

第一章 开关电源设计的一般考虑

在设计开关电源之前，应当仔细研究要设计的电源技术要求。现以一个通信电源模块的例子来说明设计要考虑的问题。该模块的技术规范如下：

1 电气性能

除非另外说明,所有参数是在输入电压为 220V,交流 50Hz 以及环境温度 25℃ 下测试和规定的。

表 1.1

额定电压	输出电流 I(max)	限流范围	过压范围	调压范围 1	调压范围 2	效率
54.9V	28A	110% I _{max}	58.8- 61.2V	52.55- 52.75V	45.7 45.9V	> 87%

1.1 输入

电压：单相交流额定电压有效值 220V ± 20%

频率：频率范围 45-65Hz

电流：在满载运行时,输入 220V,小于 8A。在 264V 时,冲击电流不大于 18A

效率：负载由 50% - 100%为表 2.1 值

功率因数：大于 0.90,负载在 50%以上,大于 0.95

谐波失真：符合 IEC 555-2 要求

启动延迟：在接通电源 3 秒内输出达到它的额定电平

保持时间：输入 176V 有效值,满载,大于 10ms

1.2 输出

电压：在满载时,输出电压设定在表 1 值的 ± 0.2%

电流：负载电流从零到最大值(参看表 1)，过流保护开始是恒流,当电压降低到一定值得时,电流截止。

稳压特性：负载变化由零变到 100%, 输入电压由 176V 变到 264V 最坏情况下输出电压变化不超过 200mV。

瞬态响应：在没有电池连接到输出端时,负载由 10%变化到 100%,或由满载变化的 10%,恢复时间应当在 2ms 之内。

最大输出电压偏摆应当小于 1V。

静态漏电流：当模块关断时,最大反向泄漏电流小于 5mA。

温度系数：模块在整个工作温度范围内 ± 0.015%。

温升漂移：在起初 30 秒内, ± 0.1%

输出噪音：输出噪音满足通信电源标准,衡重杂音 < 2mV。

1.3 保护

输入：输入端保护保险丝定额为 13A。

输出过压：按表 1.1 设置过压跳闸电压,输出电压超过这个电平时,将使模块锁定在跳闸状态,通过断开交流输入电源使模块复位。

输出过流：过流特性按表 1.1 的给定值示于图 1。过流时,恒流到 60%电压,然后电流电压转折下降。(最后将残留与短路相同的状态)

输出反接：在输入反接时,在外电路设置了一个保险丝烧断(< 32A/ 55V)

过热：内部检测器禁止模块在过热下工作，一旦温度减少到正常值以下,自动复位。

1.4 显示和指示功能

输入监视：输入电网正常显示。

输出监视：输出电压正常显示。(过压情况关断)。

限流指示：限流工作状态显示。

负载指示：负载大于低限电流显示。

继电器：输入和输出和输入正常同时正常显示。

输出电流监视：负载从 10%到 100%,指示精度为 ± 5%。

遥控降低：提供遥控调节窗口。

1.5 系统功能

电压微调：为适应电池温度特性,可对模块的输出电压采取温度补偿。

负载降落：为适应并联均流要求，应能够调节外特性。典型电压降落 0.5%,使得负载从零到增加 100%,输出电压下降 250mV。

遥控关机：可实现遥控关机。

1.6 电气绝缘

下列试验对完成的产品 100%试验。

1.在 L(网)和 N(中线)之间及其它端子试验直流电压为 6kV。

2.在所有输出端和 L,N 及地之间试验直流 2.5kV。这检查输出和地之间的绝缘。

3.下列各点分别到所有其它端子试验直流 100V：

电压降低(11 和 12 脚)

继电器接点(14,15 和 16 脚)

状态选择-输入,输出和电流限制(3,4,5 和 6 脚)

4.地连续性-以 25A,1 分钟检查,确认安全接地的阻抗小于 0.1 .

1.7 电磁兼容

符合邮电部通信电源标准.

