



DELICATE & ACCURATE

Model F2130

程控功率电流源

用户手册

MAN-F2130-Rev02-2025

本文档包含操作和编程信息

IREFA 乐真科技

Printed in China

Edition 2, Dec., 2025

在任何情况下，如果本产品在未经北京乐真科技有限公司书面授权的情况下被拆卸、调整、更换部件或维修，北京乐真科技有限公司有权拒绝提供任何形式的保修、维修、维护或校准服务。

有限保修服务

1. 以下有限保修担保只针对在中国大陆地区销售的产品。
2. 本产品之制造商北京乐真科技有限公司对此产品及其附件自发货之日起 12 个月内实行保修。
3. 在保修期内，所有得到北京乐真科技有限公司认可返回的产品及其附件，针对产品质量问题，享受保修服务。服务内容包括维修和部件更换，不收取部件更换和维修人工费用，以及将维修后的产品重新寄至用户所需邮寄费用。
4. 在保修期内，维修后的产品或更换的部件所享受的保修期限截止至原保修期限。
5. 对于非产品质量问题，以及未按规定使用产品或其附件、或者未按正确操作指示进行操作而造成的产品故障和损毁，北京乐真科技有限公司不承担保修义务。
6. 北京乐真科技有限公司对超出保修期限的产品提供维修服务，只收取部件更换费用、必要的维修人工费用以及将维修后的产品重新寄至用户所需邮寄费用，并对维修后的产品以及更换的部件实行 90 日保修服务。


校准服务

1. 以下校准服务只针对在中国大陆地区销售的产品。
2. 本产品之制造商北京乐真科技有限公司对此产品自发货之日起提供 1 次免费校准服务。
3. 免费校准服务不收取校准费用和人工费用，以及将校准后的产品重新寄至用户所需邮寄费用。对于非强制计量产品，如果用户需要开具计量证书，则由用户承担计量所需费用。
4. 对于非免费校准服务，北京乐真科技有限公司只收取必要的校准费用和人工费用，以及将校准后的产品重新寄至用户所需邮寄费用。对于非强制计量产品，如果用户需要开具计量证书，则由用户承担计量所需费用。
5. 以上校准服务只针对无故障的产品。如果校准前发现产品存在故障问题，北京乐真科技有限公司将在征得用户许可后按照有限保修服务条款维修并收取维修费用，而后向用户提供校准服务。

关于本文档的声明

1. 本文档公开和描述的方法及装置由北京乐真科技有限公司独立资金支持并开发。不存在任何其它契约形式支持，并且不存在可能通过任何途经影响或削弱北京乐真科技有限公司知识产权的任何关系。
2. 北京乐真科技有限公司保留在不事先通知的情况下，在任何时间添加、改进、变更或收回产品功能、变更设计、变更产品或变更产品文档的权利。
3. 北京乐真科技有限公司不对本文档所含错误、或者偶然事件、或者由于产品配置、性能或由于使用本文档所造成的损失承担责任。
4. 北京乐真科技有限公司对本文档拥有版权，并保有一切权利。在未经北京乐真科技有限公司书面授权的情况下，不得对本文档的任何部分通过任何途经（包括使用电子、机械、影印、复制或其它任何途经）进行任何形式的复制、转载或传播。

注册商标声明

1.  图案及文字是北京乐真科技有限公司的注册商标。
2. 本文档所涉及的其它商标属于其各自所有者所有。

安全性总括

在所有形式的针对本产品的操作、维护、维修过程中，必须首先研读下列通用安全预防措施。违反以下通用安全预防措施或本手册中任何位置提及的特殊警告，将造成对于本产品设计、生产和使用用途所遵循的安全标准的破坏。北京乐真科技有限公司对于违反安全预防措施或本手册提及的特殊警告所造成的后果不承担责任。

安全总则

1. 本产品为“Safety Class 1”类仪器，通过保护地线端子提供安全保护。
2. 本产品的安全特性可能由于使用非本手册提供的操作方法而受到削弱或损伤。
3. 本产品使用的发光二极管 LED 均为 IEC 825-1 所规定之“Class 1 LEDs”。

环境条件

1. 本产品为室内用途产品，设计用于最大相对湿度 80%、最高海拔 2000 米的环境使用。
2. 本产品使用的交流电源规格以及运行环境温度限制请参考本手册内的技术规格。

上电之前必须检查

1. 匹配的交流电源线电压和电流规格，请务必使用随仪器配置的电源线，额定电流不足的电源线将导致电源线严重发热，并导致严重的电击事故和火灾事故。
2. 已安装正确的保险管。

仪器接地

1. 本产品为“Safety Class 1”类仪器，通过保护地线端子提供安全保护。
2. 为避免电击事故的发生，本产品的底板和机箱必须连接至电学地。
3. 本产品必须通过具有 3 根芯线的电源线连接至交流电源，其中保护地线必须牢固连接至电源插座的电学地（安全地）。
4. 任何保护地线的断开或不连接保护地线的操作将导致潜在的电击事故，并导致人身伤害。

使用正确的保险

1. 必须使用具有正确额定电压/电流和指定类型（规定烧断熔丝、时间延迟等）的保险管。
2. 禁止使用修复的保险管，禁止使用导体短路保险管座。否则将导致电击和火灾事故。

禁止在爆炸性气氛中使用

禁止将本产品暴露于可燃气体、烟雾中使用，否则将造成严重的安全事故。

远离带电电路

1. 操作者不可移除仪器封盖。
2. 必须由具有资质认证的维修人员进行内部部件的替换和调整。
3. 不可在交流电源线连通的情况下更换部件。
4. 在某些情况下，断开交流电源线后，产品表面和内部仍可能呈现危险电压。
5. 为最大程度避免人身伤害，接触仪器前应断开交流电源线、为电路完全放电并断开任何与本产品连接的外部电源供给。

切勿独自维护或调整仪器

1. 切勿在单独一人的情况下尝试本产品的内部维护或调整。
2. 进行内部维护或调整时，必须有具备提供急救和复苏能力的另一人在场。

切勿超越输入规格限制

















1. 本产品使用电源滤波器，因此必须连接至正确接地的电源插座以避免电击事故。
2. 使用超越输入规格限制的线电压或频率将导致峰值大于 5.0 毫安的漏电流。

切勿置换部件或更改仪器

1. 由于存在导致人身伤害的危险，切勿自行置换部件或对仪器进行任何非授权的改动。
2. 请将本仪器返回至北京乐真科技有限公司进行维修和维护，以保持仪器的安全性能。

损坏、损毁或有缺陷的仪器应妥善封存以避免继续使用，直至得到授权的维修后方可再次使用。

安全标志

| 标志 | 描述 | 标志 | 描述 |
|---|--|---|---|
|  | 直流 Direct Current |  | 永久安装设备的火线端子 Terminal for Line Conductor |
|  | 交流 Alternating Current |  | 永久安装设备的零线端子 Terminal for Neutral Conductor |
|  | 直流和交流 Both Direct and Alternating Current |  | 警告，电击危险 Caution, Risk of Electric Shock |
|  | 三相交流 Three-Phase Alternating Current |  | 警告（参见文档） Caution |
|  | 接地端子 Earth (Ground) Terminal |  | 警告，发热表面 Caution, Hot Surface |
|  | 保护接地端子 Protective Earth (Ground) Terminal |  | 开启（电源） On (Supply) |
|  | 机架或底板端子 Frame or Chassis Terminal |  | 关断（电源） Off (Supply) |
|  | 端子位于地电位 Terminal is at Earth Potential |  | 保险 Fuse |

生产商信息



乐真科技
乐享精良品质

北京乐真科技有限公司
REFERENCE DEVICES CORPORATION, LIMITED

地 址： 北京市朝阳区崔各庄乡草场地村 166 号一层 X16-1
电 话： 13910918693
万维网址： www.REFdevice.net
电子邮箱： shichen717@126.com

检查和开封

当您收到本产品时，请检查运输包装是否存在外部损伤，以及是否存在部件缺失。如果缺失比较明显，请尽快通知北京乐真科技有限公司。

1. 打开运输包装后，请首先依据本页装箱清单确认仪器、传感器、附件和手册是否齐全，并查找是否存在损伤。
2. 丢弃包装物之前请务必清点所有部件。
3. 如果存在仪器或部件的运输损伤，请尽快通知北京乐真科技有限公司，我们将协助您向运输商和保险公司索赔。
4. 如果存在部件缺失现象，请尽快通知我们。在中国大陆地区，自货物发送之日起 15 日后，北京乐真科技有限公司不对任何部件缺失承担责任。

| 装箱清单 | |
|--------------------------|---|
| 名 称 | 程控功率电流源 |
| 型 号 | F2130 |
| 数 量 | 1 台 |
| 序列号 | F2130000109071010 |
| 附 件 | <div> <div> CAB-AC250-102 3 芯交流 220V/10A GB1002 电源线，长度 2 米 1 条 </div> <div> CAB-232-DCE-3 RS-232C 标准 9 芯直通电缆，长度 3 米 1 条 </div> <div> CAB-USB-AB-2 USB 标准 A-B 电缆，长度 1.8 米 1 条 </div> <div> FUSE5C-25070 250V/7A 陶瓷保险管，体积 5×20 毫米 2 只 </div> <div> CD-F2130 F2130 产品信息光盘 1 张 </div> <div> <div>内含：</div> <div>MAN-F2130 电子文档 1 份</div> <div>DRV-USB232 USB 接口驱动程序 1 份</div> </div> </div> |
| 装箱： | 复查： |
| 日期： 年 月 日 | 日期： 年 月 日 |

版本历史和文档注释

| | | |
|-------|--|------------------|
| Rev01 | 文档序号 MAN-F2130-Rev01-2020 | 2020 年 07 月 28 日 |
| Rev02 | 文档序号 MAN-F2130-Rev02-2025 | 2025 年 12 月 25 日 |
| | <div><div>1. 硬件升级导致的准确度提升（1.5）、（1.7）、（3.12）。</div><div>2. 硬件升级导致的输出阻抗提高（1.5）、（1.7）、（3.15）。</div><div>3. 硬件升级导致的稳定度提升（1.5）和输出电流温度系数降低（1.7）。</div><div>4. 与设置分辨率，温度系数，稳定度和输出阻抗相关的内容对应修改。</div><div>5. 关于包装物及仪器寄回时重新包装的描述（2.2）。</div><div>6. 外观更改导致的图例变化。</div><div>7. 增加模拟输入功能（3.13）。</div><div>8. 增加指数沿时间设置（3.8.4）。</div><div>9. 增加计算机接口命令和查询（5.6）。</div><div>10. 注释和警告格式变化。</div><div>11. 修正可能的图文错误。</div><div>12. 更改联系方式。</div></div> | |

我们欢迎您关于本文档的注释。尽管我们已经尽了所有努力保持本文档文本、图示和表格内容的正确性，但仍有可能出现错误。

当您报告一个具体错误时，请对其进行简要描述，并指示出现错误的章节、图示、表格和页号。请将您的注释通过邮件或电子邮件寄至北京乐真科技有限公司，我们将对此不胜感激。

Contents

目录

| | |
|---------------------------------|------------|
| 有限保修服务..... | A |
| 校准服务..... | A |
| 关于本文档的声明..... | A |
| 注册商标声明..... | A |
| 安全性总括..... | B |
| 安全标志..... | C |
| 生产商信息..... | C |
| 检查和开封..... | D |
| 历史版本和文档注释..... | E |
| 1. 简介..... | 1-1 |
| 1.1 手册内容..... | 1-1 |
| 1.2 阅读导引..... | 1-1 |
| 1.3 交流电源选项..... | 1-1 |
| 1.4 安全要求..... | 1-1 |
| 1.5 产品特征..... | 1-2 |
| 1.6 固件版本..... | 1-3 |
| 1.7 技术性能规格..... | 1-3 |
| 1.8 校准期限..... | 1-6 |
| 1.9 重要操作事项提示..... | 1-7 |
| 2. 安装..... | 2-1 |
| 2.1 简介..... | 2-1 |
| 2.2 包装物..... | 2-1 |
| 2.3 安装方法..... | 2-1 |
| 2.3.1 桌面安装..... | 2-1 |
| 2.3.2 机柜安装..... | 2-2 |
| 2.3.3 保留安全散热间距..... | 2-4 |
| 2.3.4 避免热量耦合和电磁干扰..... | 2-4 |
| 2.4 后面板详解和电缆连接..... | 2-4 |
| 2.4.1 电源输入组件..... | 2-5 |
| 2.4.2 RS-232C 和 USB-232 接口..... | 2-6 |
| 2.4.3 功率电流输出接口..... | 2-6 |
| 2.4.4 模拟输入 BNC 接口..... | 2-8 |
| 2.4.5 触发输入 BNC 接口..... | 2-9 |
| 2.4.6 触发输出 BNC 接口..... | 2-9 |
| 2.4.7 负载保护输入 BNC 接口..... | 2-9 |
| 2.4.8 RC-Snubber 接口..... | 2-10 |
| 2.5 初始设置和开机检测..... | 2-11 |
| 2.5.1 上电之前..... | 2-11 |

| | |
|-----------------|------|
| 2.5.2 开机检测..... | 2-11 |
|-----------------|------|

| | |
|------------------------------|------------|
| 3. 操作..... | 3-1 |
| 3.1 简介..... | 3-1 |
| 3.2 前面板详解..... | 3-1 |
| 3.2.1 LCD 显示器..... | 3-2 |
| 3.2.2 LED 指示器..... | 3-4 |
| 3.2.3 键盘区..... | 3-4 |
| 3.2.4 电源开关..... | 3-4 |
| 3.3 前面板键盘定义..... | 3-5 |
| 3.4 电流响应模式..... | 3-6 |
| 3.4.1 输出电流的响应模式..... | 3-6 |
| 3.4.2 设置响应模式..... | 3-7 |
| 3.4.3 不同响应模式下的显示和功能可操作性..... | 3-7 |
| 3.5 设置输出电流..... | 3-7 |
| 3.5.1 微调输出电流..... | 3-7 |
| 3.5.2 电流设置界面..... | 3-8 |
| 3.6 输出电压范围和负载直流电阻限制..... | 3-8 |
| 3.6.1 电压钳位状态..... | 3-8 |
| 3.6.2 电压钳位指示..... | 3-9 |
| 3.6.3 负载最高直流电阻限制..... | 3-9 |
| 3.6.4 长期通电工作的负载..... | 3-9 |
| 3.7 设置输出端状态..... | 3-9 |
| 3.7.1 输出端状态和开机更换负载..... | 3-9 |
| 3.7.2 切换输出端状态..... | 3-11 |
| 3.7.3 输出端状态切换时的输出电流..... | 3-11 |
| 3.8 瞬变响应和时间常数..... | 3-11 |
| 3.8.1 输出响应模式和可选时间常数..... | 3-11 |
| 3.8.2 最高速度下的电阻负载输出响应..... | 3-11 |
| 3.8.3 最高速度下的电感负载输出响应..... | 3-12 |
| 3.8.4 设置阶跃响应时间常数..... | 3-13 |
| 3.8.5 改善电感性负载的响应过冲..... | 3-14 |
| 3.8.6 切换时间常数时的瞬态效应..... | 3-14 |
| 3.8.7 切换时间常数时的直流误差..... | 3-14 |
| 3.8.8 时间常数对带宽的限制..... | 3-14 |
| 3.8.9 F2130 的输出级..... | 3-15 |
| 3.9 线性渐变方式..... | 3-15 |
| 3.9.1 电感性负载的时间常数..... | 3-15 |
| 3.9.2 时间常数引起的过冲..... | 3-15 |
| 3.9.3 电流线性渐变输出方式..... | 3-15 |
| 3.9.4 设置电流线性渐变速率..... | 3-16 |
| 3.9.5 电流线性渐变过程中的台阶效应..... | 3-16 |
| 3.10 电流渐变中止和快速归零..... | 3-16 |
| 3.10.1 中止电流线性渐变..... | 3-16 |
| 3.10.2 电流快速归零..... | 3-17 |

| | |
|-------------------------------------|------|
| 3.11 电流扫描..... | 3-17 |
| 3.11.1 扫描模式..... | 3-17 |
| 3.11.2 扫描最大值..... | 3-18 |
| 3.11.3 扫描速率..... | 3-19 |
| 3.11.4 扫描的开始、暂停、继续和中止..... | 3-19 |
| 3.11.5 极头退磁扫描..... | 3-19 |
| 3.12 输出电流准确度、线性度、温度系数和稳定度..... | 3-20 |
| 3.12.1 额定准确度..... | 3-20 |
| 3.12.2 计算误差电流..... | 3-20 |
| 3.12.3 线性度..... | 3-20 |
| 3.12.4 温度系数..... | 3-20 |
| 3.12.5 短期稳定度..... | 3-20 |
| 3.13 模拟输入..... | 3-21 |
| 3.13.1 电学连接..... | 3-21 |
| 3.13.2 选择信号源..... | 3-21 |
| 3.13.3 输入电压钳位和容限..... | 3-21 |
| 3.13.4 瞬态特性..... | 3-21 |
| 3.13.5 误差、温度系数和稳定度..... | 3-21 |
| 3.14 噪声和纹波..... | 3-22 |
| 3.15 输出阻抗..... | 3-22 |
| 3.16 输出补偿网络和内部负载保护..... | 3-22 |
| 3.16.1 内部输出补偿网络..... | 3-22 |
| 3.16.2 变更 RC-Snubber 接口..... | 3-23 |
| 3.16.3 附加电容 C_E | 3-24 |
| 3.16.4 附加电阻 R_E | 3-25 |
| 3.16.5 调整 RC-Snubber 接口所需设备和步骤..... | 3-25 |
| 3.17 内部功率过载和处理办法..... | 3-26 |
| 3.17.1 四象限安全工作区 SOA..... | 3-26 |
| 3.17.2 内部功率过载保护..... | 3-26 |
| 3.17.3 解除保护状态..... | 3-27 |
| 3.18 常规触发输出..... | 3-28 |
| 3.18.1 常规触发输出..... | 3-28 |
| 3.18.2 设置常规触发输出方式和触发延迟时间..... | 3-28 |
| 3.18.3 常规触发输出时序..... | 3-28 |
| 3.18.4 触发输出端口..... | 3-30 |
| 3.19 扫描触发输出..... | 3-30 |
| 3.19.1 扫描触发输出..... | 3-30 |
| 3.19.2 设置扫描触发输出方式和触发时间间隔..... | 3-31 |
| 3.19.3 扫描触发输出时序..... | 3-32 |
| 3.19.4 降低测量时长差异导致的扫描测量误差..... | 3-32 |
| 3.19.5 根据仪器的测量时长正确设置触发时间间隔..... | 3-32 |
| 3.20 触发输入..... | 3-32 |
| 3.20.1 触发输入源..... | 3-32 |
| 3.20.2 外部触发..... | 3-33 |
| 3.20.3 接口触发..... | 3-35 |

| | |
|-------------------------------|------------|
| 3.20.4 键盘触发..... | 3-35 |
| 3.21 设置值存储器..... | 3-35 |
| 3.21.1 存储器结构..... | 3-35 |
| 3.21.2 选择存储器组..... | 3-35 |
| 3.21.3 触发指针返回头部..... | 3-36 |
| 3.21.4 添加设置值..... | 3-37 |
| 3.21.5 设置重复方式..... | 3-37 |
| 3.21.6 清除存储器组..... | 3-38 |
| 3.21.7 清除全部存储器..... | 3-38 |
| 3.22 振荡检测和处理..... | 3-39 |
| 3.22.1 振荡和报警..... | 3-39 |
| 3.22.2 振荡的处理..... | 3-39 |
| 3.22 外部负载保护（暂无）..... | 3-38 |
| 3.22.1 开启和关闭负载保护功能..... | 3-39 |
| 3.22.2 负载保护接口的输入端..... | 3-39 |
| 3.22.3 通过常闭型温度开关实现负载过热保护..... | 3-39 |
| 3.22.4 更复杂的负载保护方法..... | 3-40 |
| 3.23 外部负载保护..... | 3-40 |
| 3.23.1 开启和关闭负载保护功能..... | 3-40 |
| 3.23.2 负载保护接口的输入端..... | 3-40 |
| 3.23.3 通过常闭型温度开关实现负载过热保护..... | 3-40 |
| 3.23.4 更复杂的负载保护方法..... | 3-41 |
| 3.24 测量负载两端电压..... | 3-41 |
| 3.25 键盘锁..... | 3-42 |
| 3.26 设置计算机接口..... | 3-42 |
| 3.26.1 设置接口类型..... | 3-42 |
| 3.26.2 设置串行接口波特率..... | 3-43 |
| 3.26.3 安装并设置 USB-232 接口..... | 3-43 |
| 3.27 声响和显示对比度..... | 3-45 |
| 3.27.1 按键音..... | 3-45 |
| 3.27.2 渐变结束音..... | 3-46 |
| 3.27.3 显示对比度..... | 3-46 |
| 3.28 恢复出厂设置..... | 3-46 |
| 3.29 接地关系..... | 3-47 |
| 3.29.1 浮动输出..... | 3-47 |
| 3.29.1 接地关系..... | 3-48 |
| 3.30 键盘菜单结构..... | 3-48 |
| 4. 典型应用实例..... | 4-1 |
| 4.1 简介..... | 4-1 |
| 4.2 低电阻测量..... | 4-1 |
| 4.2.1 四线式测量..... | 4-1 |
| 4.2.2 消除接触电动势..... | 4-1 |
| 4.2.3 测量速度..... | 4-3 |
| 4.2.4 降低电阻发热..... | 4-4 |
| 4.3 电感性负载..... | 4-5 |

| | |
|------------------------|------------|
| 4.3.1 亥姆霍兹线圈..... | 4-5 |
| 4.3.2 螺线管和电磁铁..... | 4-5 |
| 4.3.3 过冲和振铃..... | 4-5 |
| 4.3.4 无过冲沿响应..... | 4-7 |
| 4.3.5 方波磁场..... | 4-8 |
| 4.3.6 正弦波和三角波磁场..... | 4-9 |
| 4.3.7 电磁振动元件..... | 4-11 |
| 4.4 PN 结负载..... | 4-11 |
| 4.4.1 静电保护和防冲击保护..... | 4-11 |
| 4.4.2 极性保护..... | 4-11 |
| 4.4.3 串联电阻保护..... | 4-12 |
| 4.4.4 LED 老化寿命试验..... | 4-12 |
| 4.5 电解液..... | 4-12 |
| 5. 计算机接口..... | 5-1 |
| 5.1 简介..... | 5-1 |
| 5.1 计算机接口选择..... | 5-1 |
| 5.2.1 接口构成..... | 5-1 |
| 5.2.2 选择接口和设置波特率..... | 5-1 |
| 5.3 RS-232C 接口概述..... | 5-1 |
| 5.3.1 物理连接..... | 5-2 |
| 5.3.2 硬件支持..... | 5-3 |
| 5.3.3 传输格式..... | 5-3 |
| 5.4 USB-232 接口概述..... | 5-3 |
| 5.5 接口命令语法和软件控制机制..... | 5-3 |
| 5.5.1 消息字符串..... | 5-3 |
| 5.5.2 数据格式..... | 5-4 |
| 5.5.3 应答机制..... | 5-4 |
| 5.5.4 消息流控制..... | 5-4 |
| 5.5.5 接收缓存..... | 5-5 |
| 5.5.6 通讯故障诊断..... | 5-5 |
| 5.6 接口命令和查询详解..... | 5-5 |
| 5.6.1 接口命令和查询集..... | 5-5 |
| 5.6.2 通用接口命令..... | 5-7 |
| *RST..... | 5-7 |
| 5.6.3 通用接口查询..... | 5-7 |
| *IDN?..... | 5-7 |
| 5.6.4 设备特殊命令..... | 5-7 |
| ASOURCE..... | 5-7 |
| CUR..... | 5-8 |
| CURFD..... | 5-8 |
| CURFUP..... | 5-9 |
| CURFDOWN..... | 5-9 |
| FAST0..... | 5-9 |
| KEYVOICE..... | 5-9 |
| LOCK..... | 5-10 |

| | |
|--------------------|------|
| LOADP..... | 5-10 |
| MEMADD..... | 5-10 |
| MEMADDVALUE..... | 5-10 |
| MEMHEAD..... | 5-11 |
| MEMREPEAT..... | 5-11 |
| MEMGROUP..... | 5-11 |
| MEMCLEARGROUP..... | 5-11 |
| MEMCLEAR..... | 5-12 |
| NTRIG..... | 5-12 |
| NTRIGD..... | 5-12 |
| OUT..... | 5-12 |
| OVLDRST..... | 5-13 |
| PN..... | 5-13 |
| RESPONSE..... | 5-13 |
| RATE..... | 5-14 |
| RAMPAUDIO..... | 5-14 |
| STOP..... | 5-14 |
| SWEEP..... | 5-14 |
| SWABORT..... | 5-15 |
| SWCONT..... | 5-15 |
| SWPAUSE..... | 5-15 |
| SWMODE..... | 5-15 |
| SWMAX..... | 5-16 |
| SWTRIG..... | 5-16 |
| SWTRIGINT..... | 5-16 |
| TRIGGER..... | 5-17 |
| TRIGIN..... | 5-17 |
| 5.6.5 设备特殊查询..... | 5-17 |
| ASOURCE?..... | 5-17 |
| CUR?..... | 5-17 |
| CURFD?..... | 5-17 |
| CMPLS?..... | 5-18 |
| DIR?..... | 5-18 |
| KEYVOICE?..... | 5-18 |
| LOCK?..... | 5-19 |
| LOADP? | 5-19 |
| LOADPS?..... | 5-19 |
| MEMGROUP?..... | 5-19 |
| MEMREPEAT?..... | 5-19 |
| MEMLen?..... | 5-20 |
| NTRIG?..... | 5-20 |
| NTRIGD?..... | 5-20 |
| OUT?..... | 5-20 |
| OVLDS?..... | 5-21 |
| OSC?..... | 5-21 |

| | |
|---------------------------------|------------|
| OSCWARNING? | 5-21 |
| RESPONSE? | 5-21 |
| RATE? | 5-21 |
| RAMPAUDIO? | 5-22 |
| SWEEP? | 5-22 |
| SWMODE? | 5-22 |
| SWMAX? | 5-22 |
| SWTRIG? | 5-23 |
| SWTRIGINT? | 5-23 |
| TRIGIN? | 5-23 |
| 6. 附件 | 6-1 |
| 6.1 简介 | 6-1 |
| 6.2 附件 | 6-1 |
| 6.2.1 交流电源线 CAB-AC250-102 | 6-1 |
| 6.2.2 通讯电缆 CAB-232-DCE-3 | 6-1 |
| 6.2.3 通讯电缆 CAB-USB-AB-2 | 6-2 |
| 6.2.4 转换器 CONV-232-9-26 | 6-2 |
| 6.2.5 其它附件 | 6-2 |
| 附录 | A-1 |
| A.1 磁学单位换算 | A-1 |
| A.2 常用物理量 | A-2 |
| A.3 前缀表示法 | A-3 |
| A.4 希腊字母 | A-3 |
| A.5 美制线规对照表 | A-3 |
| A.6 ASCII 编码 | A-4 |

Figures

图示

| | |
|--|-----|
| 图 1-1 由序列号中读出 F2130 的固件版本 | 1-3 |
| 图 1-2 F2130 的标准显示界面 | 1-6 |
| 图 2-1 运输时需粘贴的保护标志 | 2-1 |
| 图 2-2 拆卸机箱支脚 | 2-2 |
| 图 2-3 在 F2130 两侧安装 RM03 附件 | 2-3 |
| 图 2-4 F2130 与机柜的连接安装方法 | 2-3 |
| 图 2-5 F2130 的安全散热间距 | 2-4 |
| 图 2-6 F2130 后面板详解 | 2-5 |
| 图 2-7 电源输入组件和交流电源线插头 | 2-5 |
| 图 2-8 计算机接口连接器以及使用 USB 电缆连接 F2130 和计算机 | 2-7 |
| 图 2-9 功率电流输出 2 芯接线柱和安全接地端子 | 2-7 |

| | |
|---|------|
| 图 2-10 模拟输入 BNC 接口..... | 2-8 |
| 图 2-11 触发输入 BNC 接口..... | 2-9 |
| 图 2-12 触发输出 BNC 接口..... | 2-9 |
| 图 2-13 外部负载保护输入 BNC 接口..... | 2-10 |
| 图 2-14 RC-Snubber 接口..... | 2-10 |
| 图 2-15 F2130 的开机启动画面..... | 2-11 |
| 图 2-16 F2130 的开机检测界面..... | 2-12 |
| 图 2-17 F2130 的标准显示界面..... | 2-12 |
| | |
| 图 3-1 F2130 前面板详解..... | 3-2 |
| 图 3-2 瞬变响应模式下的显示器功能区域划分..... | 3-2 |
| 图 3-3 渐变响应模式下的显示器功能区域划分..... | 3-3 |
| 图 3-4 F2130 的 LED 指示器..... | 3-4 |
| 图 3-5 F2130 的键盘分区..... | 3-4 |
| 图 3-6 电源开关的开、关位置状态..... | 3-5 |
| 图 3-7 不同响应模式下的输出电流响应..... | 3-6 |
| 图 3-8 负载最高直流电阻限制..... | 3-9 |
| 图 3-9 输出端状态切换时的输出电流..... | 3-10 |
| 图 3-10 电阻负载的输出响应..... | 3-11 |
| 图 3-11 电感负载的输出响应..... | 3-12 |
| 图 3-12 硬件 RC 电路实现可选的时间常数..... | 3-13 |
| 图 3-13 电流线性渐变过程中的台阶效应..... | 3-16 |
| 图 3-14 F2130 的四种扫描模式..... | 3-18 |
| 图 3-15 有限输出阻抗 R_{OUT} 造成的分流误差..... | 3-22 |
| 图 3-16 F2130 的内部输出补偿网络..... | 3-23 |
| 图 3-17 RC-Snubber 接口与内部补偿网络的连接关系..... | 3-24 |
| 图 3-18 四象限安全工作区 SOA..... | 3-27 |
| 图 3-19 内部功率过载保护下 F2130 的显示信息..... | 3-27 |
| 图 3-20 常规触发输出时序..... | 3-29 |
| 图 3-21 触发输出 BNC 接口..... | 3-29 |
| 图 3-22 通讯延迟造成的测量时差 Δt | 3-30 |
| 图 3-23 SWB 模式下的扫描触发输出时序..... | 3-31 |
| 图 3-24 外部触发输入的处理时序..... | 3-34 |
| 图 3-25 外部触发输入端口..... | 3-34 |
| 图 3-26 设置值存储器结构和触发指针（选择 G0）..... | 3-36 |
| 图 3-27 向当前存储器组 Gx 添加设置值..... | 3-37 |
| 图 3-28 循环 LOOP 重复方式..... | 3-38 |
| 图 3-29 负载保护接口的输入端..... | 3-40 |
| 图 3-30 使用常闭型温度开关实现负载过热保护..... | 3-41 |
| 图 3-31 二线式连接方式造成测量误差..... | 3-42 |
| 图 3-32 四线式连接方式避免测量误差..... | 3-42 |
| 图 3-33 F2130 的计算机接口系统..... | 3-43 |
| 图 3-34 设备管理器中的 RS-232C/USB 转换器设备..... | 3-44 |
| 图 3-35 USB Serial Port (COMn) 属性窗口..... | 3-44 |
| 图 3-36 修改 RS-232C/USB 转换器的端口号..... | 3-45 |

| | |
|---|------|
| 图 3-37 恢复出厂设置..... | 3-46 |
| 图 3-38 同时接地产生的地线环路..... | 3-47 |
| 图 3-39 F2130 的接地关系..... | 3-48 |
| 图 3-39 F2130 键盘菜单结构图（设置输出电流）..... | 3-49 |
| 图 3-40 F2130 键盘菜单结构图（主菜单）..... | 3-50 |
| 图 3-41 F2130 键盘菜单结构图（触发输入、触发输出和设置值存储器）..... | 3-51 |
| | |
| 图 4-1 四线式连接方式中的接触热电动势..... | 4-1 |
| 图 4-2 四线式半差分电流测量电阻..... | 4-2 |
| 图 4-3 四线式全差分电流测量电阻..... | 4-2 |
| 图 4-4 使用触发输入/输出进行快速测量..... | 4-3 |
| 图 4-5 四线式全差分电流三步补偿法测量电阻..... | 4-4 |
| 图 4-6 线性步进改善电感性负载的输出电流过冲..... | 4-6 |
| 图 4-7 指数步进消除电感性负载的输出电流过冲..... | 4-6 |
| 图 4-8 指数步进的点密度和触发频率对响应的影响..... | 4-8 |
| 图 4-9 阶梯构成的正弦波 $N=50$ | 4-9 |
| 图 4-10 PN 结负载的极性保护电路..... | 4-11 |
| | |
| 图 5-1 常用 DCE 设置 9 针连接器引线序列..... | 5-2 |
| | |
| 图 6-1 交流电源线 CAB-AC250-102..... | 6-1 |
| 图 6-2 通讯电缆 CAB-232-DCE-3..... | 6-2 |
| 图 6-3 通讯电缆 CAB-USB-AB-2..... | 6-2 |

Tables

表格

| | |
|---------------------------|------|
| 表 1-1 手册其它章节内容..... | 1-1 |
| 表 1-2 技术性能规格..... | 1-3 |
| 表 1-3 补充技术性能规格..... | 1-5 |
| | |
| 表 3-1 典型输出电流下的误差..... | 3-20 |
| 表 3-2 恢复出厂设置值..... | 3-47 |
| | |
| 表 4-1 正弦波波表 $N=100$ | 4-10 |
| | |
| 表 5-1 接口命令和查询集..... | 5-5 |
| | |
| 表 6-1 F2130 附件清单..... | 6-1 |

表 A-1 标准国际单位制 (SI) 和厘米-克-秒制 (cgs) 磁学单位换算..... A-1

表 A-2 标准国际单位制 (SI) 物理常数..... A-2

表 A-3 标准国际单位制 (SI) 前缀..... A-3

表 A-4 希腊字母表..... A-3

表 A-5 美制线规 AWG (American Wire Gage) 对照表..... A-3

表 A-6 ASCII 编码表..... A-4

简介

1.1 手册内容

本章包含 F2130 程控功率电流源的技术性能规格，以及电源选项和安全信息。本手册其它章节包含产品的安装方法、操作方法、计算机接口功能、附件和校准方法，列于表 1-1：

表 1-1 手册其它章节内容 TAB-MAN-F2130-0001

| 章节序号 | 内容简介 | 页 数 |
|-------|---------------------------|-----|
| 第 2 章 | 仪器的安装方法和后面板接线。 | 12 |
| 第 3 章 | 仪器操作方法和操作中需注意的细节。 | 52 |
| 第 4 章 | 典型应用实例的详细描述。 | 12 |
| 第 5 章 | 计算机接口的描述、操作方法、接口命令集和编程示例。 | 24 |
| 第 6 章 | 附件信息，仪器各接口的物理尺寸和电学定义。 | 2 |

1.2 阅读导引

如果您初次接触 F2130 程控功率电流源，请首先阅读第 2 章，熟悉仪器的安装方法并正确连接后面板各类电缆。而后请着重阅读第 3 章，掌握 F2130 的各项操作方法。第 4 章提供高级应用的典型示例。需要编程的用户请阅读第 5 章，提供针对 F2130 编程的细节，协助用户进行计算机语言编写。第 6 章为 F2130 各项附件的详细信息，以及仪器各物理接口的规格和电学定义。

本文档中，均以文字格式 **OUTPUT** 和 **OUT** 分别着重表示键盘和计算机接口命令/查询。并在重要位置以文字格式 **AAAAA** 着重标示。对于需要特别注意的内容和事项，以 **注** 单独标示。对于必须严格遵守的原则、规定和事项，以 **警告** 单独醒目标示，并于警告条目中使用 **AAAAA** 着重标示必须遵守的规定。

1.3 交流电源选项

在中国大陆地区销售的本产品，出厂时交流电源规格均设置为：

交流 220 伏特，50-60 赫兹
AC220V, 50-60Hz

1.4 安全要求

本产品为“Safety Class 1”类仪器，即通过“保护地线端子”提供安全保护。此保护地线端子必须牢固连接至配置接地端的三芯交流电源插座的接地端上，并且电源插座的接地端与大地良好连通。

请仔细阅读并遵守本手册前述“安全性总括”中的各项通用安全规定。特殊的安全信息位于本手册中需提示用户注意的相应位置。

1.5 产品特征

本产品具有以下特征：

► 输出电流、电压和功率

- 输出范围 -10A — $+10\text{A}$ DC
- 高步进分辨率 0.01mA ($1/1000,000$ F.S.) ——为精细磁场控制提供足够解析度
- 准确度 $\pm(0.03\%$ 设置值 $+0.3\text{mA})$ 、稳定度优于 $30\text{ppm}@10\text{A}$ ——高精度励磁驱动
- 噪声/纹波: $<0.3\text{mA}$ RMS (0 — 10kHz) 典型值 @ 10A
- 浮动输出 ——灵活配置参考电位, 降低地线环路干扰
- 有效输出电压范围 $\pm 60\text{V}$ DC、开路输出电压: 65V
- 最大输出功率 600W ——适于驱动亥姆霍兹线圈、空心螺线管和小型电磁铁

► 双极性输出

- 真双极性推挽输出级 ——高速且速度一致的上升沿和下降沿
- 电流平滑过零 ——无换向电流冲击, 完全避免继电器换向导致的瞬间共模电压串扰
- 四象限输出和吸收能力 ——快速吸收电感性负载反向电动势

► 负载适应性

- 满幅输出负载直流电阻范围 0 — 6Ω ——支持宽广的负载直流电阻范围
- 直流输出阻抗 $>2.8\text{M}\Omega$ ——低负载效应, 适应大范围变化的负载
- 可外部配置的输出补偿网络 ——针对特定负载达到最佳响应
- 可选的电流瞬变方式 ——电阻负载时沿时间小于 $100\mu\text{s}$ (-10A — $+10\text{A}$, 10% — 90%)
- 可设置的阶跃响应时间常数 ——对不同负载提供可控的瞬态响应
- 可选的线性渐变方式 ——电感性负载时避免电流过冲造成的磁场尖峰
- 电流线性渐变速率 0.01A/s — 10.00A/s ——根据电感性负载时间常数灵活调整

► 大功率电压电流转换器 (跨导放大器)

- 提供模拟输入端子 ——外部输入电压 $\pm 5\text{V}$ 控制输出电流 $\pm 10\text{A}$
- 标准带宽 ——默认输出补偿网络时电阻负载 -3dB 带宽大于 10kHz (20Ap-p)
- 更高带宽 ——合理配置输出补偿网络时电阻负载 -3dB 带宽大于 30kHz (20Ap-p)
- 输入信号钳位保护 $\pm 5.5\text{V}$ ——防止外部信号对输入级的损伤

► 负载保护

- 可控的输出端状态 ——支持开机更换负载
- 内部过功率保护 ——硬件电路保护电源安全

► 扫描功能

- I、I-III、I-III-I 象限和极头退磁四种扫描模式 ——适应大多数磁学扫描类型
- 线性扫描速率范围 0.01A/s — 10A/s 、最大扫描电流设置范围 0.01mA — 10A DC

► 自动控制

- 标准配备 RS-232C 计算机接口和易用的接口特性 ——适用于自动化测量
- 标准配备内部 USB—RS-232C 转换接口 ——提高计算机串行端口容量
- 完备的计算机接口命令集 ——通过程控完全操作各项功能
- 可选的触发输入源, 键盘触发、接口触发或外部同步触发
- 由触发输入控制的 3 组存储深度均为 1024 个设置值的非易失性存储器
- 触发输出同步功能 ——确保测量实时性, 适用于系统应用
- 扫描过程中的定时连续触发输出功能 ——便于进行与扫描相关的同步测量

- ▶ 交互能力
 - 白色背光 FSTN LCD 显示器——任何灯光条件下均清晰可读
 - 必备的 LED 状态指示器
 - 与显示器和指示器配合的 3×5 键交互型功能键盘操作
- ▶ 标准规格
 - 提供用户手册
 - 标准全宽 3U 台式仪器，交流 220V/50Hz 供电 ——适于台式或机柜应用

1.6 固件版本

本产品的固件版本可通过接口命令 `*IDN?[CR]` 返回的 17 位产品序列号读出，如图 1-1 所示，也可于开机检测或恢复出厂设置时于显示器中显示。

图 1-1 由序列号中读出 F2130 的固件版本

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| F | 2 | 1 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 9 | 0 | 7 | 1 | 0 | 4 | 0 |
| Firmware Version: 4.0 | | | | | | | | | | | | | | | | |

FIG-MAN-F2130-0001

1.7 技术性能规格

表 1-2 为 F2130 程控功率电流源的技术性能规格，其中各项于 25℃±10℃ 温度范围内均为可保证指标。

表 1-2 技术性能规格

TAB-MAN-F2130-0002

| 技术指标 | 符号 | 单位 | 测试条件 | 最小值 | 典型值 | 最大值 |
|------------------------------------|-------|-----|--------------------|-------------------|------|------|
| 输入 | | | | | | |
| 交流电源电压 RMS | Vac | V | Fac=50Hz | 209 | 220 | 231 |
| 交流电源频率 | Fac | Hz | Vac=220V | 48 | 50 | 60 |
| 视在功率 | Papp | VA | 220V/50Hz | --- | 650 | 750 |
| 温度和湿度 | | | | | | |
| 使用温度 ^[1] | Tamb | ℃ | 额定准确度 | 15 | 25 | 35 |
| 存储温度 | Tst | ℃ | 受 LCD 显示器限制 | 0 | --- | 55 |
| 相对湿度 | Hamb | % | Tamb=31℃ | --- | --- | 80 |
| 直流电流输出 | | | | | | |
| 输出范围 | IRng | A | --- | -10 | --- | 10 |
| 步进分辨率 | IRes | mA | --- | --- | 0.01 | --- |
| 有效分辨率 | IresE | mA | --- | --- | 0.01 | 0.03 |
| 准确度 | AI | --- | Tamb=15℃-35℃ | ±(0.03%设置值+0.3mA) | | |
| 噪声/纹波 RMS Iout=±10A | NRrms | mA | 0—10kHz 1Ω 电阻负载 | --- | 0.3 | 1 |
| 噪声/纹波 Ip-p Iout=±10A 1Ω 电阻负载 | NRp-p | mA | 0—10kHz | --- | 2 | 7 |
| | | | 0.1PLC | --- | 0.5 | 1 |
| | | | 1PLC | --- | 0.1 | 0.2 |

表 1-2 技术性能规格 (续)

TAB-MAN-F2130-0002

| 技术指标 | 符号 | 单位 | 测试条件 | 最小值 | 典型值 | 最大值 |
|--|------|-------|-------------------|--------------------|-----|------|
| 直流电流输出 | | | | | | |
| 短期稳定度 | STI | ppm/h | Tamb=23℃，充分预热 | --- | 10 | 30 |
| 温度系数 | IdT | ppm/℃ | Tamb=15℃-35℃ | --- | ±2 | ±5 |
| 线性度 | LI | % | --- | < 最大值（10A）的±0.005% | | |
| 输出阻抗 | RIO | MΩ | 直流 | 2.8 | --- | --- |
| 电源调整率 | PSRR | % | 额定交流输入范围 | --- | --- | 0.01 |
| 电流线性渐变速率 | IRR | A/s | 电流渐变模式 | 0.01 | --- | 10 |
| 输出阻断态漏电流 | IOFF | mA | RL<500Ω | --- | --- | 0.1 |
| 灌入电压容限 | VINT | V | RL=∞ | -60 | --- | 60 |
| 输出电流动态性能 | | | | | | |
| 上升时间 电流瞬变模式 FASTEST 1Ω电阻负载 10%—90% RC-Snubber 为 出厂设置 | TIR | μs | 0—+10A | --- | 67 | --- |
| | | | 0—+1A | --- | 68 | --- |
| | | | 0—+0.1A | --- | 110 | --- |
| | | | -10A—0 | --- | 69 | --- |
| | | | -1A—0 | --- | 79 | --- |
| | | | -0.1A—0 | --- | 116 | --- |
| | | | -10A—+10A | --- | 63 | --- |
| | | | -1A—+1A | --- | 65 | --- |
| -0.1A—+0.1A | --- | 122 | --- | | | |
| 下降时间 FASTEST 电流瞬变模式 1Ω电阻负载 90%—10% RC-Snubber 为 出厂设置 | TIF | μs | +10A—0 | --- | 66 | --- |
| | | | +1A—0 | --- | 82 | --- |
| | | | +0.1A—0 | --- | 126 | --- |
| | | | 0—-10A | --- | 72 | --- |
| | | | 0—-1A | --- | 74 | --- |
| | | | 0—-0.1A | --- | 107 | --- |
| | | | +10A—-10A | --- | 62 | --- |
| | | | +1A—-1A | --- | 67 | --- |
| +0.1A—-0.1A | --- | 112 | --- | | | |
| 阶跃响应时间常数 | EET | ms | 键盘或计算机接口设置 | 0.1 | --- | 50 |
| 电压-电流转换器 | | | | | | |
| 输入信号电压范围 | SRng | V | 对应 Iout=±10A | -5 | --- | 5 |
| 跨导 | STrc | A/V | 准确度±2% | --- | 2 | --- |
| 输入信号电压钳位 | SCpl | V | --- | -5.5 | --- | 5.5 |
| 输入信号电压容限 | Smax | V | --- | -20 | --- | 20 |
| 输出电压 | | | | | | |
| 有效输出范围 | VRng | V | Iout=±10A | -60 | --- | 60 |
| 开路输出电压 | Voc | ±V | RL=∞ | 62 | 65 | 70 |
| 输出功率 | | | | | | |
| 最大输出功率 | POM | W | RLDC=6Ω, Iout=10A | --- | --- | 600 |

表 1-2 技术性能规格（续）

TAB-MAN-F2130-0002

| 技术指标 | 符号 | 单位 | 测试条件 | 最小值 | 典型值 | 最大值 |
|---------------------|----------|-------------|----------------------|---------|-----|-----|
| 负载适应性 | | | | | | |
| 直流电阻 | RLDC | Ω | $I_{out}=\pm 10A$ DC | 0 | --- | 6 |
| 时间常数 | τ_L | H/ Ω | $1H/\Omega=1s$ | 0 | 1 | 2 |
| 电流扫描 | | | | | | |
| 电流扫描速率 | ISRR | A/s | --- | 0.01 | --- | 10 |
| 扫描最大电流 | ISMAX | A | 四种扫描模式 | 0.00001 | --- | 10 |
| 预热 | | | | | | |
| 预热时间 ^[2] | Twm | min | Tamb=23℃ | 5 | 30 | --- |
| 物理参数 | | | | | | |
| 宽度 | W | mm | --- | --- | 434 | 436 |
| 高度 | H | mm | 不含脚钉 | --- | 132 | 133 |
| 深度 ^[3] | D | mm | 不含突出部件 | --- | 610 | 615 |
| 质量 | Wgt | kg | 不含附件和包装物 | --- | 25 | 30 |
| 运输全重 | Ws | kg | 标准配置 | --- | 36 | 40 |

注

- [1] 环境温度为 15—35℃ 范围内达到额定准确度, 5—40℃ 范围内准确度下降。
[2] 每次开机上电后, 至少预热 5 分钟。至少预热 30 分钟后达到额定准确度。
[3] 突出部件可能包括: 连接器、散热器和尼龙撑垫。
[4] 1PLC 相当于采样周期为 20ms, 0.1PLC 相当于采样周期为 2ms。

表 1-3 为 F2130 程控功率电流源的补充技术性能规格。

表 1-3 补充技术性能规格

TAB-MAN-F2130-0003

| 技术指标 | 描述 | 备注 |
|------------------------|--------------------------|--------------------|
| RS-232C 计算机接口 | | |
| 连接器 | 标准 9 针 D-Sub 型插座 (DB9) | Female |
| 波特率 | 9600、19200、38400、57600 | bps |
| 内置 RS-232C 转 USB 计算机接口 | | |
| 连接器 | USB Standard-B Socket | 兼容 USB1.1 规范 |
| 波特率 | 9600、19200、38400、57600 | bps |
| 显示、键盘和声响 | | |
| 显示器 | 128×64 图形点阵白色背光 FSTN LCD | 65mm×37.5mm |
| 对比度 | 0—63 可选 | 默认为 32 |
| 键盘 | 15 键功能键盘 | 双色 |
| 键盘音、渐变结束音 | 可关闭 | 默认开启 |
| 触发输入 | | |
| 触发方式 | OFF、外部同步触发、接口命令触发、键盘触发 | 开机时为 OFF |
| 触发输入频率 | 最高 6.5kHz | 常规触发输出关闭 |
| 外部触发电平 | TTL 兼容、下降沿有效、内部上拉 | 内部 470 Ω 限流 |
| 设置值存储器 | 3 组、每组存储深度 1024 设置值 | 非易失性 |
| 耐压容限 | -15VDC—+15VDC | --- |

表 1-3 补充技术性能规格（续）

TAB-MAN-F2130-0003

| 技术指标 | 描述 | 备注 |
|----------|-------------------|-----------|
| 常规触发输出 | | |
| 触发方式 | OFF、ON、ON+♪ | ♪为声响提示 |
| 触发输出延迟时间 | 0—10.000s，步进 1ms | 默认为 0 |
| 触发输出连接器 | 2 路同步标准 BNC 插座 | 与扫描触发输出共用 |
| 外部触发电平 | TTL 兼容、下降沿有效 | 内部 470Ω限流 |
| 耐压容限 | -15VDC—+15VDC | --- |
| 扫描触发输出 | | |
| 触发方式 | OFF、ON、ON+♪ | ♪为声响提示 |
| 触发输出间隔时间 | 0.1—10.0s，步进 0.1s | 默认为 1s |
| 触发输出连接器 | 4 路同步标准 BNC 插座 | 与常规触发输出共用 |
| 外部触发电平 | TTL 兼容、下降沿有效 | 内部 470Ω限流 |
| 耐压容限 | -15VDC—+15VDC | --- |
| 模拟输入 | | |
| 连接器 | 标准 BNC 插座 | --- |
| 跨导 | 2A/V | 钳位电压±5.5V |
| 耐压容限 | -20VDC—+20VDC | --- |
| 负载保护 | | |
| 连接器 | 标准 BNC 插座 | 常闭温度开关 |
| 耐压容限 | -15VDC—+15VDC | --- |
| 电流输出连接器 | | |
| 连接器 | 2 芯多用途接线柱，接地接线柱 | --- |
| 电流容量 | >20A | 冷压接线片连接 |
| | >10A | 香蕉插头连接 |

图 1-2 为 F2130 程控功率电流源首次开机后的标准显示界面。

图 1-2 F2130 的标准显示界面

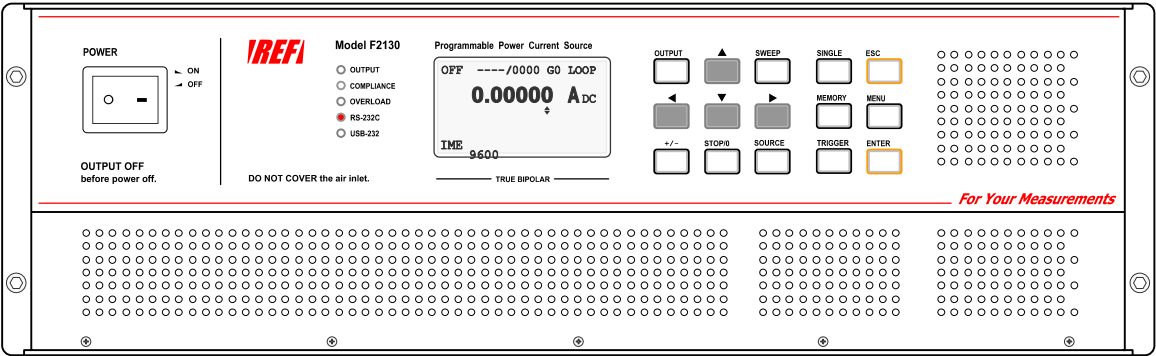


FIG-MAN-F2130-0002

1.8 校准期限

F2130 的校准期限为 1 年。

F2130 于出厂时进行校准，并保证由出厂之日起 2 年内仪器各项性能完全符合表 1-2 所述指

标。到达校准期限时，用户可将 F2130 仪器本体寄回北京乐真科技有限公司进行校准。

对于新购产品，北京乐真科技有限公司提供 1 次免费校准服务。对于其后的校准，服务条款请参阅 A 页内容。

将产品寄回乐真科技时，请参阅 2.2 中的内容进行包装和运输，并于包装箱外表面明显位置粘贴图 2-1 所示保护标志，以尽量避免仪器在运输过程中可能受到的损伤。如果可能，请尽量于仪器寄出前通过电话或电子邮件与我们联系，确认校准事宜。

1.9 重要操作事项提要

交流电源

- | | | |
|----|------------|-----------------------------|
| 1. | 正确的交流输入线电压 | ——2.4.1 (2-5)、2.5.1 (2-9) |
| 2. | 正确的交流输入频率 | ——2.4.1 (2-6) |
| 3. | 可靠接地 | ——2.4.1 (2-6)、3.29.2 (3-49) |
| 4. | 更换保险 | ——2.4.1 (2-6) |
| 5. | 使用正确的保险 | ——2.4.1 (2-6)、2.5.1 (2-9) |

后面板操作

- | | | |
|-----|----------------------|------------------------------|
| 1. | 不可带电操作 RS-232C 电缆 | ——2.4.2 (2-7)、5.2.2 (5-1) |
| 2. | 不可带电进行后面板连接 | ——2.5.1 (2-9) |
| 3. | 使用足够电流容量的输出电缆 | ——2.4.3 (2-7) |
| 4. | 避免使用电流容量不足的香蕉插头 | ——2.4.3 (2-8) |
| 5. | 不可在正常输出状态下开机操作负载 | ——2.4.3 (2-8)、3.7.1 (3-9) |
| 6. | 关机后变更 RC-Snubber 接口 | ——2.4.6 (2-10)、3.16.2 (3-23) |
| 7. | RC-Snubber 接口不可作为输出端 | ——3.16.2 (3-23) |
| 8. | 选择正确的附加电容 C_E | ——3.16.3 (3-24) |
| 9. | 安全安装附加电容 C_E | ——3.16.3 (3-24) |
| 10. | 选择正确的附加电阻 R_E | ——3.16.4 (3-25) |

