

估计电源管理 IC 的连接线载流能力

IDT公司 Jitesh Shah

连接线广泛用于连接芯片的引线端子和半导体器件的外部引脚。连接所用导线一般由黄金制成，因为黄金能抵御氧化，并具备很高的导电性，而且用黄金可相对容易地连接IC引线端子和器件引脚。

用铜导线取代黄金导线的方法势头越来越强，因为铜具备卓越的电气和热特性、相对更少的金属间化合物生长和更高的机械稳定性。

在电源管理IC等具备大DC电流的器件中，会使用大量导线来传导这种电流。这些额外的导线有助于改善DC压降性能，并降低由大电流及其产生的有关热量（焦耳生热现象）导致的导线熔断或融化风险。不幸的是，就给定应用而言，还没有一种能用来估计导线数量和尺寸的方法或分析方法。所使用的导线数量或者太多，增加了芯片面积和成本，或者太少，导

致可靠性风险和器件失灵。

本文探讨一种方法，用来估计不同尺寸和类型的导线处理DC电流的能力。本文还提供一些指导原则，将有助于产品设计师估计特定的应用所需的最佳导线数量。

估计理论上的载流能力

导线熔断的经典设计方程是由W.H. 普里斯推导出来的（1884年，称为普里斯方程），仅适用于在自由空气中的导线。

该方程揭示了熔断电流（以安培为单位）和导线直径（以英寸）为单

$$i=kD^{3/2}$$

之间的关系：其中，i是DC或RMS电流；k是常数，其值取决于导线材料，就黄金和铜导线而言， $k=10\ 244$ ；D=导线直径（单位为英寸）。

这个方程的限制是，它仅适用于在自由空气中的导线。此外，它未考虑导体长度。而导线的载流能力是受长度影响的，而且会随着长度增加而降低。

经过修改的普里斯方程

为了解决上述限制，人们对普里斯方程进行了修改，用数值更大的常数k来反映典型应用的情况，在典型应用中，导线是用基于环氧树脂的模塑化合物密封的。这个常数k也反映了导线长度对导线载流能力的影响。导体长度 ≤ 0.040 英吋时，黄金和铜导线的k值均为30 000，而在导体长度 > 0.040 英寸时，其k值均为20 500。

军用规格（MIL-M-38510J）中提到的方程就是基于修改过的普里斯方程。

表1列出了用两个版本的普里斯方程计算出的两种类型导体的载流能力。

即使是修改过的普里斯方程，仍然存在限制：

1. 所显示的载流能力值是与材料无关的。与黄金导线相比，铜导线的热导率高20%，电导率高30%，这从理

表1 基于普里斯方程计算出的载流能力

导线直径 (单位：千分之一英寸)	普里斯方程	修改过的普里斯方程 (MIL-M-38510J)	
		导体长度 ≤ 0.040 英寸	导体长度 > 0.040 英寸
2	0.92	2.68	1.83
1.3	0.48	1.41	0.96
1.2	0.43	1.25	0.85
1	0.32	0.95	0.65
0.9	0.28	0.81	0.55
0.8	0.23	0.68	0.46
0.7	0.19	0.56	0.38
0.6	0.15	0.44	0.30

论上应该转化为，铜导线能比黄金导线传送更大的电流。

2. 该方程没有推断导体长度超出0.040英寸（约为1mm导线长度）时导体的载流能力。大多数应用的导线长度在2~3mm范围内，有时还会超出这一范围。随着导体长度的变化，导线的载流能力有很多的变化，而该方程没有考虑这种情况。

鉴于上述限制，有必要寻找一种新的方法，这种方法须考虑已知几何尺寸及材料特性信息以及典型应用造成的限制。

导体中的焦耳生热现象

当电流流经一段非理想的、具备有限电阻的导体时，就会有热量释放出来，通过称为焦耳生热或电阻生热的过程，将电能转化成热能。所释放的热量大小与通过导体的电流的平方以及导体的电阻成正比，三者关系如下：

$$Q_{\text{generated}} = I^2 R$$

就一段被静止空气包围的导体而言，产生的所有热量都通过导体散出，而没有热量从导体表面传导出。当以下等式成立时，系统达到稳定状态：

$$Q_{\text{generated}} = Q_{\text{dissipated}}$$

通过由以下等式显示的简单热量传导过程，所产生的热量通过这段导线散出：

$$Q_{\text{dissipated}} = kA \frac{dT}{dx}$$

其中，k为导线的热传导率；A为导线的横截面积；dT为导线两端的温

度差；dx为导线长度。

重新排列上述等式并简化为：

$$I = \frac{\pi}{4} \times \sqrt{\frac{k}{\rho}} \times \frac{D^2}{l} \times \sqrt{\Delta T}$$

