

电子设计 可靠性工程

第2章 电子元器件的可靠性 选用

主讲：庄奕琪

本章目次

2.1 元器件可靠性等级

2.2 元器件选择通则

2.2.1 综合考虑

2.2.2 工艺考虑

2.2.3 封装考虑

2.3 电阻器的选用

2.3.1 引例

2.3.2 可靠性相关特性

2.3.3 固定电阻器的选用

2.3.4 可变电阻器的选用

2.4 电容器的选用

2.4.1 概述

2.4.2 可靠性相关特性

2.4.3 非电解电容器的选用

2.4.4 电解电容器的选用

2.4.5 综合应用

2.5 二极管的选用

2.5.1 概述

2.5.2 可靠性相关特性

2.5.3 不同类型二极管的选用

2.6 晶体管的选用

2.6.1 概述

2.6.2 可靠性相关特性

2.6.3 不同类型晶体管的选用

2.7 集成电路的选用

2.7.1 概述

2.7.2 可靠性相关特性

2.7.3 不同类型集成电路的选用

2.7.4 使用方式的考虑

2.8 元器件降额使用

2.8.1 降额的作用与依据

2.8.2 降额参数的选择

2.8.3 降额因子与降额等级的选择

2.1 元器件质量等级

国产元器件质量相关标准

■ 按级别分

- 国家标准GB、国家军用标准GJB
- 行业标准、行业军用标准
- 企业标准、企业军用标准
- 七专技术条件QZT（专批、专技、专人、专机、专料、专检、专卡，QZJ8406）

■ 按类型分

- 规范：元器件的总规范和详细规范，统称产品规范
- 标准：试验和测量标准、质量保证大纲和生产线认证标准、元器件材料和零件标准、型号命名标准、文字和图形符号标准等
- 指导性技术文件：指导正确选择和使用元器件的指南、用于电子设备可靠性预计的手册、元器件系列型谱等

2.1 元器件质量等级

元器件规范举例

国军标/国标编号	国军标/国标名称	等效采用的美军标编号
GJB 33A-1997	半导体分立器件总规范	MIL-S-19500H
GJB 597A-1996	半导体集成电路总规范	MIL-M-38510G
GJB 2438A-2002	混合集成电路通用规范	MIL-H-38534C
GJB 63B-2001	有可靠性指标的固体电解质钽电容器总规范	MIL-C-39003
GJB 65B-1999	有可靠性指标的电磁继电器总规范	MIL-R-39016
GB/T 4589.1-2006	半导体器件 分立器件和集成电路总规范	N/A
GB/T 8976-1996	膜集成电路和混合膜集成电路总规范	N/A

元器件的产品规范是元器件生产线认证和元器件鉴定的依据之一，也是使用方选择、采购元器件的主要依据

2.1 元器件质量等级

元器件标准举例

标准分类	国军标/国标编号	国军标/国标名称	等效采用的美军标编号
可靠性试验方法	GJB 128A-1997	半导体分立器件试验方法	MIL-STD-750H
	GJB 360A-1996	电子及电气元件试验方法	MIL-STD-202F
	GJB 548B-2005	微电子器件试验方法和程序	MIL-STD-883D
	GJB 1217-1991	电连接器试验方法	MIL-STD-1344A
	GB2689	寿命试验和加速寿命试验方法	N/A
失效率鉴定方法	GB-T 1772-1979	电子元器件失效率试验方法	N/A
	GJB 2649-1996	军用电子元件失效率抽样方案和程序	N/A
失效分析方法	GJB 3157-1998	半导体分立器件失效分析方法和程序	N/A
	GJB 3233-1998	半导体集成电路失效分析程序和方法	N/A
	GJB 4027A-2006	军用电子元器件破坏性物理分析方法	MIL-STD-1580A

元器件使用者充分了解上述元器件试验方法的标准，有助于深入地掌握元器件承受各种应力的能力，并为正确制订二次筛选或失效分析的规则提供了参考依据

2.1 元器件质量等级

电子元件的失效率等级

失效率等级名称	失效率等级代号		最大失效率 (1/h)
	GB/T 1772-79	GJB 2649-96	
亚五级	Y	L	3×10^{-5}
五级	W	M	10^{-5}
六级	L	P	10^{-6}
七级	Q	R	10^{-7}
八级	B	S	10^{-8}
九级	J	-	10^{-9}
十级	S	-	10^{-10}

用失效率来表征可靠性的不足之处：一是贵重、高单价器件难以获得失效率数据，二是失效率不能反映抗恶劣环境等其它可靠性特性。因此，通常仅对廉价的元件直接使用失效率来表征其可靠性，其它元器件采用质量等级来表征

2.1 元器件质量等级

- **质量**：元器件在设计、制造、筛选过程中形成的品质特征，可通过质量认证试验确定
- **质量等级**：元器件装机使用前，按产品执行标准或供需双方的技术协议，在制造、检验及筛选过程中其质量的控制等级，用于表示元器件的固有可靠性（摘自GJBZ 299C）
- 具有相同物理结构、功能和技术指标相同的元器件可能具有不同的质量等级

2.1 元器件质量等级 不同标准体系规定的质量等级

■ 质量保证等级（总规范标准体系）

- 国军标元器件总规范体系规定的器件的质量保证等级和有可靠性指标元件的失效率等级
- 不同类型的元器件，等级分法及符号不同
- 元器件生产方用于元器件生产过程控制，提供给元器件使用方采购时参考
- 与失效率不一定有一一对应的关系
- 元器件生产方在其技术条件、合格证明以及产品标志上，一般使用的是质量保证等级

■ 质量等级（元器件预计标准体系）

- GJB299C-2006（MIL-HDBK-217F）《电子设备可靠性预计手册》和 GJB/Z 108A 《电子设备非工作状态可靠性预计手册》规定的质量等级，用质量系数 π_Q 表征，反映了同类元器件不同质量等级的相对质量差异
- 分为A级、B级、C级（可细分为A1、B2之类的子级）
- 元器件使用方用于电子设备可靠性预计和元器件优选目录
- 与失效率有一一对应的关系
- 元器件采购清单中最好同时注明质量分级和质量保证等级

2.1 元器件质量等级

质量保证等级(国军标总规范)

元器件类别	依据标准	质量保证等级（从高到低）
半导体分立器件	GJB33A-1997	JY（宇航级）、JCT（超特军级）、JT（特军级）、JP（普军级）
半导体集成电路	GJB597A-1996	S、B、B ₁
混合集成电路	GJB2438A-2002	K、H、G、D
光电模块	SJ-20642-1997	M ₂ 、M ₁
晶体振荡器	GJB1648-1993	S、B
声表面波器件	GJB2600A-2007	S、B、B ₁
固体继电器	GJB1515A-2001	Y（军级）
微波组件	SJ-20527A-2003	J、G、T
有可靠性指标的元件	相应的元件总规范	失效率等级：L（亚五级）、M（五级）、P（六级）、R（七级）、S（八级）

2.1 元器件质量等级 质量等级(我国可靠性预计体系)

GJB/Z 299C规定:

元器件类别	质量等级分级(从高到低)
单片集成电路	A (A ₁ 、A ₂ 、A ₃ 、A ₄) , B(B ₁ , B ₂) , C (C ₁ 、C ₂)
混合集成电路	A (A ₁ 、A ₂ 、A ₃ 、A ₄ 、A ₅ 、A ₆) , B(B ₁ , B ₂) , C
半导体分立器件	A (A ₁ 、A ₂ 、A ₃ 、A ₄ 、A ₅) , B(B ₁ , B ₂) , C
电阻器	A (A _{1T} 、A _{1S} 、A _{1R} 、A _{1P} 、A _{1M} 、A ₂) , B(B ₁ , B ₂) , C
铝电解电容器	A (A _{1B} 、A _{1Q} 、A _{1L} 、A _{1W} 、A ₂) , B(B ₁ , B ₂) , C
感性元件	A (A ₁ 、A ₂) , B(B ₁ , B ₂) , C
机电式继电器	A (A _{1R} 、A _{1P} 、A _{1M} 、A _{1L} 、A ₂) , B(B ₁ , B ₂) , C

2.1 元器件质量等级 质量等级(我国可靠性预计体系)

GJB/Z 299C规定的单片集成电路质量等级，其它元器件可参阅附录1

质量等级		质量要求说明	质量要求补充说明	质量系数
A	A ₁	符合GJB 597A，且列入军用元器件合格产品目录(QPL)的S级产品。	符合GJB 597-1988且列入军用元器件合格产品目录(QPL)的S级产品	-
	A ₂	符合GJB 597A，且列入军用元器件合格产品目录(QPL)的B级产品。	符合GJB 597-1988且列入军用元器件合格产品目录(QPL)的B级产品	0.08
	A ₃	符合GJB 597A，且列入军用元器件合格产品目录(QPL)的B1级产品。	符合GJB 597-1988且列入军用元器件合格产品目录(QPL)的B1级产品	0.13
	A ₄	符合GB/T 4589.1的III类产品，或经中国元器件质量认证委员会认证合格的II类产品。	按QZJ 840614~840615“七专”技术条件组织生产的I、I _A 产品 符合*SJ 331的I、I _A 类产品	0.25
B	B ₁	按军用标准的筛选要求进行筛选的B2质量等级产品 符合GB/T 4589.1的II类产品	按“七九〇五”七专质量控制技术协议组织生产的产品 符合*SJ 331的II类产品	0.50
	B ₂	符合GB/T 4589.1的I类产品	符合*SJ 331的III类产品	1.0
C	C ₁	-	符合*SJ 331的IV类产品	3.0
	C ₂	低档产品	-	10

2.1 元器件质量等级

质量保证等级与质量等级的对比

质量等级		质量保证等级和“七专”等级						
		单片IC	混合IC	半导体分立器件	有可靠性指标的电阻器	有可靠性指标的电容器	有可靠性指标的继电器	无可靠性指标的元件
A	A ₁	S	K(QML)	JY	T、S（B）、R（Q）、P（L）、M（W）	S（B）、R（Q）、P（L）、M（W）	R(Q)、P(L)、M(W)、L(Y)	与有可靠性指标的最低一个级别同
	A ₂	B	H(QML)	JCT	QZJ 840629~840631七专技术条件	QZJ 840624~840626、840628、840634七专技术条件	QZJ 840617~840618七专技术条件	
	A ₃	B1	G(QML)	JT				
	A ₄	QZJ 840614~840615七专技术条件	D(QML)	QZJ 840611A七专技术条件				
	A ₅		QML	QZJ 840611~840612七专技术条件				
	A ₆		QZJ 840616七专技术条件					
B	B ₁	“七九〇五”七专质量控制技术协议						
	B ₂	无相应的国军标等级，执行国标或行标的产品						
C	C ₁	无相应的国军标等级，执行行标的产品						
	C ₂	低档产品，无相应的国军标等级						

12 注：除注明QML和“七专”外，其余均为QPL质量保证等级

2.1 元器件质量等级

容易混淆的概念举例


工作温度范围

- 军用：-55~+125°C
- 工业用：-40~+85°C
- 商业用：0~+70°C

质量等级

- B1：产品总规范质量保证等级，适用于国产微电路
- B₁：可靠性预计质量等级，适用于几乎所有国产元器件
- B-1：可靠性预计质量等级，适应于美国产集成电路

军品认证

- J级 ：“军标认证”后所赋予产品的一个质量等级
- 军级：口语化表示，可能通过了军标认证或者某些考核，但也可能是自封的

2.2 元器件选择通则

2.2.1 综合考虑

2.2.2 工艺考虑

2.2.3 封装考虑

2.2.1 综合考虑

易产生应用可靠性问题的器件

■ 对外界应力敏感的器件

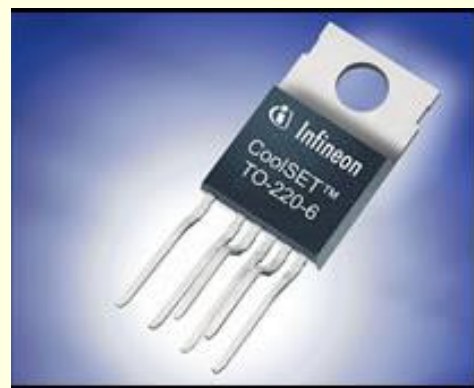
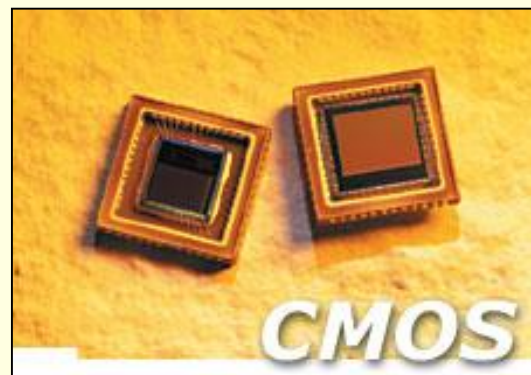
- CMOS电路：对静电、闩锁、浪涌敏感
- 小信号放大器：对过电压、噪声、干扰敏感
- 塑料封装器件：对湿气、热冲击、温度循环敏感

■ 工作应力接近电路最大应力的器件

- 功率器件：功率接近极限值
- 高压器件：电压接近极限值
- 电源电路：电压和电流接近极限值
- 高频器件：频率接近极限值
- 超大规模芯片：功耗接近极限值

■ 频率与功率都大的器件

- 时钟输出电路：在整个电路中频率最高，且要驱动几乎所有数字电路模块
- 总线控制与驱动电路：驱动能力强，频率高
- 无线收发电路中的发射机：功率和频率接近极限值



2.2.1 综合考虑

选用元器件要考虑的十大要素

1. **极限电特性：**元器件除了满足装备功能要求之外，要能经受最大施加的电应力
2. **工作温度范围：**元器件的额定工作温度范围应等于或宽于所要经受的工作温度范围
3. **工艺质量与可制造性：**元器件工艺成熟且稳定可控，成品率应高于规定值，封装应能与设备组装工艺条件相容
4. **稳定性：**在温度、湿度、频率、老化等变化的情况下，参数变化在允许范围内
5. **寿命：**工作寿命或贮存寿命应不短于使用它们的设备的预计寿命
6. **环境适应性：**应能良好地工作于各种使用环境，特别是如潮热、盐雾、沙尘、酸雨、霉菌、辐射、高海拔等特殊环境
7. **失效模式：**对元器件的典型失效模式和失效机理应有充分了解
8. **可维修性和可保障性：**应考虑安装、拆卸、更换是否方便以及所需要的工具和熟练等级
9. **可用性：**供货商多于1个，供货周期满足设备制造计划进度，能保证元器件失效时的及时更换要求等
10. **成本：**在能同时满足所要求的性能、寿命和环境制约条件下，考虑采用性价比高的元器件

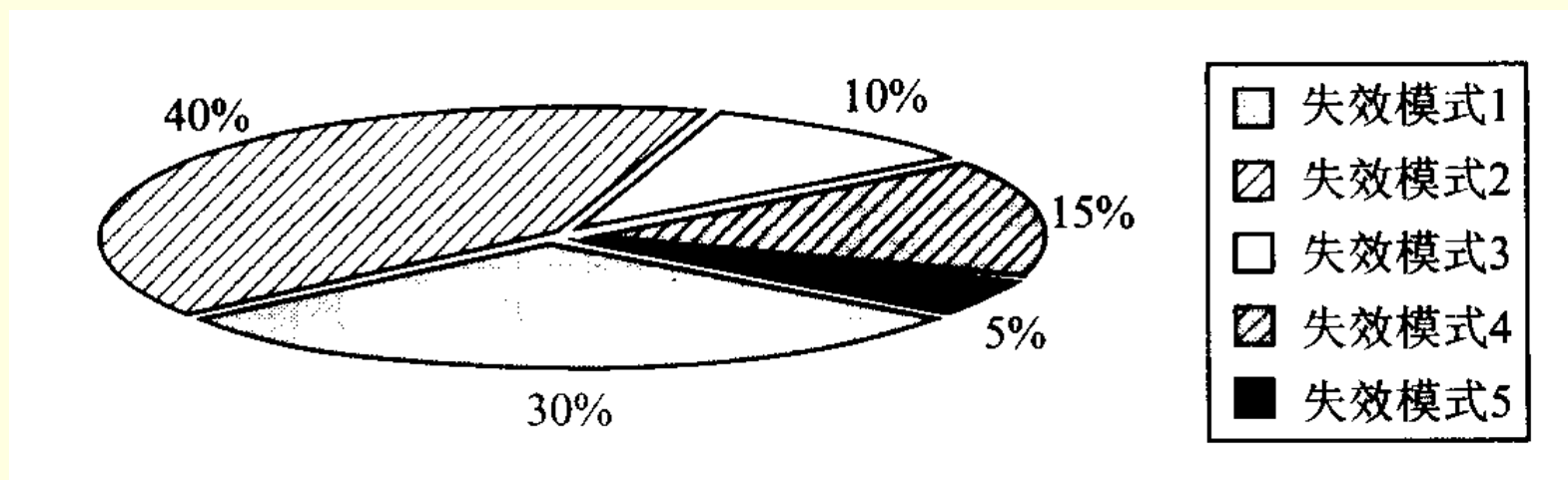
2.2.1 综合考虑

失效模式及其分布:定义

- **失效模式**: 元器件的失效形式, 即是怎样失效的?
- **失效机理**: 元器件的失效原因, 即是为为什么失效的?

元器件的使用者即使不能了解失效机理, 也应该了解失效模式

- **失效模式分布**: 如果元器件有多种失效模式, 则各种失效模式发生的概率是进行失效分析的前提。



某种元件的失效概率分布饼状图

2.2.1 综合考虑

失效模式及其分布:示例

元器件	失效模式	分布概率	元器件	失效模式	分布概率
铝电解电容	短路	0.53	整流二极管	短路	0.51
	开路	0.35		开路	0.29
	电解质泄漏	0.1		参数变化	0.2
	容值变化	0.02	小信号二极管	开路	0.24
陶瓷电容	短路	0.49		短路	0.18
	容值变化	0.29	电压基准齐纳管	参数变化	0.69
	开路	0.22		开路	0.18
钽电容	短路	0.69		短路	0.13
	开路	0.17	电压调节器齐纳管	开路	0.45
	容值变化	0.14		参数变化	0.35
薄膜电阻	开路	0.59		短路	0.2
	参数变化	0.36	三极管	短路	0.73
	短路	0.05		开路	0.27

元器件	失效模式	分布概率	元器件	失效模式	分布概率
网络电阻	开路	0.92	结型场效应管	短路	0.51
	短路	0.08		输出低	0.22
变压器	开路	0.42		参数变化	0.17
	短路	0.42		开路	0.05
	参数变化	0.16		输出高	0.05
线圈	短路	0.42	场效应管	开路	0.61
	开路	0.42		短路	0.26
	感值减少	0.16		参数变化	0.13
继电器	无法吸合	0.55	变压器	开路	0.42
	假吸合	0.26		短路	0.12
	短路	0.19		参数变化	0.16
通用二极管	短路	0.49	连接器	开路	0.61
	开路	0.36		接触不良/间歇性	0.23
	参数变化	0.15		短路	0.16

摘自MIL-HDBK-338B（1998）《美军电子可靠性设计手册》，仅供参考

Copyright by Yiqi Zhuang 2013 V1.0

2.2.1 综合考虑

品种型号的优先选用规则

- 优先选用标准的、通用的、系列化的元器件，慎重选用新品种和非标准器件，最大限度地压缩元器件的品种规格和承制单位的数量
示例：根据MIL-HDBK-217FN2，同等条件下，64位CPU的失效率为57fit，32位CPU的失效率为28fit
- 优先选用列入元器件优选目录的元器件
- 优先选用制造技术成熟的元器件，选用能长期、连续、稳定、大批量供货且成品率高的定点供货单位
- 优先选用能提供完善的工艺控制数据、可靠性应用指南或使用规范的厂家产品
- 在质量等级相当的前提下，优先选用集成度高的器件，少选用分立器件

2.2.1 综合考虑

元器件优选目录:类别

- **合格产品目录**（QPL）：可由国家主管部门、行业主管部门或企业自行编制，高可靠设备必须采取QPL内的元器件
- **推荐产品目录**（PPL）：应是QPL的一个子集，高可靠设备应优先采用PPL内的元器件
- **合格制造商目录**（QML）：已通过相关认证的厂商或者生产线

表 2-3 推荐使用的军用元器件清单标准

国军标编号	国军标名称
GJB/Z 37—1993	军用电阻器和电位器系列型谱
GJB/Z 38—1993	军用电容器系列型谱
GJB/Z 39—1993	军用继电器系列型谱
GJB/Z 40—1993	军用真空电子器件系列型谱
GJB/Z 41—1993	军用半导体分立器件系列型谱
GJB/Z 42—1993	军用微电路系列型谱
GJB/Z 62—1994	军用电连接器系列型谱
GJB/Z 63—1994	军用开关系列型谱

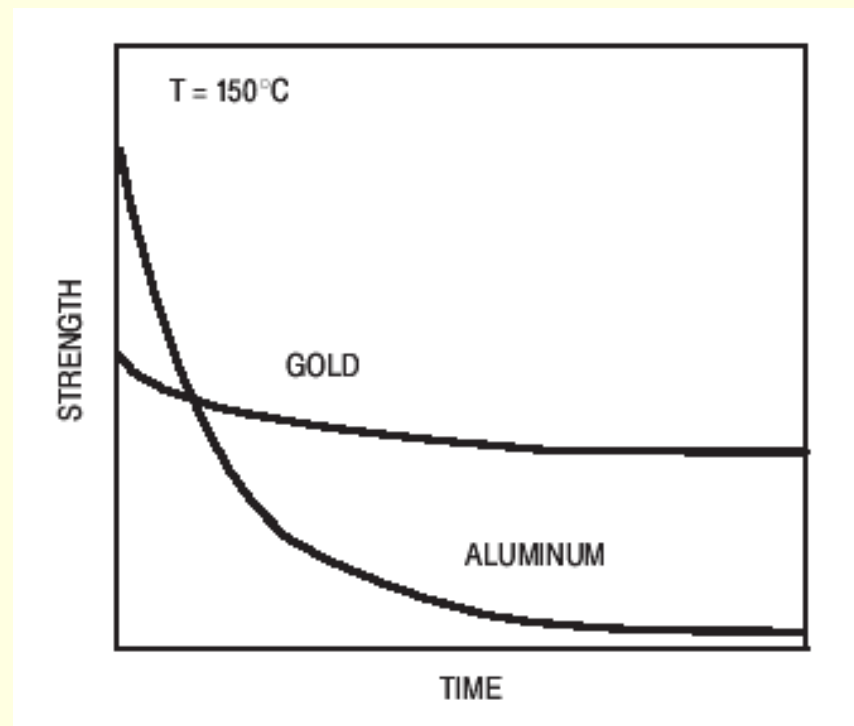
我国国军标规定的军用元器件系列型谱可视为我国军用电子元器件的推荐产品目录

2.2.2 工艺考虑

示例:考察CMOS芯片工艺水平

以集成电路为例:

- 最小线条: 0.35、0.25、0.18、0.13 μm
- 衬底材料: Si>SOI>SiGe>GaAs>SiC
- 互连材料: Cu>Al (国外先进工艺)
Al>Cu (国内现有工艺)
- 钝化材料: SiN>PSG>聚烯亚胺
无机>有机
- 键合材料: Au>Cu>Al(Si)
- 电路形式: 数/模分离>数/模合一
RF/BB分离>RF/BB合一



键合材料与引线机械强度的关系

2.2.2 工艺考虑

SPC数据:合格率的表征

■ 统计工艺控制

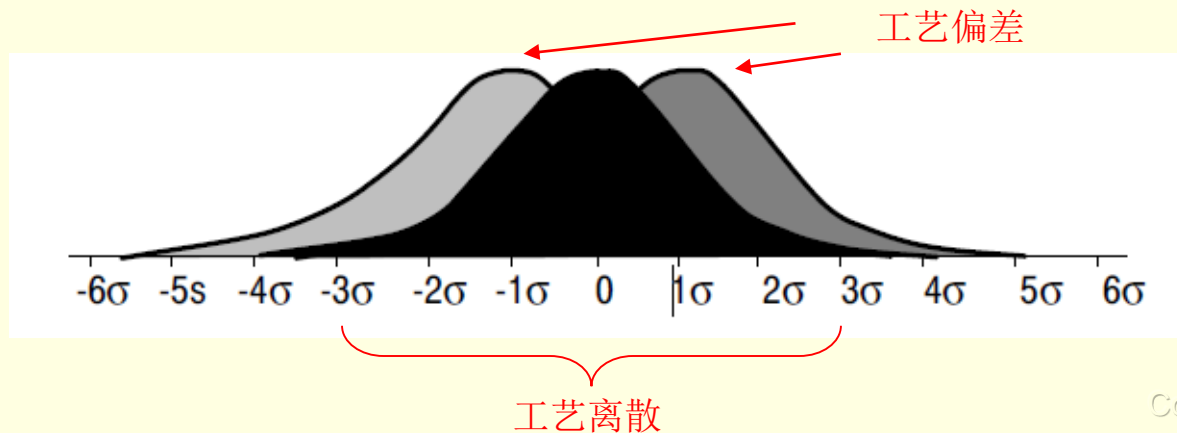
- 工艺准确度和工艺稳定性是决定产品成品率和可靠性的重要因素，可用统计工艺控制（SPC, Statistical Process Control）数据来定量表征

■ 合格率的表征参数

- 成品率(yield)：批产品中合格品所占百分比
- ppm (parts per million)：每一百万个产品中不合格品的数量，适合于批量大、质量稳定、成品率高的产品表征