2 机械规范

尺寸：略

重量：略

安装方向：模块设计安装方向是面板垂直放置,使空气垂直通过模块.

通风和冷却：模块的顶部和底部都有通风槽,使空气流通过模块,经过散热器.因此在系统中应当没有阻碍地对流冷却模块,并应强迫冷却装置使冷却空气经过模块自由流通.

3 环境条件

环境温度：在 0 ~ 55 温度范围内满功率工作.在模块下 50mm 处模块的入口测量温度.

存储温度：- 40 ~ +85

湿度：5% ~ 80%,不结冰.

高度：-60m ~ 2000m 工作;-60m ~ 10000m 不工作.

4 可靠性

MTBF 大于 100000 小时.

这些要求包括：输入电源，输入电压的类型 - 交流还是直流。交流电源的频率和电压变化范围，整流滤波方式，是否有功率因数要求？如果是直流电源，是直流发电机，还是蓄电池、抑或其它直流变换器？是电流源还是电压源？它们的变化范围和纹波大小。输出电压（电流）大小和调节范围，稳压（或稳流）精度，输出有几路？输出电流（或输出功率），输出纹波电压要求，是否需要限流？瞬态响应要求。负载特性：蓄电池，还是荧光灯，还是电机？这些电气性能之外，是军用还是民用？EMC 要求，环境温度。体积与重量要求。是否需要遥控，遥测或遥调？是否需要提供自检测，如此等等。设计出的电源必须满足这些要求。

1.1 主电网电源

如果你购进国外电气设备，不管青红皂白就去插上电源，弄不好就可能烧坏设备电源。因此，要安全使用国外设备，要知道国外电网电源的种类和相关标准。如果你设计的产品是提供出口，也必须了解该地区的电网的标准。

首先世界上主电网的交流电源频率在美国是 60Hz，而在中国和欧洲是 50Hz。实际上，频率也有一定的变化范围，电网负荷重的时候，50Hz 可能降低到 47Hz；如果负载很轻时，60Hz 可能上升到 63Hz。这是因为带动发电机的发动机转速不可能是没有调节公差的恒速运行。50Hz 供电的直流电源必须使用比 60Hz 供电更大的滤波元件，供电变压器铁芯更大或线圈匝数更多。

其次电源电压在不同地区也不同：在中国，家用电器和小功率电气设备由单相交流 220V 供电，工业用电是三相 380V。在美国民用电源为 110V（有时是 120V），而家用电器，如洗衣机电源是 208V，而工业用电是 480V，但是照明却是 277V，当然也有用 120V 的；在欧洲为 230V，而在澳大利亚却是 240V，如此等等。

以上的电网电压仅仅是其额定值，每一种电网都有允许偏差。例如电网随负荷变化时产生较大波动。在上世纪末我国电网改造前，电网电压波动范围高达 30%以上。随着国民经济发展，大量电厂建立，供电量充足，同时经过电网改造，合理输配电，目前在我国大多数地区供电质量明显提高，一般变化在 10%以内，即在 198V ~ 242V 之间。但在铁道系统和某些边远山区变化范围仍可能达到 30%。因此，你设计的开关电源，必须迎合使用地区的供电情况，即使遇到意外情况，也能够安全运行而不发生故障。有时电网也可能丢失几个周波，要求有些电源能够不间断（保持时间）地工作，这就要求较大的输出电容或并联电池满足这一要求。

电网还存在过压情况。雷击和闪电在 2 阻抗上,引起线与线电压和共模干扰可高达 6000V 电压。闪电有两种类型，一种是短脉冲，上升时间 1.2 μ s，衰减时间 50 μ s，另一种很高能量，衰减时间 1ms。电网还有瞬态电压，峰值达 750V，持续半个电网周期，这主要是大的负载的接入或断开，或高压线跌落引起电网的瞬变。

