



北京航空航天大学
BEIHANG UNIVERSITY



可靠性与系统工程学院

元器件质量与可靠性保证

主讲教师：付桂翠

Email: fuguicui@buaa.edu.cn

2023年03月28日



元器件质量保证中心

C 本节内容 CONTENTS

第七章：元器件降额设计

一、概述

二、降额设计的过程

三、降额设计示例

四、降额设计的基本原则

五、元器件结温的计算



一、概述

【降额设计的定义】：

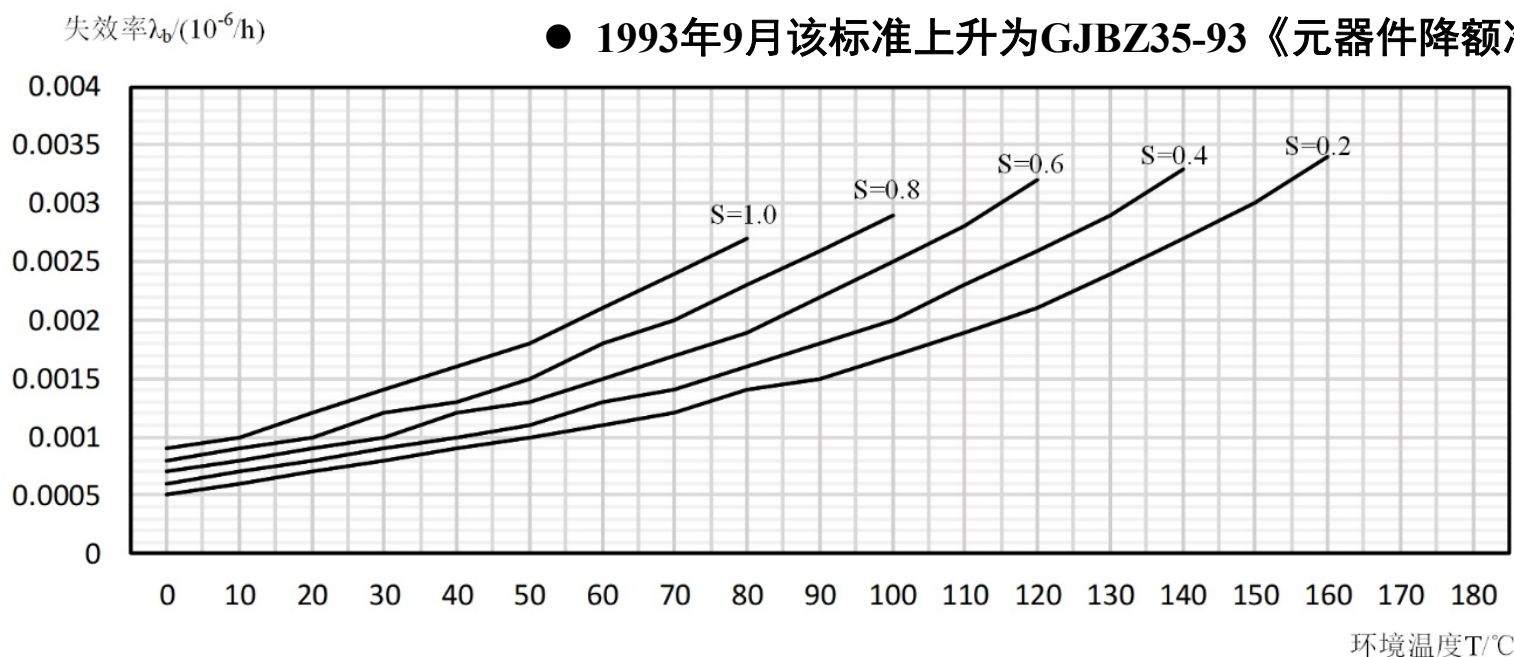
- 降额设计就是将元器件在使用中所承受的应力(电、热、机械应力等)低于其设计的额定值。
-

【降额设计的目的】：

- 通过限制元器件所承受的应力大小，降低元器件的失效率，提高使用可靠性；
- 若元器件一直在额定应力下工作，其性能退化速率较快，降额设计能延缓其参数退化，增加工作寿命；
- 使设计有一定的安全余量。

一、概述

- 元器件工作时承受的电/热应力越高, 器件的失效率越高;
- 金属膜电阻器基本失效率随工作电应力的变化曲线如下图所示。



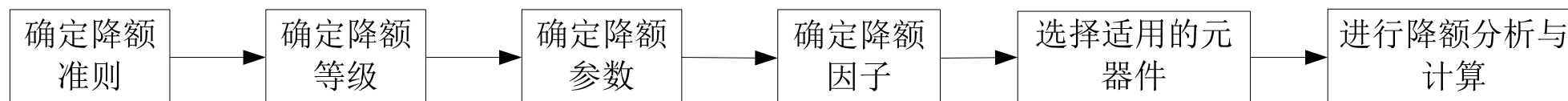
【降额设计的发展】：

- 元器件降额设计在先进国家起步比较早, 我国在80年代初期开展了该项工作;
- 1984年1月, 航天部在国内率先颁布了元器件的可靠性降额准则QJ1417-88;
- 1993年9月该标准上升为GJBZ35-93《元器件降额准则》;

二、降额设计过程

降额设计的过程：

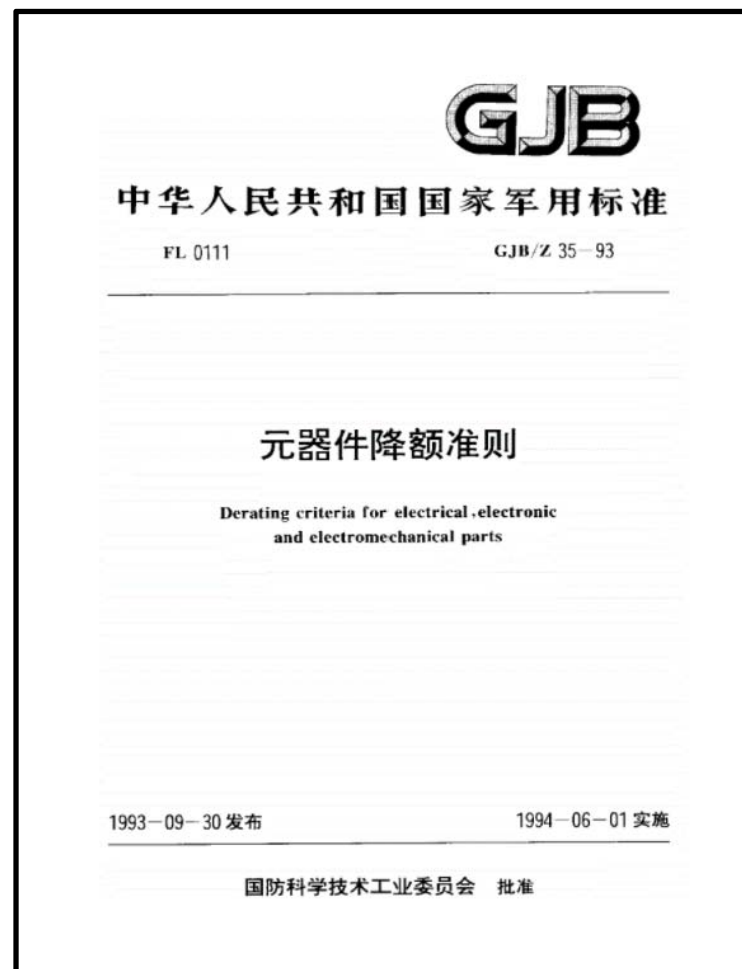
- ① 确定降额准则
- ② 确定降额等级
- ③ 确定降额参数
- ④ 确定降额因子
- ⑤ 降额计算及分析



二、降额设计的过程

①【确定降额准则】：

- 降额准则是降额的依据和标准。
- 国产电子元器件：
GJB/Z35-93 《元器件降额准则》
- 国外元器件参考：
《元器件可靠性降额准则》（美国波音宇航公司
为罗姆航空发展中心编制）
《电子元件降额要求和应用准则》（欧空局）



二、降额设计的过程

② 【确定降额等级】：

- 降额等级表示设备中元器件降额的不同范围；
- 我国国军标GJB/Z35-93《元器件降额准则》— 3个等级

降额等级	I级	II级	III级
降额程度	最大	中等	最小
可靠性改善	最大	适中	较小
适用性	设备的失效将导致人员伤亡或装备与保障设施的严重破坏	设备的失效将可能引起装备与保障设施的损坏	设备的失效不会造成人员和设施的伤亡和破坏
	对设备有高可靠性要求	有高可靠性要求	设备采用成熟的标准设计
	且采用新技术、新工艺的设计	且采用了某些专门的设计	故障设备可迅速、经济地加以修复
	由于费用和技术原因，设备失效后无法或不宜维修	需交付较高的维修费用	
	系统或设备的尺寸、重量将有显著增加	系统或设备的尺寸、重量增加不大	系统或设备的尺寸、重量增加不大
设计实现难易	较难	一般	容易
增加的费用	较高	中等	较低

二、降额设计的过程

②【确定降额等级】：

- GJB/Z35对不同类型设备推荐应用的降额等级。

应 用 范 围	降 额 等 级	
	最 高	最 低
航天器与运载火箭	I	I
战略导弹	I	II
战术导弹系统	I	III
飞机与舰船系统	I	III
通信电子系统	I	III
武器与车辆系统	I	III
地面保障设备	II	III

