



DELICATE & ACCURATE

Model F2002

程控精密电流源

用户手册

MAN-F2002-Rev03-2021

本文档包含操作和编程信息

IREFA 乐真科技

Printed in China

Edition 3, Jul., 2021

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，将造成对于本产品的设计、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规格。
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. 请尽量将本仪器返回至北京乐真科技有限公司以及得到授权的代表处进行维修和维护，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



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

地 址： 北京市朝阳区东八间房甲 1 号 C 区一层 107 室
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	程控精密电流源		
型 号	F2002		
数 量	1 台		
序列号	F2002000112112810		
附 件	F20001	二线式输出转换器	1 台
	CAB-AC250-052	3 芯交流 250V/5A 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
	FUSE5G-25005	250V/0.5A 玻封保险管，体积 5×20 毫米	2 只
	CD-F2002	F2002 产品信息光盘	1 张
	内含： DRV-USB232 USB 接口驱动程序		1 份
	MAN-F2002 电子文档		1 份
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-F2002-Rev01-2012	2012 年 01 月 27 日
Rev02	文档序号 MAN-F2002-Rev02-2017	2017 年 08 月 04 日
Rev03	文档序号 MAN-F2002-Rev03-2021	2021 年 07 月 12 日
	<div>1. 增加计算机接口数据格式解释（4.5.2）。</div> <div>2. 注释和警告格式变化。</div> <div>3. 修正可能的图文错误。</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
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.....	2-3
2.3.3 保留安全散热间距.....	2-5
2.3.4 避免热量耦合和干扰.....	2-5
2.4 后面板详解和电缆连接.....	2-6
2.4.1 电源输入组件.....	2-6
2.4.2 RS-232C 和 USB-232 接口.....	2-7
2.4.3 电流输出接口.....	2-8
2.4.4 触发输出 BNC 接口.....	2-9
2.5 初始设置和开机检测.....	2-9
2.5.1 上电之前.....	2-9
2.5.2 开机检测.....	2-10
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.....	3-1
3.2.2 LED 指示器.....	3-2
3.2.3 键盘区.....	3-3
3.2.4 电源开关.....	3-3
3.3 前面板键盘定义.....	3-4
3.4 设置输出电流.....	3-4

3.4.1	微调输出电流	3-4
3.4.2	电流设置界面	3-5
3.5	设置钳位电压	3-6
3.5.1	恒流状态和电压钳位状态	3-6
3.5.2	设置钳位电压	3-6
3.5.3	状态切换临界过程	3-7
3.6	输出电流准确度	3-8
3.6.1	额定准确度	3-8
3.6.2	计算误差电流	3-8
3.6.3	输出电流稳定性	3-8
3.7	输出阻抗	3-9
3.8	设置输出端状态	3-9
3.8.1	输出端状态和开机更换负载	3-9
3.8.2	切换输出端状态	3-10
3.9	输出补偿网络和负载保护	3-10
3.9.1	输出补偿网络	3-10
3.9.2	负载保护和低导通电阻开关 LORS	3-11
3.9.3	电容负载保护	3-12
3.10	噪声性能	3-13
3.11	振荡检测和处理	3-13
3.12	输出响应模式和避免过冲	3-14
3.12.1	IME 和 ATS 输出响应模式	3-14
3.12.2	恒流状态下的电流过冲	3-15
3.12.3	进入电压钳位状态时的输出响应	3-16
3.12.4	输出端状态切换时的输出响应	3-17
3.12.5	避免过冲的方法	3-17
3.13	测量输出电压	3-18
3.13.1	四线式测量	3-18
3.13.2	高精度电压测量	3-19
3.14	触发输出	3-20
3.14.1	触发方式 On	3-21
3.14.2	触发输出端口	3-21
3.15	键盘锁	3-22
3.16	设置计算机接口	3-23
3.16.1	设置接口类型	3-23
3.16.2	设置串行接口波特率	3-23
3.16.3	安装并设置 USB-232 接口	3-24
3.17	恢复出厂设置	3-26
3.18	负载实例	3-26
3.18.1	电阻性传感器	3-26
3.18.2	霍尔元件	3-27
3.18.3	高容量电容	3-27
3.18.4	电感性负载	3-28
3.18.5	PN 结半导体器件	3-28
3.19	接地关系	3-29
3.19.1	浮动输出	3-29
3.19.2	浮动测量	3-31
3.19.3	接地关系	3-31
3.20	键盘菜单结构	3-31

4. 计算机接口	4-1
4.1 简介	4-1
4.2 计算机接口选择	4-1
4.2.1 接口构成	4-1
4.2.2 选择接口和设置波特率	4-1
4.3 RS-232C 接口概述	4-1
4.3.1 物理连接	4-1
4.3.2 硬件支持	4-3
4.3.3 传输格式	4-3
4.4 USB-232 接口概述	4-3
4.5 接口命令语法和软件控制机制	4-3
4.5.1 消息字符串	4-3
4.5.2 数据格式	4-4
4.5.3 应答机制	4-4
4.5.4 消息流控制	4-4
4.5.5 接收缓存	4-4
4.5.5 通讯故障诊断	4-5
4.6 接口命令和查询详解	4-5
4.6.1 兼容性	4-5
4.6.2 接口命令和查询集	4-5
4.6.3 通用接口命令	4-6
*RST	4-6
4.6.4 通用接口查询	4-6
*IDN?	4-6
4.6.5 设备特殊命令	4-6
ATS	4-6
CMPL	4-7
CUR	4-7
CURFD	4-7
CURFUP	4-7
CURFDOWN	4-8
LOCK	4-8
NETWORK	4-8
OUT	4-8
TRIG	4-9
TRIGD	4-9
TRIGA	4-9
4.6.6 设备特殊查询	4-10
ATS?	4-10
CMPLS?	4-10
CMPL?	4-10
CUR?	4-10
CURFD?	4-10
LOCK?	4-10
NETWORK?	4-11
OSC?	4-11
OUT?	4-11
TRIG?	4-11
TRIGD?	4-11
TRIGA?	4-12
5. 附件	5-1
5.1 简介	5-1
5.2 F20001 二线式电流输出适配器	5-1

5.2.1 F20001 适配器.....	5-1
5.2.2 耐压容限.....	5-2
5.2.3 安全接地.....	5-2
5.2.4 屏蔽接地.....	5-2
5.3 附件.....	5-2
5.3.1 交流电源线 CAB-AC250-052.....	5-2
5.3.2 通讯电缆 CAB-232-DCE-3.....	5-3
5.3.3 通讯电缆 CAB-USB-AB-2.....	5-3
5.3.4 转换器 CONV-232-9-25.....	5-4
5.3.5 其它附件.....	5-4

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 F2002 的固件版本.....	1-2
图 1-2 F2002 的标准显示界面.....	1-5
图 2-1 运输时需粘贴的保护标志.....	2-1
图 2-2 F2002 的桌面放置方式.....	2-2
图 2-3 拆卸机箱支脚.....	2-3
图 2-4 在 F2002 两侧安装 RM01 和 RM02 附件.....	2-4
图 2-5 F2002 与机柜的连接安装方法.....	2-4
图 2-6 F2002 的安全散热间距.....	2-5
图 2-7 F2002 后面板详解.....	2-6
图 2-8 电源输入组件和交流电源线插头.....	2-7
图 2-9 计算机接口连接器以及使用 USB 电缆连接 F2002 和计算机.....	2-8
图 2-10 电流输出接口与 F20002 输出适配器的连接方法.....	2-8
图 2-11 触发输出 BNC 接口和触发电平.....	2-9
图 2-12 F2002 的开机启动画面.....	2-10
图 2-13 F2002 的开机检测界面.....	2-10
图 2-14 F2002 的标准显示界面.....	2-10
图 3-1 F2002 前面板详解.....	3-1
图 3-2 LCD 显示器功能区域划分.....	3-2
图 3-3 F2002 的 LED 指示器.....	3-3
图 3-4 F2002 的键盘分区.....	3-3

图 3-5 电源开关的开、关位置状态.....	3-3
图 3-6 微调输出电流.....	3-5
图 3-7 电流设置界面.....	3-5
图 3-8 恒流状态和电压钳位状态.....	3-6
图 3-9 钳位电压设置界面.....	3-7
图 3-10 状态切换临界过程（电流极性为正）.....	3-7
图 3-11 有限输出阻抗 ROUT 造成的分流误差.....	3-9
图 3-12 使用 OUTPUT 键切换输出端状态.....	3-10
图 3-13 设置输出补偿网络.....	3-11
图 3-14 LORS 保护负载上电安全.....	3-12
图 3-15 LORS 提供静电保护.....	3-12
图 3-16 电容负载保护.....	3-12
图 3-17 振荡检测.....	3-13
图 3-18 IME 和 ATS 输出响应模式（电流极性为正）.....	3-14
图 3-19 设置输出输出响应模式.....	3-14
图 3-20 恒流状态下的输出响应（电流极性为正）.....	3-15
图 3-21 进入电压钳位状态时的输出响应（电流极性为正）.....	3-16
图 3-22 电感性负载电流过冲导致短暂进入电压钳位状态（电流极性为正）.....	3-16
图 3-23 由高阻状态进入正常输出状态时的输出响应.....	3-17
图 3-24 二线式连接方式造成的测量误差.....	3-18
图 3-25 四线式连接方式避免测量误差.....	3-19
图 3-26 设置触发方式.....	3-20
图 3-27 设置触发延迟时间和声响提示.....	3-21
图 3-28 触发方式为“On”时的触发输出时序（电流极性为正）.....	3-22
图 3-29 F2002 计算机接口系统.....	3-23
图 3-30 使用 INTERFACE 键切换计算机接口形式.....	3-23
图 3-31 使用 BAUD 键设置触发延迟时间.....	3-24
图 3-32 设备管理器中的 RS-232C/USB 转换器设备.....	3-24
图 3-33 USB Serial Port (COMn) 属性窗口.....	3-25
图 3-34 修改 RS-232C/USB 转换器的端口号.....	3-25
图 3-35 恢复出厂设置.....	3-26
图 3-36 N 型和 P 型霍尔元件.....	3-27
图 3-37 恒流充电测量大容量电容.....	3-28
图 3-38 同时接地产生的地线环路.....	3-29
图 3-39 F2002 的接地关系.....	3-30
图 3-40 F2002 键盘菜单结构图（输出设置和计算机接口）.....	3-32
图 3-41 F2002 键盘菜单结构图（菜单和触发输出）.....	3-33
图 4-1 常用 DCE 设置 9 针连接器引线序列.....	4-2
图 5-1 F20001 输出转换器连接方法.....	5-1
图 5-2 交流电源线 CAB-AC250-052.....	5-3
图 5-3 通讯电缆 CAB-232-DCE-3.....	5-3
图 5-4 通讯电缆 CAB-USB-AB-2.....	5-3

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.....	1-4
表 3-1 典型输出电流下的最大误差和典型实测误差（15—35℃）.....	3-8
表 3-2 不同误差容许范围内的负载直流电阻范围.....	3-9
表 3-3 台式万用表直流电压档各量程分辨率和输入阻抗.....	3-19
表 3-4 台式万用表直流电压档 1000V/100V 量程下最大负载直流电阻.....	3-19
表 3-5 恢复出厂设置值.....	3-27
表 4-1 接口命令和查询集.....	4-5
表 5-1 F2002 附件清单.....	5-2
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 F2002 程控精密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-F2002-0001

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	前面板操作方法、操作中需注意的细节和输出转换器的使用方法。	34
第 4 章	计算机接口的描述、操作方法、接口命令集和编程示例。	12
第 5 章	附件信息，仪器各接口的物理尺寸和电学定义。	4
附 录	常用磁学单位换算、常用物理单位和常用术语。	4

1.2 阅读导引

如果您初次接触 F2002 程控精密电流源，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，以掌握 F2002 的各项操作方法。需要编程的用户请阅读第 4 章，第 4 章提供所有针对 F2002 编程的细节内容以及简单的编程示例，从而协助用户进行计算机语言编写。第 5 章为 F2002 各项附件的详细信息，以及仪器各物理接口规格和电学定义。

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。

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

- 输出范围 -105mA — $+105\text{mA}$ DC，继电器换向
- 高步进分辨率 $1\mu\text{A}$ ($1/105000$ F.S.) ——为精密有源测量提供足够解析度
- 高准确度： $\pm(0.015\%\text{设置值}+1\mu\text{A})$
- 低噪声/纹波： $1\mu\text{A}$ RMS 典型值 @ 100mA （低噪声模式）
- 输出阻抗 $>500\text{M}\Omega$ （常规/电容负载保护模式）——避免负载效应造成电流准确度降低
- 短期稳定度优于 20ppm/h ——高稳定度电流驱动
- 浮动输出 ——灵活配置参考电位，降低地线环路干扰
- 最大输出功率 $>10\text{W}$ ——适于驱动功率负载

► 钳位电压

- 设置范围 0 — 105V DC，设置分辨率 0.1V
- 准确度： $\pm(0.5\%\text{设置值}+0.5\text{V})$

► 负载保护

- 可控的输出端状态 ——支持开机更换负载
- 静电保护和开机上电冲击保护 ——持续保护负载安全
- 防冲击模式 ATS 和精确的输出状态时序控制 ——最大程度避免电流/电压冲击

► 负载适应性

- 3 种可编程设置的输出补偿网络 ——适用于强电感性负载和强干扰环境
- 输出阻抗 $500\text{M}\Omega$ ——极低负载效应，适应大范围变化的负载

► 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
- 触发输出同步功能 ——确保测量实时性，适用于系统应用

► 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 3×4 键交互型功能键盘操作

► 标准规格

- 提供用户手册和设备驱动程序
- 标准半宽 2U 台式仪器，交流 $220\text{V}/50\text{Hz}$ 供电

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 F2002 的固件版本

F	2	0	0	2	0	0	0	1	0	9	0	7	1	0	X	X
Firmware Version: X.X																

FIG-MAN-F2002-0001

1.7 技术性能规格

表 1-2 为 F2002 程控精密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-F2002-0002

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	W	220V/50Hz	---	30	70
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	mA	---	-105	---	+105
步进分辨率	IRes	μA	---	---	1	---
准确度 (RL<2kΩ)	AI	---	Tamb=15—35℃	±(0.015%设置值+1μA)		
噪声/纹波 RMS Iout=100mA	NRrms	μA	常规/电容负载保护	---	4	---
			低噪声模式	---	1	---
噪声/纹波 p-p Iout=100mA	NRp-p	μA	常规/电容负载保护	---	25	---
			低噪声模式	---	6	---
温度系数	IdT	ppm/℃	Tamb=15—35℃	---	---	±5
短期稳定度	STI	ppm/h	Tamb=22℃	---	---	20
输出阻抗/负载效应 直流	RIO	MΩ	常规/电容负载保护	500	---	---
			低噪声模式	200	500	---
电源调整率	PSRR	ppm/V	额定交流输入范围	---	---	2
上升时间/电阻负载 误差<0.05%	TIR	ms	IME+常规模式	---	---	10
			ATS+常规模式	---	---	2000
下降时间/电阻负载 误差<0.05%	TIF	ms	常规模式 RL<1kΩ	---	---	50
灌入电压容限	VINT	V	RL=∞	-120	---	120

表 1-2 技术性能规格 (续)

TAB-MAN-F2002-0002

技术指标	符号	单位	测试条件	最小值	典型值	最大值
钳位电压						
设置范围	VRng	V	---	0	---	105
设置分辨率	VRes	V	---	---	0.1	---
准确度	AV	---	Tamb=15°C-35°C	$\pm(0.5\% \text{设置值} + 0.5\text{V})$		
上升时间/电阻负载 误差<0.1%	TVR	ms	常规模式	---	---	1500
下降时间/电阻负载 误差<0.1%	TVF	ms	常规模式 RL<1k Ω	---	---	100
预热						
预热时间 ^[2]	Twm	min	Tamb=15°C-35°C	10	30	---
物理参数						
宽度	W	mm	---	---	217	218
高度	H	mm	不含脚钉	---	88	89
深度 ^[3]	D	mm	不含突出部件	---	317	320
质量	Wgt	kg	不含附件和包装物	---	2.5	3
运输全重	Ws	kg	标准配置	---	4.0	4.5

注

- [1] 环境温度为 15—35°C 范围内达到额定准确度, 5—40°C 范围内准确度下降。
 [2] 每次开机上电后, 至少预热 10 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。

表 1-3 为 F2002 程控精密电流源的补充技术性能规格。

表 1-3 补充技术性能规格

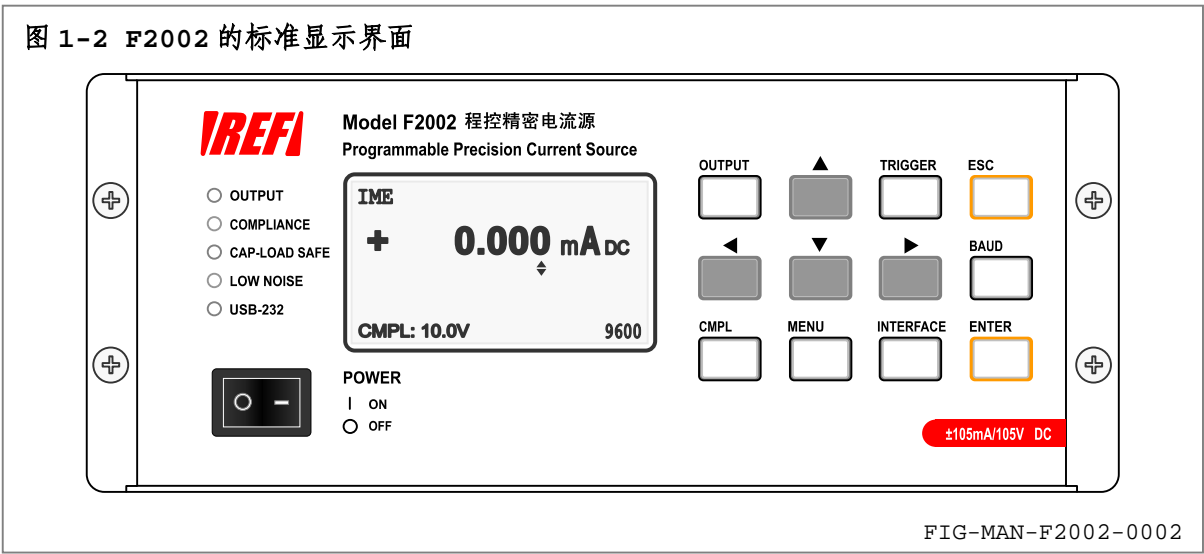
TAB-MAN-F2002-0003

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	300、600、1200、4800、9600	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	300、600、1200、4800、9600	bps
显示和键盘		
显示器	128×64 图形点阵白色背光 FSTN LCD	65mm×37.5mm
键盘	12 键功能键盘	双色
触发		
触发方式	Off、On	---
触发输出延迟时间	0—9.9s, 步进 0.1s	---
触发输出连接器	标准 BNC 插座	---
外部触发电平	TTL 兼容、下降沿有效	内部 1k Ω 限流
耐压容限	-15VDC—+15VDC	---

表 1-3 补充技术性能规格（续） TAB-MAN-F2002-0003

电流输出连接器		
连接器	7W2 功率 D-Sub 型插座（配合附件 F20002）	Female
电流容量	>10A	功率插孔
F20001 电流输出适配器		
输入连接器	7W2 功率 D-Sub 型插头	Mail
输出连接器	标准间距防护型香蕉插座、电流容量>10A	二线式连接方式

图 1-2 为 F2002 程控精密电流源开机后的标准显示界面。



1.8 校准期限

F2002 的校准期限为 1 年。

F2002 于出厂时进行校准，并保证由出厂之日起 1 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 F2002 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。

<本页为空页>

This Page Intentionally Left Blank

安 装

2.1 简介

本章包含 F2002 程控精密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 F2002 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，重新包装于原厂纸板箱内，使用胶带或尼龙袋封好，并于纸板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

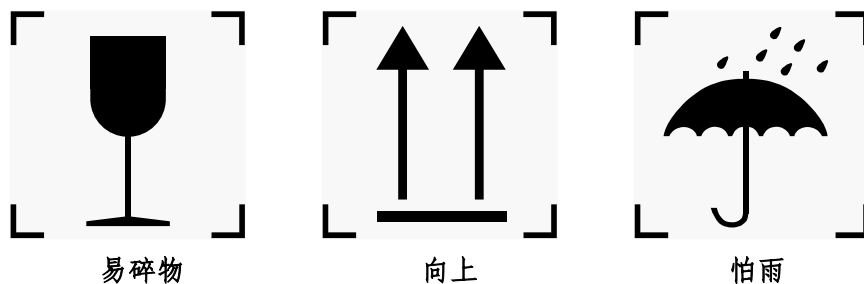


FIG-MAN-F2002-0003

2.3 安装方法

F2002 为标准半宽 2U 台式仪器，尺寸为 $W \times H \times D = 217\text{mm} \times 88\text{mm} \times 317\text{mm}$ ，可置于桌面使用，也可用于机柜安装。

2.3.1 桌面安装

置于桌面使用时，通过改变机箱前支脚活动部分的翻折角度，可将 F2002 水平或倾斜放置，适用于不同的观察角度，如图 2-2a 所示。

机箱前支脚活动部分收回锁定于 0 度时，F2002 可于桌面或台面上与高度提升物叠放放置，使显示器平面与视线法线垂直，如图 2-2b 所示。

机箱前支脚活动部分向前张开至最大角度时，F2002 可直接倾斜放置于桌面或台面上，并使显示器平面与视线法线垂直，如图 2-2c 所示。

图 2-2 F2002 的桌面放置方式

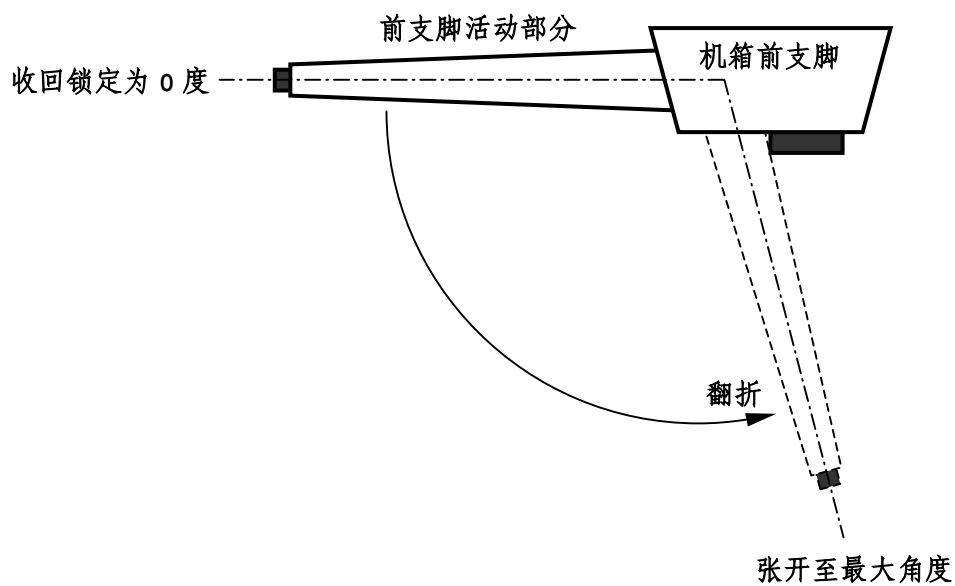


FIG-MAN-F2002-0004

a. 改变机箱前支脚的翻折角度

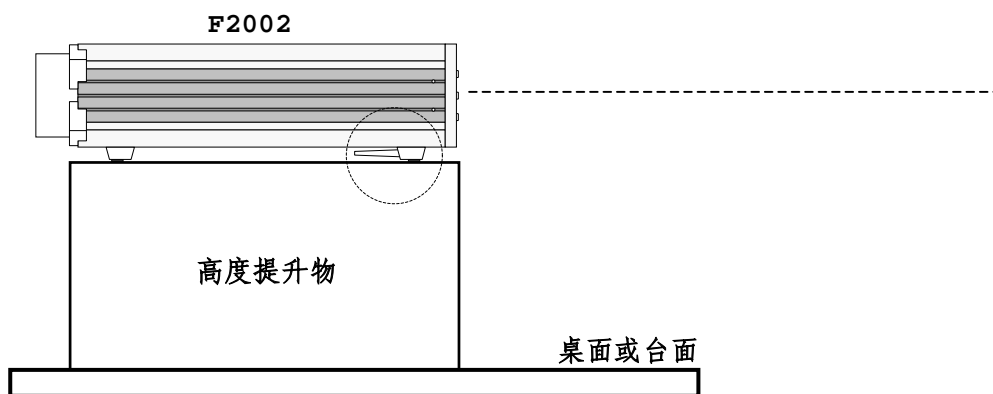


FIG-MAN-F2002-0005

b. 水平放置

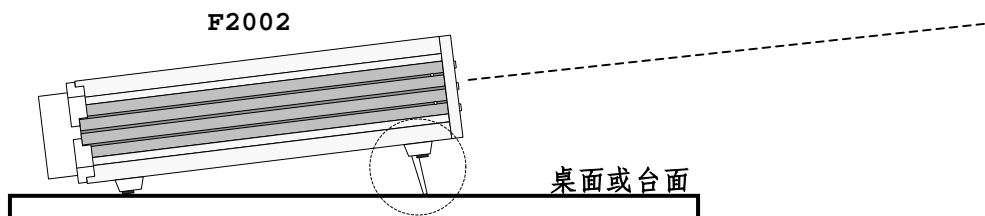


FIG-MAN-F2002-0006

c. 倾斜放置

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前后支脚。保留支脚时需使前支脚活动部分收回锁定于 0 度。拆卸支脚时，请遵循以下步骤，如图 2-3 所示：

- ① 将前支脚活动部分收回锁定于 0 度；
- ② 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；
- ③ 取下尼龙撑垫；
- ④ 倒置机箱使底板向上；
- ⑤ 水平抽出机箱底板；
- ⑥ 移除底板支脚上附带的橡胶脚垫，露出螺母；
- ⑦ 使用适用的螺丝刀配合内六角套筒拆卸固定支脚的 M3 螺钉和螺母，并取下支脚；
- ⑧ 还原安装机箱底板；
- ⑨ 使用 M4 螺钉紧固安装尼龙撑垫。