进行进一步简化：

$$I \propto \sqrt{\frac{k}{\rho}} \times \frac{D^2}{l}$$

根据上述关系，假定其他所有条件都保持相同，那么与黄金导线相比，铜导线能处理的DC或RMS电流应该大25%。

在大多数实际应用中，热量不仅能通过导线传导出，而且还能通过环氧树脂模塑化合物，从导线表面在径向方向传导出。二者结合以后的热传导

现象很复杂，不可能用闭环的方程准确分析。因此，人们运用具备热电耦合物理解程序的有限的元件建模软件来分析不同导线参数的作用。

应用描述和建模

在由导线连接的典型封装中，芯片上焊盘，这些焊盘用导线连接到封装引线，导线主要是黄金或铜质的。图1显示了一种典型的封装构造。

商业应用将最高环境温度限制为不超过70℃，而工业应用则将该温度限定为85℃。大多数应用规定，芯片的最高节温为125℃，而有些应用则规定该温度为150℃。

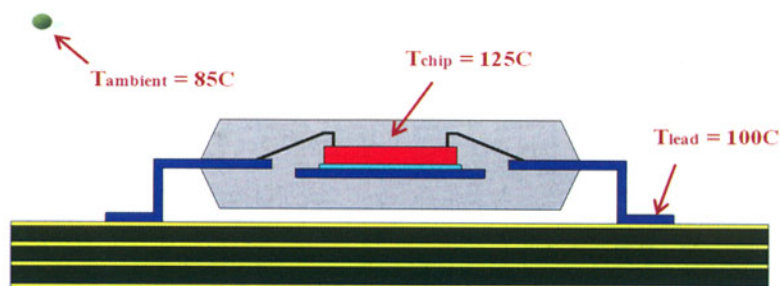


图1 具备重要温度监视点的PCB上的封装

Current (A) vs. Wire Diameter (Mils)

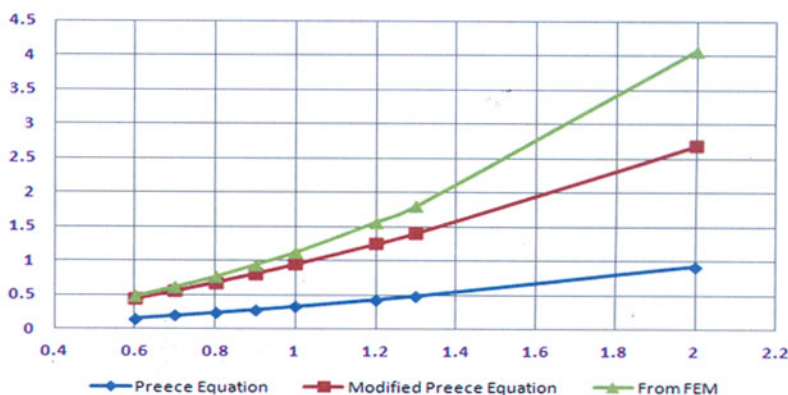


图2 用FEM方法和修改过的普里斯方程计算出的1mm长黄金导线的载流能力

为了估计在最坏情况下导线的载流能力，该模型假定，最高芯片节温为125℃时的环境温度为工业环境温度。自然对流边界条件适用于封装表面，这时封装引线温度为100℃。

小量电流流经导线时，不改变整条导线的温度曲线，导线两端仍然保

持相同的原始温度。随着电流的稳步增大，最高温度不再是芯片节温，而是导线中间某处的温度。

在模塑化合物的玻璃化转变温度（ T_g ）上，材料从硬的、相对较脆的状态转变为软的、类似橡胶的状态，这时典型温度大约为150℃。如果流经

导线的电流使模塑化合物的温度超过其 T_g 温度，那么时间和温度将使这条连接线上的环氧树脂材料的化学键劣化。这不仅导致模塑化合物的热阻增大，而且增大了材料的渗透性，使材料容易侵入潮气和其他离子污染物。因此，在计算导线的载流能力时，假定150℃的导线-模塑化合物连接线温度为上限温度。