- 美国罗姆空军发展中心(RADC)对不同应用范围推荐的降额等级。

环 境	降 额 等 级
地 面	III
飞 行	II
空 间	I
导弹发射	I

二、降额设计的过程

③【确定降额参数】：

● 降额参数

影响元器件失效率的有关性能参数和环境应力参数；

● 确定原则

首先应符合某降额等级下各项降额参数的降额量值的要求；

在不能同时满足时，尽量保证对关键降额参数的降额；

例：开关降额参数为触点电流[☆]、电压和功率；

降额参数：

- 影响开关可靠性的主要因素为电流；
- 开关触点流过的电流情况会严重影响长期工作的开关的接触可靠性；
- 开关通过的电压大小，主要影响开关的绝缘。

二、降额设计的过程

③【确定降额参数】：

- 对元器件失效率有影响的主要降额参数和关键降额参数

元器件类型		主要降额参数和关键降额参数
模拟电路	放大器	电源电压、输入电压、输出电流、功率、最高结温☆
	比较器	
	模拟开关	
	电压调整器	电源电压、输入电压、输入输出电压差、输出电流功率、最高结温☆
数字电路	双极型	频率、输出电流、最高结温☆、电源电压
	MOS型	电源电压、输出电流、频率、最高结温☆、电源电压
混合集成电路		厚、薄膜功率密度、最高结温☆
微处理器	双极型	频率、输出电流、扇出、最高结温☆、电源电压
	MOS型	
大规模集成电路		最高结温☆
晶体管	普通	反向电压、电流、功率、最高结温☆、功率管安全工作区的电压和电流
	微波	最高结温☆
二极管	普通	电压(不包含稳压管)、电流、功率、最高结温☆
	微波、基准	最高结温☆

二、降额设计的过程

③【确定降额参数】：

可控硅		电压、电流、最高结温☆
半导体光电器件		电压、电流、最高结温☆
电阻器		电压、功率☆、环境温度
热敏电阻器		功率☆、环境温度
电位器		电压、功率☆、环境温度
电容器		直流工作电压☆、环境温度
电感元件		热点温度☆、电流、瞬态电压/电流、介质耐压、扼流圈电压
继电器		触点电流☆、触点功率、温度、振动、工作寿命
开 关		触点电流☆、触点电压、功率
电连接器		工作电压、工作电流☆、接插件最高温度
导线与电缆		电压、电流☆
旋转电器		工作温度☆、负载、低温极限
灯 泡		工作电压☆、工作电流☆
电路断路器		电流☆、环境温度
保险丝		电流☆
晶 体		最低温度、最高温度☆
电真空器件	阴极射线管	温度☆
	微波管	温度、输出功率☆、反射功率、占空比
声表面波器件		输入功率☆

二、降额设计的过程

④【确定降额因子】：

● 降额因子(S)

- 表征了元器件降额的程度；
- 元器件实际承受的应力（工作应力）与额定应力之比；

● 关于温度的降额因子

- 在降额准则中，温度的降额因子一般不用应力比来表示，通常给出的是最高结温、最高环境温度或按元器件的负荷特性曲线降额；

● 注意

- 对III级降额的降额因子，可因需要而作变动；
- 对I级降额的降额因子一般不应轻易改变；

[模拟集成电路的降额准则]

元器件 种类	降 额 参 数	降 额 等 级		
		I	II	III
放大器	电源电压	0.70	0.80	0.80
	输入电压	0.60	0.70	0.70
	输出电流	0.70	0.80	0.80
	功 率	0.70	0.75	0.80
	最高结温 (°C)	80	95	105

二、降额设计的过程

⑤【降额计算及分析】：

- 确定了降额等级、降额参数和降额量值后
- 进行降额计算及分析
 - 根据元器件手册的数据，获得元器件的额定值；
 - 计算元器件降额后的允许值；
 - 利用电/热分析计算或测试获得实际工作的电应力值和温度值；
 - 将降额后的允许值与实际工作值进行比较，检查每个元器件是否达到降额要求。

[降额设计情况表]

序号	元器件名称	型号	关键件、重要件 是(√) 否(×)	降额情况	对存在问题是否有改进措施 是(√) 否(×)
1	金属膜电阻器	RJ23	×	满足	改为CA35-16
2	运算放大器	JF118	×	满足	
3	非固体钽电容器	CA35-10	×	II级降额后直流工作电压小于	
	⋮	⋮	⋮	电路9V要求	

三、降额设计示例

①【模拟电路降额设计示例】：

- 对某型国产运算放大器进行I级降额设计。
- 从数据手册上查得该型号运算放大器的额定值。

正电源电压	$V_{CC}=+22V;$	$\times 0.7=15.4(V)$
负电源电压	$V_{EE}=-22V;$	$\times 0.7= -15.4(V)$
输入差动电压	$V_{ID}=\pm 20V;$	$\times 0.6=\pm 12(V)$
输出短路电流	$I_{OS}=20mA;$	$\times 0.7=14(mA)$
最高结温	$T_{jmax}=150^{\circ}C;$	$80^{\circ}C$
总功率	$P_{tot}=500mW。$	$\times 0.7=350(mW)$

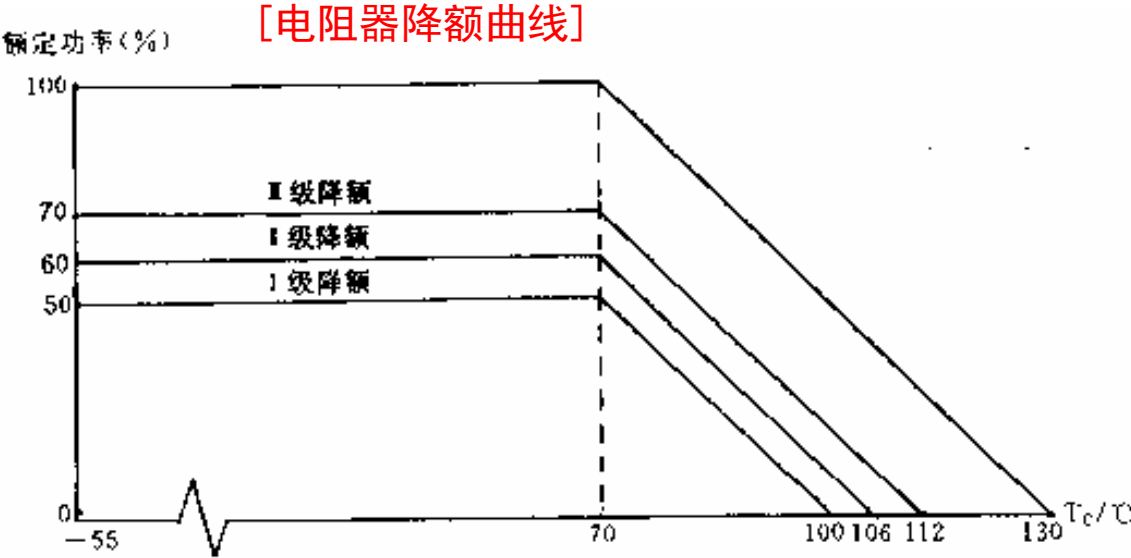
[模拟集成电路的降额准则]

元器件 种类	降 额 参 数	降 额 等 级		
		I	II	III
放大器	电源电压	0.70	0.80	0.80
	输入电压	0.60	0.70	0.70
	输出电流	0.70	0.80	0.80
	功 率	0.70	0.75	0.80
	最高结温 (°C)	80	95	105