■ 工艺偏移和离散的表征

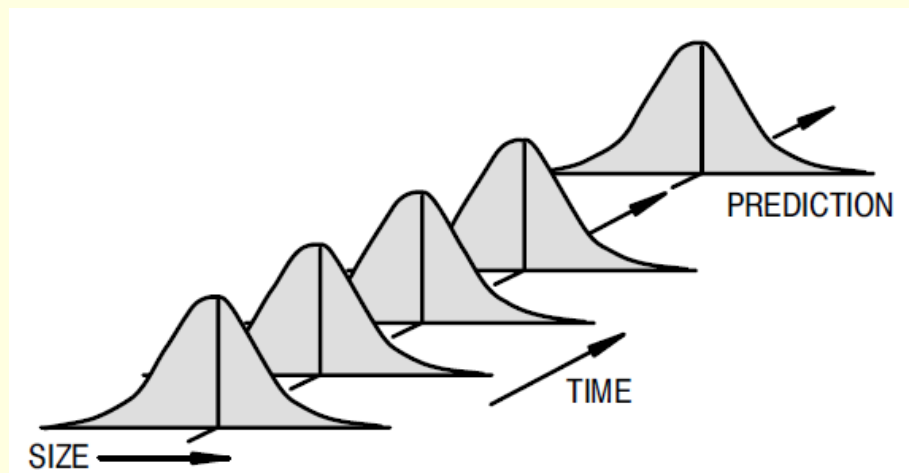
- 不合格品的产生主要来自元器件制造工艺不可避免地存在着的偏移和离散
- 工艺参数的分布通常满足正态分布（下图），其均值为 μ 、标准偏差为 σ



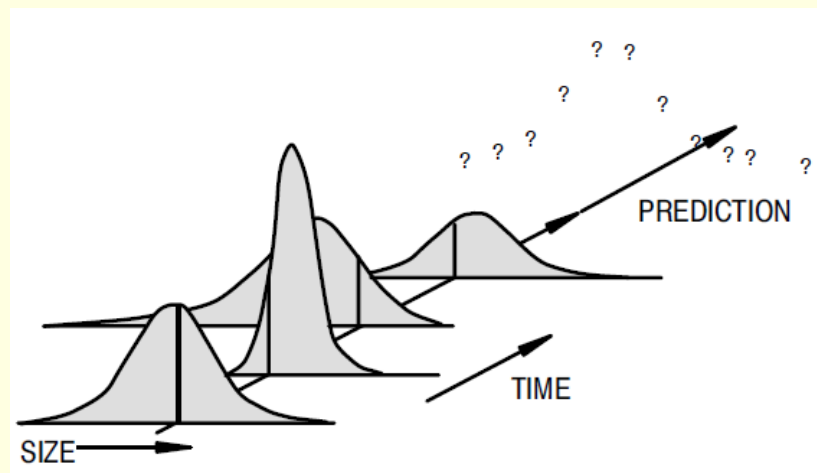
2.2.2 工艺考虑

SPC数据:工艺的可控性

工艺离散度	无工艺偏差 (K=0)			有工艺偏差 (K=1.5)		
	工艺成品率	不合格品率	C_p	工艺成品率	不合格品率	C_{pk}
$\pm 3\sigma$	99.73%	2700ppm	1	93.32%	66810ppm	0.5
$\pm 4\sigma$	99.9937%	63ppm		99.379%	6210ppm	
$\pm 5\sigma$	99.999943%	0.57ppm		99.9767%	223ppm	
$\pm 6\sigma$	99.9999998%	0.002ppm	2	99.99966%	3.4ppm	1.5



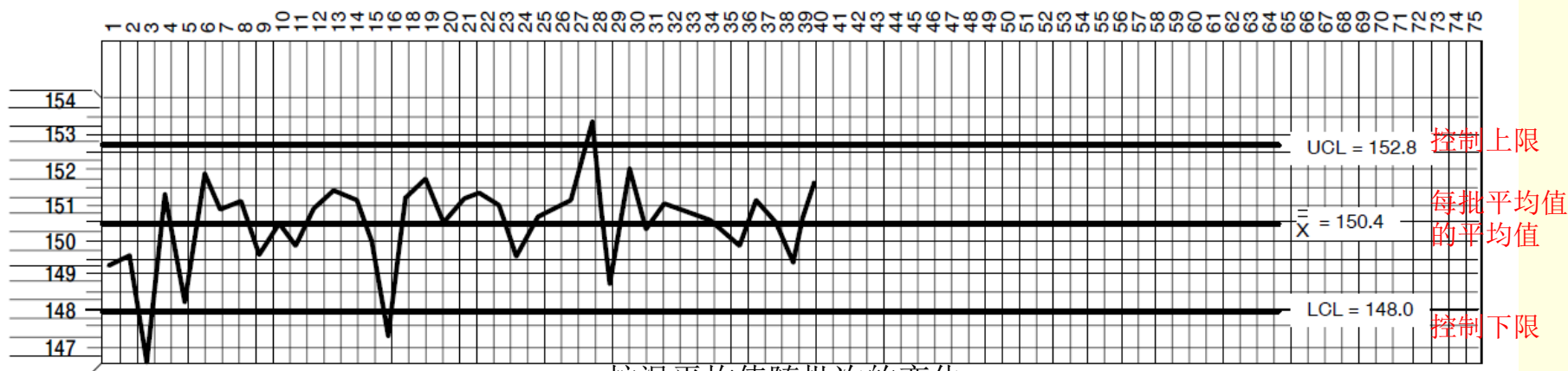
工艺参数随时间的离散和漂移在规定范围之内，工艺可控、可预测



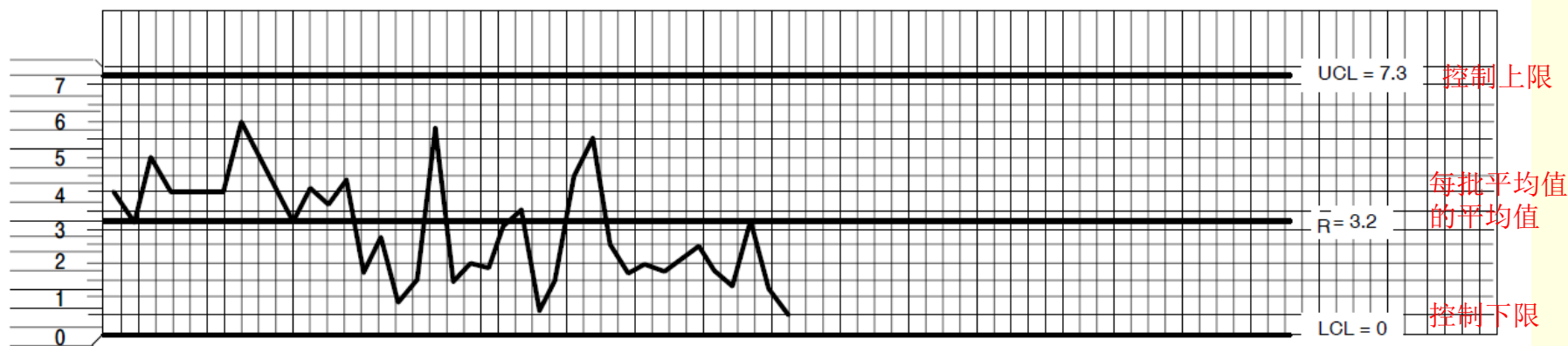
工艺参数随时间的离散和漂移超出规定范围，工艺不可控、不可预测

2.2.2 工艺考虑

SPC数据:工艺控制图



炉温平均值随批次的变化



炉温峰-峰值（最高值-最低值）的平均值随批次的变化

- 选择对工艺变化敏感且对产品性能敏感的工艺参数为关键工艺参数，无需对所有工艺参数进行监控
- 每批次关键工艺参数的变化图解化为工艺控制图（上图为IC工艺中炉温随批次的变化）

2.2.3 封装考虑

插孔安装

Through-hole Mounted



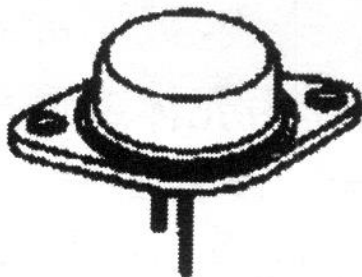
Surface Mounted



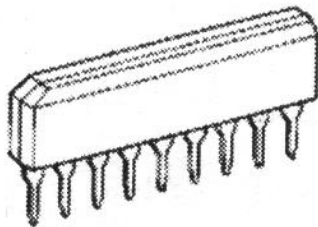
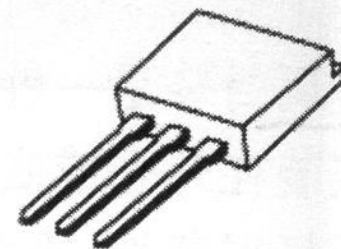
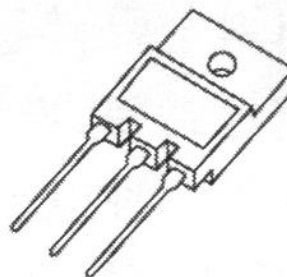
插孔安装 (TH) 和表面贴装 (SMT) 是目前元器件在 PCB 上的主要安装方式



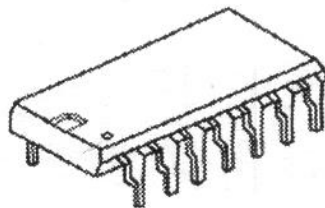
TO金属封装



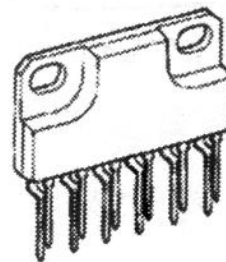
TO塑料封装



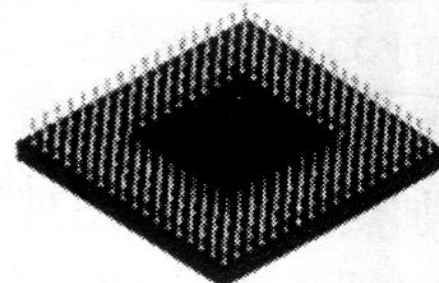
SIP (单列直插)



DIP (双列直插)



ZIP

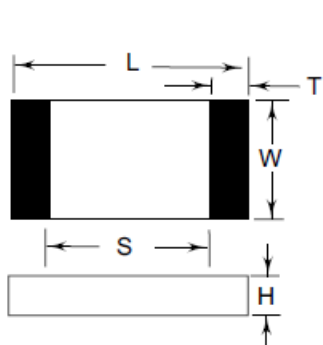
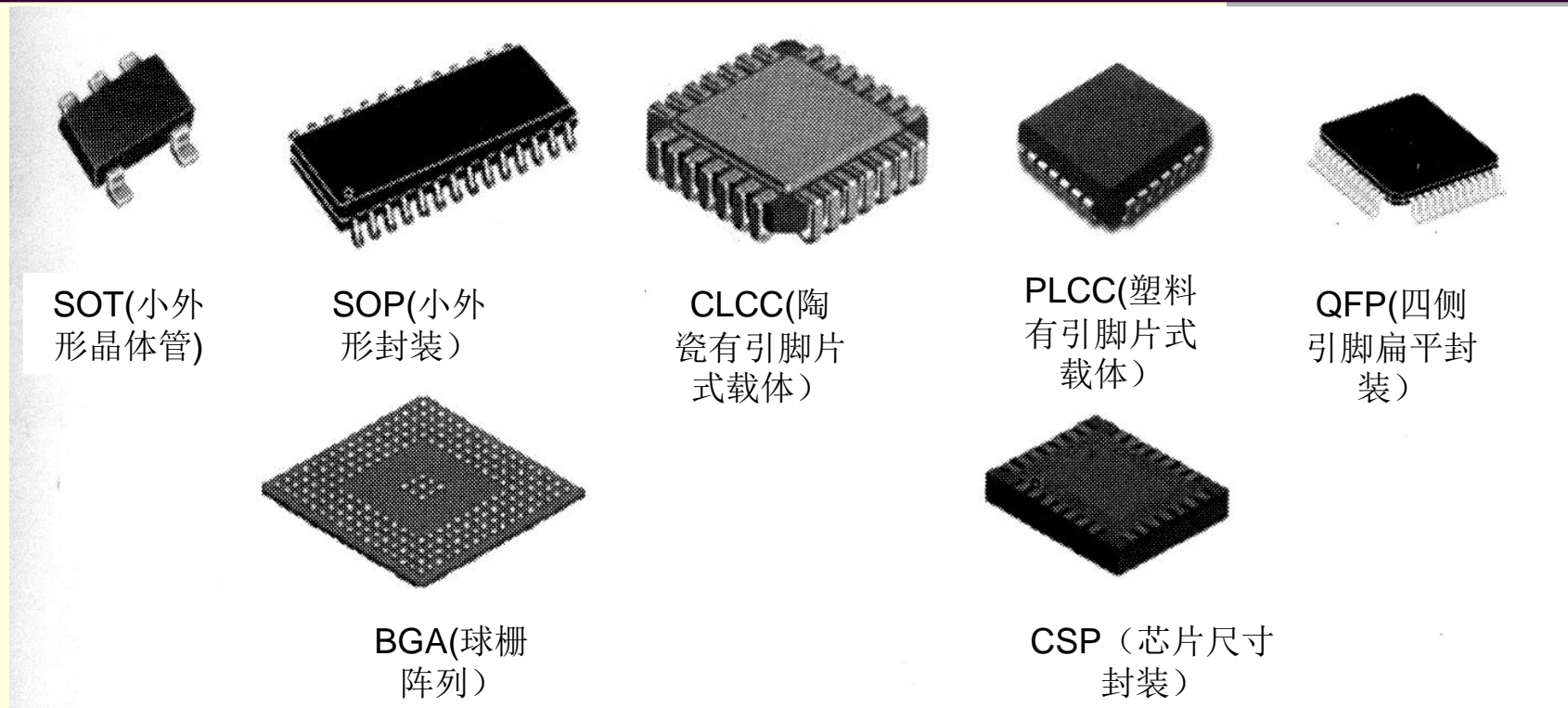


PGA(针栅阵列)

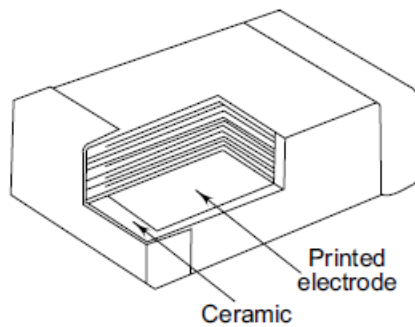
适用于插孔安装的半导体分立器件与集成电路的封装形式

2.2.3 封装考虑

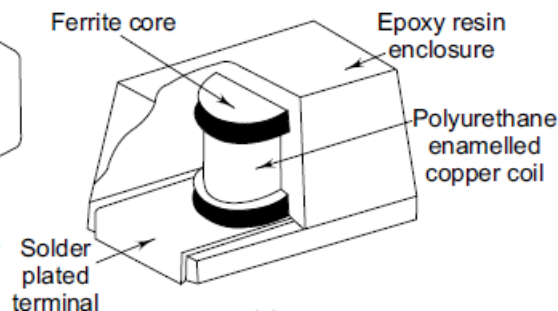
表面贴装



电阻器



陶瓷电容器



电感器

针对表面安装的半导体分立器件与集成电路的封装形式

针对表面安装无源元件的封装形式

2.2.3 封装考虑

管脚的寄生参数

■ 寄生参数典型值

- 有引脚元件：寄生电感 $1\text{nH}/\text{mm}/\text{引脚}$ （越短越好），寄生电容 $4\text{pF}/\text{引脚}$
- 无引脚元件：寄生电感 $0.5\text{nH}/\text{端口}$ ，寄生电容 $0.3\text{pF}/\text{端口}$

■ 不同封装形式寄生效应的比较（寄生参数由小到大）

- 无引脚贴装<表面贴装<放射状引脚<轴面平行引脚
- $\text{CSP}>\text{BGA}>\text{QFP}>\text{SMD}>\text{DIP}$

寄生电感

Package Size and Type	Lead-Length Inductance
14 pin DIP	2.0 – 10.2 nH
20 pin DIP	3.4 – 13.7 nH
40 pin DIP	4.4 – 21.7 nH
20 pin PLCC	3.5 – 6.3 nH
28 pin PLCC	3.7 – 7.8 nH
44 pin PLCC	4.3 – 6.1 nH
68 pin PLCC	5.3 – 8.9 nH
14 pin SOIC	2.6 – 3.6 nH
20 pin SOIC	4.9 – 8.5 nH
40 pin TAB	1.2 – 2.5 nH
624 pin CBGA	0.5 – 4.7 nH
Wire bonded to hybrid substrate	1 nH

表面
贴装



Good

DIP
封装



引线
插装

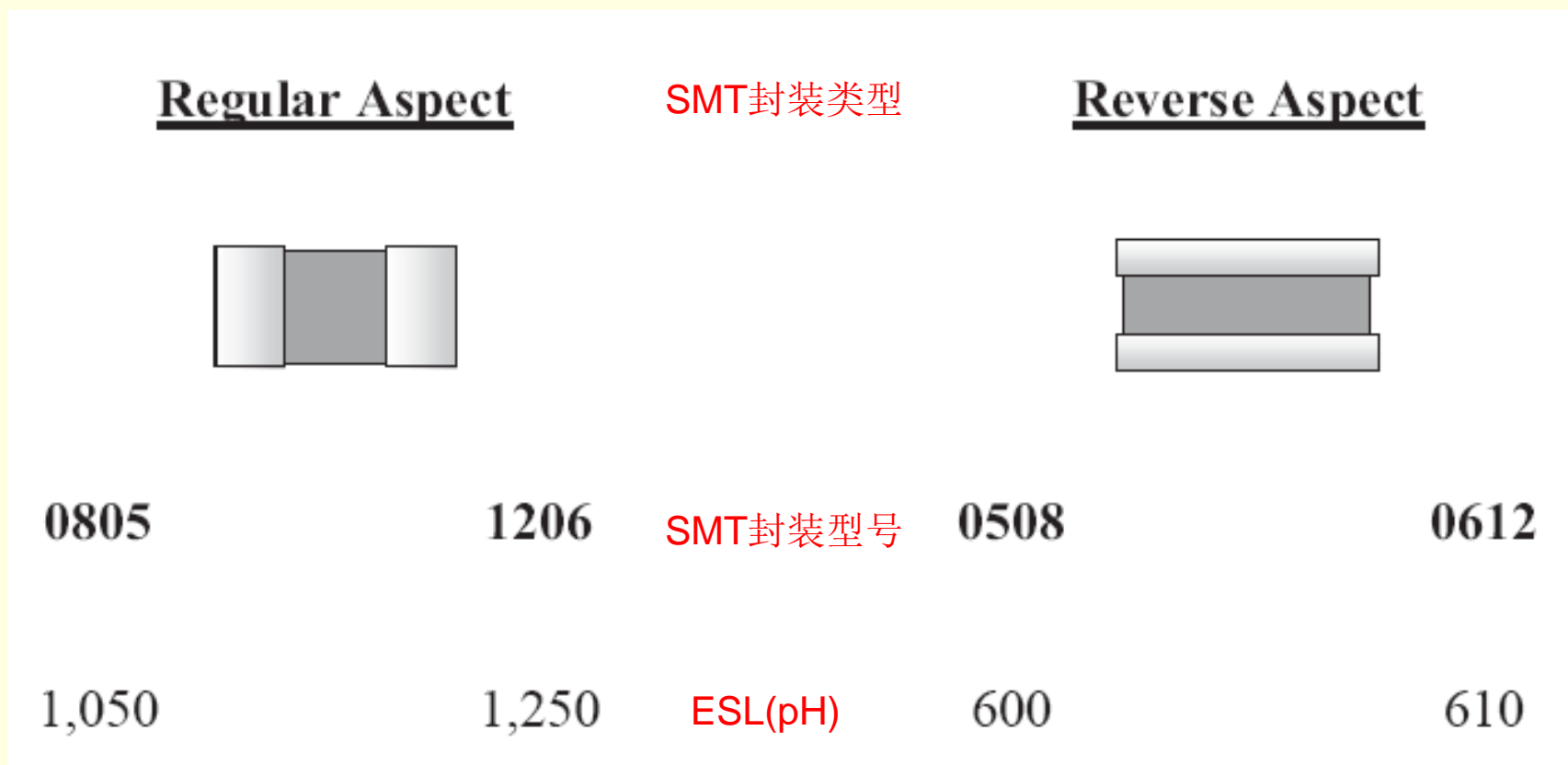


Poor

2.2.3 封装考虑

寄生参数与封装形式的关系

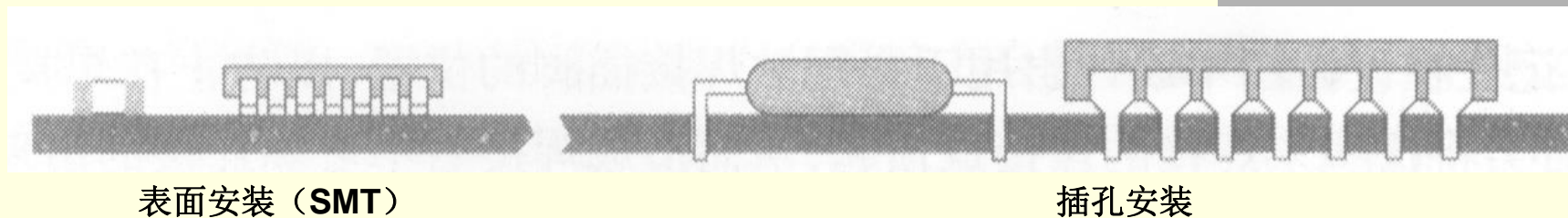
电容器的寄生电感还与电容器的封装形式有关。管脚宽长比越大，寄生电感越小



电容器的串联电感与封装形式的关系

2.2.3 封装考虑

SMT对可靠性的影响



■ 有利于可靠性

- 引线极短：降低了分布电感和电容，提高了抗干扰能力和电路速度
- 机械强度高：提高了电路抗振动和冲击的能力
- 装配一致性好：成品率高，参数离散性小

■ 不利于可靠性

- 材料不匹配性增加：某些陶瓷基材的SMT元件（如某些电阻器、电容器、无引线芯片载体LCC）与PCB基板环氧玻璃的热膨胀系数不匹配，引发热应力失效
- 较易污染：SMT元件与PCB板之间不易清洁，易驻留焊剂的污染物，需采用特殊的处理方法

表面贴装对可靠性是利远大于弊，目前已占了90%的比例

2.2.3 封装考虑

封装材料的比较

■ 塑料封装

- 优点：成本低（约为陶瓷封装的55%），重量轻（约为陶瓷封装的1/2），管脚数多，高频寄生效应弱，便于自动化生产
- 缺点：气密性差，吸潮，不易散热，易老化，对静电敏感
- 适用性：大多数半导体分立器件与集成电路常规产品

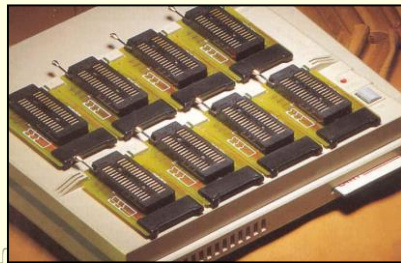
■ 陶瓷封装

- 优点：气密性好，散热能力强（热导率高），高频绝缘性能好，承受功率大，布线密度高
- 缺点：成本高
- 适用性：航空、航天、军事等高端市场

■ 金属封装

- 优点：气密性好，散热能力强，具有电磁屏蔽能力，可靠性高
- 缺点：成本高，管脚数有限
- 适用性：小规模高可靠器件

通常称塑封为非气密封装，陶瓷和金属为气密封装



2.2.3 封装考虑

引线及钝化材料的选择

■ 引线涂覆形式的选择

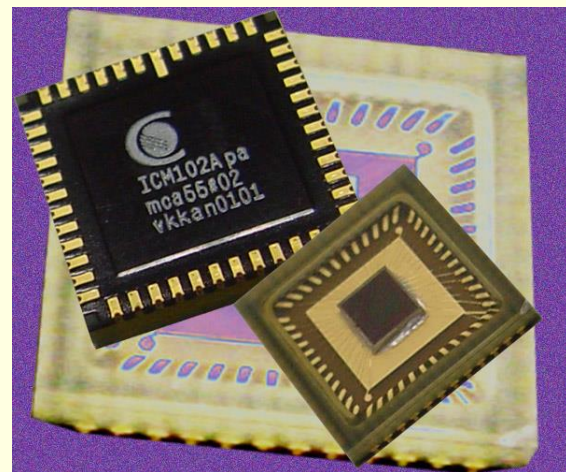
- 镀金：环境适应性好，易焊性佳，成本高
- 镀锡：易焊性好，环境适应性一般，成本中等
- 热焊料浸渍涂覆：质量最差