仪器操作

- | | | |
|----|----------------------|-----------------|
| 1. | 适度调整 RC-Snubber 接口元件 | ——3.16.5 (3-25) |
| 2. | 不可超出输出端浮动耐压容限 | ——3.29.1 (3-47) |

触发输入和输出

- | | | |
|----|--------------|--|
| 1. | 可耐受的最大输入电平限制 | ——3.18.4 (3-30)、3.20.2 (3-33) ——3.13.3 (3-21) |
|----|--------------|--|

运输和安装

- | | | |
|----|-----------------|---------------------|
| 1. | 粘贴保护标志 | ——2.2 (2-1) |
| 2. | 避免单人拆封和取出仪器 | ——2.3.1 (2-1) |
| 3. | 拆除橡胶底脚时避免单人倒置仪器 | ——2.3.2 (2-2) (2-3) |
| 4. | 保留安全散热间距 | ——2.3.3 (2-4) |
| 5. | 避免热量耦合和电磁干扰 | ——2.3.4 (2-4) |

<本页为空页>
This Page Intentionally Left Blank

安 装

2.1 简介

本章包含 F2130 程控功率电流源的安装方法和后面板接线方法。其中 2.2 为包装物，2.3 为仪器的安装方法，2.4 为后面板详解和电缆连接，2.5 为初始设置和系统检测流程。

2.2 包装物

产品开封并检查确认后，请妥善保存纸板箱、内部填充物和包裹保护袋。

将 F2130 仪器及其附件等部件返回北京乐真科技有限公司进行校准、维护、维修或更换时，请将仪器使用保护袋包裹，并使用原厂填充物保护，重新包装于原厂木箱内，使用足够数量的自攻螺钉将木箱盖板封好，并于木箱外表面明显处粘贴运输标签和图 2-1 所示“易碎物”、“向上”及“怕雨”等保护标志。

图 2-1 运输时需粘贴的保护标志

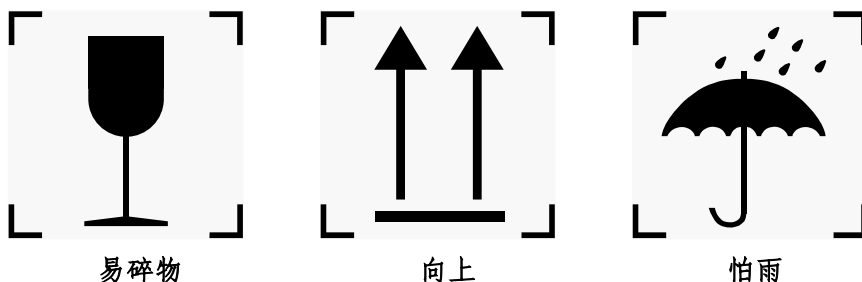


FIG-MAN-F2130-0003

2.3 安装方法

F2130 为标准 19 英寸全宽 3U 台式仪器，尺寸为 W×H×D=434mm×132mm×610mm，可置于桌面使用，也可用于机柜安装。

2.3.1 桌面安装

F2130 机箱底板配置 4 只橡胶底脚以支撑仪器的全部重量。F2130 的总质量超出 25kg，因此桌面及其支撑结构必须可承受至少 50kg 重量。置于桌面使用时，请务必保证桌面水平，并且机箱 4 只橡胶底脚均须与桌面牢靠接触。请尽量将 F2130 置于桌面中心，以防桌面和仪器由于重心偏移发生翻覆，从而保证操作者的人身安全，以及仪器的妥善放置。

警告

仪器总质量较大，将仪器由包装中移至桌面的过程中请务必小心操作，以保证操作者的人身安全。如果可能，请尽量保证在至少 2 人在场的情况下完成此操作。

2.3.2 机柜安装

机柜安装时，可视安装便利保留或拆除机箱底板配置的橡胶底脚。拆卸底脚时，请遵循以下步骤，如图 2-2 所示：

- ❶ 使用适用的螺丝刀旋出后面板上临近底板的 2 只尼龙撑垫的 M4 固定螺钉；
- ❷ 取下尼龙撑垫；
- ❸ 倒置机箱使底板向上；

警告

仪器总质量较大，倒置仪器机箱的过程中请务必小心操作，以保证操作者的人身安全。请务必保证在至少 2 人在场的情况下完成此操作。

- ❹ 水平抽出机箱底板；
- ❺ 使用适用的螺丝刀配合内六角套筒拆卸固定橡胶底脚的 M3 螺钉和螺母，并取下全部 4 只橡胶底脚；
- ❻ 还原安装机箱底板；
- ❼ 使用 M4 螺钉紧固安装尼龙撑垫。
- ❽ 倒置机箱使顶板向上；

图 2-2 拆卸机箱支脚

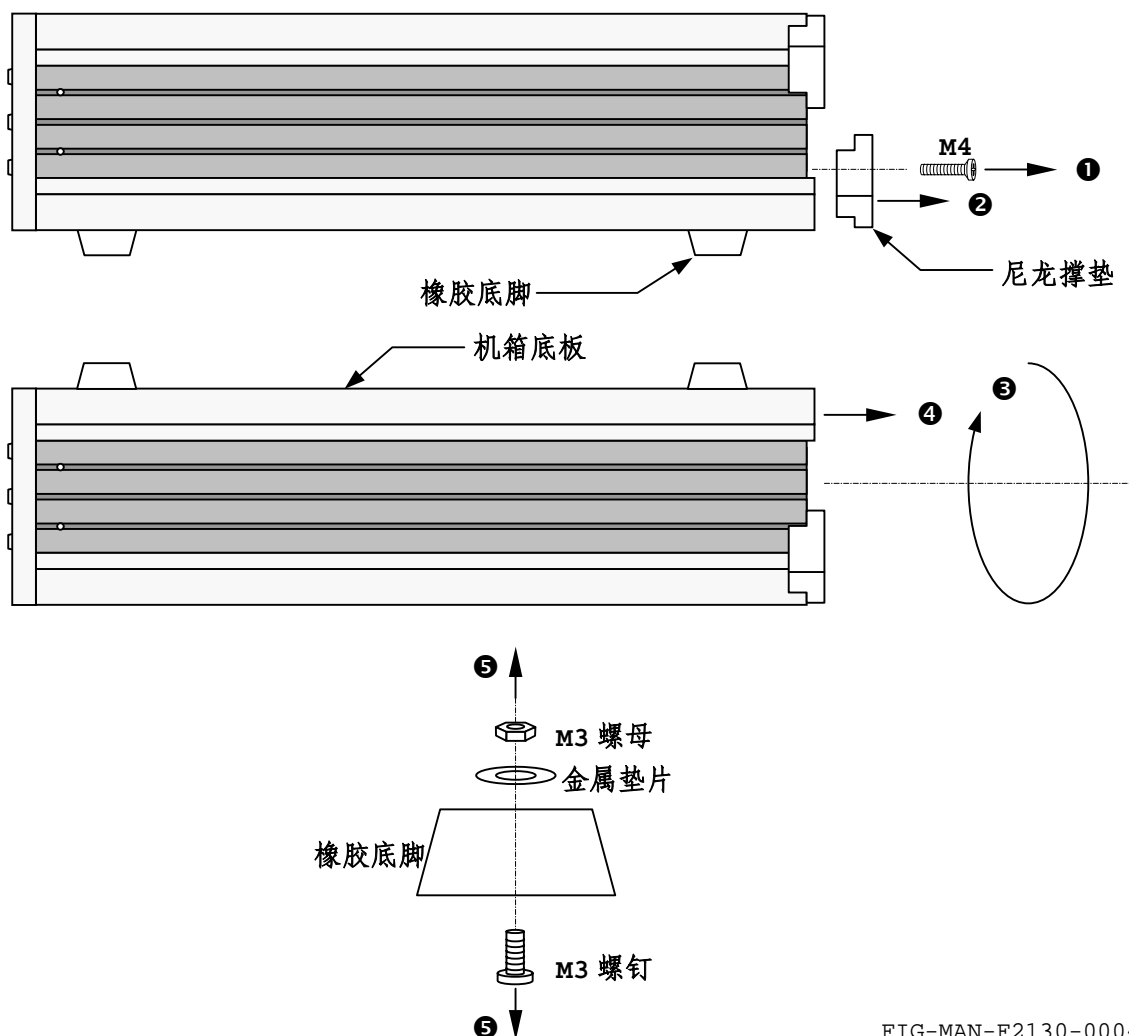


FIG-MAN-F2130-0004

警告

仪器总质量较大，倒置仪器机箱的过程中请务必小心操作，以保证操作者的人身安全。请务必保证在至少 2 人在场的情况下完成此操作。

为将 F2130 安装于机柜中，需要使用 RM03 全宽 3U 机箱法兰（机柜安装组件）附件 2 只。可遵循以下步骤使用 RM03 将 F2130 以标准 19 英寸机箱方式安装于标准机柜内部：

- （1）牢固固定机柜托盘；
- （2）使用适用的螺丝刀拆卸 F2130 机箱两侧靠近前面板的各 6 只 M3 十字组合螺钉。
- （3）在机箱两侧使用上述 M3 十字组合螺钉安装 RM03 附件各 1 只。
- （4）将 F2130 水平置于机柜托盘上，令 2 只 RM03 将 F2130 机箱固定于机柜的两侧安装梁，使用 M5 或 M6 机柜螺钉固定。

RM03 的安装方法如图 2-3 所示。F2130 与机柜的连接安装方法如图 2-4 所示。

图 2-3 在 F2130 两侧安装 RM03 附件

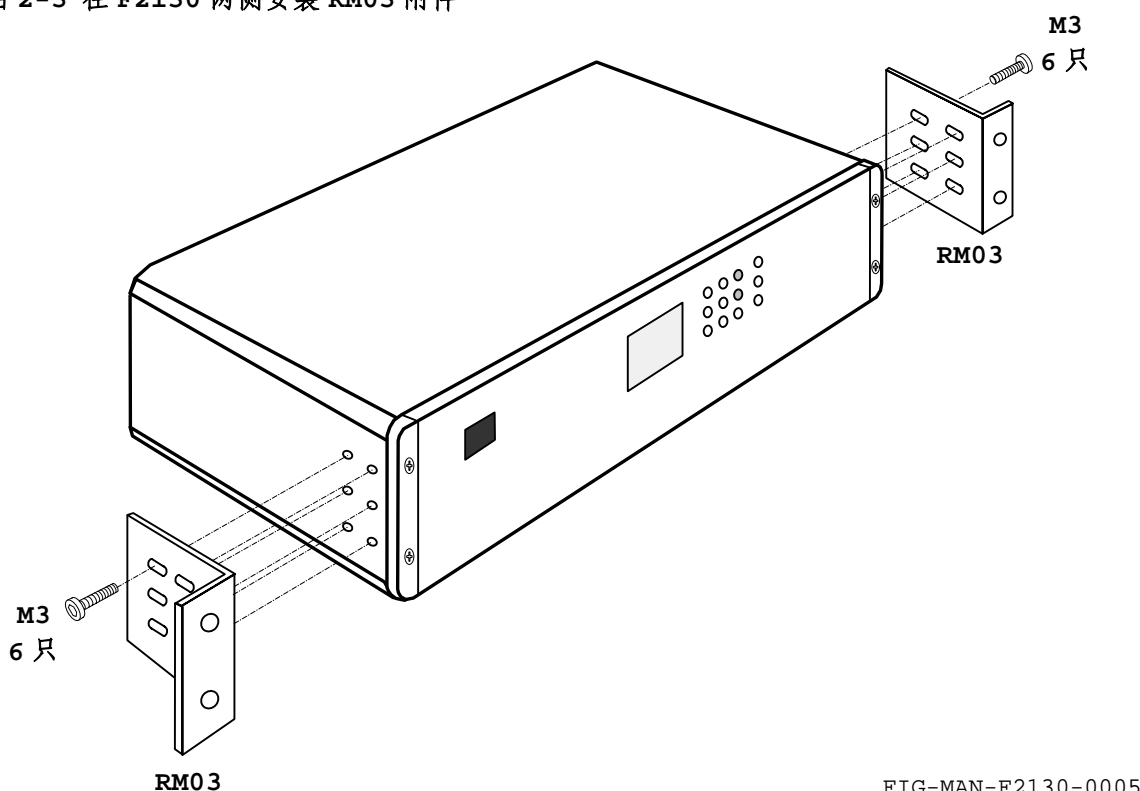
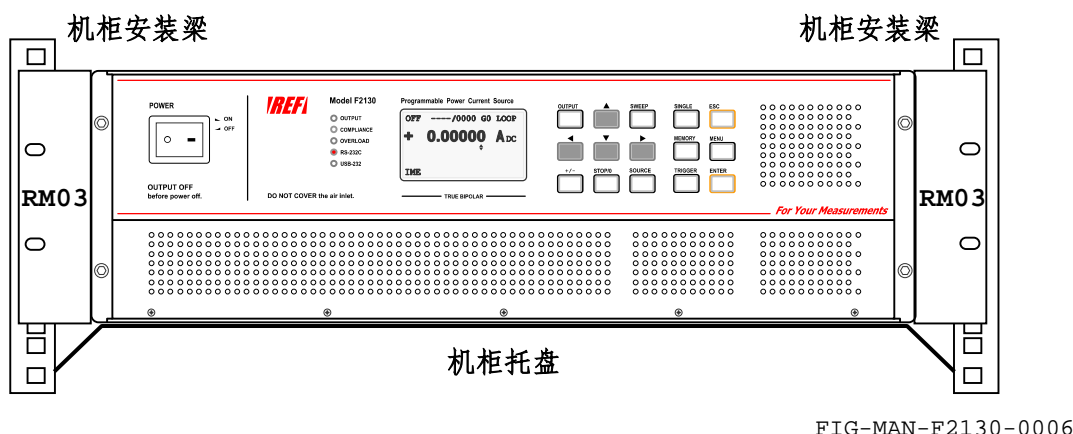


图 2-4 F2130 与机柜的连接安装方法



2.3.3 保留安全散热间距

F2130 内部采用强制风冷散热，进气口位于前面板和顶板前部，出气口均位于后面板。

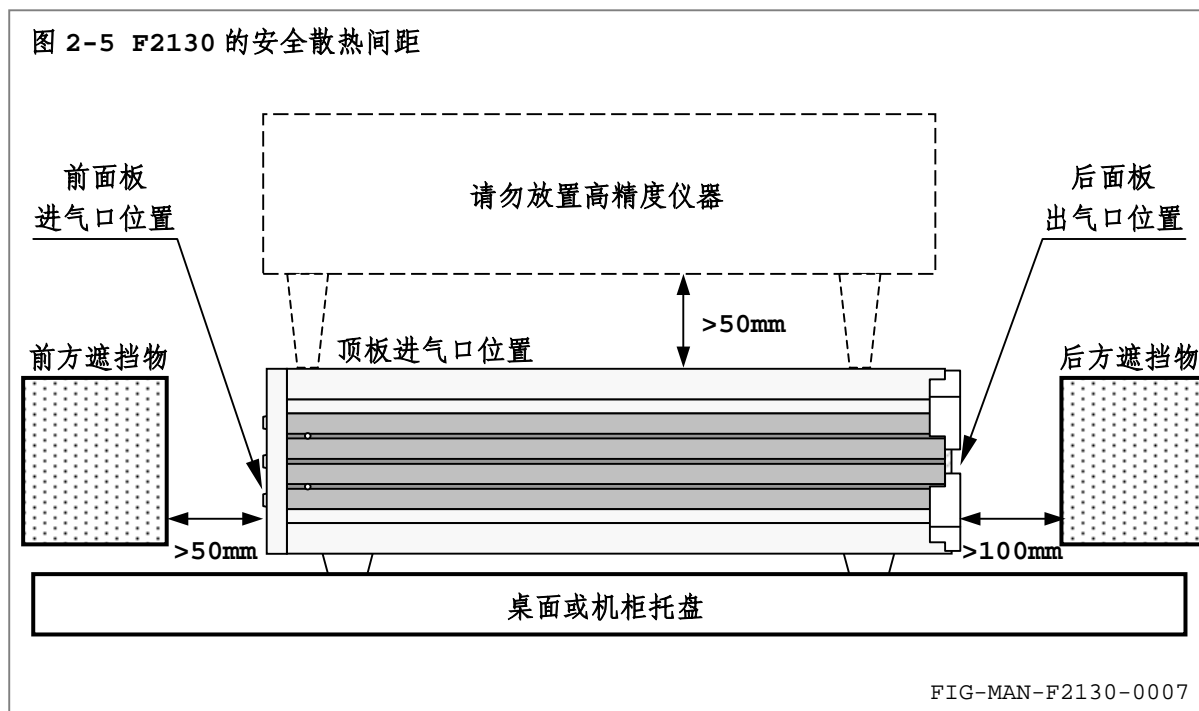
前面板面对操作者时，主散热器位于机箱左侧，并与后面板相应位置的出气口相对。主散热风扇位于机箱内部，由前面板和顶板的进气口将空气导入散热器，并由相应的出气口排出。

此外后面板还配置一只辅助散热风扇。前面板面对操作者时，辅助风扇安装于机箱右侧的后面板上。辅助风扇将电源内部的其余热量排出，并保证内部电路稳定工作。

无论桌面放置，或者机柜安装，均应保留足够的安全散热间距。切勿遮挡或封闭进气口和出气口，否则可能导致仪器内部过热，并造成输出电流准确度下降。长时间无法正常散热可能导致仪器内部电路损毁。

通常，机箱前面板和顶板均应保留至少 50mm 散热间距，后面板应保留至少 100mm 散热间距。如果 F2130 上方需要放置其它仪器，请务必使用高度不小于 50mm 的支脚抬高上方仪器，并确保不遮挡顶板上的进气口，如图 2-5 所示。

图 2-5 F2130 的安全散热间距



2.3.4 避免热量耦合和电磁干扰

长期工作时 F2130 主散热器的热量将通过金属底板传导至机箱体，并使机箱顶板温度上升。因此请勿将高精度仪器放置于 F2130 上方，以避免高精度仪器产生明显的温度漂移。

F2130 属于大功率设备，虽然已经施加屏蔽措施，工作中的 F2130 周围仍可能存在微弱的电磁干扰，尤其于顶板进气口附近以及前面板等屏蔽薄弱的位置更为严重。因此请尽量将对电磁干扰敏感的仪器及其电缆远离 F2130，或者采取更为严格的屏蔽措施，例如使用屏蔽罩和屏蔽电缆，以保证这些仪器的正常工作。

2.4 后面板详解和电缆连接

F2130 后面板包括①电源输入组件、②计算机接口（包含 RS-232C 接口和 USB 接口）、③功率电流输出接口、④触发输入 BNC 插座、⑤触发输出 BNC 插座、⑥负载保护输入 BNC 插座、⑦模拟输入 BNC 插座、⑧RC-Snubber 接口、⑨主散热出气口和⑩辅助散热风扇，共 10 部分，如图 2-6 所示。以下各节分别对上述 10 部分及其电缆连接方法进行描述。

图 2-6 F2130 后面板详解

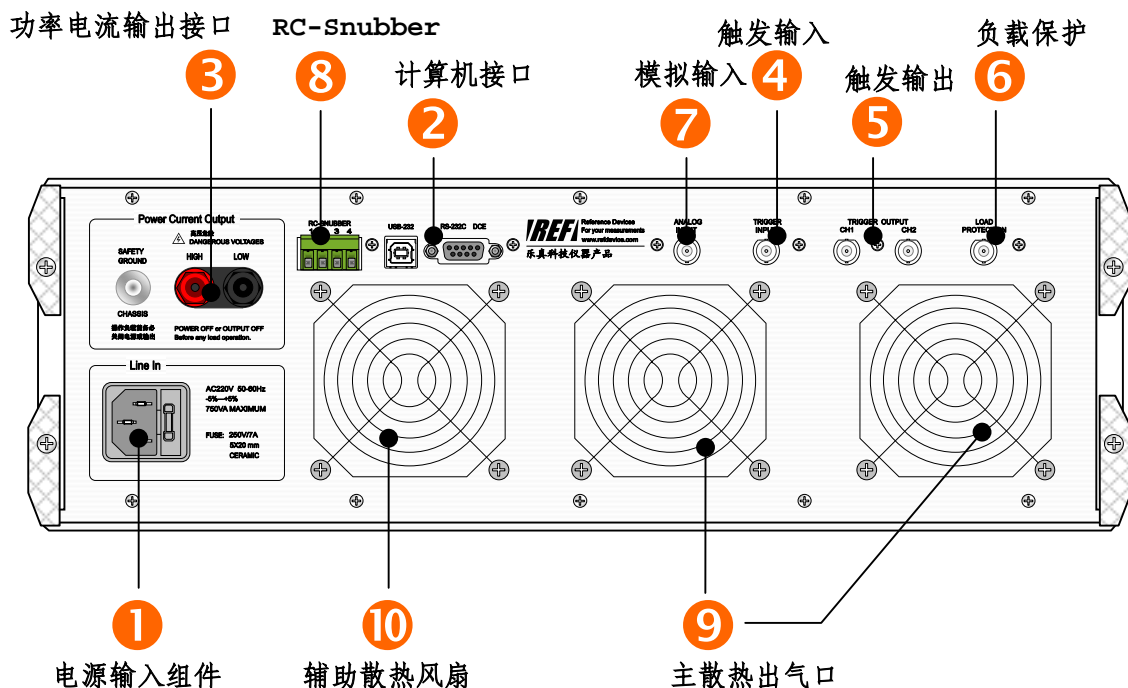


FIG-MAN-F2130-0008

2.4.1 电源输入组件

电源输入组件通过电源线为 F2130 提供交流电源。电源输入组件包括：①交流输入插座，和 ②保险仓。如图 2-8a 所示。请仔细阅读 F2130 后面板左上方标示的③“交流电源输入规格”，由交流电源插座输入的交流和频率必须严格位于此规格限制范围内。

图 2-7 电源输入组件和交流电源线插头

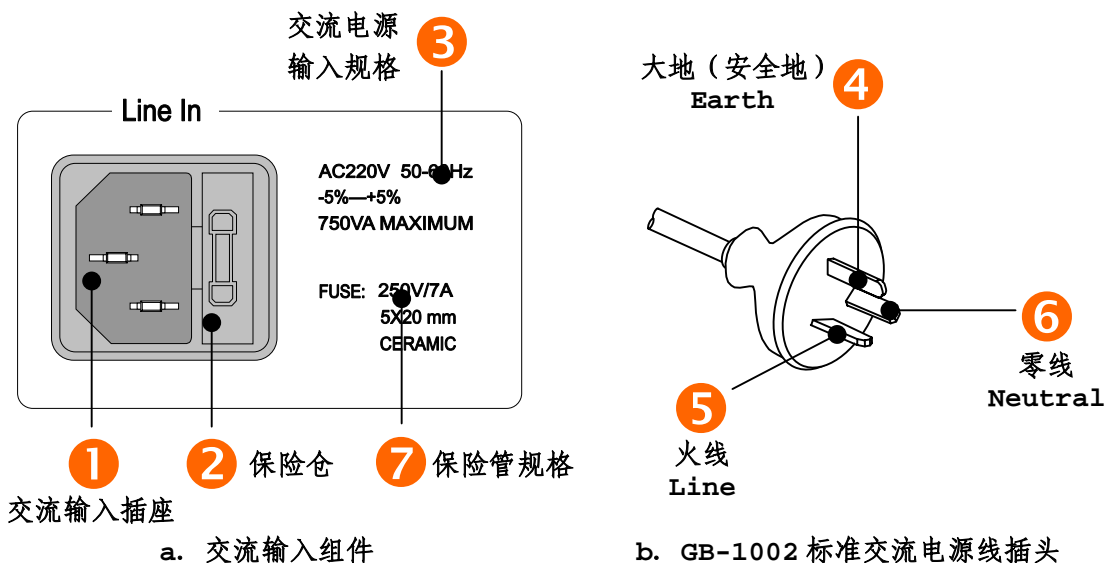


FIG-MAN-F2130-0009

警告

输入交流电压低于后面板标示的输入线电压时，将造成仪器无法正常运行。
高于后面板标示的输入线电压时，将造成仪器损毁及可能的电击或火灾事故。

警告

输入交流电源频率必须位于后面板标示的频率范围内，否则可能导致峰值大于 5.0 毫安的漏电流，并可能造成可能的电击、火灾事故或仪器损毁。

交流输入插座与附件 CAB-AC250V-102 交流电源线匹配，其中交流电压连接至交流输入插座中外侧 2 导体上，中间导体为大地（安全地），并与机箱体及金属底板相连。

附件 CAB-AC250V-102 插头及端子定义符合 GB-1002 标准，其中：④中心导体为大地（安全地）、两侧导体⑤和⑥分别为火线（L）和零线（N），如图 2-8b 所示。此插头必须可靠连接至符合国家相关安全标准且可靠接地的 3 端 220 伏特单相交流电源插座或适配器，并保证④中心导体与大地之间的良好连通性。

警告

接地不良可能导致仪器机箱体、传感器和附件的导电部分感应带电，并造成可能的电击事故或仪器运行故障。

首次开启 F2130 前，必须在未连接交流电源线的前提下取出保险仓中的保险管，并依据后面板左下方标示的⑦“保险管规格”确认其适用性。请务必使用与此规格相符的保险管。

警告

检查及更换保险管前，必须首先由电源输入组件中取出电源线，否则可能导致严重的电击事故。

警告

保险管的电压和电流容量与后面板表示不符，可能导致电击和火灾事故。
禁止使用修复的保险管或用导体代替保险管，否则将导致电击和火灾事故。

2.4.2 计算机接口

F2130 配置标准 RS-232C 计算机接口，并于后面板配置 9 针 D 型连接器，采用 DCE 设置，通过附件 CAB232DCE-3 串行电缆连接至计算机的串行端口的 9 针 D 型连接器，或配合可选附件 CONV232-9-25 连接至计算机的 25 针串行端口，串行端口及其配置请参阅第 5 章中的相应内容。

警告

EIA-232-E 标准不支持热拔插操作，连接或断开 RS-232C 电缆前必须关闭 F2130 和计算机，否则可能造成 F2130 和计算机的 RS-232C 接口电路损毁。

除标准 RS-232C 接口外，为避免计算机串行接口资源缺乏问题，F2130 内部将标准 RS-232C 接口转换为 USB1.1 兼容接口，并于后面板配置 USB Standard B 插座，通过附件 CAB-USB-AB2 连接至计算机的 USB Standard A 插座。

RS-232C 和 USB-232 接口可通过前面板键盘切换，请参阅 3.26 中的相应内容。

RS-232C 和 USB-232 接口如图 2-8a 所示。USB 电缆连接如图 2-8b 所示。

2.4.3 功率电流输出接口

F2130 配置 2 芯多用途功率接线柱，如图 2-9 所示，其中电流为正向输出时，电流由①红色接线柱流出，经过负载后由②黑色接线柱流入。

2 芯功率接线柱左侧的裸露金属接线柱为③安全接地端子，端子在仪器内部连接至底板和机箱体，并经由电源输入组件的中间导体通过 3 芯单相交流电源线的接地线与安全地相连。三芯单相电源线及其连接方法请参阅 2.4.1 中的详细内容。

图 2-8 计算机接口连接器以及使用 USB 电缆连接 F2130 和计算机

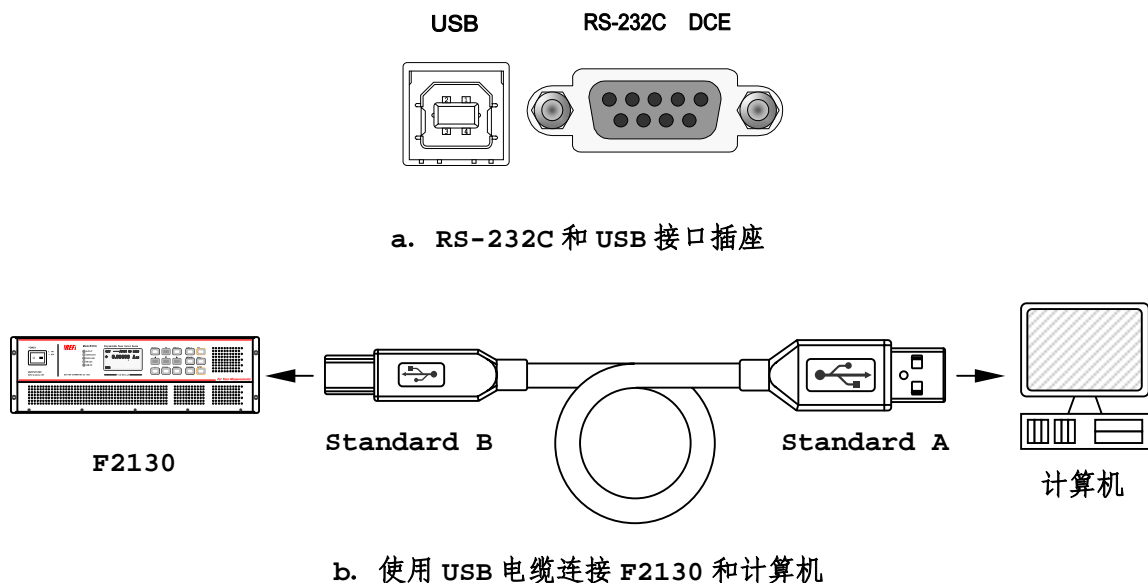


FIG-MAN-F2130-0010

图 2-9 功率电流输出 2 芯接线柱和安全接地端子

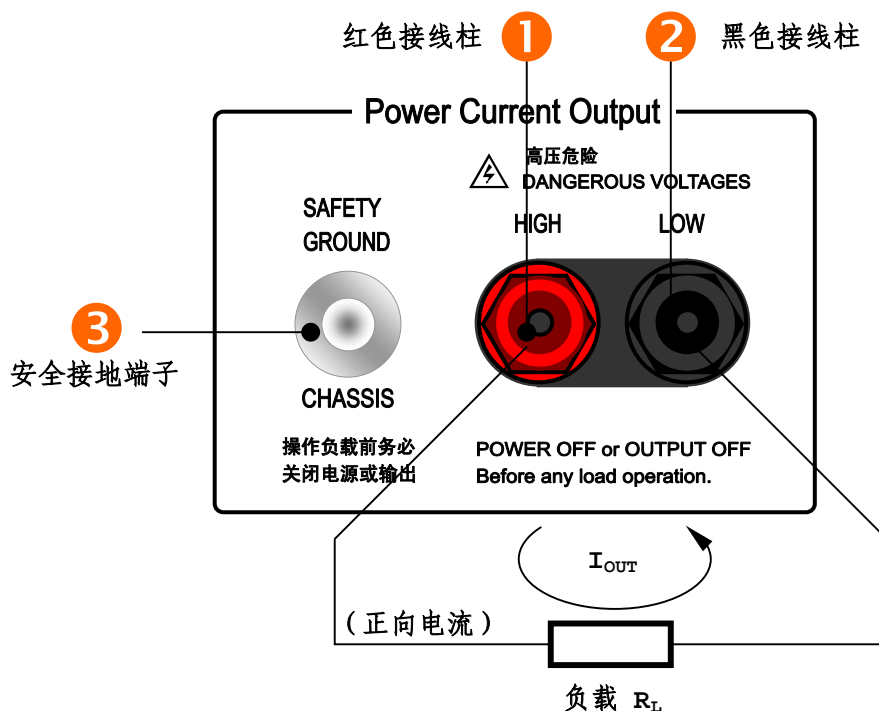


FIG-MAN-F2130-0011

负载样品存在导电表面或外壳时，建议将此导电表面或外壳牢固连接至③安全接地端子，以策操作者的人身安全。F2130 为浮动电流输出，因此即使导电表面或外壳与 F2130 电流输出端存在电气连接关系，也可安全接地。不可将与 F2130 电流输出端存在电气连接关系的不同电位导电表面或外壳同时接地，否则将可能造成负载电流的显著误差。

F2130 的最大输出电流为 10A。为保证足够的电流容量并避免长期工作时的发热现象，F2130 与负载之间的连接电缆芯线截面积应不小于 3mm^2 ，并优选为大于 4mm^2 。

警告

F2130 与负载之间的连接电缆芯线截面积不足时，将导致长时间工作过程中电缆发热。过小的芯线截面积可能造成火灾事故，并可能造成针对操作者的电击事故。

F2130 的输出直流电压可达到 60V 以上，最大开路输出电压为 65V，均高于安全电压限制。因此在操作负载时，必须关闭电源，或者在开机状态下将输出端设置为阻断状态，以避免操作负载过程中输出端开路时产生的高压对操作者人身安全的威胁。输出端状态及其设置方法请参阅 3.7 中的详细内容。

警告

开机且输出端为正常输出状态时操作负载可能造成针对操作者的电击事故。

可通过 3 种方法连接负载与 F2130 功率电流输出接线柱：

(1) 冷压接线片连接：

建议用户采用冷压接线片方式处理负载电缆，并与 F2130 的电流输出接线柱连接，以保证最大的电流容量和最牢靠的连接强度。由于 F2130 的 2 芯功率接线柱的柱头无法完全旋出脱离金属接线柱芯，因此应采用双叉式而非圆形中心孔式冷压接线片。

使用冷压接线片连接时，每一功率接线柱具有高于 20A 的电流容量。

(2) 电缆直接连接：

剥去来自负载的具有多股芯线的电缆自由端的绝缘外皮，并露出长度为 10mm 的多股铜质芯线。使用适用的工具将暴露的多股芯线旋为一股，以避免连接过程中的芯线外露和由此造成的可能的短路故障。旋松 2 芯功率接线柱的柱头，暴露出金属接线柱芯上的接线孔。将处理完成的红色和黑色电缆暴露的芯线分别插入对应颜色接线柱的金属接线孔后用力旋紧柱头。

采用电缆直接连接时，每一功率接线柱具有高于 20A 的电流容量。但在长期使用时，电流容量也可能由于暴露铜质芯线表面的氧化而逐渐降低。

(3) 香蕉插头连接：

如果负载电缆的自由端已制备为香蕉插头，可首先旋紧柱头，而后将红色和黑色电缆的香蕉插头插入对应颜色的柱头接线孔内。

采用香蕉插头连接时，每一功率接线柱具有高于 10A 的电流容量。香蕉插头的金属部分必须采用铜质，且其弹片必须具有良好的弹性，以保证与柱头接线孔内壁的良好接触。劣质香蕉插头的金属部分电阻较大，且弹片软薄，其与柱头内壁的接触电阻过大，因而无法保证足够的电流容量。

虽然 F2130 配置的双接线柱间距为标准间距，可与常见的双香蕉插头匹配，然而由于双香蕉插头的设计电流容量通常较小，不建议用户使用双香蕉插头处理电缆的自由端以及与 F2130 连接。

警告

使用电流容量不足的香蕉插头将造成接触点发热。接触点的热量累积可能造成香蕉插头塑料部分软化，并可能导致火灾事故。

2.4.4 模拟输入 BNC 接口

图 2-10 模拟输入 BNC 接口

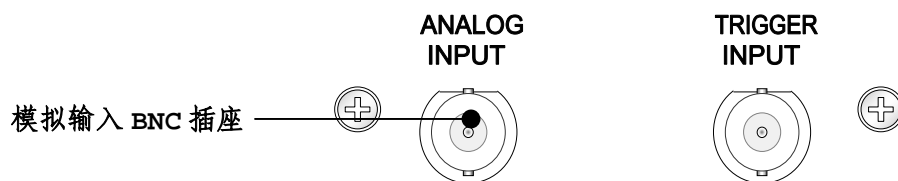


FIG-MAN-F2130-0012

F2130 配置 1 路模拟输入 BNC 接口，如图 2-10 所示。

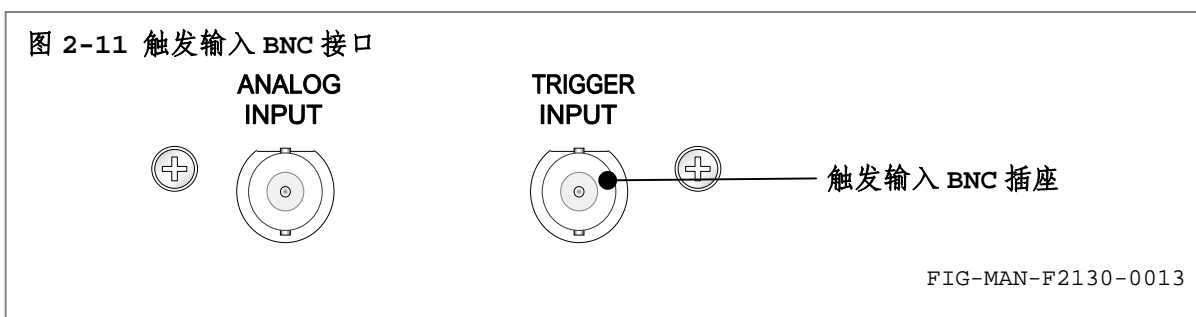
模拟输入接口为 BNC 插座，并与同轴屏蔽电缆的标准 BNC 插头匹配。用户可制备或使用成品 BNC 同轴电缆完成 F2130 与信号发生装置之间的连接。为降低空间干扰，请尽量使用屏蔽电缆。

BNC 插座的中心导体为模拟输入信号，外壳为信号地。信号地与功率电流输出 2 芯接线柱的黑色接线柱连通，但与机箱底板、机箱体和安全地电学隔离。模拟输入额定输入电压范围为 $\pm 5\text{V}$ ，钳位电压 $\pm 5.5\text{V}$ 。

模拟输入接口的电学性能及其应用请参阅 3.13 中的详细内容。

2.4.5 触发输入 BNC 接口

F2130 配置 1 路触发输入 BNC 接口，如图 2-11 所示。



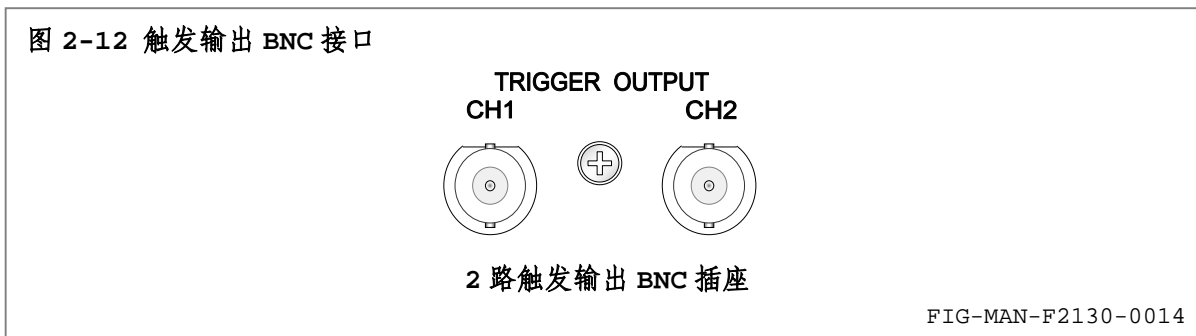
触发输入接口为 BNC 插座，并与同轴屏蔽电缆的标准 BNC 插头匹配。用户可制备或使用成品 BNC 同轴电缆完成 F2130 与可发送触发控制信号的仪器之间的连接。

BNC 插座的中心导体为触发输入信号，外壳为触发信号地。触发信号地与机箱底板、机箱体和安全地等电位。触发信号兼容标准 TTL 电平，依照国际惯例，触发信号下降沿有效。

触发输入接口的电学性能及其应用请参阅 3.20 中的详细内容。

2.4.6 触发输出 BNC 接口

F2130 配置 2 路同步触发输出 BNC 接口，常规触发输出和扫描触发输出均由此接口输出，如图 2-12 所示。



触发输出接口为 BNC 插座，并与同轴屏蔽电缆的标准 BNC 插头匹配。用户可制备或使用成品 BNC 同轴电缆完成 F2130 与可接收触发控制信号的仪器之间的连接。

BNC 插座的中心导体为触发输出信号，外壳为触发信号地。触发信号地与机箱底板、机箱体和安全地等电位。触发信号兼容标准 TTL 电平，依照国际惯例，触发信号下降沿有效。

触发输出的电学性能及其应用请参阅 3.18 和 3.19 中的详细内容。

2.4.7 外部负载保护输入 BNC 接口

F2130 配置外部负载保护输入 BNC 接口，如图 2-13 所示。

图 2-13 外部负载保护输入 BNC 接口

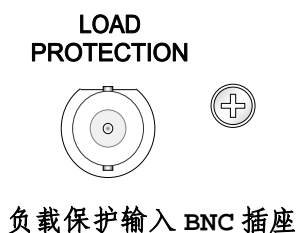


FIG-MAN-F2130-0015

外部负载保护输入接口为 BNC 插座，并与同轴屏蔽电缆的标准 BNC 插头匹配。用户可制备或使用成品 BNC 同轴电缆完成 F2130 与负载内部保护元件之间的连接。

通常，F2130 默认使用常闭的温度开关作为负载过热保护元件。温度高于关断阈值时，温度开关由闭合转换为断开状态，F2130 识别此断开状态并通过关断输出电流保护负载。负载温度下降至闭合阈值时，F2130 脱离保护状态并允许用户对输出电流进行操作。

此外，负载保护输入 BNC 接口也可识别 TTL 兼容电平，用户可使用其他负载保护装置对负载进行过热保护，此装置可使用继电器或 TTL 电平输出至 F2130，并遵循 F2130 的保护逻辑。

外部负载保护的详细内容请参阅 3.23。

2.4.8 RC-Snubber 接口

RC-Snubber 接口用于修改 F2130 配置的内部补偿网络，如图 2-14 所示。

图 2-14 RC-Snubber 接口

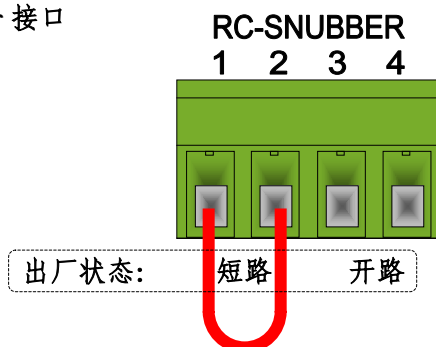


FIG-MAN-F2130-0016

RC-Snubber 接口配置与之匹配的插头。出厂时，插头已紧密连接至 RC-Snubber 接口插座，且插头的第 1 位与第 2 位之间使用短路线短路，第 3 位与第 4 位开路。

警告

变更 RC-Snubber 接口连接前，必须首先关闭本仪器，否则可能导致电击事故，并将造成仪器或与之连接的设备损毁。

警告

RC-Snubber 接口匹配的插头未插入插座，或者连接松动，均将导致 F2130 产生强烈的输出振荡，并可能造成仪器或与之连接的设备损毁。

警告

RC-Snubber 接口匹配的插头未插入插座时，切勿打开 F2130 的电源开关，否则将导致 F2130 产生强烈的输出振荡，并可能造成仪器或与之连接的设备损毁。

警告

错误的变更 RC-Snubber 接口连接将导致 F2130 产生强烈的输出振荡，并可能造成仪器或与之连接的设备损毁。

RC-Snubber 接口的详细内容请参阅 3.16。

2.5 初始设置和开机检测

2.5.1 上电之前

以下流程务必于上电前执行，以策使用者的人身安全、使用环境安全以及仪器安全。

1. 确认前面板电源开关位于关闭（O: Off）位置，且电源线已由电源输入组件中取出。
2. 将直流电阻为 4Ω 、耗散功率容量大于 1000W 的负载通过芯线截面积大于 4mm^2 的电缆连接至后面板 2 芯功率电流输出接线柱，并将负载一端通过安全接地端子妥善接地。
3. 上电前完成后面板其他电缆（包括 RS-232C 接口/USB 接口、模拟输入和触发输入/输出）连接，并确保连接状况良好。确认 RC-Snubber 接口的插头已牢固连接至插座，并已按照图 2-14 进行默认配置。

警告

作为原则性的操作规程，进行后面板连接前，必须首先关闭本仪器，否则可能造成仪器或与之连接的设备损毁。

警告

RC-Snubber 接口匹配的插头未插入插座时，切勿打开 F2130 的电源开关，否则将导致 F2130 产生强烈的输出振荡，并可能造成仪器或与之连接的设备损毁。

警告

错误的变更 RC-Snubber 接口连接将导致 F2130 产生强烈的输出振荡，并可能造成仪器或与之连接的设备损毁。

4. 检查输入交流电压是否位于后面板标示的输入线电压范围内。

警告

输入交流电压低于后面板标示的输入线电压时，将造成仪器无法正常运行。
高于后面板标示的输入线电压时，将造成仪器损毁及可能的电击或火灾事故。

5. 电源输入组件中保险管的型号是否与后面板的标示相同。

警告

保险管的电压和电流容量与后面板表示不符，可能导致电击和火灾事故。
禁止使用修复的保险管或用导体代替保险管，否则将导致电击和火灾事故。

2.5.2 开机检测

完成上述检查后，将电源线 CAB-AC250-102 插入电源输入组件，即可进入开机检测流程：

6. 拨动前面板电源开关至开启（I: On）位置，前面板显示器显示如图 2-15 所示启动画面：

图 2-15 F2130 的开机启动画面



FIG-MAN-F2130-0017

7. 约 1 秒后, 进入图 2-16 所示开机检测界面:

图 2-16 F2130 的开机检测界面

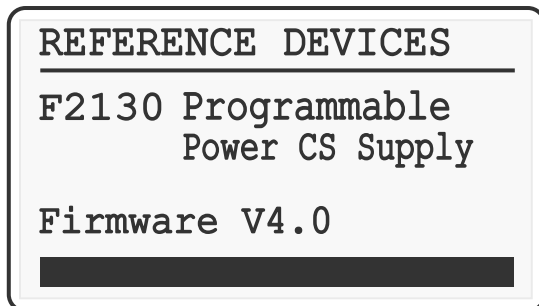


FIG-MAN-F2130-0018

8. 开机检测完成后, 进入图 2-17 所示标准显示界面:

图 2-17 F2130 的标准显示界面



FIG-MAN-F2130-0019

注

为达最佳效果, 仪器使用前应至少预热 5 分钟。至少预热 30 分钟后达到额定准确度。

9. 将万用表直流电压档量程设置为大于 100V DC。

按 **OUTPUT** 键将输出端设置为正常输出状态, 允许电流输出。

按 **ENTER** 键进入电流设置界面。使用 **◀**、**▶** 键在各位中移动, 并使用 **▲**、**▼** 键和 **+/-** 键设置输出电流为 +1.00000A, 按 **ENTER** 键确认并返回标准显示界面。使用万用表测量负载两端而非 F2130 后面板接线柱之间的电压, 电压约为 4V。

按 **ENTER** 键进入电流设置界面。使用 **◀**、**▶** 键在各位中移动, 并使用 **▲**、**▼** 键和 **+/-** 键设置输出电流为 -1.00000A, 按 **ENTER** 键确认并返回标准显示界面。使用万用表测量负载两端而非 F2130 后面板接线柱之间的电压, 电压约为 -4V。

按 **OUTPUT** 键将输出端设置为阻断状态, 而后断开负载连接。按 **OUTPUT** 键允许电流输出, 此时前面板 LED 指示器中的 COMPLIANCE 指示灯应闪烁。切勿接触功率电流输出接线柱及与其有电气连接的任何部件。按 **OUTPUT** 键将输出端设置为阻断状态, 禁止电流输出, 并关机。

注

如果仪器至此步骤均操作良好, 则 F2130 基本功能正常。

10. 成功完成上述检测流程后, 仪器即可投入正常使用。请进入第 3 章得到关于 F2130 的完整操作信息。

基本操作

3.1 简介

本章包含 F2130 程控功率电流源的操作方法。

- 3.2 前面板详解
- 3.3 键盘操作方法
- 3.4 电流响应模式
- 3.5 设置输出电流
- 3.6 输出电压范围和负载直流电阻限制
- 3.7 设置输出端状态
- 3.8 瞬变响应和时间常数
- 3.9 线性渐变方式
- 3.10 电流渐变中止和快速归零
- 3.11 电流扫描
- 3.12 输出电流准确度、线性度、温度系数和稳定度
- 3.13 模拟输入
- 3.14 噪声和纹波
- 3.15 输出阻抗
- 3.16 输出补偿网络和内部负载保护
- 3.17 内部功率过载和处理方法
- 3.18 常规触发输出
- 3.19 扫描触发输出
- 3.20 触发输入
- 3.21 设置值存储器
- 3.22 振荡检测和处理
- 3.23 外部负载保护
- 3.24 测量负载两端电压
- 3.25 键盘锁
- 3.26 设置计算机接口
- 3.27 声响和显示器对比度
- 3.28 恢复出厂设置
- 3.29 接地关系
- 3.30 键盘菜单结构

3.2 前面板详解

F2130 程控功率电流源前面板包括①LCD 显示器、②LED 指示器、③键盘区和④电源开关共 4 部分，如图 3-1 所示，并详解如下：

图 3-1 F2130 前面板详解

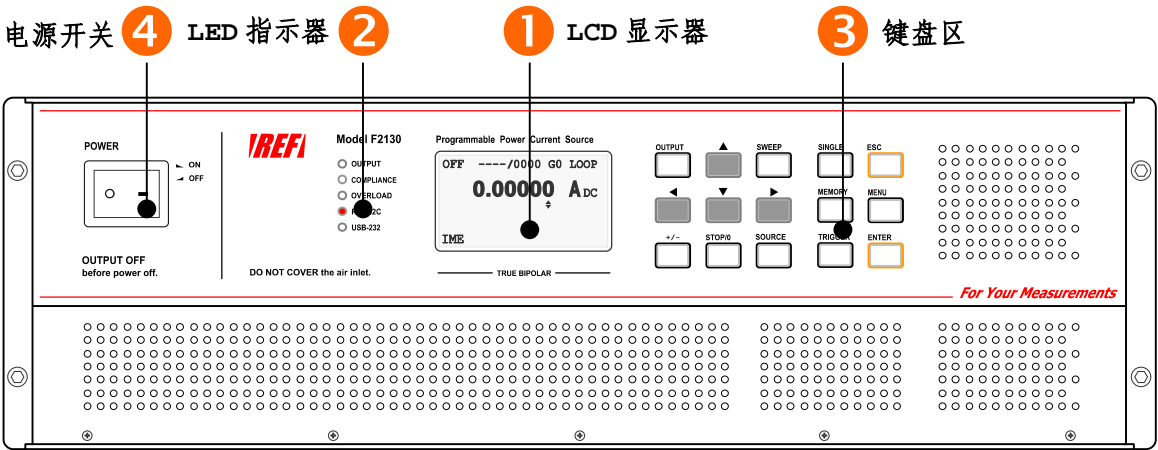
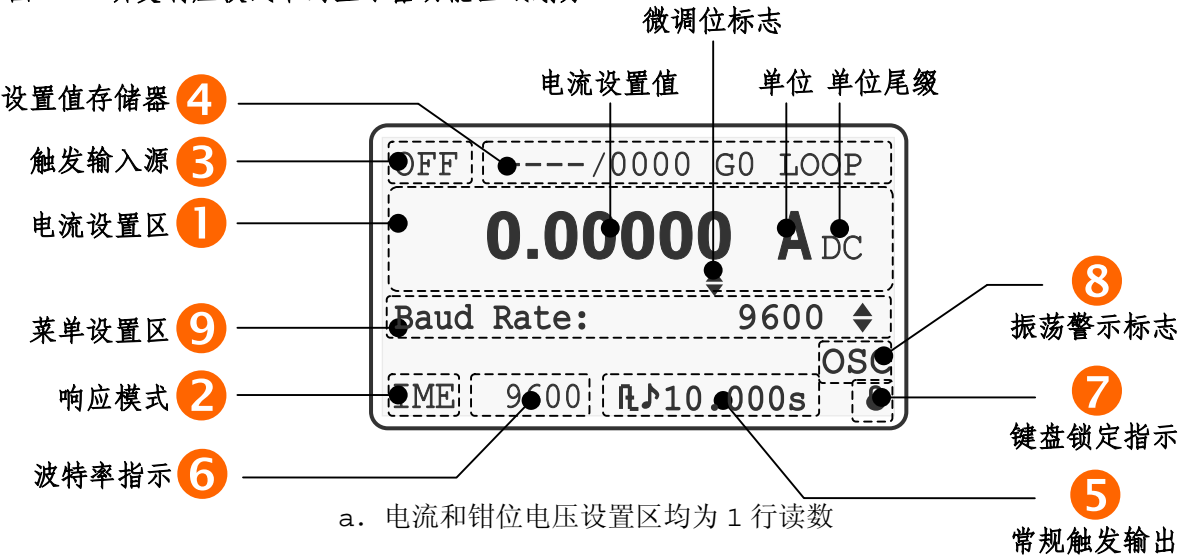


FIG-MAN-F2130-0020

3.2.1 LCD 显示器

F2130 使用 128×64 图形点阵白色背光 FSTN LCD 显示器。
瞬变响应模式下的 LCD 显示器如图 3-2 所示，根据功能划分为：

图 3-2 瞬变响应模式下的显示器功能区域划分



a. 电流和钳位电压设置区均为 1 行读数



b. 电流设置区为 2 行读数

FIG-MAN-F2130-0021

❶ 电流设置区： 设置输出电流。

标准显示界面下，电流设置区为单行，显示当前输出电流，并于输出电流的各位中的一位下方显示微调位标志，如图 3-2a 所示。进入输出电流设置界面时，电流设置区为双行，第 1 行显示当前输出电流，第 2 行显示电流设置值，设置位反转显示，如图 3-2b 所示。当前输出电流值和电流设置值单位为安培 A， $1\text{A}=10^3\text{mA}=10^6\mu\text{A}$ 。单位尾缀均为 DC。