三、降额设计示例

②【电阻器降额设计示例】：

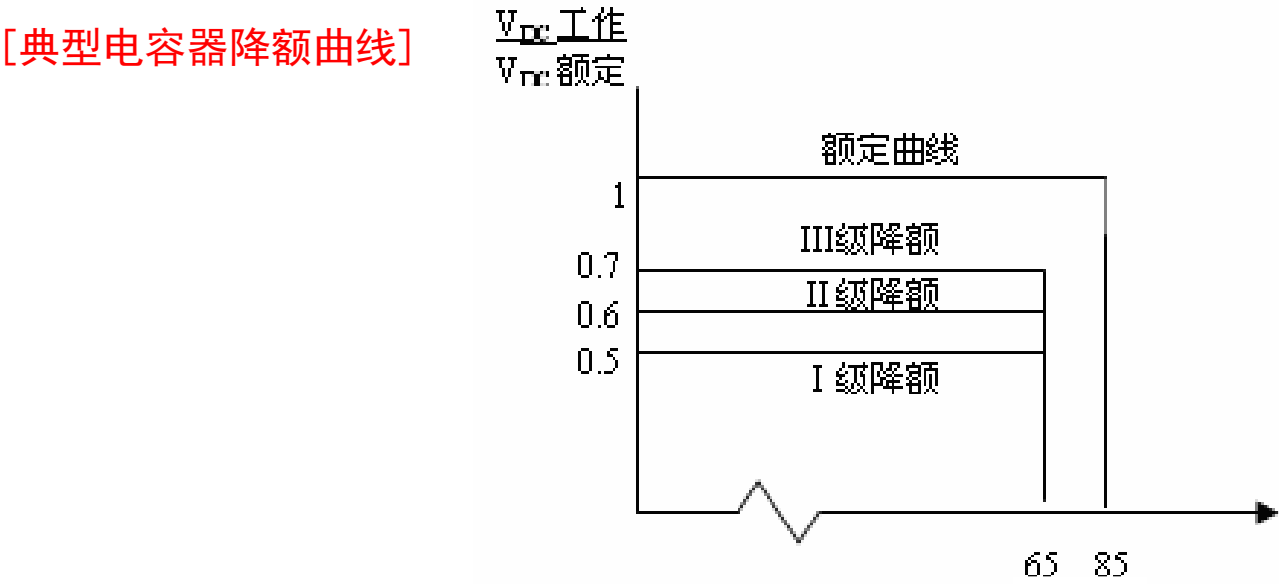
● 电阻器降额说明



合成型电阻器	降额参数	I	II	III
	电压	0.75	0.75	0.75
	功率	0.50	0.60	0.70
	环境温度	按元件负荷特性曲线降额		

三、降额设计示例

②【电容器降额设计示例】：



钽电解	降额参数	I	II	III
	直流工作电压	0.50	0.60	0.70
	环境温度(°C)	TAM-20	TAM-20	TAM-20

四、降额设计的基本原则

- 关键元器件应保证满足规定的降额因子。一般元器件的降额因子允许做**适量调整**。

- 各类元器件均有一个最佳的降额范围(参见GJB/Z35)；
- 在某规定值附近变动，对设备可靠性的影响不会很大；
- 多项降额参数的降额时，尽可能符合关键降额参数的降额，个别影响不大的参数应允许作适当的改变。对电子元器件进行降额应用时，不能将所承受的各种应力孤立看待，应进行**综合权衡**。集成电路的电压、电流、功率与结温；
- 开关的电流降额与功率降额； ● **（书第128页例题）**

四、降额设计的基本原则

- 有些元器件参数**不能降额**；

- 如：继电器的线包电流不仅不能降低，反而应在额定值之上，否则影响可靠的接触。

- 降额到一定程度后，可靠性的提高是很微小的，**过度降额反而有害**；

- 会使元器件的特性发生变化；

- 导致元器件数量不必要的增加，设备重量、体积和成本增加；

- 无法找到合适的元器件；

- 实例

- 大功率晶体管在小电流下，大大降低放大系数而且参数稳定性降低；

- 某些电容，如独石电容器、聚苯乙烯电容器等在应力比接近0.1时，会导致元器件降额太大而产生低电平失效；

- 不应采用过度的**降额**来弥补选用低于要求**质量等级**的元器件；同样，也不能由于采用了高质量等级的元器件，而**不进行降额**设计。

五、元件结温的计算

- 确定集成电路或晶体管工作时的实际结温的目的：

- 在降额设计中判定是否满足降额等级的要求；

- 只能得到元器件允许的最大额定结温、最高工作环境温度或壳温

- 通过热阻计算结温

- 什么是热阻

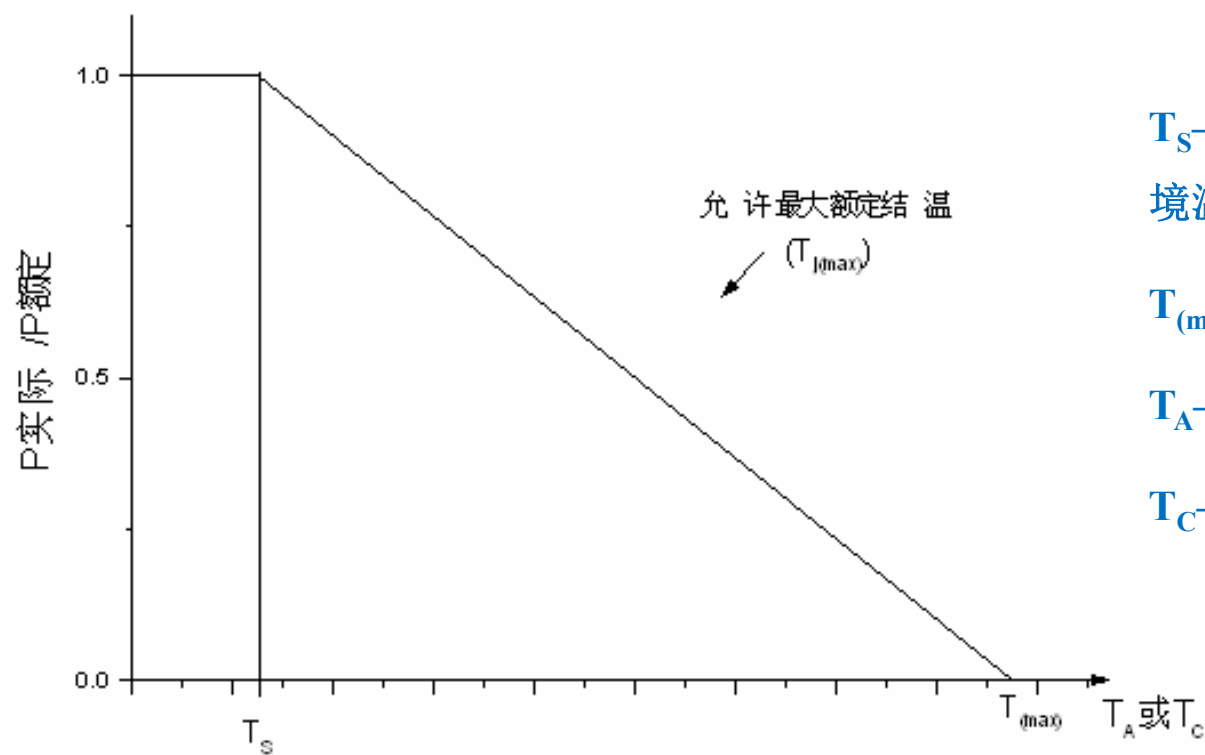
- 结温的近似计算

- 什么是结温

元器件种类	降 额 参 数	降 额 等 级		
		I	II	III
放大器	电源电压	0.70	0.80	0.80
	输入电压	0.60	0.70	0.70
	输出电流	0.70	0.80	0.80
	功 率	0.70	0.75	0.80
	最高结温 (°C)	80	95	105

五、元件结温的计算

● 半导体器件典型的功率负荷与温度（负荷特性）曲线



T_s ——最大额定功率时允许的最高环境温度(通常是 25°C);

$T_{(\max)}$ ——最高结温;

T_A ——环境温度;

T_C ——管壳温度。

五、元件结温的计算

- 小功率器件的结温等于环境温度加上热阻和器件功率耗散的乘积 **【通过热阻计算结温】**

耗散的乘积

$$T_j = T_A + RP_j$$

例：计算二极管2DG711的热阻。

T_j ——结温， $^{\circ}\text{C}$ ；

T_A ——环境温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

R ——结与管壳间的热阻， $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ；

P_j ——平均耗散功率， W 。

从手册中可查到 $P_{j(\max)}=500\text{mW}$ ； $T_{j(\max)}=175^{\circ}\text{C}$ ； $T_S=25^{\circ}\text{C}$ ；

经计算知 $R=(175-25)/0.5=300^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

- 热阻值

$$R = (T_{j(\max)} - T_S) / P_{j(\max)}$$

$T_{j(\max)}$ ——器件的允许最大额定结温， $^{\circ}\text{C}$ ；

T_S ——最大额定功率的设计环境温度上限，通常为 25°C ；

$P_{j(\max)}$ ——器件的最大额定功率， W 。

热阻值是恒定的。

五、元件结温的计算

- 功率器件的结温等于管壳温度加上热阻与器件耗散功率之积

$$T_j = T_c + RP_j$$

【通过热阻计算结温】

T_j ——结温，℃；

T_c ——管壳温度，℃；

R ——结与管壳间的热阻，℃/W；

P_j ——平均耗散功率，W。

五、元件结温的计算

- 晶体管和二极管

【结温的近似计算】

小功率：晶体管 $T_j = T_A + 30$ 二极管 $T_j = T_A + 20$

中功率：晶体管 $T_j = T_C + 30$ 二极管 $T_j = T_C + 20$

- 集成电路

集成电路门数不大于30个或晶体管数不大于120个(不包括存储器)：

$$T_j = T_A + 10$$

集成电路门数大于30个或晶体管数大于120个，以及所有存储器：

$$T_j = T_A + 25$$

- 低功耗TTL及MOS电路：

门数不大于30个或晶体管数不大于120个：

$$T_j = T_A + 5$$

门数大于30个或晶体管数大于120个：

$$T_j = T_A + 13$$

课堂作业

- 降额设计包括哪些过程？
- 从手册中查到装有引线的某器件
 $P_{j(max)}=700\text{mW}$, $T_{j(max)}=150^{\circ}\text{C}$, $T_s=25^{\circ}\text{C}$,
 计算其热阻。
- 某航空开关, 触点导通电流(阻性)为2A, 额定工作电压为60V, 导通电阻为 0.2Ω , 用于航空电源电压为直流28V, 采用II级降额, 进行降额计算与分析。
- 如何看待降额设计与元器件选用之间的关系？

表 7-8 电子开关的降额准则 (GJB/Z35-93)