■ 内部钝化材料的选择

- 芯片表面涂覆有机涂层或有机薄膜：慎用
- 芯片表面淀积有无机材料薄膜：可用

■ 内部气氛

- 真空封装：抗辐照，对管壳密封性要求高
- 惰性气体封装：易形成污染及电离气体，有利于抵抗外界气氛侵入



2.3 电阻器的选用

2.3.1 概述

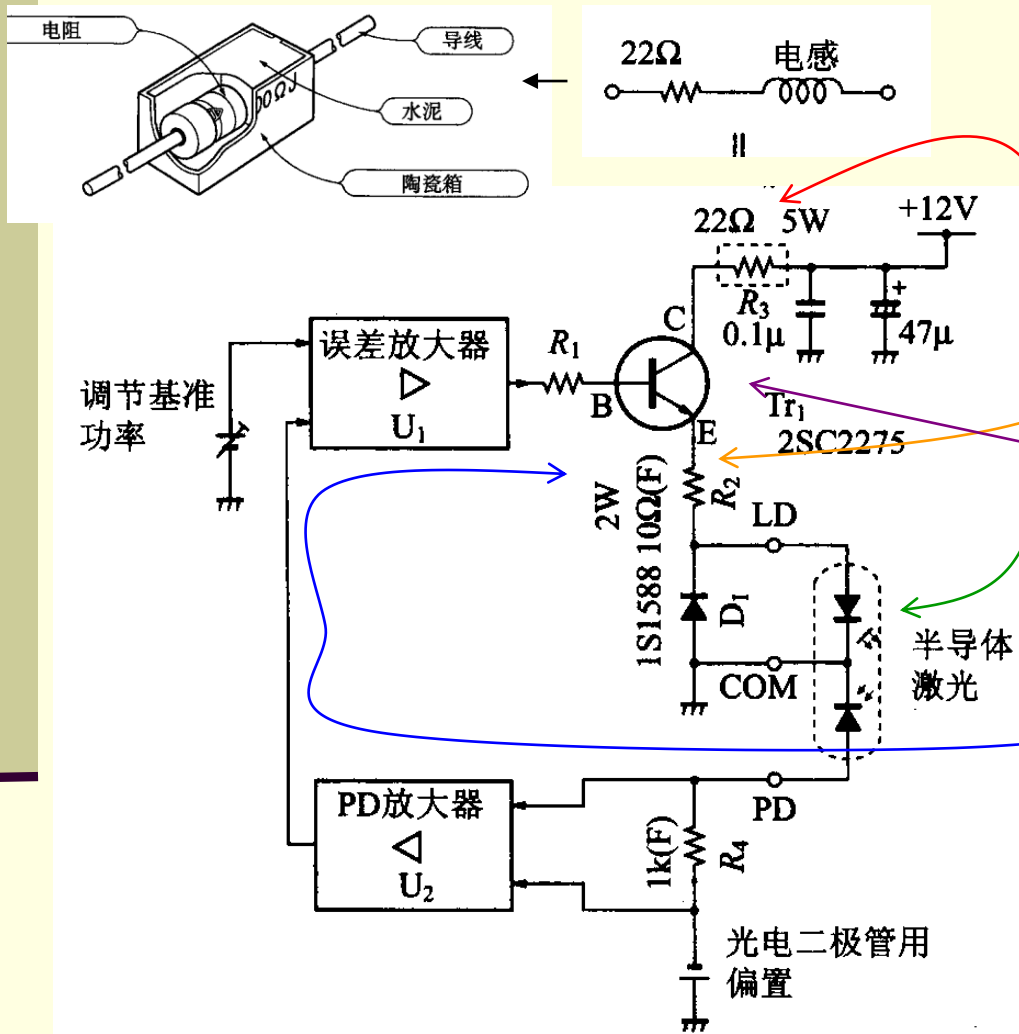
2.3.2 可靠性相关特性

2.3.3 固定电阻器的可靠性选用

2.3.4 可变电阻器的可靠性选用

2.3.1 概述

电阻器引发失效(续)



发现半导体激光器寿命缩短

观察到数MHz幅度很大的异常振荡

U₁之前的回路未发现此类振荡

振荡发生在 Tr_1 及其外围电路

将R₃由5W水泥电阻改为2W氧化金属膜电阻，振荡消失

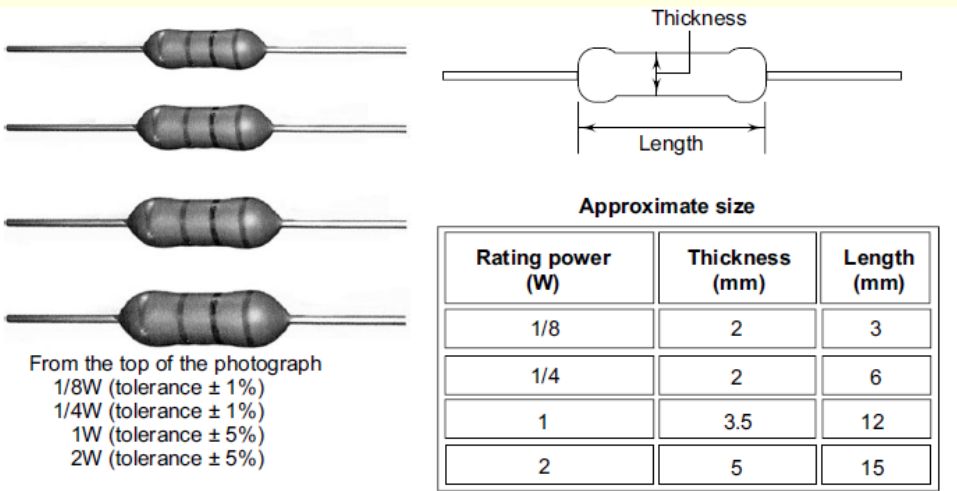
低阻值5W水泥电阻内部为线绕方式，具有较大的寄生电感

R_3 的寄生电感与 Tr_1 的寄生电容共同形成谐振产生电路

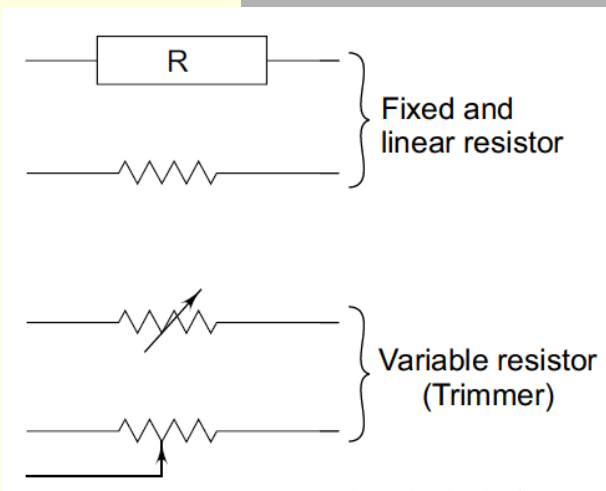
即使电阻是电路中最普通、最廉价的元器件，使用不当也会引起重大损失（比如此例中昂贵的半导体激光器的损坏）

2.3.1 概述

电阻器的表示方法



电阻额定功率与其尺寸的关系



电阻的电路符号



电阻阻值的色环表示法

- 电阻在电路中可以用矩形框和锯齿形两种方式表示，后者是早期因便于手写而形成的符号
- 电阻的额定功率与其尺寸有关，尺寸越大，额定功率越大
- 电阻的阻值可用数值或者色环表示。色环越多，表示电阻的精度越高（如5环的最高精度可达 $\pm 1\%$ ，4环的最高精度为 $\pm 5\%$ ，3环的精度不高于 $\pm 25\%$ ，6环还表示电阻的温度系数）

2.3.2 可靠性相关特性

温度系数

■ 温度系数的定义

- 每变化单位温度时阻值的变化比例
- 单位为ppm/°C ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 每摄氏度百万分之一)

■ 温度变化的来源

- 使用环境温度的变化
- 电阻耗散功率引起的自身散热过程

5(ppm/°C)	10	25	50	100	280	300	500	1000
								碳膜电阻
								氧化金属膜电阻
								厚膜金属膜电阻
								薄膜金属膜电阻
								绕线型电阻
								金属箔电阻

温度稳定性从优到劣的次序为金属箔>线绕>金属膜与金属氧化膜>碳膜>有机实芯

2.3.2 可靠性相关特性

额定功率

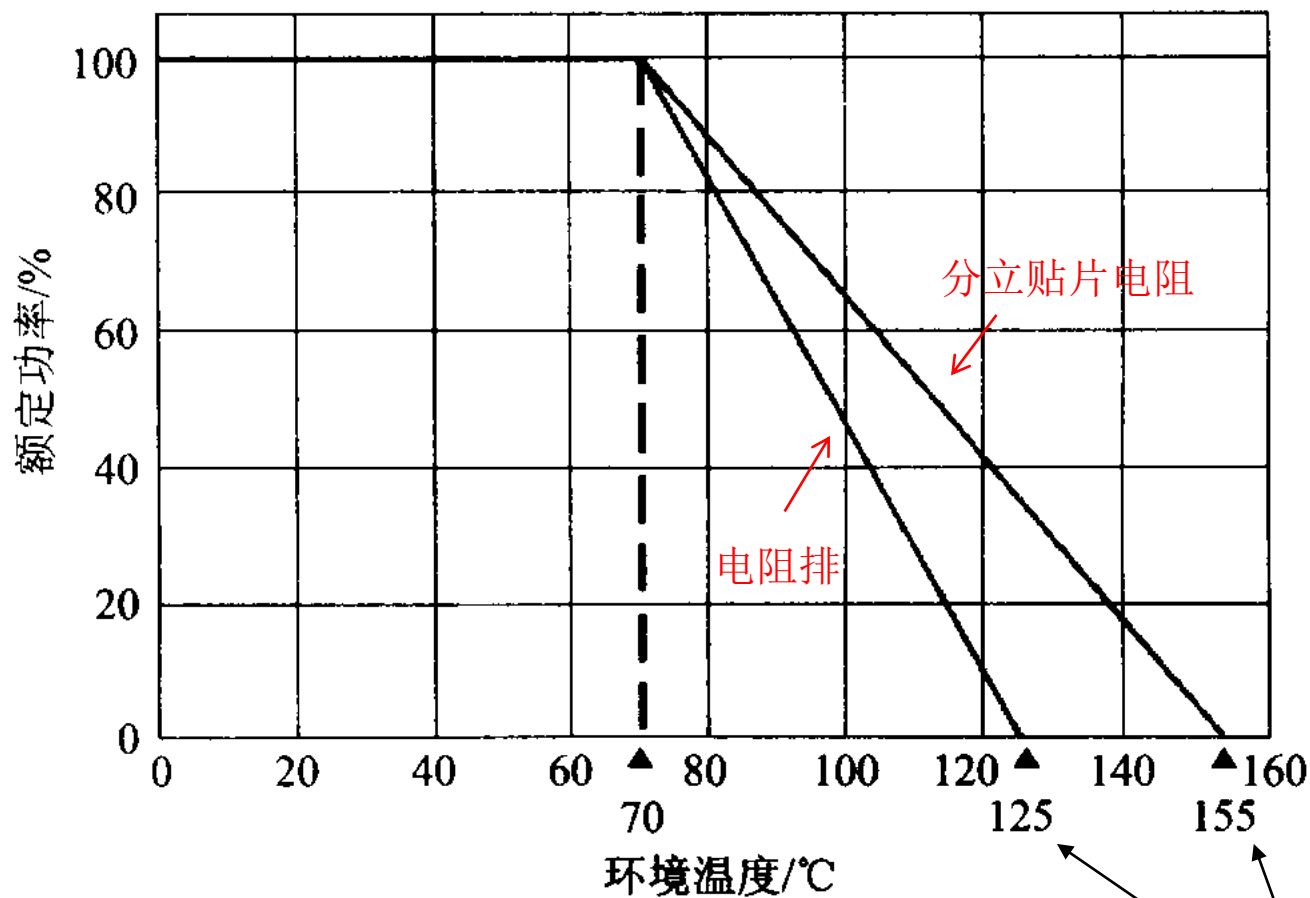
- 额定功率：电阻可连续承受的最大功率
- 常用电阻器的功率为0.25W~0.5W，现代数字电路使用的电阻器的功率多在1/8W

1/16	1/8	1/4	1/2	1	2	5	10	20	30	50	100(W)
碳膜电阻(简易绝缘涂层碳膜电阻)											
片状电阻											
厚膜金属膜电阻											
薄膜金属膜电阻											
绕线型电阻											
氧化金属膜电阻											
水泥电阻											
珐琅电阻											
金属铠装电阻											

常见电阻器的额定功率范围

2.3.2 可靠性相关特性

额定功率与环境温度的关系



- 电阻器的标称额定功率是指70℃及以下温度条件下的额定功率
- 电阻器的最高温度（称为热点温度）通常出现在该电阻的中部
- 分立电阻的最高温度为155℃，而电阻排为125℃

<70℃时额定功率与环境温度无关

>70℃时额定功率随环境温度的上升而线性下降

电阻工作时允许的最高环境温度

2.3.2 可靠性相关特性

额定电压

■ 额定电压

- 最高工作电压：电阻工作时能够承受的最大电压
- 最高负荷电压：在过负荷实验中**5s**内可能施加的电压最大值，亦称最高过载电压，通常为最高工作电压的**2倍**

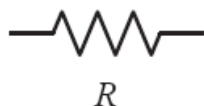
不同封装电阻的额定功率与额定电压示例

封装型号	额定功率/W	最大工作电压/V	最高负荷电压/V
0201	1/20	25	50
0402	1/16	50	100
0603	1/10	50	100
0805	1/8	150	200
1206	1/4	200	400
1210	1/2	200	400
	1/3	200	400
2010	3/4	200	400
2512	1	200	400

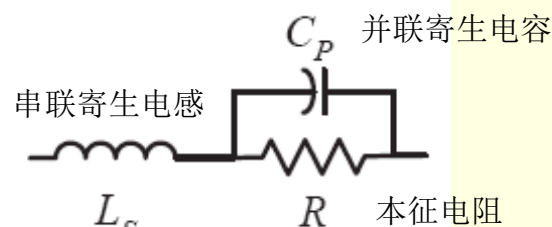
2.3.2 可靠性相关特性

高频寄生参数

低频模型

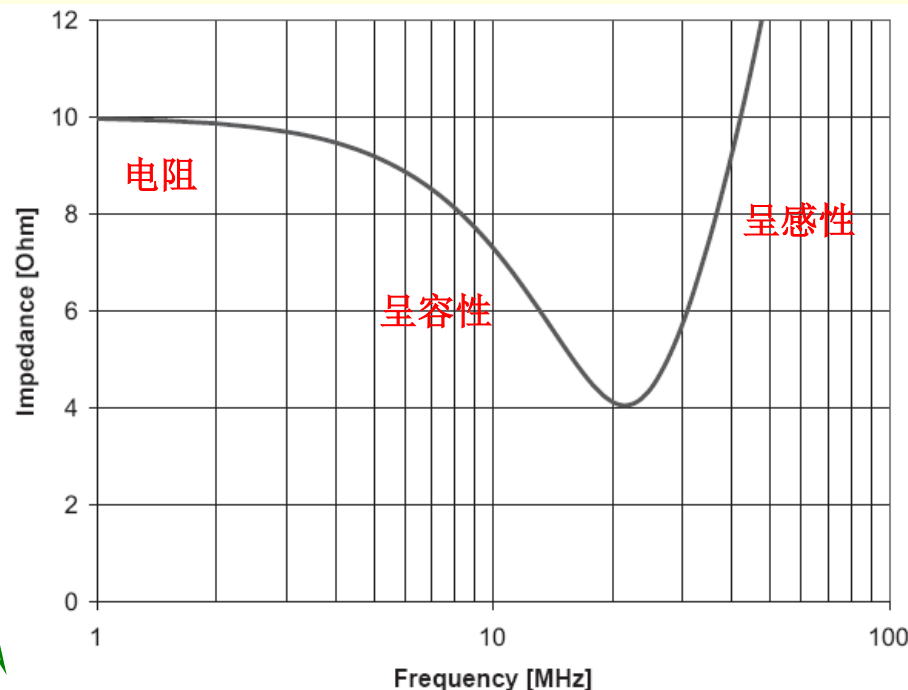


高频模型



电阻器阻抗
公式

$$Z_R = \frac{1}{j\omega C_P + \frac{1}{R}} + j\omega L_S$$



电阻器阻抗-频率特性 ($R=10\Omega$, $L_S=50\text{nH}$, $C_P=1\text{nF}$)

■ 高频寄生参数对电路的影响

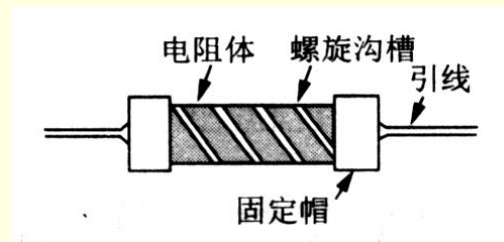
- 电磁兼容性：寄生电感可形成感应磁场，对周边形成干扰
- 高频特性：寄生电感和寄生电容会使电阻器的高频特性变坏（如线绕电阻只能用于低频，金属膜可用于数百MHz的高频电路）
- 浪涌特性：浪涌电流通过寄生电感会转化成浪涌电压，形成显著的交流压降

2.3.2 可靠性相关特性

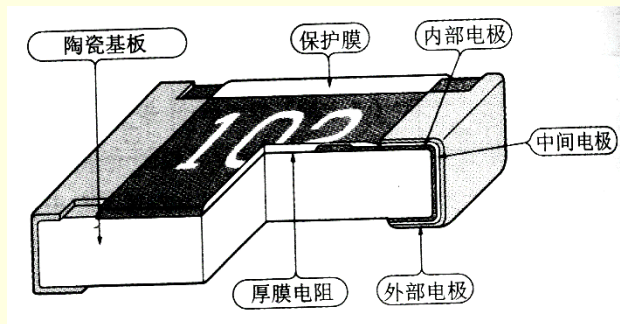
高频寄生参数(续)

■ 不同类型电阻的寄生效应比较（差→好）

- 线绕（存在线圈电感）>合成膜与有机实芯>金属膜与金属氧化膜>碳膜
- 轴向引线型（存在螺旋切割沟槽电感，典型值为 $C=0.1\sim 2\text{pF}$ ， $L=0.1\mu\text{H}$ ，不宜用于 100MHz 以上）>片状（无引线，外形小，最高可用至 1GHz ）
- 高阻值（圈数或槽数多）>低阻值（圈数或槽数少）
- 长引线>短引线>无引线
- 外形尺寸大、功率大>外形尺寸小、功率小



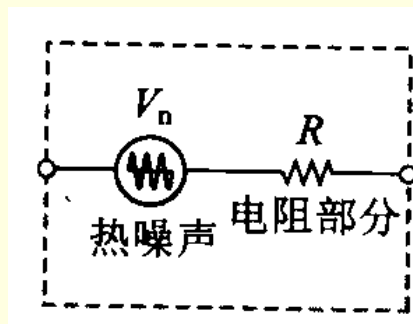
轴向引线型膜电阻（碳膜、金属膜）通过在电阻层上切开螺旋形的沟槽来调整电阻的大小，因此而引入了较大的寄生电感



片状电阻将电阻浆料通过厚膜或者薄膜的方法印制在陶瓷基板上，通过激光修正调整电阻阻值，寄生电感较小

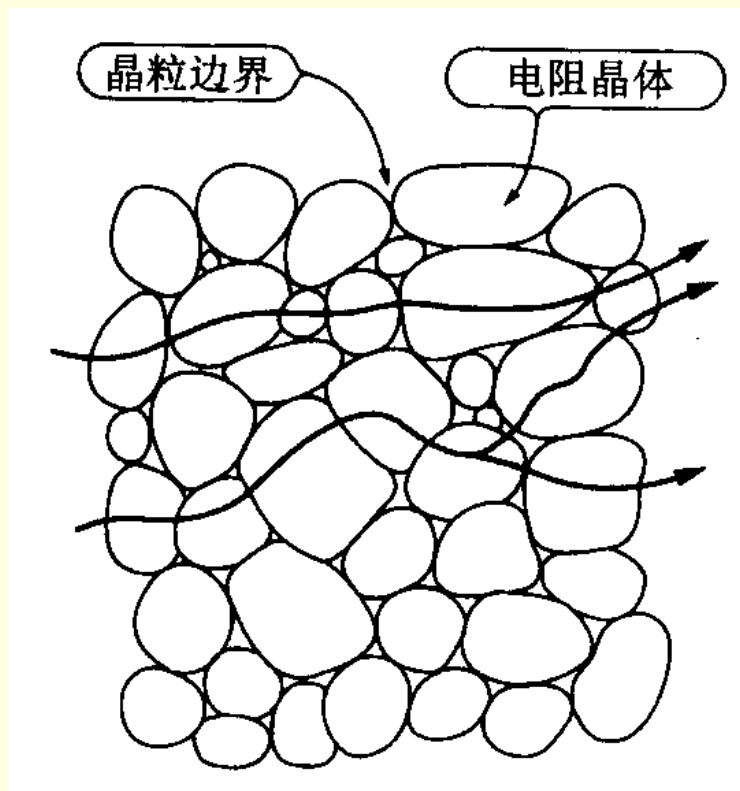
2.3.2 可靠性相关特性

固有噪声



热噪声

$$V_n = 2\sqrt{kTR\Delta f}$$



过剩噪声

来自电阻内部的不连续性

- 碳膜电阻内部结构不连续性强，是固有噪声最大的电阻
- 线绕电阻内部为体金属，不连续性很小，是固有噪声最小的电阻
- 金属膜电阻的固有噪声介于碳膜电阻和线绕电阻之间
- 100kΩ、27℃、5kHz带宽的电阻器噪声电压的典型值为8.3μV

固有噪声大的电阻不宜用于微弱信号放大、高增益精密等电路中

2.3.3 固定电阻选用

选用指南(续)

