



DELICATE & ACCURATE

Model F2070

程控功率电流源

用户手册

MAN-F2070-Rev04-2022

本文档包含操作和编程信息

IREFA 乐真科技

Printed in China
Edition 4, May., 2022

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。

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. 正确牢固的接地保护。

设备接地

1. 本产品通过保护地线端子提供安全保护，为避免电击事故，产品外壳必须连接至电学地。
2. 本产品必须通过 5 芯电源线连接至交流电源，其中保护地线必须牢固连接至安全地。
3. 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或设备内部损毁，并导致可能的人身伤害。

使用正确的交流电源电压规格

1. 本产品采用 3 相 380V 交流供电，即 3 路相线、1 路零线和 1 路保护地线（保护零线），必须正确连接相线、零线和保护地线（保护零线）。
2. 禁止将相线与零线混用，否则将导致重大电击事故，并导致人身伤害和产品损毁
3. 禁止将零线与保护地线（保护零线）混用，否则可能造成产品外壳带电，并导致可能的人身伤害。

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. 操作者不可移除设备封盖，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。
2. 不可在交流电源线连通的情况下更换部件。
3. 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。
4. 为最大程度避免人身伤害，接触设备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设备

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设备

1. 由于存在导致人身伤害的危险，切勿自行置换部件或对设备进行任何非授权的改动。
2. 请尽量将本产品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，以保持产品的安全性能。

损坏、损毁或有缺陷的设备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

总部地址： 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设备、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. 如果存在设备或部件的运输损伤，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	F2070		
数 量	1 台		
序列号	F2070000320073010		
附 件	CAB-AC450-0402	3 相 5 线制 5 芯交流 450V/40A 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-AFM-2	USB A 延长电缆，长度 2 米	1 条
	CAB-DC080-2	5 芯直流 80A 输出电缆，长度 2 米	1 条
	CD-F2070	F2070 产品信息光盘	1 张
	内含：		
	MAN-F2070	电子文档	1 份
	DRV-USB232	USB 接口驱动程序	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-F2070-Rev01-2013	2013 年 08 月 01 日
Rev02	文档序号 MAN-F2070-Rev02-2020	2020 年 11 月 16 日
	1. 硬件升级导致的性能指标提升（1.5、1.7、3.11、3.14）。 2. 风冷散热变更为水冷散热导致的外观变化和增加保护功能。 3. 增加计算机接口数据格式解释（4.5.2）。 4. USB-232 转换器硬件变更导致的驱动程序描述变更（3.20.3）。 5. 增加“警告”和“注”的颜色标记。 6. 外观更改导致的图例变化。 7. 修正可能的图文错误。	
Rev03	文档序号 MAN-F2070-Rev03-2021	2021 年 09 月 06 日
	1. 注释和警告格式变化。 2. 修正可能的图文错误。	
Rev04	文档序号 MAN-F2070-Rev04-2022	2022 年 05 月 12 日
	1. 部分指标变更。	

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.....	1-5
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 机柜安装.....	2-1
2.3.2 机柜前、后柜门.....	2-2
2.3.3 机柜左、右侧门.....	2-2
2.3.4 保留安全散热间距.....	2-2
2.3.5 避免热量耦合和电磁干扰.....	2-3
2.4 后面板详解和电缆连接.....	2-3
2.4.1 电源输入组件和交流供电配电连接.....	2-3
2.4.2 RS-232C 接口.....	2-6
2.4.3 功率电流输出接口.....	2-6
2.4.4 触发输出 BNC 接口.....	2-7
2.5 冷却水路连接.....	2-8
2.5.1 冷却水供应.....	2-8
2.5.2 冷却水管路连接.....	2-8
2.5.3 冷却水温度.....	2-9
2.5.4 冷却水水质.....	2-10
2.5.5 每次通电之前.....	2-10
2.5.6 冷却水泄放.....	2-10
2.6 初始设置和开机检测.....	2-11
2.6.1 上电之前.....	2-11
2.6.2 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.....	3-1
3.2.2 LED 指示器.....	3-3
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 电流线性渐变输出方式.....	3-6
3.5.1 电感性负载的时间常数.....	3-6
3.5.2 时间常数引起的过冲.....	3-6
3.5.3 电流线性渐变输出方式.....	3-6
3.5.4 设置电流线性渐变速率.....	3-6
3.5.5 电流线性渐变过程中的台阶效应.....	3-8
3.5.6 渐变结束声响.....	3-8
3.6 电流方向和换向延迟时间.....	3-8
3.6.1 电流方向和换向方式.....	3-8
3.6.2 电流换向过程.....	3-9
3.6.3 设置换向延迟时间组合.....	3-9
3.6.4 换向冲击.....	3-10
3.7 输出电压范围和负载直流电阻限制.....	3-10
3.7.1 电压钳位状态.....	3-10
3.7.2 电压钳位指示.....	3-10
3.7.3 负载最高直流电阻限制.....	3-11
3.7.4 长期通电工作的负载.....	3-11
3.7.5 内部过功率保护及其解除.....	3-11
3.7.6 负载最低直流电阻限制 $R_{LOADMIN}$ 和最大输出电流限制 I_{OUTMAX}	3-13
3.7.7 时间常数导致的触发保护.....	3-13
3.8 设置输出端状态.....	3-13
3.8.1 输出端状态和开机更换负载.....	3-13
3.8.2 切换输出端状态.....	3-14
3.8.3 输出端恢复正常输出状态时的输出电流.....	3-14
3.9 停止电流线性渐变、电流快速归零和中止电流换向.....	3-14
3.9.1 停止电流线性渐变.....	3-14
3.9.2 电流快速归零.....	3-15
3.9.3 中止电流换向.....	3-15
3.10 电流扫描.....	3-15
3.10.1 扫描模式.....	3-15
3.10.2 扫描最大值.....	3-16
3.10.3 扫描速率.....	3-17
3.10.4 扫描的开始、暂停、继续和中止.....	3-16
3.11 输出电流准确度.....	3-17
3.11.1 额定准确度.....	3-17
3.11.2 计算误差电流.....	3-17
3.11.3 输出电流稳定性.....	3-17
3.12 输出阻抗.....	3-18
3.13 输出补偿网络.....	3-18
3.13.1 内部输出补偿网络.....	3-18
3.13.2 追加的外部补偿网络.....	3-19
3.14 电流纹波.....	3-20

3.15	水冷系统保护	3-20
3.15.1	水压过低保护	3-20
3.15.2	散热器过热保护	3-20
3.15.3	保护动作	3-21
3.16	常规触发输出	3-21
3.16.1	常规触发输出	3-21
3.16.2	设置常规触发输出方式和触发延迟时间	3-21
3.16.3	常规触发输出时序	3-22
3.16.4	触发输出端口	3-23
3.17	扫描触发输出	3-23
3.17.1	扫描触发输出	3-23
3.17.2	设置扫描触发输出方式和触发时间间隔	3-23
3.17.3	扫描触发输出时序	3-24
3.17.4	降低测量时长差异导致的扫描测量误差	3-25
3.17.5	根据仪器的测量时长正确设置触发时间间隔	3-25
3.18	键盘锁	3-25
3.19	设置计算机接口	3-26
3.19.1	设置接口类型	3-26
3.19.2	设置串行接口波特率	3-26
3.19.3	安装并设置 USB-232 接口	3-27
3.20	恢复出厂设置	3-28
3.21	接地关系	3-29
3.21.1	浮动输出	3-29
3.21.2	接地关系	3-29
3.22	键盘菜单结构	3-30
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	4-2
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	4-3
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
4.5.6	通讯故障诊断	4-4
4.6	接口命令和查询详解	4-5
4.6.1	接口命令和查询集	4-5
4.6.2	通用接口命令	4-6
	*RST	4-6
4.6.3	通用接口查询	4-6
	*IDN?	4-7
4.6.4	设备特殊命令	4-7
	CUR	4-7
	CURFD	4-7

CURFDOWN	4-7
CURFUP	4-8
FAST0	4-8
LOCK	4-8
NTRIG	4-8
NTRIGD	4-9
OUT	4-9
PROTECTRST	4-9
PN	4-9
RAMPAUDIO	4-10
RATE	4-10
REV	4-10
REVDELAY	4-10
STOP	4-11
SWEEP	4-11
SWABORT	4-11
SWCONT	4-11
SWPAUSE	4-12
SWMODE	4-12
SWMAX	4-12
SWTRIG	4-12
SWTRIGINT	4-13
4.6.5 设备特殊查询	4-13
CMPLS?	4-13
CUR?	4-13
CURFD?	4-13
DIR?	4-14
LOCK?	4-14
NTRIG?	4-14
NTRIGD?	4-14
OUT?	4-14
PROTECTS?	4-15
RAMPAUDIO?	4-15
RATE?	4-15
REVDELAY?	4-15
SWEEP?	4-15
SWMODE?	4-16
SWMAX?	4-16
SWTRIG?	4-16
SWTRIGINT?	4-16

5. 附件..... 5-1

5.1 简介..... 5-1

5.2 附件..... 5-1

5.2.1 交流电源线 CAB-AC450-0402..... 5-1

5.2.2 功率电流输出电缆 CAB-DC080-2..... 5-2

5.2.3 通讯电缆 CAB-232-DCE-3..... 5-2

5.2.4 通讯电缆 CAB-USB-AFM-2..... 5-2

5.2.5 转换器 CONV-232-9-25..... 5-2

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 F2070 的固件版本.....	1-3
图 1-2 F2070 的前面板标准显示界面.....	1-5
图 1-3 F2070 的前、后视图.....	1-6
图 2-1 运输时需粘贴的保护标志.....	2-1
图 2-2 F2070 前方和后方的安全散热间距.....	2-2
图 2-3 F2070 后面板详解.....	2-3
图 2-4 电源输入组件.....	2-4
图 2-5 附件 CAB-AC450-0402 交流电源线详解.....	2-4
图 2-6 F2070 的交流电源配电连接.....	2-5
图 2-7 功率电流输出接口航空插座.....	2-6
图 2-8 附件 CAB-DC080-2 电流输出电缆详解.....	2-6
图 2-9 触发输出 BNC 接口.....	2-7
图 2-10 F2070 的冷却水进水和出水宝塔接头.....	2-8
图 2-11 将 F2070 连接至冷水机.....	2-9
图 2-12 F2070 的开机启动画面.....	2-12
图 2-13 F2070 的开机检测界面.....	2-12
图 2-14 F2070 的标准界面.....	2-12
图 3-1 F2070 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 F2070 的 LED 指示器.....	3-2
图 3-4 F2070 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 电流超调过冲和电流线性渐变输出方式.....	3-7
图 3-9 电流线性渐变过程中的台阶效应.....	3-8
图 3-10 输出端为正常输出状态时由正向至反向的完整电流换向过程.....	3-9
图 3-11 负载最高直流电阻限制.....	3-11
图 3-12 内部功率过载保护下 F2070 的显示信息.....	3-11
图 3-13 内部过功率保护导致的 $R_{LOADMIN}$ 和 I_{OUTMAX} 限制.....	3-12
图 3-14 使用 Out 键切换输出端状态.....	3-14
图 3-15 F2070 的三种扫描模式.....	3-16
图 3-16 有限输出阻抗 R_{OUT} 造成的分流误差.....	3-18
图 3-17 F2070 的内部输出补偿网络.....	3-18
图 3-18 追加的外部补偿网络.....	3-19
图 3-19 水压过低保护时 F2070 的显示信息.....	3-20
图 3-20 散热器过热保护时 F2070 的显示信息.....	3-21

图 3-21 常规触发输出时序..... 3-22

图 3-22 通讯延迟造成的测量时差 Δt 3-24

图 3-23 SWB 模式下的扫描触发输出时序..... 3-25

图 3-24 F2070 的计算机接口系统..... 3-26

图 3-25 设备管理器中的 RS-232C/USB 转换器设备..... 3-27

图 3-26 USB Serial Port(COMn)属性窗口..... 3-28

图 3-27 修改 RS-232C/USB 转换器的端口号..... 3-28

图 3-28 恢复出厂设置..... 3-29

图 3-29 F2070 的接地关系..... 3-30

图 3-30 F2070 键盘菜单结构图（输出设置和计算机接口）..... 3-31

图 3-31 F2070 键盘菜单结构图（线性渐变和扫描）..... 3-32

图 3-32 F2070 键盘菜单结构图（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 附件 CAB-AC450-0402 交流电源线详解..... 5-1

图 5-2 附件 CAB-DC080-2 电流输出电缆详解..... 5-2

图 5-3 通讯电缆 CAB-232-DCE-3..... 5-2

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..... 1-4

表 3-1 换向延迟时间和适用电感性负载时间常数..... 3-9

表 3-2 典型输出电流下的误差..... 3-17

表 3-3 恢复出厂设置值..... 3-25

表 4-1 接口命令和查询集..... 4-4

表 5-1 F2070 附件清单..... 5-1

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 F2070 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-F2070-0001

章节序号	内容简介	页 数
第 2 章	设备的安装方法和后面板接线。	14
第 3 章	前面板操作方法和操作中需注意的细节。	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。	16
第 5 章	附件信息，设备各接口的物理尺寸和电学定义。	4

1.2 阅读导引

如果您初次接触 F2070 程控功率电流源，请首先阅读第 2 章，熟悉设备的安装方法并正确连接后面板各类电缆和水管管路。而后请着重阅读第 3 章掌握 F2070 的各项操作方法。需要编程的用户请阅读第 4 章，其中提供所有针对 F2070 编程的细节内容以及简单的编程示例，协助用户进行计算机语言编写。第 5 章为 F2070 附件的详细信息，以及设备各物理接口的规格和电学定义。

本文档中，均以文字格式 **Out** 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：

3 相 5 线制交流 380 伏特，50-60 赫兹
AC380V, 50-60Hz

1.4 安全要求

本产品通过“保护地线（保护零线）PE 端子”提供安全保护。此保护地线（保护零线）PE 端子必须牢固连接至配电柜的保护地线（保护零线）PE，并且确保配电柜内的保护地线（保护零线）PE 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 -65A — $+65\text{A}$ DC
- 高步进分辨率 1mA ($1/65000$ F.S.) ——为精细磁场控制提供足够解析度
- 准确度 $\pm (0.2\%$ 设置值 $+10\text{mA})$ 、稳定度优于 150ppm/h ——高精度励磁电流驱动
- 噪声/纹波: 12mA RMS 典型值
- 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 7.8kW ——适于驱动电磁铁

► 输出电压

- 有效输出电压范围 0V — 120V DC、开路输出电压: $145\text{V}\pm 5\text{V}$

► 电流换向

- 微处理器控制的继电器换向方式、5 种可选延迟时间 ——根据负载时间常数灵活配置
- 换向电流冲击小于 3mA ——避免换向造成的磁场不连续

► 负载适应性

- 满幅输出负载直流电阻范围 1.25 — 1.85Ω
- 输出阻抗 $>300\text{k}\Omega$ ——低负载效应，适应大范围变化的负载
- 内部配置输出补偿网络 ——适应强电感性负载和强干扰环境

► 负载保护

- 可控的输出端状态 ——支持开机更换负载
- 线性渐变方式处理突变电流设置 ——避免电感性负载中电流过冲造成的磁场尖峰
- 电流线性渐变速率 0.01A/s — 5A/s ——根据负载时间常数灵活调整
- 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 象限三种线性扫描模式 ——适应大多数磁学扫描类型
- 线性扫描速率范围 0.01A/s — 5A/s 、最大扫描电流设置范围 1mA — 65A 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
- 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 3×4 键交互型功能键盘操作

► 标准规格

- 提供用户手册
- 标准 19 英寸、1200mm 机柜，TN-S 接地方式 3 相 5 线制交流 $380\text{V}/50\text{Hz}$ 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 F2070 的固件版本

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

FIG-MAN-F2070-0001

1.7 技术性能规格

表 1-2 为 F2070 程控功率电流源的技术性能规格,其中各项于 25±10°C 温度范围内均为可保证指标。

表 1-2 技术性能规格

TAB-MAN-F2070-0002

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	375	380	390
交流电源频率	Fac	Hz	Vac=380V	48	50	60
视在功率	Papp	kVA	380V/50Hz	---	7.0	15.0
温度和湿度						
使用温度 ^[1]	Tamb	°C	额定准确度	15	25	35
存储温度	Tst	°C	受 LCD 显示器限制	0	---	55
相对湿度	Hamb	%	Tamb=31°C	---	---	80
直流电流输出						
输出范围	IRng	A	---	-65	---	65
步进分辨率	IRes	mA	---	---	1	---
准确度	AI	---	Tamb=15—35°C	±(0.2%设置值+10mA)		
噪声/纹波 RMS	NRrms	mA	Iout=65A	---	12	---
噪声/纹波 Ip-p	NRp-p	mA	Iout=65A	---	72	---
温度系数	IdT	ppm/°C	Tamb=15—35°C	---	---	±30
短期稳定度	STI	ppm/h	Tamb=22°C	---	---	150
输出阻抗/负载效应	RI0	kΩ	直流	300	---	---
电源调整率	PSRR	ppm/V	额定交流输入范围	---	---	5
电流线性渐变速率	IRR	A/s	---	0.01	---	5
输出高阻态漏电流	I0FF	mA	RL<500Ω	---	---	1
灌入电压容限	VINT	V	RL=∞	---	---	140
输出电压						
有效输出范围	VRng	V	---	-120	---	120
开路输出电压	Voc	V	---	140	145	150
输出高阻态开路电压	V00C	V	输出端开路	---	---	15

表 1-2 技术性能规格 (续)

TAB-MAN-F2070-0002

技术指标	符号	单位	测试条件	最小值	典型值	最大值
输出功率						
最大输出功率	POM	W	RLDC=1.85Ω Iout=65A	---	7800	---
电流换向						
换向前延迟时间	TDF	s	---	1	---	5
换向后延迟时间	TDA	s	---	1	---	3
换向电流冲击	IRS	mA	RLDC=1.6Ω TDF=5s	---	0.5	3
负载适应性						
直流电阻	RLDC	Ω	Iout=65A DC	1.25	---	1.85
时间常数	LL	H/Ω	1H/Ω=1s	0	1	2
电流扫描						
电流扫描速率	ISRR	A/s	---	0.01	---	5
扫描最大电流	ISMAX	A	扫描模式 A、B、C	0.001	---	10
换向前延迟时间	TDF	s	---	1	---	5
换向后延迟时间	TDA	s	---	1	---	3
预热						
预热时间 ^[2]	Twm	min	Tamb=15—35℃	5	30	---
物理参数						
宽度	W	mm	---	---	600	605
高度	H	mm	不含脚轮	---	1200	1250
深度 ^[3]	D	mm	不含突出部件	---	800	805
质量	Wgt	kg	不含附件和包装物	---	300	330
运输全重	Ws	kg	标准配置	---	325	350

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。

表 1-3 为 F2070 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-F2070-0003

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
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

表 1-3 补充技术性能规格（续） TAB-MAN-F2070-0003

常规触发		
触发方式	Off、On、On+♪	♪为声响提示
触发输出延迟时间	0—5s，步进 0.1s	---
触发输出连接器	标准 BNC 插座、3 路触发信号同步输出	---
外部触发电平	TTL 兼容、下降沿有效	内部 1kΩ限流
耐压容限	-15VDC—+15VDC	---
扫描触发		
触发方式	Off、On、On+♪	♪为声响提示
触发输出间隔时间	0.1—2s，步进 0.1s	---
触发输出连接器	3 路同步标准 BNC 插座	---
外部触发电平	TTL 兼容、下降沿有效	内部 1kΩ限流
耐压容限	-15VDC—+15VDC	---
电流输出连接器		
连接器	5 芯大功率航空插头	---
电流容量	>100A	---

图 1-2 为 F2070 程控功率电流源开机后的标准显示界面。

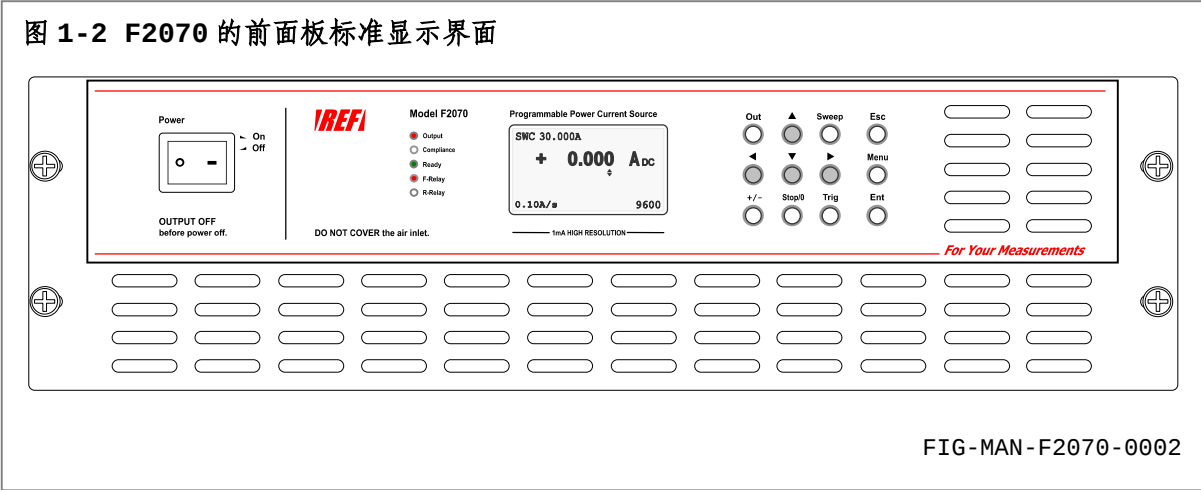


图 1-3a、b 分别为 F2070 程控功率电流源的前、后视图。

1.8 校准期限

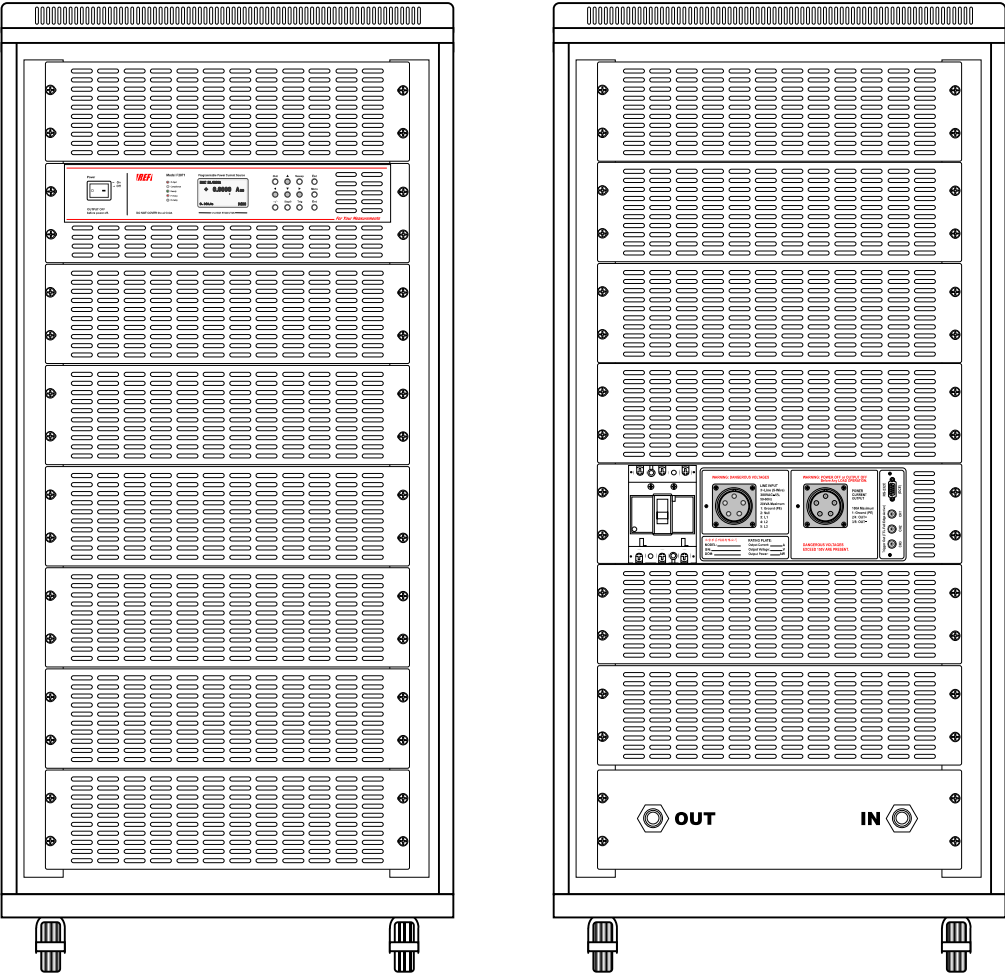
F2070 的校准期限为 2 年。

F2070 于出厂时进行校准，并保证由出厂之日起 2 年内设备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 F2070 设备本体及其附件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，以尽量避免设备在运输过程中可能受到的损伤。如果可能，请尽量于设备寄出前通过电话或电子邮件与我们联系，确认校准事宜。