元器件种类	降 额 参 数				降 额 等 级		
开 关					I	II	III
	连续触点电流	小功率负载(<100mW)			不降额		
		电阻负载			0.50	0.75	0.90
		电容负载(电阻额定电流的)			0.50	0.75	0.90
		电感负载	电感额定电流的		0.50	0.75	0.90
			电阻额定电流的		0.35	0.40	0.50
		电机负载	电机额定电流的		0.50	0.75	0.90
			电阻额定电流的		0.15	0.20	0.35
		灯泡负载	灯泡额定电流的		0.50	0.75	0.90
			电阻额定电流的		0.07-0.08	0.10	0.15
	触点额定电压				0.40	0.50	0.70
	触点额定功率（用于舌簧或水银开关）				0.40	0.50	0.70

C 本节内容 CONTENTS

第八章：热设计与热分析

一、热设计的目的与作用

二、温度对元器件可靠性的影响

三、热设计理论基础

四、元器件热设计的主要方法

五、热分析



一、热设计的目的与作用

【热设计的目的】

- 控制电子设备内部所有元器件的温度，使其在设备所处的工作环境条件下尽可能的低于规定的最高允许温度；
- **防止电子元器件因过热而失效**
- 热设计一般分为系统级、电路板级和元器件级，主要介绍元器件级的热设计。



【热量从何而来】

- 周围环境温度的升高，由环境将热量传递给电子元器件；
- 工作过程中，元器件内部电流密度提高造成的电热响应，即由电能转换为热能；

焦耳定律

电热： $Q=I^2Rt$

热功率： $P=Q/t=I^2R$

二、温度对元器件可靠性的影响

❖ 部分元器件在不同工作温度时的基本失效率 λ_b

元器件类别	$\lambda_b(10^{-6}/h)$		温度差(°C)	λ_b 升高倍数	备注
	室温(25 °C)	高温			
锗普通二极管	0.029	0.298(75 °C)	50	10.3	应力比0.3
锗PNP晶体管	0.162	0.907(75 °C)		5.6	
硅普通二极管	0.018	0.164(125 °C)	100	9.1	
硅PNP晶体管	0.080	0.422(125 °C)		5.3	
金属膜电阻器	0.0008 (30 °C)	0.0027(130 °C)		3.4	
2类瓷介电容器	0.00262	0.00337(125 °C)		1.3	

- ❖ 元器件的失效率随着温度的升高而升高；
- ❖ 元器件的工作寿命随温度的升高而降低。

三、热设计理论基础

□ 传热的基本原则

➤ 基本原则：凡是温差的地方就有热量的传递。

➤ 基本规律

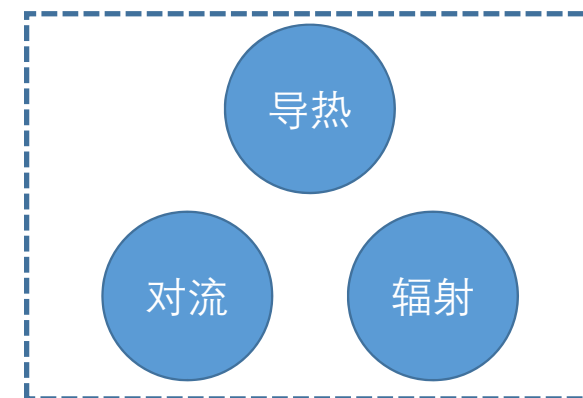
热量从高温区流向低温区；

高温区发出的热量必定等于低温区吸收的热量。

➤ 传热的基本公式：

$$\phi = KA\Delta t$$

➤ 三种基本方式：导热、对流和辐射



三、热设计理论基础

□ 热阻及热阻网络

➤ 热阻：热流在流动过程中遇到的阻力

内热阻：元器件内部发热部位与表面某部位之间的热阻；

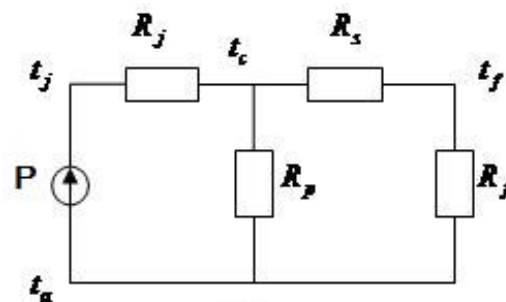
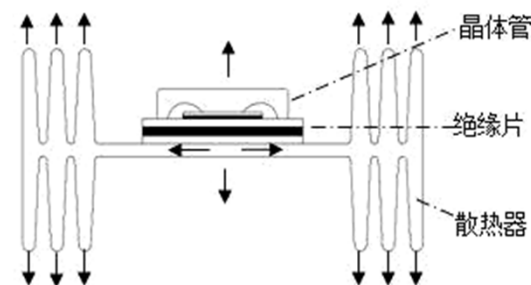
外热阻：元器件表面与最终散热器之间的热阻；

接触热阻：两种物体接触处的热阻；

安装热阻：元器件与安装表面之间的热阻。

➤ 热阻网络：热阻的串联、并联或混联形成的热流路径图。

工程上常采用根据热量的传递方式，建立热阻网络的方法来求解热问题。



三、热设计理论基础

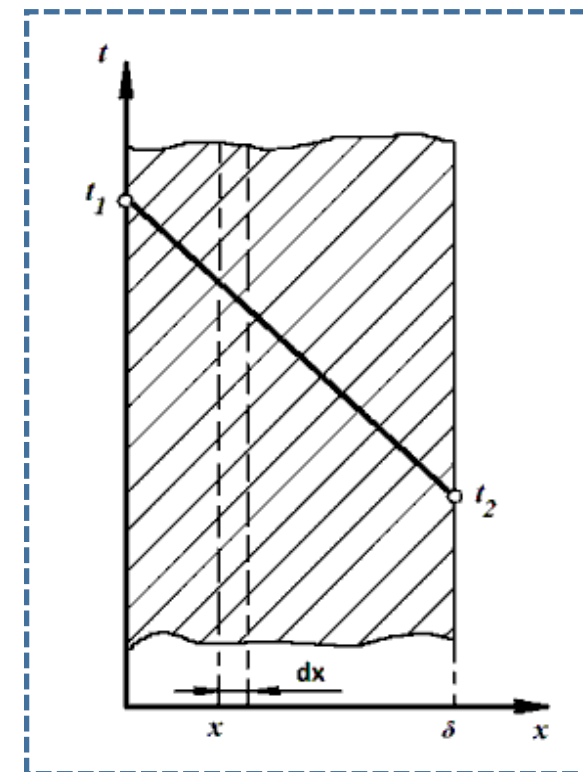
□ 热电模拟

与质量、动量和电量的传递一样，热量的传递也是一种常见的传输过程。对于右图所示的单层平壁，如两个表面分别维持均匀恒定的温度 t_1 和 t_2 ，壁厚为 δ ，则由傅立叶定律可推导得式

$$\phi = -\lambda A \frac{\partial t}{\partial x} = \lambda A \frac{t_1 - t_2}{\delta} = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta}{\lambda A}} = \frac{\Delta t}{R}$$

比较上式和电学欧姆定律可知，热阻与电阻、热流与电流、温差与电位差一一对应。这种关系称热电模拟关系。

热设计中大多采用热电模拟法（热流量模拟为电流；温差模拟为电压；热阻模拟为电阻，热导模拟为电导）进行热阻网络的热阻计算。



四、热设计主要方法

- 降低功耗

- 减少电子元器件自身热量的产生；

- 热匹配设计

- 选用结构完好和物理化学性能稳定的材料；
- 各部分材料的热膨胀系数尽量接近；

- 降低热阻

- 尽量采用易于散热的封装技术和封装形式；

- 利用各种散热方式

- 利用热传导、热辐射、热对流技术增强散热功能；
- 安装散热器、强迫空气冷却、液体冷却等手段；

- 热分布要合理

- 如功率电子元器件要分散、要处于易于散热的位置；
- 远离电路中热敏性元器件等；

设计、制造阶段

使用阶段

元器件的热匹配设计

❑ 热不匹配应力的产生

➤ 元器件中的材料：

金属、半导体、绝缘材料

➤ 热膨胀系数：

在压力一定的条件下，单位温度变化所导致的体积变化。

➤ 热不匹配应力：

由于各材料的热膨胀系数各不相同，一旦遇到温度变化，就会在不同材料的交界面间产生压缩或拉伸应力。



四、元器件的热匹配设计

❖ 微电子器件主要材料典型热膨胀系数值

分类	材料	热膨胀系数($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	弹性系数($\times 10^4/\text{mm}^2$)
芯片	Si	4.2	0.65 ~ 1.69
	GaAs	6.0	8.53
介质膜	SiO ₂	0.6 ~ 0.9	~ 0.7
	Si ₃ N ₄	2.8 ~ 3.2	~ 3.2
互联线	Al	23.0	0.69
键合引线	Au	14.2	0.83
引线框架	Cu	17	1.1
	柯伐合金	4.4	1.4
	Mo	5.2	32
烧结	Au-Si共晶	10 ~ 13	0.71 ~ 0.77
	银浆	30 ~ 100	0.02 ~ 0.04
塑料树脂	热硬化	18 ~ 70	0.15 ~ 0.16
	环氧树脂		

元器件的热匹配设计

❑ 热匹配设计的内容

➤ 目的:

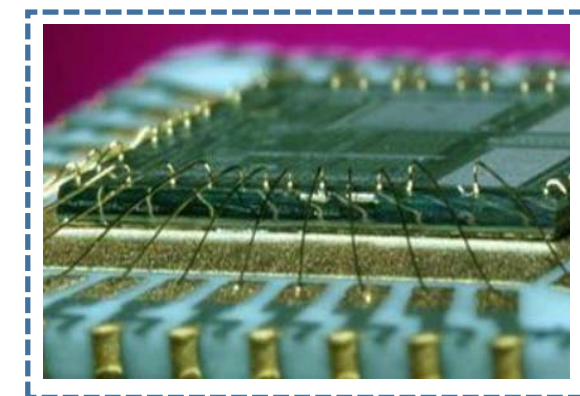
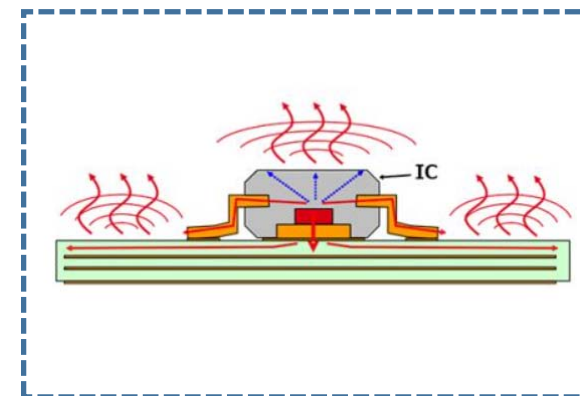
尽可能减少元器件内部相连材料间热膨胀系数的差别，以减少热应力对元器件性能与可靠性的影响。

➤ 关注重点:

管芯的热设计

封装键合的热匹配设计

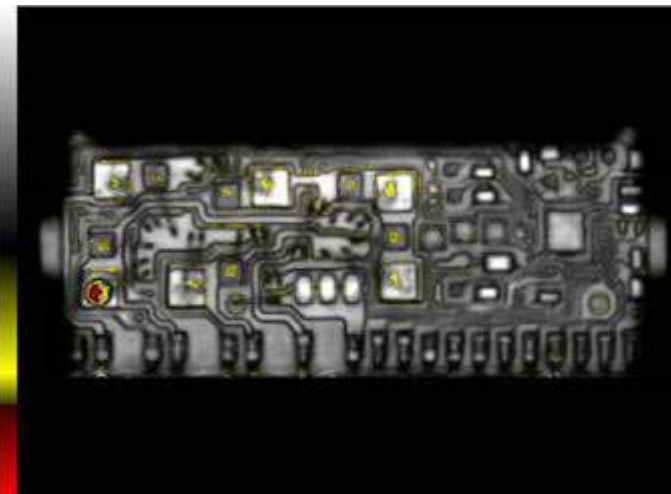
管壳的热匹配设计



元器件的热匹配设计

❑ 热匹配设计的内容

- 管芯的热设计主要通过版图的合理布局使芯片表面温度尽可能分布均匀，防止出现局部过热点。



元器件的热匹配设计

❑ 热匹配设计的内容

- 封装的热匹配设计主要通过合理选择封装、键合和烧结材料，尽可能降低材料的热阻以及材料之间的热不匹配性，防止出现过大的热应力。
 - 对于功率晶体管，为了降低硅芯片与铜底座之间的热膨胀系数差，通常在铜底座上加约0.4mm厚的钼片或柯伐合金片作为过渡层。柯伐合金材料的热膨胀系数与硅更为接近。
- 管壳的热设计主要应考虑降低热阻，即对于特定耗散功率的器件，它应具有足够大的散热能力。
 - 对于耗散功率较大的集成电路，为了改善芯片与底座接触良好，多采用芯片背面金属化和选用绝缘性与导热性好的氧化铍陶瓷，以增加散热能力。

元器件使用中的热设计

❑ 元器件的自然冷却设计

❖ 半导体器件

- 半导体器件的**面积较小**，自然对流及其本身的辐射换热不起主要作用，而**导热**是这类器件最有效的传热方法。

❖ 电阻器

- 电阻器常采用**自然冷却设计**，对大功率是靠电阻器本身与金属底座或散热器之间的金属导热；
- 用金属导热夹是一种很好的安装方法，但应保证紧密接触；

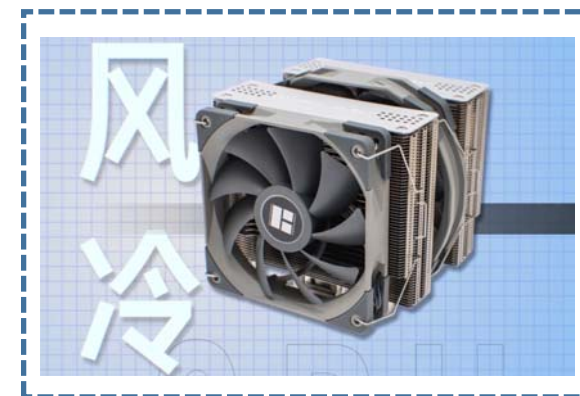
❖ 无源器件

- 无源元件包括电容器、开关、连接器、熔断器和结构元件等。**它们本身不产生热**，但受高温影响将变质而失效。
- 设计中应采用热屏蔽和热隔离的措施，尽量**避免**有源器件对其的热影响。保证它们的失效率低于可靠性设计所要求的值。

元器件使用中的热设计

❑ 元器件的强迫空气冷却散热

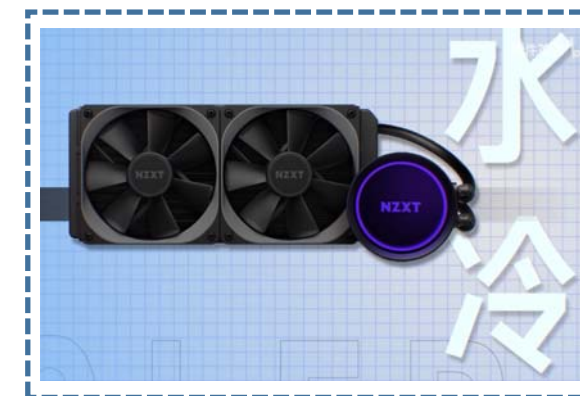
- ❖ 半导体器件
- ❖ 电阻器
- ❖ 大功率器件



CPU的风冷散热器

❑ 元器件的液体冷却设计

- ❖ 直接液体冷却
- ❖ 间接液体冷却



CPU的水冷散热器

元器件使用中的热设计

❑ 元器件的安装与布局

- ❖ 元器件的安装位置应保证元器件工作在允许的工作温度范围内，应得到最佳的**自然对流**；
- ❖ 元器件应牢靠地安装在**底座、底板上**，以保证得到最佳的传导散热；
- ❖ 产生热量较大的元器件应**接近机箱安装**，与机箱有良好的热传导；
- ❖ 元器件、部件的引线腿的横截面应大，长度应短；
- ❖ 温度敏感元件应放置在**低温**处。若邻近有发热量大的元件，则需对温度敏感元件进行热防护，可在发热元件与温度敏感元件之间放置较为光泽的金属片来实现；
- ❖ 元器件的安装板应垂直放置，利于散热。

❑ 元器件在印刷板上的安装与布局

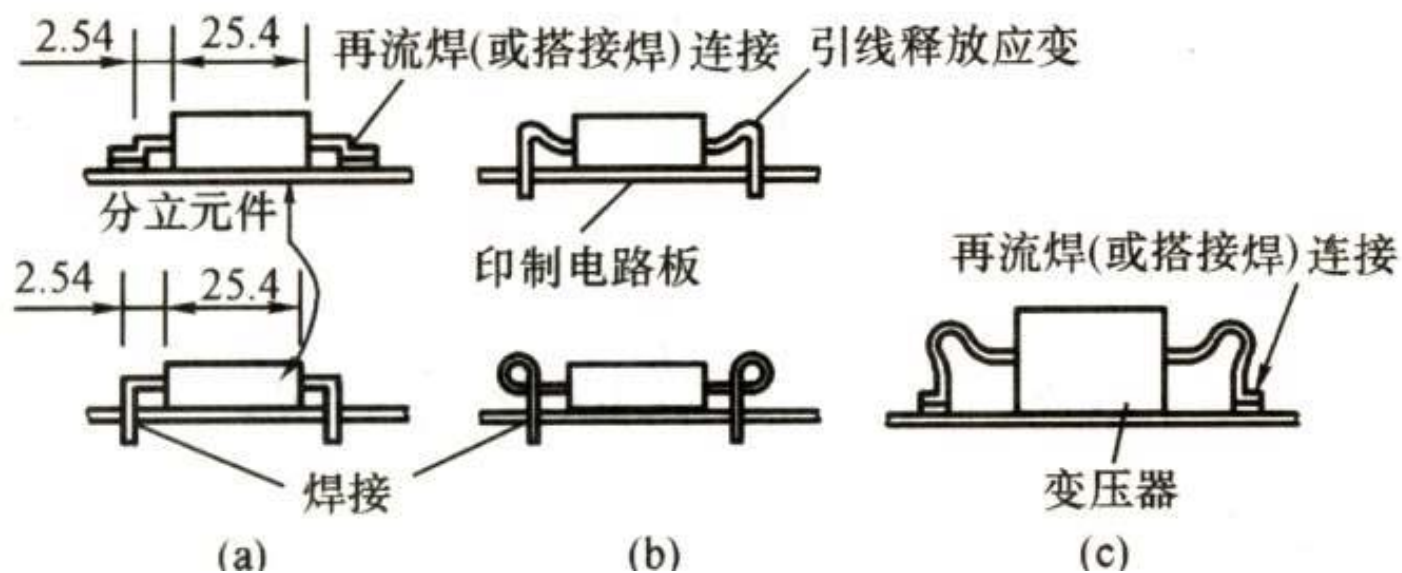
- ❖ 安装在印制电路板上的元器件的冷却，主要依靠导热提供一条从元器件到印制板及机箱侧壁的**低热阻路径**。
- ❖ 元器件在电路板上安装，需要采用一定的安装布局方法。