以下的比较次序为：优→劣

■ 阻值稳定性

- 直流负荷：线绕→碳膜→金属膜→金属氧化膜→合成膜→合成实芯
- 交流负荷：线绕→金属氧化膜→金属膜→碳膜→合成膜→合成实芯

■ 工作频率

- 碳膜→金属氧化膜→金属膜→合成膜→合成实芯→线绕

■ 承受脉冲功率能力

- 线绕→碳膜→金属膜→金属氧化膜→合成实芯→合成膜

■ R-V非线性

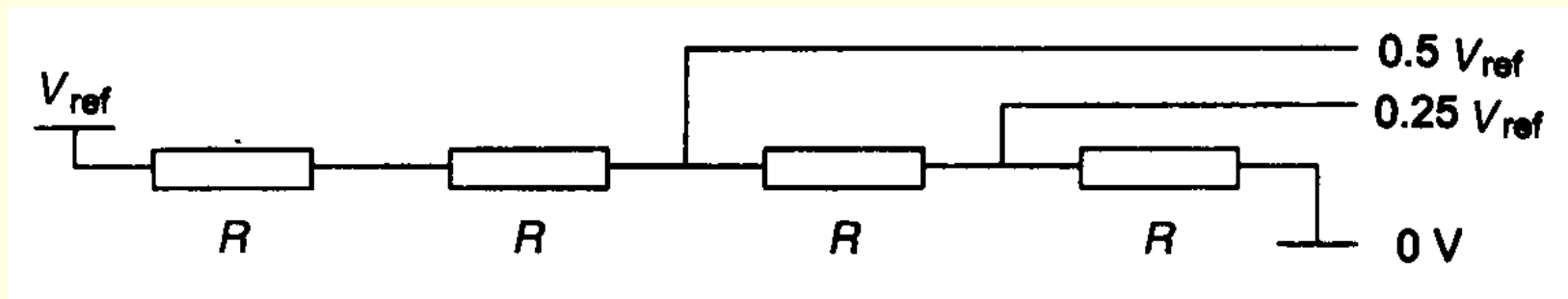
- 线绕→金属膜→金属氧化膜→碳膜→玻璃釉→合成实芯→合成膜

■ 固有噪声

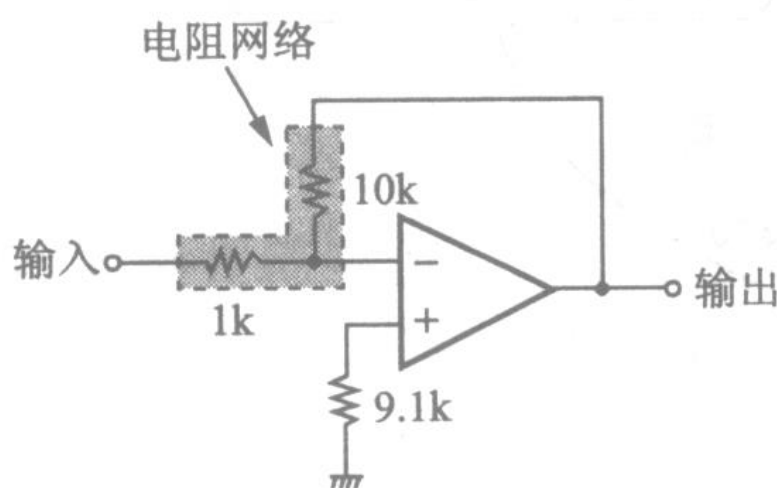
- 线绕→金属氧化膜→金属膜→碳膜→玻璃釉→合成膜→合成实芯

2.3.3 固定电阻选用

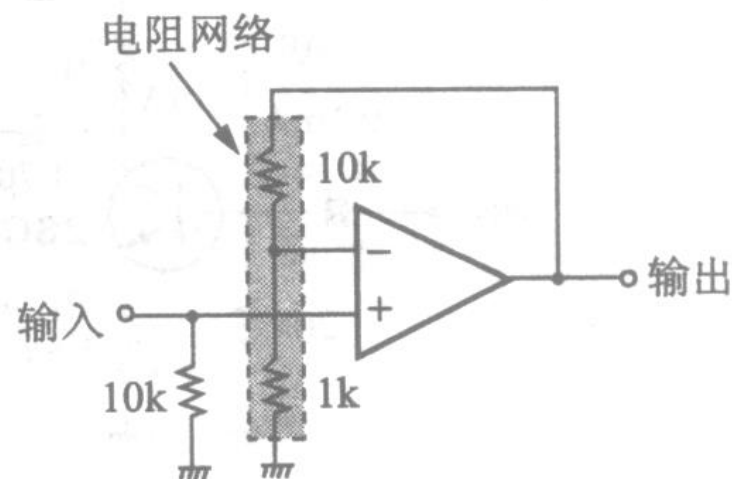
精确电路的电阻选用：场合



分压器：精确的电阻比决定了精确的输出分压比



(a) 反相放大器



(b) 同相放大器

比例放大器：精确的电阻比决定了精确的放大器增益

2.3.3 固定电阻选用

精确电路电阻选用:温度漂移影响

应考虑电阻容差和
温度系数的影响

型号: LM385-1.2

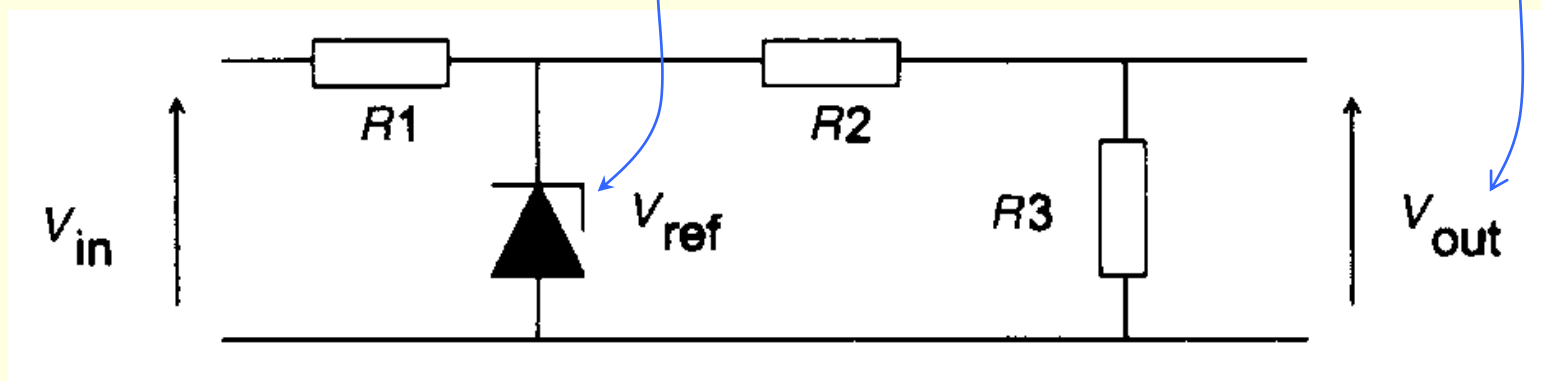
额定电压: $1.235\text{V} \pm 1\%$

温度系数: $20\text{ppm}/^\circ\text{C}$

要求

输出电压: $1.00\text{V} \pm 1.5\%$

温度系数: $30\text{ppm}/^\circ\text{C}$



基准电压分压电路

若取 $R_3 = 10\text{k}\Omega$, 则 $R_2 = 2.35\text{k}\Omega$

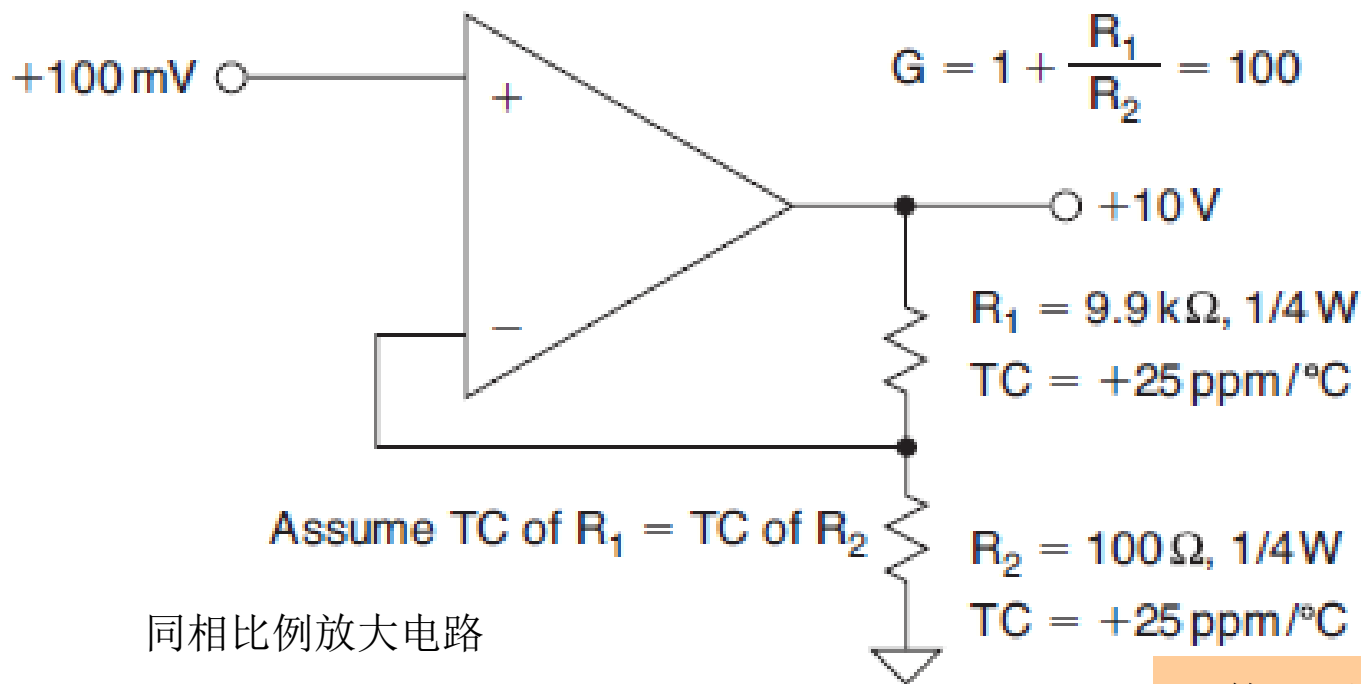
假定为最坏情况 (V_{ref} 高, R_2 低, R_3 高; V_{ref} 低, R_2 高, R_3 低), 且 R_2 、 R_3 的容差相同则

R_2 、 R_3 的容差应优于 1.4%
 R_2 、 R_3 的温度系数应优于 $26\text{ppm}/^\circ\text{C}$

} 可选容差 1% 、温度系数 $25\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 的金属膜电阻

2.3.3 固定电阻选用

精确电路电阻选用:功耗的影响



应考虑不同电阻功耗不同对其阻值的影响

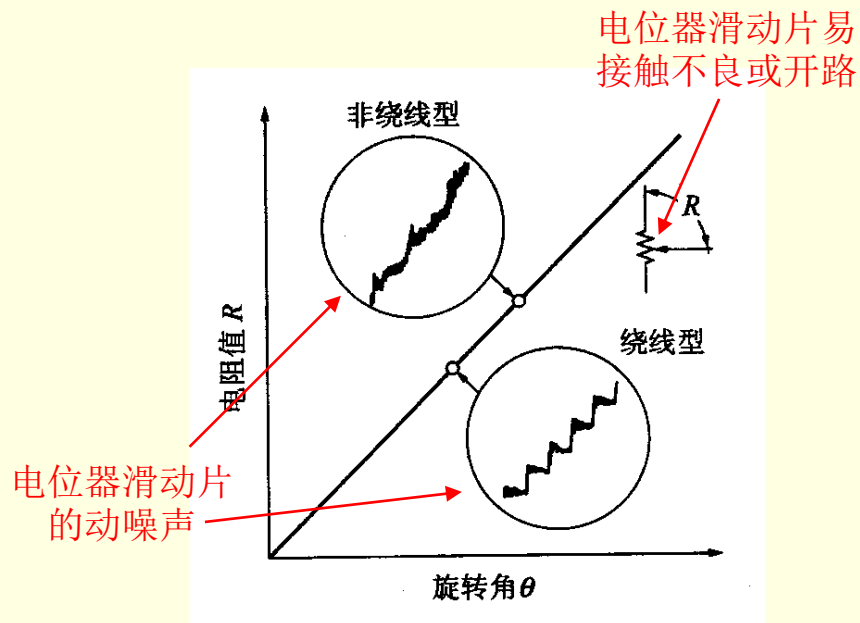
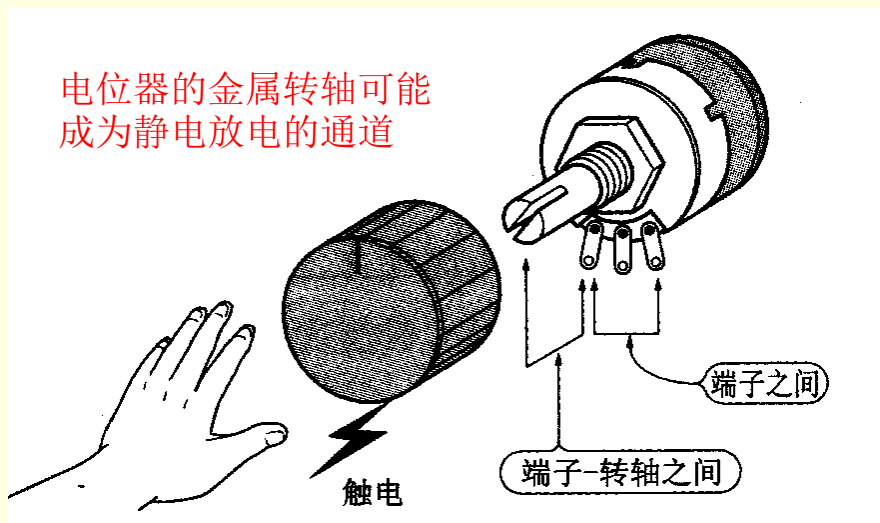
- R_1, R_2 Thermal resistance = $125^\circ\text{C}/\text{W}$.
- Temperature of R_1 will rise by 1.24°C , $P_D = 9.9 \text{ mW}$
- Temperature rise of R_2 is negligible, $P_D = 0.1 \text{ mW}$.
- Gain is altered by 31 ppm, or 1/2 LSB @ 14 bits.

即使 R_1 和 R_2 具有相同的温度系数（TC）和热阻，但因功耗不同，也会导致温升不同
→阻值不同→增益发生14bit的变化，这对于16bit的电路是致命的！

2.3.4 可变电阻选用

电位器的可靠性问题

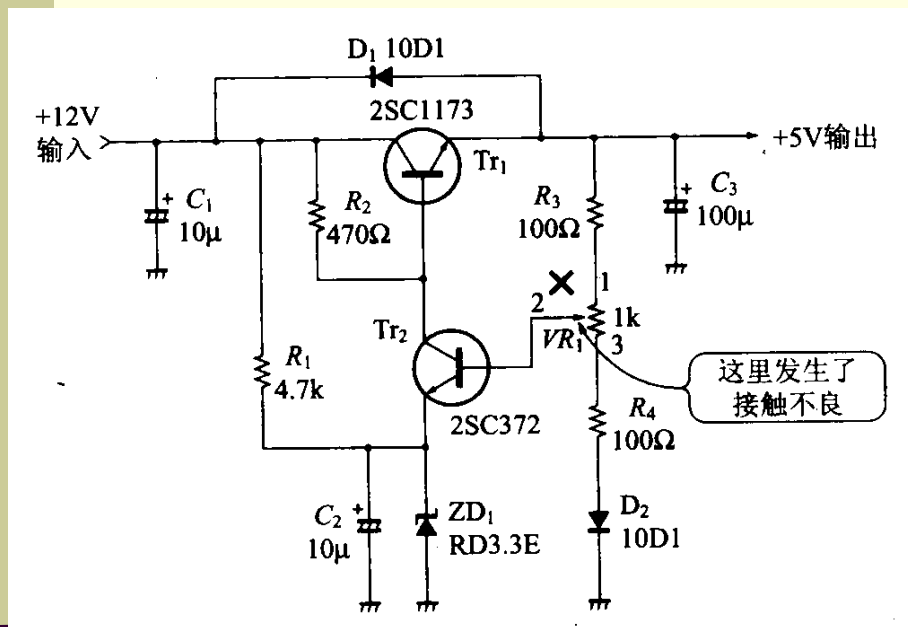
- 独有的失效模式：滑动电极因摩擦、氧化、污染、机械振动或者电化学腐蚀等原因，导致接触不良或开路
- 旋转寿命有限：电位器一般为数百次至数十万次，半固定电阻器为数次至数百次，因为所用电阻材料的耐磨性有限
- 具有动噪声：除了电阻本身的热噪声和过剩噪声之外，具有显著的滑动片动噪声
- 四极元件：额定电压除了要考虑端子之间的耐压外，还要考虑端子和金属转轴之间的耐压



2.3.4 可变电阻选用

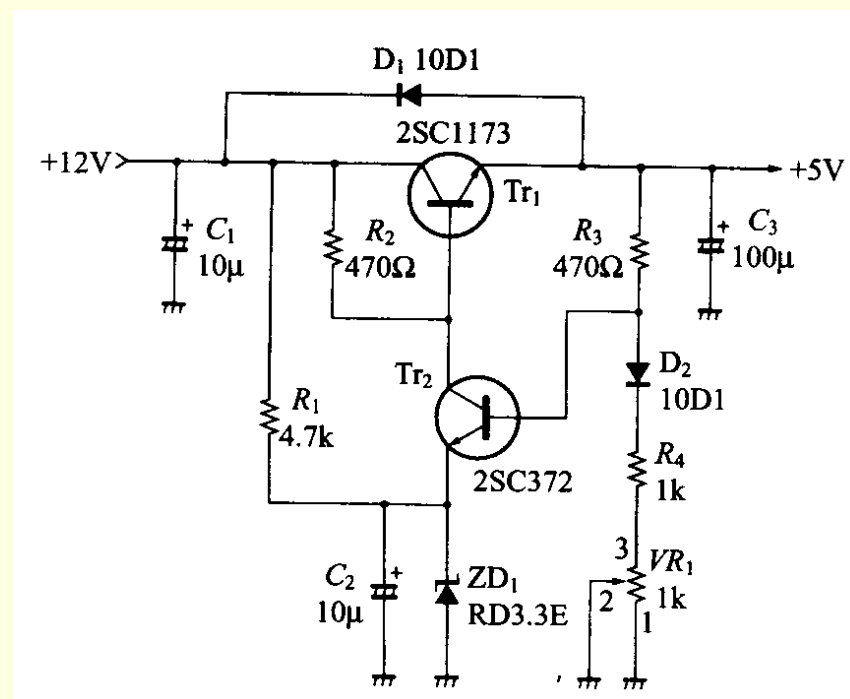
滑动点开路→电路故障

要考虑滑动点开路是否会导致电路故障甚至器件损坏



电阻比方式 可变电阻器滑动点接触不良→输出电压从+5V上升到近+12V→有可能导致低耐压的负载电路（如耐压仅为7V的TTL电路）损坏

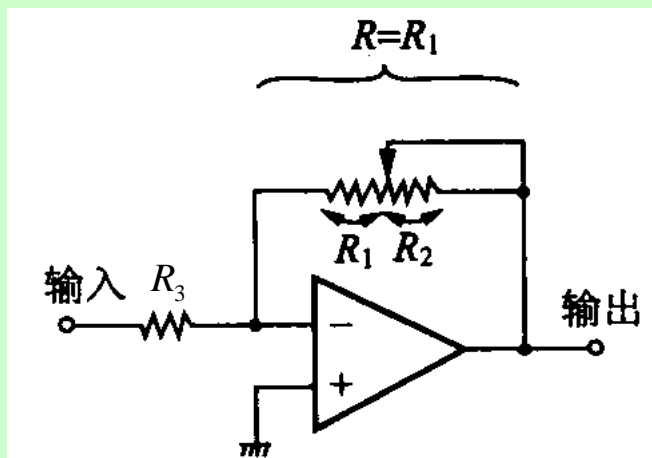
绝对值方式 将电阻调整方式由电阻比方式改为绝对值方式，使问题得以解决



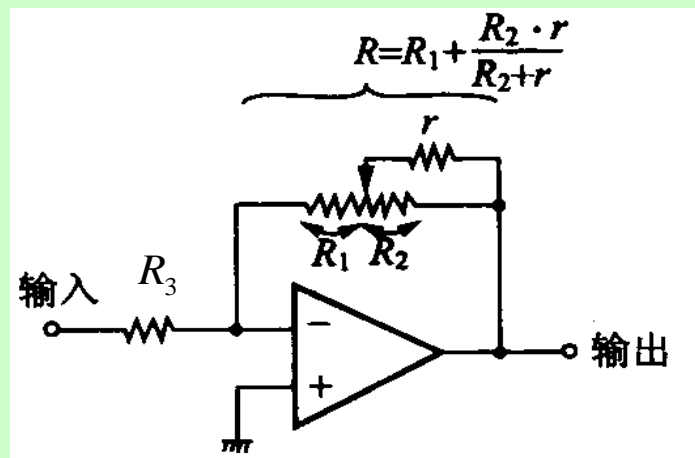
2.3.4 可变电阻选用

滑动点接触电阻→性能变化

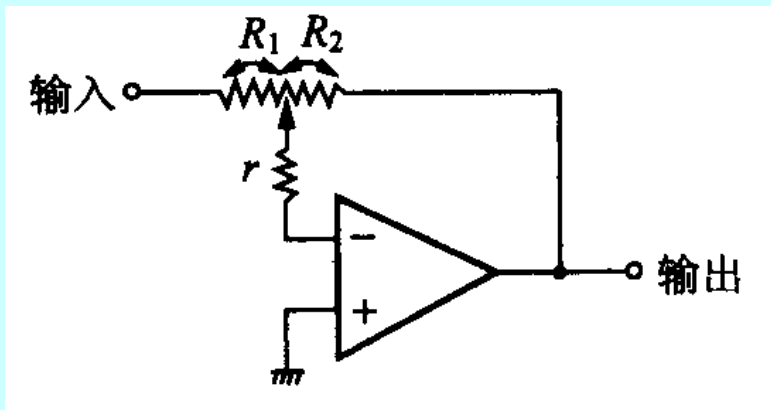
应注意滑动点存在的接触电阻是否会导致电路性能不期望的变化



理想情形：由 R/R_3 决定放大器增益，可变电阻器的滑动片接触电阻 $r=0$



实际情形：由 R/R_3 决定放大器增益，可变电阻器的滑动片接触电阻 $r>0$ 影响增益

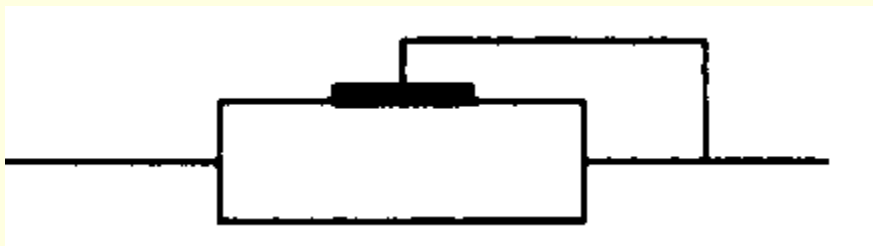


改进情形：由 R_2/R_1 决定放大器增益，可变电阻器的滑动片接触电阻 $r>0$ 但不影响增益

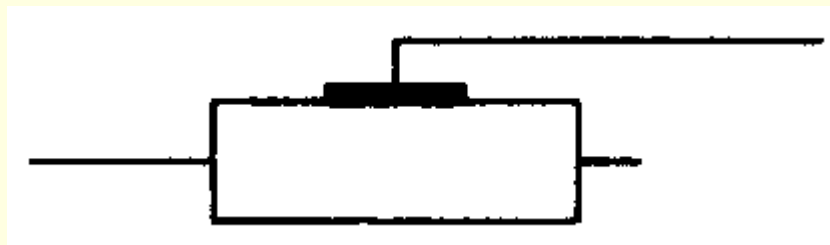
2.3.4 可变电阻选用

延长弧刷的寿命

作为可变电阻用时，电位器的滑动点要与一端短接，使得流过滑动点（弧刷）的直流电流尽可能地少，从而延长弧刷的寿命



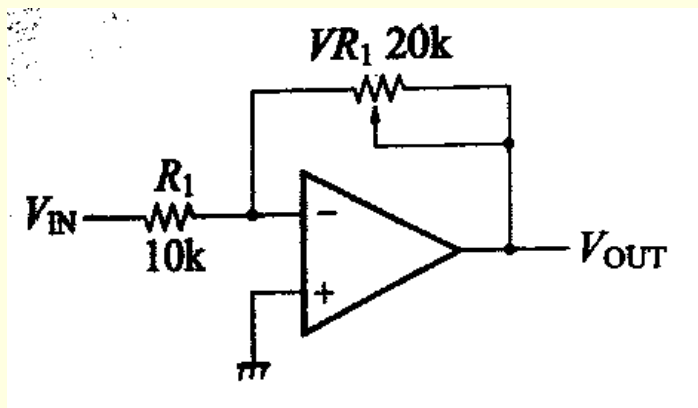
正确



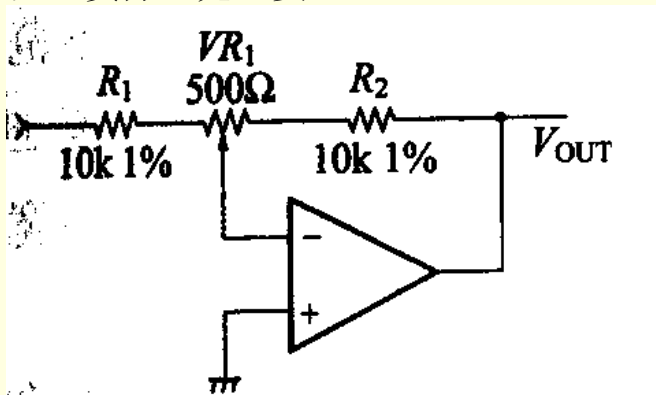
错误

2.3.4 可变电阻选用

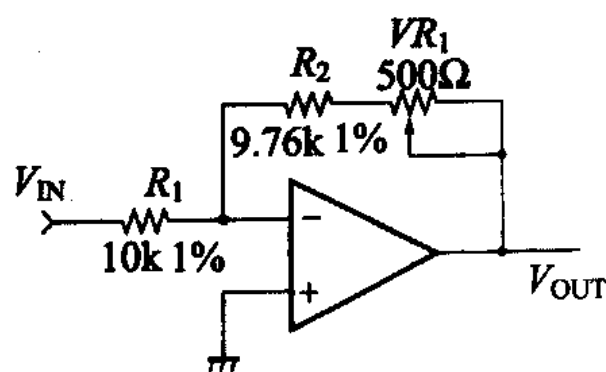
尽量减少阻值调整范围



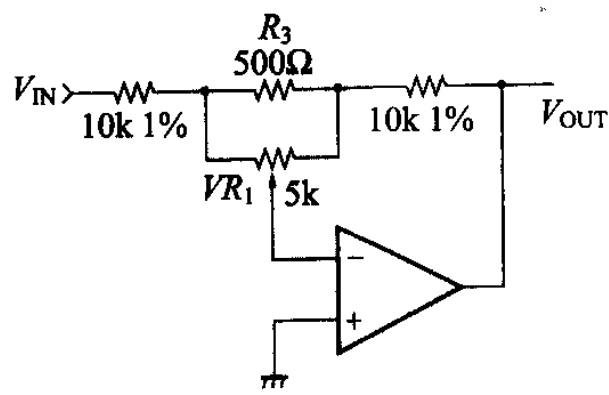
反相放大器的增益可以在0~200%之间调整，实际上无必要



与右上图调整范围相同，但滑动点接触电阻的影响减弱（如前述）



调整范围缩小到97.6%~102.6%，调整范围只有±2.5%，但已可满足通常的应用



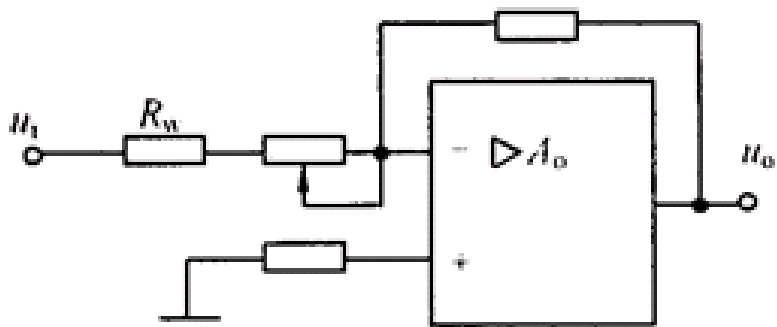
与右上图调整范围相同，但电位器容差的影响减弱（即使电位器有10%的容差，对电路的影响也只有1%）