图 1-3 F2070 的前、后视图



a. 前视图

b. 后视图

FIG-MAN-F2070-0003

安 装

2.1 简介

本章包含 F2070 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 为设备的安装方法，2.4 为后面板详解和电缆连接，2.5 为冷却水路连接，2.6 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，请妥善保存木箱、内部填充物和包裹保护袋。

将 F2070 设备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，请将设备使用保护袋包裹，并使用原厂填充物保护，重新包装于原厂木箱内，使用胶带或尼龙袋封好，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

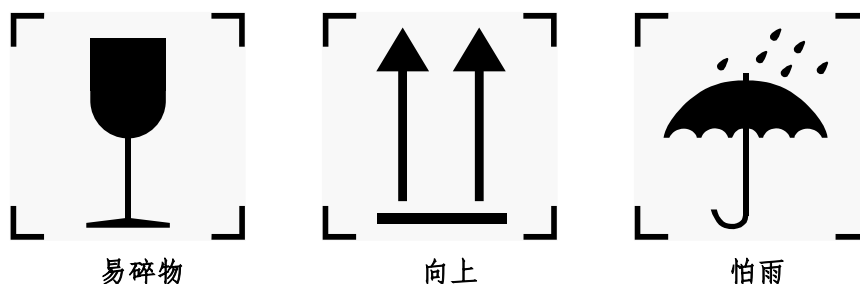


FIG-MAN-F2070-0004

2.3 安装方法

F2070 为标准 19 英寸机柜设备，尺寸为 W×H×D=600mm×1200mm×800mm。

2.3.1 机柜安装

F2070 机柜底板配置 4 只承重脚轮以支撑设备的全部重量。F2070 的总质量超出 300kg，因此地面或同等支撑结构必须可承受至少 500kg 重量。

请务必保证支撑 F2070 的承重面水平，并且机柜 4 只承重脚轮均须与承重面牢靠接触，以防止由于承重面偏斜造成的设备滑移，以及由于重心偏移发生设备翻覆，从而保证操作者的人身安全，以及设备的妥善放置。

警告

仪器总质量较大，将仪器由包装中移至承重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 机柜前、后柜门

F2070 机柜前、后柜门均为网孔散热设计，工作过程中，需拆卸机柜后门以便安装后面板电缆。用户可视使用需求保留或拆卸机柜前门。

请务必妥善保存拆卸的机柜门。当设备出现故障需要寄送运输时，必须将机柜前后柜门重新安装妥当，以保护设备内部部件安全。

警告

F2070 总质量较大，运输时必须安装前、后柜门以提高设备总体强度，并保护设备内部部件。不安装柜门运输可能造成设备内部损毁。

2.3.3 机柜左、右侧门

F2070 的左、右侧门为封闭门，由于 F2070 采用前、后方向强制风冷散热，因此侧门对散热无影响。拆卸侧门并无法显著提高散热效果。

警告

请勿尝试拆卸 F2070 机柜的左、右侧门，开启侧门将暴露内部电路，内部电路携带危险电压和高温，可能造成潜在的电击和灼伤危险，并导致可能的人身伤害。

2.3.4 保留安全散热间距

F2070 内部主要散热部件采用水冷散热，部分采用强制风冷散热，进气口位于前面板，出气口位于后面板。

为保证设备安全，必须为 F2070 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，否则可能导致设备内部过热，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设备内部电路损毁。通常，安装前柜门时机柜前方应保留至少 500mm 散热间距，拆卸前柜门时机柜前方应保留至少 300mm 散热间距，任何情况下机柜后方应保留至少 300mm 散热间距，如图 2-2 所示。

图 2-2 F2070 前方和后方的安全散热间距

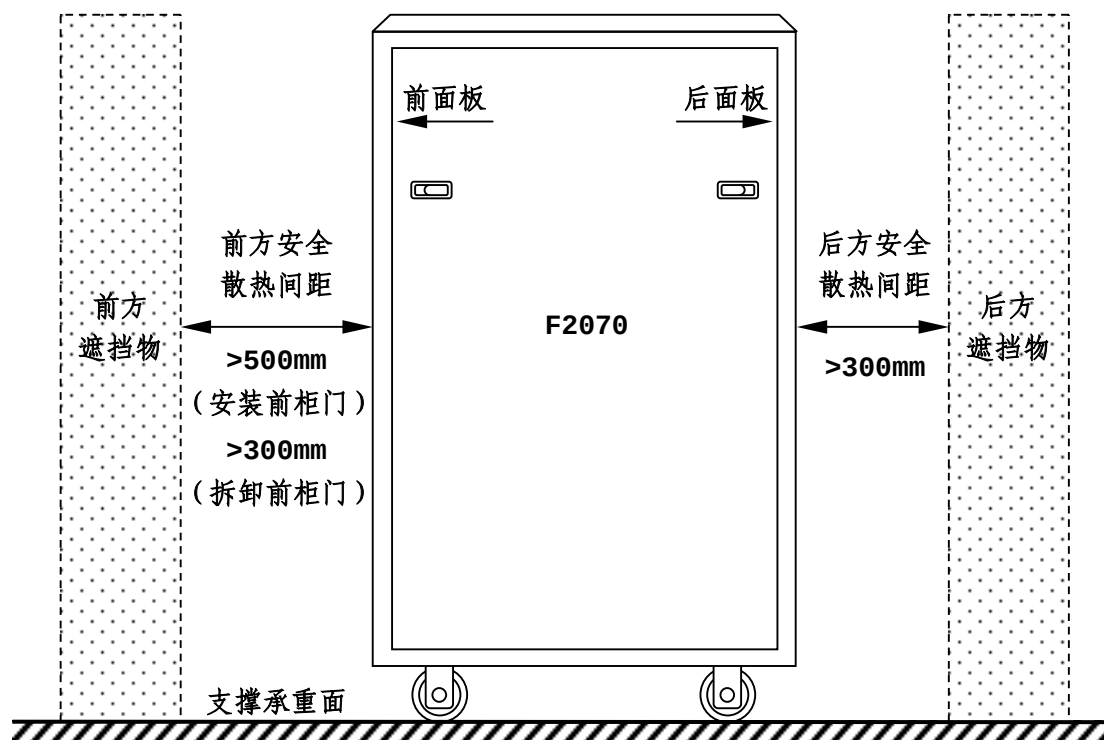


FIG-MAN-F2070-0005

警告

切勿将 F2070 机柜后方抵墙放置，否则将造成 F2070 内部散热不畅，导致设备内部过热。长时间无法正常散热可能导致设备内部电路损毁。

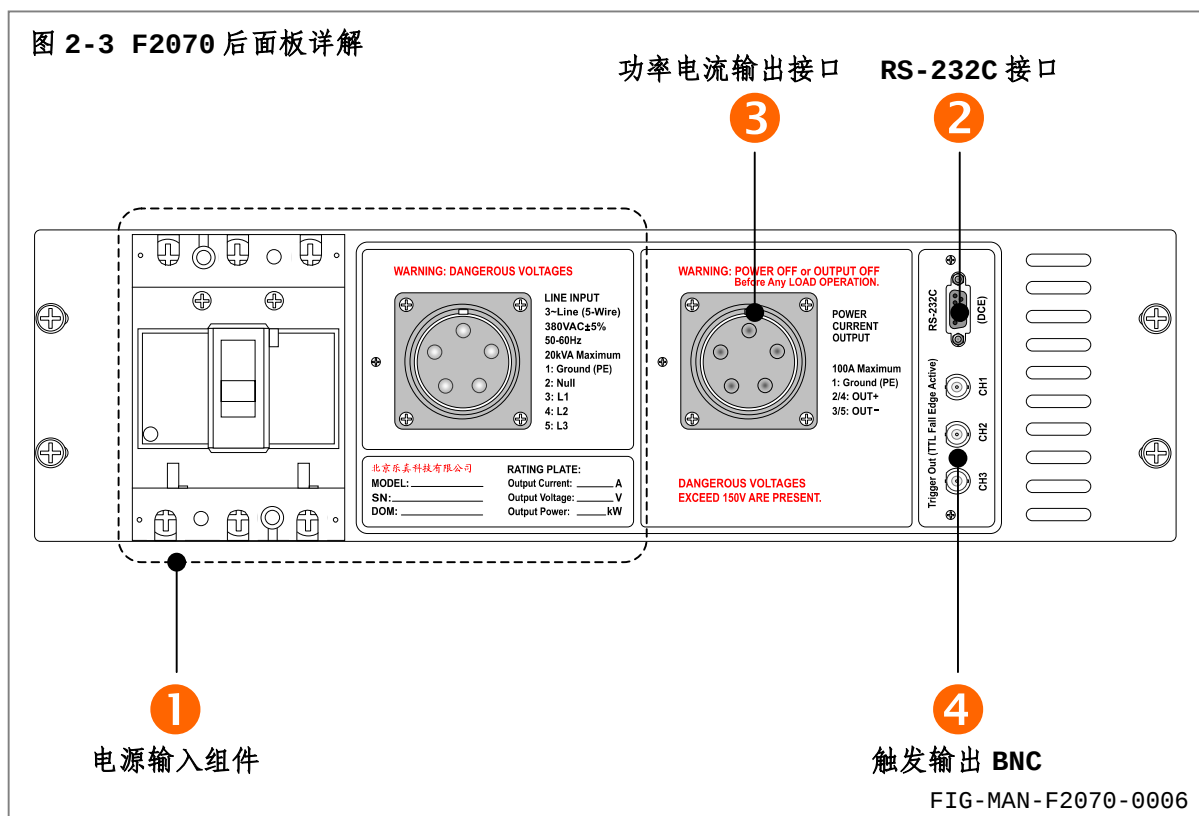
2.3.5 避免热量耦合和电磁干扰

长期工作时 F2070 主散热器的热量将由内部金属部件部分传导至机柜体，并使机柜侧板和顶板温度上升。因此请勿将高精度仪器放置于 F2070 上方，以避免高精度仪器产生明显的温度漂移。

F2070 属于大功率设备，虽然已通过接地的金属机柜外壳经施加屏蔽措施，工作中的 F2070 周围仍可能存在微弱的电磁干扰，尤其于进气口和出气口附近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 F2070，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 后面板电气详解和电缆连接

F2070 后面板包括①电源输入组件、②RS-232C 接口、③功率电流输出接口和④触发输出 BNC 插座，共 4 部分，如图 2-3 所示。以下各节分别对上述 4 部分及其电缆连接方法进行描述。



2.4.1 电源输入组件和交流供电配电连接

电源输入组件通过电源线为 F2070 提供交流电源。电源输入组件包括：①交流输入插座，和②断路器。如图 2-4 所示。请仔细阅读 F2070 后面板左上方标示的⑤“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，并可能造成可能的电击、火灾事故或仪器损毁。

图 2-4 电源输入组件

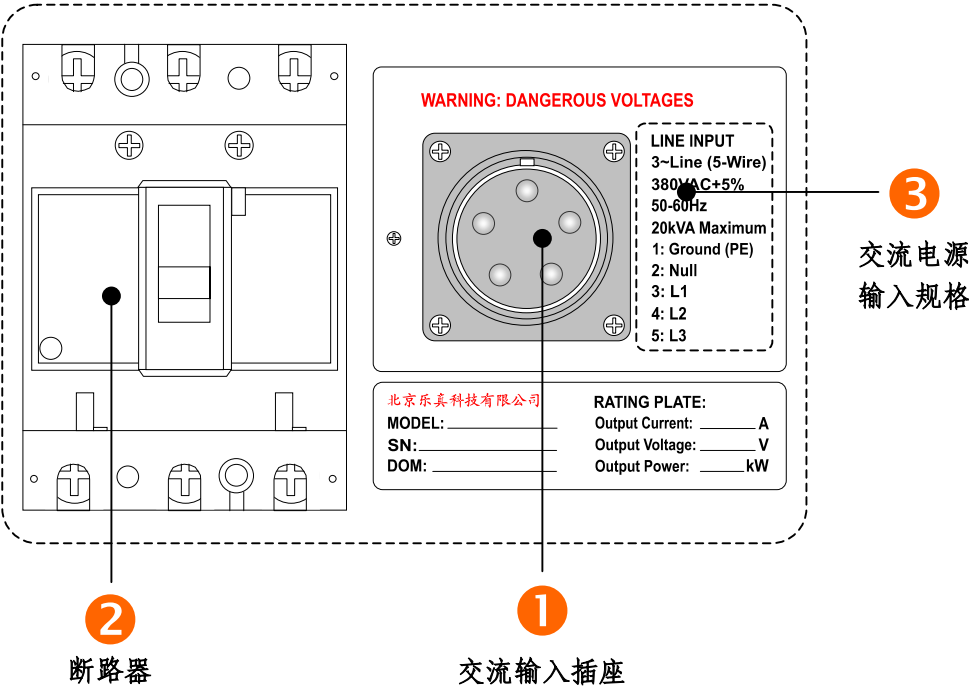


FIG-MAN-F2070-0007

F2070 采用 TN-S 接地方式 3 相 5 线制交流 380V 供电，通过附件 CAB-AC450-0402 交流电源线连接至交流电源。附件 CAB-AC450-0402 为 5 芯电缆，一端为 5 芯功率航空插头，用于连接至 F2070 后面板的交流输入插座，另一端为芯线自由端，用于连接至功率容量大于 15kW 的标准配电柜或配电箱，其中包含 ①1 路黄绿色芯线为保护地线（保护零线）PE，②1 路浅蓝色芯线为工作零线 N，③④⑤黄、绿、红色芯线各 1 路分别为相线 L1、L2 和 L3，如图 2-5 所示。

图 2-5 附件 CAB-AC450-0402 交流电源线详解

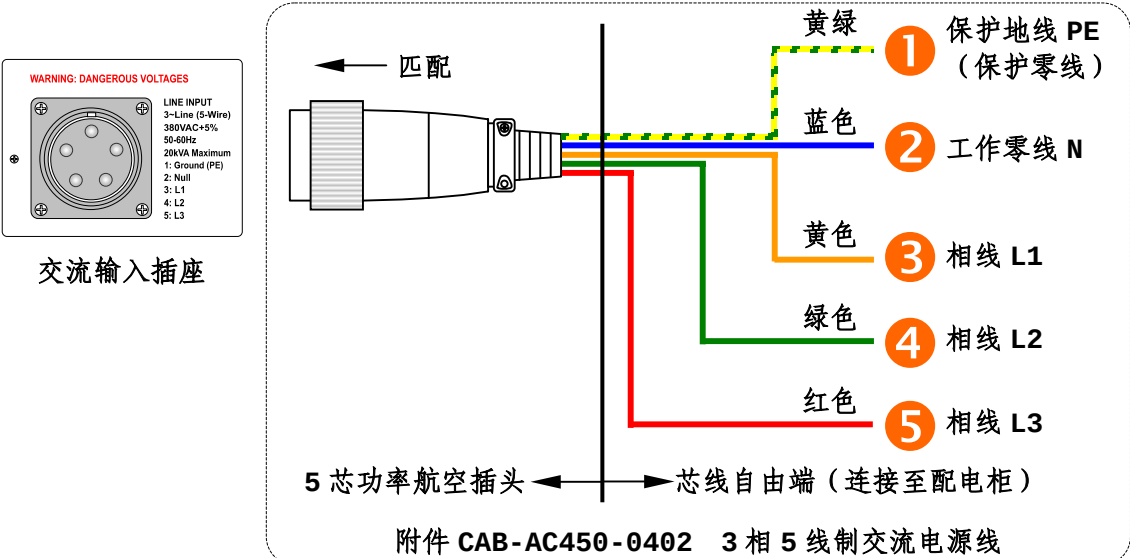
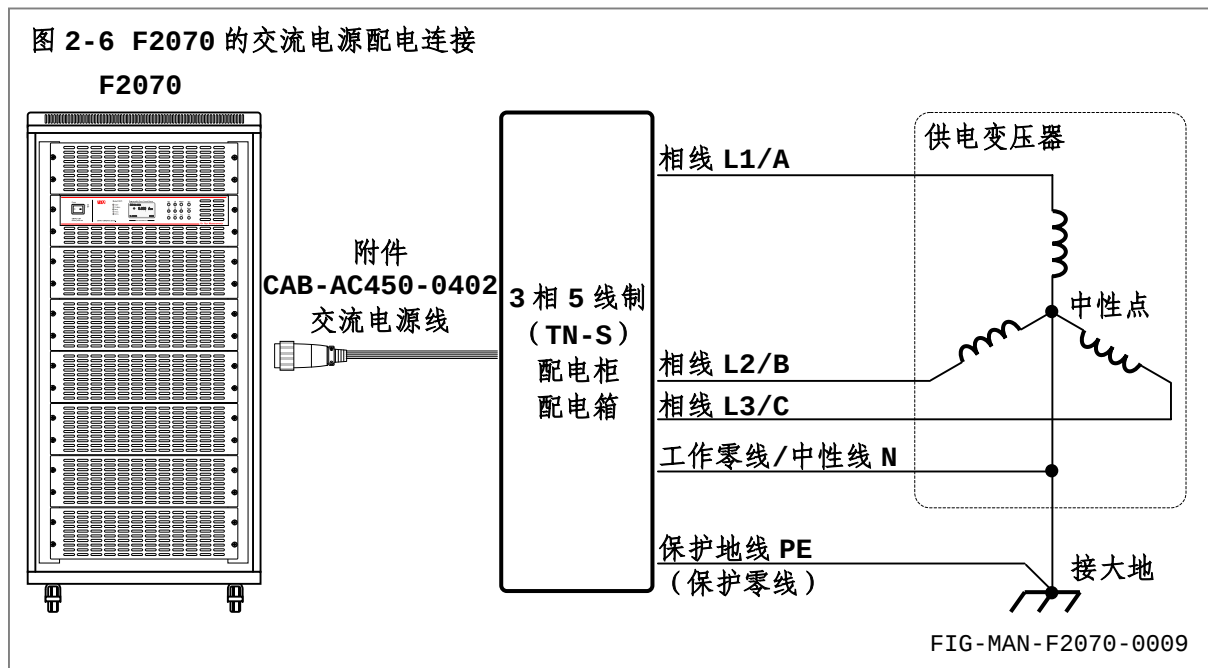


FIG-MAN-F2070-0008

F2070 的交流电源配电连接如图 2-6 所示。



F2070 对 3 路相线 L1、L2 和 L3 的相序无要求。由于内部部分部件使用单相交流 220V 供电，因此必须可靠连接工作零线 N。根据国标规定，相线 L1、L2、L3 之间的电压为线电压 380V，相线 L1、L2、L3 与工作零线 N 之间的电压均为相电压 220V。

警告

错接相线和工作零线将造成重大电击事故，并造成针对操作者的人身伤害、F2070 内部部件损毁以及供电线路上其他用电设备的损毁。

遵循用电设备的基本安全准则，F2070 必须通过附件 CAB-AC450-0402 交流电源线进行可靠接地。接地通过电源线中的黄绿芯线保护地线（保护零线）PE 连接至配电柜或配电箱的保护地线（保护零线）PE 端达成，用户必须保证配电柜或配电箱内的保护地线（保护零线）PE 可靠与大地连接。

警告

接地不良可能导致 F2070 金属机柜壳体、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设备运行故障或设备损毁。

F2070 采用 TN-S 接地方式 3 相 5 线制供电，即设备严格通过保护地线（保护零线）PE 接地，并严禁采用接零保护（即 TN-C 接地方式，合并工作零线 N 与保护地线（保护零线）PE）。工作中的 F2070 将由工作零线 N 拉取部分工作电流，造成工作零线 N 与大地之间的电位差。此外，共用此配电柜或配电箱的其他三相或单相设备也可能由于 3 相不平衡导致工作零线 N 与大地之间的电位差。工作零线 N 与大地之间电位差将导致 TN-C 接地方式接零保护时 F2070 的机柜体带电。

警告

接零保护可能造成 F2070 金属机柜壳体带电，导致潜在的电击危险，并造成可能的电击事故或设备运行故障或设备损毁。

某些不严格遵循 TN-S 接地方式 3 相 5 线制标准的 3 相配电柜或配电箱内部可能存在工作零线端子与保护地线（保护零线）端子混用，并在 F2070 已正确连接电源线的情况下造成事实上的接零保护。用户必须严格确保配电柜或配电箱内部的工作零线端子和保护地线（保护零线）端子无电气混用现象，以及确保保护地线（保护零线）端子已牢靠连接至大地并与大地等电位。

2.4.2 RS-232C 和 USB-232 接口

F2070 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 CAB-232DCE-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，F2070 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-A 电缆，通过附件 CAB-USB-AFM-2 延长连接至计算机的 USB Standard A 插座。RS-232C 和 USB 接口可通过前面板键盘切换，请参阅 3.20 中的相应内容。

2.4.3 功率电流输出接口

F2070 后面板配置 5 芯电流输出航空插座，向负载输出电流，如图 2-7 所示。其中①为安全接地插孔，电流为正向输出时，电流由②④插孔流出，经过负载后由③⑤插孔柱流入。

图 2-7 功率电流输出接口航空插座

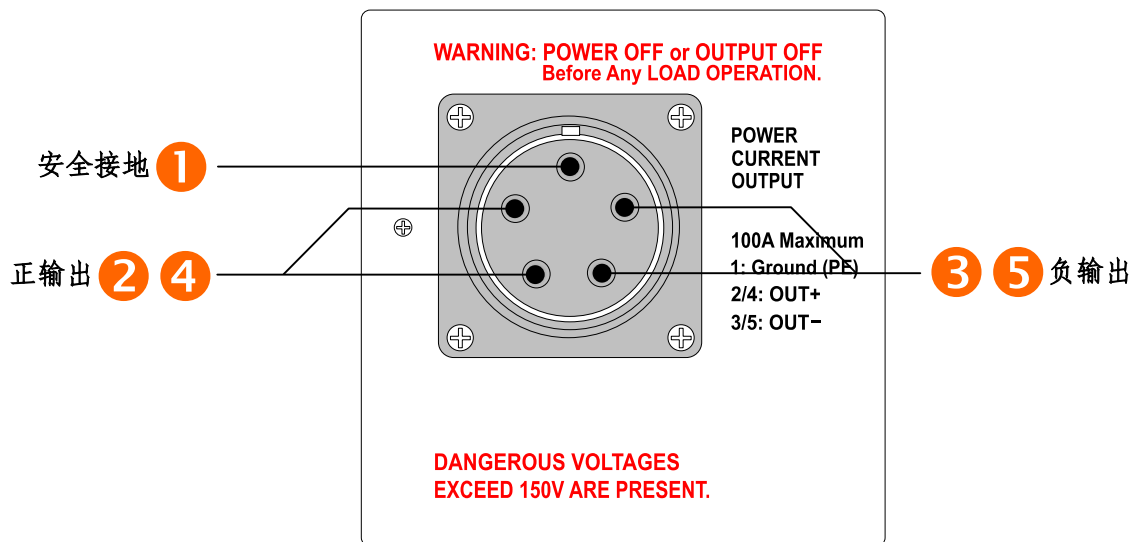


FIG-MAN-F2070-0010

图 2-8 附件 CAB-DC080-2 电流输出电缆详解

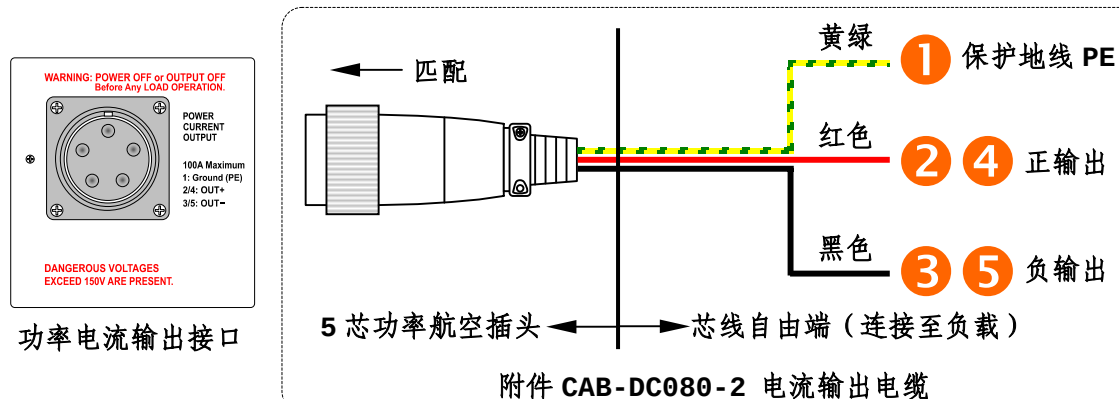


FIG-MAN-F2070-0011

①安全接地插孔在 F2070 内部连接至底板和机箱体，并经由电源输入组件通过交流电源线的保护地线（保护零线）PE 与大地相连。电源线及其连接方法请参阅 2.4.1 中的详细内容。

F2070 通过附件 CAB-DC080-2 电流输出电缆连接至负载。附件 CAB-DC080-2 一端为 5 芯功率航空插头，与 F2070 后面板的 5 芯电流输出航空插座匹配，另一端为芯线自由端，包含①保护地线芯线、②正输出芯线和③负输出芯线，负载两端分别连接至②和③。如图 2-8 所示。