实际上工业电网面临的问题远不止这些，交流电网是一个肮脏的环境。你所设计的电源应当能够在这个环境中工作，同时还要满足国际和各地区安全标准要求。

1.2 电池

在通信，电站，交通要求不间断供电的地方，电池作为不可缺少的储能后备能源。大量移动通讯站和手机，以及电动汽车，助力电瓶车都依靠电池提供能量。风力发电和太阳能发电存储峰值能量作

为后备能源。但是电池涉及到电化学和冶金学知识，已超出一般电气工程师的知识范畴。这里介绍一些使用电池基础知识，使你了解设计充电电源和使用电池供电时应注意的一些问题。

利用电化学可逆原理做成的最基本的单元电池叫单体电池。典型的单体电池是由两个金属极板和构成它们之间导电通路工作介质组成，这种通路材料可能是液体或固体，与特定化学机理有关。这种结构关键在于是否能够更有效进行电 - 化学反应（可再充电，即二次电池，也称为蓄电池。不能再充电叫一次电池）。根据不同通路材料的安排，一个金属极板为电池的阳极 - 正极，另一个则为阴极 - 负极。如将两个金属极板（阴极和阳极）接到电源上，电的作用改变了工作介质的化学状态，这就是储能。如将已储能的电池极板接到负载，材料化学作用放出电荷返回到原始状态，释放出电能。

单体电池一般很低，例如铅酸蓄电池单体电池额定电压为 2V。因此较高电压的电池一般由许多单体电池串联组成。**应当注意**：不要自己将电池连接成你需要的电压和容量，电池不能直接并联！你只能按制造厂系列产品选择你需要的电池容量和电压。如果在每个电池端串联一个二极管就可以并联。在电池工作范围内，电池看起来像一个理想电压源，但实际电源并非如此。首先，当充电时，端电压会升高；放电时，端电压会降低。这就说明蓄电池存在内电阻，图 1.1 是标称电压 12V 的 NiH 电池的伏安特性，随着输出电流的增加，输出电压下降（类似正弦双曲线）。标称电压为 12V，电池放出电流为负，充电电流为正。电池放出小电流时，电池端有一个类似电阻的压降，电流加倍压降也几乎加倍；在大电流时，电压降增加减慢；在端电压下降到零以前，电流可以达到非常大的数值，但绝对不能将电池短路，如果将 NiH 电池输出短路将引起电池爆炸！其次，电池不是与频率无关的电压源，在充电和放电时，产生电化学反应需要一定的时间，等效为电容与内阻并联。此外，在典型开关频率 20kHz 或更高时，电池有很大内阻抗。这是因为电池端子间，内部极板间存在小电感；例如，一个 NiH（镍 - 氢）电池可能具有 200nH 的感抗，五个这样的电池串联（获得 6V 电压）有大约 1 μ H 电感。如果开关频率为 200kHz，阻抗大约 1 Ω 。所以这时电池不是理想电压源，不可能吸收你的变换器产生的开关纹波，为此，通常在电池的两端并联一个电容，减少内电感的影响。

电池输出电流和输出电压的关系还与温度以及电池剩余电荷量有关。如果放电电流太大，会损伤电池。几乎所有电池，如果在远低于它的工作温度下放电，也会损坏电池。例如密封铅酸电池在低于 -10 $^{\circ}$ C 不能工作，这就是为什么在很冷的天气发动不了你的汽车。

