

电子设备中电路板布局、布线和安装的抗ESD设计规则

在电子产品设计中必须遵循抗静电释放的设计规则，本文介绍静电释放(ESD)产生的原理，以及机箱、屏蔽层、接地、布线设计等诸多设计规则，它们有助于预防并解决静电释放产生的危害，值得中国电子设备设计工程师认真研究和学习。

许多产品设计工程师通常在产品进入到生产环节时才着手考虑抗静电释放(ESD)的问题。如果电子设备不能通过抗静电释放测试，他们就会加班加点找寻不破坏原有设计的解决方案。然而，最终的方案通常都要采用昂贵的元器件，还要在制造过程中采用手工装配，甚至需要重新设计，因此，产品的进度势必受到影响。

即使对经验丰富的工程师和设计工程师，也可能并不知道设计中的哪些部分有利于抗ESD。大多数电子设备在生命期内99%的时间都处于一个充满ESD的环境之中，ESD可能来自人体、家具、甚至设备自身内部。电子设备完全遭受ESD损毁比较少见，然而ESD干扰却很常见，它会导致设备锁死、复位、数据丢失和不可靠。其结果可能是：在寒冷干燥的冬季电子设备经常出现故障现象，但是维修时又显示正常，这样势必影响用户对电子设备及其制造商的信心。

ESD产生的机理

要防止ESD，首先必须知道ESD是什么以及ESD进入电子设备的过程。一个充电的导体接近另一个导体时，就有可能发生ESD。首先，两个导体之间会建立一个很强的电场，产生由电场引起的击穿。两个导体之间的电压超过它们之间空气和绝缘介质的击穿电压时，就会产生电弧。在0.7ns到10ns的时间里，电弧电流会达到几十安培，有时甚至会超过100安培。电弧将一直维持直到两个导体接触短路或者电流低到不能维持电弧为止。

ESD的产生取决于物体的起始电压、电阻、电感和寄生电容：

1. 可能产生电弧的实例有人体、带电器件和机器。
2. 可能产生尖峰电弧的实例有手或金属物体。
3. 可能产生同极性或者极性变化的多个电弧的实例有家具。

ESD可以通过五种耦合途径进入电子设备：

1. 初始的电场能容性耦合到表面积较大的网络上，并在离ESD电弧100mm处产生高达4000V/m的高压。
2. 电弧注入的电荷/电流可以产生以下的损坏和故障：
 - a. 穿透元器件内部薄的绝缘层，损毁MOSFET和CMOS元器件的栅极(常见)。
 - b. CMOS器件中的触发器锁死(常见)。
 - c. 短路反偏的PN结(常见)。
 - d. 短路正向偏置的PN结(少见)。
 - e. 熔化有源器件内部的焊接线或铝线(少见)。
3. 电流会导致导体上产生电压脉冲($V=L \times dI/dt$)，这些导体可能是电源、地或信号线，这些电压脉冲将进入与这些网络相连的每一个元器件(常见)。

4. 电弧会产生一个频率范围在 1MHz 到 500MHz 的强磁场，并感性耦合到临近的每一个布线环路，在离 ESD 电弧 100mm 远的地方产生高达 15A/m 的电流。
5. 电弧辐射的电磁场会耦合到长的信号线上，这些信号线起到接收天线的作用(少见)。

ESD 会通过各种各样的耦合途径找到设备的薄弱点。ESD 频率范围宽，不仅仅是一些离散的频点，它甚至可以进入窄带电路中。为了防止 ESD 干扰和损毁，必须隔离这些路径或者加强设备的抗 ESD 能力。表 1 描述了对可能出现的 ESD 的防范措施以及发挥作用的场合。