❷ 响应模式标志： 标示当前响应模式为瞬变响应。

❸ 触发输入源： 显示当前触发输入源 OFF/BNC/INT/KEY。

❹ 设置值存储器： 显示当前存储器组别、当前组存储数量和执行进度、循环方式。

❺ 常规触发状态： 显示常规触发方式、延迟时间和声响提示状态。

❻ 波特率指示： 显示当前波特率，单位为 bps (bit per second)。

❼ 键盘锁定指示： 显示键盘锁定状态。

❽ 振荡警示标志： 输出发生振荡时，振荡警示标志闪烁，并发出声响提示。

❾ 菜单设置区： 设定各项参数时的菜单设置界面。

渐变响应模式下的 LCD 显示器如图 3-3 所示，根据功能划分为：

图 3-3 渐变响应模式下的显示器功能区域划分

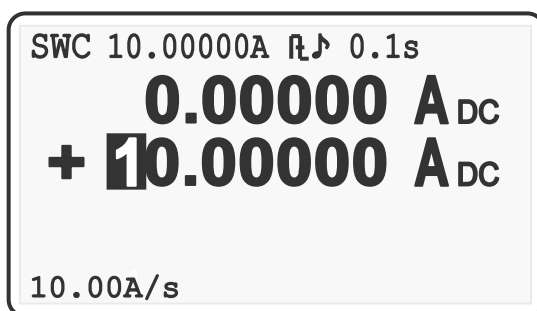
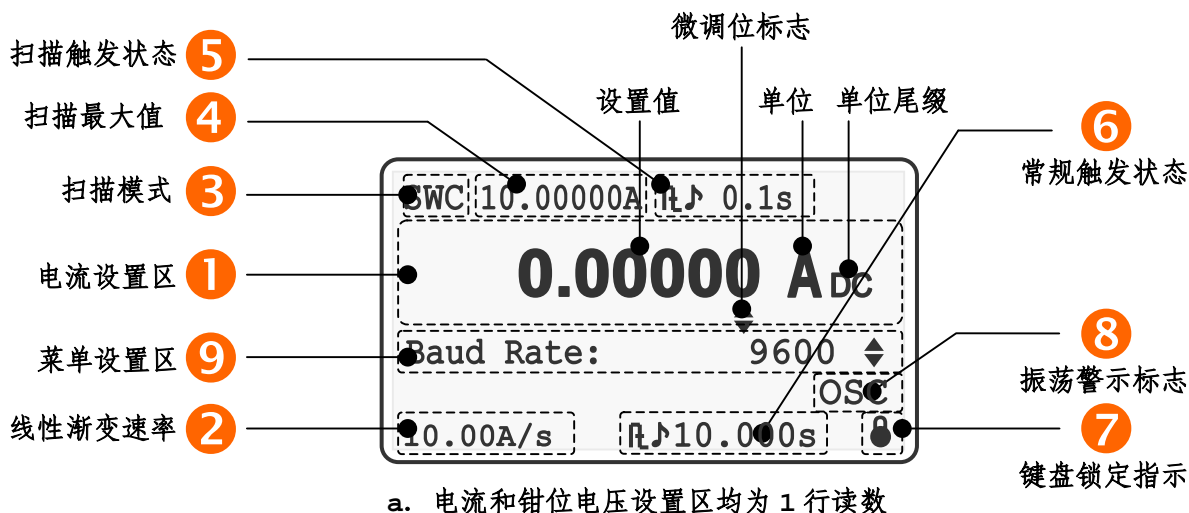


FIG-MAN-F2130-0022

❶ 电流设置区： 设置输出电流。

标准显示界面下，电流设置区为单行，显示当前输出电流，并于输出电流的低 5 位中的一位下方显示微调位标志，如图 3-2a 所示。进入输出电流设置界面时，电流设置区为双行，第 1 行显示当前输出电流，第 2 行显示电流设置值，设置位反转显示，如图 3-2b 所示。

当前输出电流值和电流设置值单位为安培 A， $1\text{A}=10^3\text{mA}=10^6\mu\text{A}$ 。单位尾缀均为 DC。

- ② 线性渐变速率：显示当前设定的电流线性渐变速率，电流扫描同样遵循此速率。
- ③ 扫描模式：显示当前扫描模式 SWA、SWB、SWC 或 SWD。
- ④ 扫描最大值：显示当前设定的扫描最大值，扫描最大值无符号。
- ⑤ 扫描触发状态：显示扫描触发的方式、间隔时间和声响提示状态。
- ⑥ 常规触发状态：显示常规触发方式、延迟时间和声响提示状态。
- ⑦ 键盘锁定指示：显示键盘锁定状态。
- ⑧ 振荡警示标志：输出发生振荡时，振荡警示标志闪烁，并发出声响提示。
- ⑨ 菜单设置区：设定各项参数时的菜单设置界面。

3.2.2 LED 指示器

LED 指示器用于指示①输出端状态、②电压钳位状态、③内部功率过载指示和④计算机接口等参数选项，LED 点亮时，对应功能处于开启状态，如图 3-4 所示。

图 3-4 F2130 的 LED 指示器

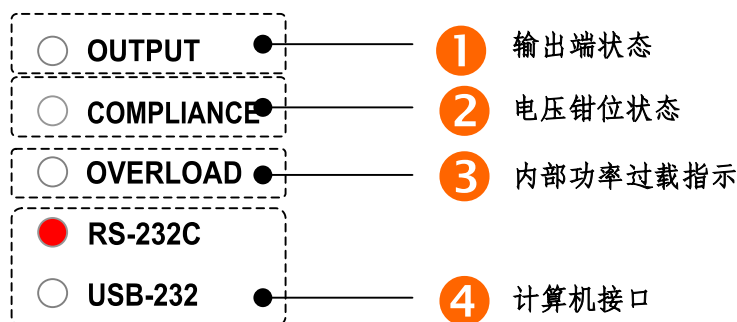


FIG-MAN-F2130-0023

3.2.3 键盘区

F2130 的键盘依据功能划分为①输出端状态、②设置电流方向、③仪器功能、④使能键和⑤方向键共 5 部分，如图 3-5 所示。

图 3-5 F2130 的键盘分区

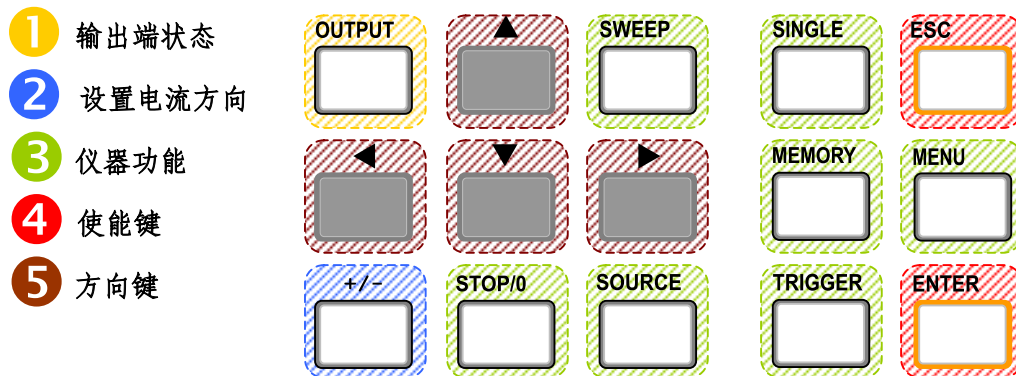


FIG-MAN-F2130-0024

3.2.4 电源开关

F2130 的电源开关采用船形开关，开、关位置状态如图 3-6 所示。

图 3-6 电源开关的开、关位置状态

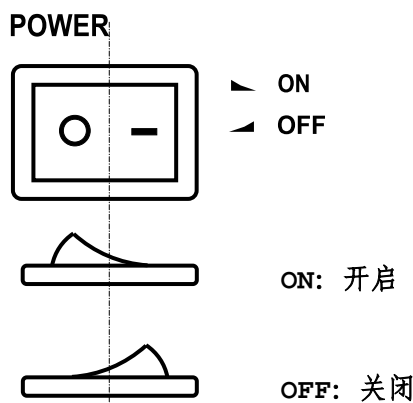


FIG-MAN-F2130-0025

3.3 前面板键盘定义

以下为前面板键盘功能定义，后续章节将提供对应各种功能的键盘操作详细描述。

① 输出端状态:

OUTPUT: 切换输出端状态为正常输出/阻断状态。

② 设置电流方向:

+/-: 标准显示状态下切换电流方向, 电流设置界面中改变电流设置值的方向。

③ 仪器功能:

MENU: 设置电流响应模式、计算机接口、串行通讯波特率、电流线性渐变速率、显示器对比度、振荡报警方式、键盘声响和电流渐变声响等各项高级功能。

SWEEP: 设置扫描模式、扫描最大值、或于渐变响应模式下依据电流线性渐变速率等参数开始电流扫描。

TRIGGER: 设置触发输入源、常规触发输出模式及其延迟时间和声响提示状态、扫描触发输出模式及其间隔时间和声响提示状态。

STOP/0: 标准显示状态下使输出电流归零。
电流设置完成但以线性渐变方式变化并未达到设置值时, 停止线性渐变过程, 并使当前输出停止于按下此按键时刻的电流值。
扫描过程中用于暂停扫描。

扫描暂停状态下用于停止扫描过程并使输出电流归零。

MEMORY: 添加设置点, 选择存储器组和清除数据。

SINGLE: 瞬变响应模式下的键盘触发输入源。

SOURCE: 选择信号源, 内部 DAC 或者后面板模拟输入 BNC。

④ 使能键:

ENTER: 确认键, 确认对某项参数的设置。
标准显示模式下用于进入电流设置界面。
扫描暂停状态下用于使扫描过程继续。

ESC: 取消键, 取消对某项参数的修改, 以及恢复出厂设置。

⑤ 方向键:

▲、**▼**: 标准显示模式下对当前电流微调位进行数值设置, 电流设置界面下对设置位进行输出电流设置, 参数设置状态下用于选择参数值。

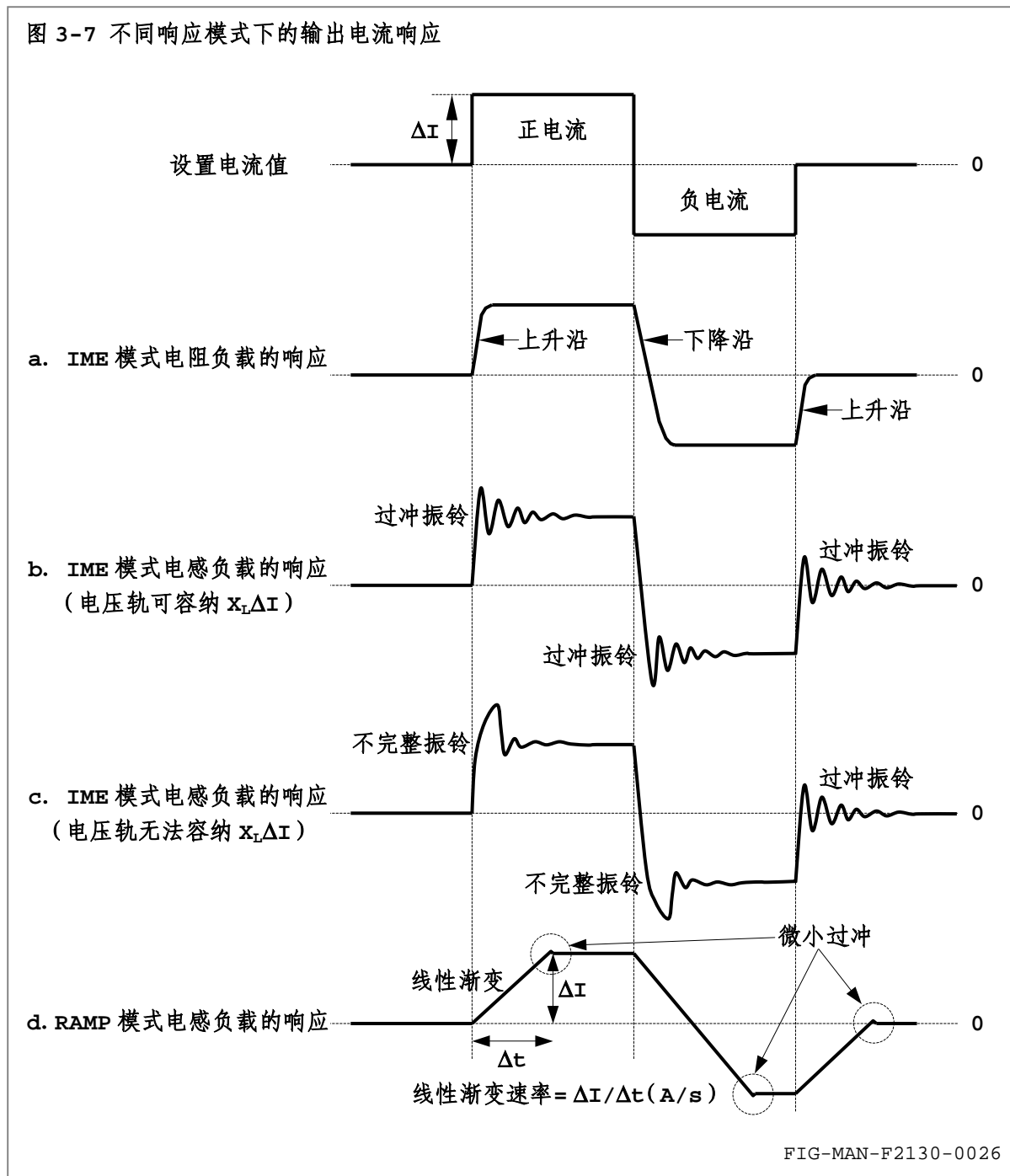
◀、**▶**: 标准显示模式下选择当前电流微调位, 电流设置界面下用于切换设置位。

3.4 电流响应模式

3.4.1 输出电流的响应模式

F2130 提供 2 种输出电流的响应模式，瞬变响应 IME 和渐变响应 RAMP。

图 3-7 不同响应模式下的输出电流响应



瞬变响应模式下，输出端为正常输出状态时，所有对输出电流的设置均立即导致输出电流的变化，如图 3-7a 所示。

对于电感性负载，过高的电流变化率将导致负载阻抗 x_L 的急剧增大。当 F2130 的最大有效输出电压轨 $\pm 60V$ 可容纳此感抗 x_L 与电流变化量 ΔI 的乘积 $x_L \Delta I$ 时，输出响应在沿时刻呈现明显过冲振铃，如图 3-7b 所示。输出电压轨无法容纳 $x_L \Delta I$ 时，输出响应将于沿时刻呈现输出电压受到钳位的不完整振铃波形，如图 3-7c 所示，并导致电压钳位“COMPLIANCE”黄色指示灯短暂闪烁。

负载时间常数 L/R 较大时，为避免不受控的瞬态电流过冲产生的磁场过冲，F2130 为电感性负载提供渐变响应模式。渐变模式采用线性渐变方式处理输出电流的变化，如图 3-7d 所示。选择适当的线性渐变速率可将电流过冲控制在可忽略的程度。

3.4.2 设置响应模式

以下操作于两种响应模式下均可操作。

标准显示界面下，请遵循以下步骤设置换向延迟时间：

- ① 使用 **MENU** 键进入菜单，按 **▲**、**▼** 键选择 “Response”，并按 **ENTER** 键进入响应模式设置界面；
- ② 按 **▲**、**▼** 方向键在 “IME” 和 “RAMP” 中循环选择；
- ③ 按 **ENTER** 键确认选择；或 ④ 按 **ESC** 键保留原响应模式并返回标准显示界面。

设置完成后，F2130 的标准显示界面由之前的响应模式切换至新响应模式，并显示相应设置。

注

响应模式保存于 F2130 内部非易失性存储器内，并于下次开机时保持。

注

切换响应模式后，触发输入源自动恢复为 OFF，禁止各种触发输入源。再次进入 IME 模式后，需重新设置触发输入源。

由瞬变响应模式 IME 进入渐变响应模式 RAMP 时，如果输出端状态为正常输出且正在通过触发输入源操作存储器内的内容进行电流序列输出，此电流序列输出立即停止，输出电流保持于最后一次触发时刻所操作的电流输出值。

注

建议切换响应模式前，首先将触发输入源设置为 OFF，并设置输出电流为 0，从而在响应模式切换完成时获得确定的输出电流状态。

响应模式也可通过计算机接口命令 **RESPONSE**[CR] 设置，或通过查询 **RESPONSE?**[CR] 查询当前响应模式，请参阅第 5 章中的相关内容。

3.4.3 不同响应模式下的显示和功能可操作性

不同响应模式可实现不同的仪器功能，并对应显示不同的参数。

瞬变响应模式下独享的仪器功能包含触发输入、存储器组及其操作、键盘触发，并于标准显示界面显示对应设置。

渐变响应模式下独享的仪器功能包含扫描及其模式和最大值、扫描触发输出、线性渐变速率、扫描声响，并于标准显示界面显示对应设置。

上述功能均可于另一种响应模式下设置，但无法使用其功能。

两种响应模式共享的仪器功能包含输出端口状态、常规触发输出、振荡报警、接口类型、波特率、显示对比度、按键声响和键盘锁。计算机接口的波特率只显示于瞬变响应模式下。

无论当前处于何种响应模式，各项独享或共享的设置值均可通过计算机接口命令进行设置，并进行查询。

3.5 设置输出电流

F2130 提供 2 种输出电流的键盘设置方法：微调和电流设置界面。

3.5.1 微调输出电流

瞬变响应模式 IME 下，输出电流值的各位均可微调，渐变响应模式 RAMP 下，仅低 5 位允许微调，以避免过高的电流变化率。

两种响应模式的标准显示界面下，当前输出电流值的允许微调位中某一位下方显示微调位。使用方向键 \leftarrow 和 \rightarrow 在允许微调的位之间循环移动选择微调位。

选定微调位后，使用方向键 \uparrow 和 \downarrow 使微调位数值增加或减小 1。输出端为正常输出状态且输出电压未达到钳位电压时，输出电流以瞬变方式与设置操作同步。

微调输出电流过程中，输出电流随微调操作同步生效，输出电流速率由负载的时间常数决定，与电流线性渐变速率无关。

微调输出电流遵循如下规则：

- ① 方向键 \uparrow 使设置值于-10A 至+10A 范围内增大，直至达到+10.00000A。
- ② 方向键 \downarrow 使设置值于-10A 至+10A 范围内减小，直至达到-10.00000A。
- ③ 瞬变响应模式下，电流方向键 $+/-$ 使设置值符号翻转，输出电流极性立即变化。
- ④ 渐变响应模式下，电流方向键 $+/-$ 使设置值符号翻转，输出电流以设定的线性渐变速率由当前值渐变至相反极性。

输出电流也可通过计算机接口命令 `CURFD`[CR]、`CURFUP`[CR] 和 `CURFDOWN`[CR] 实现微调控制，请参阅第 5 章中的相关内容。

3.5.2 电流设置界面

两种响应模式的标准显示界面下，请均遵循以下步骤于电流设置界面中设置输出电流：

- ① 按 `ENTER` 键进入电流设置界面，第 2 行显示电流设置值，当前设置位反转显示；
- ② 使用方向键 \leftarrow 和 \rightarrow 使设置位向左、右循环移动；
- ③ 使用方向键 \uparrow 和 \downarrow 使设置位数值增加或减小 1；
- ④ 按 $+/-$ 键切换电流设置值的方向位；
- ⑤ 设置完成后，按 `ENTER` 键确认使当前输出电流变化至电流设置值；或按 `ESC` 键取消设置，当前设置电流维持设置前数值。

通过电流设置界面设置输出电流遵循以下规则：

- ① 使用 `ENTER` 键确认电流设置值前，输出电流的大小和方向维持不变，设置过程中对各设置位和方向位的操作不影响当前输出电流。
- ② 设置位数值为 9，且按方向键 \uparrow 时，设置位数值为 0 并向高位进位。
- ③ 设置位数值+1 使电流设置值大于最大值 10.00000A 时，电流设置值限制为最大值。
- ④ 设置位数值为 0，且按方向键 \downarrow 时，设置位数值为 9 并向高位借位。
- ⑤ 设置位数值为 0，且所有高位均为 0 时，按方向键 \downarrow 后设置位之后的所有低位清零。

输出电流也可通过计算机接口命令 `CUR`[CR] 设置，或通过查询 `CUR?` [CR] 查询当前输出电流，请参阅第 5 章中的相关内容。

3.6 输出电压范围和负载直流电阻限制

F2130 的有效输出电压 V_{CMPL} 为 60V，即输出电压应位于-60V—+60V 范围内。开路输出电压 V_{OPEN} 大于 62V，典型值为 65V。

3.6.1 电压钳位状态

输出端位于正常输出状态时，一定的设置输出电流 I_{OUT} 下，不同的负载直流电阻 R_{LOAD} 可能导致输出电压 $V_{OUT}=I_{OUT}R_{LOAD}$ 达到或超过 $V_{CMPL}=60V$ ，例如设置 5A 电流流经 20 Ω 电阻时将导致输出电压高于 $V_{CMPL}=60V$ 并达到开路输出电压 $V_{OPEN}=65V$ ，并造成实际输出电流仅为约 3.25A。

虽然输出电压略微高于 $V_{CMPL}=60V$ 时并不显著影响输出电流准确度，然而，为确保输出电流的噪声指标，以及保证操作者对输出电压状态的完全掌控，F2130 设定输出电压超出-60V—+60V 范围时即已无法确保自身处于恒流状态，并已进入电压钳位状态。

3.6.2 电压钳位指示

进入电压钳位状态后，F2130 前面板 LED 指示器中的“COMPLIANCE”黄色指示灯闪烁，提示操作者此时输出电流无法达到额定准确度。

用户也可通过计算机接口查询 `CMPLS?` [CR] 查询电压钳位状态，请参阅第 5 章中的相关内容。

3.6.3 负载最高直流电阻限制

有限的输出电压范围 $|V_{OUT}| < V_{CMPL}$ 将限制一定设置输出电流幅值 $|I_{OUT}|$ 下的最高负载直流电阻 $R_{LOADMAX}$ ，即 $R_{LOADMAX} < |V_{CMPL}/I_{OUT}|$ ，如图 3-8 所示。

图 3-8 负载最高直流电阻限制

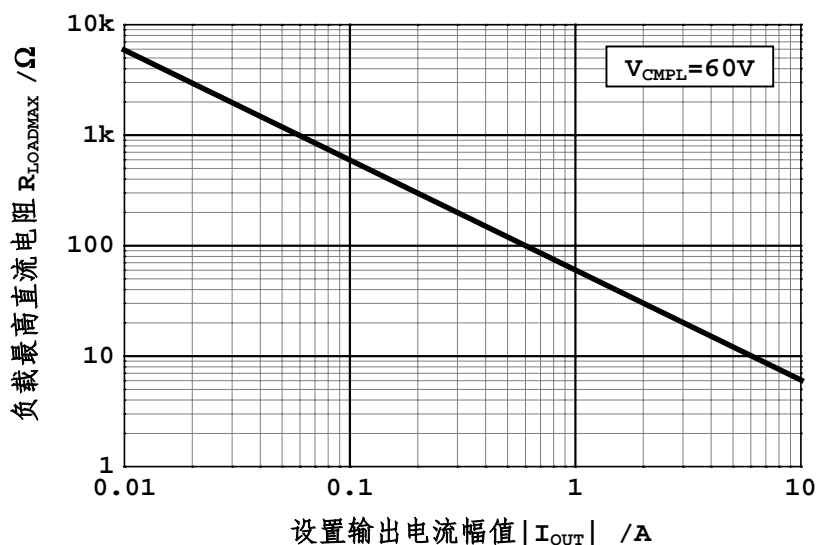


FIG-MAN-F2130-0027

3.6.4 长期通电工作的负载

长期通电激励的磁场源，例如亥姆霍兹线圈、空心螺线管和小型电磁铁负载，均会由于焦耳热的积累导致发热。线圈或电磁铁内的铜质导线具有正温度系数，约为 $+0.4\%/^{\circ}\text{C}$ ，其直流电阻随温度升高而增大。设计良好的磁场源的直流电阻由于温度升高导致的变化率限制于 10% 以内，但在散热条件不佳的环境中长期工作，可能导致此变化率达到 30% 以上。

对于长期工作的磁场源，为保证其产生磁场的长期稳定性，请于采购或设计负载时针对其冷态直流电阻保留足够余量。建议冷态的直流电阻不高于 $R_{LOADMAX}$ 的 80%。例如输出电流为 10A 时， $R_{LOADMAX}=6\Omega$ ，长时间工作的负载冷态直流电阻应不高于 4.8Ω 。输出电流为 8A 时， $R_{LOADMAX}=7.5\Omega$ ，长时间工作的负载冷态直流电阻应不高于 6Ω 。

3.7 设置输出端状态

3.7.1 输出端状态和开机更换负载

F2130 提供正常输出状态和阻断状态 2 种输出端状态，阻断状态下支持开机更换负载。F2130 开机后默认设置输出端进入阻断状态。

正常输出状态下，F2130 输出设定电流 I_{OUT} ，或在进入电压钳位状态后输出 $V_{CMPL} < |V_{OUT}| < V_{OPEN}$ 范围内的电压。正常输出时断开负载，输出端呈现开路并使 F2130 输出开路输出电压 V_{OPEN} 或 $-V_{OPEN}$ 。再次连接负载时， V_{OPEN} 或 $-V_{OPEN}$ 将瞬间施加于负载两端，并在 F2130 输出级和负载内部产生瞬间大电流，直至 F2130 再次进入恒流状态并将输出电流调整至设定值。断开和重新连接负载的过程中，回路分断和再次闭合的位置将产生明显的火花。

F2130 的开路输出电压 V_{OPEN} 高于安全电压限制，因此在输出端开路情况下操作负载，可能造成针对操作者的潜在电击危险。如果 V_{OPEN} 高于负载的额定正向或反向耐压，或者瞬间大电流超出负载的耐流极限，则可能造成负载瞬间损伤或损毁。此外，F2130 输出级也将在此过程中承受瞬间过流冲击，造成输出级寿命降低进而损毁。

警告

正常输出状态下，输出端开路时可能呈现高于安全电压的危险电压。
此时更换负载将造成对操作者的可能的电击危险。

警告

正常输出状态下更换负载将可能造成 F2130 以及负载的损伤或损毁。
开机更换负载前，请首先使 F2130 输出端处于阻断状态。

图 3-9 输出端状态切换时的输出电流

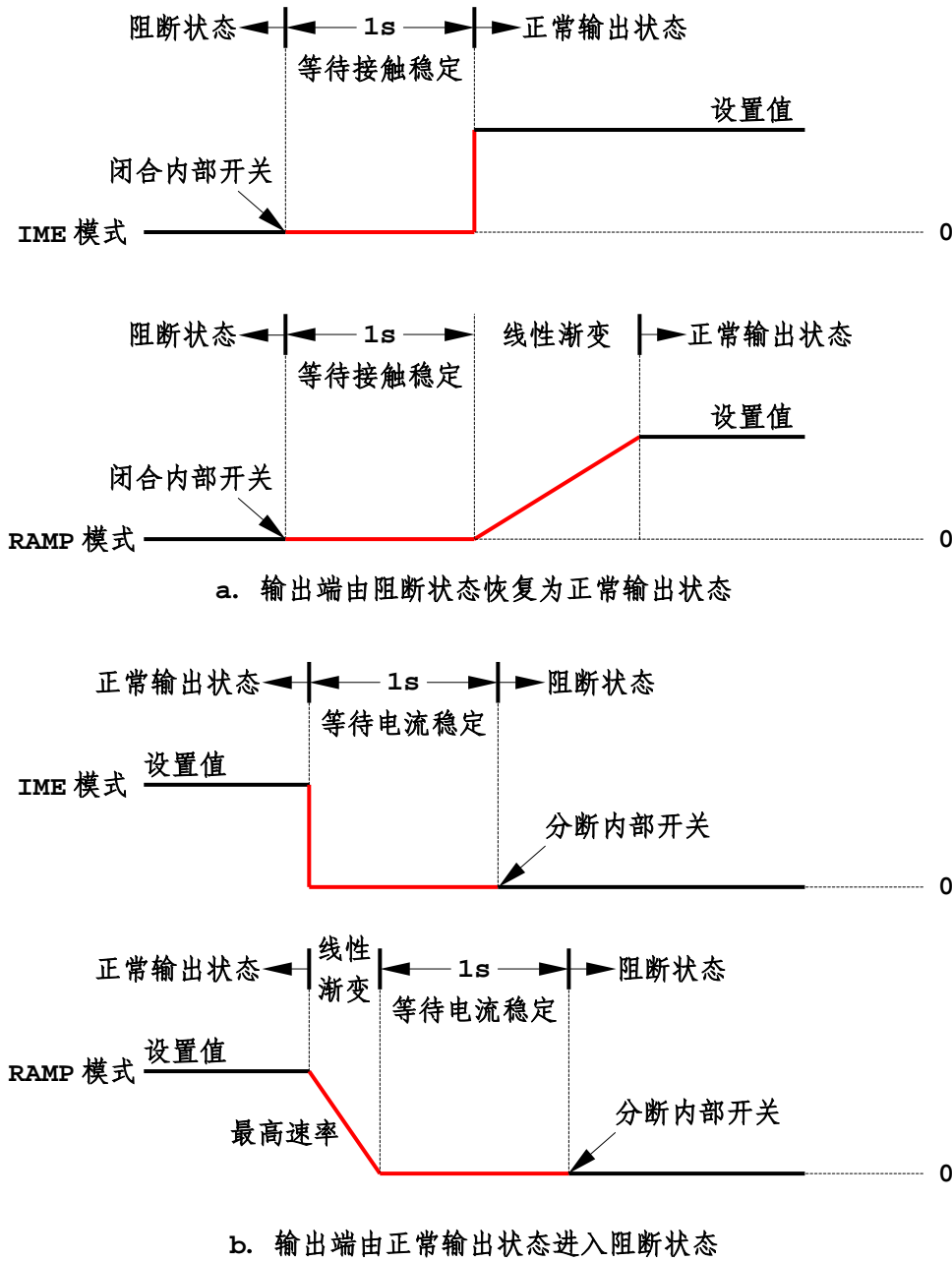


FIG-MAN-F2130-0028

阻断状态下，F2130 内部输出级与负载通过分断内部开关完全断开，阻断输出端开路时主电流回路呈现的高电压，从而允许开机更换负载。

F2130 内部输出补偿网络中的电容在正常输出状态下储存的能量在输出端进入阻断状态后的 100ms 内由内部放电电路完全泄放，并避免由此导致的针对操作者的可能的电击事故。

3.7.2 切换输出端状态

两种响应模式的标准显示界面下，使用 **OUTPUT** 键使 F2130 输出端状态在正常输出和阻断状态之间切换。正常输出时前面板左侧 LED 指示器中的“OUTPUT”指示灯点亮，阻断状态下熄灭。

输出端状态也可通过计算机接口命令 **OUT[CR]** 设置，并通过查询 **OUT?[CR]** 查询当前输出端状态，请参阅第 5 章中的相关内容。

3.7.3 输出端状态切换时的输出电流

输出端由阻断状态恢复至正常输出状态时，F2130 首先闭合内部开关，并于 1 秒后依据当前响应模式将输出电流由 0 改变至设置值。瞬变响应模式下，设置输出电流由 0 瞬变至设置值。渐变响应模式下，F2130 依据设定的线性渐变速率控制输出电流由 0 渐进至设置值。如图 3-9a 所示。

输出端由正常输出状态进入阻断状态时，F2130 首先依据当前响应模式操作输出电流回零，瞬变响应模式下，输出电流立即回零。渐变响应模式下，F2130 以最高线性渐变速率 10A/s 的速度控制输出电流渐变至 0，如图 3-9b 所示，等待 1 秒后分断内部开关。

3.8 瞬变响应和时间常数

3.8.1 输出响应模式和可选时间常数

F2130 在瞬变响应模式下，对电阻负载提供标准阶跃响应。

F2130 提供最高速度之外可设置的阶跃响应时间常数，设置电流后，输出电流由当前值以设定的时间常数阶跃变化至设置值。

对于不同形式的负载，F2130 具有不同的阶跃输出响应。对于输出短路，即负载阻抗为 0，F2130 的输出沿时间约 $t_0 < 0.1\text{ms}$ 。F2130 为具有推挽输出功率级的真双极性电流源，上升沿和下降沿的沿时间基本相同。

3.8.2 最高速度下电阻负载输出响应

最高速度时，电阻负载 R_{LOAD} 的输出电流上升/下降沿遵循指数曲线，时间常数 τ_{RLOAD} 为：

图 3-10 电阻负载的输出响应

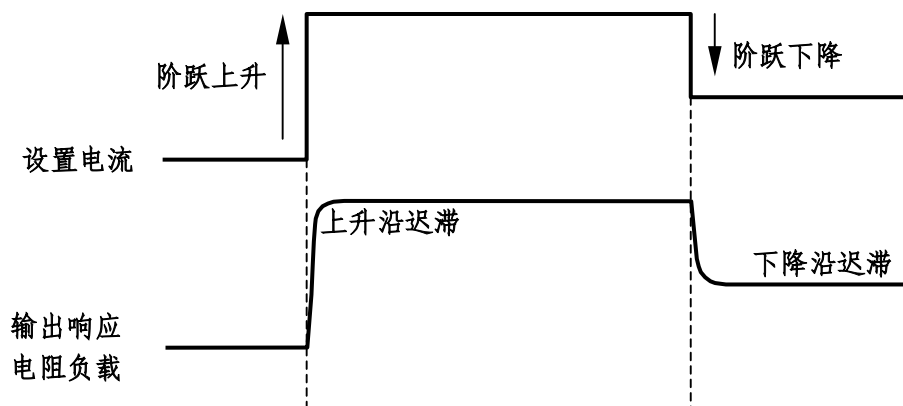


FIG-MAN-F2130-0029

$$\tau_{\text{LOAD}} = R_{\text{LOAD}} \times 10\mu\text{F} \text{ (默认 RC-SNUBBER)}$$

例如，当 $R_{\text{LOAD}} = 10\Omega$ 时， $\tau_{\text{LOAD}} = 100\mu\text{s}$ 。经过 7 个时间常数以及 t_0 ，即 0.8ms 后，输出电流误差达到步进值的 0.1% 以内，如图 3-10 所示。

3.8.3 最高速度下电感负载输出响应

对于电感负载 L_{LOAD} ，输出电流的上升沿和下降沿形状与电感值和步进值有关。

最高速度下，即使使用输出补偿网络保证 F2130 于强电感性负载下的频率稳定性，过快的电流变化率和较高的电感值仍可能导致 F2130 的开路输出电压 $V_{\text{OPEN}} = 65\text{V}$ 不足以快速改变电感负载内的电流，因此需要对于特定的电感负载 L_{LOAD} 限定最大步进值 I_{STEPMAX} ，使阶跃响应完成的全过程中所需输出电压均限制于 V_{OPEN} 以下。

步进值低于 I_{STEPMAX} 时，F2130 输出电流阶跃响应为过冲和欠阻尼振荡过程，过冲的电流以频率 f_{LLOAD} 做幅度逐渐减小的振荡，直至电流稳定至设置值。其中，标准 RC-SNUBBER 配置时：

$$f_{\text{LLOAD}} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{\text{LOAD}} \times 10\mu\text{F}}}$$

图 3-11 电感负载的输出响应

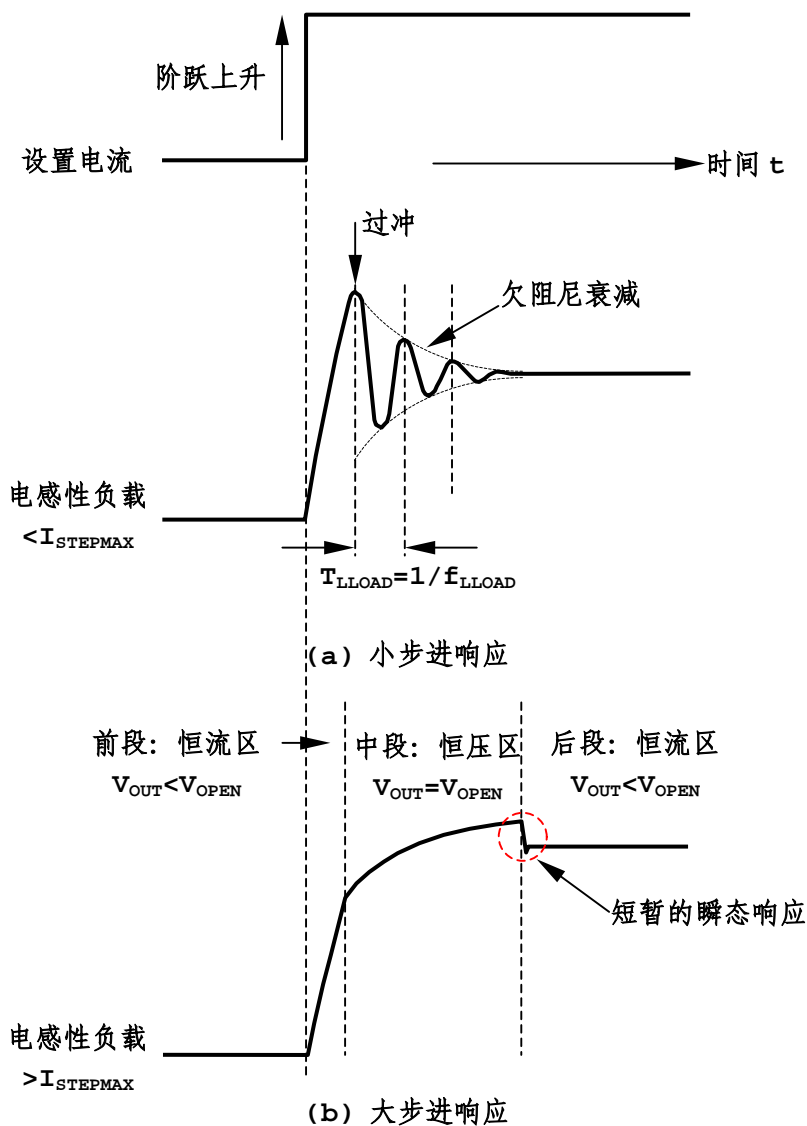


FIG-MAN-F2130-0030

例如 $L_{LOAD}=1\text{mH}$ 时, 振荡频率约为 480Hz , 周期约 2ms , 衰减速率与电感自身的串联电阻以及输出补偿网络内电容的串联电阻相关。更大的串联电阻对应更快的衰减速率和更少的振荡周期。更高的 L_{LOAD} 和更小的串联电阻将导致更大的过冲百分比。如图 3-11(a) 所示。

步进值超出 $I_{STEPMAX}$ 时, F2130 输出电流的阶跃响应以瞬间输出电压是否高于 V_{OPEN} 分为三段。如图 3-11(b) 所示。前段中, 瞬间输出电压均低于 V_{OPEN} , 曲线呈现正常指数上升, 瞬间电压逐渐升高至高于 V_{OPEN} 时进入中段, 两段之间具有明显斜率突变。中段呈现时间常数增大的指数上升形态, 在此过程中, F2130 暂时离开恒流区, 进入电压钳位状态, 由 V_{OPEN} 以恒压状态对负载充电, 电流变化速率逐渐降低, 直至 V_{OPEN} 足以驱动电感内的电流达到设置值为止进入后段, 经过短暂的瞬态响应, F2130 重新进入恒流区, 最终输出电流进入稳态。

下降沿响应与上升沿响应方式相同。

由于中段内输出电压 $V_{OUT}=V_{OPEN}=65\text{V}$, 即大于 $V_{CMPL}=60\text{V}$, F2130 将产生钳位报警, 前面板“COMPLIANCE”指示灯将于曲线中段时间短暂闪烁, 直至曲线进入后段。如果 F2130 接收到计算机接口查询 `CMPLS?`, 且 F2130 处理此查询时恰好位于曲线中段, F2130 将返回 1。

3.8.4 设置阶跃响应时间常数

图 3-12 硬件 RC 电路实现可选的时间常数

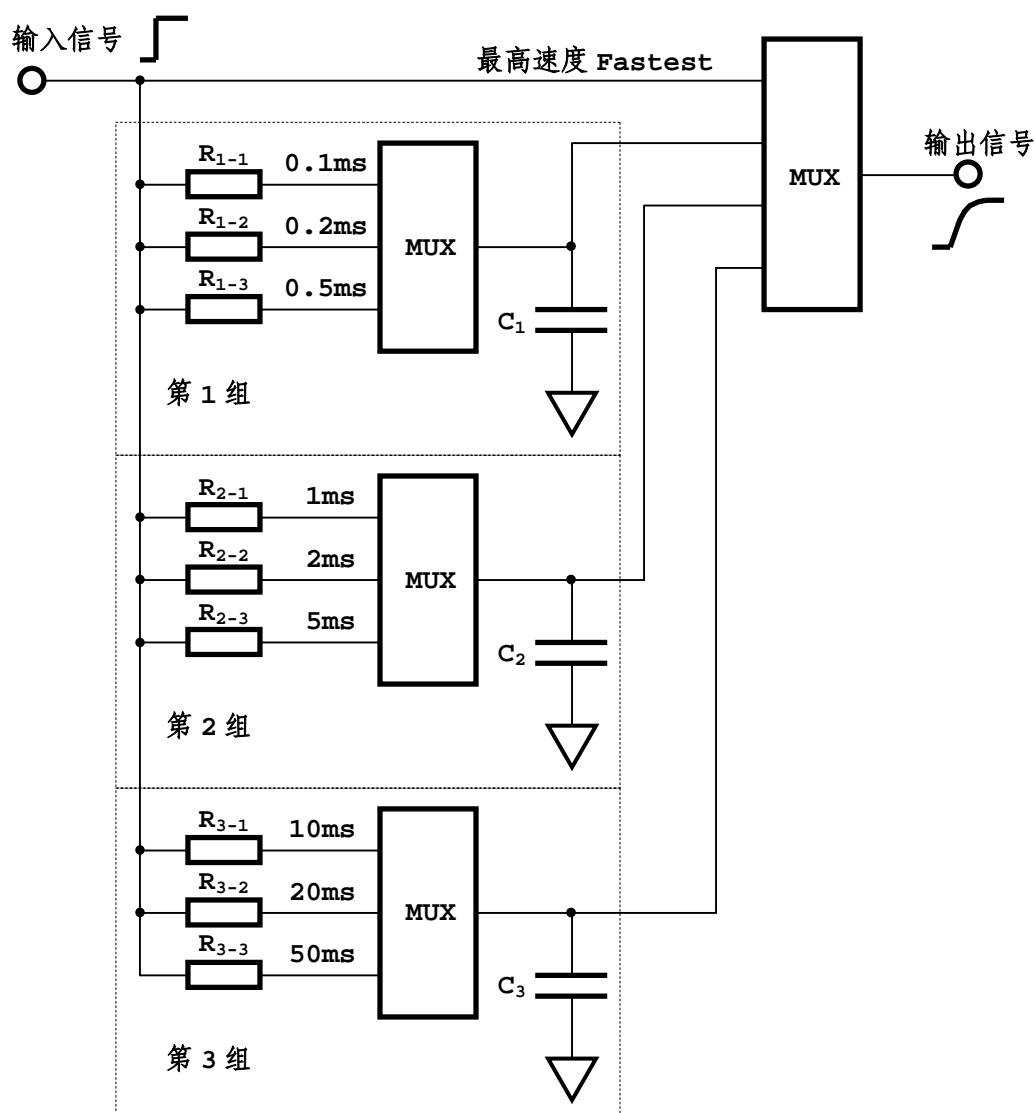


FIG-MAN-F2130-0031

除最高速度外, F2130 提供由 0.1ms 至 50ms 可设置的阶跃响应时间常数, 采用 1-2-5 步进, 即 0.1ms、0.2ms、0.5ms、1ms、2ms、5ms、10ms、20ms 和 50ms。

F2130 的阶跃响应时间常数通过内部可选的 RC 硬件电路实现, 如图 3-14 所示, 因此其响应均为 $1-e^{-t/\tau}$ 的指数曲线, 其中 τ 为时间常数, 设置步骤如下:

- ① 标准显示界面下, 按 **MENU** 键进入触发设置界面;
- ② 按 **▲**、**▼** 方向键循环显示各选项;
- ③ 至 “Time Const.” 时按 **ENTER** 键确认, 进入时间常数设置界面;
- ④ 按 **▲**、**▼** 方向键循环显示 “Fastest” 和 “0.1ms” 至 “50ms”;
- ⑤ 按 **ENTER** 键确认选择; 或 ⑥ 按 **ESC** 键保留原时间常数并返回标准显示界面。

注

时间常数保存于 F2130 内部非易失性存储器内, 并于下次开机时保持。

F2130 内部使用 3 组独立的 RC 电路提供最高速度之外的 9 种时间常数, 其中 0.1ms—0.5ms 使用第 1 组, 1ms—5ms 使用第 2 组, 10ms—50ms 使用第 3 组, 如图 3-12 所示。

设置时间常数也可通过计算机接口命令 **EXP** 达成, 并通过查询 **EXP?** 查询当前时间常数。请参阅第 5 章中的相关内容。

3.8.5 改善电感性负载的响应过冲

电感性负载的阶跃响应过冲来源于 F2130 阶跃响应时间常数 τ 低于负载电感的时间常数 $\tau_L = L/R_s$, 其中 L 为负载的电感, R_s 为电感的串联电阻。

增大 F2130 的阶跃响应时间常数 τ 有利于减小过冲的幅度。当 τ 大于 τ_L 时, 可于电感性负载上得到时间常数为 τ 的无过冲指数上升沿。建议使用示波器测量电流响应以获得适用的时间常数 τ 。

此外, 增大时间常数有利于降低输出电流的变化速率, 从而降低电感性负载两端产生的反向电动势, 以及避免由此对 F2130 输出级的冲击。

3.8.6 切换时间常数时的瞬态效应

内部 RC 电路换组, 以及由最高速度 Fastest 切换至其余任意一组 RC 电路时, RC 电路中的电容电压将以最高速度在输出端产生瞬态尖峰。例如时间常数为 50ms 时设置输出电流为 2.5A, 此时第三组 RC 电路的电容 C_3 两端电压为最大值, 而后切换至最高速度并将输出电流设置为 0, 此时 C_3 两端电压将保持最大值。时间常数再次设置为 50ms 时, C_3 两端电压将导致输出端出现短暂的非零输出电流, 直至 C_3 内的电荷以 50ms 时间常数完全泄放为止, 此过程相当于输出端首先出现 2.5A 的阶跃响应, 而后大致需要 12 个时间常数, 即约 600ms 后输出电流降至 25 μ A 以内。

为避免此瞬态尖峰, 应首先将 F2130 的输出端设置为阻断状态, 而后切换时间常数, 此时 C_3 两端电压无法于输出端产生可见的输出电流, 且此电压将以对应的时间常数降低, 约 12 个时间常数时降至原有值的 0.001% 以内, 对于 50ms 时间常数, 此时间约为 600ms。即使切换时间常数后立即将输出端设置为正常输出状态, F2130 也将提供 1s 延迟时间, 完全避免输出端产生瞬态效应。

3.8.7 切换时间常数时的直流误差

相较于最高速度, 选择其余时间常数时, 内部 RC 硬件电路将使 F2130 的零点电流产生微小偏差, 偏差范围位于 $\pm 30\mu$ A 以内, 并使得零点的温度系数略微增加。通常, 0.5ms、5ms 和 50ms 时产生最大偏差, 0.2ms、2ms 和 20ms 其次, 0.1ms、1ms 和 10ms 偏差最小。

切换时间常数不影响输出电流的幅值准确度。

3.8.8 时间常数对带宽的限制

F2130 可通过内部设置值存储器配合外部触发输入时钟源, 输出用户设定的波形, 例如但不

限于正弦波、方波和三角波，波形可任意设置为周期性或非周期性。周期性波形的频率由设置值存储器内储存的一周期数据深度与外部触发输入频率共同决定。

使用最高速度之外的其他更长的时间常数将导致对此周期性波形的带宽限制，例如 5ms 时间常数时，-3dB 带宽为约 31.8Hz，对于频率高于 5Hz 的正弦波的幅度和相位有显著影响。而最高速度下，驱动 1Ω 电阻负载时的时间常数仅为不足 20μs，-3dB 带宽可达到 10kHz。

对于谐波成分更高的方波和正弦波，当波形频率较高时，较大的时间常数将造成波形畸变，直至由于谐波成分的大量损失而退化为频率为基频的正弦波。

对于非周期性波形，较长的时间常数将产生类似的作用，并导致高次谐波的明显损失。

3.8.9 F2130 的输出级

F2130 采用推挽输出级，保障其可四象限工作，输出连续的双极性电流而无换向时间，并具有可控且一致的上升和下降沿时间。F2130 工作于 I、III 象限时具有完全电流扇出能力，工作于 II、IV 象限时，电流吸收能力受到安全工作区 SOA 的限制，参阅 3.17.1 中的详细内容。

与 F2130 不同，使用包括继电器或电子开关在内的换向装置的单端电源只可工作于 I、III 象限，即准双极性，且不具备电流吸收能力。电流由较大值向零变化的沿时间由负载放电时间决定，因此电流换向时必须预留足够长时间等待负载内的电流完全变化至 0，否则容易损毁换向装置。

3.9 线性渐变方式

3.9.1 电感性负载的时间常数

F2130 的渐变响应模式设计用于励磁应用，目标负载为具有强电感性的亥姆霍兹线圈、空心螺线管和电磁铁。这些负载具有相当大的电感值 L_{LOAD} (H)，并且实际均具有不为 0 的直流电阻 R_{LOAD} (Ω)，二者之比 L_{LOAD} (H) / R_{LOAD} (Ω) = τ_{LOAD} (s) 为负载的时间常数。

过大的电感性负载时间常数将造成显著的电流过冲。

3.9.2 时间常数引起的电流过冲

负载的时间常数较大时，由于频率响应的原因，电流源输出阶跃电流时将在负载上产生电流过冲和振铃。过冲幅度与电流阶跃幅度和负载的时间常数相关，更大的电流阶跃幅度和更大的时间常数对应更明显的电流过冲。振铃的衰减速率同样与负载时间常数有关，更大的时间常数通常对应更低的衰减速率和更长的振铃持续时间。

线圈和电磁铁产生的磁场与激励电流成正比，因此电流过冲将引起磁场尖峰，并在某些应用中由于磁滞效应严重影响测量的准确度和连续性。通常频率响应越慢的电流源将产生更小的电流过冲，但过慢的频率响应可能导致输出电流质量下降，并在输出电流中表现为工频及其倍频频率上更显著的纹波。

3.9.3 线性渐变输出方式

F2130 采用电流线性渐变方式处理输出电流的变化。

当用户设置电流变化一定幅度时，F2130 将依据预先设置的电流线性渐变速率使输出电流以线性递增或递减的方式变化，直至输出电流达到设置值。

注

电流线性渐变过程中，除使用 **STOP/0** 键停止渐变过程外，无法进行其它操作或设置。除 ***RST**、**STOP** 和 **FAST0** 命令外无法进行其它计算机接口操作。

3.9.4 设置线性渐变速率

渐变响应模式的标准显示界面下，请遵循以下步骤设置线性渐变速率：

- ① 使用 **MENU** 键进入菜单，按 **▲**、**▼** 方向键选择“Ramp Rate”，并按 **ENTER** 键进入电流线性渐变速率设置界面；
- ② 使用方向键 **◀** 和 **▶** 使设置位向左、右循环移动；
- ③ 使用方向键 **▲** 和 **▼** 使设置位数值增加或减小 1；
- ④ 按 **ENTER** 键确认选择；或按 **ESC** 键保留原速率并返回标准显示界面。

设置完成后，前面板显示器左下方显示当前电流线性渐变速率值。线性渐变速率最小值为 0.01A/s 。当设置值为 0 时，F2130 自动将其设置为 0.01A/s 。

注

线性渐变速率保存于 F2130 内部非易失性存储器内，并于下次开机时保持。

线性渐变速率也可通过计算机接口命令 **RATE[CR]** 设置，或通过查询 **RATE? [CR]** 查询当前渐变速率，请参阅第 5 章中的相关内容。

3.9.5 电流线性渐变过程中的台阶效应

电流线性渐变通过连续改变 F2130 内部的控制信号达成，控制信号由微处理器控制下的 DAC 给出。实际的 DAC 分辨率有限，无法连续变化，此外线性渐变过程中对 DAC 的设置也具有有限的时间密集度，因此实际线性渐变过程并非理想连续调整，而是由众多微小的台阶组合得到，如图 3-13 所示。F2130 的 DAC 设置时间密集度为 50次/s ，在 10A/s 最高渐进速率下，每一台阶的高度限制于 200mA ，从而抑制实际负载中由台阶效应导致的可能的电流过冲，并最大程度保证渐变连续性。在 0.01A/s 渐进速率下，每一台阶高度为 0.2mA ，台阶效应对于大多数负载均可忽略。

图 3-13 电流线性渐变过程中的台阶效应

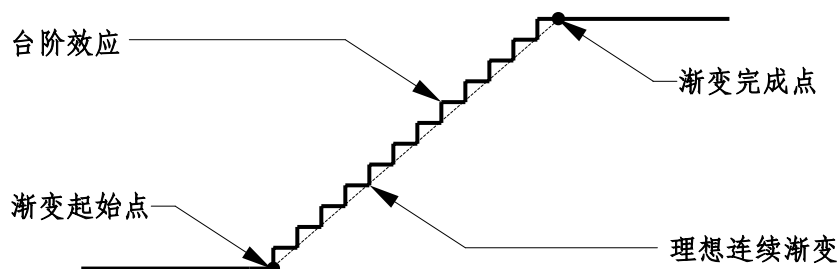


FIG-MAN-F2130-0032

3.10 电流渐变中止和快速归零

3.10.1 中止电流线性渐变

在实验室环境的磁学测量中，操作者可能在实验和调试过程中要求立即停止电流线性渐变过程，并保持当时的输出电流，以便于快速的定性分析。

F2130 可通过 **STOP/0** 键满足这一需求。在 F2130 将输出电流线性渐变至此设置值的过程中，任意时刻按下 **STOP/0** 键均可使线性渐变过程停止，输出电流保持于按下 **STOP/0** 键时刻的渐进电流值。

停止电流线性渐变也可通过计算机接口命令 **STOP[CR]** 实现，请参阅第 5 章中的相关内容。

3.10.2 电流快速回零

由于调试过程中可能对磁场进行频繁设定，某些情况下可能要求 F2130 的输出电流快速回零，以提高调试效率。F2130 的电流线性渐变速率较低时，在电流设置界面中设置输出电流为 0、并使输出电流归零的过程相当缓慢，例如 0.1A/s 的速率下将 10A 电流归零需要 100 秒，但更高的渐变速率可能无法满足调试的其他要求，因此需要在调试过程中在各种速率之间频繁手动设置。

输出端为正常输出状态，并且输出电流线性渐变结束进入稳态时，渐变响应模式的标准显示界面下任意时刻按下 **STOP/0** 键均可使 F2130 的输出电流快速回零。为避免可能的电流冲击，回零过程以 10A/s 的最高速率通过渐变方式完成。输出端为正常输出状态，瞬变响应模式的标准显示界面下，按下 **STOP/0** 键均可使 F2130 的输出电流立即回零。