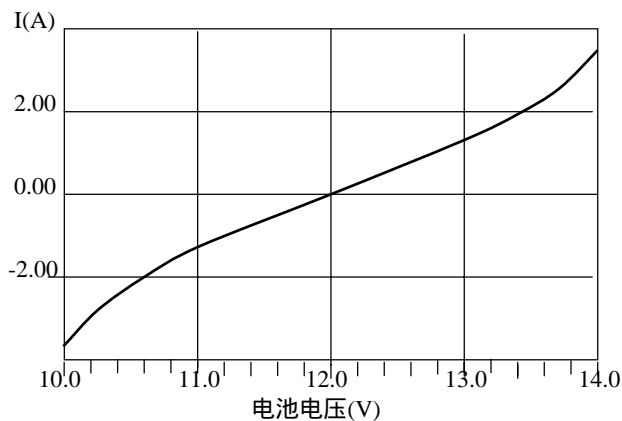


图 1.1 典型 12V 电池 V-I 特性

制造厂标定电池的容量一般以电池具有的电荷量 - 安时（电流 \times 时间 = 电荷 AH）来表示。这使得电源设计者感到为难，你不能够简单得到电池输出参数与多大能量的关系，因为它不等于电池容量乘以输出电压；何况输出电压又与输出电流有关。这些参数关系由制造厂以曲线形式提供的，而曲线似乎不能直接找到你设计需要的工作点，需要从这些曲线来回参照得到你需要的数据。你自己测试电池是不切实际的，因为每个制造厂制造的电池总有些小的差别，所以你不能假定每个电池具有相同的化学特性和安时定额，以及它们在同一场合具有相同的运行时间。

另一个现象是自放电。如果你充好电的电池放置在那里，不接任何负载，它自己会逐渐失去存储的能量。失去能量所需要的时间与化学工作介质有关：如 NiH 电池 24 小时；密封铅酸蓄电池在温度 25 $^{\circ}$ C 下约 16 月容量损失 50%，温度升高 10 $^{\circ}$ C，时间缩短一半。而某些锂电池可达几年不等。所以放置不用的铅酸电池一般每 3 个月得进行充放电维护一次。

电池不可能无限期充放电使用，电池也有寿命。在一定时间范围内，电池经过多次充电/放电周期以后，不再能存储额定容量，这个时间就是电池寿命的终止。它取决于电池如何工作，它经历了多少个充电/放电周期，放电的深度如何等等。例如，铅酸密封电池放电深度 50%额定容量，充放电可达 500~600 次；放电深度 100%，寿命仅 200~300 充放电周期。即使电池用于备份，所谓浮充状态（总是保持充满状态），在 5~10 年内也需要更换。

电池是一个不愉快的能源，它也是一个不舒服的负载。当你对电池补充充电 - 均衡充电时，你不能用一个电压源对其充电，因为电池充电电流与电压成指数关系，会造成充电电流热失控，将导致电池损坏。因此所有类型电池充电**必须**采取限流措施。如果电池充满，即达到额定电压时，应当转换到浮充电状态，补充自放电失去的能量，以保证电池保持满容量状态。

手册中指定充电电流（放电电流也一样）称为“C”。1C 定额是假定电池充电 1 小时达到电池的额定容量值：例如以 1C (20A) 对 20AH 电池充电一小时的电池容量为 $1 \times 20A = 20AH$ 。铅酸电池通常均衡充电电流小于 0.3C。均衡充电一般首先以 0.15C 恒流充电一定时间，当达到容量的 90% 后，再转换到恒压充电，进入浮充状态。浮充电压通常由生产厂家设置。环境温度 25℃ 时，一般按单体电池电压 2.23V ~ 2.35V（大部分用 2.23V ~ 2.25V）之间设置浮充电压。环境温度每升高 1℃，浮充电压下降 0.005V。充满电时单体电池端电压在 2.23V 左右。过充电和充电电流过大都会损伤电池，使电池寿命大大缩短。电池充足后，维持自放电浮充电流，一般在 0.05C 以下。铅酸电池还不能过放电，一般认为单体电池端电压达到 1.75V 应当终止放电。所以，要正确使用电池应当对电池的充、放电电压、电流和容量（电流和时间积分）进行检测和控制，才能保证电池的长寿命。

各种不同化学机理的电池 - 铅酸电池，锂电池，镍镉电池，锌 - 空气和镍氢 (NiH) 电池，无论那种，都具有自身的特性。所以你得花费一定时间去研究它们。最好的办法是去找愿意和你紧密合作的制造商，并认真地听取他们忠告。