元器件使用中的热设计

❑ 减少元器件热应变的安装方法

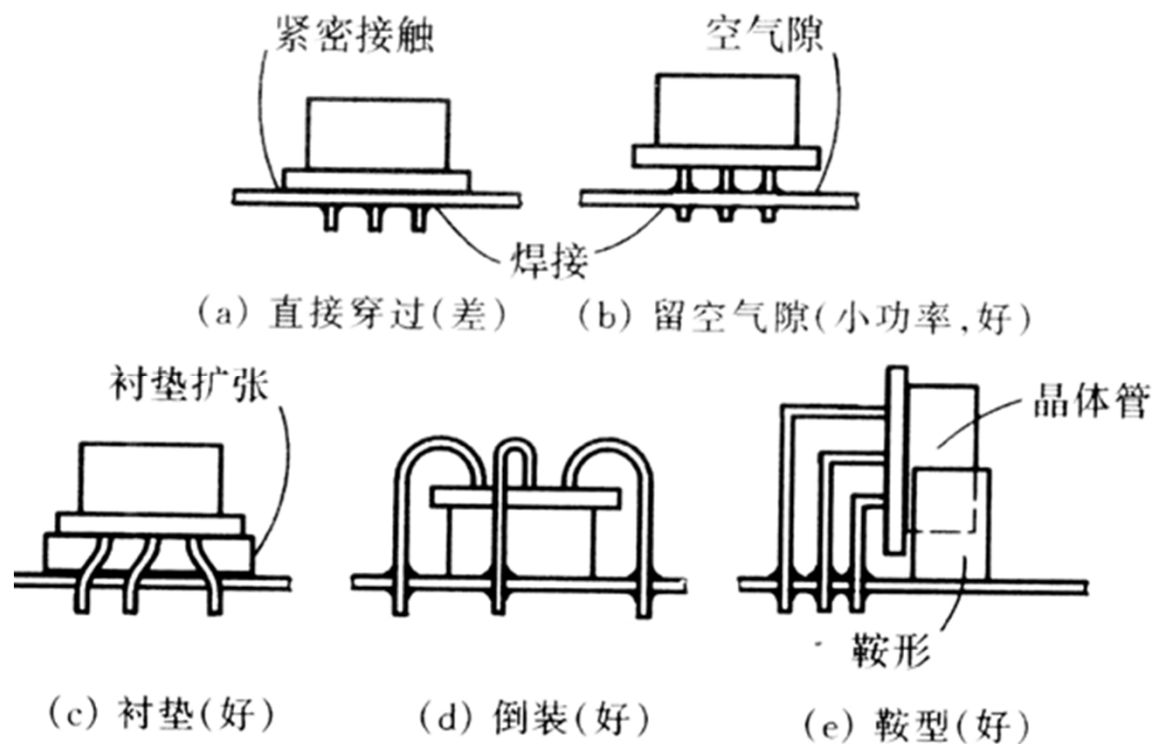
❖ 电子元件的常用安装方法



元器件使用中的热设计

❑ 减少元器件热应变的安装方法

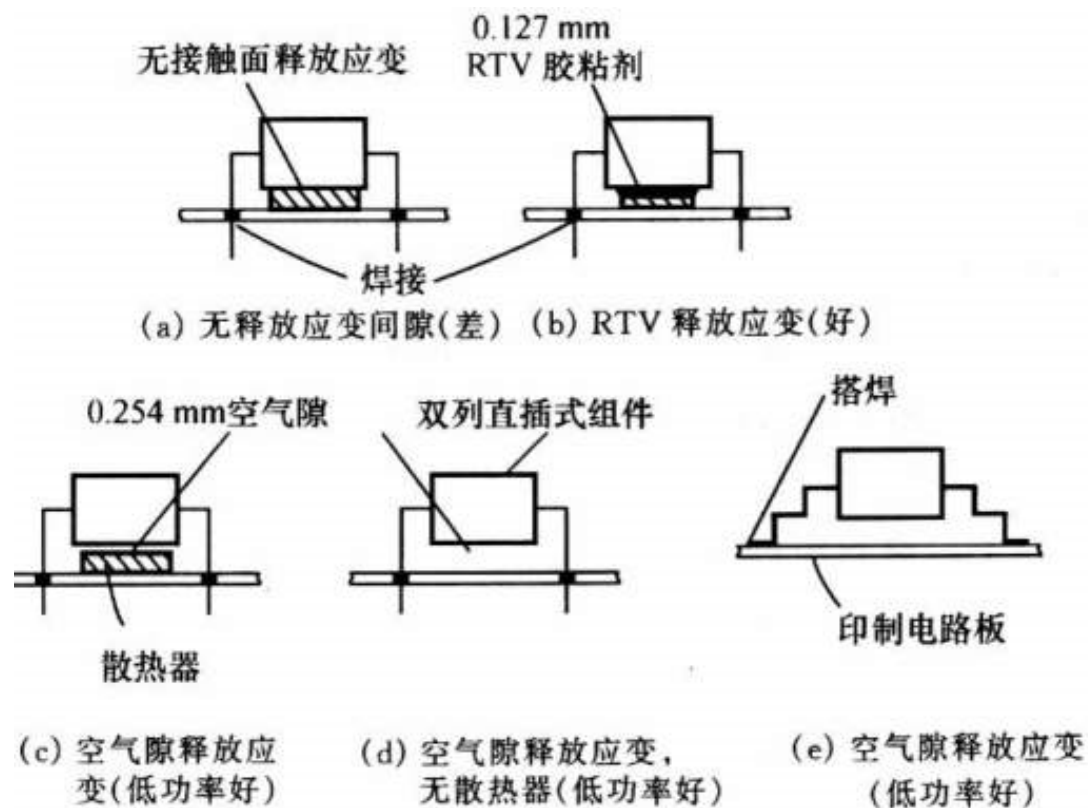
❖ 晶体管的常用安装方法



元器件使用中的热设计

❑ 减少元器件热应变的安装方法

❖ 双列直插式（DIP）集成电路的常用安装方法



功率器件的热设计

❑ 功率器件热性能的主要参数

❖ 结温 (T_j)

❖ 热阻 (R)