输出端为阻断状态时，两种响应模式下按 **STOP/0** 键均可使 F2130 的设置电流立即回零。快速回零也可通过计算机接口命令 **FAST0[CR]** 实现，请参阅第 5 章中的相关内容。

3.11 电流扫描

3.11.1 扫描模式

渐变响应模式下，F2130 提供 4 种常用扫描模式，如图 3-14 所示：

- (1) SWA 模式： I 象限扫描。I 象限内，电流
 - ①由 0 线性扫描至设定的扫描最大值，而后
 - ②返回至 0。
- (2) SWB 模式： I-III 象限扫描。I 象限内，电流
 - ①由 0 线性扫描至设定的扫描最大值，之后
 - ②线性扫描至 III 象限扫描最大值，而后
 - ③返回至 0。
- (3) SWC 模式： I-III-I 象限扫描。I 象限内，电流
 - ①由 0 线性扫描至设定的扫描最大值，之后
 - ②线性扫描至 III 象限扫描最大值，再次
 - ③线性扫描至 I 象限最大值，而后
 - ④返回至 0。
- (4) SWD 模式： Degauss 极头退磁。输出电流由扫描最大值开始，于 I、III 象限内交替衰减扫描至 50mA。

渐变响应模式的标准显示界面下，请遵循以下步骤设置扫描模式：

- ① 使用 **SWEEP** 键进入扫描设置菜单。按 **▲**、**▼** 键选择至 “Sweep Mode”，并按 **ENTER** 键进入扫描模式设置界面；
- ② 按 **▲**、**▼** 方向键在各选项中循环选择；
- ③ 按 **ENTER** 键确认选择；或 ④按 **ESC** 键保留原扫描模式并返回标准显示界面。

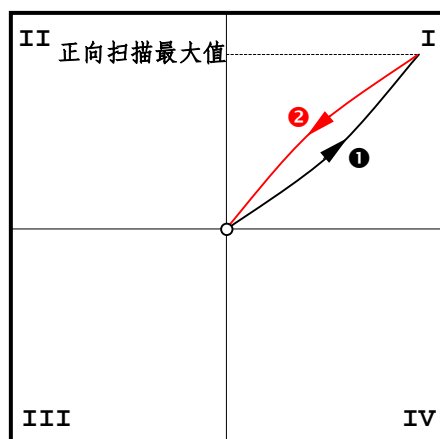
设置完成后，前面板显示器左上方显示当前扫描模式。

注

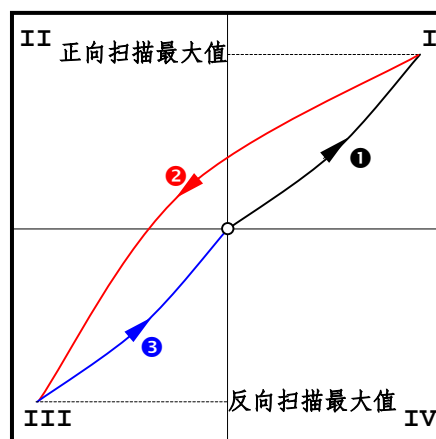
线性渐变速率保存于 F2130 内部非易失性存储器内，并于下次开机时保持。

扫描模式也可通过计算机接口命令 **SWMODE[CR]** 设置，并通过查询 **SWMODE?[CR]** 查询当前扫描模式，请参阅第 5 章中的相关内容。

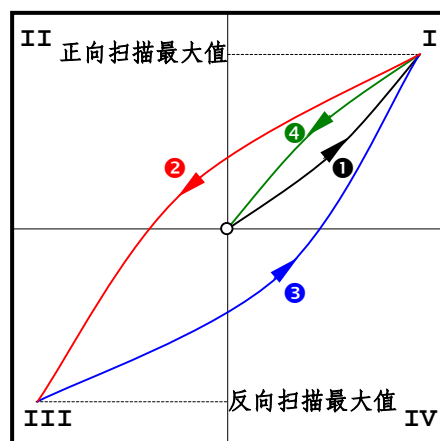
图 3-14 F2130 的四种扫描模式



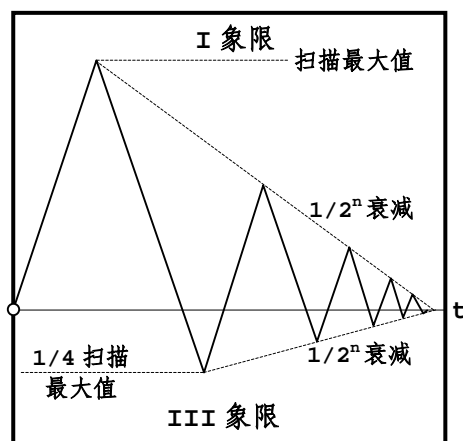
a. SWA 模式 (I 象限)



b. SWB 模式 (I-III 象限)



c. SWC 模式 (I-III-I 象限)



d. SWD 模式 (极头退磁)

FIG-MAN-F2130-0033

3.11.2 扫描最大值

F2130 的电流扫描最大值范围为 0.00001A—10A。

渐变响应模式的标准显示界面下，请遵循以下步骤设置扫描最大值：

- ① 使用 **[SWEEP]** 键进入扫描设置菜单。按 **[▲]**、**[▼]** 方向键选择“Sweep Max”并按 **[ENTER]** 键进入扫描最大值设置界面，第 1 行显示当前电流设置值，第 2 行显示当前扫描最大值，当前设置位反转显示；
- ② 使用方向键 **[◀]** 和 **[▶]** 使设置位向左、右循环移动；
- ③ 使用方向键 **[▲]** 和 **[▼]** 使设置位数值增加或减小 1；
- ④ 设置完成后按 **[ENTER]** 键确认；或按 **[ESC]** 键保留原最大值并返回标准显示界面。

扫描最大值的设置界面和设置方法与电流设置界面类似，并遵循相近的设置规则，但扫描最大值的最小设置值为 0.00001A 而非 0。扫描最大值设置值为 0 时，F2130 自动将其设置为 0.00001A。SWD 模式下，如果扫描最大值小于 50mA，F2130 只于 I、III 象限各进行 1 次扫描。

设置完成后，前面板显示器上方扫描模式右侧显示当前扫描最大值。

注

扫描最大值保存于 F2130 内部非易失性存储器内，并于下次开机时保持。

扫描最大值也可通过计算机接口命令 **SWMAX**[CR] 设置，并通过查询 **SWMAX?**[CR] 查询当前扫描模式，请参阅第 5 章中的相关内容。

3.11.3 扫描速率

F2130 的电流扫描速率遵循电流线性渐变速率，并可据此计算扫描时间。SWA、SWB 和 SWC 模式下，渐变速率为 0.1A/s，扫描最大值为 6A 时，各象限的单向扫描时间为 60 秒，巡回扫描时间为 120 秒。电流线性渐变速率的设置方法请参阅 3.9.4 中的详细内容。

3.11.4 扫描的开始、暂停、继续和中止

渐变响应模式的标准显示界面下，且 F2130 未位于电流线性渐变过程中，且未进入扫描状态时，以及输出端处于正常输出状态下，请遵循以下步骤开始扫描：

- ① 使用 **SWEEP** 键进入扫描设置菜单；
- ② 按 **▲**、**▼** 方向键选择“Start Sweep”并按 **ENTER** 键开始扫描。开始扫描，前面板显示器显示“Stop/0=PAUSE”。

瞬变响应模式下，或者渐变响应模式下且输出端处于阻断状态时开始扫描，F2130 显示消息“RAMP & OUTPUT ON first, ESC to exit”，提示用户首先进入渐变响应模式并使输出端处于正常输出状态。按 **ESC** 键关闭此消息。

如果扫描开始时输出电流不为 0，F2130 首先以 10A/s 的最高渐进速率使电流归零，恢复扫描初始状态后开始扫描。

扫描过程中，包括扫描前恢复初始状态过程中的任意时刻按下 **STOP/0** 键均可使扫描过程暂停。扫描暂停后，未启用键盘锁时前面板显示器显示提示信息“STOP/0=STOP ENTER=CONTINUE”并可按下 **ENTER** 键由暂停点继续扫描，或按 **STOP/0** 键中止扫描。键盘锁定时，前面板显示器只显示“STOP/0=STOP”信息，此时只可按下 **STOP/0** 键中止扫描。

扫描操作也可通过计算机接口命令 **SWEEP**[CR]、**SWPAUSE**[CR]、**SWCONT**[CR] 和 **SWABORT**[CR] 实现，或通过查询 **SWEEP?**[CR] 查询当前扫描状态，请参阅第 5 章中的相关内容。

3.11.5 极头退磁扫描 SWD

使用电磁铁作为磁场发生器时，由于极头的固有特性，产生较高磁场后，极头之间的气隙可能呈现±100G 范围内的明显剩磁。某些应用对样品测试的初始条件要求严格，例如接近于 0 的初始磁场，以避免额外磁化导致样品测试误差。

SWD 退磁扫描模式用于对电磁铁极头退磁，足够次数的退磁扫描可将极头剩磁控制于 5G 以内，通常可使极头退磁至 2G 以内。由于每次退磁扫描的结果决定是否需要后续的退磁扫描，建议在退磁操作中使用零点高度稳定的 F1205⁺系列高斯计对极头气隙磁场进行监测。

警告

极头退磁扫描将于极头气隙中产生强磁场，退磁开始前请将极头气隙中的样品取出，且于退磁过程结束前勿置入任何样品，以避免额外磁化导致的样品测试误差。

退磁扫描开始于第 I 象限，因此要求极头剩磁于退磁扫描之前呈现负磁场。F2130 无法对正的剩磁进行退磁，当高斯计测量气隙剩磁为正时，需首先对极头进行 III 象限的预充磁。预充磁时，F2130 输出负电流 $-I_{PRE}$ ，调整 $-I_{PRE}$ 使极头进入饱和区。对于常规电磁铁，进入饱和区时极头气隙磁场约 $-(5500—6500)G$ 之间。

进入退磁扫描后，F2130 于 I 象限的起始电流为最大扫描电流 I_{MAX} ，III 象限起始电流为 $1/4I_{MAX}$ ，而后于 I、III 象限交替进行幅值不断衰减的线性渐变扫描，衰减率均为 1/2，直至 I

象限扫描电流低于 50mA 时结束。

退磁扫描的最大扫描电流 I_{MAX} 应使极头气隙磁场位于 1500—2000 范围内。较小的 I_{MAX} 将降低退磁效率,并可能需要更多后续扫描才可将极头剩磁控制于所需范围内。较大的 I_{MAX} 可提高效率,但可能在第一次退磁后,使极头剩磁为正,并可能超出可容许的范围。

精细的多次退磁过程可将气隙剩磁降至 1G 以内。多次退磁时,每次退磁后剩磁逐渐减小,使得各次退磁的效率依次降低,直至剩磁由负磁场逐渐逼近于 0。气隙剩磁降至 -2G 以内时,再次施加的等量 I_{MAX} 退磁可能令气隙磁场略微为正,此时可将最大扫描电流 I_{MAX} 减半后实施后续退磁。

由于电磁铁的结构以及极头气隙差异,不同型号,或者相同型号不同极头气隙下的电磁铁所需预充磁电流 $-I_{PRE}$ 和退磁扫描最大电流 I_{MAX} 差异显著。此外,极头磁畴状态与充磁历史相关,使得相同的剩磁可能对应不同的磁畴状态,导致相同的极头剩磁对应的退磁次数不同。

3.12 输出电流准确度、线性度、温度系数和稳定性

3.12.1 额定准确度

F2130 的输出电流准确度使用固定误差表示法。

恒流状态下,即未进入电压钳位状态时,电流输出额定准确度为 $\pm(0.03\% \text{设置值} + 0.3\text{mA})$ 。

3.12.2 计算误差电流

恒流状态下,设置输出电流为 I_{SET} 时的输出误差为 $I_{ERROR} = \pm(0.03\% I_{SET} + 0.3\text{mA})$ 。典型输出电流下的误差如表 3-1 所示,其中参考百分比误差为实测准确度典型值:

表 3-1 典型输出电流下的误差

TAB-MAN-F2130-0004

| 输出电流 I_{SET} | 最大误差电流 I_{ERROR} | 最大绝对百分比误差 | 参考百分比误差 |
|----------------|----------------------|---------------|--------------|
| 10A | $\pm 3.3\text{mA}$ | $\pm 0.033\%$ | $\pm 0.02\%$ |
| 1A | $\pm 0.6\text{mA}$ | $\pm 0.06\%$ | $\pm 0.02\%$ |
| 100mA | $\pm 0.33\text{mA}$ | $\pm 0.33\%$ | $\pm 0.05\%$ |
| 10mA | $\pm 0.303\text{mA}$ | $\pm 3.03\%$ | $\pm 0.5\%$ |

3.12.3 线性度

F2130 的输出电流线性度使用积分非线性度误差 (INL: Integral Non-Linearity) 表示,为 $<\pm(0.005\% \text{最大值}) = \pm 0.5\text{mA}$ 。

忽略 F2130 以额定准确度表示的电流输出误差时,由最大负值 I_{MAX-} 至最大正值 I_{MAX+} 之间任意实际输出值 I_{OUTP} 与通过 I_{MAX-} 和 I_{MAX+} 通过比例计算得到的输出值 I_{OUT} 之间的误差小于 $\pm 0.5\text{mA}$ 。

计入以额定准确度表示的电流输出误差时, I_{MAX+} 和 I_{MAX-} 以实际输出值 I_{MAX+P} 和 I_{MAX-P} 代替,当 INL 误差超出额定准确度时,以额定准确度为准。

3.12.4 温度系数

环境温度位于 $25 \pm 10^\circ\text{C}$ 范围内, F2130 的输出电流温度系数低于 $\pm 5\text{ppm}/^\circ\text{C}$, 典型值为 $\pm 2\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 。

3.12.5 短期稳定度

环境温度恒定且安装位置满足 F2130 的散热安全间距要求时, F2130 的短期稳定度优于 30ppm/h , 典型值优于 10ppm/h 。

3.13 模拟输入

3.13.1 电学连接

注

后面板模拟输入 BNC 接口的外壳与电流输出接线柱的 LOW(黑色)连通并等电位。

F2130 后面板提供模拟输入 BNC 接口。使用模拟输入时，F2130 相当于跨导功率放大器，输出电流与模拟输入电压成正比，跨导系数为 2A/V 。后面板模拟输入 BNC 接口的外壳与电流输出接线柱的 LOW(黑色)连通并等电位。电学连接关系参阅 3.29.2 和图 3-39。

3.13.1 选择信号源

F2130 的信号源可选为内部 DAC 和后面板模拟输入 BNC。

上电后，F2130 默认使用内部 DAC 作为信号源。2 种响应模式下均可使用模拟输入作为信号源，但在渐变响应模式下，输出电流渐变速率无效。

2 种响应模式的标准显示界面下，均可遵循以下步骤选择信号源：

- ① 使用 **SOURCE** 键进入扫描设置菜单。按 **▲**、**▼** 方向键选择 “Internal” (内部 DAC)，或 “Rear Panel” (后面板模拟输入)；
- ② 设置完成后按 **ENTER** 键确认；或按 **ESC** 键保留原信号源并返回标准显示界面。

由 Internal (内部 DAC) 切换至 Rear Panel (后面板模拟输入) 时，F2130 输出端首先进入阻断状态，而后显示 “Switching to Rear Panel Source”，并等待切换过程结束。切换完成后，标准显示界面只显示 “REAR INPUT active”，不再显示电流设置值，且输出端保持阻断状态。使用模拟输入时仍可通过菜单设置各参数。

由 Rear Panel (后面板模拟输入) 切换至 Internal (内部 DAC) 时，F2130 输出端首先进入阻断状态，而后显示 “Switching to Internal Source”，并等待切换过程结束。切换完成后，标准显示界面重新显示电流设置值，且输出端保持阻断状态。

信号源也可通过计算机接口命令 **ASOURCE[CR]** 进行选择，并通过查询 **ASOURCE?[CR]** 查询当使用的信号源。请参阅第 5 章中的相关内容。

3.13.3 输入电压钳位和容限

模拟输入电压额定输入范围为 -5V 至 $+5\text{V}$ 。输入信号电压绝对值高于 5.5V 时，F2130 将模拟输入电压钳位至 -5.5V 至 $+5.5\text{V}$ 范围内，对应输出电流范围为 -11A 至 11A 。

模拟输入电压容限为 $\pm 20\text{V}$ ，超过此电压容限将造成模拟输入级损毁。

3.13.4 瞬态特性

与内部 DAC 产生的电压信号相同，由模拟输入电压控制的输出电流瞬态特性也可通过设置阶跃响应时间进行改变，请参阅 3.8.4 中的详细内容。

3.13.5 误差、温度系数和稳定度

由于未经过内部 DAC 的校准，使用模拟输入信号时，F2130 输出电流的零点和幅度均无法达到使用内部 DAC 时的标准。用户需自行调整模拟输入信号的零点和幅度，以保证 F2130 的输出电流达到预期准确度。

由于模拟输入信号未按照精密标准进行调理，因此输出电流的温度系数将轻微增大，短期稳定度也将随之降低。

3.14 噪声和纹波

F2130 向纯电阻负载输出 10A 时，测量带宽为 10kHz 的噪声/纹波低于 0.3mA RMS 或 2mA_{p-p}。测量带宽降低时，RMS 噪声/纹波相应下降，例如 0.1PLC（采样时间 2ms、采样速率 500Sa/s）时的噪声/纹波低于 0.5mA_{p-p}，1PLC（采样时间 20ms、采样速率 50Sa/s）时低于 0.1mA_{p-p}。

负载具有电感性时，由于电感对电流变化的抑制作用，其噪声/纹波将随电感量的增加而显著降低。F2130 输出电流的噪声以工频及其倍频成分为主，因此测量 F2130 的输出电流、以及由此电流驱动的磁场发生装置所产生的磁场时，当测量仪器具备工频及其倍频的抑制能力时，其读数的 RMS 噪声/纹波系数将显著降低。

3.15 输出阻抗

理想电流源输出阻抗 R_{OUT} 为无穷大。实际电流源的输出阻抗为有限值。 R_{OUT} 等效并联于负载 R_{LOAD} 两端，并造成分流误差，如图 3-15 所示。F2130 具有大于 2.8M Ω 的直流额定输出电阻。在可预见的适用负载直流电阻范围内，由 R_{OUT} 造成的分流误差可以忽略。

图 3-15 有限输出阻抗 R_{OUT} 造成的分流误差

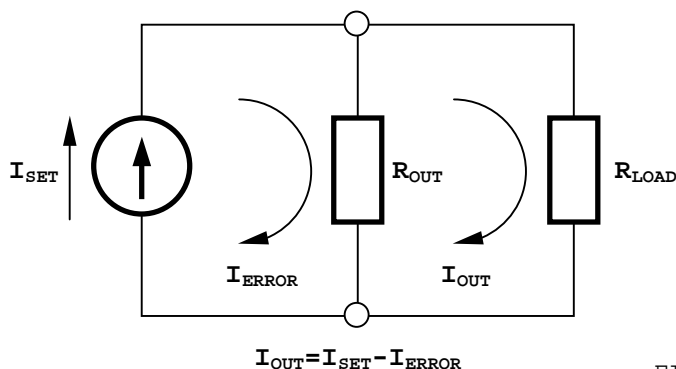


FIG-MAN-F2130-0034

通过外部触发输入，以及编辑 F2130 的内部存储器，F2130 可在瞬变响应模式下输出交流电流波形。随频率升高，F2130 的输出阻抗随之降低，并导致输出电流波形的幅度和相位误差。

此外，F2130 内部为驱动强电感性负载设置的与负载并联的补偿网络也将降低交流输出阻抗。

3.16 输出补偿网络

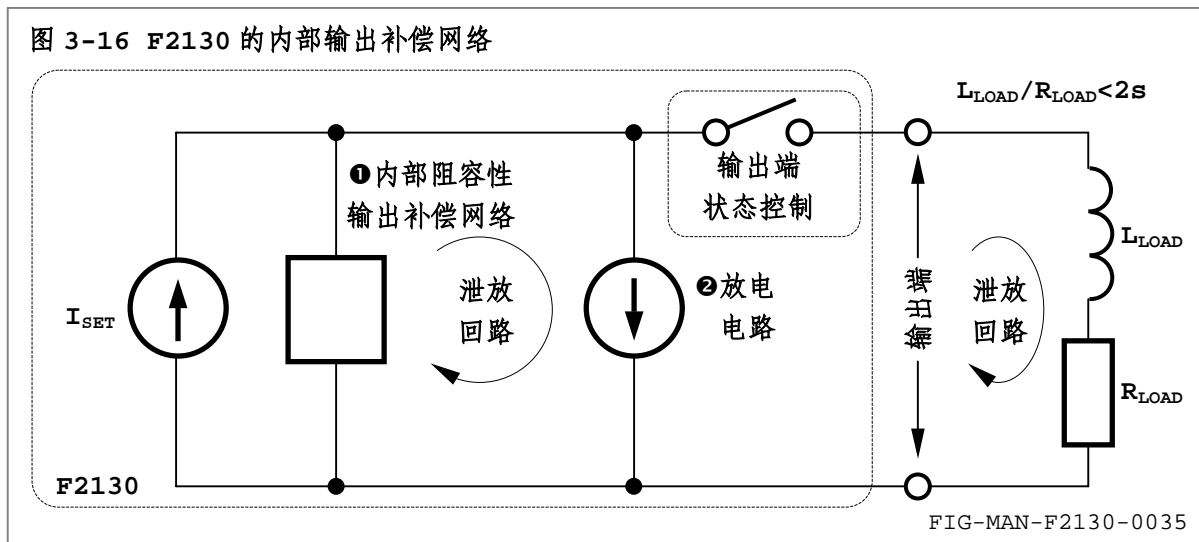
3.16.1 内部输出补偿网络

相对于电压源，电流源更易不稳定，尤其面临时间常数较大的电感性负载时，电流源可能由于过快的频率响应产生显著的输出振荡。除使用必要的频率补偿外，F2130 使用可配置的输出补偿网络确保电流源输出稳定。

F2130 提供①内部阻容性输出补偿网络，可稳定驱动时间常数高至 2s 的电感性负载，适用于大多数亥姆霍兹线圈、空心螺线管和小型电磁铁。如图 3-16 所示。

输出补偿网络内的电容将储存与输出电压相同的电压，此电压可能超出安全电压范围。此电压在输出端进入阻断状态后的 100ms 内可由 F2130 内部②放电电路钳制至 0。

图 3-16 F2130 的内部输出补偿网络



3.16.2 变更 RC-Snubber 接口

F2130 通过后面板的 RC-Snubber 接口提供对内部输出补偿网络的修改功能。

RC-Snubber 接口配置与之匹配的插头。出厂时，插头已紧密连接至 RC-Snubber 接口插座，且插头的第 1 位与第 2 位之间使用短路线短路，第 3 位与第 4 位开路。

对于不同时间常数的负载，为保证 F2130 的绝对稳定，或改善输出阶跃响应的沿质量，可通过变更 F2130 后面板的 RC-Snubber 接口的连接方式，修改内部输出补偿网络。

警告

除非对电感性负载阶跃响应的沿质量有绝对必要的要求，不建议用户自行变更 RC-Snubber 接口的出厂连接设置，并**绝对禁止**在匹配插头未牢固插入接口的情况下开启 F2130。

警告

变更 RC-Snubber 接口连接前，**必须首先关闭本仪器**，否则可能导致电击事故，并将造成仪器或与之连接的设备损毁。

警告

RC-Snubber 接口匹配的插头未插入插座，或者连接松动，均将导致 F2130 产生强烈的输出振荡，并可能造成仪器或与之连接的设备损毁。

警告

RC-Snubber 接口匹配的插头未插入插座时，切勿打开 F2130 的电源开关，否则将导致 F2130 产生强烈的输出振荡，并可能造成仪器或与之连接的设备损毁。

警告

错误的变更 RC-Snubber 接口连接将导致 F2130 产生强烈的输出振荡，并可能造成仪器或与之连接的设备损毁。

RC-Snubber 接口与内部输出补偿网络的连接关系如图 3-17 所示。第 1 位和第 2 位与内部补偿网络中的电阻 R 串联，第 3 位和第 4 位分别连接至内部补偿网络中的电容 C 两端。

即使 RC-Snubber 接口与输出端子 F2130 内部存在确定的连接关系，任何情况下仍严禁将其中任何一位作为输出端子。RC-Snubber 接口连接器及其内部连接电缆不具有承载 10A 直流电流的能力。

警告

严禁使用 RC-Snubber 接口中的任何一位作为输出端子，否则可能由于连接器和内部电缆的电流承载能力不足而造成连接器和电缆发热，并可能发生火灾。

图 3-17 RC-Snubber 接口与内部补偿网络的连接关系

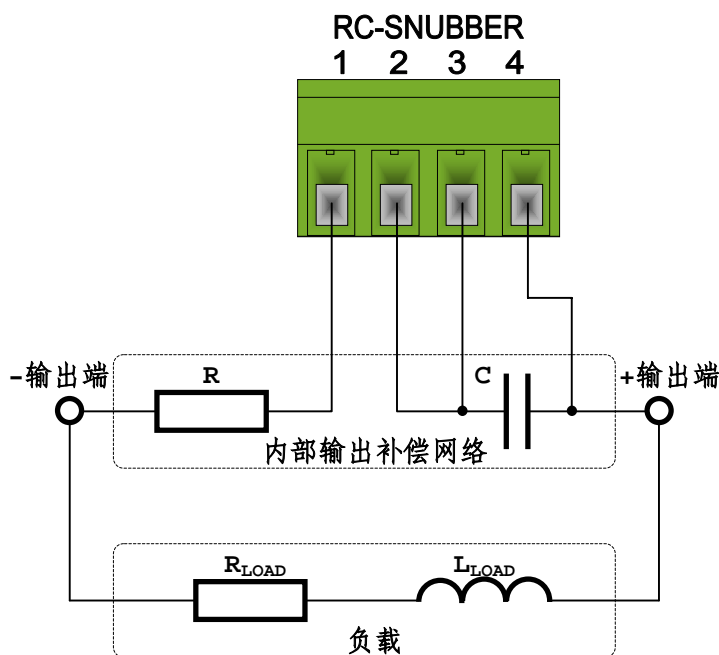


FIG-MAN-F2130-0036

3.16.3 附加电容 C_E

负载的电感量过大导致时间常数过高，并造成 F2130 输出电流出现振荡时，可于第 3 位和第 4 位之间连接适当的附加电容 C_E ，等效于内部补偿网络中的电容增大至 $C+C_E$ ，从而提高 F2130 的频率稳定性，消除可能的振荡。

附加电容 C_E 的额定耐压必须显著大于 F2130 的开路输出电压 65V，为保证长期可靠工作，电容的额定耐压应不低于 100V。由于 F2130 具有 I、III 象限输出能力，即在反向电流下于输出端呈现负电压，因此切勿使用具有极性的电解电容。

警告

使用耐压低于 100V 的电容将可能造成薄膜电容损毁和短路，以及无极性电解电容的爆裂，以及由此引发的针对操作者的安全事故。

警告

有极性的电解电容将在输出电压极性与电解电容极性相异时导致电解电容的爆裂，以及由此引发的针对操作者的安全事故。

虽然无极性电解电容的漏电流相对于可预见的负载直流电阻而言可以忽略，但长期使用的无极性电解电容可能由于电解液干涸导致电容量显著下降，因此请尽可能使用薄膜电容。

警告

连接附加电容必须在关机且内部输出补偿网络完全放电的条件下进行，以策操作者的人身安全。

连接附加电容 C_E 之前，必须使用电阻值为 10kΩ 的 10W 功率电阻为附加电容完全放电，以避免电容可能储存的高压对 F2130 内部电路的冲击和可能导致的 F2130 输出级损毁。由 RC-Snubber 接口取下的电容必须使用电阻值为 10kΩ 的 10W 功率电阻完全放电后方可进入储存状态，以避免电容储存的高压对操作者和可能接触此电容的人员造成可能的电击危险。

通常使用 10kΩ 电阻对两端电压为 60V 的 10μF 电容完全放电时间为 0.3s，最大放电电流为 6mA，放电完成后电容两端残余电压小于 1V。

警告

未完全放电的附加电容并联于 RC-Snubber 接口的瞬间将对 F2130 内部电路放电，并可能导致 F2130 的功率输出级损毁。

警告

储存未完全放电的电容可能造成针对与其接触的人员的电击事故，并可能导致与其接触的电气设备或电路损毁。

3.16.4 附加电阻 R_E

针对电感量较小的负载，例如低于 1mH，对阶跃响应的沿质量要求较高时，可于第 1 位和第 2 位之间连接适当的附加电阻 R_E ，等效于内部补偿网络中的电阻增大至 $R+R_E$ ，从而提高由补偿网络和负载构成的 RLC 环路的阻尼系数，削弱或消除沿时刻的过冲和振铃。

附加电阻 R_E 的电阻值遵循以下公式确定：

$$R + R_E + R_{LOAD} = 2 \sqrt{\frac{L_{LOAD}}{C + C_E}} \quad (C=10\mu F, R=2.5\Omega) \quad (\text{公式 3-1})$$

此时 RLC 环路处于临界阻尼状态，过冲和振铃恰好消失，沿形态为指数曲线。

不恰当的变更输出补偿网络，尤其是添加较大的附加电阻 R_E ，可能造成补偿不足，并可能导致 F2130 输出端出现振荡，因此第 1 位和第 2 位之间的电阻值应遵循由小至大的原则依次增大。负载电感值 L_{LOAD} 较大时，切勿过分追求完全消除过冲和振铃，某些情况下这将使 R_E 的电阻值增大至补偿不足的程度，反而可能导致 F2130 输出端振荡。

调整 R_E 的电阻值时，应尽量避免使 F2130 处于振荡恰好消失的状态，即使此时阶跃响应的沿质量可达到最高。电子元件的值会随温度变化和运行时间增加而缓慢变化，例如电阻 $R+R_E+R_{LOAD}$ 增大或 $C+C_E$ 减小，或者 F2130 内部元件值的微小变化，均可能导致 F2130 的输出端出现振荡，此时应适当减小 R_E 的电阻值，为上述可能的元件值变化保留足够的余量。

输出电流的快速变化将导致附加电阻流过较大电流，附加电阻 R_E 必须具有足够的额定功率，保证其至少可承受 5A 电流。

警告

附加电阻功率不足时，可能在 F2130 运行时由于过流而损毁，损毁过程可能出现明火，并可能导致火灾。

警告

损毁的附加电阻 R_E 可能呈开路状态，导致补偿网络失效，造成 F2130 产生强烈的输出振荡，并可能造成仪器或与之连接的设备损毁。

不允许 F2130 开机后出现 RC-Snubber 接口第 1 位和第 2 位之间开路的情形，这将导致内部输出补偿网络失效，并使 F2130 的输出端产生强烈的振荡。

警告

为避免可能的开路情形，每次变更附加电阻的电阻值前应首先关闭 F2130。

3.16.5 调整 RC-Snubber 所需设备和步骤

请遵循以下步骤调整 RC-Snubber 接口的附加电容 C_E 和附加电阻 R_E ：

- ① 关闭 F2130 的电源开关。
- ② 确定负载后，首先应使用 LCR 交流数字电桥测量其电感量 L_{LOAD} 和串联电阻 R_{LOAD} ，而后根据公式 3-1 计算所需附加电容 C_E 和附加电阻 R_E 。
- ③ 将一只电阻值为 0.1Ω ，额定功率不低于 20W 的采样电阻 R_{SAMPLE} 与负载串联，并连接至 F2130 的输出端。
- ④ 使用电池供电的数字示波器，在不连接 AC220V 电源的情况下监测采样电阻 R_{SAMPLE} 两端的电压，此时可将输出端之一连接至双接线柱左侧的接地接线柱，即连接至大地，以降低

输出电流的共模测量噪声。或者，如果使用 AC220V 供电的数字示波器，由于其探头输入 BNC 接口的外壳已均与大地连通，不可将 F2130 输出端中任何一端连接至接地接线柱，即与大地绝缘，保持输出端与大地浮动，而后监测采样电阻 R_{SAMPLE} 两端电压。

- ⑤ 为确保调整过程的安全性，除示波器外，还应使用测量速率不低于 50Sa/s，分辨率不低于 $5^{-1}/2$ 位的数字电压表同时监测采样电阻两端电压。
- ⑥ 正确连接附加电容 C_E 和附加电阻 R_E 至 RC-Snubber 接口插头，并将插头牢固连接至接口插座。请务必仔细核对电容的耐压和电阻的额定功率，确保其不低于所需的最低标准。
- ⑦ 开启示波器和电压表，示波器输入耦合方式设置为“直流 DC”，横纵坐标分别设置为 2ms/格和 0.1V/格，触发方式为“自动 Auto”，有效触发沿为“上升沿和下降沿 Rise & Fall”，电压表量程设置为 1V DC，测量速率为 1PLC (50Sa/s)，分辨率设置为不低于 $5^{-1}/2$ 位。
- ⑧ 开启 F2130 的电源开关，此时输出端处于阻断状态。遵循 3.4 中的步骤将响应模式设置为“瞬变响应模式 IME”，设置输出电流为 +1.00000A。
- ⑨ 按 **OUTPUT** 键将输出端设置为正常输出状态，并同时观察示波器和万用表的测量结果是否同步变化。如果示波器的测量结果显示出振荡，请立即按 **OUTPUT** 键阻断输出端，避免强烈的振荡对 F2130 的损伤，而后关闭 F2130，并降低附加电阻 R_E 或增大附加电容 C_E ，直至振荡消失。调整附加 R_E 时请严格遵循由小至大的原则，并在操作 RC-Snubber 接口之前关闭 F2130。
- ⑩ 如果 F2130 输出端无振荡现象，将示波器的触发方式修改为“常规 Normal”，并调整触发电平至 0V。按 **OUTPUT** 键将输出端设置为正常输出状态，设置输出电流为 1.00000A，并连续按 **+/-** 键切换极性，示波器将捕捉并保持沿的波形。调整示波器横纵坐标尺度及位置至显示完整的过冲和振铃过程。由小至大不断增大附加电阻 R_E 的值，可由示波器观察到过冲幅度的降低和振铃减弱。减小附加电容 C_E 的电容值也有类似效果。

警告

负载电感值 L_{LOAD} 较大时，切勿过分追求完全消除过冲和振铃，某些情况下这将使 R_E 的电阻值增大至补偿不足的程度，反而可能导致 F2130 产生强烈的输出振荡，并可能造成仪器或与之连接的设备损毁。

3.17 内部功率过载和处理方法

3.17.1 四象限安全工作区 SOA

F2130 的四象限安全工作区 SOA 如图 3-18 所示。

I、III 象限内，F2130 可工作于 $|V_{OUT}|=0-60V$ ， $|I_{OUT}|=0-10A$ 范围内的任意一点，安全工作区为矩形。II、IV 象限内，安全工作区限制于内部输出级功耗约 700W 范围内。

3.17.2 内部功率过载保护

F2130 配置内部功率过载保护电路，当内部功率消耗达到约 700W 时，即超出安全工作区 SOA 时，保护电路动作，将输出端锁定为阻断状态，停止电流输出，直至使用键盘或计算机接口解除保护锁定。

内部功率过载保护电路在 F2130 输出级热耗散功率达到 700W 时动作。I、III 象限内，F2130 可在输出端短路时提供 10A 输出电流，因此通常无法触发内部功率过载保护电路动作。II、IV 象限内，即负电压正电流或正电压负电流工作时，F2130 的推挽输出级将可能最高承受 1100W，并触发保护电路动作。

保护电路动作时，F2130 进入由保护电路控制的输出端阻断状态，输出设置电流归零。电流线性渐变或电流扫描过程中进入保护状态时，F2130 将停止正在进行的渐变或扫描过程。进入保护状态后，操作者无法进行针对 F2130 的任何操作，直至通过前面板键盘或计算机接口解除保护。

图 3-18 F2130 的安全工作区 SOA

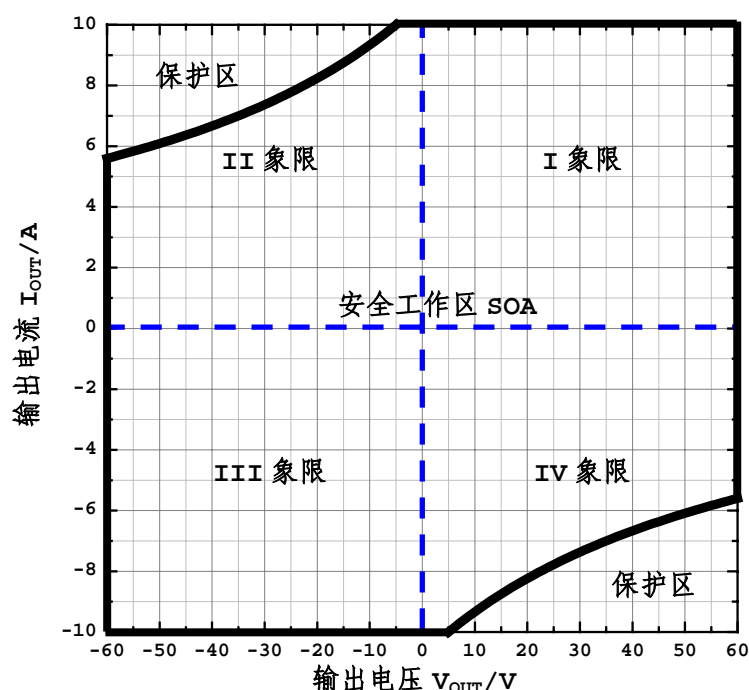


FIG-MAN-F2130-0037

进入保护状态后，F2130 前面板显示器显示保护信息，LED 指示器中的“OVERLOAD”指示灯点亮，并发出 5 声连续声响报警，如图 3-19 所示。

由保护电路控制的输出端阻断状态与操作者可设置的输出端状态无关，因此 F2130 内部记录的可设置的输出端状态以及前面板 LED 指示器中的“OUTPUT”指示灯状态不受保护电路动作影响。

图 3-19 内部功率过载保护下 F2130 的显示信息

- ☐ OUTPUT
- ☐ COMPLIANCE
- ☒ OVERLOAD
- ☒ RS-232C
- ☐ USB-232

OVERLOAD PROTECTION

Internal Overload
Detected.

ZERO-OUTPUT restored.

Esc = QUIT Protection.

FIG-MAN-F2130-0038

3.17.3 解除保护状态

进入保护状态后，无论键盘是否锁定，操作者均可在妥善处理输出端与负载的连接后按下前面板 **ESC** 键使 F2130 脱离保护状态。

解除保护状态也可通过计算机接口命令 **OVLD RST**[CR] 实现，并可通过查询 **OVLD?**[CR] 查询当前是否进入保护状态，请参阅第 5 章中的相关内容。

3.18 常规触发输出

F2130 提供 2 种触发输出功能，即用于常规电流设置的常规触发输出，以及在电流扫描过程中等时间间隔连续输出的扫描触发输出。

3.18.1 常规触发输出

瞬变响应模式下，F2130 立即响应对输出电流的设置，或者在渐变响应模式下，采用线性渐变方式处理输出电流的变化。在两种模式下，F2130 均可通过常规触发输出功能为用户提供电流响应完成的准确时刻，以对输出电流变化过程进行监测，并驱动其他仪器进行同步测量。

触发连接是一种高速触发总线，为 F2130 与其他仪器之间提供简单而准确的同步测量协调。触发连接可避免仪器固有测量时间以及计算机接口通讯导致的延迟，从而有效提高系统工作速率。

F2130 提供 3 种常规触发方式和可选的触发输出延时，以适应自动化测量的各种应用要求。同时 F2130 还提供触发输出声响提示功能用于监视仪器运行状态。

3.18.2 设置常规触发输出方式和触发延迟时间

TRIGGER 键用于设置触发输出方式，在两种响应模式下，请均遵循以下步骤设置常规触发：

- ❶ 标准显示界面下，按 **TRIGGER** 键进入触发设置菜单。按 **▲**、**▼** 方向键选择“Normal”，进入常规触发方式选择界面；
- ❷ 按 **▲**、**▼** 方向键循环显示“OFF”（关闭常规触发输出）、“ON”（常规触发输出）、和“ON+♪”（具有声响提示的常规触发输出）；
- ❸ 按 **ENTER** 键确认选择；或 ❹ 按 **ESC** 键保留原常规触发方式并返回标准显示界面；

选择“OFF”时，常规触发状态指示区无显示，F2130 不输出触发信号。

选择“ON”、或“ON+♪”时，常规触发状态指示区显示触发标志和相应的声响提示标志“♪”，并进入常规触发延迟时间设置界面，并遵循如下步骤设置常规触发延迟时间：

- ❺ 按 **◀**、**▶** 方向键选择调节位，并按 **▲**、**▼** 方向键在 0.000—10.000s 范围内增大或减小常规触发延迟时间，调整步进为 0.001s；
- ❻ 按 **ENTER** 键确认选择；或 ❼ 按 **ESC** 键保留原触发延迟时间并返回标准显示界面。

注

常规触发输出方式和延迟时间保存于 F2130 内部非易失性存储器内，并于下次开机时保持。

常规触发输出方式也可通过计算机接口命令 **NTRIG[CR]** 设置，并通过查询 **NTRIG?[CR]** 查询当前触发方式。命令 **NTRIGD[CR]** 和查询 **NTRIGD?[CR]** 分别用于设置和查询常规触发延迟时间，请参阅第 5 章中的相关内容。

3.18.3 常规触发输出时序

常规触发方式为“ON”或“ON+♪”时，输出端处于正常输出状态下，电流设置完成且输出电流变化过程结束后，经过设定的常规触发延迟时间，于后面板触发输出端口输出下降沿有效的触发信号。在“ON+♪”方式下，F2130 于触发信号输出时刻发出一次声响提示。如图 3-20 所示。

输出端处于正常输出状态下，任何使输出电流产生变化的操作，包括键盘、触发输入，以及通过计算机接口命令 **CUR[CR]**、**CURFUP[CR]**、**CURFDOWN[CR]** 和 **PN[CR]** 设置电流的大小和方向，F2130 均输出常规触发信号。通过计算机接口设置电流时，即使输出电流设置前后未发生变化，例如 2 次 **CUR[CR]** 的参数相同，F2130 同样输出常规触发信号。此外，输出状态由阻断状态切换至正常输出时，如果电流设置值不为零，F2130 将根据当前响应模式使输出电流达到设置值，并输出触发信号。

图 3-20 常规触发输出时序

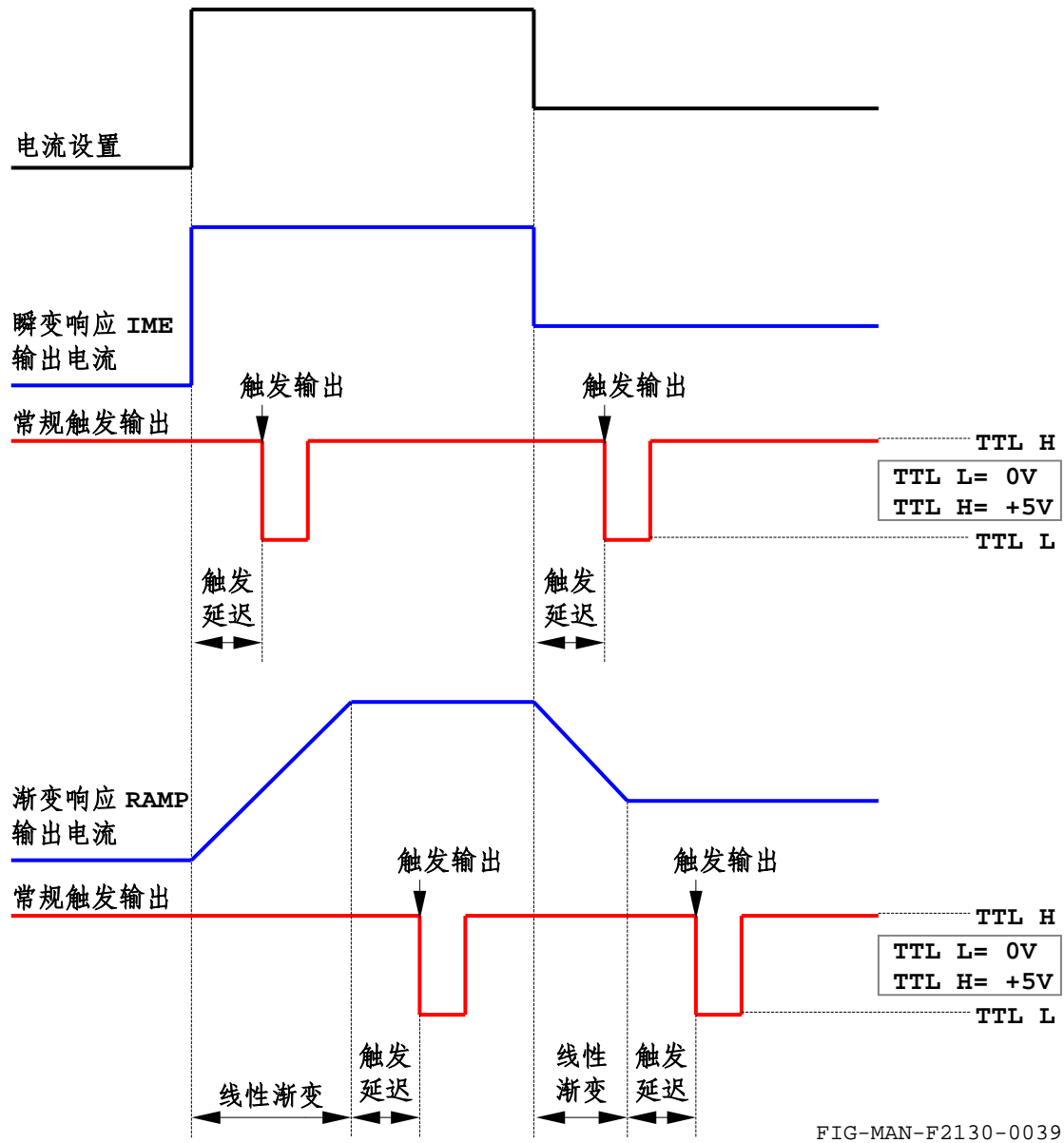
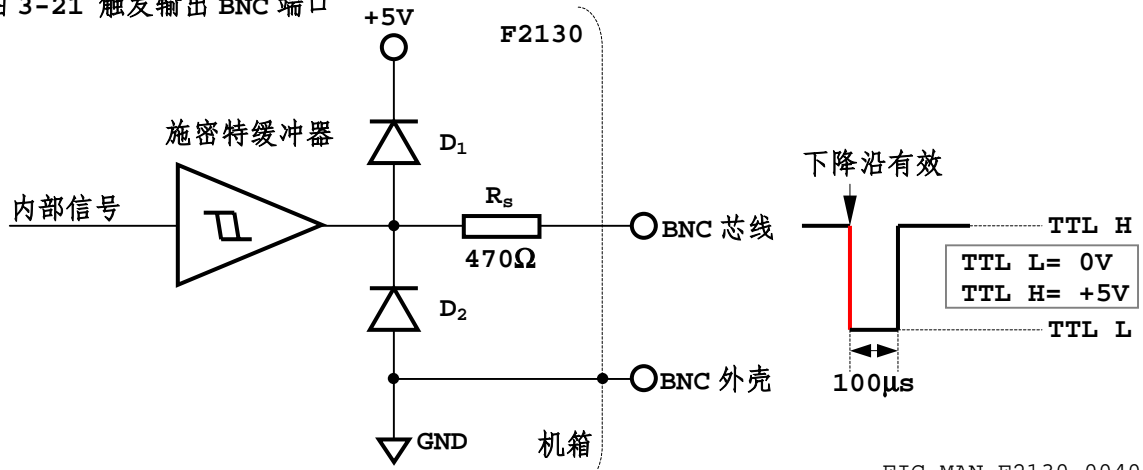


图 3-21 触发输出 BNC 端口



输出端处于阻断状态下，F2130 对于针对电流的操作不输出常规触发信号。
在两种响应模式下，常规触发模式及其延迟时间均显示于显示器下方。

注

常规触发延迟时间内再次设置电流，本次触发输出失效，并由本次电流变化过程完成时刻起，再次经过触发延迟时间后输出触发信号。

3.18.4 触发输出端口

F2130 的触发输出端口使用 TTL 电平，下降沿触发有效。触发输出端口在等待时间内保持高电平，输出触发下降沿后，低电平保持时间为 $100\mu\text{s}$ ，而后恢复至高电平。触发输出端口输出阻抗为 470Ω ，如图 3-21 所示。为避免明显的电平衰减，连接于触发输出端口的负载输入阻抗应大于 $10\text{k}\Omega$ ，以保证触发设备可正确识别电平。触发输出端口可耐受的外部施加的最大电平范围为 $\pm 15\text{V}$ 。

警告

为保证操作者人身安全，以及仪器内部电路安全，请务必限制触发输出端口电平位于 -15V — $+15\text{V}$ 范围之内。

3.19 扫描触发输出

3.19.1 扫描触发输出

渐变响应模式下，进入电流扫描状态后，F2130 依据扫描模式、扫描最大值和线性渐变速率执行完整的扫描过程。在此期间，除针对扫描过程的暂停、继续和中止操作外，F2130 无法响应其他操作。电流扫描功能通常针对需要磁场扫描并在扫描中进行连续测量的应用。

在这些应用中，其他多台测量仪器在扫描过程中以一定的时间间隔连续测量磁场以及随磁场变化的其他参数，例如电阻和磁矩。通过计算机接口的统一操作，可在一定程度上达成测量的同步性，但接口自身的通讯延迟又可能破坏 F2130 之外的磁场测量仪器和另一台测量仪器的同步性，从而使测量曲线以磁场为水平轴出现向左或向右的平移。平移程度和方向由磁场扫描速率、2 台仪器测量时刻的差异和测量先后顺序决定。如图 3-22 所示。

图 3-22 通讯延迟造成的测量时差 Δt

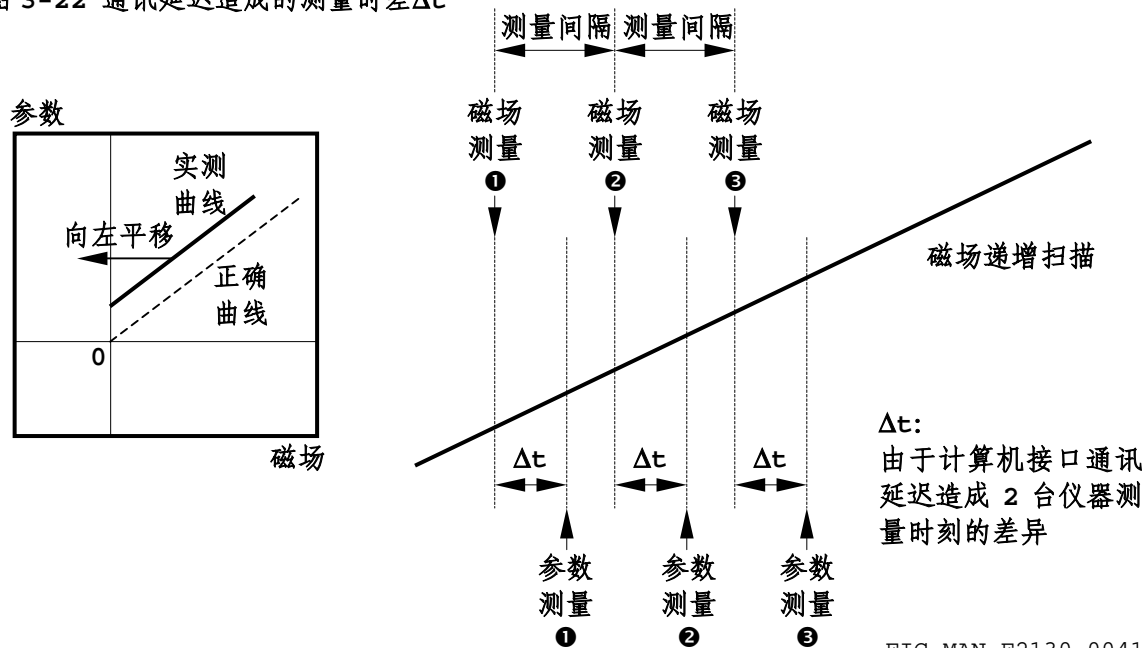


FIG-MAN-F2130-0041

磁场扫描速率愈大，通讯延迟时间愈长，曲线的平移现象愈明显。正向磁场递增扫描过程中，

磁场测量先于参数测量时，曲线向左移动，其它扫描过程中的曲线移动方向类推。

为应对此问题，F2130 提供扫描触发输出功能。开启此功能后，F2130 以设定时间间隔连续输出的触发信号驱动具有外部触发输入功能的多台测量仪器在触发时刻进行同步测量。

注

扫描触发输出与常规触发输出共用触发输出端口

3.19.2 设置扫描触发输出方式和触发时间间隔

扫描触发输出方式设置步骤如下：

- ① 标准显示界面下，按 **TRIGGER** 键进入触发设置菜单。按 **▲**、**▼** 方向键选择“Sweep”，进入扫描触发方式选择界面；
- ② 按 **▲**、**▼** 方向键循环显示“OFF”（关闭扫描触发输出）、“ON”（扫描触发输出）、和“ON+♪”（具有声响提示的扫描触发输出）；
- ③ 按 **ENTER** 键确认选择；或 ④ 按 **ESC** 键保留原扫描触发方式并返回标准显示界面；选择“OFF”时，扫描触发状态指示区无显示，F2130 在电流扫描期间不输出触发信号。

选择“ON”、或“ON+♪”时，扫描触发状态指示区显示触发标志和相应的声响提示标志“♪”，并进入触发时间间隔设置界面，并遵循如下步骤设置扫描触发时间间隔：

- ⑤ 按 **◀**、**▶** 方向键选择调节位，并按 **▲**、**▼** 方向键在 0—10.0s 范围内增大或减小触发时间间隔，调整步进为 0.1s；
 - ⑥ 按 **ENTER** 键确认选择；或 ⑦ 按 **ESC** 键保留原触发时间间隔并返回标准显示界面。
- 渐变响应模式下，扫描触发输出的设置及其延迟时间显示于 LCD 显示器顶行。

注

扫描触发输出方式和触发时间间隔保存于 F2130 内部非易失性存储器内，并于下次开机时保持。

扫描触发输出方式也可通过计算机接口命令 **SWTRIG[CR]** 设置，并通过查询 **SWTRIG?[CR]** 查询当前触发方式。命令 **SWTRIGINT[CR]** 和查询 **SWTRIGINT?[CR]** 分别用于设置和查询扫描触发时间间隔，请参阅第 5 章中的相关内容。