以此为标准，来分析导线材料的类型、导线长度和导线直径的影响，并将分析数据与理论上的估计值进行比较。

图2显示了采用3种方法计算出的1mm长黄金导线的载流能力。利用FEM方法所得的电流值在开始时，与利用修改过的普里斯方程计算出的电流值相同，不过随着导线直径增大，两条电流曲线出现了偏离。

图3显示了用FEM方法计算出的1mm长黄金导线及铜导线的载流能力。正如所预期的那样，与黄金导线相比，铜导线能传送更大的电流。

图4显示用FEM方法计算出的3种不同长度黄金导线的载流能力。正如所预期的那样，随着长度增加，导线传送电流的能力下降了。

表2总结了不同导线组合的电流值（单位：安培）。

总之，本文针对实际应用环境，阐明了导线材料类型、导线长度和导线直径对导线载流能力的影响。本文还探讨了用常规方法估计载流能力产生的限制。

EPC

Current (A) vs. Wire Diameter (Mils)

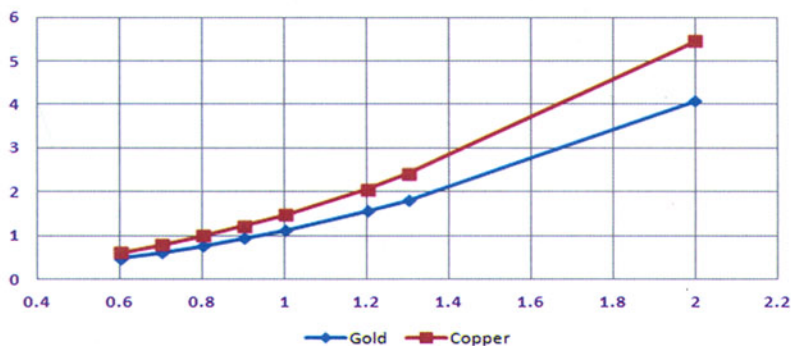


图3 用FEM方法算出的1mm长黄金及铜导线的载流能力

Current (A) vs. Wire Diameter (Mils)

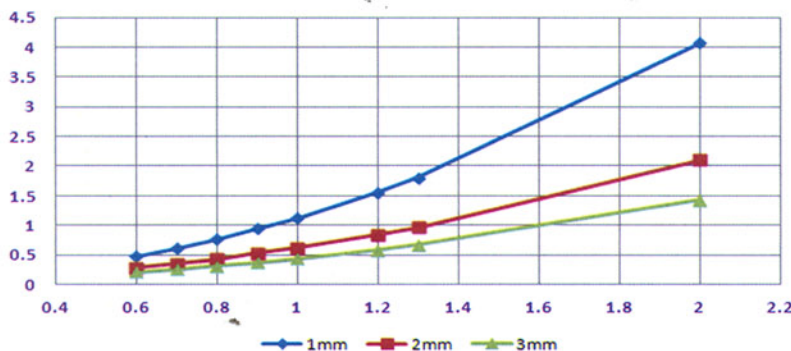


图4 用FEM方法计算出的3种不同长度黄金导线的载流能力

表2 不同导线组合的电流值（单位：安培）总结

导线直径 (单位：千分之一英寸)	黄金导线			铜导线		
	1 mm长	2 mm长	3 mm长	1 mm长	2 mm长	3 mm长
2	4.075	2.11	1.425	5.45	2.8	1.89
1.3	1.8	0.97	0.665	2.41	1.275	0.87
1.2	1.563	0.847	0.58	2.065	1.1	0.76
1	1.12	0.625	0.436	1.475	0.81	0.56
0.9	0.94	0.525	0.368	1.225	0.677	0.47
0.8	0.76	0.435	0.309	1	0.55	0.394
0.7	0.612	0.355	0.254	0.787	0.45	0.322
0.6	0.475	0.28	0.203	0.608	0.355	0.255