图 2-3 拆卸机箱支脚

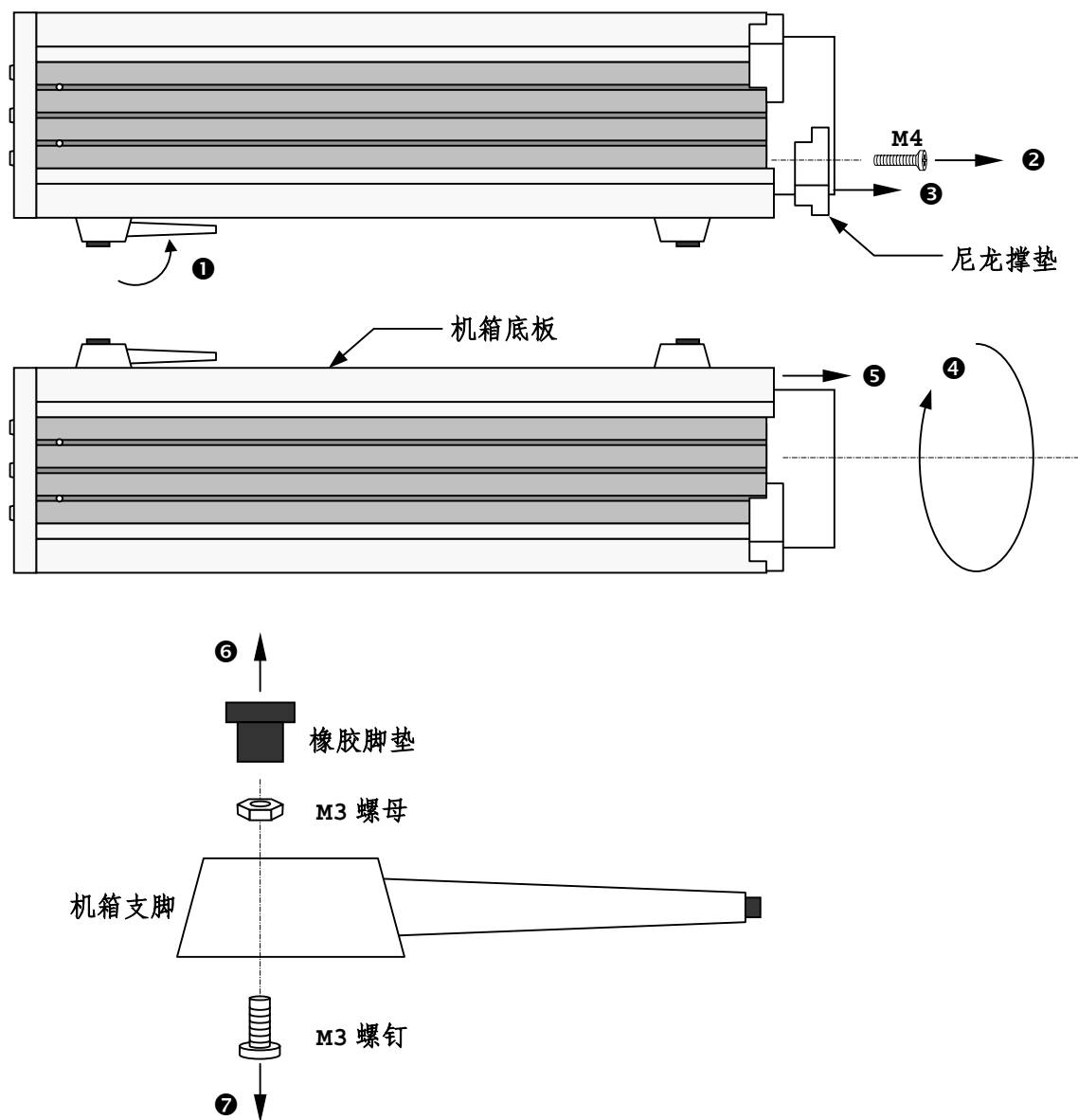


FIG-MAN-F2002-0007

为将 F2002 安装于机柜中，需要使用以下附件：

- (1) RM01：全宽机箱法兰（机柜安装组件）
- (2) RM02：半宽机箱法兰（机柜安装组件）

可遵循以下步骤使用 RM01 和 RM02 将 F2002 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 F2002 机箱两侧靠近前面板的各 2 只 M3 内六角螺钉。
- (3) 面向 F2002 前面板，并在机箱右侧使用上述 M3 内六角螺钉安装 RM01 附件 1 只。
- (4) 类似地，在 F2002 机箱左侧安装 RM02 附件 1 只。
- (5) 将 F2002 水平置于机柜托盘上，令 RM01 将 F2002 机箱一侧紧贴固定于机柜的一侧安装梁，RM02 填充另一侧的半宽机箱空位，并连接至机柜的另一侧安装梁，使用 M5 机柜螺钉固定。

RM01 和 RM02 的安装方法如图 2-4 所示。F2002 与机柜的连接安装方法如图 2-5 所示。

图 2-4 在 F2002 两侧安装 RM01 和 RM02 附件

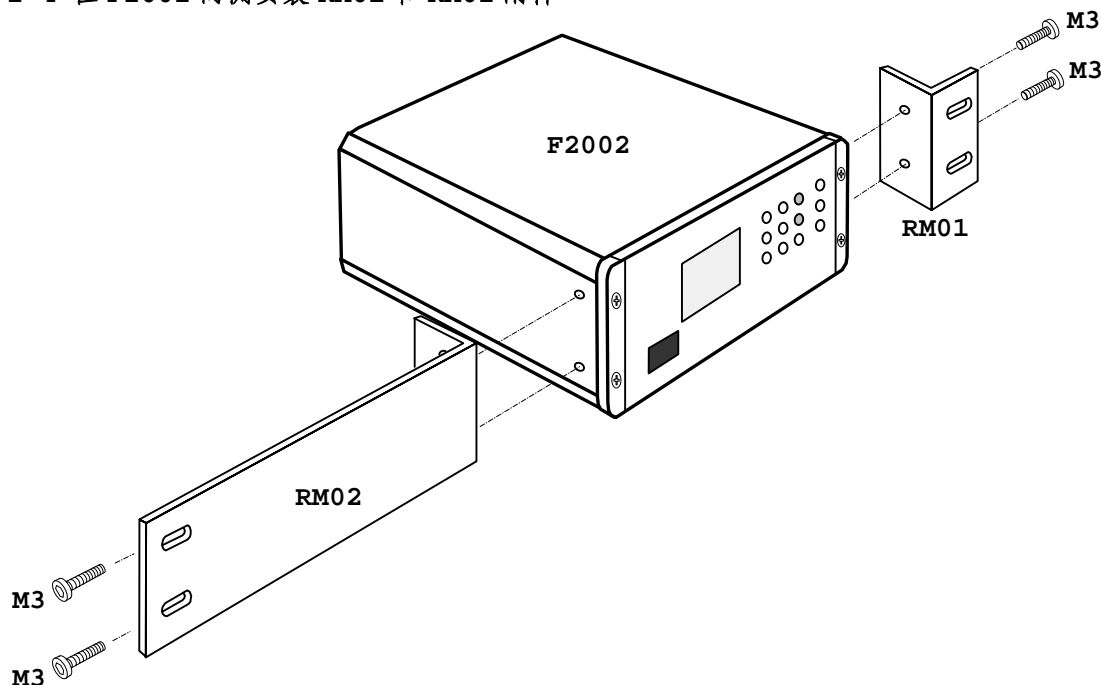


FIG-MAN-F2002-0008

图 2-5 F2002 与机柜的连接安装方法

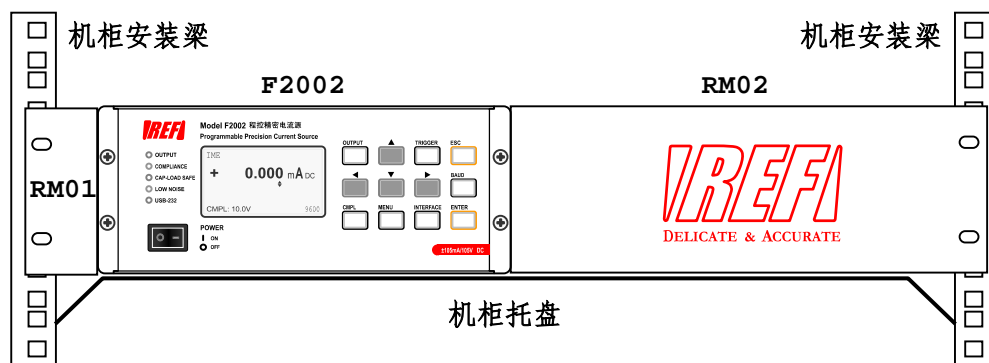


FIG-MAN-F2002-0009

2.3.3 保留安全散热间距

F2002 具有 2 处发热区，分别为位于后面板的主散热器和位于顶板的辅助散热孔。

主散热器采用强制负压风冷散热。F2002 输出电流为 105mA 且输出端短路时，主散热器达到约 12W 的最高散热量。无遮挡条件下，主散热器相对环境温度的温升不高于 20℃。

辅助散热孔下方为辅助散热器。辅助散热器采用自然风冷散热。无遮挡条件下，辅助散热器相对环境温度的温升不高于 30℃。

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。切勿遮挡或封闭主散热器和辅助散热孔，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，主散热器上方和下方均应保留至少 30mm 散热间距，辅助散热孔上方应保留至少 15mm 散热间距，如果 F2002 上方需要放置其它仪器，请务必使用高度不小于 15mm 的支脚抬高上方仪器，如图 2-6 所示。

图 2-6 F2002 的安全散热间距

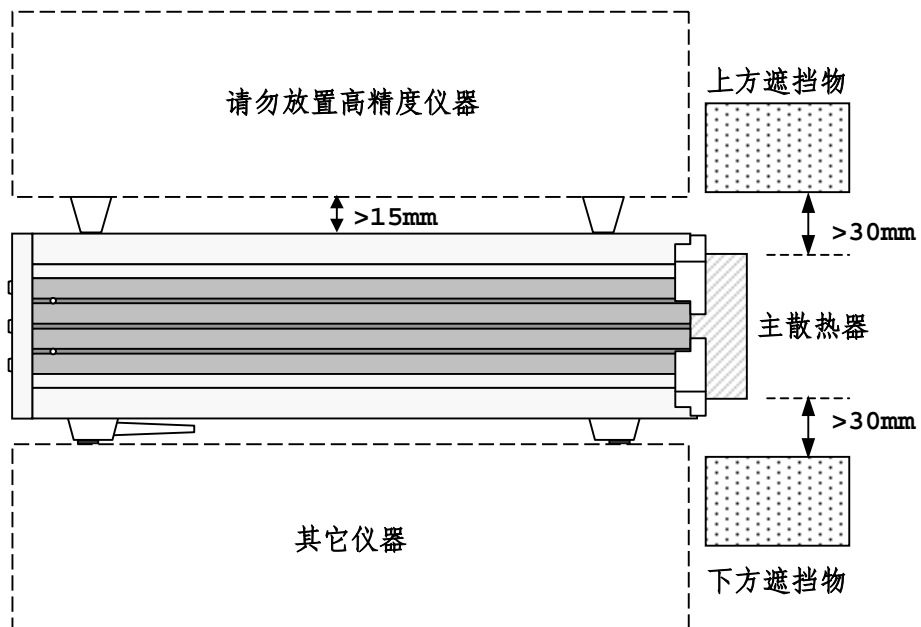


FIG-MAN-F2002-0010

2.3.4 避免热量耦合和干扰

由于 F2002 的辅助散热器最高可产生约 5W 热量，并造成显著的温度变化，因此请勿将高精度仪器放置于 F2002 上方，以避免高精度仪器产生明显的温度漂移。

多台 F2002 或 F2002 与其他精密仪器共同使用时，请尽量优先水平放置，避免仪器之间的热量耦合和干扰，以策各种仪器的额定准确度。

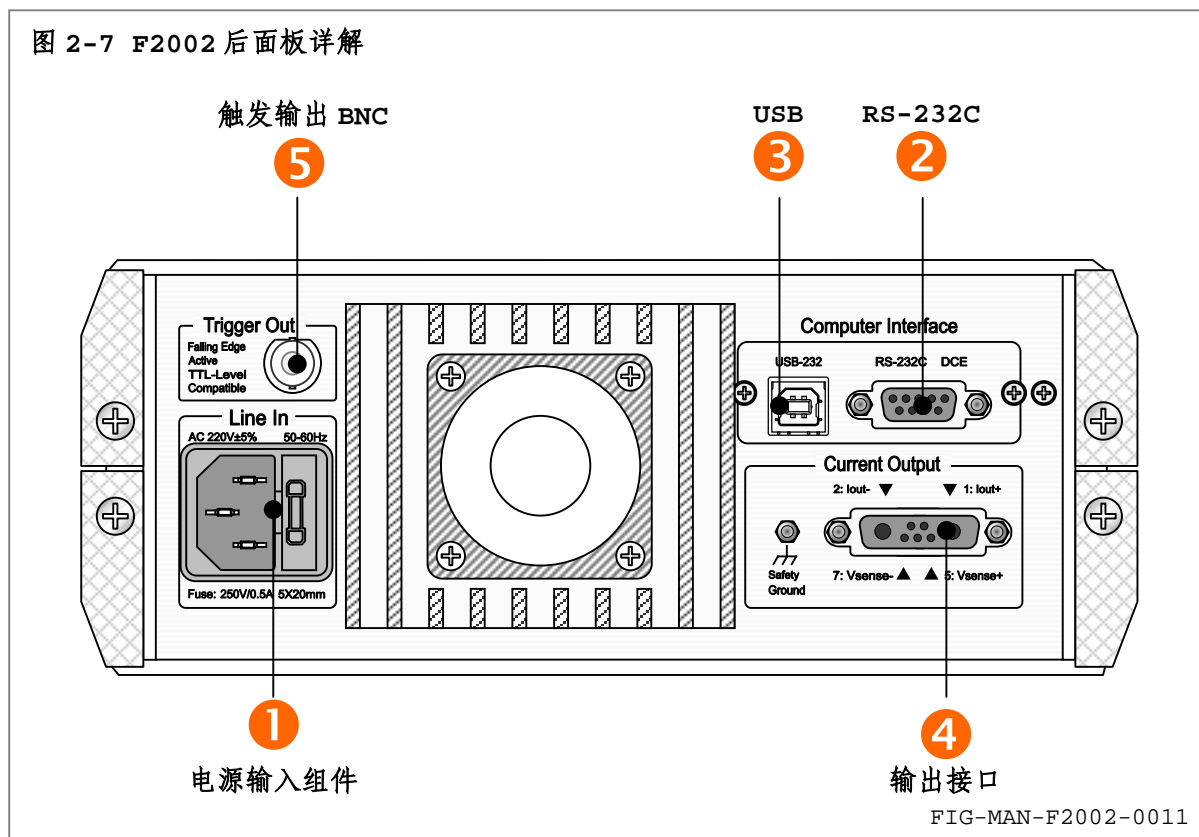
如果空间允许，桌面放置时请尽量为 F2002 保留远离其他发热源的独立桌面区域。

桌面多层叠放放置或机柜安装时，请尽量将 F2002 安置于顶层，并确保足够的安全散热间距以及 15—35℃ 范围内的局部环境温度。

2.4 后面板详解和电缆连接

F2002 后面板包括❶电源输入组件、❷RS-232C 接口、❸USB 接口、❹输出接口和❺触发输出 BNC 插座，共 5 部分，如图 2-7 所示。以下各节分别对上述 5 部分及其电缆连接方法进行描述。

图 2-7 F2002 后面板详解



2.4.1 电源输入组件

电源输入组件通过电源线为 F2002 提供交流电源。电源输入组件包括：❶交流输入插座，和❷保险仓。如图 2-8a 所示。请仔细阅读 F2002 后面板左上方标示的❸“交流电源输入规格”，由交流电源插座输入的交流电压和频率必须严格位于此规格限制范围内。

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。

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，并可能造成仪器损毁及可能的电击或火灾事故。

交流输入插座与附件 CAB-AC250-052 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-AC250-052 插头及端子定义符合 GB-1002 标准，其中：❹中心导体为大地（安全地）、两侧导体❺和❻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❹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 F2002 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。

图 2-8 电源输入组件和交流电源线插头

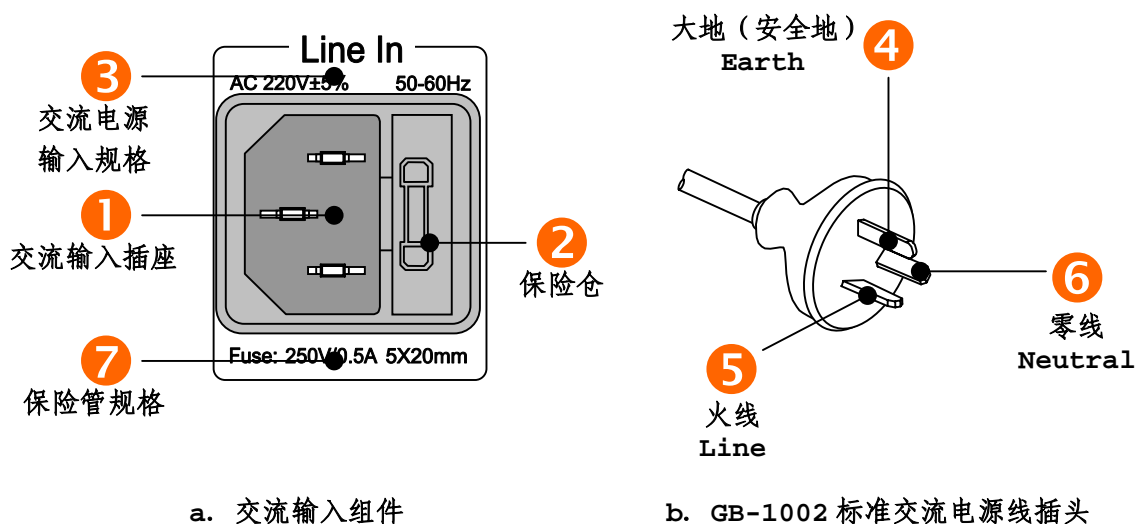


FIG-MAN-F2002-0012

2.4.2 RS-232C 和 USB-232 接口

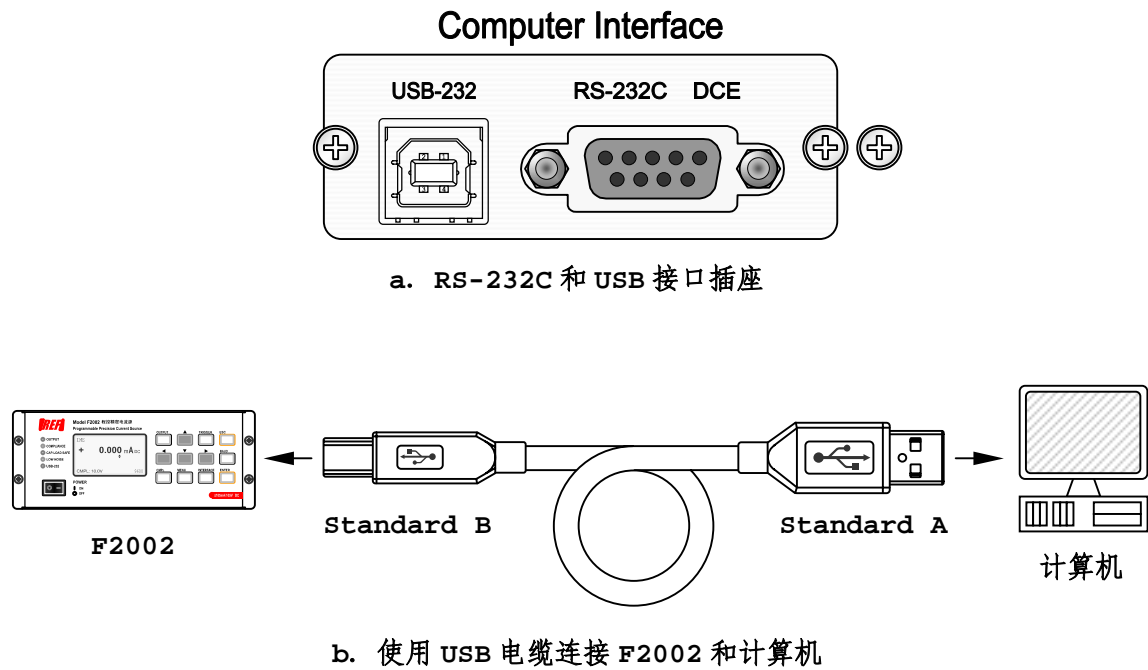
F2002 配置标准 RS-232C 计算机接口，并于后面板配置 9 针 D 型连接器，采用 DCE 设置，通过附件 CAB232DCE-3 串行电缆连接至计算机的串行端口的 9 针 D 型连接器，或配合可选附件 CONV232-9-25 连接至计算机的 25 针串行端口，串行端口及其配置请参阅第 4 章中的相应内容。

除标准 RS-232C 接口外，为避免计算机串行接口资源缺乏问题，F2002 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 3.10 中的相应内容。

RS-232C 和 USB-232 接口如图 2-9a 所示。USB 电缆连接如图 2-9b 所示。

图 2-9 计算机接口连接器以及使用 USB 电缆连接 F2002 和计算机



2.4.3 电流输出接口

F2002 配置 7W2 功率 D-Sub 型插座与 F20001 二线式输出适配器匹配，如图 2-10 所示。输出接口插座两侧配备❶锁紧螺母，与 F20001 输出转换器 7W2 功率 D-Sub 型插头两侧的❷锁紧螺钉配合，具有高连接可靠性。

图 2-10 电流输出接口与 F20001 输出适配器的连接方法

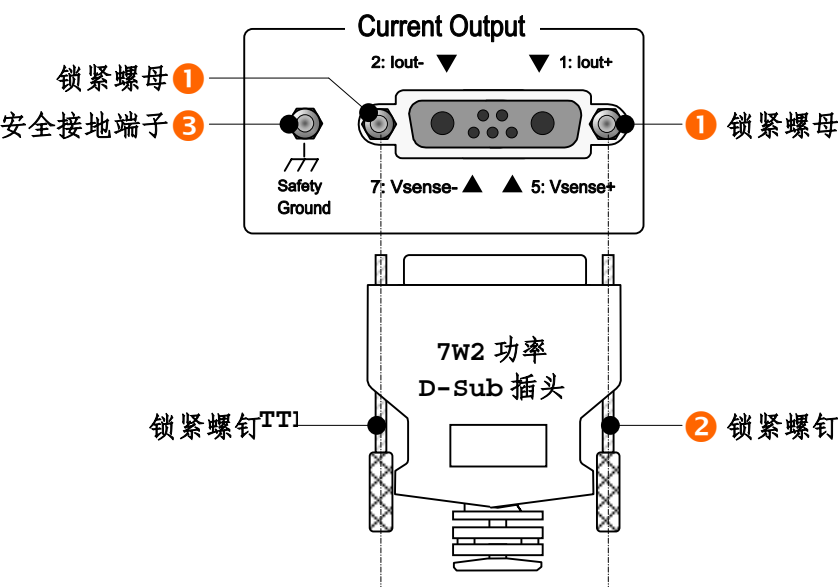


FIG-MAN-F2002-0014

插入功率 D-Sub 型插头时，将插头依据 D 型形状对准插座，平直插入，并旋紧锁紧螺钉②。取下插头时，首先旋松锁紧螺钉②，而后平直取下插头。

F2002 的输出接口左侧配置安全接地端子③。

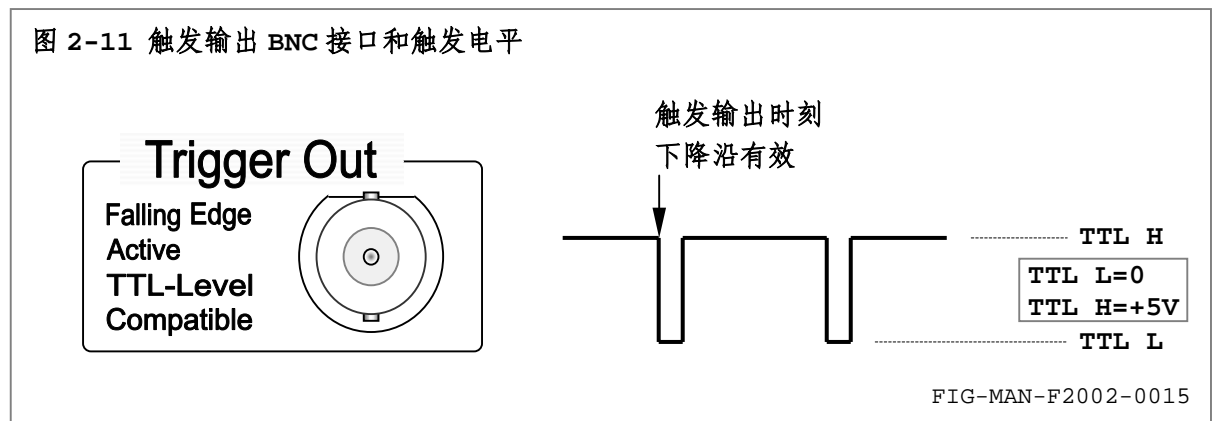
安全接地端子与 F2002 机箱连接，并通过三芯单相电源线的接地线与安全地相连。三芯单相电源线及其连接方法请参阅 2.4.1 中的详细内容。

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安全接地端子，以策操作者的人身安全。F2002 为浮动电流/电压输出，因此即使导电表面或外壳与 F2002 电流输出端存在电气连接关系，也可安全接地。不可将与 F2002 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。

F20001 输出转换器的金属外壳已通过输出接口连接至安全地。

2.4.4 触发输出 BNC 接口

F2002 配置触发输出 BNC 接口，用于输出同步触发信号，触发信号兼容 TTL 电平规范，下降沿有效，如图 2-11 所示。触发功能的电平兼容性和设置方法请参阅 3.14.3 中的相关内容。



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 F20002 的 7W2 功率 D-Sub 型插头插入后面板输出插座，并锁紧插头两侧所锁紧螺钉。
3. 上电前完成后面板其他电缆（包括 RS-232C 接口/USB 接口和触发输出）连接，并确保连接状况良好。

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。

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. 检查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-AC250-052 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 2-12 所示启动画面：