图 3-23 SWB 模式下的扫描触发输出时序

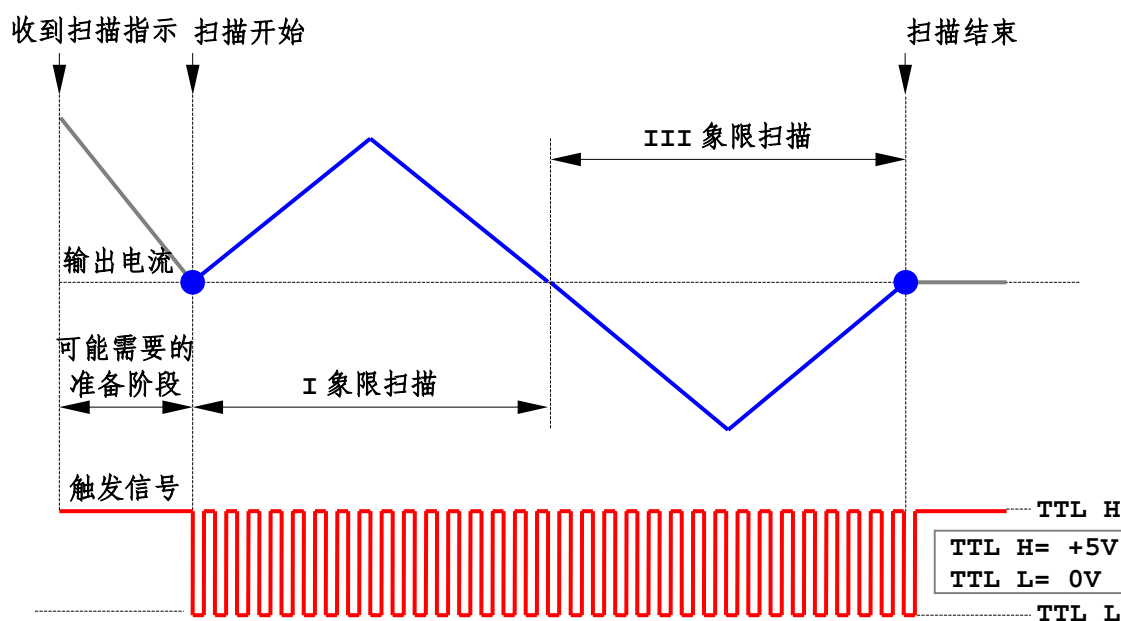


FIG-MAN-F2130-0042

3.19.3 扫描触发输出时序

扫描开始后，F2130 以设定的扫描触发时间间隔连续输出下降沿有效的触发信号，但在可能的准备阶段不输出触发信号，以保证触发信号与完整扫描过程的同步。SWB 模式下的扫描输出时序如图 3-23 所示，SWA、SWC 和 SWD 模式下的时序类推。

开启扫描触发功能后，无论使用前面板键盘，或使用计算机接口命令 **SWEEP[CR]** 开启电流扫描，F2130 均输出扫描触发信号。

扫描暂停时，扫描触发信号随之暂停输出，并在扫描继续时刻起恢复。如果扫描过程中止，扫描触发信号随之停止输出。

F2130 可提供的最小触发时间间隔为 0.1s，对应最大触发输出密集度为 10 次/s，即测量仪器每秒获得 10 个数据点。扫描速率为 2A/s、最大扫描值为 10A 的情形下，用户在一个象限扫描的一次递增或递减过程中可获取 50 个数据点。

3.19.4 降低测量时长差异导致的扫描测量误差

扫描触发输出可避免由于计算机接口通讯延迟导致的同步问题，然而在实际应用中，用于磁场测量的高斯计和用于测量其他参数的仪器，例如台式万用表和锁定放大器均具有必需的测量时长要求。测量时长与仪器内部电路采样方式和数据处理速度有关。例如具有外部触发输入功能的高斯计 F1206，其触发测量时长为 20ms，而台式万用表 Keithley 2000 在 6 1/2 位低速模式下的触发测量时长约为 200ms，中速模式下为 20ms，设置时间常数为 100ms 的锁定放大器在外部触发测量模式下获得采样值并处理为稳定读数的时间约为 150ms。

测量时长的差异同样将导致测量曲线的平移。但可通过以下措施最大程度缓解此一问题：

- (1) 使用测量时长尽量短的仪器。
- (2) 尽量使用相同或相近测量时长的仪器组合，例如 F1206 与 Keithley 2000 在 6 1/2 位中速模式下的组合。
- (3) 无法保证仪器之间相同或相近测量时长且系统中存在低速仪器时，使用尽量低的扫描速率，以保证最大测量时长内磁场变化率不致导致测量曲线的明显平移。例如设置电流线性渐变速率为 0.01A/s，且 10A 可驱动亥姆霍兹线圈产生 300G 磁场时，200ms 测量时长内的电流变化为 2mA，对应磁场变化 0.06G，即满幅磁场的 0.02%。

3.19.5 根据仪器测量时长正确设置触发时间间隔

扫描触发时间间隔应大于系统中最低速仪器的测量时长，以保证触发测量数据点的严格对应关系。在大多数具有外部触发输入功能的测量仪器中，一次触发测量未结束时即接收到下一次触发信号将导致本次触发测量结果失效，或者下次触发信号失效。二者之一均将导致与其他测量仪器数据点的对应关系混乱，并在测量曲线上表现为非正常的曲线波动和平移。





3.20 触发输入

F2130 内部配置 3 组设置值存储器，每组存储器的存储深度为 1024 设置值，请参阅 3.20 中的详细内容。设置值存储器用于通过触发输入源对输出电流进行操作。F2130 可使用 3 种触发输入源产生触发信号。

3.20.1 触发输入源

F2130 可使用外部触发信号、接口和键盘 3 种触发源产生触发信号，并操作输出电流按照设置值存储器中保存的电流值依次输出。设置步骤如下：

- ❶ 标准显示界面下，按 **TRIGGER** 键进入触发设置界面；

- ② 按 、 方向键循环显示 “Input”（触发输入源）和 “Output”（触发输出）；
- ③ 至 “Input” 时按 **ENTER** 键确认，进入触发输入源设置界面；
- ④ 按 、 方向键循环显示 “OFF”（关闭触发输入）、“EXTERNAL BNC”（外部触发）、“INTERFACE”（接口触发）和 “SINGLE KEY”（键盘触发）；
- ⑤ 按 **ENTER** 键确认选择；或 ⑥ 按 **ESC** 键保留原触发输入源并返回标准显示界面。

瞬变响应模式下，选择输入源后，显示器左上角根据所选项对应显示 “OFF”（关闭 OFF）、“BNC”（外部触发 EXTERNAL BNC）、“INT”（接口触发 INTERFACE）和 “KEY”（键盘触发 SINGLE KEY）。

瞬变响应模式下，选择外部触发时，F2130 接收由后面板触发输入 BNC 接口输入的 TTL 电平触发信号，并于触发信号下降沿时刻依据设置值存储器中保存的电流值改变输出电流，并累进设置值存储器的触发指针位置。外部触发信号在输出端状态为正常输出状态时有效，当输出端为阻断状态时，F2130 忽略外部触发信号。触发指针请参阅 3.20 中的详细内容。选择接口触发时，使用计算机接口命令 **TRIGGER**[CR] 完成 1 次触发，选择键盘触发时，按下前面板 **SINGLE** 键完成 1 次触发，或按住 **SINGLE** 键实现连续触发。接口触发和键盘触发在输出端状态为正常输出状态时，立即依据设置值存储器中保存的电流值改变输出电流，并将设置值存储器的触发指针位置累进，输出端状态为阻断状态时接口触发和键盘触发无效。触发指针请参阅 3.20 中的详细内容。

切换响应模式时，F2130 自动将外部触发源恢复为 “OFF”。

渐变响应模式下，即使将外部触发源设置为除 “OFF” 之外的任意一种，F2130 也不响应任何触发输入源的触发信号。

触发输入源也可通过计算机接口命令 **TRIGIN**[CR] 进行选择，并通过查询 **TRIGIN?**[CR] 查询当前触发输入源。请参阅第 5 章中的相关内容。

注

触发输入源于开机时恢复为 OFF，以避免可能的内部或外部初始化过程中可能出现的任何误触发。

3.20.2 外部触发

触发输入源由其他选项切换至外部触发时，F2130 立即由设置值存储器读取首次触发所需数据，首次触发时立即依据此数据改变输出电流，并由设置值存储器读取下一次触发所需数据并加以处理，以备下一次触发时立即据此改变输出电流，而无需在下一次触发开始后耗时读取和处理数据，因此可保证较高的实时性，如图 3-24 所示。由触发信号下降沿时刻至输出电流设置完成，所需时间为固有触发延迟时间，小于 50μs。此时间不包含 F2130 功率输出级针对不同负载的响应时间，由触发信号下降沿时刻至输出电流上升或下降沿完成的时间与负载相关。

由于读取并处理下一次触发所需数据仍需耗费一定时间，外部触发输入的最高频率仍受到限制。F2130 可接收的外部触发输入信号最高频率为 5kHz，即两次相邻触发之间至少应相隔 200μs。高于此频率时，可能出现触发信号下降沿时刻到达时，F2130 仍未完成上次触发过程中对本次触发数据的读取和处理，F2130 将忽略此下降沿并等待下一次下降沿。

基于外部触发的高实时性，F2130 可使用信号发生器作为触发源，以较高的时间和频率准确度实现特定的电流波形输出，例如方波、正弦波、三角波或锯齿波，以及可编辑的任意电流波形。

当电流波形的频率较高时，需考虑 F2130 针对不同类型负载的输出响应。尤其，对于正弦波而言，F2130 的输出响应直接代表其输出级针对不同类型负载的频率响应。对于电阻或电容负载，此频率响应在平直段结束时存在 -3dB 转折频率，而后以 -20dB/DEC 的速度滚降，-3dB 频率与负载的电阻/电容以及 F2130 输出补偿网络中的电阻/电容相关。

对于电感负载 L_{LOAD} ，其与 F2130 输出补偿网络中的电容共同产生某一谐振频率 f_R ，频率响应曲线平直段之后开始上升，至谐振频率 f_R 后快速滚降。其中：

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{LOAD}C}} \quad (C=10\mu F)$$

通过 RC-Snubber 接口连接附加电容 C_E 时，应将 C_E 计入 C 内。

注

较高的输出波形频率和较高的输出电压幅值可能触发 F2130 的振荡报警器报警。

图 3-24 外部触发输入的处理时序

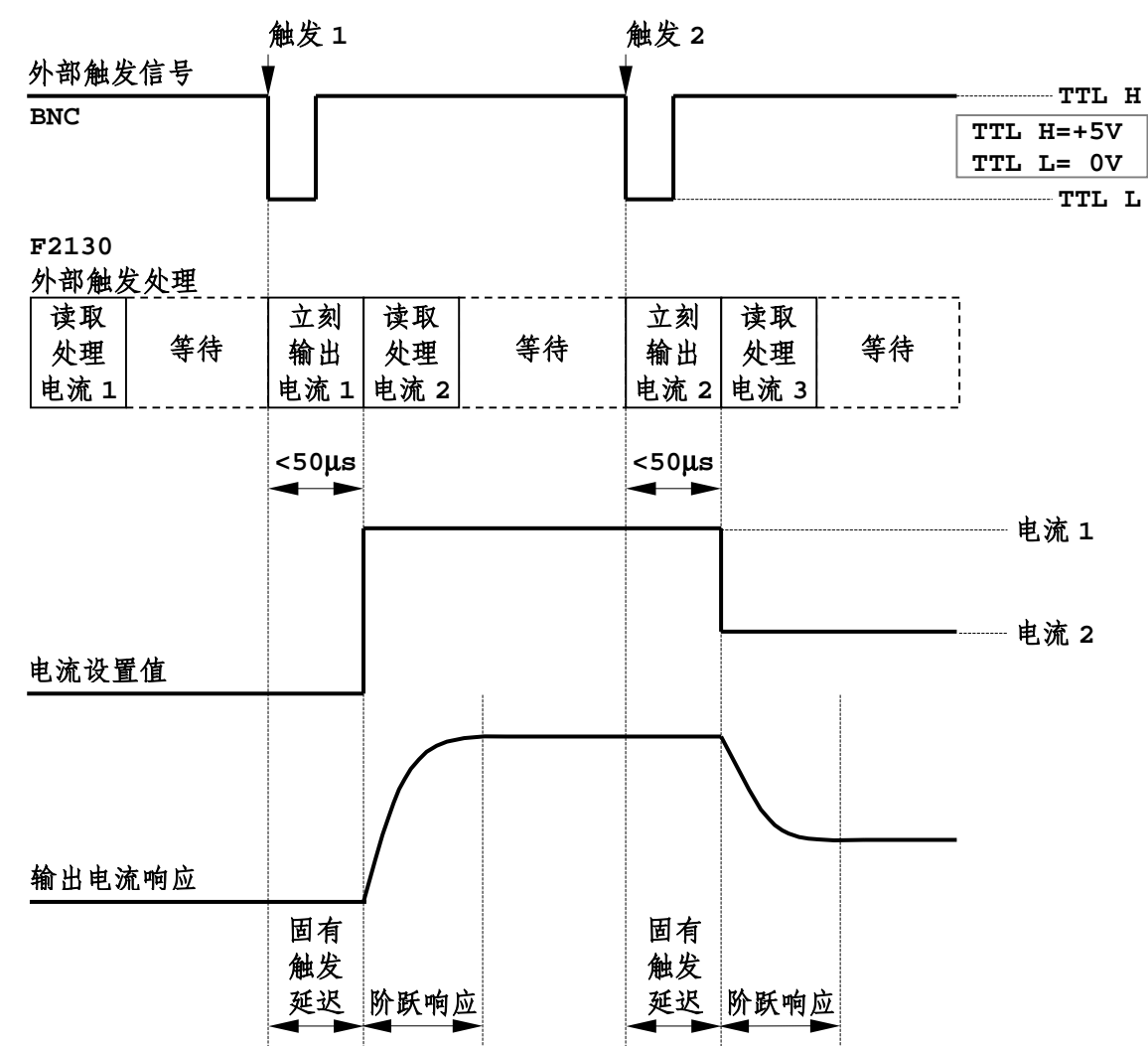


FIG-MAN-F2130-0043

图 3-25 外部触发输入端口

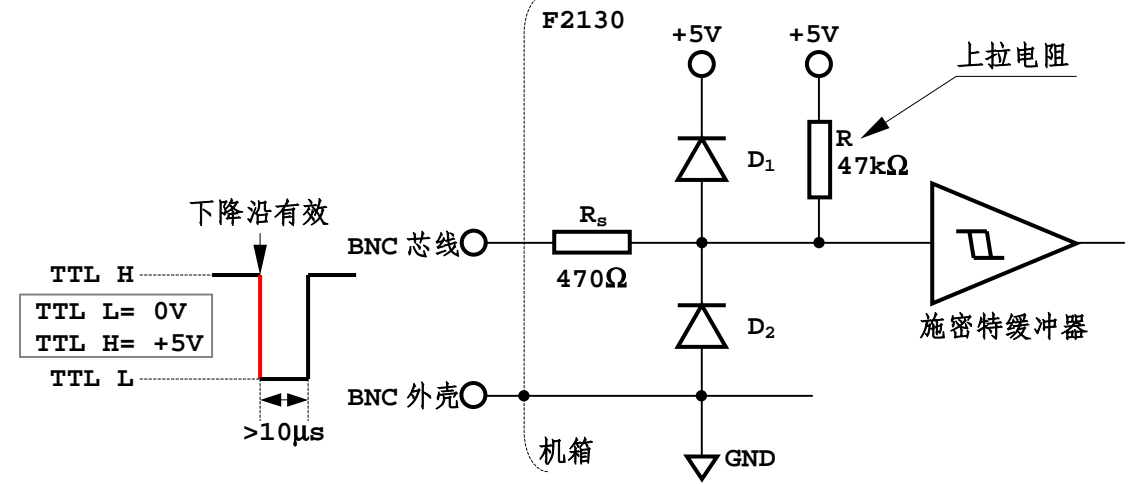


FIG-MAN-F2130-0044

F2130 的外部触发输入 BNC 端口使用 TTL 电平，下降沿触发有效。触发输入端口在未连接外部触发信号时由 F2130 内部上拉电阻保持高电平，触发输入信号下降沿后，低电平保持时间应不低于 $10\mu\text{s}$ ，以保证可靠触发。触发输入端口上拉为 $47\text{k}\Omega$ ，如图 3-25 所示。为避免明显的电平衰减，连接于触发输入端口的信号源阻抗应不大于 $1\text{k}\Omega$ ，以保证触发设备可正确识别电平。触发输入端口可耐受的外部施加的最大电平范围为 $\pm 15\text{V}$ 。

警告

为保证操作者人身安全，以及仪器内部电路安全，请务必限制触发输入端口电平位于 -15V — $+15\text{V}$ 范围之内。

3.20.3 接口触发

选择接口触发时，由计算机发送 **TRIGGER**[CR] 完成至 F2130 电流设置完成所需时间由 3—8ms 不等，具体时长与 F2130 接收到此接口命令的时机有关。此时间包括 F2130 对接口命令的识别和处理时间、读取并处理本次触发所对应的设置值存储器中的数据所需时间、设置输出电流以及 F2130 完成其他功能所必须占用的时间，不包含 F2130 功率输出级针对不同负载的响应时间。

由于 F2130 无法准确保证接口触发的延迟时间，因此不建议通过接口触发方式产生频率要求较高的电流波形。

配合触发输出及其可设置的延迟时间，接口触发可配合多个外部设备实现较高实时性的复杂的源测量应用。在此类应用中，对于触发的实时性要求不高，但对于由输出电流设置完成至外部设备开始测量之间的时间，以及各外部设备开始测量时间之间的差异要求严格。

例如 2 台外部分别测量由 F2130 输出电流施加于线圈上所产生的磁场，以及由此磁场产生的对样品的二次效应，例如霍尔效应或磁电阻效应，此应用对于 F2130 何时改变输出电流并不敏感，但对于由输出电流变化时刻至外部设备开始测量时刻之间的时间，以及 2 台外部设备之间的同步性要求严格。类似的应用还包括低电阻差分测量和微分电阻测量。

在这些应用中，可省略用于触发 F2130 的外部触发源，而只使用计算机接口完成触发。一系列的接口触发命令 **TRIGGER**[CR] 依据设置值存储器使 F2130 依次输出设定的电流，构成复杂的电流输出曲线，简化计算机控制流程。

3.20.4 键盘触发

键盘触发通过按下前面板 **SINGLE** 键完成 1 次触发，或者按住 **SINGLE** 键进行连续触发。由于键盘控制的特殊性，键盘触发的延迟时间较长，通常不低于 30ms，不具有实时性。键盘触发仅用于核验设置值存储器中内容的正确性，或设备联调，也可用于简单的筛选或手工测量。

3.21 设置值存储器

3.21.1 存储器结构

F2130 配置 3 组设置值存储器 G0、G1 和 G2，各存储器组存储深度为 1024 设置值。F2130 为当前选定存储器组分配触发指针和不占用存储器空间的头部 head，用于指示最后一次触发所对应的电流设置值，触发指针指向头部表示下一次触发完成后输出电流设置为 I_1 。如图 3-26 所示。

3.21.2 选择存储器组

F2130 内部配置 3 组相互独立的设置值存储器 G0、G1 和 G2，对于设置值存储器的操作，包括触发指针返回头部、添加设置值和清除存储器组，均只针对当前所选存储器组。重复方式的设置适用于所有存储器组，与所选存储器组无关。存储器组选择步骤如下：

- ① 标准显示界面下，按 **MEMORY** 键进入设置值存储器设置界面；

图 3-26 设置值存储器结构和触发指针（选择 G0）

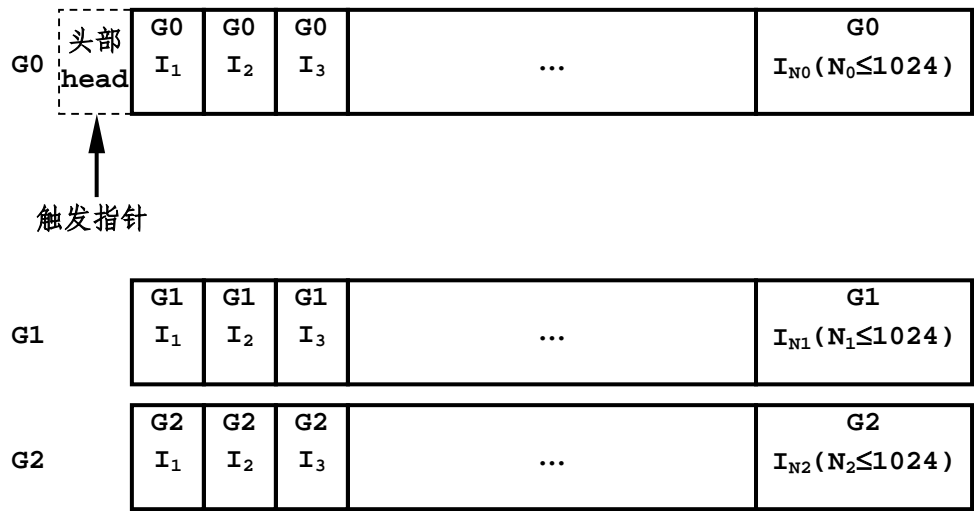


FIG-MAN-F2130-0045

- ② 按 **▲**、**▼** 方向键循环显示各选项；
- ③ 至“Select Group”时按 **ENTER** 键选择，进入选择存储器组界面；
- ④ 按 **▲**、**▼** 方向键循环显示 4 个存储器组 G0、G1 和 G2；
- ⑤ 按 **ENTER** 键确认选择；或 ⑥ 按 **ESC** 键保留存储器组并返回标准显示界面。

当前存储器组变更时，F2130 读取新选择存储器组中保存的设置值数量，并将触发指针返回至头部。前面板显示器上方显示为“----/NNNN Gx”，其中“Gx”为新选择存储器组编号，“----”表示触发指针已返回头部，“NNNN”为当前存储器组长度。存储器组不变时，F2130 不更改触发指针位置。

选择存储器组也可通过计算机接口命令 **MEMGROUP**[CR] 达成，并通过查询 **MEMGROUP?**[CR] 查询当前选择的存储器组。请参阅第 5 章中的相关内容。

注

当前存储器组编号保存于 F2130 内部非易失性存储器内，并于下次开机时保持。

3.21.3 触发指针返回头部

触发指针指向头部 head 仅用于表示触发指针位置指向第 1 个设置值 I_1 之前，头部 head 仅分配给当前存储器组，但并不占用当前存储器组空间。下一次触发完成后，触发指针由头部累进至第 1 个设置值 I_1 ，表示已执行完成 I_1 ，即输出电流设置值为 I_1 ，后续类推。

可通过前面板键盘强制当前存储器组的触发指针返回头部 head，步骤如下：

- ① 标准显示界面下，按 **MEMORY** 键进入设置值存储器设置界面；
- ② 按 **▲**、**▼** 方向键循环显示各选项；
- ③ 至“Back To Head”时按 **ENTER** 键选择，进入返回头部的确认界面；
- ④ 按 **ENTER** 键确认；或 ⑤ 按 **ESC** 键保留当前触发指针位置并返回标准显示界面。

触发指针返回头部也可通过计算机接口命令 **MEMHEAD**[CR] 达成。请参阅第 5 章中的相关内容。

上电后，触发指针指向头部。此外，选择存储器组、添加设置值、改变重复方式、清除存储器组和清除全部存储器后，F2130 均自动将触发指针返回头部。

触发指针返回头部后，前面板显示器上方显示为“----/NNNN”，其中“----”表示触发指针已返回头部，“NNNN”为当前存储器组长度， $NNNN \leq 1024$ 。当 $NNNN > 0$ ，即当前组非空时，触发指针返回头部后的第 1 次触发完成后，触发指针累进，显示更改为“0001/NNNN”，表示已执行第 1 个设置值 I_1 ，当前输出电流设置值为 I_1 。

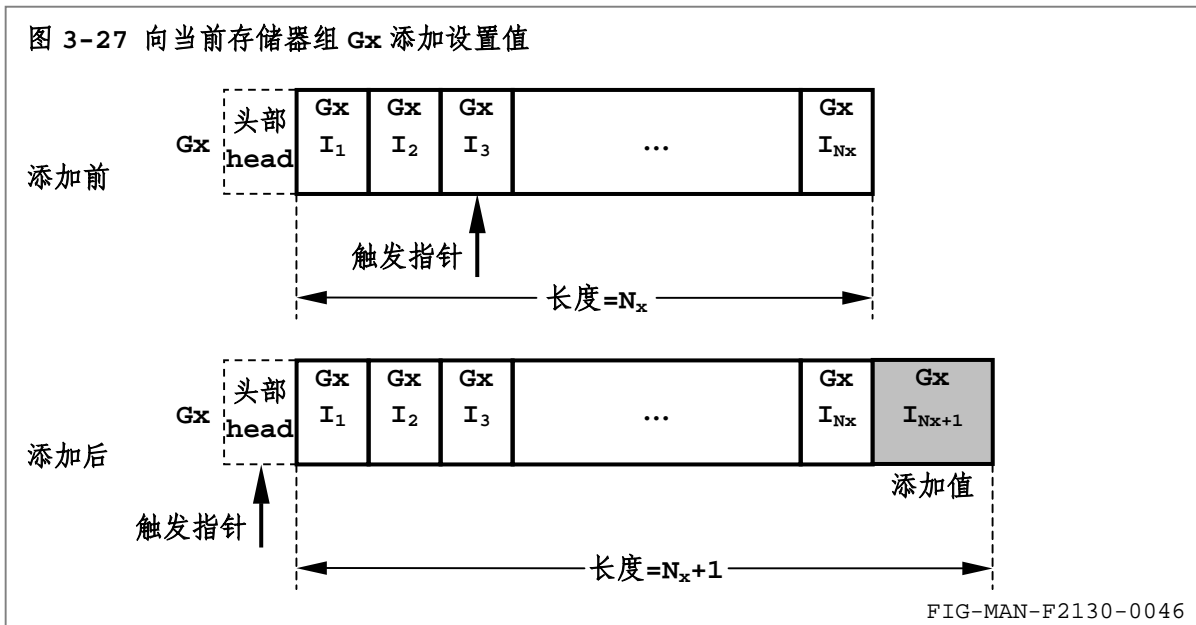
3.21.4 添加设置值

通过前面板键盘或计算机接口设置输出电流值后，无论输出端状态为正常输出状态或阻断状态，均可将当前电流设置值添加至当前存储器组。步骤如下：

- ① 通过前面板键盘或计算机接口设置输出电流值，请参阅 3.5 和第 5 章中的详细内容；
- ② 标准显示界面下，按 **MEMORY** 键进入设置值存储器设置界面；
- ③ 按 **▲**、**▼** 方向键循环显示各选项；
- ④ 至“Add Point”时按 **ENTER** 键选择，进入添加设置值的确认界面；
- ⑤ 按 **ENTER** 键确认添加；或 **ESC** 键放弃添加设置值并返回标准显示界面。

确认添加后，如果当前存储器组的长度达到 1024，F2130 将进入存储器组全满报警界面，并显示“GPx Full, Add Aborted, Press ESC to exit”，其中“x”为当前存储器组编号。此时⑦按 **ESC** 键退出并返回标准显示界面。

成功添加设置值后，当前电流设置值添加至当前存储器组尾部，当前存储器组的长度加 1，触发指针返回至头部，如图 3-27 所示。放弃添加设置值或者由于存储器组全满无法添加设置值时，触发指针位置不变。



也可通过计算机接口命令 **MEMADD[CR]** 和 **MEMADDVALUE[CR]** 向当前存储器组添加设置值，其中命令 **MEMADDVALUE[CR]** 为有参数命令，可将参数作为设置值添加至当前存储器组。此外可通过查询 **MEMLLEN?[CR]** 查询当前存储器组的长度。请参阅第 5 章中的相关内容。

3.21.5 设置重复方式

对于当前存储器组 F2130 提供 2 种重复方式，循环“LOOP”和单向“ONCE”。设置步骤如下：

- ① 标准显示界面下，按 **MEMORY** 键进入设置值存储器设置界面；
- ② 按 **▲**、**▼** 方向键循环显示各选项；
- ③ 至“Repeat Mode”时按 **ENTER** 键选择，进入重复方式设置界面；
- ④ 按 **▲**、**▼** 方向键循环显示“Loop（循环）”和“Once（单向）”；
- ⑤ 按 **ENTER** 键确认选择；或 **ESC** 键保留原重复方式并返回标准显示界面。

设置完成后，F2130 根据所选重复方式，于前面板显示器右上方显示“LOOP”或“ONCE”。

注

重复方式发生变更后，F2130 强制将触发指针返回头部。

注

重复方式保存于 F2130 内部非易失性存储器内，并于下次开机时保持。

循环 LOOP 方式下，当触发指针位置为当前存储器组尾部 I_{Nx} 时，下一次触发完成后，触发指针指向 I_1 ，即输出电流设置值为 I_1 。如图 3-28 所示。

图 3-28 循环 LOOP 重复方式

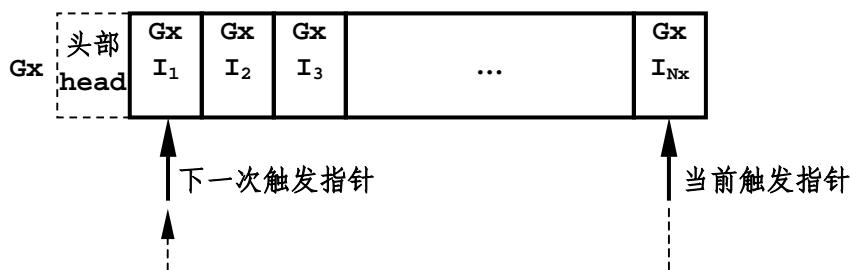


FIG-MAN-F2130-0047

配合外部触发源，循环 LOOP 方式可用于产生周期性变化的电流输出曲线，例如频率较低的正弦波、三角波或方波，或者其他任意重复波形，也可用于多次重复的源测量应用。

单向 ONCE 方式下，当触发指针位置为当前存储器组尾部 I_{Nx} 时，其后的触发不会变更触发指针位置，输出电流设置值保持于 I_{Nx} ，直至强制触发指针返回头部。对于某些脆弱的负载，或者可能产生回滞效应的场合，单向方式可避免触发指针返回头部对样品安全的威胁，或者对样品状态的更改。此外，在设备联调中，单向方式可最大程度避免可能产生的意外情况。

注

重复方式与所选存储器组无关。选定的重复方式将应用于所有存储器组。

设置重复方式也可通过计算机接口命令 `MEMREPEAT[CR]` 达成，并使用查询 `MEMREPEAT?[CR]` 查询当前重复方式。请参阅第 5 章中的详细内容。

3.21.6 清除存储器组

使用以下步骤清除当前存储器组中的内容：

- ❶ 标准显示界面下，按 `MEMORY` 键进入设置值存储器设置界面；
- ❷ 按 `▲`、`▼` 方向键循环显示各选项；
- ❸ 至“Clear Group”时按 `ENTER` 键选择，进入清除存储器组的确认界面；
- ❹ 按 `ENTER` 键确认清除；或 ❶ 按 `ESC` 键放弃清除并返回标准显示界面。

警告

清除存储器组后，当前存储器组中的内容将无法恢复。

成功清除当前存储器组后，存储器组长度为 0，触发指针返回至头部。前面板显示器上方显示为“----/0000 Gx”，其中“Gx”为当前存储器组编号，“----”表示触发指针已返回头部，“0000”表示当前存储器组长度为 0。

也可使用计算机接口命令 `MEMCLEARGROUP[CR]` 清除当前存储器组的内容。请参阅第 5 章中的相关内容。

3.21.7 清除全部存储器

使用以下步骤清除全部 3 个存储器组中的内容：

- ❶ 标准显示界面下，按 `MEMORY` 键进入设置值存储器设置界面；
- ❷ 按 `▲`、`▼` 方向键循环显示各选项；
- ❸ 至“Clear All”时按 `ENTER` 键选择，进入清除全部存储器的确认界面；

- ④ 按 **ENTER** 键确认清除；或 ⑤ 按 **ESC** 键放弃清除并返回标准显示界面。

警告

清除全部存储器后，所有存储器组中的内容将无法恢复。

成功清除全部存储器后，各存储器组长度均为 0，当前存储器组的触发指针返回至头部。前面板显示器上方显示为“----/0000 Gx”，其中“Gx”为当前存储器组编号，“----”表示触发指针已返回头部，“0000”表示当前存储器组长度为 0。

也可使用计算机接口命令 **MEMCLEAR** [CR] 清除全部存储器内容。请参阅第 5 章中的相关内容。

3.22 振荡检测和处理

3.22.1 振荡和报警

即使配备输出补偿网络，面对强电感性或负阻性负载，或者用户配置的补偿网络不恰当时，F2130 仍有可能由于频率稳定性而产生振荡。振荡由 F2130 内部电流源与外部负载共同产生的相位差造成，当此相位差在某一频率使 F2130 内部电路的相位裕量不足以发生正反馈时，F2130 的输出端可能产生有害且十分强烈的自激振荡，振荡的幅度和频率与负载的频率特性相关，同时与 F2130 内部电路的偏置水平相关，并因此也可能与电流设置值有关。微弱的振荡可能呈现直流稳态输出电流上叠加的较小幅度的正弦波，强烈的振荡则体现为规则或不规则的大幅度周期波形。

警告

微弱振荡将提高输出噪声并造成输出电流准确度降低，以及造成其他以 F2130 为激励源进行测量的测量仪器读数跳动。强烈的振荡可能造成负载和仪器损毁。

F2130 内部集成振荡检测电路，可检测微弱的振荡。输出振荡时，根据振荡报警方式设置，F2130 可于前面板显示器右下方闪烁显示“OSC”，或者同时发出连续短声讯报警。

注

较高的输出波形频率和较高的输出电压幅值可能触发 F2130 的振荡报警器报警。

由于使用外部触发方式操作设置值存储器可控制 F2130 产生周期性的输出电流曲线，并可能触发 F2130 的振荡检测电路产生误报警，确认当前负载不会导致 F2130 输出端产生任何自激振荡后，可通过选择振荡报警方式关闭报警、只闪烁显示“OSC”或闪烁显示“OSC”的同时发出声响报警。步骤如下：

- ① 标准显示界面下，按 **MENU** 键进入主菜单；
- ② 按 **▲**、**▼** 方向键循环显示各选项；
- ③ 至“OSC Warning”时按 **ENTER** 键选择，进入振荡报警设置界面；
- ④ 按 **▲**、**▼** 方向键循环显示 Off（关闭报警）、Flash Only（只闪烁显示）和 Flash+J（闪烁显示和声响报警）；
- ⑤ 按 **ENTER** 键确认选择；或 ⑥ 按 **ESC** 键保留原报警方式并返回标准显示界面。

输出振荡报警方式可通过计算机接口命令 **OSCWARNING** [CR] 设置，并使用查询 **OSCWARNING?** [CR] 查询当前重复方式，请参阅第 5 章中的相关内容。

3.22.2 振荡的处理

产生输出振荡时，请首先按 **OUTPUT** 键使输出端切换至阻断状态，避免振荡损毁负载和 F2130 内部电路。而后检查后面板 RC-Snubber 接口是否牢固连接，以及在 RC-Snubber 接口增加必要的补偿元件，或者更换负载，并再次按 **OUTPUT** 键切换输出端为正常输出模式，并查看是否仍然产生报警。RC-Snubber 接口及其操作请参阅 3.16 中的详细内容。

对于负阻性负载，在输出电压允许范围内串联适当阻值的大功率电阻可使 F2130 输出端面对的实际负载呈现正电阻，从而减小自激振荡的可能性。

输出振荡状态可通过计算机接口查询 `OSC?[CR]` 获取，请参阅第 5 章中的相关内容。

3.23 外部负载保护

F2130 后面板配置的负载保护 BNC 接口用于对负载进行保护。

3.23.1 开启和关闭负载保护功能

标准显示界面下，请遵循以下步骤开启和关闭负载保护功能：

- ❶ 使用 `MENU` 键进入菜单，按 `▲`、`▼` 方向键选择“Protection”并按 `ENTER` 键进入负载保护功能设置界面；
- ❷ 按 `▲`、`▼` 方向键键循环显示“Off”（关闭负载保护）和“N.C.”（常闭型开关保护）；
- ❸ 按 `ENTER` 键确认选择；或 ❹ 按 `ESC` 键保留原速率并返回标准显示界面。

注

负载保护功能设置保存于 F2130 内部非易失性存储器内，并于下次开机时保持。

也可通过计算机接口命令 `LOADP` 开启或关闭负载保护功能，并由查询 `LOADP?` 查询负载保护功能是否开启，以及 `LOADPS?` 查询 F2130 是否进入负载保护状态。

3.23.2 负载保护接口的输入端

F2130 的负载保护接口可识别开关输入或 TTL 电平输入信号。输入端为使用上拉电阻的 TTL 电平施密特缓冲器输入，如图 3-29 所示。

图 3-29 负载保护接口的输入端

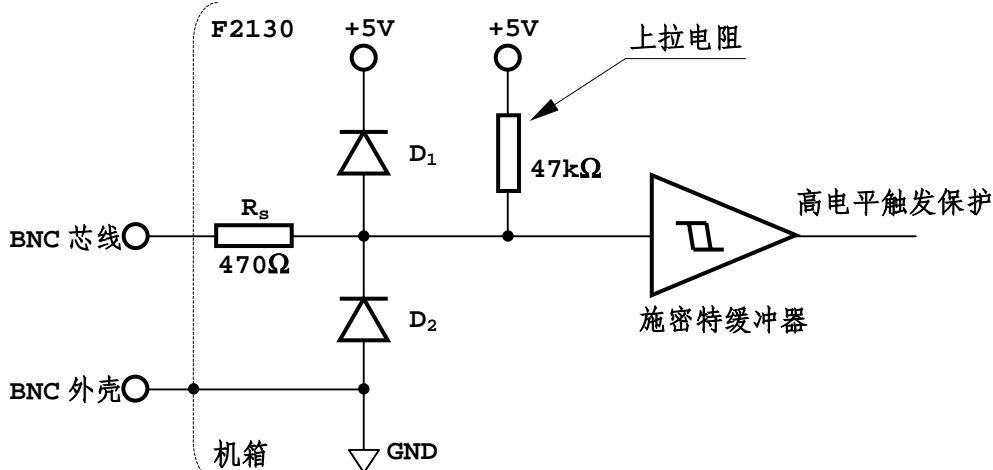


FIG-MAN-F2130-0048

3.23.3 通过常闭型温度开关实现负载过热保护

将温度开关预埋于负载内部或固定于负载表面可实现最简单的负载过热状态逻辑。温度开关分为常开（NO，Normal Open）和常闭（NC，Normal Close）型，F2130 的负载保护功能需使用常闭型号的两极分别连接至 BNC 的芯线和外壳，如图 3-30 所示。

警告

使用常开型温度开关将导致负载于冷态时 F2130 即进入负载保护状态。

图 3-30 使用常闭型温度开关实现负载过热保护

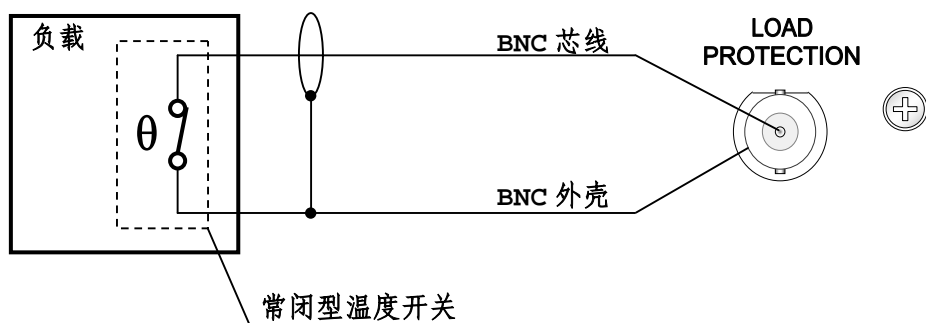


FIG-MAN-F2130-0049

对于常闭温度开关，负载温度低于断开阈值时内部开关闭合，BNC 芯线和外壳短路，经过施密特缓冲器后，F2130 内部接收低电平，允许用户正常操作输出电流。负载温度高于断开阈值时内部开关断开，BNC 芯线与外壳开路，上拉电阻 R 使施密特缓冲器输入端和输出端均维持高电平，F2130 发出断续声响信号作为负载保护警报，输出电流以 10A/s 的速度降至零，输出端切换为阻断状态，而后 F2130 进入负载保护状态，并于电流设置值后“DC”上方闪烁显示“LP”。

负载保护状态下，F2130 允许用户设置输出电流、切换电流输出方向和更改各设置项，但不允许将输出端设置为正常输出状态，避免继续对负载施加功率，从而使负载温度下降，直至温度降至闭合阈值以下，温度开关再次闭合。

温度开关再次闭合后，F2130 脱离负载保护状态，电流设置值后“DC”上方闪烁显示的“LP”消失，并重新允许用户完全操作输出电流。

注

常闭型温度开关的闭合阈值温度低于断开阈值温度约 $5\text{--}10^\circ\text{C}$ 。

3.23.4 更复杂的负载保护方法

F2130 的负载保护输入端口允许处理外部输入的 TTL 电平，因此可配合独立的负载保护装置实现更复杂的保护功能，例如具有数字电平信号输出的更精密的温度测量装置。这些额外的独立保护装置的数字信号输出电平和逻辑应与 F2130 的需求一致。

3.24 测量负载两端电压

除励磁应用外，F2130 也适用于恒流驱动大功率负载，例如测量低于 $1\text{m}\Omega$ 的电阻，需要测量负载两端的电压。此外在某些严格的应用场合中，例如驱动精密加热装置或驱动工作电流达到 3A 以上的大功率 LED 串联组合，需要测量负载两端电压以时刻监测负载运行状况。

常见的电阻测量使用二线式连接方式，如图 3-31 所示。连接电压表的测量导线具有电阻 R_{CON} ，通过电流时具有一定的压降 V_{ERROR} ，并造成测量误差。

V_{LOAD} 较高且 I_{OUT} 较小时 V_{ERROR} 远小于 V_{LOAD} ，误差可以忽略。然而 V_{LOAD} 较低且 I_{OUT} 较大时， V_{ERROR} 可能增大至与 V_{LOAD} 可比甚至远大于 V_{LOAD} 的程度。例如 10A 电流驱动 $1\text{m}\Omega$ 电阻时，测量导线总电阻 $R_{\text{CON1}} + R_{\text{CON2}} = 10\text{m}\Omega$ 时误差电压为 100mV ，远大于负载两端的 10mV 电压。

为避免测量导线造成的测量误差，常使用四线式连接方式保证电阻测量精度。如图 3-32 所示。由 F2130 输出的电流通过导线电阻 R_{CON3} 和 R_{CON4} 以及负载形成回路。由于电压表输入阻抗远大于 R_{LOAD} ，流经电压测量导线的电流 I_{M} 很小。例如万用表电压档的输入阻抗为 $10\text{M}\Omega$ 、 $V_{\text{LOAD}} = 10\text{mV}$ 时 $I_{\text{M}} = 1\text{nA}$ ，即使总导线电阻 $R_{\text{CON1}} + R_{\text{CON2}}$ 达到 1Ω ，误差电压为 1nV ，造成的测量误差也仅为 0.1ppm 。

图 3-31 二线式连接方式造成测量误差

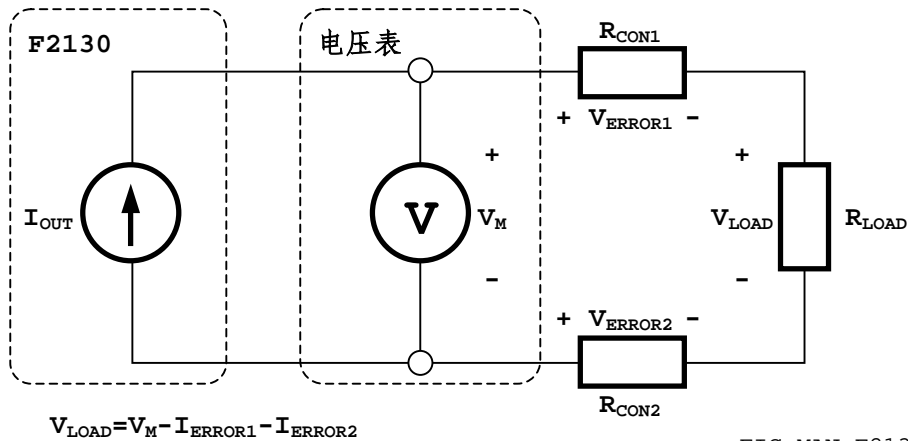


FIG-MAN-F2130-0050

图 3-32 四线式连接方式避免测量误差

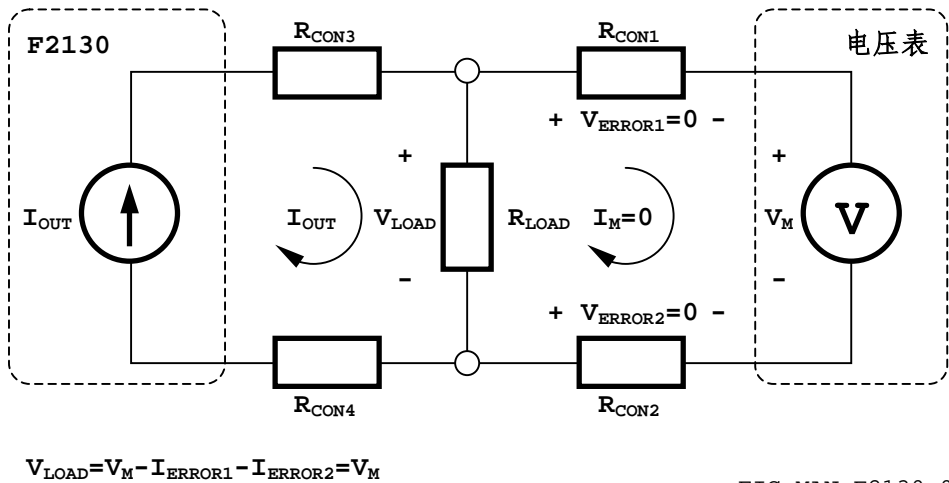


FIG-MAN-F2130-0051

3.25 键盘锁

F2130 配置键盘锁，用于在远程控制过程中避免与前面板键盘操作发生冲突。键盘锁由接口命令 **LOCK[CR]** 启动或解除，并由查询 **LOCK?[CR]** 进行查询。请参阅 5.6.4 和 5.6.5 中的相关内容。

键盘锁启动后，LCD 显示器右上方显示键盘锁标记“”。此时除 **ESC** 和 **STOP/0** 键外前面板其余按键无效。键盘锁启动后，按下 **ESC** 键 5 秒后恢复出厂设置，并解除键盘锁。

注

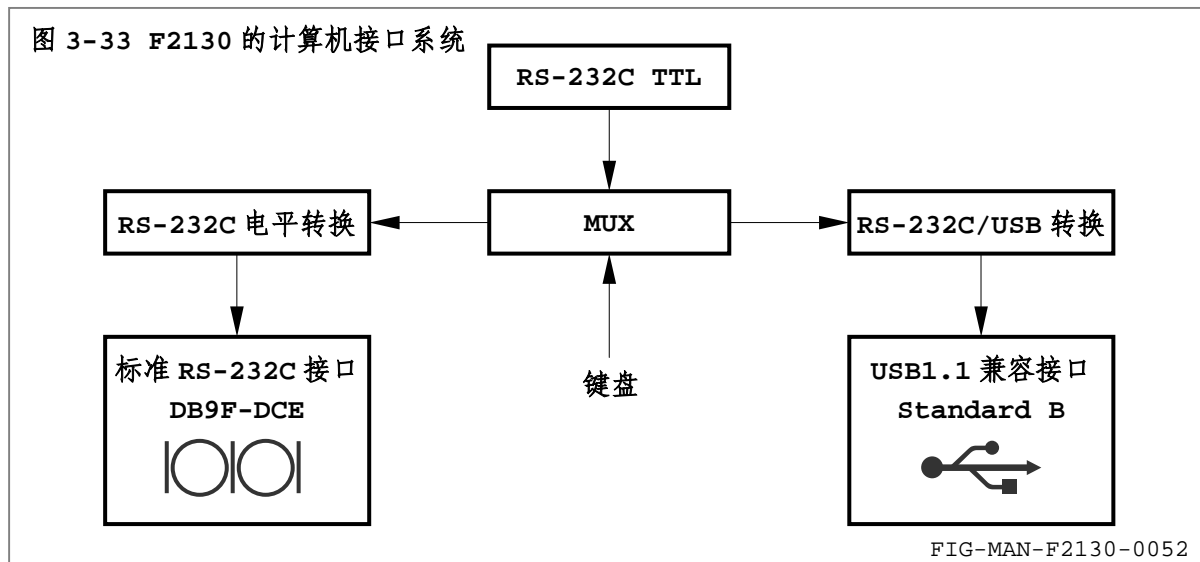
F2130 开机时键盘锁为解除状态。

3.26 设置计算机接口

3.26.1 设置接口类型

F2130 除提供标准 RS-232C 接口外，还于内部将 RS-232C 转换为 USB1.1 兼容接口，以解决计算机串行接口缺乏问题并充分利用日益扩充的 USB 接口资源。如图 3-33 所示。安装必要的驱动程序后，转换后的 USB 接口对于计算机相当于标准 RS-232C 接口。

图 3-33 F2130 的计算机接口系统



标准显示界面下，请遵循以下步骤选择计算机接口形式：

- ① 使用 **MENU** 键进入菜单。按 **▲**、**▼** 方向键选择“Interface”，并按 **ENTER** 键进入计算机接口选择界面；
- ② 按 **▲**、**▼** 方向键在“RS-232C”和“USB-232”选项中循环选择；
- ③ 按 **ENTER** 键确认选择；或 ④ 按 **ESC** 键保留原接口形式并返回标准显示界面。

设置完成后，前面板 LED 指示器中“RS-232C”或“USB-232”指示灯相应点亮。

注

当前接口形式保存于 F2130 内部的非易失性存储器内，并于下次开机时保持。

3.26.2 设置串行接口波特率

RS-232C 接口和 USB 接口使用相同的波特率，标准显示界面下，请遵循以下步骤设置波特率：

- ① 使用 **MENU** 键进入菜单。按 **▲**、**▼** 方向键选择“Baud Rate”，并按 **ENTER** 键进入波特率设置界面；
- ② 按 **▲**、**▼** 方向键循环显示各可选波特率 9600、19200、38400、57600；
- ③ 按 **ENTER** 键确认选择；或 ④ 按 **ESC** 键保留原波特率并返回标准显示界面。

设置完成后，瞬变响应模式下，显示器于标准显示界面中显示当前使用的波特率。

注

当前波特率保存于 F2130 内部的非易失性存储器内，并于下次开机时保持。

3.26.3 安装并设置 USB-232 接口

F2130 内部将标准 RS-232C 接口转换为 USB1.1 兼容接口。计算机无法直接识别 F2130 的 USB 转换器设备，必须安装产品信息光盘 CD-F2130 内的驱动程序 DRV-USB232 后方可与计算机正常通讯。驱动程序 DRV-USB232 适用于 Windows XP、7、8 和 10 操作系统。

安装驱动程序请遵循以下步骤：

- ① 关闭 F2130 前面板电源开关；
- ② 打开产品信息光盘 CD-F2130（设光驱盘符为 D:）中的 DRV-USB232 文件夹，并根据计算机中安装的 Windows 版本对应双击运行：

图 3-34 设备管理器中的 RS-232C/USB 转换器设备

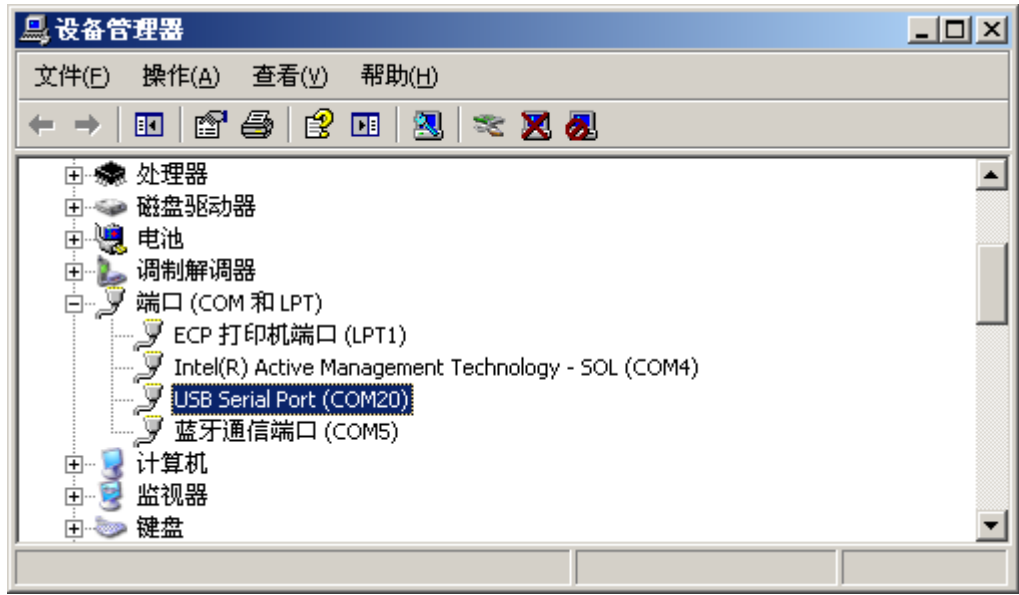


FIG-MAN-F2130-0053

图 3-35 USB Serial Port(COMn)属性窗口

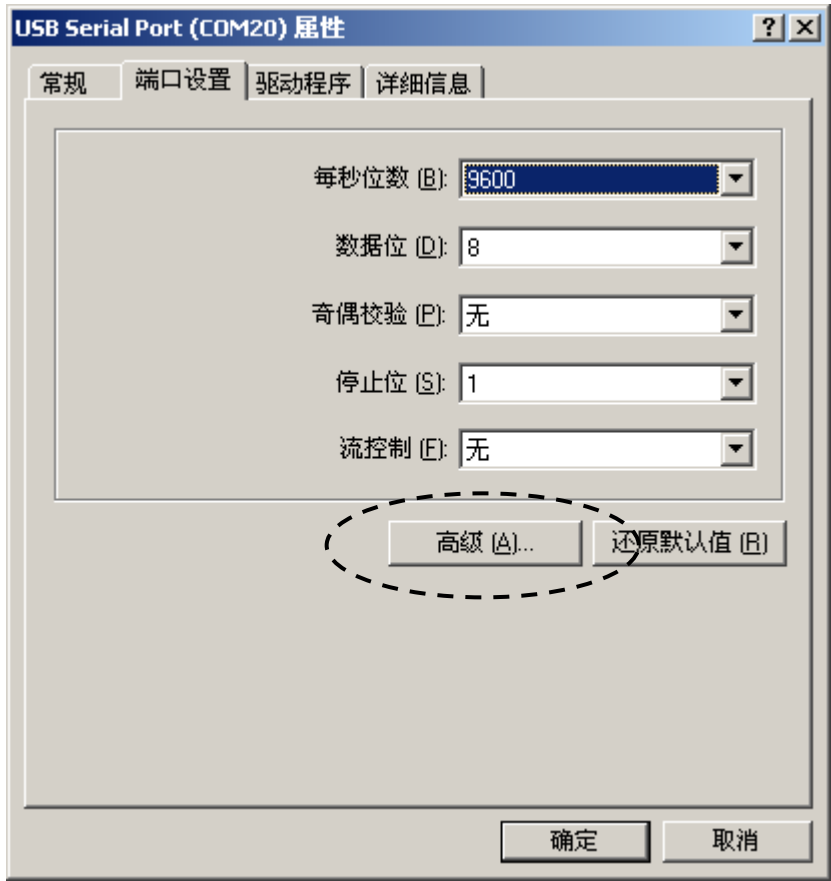


FIG-MAN-F2130-0054

驱动 20824: “DRV-USB232(20824) for WINXP.exe”, 或者
驱动 21226: “DRV-USB232(21226) for WIN7 WIN8 WIN10.exe”。
Windows XP 下, 运行驱动 20824 后弹出控制台界面, 并自行完成各项驱动设置。