在振动环境或者温度变化剧烈的环境中，电位器的阻值变化可能非常显著，因此尽量不要使用电位器。如必须使用，也应尽量减少阻值变化对电路的影响。

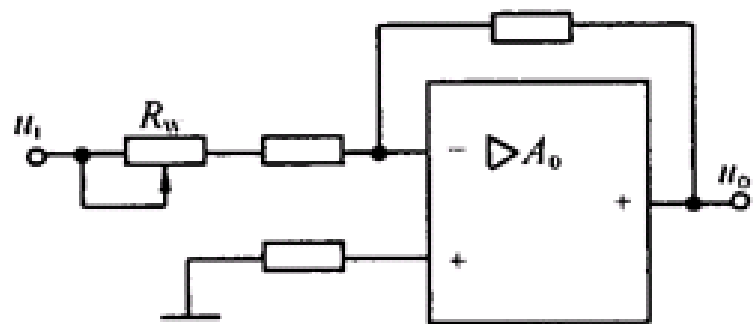
2.3.4 可变电阻选用

降低动噪声的影响

- 尽可能将电位器用在大信号一侧
- 尽可能将电位器的滑动节点远离输入端



(c) 合理用法



(d) 不合理用法

2.4 电容器的选用

2.4.1 概述

2.4.2 可靠性相关特性

2.4.3 非电解电容器的选用

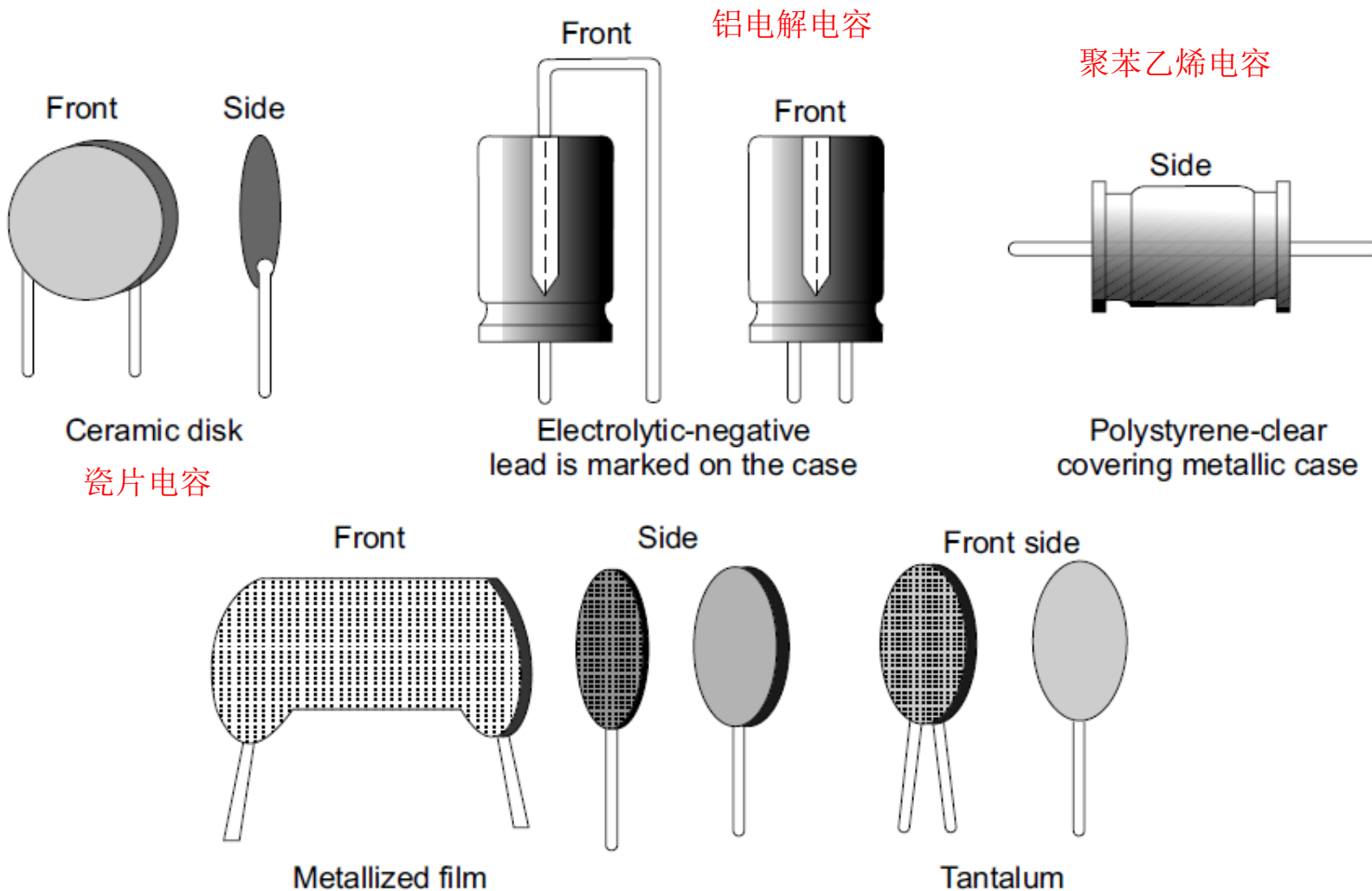
2.4.4 电解电容器的选用

2.4.5 综合应用



2.4.1 概述

常见电容器的外形



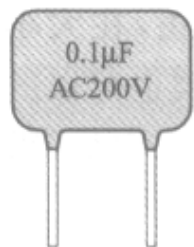
2.4.1 概述

电容器与电阻器的不同

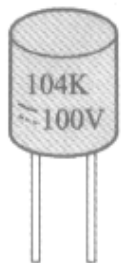
- 电容器的种类远比电阻器多
- 电容器容量的容差比电阻器阻值的容差大，通用电容一般为 $\pm 5\% \sim \pm 20\%$ ，高容量的电解电容器或者高介电常数的陶瓷电容器可达 $-20\% \sim +80\%$ ，但多数应用场合对电容精度的要求低于电阻
- 电容器的温度系数通常高于电阻器的温度系数
- 电容器的容量有可能随工作频率、工作电压而变化
- 有的电容器（如电解电容器）与二极管一样具有极性，不能反接
- 在直流和交流工作状态下的额定电压不同，通常后者低于前者

2.4.2 可靠性相关特性

额定电压



AC表示



DC表示

DC 额定电压	AC 额定电压
16V	12V
25V	20V
50V	40V
100V	75V
200V	100V
250V	150V
400V	200V
630(600 V)	250V
1000V	400V
2000V	500V

有效值(50/60Hz)

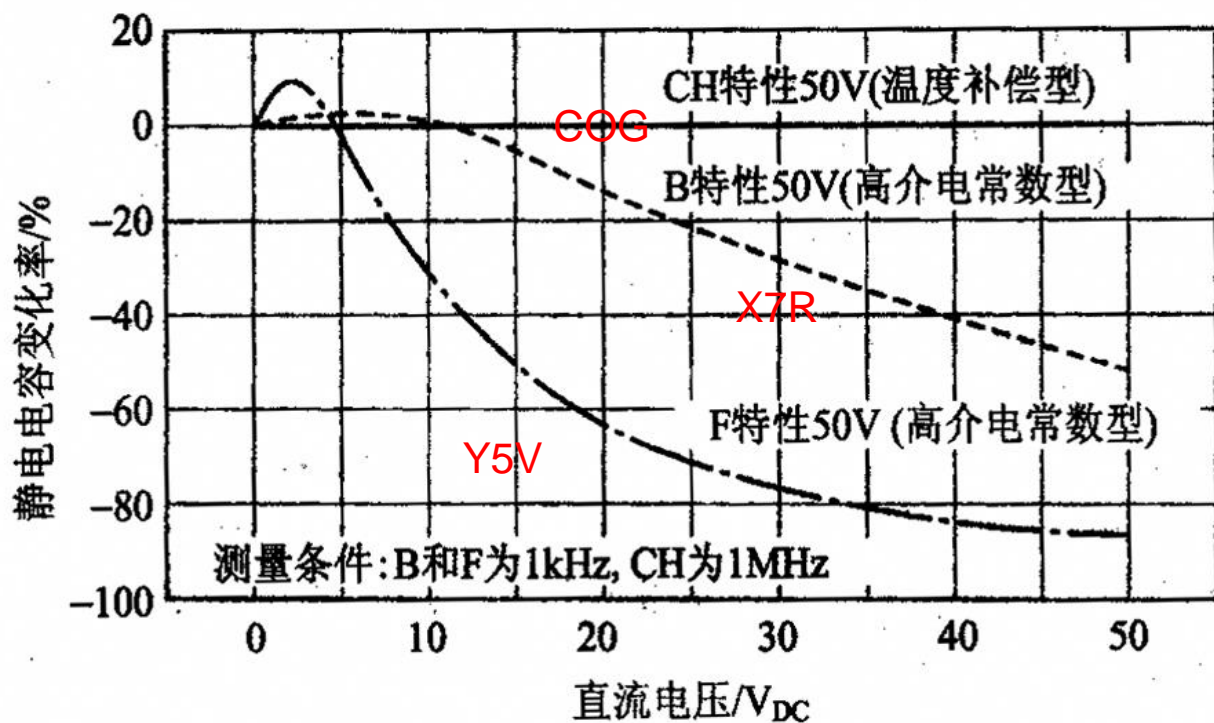
通常电容器的交流耐压低于直流耐压

- 额定电压是指在额定温度与最小工作温度之间的任一温度下，可连续施加在电容器上的最大直流电压，或者最大交流电压的有效值，或者浪涌脉冲电压的峰值
- 额定交流电压<额定直流电压<能耐受的瞬态浪涌电压（通常是直流耐压的**2.5**倍以上）
- 引起电容器永久性损坏电压称为击穿电压。击穿电压通常是额定电压的**2**倍左右

2.4.2 可靠性相关特性

容量稳定性

- 电容器的容量会随工作电压、温度、频率和老化时间而变化，其变化程度比电阻器更剧烈，而且不同类型的电容器可能表现出完全不同的变化幅度和变化规律
- 电容器的标称容量通常是在25℃下测量的容值

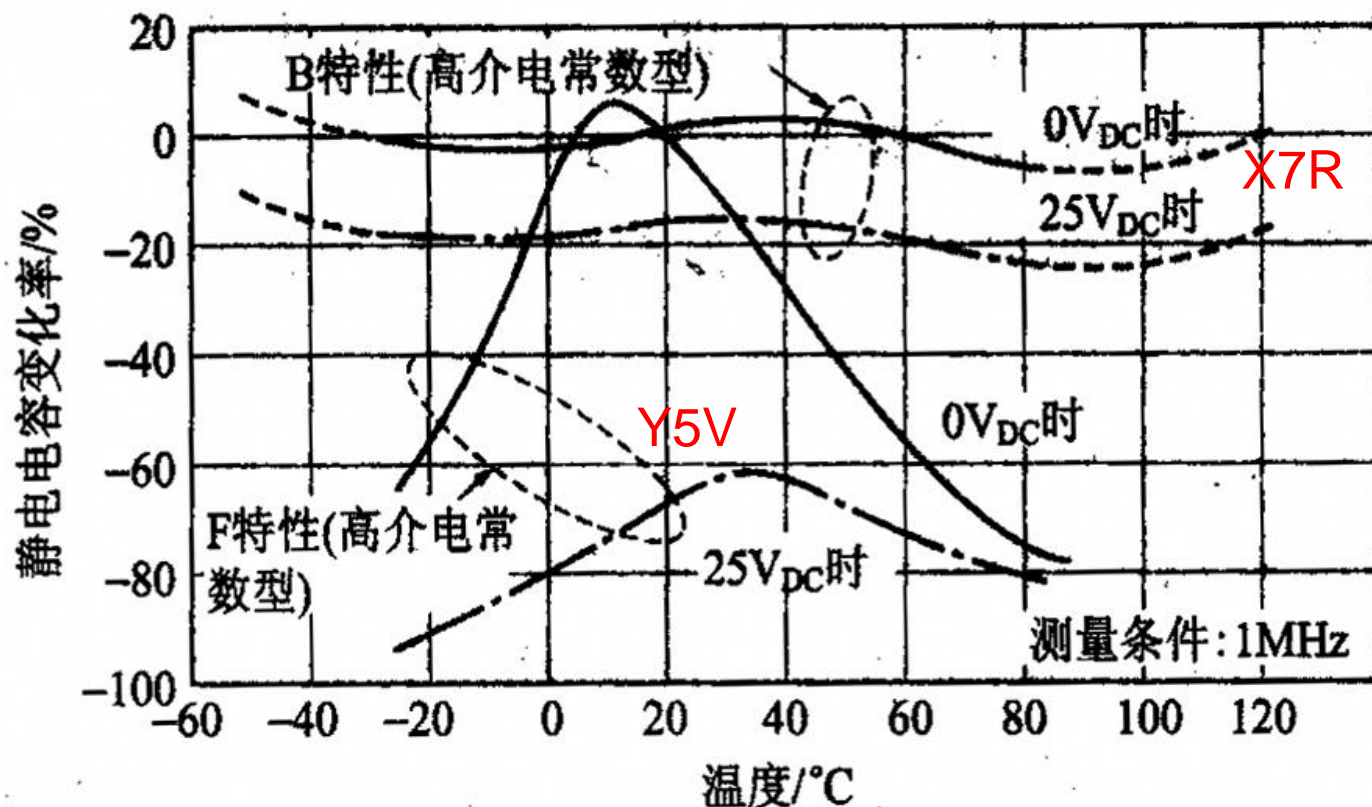


陶瓷电容器容量随直流电压的变化

2.4.2 可靠性相关特性

温度稳定性

- 电容器的温度特性：最大工作温度，最小工作温度，额定温度，温度系数。其中额定温度是指可以连续施加额定电压的最高环境温度
- 不同的电容的温度特性可能相差甚大。如同为陶瓷电容，COG电容器的容量几乎不随温度变化，X7R的容量在额定工作温度范围内变化不超过12%，而Y5V的容量在额定工作温度范围内的变化可达70%以上



陶瓷电容器容量
随温度的变化

2.4.2 可靠性相关特性

容值漂移估算

电容稳定性估算实例

$$C_{\text{实际最大}} = C_{\text{标称}} \times (1 + \text{最大正容差}) \times (1 + \text{最大正温度系数}) \times (1 + \text{最大正电压系数}) \\ \times (1 + \text{最大正频率系数}) \times (1 + \text{最大正老化系数})$$

$$C_{\text{实际最小}} = C_{\text{标称}} \times (1 + \text{最大负容差}) \times (1 + \text{最大负温度系数}) \times (1 + \text{最大负电压系数}) \\ \times (1 + \text{最大负频率系数}) \times (1 + \text{最大负老化系数})$$

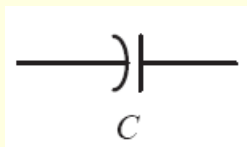
电容类型	标称电容	额定电压	初始容差	温度系数	电压系数	频率系数	老化系数	温度范围	电压范围	频率范围	实际最大电容	实际最小电容	变化比
Z5U陶瓷	0.1uF	50V	-20%~+80%	+22%~-56%	在60%额定电压处-35%	10kHz处-3%, 100kHz处-6%	1000小时后-6%	+10℃~+85℃	5~30V	10kHz~100kHz	0.219uF	0.0202uF	11: 1
聚碳酸酯	0.1uF	63V		±10%							0.11uF	0.089uF	1.23: 1
钽珠电解	0.1uF	35V		±20%							0.125uF	0.038uF	3.29: 1

- 实际电容值随容差、温度、电压、频率和时间的变化最大可以达到10倍以上，故不能忽视，尤其是在定时、调谐、振荡器等对电容值的精度及稳定性要求高的电路中
- 对于不同类型的电容，容差和漂移的影响程度是不一样的。在此例中，聚碳酸酯最好，而Z5U多层陶瓷电容最差
- 对于不同类型的电容，决定容值变化的关键因素是不一样的，如聚碳酸酯主要受初始容差支配，而钽珠电容在高频段表现出了最坏的性能

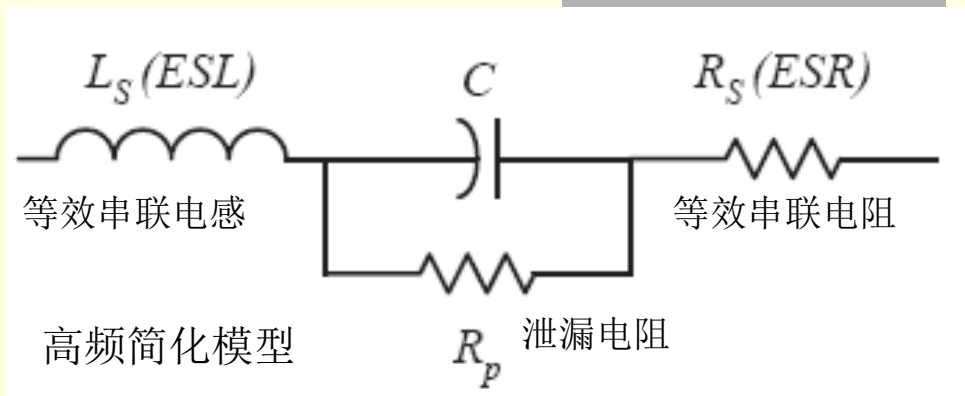
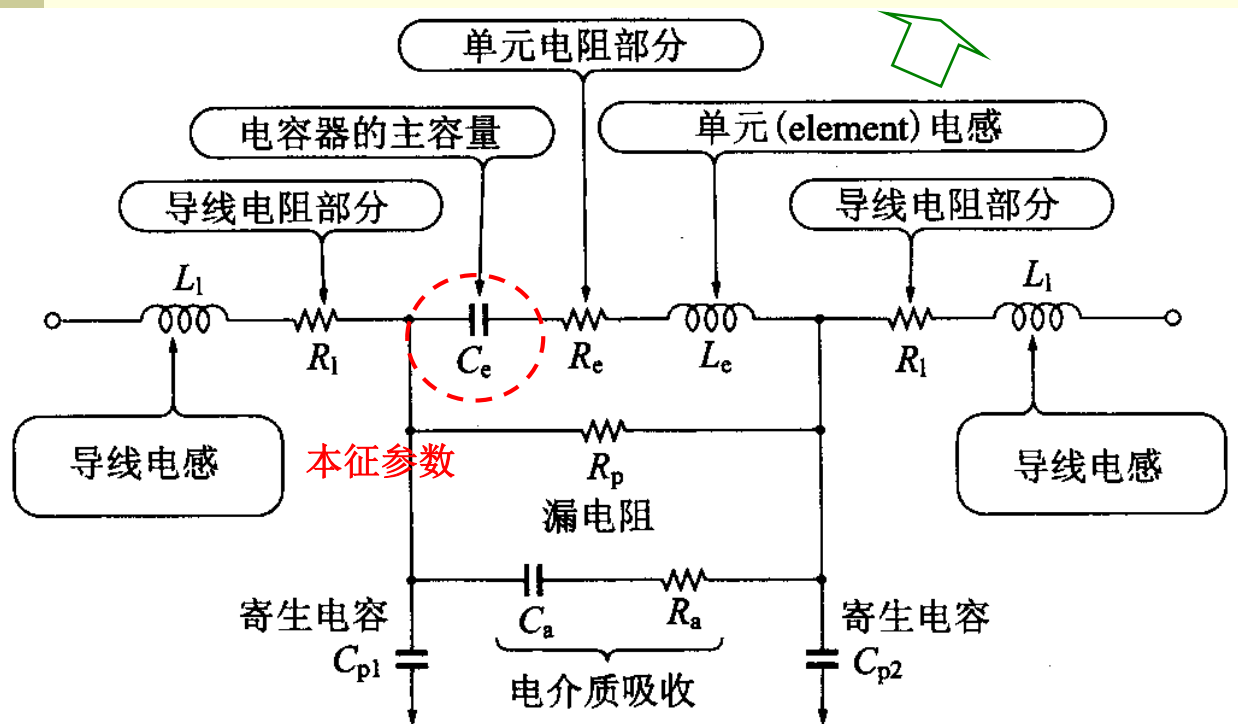
2.4.2 可靠性相关特性

高频寄生参数

低频模型



高频完整模型

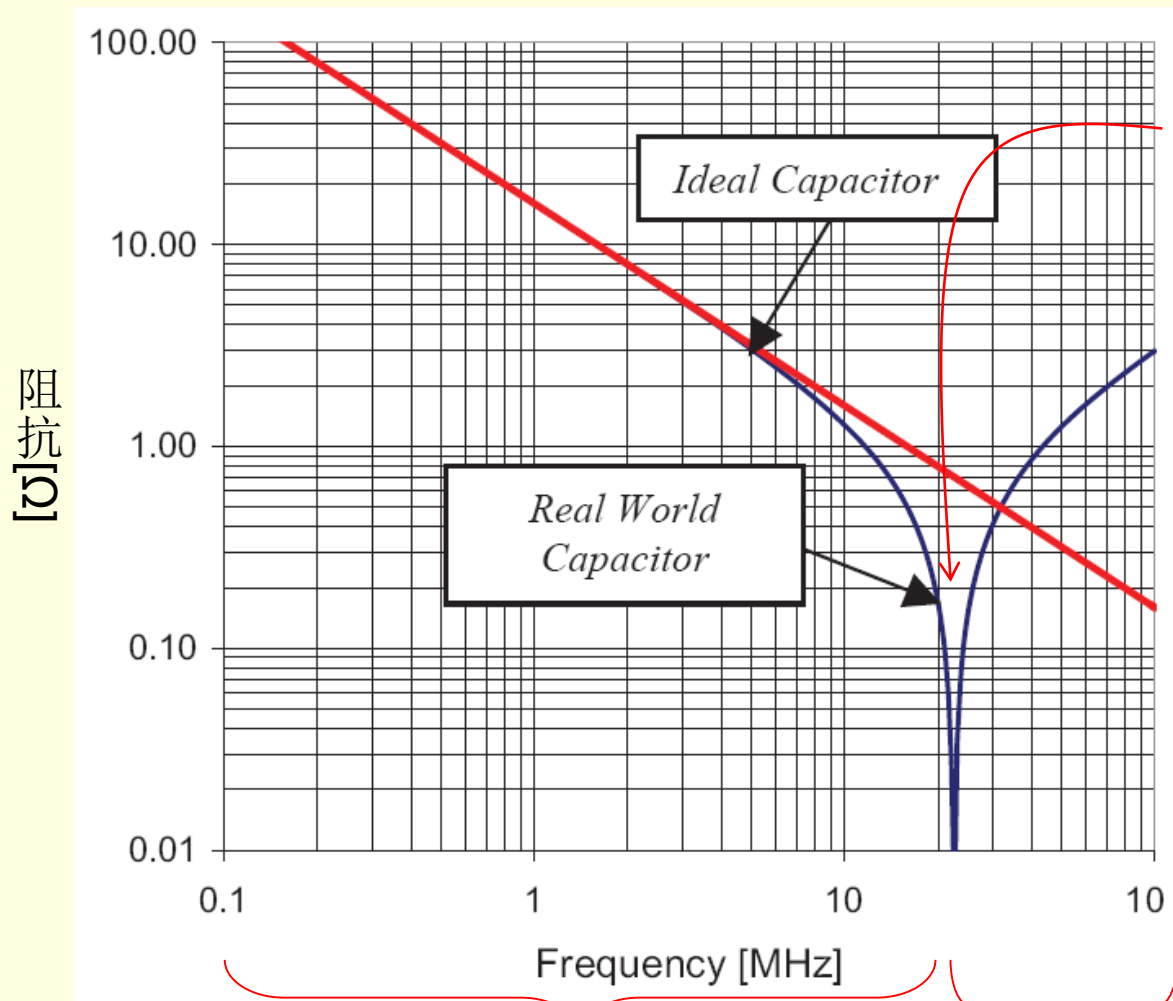


电容器阻抗公式

$$Z_C = \frac{1}{\left(j\omega C + \frac{1}{R_p} \right)} + j\omega L_s + R_s$$

2.4.2 可靠性相关特性

阻抗随频率的变化



$$\text{自谐振频率 } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{CL_S}}$$

$$\text{谐振点阻抗 } Z_c(f_0) = \sqrt{R_s^2 + (X_L - X_c)^2}$$

电容器阻抗随频率的变化
($C=10\text{nF}$, $L_S=5\text{nH}$, $R_S=2\text{m}\Omega$)

- 电容器的工作频率范围应在自谐振频率之下，因此高频寄生参数的存在限制了电容器的使用频率范围

呈容性：理想电容器, $Z_c = X_c = \frac{1}{j2\pi fC}$

呈感性：寄生电感 L_{ESL} 所致, $Z_c = X_L = j2\pi fL_S$

Copyright by Yiqi Zhuang 2013 V1.0

2.4.2 可靠性相关特性

容量及封装形式的影响

电容器的寄生电感、自谐振频率及其工作频率范围与电容量、电容器材料与结构形式有关

不同容量电容的自谐振频率估计值

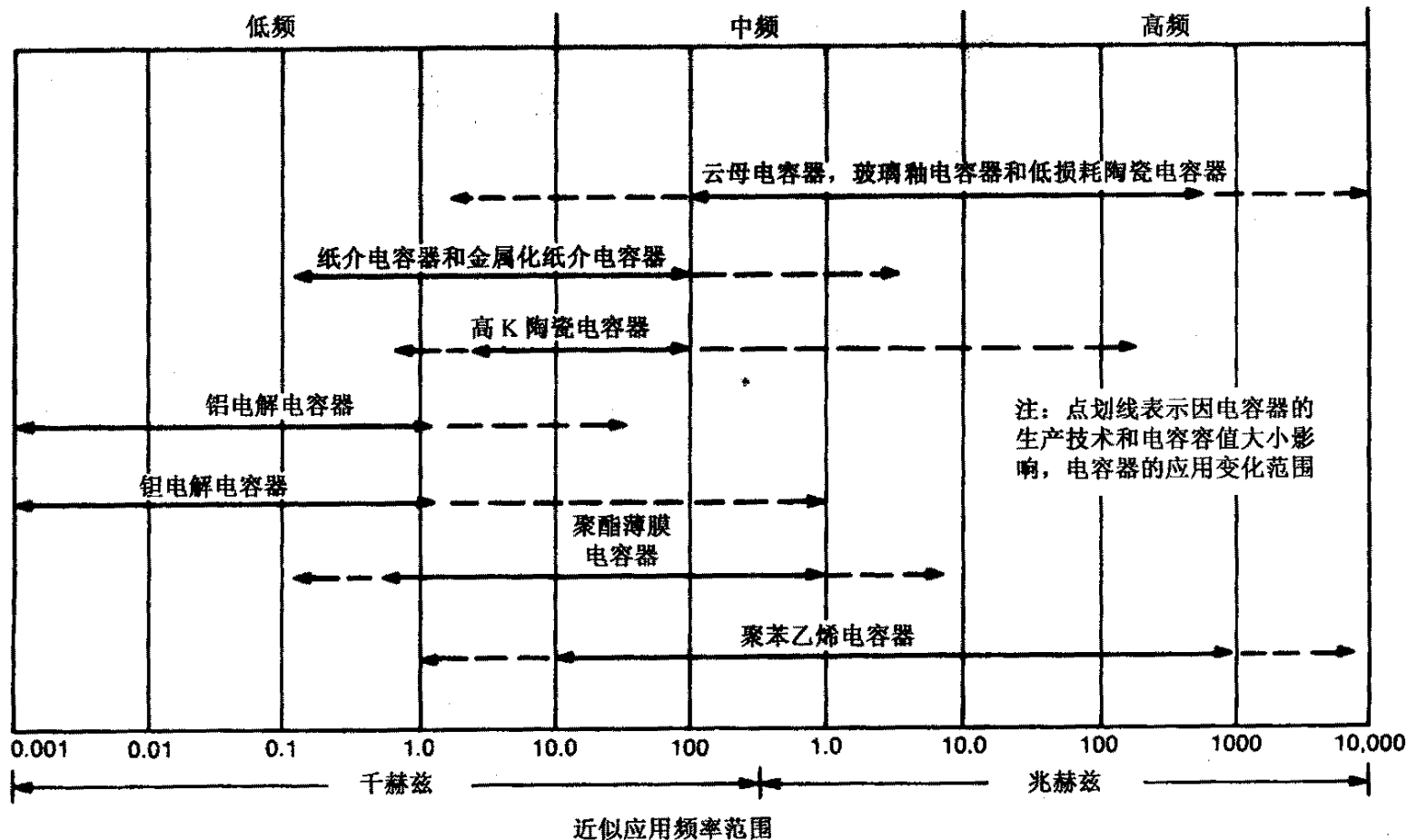
Capacitor Value	Through-Hole* L=3.75nH 0.25" leads (15nH/inch)	Surface Mount** (0805) L=1nH
1.0 μf	2.6 MHz	5 MHz
0.1 μf	8.2 MHz	16 MHz
0.01 μf	26 MHz	50 MHz
1000 pF	82 MHz	159 MHz
500 pF	116 MHz	225 MHz
100 pF	260 MHz	503 MHz
10 pF	821 MHz	1.6 GHz