图 2-12 F2002 的开机启动画面



FIG-MAN-F2002-0016

7. 约 1 秒后，进入图 2-13 所示开机检测界面：

图 2-13 F2002 的开机检测界面

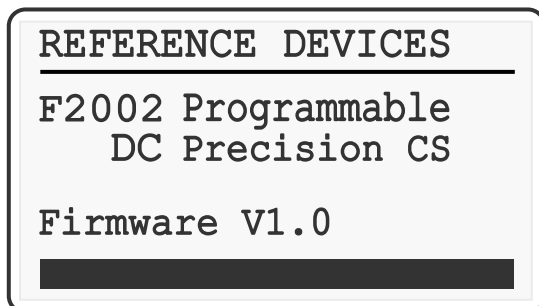


FIG-MAN-F2002-0017

8. 开机检测完成后，进入图 2-14 所示标准显示界面：

图 2-14 F2002 的标准显示界面

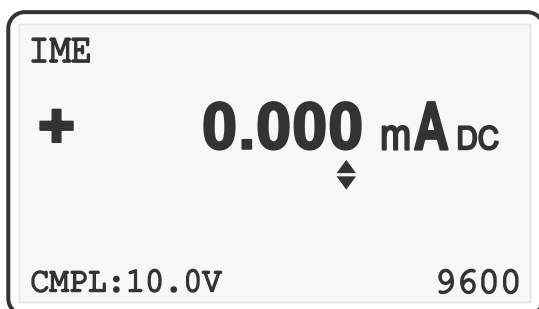


FIG-MAN-F2002-0018

注

为达最佳效果，仪器使用前应至少预热 10 分钟。
至少预热 30 分钟后达到额定准确度。

9. 通过香蕉插头连接线将 F20001 输出香蕉插座的 Iout+和 Iout-端分别连接至万用表的 +、-电流输入端，并将万用表量程设置为大于 100mA。

按 **ENTER** 键进入电流设置界面。使用 **◀**、**▶** 键在各位中移动，并使用 **▲**、

▼ 键设置输出电流为+100.000mA，按 **ENTER** 键确认并返回标准显示界面。

按 **OUTPUT** 键将输出端设置为正常输出状态，允许电流输出，此时万用表应显示 100mA。

按 **OUTPUT** 键将输出端设置为高阻状态，禁止电流输出。

断开万用表连接后按 **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。

按 **OUTPUT** 键将输出端设置为高阻状态，禁止电流输出。

注

如果仪器至此步骤均操作良好，则 F2002 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 F2002 的完整操作信息。

<本页为空页>

This Page Intentionally Left Blank

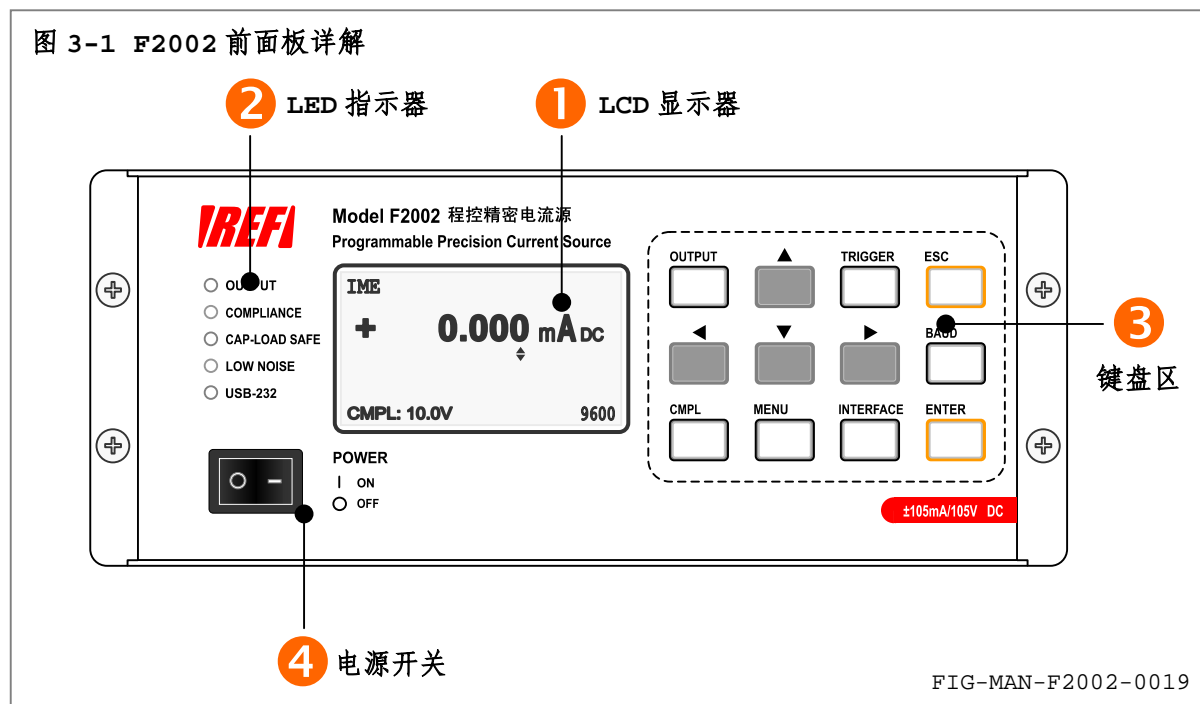
操作

3.1 简介

本章包含 F2002 程控精密电流源的操作方法。3.2 为前面板详解，3.3 为键盘操作方法，3.4 为设置输出电流，3.5 为设置钳位电压，3.6 为输出电流准确度，3.7 为输出阻抗，3.8 为设置输出端状态，3.9 为设置输出补偿网络和负载保护，3.10 为噪声性能，3.11 为振荡检测和处理，3.12 为输出响应模式和避免过冲，3.13 测量输出电压，3.14 为触发输出，3.15 为键盘锁，3.16 为设置计算机接口，3.17 为恢复出厂设置，3.18 为负载实例，3.19 为接地关系，3.20 为键盘菜单结构。

3.2 前面板详解

F2002 程控精密电流源前面板包括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：



3.2.1 LCD 显示器

F2002 使用 128×64 图形点阵白色背光 FSTN LCD 显示器，如图 3-2 所示。LCD 显示器根据功能划分为：

① 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 4 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毫安 mA， $1\text{mA}=10^{-3}\text{A}=10^3\mu\text{A}$ 。单位尾缀均为 DC。

② 钳位电压设置区： 设置钳位电压。

标准显示界面下，钳位电压设置区为单行，显示当前钳位电压，如图 3-2a 所示。进入钳位电压设置界面时，钳位电压设置区为双行，第 1 行显示当前钳位电压，第 2 行显示设置值，当前设置位反转显示，如图 3-2b 所示。

当前钳位电压和钳位电压设置值单位为伏特 V， $1V=10^3mV=10^6\mu V$ 。

③ 防冲击模式指示： 显示防冲击模式状态 IME/ATS。

④ 键盘锁定指示： 显示键盘锁定状态。

⑤ 触发状态指示： 显示触发方式、触发延迟时间和触发声响提示状态。

⑥ 波特率指示： 显示当前波特率，单位为 bps (bit per second)。

⑦ 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。

⑧ 设置区： 设定各项参数时的设置界面。

图 3-2 LCD 显示器功能区域划分

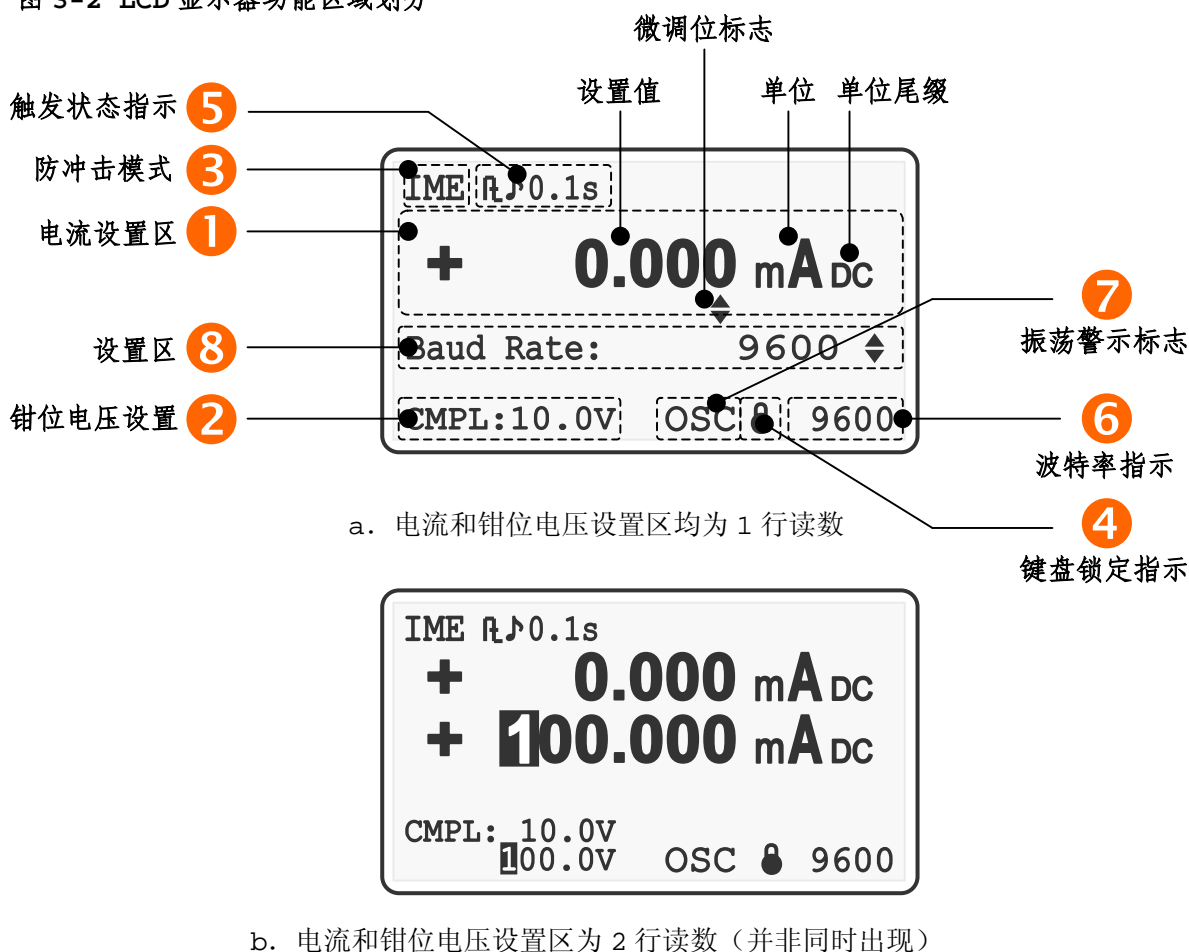


FIG-MAN-F2002-0020

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输出补偿网络状态和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 3-3 所示。

图 3-3 F2002 的 LED 指示器

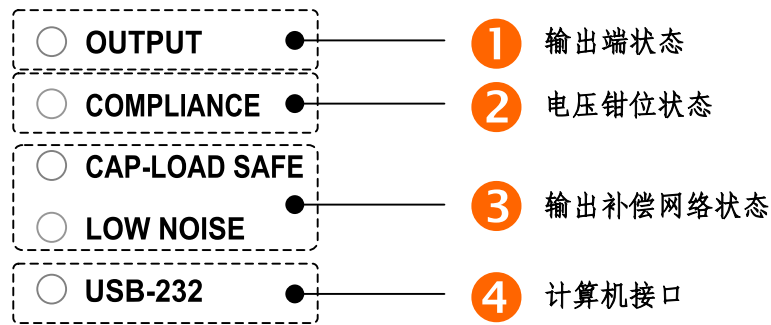


FIG-MAN-F2002-0021

3.2.3 键盘区

F2002 的键盘依据功能划分为①输出端状态、②设置钳位电压、③仪器功能、④计算机接口设置、⑤使能键和⑥方向键共 6 部分，如图 3-4 所示。

图 3-4 F2002 的键盘分区

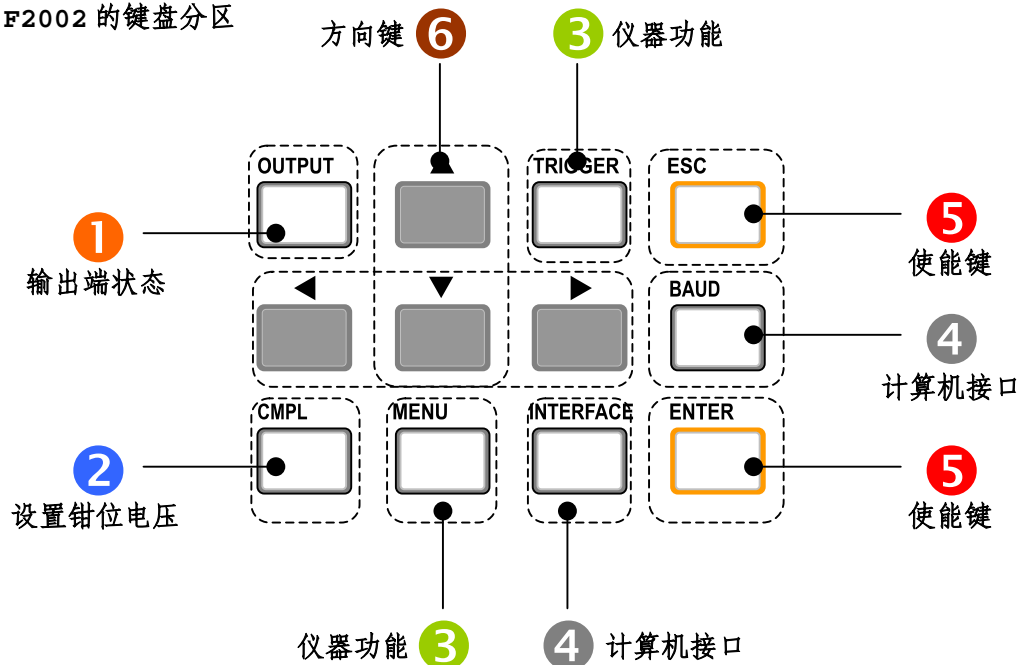


FIG-MAN-F2002-0022

3.2.4 电源开关

F2002 的电源开关采用船形开关，开、关位置状态如图 3-5 所示。

图 3-5 电源开关的开、关位置状态

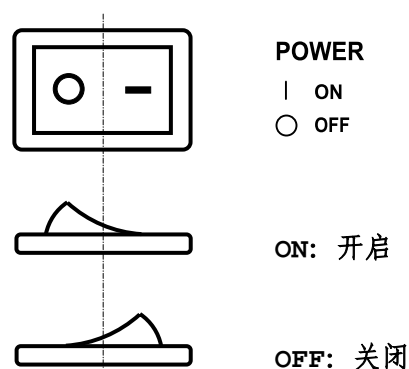


FIG-MAN-F2002-0023

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。

❶ 输出端状态：

OUTPUT：切换输出端状态为正常输出/高阻状态。

❷ 设置钳位电压：

CMPL：进入钳位电压设置界面。

❸ 仪器功能：

TRIGGER：设置触发输出模式、触发延迟时间和触发声响提示状态。

MENU：设置防冲击模式、输出补偿网络和电压表等各项仪器高级功能。

❹ 计算机接口设置：

INTERFACE：切换计算机接口为 RS-232C 接口或 USB 接口。

BAUD：选择串行计算机接口波特率。

❺ 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。

Esc：取消键，取消对某项参数的修改，以及恢复出厂设置。

❻ 方向键：

▲、**▼**：标准显示模式下对当前电流微调位进行数值设置，电流和钳位电压设置界面下对设置位进行数值设置，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，电流和钳位电压设置界面下用于切换设置位。

3.4 设置输出电流

F2002 提供 2 种输出电流的键盘设置方法：微调 and 电流设置界面。

3.4.1 微调输出电流

在标准显示界面下，当前输出电流值低 4 位（1 μ A/10 μ A/100 μ A/1mA 位）和符号位中某一位下方显示微调位。使用方向键 **◀** 和 **▶** 在低 4 位和符号位之间循环移动选择微调位。选定微调位后，使用方向键 **▲** 和 **▼** 使微调位数值增加或减小 1 或使符号位极性变化，如图 3-6 所示。输出端为正常输出状态且输出电压未达到钳位电压时，输出电流的变化与操作同步。

微调输出电流过程中，输出电流随微调操作同步生效，与输出响应模式（IME、ATS）无关。

微调输出电流遵循如下规则：

❶ 微调位为 9，且按方向键 **▲** 时，微调位数值为 0 并向高位进位。

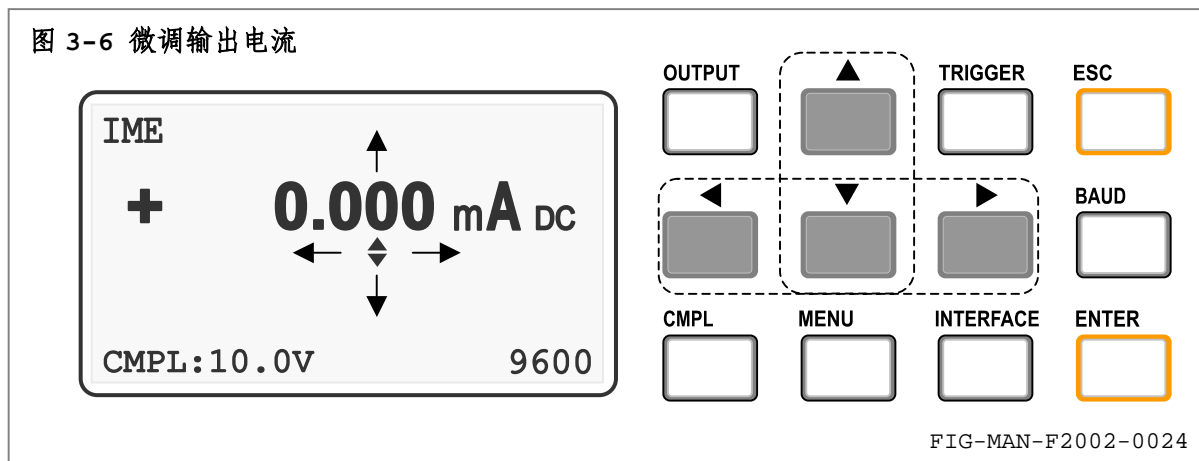
❷ 当前输出电流为最大值 105.000mA 且按方向键 **▲** 时，输出电流不变化。

❸ 微调位+1 使输出电流大于最大值 105.000mA 时，当前输出电流限制为最大值。

❹ 微调位为 0，且按方向键 **▼** 时，微调位数值为 9 并向高位借位。

❺ 微调位为 0，并且所有高位均为 0 时，按方向键 **▼** 后微调位之后的所有低位清零。

图 3-6 微调输出电流



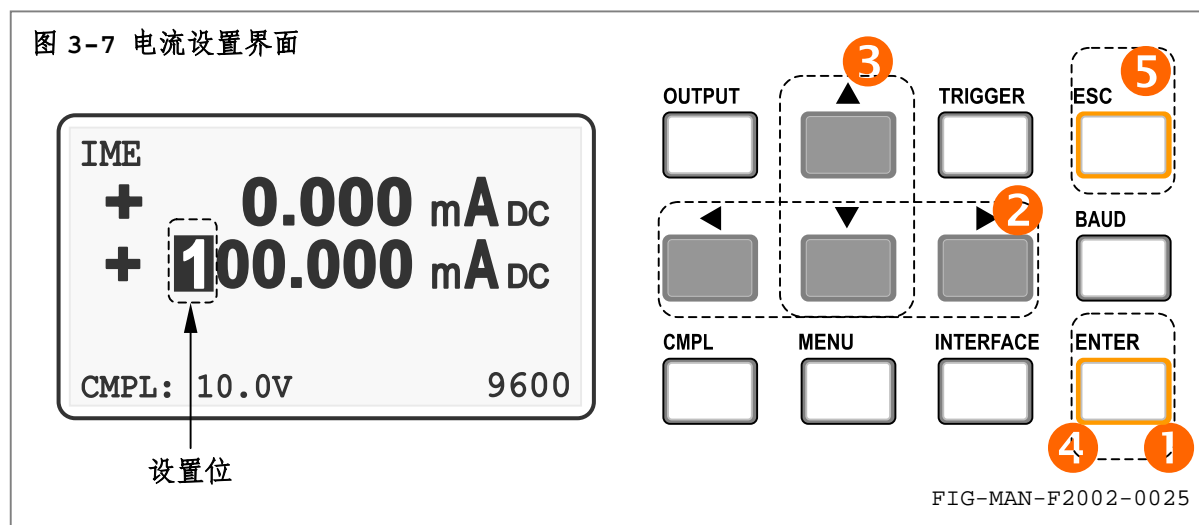
微调输出电流也可通过计算机接口命令 `CURFD`、`CURFUP` 和 `CURFDOWN` 实现，请参阅第 4 章中的相关内容。

3.4.2 电流设置界面

标准显示界面下，请遵循以下步骤于电流设置界面中设置输出电流，如图 3-7 所示：

- ❶ 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。
- ❷ 使用方向键 `←` 和 `→` 使设置位向左、右循环移动。
- ❸ 使用方向键 `▲` 和 `▼` 使设置位数值增加或减小 1，或使符号位极性变化。
- ❹ 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。

图 3-7 电流设置界面



通过电流设置界面设置输出电流遵循以下规则：

- ❶ 使用 `ENTER` 键确认电流设置值前，输出电流维持不变，设置过程中对各设置位的操作不影响当前输出电流。
- ❷ 设置位数值为 9，且按方向键 `▲` 时，设置位数值为 0 并向高位进位。
- ❸ 设置位数值+1 使电流设置值大于最大值 105.000mA 时，电流设置值限制为最大值。
- ❹ 设置位数值为 0，且按方向键 `▼` 时，设置位数值为 9 并向高位借位。
- ❺ 设置位数值为 0，且所有高位均为 0 时，按方向键 `▼` 后设置位之后的所有低位清零。

设置输出电流及其极性也可通过计算机接口命令 `CUR` 实现，或通过查询 `CUR?` 查询当前输出电流，请参阅第 4 章中的相关内容。

3.5 设置钳位电压

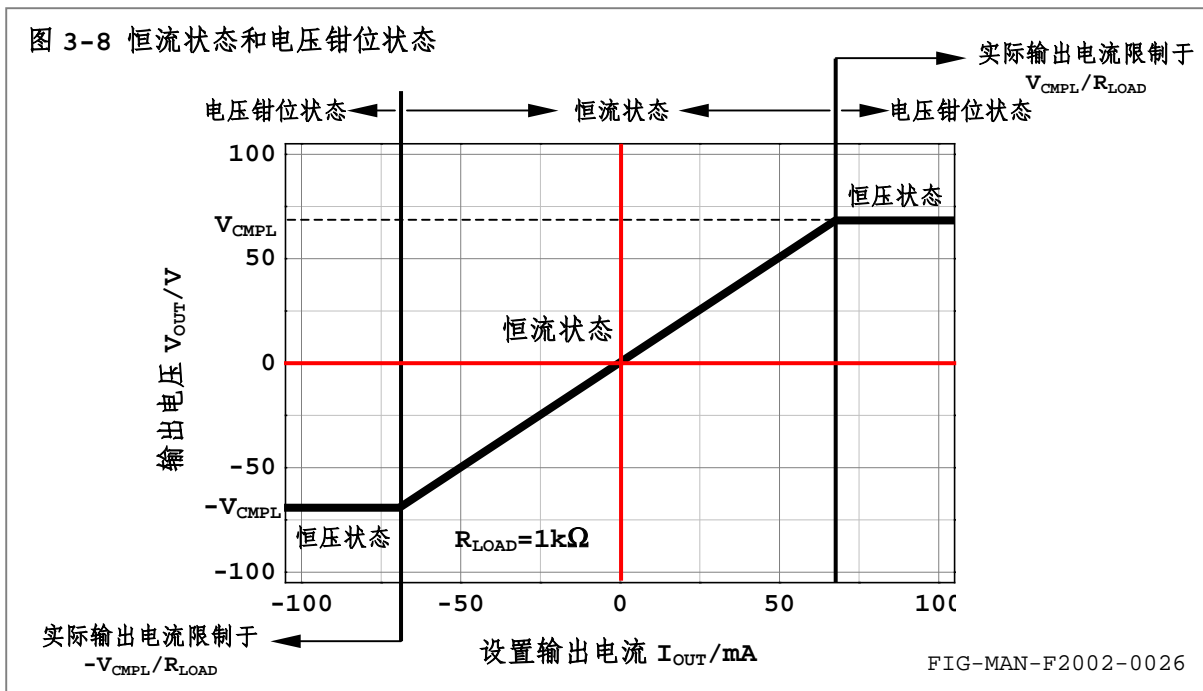
F2002 提供钳位电压设置功能。通过设置钳位电压，F2002 的最大输出电压可设置为 0.3V—105V 范围内，设置步进 0.1V。

3.5.1 恒流状态和电压钳位状态

F2002 实质为电压电流源，一定的设置输出电流下，不同的负载直流电阻可能导致 F2002 进入恒流状态或电压钳位状态（恒压状态）。

当前设置输出电流 I_{OUT} 与负载直流电阻 R_{LOAD} 乘积的绝对值 $|I_{OUT}R_{LOAD}|$ 低于当前钳位电压 V_{CMPL} 时，F2002 处于恒流状态，实际输出电流与设置值相同，并可保证额定准确度。

$|I_{OUT}R_{LOAD}|$ 高于 V_{CMPL} 时，F2002 由恒流状态进入电压钳位状态，即恒压状态。此时，F2002 维持恒定的输出电压 V_{CMPL} ，实际输出电流绝对值为 V_{CMPL}/R_{LOAD} ，小于 I_{OUT} ，如图 3-8 所示。



电压钳位状态下，F2002 恒压输出，相当于电压源，并导致前面板左侧 LED 指示器中的“COMPLIANCE”黄色指示灯闪烁。除前面板指示灯外，还可通过计算机接口查询 `CMPLS?` 确定是否进入电压钳位状态，请参阅第 4 章中的相关内容。

由于设置步进、噪声和准确度原因，请尽量避免将 F2002 作为精密电压源使用。

3.5.2 设置钳位电压

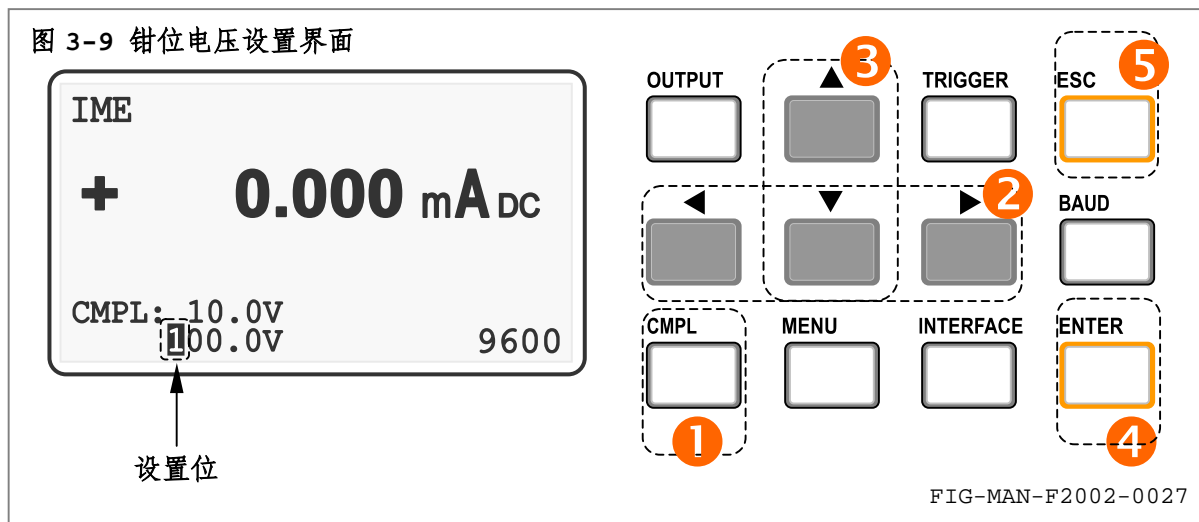
标准显示界面下，请遵循以下步骤设置钳位电压，如图 3-9 所示：

- ① 按 `CMPL` 键进入钳位电压设置界面，第 2 行显示电压设置值，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` 键确认使当前钳位电压变化至电压设置值，或按 `ESC` 键取消设置。