Windows 7、8、10 下，运行驱动 21226 后弹出安装窗口，请循安装程序提示完成安装。

- ③ 将附件中的电缆 USB-AB-2 的 Standard A 型插头插入计算机后面板的 Standard A 型插座内，并将 Standard B 插头插入 F2130 后面板的 USB B 型插座内；
- ④ 开启 F2130 前面板电源开关，等待计算机识别设备。

设置 USB 接口时，请遵循以下步骤：

- ① 进入 Windows 系统的“设备管理器”页面，如图 3-34 所示，点击“端口 (COM 和 LPT)”左侧的“+”；
- ② 双击“USB Serial Port (COMn)”，打开图 3-35 所示属性窗口；
- ③ 选择“端口设置”页，点击“高级”按钮，打开图 3-36 所示“COMn”的高级属性窗口，调整 COM 端口号为所需端口号；
- ④ 修改端口号后点击“确定”按钮，返回图 3-35 所示属性窗口，修改“波特率”与 F2130 所使用的波特率一致，修改“数据位”、“奇偶校验位”和“停止位”为“8”、“无”和“1”，参阅第 4 章中的相关内容，设置“流控制”为“无”，点击“确定”按钮。

图 3-36 修改 RS-232C/USB 转换器的端口号

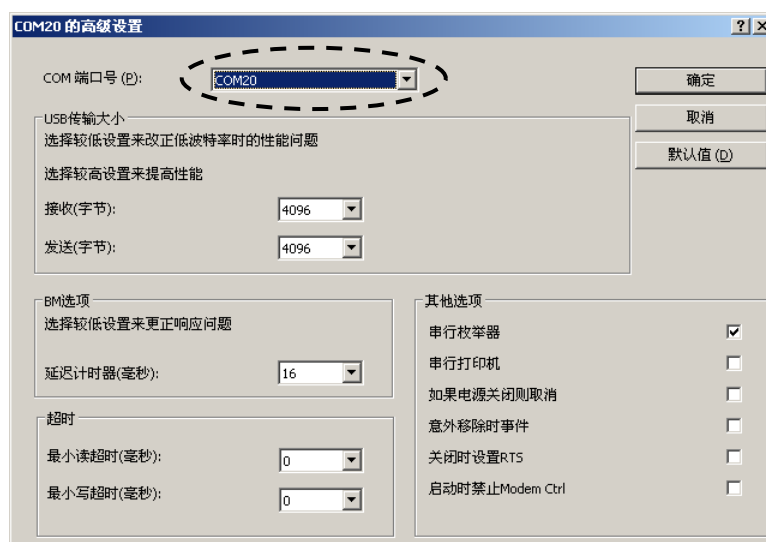


FIG-MAN-F2130-0055

3.27 声响和显示器对比度

3.27.1 按键音

F2130 提供按键音，作为对用户按键动作的反馈。开启按键声响后，按下当前操作界面、菜单或设置的有效键时，F2130 发出短音，无效按键时发出点音。

在需要安静的运行环境下，例如声学测量中，可关闭 F2130 的按键音。

标准显示界面下，请遵循以下步骤设置按键音：

- ① 使用 **MENU** 键进入菜单。按 **▲**、**▼** 方向键选择“Key Voice”，并按 **ENTER** 键进入按键音设置界面；
- ② 按 **▲**、**▼** 方向键循环显示“ON”和“OFF”；
- ③ 按 **ENTER** 键确认选择；或 ④ 按 **ESC** 键保留原设置并返回标准显示界面。

按键音也可通过计算机接口命令 **KEYVOICE[CR]** 开启或关闭，并由查询 **KEYVOICE?[CR]** 进行查询。请参阅第 5 章中的相关内容。

3.27.2 渐变结束音

渐变响应模式下，由于电流渐变过程可能耗时很长，例如以 0.01A/s 的渐变速率变化 10A 时，需 1000s，即使 F2130 前面板显示器将同步显示电流变化，但仅由此检测电流渐变是否完成将耗费使用者大量的时间和精力。F2130 提供电流渐变结束音，于渐变过程完成时提醒使用者。渐变结束音出现于一次线性渐变结束时刻，以及在电流扫描过程中的各电流转折点。

在需要安静的运行环境下，特别是使用计算机接口，于渐变响应模式下以较高的渐变速率频繁设置输出电流时，F2130 将不断发出密集的渐变结束音。某些情况下，这些声响可能会不必要的过分获取使用者的注意力，从而干扰使用者。在此情形下，用户可关闭渐变结束音。

标准显示界面下，请遵循以下步骤设置渐变结束音：

- ① 使用 **MENU** 键进入菜单。按 **▲**、**▼** 方向键选择“Ramp Audio”并按 **ENTER** 键进入渐变结束音设置界面；
- ② 按 **▲**、**▼** 方向键循环显示“ON”和“OFF”；
- ③ 按 **ENTER** 键确认选择；或 ④ 按 **ESC** 键保留原设置并返回标准显示界面。

渐变结束音也可通过接口命令 **RAMPAUDIO[CR]** 开启或关闭，并由查询 **RAMPAUDIO? [CR]** 进行查询。请参阅第 5 章中的相关内容。

3.27.3 显示对比度

F2130 出厂前将对显示器的对比度进行校准，使显示器工作于最佳显示状态。用户可根据自身需求调节对比度。

标准显示界面下，请遵循以下步骤设置对比度：

- ① 使用 **MENU** 键进入菜单；
- ② 按 **▲**、**▼** 方向键选择“LCD Contrast”，并按 **ENTER** 键进入对比度设置界面；
- ③ 按 **▲**、**▼** 方向键循环显示对比度数值 0—63，显示器实际对比度相应变化，直至调节至最佳状态；
- ④ 按 **ENTER** 键确认选择；或 ⑤ 按 **ESC** 键保留原对比度并返回标准显示界面。

注 当前按键音、渐变结束音和显示对比度设置保存于 F2130 内部的非易失性存储器内，并于下次开机时保持。

3.28 恢复出厂设置

标准显示界面下，包括键盘锁启动状态下，按下 **ESC** 键 5 秒后进入图 3-37 所示恢复出厂设置界面，并将各参数恢复出厂设置，5 秒后恢复至瞬变响应模式 IME 的标准显示界面。各项参数出厂设置如表 3-2 所示。

图 3-37 恢复出厂设置

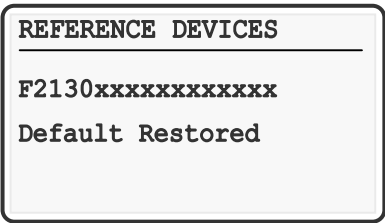


FIG-MAN-F2130-0056

表 3-2 恢复出厂设置值

TAB-MAN-F2130-0005

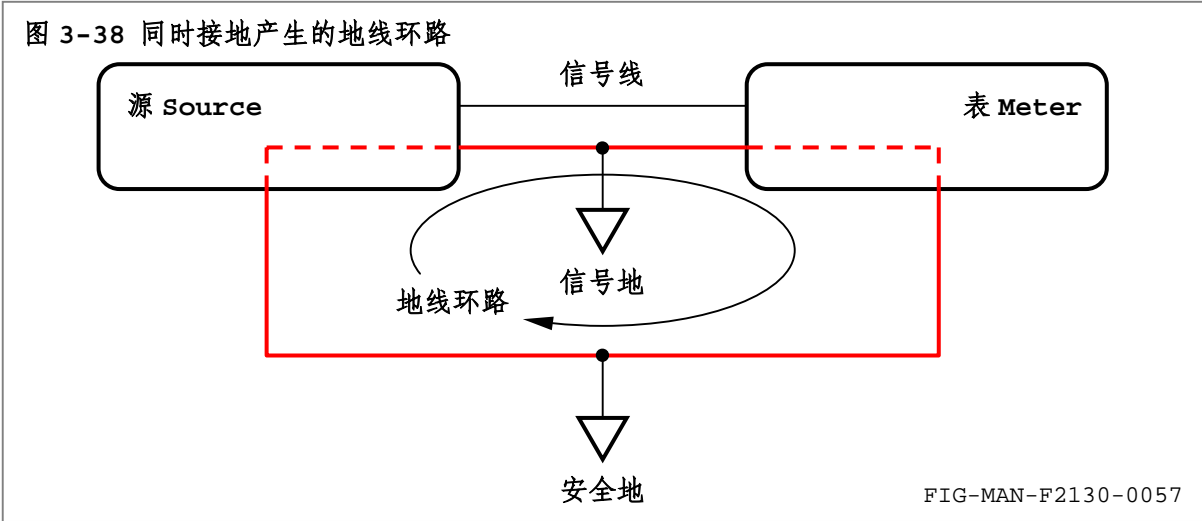
| 项 目 | 出厂设置值 | 项 目 | 出厂设置值 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 响应模式 | 瞬变响应（IME） | 输出端 | 阻断状态（OFF） |
| 信号源 | 内部 DAC | 指数沿时间 | Fastest |
| 输出电流 | 0 | 渐变速率 | 0.10A/s |
| 触发输入源 | 关闭（OFF） | 存储器重复方式 | 循环（LOOP） |
| 存储器组 | G0 | 触发指针 | 返回头部 |
| 常规触发输出 | 关闭（OFF） | 常规触发延迟 | 0.000s |
| 扫描触发输出 | 关闭（OFF） | 扫描触发间隔 | 1s |
| 扫描模式 | SWC | 扫描最大值 | 10A |
| 外部负载保护 | 关闭 | 接口形式 | RS-232C |
| 波特率 | 9600bps | 键盘音 | 开启（ON） |
| 扫描结束音 | 开启（ON） | 显示器对比度 | 32 |
| 振荡报警方式 | 闪烁和声响 | 前面板键盘 | 解锁 |

3.29 接地关系

3.29.1 浮动输出

为保证操作者的人身安全，使用交流电源供电的电子仪器必须通过三芯单相交流电源的接地线妥善安全接入安全地，此外，为避免可能的干扰，所有仪器必须良好接地。

然而，多个同时接地的仪器可能产生地线环路。例如，在 2 台通过电源线同时接入安全地的源和表之间，由于用于测量的信号线具有连接 2 者的信号地，并且信号地可能均于 2 台仪器内部连接至安全地，从而构成地线环路，如图 3-38 所示。



地线环路构成事实上的天线，拾取空间干扰并对测量造成影响。此外，如果系统中存在功率设备，流经连接设备之间电缆的地线也将使地电平产生可考的差异，造成测量误差。

大多数台式万用表均为浮动输入测量，可避免形成地线环路。然而，某些测量设备的输入端必须内部接入安全地，例如交流供电的示波器。对于此类测量设备，为达到尽可能高的测量准确度，要求源必须具有浮动输出。此外，某些驱动应用实例要求源的输出端必须承受以安全地为参考的有效共模电压，此时，源必须具有浮动输出能力，并必须在内部提供足够高的隔离电压。

F2130 的电流输出端与安全地无关，为浮动输出。输出端的任意一端与仪器安全地之间的电压峰值隔离能力不低于 200V。输出端中任意一端可根据应用需要在仪器外部连接至适当的接地点，

从而保护操作者的人身安全。

警告

F2130 浮动输出端的任意一端与安全地之间的直流和交流电压叠加峰值不可超出 200V，否则可能造成内部电路击穿，并进而造成对操作者的严重电击事故。

3.29.2 接地关系

F2130 具有 2 个相互隔离的地电位，即 ❶ 机箱地 GND 和 ❷ 内部电流源隔离地 ISOGND，如图 3-39 所示。其中：

❶ 机箱地 GND：通过电源输入组件交流输入插座的中间导体，经由 AC220-3 附件连接至安全地（Earth），并作为机箱的保护地（PE）。同时机箱地与 RS-232C 端口的 DB9 插座外壳及其第 5 引脚、USB 端口的 Standard B 插座外壳及其第 4 引脚以及触发输出 BNC 插座和负载保护 BNC 插座外壳连通并等电位。

❷ 电流源隔离地 ISOGND：隔离地，与输出黑色接线柱和模拟输入 BNC 外壳连通。

图 3-39 F2130 的接地关系

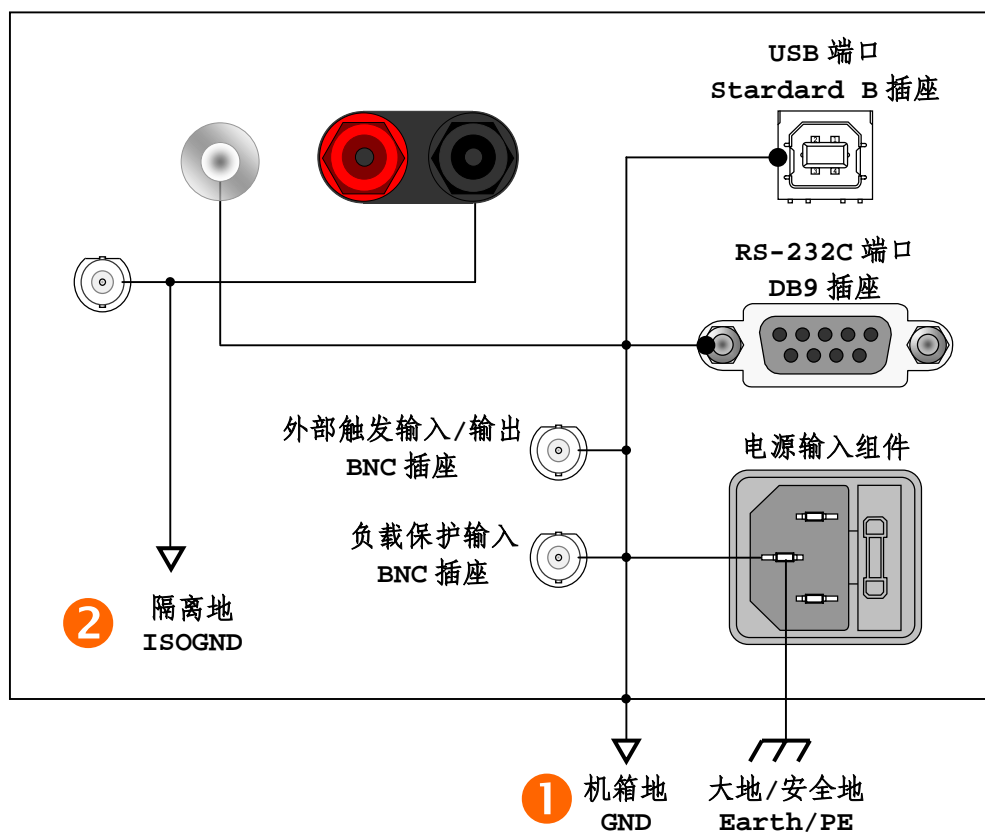


FIG-MAN-F2130-0058

警告

接地不良可能导致仪器机箱体和附件的导电部分感应带电，并造成可能的电击事故或仪器运行故障。

3.30 键盘菜单结构

图 3-40、图 3-41 和图 3-42 所示为 F2130 的键盘菜单结构图。其中图 3-40 为设置输出电流和选择信号源，图 3-41 为主菜单，图 3-42 为触发输入、输出和存储器操作。

图 3-40 F2130 键盘菜单结构图（设置输出电流，选择信号源）

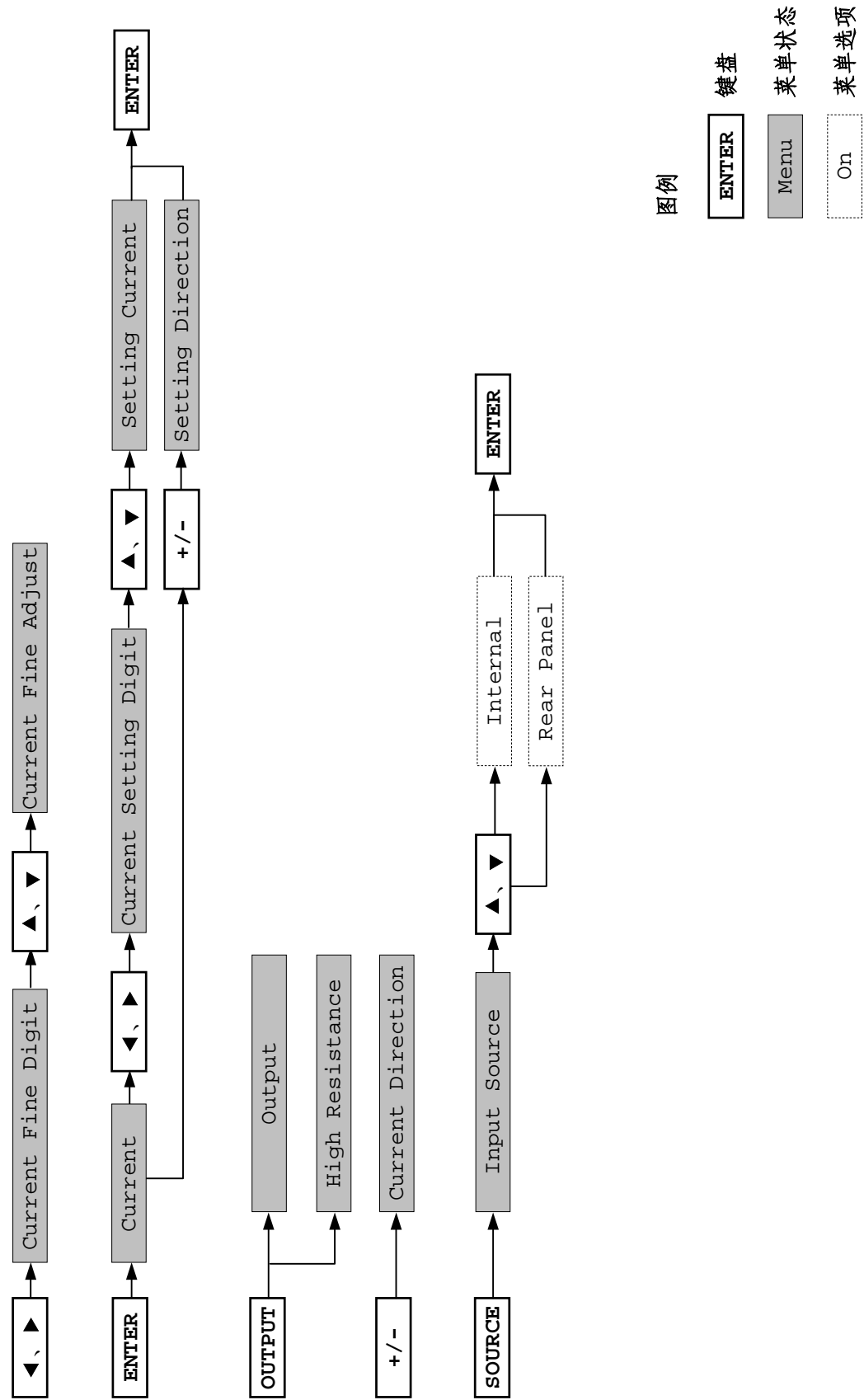


FIG-MAN-F2130-0059

图 3-41 F2130 键盘菜单结构图（主菜单）

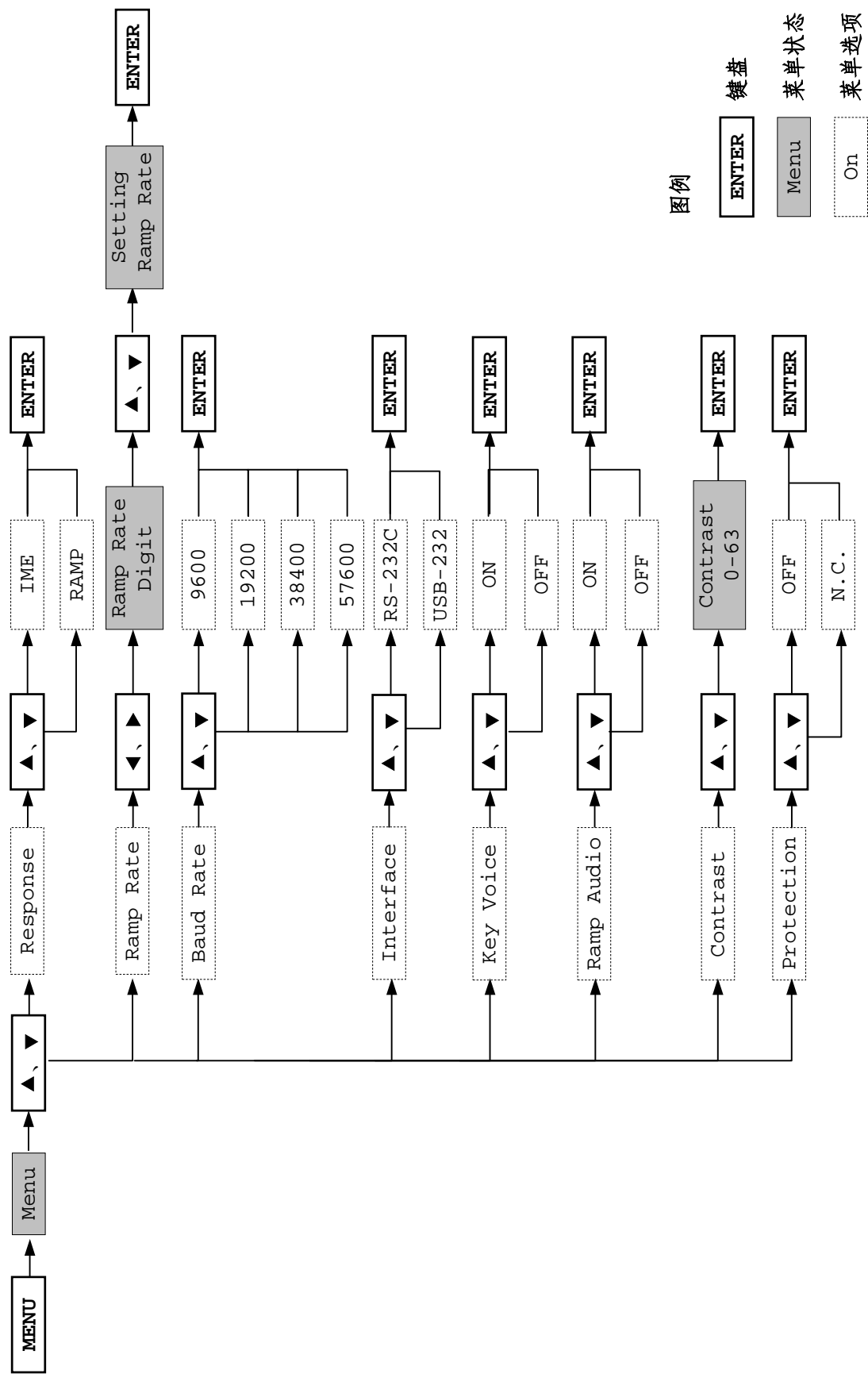


FIG-MAN-F2130-0060

图 3-42 F2130 键盘菜单结构图（触发输入、触发输出和设置值存储器）

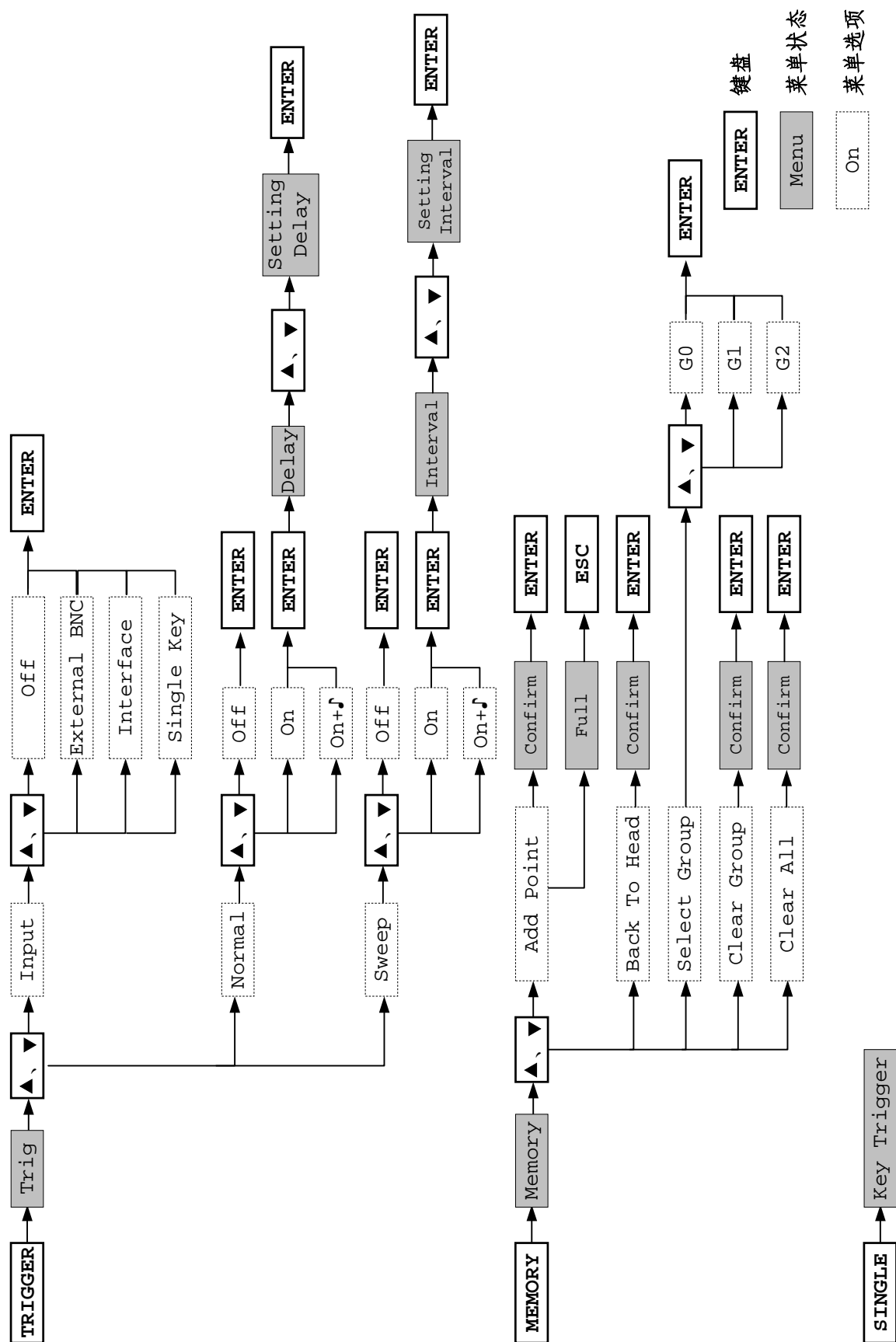


FIG-MAN-F2130-0061

<本页为空页>
This Page Intentionally Left Blank

典型应用实例

4.1 简介

本章包含 F2130 程控精密电流源的典型应用实例。F2130 为负载提供高准确度和高稳定度电流驱动，负载包括但不限于各种电阻、各种尺寸的电感线圈和具有 PN 结结构的半导体器件。其中：

- 4.2 低电阻测量
- 4.3 电感性负载
- 4.4 PN 结负载
- 4.5 电解液

4.2 低电阻测量

4.2.1 四线式测量

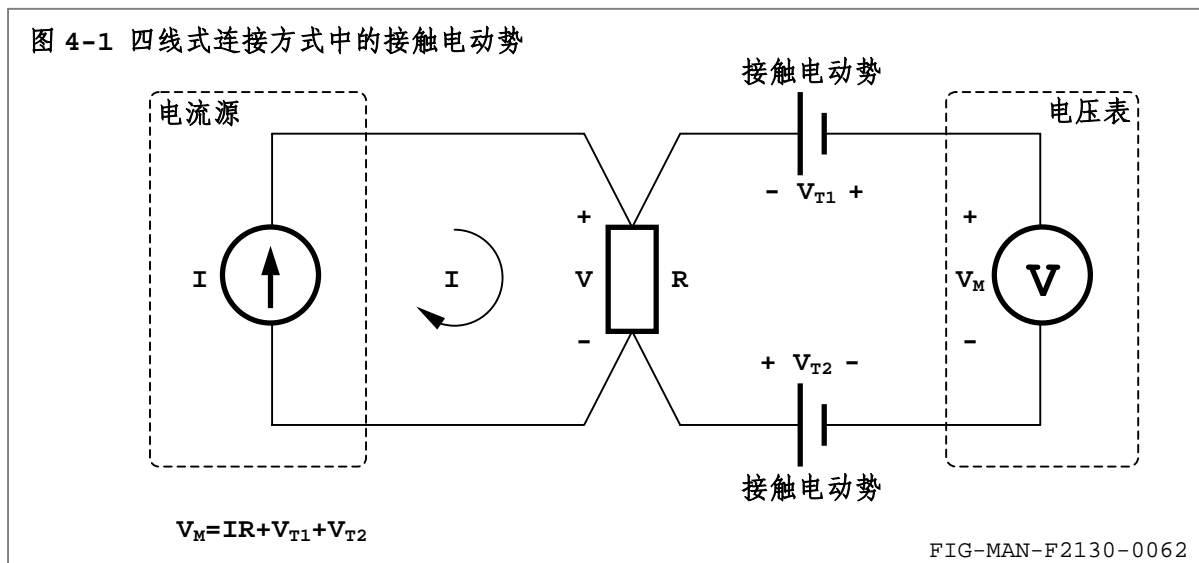
配合高精度数字电压表，F2130 可为低电阻测量提供高准确度和高稳定度电流激励。

低电阻测量必须使用四线式测量方法，请参阅 3.24 中的详细描述。在负载电阻 R_L 功率耗散允许的范围内，以及 F2130 保持恒流状态的前提下，请使用尽量高的激励电流 I_{OUT} 以提高电阻测量的准确度。负载电阻 R_L 的功率耗散 $P_{DISS}=I_{OUT}^2 R_L$ ， P_{DISS} 较大时可能造成待测电阻温度的显著提高，并造成 R_L 的温度漂移，降低测量准确度。过高的 P_{DISS} 可能造成待测电阻由于高温而损毁。

4.2.2 消除接触电动势

实际的低电阻测量中，测量夹具与被测电阻接触的接触电动势成为主要误差来源。接触电动势来源于接触面两侧不同金属材料的电子逸出功差异，并随两侧温度差异增大而愈发显著。静态四线式测量中，主要的接触电动势误差 $V_{T1}+V_{T2}$ 来源于电阻内部两端引线键合接触、两根电压测量线的夹具与电阻引线的接触，以及测量线与电压表输入端子的接触。两侧的接触电动势串联后，可分别合并为电压 V_{T1} 和 V_{T2} ，如图 4-1 所示。

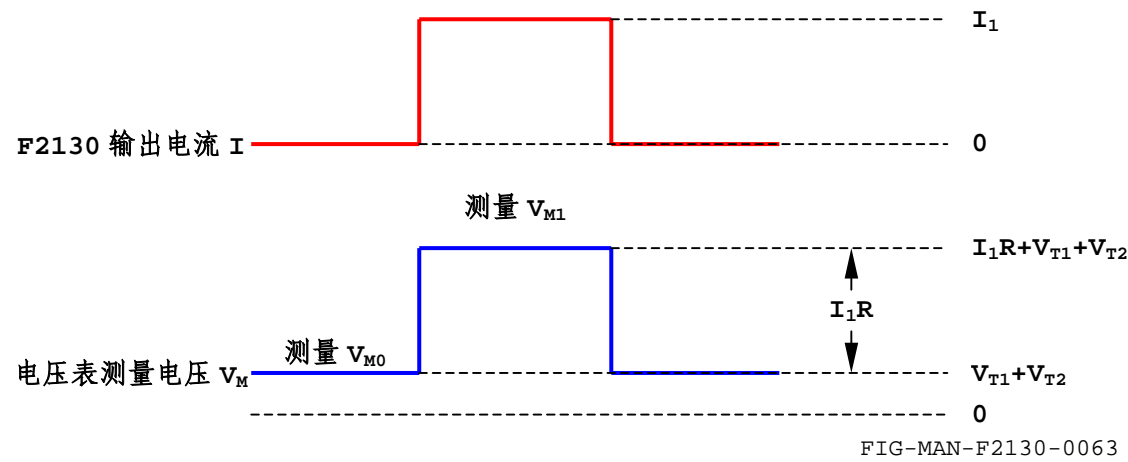
图 4-1 四线式连接方式中的接触电动势



由于接触电动势只与接触面两侧导体材料及其之间的温差有关，而与流经电阻的电流大小和方向无关，因此可通过 4 线式半差分电流测量方法消除。首先测量电流 $I=0$ 时的电压 $V_{M0}=(V_{T1}+V_{T2})$ ，而后测量 $I=I_1$ 时的电压 $V_{M1}=(I_1R+V_{T1}+V_{T2})$ ，如图 4-2 所示，计算得到与热电动势无关的电阻值：

$$R = \frac{V_{M1} - V_{M0}}{I_1}$$

图 4-2 四线式半差分电流测量电阻

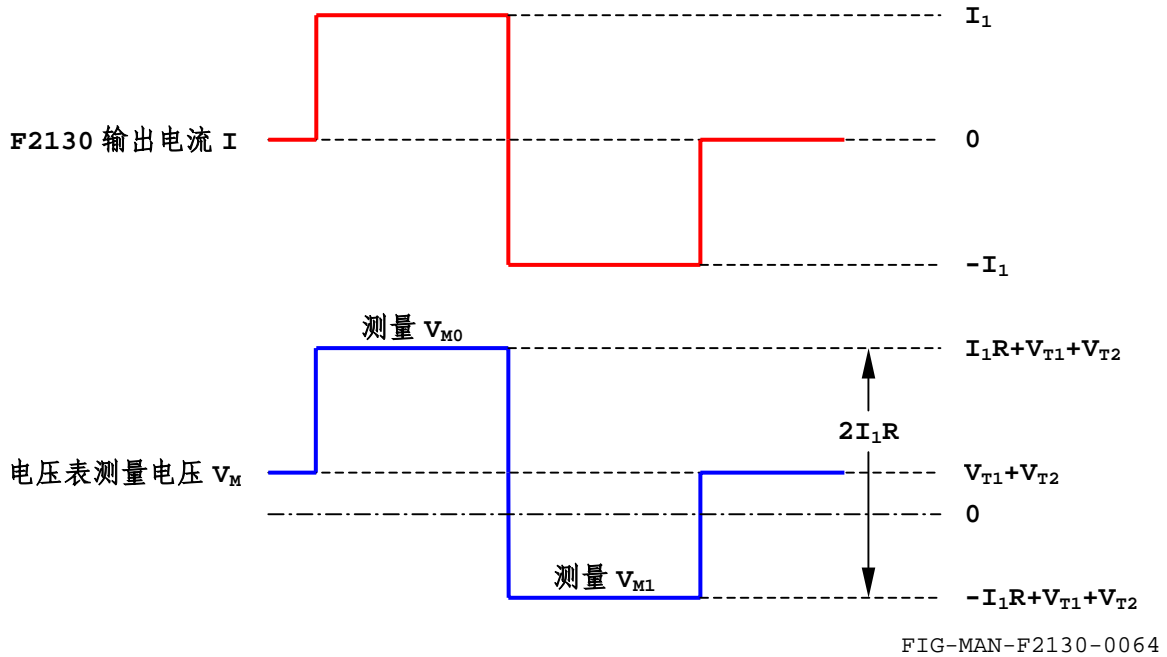


此外，基于 F2130 双极性输出电流的良好对称性，可采用 4 线式全差分电流测量方法进一步提高测量分辨率。首先测量电流 $I=I_1$ 时的电压 $V_{M1}=(I_1R+V_{T1}+V_{T2})$ ，而后测量电流为 $I=-I_1$ 时的电压 $V_{M2}=(-I_1R+V_{T1}+V_{T2})$ ，如图 4-3 所示，计算得到与热电动势无关的电阻值：

$$R = \frac{V_{M1} - V_{M2}}{2I_1}$$

由于 (V_1-V_2) 的值 2 倍于 I_1R ，此方法可获得 2 倍于半差分电流方法的测量分辨率。

图 4-3 四线式全差分电流测量电阻



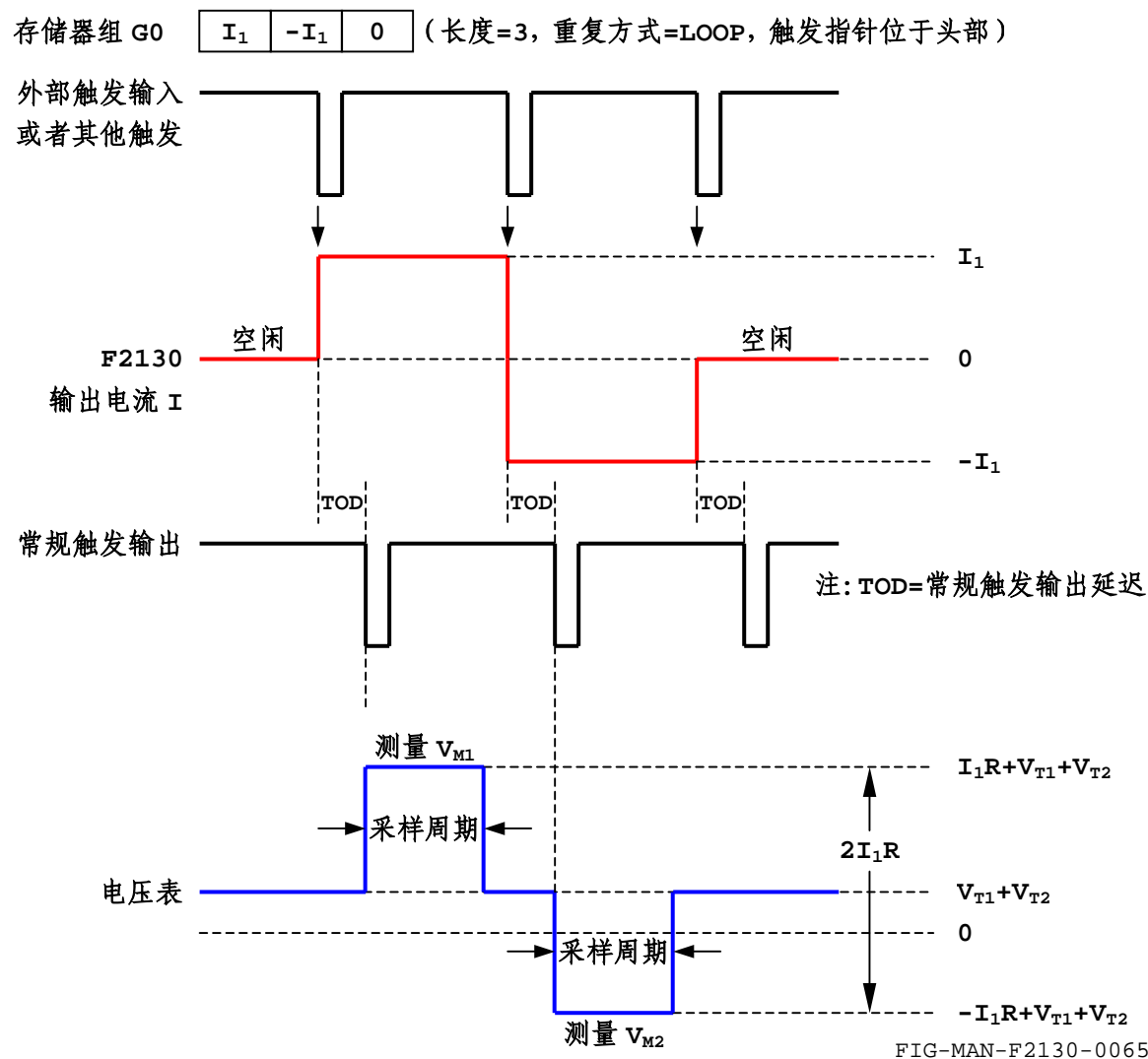
此外，相较静态测量，半差分和全差分电流方法均不要求电流源的零点准确，只要求两次测量时施加的电流差值稳定。

4.2.3 测量速度

上述两种方法之前提基于 V_{T1} 和 V_{T2} 在完整测量过程中不变。由于温度变化具有一定的时间常数 τ_T ，因此完整测量时间 T_M 应控制于远小于 τ_T 的范围内，以避免测量过程中热电动势 ($-V_{T1}+V_{T2}$) 的明显变化降低对其的抵消效果。

与常规的 4 线式测量相比，在环境温度基本稳定，即夹具接触面两侧温差基本不变时，手动设置电流和读取电压值足以消除大部分热电动势的影响。当环境温度变化剧烈，例如快速测量电阻的温度曲线时，对热电动势的消除须使用触发输入操作设置值存储器的方法，并使用触发输出信号与电压测量装置同步，以更高的测量速率达成。如图 4-4 所示。

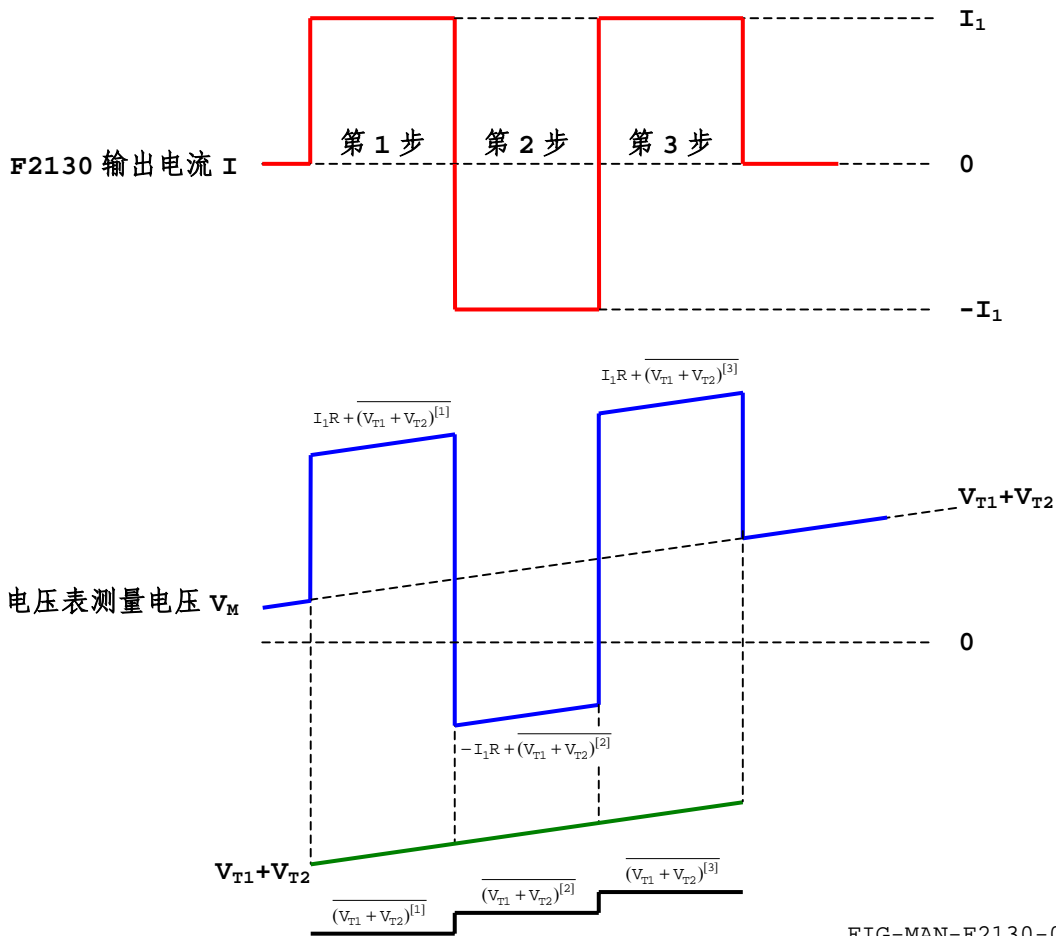
图 4-4 使用触发输入/输出进行快速测量



进一步，为尽量完全消除温度变化引起的 ($V_{T1}+V_{T2}$) 的变化，可在一次完整测量过程中使用三步补偿测量法，如图 4-5 所示。温度变化为纯滞后的非线性过程，然而当测量速度足够快时，在一次完整测量过程中，夹具接触面两侧温度差的变化近似线性，由于较小的温差范围内热电动势与温差也接近线性关系，因此第 1 步和第 3 步热电动势的平均值与第 2 步的热电动势平均值相同：

$$\frac{(V_{T1} + V_{T2})^{[1]} + (V_{T1} + V_{T2})^{[3]}}{2} = (V_{T1} + V_{T2})^{[2]}$$

图 4-5 四线式全差分电流三步补偿法测量电阻



此时测量值计算方法为：

$$\frac{I_1 R + (V_{T1} + V_{T2})^{[1]} + I_1 R (V_{T1} + V_{T2})^{[3]}}{2} - \left(-I_1 R + (V_{T1} + V_{T2})^{[2]} \right) = 2I_1 R$$

此方法也可用于半差分电流方法，计算方法为：

$$\frac{I_1 R + (V_{T1} + V_{T2})^{[1]} + I_1 R (V_{T1} + V_{T2})^{[3]}}{2} - (V_{T1} + V_{T2})^{[2]} = I_1 R$$

4.2.4 降低电阻发热

对于一定范围的电阻值，例如 0.1Ω ，2A 电流将在电阻两端产生 200mV 电压，同时产生 400mW 焦耳热功率。400mW 功率足以在一定时间内加热电阻，并使电阻值根据自身温度系数产生漂移，使测量误差增大。此外，温度的变化还将导致接触热电动势增大，进一步降低测量准确度。

此时也需使用触发输入操作设置值存储器，以及使用触发输出信号同步电压测量装置的方法尽量降低电流流经电阻时间，提高空闲时长，降低施加功率的占空比，降低电阻的平均发热功率。

由于全差分电流法的测量分辨率较半差分电流法提高一倍，在保证测量分辨率相同的前提下，输出电流可降至半差分电流法的 $1/2$ ，即 $0.5I_1$ 。

使用三步补偿测量法时，一次完整测量过程中，全差分电流法的平均发热功率为 $0.75I_1^2R$ ，仅及半差分电流法平均发热功率 $2I_1^2R$ 的 $3/8$ 。

不采用三步补偿时，全差分电流法的平均发热功率为 $0.5I_1^2R$ ，仅为半差分电流法平均发热功率 I_1^2R 的 $1/2$ 。

4.3 电感性负载

4.3.1 亥姆霍兹线圈

亥姆霍兹线圈可产生较大体积的可计算均匀磁场，磁场幅度与 F2130 输出电流大小成正比，方向与输出电流极性相关。单个亥姆霍兹线圈通常用于产生 300G 以下均匀磁场。大体积的亥姆霍兹线圈可用于抵消地磁场单一方向分量对测量的影响，三维大体积亥姆霍兹线圈组则用于完全抵消地磁场，或者模拟地磁场旋转。

3 台联动的 F2130 驱动三维大体积亥姆霍兹线圈组可产生方向可调的均匀磁场，用于校准或调试三维罗盘传感器，及其衍生的飞行物体姿态调整装置。负载电感量较小时，可在瞬变响应模式下，将设置磁场所需的相同长度的电流波形数据分别存储于 3 台 F2130 的设置值存储器内，使用同一触发源同步触发 3 台 F2130，获得较高变化速度的高同步性旋转磁场。通过其中 1 台 F2130 的可选延迟时间的触发输出信号，同步磁场测量装置实时获得磁场幅值和方向数据，其中延迟时间用于避开可能的输出过冲，使测量开始时刻位于电流和磁场的稳态区。

由于 F2130 为真双极性电源，输出电流可由正极性直接变化为负极性，无极性切换时间，因此可驱动亥姆霍兹线圈产生高速变化的磁场，模拟飞行姿态的高速翻转。

4.3.2 螺线管和电磁铁

F2130 驱动长直螺线管可产生高稳定度的可计算均匀磁场，磁场大小与 F2130 输出电流大小成正比，方向与输出电流极性相关，通常用于校准高分辨率的磁场传感器或磁场测量装置。

F2130 可驱动中型电磁铁在 10mm 以下较小的气隙中产生 10000G 以上的高稳定度强磁场。电磁铁为强电感性负载，在快速变化的电流将产生强烈的反向电动势，并可能对 F2130 的输出级造成损伤或损毁。因此驱动电磁铁时，应尽量使用渐变响应模式。

警告

切勿试图对强电感性负载施加快速变化的电流，强电感性负载对此产生的强烈反电动势可能对 F2130 的输出级造成损伤。

与三维亥姆霍兹线圈应用类似，对于小型多极磁铁，多台联动的 F2130 可产生较强的高精度旋转磁场。当电流步进较小时，可在瞬变响应模式下，使用触发输入功能和设置值存储器，进行磁场的同步精密旋转。

4.3.3 过冲和振铃

常用的电感性负载包括亥姆霍兹线圈及其三维结构、螺线管和电磁铁。

电感性负载通常由铜质漆包线绕制，因此具有较高的瞬间功率承受能力，对于由 F2130 状态切换产生的电流/电压过冲不敏感。由于电感内部电流的延迟效应，面对阶跃电流上升/下降沿时可能产生短时过冲和振铃，请参阅 3.4.1 中的详细内容。

注

面对电感性负载，应首选渐变响应模式。

当电感量较小，且渐变响应模式无法满足测量要求时，在瞬变响应模式下，使用多个小的阶梯步进比一次使用一个大步进更可有效避免过大的过冲和振铃，将较大的过冲幅度分解为随时间均匀渐进的多个等高阶梯小步进过程中，以降低电流变化速率的方法得到相对平缓的输出电流响应，并避免较大的阶跃幅度造成 F2130 电压裕量不足的问题，如图 4-6 所示。