防范措施	ESD耦合路径					ESD对象				
	容性耦合	电荷释放	共模阻抗耦合	感性耦合	辐射耦合	输入	输出	电源	地	存储器/寄存器
塑料机箱	X	X	X	X		X	X	X	X	X
空气间隙	X	X	X	X		X	X	X	X	X
绝缘材料		X	X			X	X	X	X	X
金属机箱	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
屏蔽	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
接地/焊接	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
电源分布		X	X	X	X			X	X	X
旁路/去耦		X	X	X				X		X
PCB设计/安装	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
线缆设计/布线	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
电路设计		X	X			X	X	X	X	X
滤波器	X	X	X	X	X	X	X	X		X
瞬态抑制器		X	X	X	X	X	X	X		X
抗静电器件		X	X			X	X	X	X	X
看门狗计时器						X	X			X
软件						X	X			X

防患于未然

塑料机箱、空气空间和绝缘体可以屏蔽射向电子设备的 ESD 电弧。除利用距离保护以外，还要建立一个击穿电压为 20kV 的抗 ESD 环境。

A1. 确保电子设备与下列各项之间的路径长度超过 20mm。

1. 包括接缝、通风口和安装孔在内任何用户能够接触到的点。在电压一定的情况下，电弧通过介质的表面比通过空气传播得更远。
2. 任何用户可以接触到的未接地金属，如紧固件、开关、操纵杆和指示器。

A2. 将电子设备装在机箱凹槽或槽口处来增加接缝处的路径长度。

A3. 在机箱内用聚脂薄膜带来覆盖接缝以及安装孔，这样延伸了接缝/过孔的边缘，增加了路径长度。

A4. 用金属帽或者屏蔽塑料防尘盖罩住未使用或者很少使用的连接器。

A5. 使用带塑料轴的开关和操纵杆，或将塑料手柄/套子放在上面来增加路径长度。避免使用带金属固定螺丝的手柄。

A6. 将 LED 和其它指示器装在设备内孔里，并用带子或者盖子将它们盖起来，从而延伸孔的边沿或者使用导管来增加路径长度。

A7. 延伸薄膜键盘边界使之超出金属线 12mm，或者用塑料企口来增加路径长度。

A8. 将散热器靠近机箱接缝，通风口或者安装孔的金属部件上的边和拐角要做成圆弧形状。

A9. 塑料机箱中，靠近电子设备或者不接地的金属紧固件不能突出在机箱中。

A10. 如果产品不能通过桌面/地面或者水平耦合面的间接 ESD 测试，可以安装一个高支撑脚使之远离桌面或地面。

A11. 在触摸橡胶键盘上，确保布线紧凑并且延伸橡胶片以增加路径长度。

A12. 在薄膜键盘电路层周围涂上粘合剂或密封剂。

A13. 在机箱箱体接合处，要使用耐高压硅树脂或者垫圈实现密闭、防 ESD、防水和防尘。

材料	电动势(EMF, 电位: V)	电阻系数
□	(阳极, 腐蚀)	
镁	+2.37V	42
镁合金		50-175
铝	+1.66V	27
锌	+0.76	60
电镀钢		100-197
铝合金		27-86
镉	+0.74V	132
镉	+0.40V	73
低碳钢	+0.44V	100-197
铁	+0.44V	101
锡铅焊料		145-195
不锈钢		560-780
铅	+0.13V	206
锡	+0.14V	126
镍	+0.25V	69
黄铜		61-110
铍铜合金		29-115
铜	-0.34V	17.2
铜锡合金		91-212
蒙乃尔铜-镍合金		510-614
银焊料		22-172
不锈钢(无源)		560-780
钛合金		482-1700
银	-0.80V	16
钛	+1.63	540
金	-1.50V	22
□	(阴极, 无源)	

机箱和屏蔽

利用金属机箱和屏蔽罩可以阻止 ESD 电弧以及相应的电磁场，并且保护设备免受间接 ESD 的影响，目的是将全部 ESD 阻隔在机箱以外。对于静电敏感的电子设备来说，不接地机箱至少应该具有 20kV 的击穿电压(规则 A1 到 A9)；而对接地机箱，电子设备至少要具备 1,500V 击穿电压以防止二级电弧，并且要求路径长度大于等于 2.2mm。