注

钳位电压值保存于 F2002 内部非易失性存储器中，并于下次开机时保持。

图 3-9 钳位电压设置界面



F2002 的钳位电压设置准确度为 $\pm (0.5\% \text{设置值} + 0.5\text{V})$ ，设置步进分辨率 0.1V。

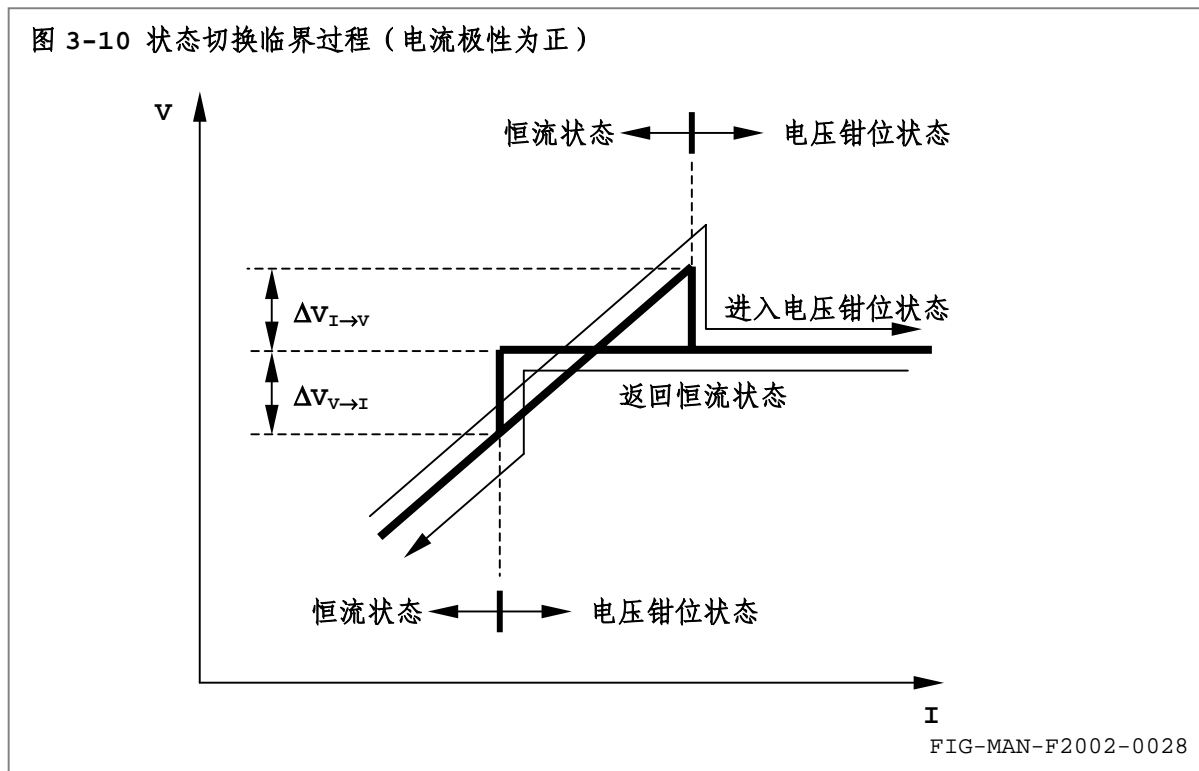
通过钳位电压设置界面设置钳位电压遵循以下规则：

- ① 使用 **ENTER** 键确认电压设置值前，钳位电压维持不变，设置过程中对各设置位的操作不影响当前钳位电压。
- 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 105.0V 时，电压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 后电压设置值为 0V。

钳位电压设置值高于当前钳位电压，且 F2002 处于电压钳位状态时，钳位电压线性递增至设置值。其余情形下，钳位电压立即生效。

设置钳位电压也可通过计算机接口命令 **CMPL** 实现，或通过查询 **CMPL?** 查询当前钳位电压，请参阅第 4 章中的相关内容。

图 3-10 状态切换临界过程（电流极性为正）



3.5.3 状态切换临界过程

$I_{OUT}R_{LOAD}$ 达到或超过 V_{CMPL} 时, F2002 自动由恒流状态切换至电压钳位状态。 $I_{OUT}R_{LOAD}$ 再次低于 V_{CMPL} 时, F2002 自动恢复为恒流状态。 $I_{OUT}R_{LOAD}$ 与 V_{CMPL} 十分接近时, F2002 可能短暂呈现由恒流状态和恒压状态共同控制的临界过程, 如图 3-10 所示。

处于恒流状态时, 随输出电流增大, $I_{OUT}R_{LOAD}$ 增大至略高于 V_{CMPL} 的电压 $V_{CMPL} + \Delta V_{I \rightarrow V}$ 时, F2002 进入电压钳位状态。

反之, 处于电压钳位状态时, 随输出电流减小, $I_{OUT}R_{LOAD}$ 降低至略低于 V_{CMPL} 的电压 $V_{CMPL} - \Delta V_{V \rightarrow I}$ 时, F2002 进入恒流状态。

电流设置步进足够细致, 即电流变化足够慢时, $\Delta V_{I \rightarrow V}$ 和 $\Delta V_{V \rightarrow I}$ 典型值约为 30mV, 最大值不大于 100mV。IME 模式下, 大幅度步进可能导致 $\Delta V_{I \rightarrow V}$ 和 $\Delta V_{V \rightarrow I}$ 显著增大, 并形成电流/电压过冲。

3.6 输出电流准确度

3.6.1 额定准确度

F2002 的输出电流准确度使用固定误差表示法。

恒流状态下, 电流输出额定准确度为 $\pm (0.015\% \text{设置值} + 1\mu\text{A})$ 。

3.6.2 计算误差电流

恒流状态下, 输出电流为 I_{OUT} 时的最大输出误差为 $I_{ERROR} = \pm (0.015\% I_{OUT} + 1\mu\text{A})$ 。典型输出电流下的最大误差和典型实测误差参考值如表 3-1 所示:

表 3-1 典型输出电流下的最大误差和典型实测误差 (15—35°C)

TAB-MAN-F2002-0004

输出电流 I_{OUT}	最大误差电流 I_{ERROR}	绝对百分比最大误差 $I_{ERROR}/100\%$	典型实测误差参考值 $I_{ERROR}/100\%$
100mA	$\pm 16\mu\text{A}$	$\pm 0.016\%$	$\pm 0.006\%$
50mA	$\pm 8.5\mu\text{A}$	$\pm 0.017\%$	$\pm 0.008\%$
20mA	$\pm 4\mu\text{A}$	$\pm 0.02\%$	$\pm 0.01\%$
10mA	$\pm 2.5\mu\text{A}$	$\pm 0.025\%$	$\pm 0.01\%$
5mA	$\pm 1.75\mu\text{A}$	$\pm 0.035\%$	$\pm 0.015\%$
1mA	$\pm 1.15\mu\text{A}$	$\pm 0.115\%$	$\pm 0.02\%$
500 μA	$\pm 1.075\mu\text{A}$	$\pm 0.215\%$	$\pm 0.03\%$
200 μA	$\pm 1.03\mu\text{A}$	$\pm 0.515\%$	$\pm 0.05\%$
100 μA	$\pm 1.015\mu\text{A}$	$\pm 1.015\%$	$\pm 0.05\%$
50 μA	$\pm 1.0075\mu\text{A}$	$\pm 2.015\%$	$\pm 0.1\%$
20 μA	$\pm 1.003\mu\text{A}$	$\pm 5.015\%$	$\pm 0.5\%$
10 μA	$\pm 1.0015\mu\text{A}$	$\pm 10.015\%$	$\pm 1\%$
5 μA	$\pm 1.00075\mu\text{A}$	$\pm 20.015\%$	$\pm 10\%$
2 μA	$\pm 1.0003\mu\text{A}$	$\pm 50.017\%$	$\pm 15\%$
1 μA	$\pm 1.00015\mu\text{A}$	$\pm 100.015\%$	$\pm 20\%$

3.6.3 输出电流稳定性

15—35°C 环境温度范围内, F2002 的输出电流平均温度系数为 $\pm 5\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 。

为保证输出电流高度稳定, 请勿于环境温度剧烈变化的环境内使用。15—35°C 环境温度恒定时, F2002 的长期稳定度为 20ppm/h。

3.7 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 3-11 所示。

在一定的误差容许范围内，输出阻抗 R_{OUT} 决定负载直流电阻 R_{LOAD} 的最大值。常规模式下且不连接电压表时，常规补偿模式下，F2002 具有大于 $500M\Omega$ 的额定输出阻抗，低噪声补偿模式下输出阻抗大于 $200M\Omega$ 。在不同的误差容许范围内，允许的负载直流电阻范围如表 3-2 所示。

输出端并联具有显著漏电流的电解电容将导致 R_{OUT} 显著降低， $100\mu F/250V$ 的铝电解电容将使 R_{OUT} 降低至 $50M\Omega$ 以下。

图 3-11 有限输出阻抗 R_{OUT} 造成的分流误差

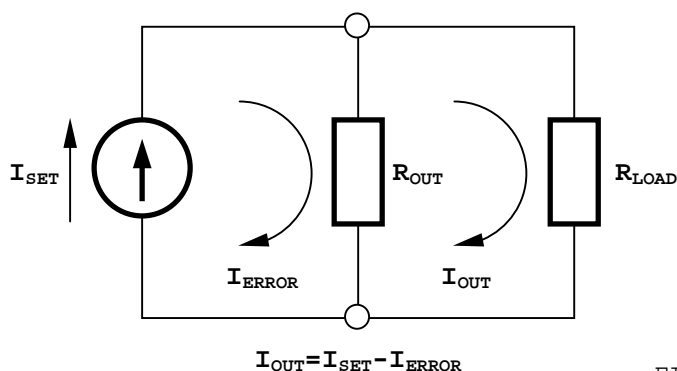


FIG-MAN-F2002-0029

表 3-2 不同误差容许范围内的负载直流电阻范围

TAB-MAN-F2002-0005

电流误差容许范围	最大允许分流误差	最大负载直流电阻	
		常规/电容负载保护 $R_{OUT} > 500M\Omega$	低噪声模式 $R_{OUT} > 200M\Omega$
$\pm 0.016\%$	0.001%	$5k\Omega$	$2k\Omega$
$\pm 0.02\%$	0.005%	$25k\Omega$	$10k\Omega$
$\pm 0.05\%$	0.035%	$175k\Omega$	$70k\Omega$
$\pm 0.1\%$	0.085%	$425k\Omega$	$170k\Omega$
$\pm 0.5\%$	0.485%	$2.425M\Omega$	$970k\Omega$
$\pm 1\%$	0.985%	$4.925M\Omega$	$1.97M\Omega$

3.8 设置输出端状态

3.8.1 输出端状态和开机更换负载

F2002 提供正常输出状态和高阻状态 2 种输出端状态。

正常输出状态下，F2002 输出设定电流 I_{OUT} ，或在进入电压钳位状态后输出钳位电压 V_{CMPL} 。正常输出时更换负载，输出端可能开路并使 F2002 进入电压钳位状态，恒压输出 V_{CMPL} 。再次连接负载时， V_{CMPL} 将瞬间施加于负载两端，并在负载内部产生瞬间大电流，直至 F2002 再次进入恒流状态并将输出电流调整至设定值。如果 V_{CMPL} 高于负载的额定耐压，或者瞬间大电流超出负载的耐流极限，尤其对于耐压/耐流容限较低的激光二极管 LD 和发光二极管 LED，则可能造成负载瞬间损伤或损毁。

高阻状态下，F2002 的输出端对负载呈现高阻抗，任何负载条件下，包括输出端开路，输出电压和电流均为 0。高阻状态下允许开机更换负载。F2002 开机后，输出端自动设置为高阻状态。高阻状态下，F2002 的输出漏电流小于 20nA。

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

正常输出状态下开机更换负载将可能造成负载损伤或损毁。开机更换负载前，请首先使 F2002 输出端处于高阻状态。

3.8.2 切换输出端状态

标准显示界面下，使用 **OUTPUT** 键使 F2002 的输出端状态在正常输出和高阻状态之间切换。正常输出时，前面板左侧 LED 指示器中的“OUTPUT”LED 点亮，高阻状态下，此 LED 熄灭。如图 3-12 所示。设置输出端状态也可通过计算机接口命令 **OUT** 达成，并通过查询 **OUT?** 查询当前输出端状态，请参阅第 4 章中的相关内容。

图 3-12 使用 **Out** 键切换输出端状态

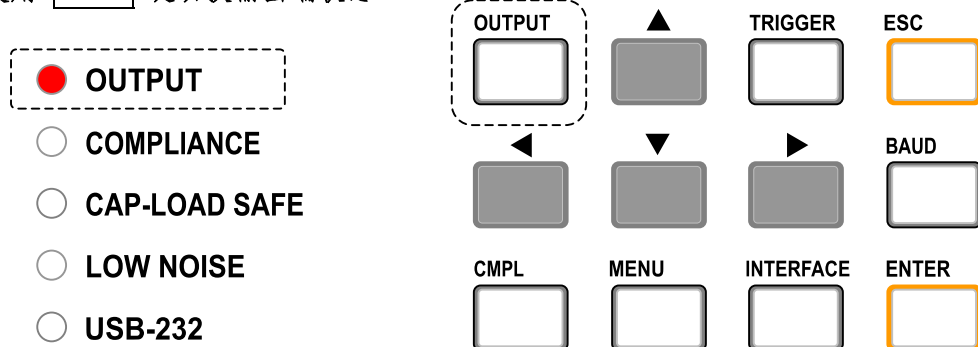


FIG-MAN-F2002-0030

3.9 输出补偿网络和负载保护

3.9.1 输出补偿网络

相对于电压源，电流源更易不稳定，尤其面临电感性负载时，电流源可能产生显著振荡。通常使用输出补偿网络确保电流源输出稳定。

F2002 提供 3 种可选的输出补偿网络：常规补偿模式(Normal)、电容负载保护(C Load Safe)模式和低噪声(Low Noise)模式。

前 2 种模式在正常输出状态下具有相同的补偿参数，适用于 10mH 以下的电感性负载，具有良好的输出动态响应速率，并提供大于 500MΩ 输出阻抗。其中电容负载保护模式适用于电容性负载，详细内容请参阅 3.9.2。

低噪声模式下 F2002 通过内部并联于输出端的 10μF 电容提供深度补偿，适用于强电感性负载，并提供输出电流噪声滤波功能，但输出动态响应速率相应降低。使用低噪声模式将降低输出阻抗至 200MΩ。低噪声模式适用于电容性负载，详细内容请参阅 3.9.2。F2002 关机或切换至前 2 种补偿网络后，并联于输出端的 10μF 电容与输出端断开连结，并自动切换至内部放电电路。

请遵循以下步骤设置输出补偿网络，如图 3-13 所示：

- ① 标准显示界面下，使用 **MENU** 键进入菜单，按 **▲**、**▼** 方向键选择“Output Network”，按 **Ent** 键进入输出补偿网络设置界面；
- ② 按 **▲**、**▼** 方向键循环显示 3 种补偿网络；
- ③ 按 **ENTER** 键确认选择；或 ④ 按 **ESC** 键保留原补偿网络并返回标准显示界面。

选择电容负载保护模式时，前面板左侧 LED 指示器中的“Cap-Load Safe”LED 点亮。低噪声模式下，“Cap-Load Safe”和“Low Noise”LED 均点亮。

注

输出补偿模式将保存于 F2002 内部非易失性存储器中，并于下次开机后保持。

输出端处于正常输出状态下，切换输出补偿网络时，F2002 首先将输出端设置为高阻状态，而后切换补偿网络，经过必要的切换稳定时间后，F2002 重新将输出端恢复为正常输出状态。切换过程中 F2002 不响应由键盘或计算机接口进行的操作。

输出端处于高阻状态下，F2002 直接切换输出补偿网络。

输出补偿网络可通过计算机接口命令 **NETWORK** 设置，并可通过查询 **NETWORK?** 查询当前补偿网络类型，请参阅第 4 章中的相关内容。

图 3-13 设置输出补偿网络

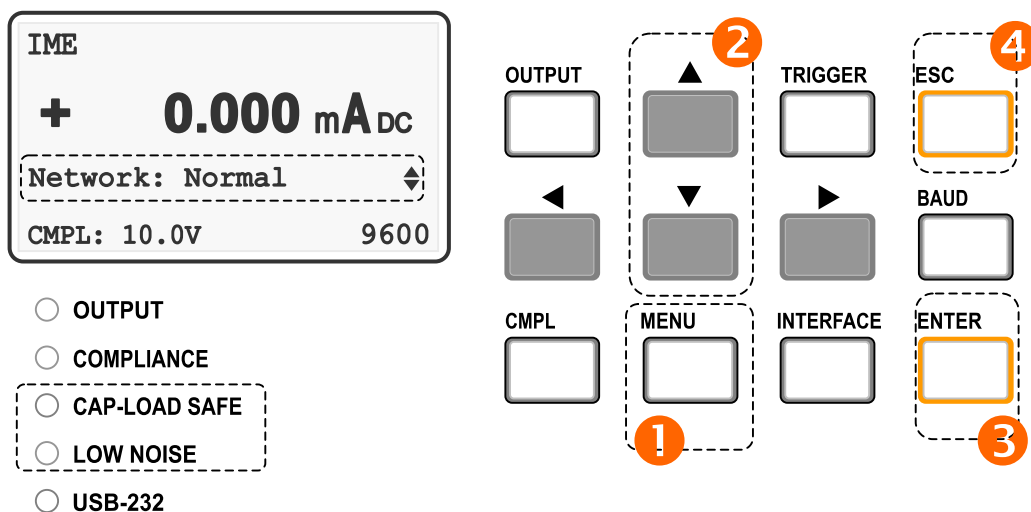


FIG-MAN-F2002-0031

3.9.2 负载保护和低导通电阻开关 LORS

电源上电时内部电路状态的不确定性可能造成输出端产生冲击电流或电压。F2002 在输出端设置具有状态保持功能的低导通电阻开关 LORS，LORS 在关机时处于导通状态，并具有低于 100mΩ 的导通电阻。开机瞬间，F2002 自动设置输出端为高阻状态，并保持 LORS 导通，从而短路上电造成的输出端冲击，保护负载上电安全，如图 3-14 所示。

F2002 关机或处于高阻状态时，如果负载连接至输出端，由于输出端无法提供泄放回路，负载可能受到静电损伤。F2002 配置的 LORS 在关机和高阻状态下始终保持导通，提供必要的静电泄放通道，为负载提供静电保护，如图 3-15 所示。

图 3-14 LORS 保护负载上电安全

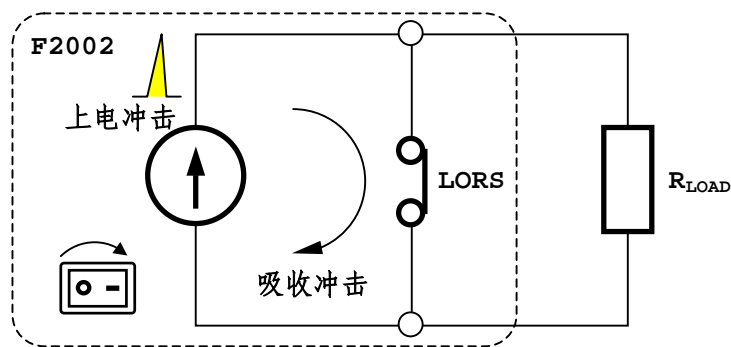


FIG-MAN-F2002-0032

图 3-15 LORS 提供静电保护

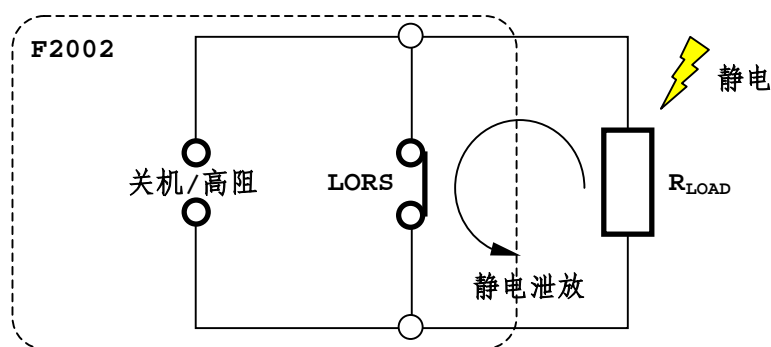


FIG-MAN-F2002-0033

3.9.3 电容负载保护

面对电容性负载，F2002 在关机或进入高阻状态时，LORS 将对电容性负载放电。如果负载电容量较大，将在 LORS 导通瞬间产生大电流，并可能造成 LORS 开关损伤。F2002 提供电容负载保护模式，对电容性负载放电时在为 LORS 串联 100Ω 保护电阻以显著降低放电电流。如图 3-16 所示。电容负载保护模式以及低噪声模式均提供电容负载保护。

图 3-16 电容负载保护

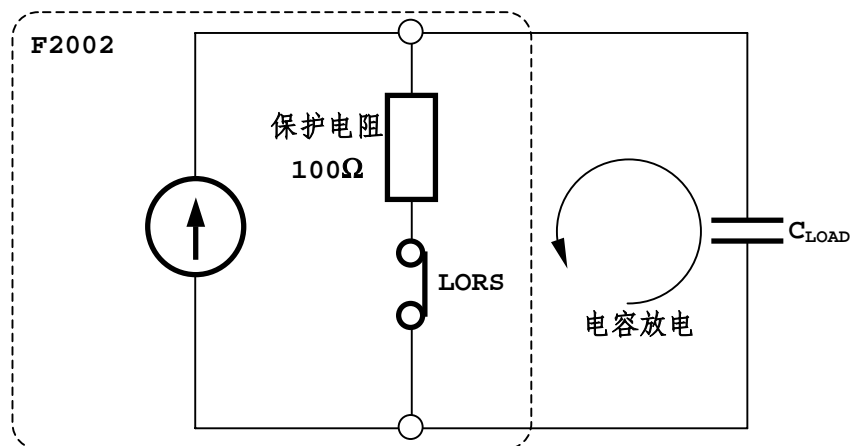


FIG-MAN-F2002-0034

3.10 噪声性能

常规补偿模式下，F2002 具有低噪声特性。恒流状态下输出电流为 100mA 时，输出纹波/噪声的 RMS 值约为 4 μ A，p-p 值约为 25 μ A。低噪声模式下，F2002 提供更高的输出噪声，恒流状态下输出电流为 100mA 时，输出纹波/噪声的 RMS 值约为 1 μ A，p-p 值约为 6 μ A。

输出端并联 10 μ F 以上的电容可进一步降低输出噪声，并抑制可能的空间噪声。输出端并联电容时必须使用电容负载保护模式或低噪声模式，以确保 F2002 内部 LORS 开关的安全。并联电容时请务必确保电容具有足够的耐压，并尽量使用漏电流较小的无极性电容，例如金属化薄膜电容，而非漏电明显的无极性铝电解电容，以尽量避免电容漏电造成的分流误差。为获得尽量高的输出阻抗，对于相同的容量，请优先选择耐压更高的电容型号。

由于输出电流极性决定输出端电压的极性，因此请尽量避免使用包括铝电解电容和钽电解电容在内的有极性电容。

使用示波器可观察输出噪声电压 V_{NOISE} ，其与负载直流电阻 R_{LOAD} 的比值即为噪声电流 I_{NOISE} 。观察和测量输出噪声时，示波器探头不可形成地线环，否则示波器将显示幅度很高的空间感应噪声，并将 F2002 的噪声完全淹没。

3.11 振荡检测和处理

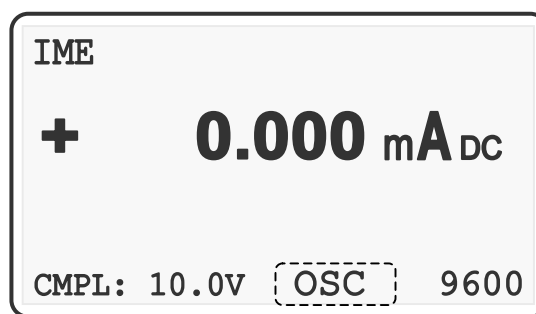
常规补偿（Normal）和电容负载保护（C-Load Safe）模式具有适中的频率稳定性和输出响应速率，然而面对强电感性或负阻性负载时仍有可能产生振荡。输出振荡的幅度和频率与负载频率响应有关，微弱的振荡可能呈现直流电流上叠加的幅度很低的正弦波，强烈的振荡则体现为规则或不规则的大幅度周期波形。

警告

微弱输出振荡将提高输出噪声水平并造成输出电流准确度降低，以及造成其他以 F2002 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损毁。

F2002 内部集成振荡检测电路，可检测微弱的振荡。输出振荡时，F2002 于前面板显示器下方闪烁显示“OSC”，并发出连续短声讯报警。如图 3-17 所示。

图 3-17 振荡检测



闪烁显示

FIG-MAN-F2002-0035

输出振荡时，请首先按 **OUTPUT** 键使输出端切换至高阻状态，避免振荡损毁负载和 F2002 内部电路。而后将输出补偿网络切换至低噪声模式，并再次按 **OUTPUT** 键切换输出端为正常输出模式。通常低噪声模式可避免大多数振荡。输出振荡状态可通过计算机接口查询 **OSC?** 获取，请参阅第 4 章中的相关内容。

3.12 输出响应模式和避免过冲

3.12.1 IME 和 ATS 输出响应模式

F2002 提供 IME 和 ATS 两种输出响应模式。

IME 模式下，F2002 提供标准阶跃响应，设置电流后输出电流由当前值阶跃变化至设置值。

ATS 模式为防冲击模式，正向输出电流下，设置电流大于当前电流时，输出电流以一定速率由当前值线性递增至设置值，设置电流小于当前电流时，输出电流立即由当前值阶跃降低至设置值。如图 3-18 所示。