负载存在导电表面或外壳时，建议将此导电表面或外壳通过附件 CAB-DC080-2 的①保护接地芯线接地，以策操作者的人身安全。F2070 为浮动电流输出，因此即使导电表面或外壳与 F2070 电流输出端存在电气连接关系，也可安全接地。不可将与 F2070 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，或设备内部保护。

附件 CAB-DC080-2 的电流输出芯线（②④）和（③⑤）及其自由端配置之接线片的长期工作最大耐受电流为 80A。用户必须确保电流输出芯线自由端的接线片与负载紧密牢固连接。不够紧密的连接将导致较大的接触电阻，并在 F2070 输出电流较大时于连接面产生大量热量，以及导致潜在的火灾事故，松动的连接还可导致输出断续故障、火花以及设备内部电路损毁。

警告

不够紧密的负载电气连接将导致长时间工作过程中连接接触面发热，并导致潜在的火灾事故。松动的负载连接可能造成设备损毁。

通常，用户无需更换电缆。负载距离 F2070 较远时，用户可在采购 F2070 时采购加长电缆。我们不建议用户自行加长电流输出芯线，以避免由于延长连接不牢固和芯线导体截面积不足导致的电缆发热故障。

警告

F2070 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。

F2070 的输出直流电压可达到 120V 以上，最大开路输出电压接近 150V，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高阻状态，以避免操作负载过程中输出端高压对操作者人身安全的威胁。输出端状态及设置方法请参阅 3.8 中的内容。

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。

2.4.4 触发输出 BNC 接口

F2070 配置 3 路触发输出 BNC 接口，如图 2-9 所示。由 3 路输出接口输出的触发信号具有同等优先级，同步性能优于 $\pm 1\mu\text{s}$ 。3 路触发输出接口均与单芯线屏蔽电缆的标准 BNC 插头匹配。用

图 2-9 触发输出 BNC 接口

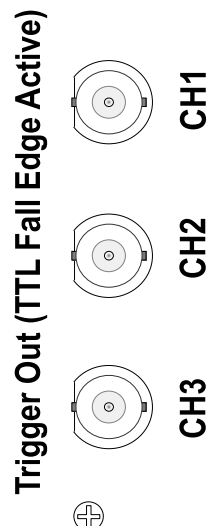


FIG-MAN-F2070-0012

户可制备或使用成品 BNC 屏蔽电缆完成 F2070 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信号，外壳为触发信号地。触发信号地与金属机柜外壳和安全地等电位。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 3.16 和 3.17 中的详细内容。

2.5 冷却水路连接

F2070 内部主散热器采用水冷散热，冷却水由后面板右下方的进水宝塔接头①进入 F2070，流经主散热器后，由后面板左下方的出水宝塔接头②流出，如图 2-10 所示。

图 2-10 F2070 的冷却水进水和出水宝塔接头

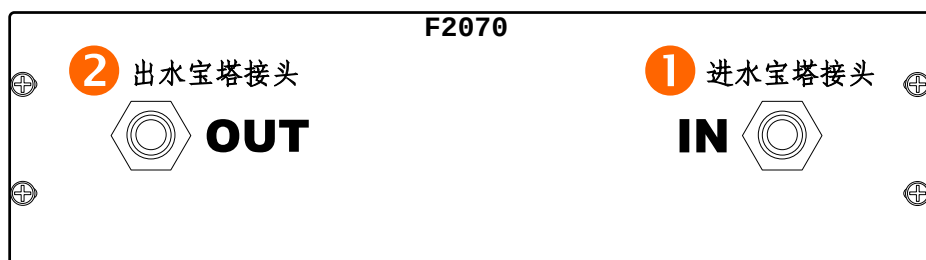


FIG-MAN-F2070-0013

2.5.1 冷却水供应

由于 F2070 的散热功率接近 5kW，请使用压力不低于 $1\text{kg}/\text{cm}^2$ ，制冷功率不低于 5kW 的水冷机为 F2070 单独供应冷却水。如果 F2070 与其他大功率设备共用一台水冷机，请确保供应至 F2070 的水压不低于 $1\text{kg}/\text{cm}^2$ ，且为 F2070 分配的制冷功率不低于 5kW。

警告

水压过低将触发 F2070 内部的水压过低保护，使 F2070 无法输出电流。

警告

不足的制冷功率将导致 F2070 内部产生的热量无法及时由冷却水带出，并导致主散热器温度上升，并可能触发 F2070 的过热保护，使 F2070 无法输出电流。

请务必确保冷水机具有正确的电气连接，且已经正确接地。未正确接地的水冷机可能携带高于安全限制的电压，并通过可导电的水使 F2070 外壳带电。

警告

未正确接地的水冷机将导致 F2070 外壳带电，并导致严重的针对操作者的电击事故。

2.5.2 冷却水管路连接

请务必正确选择供应冷却水的水管，以及用于密封固定水管的喉箍。

警告

冷却水为导电体，泄露的冷却水可能通过 F2070 内部或外部的导电部件使 F2070 的金属外壳带电，并造成针对操作者的严重电击事故。

F2070 的进水宝塔接头①和出水宝塔接头②外径均为 19mm，适配内径 19mm 的橡胶水管。请使用可承受至少 2kg 水压的水管将 F2070 连接至水冷机。其中，进水宝塔接头①连接至水冷机的出水口，出水宝塔接头②连接至冷水机的进水口，如图 2-11 所示。

注

内径过小的水管可能无法与宝塔接头匹配，或者可能匹配困难。

图 2-11 将 F2070 连接至冷水机

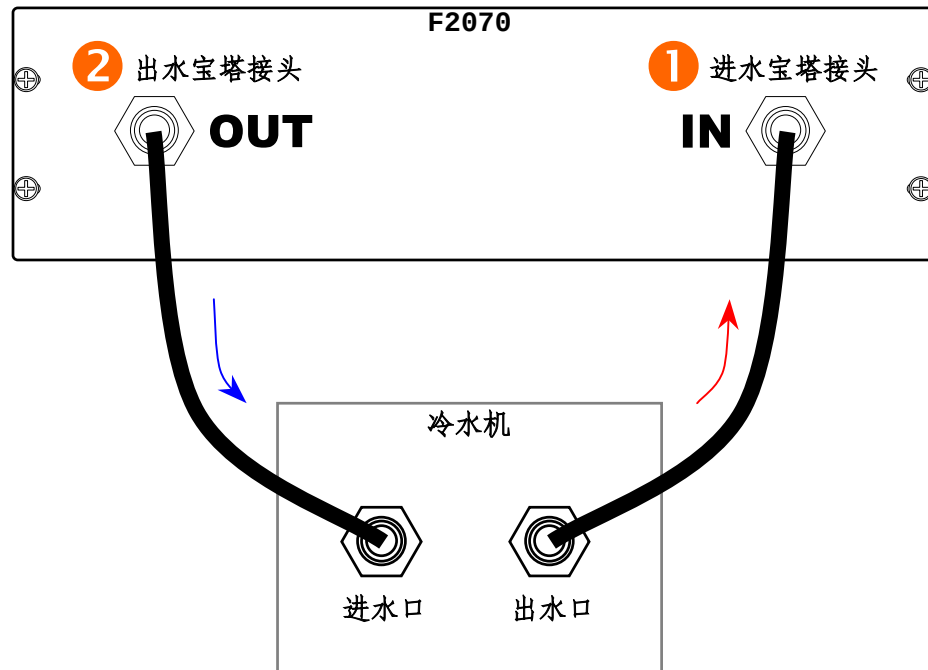


FIG-MAN-F2070-0014

警告

内径过大的水管将导致可能的冷却水泄露，并可能导致漏电及由此造成的针对操作者的电击事故。

警告

耐压不足的水管将在施加水压时膨胀甚至爆裂，导致冷却水泄露，并可能导致漏电及由此造成的针对操作者的电击事故。

请使用内径范围正确的喉箍将水管与 F2070 的宝塔接头密封固定。喉箍的内径范围与水管外径相关，通常喉箍内径范围应恰好容纳水管外径。请勿使用内径过大的喉箍，此喉箍在过分施紧时，形状通常会由正常的圆形变化为椭圆形，导致水管的部分管壁无法与宝塔接头密封贴合，并导致冷却水泄露。

警告

内径过大的喉箍将导致水管与宝塔接头密封不严，使冷却水泄露，并可能导致漏电及由此造成的针对操作者的电击事故。

请尽量避免连接至 F2070 的水管发生弯折和盘绕。弯折和盘绕将增加管路的水阻并降低水流速率，以及造成 F2070 内部主散热器无法充分散热。

请避免使用过长的水管供应冷却水，或者将 F2070 安置于明显高于水冷机的平面上，或者将水管悬于较高的高度，这三种情形将增大水冷机内水泵的扬程负荷，可能导致 F2070 内部主散热器无法充分散热。

2.5.3 冷却水温度

环境湿度较高时，空气中的水蒸气将于低于环境温度的表面降温冷凝，而后结露或结霜。露水以及霜融化后形成的水为导电体，可能造成 F2070 内部电路故障和损毁，并可能造成 F2070 的金

属外壳携带高于安全限制的危险电压，并导致针对操作者的严重电击事故。

警告

结露或结霜可能导致 F2070 内部电路故障和损毁，并可能导致漏电及由此造成的针对操作者的严重电击事故。

因此，必须将冷水机的设定温度设置为高于环境温度，以避免结露或结霜。如果与 F2070 共用冷水机的设备要求冷却水温度低于环境温度，请务必为 F2070 提供额外的单独冷水机。

2.5.4 冷却水水质

长时间使用水质较差的冷却水将造成杂质堆积于 F2070 内部水管管路中，并可能造成管路部分或完全阻塞，使主散热器无法获得充分散热，以至温度过高引发 F2070 温度报警。

建议使用蒸馏水或纯净水作为冷却水。如果环境温度过低可能导致冷却水结冰，请于冷却水中添加适量的防冻液。结冰的冷却水体积膨胀，并导致内部管路破裂和冷却水泄露。

警告

自来水中可能携带锈蚀杂质，并可能携带泥沙，二者均易阻塞水路。

警告

为自来水消毒的氯基化合物将腐蚀 F2070 内部的铜质水管，长时间使用将造成内部冷却水泄露。

警告

严禁向冷却水中添加腐蚀性的酸、碱和盐作为防冻剂，否则将腐蚀 F2070 内部管路造成冷却水泄露，并导致漏电及由此造成的针对操作者的严重电击事故。

请着重注意长时间未更换的冷却水。水中可能生长有机物，有机物可能依附于水管内壁，增加水流阻滞，并吸附固体杂质造成水管内径减小，降低水流速率，使主散热器无法获得充分散热。

2.5.5 每次通电之前

水冷散热存在漏水危险，尤其在长时间使用之后，F2070 内部的管路和管件可能出现老化和金属疲劳，导致密封失效和冷却水泄露。

警告

泄露的冷却水对于任何用电器均有巨大风险，并可能导致严重的电击事故。

因此每次通电之前，尤其在将电源线连接至后面板插座之前，应首先通入水泵加压的冷却水，并观察至少 30 分钟，确认无冷却水泄露之后，方可将电源线插入 F2070 后面板插座。

出现冷却水泄露时，切勿贸然通电，请务必联系北京乐真科技有限公司进行维修。

警告

F2070 出现冷却水泄露时，严禁通电，否则可能导致针对使用者的严重电击事故，并可能导致 F2070 损毁。

2.5.6 冷却水泄放

长时间不通电使用的 F2070 应进入储存状态。进入储存状态前应首先将冷却水完全泄放。长时间不流动的冷却水，杂质将沉淀于 F2070 内部管路中并造成阻塞。储存温度低于零摄氏度将使未泄放的冷却水结冰膨胀，导致 F2070 内部管路破裂和冷却水泄露。

警告

带电泄放冷却水时，冷却水喷溅将导致 F2070 外壳带电，并导致针对操作者的严重电击事故。

请遵循以下顺序泄放冷却水：

- ① 务必切断 F2070 的电源，并将电源线由后面板插座中取出。
- ② 务必切断冷水机的电源，并将电源线由插座中取出。
- ③ 保持 F2070 与水冷机的管路密封连接。
- ④ 使用冷水机的泄放阀将冷水机内贮藏的大量冷却水排净。
- ⑤ 断开冷水机一端的出水管接头，并将存留于水管内的冷却水排净。
- ⑥ 断开冷水机一端的进水管接头，并将存留于水管内的冷却水排净。
- ⑦ 使用压缩空气向一根水管内吹气，将 F2070 内部水路残存的冷却水排出。
- ⑧ 使用压缩空气向另一根水管内吹气，将 F2070 内部水路残存的冷却水排出。
- ⑨ 于 F2070 一端的两个水管接头下方均放置足量的强吸水性棉布，而后顺序断开两个水管接头，并将流出的少量冷却水擦净。

顺序执行完成上述步骤后，F2070 可进入储存状态。

2.6 初始设置和开机检测

2.6.1 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、使用环境安全以及设备安全。

1. 确认后面板断路器位于分断位置，且电源线已由电源输入组件中取出。
2. 请遵循 2.5.5 中的内容对 F2070 进行试水，并务必确认 F2070 内部管路确无冷却水泄露现象。出现冷却水泄露时，切勿贸然通电，请务必联系北京乐真科技有限公司进行维修。

警告

F2070 出现冷却水泄露时，严禁通电，否则可能导致针对使用者的严重电击事故，并可能导致 F2070 损毁。

3. 将直流电阻为 2Ω 、耗散功率容量大于 5000W 的负载通过电流输出电缆 CAB-DC080-2 牢固连接至后面板功率电流输出接口航空插座，并将负载通过电流输出电缆的保护接地芯线妥善接地。
4. 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 F2070 的电源，否则可能造成 F2070 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，将造成设备无法正常运行。高于后面板标示的输入线电压时，将造成设备损毁及可能的电击或火灾事故。

5. 依据 2.4.1 中的内容对交流电源线 CAB-AC450-0402 自由端进行配电柜/配电箱连接。

2.6.2 开机检测

完成上述检查后，将交流电源线 CAB-AC450-0402 牢固连接至后面板交流输入插座，即可进入开机检测流程：

6. 扳动后面板断路器至闭合位置，而后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 F2070 的开机启动画面



FIG-MAN-F2070-0015

图 2-13 F2070 的开机检测界面

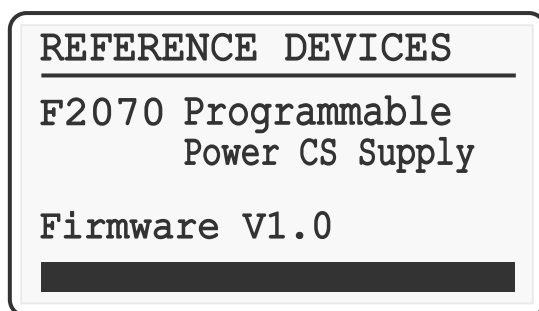


FIG-MAN-F2070-0016

7. 约 10 秒后，进入图 2-13 所示开机检测界面：
8. 开机检测完成后，进入图 2-14 所示标准显示界面：

图 2-14 F2070 的标准界面



FIG-MAN-F2070-0017

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 200V DC。
按 **OUT** 键将输出端设置为正常输出状态，允许电流输出。
按 **Ent** 键进入电流设置界面。按 **◀**、**▶** 键在各位中移动，并按 **▲**、**▼** 键设置输出电流为+5.000A，按 **Ent** 键确认并返回标准显示界面，并等待至少 10 秒。
使用万用表测量负载两端电压，电压约为 10V。
按 **Out** 键将输出端设置为高阻状态并断开负载连接。按 **Out** 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。人体任何部位切勿接触功率电流输出电缆的正、负输出芯线内部导体以及与其有电气连接的任何部件。按 **Out** 键将输出端设置为高阻状态，禁止电流输出，至少等待 5 秒后关机。

注

如果设备至此步骤均操作良好，则 **F2070** 基本功能正常。

10. 成功完成上述检测流程后，设备即可投入正常使用。请进入第 3 章得到关于 **F2070** 的完整操作信息。

<本页为空页>
This Page Intentionally Left Blank

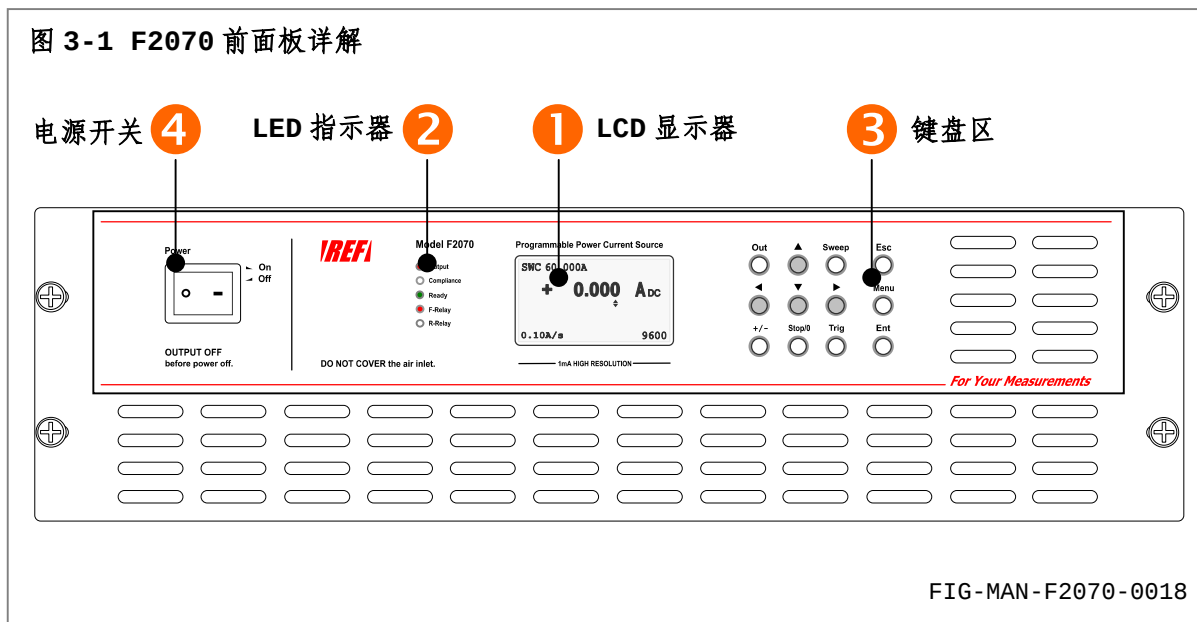
操 作

3.1 简介

本章包含 F2070 程控功率电流源的操作方法。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 为电流线性渐变输出方式，3.6 为电流方向和换向延迟时间，3.7 为输出电压范围和负载直流电阻限制，3.8 为设置输出端状态，3.9 为电流设置停止和快速归零，3.10 为电流扫描，3.11 为输出电流准确度，3.12 为输出阻抗，3.13 为输出补偿网络，3.14 为电流纹波，3.15 为水冷系统保护，3.16 为常规触发输出，3.17 为扫描触发输出，3.18 为键盘锁，3.19 为设置计算机接口，3.20 为恢复出厂设置，3.21 为接地关系，3.22 为键盘菜单结构。

3.2 前面板详解

F2070 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：



3.2.1 LCD 显示器

F2070 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安培 A， $1A=10^3mA=10^6\mu A$ 。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 或 SWC。
- 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 扫描触发状态指示：显示扫描触发的方式、间隔时间和声响提示状态。
- ⑥ 常规触发状态指示：显示常规触发方式、延迟时间和声响提示状态。
- ⑦ 波特率指示：显示当前波特率，单位为 bps (bit per second)。
- ⑧ 键盘锁定指示：显示键盘锁定状态。
- ⑨ 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

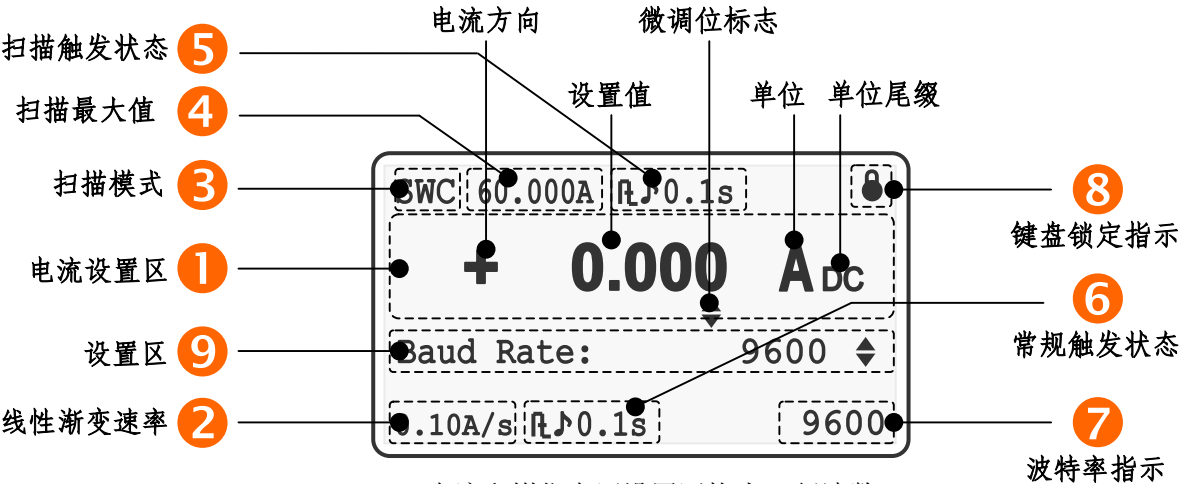


FIG-MAN-F2070-0019

图 3-3 F2070 的 LED 指示器

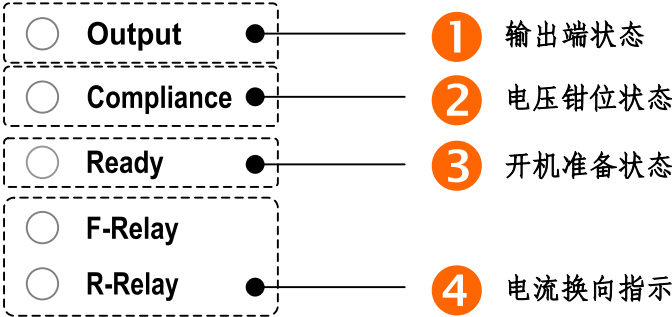


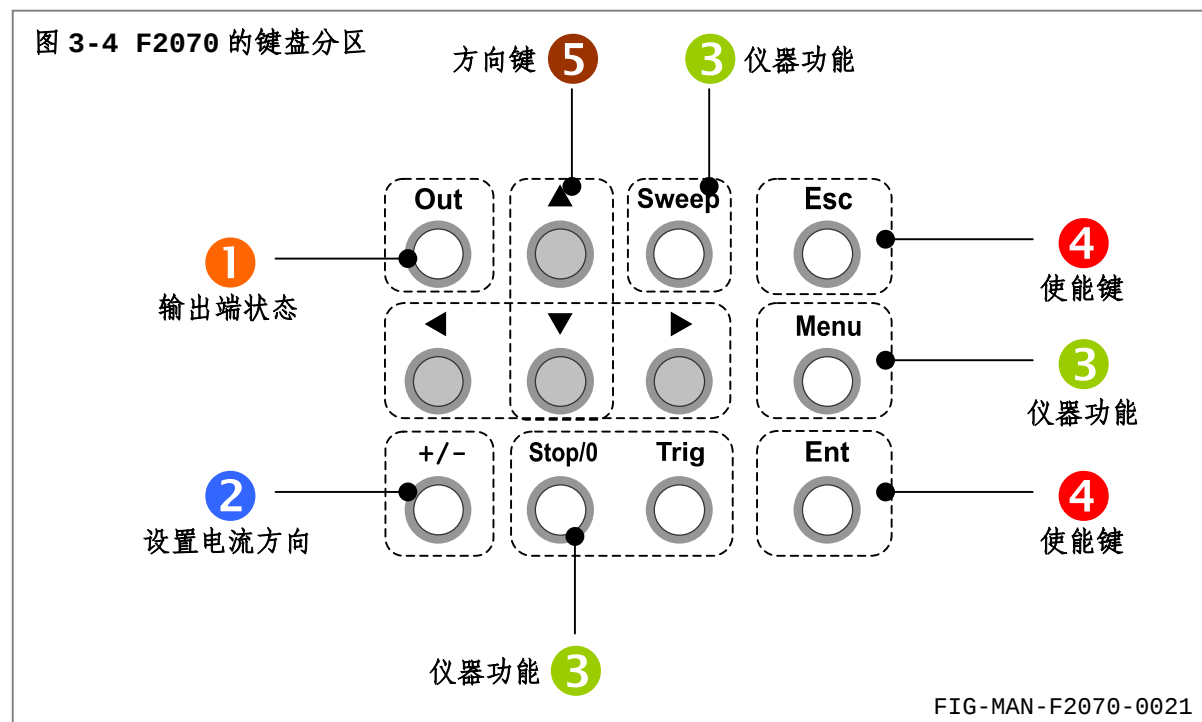
FIG-MAN-F2070-0020

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开机准备状态和④电流换向指示等参数选项，LED 点亮时，对应功能处于开启状态，如图 3-3 所示。