- 对相同类型的电容器，容量越大，自谐振频率越低，因此对于宽使用频带的电容器，必须使用小容量电容器和大容量电容器的并联
- 对相同容量的电容器，电容尺寸越小，引线越短，则自感越小，自谐振频率越高，因此表面贴装片式电容器的自谐振频率高于引线插装的电容器

2.4.2 可靠性相关特性

工作频率范围

- 不同容量、不同类型的电容因自谐振频率不同，所以具有不同的适用频率范围。如容量为10nF的陶瓷电容器的自谐振频率为10~100MHz，10uF钽电解电容自谐振频率为1MHz



常见电容器的
适用频率范围
(虚线为由于
制造工艺和容
差引起的变化)

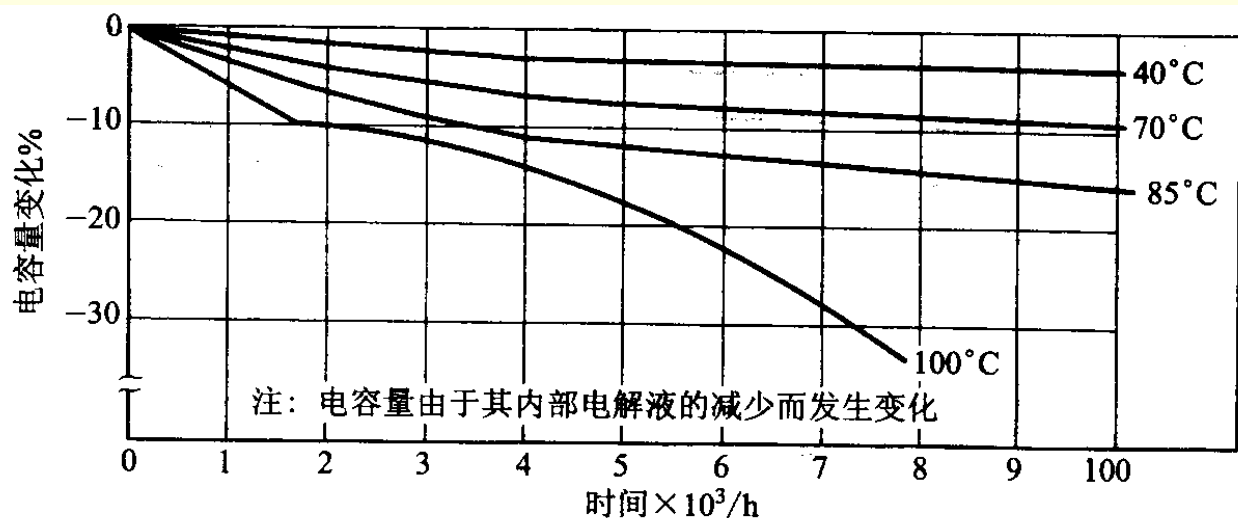
2.4.4 电解电容器选用

铝电解电容器:寿命

铝电解电容器的容量-体积比在所有电容器中是最高的，而且价格低，因而成为大容量电容器的主角，但从可靠性角度看，存在以下问题：

■ 寿命较短

- 工作寿命和储存寿命都有限，因为内部的电解液逐渐干枯会导致电容量逐渐减少，是少数几种不使用也会退化的电子元件之一。在各类电容器中，受温度影响而老化的程度最高，也是储存寿命最短的元器件之一
- 影响寿命的因素有环境温度、自身发热、整体密封性、施加的电压等
- 怕热，高温下可能有气体逸出，不仅会影响周边元器件，而且有可能诱发电容器爆炸，因此工作温度严禁超过额定温度，安装时要使其远离热源
- 普通电解电容器在105℃下的寿命约为1000~2000h，高可靠电容器可以达到7000h。在高温区满足10℃法则，即温度每升10℃寿命减半



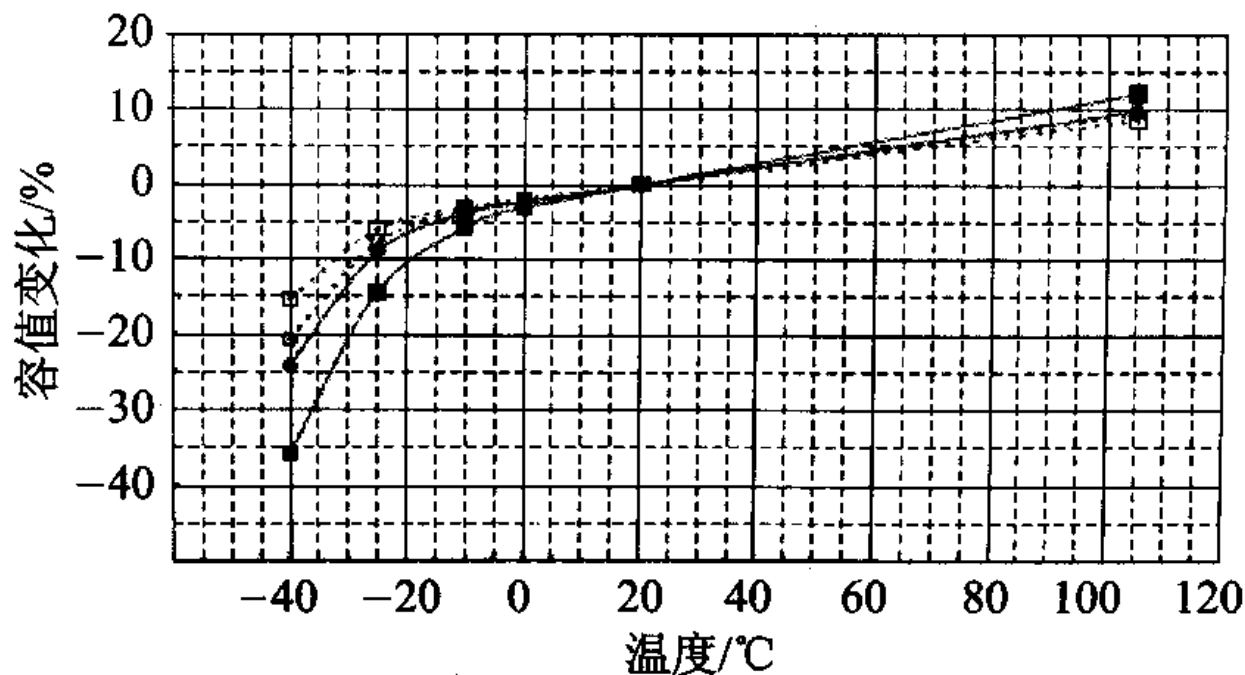
铝电解电容器的温度与寿命的关系

2.4.4 电解电容器选用

铝电解电容器:温度范围

■ 工作温度范围较窄

- 最大工作温度范围约为 $-40^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$ ，典型工作温度范围 $0 \sim 60^{\circ}\text{C}$ （电容变化量 $\pm 20\%$ ）
- 电容量随温度 \downarrow 而 \downarrow ，相对于室温， -40°C 时的容值可能会下降20%以上



铝电解电容器的容值随温度的相对变化

2.4.4 电解电容器选用

铝电解电容器:寄生参数

■ 寄生参数大

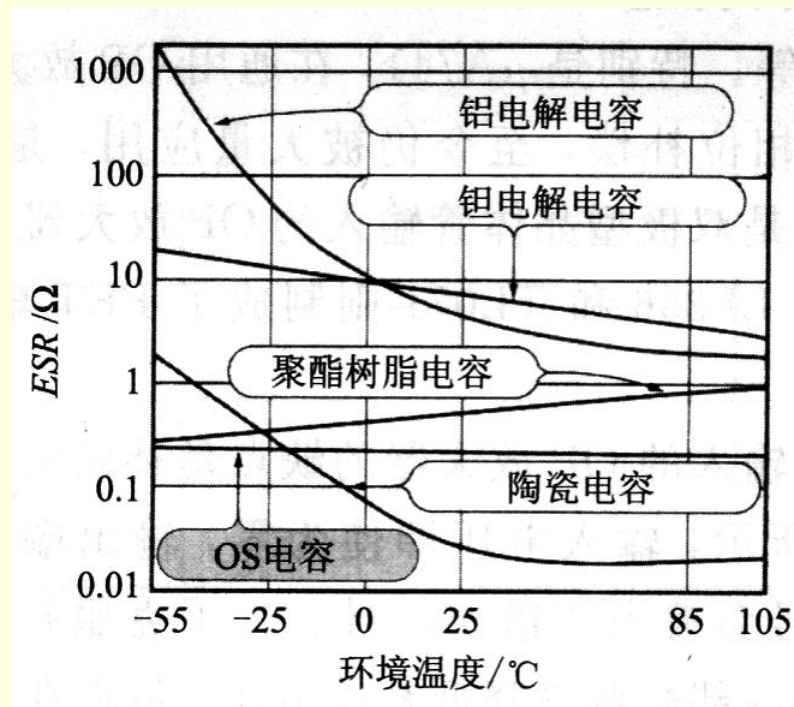
- 采用卷绕式结构，分布电感大，只能用于25kHz以下的低频旁路、滤波及耦合电路
- ESR在所有电容器中最大，且随温度变化剧烈（-40℃的阻值可上升到+25℃时的10~100倍）
- 多个小容量电解电容器并联的串联阻抗要低于单个同容量电解电容器
- 自谐振频率有可能低于100kHz，故只能用于低频电路

■ 体积重量大

- 通常是电路中体积最大和质量最大的元件，抗振动能力较薄弱，因此需小心选择固定安装方式，保证其连接端的机械强度

■ 具有自愈性

- 在偶然击穿后，由于电解质的作用，击穿处将重新形成氧化膜，而自动恢复其绝缘性



常用电容器ESR随环境温度变化特性（0.47μF，100kHz，其中OS为有机半导体铝固体电解电容器，其寿命、漏电、高温、高频特性均优于普通铝电解电容器，但价格昂贵，多用于要求高保真、高稳定的系统）

2.4.4 电解电容器选用

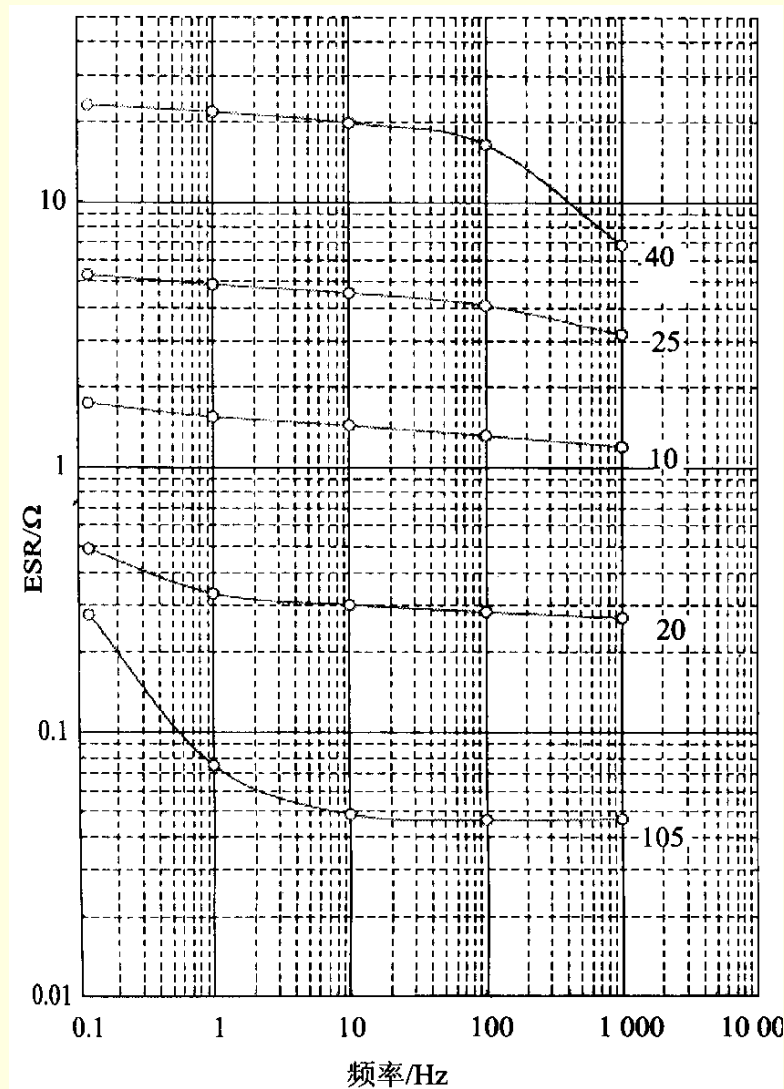
铝电解电容器:漏电与功耗

■ 漏电大

- 在所有电容器中漏电最大
- 估算公式: 漏电流 $= (0.01 \sim 0.03) CV [\mu A]$,
C、V是标称电容、工作电压
- 与电压有关: 工作电压=40%额定电压
→漏电流=10%额定漏电流
- 与温度有关: 最高温度下的漏电流
=10×25℃下的漏电流

■ 功耗大

- 交变电流通过电容器等效串联电阻ESR会形成功耗→电容器内部的温升↑
- 等效串联电阻ESR会随着工作温度降到0℃以下而急剧增加→功耗↑
- ESR随老化时间增长也会持续增大, 有可能增加100%以上



不同环境温度下ESR的频率特性

2.4.4 电解电容器选用

固体钽电解电容

■ 基本结构

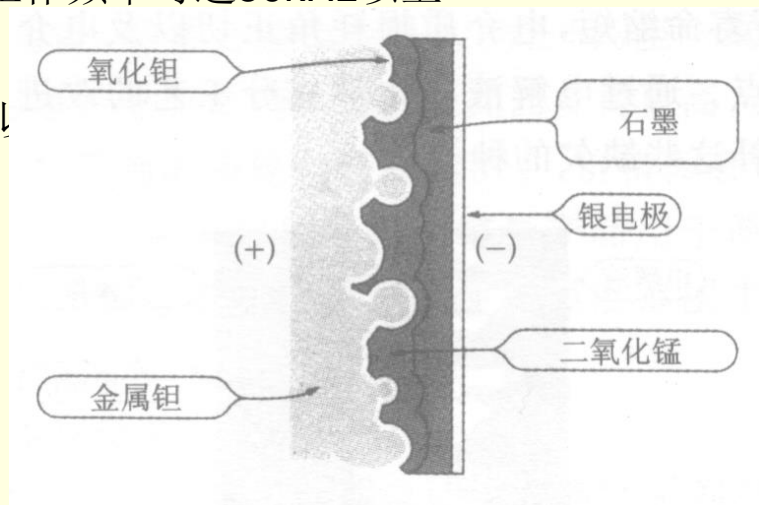
- 固体二氧化锰作为电介质，烧结的钽块作为阳极

■ 优点（与铝电解电容器相比）

- 温度范围宽：可达 $-55^{\circ}\text{C} \sim +125^{\circ}\text{C}$
- 漏电流小、绝缘电阻高： $<0.01\text{CV}[\mu\text{A}]$ ，可与品质最好的铝电解电容相比
- 损耗因数低： $0.04 \sim 0.1$ ，约比铝电解电容好两倍
- 温度系数低：电容值在工作温度范围内的变化 $\pm 3 \sim \pm 15\%$
- 寄生参数小：自身电感小，串联电阻较低，工作频率可达 50kHz 以上
- 有可能反极性使用：在某些工作电压范围内
- 体积小：电容-体积比大于铝电解电容器，可以
- 可靠性高：寿命长，失效率比铝电解电容器低 $1 \sim 2$ 个数量级，常常作为军事用途

■ 缺点（与铝电解电容器相比）

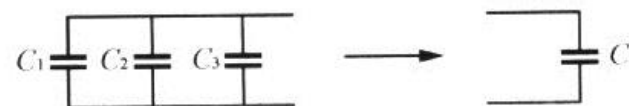
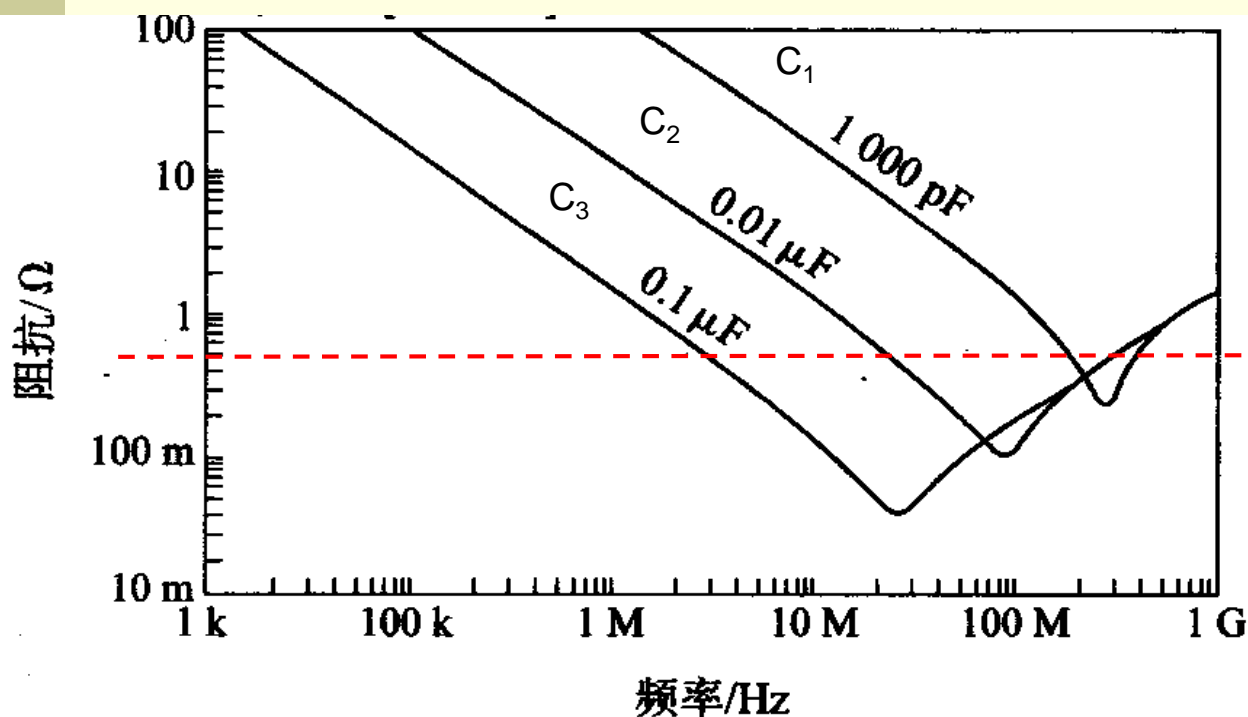
- 价格高，因为钽属于稀有金属
- 对脉动电流的承受力差
- 容量范围和工作电压范围相对较窄



2.4.5 综合应用

电容器的并联

电容器并联应用的作用一是增大电容总容量，此时通常采用相同类型、容量相近（容量差在一个数量级以内）的电容器并联；二是扩大应用频率范围，此时通常采用不同容量、不同类型（容量差在一个数量级以上）的电容器并联，这是应为电容器的工作频率范围与其类型及容量有关，要获得较宽的工作频率范围，必须将不同容量、不同类型的电容器并联使用。在下图例中，如果电路要求在频率区间3MHz~300MHz内的阻抗 $<0.5\Omega$ ，则需将1000pF、0.01 μF 、0.1 μF 的三个瓷片电容并联

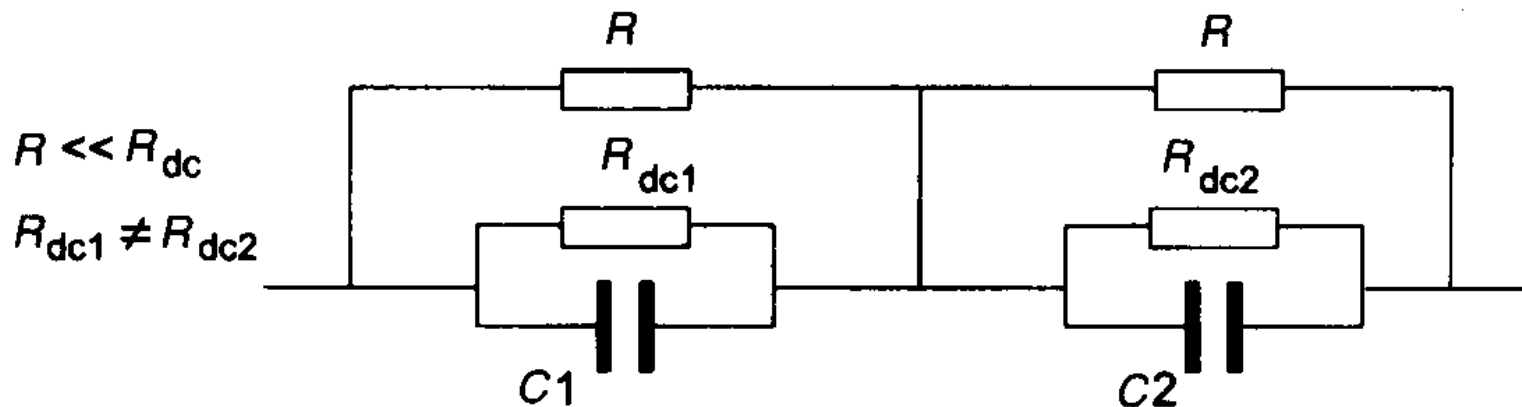


片状多层陶瓷电容的频率特性

2.4.5 综合应用

电容器的串联

- 好处：降低单个电容耐受的实际供电电压，从而增加其性能和寿命
- 问题：即使各个电容的标称容量相同，但其直流漏电阻也可能有明显差别，导致各个电容实际承受电压有较大不同，有可能使个别电容因过压而损坏
- 对策：给每个电容并联一个泄漏电阻，其阻值小于电容中最小的漏电阻，可使电容的工作电压 \leq 额定最大电压，同时可缩短电源关断时的放电时间，对安全有利。副作用是会增加整个电路的漏电流，但对于大部分应用（特别是高压滤波器）是可以接受的



2.4.5 综合应用

可靠性的综合选用

失效率：云母<涤纶<聚苯乙烯<玻璃釉<瓷片<密封纸介<金属化纸介<固体钽电解<液体钽电解<铝电解

容量稳定性与低漏电：固体钽电解>液体钽电解>铝电解

抗过流过压能力：无机介质>高分子有机介质>电解

2.5 二极管的选用

2.5.1 概述

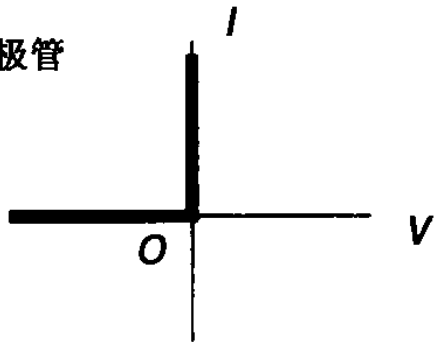
2.5.2 可靠性相关特性

2.5.3 类型选用

2.5.2 可靠性相关特性

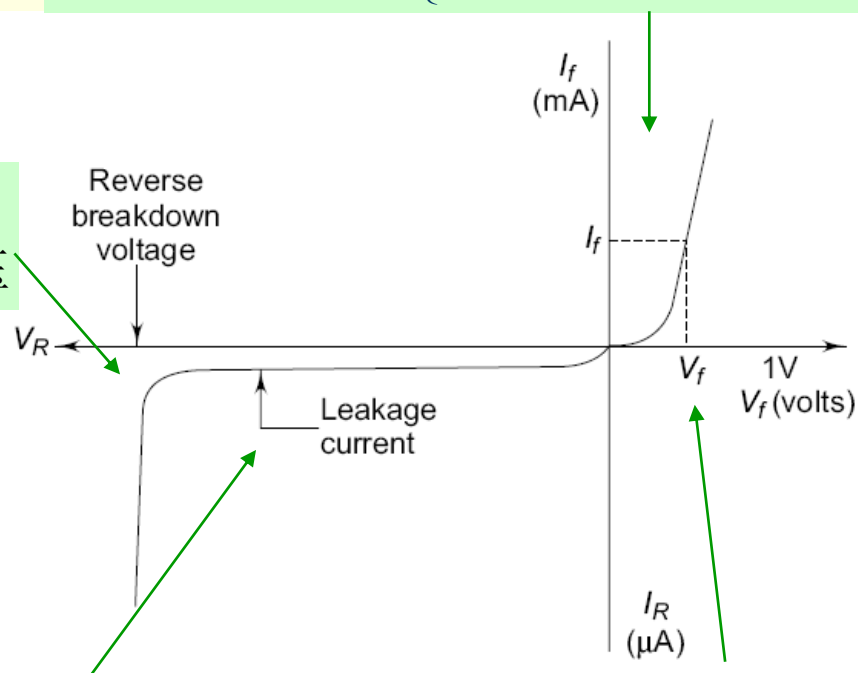
I-V曲线的非理想性

理想二极管



最大正向电流 $I_{F \max}$ { 由可靠性决定：最大允许结温 \Rightarrow
最大允许功耗 $\Rightarrow I_{F \max}$
可承受最大浪涌电流 $= 30 \sim 70 I_{F \max}$
(浪涌时间8.33ms)