图 3-18 IME 和 ATS 输出响应模式（电流极性为正）

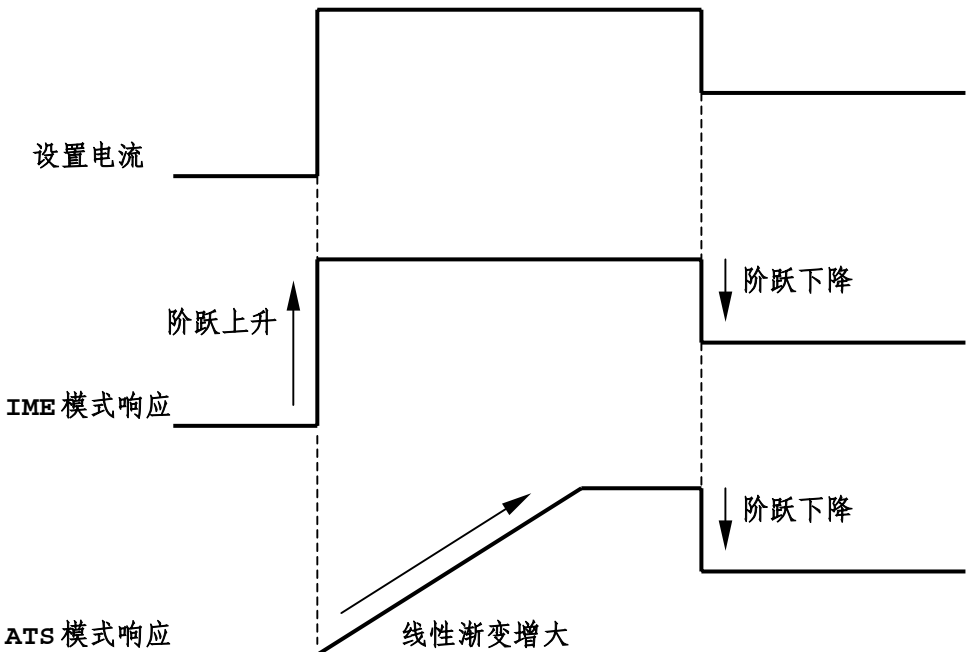


FIG-MAN-F2002-0036

反向输出电流下，阶跃上升定义为设置电流绝对值大于当前电流绝对值，阶跃下降定义为设置电流绝对值小于当前电流绝对值。电流设置涉及电流极性变化时，输出电流首先下降为 0，反向后由 0 起执行设定的 IME 或 ATS 模式响应。

请遵循以下步骤设置输出响应模式，如图 3-19 所示：

图 3-19 设置输出输出响应模式

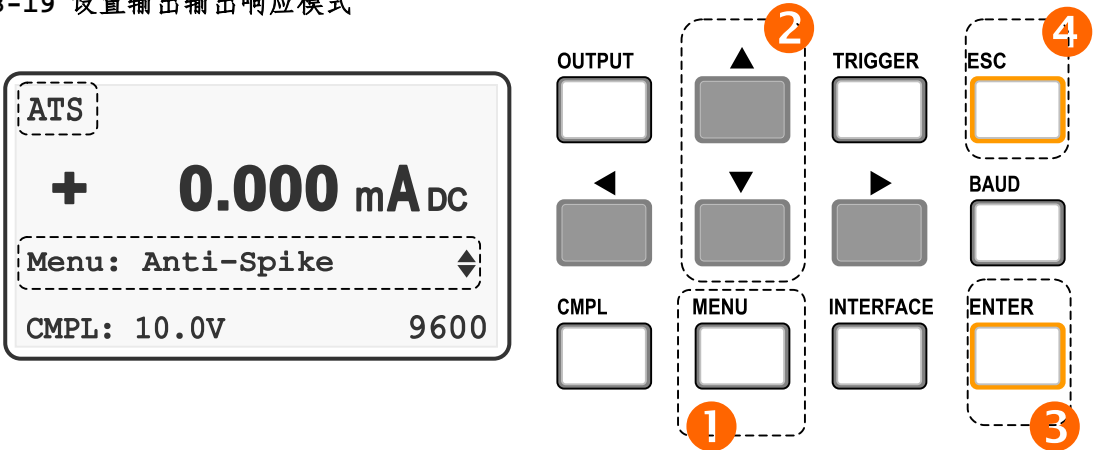


FIG-MAN-F2002-0037

- ① 标准显示界面下, 使用 **MENU** 键进入菜单, 按 **▲**、**▼** 方向键选择“Anti-Spike”, 按 **Ent** 键进入输出响应模式设置界面;
 - ② 按 **▲**、**▼** 方向键循环显示 “IME” 和 “ATS” 模式;
 - ③ 按 **ENTER** 键确认选择; 或 ④ 按 **ESC** 键保留原输出响应模式并返回标准显示界面。
- 设置输出响应模式后, 前面板显示器左上方对应显示 “IME” 或 “ATS”。

注

输出响应模式将保存于 F2002 内部非易失性存储器中, 并于下次开机后保持。

设置输出响应模式也可通过计算机接口命令 **ATS** 达成, 并通过接口查询 **ATS?** 查询当前输出响应模式, 请参阅第 4 章中的相关内容。

3.12.2 恒流状态下的电流过冲

纯电阻性负载下, F2002 处于恒流状态, 即输出电压绝对值 $|I_{OUT}R_{LOAD}|$ 小于 V_{CMPL} 时, IME 模式下的电流上升沿和下降沿阶跃响应均稍有迟滞, 无电流过冲。

电容性负载下, F2002 处于恒流状态, IME 模式下的电流上升沿和下降沿阶跃响应均呈现明显迟滞, 无电流过冲, 迟滞时间与电容量有关。

图 3-20 恒流状态下的输出响应（电流极性为正）

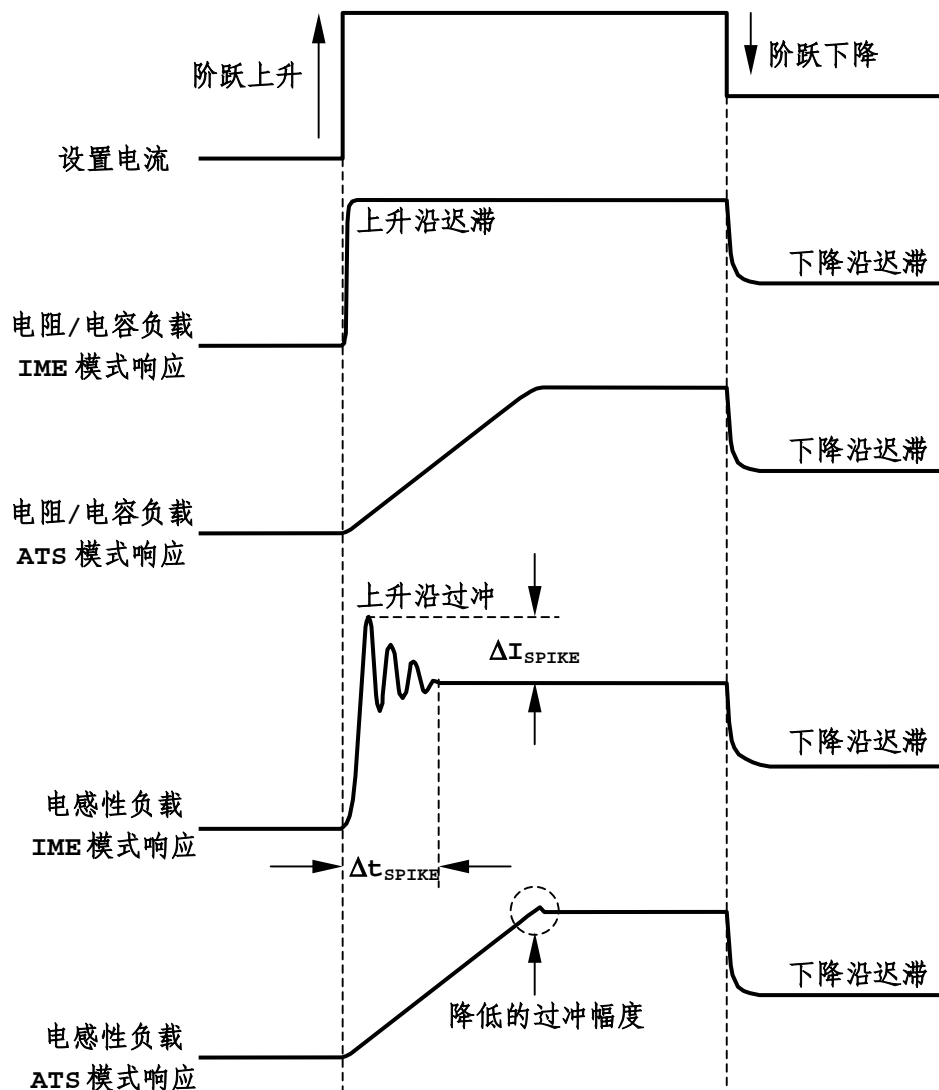


FIG-MAN-F2002-0038

电感性负载下，F2002 处于恒流状态，IME 模式下上升沿阶跃响应可能产生电流过冲，过冲幅度 ΔI_{SPIKE} 和过冲时间 Δt_{SPIKE} 与阶跃高度和负载电感量有关，下降沿阶跃响应可能产生迟滞。如图 3-20 所示。

ATS 模式将上升沿阶跃转化为线性渐变递增，可有效降低过冲幅度，下降沿阶跃响应与 IME 模式相同。驱动强电感性负载时，请使用过冲幅度较小的 ATS 模式。

3.12.3 进入电压钳位状态时的输出响应

电流设置值 I_{OUT} 与负载直流电阻 R_{LOAD} 乘积的绝对值 $|I_{\text{OUT}}R_{\text{LOAD}}|$ 达到或超过 V_{CMPL} 时，F2002 由恒流状态进入电压钳位状态。

IME 模式下， $|I_{\text{OUT}}R_{\text{LOAD}}|$ 明显超出 V_{CMPL} 时，可能首先出现输出电流过冲，而后 F2002 进入电压钳位状态，并将输出电压调整为 V_{CMPL} 或 $-V_{\text{CMPL}}$ ，如图 3-21 所示。为避免此电流过冲，请使用尽量小的电流设置步进。

图 3-21 进入电压钳位状态时的输出响应（电流极性为正）

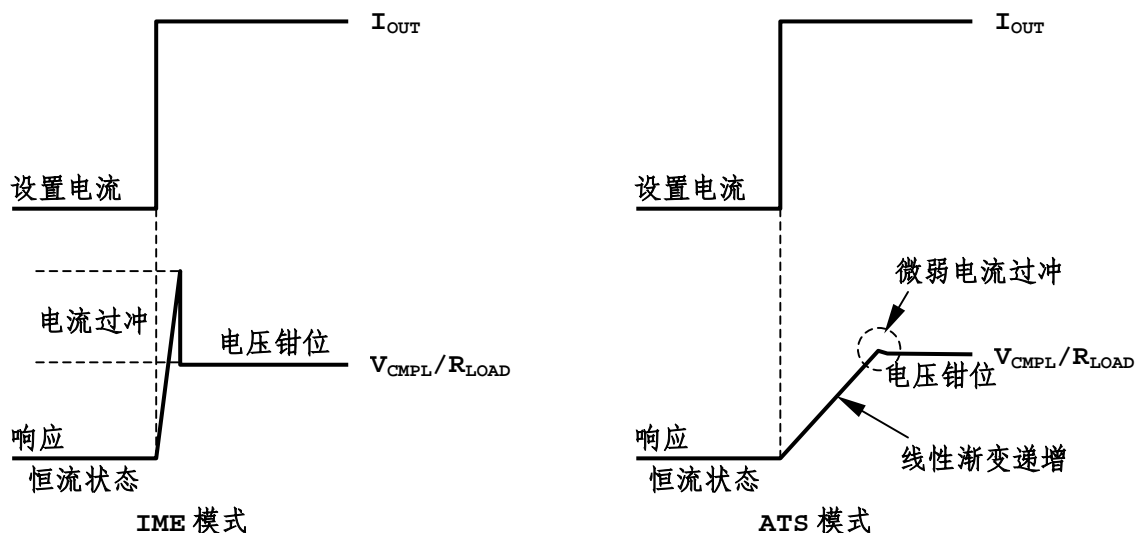


FIG-MAN-F2002-0039

图 3-22 电感性负载电流过冲导致短暂进入电压钳位状态（电流极性为正）

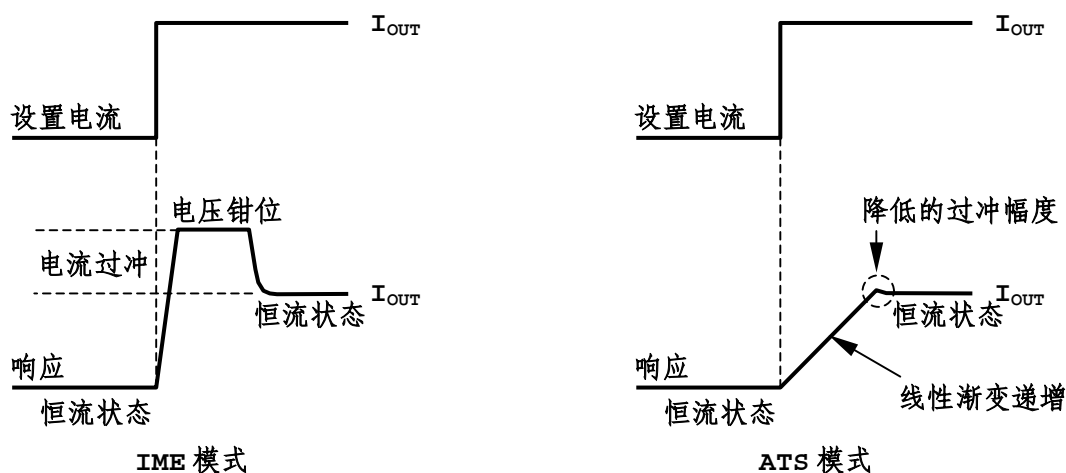


FIG-MAN-F2002-0040

此外, IME 模式下, 上升沿阶跃面对电感性负载时, 即使 $|I_{OUT}R_{LOAD}|$ 未达到 V_{CMPL} , 明显的电流过冲也可能由于 $|I_{OUT}R_{LOAD}|$ 过于接近 V_{CMPL} 使 F2002 短暂进入电压钳位状态, 电流进入稳态后, F2002 恢复至恒流状态, 如图 3-22 所示。

ATS 模式下, 由于上升沿阶跃转化为线性渐变递增, 等效于使用足够小的电流步进, 可明显避免由于 $|I_{OUT}R_{LOAD}|$ 明显超出 V_{CMPL} 造成的电流过冲。对于电感性负载, 由于 ATS 模式使过冲电流显著降低而可有效避免短暂进入电压钳位状态的现象。

对于对电流过冲敏感的负载, 请优先使用 ATS 模式。

3.12.4 输出端状态切换时的输出响应

输出端由正常输出状态切换至高阻状态时, 由于 LORS 的作用, 输出电压和电流立即归零。

由高阻状态切换至正常输出状态时, 无论当前为 IME 或 ATS 模式, F2002 均采用输出电流渐进方式以避免可能的电流或电压过冲, 如图 3-23 所示。

开始切换后, F2002 内部将输出端设置为正常输出状态, 约 300ms 后断开 LORS, 再经过 700ms 延时后, F2002 使输出电流由 0 向设置电流值线性渐进。

$|I_{OUT}R_{LOAD}| > V_{CMPL}$ 时, F2002 最终处于电压钳位状态(恒压状态), 因此电流渐进过程中 F2002 由恒流状态自动切换至电压钳位状态, 并可能产生微小电流过冲。

由开始切换时刻至输出电流达到额定准确度的时间通常不大于 4s。

$|I_{OUT}R_{LOAD}| < V_{CMPL}$ 时, F2002 最终处于恒流状态, F2002 完成完整的输出电流渐进过程。

图 3-23 由高阻状态进入正常输出状态时的输出响应

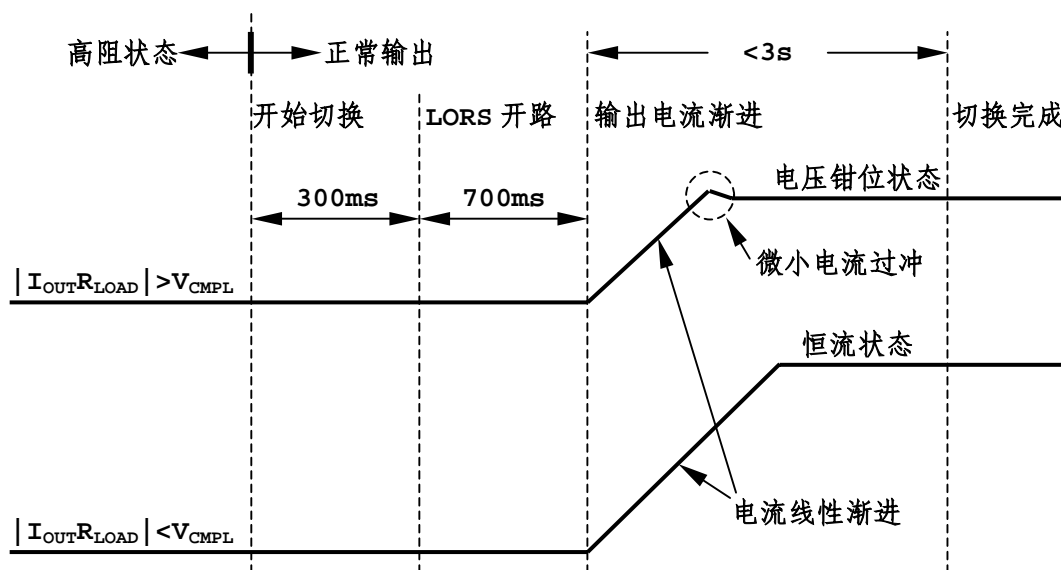


FIG-MAN-F2002-0041

3.12.5 避免过冲的方法

警告

虽然 F2002 输出端的电流和电压过冲产生的能量不致造成负载的过热损毁。然而, 对于对过电压和过电流敏感的负载仍可能造成不可预期的损伤。

请遵循以下方法尽量减小和避免电压/电流过冲:

- ① 任何情况下, 尤其对于易由于过冲损伤或损毁的负载, 请优先选择 ATS 输出响应模式。
- ② 任何情况下, 优先使用低噪声模式 (Low Noise)。
- ③ 任何情况下, 更换负载前首先使用 **OUTPUT** 键将 F2002 输出端切换至高阻状态。

- ④ IME 模式下，无法预知设置电流对应的输出电压时，首先使用 **OUTPUT** 键将 F2002 输出端切换至高阻状态，而后设置电流，并再次使用 **OUTPUT** 键将 F2002 输出端切换至正常输出状态。
- ⑤ IME 模式下，在保证负载安全的前提下，将钳位电压设置为总高于可预期输出电压 2V 以上，以避免 F2002 在恒流状态和电压钳位状态之间的频繁切换。
- ⑥ IME 模式下，使用尽量小的电流步进，从而尽量减小直至避免图 3-17 所示电流过冲。
- ⑦ IME 模式下，尽量降低负载的电感性。在输出响应时间允许且输出电压不大于 105V 的前提下，为电感性负载串联足够大的电阻，以减小图 3-16 和图 3-18 所示过冲。
- ⑧ 为最大程度避免过冲，以上针对 IME 模式的建议对于 ATS 模式同样可行。
- ⑨ 为最大程度避免过冲，在输出响应时间允许的前提下，可在输出端两端追加并联具有足够耐压、容量大于 $10\mu\text{F}$ 的无极性电容，并同时使用低噪声补偿网络。

警告

为保证 F2002 内部 LORS 的安全，追加并联电容时必须使用电容负载保护模式或低噪声模式，且追加并联电容的总电容量应小于 $50\mu\text{F}$ 。

注

为保证足够高的输出阻抗和额定准确度，请使用耐压尽量高的电容型号，并尽量避免使用漏电显著的电解电容。

3.13 测量输出电压

3.13.1 四线式测量

常见的电阻测量使用二线式连接方式，如图 3-24 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。

图 3-24 二线式连接方式造成的测量误差

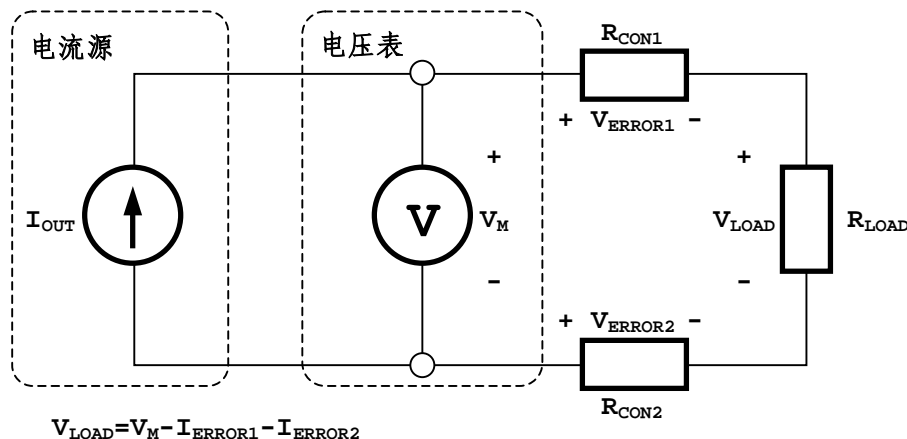
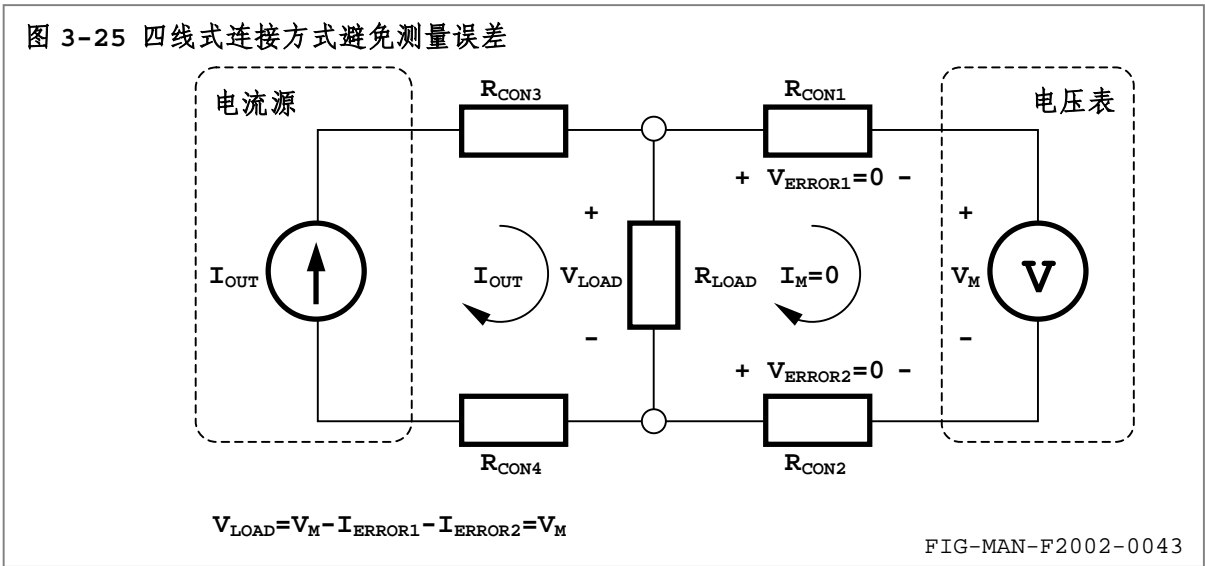


FIG-MAN-F2002-0042

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} 可比并造成不可忽略的电压测量误差。例如 $R_{\text{LOAD}}=10\Omega$ 、 $I_{\text{OUT}}=100\text{mA}$ 时， $V_{\text{LOAD}}=1\text{V}$ ，测量导线总电阻 $R_{\text{CON1}}+R_{\text{CON2}}=100\text{m}\Omega$ 时误差电压为 10mV ，造成的测量误差为 1%。

为避免测量导线造成的测量误差，精密电阻测量常使用四线式连接方式。如图 3-25 所示。

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。例如量程大于 10V 的电压表内阻为 $10\text{M}\Omega$ 、 $V_{\text{LOAD}}=100\text{V}$ 时 $I_M=10\mu\text{A}$ ，即使总导线电阻 $R_{\text{CON1}}+R_{\text{CON2}}$ 达到 100Ω ，误差电压为 1mV ，造成的测量误差也仅为 10ppm 。



3.13.2 高精度电压测量

对于高精度的电压测量，需要测量幅度小于 1V 的低电压，并需要更高的测量分辨率。此时可使用高分辨率台式万用表，例如 5 ½ 位或 6 ½ 位的型号。这些型号的直流电压档可提供高达 1μV 或 0.1μV 的高分辨率，适于测量低电压，并在测量中提供更高的准确度。

常见的高分辨率台式万用表直流电压档通常具有 1000V、100V、10V、1V 和 100mV 量程，各量程下的分辨率和输入阻抗如表 3-3 所示。

表 3-3 台式万用表直流电压档各量程分辨率和输入阻抗

TAB-MAN-F2002-0006

量程	分辨率		输入阻抗
	5 ½ 位	6 ½ 位	
1000V	10mV	1mV	10MΩ±1%
100V	1mV	100μV	
10V	100μV	10μV	>10GΩ
1V	10μV	1μV	
100mV	1μV	0.1μV	

10V、1V 和 100mV 量程下，万用表直流电压档输入阻抗高于 10GΩ，对于输出电流的分流误差可以忽略。1000V 和 100V 量程下，输入阻抗为 10MΩ，负载直流电阻较大时将造成明显的分流误差。表 3-4 所示为 1000V 和 100V 量程下，万用表直流电压档在不同电流误差容许范围内对应的最大负载直流电阻。

表 3-4 台式万用表直流电压档 1000V/100V 量程下最大负载直流电阻

TAB-MAN-F2002-0007

电流误差容许范围	最大允许分流误差	最大负载直流电阻 (R _{IN} =10MΩ)
±0.016%	0.001%	100Ω
±0.02%	0.005%	500Ω
±0.05%	0.035%	3.5kΩ
±0.1%	0.085%	8.5kΩ
±0.5%	0.485%	48.5kΩ
±1%	0.985%	78.5kΩ

使用台式万用表精确测量电压，尤其于较大电流下测量时，请使用可避免测量导线电阻误差的四线式连接方法。

不推荐使用手持数字或指针万用表进行电流激励下的精密电压测量。手持数字万用表直流电压档的各量程输入阻抗均为 $10\text{M}\Omega$ ，指针表输入阻抗多数为 $1\text{M}\Omega$ ，均将对最大负载直流电阻造成较大的限制，或于负载直流电阻较大时造成显著的电压测量误差。

3.14 触发输出

触发连接是一种高速触发总线，为 F2002 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。

F2002 可为具备外部触发输入功能的测量仪器提供触发输出信号，并提供 3 种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 F2002 还提供触发输出声响提示功能用于监视仪器运行状态。

TRIGGER 键用于开启和设置触发输出方式，并在开启触发输出后设置触发延迟时间和声响提示。设置步骤如下，如图 3-26 所示：

- ❶ 标准显示界面下，按 **TRIGGER** 键进入触发方式设置界面；
- ❷ 按 **▲**、**▼** 方向键循环显示 “Off”（关闭触发输出）和 “On”（触发输出）；
- ❸ 按 **ENTER** 键确认选择；或 ❹ 按 **ESC** 键保留原触发方式并返回标准显示界面。