1.3 负载

开关电源供给各种不同的负载，各种负载都有自己的特性，负载对开关电源提出符合自己特性的要求。因此开关电源设计者必须了解负载特性，才能做好符合要求的电源。前面讨论了蓄电池一般特性，如果开关电源作为充电器对电池充电。则开关电源必须具有恒流充电和浮充能力。这里不再讨论。下面分别简要说明其它负载要求

1.3.1 计算机电源

现代计算机要求电源高速切换。现在许多计算机电源为 3.3V，从数据库调出数据，要求电源能适应 30A/μs 负载跃变。举例来说，假定负载从零变化到 7A，花的时间小于 1μs。如果你的开关电源的带宽 20kHz，要变化到新的负载水平时间为 $1/20kHz = 50\mu s$ ，假设电流上升是线性的，那么你尚缺少的电荷量是 $(7A/2)50\mu s = 175\mu C$ ，如果允许 3.3V 电压波动是 66mV，如果此瞬态能量由电容提供，你应当需要 $175\mu C/66mV = 3mF$ 才能避免电压跌落超过允许值。

值得注意的是你不能用一个 3300μF 电容达到这个目的，而是应当用许多小电容并联。这是因为母线上电压跌落并不是变换器的带宽限制，而是电容的 ESR 造成的。你需要最大 ESR 为 $66mV/7A = 9m\Omega$ 的电容。如果每个电容的 ESR 近似为 100mΩ，需要 11 个电容并联，最好选择 300μF 的钽电容。当然这种计算是假定变换器输出到负载连线是无电感和电阻的，如果引线长，你就需要更高性能的电源。

在以上计算中另一个假定是变换器有足够的大信号响应。稳定性在以后详细讨论，但你必须确定满足小信号响应误差放大器的摆率 (slew rate) 也应当是足够的，但这不总是正确的。变换器的大信号带宽不能大于小信号带宽，如果运放摆率较低，大信号带宽可能比较小。

从以上的例子看到为使变换器体积减少，实质上是要变换器具有较宽带宽和高速放大器。在今天的工业界，这是继续推动开关电源向更高的开关频率（带宽不超过开关频率的一半）的主要原因，某些变换器的工作频率现在已达 2MHz，带宽 100kHz。

1.3.2 要求低噪声

各种负载要求噪声是不同的。例如蜂窝电话电源中射频功率放大器要求低噪声。变换器电源提供放大器栅极和漏极（放大器由 FET 构成）电压，如果电源上有变换器开关频率的纹波，那么放大器输出也就有纹波，因为输出功率由栅极和漏极电压决定，通过改变这些电压来控制输出功率大小。而放大器输出是射频，纹波是载波频率的边带。由于纹波被接收机作为信号解调产生的边带，所以很容易看到你不需要纹波（谐波）。

有些情况就不一定。你的和提出要求的工程师研究研究，是否一定要很高的噪声要求，并告诉他，噪声要求越高，代价越大。

要满足低噪声的要求，应当考虑电感电流在输出电容 ESR 上产生的峰峰值纹波和二极管及晶体管转换产生的开关噪声两者的造成纹波。在要求非常低噪声时，想用足够大的滤波电感和多个电容并联是不切实际的，一般在变换器输出加后续线性调节器或外加滤波环节。

后续线性调节器决不是好的选择，因为效率低。一般的办法在主滤波器后面增加一级 LC 滤波器（图 1.2）。如果反馈从原来输出电容端取回，主反馈保持原来的稳定性，而与外加滤波无关。但外加的 LC 滤波是不可控制的，当阶跃负载时将引起振铃现象，破坏了引入附加滤波器的目的。