击穿电压 BV_{BR} { 基本与温度无关
可承受反向浪涌电压

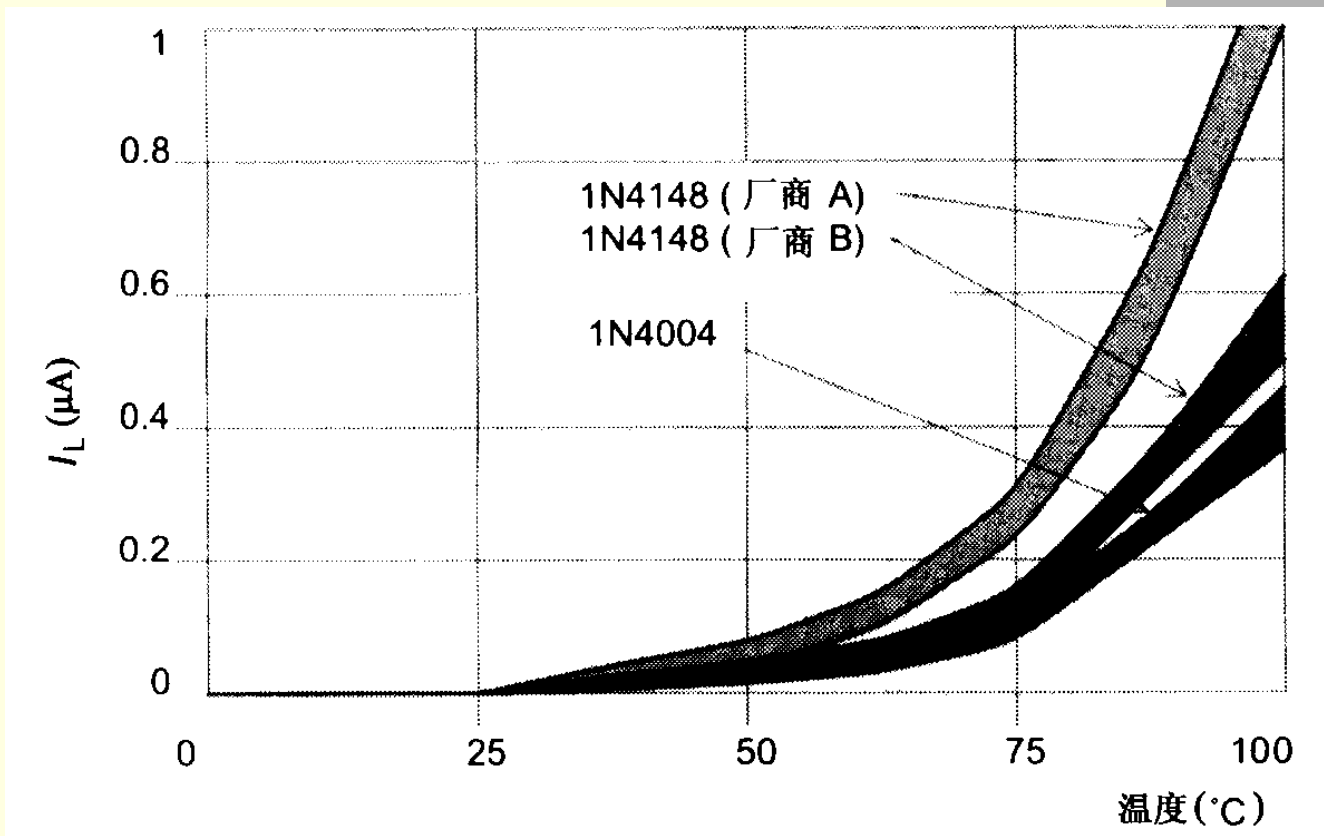


漏电流 I_R { 对温度敏感：每升高 10°C \uparrow 1倍
离散性大：达1个数量级以上

正向压降 V_F { 与正向电流 I_F 相关： $I_F \sim \text{nA}$ 时 $V_F \approx 0$;
 $I_F \sim 100\text{mA}$ 时 $V_F \approx 1.0\text{V}$
与温度 T 有关：变化速率 $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$

2.5.2 可靠性相关特性

反向漏电流

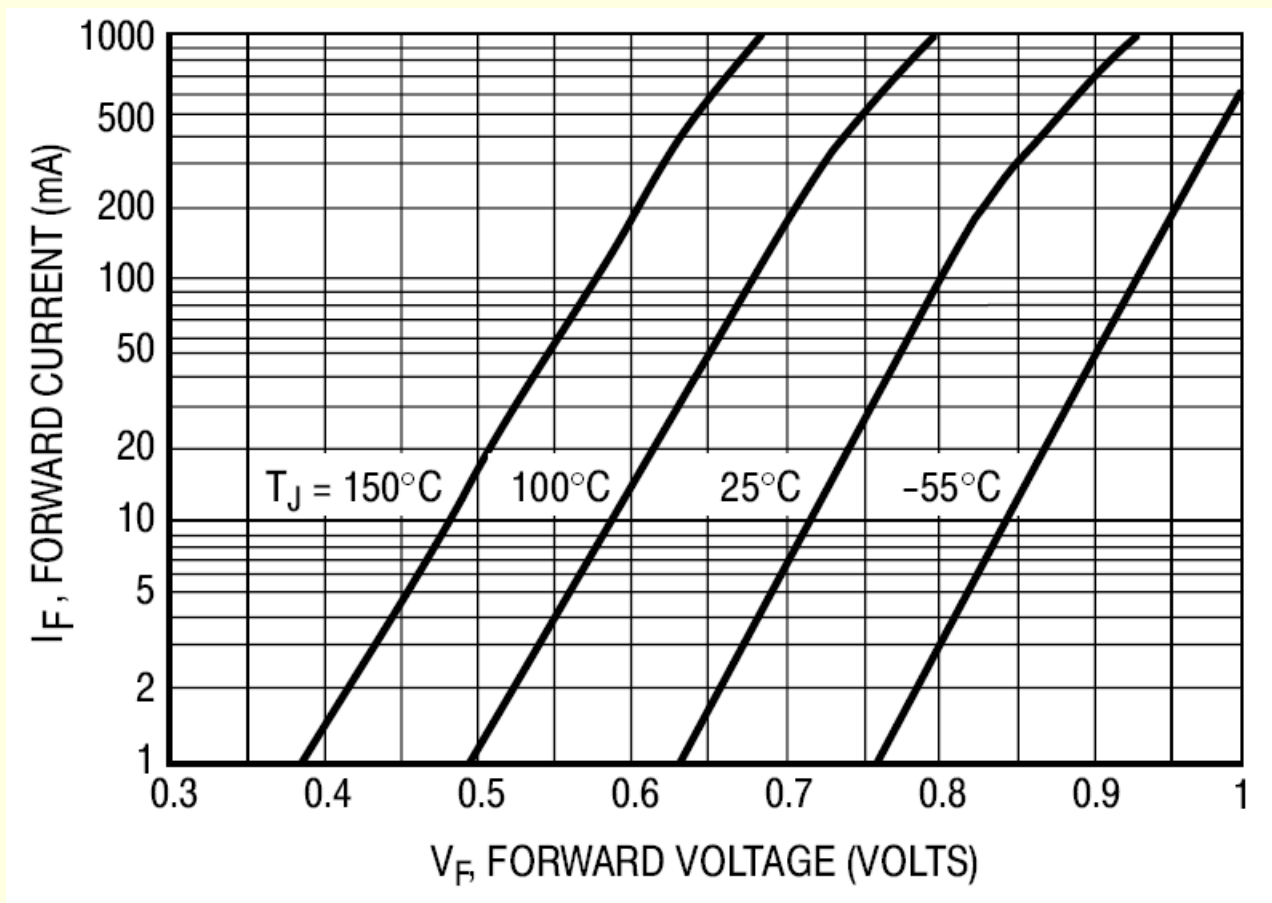


- 反向漏电流随温度上升而呈指数型上升
- 对于同种型号不同厂商生产的二极管，漏电流可能也会有明显的差异
- 整流二极管（1N4004）的漏电流甚至可能比小信号二极管1N4148还低
- 漏电流是可靠性敏感参数之一

2.5.2 可靠性相关特性

正向导通压降的温度特性

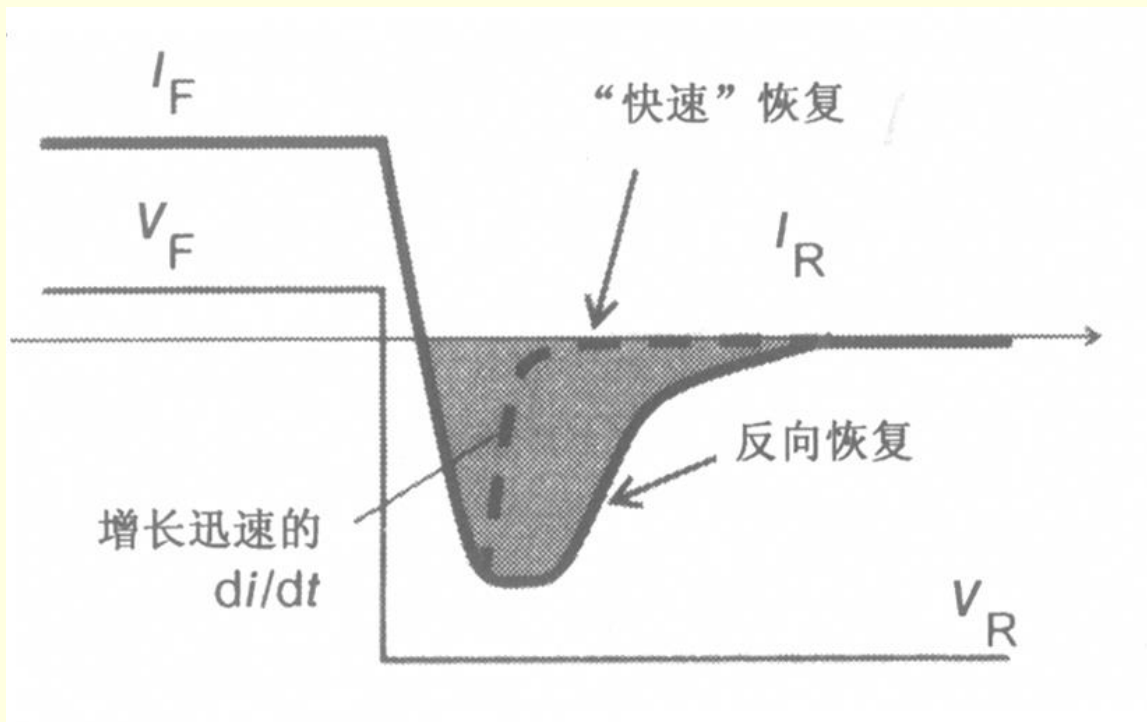
不同温度下齐纳二极管正向导通特性（温度系数为 $-1.4\sim-2\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ ）



可见，PN结二极管的正向导通压降随温度的上升而减少

2.5.2 可靠性相关特性

反向恢复效应

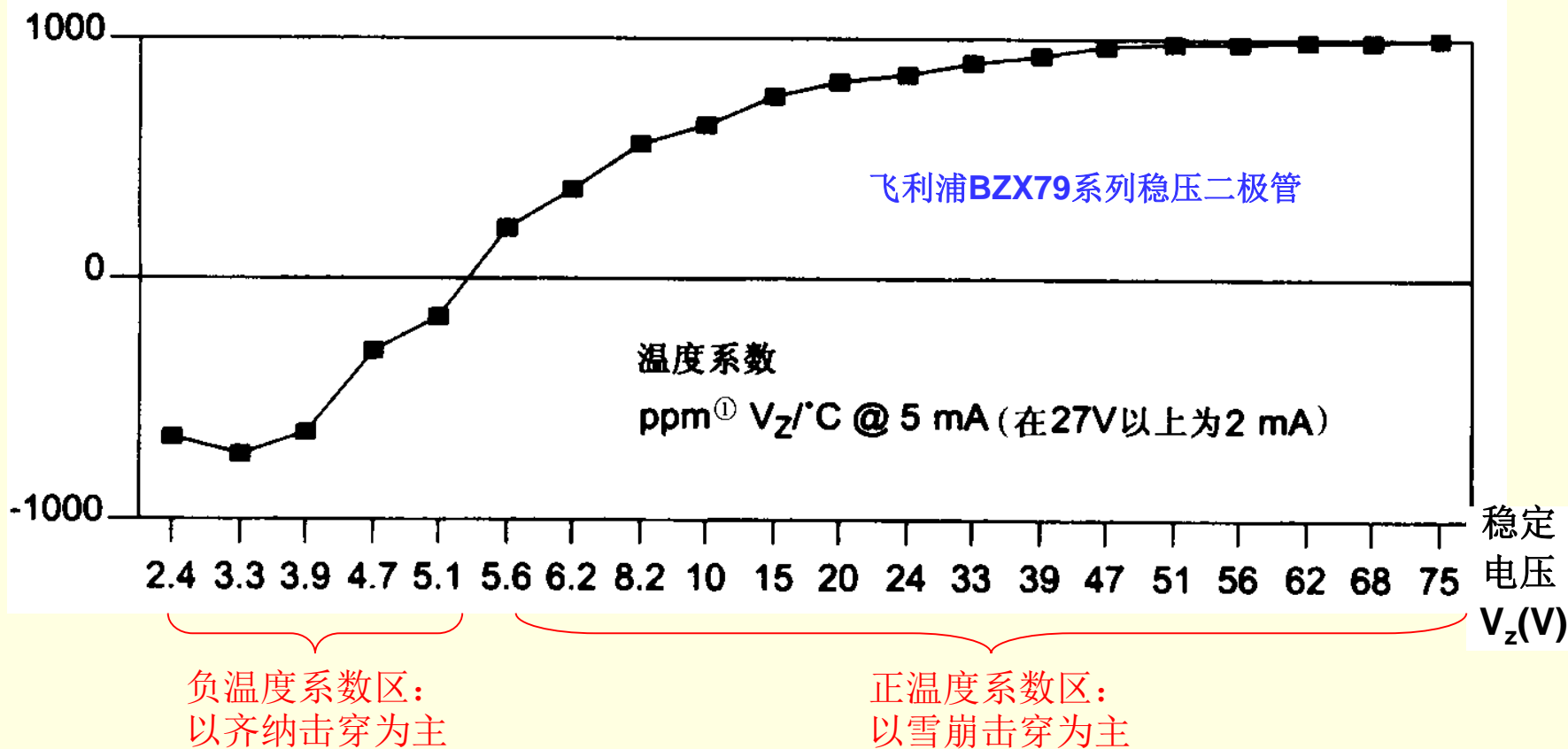


当二极管所加电压从正偏 V_F 转为反偏 V_R 时，需要一段时间（反向恢复时间）的反向电流 I_R 来清除结内所有导电的载流子

- 产生功耗：在反向恢复期间， $V_R \cdot I_R$ 形成了一个相当大的功耗，为此专门研制了“快速恢复”二极管，将反向恢复时间从1~20us减少到0.15~0.2us
- 形成浪涌：在反向恢复期间，极高的 di/dt 会如果通过电感负载，会在电路中形成很大的浪涌电压，为此专门研制了 di/dt 较小的“软恢复”二极管

2.5.3 类型选用

稳压二极管



- 通常在4.7~5.6V附近具有最低的温度系数，故对温度要求很高的场合可选用该稳压值的器件
- 通常在5.6~5.9V附近具有最接近普通二极管正偏电压的温度系数（+2mV/°C），故常用作精密基准二极管

2.5.3 类型选用

■ 优点（与pn结二极管相比）

- 正向压降低：0.4~0.5V，而pn结二极管为0.6~1V，故功耗低，常用在高效开关电源或整流器中
- 速度快：无少数载流子的电荷存储效应，基本无反向恢复效应，故常用于RF混频器或高速转换器，用作开关电源时的开关频率可达几百kHz

■ 缺点（与pn结二极管相比）

- 反向漏电流大：比pn结二极管高一个数量级左右
- 击穿电压做不大：一般为40~60V，而pn结二极管可以达到1kV以上
- 易受静电、浪涌而被破坏

常规二极管



肖特基二极管



2.6 晶体管的选用

2.6.1 概述

2.6.2 可靠性相关特性

2.6.3 类型选用

2.6.1 概述

晶体管的封装形式



E B C



E B C

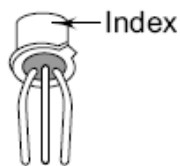


E B C

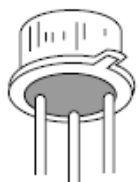


E B C

塑料封装双极晶体管



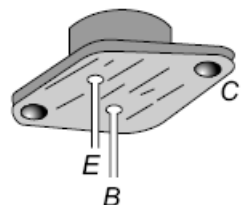
E B C



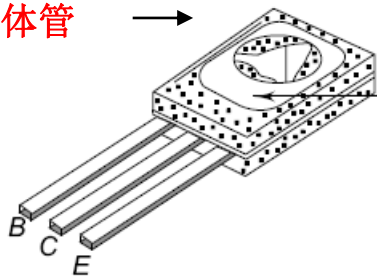
E B C

金属封装双极晶体管

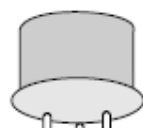
双极功率晶体管



Metal heat sink

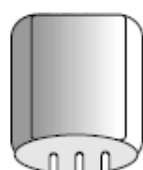


Metal case



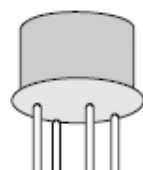
D G S
or
GDS

Black plastic

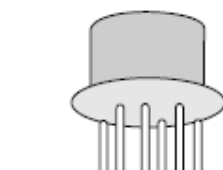


S G D
or
GDS

Metal case

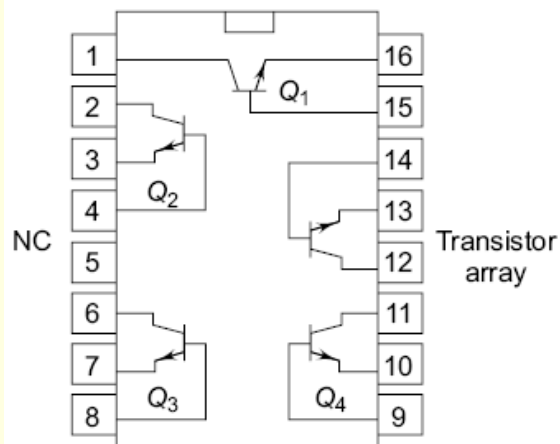


D G S
1 2



S₁ D₁ G₁
S₂ D₂ G₂

金属与塑料封装场效应晶体管



双极晶体管阵列

2.6.2 可靠性相关特性 双极晶体管的可靠性影响因素

不同环境条件的影响

环境类别：GB地面良好，GMS导弹发射井，GF1一般地面固定，GF2恶劣地面固定，GM1平稳地面移动，GM2剧烈地面移动，MP背负，NSB潜艇，NS1舰船良好舱中，NS1舰船普通舱中，NU舰船舱外，AIF战斗机座舱，AUF战斗机无人舱，AIC运输机座舱，AUC运输机无人舱，直升机ARW，SF宇宙飞行，ML导弹发射，MF导弹飞行

在应用环境下的失效率

不同电路结构的影响

应用类别：线性放大，逻辑开关，高频，微波

耗散功率的影响

工作功率/额定功率

双极晶体管

$$\lambda_P = \lambda_b \pi_E \pi_Q \pi_A \pi_{S2} \pi_r \pi_C$$

工作失效率

环境系数

应用系数

功率系数

结构系数

基本失效率

质量系数

电压应力系数

不同质量等级的影响

结构类别：单管，不匹配或互补对，匹配对，达林顿对，双发射极，复式发射极

$$\lambda_b = A \exp\left(\frac{N_T}{T + 273 + \Delta T \cdot S}\right) \exp\left[\left(\frac{T + 273 + \Delta T \cdot S}{T_M}\right)^p\right]$$

只考虑温度应力影响

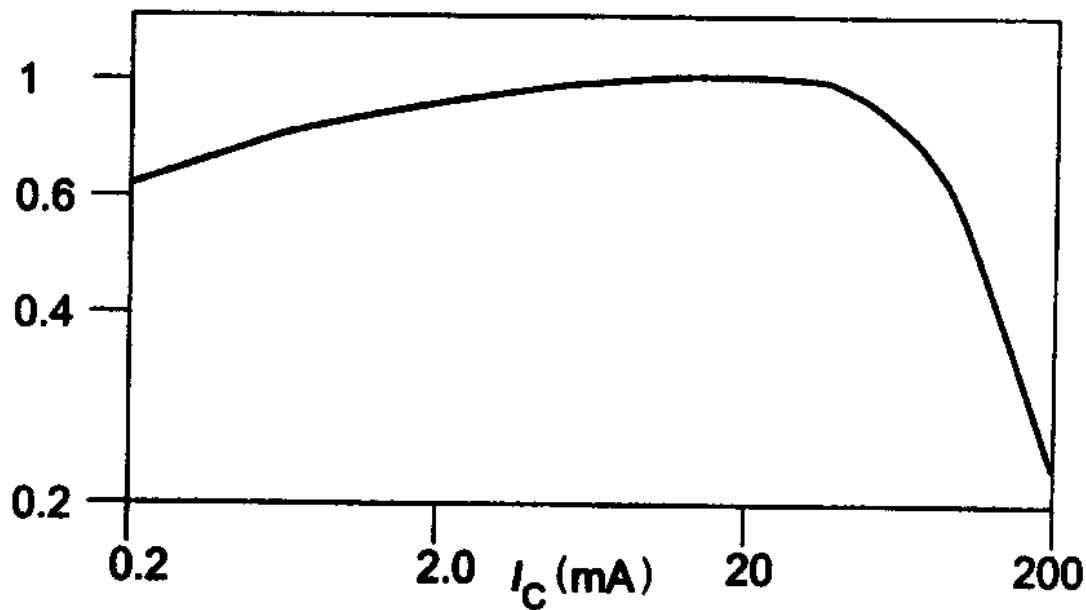
工作电压/额定电压

外加电压的影响

2.6.2 可靠性相关特性

双极晶体管的电流增益

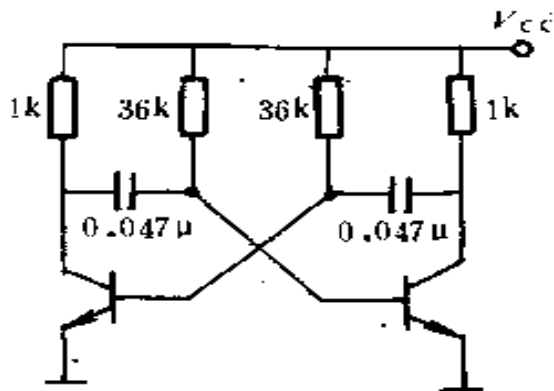
标准的 h_{FE} 与集电极电流的关系
(归一化值)



- 直流或小信号电流增益随集电极电流和温度而变化，设计时不能作为一个稳定参数
- 进入高电流区或者进入低电流区，电流增益均要下降，中间的平坦区的范围对于不同类型的管子会有所不同
- 电流增益会随温度的上升而增加，温度的下降而减少，最大变化幅度可达2~3倍

2.6.2 可靠性相关特性

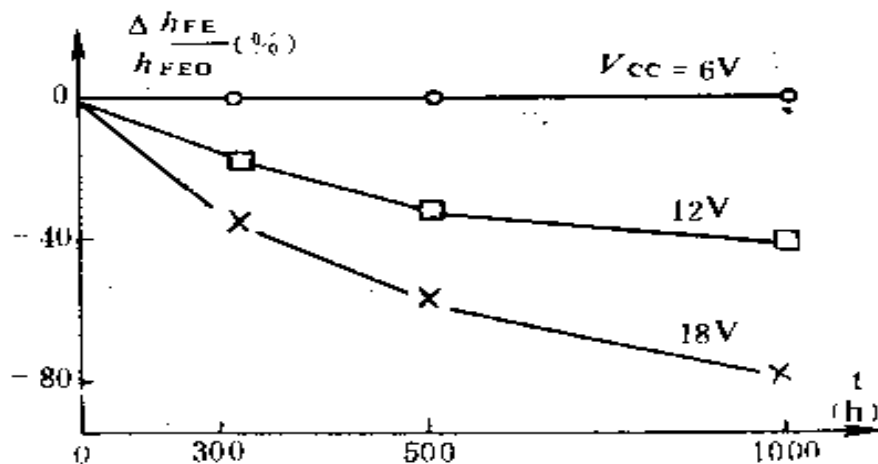
击穿电压选择不当导致器件退化



(a)

单稳态多谐振荡器

- 晶体管的B-E结周期性地承受反向偏置电压 V_{EB}
- 若晶体管的 $BV_{EB0} \gg V_{EB}$, 就不会有损伤; 若晶体管的 BV_{EB0} 接近 V_{EB} , 就可能出现损伤, 使其电流放大系数 h_{FE} 逐渐减少
- 电源电压 V_{CC} 越高, V_{EB} 越高, h_{FE} 的退化越严重