图 3-26 设置触发方式

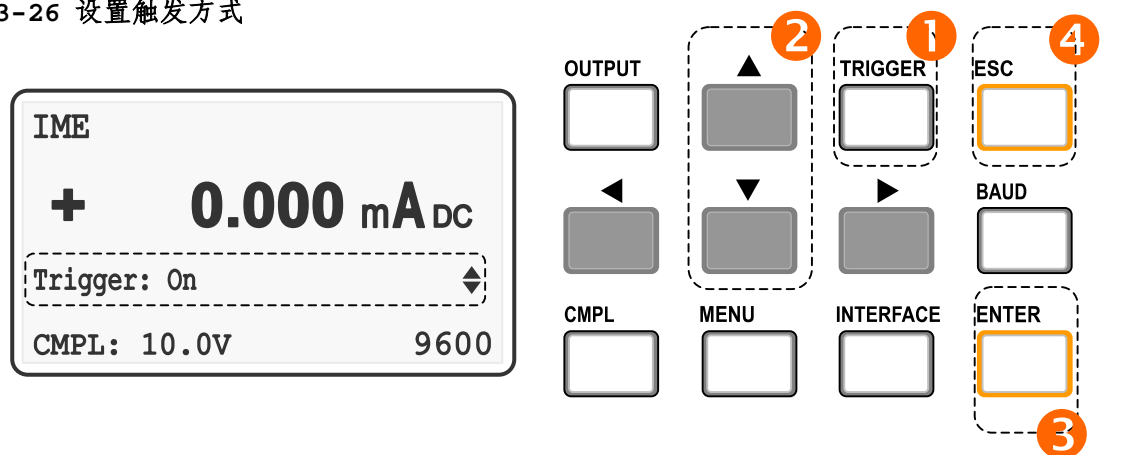


FIG-MAN-F2002-0044

选择 “Off” 时，触发状态指示区无显示，F2002 不输出触发信号。

选择 “On” 时，触发状态指示区显示触发标志，并进入图 3-27 所示触发延迟设置界面，并遵循如下步骤设置触发延迟时间和触发声响提示：

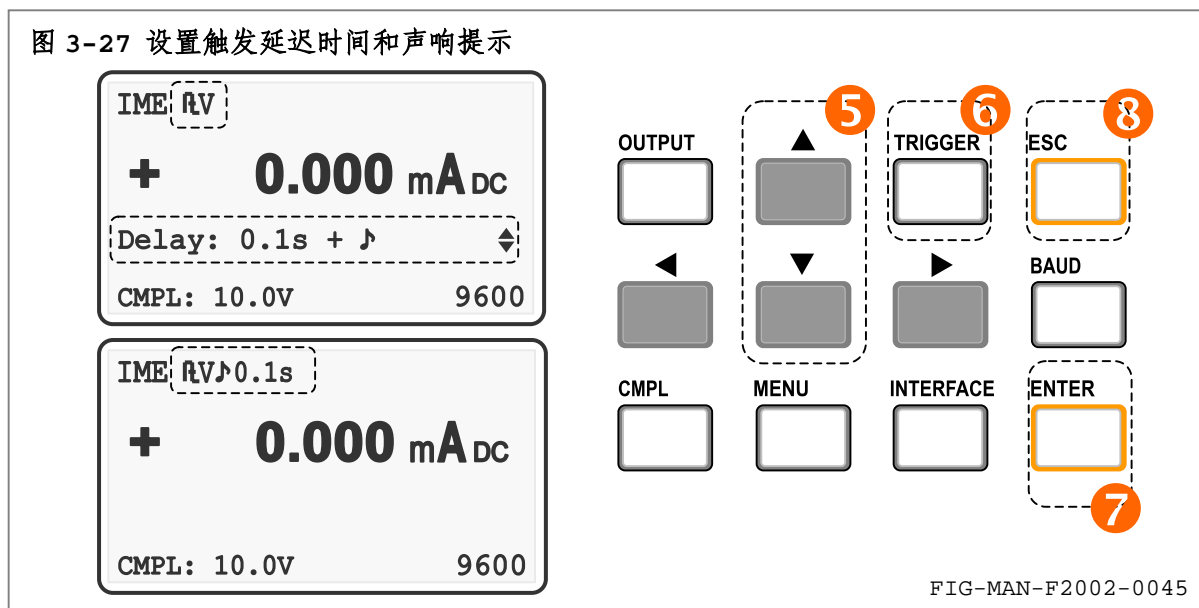
- ❺ 按 **▲**、**▼** 方向键在 0—9.9s 范围内增大或减小触发延迟时间，调整步进为 0.1s；
- ❻ 按 **TRIGGER** 键选择是否于外部触发方式下使用声响提示，并于延迟时间前以 **♪** 标识；
- ❼ 按 **ENTER** 键确认选择；或
- ❽ 按 **ESC** 键保留原触发延迟时间并返回标准显示界面。

注

触发输出方式、延迟时间和声响提示状态保存于 F2002 内部非易失性存储器内，并于下次开机时保持。

设置触发方式也可通过计算机接口命令 **TRIG** 达成，并通过查询 **TRIG?** 查询当前触发方式。命令 **TRIGD** 和查询 **TRIGD?** 分别用于设置和查询触发延迟时间。命令 **TRIGA** 和查询 **TRIGA?** 分别用于设置和查询触发声响提示状态，请参阅第 4 章中的相关内容。

图 3-27 设置触发延迟时间和声响提示



3.14.1 触发方式 On

选择触发方式为“On”时，F2002 在电流设置完成并生效后，经过设定的触发延迟时间后于后面板触发输出端口输出下降沿有效的触发信号。

输出端处于正常输出状态下，微调电流、进入电流设置界面或者通过计算机接口命令 **CUR**、**CURFUP** 和 **CURFDOWN** 设置电流，F2002 均输出触发信号。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** 的参数相同，F2002 同样输出触发信号。此外，输出状态由高阻状态切换至正常输出后也使 F2002 输出触发信号。

触发方式为“On”时的输出时序如图 3-28 所示。

注

触发延迟时间内设置电流并生效后，本次触发输出失效，并由电流设置生效时刻起再次经过触发延迟时间后输出触发信号。

3.14.2 触发输出端口

F2002 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 1ms。

触发输出端口输出阻抗为 1kΩ。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不小于 10kΩ，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 -15V—+15V。

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—+15V 范围之内。

图 3-28 触发方式为“On”时的触发输出时序（电流极性为正）

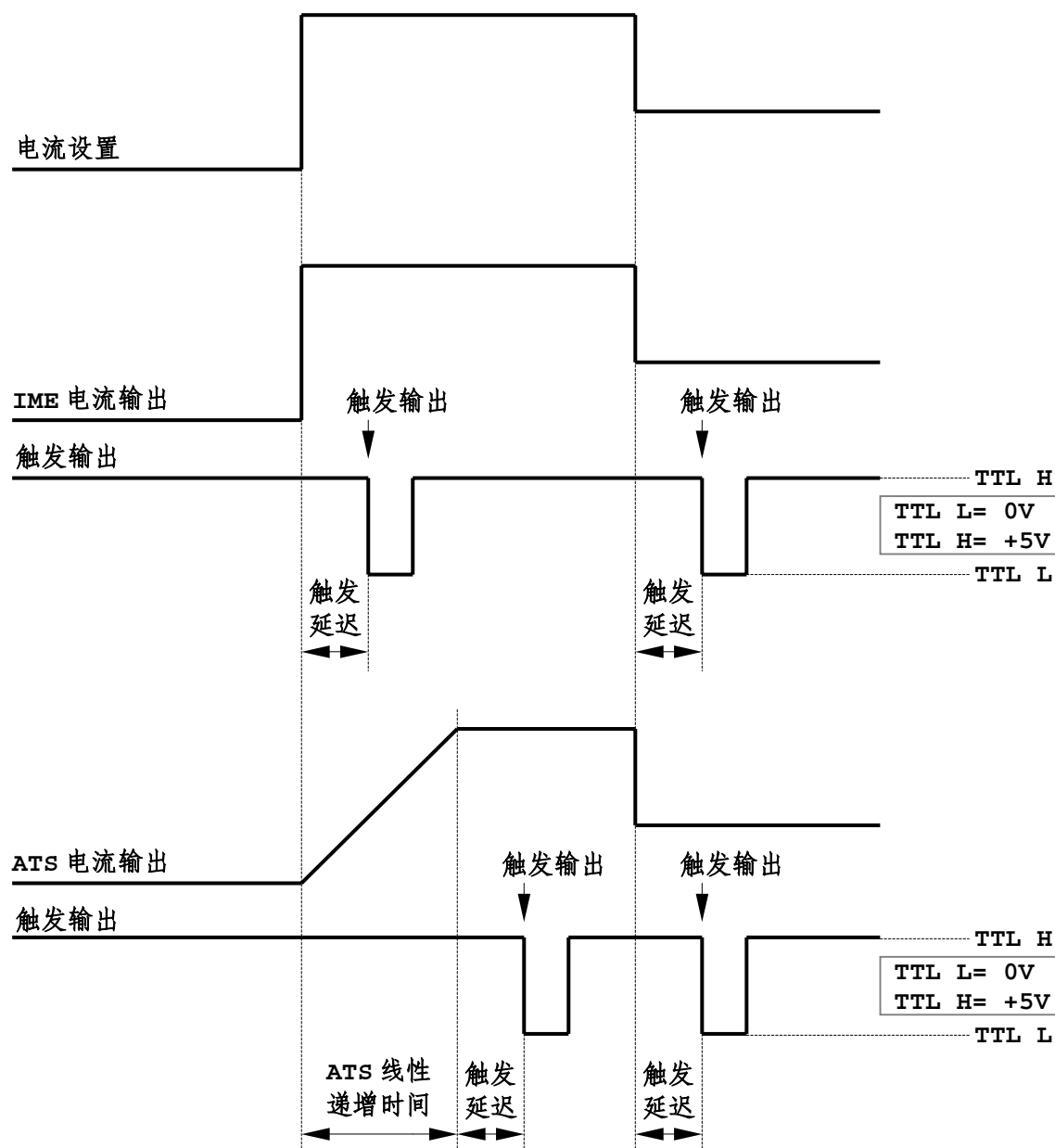


FIG-MAN-F2002-0046

3.15 键盘锁

F2002 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** 启动或解除，并由查询 **LOCK?** 进行查询。请参阅 4.6.4 和 4.6.5 中的相关内容。

键盘锁启动后，LCD 显示器右下方显示键盘锁标记“**🔒**”。此时除 **ESC** 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

F2002 开机时键盘锁为解除状态。

3.16 设置计算机接口

INTERFACE 键和 **BAUD** 键分别用于设置计算机接口形式和串行接口波特率。

3.16.1 设置接口类型

F2002 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 3-29 所示。

图 3-29 F2002 计算机接口系统

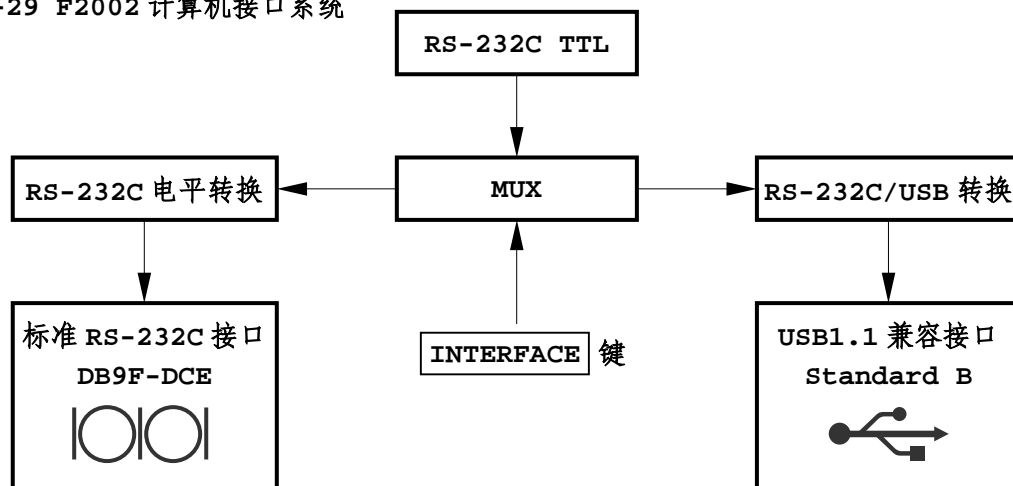


FIG-MAN-F2002-0047

图 3-30 使用 **INTERFACE** 键切换计算机接口形式

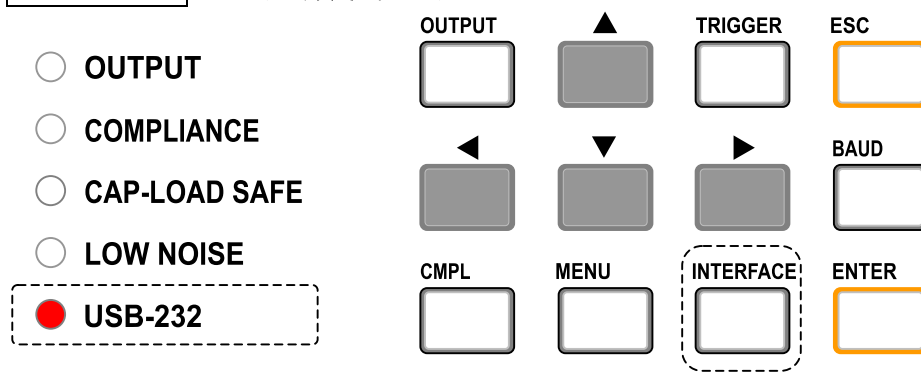


FIG-MAN-F2002-0048

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。

使用 **INTERFACE** 键切换 RS-232C 和 USB 接口。在标准显示界面下，按 **INTERFACE** 键切换接口类型。使用 USB 接口时，LED 指示器中“USB-232”LED 点亮，如图 3-30 所示。

注

当前接口形式保存于 F2002 内部的非易失性存储器内，并于下次开机时保持。

3.16.2 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，通过 **BAUD** 键进行设置，如图 3-31 所示：

- ① 标准显示界面下，按 **BAUD** 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 300、600、1200、4800、9600；
- 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。

当前波特率保存于 F2002 内部的非易失性存储器内，并于下次开机时保持。

图 3-31 使用 **BAUD** 键设置波特率

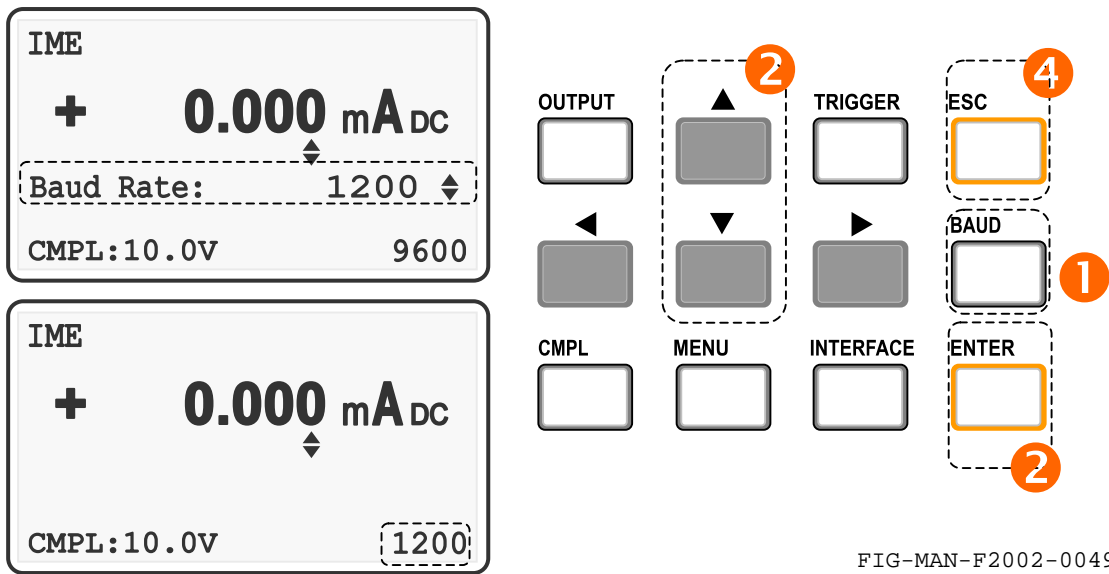


FIG-MAN-F2002-0049

3.16.3 安装并设置 USB-232 接口

F2002 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 F2002 的 USB 转换器设备，必须安装产品信息光盘 CD-F2002 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：

- ❶ 关闭 F2002 前面板电源开关；
- ❷ 打开产品信息光盘 CD-F2002（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：

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。

图 3-32 设备管理器中的 RS-232C/USB 转换器设备

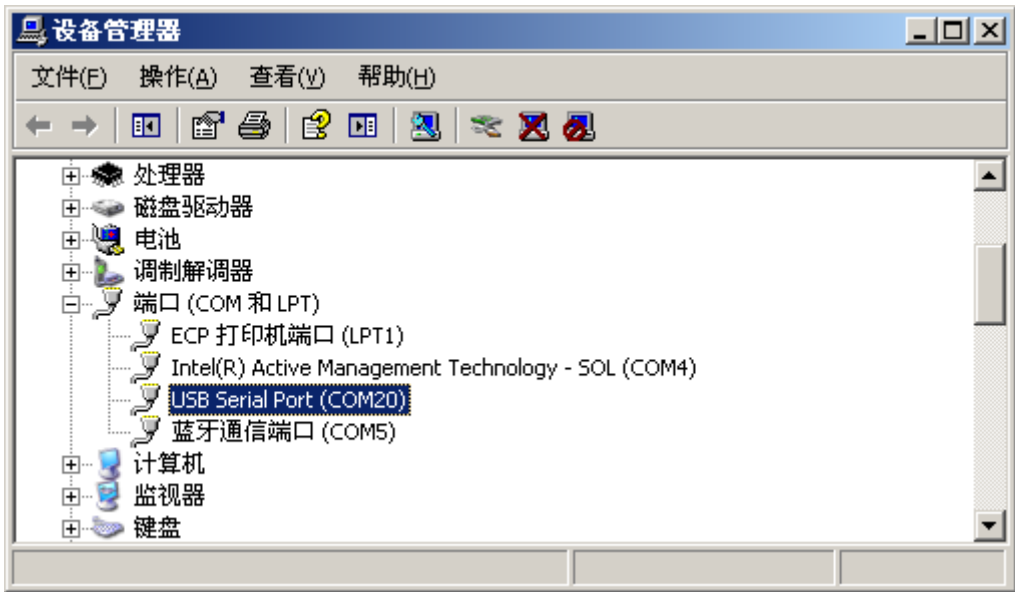


FIG-MAN-F2002-0050

图 3-33 USB Serial Port (COMn) 属性窗口

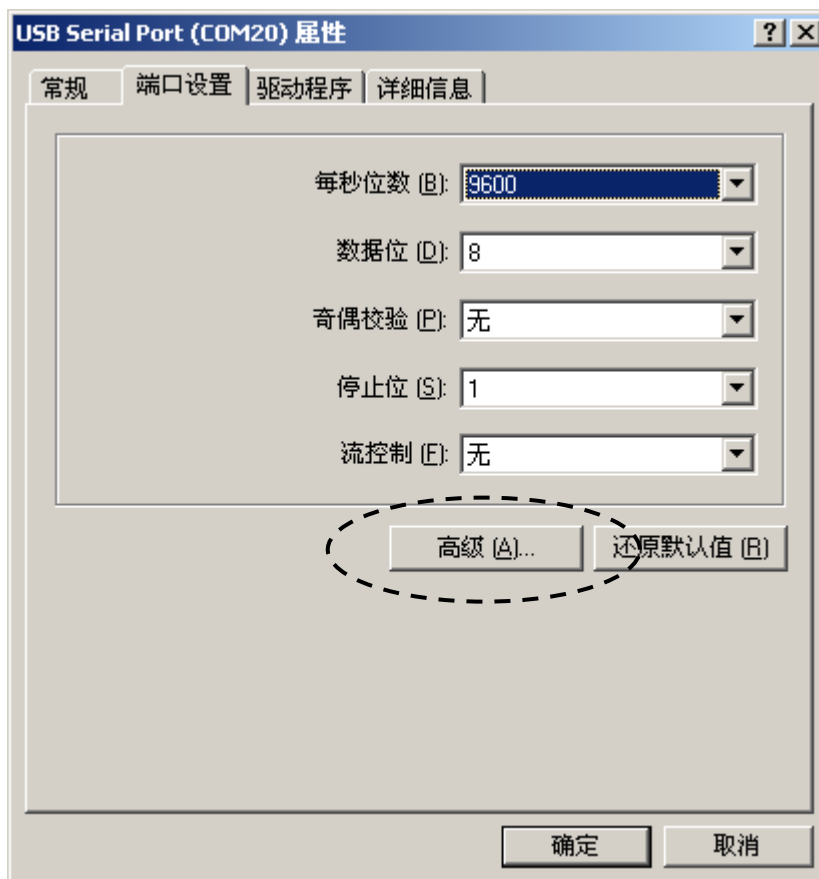


FIG-MAN-F2002-0051

图 3-34 修改 RS-232C/USB 转换器的端口号

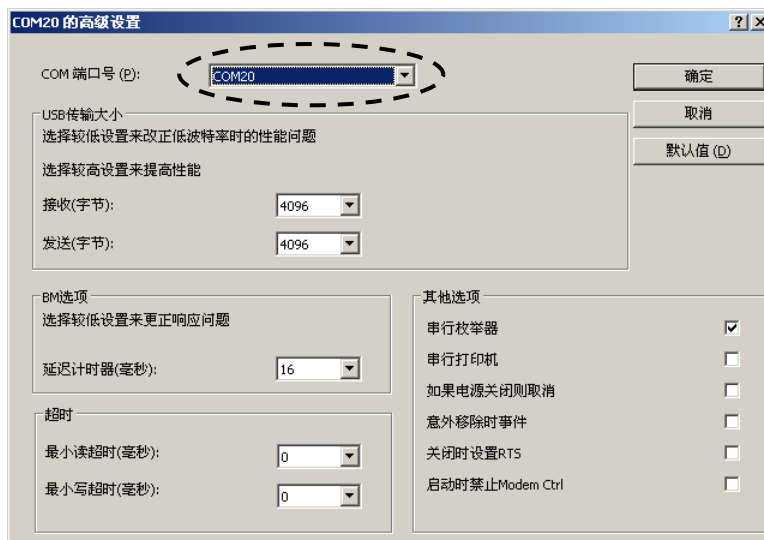


FIG-MAN-F2002-0052

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 F2002 后面板的 USB B 型插座内；
- ④ 开启 F2002 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 3-32 所示，点击“端口（COM 和 LPT）”左侧的“+”；
- ② 双击“USB Serial Port(COMn)”，打开图 3-33 所示属性窗口；
- ③ 选择“端口设置”页，点击“高级”按钮，打开图 3-34 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 3-32 所示属性窗口，修改“波特率”与 F2002 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”，参见第 4 章中的相关内容，设置“流控制”为“无”，点击“确定”按钮。

3.17 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 3-35 所示恢复出厂设置界面，并将各参数恢复出厂设置，3 秒后显示参数恢复结果，而后恢复至标准显示界面。各项参数出厂设置如表 3-5 所示。恢复开机设置可通过发送计算机接口命令 ***RST** 达成。

图 3-35 恢复出厂设置

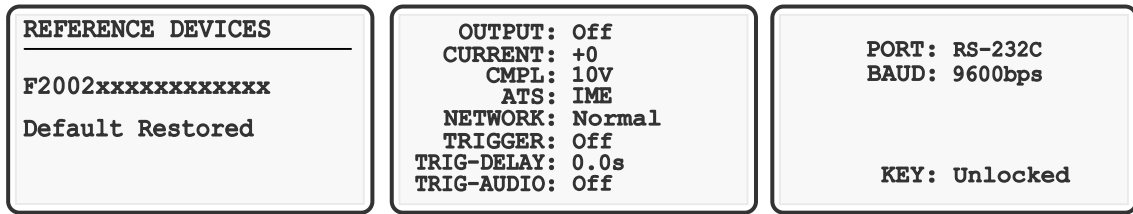


FIG-MAN-F2002-0053

表 3-5 恢复出厂设置值

TAB-MAN-F2002-0008

项 目	出厂设置值	项 目	出厂设置值
输出端	高阻状态	输出电流	+0
钳位电压	10V	输出响应	IME
接口形式	RS-232C	波特率	9600bps
触发方式	关闭	触发延迟	0
触发声响	关闭	输出补偿网络	常规
电流微调位	1μA 位	前面板键盘	解锁

3.18 负载实例

F2002 为负载提供高准确度和高稳定度电流驱动。负载可能包括各种电阻性传感器、霍尔元件、大容量电容、各种尺寸的电感线圈和具有 PN 结结构的半导体器件。

3.18.1 电阻性传感器

电阻性传感器在一定的物理因素（例如热、光、磁和机械应力）作用下，自身直流电阻发生变化。通过测量传感器电阻标定或测量相应的物理量（例如温度、光功率、磁感应强度和机械力）。

常用电阻性传感器包括铂电阻（PT100、PT1000）、温敏电阻（NTC、PTC）、光敏电阻、磁敏电阻和用于测量机械应力的应变片电阻，直流电阻属于中等阻值，即位于 10Ω—10kΩ 范围内，通常通过施加电流偏置测量电压计算阻值。在恒定电流驱动下，负载两端电压与负载直流电阻成正比。

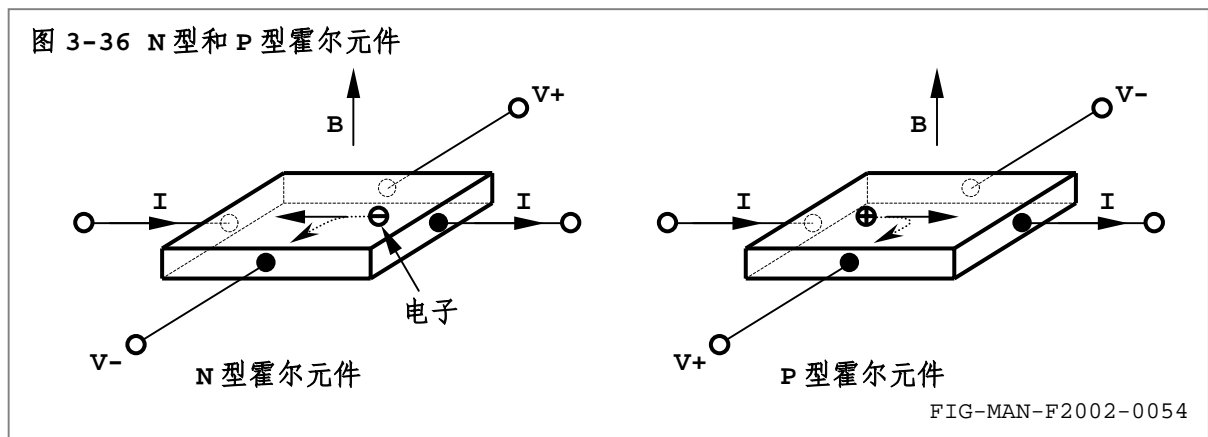
由于某些测量要求传感器具有更小的体积，传感器结构愈发精细，使得功率容量降低，瞬间高功率可能造成传感器损伤，因此不允许在电流设置过程中出现电流或电压过冲。在这些传感器的应