❑ 功率器件热设计方法

❖ 在**生产工艺阶段**，就要充分考虑器件内部、封装和管壳的热设计，尽量减少器件自身热量的产生；

❖ 为防止元器件由于过热而引起失效，在**使用阶段**还需对大功率的元器件进行有效的热设计；

- 目前普遍采用在大功率元器件上加散热器进行自然冷却的方法，当热流密度比较大的情况下，也可采用散热器加风冷技术。

六、功率器件的热设计

❑ 功率器件散热系统传热分析

❖ 晶体管散热系统的等效热路模型可知其总热阻 R_t 为

$$R_t = R_j + \frac{R_p (R_s + R_f)}{R_p + R_s + R_f}$$

❖ 若 $R_p \gg R_s + R_f$, 则

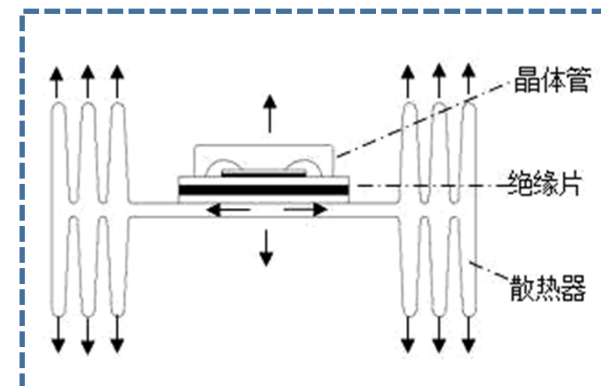
$$R_t = R_j + R_s + R_f$$

R_j ——晶体管内部热阻；

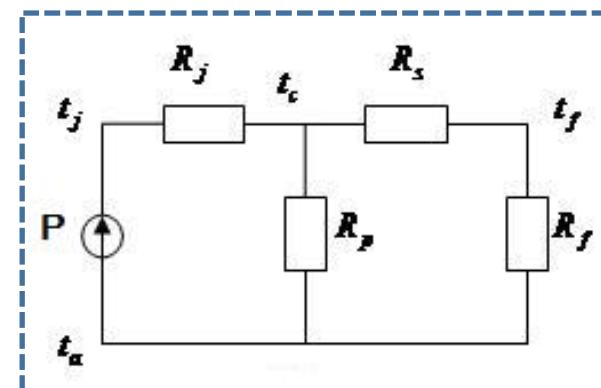
R_f ——散热器热阻；

R_s ——安装界面热阻；

R_p ——管壳热阻。



带散热器的晶体管结构模型



等效热路模型

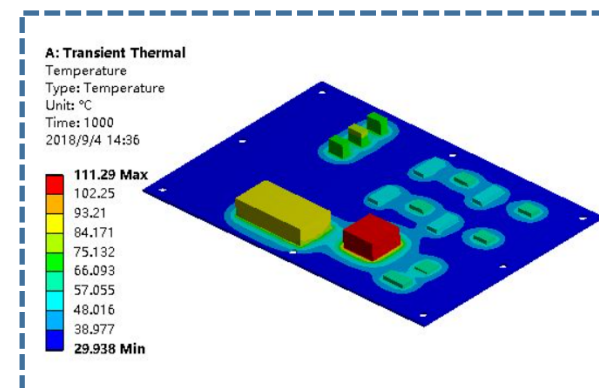
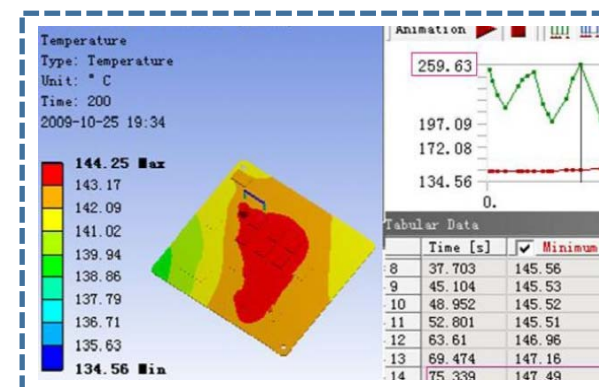
五、热分析

❑ 热分析的目的

- ❖ 利用仿真手段，在电子产品设计阶段（即在产品制造前）获得其温度分布的有效方法。

❑ 热分析方法

- ❖ 解析法
- ❖ 数值法
 - 有限元法
 - 有限差分法
 - 边界元法
 - 有限体积法



五、热分析

❑ 热分析软件

- ❖ 工程中热分析是采用软件来完成的。常用的热分析软件可分为以下两类：
 - 一般的**通用**热分析软件。例如Flotrn， ANSYS等等。它们并不是根据电子产品的特点而编制的，但可用于电子产品的热分析。
 - **专用**的电子产品热分析软件。例如BetaSoft， Coolit， Flotherm， Icepak等等。它们是专门针对电子产品的特点而开发的，具有较大的灵活性。
- ❖ 典型商业化软件

公司	软件名	程序类型	特点
美国ANSYS	ANSYS	通用	融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体，是一种标准分析软件
美国Dynamic Soft Analysis	Betasoft	电子产品	包括可靠性计算
美国daat	Coolit	电子产品	只适用于windows操作系统
美国Fluent	Icepak	电子产品	非结构化和非连续化网格
英国Flomerics	Flotherm	电子产品	优化设计， Flopack工具（协助芯片级建模）
美国Compuflo	Flotrn	通用	要求有网格产生程序

五、热分析

□ 热分析步骤

❖ 建模：

- 由重要到次要，由简单到复杂，对重点分析部位进行详细建模；对于次要因素，进行粗略建模。

❖ 元器件参数及边界条件的输入

- 元器件的参数主要包括几何参数、位置参数、材料的热传导率、热功耗等。

❖ 划分网格进行计算

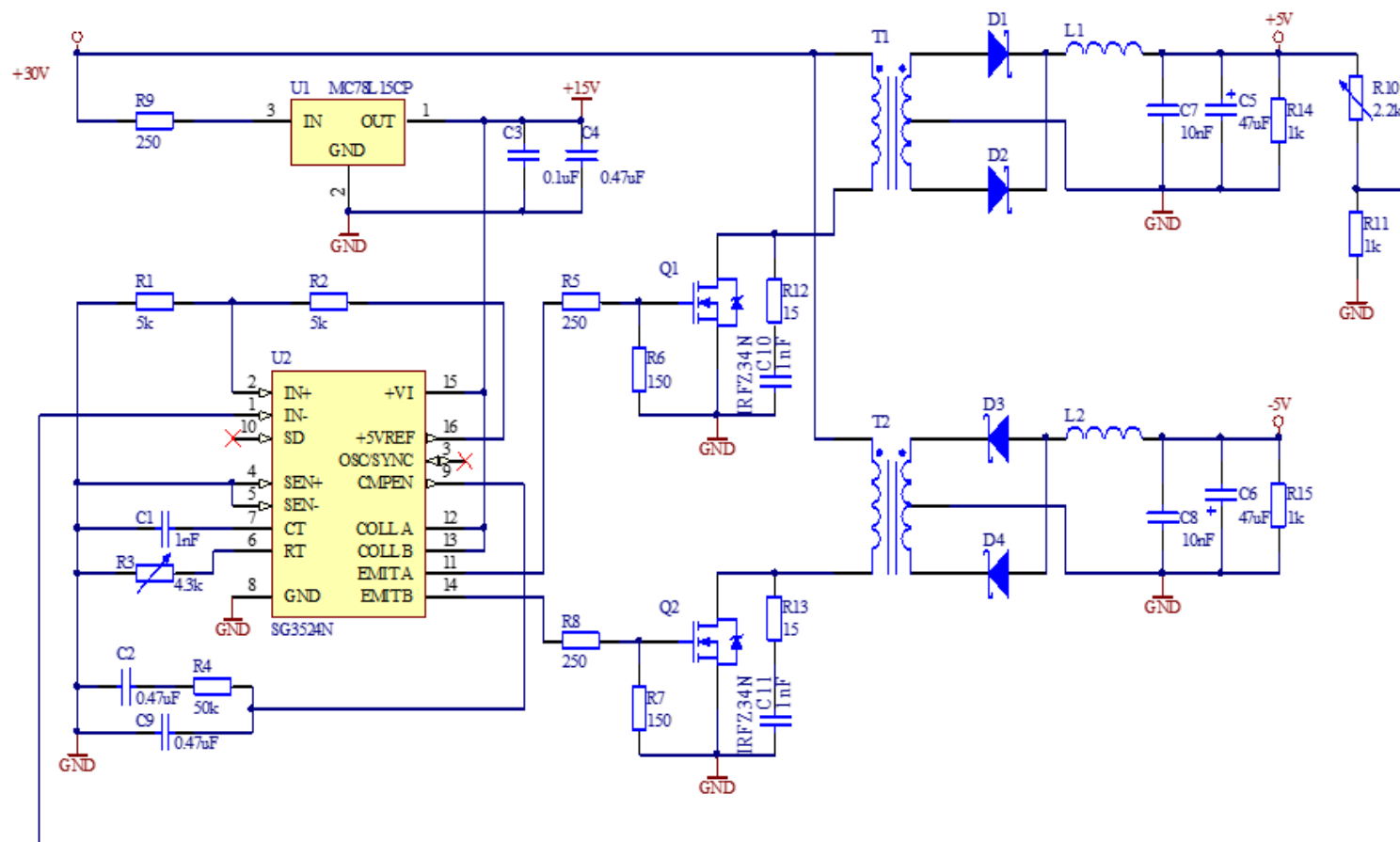
- 一般情况下，网格设置越密，分析精度越高，但计算时间会加长，通常在温度较高的地方进行局部加密。