如果将反馈包含外加滤波器，这将引入两个额外的极点，这两个极点要是处于低频段，将引起变换器工作的不稳定。一般取外加滤波器的谐振频率为变换器带宽的 10 倍，仅需要很小的相位补偿处理（在以后详细讨论），同时仍然能给开关频率适当地衰减。一般电感取得较小，电容较大，减少变换器的输出阻抗。串联电感在数百 nH 到几个 μH ，一般不用铁氧体磁珠，磁珠不能抗直流磁化，而采用小的 MPP（皮莫合金磁粉芯）磁珠或铁硅铝磁芯，1 匝输出汇流条通过它即可。

如果你既要快速瞬态响应，又要低噪声，那是最糟糕的负载。那你得运用以上的技术，还得花费许多心血。

1.3.3 电话

电话大约在 100 年前出现的，一直使用大量的铁和铜，而不是半导体。它是由电话线供电，而不是电网供电，这就是为什么电灯不亮，而电话照样畅通。电源距离在几百米，甚至几千米以外，在电话和电源之间引入了较大电线电阻和电感。

电话有三个不同的模式：既不通话又没有振铃，通话，待通。这三种状态具有不同的特性，每种特性在每个国家也是不同的。

为了解驱动电话振铃有多困难，拿出一些数据来考虑。在振铃状态，电话看起来像一个电感和电容串联并用一个低频正弦波电源驱动。此正弦波在电话端电压最小 $40V_{\text{rms}}$ （美国）或 $35V$ （德国）。实际上，由于电源输出在达到电话之前经过不同阻抗分压，需要的驱动电源电压要高得多。美国近似 $7k$ 与 $8\mu\text{F}$ 串联，驱动电源是 20Hz 正弦波。而德国似乎是 $3.4k$ 与 850nF 串联，用 25Hz 驱动。法国电话是大于 $2k$ 和小于 $2.2\mu\text{F}$ ，可以用 25Hz 或 50Hz 驱动，取决于是否差动（平衡）还是不对称驱动。电话本身作为负载更是五花八门，阻抗由 $6k \sim 60k$ ，或更高。也不知道这些电话是怎样电源供电，除非这个国家自行规定。甚至一个电源同时带 5 个电话机。

1.3.4 荧光灯

荧光灯是另一个特殊负载，用一个特殊的称为镇流器的电源驱动。灯管就有很多类型，不同长度灯管和环形灯管，冷阴极大台灯，广场照明的钠灯等等。他们具有不同发光和电气特性，但在他们之间重要的不同是否具有加热灯丝。不需要灯丝的，仅需要两根导线的称为直接启动灯管；如果有加热灯丝，还需要增加两根加热灯丝导线称为快速启动灯管。因其他特性相同，这里仅讨论有灯丝的荧光灯。

荧光灯管是充气的例如充有氩气和一滴水银液体，水银在工作时蒸发成气体。玻璃管内壁涂敷类似显象管的荧光物质。工作时电压通过气体加在管两端，灯管实际上有一个阴极和一个阳极，但加在灯管上是交流电，不必要区分正负。用交流可减少电极的电蚀。

必须有足够的启动电压才能使灯管内的气体电离，也就是说电离形成等离子。等离子发出紫外线光，激发了涂敷在管内壁的荧光物质转变成可见光。它比利用高温加热发光的白炽灯发光效率高。

灯管内的水银是剧毒物质，请不要随地将灯管打破，否则严重破坏环境。

当灯管关断时，它呈现高阻抗，因为水银是液体，需要高压启动。冷阴极型（即没有灯丝）就需要一定时间高压以后导通它。带有灯丝需要加热灯丝，应用数百毫秒时间加高压，预热大大地降低了灯管的寿命。由于早先电子镇流器忽视这个问题，电子镇流器业发展较慢。

在灯丝预热加上高压以后，灯管导通。一旦灯管导通，灯管近似像一个稳压管，如流过灯管的电流加倍，但灯管端电压或许只变化 10%。管子通过加倍的电流，当然亮度也加倍，寿命也因此降低。因此需要一个镇流器，保持灯管亮度，同时使电压、电流保持在灯管厂家规定的允许范围之内。