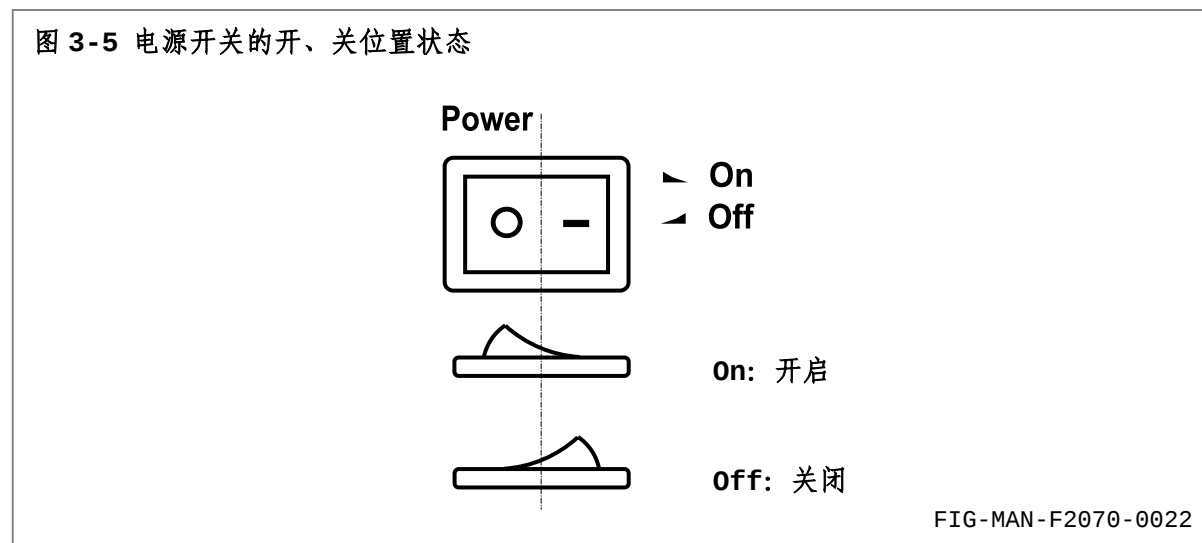
3.2.3 键盘区

F2070 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 3-4 所示。



3.2.4 电源开关

F2070 的电源开关采用船形开关，开、关位置状态如图 3-5 所示。



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：

Out： 切换输出端状态为正常输出/高阻状态。

❷ 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。

❸ 仪器功能：

Trig： 设置常规触发输出模式、延迟时间和声响提示状态。

设置扫描触发输出模式、间隔时间和声响提示状态。

Menu： 设置计算机接口、串行通讯波特率、电流线性渐变速率、扫描模式、扫描最大值和电流换向延迟时间等各项高级功能。

Sweep： 根据扫描模式、扫描最大值、电流线性渐变速率等参数进行电流扫描。

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。

❹ 使能键：

Ent： 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。

❺ 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 设置输出电流

F2070 提供 2 种输出电流的键盘设置方法：微调和电流设置界面。

3.4.1 微调输出电流

标准显示界面下，当前输出电流值低 3 位（1mA/10mA/100mA 位）中某一位下方显示微调位。使用方向键 **◀** 和 **▶** 在低 3 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，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。

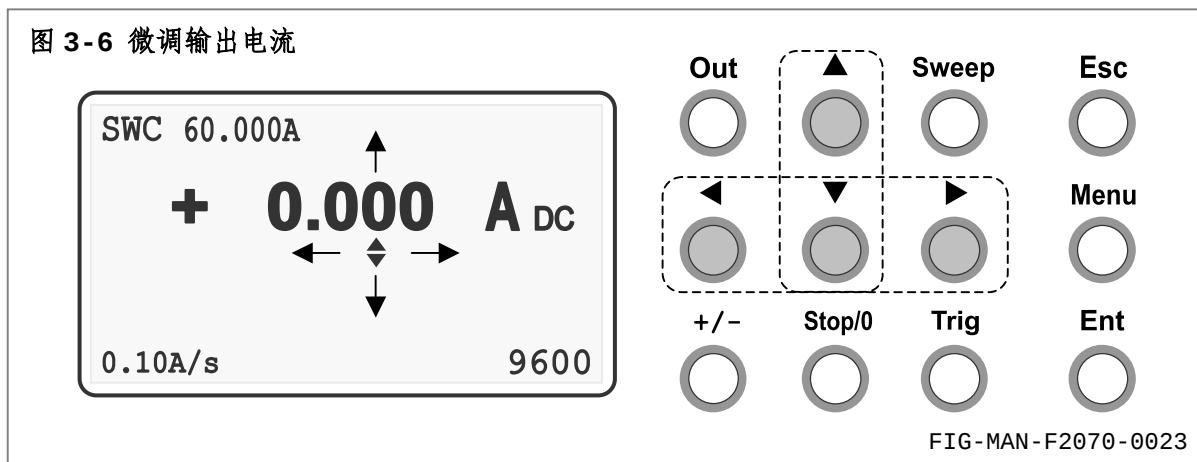
微调输出电流过程中，输出电流随微调操作同步生效，输出电流速率由负载的时间常数决定，与电流线性渐变速率无关。

微调输出电流遵循如下规则：

- ① 微调位为 9，且按方向键 $\blacktriangle$ 时，微调位数值为 0 并向高位进位。
- ② 当前输出电流为最大值 65.000A 且按方向键 $\blacktriangle$ 时，输出电流不变化。
- ③ 微调位+1 使输出电流大于最大值 65.000A 时，当前输出电流限制为最大值。
- ④ 微调位为 0，且按方向键 $\blacktriangledown$ 时，微调位数值为 9 并向高位借位。
- ⑤ 微调位为 0，并且所有高位均为 0 时，按方向键 $\blacktriangledown$ 后微调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 **CURFD[CR]**、**CURFUP[CR]** 和 **CURFDOWN[CR]** 实现微调控制，请参阅第 4 章中的相关内容。

图 3-6 微调输出电流

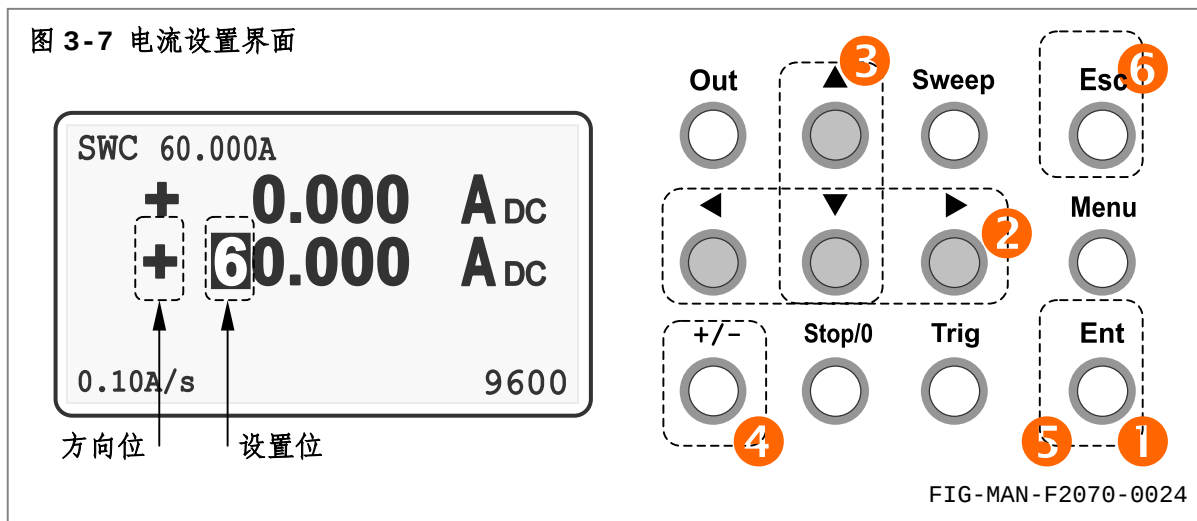


3.4.2 电流设置界面

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：

- ① 按 **Ent** 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 $\blacktriangleleft$ 和 $\blacktriangleright$ 使设置位向左、右循环移动；
- ③ 使用方向键 $\blacktriangle$ 和 $\blacktriangledown$ 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 **Ent** 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 **Ent** 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。
- 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 65.000A 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。

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 4 章中的相关内容。

3.5 电流线性渐变输出方式

3.5.1 电感性负载的时间常数

F2070 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 $L_{LOAD}/R_{LOAD}=\tau_{LOAD}$ (s) 为负载的时间常数。

过大的电感性负载时间常数将引起电流源的超调响应，并在负载中产生电流过冲。

3.5.2 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以及由过冲引起的寄生阻尼振荡。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，如图 3-8a 所示。寄生阻尼振荡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寄生振荡持续时间。

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。

3.5.3 电流线性渐变输出方式

F2070 具有足够快的频率响应，可保证相对很低的纹波系数，但在进行电流阶跃设置时更易于产生电流过冲。因此 F2070 采用电流线性渐变输出方式应对电流的阶跃设置。

当用户设置电流变化一定幅度时，F2070 将以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。如图 3-8b 所示。

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 **STOP[CR]** 命令外无法进行其它计算机接口操作。

3.5.4 设置电流线性渐变速率

标准显示界面下，请遵循以下步骤设置电流线性渐变速率：

- ❶ 使用 **Menu** 键进入菜单，按 **▲**、**▼** 方向键选择“Ramp Rate”，并按 **Ent** 键进入电流线性渐变速率设置界面；
- ❷ 按 **▲**、**▼** 方向键在 0.01—5.0A/s 范围内增大或减小电流线性渐变速率，调整步进为 0.01A/s；
- ❸ 按 **Ent** 键确认选择；或 ❹ 按 **Esc** 键保留原速率并返回标准显示界面。

图 3-8 电流超调过冲和电流线性渐变输出方式

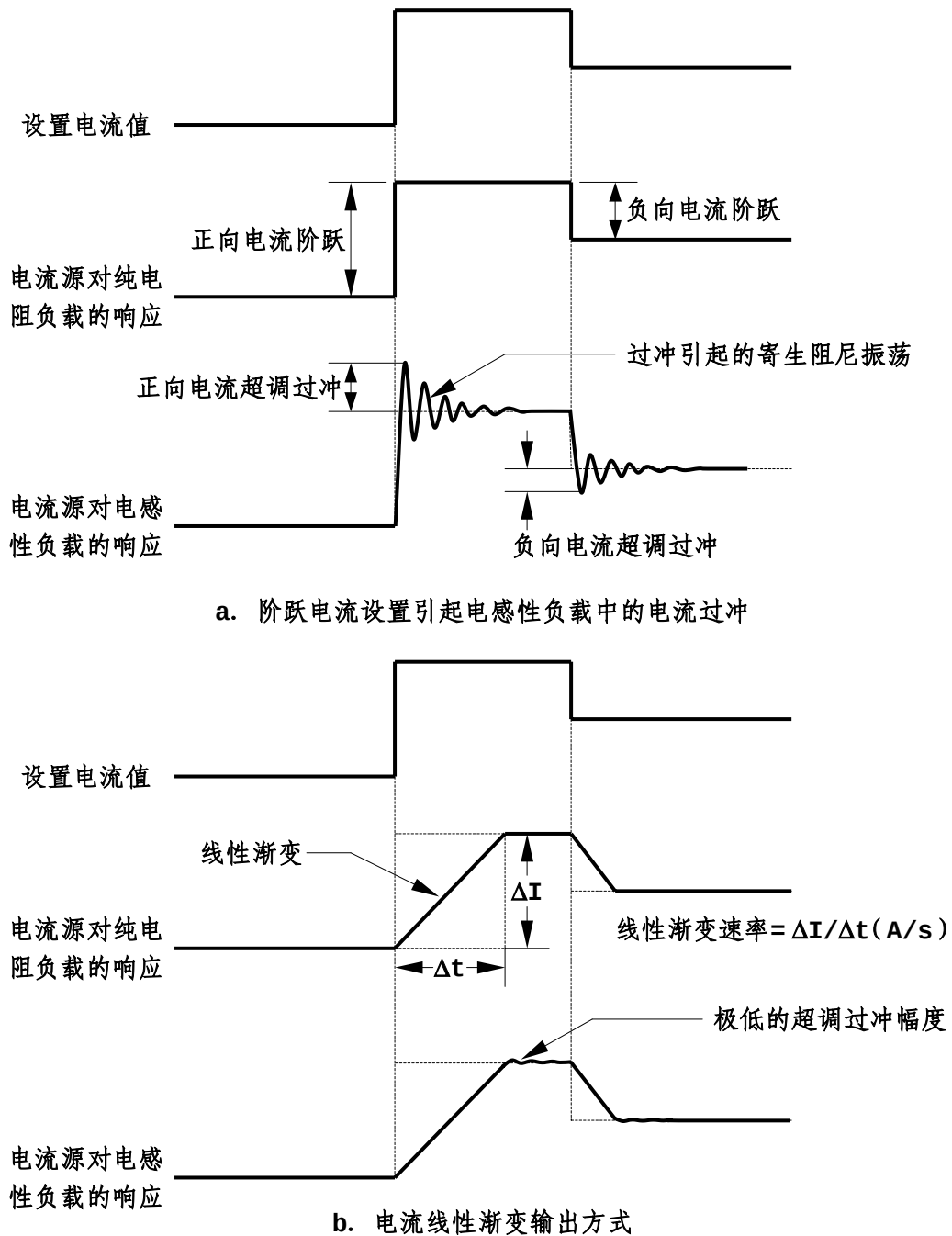


FIG-MAN-F2070-0025

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。

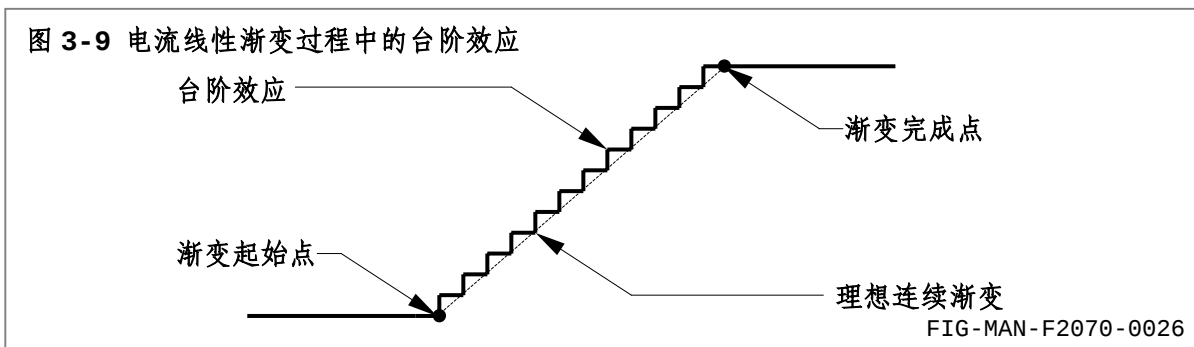
注

电流线性渐变速率保存于 F2070 内部非易失性存储器内，并于下次开机时保持。

电流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 4 章中的相关内容。

3.5.5 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 F2070 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 3-9 所示。F2070 的 DAC 设置时间密集度为 50 次/s，在 5A/s 最高渐进速率下，每一台阶的高度限制于 100mA，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。



3.5.6 渐变结束声响

电流线性渐变结束时，F2041 提供声响提示用户渐变已完成。当电流渐进速率较低且步进较大时，用户需等待较长的渐变时间，渐变结束声响为用户提供简单的渐变结束时刻判断方法，而无需用户时刻注视显示器。换向声响和电流扫描过程中的渐变声响均与渐变结束声响设置同步。

然而，当电流渐进速率较高，且步进较小时，频繁设置电流将导致不断出现的渐变结束声响。在需要安静的测试环境中，可遵循以下步骤关闭渐变结束声响：

- ① 使用 **MENU** 键进入菜单。按 **▲**、**▼** 键选择 “Ramp Audio”，并按 **ENTER** 键进入渐变声响设置界面；
- ② 按 **▲**、**▼** 方向键在选项 “On” 和 “Off” 之间循环选择；
- 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。

注

渐变结束声响保存于 F2041 内部非易失性存储器内，并于下次开机时保持。

渐变结束声响也可通过计算机接口命令 **RAMPAUDIO[CR]** 设置，并通过查询 **RAMPAUDIO?[CR]** 查询当前渐变结束声响是否开启，请参阅第 4 章中的相关内容。

3.6 电流方向和换向延迟时间

3.6.1 电流方向和换向方式

F2070 采用继电器换向方式提供正、反两个电流方向。开机后 F2070 将电流方向设置为正向。

电流方向为正向时，显示器中当前输出电流符号为 “+”，反之为 “-”。正向电流下，电流由后面板功率电流输出接线柱的红色柱头流出，经由负载后由黑色柱头流入。反向电流下，电流由黑色柱头流出，经由负载后流入红色柱头。

继电器换向方式可提供大小完全相同的相反方向输出电流。在霍尔效应测试系统中，这一特性将产生完全相同的相反方向磁场，保证测量准确度不受正、负磁场差异的影响。

3.6.2 电流换向过程

在标准显示界面且输出端为正常输出状态下，按 **+/-** 键直接切换电流方向。在电流设置界面中，**+/-** 键用于改变电流设置值的方向，并在设置完成按 **Ent** 键后生效。

图 3-10 输出端为正常输出状态时由正向至反向的完整电流换向过程

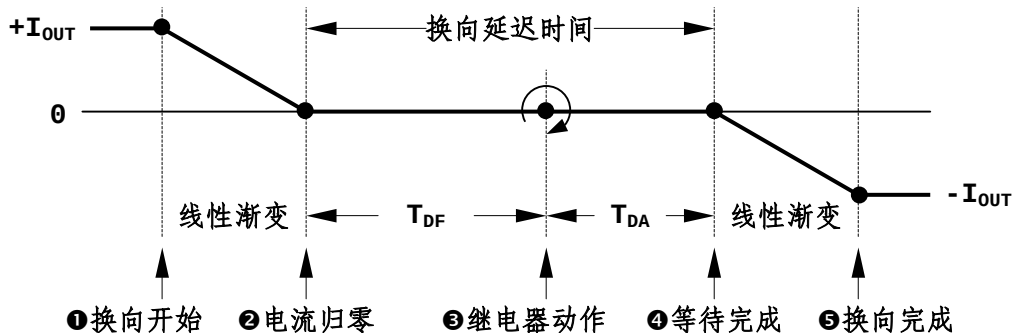


FIG-MAN-F2070-0027

输出电流不为 0 时切换电流方向将使电感性负载产生强烈的反电动势。反电动势的电压可能高于安全电压限制，并在操作者接触负载时产生电击事故。此外强烈的反电动势可能导致 F2070 内部电路损毁。因此电流换向必须于零输出电流下进行。

输出端为正常输出状态时切换电流方向，F2070 首先①依据设定的电流线性渐变速率将当前电流降至 0，②等待换向前延迟时间 T_{DF} 使输出电流稳定后③驱动继电器换向，并在④等待换向后延迟时间 T_{DA} 后⑤依据设定的电流线性渐变速率将输出电流恢复至换向前的值。换向瞬间当前输出电流值符号相应改变。完整的电流换向过程如图 3-10 所示。

输出端为高阻状态时，F2070 立即切换输出电流方向，并相应改变输出电流值的符号。

切换电流方向也可通过计算机接口命令完成。F2070 提供 2 种程控换向方式，使用命令 **PN[CR]** 换向时，换向过程遵循图 3-6 所示时序，使用命令 **REV[CR]** 换向时，F2070 只完成前 4 个步骤，换向完成后的电流值为 0。通过改变命令 **CUR[CR]** 参数的方向也可直接设置电流方向。此外，可通过查询 **DIR?[CR]** 查询当前电流方向，或通过查询 **CUR?[CR]** 返回的电流值符号判断当前电流方向。计算机接口操作请参阅第 4 章中的相关内容。

3.6.3 设置换向延迟时间组合

F2070 提供 5 种换向延迟时间组合，以适应不同时间常数的电感性负载，如表 3-1 所示：

表 3-1 换向延迟时间和适用电感性负载时间常数

TAB-MAN-F2070-0004

延迟组合	换向前延迟时间 T_{DF}	换向后延迟时间 T_{DA}	适用电感性负载时间常数 τ_{LOAD}
1S+┐+1S	1S	1S	<400ms、最大 1000ms
2S+┐+1S	2S	1S	<800ms、最大 2000ms
3S+┐+1S	3S	1S	<1200ms、最大 3000ms
4S+┐+2S	4S	2S	<1600ms、最大 4000ms
5S+┐+3S	5S	3S	<2000ms、最大 5000ms

警告

负载时间常数过大而延迟时间过短将使换向时输出电流无法完全归零，导致明显的换向电流冲击，并造成换向继电器的触点损伤、寿命降低以及可能的损毁。

标准显示界面下，请遵循以下步骤设置换向延迟时间：

- 按 **Menu** 键进入菜单，按 **▲**、**▼** 方向键选择“Reverse Delay”，并按 **Ent** 键

进入换向延迟时间设置界面；

② 按 、 方向键在各选项中循环选择；

③ 按  键确认选择；或 ④ 按  键保留原延迟时间组合并返回标准显示界面。

设置完成后，在电流换向过程中前面板显示器当前电流值下方根据设定的延迟时间组合显示延时过程，并以 1s 间隔发出声响提示，直至 T_{DA} 结束。

注

换向延迟时间组合保存于 F2070 内部非易失性存储器内，并于下次开机时保持。

换向延迟时间组合也可通过计算机接口命令 **REVDELAY[CR]** 设置，或通过查询 **REVDELAY?[CR]** 查询当前换向延迟时间组合，请参阅第 4 章中的相关内容。

3.6.4 换向冲击

除去由于时间常数与换向延迟时间不匹配造成的换向电流冲击外，也可能由于电流的零点误差而产生换向冲击。电流换向过程中，继电器的动片由一端向另一端的切换所需时间内，电流输出端将短暂开路。如果此时输出电流不为 0，短暂开路将造成输出端呈现高压，并在动片切换到位时将此高压施加于负载造成电流冲击。F2070 内部具有零点保持电路，可保证切换过程中小于 3mA 的输出电流，并有效抑制短暂开路期间输出端呈现的电压，从而最大程度上避免由此导致的换向冲击。

测量过程中，可通过以下 2 个方法避免换向冲击造成的影响：

- (1) 使用尽可能长的换向延迟时间组合。
- (2) 使用计算机接口控制换向时，务必等待 F2070 换向完毕且返回接口响应并等待足够长的时间再继续后续测量步骤。
- (3) 使用硬件常规触发输出连接的应用中，使用尽可能长的触发延迟时间。
- (4) 电流扫描应用中使用硬件扫描触发输出连接，并使用触发输出信号控制测量仪器进行同步测量。在电流扫描所涉及的换向过程中，F2070 不输出触发信号，从而避免由触发输出信号控制的测量仪器在换向过程中的测量行为。

3.7 输出电压范围和负载直流电阻限制

F2070 的有效输出电压 V_{CMPL} 为 120V，开路输出电压 V_{OPEN} 约为 145V。

3.7.1 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 $V_{CMPL}=120V$ ，例如设置 5A 电流流经 50Ω 电阻时将导致输出电压高于 V_{CMPL} 并达到开路输出电压 $V_{OPEN}=145V$ ，并造成实际输出电流低于 5A。

虽然输出电压略微高于 $V_{CMPL}=120V$ 时并不显著影响输出电流准确度，然而，为确保输出电流的正确性，以及保证操作者对输出电压状态的完全掌控，F2070 设定输出电压高于 120V 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。

3.7.2 电压钳位指示

进入电压钳位状态后，F2070 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 4 章中的相关内容。

3.7.3 负载最高直流电阻限制 $R_{LOADMAX}$

有限的输出电压范围 $V_{OUT} < V_{CMPL}$ 将限制一定设置输出电流 I_{OUT} 下的最高负载直流电阻 $R_{LOADMAX}$ ，即 $R_{LOADMAX} < V_{CMPL} / I_{OUT}$ ，如图 3-11 所示。