以下措施能使 ESD 的屏蔽更有效。

B1. 如果需要，应设计由以下屏蔽材料制成的机箱：

1. 金属板；
2. 聚酯薄膜/铜或者聚酯薄膜/铝压板；
3. 具有焊接节点的热成型金属网。
4. 热成型金属化的纤维垫子(非编织)或者织物(编织)；
5. 银、铜或者镍涂层；
6. 锌电弧喷涂；
7. 真空金属处理；
8. 无电电镀；
9. 塑料中加入导体填充材料；

10. 对结合点和边缘的处理很关键。

B2. 选择一种具有高传导率(低电阻系数)的材料, 见表 2。

B3. 选择屏蔽材料、紧固件材料和垫圈材料来尽可能地减轻腐蚀。参考表 2。1. 相互接触的部件彼此之间的电势(EMF)应该小于 0.75V。如果在一个盐性潮湿环境中, 那么彼此之间的电势必须小于 0.25V。2. 阳极(正极)部件的尺寸应该大于阴极(负极)部件。

B4. 用缝隙宽度 5 倍以上的屏蔽材料叠合在接缝处。

B5. 在屏蔽层与箱体之间每隔 20mm(0.8 英寸)的距离通过焊接、紧固件等方式实现电连接。

B6. 用垫圈实现缝隙的桥接, 消除开槽并且在缝隙之间提供导电通路。

B7. 杜绝缺口、裂缝和屏蔽太薄的情况。

B8. 避免屏蔽材料中出现直拐角以及过大的弯角。

B9. 确保孔径小于等于 20mm 以及槽的长度小于等于 20mm。相同开口面积条件下, 采用孔比槽好。

B10. 如果要求大的开口以及有敏感器件, 应该在操纵杆、指示器之间设置第二层屏蔽。

B11. 如果可能, 使用几个小的开口来代替一个大的开口。

B12. 如果可能, 这些开口之间的间距尽量大。

B13. 对接地设备, 在连接器进入的地方将屏蔽层和机箱地连接在一起。

B14. 对未接地(双重隔离)设备, 将屏蔽材料同开关附近的电路公共地连接起来。

B15. 在靠近电子设备处并行放置一个地平面或二级屏蔽(金属或者铜/聚酯薄膜分层), 并且弯曲该地平面以便在电缆进入位置可以连接到机箱地或者电路的公共地。

B16. 尽量让电缆进入点靠近面板中心, 而不是靠近边缘或者拐角的位置。

B17. 在屏蔽装置中排列的各个开槽要与 ESD 电流流过的方向平行。

B18. 当考虑间接 ESD 问题时, 应该在水平的电路板和背板下面安装一个局部的屏蔽装置。

1. 在电源连接器和连接器引向外部的地方, 要连接到机箱地或者电路的公共地。

2. 在安装孔的位置使用带金属支架的金属片来充当附加的接地点, 或者用塑料支架来实现绝缘和隔离。

3. 电路板/背板下面, 要放置聚酯薄膜/铜或者聚酯薄膜/铝压板, 并在机箱和连接器金属体之间安放一个紧固薄片, 既便宜又容易实现。

4. 在底盘中, 要使用导电涂层或者导电的填充物(见 B1)。

B19. 在塑料机箱上的控制面板和键盘位置处安装局部屏蔽装置来阻止 ESD:

1. 电源连接器和引向外部的连接器的位置, 要连接到机箱地或者电路公共地。

2. 使用金属片以便小的高频电容可以焊接在屏蔽装置与开关/操纵杆/指示器的连接处之间。

3. 在塑料中使用聚酯薄膜/铜或者聚酯薄膜/铝压板, 或者使用导电涂层或导电填充物。

B20. 在铝板上使用薄的导电铬化镀层或者铬酸盐涂层, 但不能采用阳极电镀。

B21. 要达到大于 20 到 40dB 的屏蔽效果。

B22. 除去阳极电镀以及接缝、接合处和连接器处的涂层。

B23. 在不锈钢的焊接接合处实现良好的导电连续性。

B24. 在塑料中要使用导电填充材料。由于铸型部件的表面通常具有树脂材料, 这样很难实现低电阻的连接。

B25. 在钢材料上使用薄的导电铬酸盐涂层。

B26. 让清洁整齐的金属表面直接接触而不要依靠螺钉来实现金属部件的连接。

- B27. 紧靠双面板的位置处增加一个地平面，在最短间距处将该地平面连接到电路上的接地点。
- B28. 沿整个外围用屏蔽涂层(钢锡氧化物、钢氧化物和锡氧化物等)将显示器与机箱屏蔽装置连接在一起。
- B29. 在操作员经常接触的位置处，要提供一个到地的抗静电(弱导电)路径，比如键盘上的空格键。
- B30. 要让操作员很难产生到金属板边缘或角的电弧放电。电弧放电到这些点会比电弧放电到金属板中心导致更多间接 ESD 的影响。
- B31. 在薄膜键盘电路和与其相对的邻近电路之间放置一个接地的导电层。

接地和邦定

ESD 电弧电流放电时首先对被击中金属物体的寄生电容充电，然后流经每一个可能的导电路径。电弧电流更容易在片状、或短而宽的带状导体而不是窄线上流过。金属部件之间通过邦定(binding)建立低阻抗的路径，从而使相互之间的电压差降至最低，而接地则提供最终泄放掉累积电荷的路径。为了使接地和邦定能够有效地防止 ESD，应该确保 ESD 电流密度和电流路径阻抗尽可能低。

- C1. 在 ESD 电流预计会流过的位置采用多点接地。
- C2. 在预计 ESD 电流不会流过的位置采用单点接地。
- C3. 将机箱的金属部分同底盘地连接在一起。
- C4. 确保每个电缆进入点离机箱地的距离在 40mm(1.6 英寸)以内。
- C5. 将连接器外壳和金属开关外壳都连接到机箱地上。
- C6. 在薄膜键盘周围放置宽的导电保护环，将环的外围连接到金属机箱上，或至少在四个拐角处连接到金属机箱上。不要将该保护环与 PCB 地连接在一起。
- C7. 在靠近连接器的地方，要将连接器上的信号用一个 L-C 或者磁珠-电容滤波器接到连接器的机箱地上。
- C8. 确保未隔离的机箱地与电子设备的距离大于等于 2.2mm。
- C9. 在机箱地和电路公共地之间加入一个磁珠。
- C10. 确保邦定接头短而粗。如果可能，长宽比尽量做到小于等于 5:1。
- C11. 如果可能使用多个邦定接头，从而避免 ESD 电流过分集中。
- C12. 确保邦定接头和邦定线远离易受影响的电子设备或者这些电子设备的电缆。
- C13. 选择邦定接头和邦定线的材料以及紧固件/紧固方式时，要尽可能减小侵蚀，见表 2。
1. 相互靠近的部件之间的 EMF 必须小于 0.75V，如果在潮湿的环境中 EMF 值必须小于 0.25V；
 2. 阳极(正极)部件的尺寸应大于阴极(负极)部件。
- C14. 将控制金属柄接地到具有接地叉指或导电衬套的屏蔽装置上。
- C15. 确保邦定带和邦定线远离易受 ESD 影响的 PCB。
- C16. 在铰链中要补充邦定带或邦定线。
- C17. 通过焊接、铜焊、铅焊或型铁弯曲等方式来焊接不能分开的金属片。
- C18. 从操作/维修考虑，必须分离的金属片要通过下面的方式邦定起来：1. 要让金属表面保持清洁并直接接触。2. 让具有薄导电涂层的金属表面直接紧密接触。
- C19. 固体邦定带优于编织邦定带。
- C20. 确保邦定处不潮湿。
- C21. 使用多个导体将机箱内所有电路板的地平面或地网格连接在一起。
- C22. 确保邦定点和垫圈的宽度大于 5mm。