用中，施加于传感器的偏置电流恒定并很少改变，不要求 F2002 的快速输出阶跃响应。使用 ATS 输出响应模式可有效避免各种过冲，保护负载安全。同时，将输出补偿网络设置为低噪声模式 (Low Noise)，以最大程度降低电流噪声产生的电压噪声。

此外，在传感器上串联适当的保护电阻可部分吸收过冲造成的瞬间功率，较大的保护电阻在所需电流下将导致更高的输出电压，因此需要适当调整钳位电压以保证 F2002 工作于恒流状态。

3.18.2 霍尔元件

霍尔元件基于霍尔效应，用于测量磁场的磁感应强度。霍尔元件通常由 IV 族或 III-V 族、II-VI 族半导体构成，为 4 端元件，通过向一条对角线的两端注入恒定偏置电流，在磁场作用下，另一条对角线两端产生与磁场磁感应强度成比例的输出电压，如图 3-36 所示。



根据霍尔系数的差异，不同霍尔元件于相同磁场下产生相同输出电压所需注入的电流范围很大，某些霍尔元件需要注入 10mA 以上的偏置电流，例如 Si、GaAs 和 InSb，另一些输入电阻较大的霍尔元件，例如某些 II-VI 族，偏置电流可能小于 100 μ A。

除半导体材料试片外，商品封装的霍尔元件的有效区通常为衬底上的扩散或离子注入薄层，某些霍尔元件的有效区可能是衬底上淀积生长的薄层。这些元件的非体材料结构对于静电和瞬间功率比较敏感，因此要求偏置电流源具有静电保护功能和尽量小的电流/电压冲击。

与电阻性传感器类似，霍尔元件的应用中，注入的偏置电流恒定并很少改变，因此不要求 F2002 的快速输出阶跃响应。使用 ATS 输出响应模式可有效避免各种过冲，保护负载安全。此外 F2002 的 LORS 可在输出端高阻状态以及关机后为霍尔元件持续提供防静电保护。同时，将输出补偿网络设置为低噪声模式 (Low Noise)，可最大程度降低电流噪声产生的电压噪声。

此外，在霍尔元件的电流输入端串联适当的保护电阻可部分吸收过冲产生的瞬间功率。

3.18.3 高容量电容

对电容进行恒流 I 充电并测量电容两端电压达到某一电压值 V_C 的充电时间 t_C ，可准确测量电容量 C 。容量高于 10 μ F 的电容通常为电解电容。电解电容具有显著的漏电流 I_{LEAK} ，因此需适用更大的充电电流以避免漏电流造成的测量误差，如图 3-37 所示。

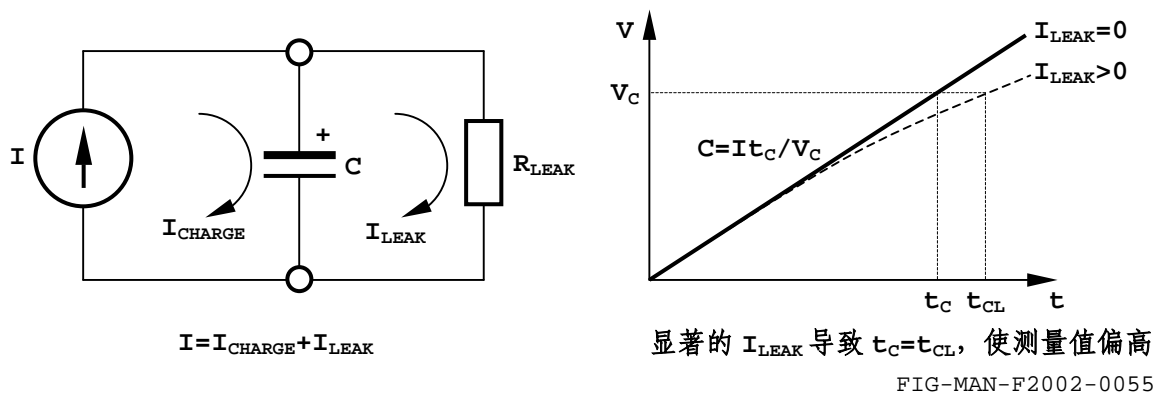
恒流充电时，F2002 的钳位电压必须低于电容的额定耐压，并且必须保证正确的电容连接极性，以避免电容由于过电压或负压产生失效、爆裂等严重损伤，并保护测量者的人身安全。

警告

电解电容过压或反压工作可能造成严重的爆裂，并导致可能的人身伤害。

测量高容量电容时，必须将输出补偿网络设置为电容负载保护模式 (C-Load Safe)，以保护 F2002 内部 LORS 安全。低噪声模式 (Low Noise) 具有约 10 μ F 的输出端内部并联电容，可能造成显著的电容测量误差。

图 3-37 恒流充电测量高容量电容

**警告**

不使用电容负载保护可能使 F2002 内部 LORS 在输出端进入高阻状态瞬间由于对电容短路放电而产生过流, 并导致 LORS 寿命降低或损毁。

负载电容高于 $50\mu\text{F}$ 时, 为进一步保护 F2002 内部 LORS 电路安全, 建议对负载电容串联保护电阻。保护电阻在电流充电过程中将产生一定的压降, 但不影响电流准确度。可依据 $2\Omega/\mu\text{F}$ 的比例设置保护电阻阻值。例如负载电容为 $1000\mu\text{F}$ 时, 保护电阻约 $2\text{k}\Omega$, 充电电流为 1mA 时, 保护电阻两端压降为 2V , 电容两端电压由 0 至 50V 的充电时间为 50 秒。

为保证电容测量准确度, 恒流充电前, 应将 F2002 输出端设置为高阻状态, 并在电容负载保护模式下通过 LORS 为电容负载完全放电。高容量电容完全放电可能需要经历较长时间, 请使用适用的电压表监测。放电完成后, 设置 F2002 输出电流为 0 , 将输出端设置为正常输出, 并将输出响应设置为 IME, 而后设置充电电流, 监测电压表读数并记录时间。

先于切换输出端状态设置电流时, 输出端由高阻状态进入正常输出过程中, 电流将线性递增至设置值, 并造成显著的测量误差。此外 ATS 输出响应也将呈现电流线性递增, 增大测量误差。

3.18.4 电感性负载

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 F2002 状态切换产生的电流/电压过冲不敏感。然而, 由于电感内部电流的延迟效应, 面对阶跃电流上升沿时可能产生短时失调振荡, 并可能在阶跃电流下降沿产生明显的反向电动势。

使用 ATS 输出响应可有效避免失调振荡, 此外 F2002 内部配置专门应对电感反向电动势的续流泄放电路。

为进一步保证 F2002 内部电路安全, 建议驱动电感性负载时使用电容负载保护模式 (C-Load Safe) 或低噪声模式 (Low Noise), 从而避免 F2002 内部 LORS 在输出状态由正常输出切换至高阻状态瞬间由于对电感短路放电而产生流经 LORS 的过电流冲击。此外, 低噪声模式 (Low Noise) 可进一步降低失调振荡幅度。

F2002 的常规补偿网络和电容负载保护模式 (Normal、C-Load Safe) 可保证 10mH 电感负载下内部电路的稳定性。负载为高于 10mH 的强电感时, 请使用低噪声模式 (Low Noise)。

3.18.5 PN 结半导体器件

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。此外, 半导体器件均对静电极为敏感, 需要静电保护。

F2002 的输出电流具有高准确度和高稳定度, 低噪声模式 (Low Noise) 下输出电流噪声可以忽略。为最大程度避免电流和电压冲击, F2002 提供 ATS 输出响应, 并在输出状态切换时通过准确的内部时序控制保证最低的电流和电压冲击。

此外，即使在关机状态或输出端处于高阻状态时，F2002 也可通过内部 LORS 为半导体器件提供持续的防静电保护，并在开机瞬间提供上电冲击保护。

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** 键将输出端切换至高阻状态，并于负载可靠连接后将输出端切换为正常输出。

警告

正常输出状态下更换 PN 结负载可能造成负载瞬间损毁。

为最大程度避免电流/电压冲击，可将 F2002 的输出响应设置为 ATS 状态，并小心设置钳位电压，以及确保正确的连接极性。使用低噪声补偿网络（Low Noise）可能降低输出响应速率，但可进一步降低可能的过冲幅度。

PN 结导通后两端电压 V_F 呈现稳定状态，电流增大后 V_F 变化很小。因此明显高于 V_F 钳位电压可能无法有效对半导体器件进行过压保护，而十分接近但高于 V_F 的钳位电压可能造成 F2002 频繁进入电压钳位状态，降低测量有效性。

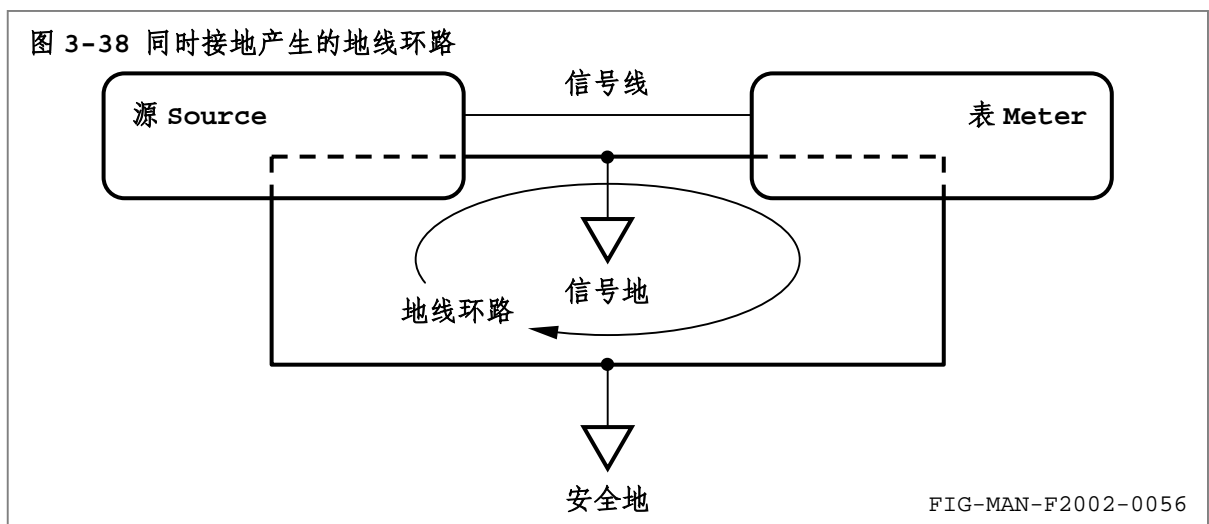
串联适当的保护电阻可提高电压钳位对半导体器件的过压保护效能。保护电阻两端呈现与流经其内部的电流成正比的电压。F2002 进入电压钳位状态后，保护电阻根据自身电压限制 PN 结两端电压和流经 PN 结的电流，从而避免 PN 结过压或过流损毁。

串联保护电阻后，可通过输出电流与电阻的乘积以及 V_F 计算所需的钳位电压值。此外，保护电阻还可于出现电流/电压过冲时阻止大部分瞬间能量进入 PN 结，保护半导体器件安全。

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。F2002 提供高于 100V 的最大输出电压，可为多于 30 只串联的白光 LED，或多于 60 只串联的红光 LED 提供高稳定度电流驱动。

3.19 接地关系

3.19.1 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向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，例如安装于计算机内部的数据采集卡。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。

F2002 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 500V。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

F2002 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 500V，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。

图 3-39 F2002 的接地关系

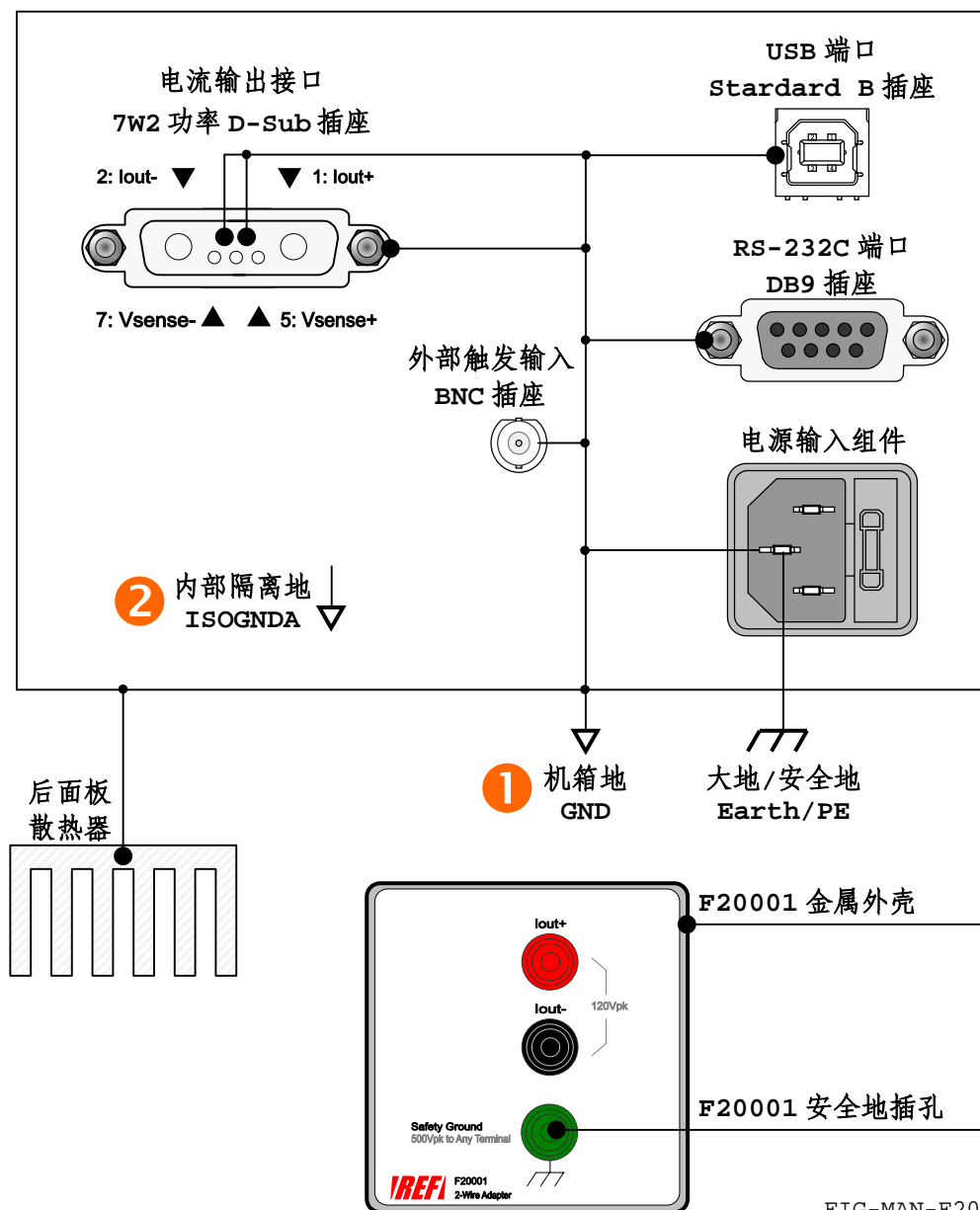


FIG-MAN-F2002-0057

3.19.2 浮动测量

F2002 配置的电压表为浮动输入，与安全地和电流输出端无关。输入端的任意一端与电流输出端的任意一端以及仪器安全地之间的电压峰值隔离能力不低于 500V。

警告

F2002 电流输出端的任意一端以及安全地之间的直流和交流电压叠加峰值不可超出 500V，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。

3.19.3 接地关系

F2002 具有 3 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 ISOGNDA，如图 3-39 所示。其中：

❶ 机箱地 GND：通过电源输入组件中电源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）。同时机箱地与后面板散热器、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、触发输出 BNC 插座外壳以及电流输出 7W2 功率 D-Sub 连接器的外壳及其 3、4 引脚连通并等电位。

❷ 内部电流源隔离地 ISOGNDA：内部隔离地，无外接导体或端子。

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。

使用四线式输出适配器 F20001 时，F20001 的外壳和绿色安全地插孔与机箱地 GND 相连，并通过 F2002 连接至安全地（Earth）。

不使用附件 F20001 时，负载可通过图 2-10 所示电流输出 7W2 功率 D-Sub 接口的第 3、4 引脚，或者接口左侧的安全接地端子连接至安全地。

3.20 键盘菜单结构

图 3-40 和图 3-41 所示为 F2002 的键盘菜单结构图。其中图 3-40 为输出设置和计算机接口，图 3-41 为菜单和触发输出。

图 3-41 F2002 键盘菜单结构图（菜单和触发输出）

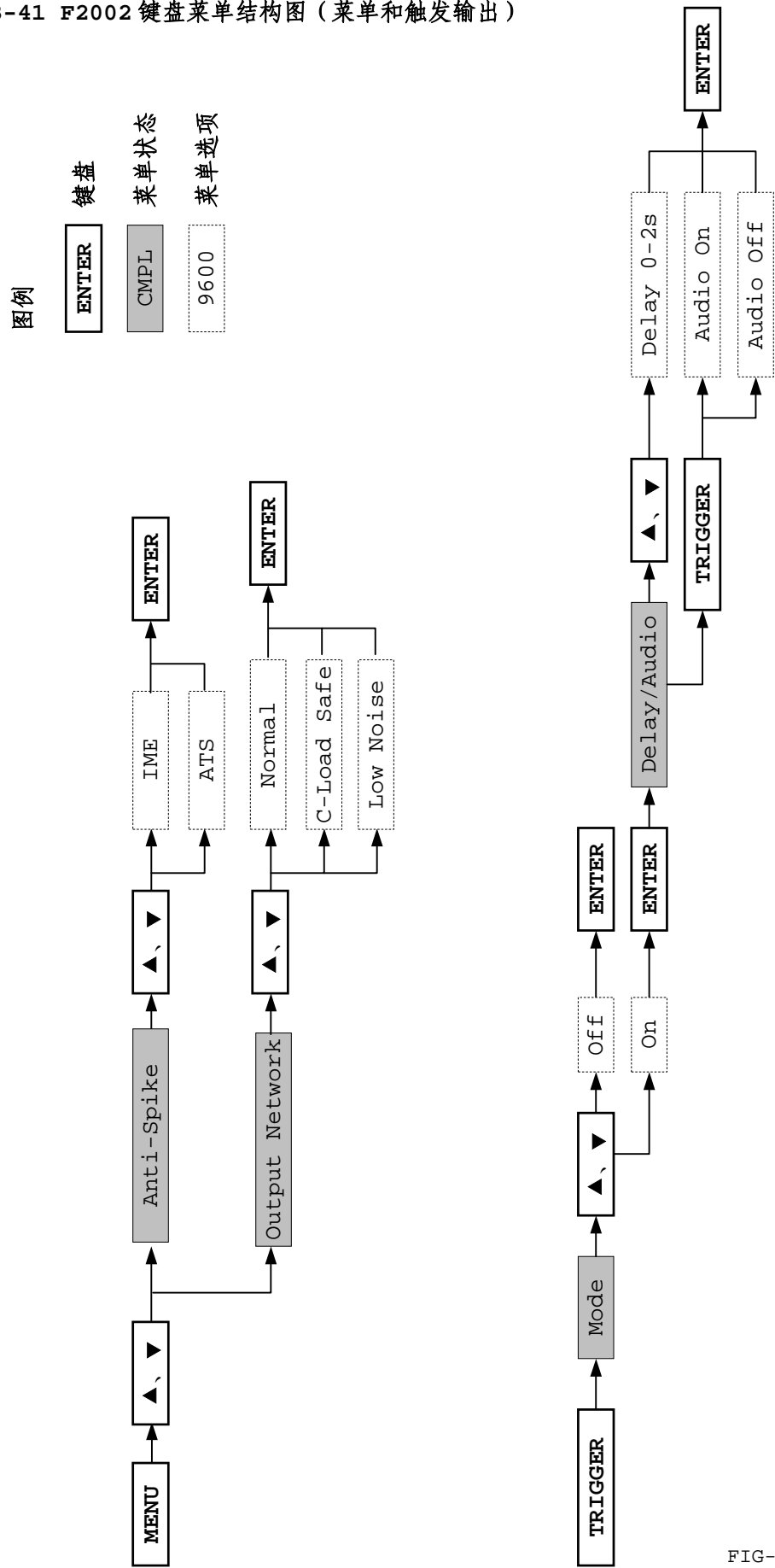


FIG-MAN-F2002-0059

<本页为空页>
This Page Intentionally Left Blank

计算机接口

4.1 简介

F2002 程控精密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 4.2 为计算机接口选择，4.3 为 RS-232C 接口概述，4.4 为 USB-232 接口概述，4.5 为接口命令语法和软件控制机制，4.6 为接口命令详解。

4.2 计算机接口选择

4.2.1 接口构成

F2002 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，F2002 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 F2002 类似的串行接口设备，从而无需由硬件扩充 RS-232C 接口。

4.2.2 选择接口和设置波特率

在同一时刻，用户只可使用 F2002 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 3.16.1 中的内容。

由于 2 种接口于 F2002 内部均视为标准 RS-232C 接口，因此 F2002 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 3.16.2 中的内容。

使用 USB-232 接口时，需首先于计算机上安装 F2002 的接口驱动程序。驱动程序安装方法请参阅 3.16.3 中的相应内容。

4.3 RS-232C 接口概述

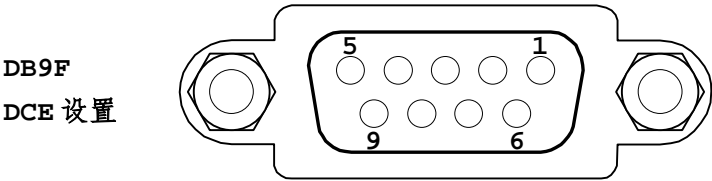
F2002 使用的 RS-232C 接口符合电子工业协会 EIA-232-E 标准。EIA-232-E 标准描述了各种用于计算机与电子设备之间连接的众多通用接口之一。在 F2002 内部，USB-232 接口数据也将转换为符合 EIA-232-E 标准的数据格式。

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 F2002 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。

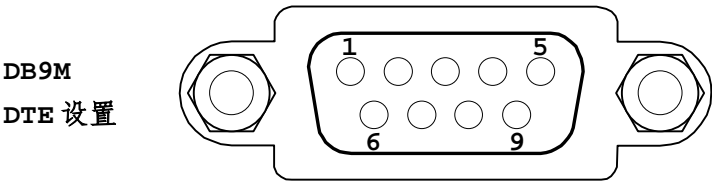
4.3.1 物理连接

F2002 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 针连接器也已成为工业标准。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 4-1 为常用 DCE 和 DTE 配置的 9 针连接器引线序列。必须提请用户注意，F2002 并不支持其中的全部引线功能。

图 4-1 常用 DCE 设置 9 针连接器引线序列



引线序号	引线定义	F2002 连接描述
1	DCD	NC
2	Tx	数据接收
3	Rx	数据发送
4	DTR	NC
5	GND	参考地
6	DSR	NC
7	RTS	NC
8	CTS	NC
9	Ring in	NC



引线序号	引线定义	F2002 连接描述
1	DCD	---
2	Rx	---
3	Tx	---
4	DTR	---
5	GND	---
6	DSR	---
7	RTS	---
8	CTS	---
9	Ring in	---

FIG-MAN-F2002-0060

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。

F2002 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。F2002 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。

4.3.2 硬件支持

F2002 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：F2002 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：F2002 支持的波特率为 300、600、1200、4800 和 9600bps。
- ④ 硬件握手（流控制）：F2002 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。

4.3.3 传输格式

字符是接口传输中的最小单位。F2002 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 F2002 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)。F2002 可识别的结束符为 CR 和 LF 的任意组合，例如 CR、LF、CR+LF、LF+CR、CR+CR 和 LF+LF。

4.4 USB-232 接口概述

F2002 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 F2002。USB 接口在 F2002 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。

4.5 接口命令语法和软件控制机制

4.5.1 消息字符串

消息字符串为用于执行接口功能的一组字符。F2002 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 F2002 发送命令和查询，F2002 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。F2002 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 F2002 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，例如开启防冲击模式输出响应命令 ATS 1[CR]也可写为 ats 1[CR]或 Ats 1[CR]。

响应字符串为 F2002 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，F2002 处于空闲状态时的最大响应时间不大于 100ms。

4.5.2 数据格式

F2002 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 F2002 发送命令 `CUR 100.000[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	30h	30h	2Eh	30h	30h	30h	0Dh
	10 进制 DEC	67	85	82	32	49	48	48	46	48	48	48	13

4.5.3 应答机制

F2002 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，F2002 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 F2002 处于标准显示界面，否则除命令 `*RST` 外 F2002 对其余命令/查询均返回忙 `BUSY`。F2002 尚未完成一项命令任务时即收到其它命令/查询，也将返回忙 `BUSY`。如果命令的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，F2002 返回 `ERROR`。

由于通讯时序问题及可能的空间干扰，F2002 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，F2002 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。

4.5.4 消息流控制

F2002 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，F2002 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 F2002 的应答响应，并于接收到应答响应后发送下一命令或查询。

F2002 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

F2002 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，F2002 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：F2002 处于正常输出状态，输出电流为 0 且输出响应为 `ATS` 模式时，连续命令/查询 `CUR 100[term]ATS?[term]` 中，`CUR 100` 命令首先设置 F2002 的输出电流以线性递增至 100mA，此过程中 F2002 不接受任何查询以及除 `OUT 0` 和 `OUT 1` 之外的任何命令，`ATS?` 的响应为 `BUSY`，而无法查询当前输出响应模式。

因此，请尽量遵循 4.5.3 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。

4.5.6 通讯故障诊断

F2002 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 F2002 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。

4.6 接口命令和查询详解

4.6.1 兼容性

除与数字电压表相关的命令和查询外，F2002 的接口命令和查询集与 F2012 完全兼容。

4.6.2 接口命令和查询集

F2002 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 4-1 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 4.3.3 和 4.5.1 中的相关内容。

表 4-1 接口命令和查询集

TAB-MAN-F2002-0009

助记符	描述	格式	正常响应
① 通用接口命令			
*RST	仪器复位	*RST[term]	CMLT
② 通用接口查询			
*IDN?	查询仪器序列号	*IDN?[term]	产品序列号
③ 设备特殊命令			
ATS	设置输出响应模式	ATS n[term]、n=0、1	CMLT
CMPL	设置钳位电压	CMPL xxx.x[term]	CMLT
CUR	设置输出电流	CUR xxx.xxx[term]	CMLT
CURFD	设置输出电流微调位	CURFD n[term]、n=0—3	CMLT
CURFUP	当前输出电流微调位数值+1	CURFUP[term]	CMLT
CURFDOWN	当前输出电流微调位数值-1	CURFDOWN[term]	CMLT
LOCK	设置键盘锁状态	LOCK n[term]、n=0、1	CMLT
NETWORK	设置输出补偿网络	NETWORK n[term]、n=0—2	CMLT
OUT	设置输出端状态	OUT n[term]、n=0、1	CMLT
TRIG	设置触发输出方式	TRIG n[term]、n=0、1	CMLT
TRIGD	设置触发输出延迟时间	TRIGD x.x[term]	CMLT
TRIGA	设置触发输出声响提示状态	TRIGA n[term]、n=0、1	CMLT

表 4-1 接口命令和查询集（续）

TAB-MAN-F2002-0009

助记符	描述	格式	正常响应
④ 设备特殊查询			
ATS?	查询当前输出响应模式	ATS?[term]	0、1
CMPLS?	查询当前是否进入电压钳位状态	CMPLS?[term]	0、1
CMPL?	查询当前前位电压设置值	CMPL?[term]	电压值
CUR?	查询当前输出电流设置值	CUR?[term]	电流值
CURFD?	查询当前输出电流微调位	CURFD?[term]	0—3
LOCK?	查询当前键盘锁状态	LOCK?[term]	0、1
NETWORK?	查询当前输出补偿网络模式	NETWORK?[term]	0、1、2
OSC?	检测当前输出端是否发生振荡	OSC?[term]	0、1
OUT?	查询当前输出端状态	OUT?[term]	0、1
TRIG?	查询当前触发输出模式	TRIG?[term]	0、1
TRIGD?	查询当前触发输出延迟时间	TRIGD?[term]	x.x
TRIGA?	查询当前触发输出声响提示状态	TRIGA?[term]	0、1

4.6.3 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： 设置输出端状态为高阻状态，输出电流为 0，钳位电压为 10.0v，输出响应模式为 IME，关闭触发输出，触发输出延迟时间为 0s，关闭触发输出声响提示，电压表测量分辨率为 4 ½ 位，关闭附加测量功能，输出补偿网络恢复为常规补偿模式。

4.6.4 通用接口查询

*IDN?