图 3-11 负载最高直流电阻限制

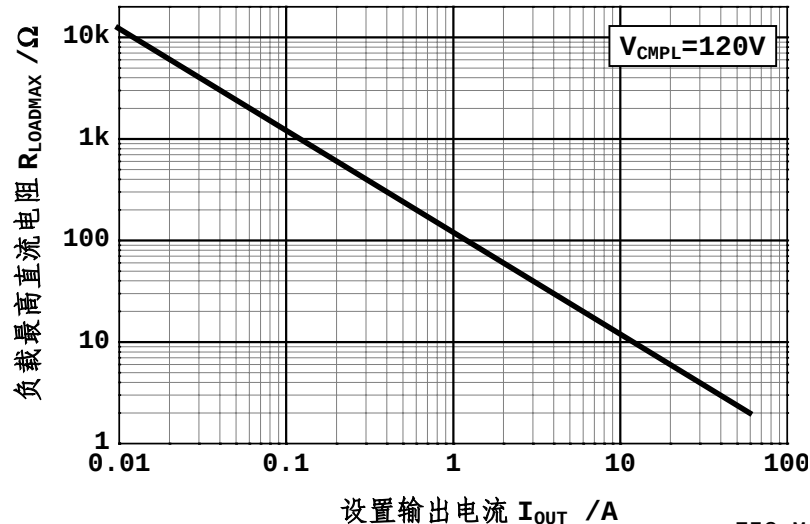


FIG-MAN-F2070-0028

3.7.4 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、空心螺线管和电磁铁负载，均会由于欧姆热的积累导致发热。线圈或电磁铁内的铜质导线具有正温度系数，其直流电阻随温度升高而增大，温度系数约为 $0.4\%/^{\circ}\text{C}$ 。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。

对于长期工作的负载，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 85% 。例如最大输出电流为 65A 时， $R_{LOADMAX}=1.85\Omega$ ，负载冷态直流电阻应不高于 1.57Ω 。

3.7.5 内部过功率保护及其解除

大功率电源通常通过预稳压电路降低内部功耗，以适应更大范围的负载变化。预稳压使用可控硅触发电路实现，并因此产生大量高频谐波，高频谐波一部分以输出电流纹波的形式输出至由负载，并相应产生磁场纹波，另一部分以交流电源回馈或空间传播方式干扰微弱信号测量仪器。

F2070 设计用于微弱信号测量，内部不设置预稳压功能，以保证高质量的电流输出，以及尽

图 3-12 内部功率过载保护下 F2070 的显示信息

```
OVERLOAD PROTECTION
.....
Internal Overload
Detected.

ZERO-OUTPUT restored.

Esc = QUIT Protection.
```

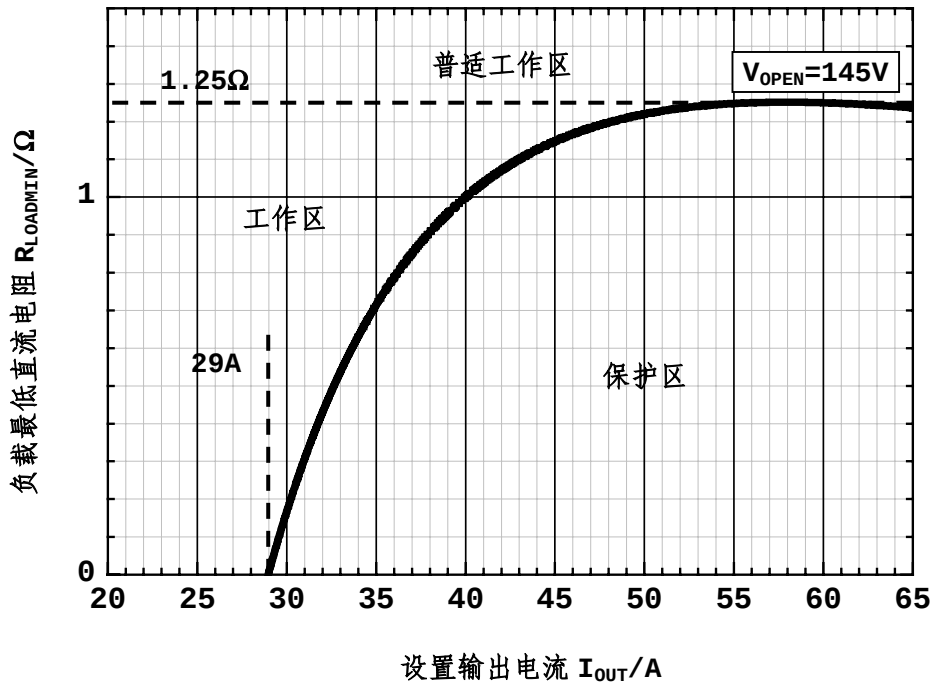
FIG-MAN-F2070-0029

量降低对其他设备的可能干扰。由于不具有预稳压功能，面对较低直流电阻值的负载时，F2070 内部将于满载输出时产生大量热量，并可能导致内部过热损毁。

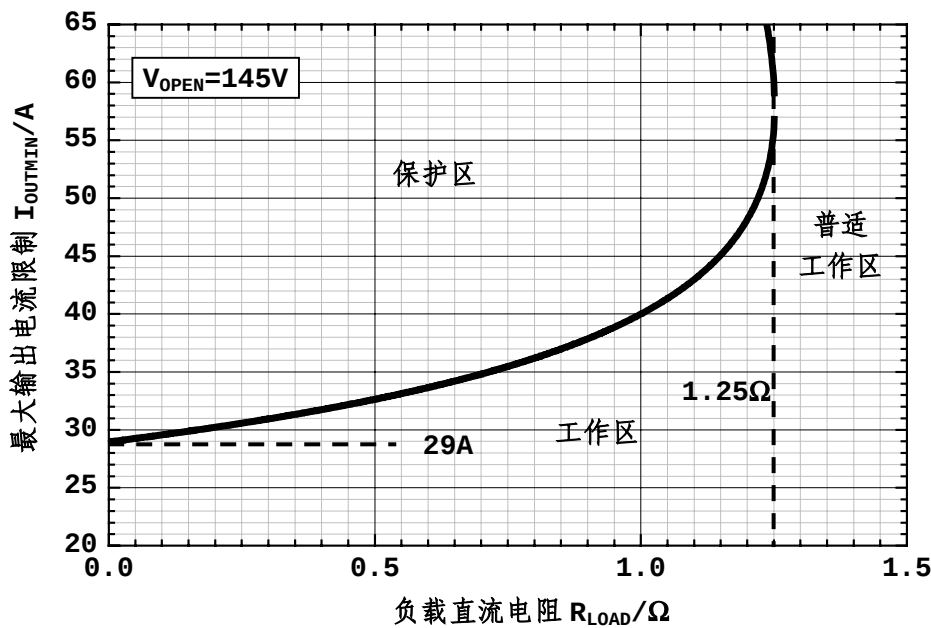
为应对可能的极端情况，F2070 提供内部过功率保护，将内部热耗散功率 P_{DISS} 限制于 4200W 以下。F2070 内部功耗达到 4200W 时进入内部过功率保护状态。F2070 配置的内部过功率保护电路为硬件保护电路，无需接受微处理器的软件查询，因此具有更佳的保护实时性。

进入保护状态后，F2070 前面板显示器显示保护信息，并发出 5 声连续声响报警，如图 3-12 所示。F2070 将输出端状态锁定为由保护电路控制的高阻状态，输出电流设置值降低至零，但不

图 3-13 内部过功率保护导致的 $R_{LOADMIN}$ 和 I_{OUTMAX} 限制



a. 负载最低直流电阻限制 $R_{LOADMIN}$



b. 最大输出电流限制 I_{OUTMAX}

FIG-MAN-F2070-0030

改变输出电流方向。电流线性渐变或电流扫描过程中进入保护状态时，F2070 将停止正在进行的渐变或扫描过程。输出端状态请参阅 3.8 中的内容。

进入保护状态后操作者无法进行针对 F2070 的任何操作，直至通过前面板键盘或计算机接口解除保护。无论键盘是否锁定，操作者均可在妥善处理输出端与负载后按下前面板 **[Esc]** 键使 F2070 脱离保护状态。

用户也可通过计算机接口查询 **PROTECTS?[CR]** 查询保护状态，以及通过计算机接口命令 **PROTECTRST?[CR]** 解除保护，请参阅第 4 章中的相关内容。

3.7.6 负载最低直流电阻限制 $R_{LOADMIN}$ 和最大输出电流限制 I_{OUTMAX}

F2070 的最大开路输出电压为 $V_{OPEN}=145V$ ， V_{OPEN} 实际为 F2070 的内部主线路供电电压，并决定包含输出功率 $P_{OUT}=I_{OUT}^2 R_{LOAD}$ 和内部热耗散功率 P_{DISS} 在内的主线路供电功率 $V_{OPEN} I_{OUT}$ 。内部过功率保护功能将依据 V_{OPEN} 产生对于某一设定输出电流 I_{OUT} 下的负载最低直流电阻限制 $R_{LOADMIN}$ ，以及对于某一特定负载直流电阻 R_{LOAD} 的最大输出电流限制 I_{OUTMAX} 。这两种限制均可通过公式 $P_{DISS}=V_{OPEN} I_{OUT}-I_{OUT}^2 R_{LOAD}<2100W$ ， $I_{OUT}<65A$ 计算得到。

例如输出电流 $I_{OUT}=40A$ 时，F2070 的内部主线路供电功率为 $V_{OPEN} I_{OUT}=5800W$ ，输出功率 $P_{OUT}=I_{OUT}^2 R_{LOAD}$ 应大于 $1600W$ 以保证 P_{DISS} 低于 $4200W$ ，此时对应的负载直流电阻 $R_{LOAD}=P_{OUT}/I_{OUT}^2$ 应大于 1Ω ，即负载最低直流电阻限制 $R_{LOADMIN}|_{20A}=1\Omega$ 。对应的，如果负载直流电阻 $R_{LOAD}=1\Omega$ ， I_{OUTMAX} 应低于 $40A$ 。不同输出电流 I_{OUT} 对应的负载最低直流电阻限制 $R_{LOADMIN}$ 如图 3-13a 所示，不同负载直流电阻 R_{LOAD} 对应的最大输出电流限制 I_{OUTMAX} 如图 3-13b 所示。事实上，图 3-13a 与图 3-13b 为公式 $P_{DISS}=V_{OPEN} I_{OUT}-I_{OUT}^2 R_{LOAD}<4200W$ ， $I_{OUT}<65A$ 横纵轴互易的 2 种表述方式。

为避免触发内部过功率保护电路，F2070 应尽量工作于普适工作区。如果内部过功率保护功能频繁触发，请依据图 3-13 检视负载和输出电流是否位于工作区内。使用具备足够功率容量的串联电阻 R_{SERIES} 与负载 R_{LOAD} 串联可提高最大输出电流限制 I_{OUTMAX} ，并使 F2070 进入普适工作区。

例如根据图 3-13b，负载 $R_{LOAD}=1\Omega$ 的最大输出电流限制 $I_{OUTMAX}=40A$ ，串联 $R_{SERIES}=0.5\Omega$ 后进入普适工作区，此时串联电阻 R_{SERIES} 的最大功耗为 $2112.5W$ ，保留 50% 功率余量时实际使用 $0.5\Omega/4kW$ 功率电阻器，并尽量使用强制风冷冷却串联电阻。

由于 V_{OPEN} 随输出电流增大略有下降，以及保护电路的固有误差，上述计算的容差范围为 $\pm 10\%$ 。

3.7.7 时间常数导致的触发保护

由于电感性负载导致的电流过冲和滞后，对于时间常数较大的负载可能在较高的线性渐变速率下意外触发内部过功率保护，降低线性渐变速率可改善并避免产生意外触发保护。

3.7.6 中，使用串联电阻 R_{SERIES} 与负载串联可降低等效负载时间常数。实际操作中，请尽量避免使用电感性的电抗器替换串联电阻，即使电抗器的直流电阻确实可使 F2070 进入普适工作区，以避免可能产生的更大的等效负载时间常数。

3.8 设置输出端状态

3.8.1 输出端状态和开机更换负载

F2070 提供正常输出状态和高阻状态 2 种输出端状态，并支持开机更换负载。F2070 开机后默认设置输出端进入高阻状态。

正常输出状态下，F2070 输出设定电流 I_{OUT} ，或在进入电压钳位状态后输出 $V_{CMPL}<V_{OUT}<V_{OPEN}$ 范围内的某一电压。正常输出时更换负载，输出端可能开路并使 F2070 输出开路输出电压 V_{OPEN} 。再次连接负载时， V_{OPEN} 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 F2070 再次进入恒流状态并将输出电流调整至设定值。

F2070 的开路输出电压高于安全电压限制，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。

高阻状态下，F2070 的输出端对负载和主电流回路呈现高阻抗，有效隔离输出端开路时主电流回路呈现的高电压，允许开机更换负载。

F2070 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高阻状态后的 3.3s 内由内部放电电路完全泄放，用户应至少等待 5s 后方可对负载进行操作，以避免由于未完全放电导致的针对操作者的可能的电击事故。

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。

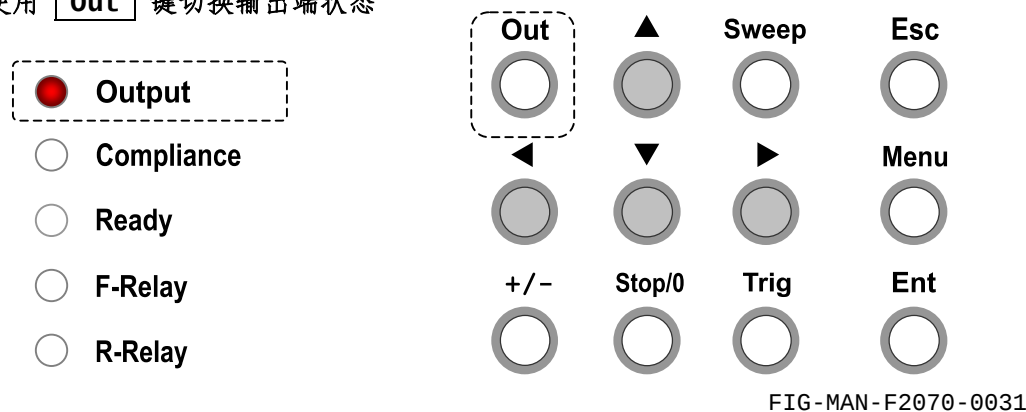
警告

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 F2070 输出端处于高阻状态，并等待至少 5 秒。

3.8.2 切换输出端状态

标准显示界面下，使用 **Out** 键使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 3-14 所示。

图 3-14 使用 **Out** 键切换输出端状态



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 4 章中的相关内容。

3.8.3 输出端恢复正常输出状态时的输出电流

输出端由高阻状态恢复至正常输出状态时，如果此时的电流设置值不为零，F2070 将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。

3.9 停止电流线性渐变、电流快速归零和中止电流换向

3.9.1 停止电流线性渐变

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。

F2070 可通过 **Stop/0** 键满足这一需求。在 F2070 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 4 章中的相关内容。

3.9.2 电流快速归零

由于调试过程中对磁场的频繁设定,某些情况下可能要求 F2070 的输出电流快速回零,以提高调试效率。当 F2070 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,并使输出电流以此线性渐变速率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。

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,标准显示界面下任意时刻按下 **Stop/0** 键均可使 F2070 的输出电流快速回零,但不改变电流方向。为避免可能的电流冲击,回零过程以 5A/s 的固定速率通过渐变方式完成。输出端为高阻状态时快速回零无效。

快速回零也可通过计算机接口命令 **FAST0[CR]** 实现,请参阅第 4 章中的相关内容。

3.9.3 中止电流换向

电流换向过程中的任意时刻按下 **Stop/0** 键均可使换向过程中止。

中止电流换向也可通过计算机接口命令 **STOP[CR]** 实现,请参阅第 4 章中的相关内容。

3.10 电流扫描

3.10.1 扫描模式

F2070 提供 3 种常用扫描模式,如图 3-15 所示:

- (1) SWA 模式: I 象限扫描。I 象限内,正向电流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。完成 I 象限扫描后③切换电流方向为反向进入 III 象限,正向电流④由 0 线性扫描至设定的扫描最大值,并⑤返回至 0,而后⑥切换电流方向为正向。
- (3) SWC 模式: I+III+I 象限扫描。完成 I+III 象限扫描后重新切换电流方向为正向,再次进入 I 象限,正向电流⑦重新由 0 扫描至扫描最大值,而后⑧返回至 0。

标准显示界面下,请遵循以下步骤设置扫描模式:

- ① 使用 **Menu** 键进入菜单。按 **▲**、**▼** 方向键选择“Sweep Mode”,并按 **Ent** 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 **Ent** 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。

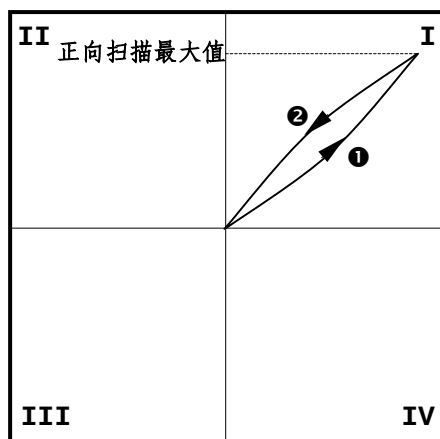
设置完成后,前面板显示器左上方显示当前扫描模式。

注

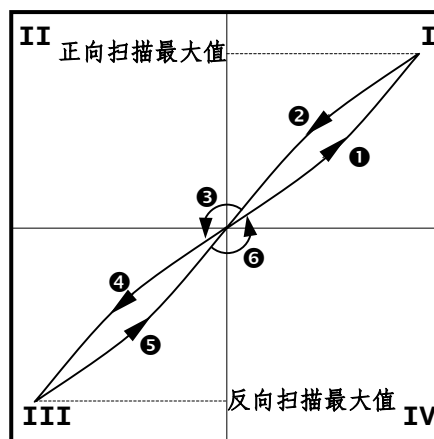
扫描模式保存于 F2070 内部非易失性存储器内,并于下次开机时保持。

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 4 章中的相关内容。

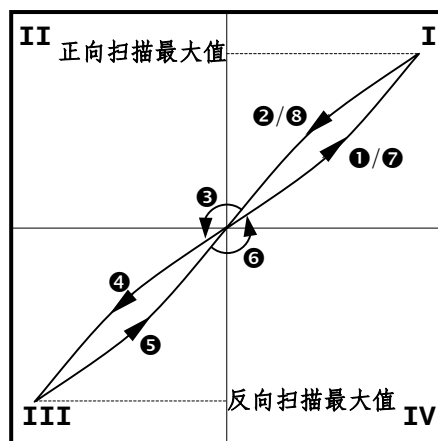
图 3-15 F2070 的三种扫描模式



a. SWA 模式 (I 象限)



b. SWB 模式 (I+III 象限)



c. SWC 模式 (I+III+I 象限)

FIG-MAN-F2070-0032

3.10.2 扫描最大值

F2070 的电流扫描最大值范围为 0.001A—65A。

标准显示界面下，请遵循以下步骤设置扫描最大值：

- ① 使用 **Menu** 键进入菜单。按 **▲**、**▼** 方向键选择“Sweep Max”，并按 **Ent** 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 **Ent** 键确认；或按 **Esc** 键保留原扫描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 0.001A 而非 0。

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 F2070 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 4 章中的相关内容。

3.10.3 扫描速率

F2070 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。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 3.5.3 中的详细内容。

3.10.4 扫描的开始、暂停、继续和中止

标准显示界面下且 F2070 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，按 **Sweep** 键开始扫描，前面板显示器显示“Stop/0=PAUSE”。

如果扫描开始时输出电流不为 0 ，或电流方向为反向，F2070 首先以 3A/s 的固定渐进速率使电流归零，并依据换向延迟时间将电流方向转换为正向，恢复扫描初始状态后开始扫描。

扫描过程中，包括扫描之前对初始状态的恢复过程以及扫描所涉及的换向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 Ent=Cont.”并可通过按下 **Ent** 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 4 章中的相关内容。

3.11 输出电流准确度

3.11.1 额定准确度

F2070 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 $\pm(0.2\%\text{设置值}+10\text{mA})$ 。

3.11.2 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 $I_{\text{ERROR}} = \pm(0.2\%I_{\text{SET}}+10\text{mA})$ 。典型输出电流下的误差如表 3-1 所示：

表 3-2 典型输出电流下的误差

TAB-MAN-F2070-0005

输出电流 I_{SET}	最大误差电流 I_{ERROR}	绝对百分比误差
60A	$\pm 130\text{mA}$	$\pm 0.22\%$
10A	$\pm 30\text{mA}$	$\pm 0.33\%$
1A	$\pm 12\text{mA}$	$\pm 1.2\%$
100mA	$\pm 10.2\text{mA}$	$\pm 10.2\%$

3.11.3 输出电流稳定性

$15\text{—}35^\circ\text{C}$ 环境温度范围内，F2070 的输出电流平均温度系数为 $\pm 30\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 。为保证输出电流的高度稳定，请勿于环境温度剧烈变化的环境内使用。

环境温度位于 $15\text{—}35^\circ\text{C}$ 范围内且恒定，当安装位置满足 F2070 的散热安全间距要求时，F2070 的短期稳定性为 150ppm/h 。

3.12 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 3-16 所示。

图 3-16 有限输出阻抗 R_{OUT} 造成的分流误差

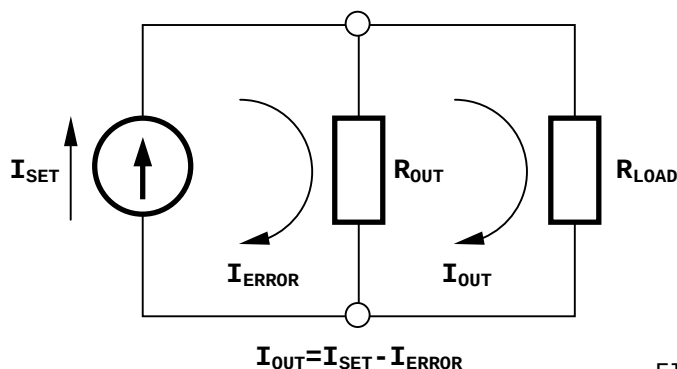


FIG-MAN-F2070-0033

F2070 具有大于 $300k\Omega$ 的额定直流输出阻抗。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。

3.13 输出补偿网络

3.13.1 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。F2070 使用输出补偿网络确保电流源输出稳定。

F2070 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、空心螺线管和小电磁铁。如图 3-17 所示。

图 3-17 F2070 的内部输出补偿网络

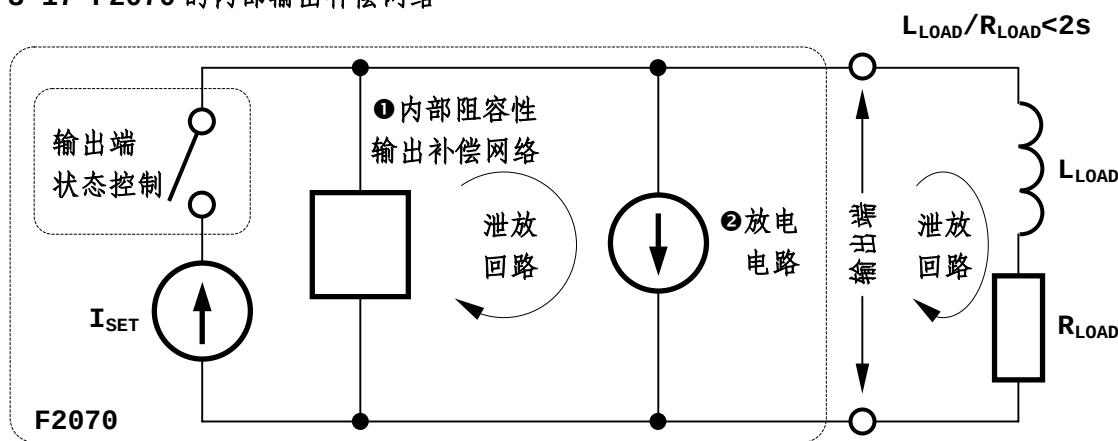


FIG-MAN-F2070-0034

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高阻状态后的 3.3s 内可由负载和 F2070 内部②放电电路钳制至零。

输出端开路且设置为正常输出状态时，如果设置输出电流不为 0，将造成①内部输出补偿网络两端呈现 F2070 的开路输出电压，此时关机后，由于②内部放电电路无法工作以及输出端未连接

负载而无法形成针对此高电压的泄放回路，并导致输出端呈现超出安全电压限制的直流电压。因此在输出端开路时，如果设置的输出电流不为 0，用户应首先设置输出端进入高阻状态后至少 5s，使内部放电电路对此电容充分放电，而后关闭电源。

3.13.2 追加的外部补偿网络

对于更高时间常数的负载，为保证 F2070 的频率稳定性，可在 F2070 外部追加额外的输出补偿。通常在输出端并联大于 $100\mu\text{F}$ 的薄膜电容或无极性电解电容可使 F2070 正常驱动时间常数高至 5s 的电感性负载。如图 3-18 所示。