❖ 后处理

- 一般热分析软件可以图形、报表、动画和报告等形式提供分析结果。便于用户观察到所关心的温度分布及温度变化情况。

五、热分析

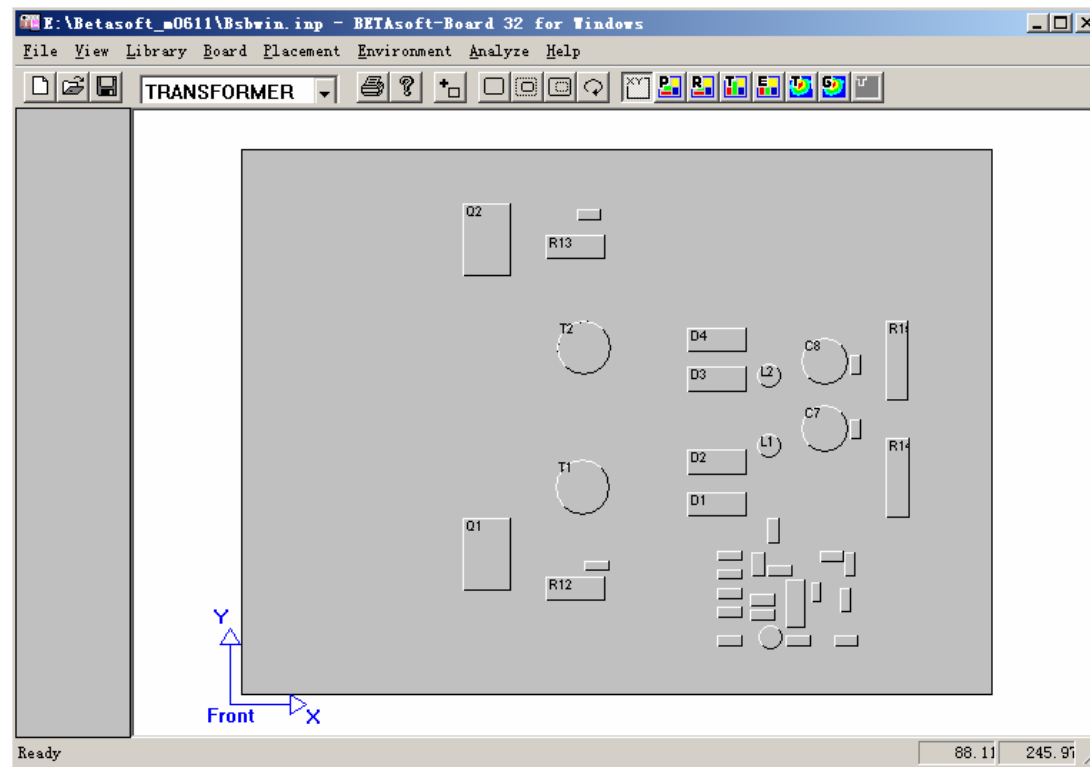
热分析示例



五、热分析

❖ 建模

- 先建立发热量较大的元器件的模型；
- 再建立发热量较小和不发热元器件热分析模型；



五、热分析

❖ 元器件的相关参数

- 三维尺寸
- 材料的导热率
- 发射率
- 功耗等

Edit working library component

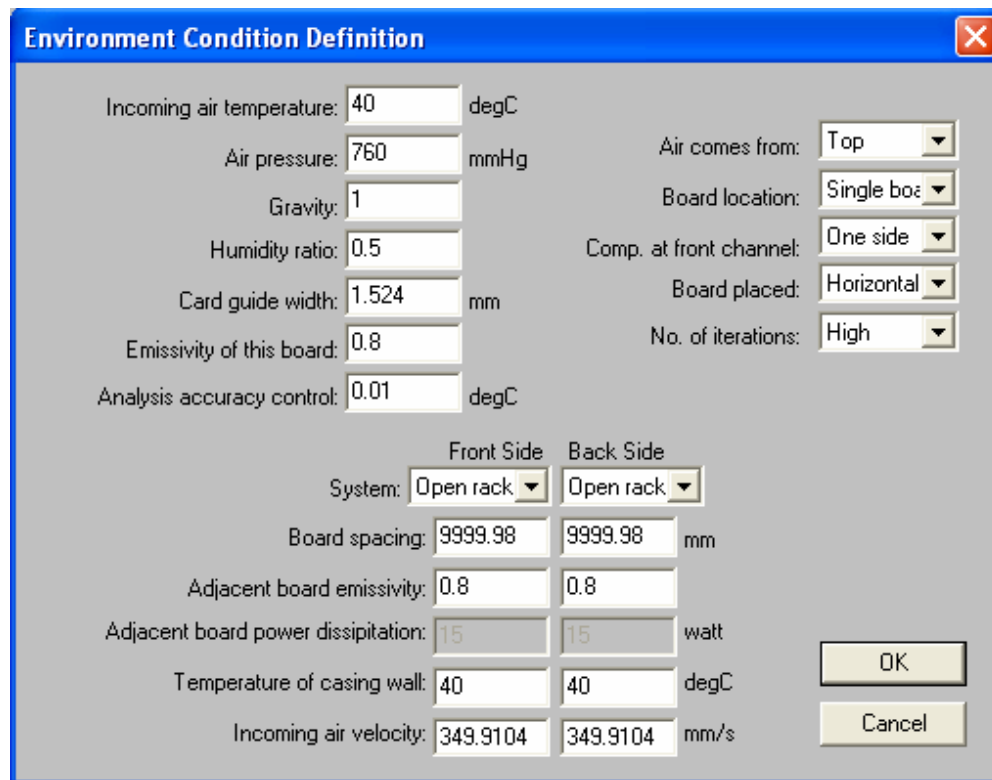
Name of component	IRFZ34N	Power	68	watt
Class	SMD - leadless	Junction to casing thermal	1.5	degC/watt
<input type="checkbox"/> Round component		Sink to air thermal resistance @ 25 ft/s	3	degC/watt
Length (DX)	10.3632	mm	Sink to air thermal resistance @ 10 ft/s	3
Width (DY)	15.0114	mm	degC/watt	
Height (DZ)	4.699	mm	Radiative Emissivity	0
Number of pins	3		Gap conductivity	0
Air gap	0.1524	mm	Casing temperature	0
Pin thermal	0	W/m-C	Junction temperature	0
Pin thickness	0.3048	mm		
Pin length	0.1524	mm		
Pin width	0.4064	mm		

OK Cancel

五、热分析

❖ 划分网格

❖ 分析结果显示



The image shows a software dialog box titled "Environment Condition Definition". It contains various input fields and dropdown menus for defining environmental conditions for a thermal analysis. The fields are organized into two main columns. The left column includes: Incoming air temperature (40 degC), Air pressure (760 mmHg), Gravity (1), Humidity ratio (0.5), Card guide width (1.524 mm), Emissivity of this board (0.8), and Analysis accuracy control (0.01 degC). The right column includes: Air comes from (Top), Board location (Single board), Comp. at front channel (One side), Board placed (Horizontal), and No. of iterations (High). Below these, there are two columns for "Front Side" and "Back Side" settings. The "System" dropdown is set to "Open rack" for both. "Board spacing" is 9999.98 mm for both. "Adjacent board emissivity" is 0.8 for both. "Adjacent board power dissipation" is 15 watt for both. "Temperature of casing wall" is 40 degC for both. "Incoming air velocity" is 349.9104 mm/s for both. At the bottom right, there are "OK" and "Cancel" buttons.

Environment Condition Definition	
Incoming air temperature: 40 degC	Air comes from: Top
Air pressure: 760 mmHg	Board location: Single board
Gravity: 1	Comp. at front channel: One side
Humidity ratio: 0.5	Board placed: Horizontal
Card guide width: 1.524 mm	No. of iterations: High
Emissivity of this board: 0.8	
Analysis accuracy control: 0.01 degC	
System: Open rack	System: Open rack
Board spacing: 9999.98 mm	Board spacing: 9999.98 mm
Adjacent board emissivity: 0.8	Adjacent board emissivity: 0.8
Adjacent board power dissipation: 15 watt	Adjacent board power dissipation: 15 watt
Temperature of casing wall: 40 degC	Temperature of casing wall: 40 degC
Incoming air velocity: 349.9104 mm/s	Incoming air velocity: 349.9104 mm/s
OK Cancel	

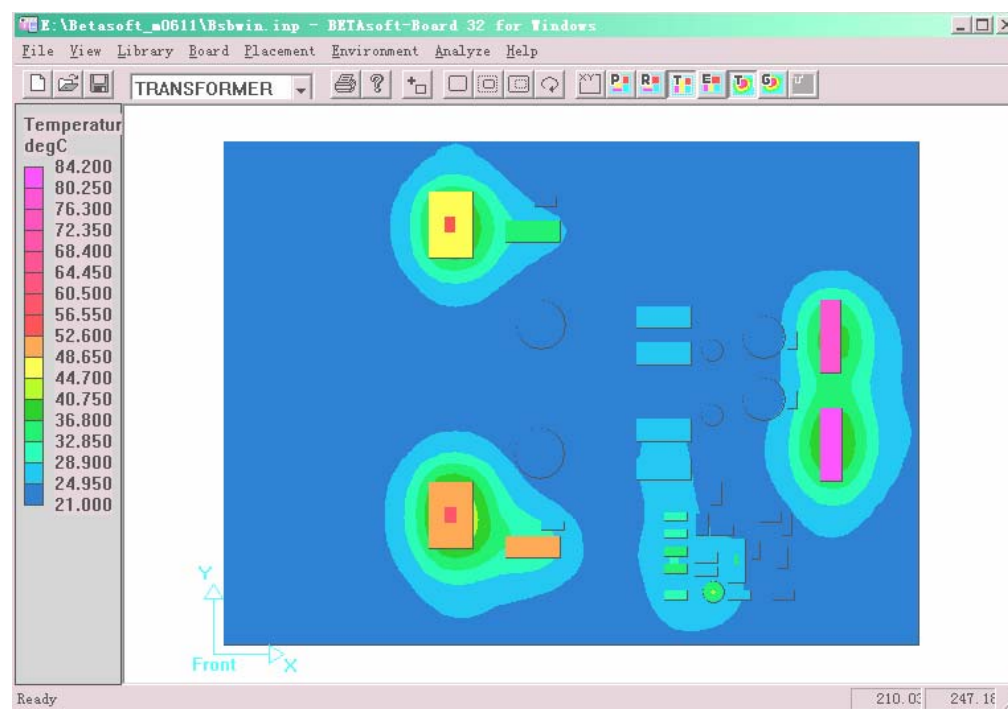
❖ 热分析结论

- 在环境温度为40℃，自然对流的情况下，开关电源板上元器件的最高温度为84.2℃，因此该电源板的热设计满足要求。

五、热分析

❖ 划分网格

❖ 分析结果显示



❖ 热分析结论

- 在环境温度为40℃，自然对流的情况下，开关电源板上元器件的最高温度为84.2℃，因此该电源板的热设计满足要求。

课堂作业

- ❖ 简述高温和温度剧烈变化对元器件性能和可靠性的影响
- ❖ 元器件的热匹配设计应考虑哪些方面？
- ❖ 半导体器件在使用中的热设计考虑的因素是哪些？
- ❖ 查阅相关的文献，举例说明热设计与热分析对系统可靠性提高的贡献。



The End

付桂翠

可靠性与系统工程学院

fuguicui@buaa.edu.cn