- 功能： 查询仪器产品序列号
- 格式： *IDN?[term]
- 返回： F2002 处于标准显示界面，且不处于连续读数状态，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： F2002 使用 17 位产品序列号：

F	2	0	1	2	0	0	0	1	0	9	0	7	1	0	x	x
仪器型号					出厂序号				出厂日期				版本			

4.6.5 设备特殊命令

ATS

- 功能： 设置输出响应模式为 IME 或 ATS
- 格式： ATS 0[term]、ATS 1[term]
- 返回： F2002 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]。
ATS 0 设置当前输出响应模式为 IME，并返回 **CMLT**[CR]。
ATS 1 设置当前输出响应模式为 ATS，并返回 **CMLT**[CR]。
参数非 0 或 1 时，返回 **ERROR**[CR]。
- 备注： 0=IME，1=ATS。
输出响应模式的详细描述请参阅 3.12.1 中的内容，并请参阅查询 **ATS?**。

CMPL

功能： 设置钳位电压

格式： CMPL xxx.x[term]

返回： F2002 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]。

参数大于 105.0 或小于 0.3，或者浮点数格式错误时，F2002 返回 **ERROR**[CR]。

钳位电压设置完成后，F2002 返回 **CMLT**[CR]。

备注： 参数单位为伏特（V）。

F2002 支持除“x.”以外的合法浮点参数 xxx.x 格式，小数点之前的位数应小于或等于 3 位，小数点以后第 1 位之后的位数自动省略。

输出端为正常输出且 F2002 处于恒流状态下，设置较当前钳位电压更高的钳位电压值后，钳位电压由当前值线性递增至设置值，并可能需要等待较长的设置时间，在此过程中可随时使用命令 **OUT 0** 使输出端切换至高阻状态。处于高阻状态或电压钳位状态，或者设置值小于当前钳位电压时，F2002 立即设置钳位电压至设置值。

钳位电压、输出端状态和输出响应模式的详细描述请分别参阅 3.5、3.8 和 3.12 中的内容，并请参阅查询 **CMPLS?** 和 **CMPL?**。

CUR

功能： 设置输出电流

格式： CUR xxx.xxx[term]

返回： F2002 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]。

参数大于 105.000，或者浮点数格式错误时，F2002 返回 **ERROR**[CR]。

正常输出且 F2002 处于 ATS 输出响应模式下，设置较当前输出电流更高的电流值后，输出电流由当前值线性递增至设置值，并可能需要等待较长的设置时间，在此过程中可随时使用命令 **OUT 0** 使输出端切换至高阻状态。处于高阻状态、电压钳位状态、输出响应为 **IME** 或设置值小于当前电流时，F2002 立即设置输出电流至设置值。

输出电流设置完成后，F2002 返回 **CMLT**[CR]。

备注： 参数单位为毫安（mA）。

F2002 支持除“x.”以外的合法浮点参数 xxx.xxx 格式，小数点之前的位数应小于或等于 3 位，小数点以后第 3 位之后的位数自动省略。

设置输出电流、电压钳位状态、输出端状态和输出响应模式的详细描述请分别参阅 3.4、3.5、3.8 和 3.12 中的内容，并请参阅查询 **CUR?**。

CURFD

功能： 设置输出电流微调位

格式： CURFD n[term]、n=0—3

返回： F2002 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]。

输出电流微调位设置完成后，返回 **CMLT**[CR]。

参数非 0、1、2 或 3 时，返回 **ERROR**[CR]。

备注： 0=0.001mA 位，1=0.01mA 位，2=0.1mA 位、3=1mA 位。

设置输出电流调整位可于任何输出端状态和输出响应状态下操作。

输出电流微调的详细描述请参阅 3.4.1 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+1

格式： CURFUP[term]

- 返回: F2002 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]。
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, 与输出响应状态是否为 **ATS** 无关。
 输出电流微调设置规则请参阅 3.4.1 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]
- 返回: F2002 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]。
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, 与输出响应状态是否为 **ATS** 无关。
 输出电流微调设置规则请参阅 3.4.1 中的详细内容, 并请参阅命令 **CURFD**、**CURFUP** 和查询 **CURFD?**。

LOCK

- 功能: 设置键盘锁状态
- 格式: **LOCK** 0[term]、**LOCK** 1[term]
- 返回: F2002 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]。
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 3.15 中的内容, 并请参阅查询 **LOCK?**。

NETWORK

- 功能: 设置输出补偿网络
- 格式: **NETWORK** n[term]、n=0、1、2
- 返回: F2002 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]。
NETWORK 0 设置输出补偿网络为常规补偿模式, 并返回 **CMLT**[CR]。
NETWORK 1 设置输出补偿网络为电容负载保护模式, 并返回 **CMLT**[CR]。
NETWORK 2 设置输出补偿网络为低噪声模式, 并返回 **CMLT**[CR]。
 正常输出状态下切换输出补偿网络时, F2002 首先将输出端切换至高阻状态, 而后切换补偿网络, 经过适当的延迟时间后恢复输出端至正常输出状态, 并返回响应。
 参数非 0 或 1 时, 返回 **ERROR**[CR]。
- 备注: 0=常规补偿, 1=电容负载保护, 2=低噪声。
 输出补偿网络的详细描述请参阅 3.9 中的内容, 并请参阅查询 **NETWORK?**。

OUT

- 功能: 设置输出端状态为正常输出或高阻状态
- 格式: **OUT** 0[term]、**OUT** 1[term]
- 返回: F2002 未处于标准显示界面, 或未完成除 **CUR** 和 **CMPL** 之外的上一命令任务时, 立即返回 **BUSY**[CR]。
 输出端为正常输出状态时, **OUT** 0 立即切换输出端为高阻状态, 并返回 **CMLT**[CR]。
 输出端为高阻状态时, **OUT** 0 无效, 并立即返回 **CMLT**[CR]。
 输出端为高阻状态时, **OUT** 1 切换输出端为正常输出状态, 切换过程可能需等待较长时间, 切换完成后返回 **CMLT**[CR]。

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

参数非 0 或 1 时，返回 **ERROR[CR]**。

备注：0=高阻状态，1=正常输出。

命令 **OUT 1** 使输出端由高阻状态切换至正常输出状态过程中，可随时使用命令 **OUT 0** 使输出端恢复至高阻状态。

正常输出状态下，命令 **CUR** 和 **CMPL** 均可能使输出端的电流或电压发生线性递增，并需等待较长的设置时间，在此线性递增过程中，可随时使用命令 **OUT 0** 使输出端恢复至高阻状态，并中止 **CUR** 和 **CMPL** 的设置过程，但不影响二者的最终设置值。

输出端状态的详细描述请参阅 3.8 中的内容，并请参阅查询 **OUT?**。

TRIG

功能：设置触发输出方式

格式：**TRIG 0[term]**、**TRIG 1[term]**

返回：F2002 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]**。

TRIG 0 关闭触发输出，并返回 **CMLT[CR]**。

TRIG 1 设置触发输出方式为“On”，并返回 **CMLT[CR]**。

参数非 0 或 1 时，返回 **ERROR[CR]**。

备注：0=关闭，1=方式 On。

触发输出方式的详细描述请参阅 3.14 中的相关内容，并请参阅命令 **TRIGD**、**TRIGA**、查询 **TRIG?**、**TRIGD?** 和 **TRIGA?**。

TRIGD

功能：设置触发输出延迟时间

格式：**TRIGD x.x[term]**

返回：F2002 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]**。

无论关闭或开启触发输出，**TRIGD x.x** 均有效，并于设置完成后均返回 **CMLT[CR]**。
x.x>9.9 或浮点数表示法不正确时，F2002 返回响应 **ERROR[CR]**。

备注：参数 **x.x** 为 0—9.9 之间的 2 位浮点数。

F2002 支持以下浮点数表示法：“0”、“0.0”、“0.1”、“.1”、“1”和“1.0”。

触发输出延迟时间的详细描述请参阅 3.14 中的相关内容，并请参阅命令 **TRIG**、**TRIGA**、查询 **TRIG?**、**TRIGD?** 和 **TRIGA?**。

TRIGA

功能：设置触发输出声响提示状态

格式：**TRIGA 0[term]**、**TRIGA 1[term]**

返回：F2002 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]**。

TRIGA 1 开启触发输出声响提示，并返回 **CMLT[CR]**。

TRIGA 0 关闭触发输出声响提示，并返回 **CMLT[CR]**。

无论开启或关闭触发输出，**TRIGA** 命令均有效，并于设置完成后均返回 **CMLT[CR]**。

参数非 0 或 1 时，返回 **ERROR[CR]**。

备注：0=关闭触发输出声响提示，1=开启触发输出声响提示。

触发输出声响提示的详细描述请参阅 3.14 中的相关内容，并请参阅命令 **TRIG**、**TRIGD**、查询 **TRIG?**、**TRIGD?** 和 **TRIGA?**。

4.6.6 设备特殊查询

ATS?

功能: 查询当前输出响应模式

格式: `ATS?[term]`

返回: F2002 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]`。
否则返回当前输出响应模式: `0[CR]`或`1[CR]`。

备注: 0=IME, 1=ATS。

输出响应模式的详细描述请参阅 3.12.1 中的内容, 并请参阅命令 `ATS`。

CMPLS?

功能: 查询是否进入电压钳位状态

格式: `CMPLS?[term]`

返回: F2002 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 3.5 中的内容, 并请参阅命令 `CMPL` 和查询 `CMPLS?`。

CMPL?

功能: 查询当前钳位电压设置值

格式: `CMPL?[term]`

返回: F2002 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]`。
否则返回当前钳位电压设置值。

备注: 返回响应的单位为伏特 (V)。

钳位电压的详细描述请参阅 3.5 中的内容, 并请参阅命令 `CMPL` 和查询 `CMPLS?`。

CUR?

功能: 查询当前输出电流设置值

格式: `CUR?[term]`

返回: F2002 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]`。
否则返回当前输出电流设置值。

备注: 返回响应的单位为毫安 (mA)。

输出电流设置值的详细描述请参阅 3.4 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]`

返回: F2002 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]`。
否则返回当前输出电流微调位: `0[CR]`、`1[CR]`、`2[CR]`或`3[CR]`。

备注: 0=0.001mA 位, 1=0.01mA 位, 2=0.1mA 位、3=1mA 位。

输出电流微调的详细描述请参阅 3.4.1 中的内容, 并请参阅命令 `CURFD`、`CURFUP`、`CURFDOWN`。

LOCK?

功能: 查询当前键盘锁状态

格式: `LOCK?[term]`

返回: F2002 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 3.15 中的内容，并请参阅命令 LOCK。

NETWORK?

功能： 查询当前输出补偿网络
格式： NETWORK?[term]
返回： F2002 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]。
否则返回当前输出补偿网络： 0[CR]、1[CR]或 2[CR]。
备注： 0=常规补偿，1=电容负载保护，2=低噪声。
输出补偿网络的详细描述请参阅 3.9 中的内容，并请参阅命令 NETWORK。

OSC?

功能： 检测当前输出端是否发生振荡
格式： OSC?[term]
返回： F2002 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 3.11 中的内容。

OUT?

功能： 查询当前输出端状态
格式： OUT?[term]
返回： F2002 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]。
否则返回当前输出端状态： 0[CR]或 1[CR]。
备注： 0=高阻状态，1=正常输出状态。
输出端状态的详细描述请参阅 3.8 中的内容，并请参阅命令 OUT。

TRIG?

功能： 查询当前触发输出模式
格式： TRIG?[term]
返回： F2002 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 F2002 返回当前触发输出模式： 0[CR]或 1[CR]。
备注： 0=关闭，1=方式 On。
触发输出方式的详细描述请参阅 3.14 中的相关内容，并请参阅命令 TRIG、TRIGD、TRIGA、查询 TRIGD? 和 TRIGA?。

TRIGD?

功能： 查询当前触发输出延迟时间
格式： TRIGD?[term]
返回： F2002 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]。
否则无论 F2002 处于自动或外部触发模式，F2002 均返回当前外部触发延迟时间 x.x[CR]。F2002 只支持“1.0”的返回浮点数格式。
备注： 参数 x.x 为 0—9.9 之间的 2 位浮点数。
触发延迟时间的详细描述请参阅 3.14 中的相关内容，并请参阅命令 TRIG、TRIGD、TRIGA、查询 TRIG? 和 TRIGA?。

TRIGA?

功能: 查询当前触发输出声响提示状态

格式: TRIGA?[term]

返回: F2002 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 F2002 返回当前触发输出声响提示状态: **0**[CR]或**1**[CR]。

备注: 0=关闭触发输出声响提示, 1=开启触发输出声响提示。

触发声响提示的详细描述请参阅 3.14 中的相关内容, 并请参阅命令 **TRIG**、**TRIGD**、**TRIGA**、查询 **TRIG?** 和 **TRIGD?**。

附件

5.1 简介

本章包含 F2002 程控精密电流源各附件的操作方法，以及各电学接口定义。5.2 为 F20001 二线式电流输出适配器，5.3 为附件，5.4 为电学接口定义。

5.2 F20001 二线式电流输出适配器

5.2.1 F20001 适配器

F2002 配置 F20001 二线式电流输出适配器，用于将负载样品快速连接至 F2002 后面板。

F20001 适配器由 7W2 功率 D-Sub 插头、屏蔽柔性电缆和香蕉插头连接器构成。如图 5-1 所示。其中 7W2 功率 D-Sub 插头与 F2002 后面板电流输出接口匹配。

香蕉插头连接器提供标准 19mm 间距的 3 个香蕉插孔， I_{OUT+} （红色插孔）和 I_{OUT-} （黑色插孔）为电流输出端，下方 Safety Ground（绿色插孔）为安全地。屏蔽柔性电缆连接 7W2 功率 D-Sub 插头与香蕉插头连接器，其屏蔽层连接至 F2002 的机箱地，并将香蕉插头连接器的金属外壳以及 Safety Ground（绿色插孔）连接至安全地。

图 5-1 F20001 输出转换器连接方法

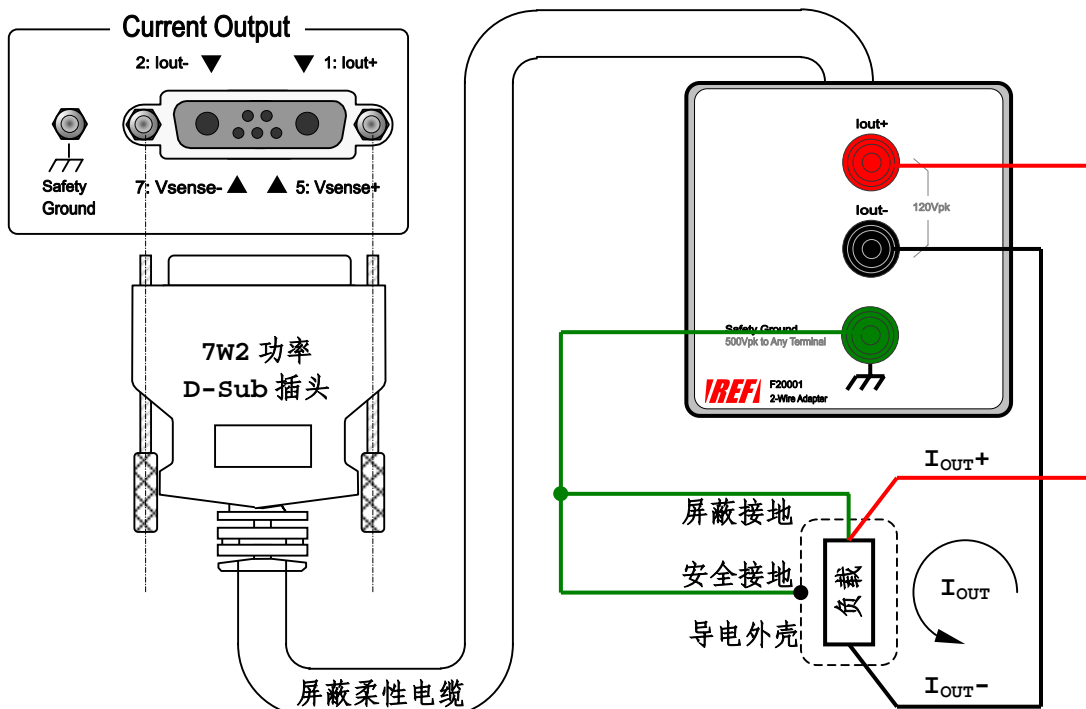


FIG-MAN-F2002-0063

5.2.2 耐压容限

F2002 为浮动式电流输出，因此 F20001 的 I_{OUT+} 、 I_{OUT-} 插孔与安全地 Safety Ground 插孔之间并无电气连接，并提供 $\pm 500V$ 耐压容限。

受 F2002 内部电流源电路的灌入电流限制，切勿通过外部对 F20001 的 I_{OUT+} 、 I_{OUT-} 之间强行施加包含电压和电流在内的电功率。F2002 的灌入电压容限为 $\pm 120V$ ，超出此限制将造成 F2002 内部电流源损毁。

5.2.3 安全接地

大多数使用 F2002 提供电流驱动的应用中，并不需要输出电位与安全地之间保持共模电压，因此，为最大程度保证操作者安全，可将 I_{OUT+} 或 I_{OUT-} 其中之一，或者负载金属外壳连接至安全地，即安全接地。由于大多数情况下，操作者人体通过与地面的接触事实上已经连接至大地（安全地），安全接地可最大程度避免暴露的导电部分相对安全地之间的电位造成对操作者可能的电击危险。

5.2.4 屏蔽接地

F20001 的屏蔽柔性电缆的屏蔽层通过 7W2 功率 D-Sub 插头以及 F2002 后面板电流输出接口连接至大地（安全地、机箱地）。浮动输出和测量时，由于缺乏实际的电气连接，屏蔽层对电缆内部电流输出的屏蔽作用有限。为保证最佳的驱动和测量的噪声性能，需要将 F20001 的 I_{OUT+} 或 I_{OUT-} 其中之一连接至安全地 Safety Ground 插孔，连接点应尽量接近负载，以最大程度降低由于电流输出引线的非零阻抗产生的可能噪声。

注

某些负载的导电外壳与内部流过电流的部分之间并无确切电气连接，仅将负载导电外壳连接至安全地插孔可能无法保证屏蔽层发挥正常的屏蔽效能。

5.3 附件

F2002 配备附件如表 5-1 所示：

表 5-1 F2002 附件清单

TAB-MAN-F2002-0010

型 号	描述	数量	标准配置
CAB-AC250-052	3 芯交流 250V/5A 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	---
FUSE5G-25005	250V/0.5A 玻封保险管，体积 5×20mm	2 只	√
RM01	全宽机箱安装法兰（机柜安装组件）	1 只	---
RM02	半宽机箱安装法兰（机柜安装组件）	1 只	---

5.3.1 交流电源线 CAB-AC250-052

附件 CAB-AC250-052 为 3 芯交流 250V/5A GB1002 电源线，长度 2 米，与后面板的电源输入组件匹配，符合 GB-1002 标准，如图 5-7 所示。

图 5-2 交流电源线 CAB-AC250-052

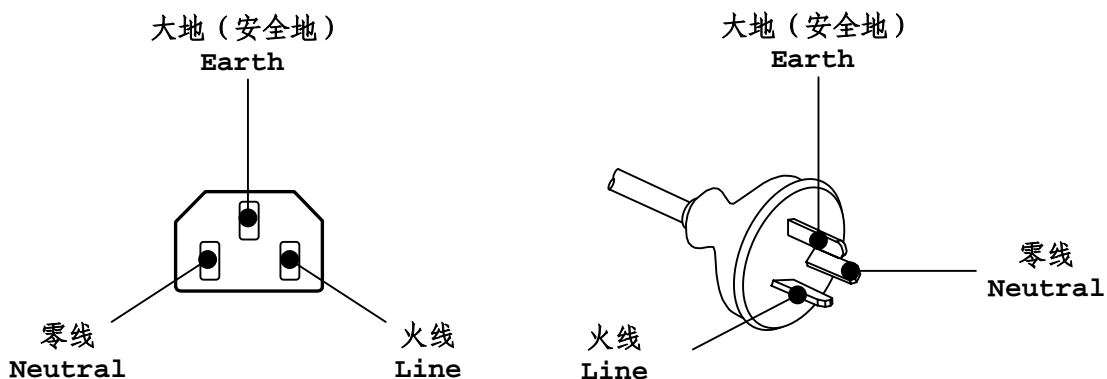


FIG-MAN-F2002-0064

5.3.2 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, 与后面板的 RS-232C DCE 插座匹配, 符合 EIA-232-E 标准, 如图 5-8 所示。

图 5-3 通讯电缆 CAB-232-DCE-3

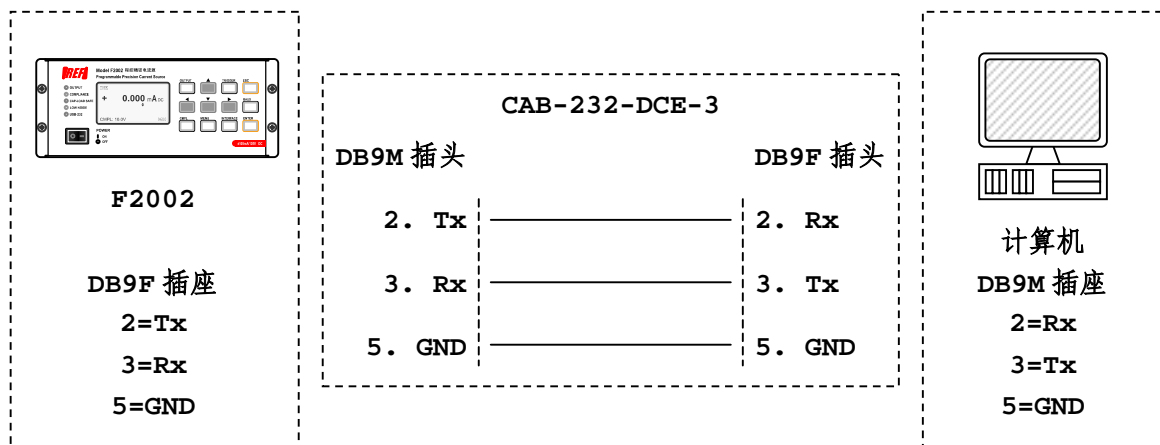


FIG-MAN-F2002-0065

5.3.3 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 5-9 所示。

图 5-4 通讯电缆 CAB-USB-AB-2

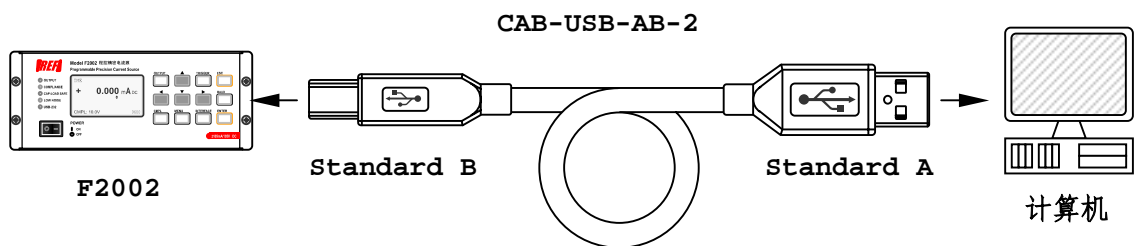


FIG-MAN-F2002-0066

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 F2002 和计算机，否则可能造成 F2002 和计算机的 RS-232C 接口电路损毁。

5.3.4 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 F2002，符合 EIA-232-E 标准。

5.3.5 其它附件

附件 FUSE5G-25005 请参阅 2.4.1 中的详细内容。

附件 RM01 和 RM02 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-F2002-0011

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-F2002-0012

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	$2.6752 \times 10^8 \text{ /}(\text{s} \cdot \text{T})$
逆磁屏蔽系数 (球形 H_2O 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-F2002-0013

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-F2002-0014

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-F2002-0015

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-F2002-0016

					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	b3	b2	b1	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	A	LF	SS	*	:	J	Z	j	z	
1	1	0	1	B	VT	ESC	+	;	K	[	k	{
0	0	1	1	C	FF	FS	,	<	L	~	l	~	
1	0	1	1	D	CR	GS	-	=	M	]	m	}
0	1	1	1	E	SO	RS	.	>	N	^	n	|	
1	1	1	1	F	SI	US	/	?	O	_	o	DEL	