在导通状态，灯丝仍然发热，但已远小于预热时的功率。灯丝是电阻丝，可减少灯丝电压减少发热，而延长灯管寿命。

负载时各式各样的，可见，不研究负载特性去做电源是不可能做好的。

1.4 安全

研究、开发和电源，当然要与交流电网高压打交道。常常碰到不仅是交流高压（ $220V/380V$ ），而且还要遇到 $300V/500V$ 直流。因此使用和操作人员应当时刻注意到用电的人身安全。国际及各国都制定了电气设备的安全标准。

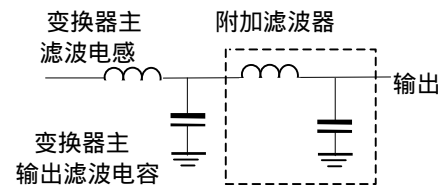


图 1.2 附加 LC 滤波获得低噪声输出

应当知道，触电时是电流危及生命，而不是电压。人体感觉到刺激的电流 1mA，通过人体的电流达数十 mA 以上时，肌肉就产生收缩抽搐现象，使人体不能自己离开电线。将使心脏丧失扩张和收缩能力，直至死亡。但各人对电流的敏感程度相差较大。如表 1.2 所示。

究竟多大电流、多长时间造成死亡尚不明白。为防护触电，许多国家规定允许触电电流与时间的乘积为 30mAS。各国规定允许触电电压如表 1.3。

不管怎样，应当注意安全问题。首先，应避免带电操作。即转接电路时，应当在断电情况下接线。如果高于 50V 直流，应一只手接触电路，一只手放在背后，避免电流经一只手流经心脏，再流过另一只手构成回路。

表 1.2

	DC(mA)		AC(mA)			
	男	女	50Hz		10kHz	
			男	女	男	女
不太痛苦	5.2	3.5	11	0.6	12	8
有痛苦感	62	41	9	6	55	37
痛苦难忍，肌肉不自由	74	50	16	10.5	75	50
呼吸困难，肌肉收缩	90	60	23	15	94	63

表 1.3

一般场所	潮湿场所	其它
德、澳 65V	日、瑞典 25V	移动设备 25V(IEC)
英国 55V	法国 24V	德国 24V (家畜)
日、瑞士、法国、瑞典 50V(IEC)		英国 45V(住宅)

我国国家规定安全电压 12~50V，由有关规程和使用环境选用。航空 30V

同样的理由，对地通路不导电。如果你的皮鞋橡胶底破了，就不必再穿了。

在许多电源中，由电网输入 (220V 或 380V) 直接整流滤波，或经过 PFC 变换输出高压直流提供 DC/DC 变换器。有时需要测量电路

波形。你是否知道示波器的金属外壳是接地的？你是否还知道示波器输入地与外壳是相连的？你是否还知道交流电网的中线、地线的连接方式？如果你不知道，就可能在测量操作被电击或损坏被测电路元件。作者曾多次经历过这样的事例：用示波器观察直接由

单相电网可控整流电路，而造成操作者触电和烧毁可控硅整流器，还有甚至损坏了控制电路。其中一个示波器与整流器同一交流电源供电，示波器虽然有三线插头，但是配电电路地线与中线是相连的，这就造成示波器接地外壳将被测电路短路。

从安全考虑，示波器必须三线制供电，即相、中和地 - 三线插头。为了避免短路，示波器应当用一个变比为 1:1 的隔离变压器隔离供电，这就避免了接触任何高电位。即便如此，在检测高于表 2 所示安全电压的路时，也应当在断电的情况下转换测试点。

如果电路中直流高压大电容，在断电情况下，即使设置了放电电阻（一般在大电容上并联大电阻），仍需等待一定时间，要确认电容电压是否完全放电后，才能进行电路操作。

实验室内的桌面应当有绝缘垫，座椅最好不是导电材料。地面也应当良好绝缘。