图 4-6 线性步进改善电感性负载的输出电流过冲

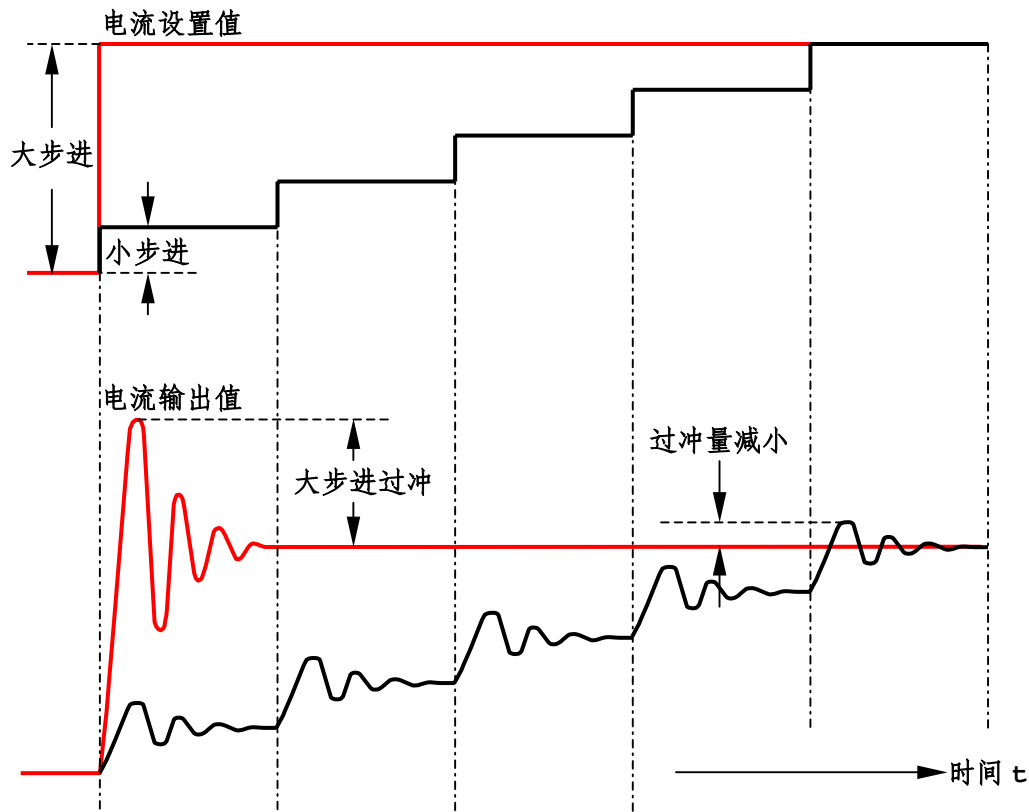


FIG-MAN-F2130-0067

图 4-7 指数步进消除电感性负载的输出电流过冲

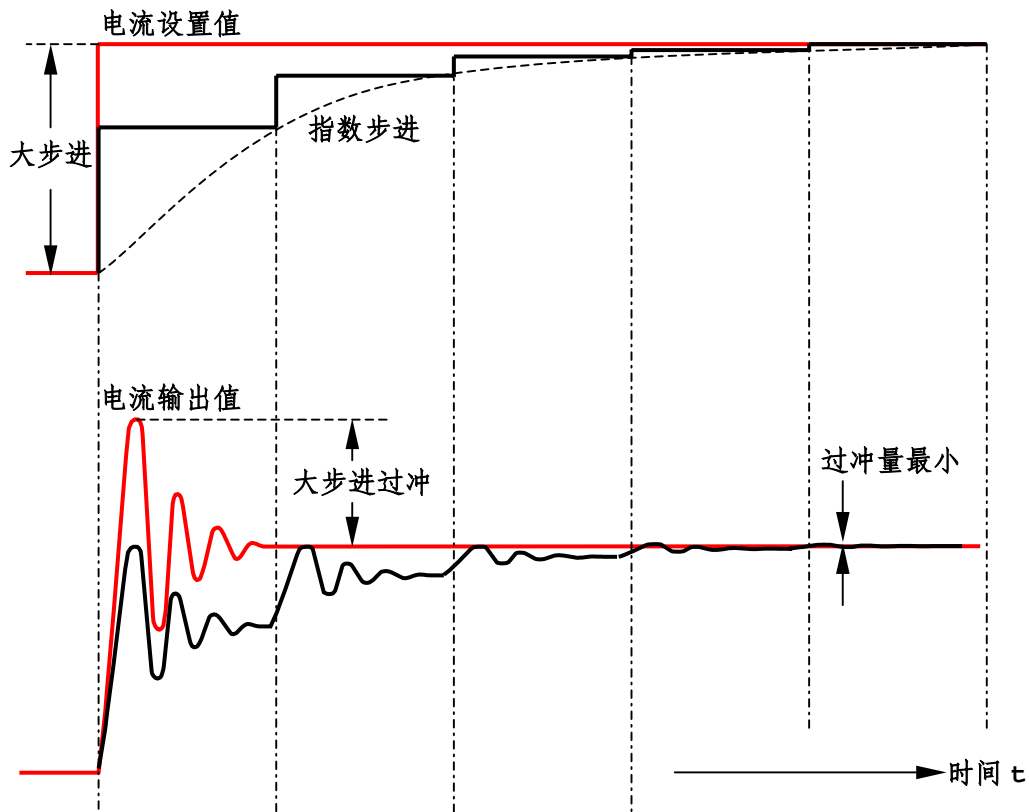


FIG-MAN-F2130-0068

进而,相比等高阶梯渐进,采用指数阶梯渐进可在不降低输出响应速度的前提下将过冲幅度降至最小。如图 4-7 所示。输出电流的过冲量仅为最小指数阶梯产生的过冲量。

计算指数阶梯高度时,以实际输出阶跃响应的电流过冲量作为依据。电流过冲量通常采用阶跃高度的百分比表示,阶梯最小时长与负载时间常数相关,即输出电流由阶跃时刻经历欠阻尼振荡(振铃)达到稳态的时间。二者均可使用示波器配合采样电阻进行测量。

第 1 个阶梯高度包含其产生的过冲量之和不应超出稳态值,即电流设置值。而后第 2 个阶梯高度为第 1 个阶梯的 $1/ke$ (k 为系数),其后类推,直至最后一个阶梯达到稳态值。

上述方法采用等时长阶梯,可使用通过外部触发操作设置值存储器的方法达成。负载时间常数较大时,也可使用接口触发,或者直接采用等时设置电流值生成阶梯波形。

4.3.4 电感负载的无过冲沿响应

负载电感性较低时,例如用于抵消杂散磁场的低匝数亥姆霍兹线圈,施加阶跃电流产生的过冲和振铃较小,可在瞬变响应模式下,使用触发输入配合设置值存储器,输出一系列幅度较小的电流阶梯,并由此组成用户自定义扫描波形。F2130 的 3 个存储器组均可存储 1024 个设置值,可以构成相当复杂的波形。

此外使用多通道常规触发输出,并适当调节其延迟时间,驱动多个测量仪器同步测量不同的物理量,在众多应用中实现高速测量。

电流施加于电感量较大的线圈时,电流过冲将使线圈产生的磁场产生相同形态的过冲。某些应用中,考虑到样品的磁滞效应,过冲的磁场将导致样品磁化历史与预设之间产生差异,并影响对样品磁学性能的测量和评估。过冲及后续振铃,以及消除方法请参阅 4.3.3 中的详细内容。

根据 3.15 中的描述,通过 RC-Snubber 接口调节 F2130 内部输出补偿网络,可以将电感性负载的阶跃响应中的过冲和振铃降至最低,当负载电感量较小时,可能将阶跃响应调整为临界阻尼甚至过阻尼状态,完全抑制过冲和振铃。然而当负载电感量较高时,此方法可能导致 F2130 输出端产生振荡,而无法完全消除过冲和振铃。

不建议用户为尽量抑制过冲和振铃,通过 RC-Snubber 接口将 F2130 调节至临界振荡的状态,微小的状态改变都可能使 F2130 进入振荡状态,以至于可能损伤其输出级。

当过冲和振铃无法完全消除,且阶跃高度较大,使得过冲达到 F2130 电压轨 $\pm 60V$ 无法容纳的程度,电流波形将在沿时刻产生畸变的过冲和少量振铃,如图 3-7c 所示。阶跃时刻附近的负载电抗将随电流变化速率的改变而急剧变化,以至于使 F2130 内部的主电源元件受到强烈的电流冲击,并产生低频机械振动。频繁的机械振动将使这些元件的寿命降低,并降低 F2130 的可靠性。

在此情况下使用线性渐变方式可将过冲降至最低,如图 3-7d。但通常线性渐变并非最快速的无过冲方法,即使在 $10A/s$ 的最高渐进速率下,3A 的变化量也需要 300ms,在需要高速测量的应用中可能无法接受。

指数阶梯步进可提供更短的无过冲沿时间,从而提供更快的磁学测量速度。指数步进相当于对阶跃信号进行低通滤波,从而削弱阶跃信号中的高频成分,使 F2130 的输出级和电感性负载不至面对过高的电流变化率。

指数曲线的点密度足够高时,相同触发密度的指数渐进曲线的每个台阶高度更低,台阶响应的过冲量越低,如图 4-8a 所示。

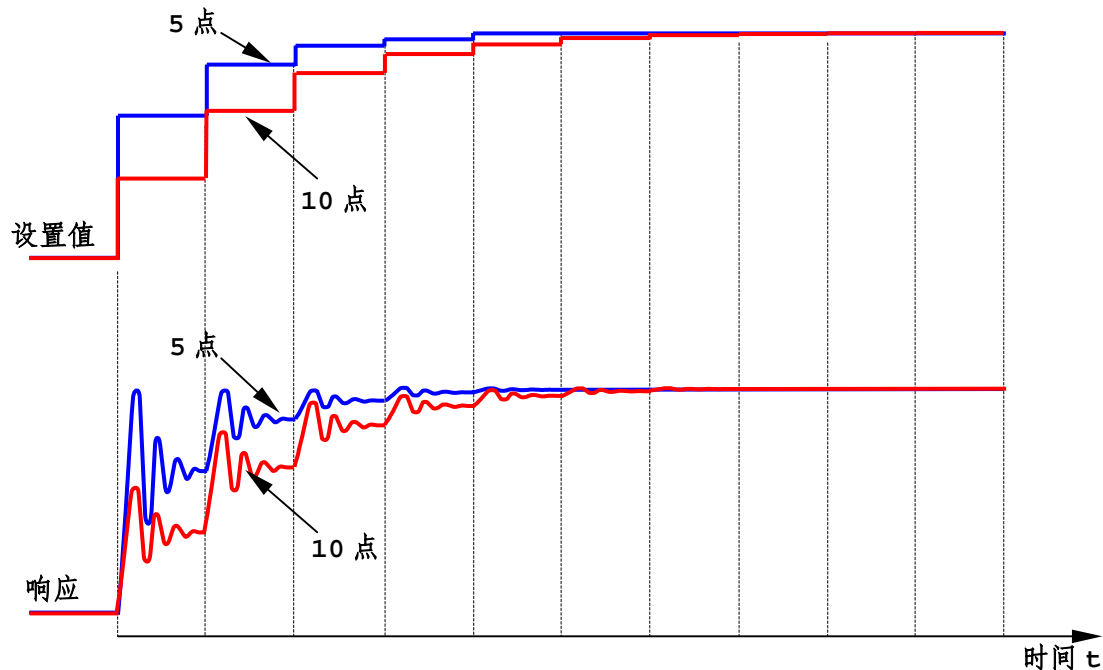
每个台阶时长缩短至振铃周期的 $1/2$,即触发密度提高至 2 倍振铃频率时,响应中过冲过程不完全,并提高下一个台阶响应的沿起始点,从而降低下一个台阶的等效高度,宏观上形成更平滑的响应曲线,如图 4-8b 所示。

继续提高触发频率时,曲线渐趋平滑,但触发频率过高时,快速的指数渐变曲线将逐渐接近阶跃信号,导致输出电流响应重新出现过冲和振铃。无过冲沿响应的触发频率上限由负载决定,通过示波器监测 F2130 的输出电流,调整触发频率可获得最短的无过冲沿时间。

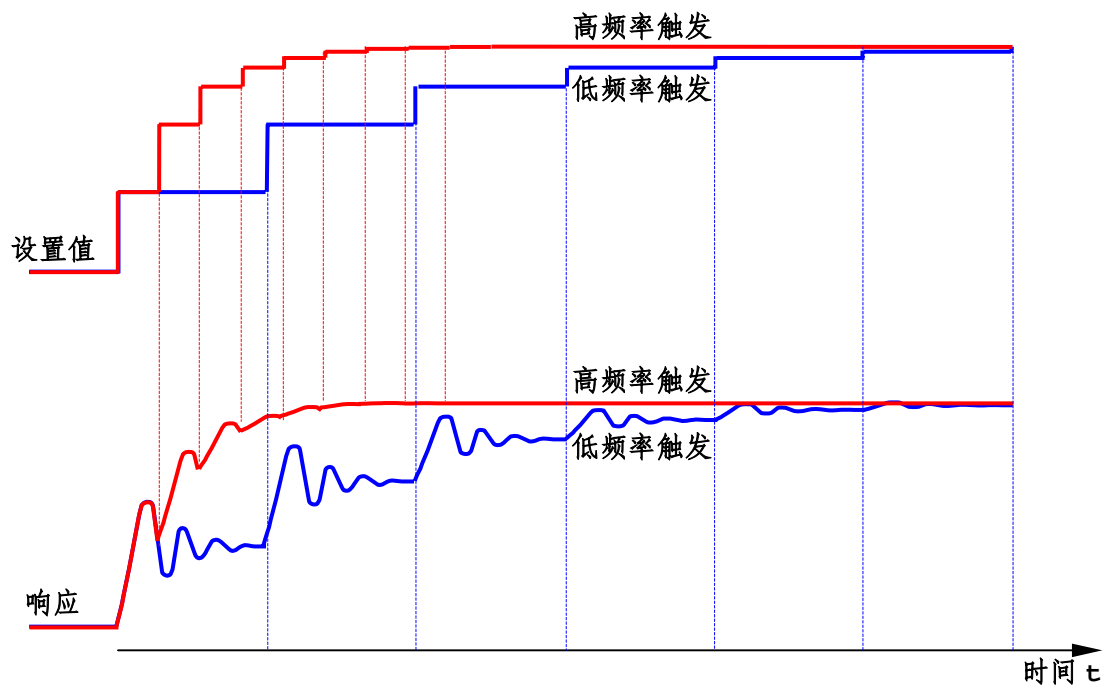
高速无过冲沿响应对于需要磁场快速大范围变化的应用极为有益,例如由正向最大磁场快速翻

转至负向最大磁场。在类似应用中，请务必仔细确认负载的电感量和串联电阻，并保证在高变化率电流的驱动下，F2130 的电源轨 $\pm 60\text{V}$ 可容纳感抗和电阻共同决定的负载两端电压，并在调试过程中，时刻观察前面板“COMPLIANCE”黄色指示灯是否闪烁。

图 4-8 指数步进的点密度和触发频率对响应的影响



a. 提高点密度降低过冲量



b. 提高触发频率使响应平滑

FIG-MAN-F2130-0069

4.3.5 方波磁场

F2130 的推挽输出级允许输出交流电流，带动磁场发生器产生交流磁场。

对于电感量很小的负载，例如电感低于 1mH ，通过适当调整 RC-Snubber 接口连接的附加电

阻 R_E 和附加电容 C_E ，可抑制或消除阶跃响应的输出电流过冲及振铃，从而产生指数沿响应。RC-Snubber 接口及其调整方法请参阅 3.16.2 中的详细内容。

瞬变响应模式下，向 F2130 内部设置值存储器写入 2 个相异的设置值，设置循环模式为 LOOP，并使用已知频率为 f 的外部触发输入信号，可产生频率为 $f/2$ 的对称方波。当 F2130 对电感性负载的输出响应为指数沿时，可由此电感性负载产生相同频率的对称方波磁场。例如写入 -1A 和 2A 至设置值存储器时，在频率为 100Hz 的 TTL 电平信号触发下，产生频率为 50Hz，平顶为 2A、平底为 -1A，即在 0.5A 直流偏置上叠加峰-峰值为 3A 的对称方波信号。受 F2130 最高外部触发输入频率 6.5kHz 的限制，可产生的最高对称方波频率为 3.25kHz。此外，通过增大某个设置值写入的次数，也可产生不同占空比的方波信号。

对于电感量更大的负载，调整 RC-Snubber 接口无法同时保证消除阶跃响应过冲和 F2130 输出端不产生振荡。可通过 4.3.2 中的方法产生针对两个设置值的无过冲沿响应产生方波信号，即 1 个上升沿和 1 个下降沿，并辅以足够多的稳定设置值。

此时可产生的方波频率除受到最高外部触发输入频率限制外，还受到 F2130 的有限输出电压轨，以及负载自身时间常数的限制。当负载电感在方波及其高次谐波频率下的感抗超出 F2130 输出电压轨 60V 在当前施加电流下允许的最高感抗时，将于沿时刻附近产生电压错位，并导致波形的畸变。当负载电感量较高以至于时间常数过大时，过高频率的无过冲阶跃设置信号依然将导致明显的过冲，请使用示波器配合采样电阻监测输出电流，以确定合适的指数步进的数据和可能的触发输入频率。

警告

切勿试图对强电感性负载施加幅值较大且频率稍高的方波电流，强电感性负载对此产生的强烈反电动势可能对 F2130 的输出级造成损伤。

4.3.6 正弦波和三角波磁场

通过向内部设置值存储器写入一个周期的正弦波电流值，并设置循环方式为 LOOP，在频率为 f 的外部触发输入信号驱动下，F2130 可输出频率为 f/N 的由一系列阶梯构成的正弦波电流，其中 N 为一周期正弦波的点数，如图 4-9 所示。

图 4-9 阶梯构成的正弦波 $N=50$

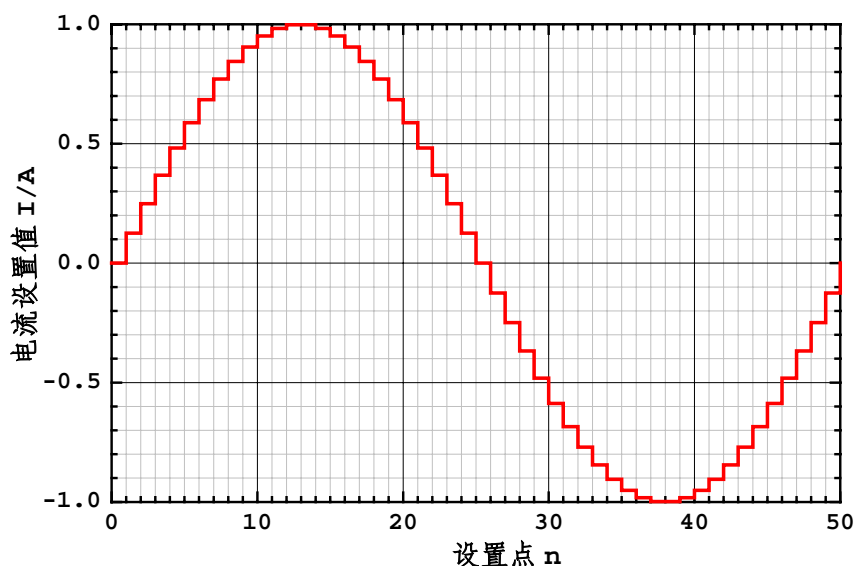


FIG-MAN-F2130-0070

请尽量使点数 N 高于 40，即每 $1/2$ 周期点数不低于 20，从而保证正弦波的连续性，以及在电感性负载时避免过高阶跃幅度引起的过冲和振铃。更高的点数 N 将产生更小的阶梯，从而产生更细腻的波形，并产生频率更高但幅度更小的谐波成分，但点数提高将降低正弦波可能的最高频率 $6500/N$ (Hz)。例如 $N=100$ 时，构成正弦波的最高阶梯产生于过零附近，约为幅值（即 $1/2$ 峰-峰值）的 6.3%，最高频率为 65Hz，足以应对对总谐波失真（THD）要求不高的低频应用。

$N=100$ 时幅值为 1A（峰-峰值为 2A）的正弦波波表如表 4-1 所示：

表 4-1 正弦波波表 $N=100$

TAB-MAN-F2130-0006

| 序号 | 设置值 | 序号 | 设置值 | 序号 | 设置值 | 序号 | 设置值 | 序号 | 设置值 |
|----|---------|----|---------|----|----------|----|----------|-----|----------|
| 1 | 0 | 21 | 0.95106 | 41 | 0.58779 | 61 | -0.58779 | 81 | -0.95106 |
| 2 | 0.06279 | 22 | 0.96858 | 42 | 0.53583 | 62 | -0.63742 | 82 | -0.92978 |
| 3 | 0.12533 | 23 | 0.98229 | 43 | 0.48175 | 63 | -0.68455 | 83 | -0.90483 |
| 4 | 0.18738 | 24 | 0.99211 | 44 | 0.42578 | 64 | -0.72897 | 84 | -0.87631 |
| 5 | 0.24869 | 25 | 0.99803 | 45 | 0.36812 | 65 | -0.77051 | 85 | -0.84433 |
| 6 | 0.30902 | 26 | 1 | 46 | 0.30902 | 66 | -0.80902 | 86 | -0.80902 |
| 7 | 0.36812 | 27 | 0.99803 | 47 | 0.24869 | 67 | -0.84433 | 87 | -0.77051 |
| 8 | 0.42578 | 28 | 0.99211 | 48 | 0.18738 | 68 | -0.87631 | 88 | -0.72897 |
| 9 | 0.48175 | 29 | 0.98229 | 49 | 0.12533 | 69 | -0.90483 | 89 | -0.68455 |
| 10 | 0.53583 | 30 | 0.96858 | 50 | 0.06279 | 70 | -0.92978 | 90 | -0.63742 |
| 11 | 0.58779 | 31 | 0.95106 | 51 | 0 | 71 | -0.95106 | 91 | -0.58779 |
| 12 | 0.63742 | 32 | 0.92978 | 52 | -0.06279 | 72 | -0.96858 | 92 | -0.53583 |
| 13 | 0.68455 | 33 | 0.90483 | 53 | -0.12533 | 73 | -0.98229 | 93 | -0.48175 |
| 14 | 0.72897 | 34 | 0.87631 | 54 | -0.18738 | 74 | -0.99211 | 94 | -0.42578 |
| 15 | 0.77051 | 35 | 0.84433 | 55 | -0.24869 | 75 | -0.99803 | 95 | -0.36812 |
| 16 | 0.80902 | 36 | 0.80902 | 56 | -0.30902 | 76 | -1 | 96 | -0.30902 |
| 17 | 0.84433 | 37 | 0.77051 | 57 | -0.36812 | 77 | -0.99803 | 97 | -0.24869 |
| 18 | 0.87631 | 38 | 0.72897 | 58 | -0.42578 | 78 | -0.99211 | 98 | -0.18738 |
| 19 | 0.90483 | 39 | 0.68455 | 59 | -0.48175 | 79 | -0.98229 | 99 | -0.12533 |
| 20 | 0.92978 | 40 | 0.63742 | 60 | -0.53583 | 80 | -0.96858 | 100 | -0.06279 |

激励电感性负载的正弦波最高频率除受到 $6500/N$ 的限制外，还受到负载电感量的限制，幅值为 I （峰-峰值为 $2I$ ）的正弦波施加于电感量为 L 、串联电阻为 R 的负载上，可能的最高频率 f 受到以下公式的限制：

$$I\sqrt{(2\pi fL)^2 + R^2} < |V_{CMPL}| = 60V$$

例如施加幅值为 1A 的正弦波于（180mH+10Ω）负载上，最高频率为 52.3Hz，更高的频率将使 F2130 进入周期性的钳位状态，并造成波形畸变。

对于电阻性负载，阶梯效应不可忽略。电感性负载迟滞电流的变化，频率升高时可明显改变波形中的阶梯形态，使波形趋于平滑。

以相同方式向设置值存储器写入一周期三角波信号也可达成类似效果。但请注意，三角波尤其在顶角突变时刻的谐波成分较高，对于电感性负载，无畸变波形的最高频率仅及正弦波的约 $2/3$ 。

除非电感量很低，不建议对电感性负载施加锯齿波。锯齿波的锯齿顶角之后为阶跃变化，电流变化率比三角波更高，将产生强烈的过冲和振铃。如果锯齿波为应用所必需，请于阶跃位置使用指数步进降低过冲，但这将使锯齿的出现产生明显延迟。

4.3.7 电磁振动元件

与磁场发生器不同，电磁振动元件，例如扬声器和 VSM 系统中的振动头，具有机械运动部件，因此，其阻抗并非单纯由电感量和串联电阻决定。

例如低频扬声器通常于 20—60Hz 频率范围内，存在至少一个与自然谐振点相关的高阻抗频率点，频率位置与扬声器的功率、口径和负载有关，振动头也存在同样现象。在此高阻抗频率附近驱动电磁振动元件时，相同输出电流时可能要求 F2130 具有更高的输出功率，请务必通过前面板“COMPLIANCE”黄色指示灯检查 F2130 是否频繁进入钳位状态。此外，在此高阻抗频率附近，电磁振动元件的机械输出可能偏离简谐振动，这在某些应用中不可接受。

机械振动推动空气，并产生声波。以 4.3.6 方法产生的由阶梯构成的正弦波施加于这些元件，尤其是扬声器时，将产生可闻的谐波声响。谐波的主要成分为阶梯频率，即外部触发输入频率。

4.4 PN 结负载

4.4.1 静电保护和防冲击保护

多数具有 PN 结结构的半导体器件，例如激光二极管 LD 和发光二极管 LED，在测试和应用中均需要稳定电流驱动。尤其对于结构相当脆弱的 LD，需要低噪声和高稳定度驱动，并要求尽量避免电流源可能产生的电流和电压冲击。F2130 的输出电流具有高准确度和高稳定度，并配备输出端状态控制功能，为最大程度避免电流和电压冲击。

对于脆弱的半导体器件，接入或更换负载时，必须首先使用 **OUTPUT** 键或计算机接口命令 **OUT[CR]** 将输出端切换至阻断状态，使 F2130 输出级与负载隔离，并为负载提供低阻抗保护，而后于负载可靠连接后将输出端切换为正常输出。请参阅 3.7 和第 5 章中的详细内容。

警告

正常输出状态下更换或操作 PN 结负载可能造成**负载瞬间损毁**。

4.4.2 极性保护

警告

F2130 为双极性电流源，为避免 PN 结负载损毁，请确保**正确的连接极性**，并使用足够功率和耐压的快恢复二极管在 F2130 之外对负载**进行极性保护**。

极性保护电路如图 4-10 所示，包括 1 只与负载串联的正偏二极管 D_1 和 1 只与负载反并联的反偏二极管 D_2 。当 F2130 输出极性正确时，电流流经正偏的 D_1 进入负载， D_2 反偏截止。极性错误时， D_1 反偏截止并具有极低的反向漏电流，呈现极高阻抗， D_2 微弱正偏并具有远大于 D_1 的漏电流，为与之并联的负载提供相对较低的阻抗保护，从而保证输出电压的绝大部分由反偏的 D_1 承担，落在负载两端的反向电压几乎为 0。

图 4-10 PN 结负载的极性保护电路

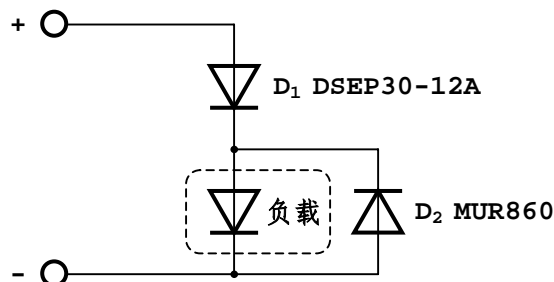


FIG-MAN-F2130-0071

注

请优先使用漏电流极低的硅高反压快恢复二极管构成极性保护电路。反向漏电流较高的肖特基二极管可能造成明显的分流误差和保护失效。

4.4.3 串联保护电阻

正向导通的 PN 结两端电压近似恒定，因此任何可能的过量电流，包含短时间的大电流所产生的能量将全部由 PN 结吸收，在 PN 结内部产生局部高热点，并导致 PN 结损毁，尤其对于大功率 LED，即使 PN 结仍可工作，也将降低器件寿命，并降低发光效率。

串联适当的保护电阻可降低操作中针对 PN 结负载的损伤几率。保护电阻两端呈现与流经其内部的电流成正比的电压，并根据自身电压限制 PN 结两端电压和流经 PN 结的电流，从而避免过流损毁。PN 结正向导通压降为 V_F ，最大电流容限为 I_{MAX} 时，最大保护电阻 $R_{P_{MAX}}$ 为：

$$R_{P_{MAX}} = \frac{|V_{CMPL}| - V_F}{I_{MAX}}, \text{ 其中 } |V_{CMPL}| = 60V$$

多个 PN 结串联时， V_F 为各 PN 结正向导通压降之和。

注

串联保护电阻将降低 F2130 可能施加于 PN 结两端的最高电压。

警告

使用额定功率不足的保护电阻可能导致火灾以及由其导致的人身伤害。

4.4.4 LED 老化寿命试验

在 LED 老化寿命试验中，需要对驱动电流相同的多只 LED 进行测量，以保证多只 LED 的老化条件完全一致，因此常采用多只 LED 串联方式。F2130 提供 60V 有效输出电压，可为多于 18 只串联的大功率白光/蓝光 LED，或多于 30 只串联的大功率红光/红外 LED 提供高稳定性和极低纹波的高质量电流驱动，避免开关恒流电源的周期性电流尖峰对 LED 的瞬间过流损伤。

4.5 电解液

F2130 可输出高稳定性和高准确度电流，适于精密电化学过程。

由于电解液的导电载体为数量有限且移动缓慢的离子，因此电流流经电解液时，相比常见导体，将产生明显的散粒噪声。

散粒噪声为宽频带噪声，其能量谱与白噪声类似。散粒噪声源于导电载体的不均匀性，因此几乎存在于一切导体，例如真空管和半导体中。然而电解液由于离子的离散性更为严重，产生的散粒噪声尤为显著。除非使用极弱的电流，否则极易打破体系中的局部状态平衡，例如腐蚀体系，运动离子具有符合高斯分布的速度分布。在一定时间内，相同截面积流经的离子数量并非常数，而是在平均值附近上下起伏的随机变量。

此外，电解过程还将产生可观测的闪烁噪声，可能与溶液中局部阴阳极反应造成的离子浓度涨落有关。其能量谱集中于低频段，与 $(1/f)^2$ 成正比，具有明显的 $1/f$ 转角频率。电解过程中，使用示波器观察 F2130 的输出电流时，电流波形呈现平均值附近密集的瞬态变化。

警告

正常输出状态下操作电极可能在电极与电解液液面接触处产生明显的火花。

计算机接口

5.1 简介

F2130 程控功率电流源配备计算机接口，所有仪器功能均可通过接口进行操作。本章包含接口操作方法，其中：

- 5.2 计算机接口选择
- 5.3 RS-232C 接口概述
- 5.4 USB-232 接口概述
- 5.5 接口命令语法和软件控制机制
- 5.6 接口命令详解

5.2 计算机接口选择

5.2.1 接口构成

F2130 配备标准 RS-232C 串行计算机接口，并提供完整的命令集，以完成对仪器功能的操作。

同时为提高计算机的接口容量，F2130 内部提供将 RS-232C 协议转换为 USB 协议的 USB-232 转接器。使用 USB-232 接口时，用户可使用与 RS-232C 接口相同的命令和操作方法，并籍由符合 USB 1.1 规范的 USB 接口控制仪器。

通过简便的 USB 连接方式，一台计算机可通过固有的多个 USB 硬件接口连接多台与 F2130 类似的串行接口设备，从而无需由硬件扩充 RS-232C 接口。

5.2.2 选择接口和设置波特率

在同一时刻，用户只可使用 F2130 的一种接口形式，使用一种接口时，另一接口不响应任何操作。切换 RS-232C 和 USB-232 接口的操作方法请参阅 3.26.1 中的内容。

由于 2 种接口于 F2130 内部均视为标准 RS-232C 接口，因此 F2130 对二者使用相同的波特率设置，即对波特率的设置同时适用于 2 种接口，而无论设置波特率时正在使用何种接口。波特率的设置方法请参阅 3.26.2 中的内容。

使用 USB-232 接口时，需首先于计算机上安装 F2130 的接口驱动程序。驱动程序安装方法请参阅 3.26.3 中的相应内容。

5.3 RS-232C 接口概述

F2130 使用的 RS-232C 接口符合电子工业协会 EIA-232-E 标准。EIA-232-E 标准描述了各种用于计算机与电子设备之间连接的众多通用接口之一。在 F2130 内部，USB-232 接口数据也将转换为符合 EIA-232-E 标准的数据格式。

EIA-232-E 标准描述的 RS-232C 接口可以采用不同的设置方法和通讯参数。本节以下部分将描述适用于 F2130 的串行通讯特性。为达可靠通讯，用户需首先在计算机上正确设置端口参数。

5.3.1 物理连接

F2130 后面板配置 1 只 9 针 D 型连接器，适用于使用 RS-232C 接口与计算机通讯。最初的 EIA-232-E 标准指定使用 25 针连接器，至今 9 针连接器也成为工业标准。众多第三方通讯电缆可用于通过 9 针或 25 针方式将电子设备连接至计算机。图 5-1 为常用 DCE 配置的 9 针连接器引线序列。必须提请用户注意，F2130 并不支持其中的全部引线功能。

图 5-1 常用 DCE 设置 9 针连接器引线序列



FIG-MAN-F2130-0072

DCE 配置代表数据通讯设备 (Data Communication Equipments), 并决定方向引线 Tx 和 Rx 的线序和连接方式。DTE 配置 (Data Terminal Equipments) 的设备通过的直通电缆 (即 2-2、3-3、5-5) 与 DCE 设备互补连接。DCE 配置的设备通过空调制解调器电缆 (即 2-3、3-2、5-5) 与 DCE 设备互补连接。类似的, DTE 配置的设备之间也需通过空调制解调器电缆互补连接。

F2130 的 RS-232C 串行驱动器可产生满足 EIA-232-E 标准的传输电平。由于接口电压和电流限制于较低的水平, 在正常操作中接口电压可视为安全电压。F2130 的串行驱动器设计用于驱动长度不大于 15 米的通讯电缆。更长的电缆可能造成通讯不稳定。

5.3.2 硬件支持

F2130 的 RS-232C 硬件接口具有以下特性:

- ① 异步时钟: 每个字符的各个位均使用异步时钟。此时钟需要起始位和结束位作为一个字符传输的一部分, 由此发送设备和接收设备可于不同字符传输中重新同步。
- ② 半双工传输方式: F2130 可作为数据的发送者或接收者, 但无法同时作为两者。
- ③ 波特率: F2130 支持的波特率为 9600、19200、38400 和 57600。
- ④ 硬件握手 (流控制): F2130 不支持硬件握手, 因此在计算机接口操作中, 用户程序必须对其中涉及到的流控制时序全面负责。

5.3.3 传输格式

字符是接口传输中的最小单位。F2130 使用的每个字符长度为 10 位, 其中包含数据位和同步位。数据位为 8 位, 对应 1 字节数据, 同步位包含 1 位起始位和 1 位停止位, 无奇偶校验位。

字符数据以 ASCII 编码为基本格式, 此外 F2130 还使用 2 个不可显示的特殊 ASCII 字符 CR 和 LF 作为命令结束符, 以标明一个完整字符串发送完毕, 其中 CR=0DH (13)、LF=0AH (10)。F2130 可识别的结束符为 CR 或 LF, 也可以为二者的任意组合, 例如 CR+LF、LF+CR、CR+CR 和 LF+LF, 此时 F2130 将后一个结束符解释为空命令。

5.4 USB-232 接口概述

F2130 后面板配置 USB Standard B 连接器, 用户可通过标准 USB A-B 电缆连接计算机和 F2130。USB 接口在 F2130 内部转换为标准 RS-232C 接口, 对于计算机, 此 USB-232 接口也等效于标准 RS-232C 接口, 因此, 对于 USB-232 接口的操作与标准 RS-232C 接口的操作完全相同。

USB Standard B 连接器通常用于设备端, 对应的 USB Standard A 连接器通常用于控制端, 二者在物理尺寸有较大差异, 并通过 USB A-B 电缆相互连接。详细连接方法请参阅 2.4.2。

5.5 接口命令语法和软件控制机制

5.5.1 消息字符串

消息字符串为用于执行接口功能的一组字符。F2130 具有 3 种基本消息字符串, 即命令、查询和响应。计算机通过用户程序向 F2130 发送命令和查询, F2130 视执行结果返回响应。由计算机发起的通讯每次允许发送多条命令和查询, 消息字符串之间必须以结束符分隔。F2130 逐一对命令进行响应, 但包含结束符在内的多条命令/查询字节 (字符) 长度总和不应超过 200 字节。

命令字符串由计算机发出, 指示仪器执行一项特定功能, 或修改某一参数, 格式为:

| 命令助记符 | 空格 | 参数 | 结束符 |
|-------|----|----|-----|
|-------|----|----|-----|

例如开启键盘锁命令: `LOCK 1[CR]`, 以及不具有参数的命令, 如设备复位命令: `*RST[CR]`。

查询字符串由计算机发出，查询 F2130 当前状态或参数设置，格式为

| | | |
|-------|---|-----|
| 查询助记符 | ? | 结束符 |
|-------|---|-----|

例如当前输出电流查询：CUR?[CR]。

消息字符串中的英文字符大小写不敏感，可均使用小写或大写，也可大小写混用，例如设置扫描模式命令 SWMODE 1[CR]也可写为 swmode 1[CR]或 Swmode 1[CR]。此外，为降低接口通讯开销，F2130 对部分助记符较长的查询和命令提供简单助记符，例如查询 CUR?[CR]的简单助记符形式为 I?[CR]或 i?[CR]。

响应字符串为 F2130 对命令或查询的应答。仪器收到命令并执行完毕后、或者收到命令但当前无法执行、或者收到查询后向计算机发送响应字符串，并在字符串结尾固定发送结束符[CR]。

响应时间视执行时间而异，F2130 处于空闲状态时的最大响应时间不大于 100ms。

5.5.2 数据格式

F2130 通过一系列 16 进制编码的 ASCII 码与计算机之间进行通讯，ASCII 编码请参阅 A.6 中的详细内容。例如计算机向 F2130 发送命令 CUR 1.00000[term]，当结束符[term]=[CR]时计算机实际通过串行接口发送的数据为：

| 格式 | | 助记符 | | | 空格 | 参数 | | | | | | | 结束符 |
|------------|-----------|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ASCII 码 | | C | U | R | Space | 1 | . | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | CR |
| 实际发送 字节 | 16 进制 HEX | 43h | 55h | 52h | 20h | 31h | 2Eh | 30h | 30h | 30h | 30h | 30h | 0Dh |
| | 10 进制 DEC | 67 | 85 | 82 | 32 | 49 | 46 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 13 |

5.5.3 应答机制

F2130 采用一问一答的应答机制，即对每个具有正确助记符的命令或查询均返回响应。如果命令助记符/查询助记符拼写错误，F2130 不返回响应并于 100ms 内抛弃助记符错误的命令/查询。

使用计算机接口控制时应首先使 F2130 处于标准显示界面，否则除命令 *RST 外 F2130 对其余命令/查询均返回忙 BUSY。F2130 尚未完成一项命令任务时即收到命令/查询，也将返回忙 BUSY。如果命令参数超出设定范围或浮点数格式不符合此命令规定的格式，F2130 返回 ERROR。

由于通讯时序问题及可能的空间干扰，F2130 可能未接收到包含结束符在内的完整命令/查询，或计算机发送的命令/查询不含结束符时，F2130 将等待 200ms 并于之后抛弃不完整命令/查询。因此，由计算机发出的命令/查询中包含结束符在内的两字符之间的时间间隔应小于 200ms。

5.5.4 消息流控制

F2130 采用一问一答的应答机制，并对所有接收到的命令和查询返回响应。然而，F2130 自身无法决定这些命令和查询何时到达，因此可能在尚未执行完当前命令所规定的任务时又接收到其它命令或查询，从而无法返回用户程序所需的应答响应。为此，用户程序应对消息流控制全面负责。

遵循一问一答的应答机制可最大程度保证消息流软件控制的有效性。建议用户程序一次只发送一个命令或查询，立即等待来自 F2130 的应答响应，并于接收到应答响应后发送下一命令或查询。

F2130 的串行命令处理机制可应对大多数常规的消息流控制。然而，为达通讯的最佳可靠性，可遵循以下简单原则，以保证每次命令和查询均可得到预期的应答响应：

- ❶ 使用正确的格式，并在发送完整命令后发送至少 1 个结束符。
- ❷ 最后一个结束符发送后的 100ms 内尽量不发起其它通讯。
- ❸ 发送完整命令并发送 CR 和 LF 中至少 1 个结束符后，立即准备接收响应。
- ❹ 接收包含结束符[CR]在内的完整响应。
- ❺ 响应接收完毕后的 100ms 内尽量不发起其它通讯。

4.5.5 接收缓存

F2130 的串行接口具有 200 字节(字符)接收缓存。计算机连续发送多个命令/查询时，F2130 将接收到的各命令/查询及其结束符保存于接收缓存内，并视接收顺序依次处理，而后于每一命令/查询处理完成后向计算机依次返回响应。各命令/查询之间以结束符分隔。

然而，由于部分命令/查询的处理可能需要较长时间，或者命令的执行可能延续较长时间，其后发送的命令/查询可能无法正确执行。例如：F2130 输出端处于正常输出状态，渐变响应模式下，设置输出电流为 10A 时，连续命令/查询 CUR 10[term]CUR?[term]中，CUR 10 命令首先设置 F2130 的输出电流以线性渐变方式递增至 10A，此过程中 F2130 不接受任何查询以及不响应除 STOP 和 FAST0 之外的任何命令，CUR? 的响应为 BUSY，而无法查询当前输出电流。

因此，请尽量遵循 5.5.3 中的消息流控制机制，以保证接口通讯的可靠性。如需连续发送命令/查询，请务必确认其中可能造成后续命令/查询无法正确执行的命令位于连续命令的末尾。

5.5.6 通讯故障诊断

F2130 为全新品但仍出现通讯故障时，请检查如下事项：

- ① 查看仪器当前接口是否与后面板连接一致，以及
- ② 查看计算机使用的串行接口的端口号是否与后面板连接一致。
- ③ 查看是否使用了正确的 RS-232C 直通电缆或 USB A-B 电缆。
- ④ 查看 F2130 的波特率设置是否与计算机的串行接口波特率一致。
- ⑤ 查看计算机串行端口的数据位、奇偶校验、停止位和流控制设置是否正确。
- ⑥ 如果 RS-232C 接口通讯正常而 USB-232 接口无法通讯，请查看驱动程序安装是否正确。
- ⑦ 确保命令和查询的拼写正确，对于带参数的命令，应在命令助记符与参数之间添加 1 个空格，除此之外，所有命令和查询的其余位置均不应添加空格。
- ⑧ 查看用户软件是否每次发送命令或查询时均在结尾发送结束符，并于接收响应时接收包含结束符[CR]在内的完整响应。某些终端仿真程序可能并不严格遵循此原则。
- ⑨ 查看用户软件是否在 1 个消息字符串内的 2 个相邻字符之间的发送间隔大于 200ms。

5.6 接口命令和查询详解

5.6.1 接口命令和查询集

F2130 的接口命令和查询集划分为①通用接口命令、②通用接口查询、③设备特殊命令和④特殊命令查询 4 部分，如表 5-1 所示。其中[term]为命令和查询的结束符，响应的结束符均固定为[CR]。结束符的详细描述请参阅 5.3.3 和 5.5.1 中的相关内容。

表 5-1 接口命令和查询集

TAB-MAN-F2130-0007

| 助记符 | 描述 | 简单助记符 | 正常响应 |
|----------|-----------|-------|-------|
| ① 通用接口命令 | | | |
| *RST | 仪器复位 | --- | CMLT |
| ② 通用接口查询 | | | |
| *IDN? | 查询仪器序列号 | --- | 产品序列号 |
| ③ 设备特殊命令 | | | |
| ASOURCE | 选择信号源 | AS | CMLT |
| CUR | 设置输出电流 | I | CMLT |
| CURFD | 设置输出电流微调位 | ID | CMLT |

表 5-1 接口命令和查询集 (续)

TAB-MAN-F2130-0007

| 助记符 | 描述 | 简单助记符 | 正常响应 |
|-----------------|----------------|-------|------|
| ③ 设备特殊命令 | | | |
| CURFDOWN | 当前输出电流微调位数-1 | IFU | CMLT |
| CURFUP | 当前输出电流微调位数+1 | IFD | CMLT |
| FAST0 | 输出电流快速归零 | F0 | CMLT |
| KEYVOICE | 设置键盘音 | KV | CMLT |
| LOCK | 设置键盘锁状态 | L | CMLT |
| LOADP | 设置负载保护功能 | LP | CMLT |
| MEMADD | 将当前数据添加至设置值存储器 | MA | CMLT |
| MEMADDVALUE | 将参数添加至设置值存储器 | MAV | CMLT |
| MEMHEAD | 触发指针返回头部 | MH | CMLT |
| MEMREPEAT | 设置重复方式 | MR | CMLT |
| MEMGROUP | 选择设置值存储器组 | MG | CMLT |
| MEMCLEARGROUP | 清除当前存储器组 | MCG | CMLT |
| MEMCLEAR | 清除所有存储器组 | MC | CMLT |
| NTRIG | 设置常规触发方式 | NT | CMLT |
| NTRIGD | 设置常规触发输出延迟时间 | NTD | CMLT |
| OUT | 设置输出端状态 | O | CMLT |
| OVLDRST | 解除内部功率过载保护 | OVR | CMLT |
| OSCWARNING | 设置振荡报警方式 | OW | CMLT |
| PN | PN 电流换向 | --- | CMLT |
| RESPONSE | 设置响应模式 | RSP | CMLT |
| RATE | 设置电流线性渐变速率 | R | CMLT |
| RAMPAUDIO | 设置渐变结束音 | RA | CMLT |
| STOP | 停止正在进行的电流线性渐变 | SP | CMLT |
| SWEEP | 开始电流扫描 | SW | CMLT |
| SWABORT | 中止电流扫描 | SWA | CMLT |
| SWPAUSE | 暂停电流扫描 | SWP | CMLT |
| SWCONT | 由暂停点继续电流扫描 | SWC | CMLT |
| SWMODE | 设置扫描模式 | SM | CMLT |
| SWMAX | 设置电流扫描最大值 | SX | CMLT |
| SWTRIG | 设置扫描触发输出方式 | ST | CMLT |
| SWTRIGINT | 设置扫描触发输出时间间隔 | STI | CMLT |
| TRIGGER | 接口触发 | T | CMLT |
| TRIGIN | 设置触发输入源 | TI | CMLT |
| ④ 设备特殊查询 | | | |
| ASOURCE? | 查询当前信号源 | AS? | 0、1 |
| CUR? | 查询输出电流设置值 | I? | 电流值 |
| CURFD? | 查询输出电流微调位 | ID? | 0—6 |
| CMPLS? | 查询是否进入电压钳位状态 | CS? | 0、1 |
| DIR? | 查询输出电流方向 | D? | 0、1 |
| KEYVOICE? | 查询是否开启键盘音 | KV? | 0、1 |
| LOCK? | 查询键盘锁状态 | L? | 0、1 |
| LOADP? | 查询负载保护设置 | LP? | 0、1 |
| LOADPS? | 查询负载保护状态 | LPS? | 0、1 |
| MEMGP? | 查询当前存储器组 | MG? | 0—2 |
| MEMREPEAT? | 查询重复模式 | MR? | 0、1 |
| MEMLEN? | 查询当前存储器组长度 | ML? | NNNN |

表 5-1 接口命令和查询集（续）

TAB-MAN-F2130-0007

| 助记符 | 描述 | 简单助记符 | 正常响应 |
|-------------|--------------|-------|--------|
| ④ 设备特殊查询 | | | |
| MEMREPEAT? | 查询重复模式 | MR? | 0、1 |
| MEMLLEN? | 查询当前存储器组长度 | ML? | NNNN |
| NTRIG? | 查询常规触发输出方式 | NT? | 0—2 |
| NTRIGD? | 查询常规触发输出延迟时间 | NTD? | xx.xxx |
| OUT? | 查询输出端状态 | O? | 0、1 |
| OVLDS? | 查询当前内部功率过载状态 | OVS? | 0、1 |
| OSC? | 检测输出端是否发生振荡 | S? | 0、1 |
| OSCWARNING? | 查询振荡报警方式 | OW? | 0、1 |
| RESPONSE? | 查询响应模式 | RSP? | 0、1 |
| RATE? | 查询电流线性渐变速率 | R? | xx.xx |
| RAMPAUDIO? | 查询是否开启渐变结束音 | RA? | 0、1 |
| SWEEP? | 查询电流扫描状态 | SW? | 0、1 |
| SWMODE? | 查询电流扫描模式 | SM? | 0—3 |
| SWMAX? | 查询电流扫描最大值 | SM? | 电流值 |
| SWTRIG? | 查询扫描触发输出方式 | ST? | 0—2 |
| SWTRIGINT? | 查询扫描触发输出时间间隔 | STI? | xx.x |

5.6.2 通用接口命令

*RST

- 功能： 仪器复位
- 格式： *RST[term]
- 返回： 仪器复位后返回 **CMLT**[CR]，并返回标准显示界面。
- 备注： 瞬变响应模式下，输出电流立即归零，渐变响应模式下，停止正在进行的电流扫描，输出电流以 10A/s 速度渐变至 0。而后输出端进入阻断状态，电流微调位为最低位，关闭触发输入，触发指针返回头部，关闭所有菜单，解除内部功率过载保护。***RST** 不改变响应模式，渐变速率、接口形式和波特率、显示器对比度、振荡报警方式、键盘锁、键盘音和渐变结束音、常规触发输入及其延迟时间、扫描触发输入及其间隔。

5.6.3 通用接口查询

*IDN?