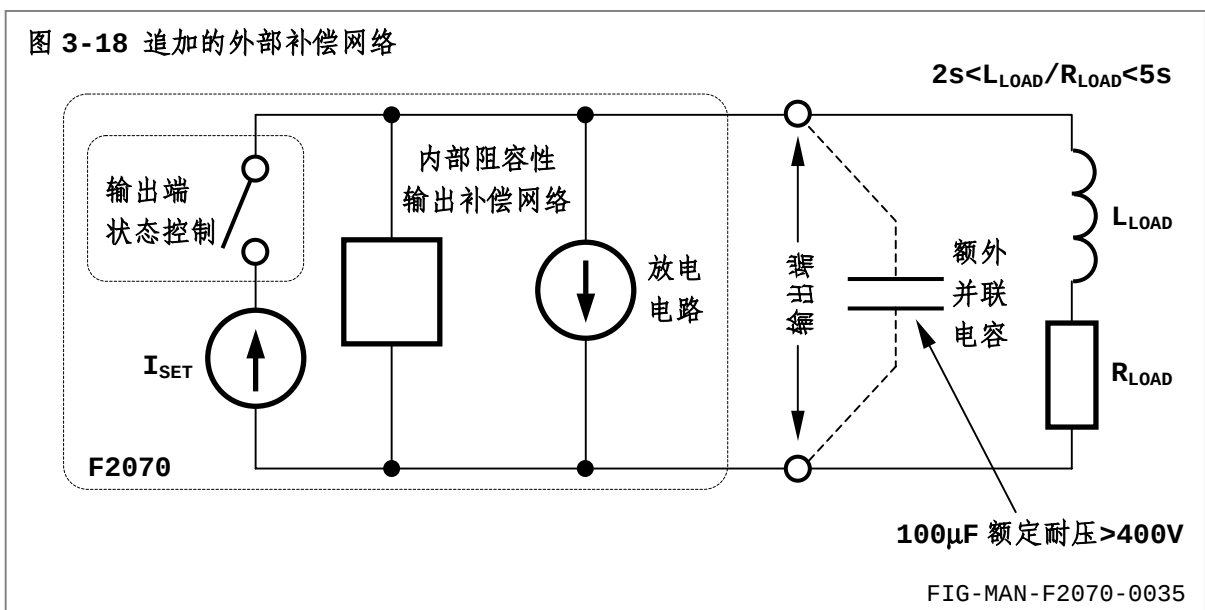
并联电容的额定耐压必须大于 F2070 的开路输出电压 145V，为保证长期可靠工作，电容的额定耐压应不低于 400V。由于 F2070 具有 I、III 象限输出能力，即在反向电流下于输出端呈现负电压，因此切勿使用具有极性的电解电容。

警告

在输出端并联耐压低于 145V 的电容将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

在输出端并联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

在 F2070 输出端操作并联的额外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。

电容在并联于 F2070 的输出端之前必须使用电阻值为 $10\text{k}\Omega$ 的 10W 功率电阻完全放电，以避免电容可能储存的高压对 F2070 内部电路的冲击和可能导致的 F2070 输出级损毁。由输出端取下的电容必须使用电阻值为 $10\text{k}\Omega$ 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 $10\text{k}\Omega$ 电阻对两端电压为 200V 的 $100\mu\text{F}$ 电容完全放电时间为 5s，最大放电电流为 20mA，放电完成后电容两端残余电压小于 2V。

警告

未完全放电的电容并联于 F2070 的瞬间将对 F2070 内部电路放电，并可能导致 F2070 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。

注

在 F2070 输出端追加并联电容将导致输出端开路且进入高阻状态时，针对此电容的放电时间增加。

3.14 电流纹波

F2070 向纯电阻负载输出 65A 时，测量带宽为 300kHz 的 RMS 噪声/纹波典型值为 12mA。测量带宽降低时，RMS 噪声/纹波系数相应下降。

F2070 输出电流的噪声以工频及其倍频成分为主，因此测量 F2070 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。

例如，当电流表的测量速率设置为 0.1PLC 时，其测量周期为 2ms，即 0.1 个工频周期，读数速率为 500 读数/s，此时测量得到 F2070 于 65A 输出电流下的波动峰峰值小于 7.2mA。更低的测量速率，例如 1PLC（测量周期 20ms，读数速率 50 读数/s）时的电流波动峰峰值小于 2.4mA。

3.15 水冷系统保护

F2070 提供 2 种针对水冷系统的保护，即水压过低保护和散热器过热保护。

3.15.1 水压过低保护

F2070 的主散热器采用水冷散热方式，将焦耳热量通过冷却水带回冷水机，并通过冷水机制冷将热量散发至空气中，最大耗散热量接近 5kW。冷水机应具有水泵加压功能，以保证基本恒定的水压，以及由此保证的水流速率和散热量。F2070 内部于冷却水出水口之前设置开关型水压传感器。水压过低时，水压传感器动作，并引发 F2070 进入水压过低保护，如图 3-19 所示。

图 3-19 水压过低保护时 F2070 的显示信息

```

WATERBREAK PROTECTION
.....
Internal Waterbreak
Detected.

ZERO-OUTPUT restored.

Esc = QUIT Protection.
  
```

FIG-MAN-F2070-0036

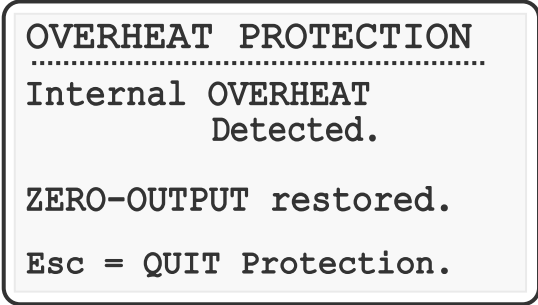
F2070 的水压报警门限位于 0.3-0.5kg/cm² 之间，请确保冷水机输出的冷却水水压高于 1kg/cm²，以避免频繁进入保护状态。

3.15.2 散热器过热保护

水冷散热器通过流动的冷却水带走热量。冷却水流动不畅时，散热器温度将急剧升高并导致散热元件损毁。F2070 内部配置并联分路供水的多块水冷主散热器。某一路水路阻塞或水流不畅时，

将导致对应的散热器严重发热,但并不会触发水压过低报警。因此每块水冷散热器均配置温度开关,任意一块散热器温度高于 65℃ 时,温度开关动作,引发 F2070 进入过热保护,如图 3-20 所示。

图 3-20 散热器过热保护时 F2070 的显示信息



```
OVERHEAT PROTECTION
.....
Internal OVERHEAT
      Detected.

ZERO-OUTPUT restored.

Esc = QUIT Protection.
```

FIG-MAN-F2070-0037

3.15.3 保护动作

进入水压过低保护后, F2070 前面板显示器显示保护信息, 并发出 5 声连续声响报警。F2070 将输出输出电流设置值降低至零, 但不改变输出电流方向。电流线性渐变或电流扫描过程中进入保护状态时, F2070 将停止正在进行的渐变或扫描过程。

用户也可通过计算机接口查询 `PROTECTS?[CR]` 查询保护状态, 以及通过计算机接口命令 `PROTECTRST?[CR]` 解除保护, 请参阅第 4 章中的相关内容。

3.16 常规触发输出

F2070 提供 2 种触发输出功能, 即用于常规电流设置和电流换向的常规触发输出, 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。

3.16.1 常规触发输出

F2070 采用电流线性渐变方式处理输出电流的变化。由于电流线性渐变必须耗用一定时长, 因此在电流线性渐变完成之前, 由 F2070 驱动产生的磁场连续变化且未达到预定值。在此期间进行的测量可能产生显著误差。

手动操作中, 操作者必须持续注视 F2070 的前面板显示器监测电流大小和方向操作的完成情况。此外, 用户可通过计算机接口命令 `CUR[CR]`、`PN[CR]` 和 `REV[CR]` 设置 F2070 的电流大小和方向, 并通过查询 F2070 返回的响应判断电流线性渐变和换向过程是否完成, 并在完成后通过计算机接口指示其他测量仪器完成测量。

F2070 通过常规触发输出功能提供另一种对此过程进行监测并驱动其它仪器进行同步测量的途径。触发连接是一种高速触发总线, 为 F2070 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。

F2070 通过后面板 3 路同步触发输出 BNC 接口为具备外部触发输入功能的测量仪器提供常规触发输出信号, 并提供 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 F2070 还提供触发输出声响提示功能用于监视仪器运行状态。

3.16.2 设置常规触发输出方式和触发延迟时间

`Trig` 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:

- 标准显示界面下, 按 `Trig` 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;

- ② 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）；
- ③ 按  键确认选择；或 ④ 按  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，F2070 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：

- ⑤ 按 、 方向键在 0—5.0s 范围内增大或减小常规触发延迟时间，调整步进为 0.1s；
- ⑥ 按  键确认选择；或 ⑦ 按  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 F2070 内部非易失性存储器内，并于下次开机时保持。

注

常规触发输出方式和延迟时间对 3 路触发输出端口同时有效。

常规触发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 4 章中的相关内容。

3.16.3 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，F2070 于电流设置完成且线性渐变过程结束后，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，F2070 于触发信号输出时刻发出一次声响提示。如图 3-21 所示。

图 3-21 常规触发输出时序

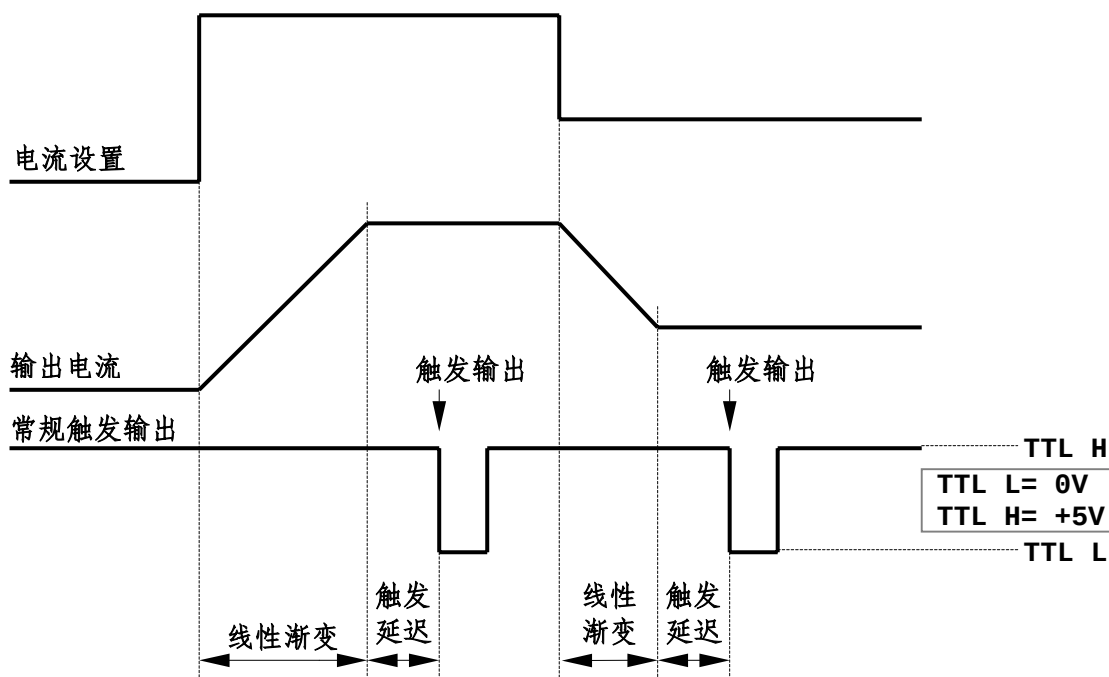


FIG-MAN-F2070-0038

输出端处于正常输出状态下，微调电流、使用 **[+/-]** 键切换电流方向、进入电流设置界面、或者通过计算机接口命令 **CUR[CR]**、**CURFUP[CR]**、**CURFDOWN[CR]**、**PN[CR]** 和 **REV[CR]** 设置电流的大小和方向，F2070 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，F2070 同样输出常规触发信号。此外，输出状态由高阻状态切换至正常输出后，如果电流设置值不为零，F2070 将以电流线性渐进方式输出电流达到设置值，并输出触发信号。

输出端处于高阻状态下，F2070 对于针对电流大小和方向的操作不输出常规触发信号。

注

常规触发延迟时间内设置电流并完成线性渐变过程后，本次触发输出失效，并由线性渐变过程完成时刻起再次经过触发延迟时间后输出触发信号。

3.16.4 触发输出端口

F2070 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 10ms。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。

3.17 扫描触发输出

3.17.1 扫描触发输出

进入电流扫描状态后，F2070 依据扫描模式、扫描最大值、电流线性渐变速率和换向延迟时间组合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，F2070 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 F2070 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。

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，F2070 提供扫描触发输出功能。开启此功能后，F2070 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。

3.17.2 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 **[Trig]** 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+J”（具有声响提示的扫描触发输出）；
- ③ 按 **[Ent]** 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；

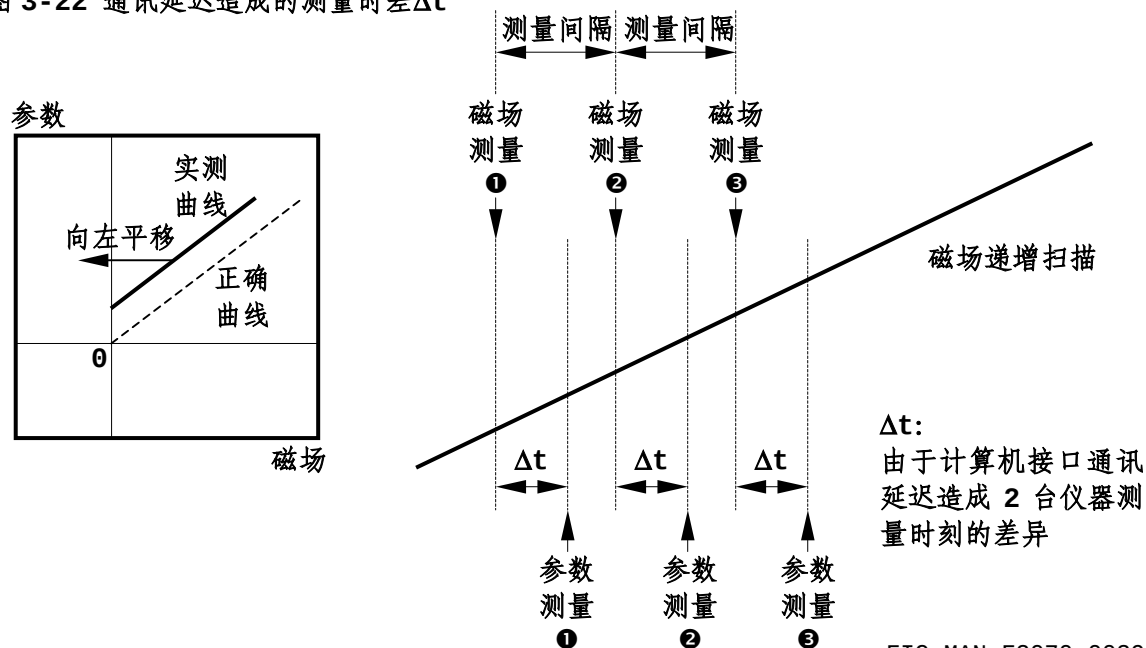
图 3-22 通讯延迟造成的测量时差 Δt 

FIG-MAN-F2070-0039

选择“Off”时，扫描触发状态指示区无显示，F2070 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 **▲**、**▼** 方向键在 0—2.0s 范围内增大或减小触发时间间隔，调整步进为 0.1s；
- ⑥ 按 **Ent** 键确认选择；或 **Esc** 键保留原触发时间间隔并返回标准显示界面。

注

扫描触发输出方式和触发时间间隔保存于 F2070 内部非易失性存储器内，并于下次开机时保持。

注

扫描触发输出方式和触发时间间隔对 3 路触发输出端口同时有效。

触发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 4 章中的相关内容。

3.17.3 扫描触发输出时序

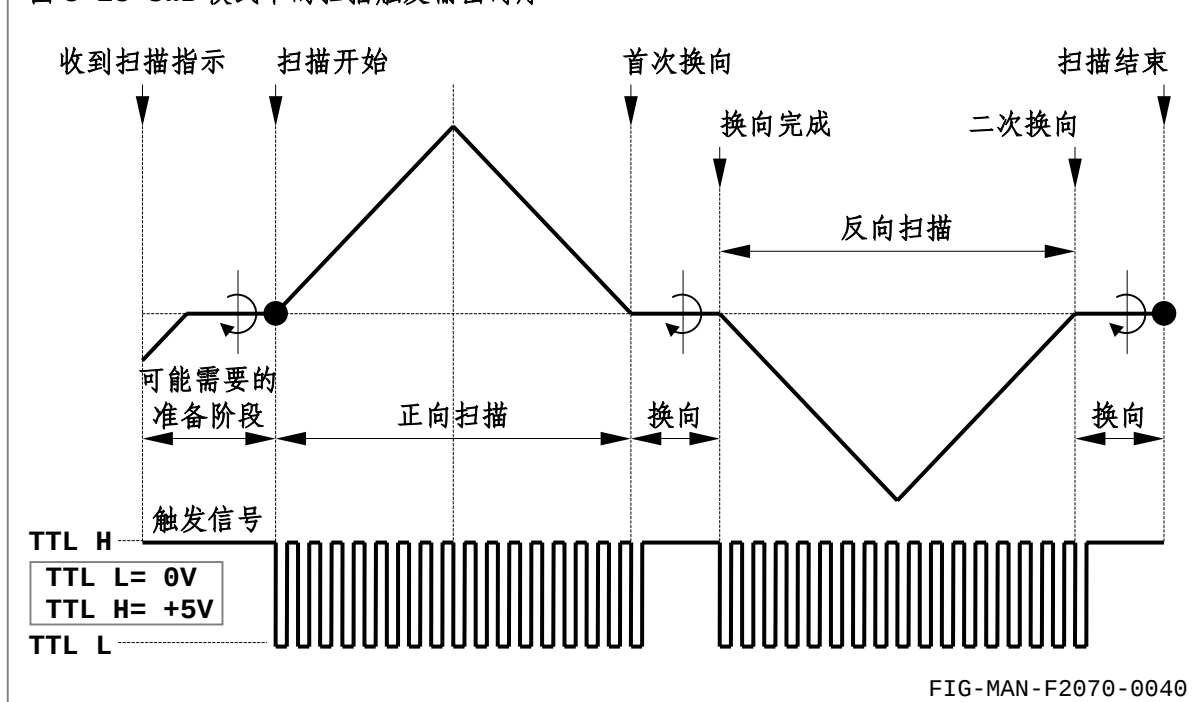
扫描开始后，F2070 以设定的扫描触发时间间隔连续输出下降沿有效的触发信号，但在可能的准备阶段以及扫描所涉及的换向过程中不输出触发信号，以保证触发信号与完整扫描过程的同步，以及避免换向中可能出现的电流过冲对测量准确度的影响。SWB 模式下的扫描输出时序如图 3-23 所示，SWA 和 SWC 模式下的时序类推。

开启扫描触发功能后，无论使用前面板 **Sweep** 键，或使用计算机接口命令 **SWEEP[CR]** 开启电流扫描，F2070 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。

F2070 可提供的最小触发时间间隔为 100ms，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。在最高扫描速率 2A/s、最大扫描值为 10A 的情形下，用户在扫描的一次递增或递减过程中可获取 50 个数据点。

图 3-23 SWB 模式下的扫描触发输出时序



3.17.4 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 F1205 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%。

3.17.5 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。

3.18 键盘锁

F2070 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 显示器右上方显示键盘锁标记“”。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

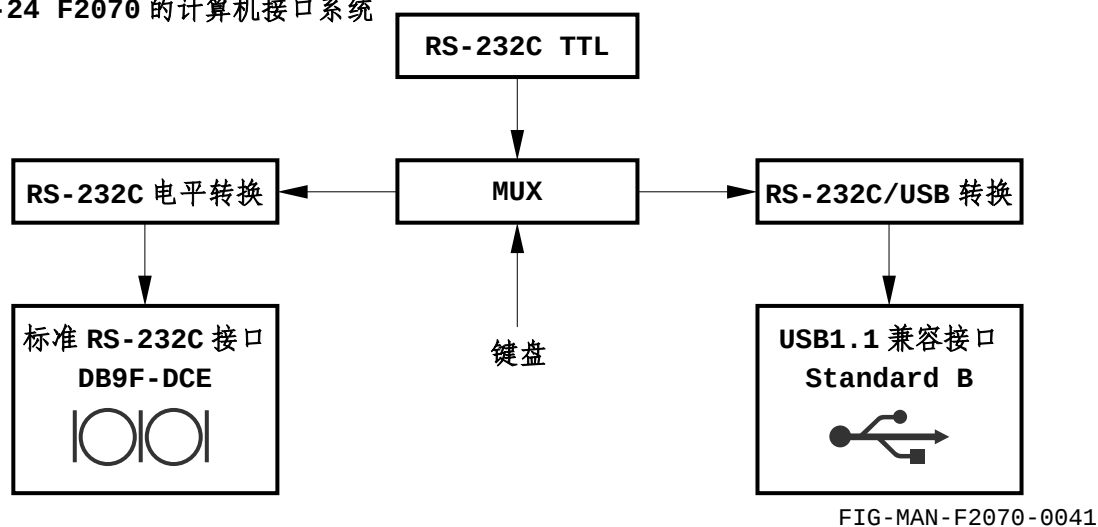
F2070 开机时键盘锁为解除状态。

3.19 设置计算机接口

3.19.1 设置接口类型

F2070 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 3-24 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 3-24 F2070 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：

- ❶ 使用 **[MENU]** 键进入菜单。按 **[▲]**、**[▼]** 键选择“Interface”，并按 **[ENTER]** 键进入计算机接口选择界面；
- ❷ 按 **[▲]**、**[▼]** 方向键在“RS-232C”和“USB-232”选项中循环选择；
- ❸ 按 **[ENTER]** 键确认选择；或 ❹ 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 LCD 显示器右下方波特率之后对应显示“R”或“U”，对应 RS-232C”或“USB-232”接口。

注

当前接口形式保存于 F2070 内部的非易失性存储器内，并于下次开机时保持。

3.19.2 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：

- ❶ 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；
- ❷ 按 **[▲]**、**[▼]** 方向键循环显示各可选波特率 300、600、1200、4800、9600；
- ❸ 按 **[ENTER]** 键确认选择；或 ❹ 按 **[ESC]** 键保留原波特率并返回标准显示界面。

设置完成后，前面板显示器右下方显示当前使用的波特率。

3.19.3 安装并设置 USB-232 接口

F2070 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 F2070 的 USB 转换器设备，必须安装产品信息光盘 CD-F2070 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 F2070 前面板电源开关；
- ② 打开产品信息光盘 CD-F2070（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。

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 F2070 后面板的 USB B 型插座内；
- ④ 开启 F2070 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 3-25 所示，点击“端口（COM 和 LPT）”左侧的“+”；

图 3-25 设备管理器中的 RS-232C/USB 转换器设备

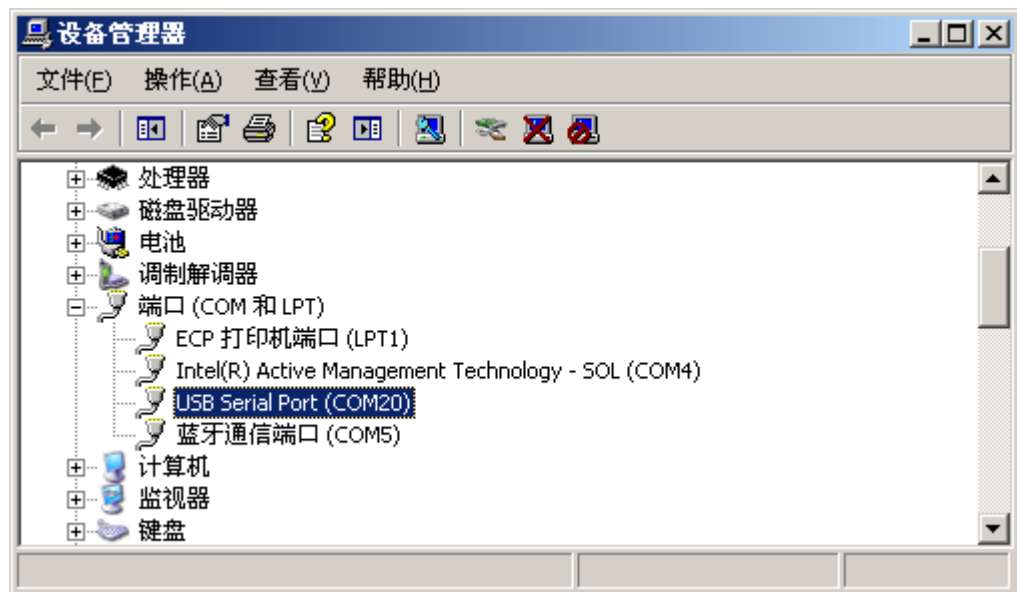


FIG-MAN-F2070-0042

- ② 双击“USB Serial Port(COMn)”，打开图 3-26 所示属性窗口；
- ③ 选择“端口设置”页，点击“高级”按钮，打开图 3-27 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 3-26 所示属性窗口，修改“波特率”与 F2070 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。