保护电源

电子设备内部的电源分配系统是遭受 ESD 电弧感性耦合的主要对象。下面的步骤将有助于电源分配系统防范 ESD。

D1. 将电源线和相应的回路线紧密绞合在一起。

D2. 在每一根电源线进入电子设备的地方放一个磁珠。

D3. 在每一个电源管脚和紧靠电子设备机箱地之间放一个瞬流抑制器、金属氧化压敏电阻 (MOV) 或者 1kV 高频电容。

D4. 最好在 PCB 上布置专门的电源和地平面，或者紧密的电源和地栅格，并采用大量旁路和去耦电容。

抗 ESD 的布局布线设计

通过 PCB 的分层设计、恰当的布局布线和安装以及上述 ESD 防范方法可以实现 PCB 的抗 ESD 设计。要达到期望的抗 ESD 能力，通常要通过几个测试-解决问题-重新测试这样的周期，每一个周期都可能至少影响到一块 PCB 的设计。在 PCB 设计过程中，通过预测可以将绝大多数设计修改仅限于增减元器件。

要调整 PCB 布局布线，使之具有最强的 ESD 防范性能。

E1. 尽可能使用多层 PCB:

1. 相对于双面 PCB 而言，地平面和电源平面以及排列紧密的信号线-地线间距能够减小共模阻抗 (common impedance) 和感性耦合，使之达到双面 PCB 的 1/10 到 1/100。
2. 尽量地将每一个信号层都紧靠一个电源层或地线层。
3. 对于顶层和底层表面都有元器件、具有很短连接线以及许多填充地的高密度 PCB，可以考虑使用内层线。大多数的信号线以及电源和地平面都在内层上，因而类似于具备屏蔽功能的法拉第盒。

E2. 对于双面 PCB 来说，要采用紧密交织的电源和地栅格。

1. 电源线紧靠地线。
2. 在垂直和水平线或填充区之间，要尽可能多地连接。
3. 一面的栅格尺寸小于等于 60mm。
4. 如果可能，栅格尺寸应小于 13mm (0.5 英寸)。

E3. 确保每一个电路尽可能紧凑。

E4. 尽可能将所有连接器都放在一边。

E5. 如果可能，将电源线从卡的中央引入，并远离容易直接遭受 ESD 影响的区域。

E6. 在引向机箱外的连接器(容易直接被 ESD 击中)下方的所有 PCB 层上，要放置宽的机箱地或者多边形填充地，并每隔大约 13mm 的距离用过孔将它们连接在一起。

E7. 在卡的边缘上放置安装孔，安装孔周围用无阻焊剂的顶层和底层焊盘连接到机箱地上。

E8. PCB 装配时，不要在顶层或者底层的焊盘上涂覆任何焊料。使用具有内嵌垫圈的螺钉来实现 PCB 与金属机箱/屏蔽层或接地面上支架的紧密接触。

E9. 在每一层的机箱地和电路地之间，要设置相同的“隔离区”；如果可能，保持间隔距离为 0.64mm (0.025 英寸)。

E10. 在卡的顶层和底层靠近安装孔的位置，每隔 100mm (4.0 英寸) 沿机箱地线将机箱地和电路地用 1.27mm 宽 (0.050 英寸) 的线连接在一起。与这些连接点的相邻处，在机箱地和电路地之间放置用于安装的焊盘或安装孔。这些地线连接可以用刀片划开，以保持开路；或用磁珠/高频电容的跳接，以改变 ESD 测试时的接地机制。

E11. 如果电路板不会放入金属机箱或者屏蔽装置中, 在电路板的顶层和底层机箱地线上不能涂阻焊剂, 这样它们可以作为 ESD 电弧的放电棒。

E12. 要以下列方式在电路周围设置一个环形地:

1. 除边缘连接器以及机箱地以外, 在整个外围四周放上环形地通路。
2. 确保所有层的环形地宽度大于 2.5mm (0.1 英寸)。
3. 每隔 13mm(0.5 英寸)用过孔将环形地连接起来。
4. 将环形地与多层电路的公共地连接到一起。
5. 对安装在金属机箱或者屏蔽装置里的双面板来说, 应该将环形地与电路公共地连接起来。
6. 不屏蔽的双面电路则应该将环形地连接到机箱地, 环形地上不能涂阻焊剂, 以便该环形地可以充当 ESD 的放电棒, 在环形地(所有层)上的某个位置处至少放置一个 0.5mm 宽(0.020 英寸)的间隙, 这样可以避免形成一个大的环路。
7. 信号布线离环形地的距离不能小于 0.5mm。

E13. 在能被 ESD 直接击中的区域, 每一个信号线附近都要布一条地线。

E14. I/O 电路要尽可能靠近对应的连接器。

E15. 对易受 ESD 影响的电路, 应该放在靠近电路中心的区域, 这样其它的电路可以为它们提供一定的屏蔽作用。

E16. 通常在接收端放置串联的电阻和磁珠, 而对那些易被 ESD 击中的电缆驱动器, 也可以考虑在驱动端放置串联的电阻或磁珠。

E17. 通常在接收端放置瞬态保护器。1. 用短而粗的线(长度小于 5 倍宽度, 最好小于 3 倍宽度)连接到机箱地。2. 从连接器出来的信号线和地线要直接接到瞬态保护器, 然后才能接电路的其它部分。

E18. 在连接器处或者离接收电路 25mm (1.0 英寸)的范围内, 要放置滤波电容。1. 用短而粗的线连接到机箱地或者接收电路地(长度小于 5 倍宽度, 最好小于 3 倍宽度)。2. 信号线和地线先连接到电容再连接到接收电路。

E19. 要确保信号线尽可能短。

E20. 信号线的长度大于 300mm (12 英寸)时, 一定要平行布一条地线。

E21. 确保信号线和相应回路之间的环路面积尽可能小。对于长信号线每隔几厘米或几英寸调换信号线和地线的位置来减小环路面积。

E22. 从网络的中心位置驱动信号进入多个接收电路。

E23. 确保电源和地之间的环路面积尽可能小, 在靠近集成电路芯片每一个电源管脚的地方放置一个高频电容。

E24. 在距离每一个连接器 80mm (3 英寸)范围以内放置一个高频旁路电容。

E25. 在可能的情况下, 要用地填充未使用的区域, 每隔 60mm 距离将所有层的填充地连接起来。

E26. 确保在任意大的地填充区(大约大于 $25 \times 6\text{mm}$ (1×0.25 英寸))的两个相反端点位置处要与地连接。

E27. 电源或地平面上开口长度超过 8mm (0.3 英寸)时, 要用窄的线将开口的两侧连接起来。

E28. 复位线、中断信号线或者边沿触发信号线不能布置在靠近 PCB 边沿的地方。

E29. 将安装孔同电路公地连接在一起, 或者将它们隔离开来。1. 金属支架必须和金属屏蔽装置或者机箱一起使用时, 要采用一个零欧姆电阻实现连接。2. 确定安装孔大小来实现金属或者塑料支架的可靠安装, 在安装孔顶层和底层上要采用大焊盘, 底层焊盘上不能采用阻焊剂, 并确保底层焊盘不采用波峰焊工艺焊接。

E30. 不能将受保护的信号线和不受保护的信号线并行排列。

E31. 要特别注意复位、中断和控制信号线的布线。1. 要采用高频滤波。2. 远离输入和输出电路。3. 远离电路板边缘。

E32. PCB 要插入机箱内，不要安装在开口位置或者内部接缝处。

E33. 要注意磁珠下、焊盘之间、可能接触到磁珠的信号线的布线。有些磁珠导电性能相当好，可能会产生意外的导电路径。

E34. 如果一个机箱或者主板要内装几个电路卡，应该将对静电最敏感的电路卡放在最中间。