- 功能： 查询仪器产品序列号
- 格式： *IDN?[term]
- 返回： F2130 处于标准显示界面，完成电流线性渐变且未进行电流扫描，以及已完成上一命令任务时，仪器复位后返回产品序列号；否则立即返回 **BUSY**[CR]。
- 备注： F2130 使用 17 位产品序列号：

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|---|---|---|---|------|---|---|---|---|------|---|---|---|---|----|---|
| F | 2 | 1 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 9 | 0 | 7 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 仪器型号 | | | | | 出厂序号 | | | | | 出厂日期 | | | | | 版本 | |

5.6.4 设备特殊命令

ASOURCE

- 功能： 选择信号源
- 格式： ASOURCE n[term]、n=0、1

- 简化: AS n[term]、n=0、1
- 返回: F2130 未处于标准显示界面, 或未完成电流线性渐变, 或正在进行电流扫描, 或未完成上一命令任务时, 立即返回 **BUSY**[CR]。
ASOURCE 0 设置信号源为后面板模拟输入 BNC, 并返回 **CMLT**[CR]。
ASOURCE 1 设置信号源为内部 DAC, 并返回 **CMLT**[CR]。
 参数非 0 或 1 时, 返回 **ERROR**[CR]。
- 备注: 0=后面板模拟输入 BNC, 1=内部 DAC。
 信号源选择的详细描述请参阅 3.13 中的内容, 并请参阅查询 **ASOURCE?**。

CUR

- 功能: 设置输出电流
- 格式: CUR \pm xx.xxxxx[term]
- 简化: I \pm xx.xxxxx[term]
- 返回: F2130 未处于标准显示界面, 或未完成电流线性渐变, 或正在进行电流扫描, 或未完成上一命令任务时, 立即返回 **BUSY**[CR]。
 参数大于 10.00000, 或者浮点数格式错误时, F2130 返回 **ERROR**[CR]。
 输出电流设置完成后, F2130 返回 **CMLT**[CR]。
- 备注: 参数单位为安培 (A)。
 F2130 支持除 “x.” 或 “xx.” 以外的合法浮点参数 xx.xxxxx 格式, 小数点之前的位数应小于或等于 2 位, 小数点以后第 5 位之后的位数四舍五入后自动省略。
 瞬变响应模式下, 输出端为正常输出状态时, 设置电流后输出电流立即变化至设置值。
 渐变响应模式下, 输出端为正常输出状态时, 设置电流后输出电流线性渐变至设置值, 并可能需要等待较长时间, 此过程中可随时按下前面板 **STOP/0** 键或使用命令 **STOP** 停止渐变过程并使输出电流保持于停止时刻的状态, 或使用命令 **FAST0** 使电流快速归零。
 输出端处于阻断状态时, F2130 立即改变当前电流设置值至命令参数数值, 但不改变输出电流大小。
 参数单位为 “+” 时, F2130 输出正电流, 单位为 “-” 时反之。参数单位缺省时, F2130 默认电流方向为正向。
 响应模式、设置输出电流、输出端状态、瞬态响应、线性渐变方式和停止电流线性渐变的详细描述请分别参阅 3.4、3.5、3.7、3.8、3.9 和 3.10 中的内容, 并请参阅命令 **STOP**、**RESPONSE**、**FAST0** 和查询 **CUR?**。

CURFD

- 功能: 设置输出电流微调位
- 格式: CURFD n[term]、n=0—6
- 简化: ID n[term]、n=0—6
- 返回: F2130 未处于标准显示界面, 或未完成电流线性渐变, 或正在进行电流扫描, 或未完成上一命令任务时, 立即返回 **BUSY**[CR]。
 输出电流微调位设置完成后, 返回 **CMLT**[CR]。
 瞬变响应模式下, 参数非 0—6 时, 以及渐变响应模式下, 参数非 0—4 时, 返回 **ERROR**[CR]。
- 备注: 0=0.00001A 位, 1=0.0001A 位, 2=0.001A 位, 3=0.01A 位, 4=0.1A 位, 5=1A 位, 6=10A 位。
 设置输出电流调整位可于任何输出端状态下操作。
 输出电流微调的详细描述请参阅 3.5.1 中的内容, 并请参阅命令 **CURFUP**、

CURFDOWN 和查询 **CURFD?** 。

CURFUP

功能： 当前输出电流微调位数值+1

格式： **CURFUP**[term]

简化： **IFU**[term]

返回： F2130 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或正在进行电流扫描，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。

CURFUP 使当前输出电流微调位的数值+1。微调完成后，返回 **CMLT**[CR]。

备注： 正常输出状态下，输出电流立即发生变化，而不执行线性渐变过程。

输出电流微调设置规则请参阅 3.5.1 中的详细内容，并请参阅命令 **CURFD**、**CURFDOWN** 和查询 **CURFD?** 。

CURFDOWN

功能： 当前输出电流微调位数值-1

格式： **CURFDOWN**[term]

简化： **IFD**[term]

返回： F2130 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或正在进行电流扫描，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。

CURFDOWN 使当前输出电流微调位的数值-1。微调完成后，返回 **CMLT**[CR]。

备注： 正常输出状态下，输出电流立即发生变化，而不执行线性渐变过程。

输出电流微调设置规则请参阅 3.5.1 中的详细内容，并请参阅命令 **CURFD**、**CURFUP** 和查询 **CURFD?** 。

FAST0

功能： 输出电流快速归零

格式： **FAST0**[term]

简化： **F0**[term]

返回： F2130 未处于标准显示界面，或正在进行电流扫描时，立即返回 **BUSY**[CR]。

输出端为阻断状态时，电流设置值回零，并返回 **CMLT**[CR]。

瞬变响应模式下，输出端为正常输出状态时，输出电流立即回零，并返回 **CMLT**[CR]。

渐变响应模式下，输出端为正常输出状态且当前设置值为 0 时，立即返回 **CMLT**[CR]。

否则 F2130 以 10A/s 的最高速率以线性渐变方式使输出电流快速归零，并在归零完成后 **CMLT**[CR]。

为达可靠控制，渐变响应模式下，发送 **FAST0** 之前应首先使用 **STOP** 命令使 F2130 中止针对电流变化的任何过程，并在接收到 F2130 返回的响应后使用 **FAST0** 进行快速归零。

备注： 快速归零可于 F2130 处于电流线性渐变过程中生效。

快速归零的详细描述请参阅 3.10 中的内容，并请参阅命令 **STOP** 。

KEYVOICE

功能： 设置键盘音

格式： **KEYVOICE** n[term]、n=0、1

简化： **KV** n[term]、n=0、1

返回： F2130 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或正在进行电流扫描，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。

KEYVOICE 0 关闭键盘音，并返回 **CMLT**[CR]。

KEYVOICE 1 开启键盘音，并返回 **CMLT**[CR]。

参数非 0 或 1 时，返回 **ERROR**[CR]。

备注： 0=关闭键盘音，1=开启键盘音。

键盘音的详细描述请参阅 3.27 中的内容，并请参阅查询 **KEYVOICE?**。

LOCK

功能： 设置键盘锁状态

格式： **LOCK n**[term]、n=0、1

简化： **L n**[term]、n=0、1

返回： F2130 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或正在进行电流扫描，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。

LOCK 1 开启键盘锁，并返回 **CMLT**[CR]。

LOCK 0 关闭键盘锁，并返回 **CMLT**[CR]。

参数非 0 或 1 时，返回 **ERROR**[CR]。

备注： 0=关闭键盘锁，1=开启键盘锁。

键盘锁的详细描述请参阅 3.25 中的内容，并请参阅查询 **LOCK?**。

LOADP

功能： 设置负载保护功能

格式： **LOADP n**[term]、n=0、1

简化： **LP n**[term]、n=0、1

返回： F2130 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或正在进行电流扫描，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。

LOADP 1 开启负载保护功能，并返回 **CMLT**[CR]。

LOADP 0 关闭负载保护功能，并返回 **CMLT**[CR]。

参数非 0 或 1 时，返回 **ERROR**[CR]。

备注： 0=关闭负载保护，1=开启负载保护。

负载保护功能的详细描述请参阅 3.23 中的内容，并请参阅查询 **LOADP?** 和 **LOADPS?**。

MEMADD

功能： 将当前电流设置值添加至设置值存储器

格式： **MEMADD**[term]

简化： **MA**[term]

返回： F2130 未处于标准显示界面，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。

当前存储器组长度未达到 1024 时，**MEMADD** 将当前电流设置值添加至当前存储器组的尾部，触发指针返回头部，并返回 **CMLT**[CR]。否则返回 **ERROR**[CR]。

备注： 设置值存储器结构和添加设置值的详细描述请参阅 3.21.1 和 3.21.4 中的内容，并请参阅命令 **MEMADDVALUE** 和查询 **MEMLEN?**。

MEMADDVALUE

功能： 将参数添加至设置值存储器

格式： **MEMADDVALUE ±xx.xxxxx**[term]

简化： **MAV ±xx.xxxxx**[term]

返回： F2130 未处于标准显示界面，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。

当前存储器组长度未达到 1024 时，**MEMADDVALUE** 将参数±xx.xxxxx 添加至当前存储器组的尾部，触发指针返回头部，并返回 **CMLT**[CR]。否则返回 **ERROR**[CR]。

参数超出 ± 10.00000 ，或者浮点数格式错误时，F2130 返回 **ERROR**[CR]。

备注： 参数单位为安（A）。

F2130 支持除“x.”以外的合法浮点参数 $\pm xx.xxxxx$ 格式，小数点之前的位数应小于或等于 2 位，小数点以后第 5 位之后的位数四舍五入后自动省略。“+”号可缺省。设置值存储器结构和添加设置值的详细描述请参阅 3.21.1 和 3.21.4 中的内容，并请参阅命令 **MEMADD** 和查询 **MEMLEN?**。

MEMHEAD

功能： 将触发指针指向头部

格式： **MEMHEAD**[term]

简化： **MH**[term]

返回： F2130 未处于标准显示界面，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。

MEMHEAD 将触发指针指向当前存储器组的头部，并返回 **CMLT**[CR]。

备注： 设置值存储器结构和触发指针的详细描述请参阅 3.21.1 和 3.21.3 中的内容。

MEMREPEAT

功能： 设置重复方式

格式： **MEMREPEAT** n[term]、n=0、1

简化： **MR** n[term]、n=0、1

返回： F2130 未处于标准显示界面，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。

MEMREPEAT 1 将重复模式设置为循环 LOOP，并返回 **CMLT**[CR]。

MEMREPEAT 0 将重复模式设置为单次 ONCE，并返回 **CMLT**[CR]。

参数非 0 或 1 时，返回 **ERROR**[CR]。

备注： 0=循环 LOOP，1=单次 ONCE。

变更重复方式后，触发指针返回头部，否则触发指针位置不变。

重复方式的详细描述请参阅 3.21.5 中的内容，并请参阅查询 **MEMREPEAT?**。

MEMGROUP

功能： 选择存储器组

格式： **MEMGROUP** n[term]、n=0—2

简化： **MG** n[term]、n=0—2

返回： F2130 未处于标准显示界面，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。

MEMGROUP n 将当前存储器组选择为 Gn，并返回 **CMLT**[CR]。

参数非 0、1 或 2 时，返回 **ERROR**[CR]。

备注： 0=G0，1=G1，2=G2。

变更当前存储器组后，触发指针返回头部，否则触发指针位置不变。

设置值存储器结构和选择存储器组的详细描述请参阅 3.21.1 和 3.21.2 中的内容，并请参阅查询 **MEMGROUP?**。

MEMCLEARGROUP

功能： 清除当前存储器组中的内容

格式： **MEMCLEARGROUP**[term]

简化： **MCG**[term]

返回： F2130 未处于标准显示界面，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。

MEMCLEARGROUP 清除当前存储器组中的内容，触发指针返回头部，并返回 **CMLT**[CR]。

备注： 当前存储器组中的内容清除后不可恢复。清除完成后，当前存储器组长度为 0。

清除存储器组的详细描述请参阅 3.21.6 中的内容，并请参阅命令 **MEMCLEAR** 和查询 **MEMLEN?**。

MEMCLEAR

- 功能: 清除全部存储器中的内容
- 格式: **MEMCLEAR** [term]
- 简化: **MC**[term]
- 返回: F2130 未处于标准显示界面，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。
MEMCLEAR 清除所有存储器组中的内容，触发指针返回头部，并返回 **CMLT**[CR]。
- 备注: 所有存储器组中的内容清除后均不可恢复。清除完成后，各存储器组长度均为 0。
清除存储器组的详细描述请参阅 3.21.6 中的内容，并请参阅命令 **MEMCLEARGROUP** 和查询 **MEMLEN?**。

NTRIG

- 功能: 设置常规触发输出方式
- 格式: **NTRIG** n[term]、n=0—2
- 简化: **NT** n[term]、n=0—2
- 返回: F2130 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或正在进行电流扫描，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。
NTRIG 0 关闭常规触发输出，并返回 **CMLT**[CR]。
NTRIG 1 和 **NTRIG 2** 分别设置常规触发输出方式为“ON”和“ON+J”，并返回 **CMLT**[CR]。
参数非 0、1、2 时，返回 **ERROR**[CR]。
- 备注: 0=OFF, 1=ON, 2=ON+J。
常规触发输出方式的详细描述请参阅 3.18 中的相关内容，并请参阅命令 **NTRIGD** 和查询 **NTRIG?**、**NTRIGD?**。

NTRIGD

- 功能: 设置常规触发输出延迟时间
- 格式: **NTRIGD** xx.xxx[term]
- 简化: **NTD** xx.xxx[term]
- 返回: F2130 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或正在进行电流扫描，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。
无论关闭或开启常规触发输出，**NTRIGD xx.xxx** 均有效，并于设置完成后均返回 **CMLT**[CR]。
xx.xxx>10.000 或浮点数表示法不正确时，F2130 返回响应 **ERROR**[CR]。
- 备注: 参数 xx.xxx 为 0—10.000 之间的 5 位无符号浮点数，单位为秒 (s)。
F2130 支持以下浮点数表示法：“0”、“0.0”、“0.1”、“.1”、“1”和“1.0”。
常规触发输出延迟时间的详细描述请参阅 3.18 中的相关内容，并请参阅命令 **NTRIG** 和查询 **NTRIG?**、**NTRIGD?**。

OUT

- 功能: 设置输出端状态为正常输出或阻断状态
- 格式: **OUT** n[term]、n=0、1
- 简化: **O** n[term]、n=0、1
- 返回: F2130 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或正在进行电流扫描，或未完

成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。

输出端为正常输出状态时，**OUT 0** 立即切换输出端为阻断状态，并返回 **CMLT**[CR]。

输出端为阻断状态时，**OUT 0** 无效，并立即返回 **CMLT**[CR]。

输出端为阻断状态时，**OUT 1** 切换输出端为正常输出状态，瞬变响应模式输出电流立即变化至设置值，并返回 **CMLT**[CR]，渐变响应模式下以线性渐变方式输出电流达到设置值，线性渐变过程完成后返回 **CMLT**[CR]。

输出端为正常输出状态时，**OUT 1** 立即返回 **CMLT**[CR]。

参数非 0 或 1 时，返回 **ERROR**[CR]。

备注： 0=阻断状态，1=正常输出状态。

OUT 1 使输出端由阻断状态切换至正常输出状态，其后于渐变响应模式下执行线性渐变的过程中可随时使用命令 **STOP** 或 **FAST0** 停止渐变或使输出电流快速归零。

输出端状态的详细描述请参阅 3.7 中的内容，并请参阅命令 **STOP**、**FAST0** 和查询 **OUT?**。

OVDRST

功能： 解除内部功率过载保护

格式： OVDRST[term]

简化： OVR[term]

返回： F2130 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或正在进行电流扫描，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。

否则，无论 F2130 是否进入内部功率过载保护状态，均对保护电路进行复位，并立即返回 **CMLT**[CR]。

备注： 内部功率过载保护的详细描述请参阅 3.17 中的内容，并请参阅查询 **OVDRST?**。

PN

功能： 电流换向

格式： PN[term]

简化： 无

返回： F2130 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或正在进行电流扫描，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。

输出端处于阻断状态下，F2130 不改变电流设置值并返回 **CMLT**[CR]。

输出端为正常输出状态时，瞬变响应模式下，输出电流方向立即改变，并返回 **CMLT**[CR]，渐变响应模式下以线性渐变方式改变输出电流方向，并返回 **CMLT**[CR]。

备注： 电流设置的详细描述请分别参阅 3.5 中的内容，并请参阅查询 **DIR?**、**CUR?**。

RESPONSE

功能： 设置电流响应模式

格式： RESPONSE n[term]、n=0、1

简化： RSP n[term]、n=0、1

返回： F2130 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或正在进行电流扫描，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。

RESPONSE 0 将 F2130 设置为瞬变响应模式 IME，并返回 **CMLT**[CR]。

RESPONSE 0 将 F2130 设置为渐变响应模式 RAMP，并返回 **CMLT**[CR]。

参数非 0 或 1 时，返回 **ERROR**[CR]。

备注： 0=瞬变响应模式 IME，1=渐变响应模式 RAMP。

电流响应模式的详细描述请参阅 3.4 中的内容，并请参阅查询 **RESPONSE?**。

RATE

功能: 设置电流线性渐变速率

格式: RATE xx.xx[term]

简化: R xx.xx[term]

返回: F2130 未处于标准显示界面, 或未完成电流线性渐变, 或正在进行电流扫描, 或未完成上一命令任务时, 立即返回 **BUSY**[CR]。

否则, 设置完成后返回 **CMLT**[CR]。

xx.xx>10.00 或 xx.xx<0.01, 或浮点数表示法不正确时, 返回响应 **ERROR**[CR]。

备注: 参数 xx.xx 为 0.01—10.00 之间的 4 位无符号浮点数, 单位为安培每秒 (A/s)。

F2130 支持以下浮点数表示法:

“0”、“0.0”、“0.1”、“.1”、“1”、“1.0”、“.01”和“0.01”。

电流扫描的渐进速率同样遵循电流线性渐变速率。

电流线性渐变速率的详细描述请参阅 3.9 中的内容, 并请参阅查询 **RATE?**。

RAMPAUDIO

功能: 设置渐变结束音

格式: RAMPAUDIO n[term]、n=0、1

简化: RA n[term]、n=0、1

返回: F2130 未处于标准显示界面, 或未完成电流线性渐变, 或正在进行电流扫描, 或未完成上一命令任务时, 立即返回 **BUSY**[CR]。

RAMPAUDIO 0 关闭渐变结束音, 并返回 **CMLT**[CR]。

RAMPAUDIO 1 开启渐变结束音, 并返回 **CMLT**[CR]。

参数非 0 或 1 时, 返回 **ERROR**[CR]。

备注: 0=关闭渐变结束音, 1=开启渐变结束音。

键盘音的详细描述请参阅 3.27 中的内容, 并请参阅查询 **RAMPAUDIO?**。

STOP

功能: 停止正在进行的电流线性渐变过程

格式: STOP[term]

简化: SP[term]

返回: F2130 未处于标准显示界面, 或正在进行电流扫描时, 立即返回 **BUSY**[CR]。

输出端为阻断状态时, 立即返回 **CMLT**[CR]。

输出端为正常输出状态, 且 F2130 未执行电流线性渐变过程时, 立即返回 **CMLT**[CR]。

F2130 正在执行电流线性渐变过程时, 正在进行的过程立即停止, 输出电流和方向保持于停止时刻的状态, 并返回 **CMLT**[CR]。

备注: 停止电流线性渐变过程和停止电流换向过程的详细描述请参阅 3.10 中的内容, 并请参阅命令 **FAST0**。

SWEEP

功能: 开始电流扫描

格式: SWEEP[term]

简化: SW[term]

返回: F2130 未处于标准显示界面, 或未完成电流线性渐变, 或正在进行电流扫描, 或未完成上一命令任务时, 立即返回 **BUSY**[CR]。

当前响应模式为瞬变响应 **IME**, 或渐变响应模式下输出端处于阻断状态时, 立即返回 **ERROR**[CR]。

渐变响应模式下且输出端为正常输出状态时，F2130 开始执行电流扫描，并立即返回 **CMLT**[CR]。

备注： 电流扫描的详细描述请参阅 3.11 中的相关内容，并请参阅命令 **SWPAUSE**、**SWCONT**、**SWABORT**、**SWMODE**、**SWMAX**、**RATE** 和查询 **SWEEP?**、**SWMODE?**、**SWMAX?**、**RATE?**。

SWABORT

功能： 中止电流扫描

格式： **SWABORT**[term]

简化： **SWA**[term]

返回： F2130 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。

当前响应模式为瞬变响应，或渐变响应模式下输出端处于阻断状态，或 F2130 未启动电流扫描，立即返回 **ERROR**[CR]。

否则，F2130 立即中止正在进行的电流扫描，并返回 **CMLT**[CR]。

备注： 无论电流扫描处于暂停或正在进行状态，F2130 均中止扫描，并恢复至标准显示界面。电流扫描的详细描述请参阅 3.11 中的相关内容，并请参阅命令 **SWEEP**、**SWPAUSE**、**SWCONT**、**SWMODE**、**SWMAX**、**RATE** 和查询 **SWEEP?**、**SWMODE?**、**SWMAX?**、**RATE?**。

SWCONT

功能： 由暂停点继续电流扫描

格式： **SWCONT**[term]

简化： **SWC**[term]

返回： F2130 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。

当前响应模式为瞬变响应，或渐变响应模式下输出端处于阻断状态，或 F2130 未启动电流扫描，或者电流扫描并未暂停，立即返回 **ERROR**[CR]。

否则，F2130 立即由暂停点继续进行电流扫描，并返回 **CMLT**[CR]。

备注： 电流扫描的详细描述请参阅 3.11 中的相关内容，并请参阅命令 **SWEEP**、**SWPAUSE**、**SWABORT**、**SWMODE**、**SWMAX**、**RATE** 和查询 **SWEEP?**、**SWMODE?**、**SWMAX?**、**RATE?**。

SWPAUSE

功能： 暂停电流扫描

格式： **SWPAUSE**[term]

简化： **SWP**[term]

返回： F2130 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。

当前响应模式为瞬变响应，或渐变响应模式下输出端处于阻断状态，或 F2130 未启动电流扫描，或者电流扫描已经暂停，立即返回 **ERROR**[CR]。

否则，F2130 立即暂停正在进行的电流扫描，并返回 **CMLT**[CR]。

备注： 电流扫描的详细描述请参阅 3.11 中的相关内容，并请参阅命令 **SWEEP**、**SWCONT**、**SWABORT**、**SWMODE**、**SWMAX**、**RATE** 和查询 **SWEEP?**、**SWMODE?**、**SWMAX?**、**RATE?**。

SWMODE

功能： 设置电流扫描模式

格式： **SWMODE** n[term]、n=0—3

简化： **SM** n[term]、n=0—3

返回： F2130 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或正在进行电流扫描，或未完

成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。

SWMODE 0、**SWMODE 1**、**SWMODE 2** 和 **SWMODE 3** 分别设置扫描模式为 SWA、SWB、SWC 和 SWD，并返回 **CMLT**[CR]。

参数非 0、1、2、3 时，返回 **ERROR**[CR]。

备注：0=SWA，1=SWB，2=SWC，3=SWD。

电流扫描模式的详细描述请参阅 3.11 中的相关内容，并请参阅查询 **SWMODE?**。

SWMAX

功能：设置电流扫描最大值

格式：SWMAX xx.xxxxx[term]

简化：SX xx.xxxxx[term]

返回：F2130 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或正在进行电流扫描，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。

参数大于 10.00000 或小于 0.00001，或浮点数格式错误时，F2130 返回 **ERROR**[CR]。

扫描最大值设置完成后，F2130 返回 **CMLT**[CR]。

备注：xx.xxxxx 为无符号浮点数，单位为安培（A）。

F2130 支持除“x.”或“xx.”以外的合法浮点参数 xx.xxxxx 格式，小数点之前的位数应小于或等于 2 位，小数点以后第 5 位之后的位数四舍五入后自动省略。

电流扫描最大的详细描述请参阅 3.11 中的相关内容，并请参阅查询 **SWMAX?**。

SWTRIG

功能：设置扫描触发输出方式

格式：SWTRIG n[term]、n=0—2

简化：ST n[term]、n=0—2

返回：F2130 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或正在进行电流扫描，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。

SWTRIG 0 关闭扫描触发输出，**SWTRIG 1** 和 **SWTRIG 2** 分别设置扫描触发输出方式为“ON”和“ON+J”，而后均返回 **CMLT**[CR]。

参数非 0、1、2 时，返回 **ERROR**[CR]。

备注：0=OFF，1=ON，2=ON+J。

扫描触发输出方式的详细描述请参阅 3.19 中的相关内容，并请参阅命令 **SWTRIGINT** 和查询 **SWTRIG?**、**SWTRIGINT?**。

SWTRIGINT

功能：设置扫描触发输出时间间隔

格式：SWTRIGINT xx.x[term]

简化：STI xx.x[term]

返回：F2130 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或正在进行电流扫描，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。

无论关闭或开启扫描触发输出，**SWTRIGINT xx.x** 均有效，并于设置完成后均返回 **CMLT**[CR]。

xx.x>10.0 或 xx.x<0.1 或浮点数表示法不正确时，F2130 返回响应 **ERROR**[CR]。

备注：参数 xx.x 为 0.1—10.0 之间的 3 位无符号浮点数，单位为秒（s）。

F2130 支持以下浮点数表示法：“0”、“0.0”、“0.1”、“.1”、“1”和“1.0”。

扫描触发输出时间间隔的详细描述请参阅 3.19 中的相关内容，并请参阅命令

SWTRIG 和查询 **SWTRIG?**、**SWTRIGINT?**。

TRIGGER

功能： 接口触发

格式： **TRIGGER**[term]

简化： **T**[term]

返回： **F2130** 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或正在进行电流扫描，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。

瞬变响应模式下，触发输入源为接口触发且输出端处于正常输出模式时，**TRIGGER** 将触发指针累进，并依据设置值存储器的内容立即改变输出电流，而后返回 **CMLT**[CR]。输出端为阻断状态，或者瞬变响应模式下且触发输入源非接口触发时，或者当前响应模式为渐变响应时，返回 **ERROR**[CR]。

备注： 接口触发须首先将响应模式设置为瞬变响应模式，并将触发输入源设置为接口触发。接口触发和触发指针的详细描述请参阅 3.20.2 和 3.21.1 中的相关内容，并请参阅命令 **TRIGIN** 和查询 **TRIGIN?**。

TRIGIN

功能： 设置触发输入源

格式： **TRIGIN** n[term]、n=0—3

简化： **TI** n[term]、n=0—3

返回： **F2130** 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或正在进行电流扫描，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。

TRIGIN 0 关闭触发输入，并返回 **CMLT**[CR]。

TRIGIN 1 设置触发输入源为外部触发，并返回 **CMLT**[CR]。

TRIGIN 2 设置触发输入源为接口触发，并返回 **CMLT**[CR]。

TRIGIN 3 设置触发输入源为键盘触发，并返回 **CMLT**[CR]。

参数非 0—3 时，返回 **ERROR**[CR]。

备注： 0=关闭，1=外部触发、2=接口触发、3=键盘触发。

变更触发输入源后，触发指针返回头部，否则触发指针位置不变。

触发输入源的详细描述请参阅 3.20 中的相关内容，并请参阅查询 **TRIGIN?**。

5.6.5 设备特殊查询

ASOURCE?

功能： 查询当前信号源

格式： **ASOURCE?**[term]

简化： **AS?**[term]

返回： **F2130** 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或正在进行电流扫描，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。

否则返回当前选择的信号源：**0**[CR]或**1**[CR]。

备注： 0=后面板模拟输入 BNC，1=内部 DAC。

选择信号源的详细描述请参阅 3.13 中的内容，并请参阅命令 **ASOURCE**。

CUR?

功能： 查询当前输出电流设置值

格式： **CUR?**[term]

简化： **I?**[term]

- 返回: F2130 未处于标准显示界面, 或未完成电流线性渐变, 或正在进行电流扫描, 或未完成上一命令任务时, 立即返回 **BUSY**[CR]。
 否则无论输出端状态如何, 均返回电流设置值 **±xx.xxxxxx**[CR]。
- 备注: 返回响应 **±xx.xxxxxx** 的单位为安培 (A)。
 返回响应符号为 “+” 时电流方向为正向, 为 “-” 时为反向。
 输出电流设置值的详细描述请参阅 3.5 中的内容, 并请参阅命令 **CUR**。

CURFD?

- 功能: 查询当前输出电流微调位
- 格式: **CURFD?**[term]
- 简化: **ID?**[term]
- 返回: F2130 未处于标准显示界面, 或未完成电流线性渐变, 或正在进行电流扫描, 或未完成上一命令任务时, 立即返回 **BUSY**[CR]。
 否则于瞬变响应模式下返回当前输出电流微调位 **0**[CR]、**1**[CR]、**2**[CR]...或**6**[CR], 以及于渐变响应模式下返回 **0**[CR]、**1**[CR]、**2**[CR]...或**4**[CR]。
- 备注: 0=0.00001A 位, 1=0.0001A 位, 2=0.001A 位, 3=0.01A 位, 4=0.1A 位, 5=1A 位, 6=10A 位。
 输出电流微调的详细描述请参阅 3.5.1 中的内容, 并请参阅命令 **CURFD**、**CURFUP**、**CURFDOWN**。

CMPLS?

- 功能: 查询是否进入电压钳位状态
- 格式: **CMPLS?**[term]
- 简化: **CS?**[term]
- 返回: F2130 未处于标准显示界面, 或未完成电流线性渐变, 或正在进行电流扫描, 或未完成上一命令任务时, 立即返回 **BUSY**[CR]。
 否则返回当前电压钳位状态: **0**[CR]或**1**[CR]。
- 备注: 0=未进入电压钳位状态 (当前为恒流状态), 1=进入电压钳位状态。
 电压钳位状态的详细描述请参阅 3.6 中的内容。

DIR?

- 功能: 查询当前输出电流方向
- 格式: **DIR?**[term]
- 简化: **D?**[term]
- 返回: F2130 未处于标准显示界面, 或未完成电流线性渐变, 或正在进行电流扫描, 或未完成上一命令任务时, 立即返回 **BUSY**[CR]。
 否则无论当前输出端状态如何, 返回当前输出电流方向: **0**[CR]或**1**[CR]。
- 备注: 0=反向, 1=正向。
 电流方向的详细描述请参阅 3.5 中的内容, 并请参阅命令 **PN**、**CUR** 和查询 **CUR?**。

KEYVOICE?

- 功能: 查询是否开启键盘音
- 格式: **KEYVOICE?**[term]
- 简化: **KV?**[term]
- 返回: F2130 未处于标准显示界面, 或未完成电流线性渐变, 或正在进行电流扫描, 或未完成上一命令任务时, 立即返回 **BUSY**[CR]。
 否则返回当前键盘音开启状态: **0**[CR]或**1**[CR]。

备注: 0=关闭键盘音, 1=开启键盘音。
键盘音的详细描述请参阅 3.27 中的内容, 并请参阅命令 **KEYVOICE**。

LOCK?

功能: 查询当前键盘锁状态
格式: LOCK?[term]
返回: F2130 未处于标准显示界面, 或未完成电流线性渐变, 或正在进行电流扫描, 或未完成上一命令任务时, 立即返回 **BUSY**[CR]。
否则返回当前键盘锁状态: **0**[CR]或**1**[CR]。
备注: 0=关闭键盘锁, 1=开启键盘锁。
键盘锁的详细描述请参阅 3.25 中的内容, 并请参阅命令 **LOCK**。

LOADP?

功能: 查询当前负载保护功能设置
格式: LOADP?[term]
返回: F2130 未处于标准显示界面, 或未完成电流线性渐变, 或正在进行电流扫描, 或未完成上一命令任务时, 立即返回 **BUSY**[CR]。
否则返回当前负载保护功能设置: **0**[CR]或**1**[CR]。
备注: 0=关闭负载保护, 1=开启负载保护。
负载保护的详细描述请参阅 3.23 中的内容, 并请参阅命令 **LOADP** 和查询 **LOADPS?**。

LOADPS?

功能: 查询当前负载保护状态
格式: LOADPS?[term]
返回: F2130 未处于标准显示界面, 或未完成电流线性渐变, 或正在进行电流扫描, 或未完成上一命令任务时, 立即返回 **BUSY**[CR]。
否则返回当前负载保护状态: **0**[CR]或**1**[CR]。
备注: 0=正常状态, 1=进入负载保护状态。
负载保护的详细描述请参阅 3.23 中的内容, 并请参阅命令 **LOADP** 和查询 **LOADP?**。

MEMGROUP?

功能: 查询当前存储器组编号
格式: MEMGROUP?[term]
简化: MG?[term]
返回: F2130 未处于标准显示界面, 或未完成电流线性渐变, 或正在进行电流扫描, 或未完成上一命令任务时, 立即返回 **BUSY**[CR]。
否则返回当前存储器组编号: **0**[CR]、**1**[CR]或**2**[CR]。
备注: 0=G0, 1=G1, 2=G2。
设置值存储器的详细描述请参阅 3.21 中的内容, 并请参阅命令 **MEMGROUP**。

MEMREPEAT?

功能: 查询当前重复方式
格式: MEMREPEAT?[term]
简化: MR?[term]
返回: F2130 未处于标准显示界面, 或未完成电流线性渐变, 或正在进行电流扫描, 或未完成上一命令任务时, 立即返回 **BUSY**[CR]。

否则返回当前重复方式：0[CR]或1[CR]。

备注：0=循环 LOOP，1=单次 ONCE。

重复方式的详细描述请参阅 3.21.5 中的内容，并请参阅命令 **MEMREPEAT**。

MEMLEN?

功能：查询当前存储器组长度

格式：MEMLEN?[term]

简化：ML?[term]

返回：F2130 未处于标准显示界面，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。

否则返回当前存储器组长度：**NNNN**[CR]。

备注：F2130 只支持“NNNN”的返回整数格式，不灭零。返回值 NNNN 为 0—1024 之间的 4 位整数，设置值存储器的详细描述请参阅 3.21 中的内容，并请参阅命令 **MEMGROUP**。

NTRIG?

功能：查询当前常规触发输出方式

格式：NTRIG?[term]

简化：NT?[term]

返回：F2130 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或正在进行电流扫描，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。

否则 F2130 返回当前常规触发输出方式：0[CR]、1[CR]或2[CR]。

备注：0=OFF，1=ON，2=ON+J。

常规触发输出方式的详细描述请参阅 3.18 中的相关内容，并请参阅命令 **NTRIG**、**NTRIGD** 和查询 **NTRIG?**。

NTRIGD?

功能：查询当前常规触发输出延迟时间

格式：NTRIGD?[term]

简化：NTD?[term]

返回：F2130 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或正在进行电流扫描，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。

否则无论 F2130 处于何种常规触发输出方式，F2130 均返回当前常规触发输出延迟时间 **xx.xxx**[CR]。F2130 只支持“xx.xxx”的返回浮点数格式。

备注：参数 xx.xxx 为 0—10.000 之间的 5 位无符号浮点数，单位为秒 (s)。

常规触发延迟时间的详细描述请参阅 3.18 中的相关内容，并请参阅命令 **NTRIG**、**NTRIGD** 和查询 **NTRIG?**。

OUT?

功能：查询当前输出端状态

格式：OUT?[term]

简化：O?[term]

返回：F2130 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或正在进行电流扫描，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。

否则返回当前输出端状态：0[CR]或1[CR]。

备注：0=阻断状态，1=正常输出状态。

输出端状态的详细描述请参阅 3.7 中的内容，并请参阅命令 **OUT**。

OVLDS?

- 功能： 查询当前内部功率过载保护状态
- 格式： OVLDS?[term]
- 简化： OVS?[term]
- 返回： F2130 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或正在进行电流扫描，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。
- 否则返回当前内部功率过载保护状态： **0**[CR]或 **1**[CR]。
- 备注： 0=未进入保护状态，1=进入保护状态。
- 内部功率过载保护的详细描述请参阅 3.17 中的内容，并请参阅命令 **OVLDRST**。

OSC?

- 功能： 检测当前输出端是否发生振荡
- 格式： OSC?[term]
- 简化： S?[term]
- 返回： F2130 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或正在进行电流扫描，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。
- 否则返回当前输出端振荡状态： **0**[CR]或 **1**[CR]。
- 备注： 0=无振荡，1=发生振荡。
- 输出端振荡检测的详细描述请参阅 3.22 中的内容。并请参阅命令 **OSCWARNING** 和查询 **OSCWARNING?**。

OSCWARNING?

- 功能： 查询当前振荡报警方式
- 格式： OSCWARNING?[term]
- 简化： SW?[term]
- 返回： F2130 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或正在进行电流扫描，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。
- 否则 F2130 返回当前触发报警方式： **0**[CR]、**1**[CR]或 **2**[CR]。
- 备注： 0=OFF，1=闪烁，2=闪烁+声响。
- 振荡报警的详细描述请参阅 3.22 中的内容，并请参阅命令 **OSCWARNING** 和查询 **OSC?**。

RESPONSE?

- 功能： 查询当前电流响应模式
- 格式： RESPONSE?[term]
- 简化： RSP?[term]
- 返回： F2130 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或正在进行电流扫描，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。
- 否则返回当前电流响应模式 **0**[CR]或 **1**[CR]
- 备注： 0=瞬变响应模式 IME，1=渐变响应模式 RAMP。
- 电流响应模式的详细描述请参阅 3.4 中的内容，并请参阅命令 **RESPONSE**。

RATE?

- 功能： 查询当前电流线性渐变速率
- 格式： RATE?[term]
- 简化： R?[term]
- 返回： F2130 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或正在进行电流扫描，或未完

成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。

否则 F2130 返回当前电流线性渐变速率 **xx.xx**[CR]。F2130 只支持“xx.xx”的返回浮点数格式。

备注：参数 **xx.xx** 为 0.01—10.00 之间的 4 位无符号浮点数，单位为安培每秒（A/s）。
电流线性渐变速率的详细描述请参阅 3.9 中的相关内容，并请参阅命令 **RATE**。

RAMPAUDIO?

功能：查询是否开启渐变结束音

格式：RAMPAUDIO?[term]

简化：RA?[term]

返回：F2130 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或正在进行电流扫描，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。

否则返回当前渐变结束音开启状态：**0**[CR]或**1**[CR]。

备注：0=关闭渐变结束音，1=开启渐变结束音。

键盘音的详细描述请参阅 3.27 中的内容，并请参阅命令 **RAMPAUDIO**。

SWEEP?

功能：查询当前电流扫描状态

格式：SWEEP?[term]

简化：SW?[term]

返回：F2130 未处于标准显示界面，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。

当前输出端状态为阻断状态时，立即返回 **ERROR**[CR]。

否则返回当前电流扫描状态 **0**[CR]、**1**[CR]、或**2**[CR]。

备注：0=扫描未开始或已停止，1=扫描正在进行，2=扫描暂停。

电流扫描的详细描述请参阅 3.11 中的相关内容，并请参阅命令 **SWEEP**、**SWPAUSE**、**SWCONT**、**SWABORT**、**SWMODE**、**SWMAX**、**RATE** 和查询 **SWMODE?**、**SWMAX?**、**RATE?**。

SWMODE?

功能：查询当前电流扫描模式

格式：SWMODE?[term]

简化：SM?[term]

返回：F2130 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或正在进行电流扫描，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。

否则返回当前扫描模式：**0**[CR]、**1**[CR]、**2**[CR] 或**3**[CR]。

备注：0=SWA，1=SWB，2=SWC，3=SWD。

电流扫描的详细描述请参阅 3.11 中的相关内容，并请参阅命令 **SWEEP**、**SWPAUSE**、**SWCONT**、**SWABORT**、**SWMODE**、**SWMAX**、**RATE** 和查询 **SWEEP?**、**SWMAX?**、**RATE?**。

SWMAX?

功能：查询当前设置的电流扫描最大值

格式：SWMAX?[term]

格式：SX?[term]

返回：F2130 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或正在进行电流扫描，或未完成上一命令任务时，立即返回 **BUSY**[CR]。

否则返回当前电流扫描最大值 **xx.xxxxxx**[CR]。

备注：返回响应 **xx.xxxxxx** 的单位为安培（A），为无符号浮点数。

电流扫描的详细描述请参阅 3.11 中的相关内容，并请参阅命令 **SWEEP**、**SWPAUSE**、

SWCONT、SWABORT、SWMODE、SWMAX、RATE 和查询 SWEEP?、SWMODE?、RATE?。

SWTRIG?

功能： 查询当前扫描触发输出方式

格式： SWTRIG?[term]

简化： ST?[term]

返回： F2130 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或正在进行电流扫描，或未完成上一命令任务时，立即返回 BUSY[CR]。

否则 F2130 返回当前扫描触发输出方式：0[CR]、1[CR]或2[CR]。

备注： 0=OFF，1=ON，2=ON+J。

扫描触发输出方式的详细描述请参阅 3.19 中的相关内容，并请参阅命令 SWTRIG、SWTRIGINT 和查询 SWTRIGINT?。

SWTRIGINT?

功能： 查询当前扫描触发输出时间间隔

格式： SWTRIGINT?[term]

简化： STI?[term]

返回： F2130 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或正在进行电流扫描，或未完成上一命令任务时，立即返回 BUSY[CR]。

否则无论 F2130 处于何种扫描触发输出方式，F2130 均返回当前扫描触发输出时间间隔 xx.x[CR]。F2130 只支持“xx.x”的返回浮点数格式。

备注： 参数 xx.x 为 0.1—10.0 之间的 3 位无符号浮点数，单位为秒 (s)。

扫描触发输出时间间隔的详细描述请参阅 3.19 中的相关内容，并请参阅命令 SWTRIG、SWTRIGINT 和查询 SWTRIG?。

TRIGIN?

功能： 查询当前触发输入源

格式： TRIGIN?[term]

简化： TI?[term]

返回： F2130 未处于标准显示界面，或未完成电流线性渐变，或正在进行电流扫描，或未完成上一命令任务时，立即返回 BUSY[CR]。

否则 F2130 返回当前触发输入源：0[CR]、1[CR]、2[CR]或3[CR]。

备注： 0=关闭，1=外部触发，2=接口触发，3=键盘触发。

触发输出方式的详细描述请参阅 3.20 中的相关内容，并请参阅命令 TRIGIN、TRIGGER 和查询 TRIGIN?。

<本页为空页>
This Page Intentionally Left Blank

附件

6.1 简介

本章包含 F2130 程控功率电流源各附件的操作方法，以及各电学接口定义。6.2 为附件明细和电学定义的详细说明。

6.2 附件

F2130 配备附件如表 6-1 所示：

表 6-1 F2130 附件清单

TAB-MAN-F2130-0008

| 型 号 | 描述 | 数量 | 标准配置 |
|---------------|----------------------------------|-----|------|
| CAB-AC250-102 | 3 芯交流 250V/10A GB1002 电源线，长度 2 米 | 1 条 | √ |
| CAB-232-DCE-3 | RS-232C 标准 9 芯直通电缆，长度 3 米 | 1 条 | √ |
| CAB-USB-AB-2 | USB 标准 A-B 电缆，长度 1.8 米 | 1 条 | √ |
| CONV232-9-25 | RS-232C 9 针转 25 针转换器 | 1 只 | --- |
| FUSE5C-25070 | 250V/7A 陶瓷保险管，体积 5×20mm | 2 只 | √ |
| RM03 | 3U 全宽机箱安装法兰（机柜安装组件） | 2 只 | --- |

6.2.1 交流电源线 CAB-AC250-102

附件 CAB-AC250-102 为 3 芯交流 250V/10A GB1002 电源线，长度 2 米，与 F2130 后面板的电源输入组件匹配，符合 GB-1002 标准，如图 6-1 所示。

图 6-1 交流电源线 CAB-AC250-102

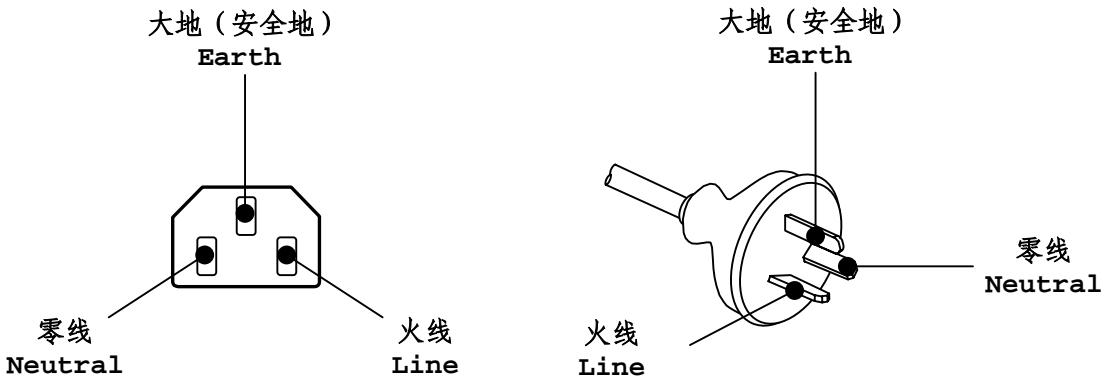


FIG-MAN-F2130-0073

6.2.2 通讯电缆 CAB-232-DCE-3

附件 CAB-232-DCE-3 为 RS-232C 标准 9 芯直通电缆，长度 3 米，与 F2130 后面板的 RS-232C DCE 插座匹配，符合 EIA-232-E 标准，如图 6-2 所示。

警告

EIA-232-E 标准不支持热拔插操作，连接或断开 RS-232C 电缆前必须关闭 F2130 和计算机，否则可能造成 F2130 和计算机的 RS-232C 接口电路损毁。

图 6-2 通讯电缆 CAB-232-DCE-3

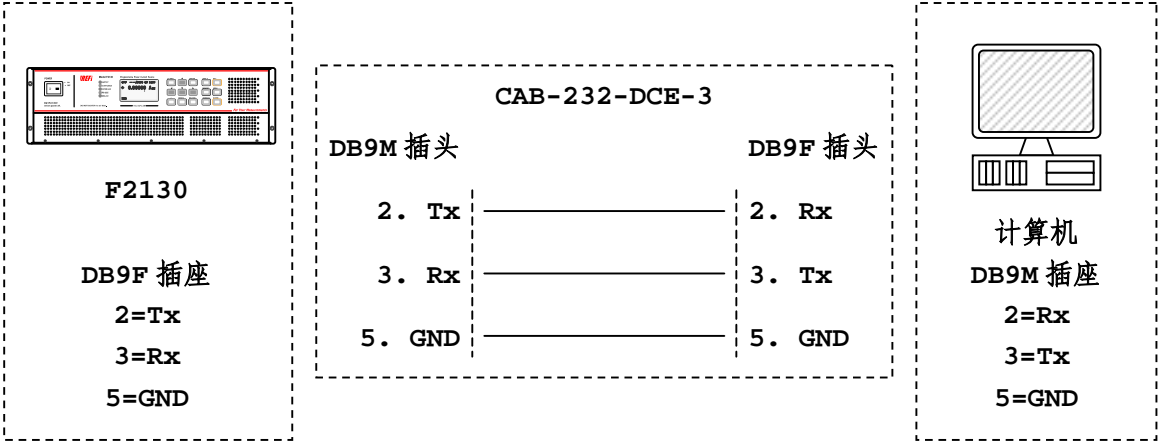


FIG-MAN-F2130-0074

6.2.3 通讯电缆 CAB-USB-AB-2

附件 CAB-USB-AB-2 为 USB 标准 A-B 电缆，长度 1.8 米，与后面板的 USB Standard B 插座匹配，符合 USB 1.1 标准，如图 6-3 所示。

图 6-3 通讯电缆 CAB-USB-AB-2

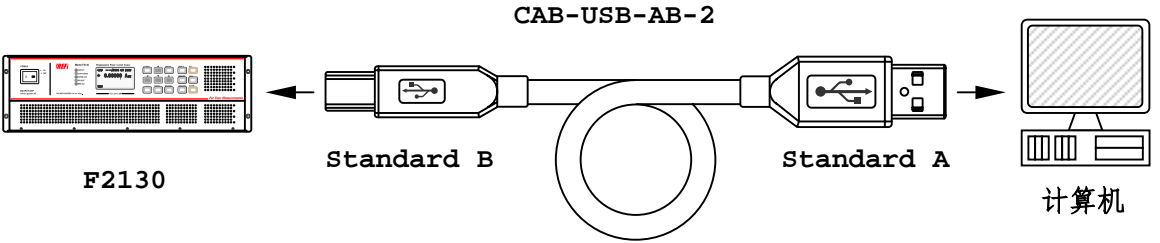


FIG-MAN-F2130-0075

6.2.4 转换器 CONV-232-9-25

附件 CONV-232-9-25 为可选附件。

某些早期型号的计算机只配备 25 针 DBM 型 RS-232C 接口，而非常见的 9 针接口，无法直接使用附件 CAB-232-DCE-3，同时此类计算机的设计年代通常不配备 USB 接口，因而也无法使用 USB 接口通讯。此时需要使用转换器进行物理接口转换。

附件 CONV-232-9-25 为 RS-232C 标准 9 针转 25 针转换器，用于将 DBM25 接口转换为常用的 DBM9 接口，并通过附件 CAB-232-DCE-3 连接至 F2130，符合 EIA-232-E 标准。

6.2.5 其它附件

附件 FUSE5C-25040 请参阅 2.4.1 中的详细内容。

附件 RM03 为可选附件，请参阅 2.3.2 中的详细内容。

Appendix

附录

A.1 磁学单位换算

表 A-1 标准国际单位制 (SI) 和厘米-克-秒单位制 (cgs) 磁学单位换算 TAB-MAN-F2130-0009

| 物理量 | 符号 | 高斯/cgs 单位制 | 转换因子 | SI |
|-----------------|--|---|---|---|
| 磁通密度 磁感应强度 | B | G (高斯) | 10^{-4} | T (特斯拉) Wb/m^2 |
| 磁通 | ϕ | Mx (麦克斯韦) $\text{G}\cdot\text{cm}^2$ | 10^{-8} | Wb (韦伯) V·s (伏特秒) |
| 磁势差 磁通势 | U、F | Gb (吉尔伯特) | $10/4\pi$ (0.7958) | A (安培) |
| 磁场强度 磁化力 | H | Oe (奥斯特) Gb/cm | $10^3/4\pi$ (79.58) | A/m |
| 体磁化强度 | M | emu/cm^3 | 10^3 | A/m |
| 体磁化强度 | $4\pi M$ | G (高斯) | $10^3/4\pi$ (79.58) | A/m |
| 磁极化 磁化强度 | J、I | emu/cm^3 | $4\pi\times 10^{-4}$ | T Wb/m^2 |
| 比磁化强度 | σ 、M | emu/g | $\frac{1}{4\pi\times 10^{-7}}$ | $\text{A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ $\text{Wb}\cdot\text{m}/\text{kg}$ |
| 磁矩 | m | emu erg/G (尔格/高斯) | 10^{-3} | $\text{A}\cdot\text{m}^2$ J/T (焦耳/特斯拉) |
| 磁偶极距 | j | emu erg/G | $4\pi\times 10^{-10}$ | Wb·m |
| 体磁化率 | χ κ | 无量纲数 emu/cm^3 | --- $(4\pi)^2\times 10^{-7}$ | H/m (亨利/米) $\text{Wb}/(\text{A}\cdot\text{m})$ |
| 比磁化率 | χ_ρ κ_ρ | cm^3/g emu/g | $4\pi\times 10^{-3}$ $(4\pi)^2\times 10^{-10}$ | m^3/kg $\text{H}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ |
| 克分子磁化率 摩尔磁化率 | χ_{mol} κ_{mol} | cm^3/mol emu/mol | $4\pi\times 10^{-6}$ $(4\pi)^2\times 10^{-13}$ | m^3/mol $\text{H}\cdot\text{m}^2/\text{mol}$ |
| 磁导率 | μ | 无量纲数 | $4\pi\times 10^{-7}$ | H/m $\text{Wb}/(\text{A}\cdot\text{m})$ |
| 相对磁导率 | μ_r | --- | --- | 无量纲数 |
| 体能量密度 能积 | W | erg/cm^3 | 10^{-1} | J/m^3 |
| 去磁系数 | D、N | 无量纲数 | $1/4\pi$ (0.07958) | 无量纲数 |

A.2 常用物理量

表 A-2 标准国际单位制 (SI) 物理常数

TAB-MAN-F2130-0010

| 物理量 | 符号 | SI |
|---|--|---|
| 真空磁导率 Permeability of Vacuum | μ_0 | $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ |
| 真空光速 Speed of Light in Vacuum | c | $2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$ |
| 真空介电常数 Permittivity of Vacuum | $\epsilon_0 = (\mu_0 c^2)^{-1}$ | $8.8542 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ |
| 精细结构常数 Fine Structure Constant | α | 0.0073 |
| | $1/\alpha$ | 137.0360 |
| 基本电荷 Elementary Charge | e | $1.6022 \times 10^{-19} \text{ C}$ |
| 普朗克常量 Plank's Constant | h | $6.6262 \times 10^{-34} \text{ J/Hz}$ |
| | $\hbar = h/2\pi$ | $1.0546 \times 10^{-34} \text{ J/Hz}$ |
| 阿伏加德罗常数 Avogadro's Constant | N_A | $6.0220 \times 10^{23} \text{ /mol}$ |
| 原子质量单位 Atomic Mass Unit | $1u = 10^{-3} \text{ kg}/(\text{mol} \cdot N_A)$ | $1.6605 \times 10^{-27} \text{ kg}$ |
| 电子静止质量 Electron Rest Mass | m_e | $0.9109 \times 10^{-30} \text{ kg}$ |
| | | $5.4858 \times 10^{-4} \text{ u}$ |
| 质子静止质量 Proton Rest Mass | m_p | $1.6726 \times 10^{-27} \text{ kg}$ |
| | | 1.0073 u |
| 中子静止质量 Neutron Rest Mass | m_n | $1.6749 \times 10^{-27} \text{ kg}$ |
| | | 1.0087 u |
| 量子磁通 Magnetic Flux Quantum | $\phi = h/(2e)$ | $2.0679 \times 10^{-15} \text{ Wb}$ |
| | h/e | $4.1357 \times 10^{-15} \text{ J}/(\text{Hz} \cdot \text{C})$ |
| 约瑟夫森频率-电压比 Josephson Frequency-Voltage Ratio | $2e/h$ | 483.5939 THz/V |
| 量子周期 Quantum of Circulation | $h/(2m_e)$ | $3.6369 \times 10^{-4} \text{ J}/(\text{Hz} \cdot \text{kg})$ |
| | h/m_e | $7.2739 \times 10^{-4} \text{ J}/(\text{Hz} \cdot \text{kg})$ |
| 里德伯常数 Rydberg Constant | R_∞ | $1.0974 \times 10^7 \text{ /m}$ |
| 波尔磁子 Bohr Magneton | $\mu_B = eh/(2m_e)$ | $9.2741 \times 10^{-24} \text{ J/T}$ |
| 质子回磁比 Proton Gyromagnetic Ratio | γ_p | $2.6752 \times 10^8 \text{ /(s} \cdot \text{T)}$ |
| 逆磁屏蔽系数 (球形 H ₂ O 样品) Diamagnetic shielding Factor | $1 + \sigma(\text{H}_2\text{O})$ | 1.0000 |
| 摩尔质量常数 Molar Mass Constant | R | $8.3144 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ |
| 摩尔体积、理想气体 $T_0 = 273.15\text{K}$, $P_0 = 1\text{atm}$ Molar Volume, Ideal Gas | $V_m = RT_0/P_0$ | $0.0224 \text{ m}^3/\text{mol}$ |
| 波尔兹曼常数 Boltzman Constant | $k_B = R/N_A$ | $1.3807 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ |
| 斯台范-波尔兹曼常数 Stefan-Boltzman Constant | $\sigma = (\pi^2/60) k_B^4 / (h^3 c^2)$ | $5.6703 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ |
| 第一辐射常数 First Radiation Constant | $c_1 = 2\pi\hbar c^2$ | $3.7418 \times 10^{-16} \text{ W/m}^2$ |
| 第二辐射常数 Second Radiation Constant | $c_2 = hc/k$ | 0.0144 mK |
| 引力常数 Gravitation Constant | G | $6.6720 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ |

A.3 前缀表示法

表 A-3 国际标准单位制 (SI) 前缀

TAB-MAN-F2130-0011

| 因数 10 ⁿ | 前缀 | 符号 | 因数 10 ⁿ | 前缀 | 符号 |
|--------------------|-------|----|--------------------|-------|----|
| 24 | yotta | Y | -1 | deci | d |
| 21 | zetta | Z | -2 | centi | c |
| 18 | exa | E | -3 | milli | m |
| 15 | peta | P | -6 | micro | μ |
| 12 | tera | T | -9 | nano | n |
| 9 | giga | G | -12 | pico | p |
| 6 | mega | M | -15 | femto | f |
| 3 | kilo | k | -18 | atto | a |
| 2 | hecto | h | -21 | zepto | z |
| 1 | deka | da | -24 | yocto | y |

A.4 希腊字母

表 A-4 希腊字母表

TAB-MAN-F2130-0012

| | | | | | | | | |
|---------|---|---|---------|---|---|---------|---|---|
| Alpha | α | A | Iota | ι | I | Rho | ρ | P |
| Beta | β | B | Kappa | κ | K | Sigma | σ | Σ |
| Gamma | γ | Γ | Lamda | λ | Λ | Tau | τ | T |
| Delta | δ | Δ | Mu | μ | M | Upsilon | υ | Υ |
| Epsilon | ε | E | Nu | ν | N | Phi | φ | Φ |
| Zeta | ζ | Z | Xi | ξ | Ξ | Chi | χ | X |
| Eta | η | H | Omicron | ο | O | Psi | ψ | Ψ |
| Theta | θ | Θ | Pi | π | Π | Omega | ω | Ω |

A.5 美制线规对照表

表 A-5 美制线规 AWG (American Wire Gage) 对照表

TAB-MAN-F2130-0013

| AWG | Dia. In. | Dia. mm | AWG | Dia. In. | Dia. mm | AWG | Dia. In. | Dia. mm | AWG | Dia. In. | Dia. mm |
|-----|-------------|------------|-----|-------------|------------|-----|-------------|------------|-----|-------------|------------|
| 1 | 0.2893 | 7.348 | 11 | 0.0907 | 2.304 | 21 | 0.0285 | 0.7230 | 31 | 0.0089 | 0.2268 |
| 2 | 0.2576 | 6.544 | 12 | 0.0808 | 2.053 | 22 | 0.0253 | 0.6438 | 32 | 0.0080 | 0.2019 |
| 3 | 0.2294 | 5.827 | 13 | 0.0720 | 1.829 | 23 | 0.0226 | 0.5733 | 33 | 0.00708 | 0.178 |
| 4 | 0.2043 | 5.189 | 14 | 0.0641 | 1.628 | 24 | 0.0207 | 0.5106 | 34 | 0.00630 | 0.152 |
| 5 | 0.1819 | 4.621 | 15 | 0.0571 | 1.450 | 25 | 0.0179 | 0.4547 | 35 | 0.00561 | 0.138 |
| 6 | 0.1620 | 4.115 | 16 | 0.0508 | 1.291 | 26 | 0.0159 | 0.4049 | 36 | 0.00500 | 0.127 |
| 7 | 0.1443 | 3.665 | 17 | 0.0453 | 1.150 | 27 | 0.0142 | 0.3606 | 37 | 0.00445 | 0.1131 |
| 8 | 0.1285 | 3.264 | 18 | 0.0403 | 1.024 | 28 | 0.0126 | 0.3211 | 38 | 0.00397 | 0.1007 |
| 9 | 0.1144 | 2.906 | 19 | 0.0359 | 0.9116 | 29 | 0.0113 | 0.2859 | 39 | 0.00353 | 0.08969 |
| 10 | 0.1019 | 2.588 | 20 | 0.0338 | 0.8118 | 30 | 0.0100 | 0.2546 | 40 | 0.00314 | 0.07987 |

A.6 ASCII 编码

表 A-6 ASCII 编码表

American Standard Code for Information Exchange

TAB-MAN-F2130-0014

| | | | | | b7 b6 b5 | 0 0 0 | 0 0 1 | 0 1 0 | 0 1 1 | 1 0 0 | 1 0 1 | 1 1 0 | 1 1 1 |
|---------|---------|---------|---------|--------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| b4 1 | b3 1 | b2 1 | b1 1 | 列 行 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | NUL | DLE | SPACE | 0 | ` | P | @ | p | |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | SOH | DC1 | ! | 1 | A | Q | a | q | |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | STX | DC2 | " | 2 | B | R | b | r | |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 3 | ETX | DC3 | # | 3 | C | S | c | s | |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 4 | EOT | DC4 | \$ | 4 | D | T | d | t | |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 5 | ENG | NAK | % | 5 | E | U | e | u | |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 6 | ACK | SYN | & | 6 | F | V | f | v | |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 7 | BEL | ETB | \ | 7 | G | W | g | w | |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 8 | BS | CAN | (| 8 | H | X | h | x | |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 9 | HT | EM |) | 9 | I | Y | i | y | |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 10 | LF | SS | * | : | J | Z | j | z | |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 11 | VT | ESC | + | ; | K | [| k | { | |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 12 | FF | FS | , | < | L | ~ | l | ~ | |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 13 | CR | GS | - | = | M |] | m | } | |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 14 | SO | RS | . | > | N | ^ | n | | |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 15 | SI | US | / | ? | O | _ | o | DEL | |