图 3-26 USB Serial Port (COMn)属性窗口

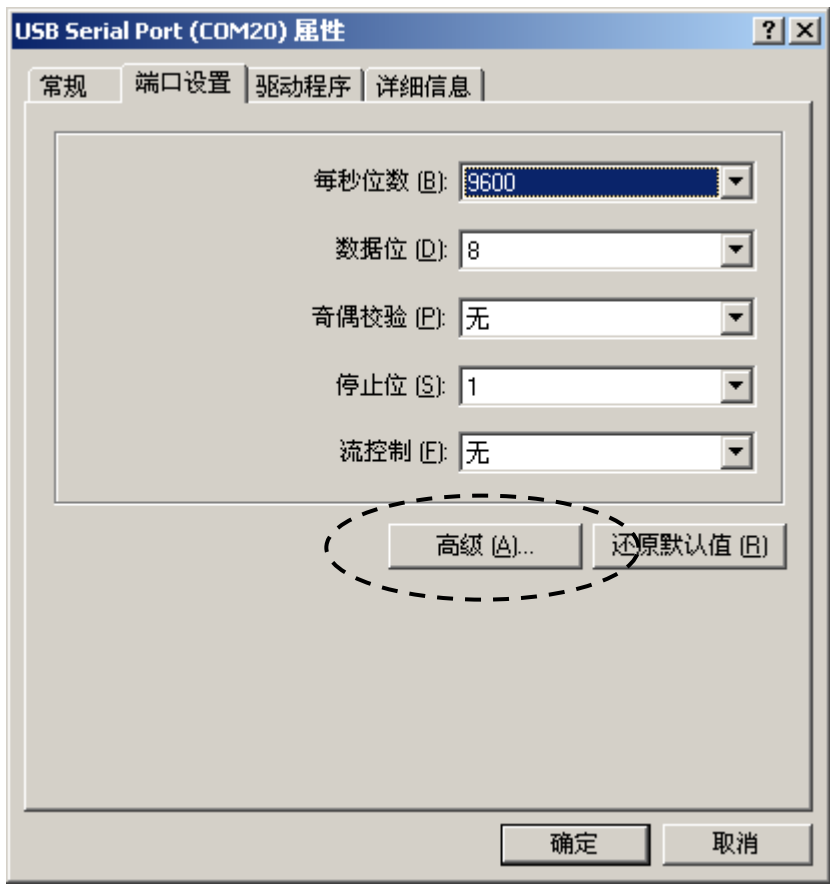


FIG-MAN-F2070-0043

图 3-27 修改 RS-232C/USB 转换器的端口号



FIG-MAN-F2070-0044

3.20 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 3-28 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 3-3 所示。恢复出厂设置也可通过发送计算机接口命令 ***RST[CR]** 达成。

图 3-28 恢复出厂设置

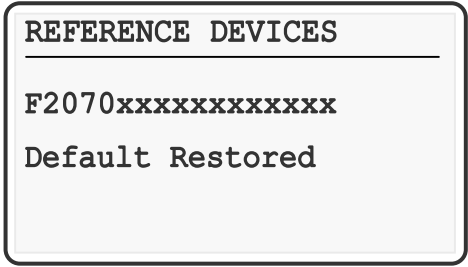


FIG-MAN-F2070-0045

表 3-3 恢复出厂设置值

TAB-MAN-F2070-0006

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
接口形式	RS-232C	波特率	9600bps
扫描模式	SWC	扫描最大值	65.000A
换向延迟	5s+J+3s	常规触发输出	关闭
常规触发延迟	100ms	扫描触发输出	关闭
扫描触发间隔	1s	前面板键盘	解锁
渐变结束声响	开启		

3.21 接地关系

3.21.1 浮动输出

F2070 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 300V。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

F2070 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 300V，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。

3.21.2 接地关系

F2070 具有 2 个相互隔离的地电位，即 ❶ 机柜地 GND 和 ❷ 内部电流源隔离地 ISOGND，如图 3-29 所示。其中：

❶ 机柜地 GND：通过电源输入组件中交流输入插座的第 1 引脚，经由附件 CAB-AC380-2A 交流电源线的保护地线（保护零线）PE 芯线连接至 TN-S 接地方式 3 相 5 线制配电柜的保护地线（保护零线）端子并连接至大地（Earth），同时作为机柜的保护地（PE）。机柜地与功率电流输出插座的第 1 引脚、附件 CAB-50ADC-2 的保护地线芯线、RS-232C 端口的 DB9 插座外壳及其第 5 引脚、触发输出 BNC 插座外壳连通并等电位。

❷ 内部电流源隔离地 ISOGND：内部隔离地，无外接导体或端子。

警告

接地不良可能导致 F2070 金属机柜外壳和附件的导电部分感应带电，并造成可能的电击事故、设备运行故障或设备内部电路损毁。

图 3-29 F2070 的接地关系

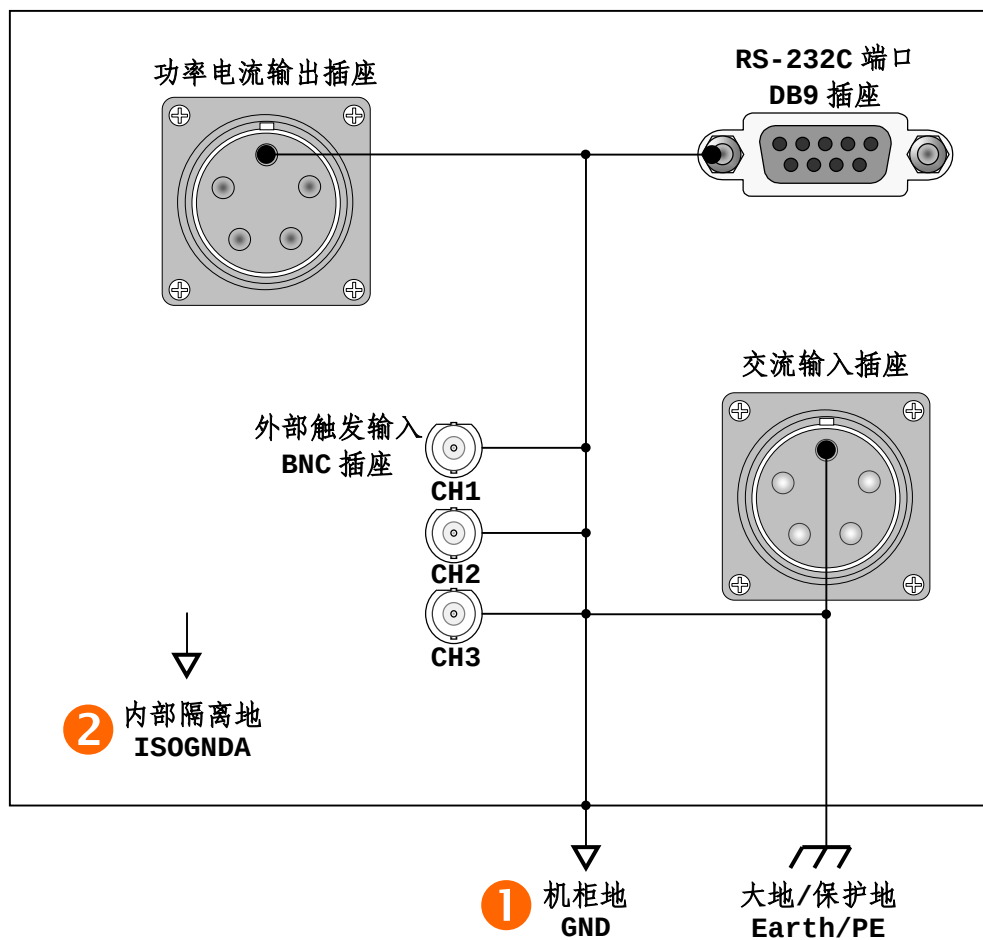


FIG-MAN-F2070-0046

3.22 键盘菜单结构

图 3-30、图 3-31 和图 3-32 所示为 F2070 的键盘菜单结构图。其中图 3-30 为输出设置和计算机接口，图 3-31 为线性渐变、扫描，图 3-32 为触发输出。

图 3-28 F2070 键盘菜单结构图（输出设置和计算机接口）

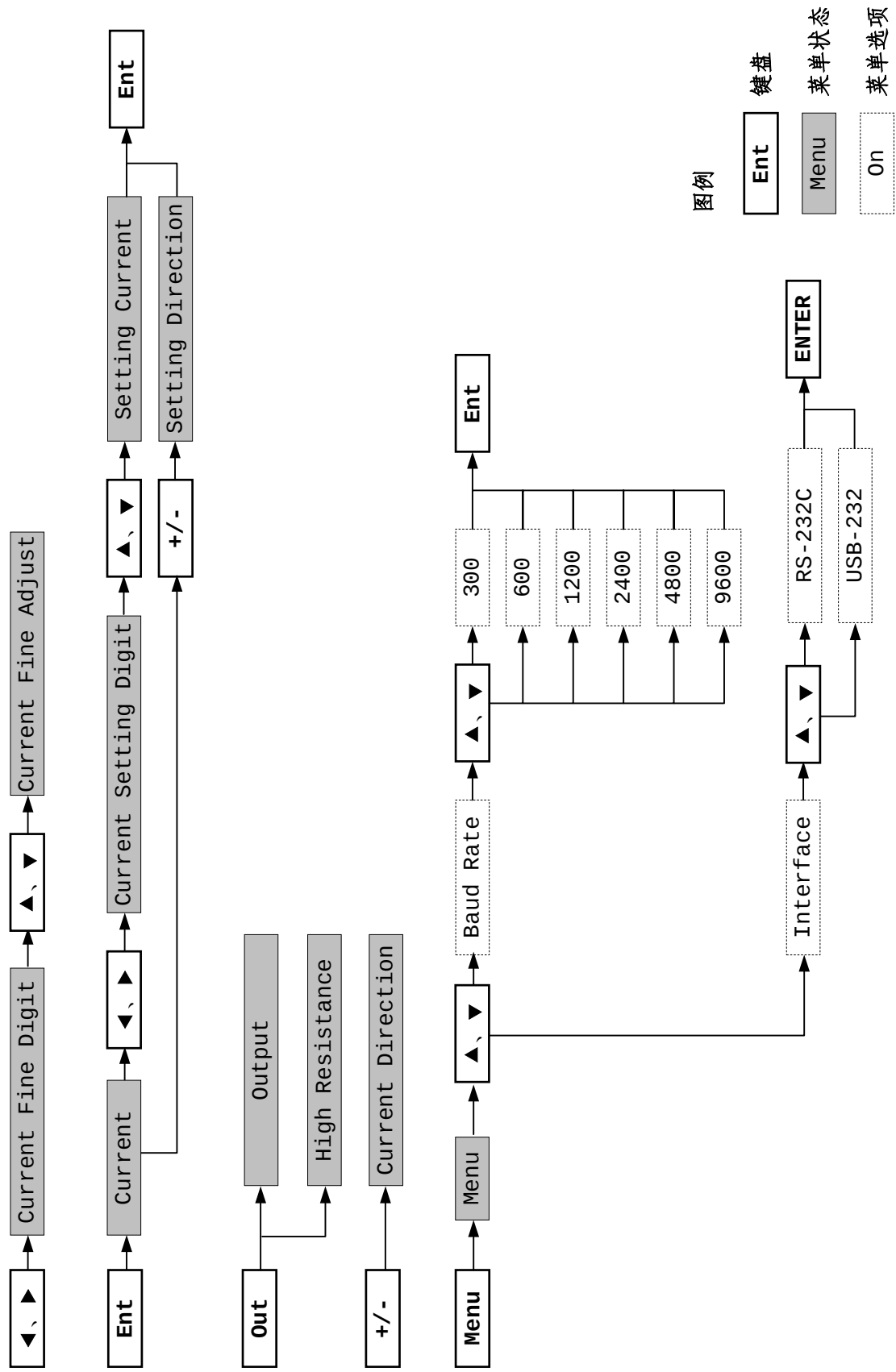


FIG-MAN-F2070-0047

图 3-29 F2070 键盘菜单结构图（线性渐变和扫描）

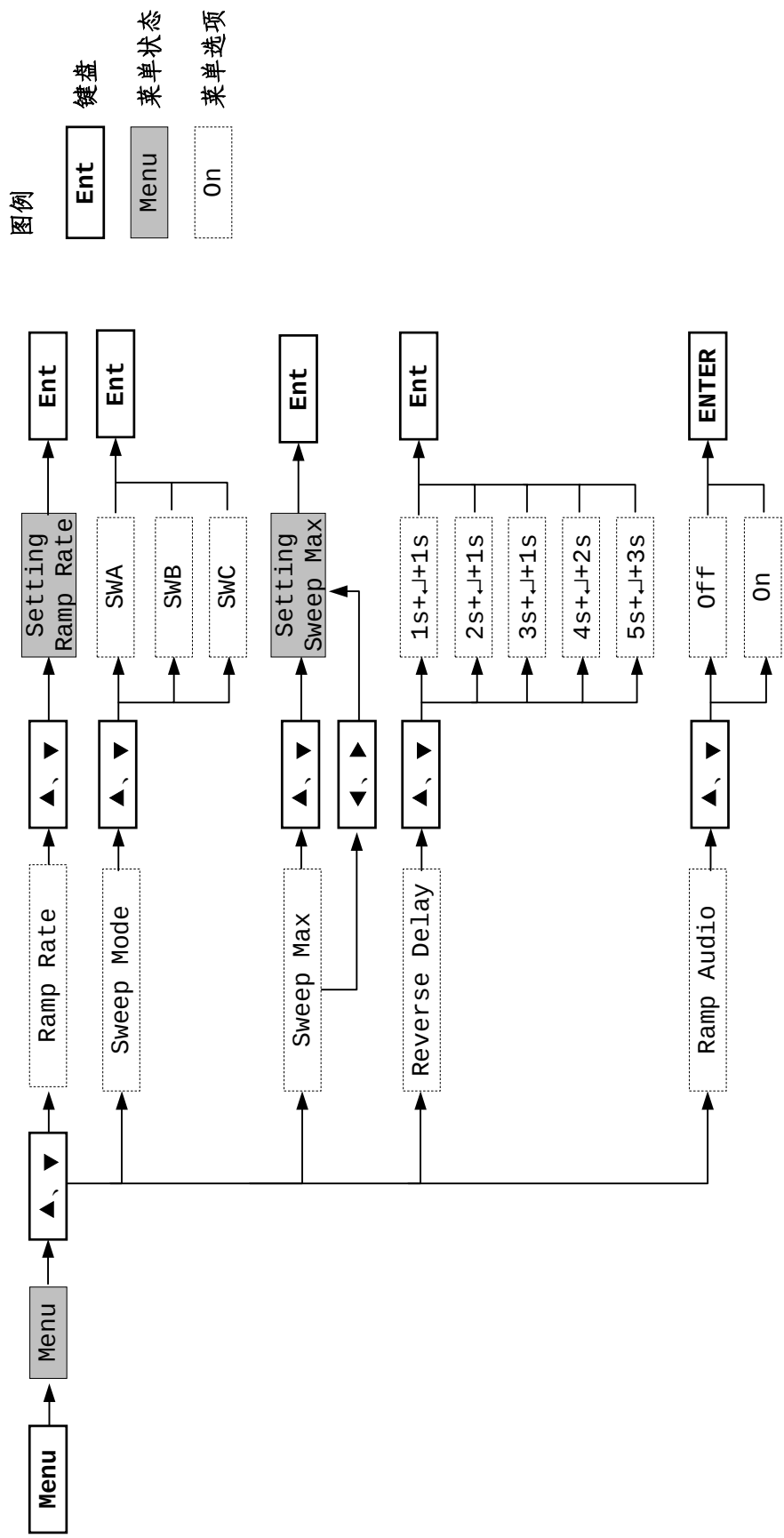


FIG-MAN-F2070-0048

图 3-30 F2070 键盘菜单结构图（触发输出）

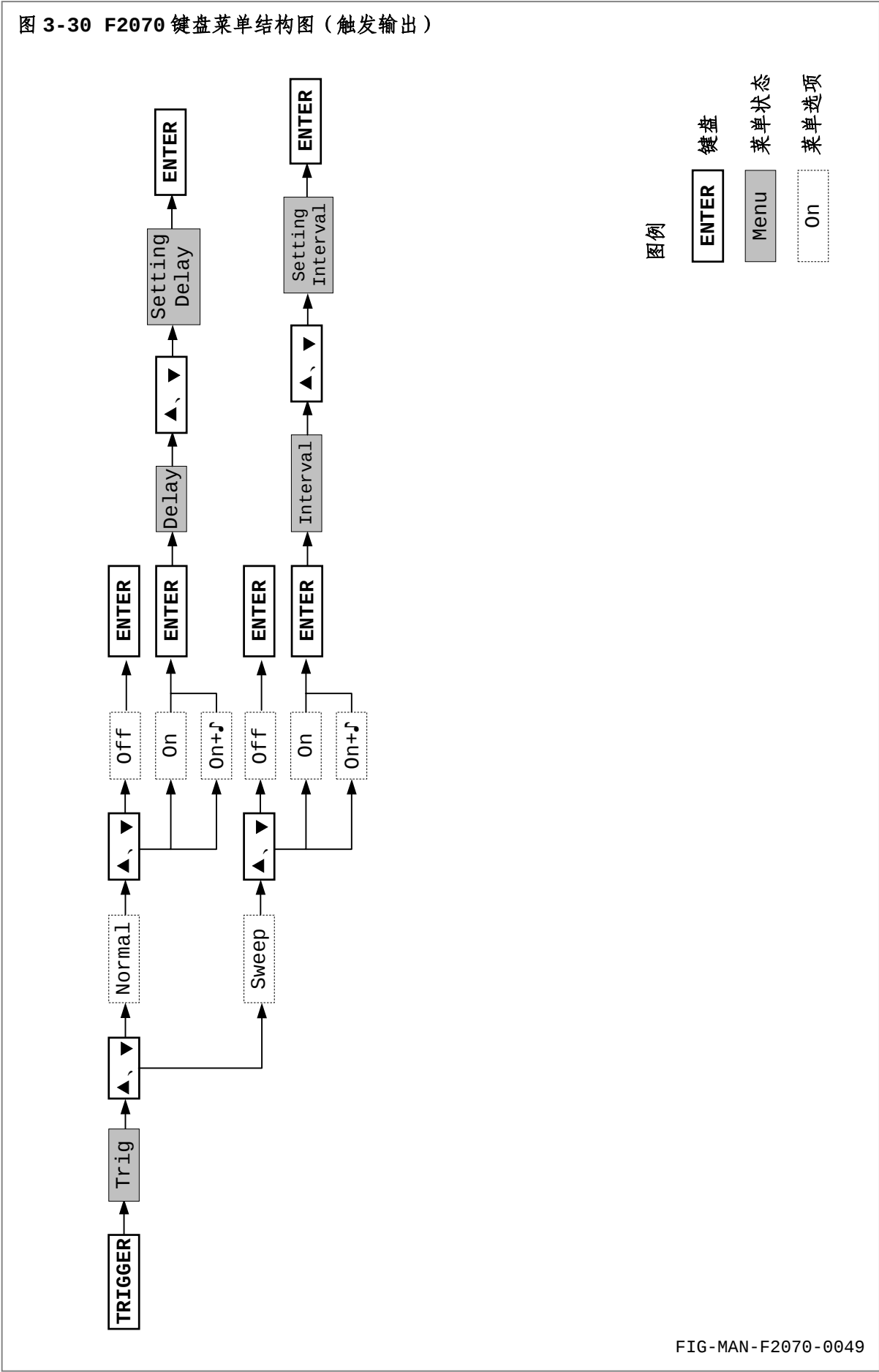


FIG-MAN-F2070-0049

<本页为空页>
This Page Intentionally Left Blank

计算机接口

4.1 简介

F2070 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 4.2 为 RS-232C 接口概述，4.3 为接口命令语法和软件控制机制，4.4 为接口命令详解。

4.2 计算机接口选择

4.2.1 接口构成

F2070 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，F2070 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 F2070 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 F2070 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 3.19.1 中的内容。

由于 2 种接口于 F2070 内部均视为标准 RS-232C 接口，因此 F2070 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 3.19.2 中的内容。

使用 USB-232 接口时，需首先于计算机上安装 F2070 的接口驱动程序。驱动程序安装方法请参阅 3.19.3 中的相应内容。

4.3 RS-232C 接口概述

F2070 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 F2070 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 F2070 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

F2070 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 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，F2070 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



FIG-MAN-F2070-0045

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。

F2070 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。F2070 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

F2070 的 RS-232C 硬件接口具有以下特性：

- ❶ 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。
- ❷ 半双工传输方式：F2070 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：F2070 支持的波特率为 300、600、1200、4800 和 9600bps。
- ④ 硬件握手（流控制）：F2070 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。F2070 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 F2070 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)。F2070 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

F2070 后面板配置 USB-A 电缆，用户可通过附件 CAB-USB-AFM-2 电缆连接计算机和 F2070。USB 接口在 F2070 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。

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。F2070 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 F2070 发送命令和查询，F2070 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。F2070 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 F2070 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]。

响应字符串为 F2070 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，F2070 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

F2070 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 F2070 发送命令 CUR 10.000[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	CR
实际发送	16 进制 HEX	43h	55h	52h	20h	31h	30h	2Eh	30h	30h	30h	0Dh
字节	10 进制 DEC	67	85	82	32	49	48	46	48	48	48	13

4.5.3 应答机制

F2070 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，F2070 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 F2070 处于标准显示界面，否则除命令 ***RST** 外 F2070 对其余命令/查询均返回忙 **BUSY**。F2070 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，F2070 返回 **ERROR**。

由于通讯时序问题及可能的空间干扰，F2070 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，F2070 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

F2070 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，F2070 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 F2070 的应答响应，并于接收到应答响应后发送下一命令或查询。

F2070 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：

- ① 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。
- ② 最后一个结束符发送后的 100ms 内尽量不发起其它通讯。
- ③ 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。
- ④ 接收包含结束符[CR]在内的完整响应。
- ⑤ 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

F2070 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，F2070 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：F2070 输出端处于正常输出状态，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 F2070 的输出电流以线性渐变方式递增至 10A，此过程中 F2070 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 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

F2070 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 F2070 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 接口命令和查询集

F2070 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-F2070-0007

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			
CUR	设置输出电流	CUR ±xx.xxx[term]	CMLT
CURFD	设置输出电流微调位	CURFD n[term]、n=0—2	CMLT
CURFDOWN	当前输出电流微调位数值-1	CURFDOWN[term]	CMLT
CURFUP	当前输出电流微调位数值+1	CURFUP[term]	CMLT
FAST0	输出电流快速回零	FAST0[term]	CMLT
LOCK	设置键盘锁状态	LOCK n[term]、n=0、1	CMLT
NTRIG	设置常规触发方式	NTRIG n[term]、n=0—2	CMLT
OUT	设置输出端状态	OUT n[term]、n=0、1	CMLT
NTRIGD	设置常规触发输出延迟时间	NTRIGD x.x[term]	CMLT
PROTECTRST	解除内部功率过载保护	PROTECTRST[term]	CMLT
PN	PN 方式电流换向	PN[term]	CMLT
RAMPAUDIO	开启或关闭渐进结束声响	RAMPAUDIO n[term]、n=0、1	CMLT
RATE	设置电流线性渐变速率	RATE x.xx[term]	CMLT
REV	REV 方式电流换向	REV[term]	CMLT
REVDELAY	设置换向延迟时间组合	REVDELAY[term]	CMLT
STOP	停止正在进行的电流线性渐变	STOP[term]	CMLT
SWEEP	开始电流扫描	SWEEP[term]	CMLT
SWABORT	中止电流扫描	SWABORT[term]	CMLT

表 4-1 接口命令和查询集（续）

TAB-MAN-F2070-0007

助记符	描述	格式	正常响应
③ 设备特殊命令			
SWCONT	由暂停点继续电流扫描	SWCONT[term]	CMLT
SWPAUSE	暂停电流扫描	SWPAUSE[term]	CMLT
SWMODE	设置扫描模式	SWMODE n[term]、n=0—2	CMLT
SWMAX	设置电流扫描最大值	SWMAX xx.xxx[term]	CMLT
SWTRIG	设置扫描触发输出方式	SWTRIG n[term]、n=0—2	CMLT
SWTRIGINT	设置扫描触发输出时间间隔	SWTRIGINT x.x[term]	CMLT
④ 设备特殊查询			
CMPLS?	查询当前是否进入电压钳位状态	CMPLS?[term]	0、1
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—2
DIR?	查询当前输出电流方向	DIR?[term]	0、1
LOCK?	查询当前键盘锁状态	LOCK?[term]	0、1
NTRIG?	查询当前常规触发输出方式	NTRIG?[term]	0—2
NTRIGD?	查询当前常规触发输出延迟时间	NTRIGD?[term]	x.x
OUT?	查询当前输出端状态	OUT?[term]	0、1
PROTECTS?	查询当前保护状态	PROTECTS?[term]	状态值
RATE?	查询当前电流线性渐变速率	RATE?[term]	x.xx
REVDELAY?	查询当前换向延迟时间组合	REVDELAY?[term]	0—4
SWEEP?	查询当前电流扫描状态	SWEEP?[term]	0—2
SWMODE?	查询当前电流扫描模式	SWMODE?[term]	0—2
SWMAX?	查询当前电流扫描最大值	SWMAX?[term]	电流值
SWTRIG?	查询当前扫描触发输出方式	SWTRIG?[term]	0—2
SWTRIGINT?	查询当前扫描触发输出时间间隔	SWTRIGINT?[term]	x.x

4.6.2 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： 设置输出端状态为高阻状态，输出电流归零，电流方向为正向，停止正在进行的电流扫描，解除保护。

4.6.3 通用接口查询

*IDN?

功能： 查询仪器产品序列号

格式： *IDN?[term]

返回： **F2070** 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： **F2070** 使用 17 位产品序列号：

F	2	0	7	0	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	

4.6.4 设备特殊命令

CUR

功能： 设置输出电流

格式： CUR $\pm$ xx.xxx[term]

返回： F2070 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 65.000，或者浮点数格式错误时，F2070 返回 **ERROR**[CR]。

输出电流设置完成后，F2070 返回 **CMLT**[CR]。

备注： 参数单位为安培（A）。

F2070 支持除“x.”以外的合法浮点参数 xx.xxx 格式，小数点之前的位数应小于或等于 2 位，小数点以后第 3 位之后的位数自动省略。

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。

输出端位于高阻状态，且 **CUR** 命令不改变当前电流输出方向时，F2070 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，F2070 输出正电流，单位为“-”时反之。参数单位缺省时，F2070 默认电流方向为正向。

输出端位于高阻状态，且 **CUR** 命令将改变电流输出方向时，F2070 立即改变当前电流设置值至命令参数数值，并且改变输出电流方向，但不改变输出电流大小。

设置输出电流、电流线性渐变方式、电流换向、输出端状态和停止电流线性渐变的详细描述请分别参阅 3.4、3.5、3.6、3.8 和 3.9 中的内容，并请参阅命令 **STOP**、**FAST0** 和查询 **CUR?**。

CURFD

功能： 设置输出电流微调位

格式： CURFD n[term]、n=0—2

返回： F2070 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]。

参数非 0、1、2 时，返回 **ERROR**[CR]。

备注： 0=0.001A 位，1=0.01A 位，2=0.1A 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 3.4.1 中的内容，并请参阅命令 **CURFUP**、**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： F2070 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 3.4.1 中的详细内容，并请参阅命令 **CURFD**、**CURFUP** 和查询 **CURFD?**。

CURFUP

- 功能：当前输出电流微调位数值+1
- 格式：**CURFUP**[term]
- 返回：**F2070** 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 3.4.1 中的详细内容，并请参阅命令 **CURFD**、**CURFDOWN** 和查询 **CURFD?**。

FAST0

- 功能：输出电流快速归零
- 格式：**FAST0**[term]
- 返回：**F2070** 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]。
 输出端为高阻状态时，立即返回 **ERROR**[CR]。
 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 **F2070** 以 3A/s 的固定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]。
 快速归零不影响正在进行的换向过程，并立即返回 **CMLT**[CR]。
- 备注：快速归零不改变电流输出方向，并可于 **F2070** 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 3.9 中的内容，并请参阅命令 **STOP**。

LOCK

- 功能：设置键盘锁状态
- 格式：**LOCK 0**[term]、**LOCK 1**[term]
- 返回：**F2070** 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 3.18 中的内容，并请参阅查询 **LOCK?**。

NTRIG

- 功能：设置常规触发输出方式
- 格式：**NTRIG n**[term]、n=0—2
- 返回：**F2070** 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=关闭，1=On，2=On+J。
 常规触发输出方式的详细描述请参阅 3.16 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 x.x[term]

返回： F2070 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 x.x** 均有效，并于设置完成后均返回 **CMLT[CR]**。

x.x>5.0 或浮点数表示法不正确时，F2070 返回响应 **ERROR[CR]**。

备注： 参数 x.x 为 0—5.0 之间的 2 位无符号浮点数。

F2070 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 3.16 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高阻状态

格式： OUT 0[term]、OUT 1[term]

返回： F2070 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，并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** 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=正常输出状态。

命令 **OUT 1** 使输出端由高阻状态切换至正常输出状态且执行线性渐变过程中，可随时使用命令 **STOP** 或 **FAST0** 停止线性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 3.8 中的内容，并请参阅命令 **STOP**、**FAST0** 和查询 **OUT?**。

PROTECTRST

功能： 解除保护

格式： PROTECTRST[term]

返回： F2070 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 F2070 是否进入保护状态，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 3.7.5 中的内容，水压过低保护和过热保护请参阅 3.15 中的内容，并请参阅查询 **PROTECTS?**。

PN

功能： 以 PN 方式电流换向

格式： PN[term]

返回： F2070 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]**。

输出端处于高阻状态下，F2070 不改变输出电流大小但立即切换电流方向并返回 **CMLT[CR]**。

输出端为正常输出状态时，F2070 首先以线性渐变方式使输出电流归零，并在换向后

以线性渐变方式恢复之前的电流设置值，而后返回 **CMLT[CR]**。

备注：输出端为正常输出状态且当前输出电流为 0 时，F2070 不执行线性渐变并立即切换电流方向。

电流方向和换向的详细描述请分别参阅 3.6 中的内容，并请参阅命令 **REV**、**REVDELAY** 和查询 **DIR?**、**CUR?**、**REVDELAY?**。

RAMPAUDIO

功能：设置渐进结束声响

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

返回：F2070 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 1 开启渐进结束声响，并返回 **CMLT[CR]**。

RAMPAUDIO 0 关闭渐进结束声响，并返回 **CMLT[CR]**。

参数非 0 或 1 时，返回 **ERROR[CR]**。

备注：0=关闭渐进结束声响，1=开启渐进结束声响。

渐进结束声响的详细描述请参阅 3.5.6 中的内容，并请参阅查询 **RAMPAUDIO?**。

RATE

功能：设置电流线性渐变速率

格式：**RATE x.xx[term]**

返回：F2070 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]**。

$x.xx > 5.00$ 或 $x.xx < 0.01$ ，或浮点数表示法不正确时，返回响应 **ERROR[CR]**。

备注：参数 $x.x$ 为 0.01—5.00 之间的 2 位无符号浮点数。

F2070 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 3.5 中的内容，并请参阅查询 **RATE?**。

REV

功能：以 REV 方式电流换向

格式：**REV[term]**

返回：F2070 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]**。

输出端处于高阻状态下，F2070 将输出电流设置值归零，并立即切换电流方向，而后返回 **CMLT[CR]**。

输出端为正常输出状态时，F2070 首先以线性渐变方式使输出电流归零，并在换向后返回 **CMLT[CR]**。

备注：电流方向和换向的详细描述请分别参阅 3.6 中的内容，并请参阅命令 **PN**、**REVDELAY** 和查询 **DIR?**、**CUR?**、**REVDELAY?**。

REVDELAY

功能：设置电流换向延迟时间组合

格式：**REVDELAY n[term]**、 $n=0-4$

返回：F2070 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]**。

参数非 0—4 时，返回 **ERROR[CR]**。

备注：0=1s+1s, 1=2s+1s, 2=3s+1s, 3=4s+2s, 4=5s+3s。

电流换向延迟时间组合的详细描述请分别参阅 3.6 中的内容，并请参阅命令 **PN**、**REV** 和查询 **DIR?**、**CUR?**、**REVDELAY?**。

STOP

功能：停止正在进行的电流线性渐变过程和电流换向过程

格式：**STOP[term]**

返回：**F2070** 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]**。

输出端为高阻状态时，立即返回 **CMLT[CR]**。

输出端为正常输出状态，且 **F2070** 未执行电流线性渐变过程和电流换向过程时，立即返回 **CMLT[CR]**。

F2070 正在执行电流线性渐变过程或电流换向过程时，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 3.9 中的内容，并请参阅命令 **FAST0**。

SWEEP

功能：开始电流扫描

格式：**SWEEP[term]**

返回：**F2070** 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]**。

输出端处于高阻状态时，立即返回 **ERROR[CR]**。

输出端为正常输出状态时，**F2070** 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 3.10 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]**

返回：**F2070** 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]**。

输出端处于高阻状态，或者或 **F2070** 未启动电流扫描，立即返回 **ERROR[CR]**。

否则，**F2070** 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，**F2070** 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 3.10 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]**

返回：**F2070** 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]**。

输出端处于高阻状态，或者或 **F2070** 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，**F2070** 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 3.10 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]

返回： **F2070** 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]。

输出端处于高阻状态，或者 **F2070** 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，**F2070** 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 3.10 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—2

返回： **F2070** 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** 和 **SWMODE 2** 分别设置扫描模式为 **SWA**、**SWB** 和 **SWC**，并返回 **CMLT**[CR]。

参数非 0、1、2 时，返回 **ERROR**[CR]。

备注： 0=SWA，1=SWB，2=SWC。

电流扫描模式的详细描述请参阅 3.10 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： **SWMODE** xx.xxx[term]

返回： **F2070** 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 65.000 或小于 0.001，或者浮点数格式错误时，**F2070** 返回 **ERROR**[CR]。

扫描最大值设置完成后，**F2070** 返回 **CMLT**[CR]。

备注： xx.xxx 为无符号浮点数。

F2070 支持除“x.”以外的合法浮点参数 xx.xxx 格式，小数点之前的位数应小于或等于 2 位，小数点以后第 3 位之后的位数自动省略。

电流扫描最大的详细描述请参阅 3.10 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

返回： **F2070** 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，并返回 **CMLT**[CR]。

SWTRIG 1 和 **SWTRIG 2** 分别设置扫描触发输出方式为“On”和“On+J”，并返回 **CMLT**[CR]。

参数非 0、1、2 时，返回 **ERROR**[CR]。

备注： 0=关闭，1=On，2=On+J。

扫描触发输出方式的详细描述请参阅 3.17 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: **SWTRIGD x.x[term]**

返回: **F2070** 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, **SWTRIGD x.x** 均有效, 并于设置完成后均返回 **CMLT[CR]**。

$x.x > 2.0$ 或 $x.x < 0.1$, 或者浮点数表示法不正确时, **F2070** 返回响应 **ERROR[CR]**。

备注: 参数 $x.x$ 为 $0.1 \sim 2.0$ 之间的 2 位无符号浮点数。

F2070 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 3.17 中的相关内容, 并请参阅命令 **SWTRIG** 和查询 **SWTRIG?**、**SWTRIGINT?**。

4.6.5 设备特殊查询

CMPLS?

功能: 查询是否进入电压钳位状态

格式: **CMPLS?[term]**

返回: **F2070** 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 3.7 中的内容。

CUR?

功能: 查询当前输出电流设置值

格式: **CUR?[term]**

返回: **F2070** 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, 均返回包含电流方向在内的电流设置值 **±xx.xxx[CR]**。

备注: 返回响应 **±xx.xxx** 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。

当前输出电流设置值为 **0** 时, **F2070** 根据电流方向返回 “+0” 或 “-0”。

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: **F2070** 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]**。

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

备注: **0**=0.001A 位, **1**=0.01A 位, **2**=0.1A 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**。

DIR?

功能: 查询当前输出电流方向

格式: DIR?[term]

返回: F2070 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 3.6 中的内容, 并请参阅命令 **PN**、**REV**、**CUR** 和查询 **CUR?**。

LOCK?

功能: 查询当前键盘锁状态

格式: LOCK?[term]

返回: F2070 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 3.18 中的内容, 并请参阅命令 **LOCK**。

NTRIG?

功能: 查询当前常规触发输出方式

格式: NTRIG?[term]

返回: F2070 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 F2070 返回当前常规触发输出方式: **0[CR]**、**1[CR]** 或 **2[CR]**。

备注: 0=关闭, 1=On, 2=On+J。

常规触发输出方式的详细描述请参阅 3.16 中的相关内容, 并请参阅命令 **NTRIG**、**NTRIGD** 和查询 **NTRIGD?**。

NTRIGD?

功能: 查询当前常规触发输出延迟时间

格式: NTRIGD?[term]

返回: F2070 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 F2070 处于何种常规触发输出方式, F2070 均返回当前常规触发输出延迟时间 **x.x[CR]**。F2070 只支持“1.0”的返回浮点数格式。

备注: 参数 x.x 为 0—5.0 之间的 2 位无符号浮点数。

常规触发延迟时间的详细描述请参阅 3.16 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]

返回: F2070 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=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**。

PROTECTS?

功能： 查询当前保护状态

格式： **PROTECTS?[term]**

返回： **F2070** 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]**。

否则返回当前保护状态： **abc[CR]**，其中：

a 为内部过功率保护状态，0 为未保护，1 为保护；

b 为水压过低保护状态，0 为未保护，1 为保护；

c 为过热保护状态，0 为未保护，1 为保护；

备注： 内部功率过载保护的详细描述请参阅 3.7.5 中的内容，水压过低保护和过热保护请参阅 3.15 中的内容，并请参阅命令 **PROTECTRST**。

RAMPAUDIO?

功能： 查询当前渐进结束声响设置

格式： **RAMPAUDIO?[term]**

返回： **F2070** 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]**。

否则返回当前渐进结束声响设置： **0[CR]** 或 **1[CR]**。

备注： 0=关闭渐进结束声响，1=开启渐进结束声响。

渐进结束声响的详细描述请参阅 3.5.6 中的内容，并请参阅命令 **RAMPAUDIO**。

RATE?

功能： 查询当前电流线性渐变速率

格式： **RATE?[term]**

返回： **F2070** 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 **F2070** 返回当前电流线性渐变速率 **x.xx[CR]**。**F2070** 只支持“1.00”的返回浮点数格式。

备注： 参数 x.xx 为 0.01—5.00 之间的 2 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 3.5 中的相关内容，并请参阅命令 **RATE**。

REVDELAY?

功能： 查询当前电流换向延迟时间组合

格式： **REVDELAY?[term]**

返回： **F2070** 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]**。

否则返回当前换向延迟时间组合： **0[CR]**、**1[CR]**、**2[CR]**、**3[CR]** 或 **4[CR]**。

备注： 0=1s+┐+1s，1=2s+┐+1s，2=3s+┐+1s，3=4s+┐+2s，4=5s+┐+3s。

电流换向延迟时间组合的详细描述请分别参阅 3.6 中的内容，并参阅命令 **PN**、**REV**、**REVDELAY** 和查询 **DIR?**、**CUR?**。

SWEEP?

功能： 查询当前电流扫描状态

格式： **SWEEP?[term]**

返回： **F2070** 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]。

当前输出端状态为高阻状态时，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 3.10 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]

返回： **F2070** 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]或 **2**[CR]。

备注：**0**=SWA，**1**=SWB，**2**=SWC。

电流扫描的详细描述请参阅 3.10 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]

返回： **F2070** 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.xxx**[CR]。

备注： 返回响应 **xx.xxx** 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 3.10 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]

返回： **F2070** 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 **F2070** 返回当前扫描触发输出方式：**0**[CR]、**1**[CR]或 **2**[CR]。

备注：**0**=关闭，**1**=On，**2**=On+J。

扫描触发输出方式的详细描述请参阅 3.17 中的相关内容，并请参阅命令 **SWTRIG**、**SWTRIGINT** 和查询 **SWTRIG?**。

SWTRIGINT?

功能： 查询当前扫描触发输出时间间隔

格式： **SWTRIGINT?**[term]

返回： **F2070** 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 **F2070** 处于何种扫描触发输出方式，**F2070** 均返回当前扫描触发输出时间间隔 **x.x**[CR]。**F2070** 只支持“1.0”的返回浮点数格式。

备注： 参数 **x.x** 为 **0.1—2.0** 之间的 2 位无符号浮点数。

扫描触发输出时间间隔的详细描述请参阅 3.17 中的相关内容，并请参阅命令 **SWTRIG**、**SWTRIGINT** 和查询 **SWTRIG?**。

附件

5.1 简介

本章包含 F2070 程控功率电流源各附件的操作方法，以及各电学接口定义。5.2 为附件明细和电学定义的详细说明。

5.2 附件

F2070 配备附件如表 5-1 所示：

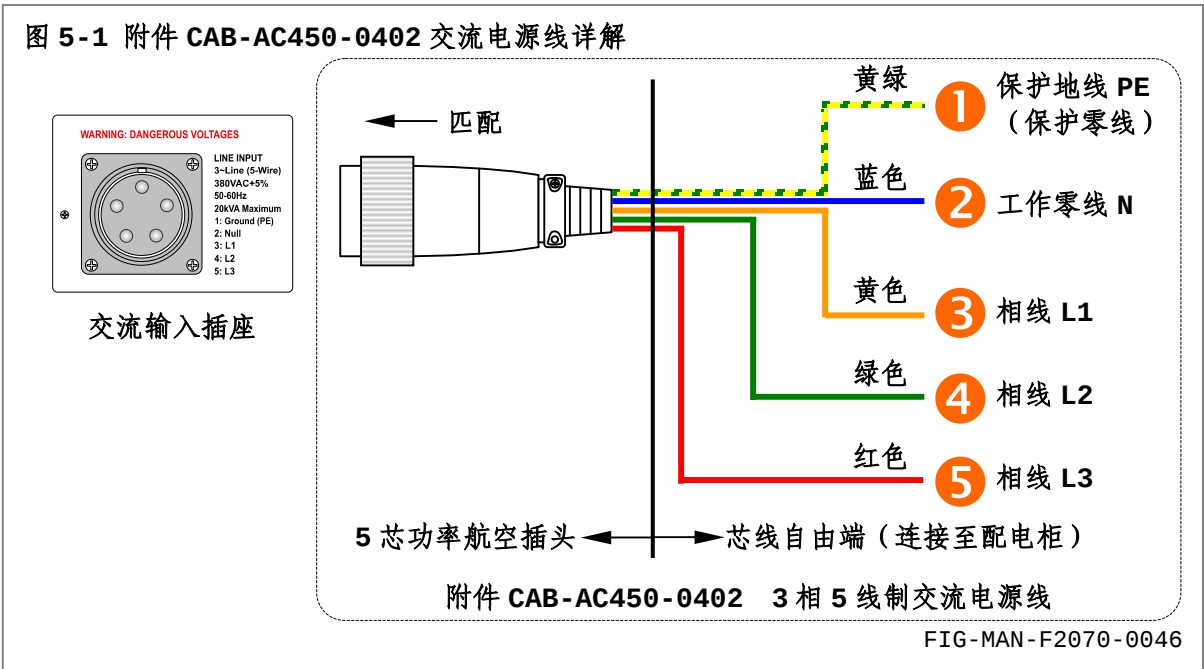
表 5-1 F2070 附件清单

TAB-MAN-F2070-0008

型 号	描述	数 量	标准配置
CAB-AC450-0402	5 芯交流 380V/40A 电源线，长度 2 米	1 条	√
CAB-DC080-2	5 芯直流 80A 输出电缆，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-AFM-2	USB-A 延长电缆，长度 1.8 米	1 条	√
CONV232-9-25	RS-232C 9 针转 25 针转换器	1 只	---

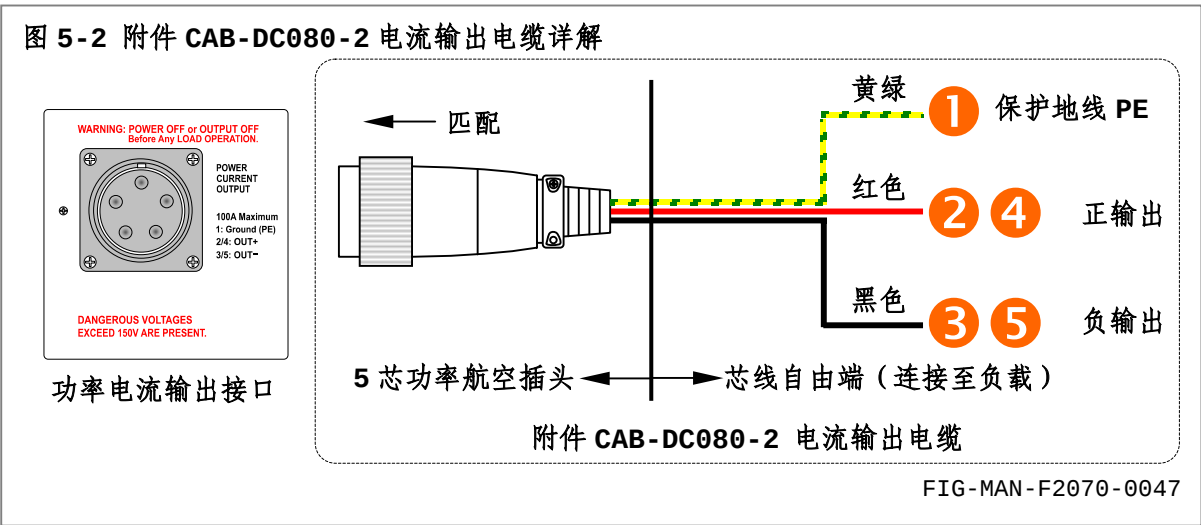
5.2.1 交流电源线 CAB-AC450-0402

附件 CAB-AC450-0402 为 5 芯交流 450V/40A 电源线，长度 2 米，与 F2070 后面板的电源输入插座匹配，如图 5-1 所示。



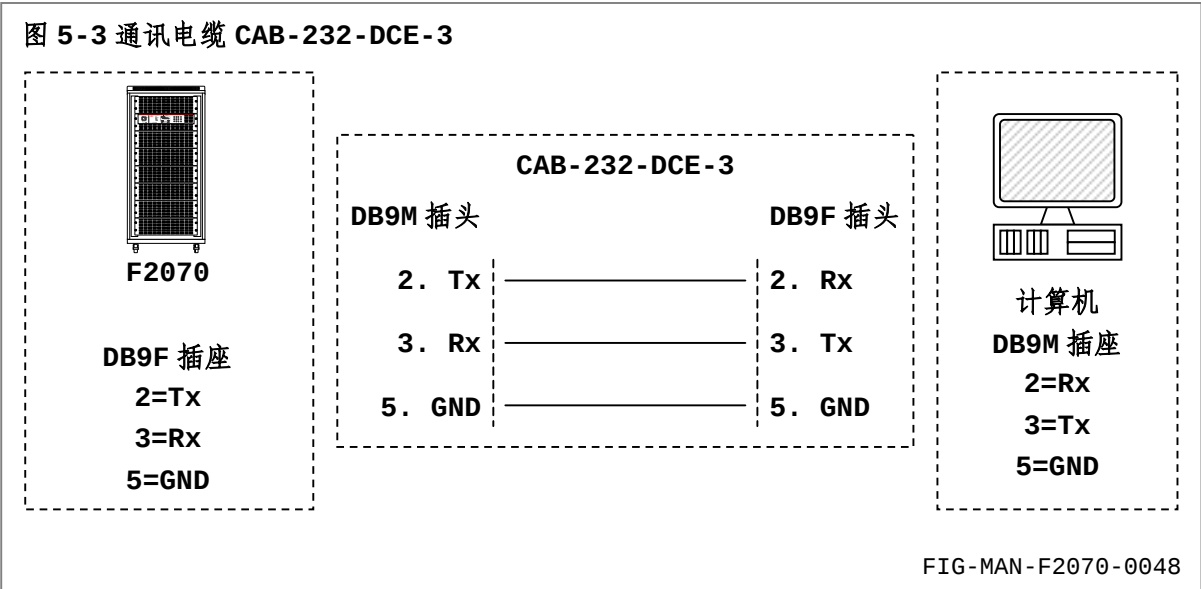
5.2.2 大电流输出电缆 CAB-DC080-2

附件 CAB-DC080-2 为五芯直流 80A 输出电缆，长度 2 米，与 F2070 后面板的功率电流输出接口插座匹配，如图 5-2 所示。



5.2.3 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 F2070 后面板的 RS-232C DCE 插座匹配，符合 EIA-232-E 标准，如图 5-3 所示。



5.2.4 通讯电缆 CAB-USB-AFM-2

附件 CAB-USB-AFM-2 延长电缆用于将 F2070 后面板的 USB-A 电缆延长连接至计算机，符合 USB 1.1 标准。

5.2.5 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 F2070，符合 EIA-232-E 标准。

<本页为空页>
This Page Intentionally Left Blank

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-F2070-0009

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) G·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	$\frac{1}{4\pi \times 10^{-7}}$	A·m ² /kg Wb·m/kg
磁矩	m	emu erg/G (尔格/高斯)	10^{-3}	A·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) Wb/(A·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 H·m ² /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 H·m ² /mol
磁导率	μ	无量纲数	$4\pi \times 10^{-7}$	H/m Wb/(A·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-F2070-0010

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	$c_1 = 2\pi h c^2$	$3.7418 \times 10^{-16} \text{ W/m}^2$
第二辐射常数 Second Radiation Constant	$c_2 = hc/k$	0.0144mK
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-F2070-0011

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-F2070-0012

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	Omicro	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-F2070-0013

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-F2070-0014

					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	b7 b6 b5 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