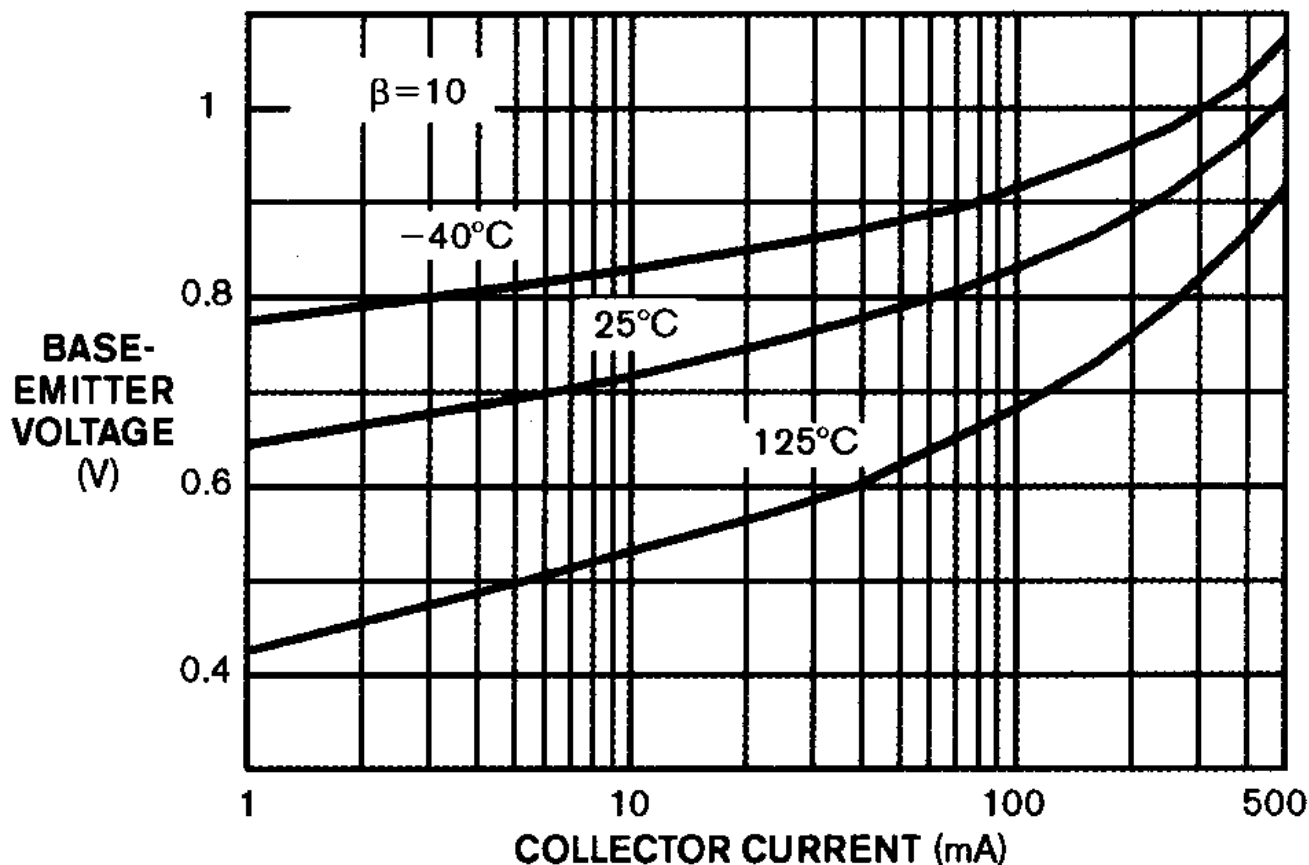
(b)

2.6.2 可靠性相关特性

双极晶体管的温度特性

- 器件的电性能参数（工作电流、增益、耐压、漏电流、功耗等）是温度的函数

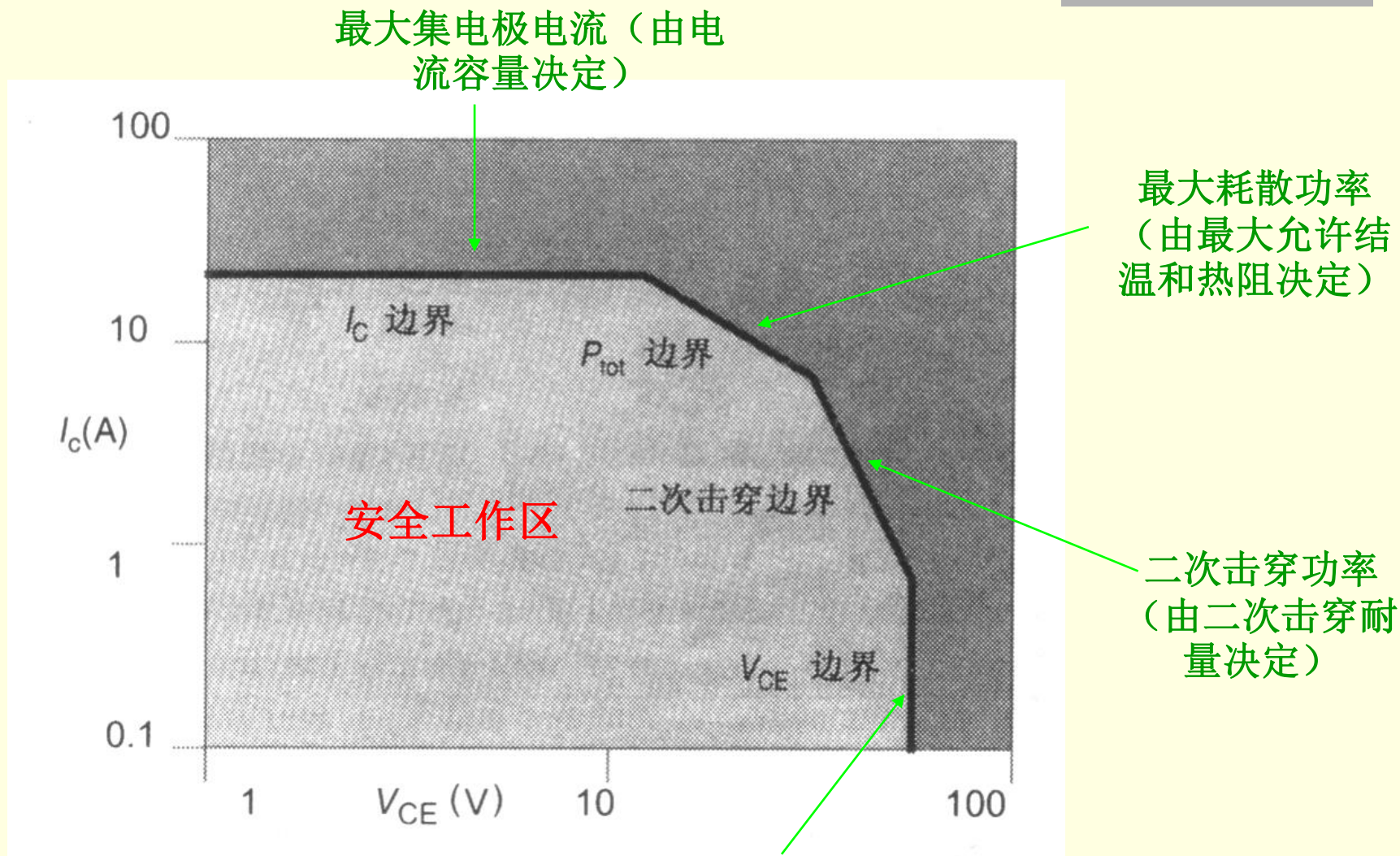
双极晶体管的发射结压降随温度的变化



可见，双极晶体管的集电极电流具有正温度系数（热电正反馈是产生二次击穿的主要原因），正向压降具有负温度系数

2.6.2 可靠性相关特性

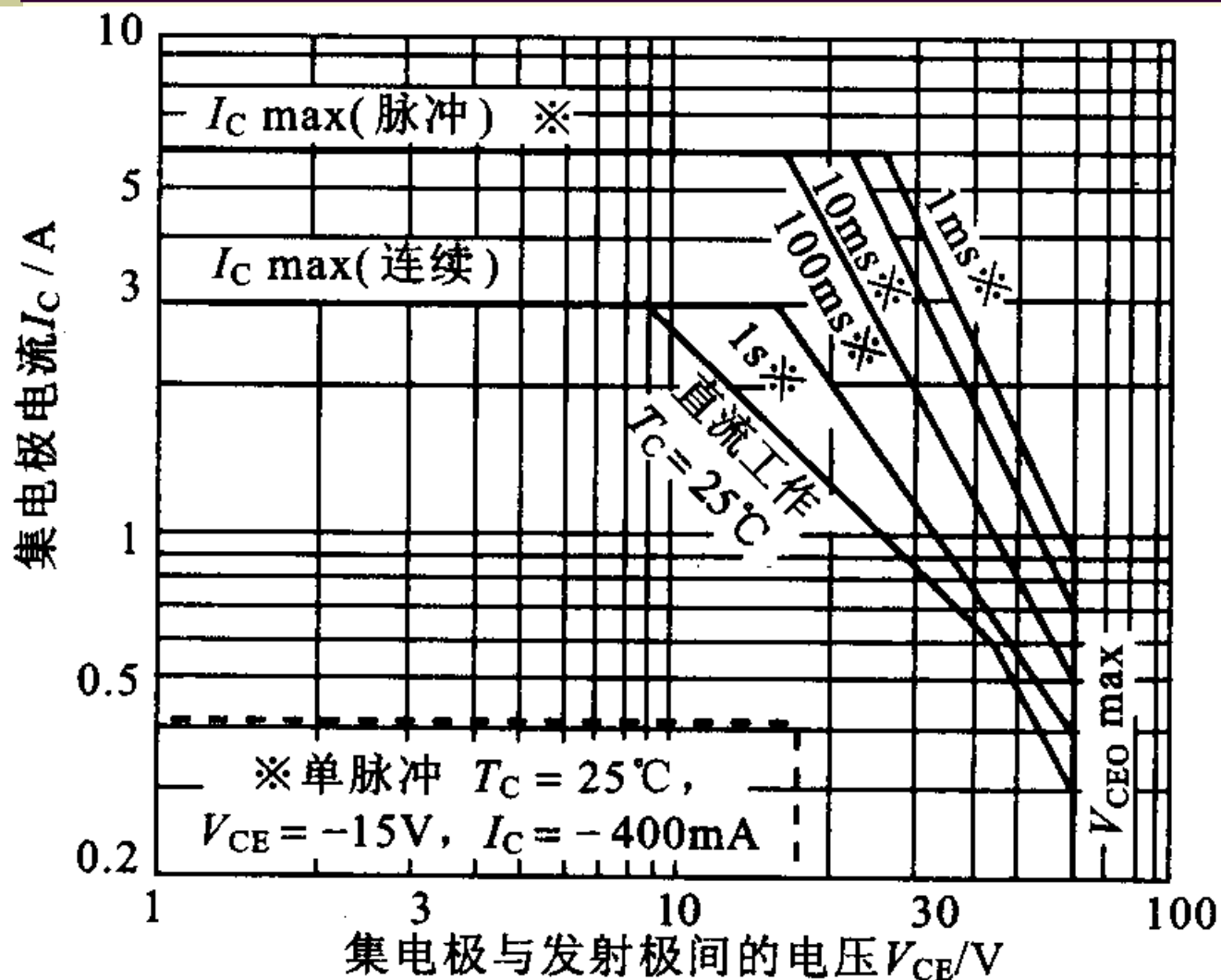
双极晶体管的安全工作区



最大集电极-发射极电压
（由击穿电压决定）

2.6.2 可靠性相关特性

双极晶体管的安全工作区(续)



- 脉冲工作时的最大电流和耗散功率大于直流工作情形，故安全工作区更大
- 脉冲宽度越窄，安全工作区越大
- 仅在直流工作状态下，二次击穿会影响安全工作区

2.7 集成电路的选用

2.7.1 概述

2.7.2 可靠性相关特性

2.7.3 类型选用

2.7.2 可靠性相关特性

可靠性影响因素(GJB299)

环境类别: GB地面良好, GMS导弹发射井, GF1一般地面固定, GF2恶劣地面固定, GM1平稳地面移动, GM2剧烈地面移动, MP背负, NSB潜艇, NS1舰船良好舱中, NS1舰船普通舱中, NU舰船舱外, AIF战斗机座舱, AUF战斗机无人舱, AIC运输机座舱, AUC运输机无人舱, 直升机ARW, SF宇宙飞行, ML导弹发射, MF导弹飞行

电路形式:

TTL, HTTL, HTL, ETL

STTL

LSTTL, NMOS, PMOS, CMOS, CCD

CMOS/SOS, HCMOS, HCTMOS

双极及MOS模拟电路

电路形式系数

环境系数

封装复杂度失效率

电路复杂度系数

质量系数

工作失效率

微电路

$$\lambda_P = \pi_Q [c_1 \pi_T \pi_V + (c_2 + c_3) \pi_E] \pi_L$$

温度应力系数

电压应力系数

成熟系数

封装复杂度:

密封器件(金属圆形、金属菱形)

双列直插(DIP)、扁平

针栅阵列(CPGA)、球栅阵列(CBGA)、小外形(SO)、芯片载体(LCC)

电路复杂度

数字电路: 50~500万门

模拟电路: 50~5000个晶体管

微处理器: 100~2.2亿个晶体管

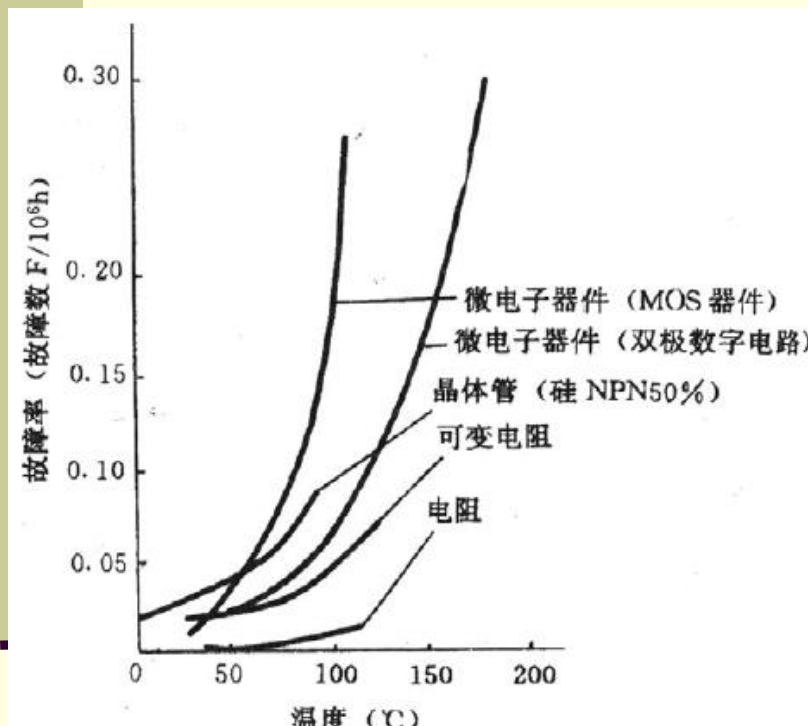
成熟类型:

符合相应标准或技术条件
质量尚未稳定

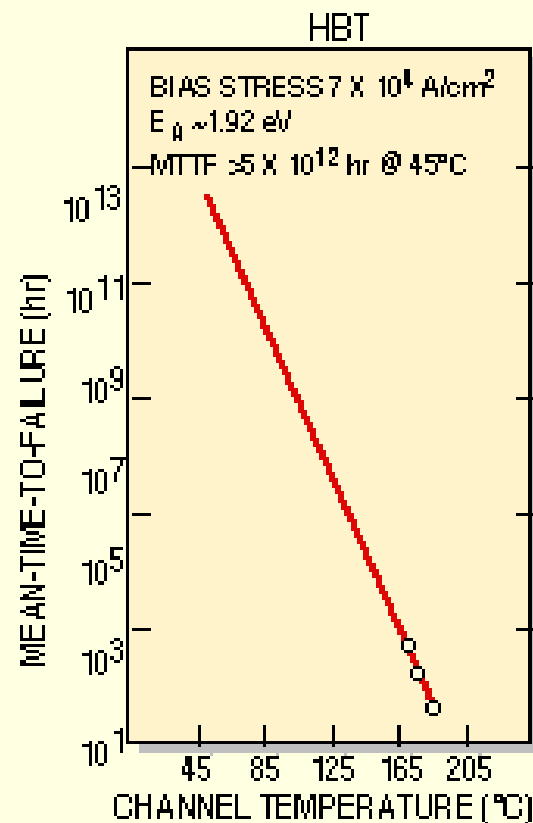
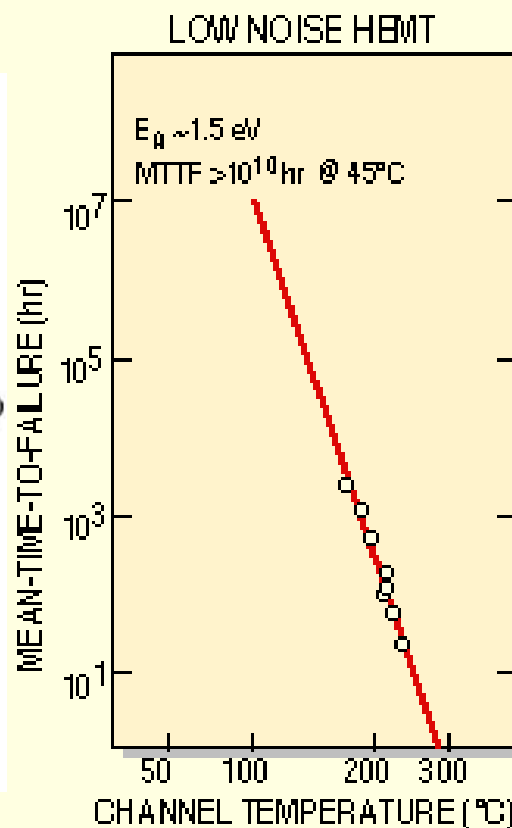
试制品或新投产的初批次

2.7.2 可靠性相关特性

失效率与芯片有源区温度的关系



硅器件的失效率与其有源区温度的关系



化合物半导体器件的MTTF与其有源区温度（即沟道温度）的关系

2.7.2 可靠性相关特性

芯片有源区温度

$$\text{失效率 } \lambda = K \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$$

K 是与元器件类型有关的常数, E_a 是激活能,
 $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 是玻尔兹曼常数, T 是芯片
有源区的绝对温度 (俗称结温)

- 有源区温度每上升 10°C , 多数元器件的失效率增加1倍 (10°C 规则, $E_a \approx 0.5\text{eV}$)
- 工作功率降低到额定功率的 $1/2$, 多数元器件失效率降低为额定失效率的 $1/4$
- 最高允许结温: 塑料封装 $125 \sim 150^\circ\text{C}$, 金属封装 $150 \sim 200^\circ\text{C}$, 化合物器件 $150 \sim 175^\circ\text{C}$)
- 硅塑料封装芯片
 - 可安全工作在 150°C 以下的有源区温度
 - 瞬时超过 150°C , 会产生隐性损伤
 - 超过 175°C , 即时失效

2.7.2 可靠性相关特性

决定芯片温度的因素

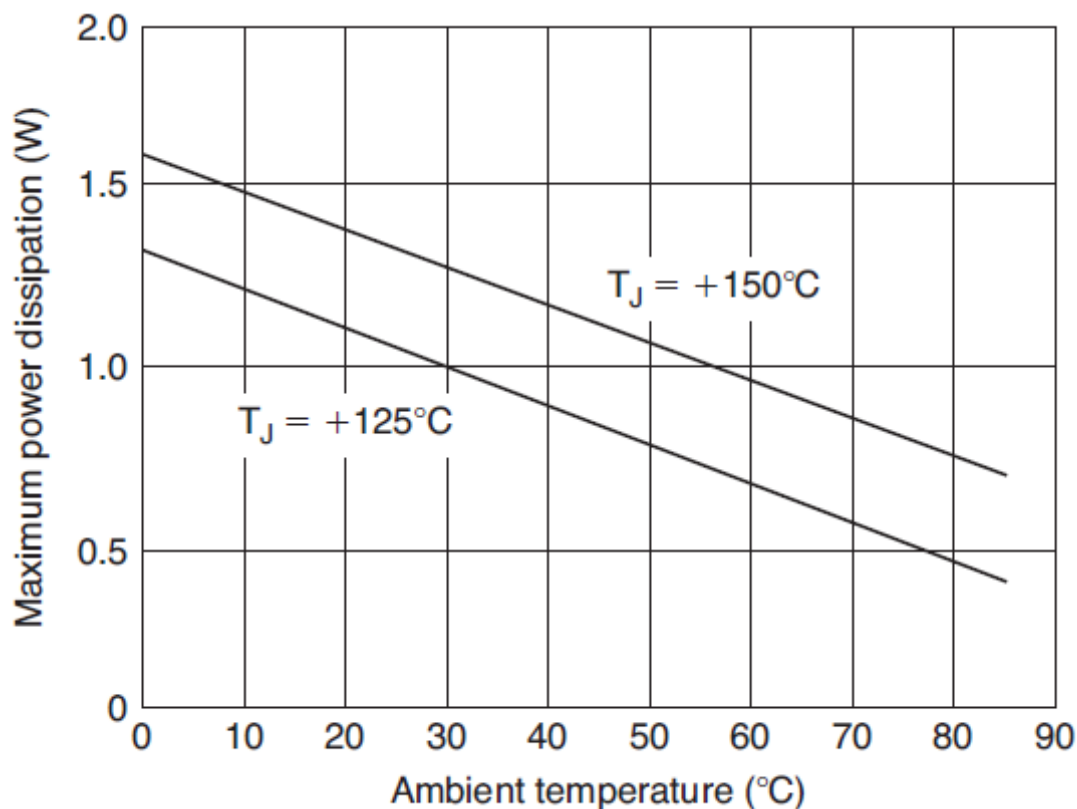
芯片有源区的温度

$$T = P_D \cdot R_\theta + T_A$$

要使芯片
温度 $T \downarrow$



- 热阻 $R_\theta \downarrow$
- 耗散功率 $P_D \downarrow$
- 环境温度 $T_A \downarrow$



当 $R_\theta=100^\circ\text{C}/\text{W}$, $P_D=1\text{W}$, 环境温度 $T_A=25^\circ\text{C}$ 时, $T=125^\circ\text{C}$

运算放大器AD8017AR的最大耗散功率与环境温度及最高允许结温的关系

2.7.2 可靠性相关特性

环境温度

降低结温方法1：尽量降低环境温度

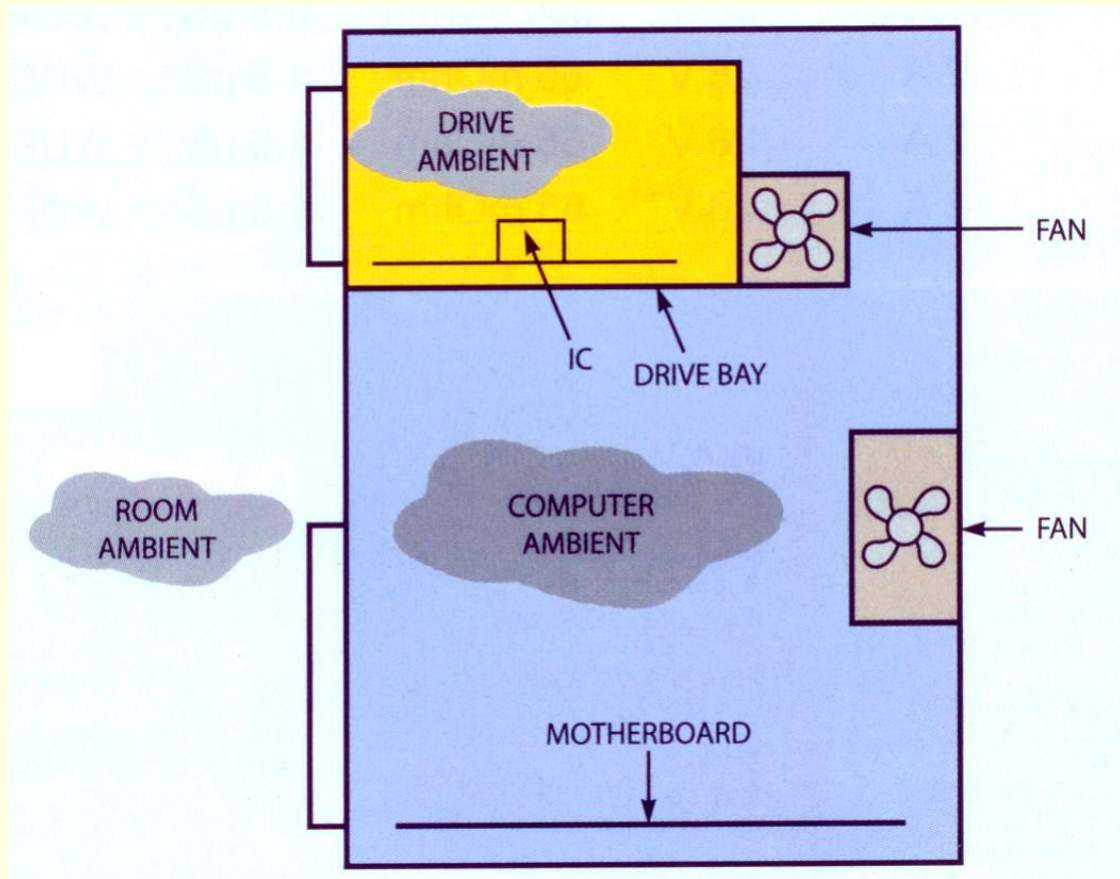
器件环境温度 \neq 室温

■ 实验室

- 空气25℃
- 工作台面50℃
- 工作台面上的芯片75℃

■ 沙漠中的汽车

- 白天环境温度46℃
- 车内空气温度82℃
- 仪表板表面温度111℃
- 车内元件温度82℃

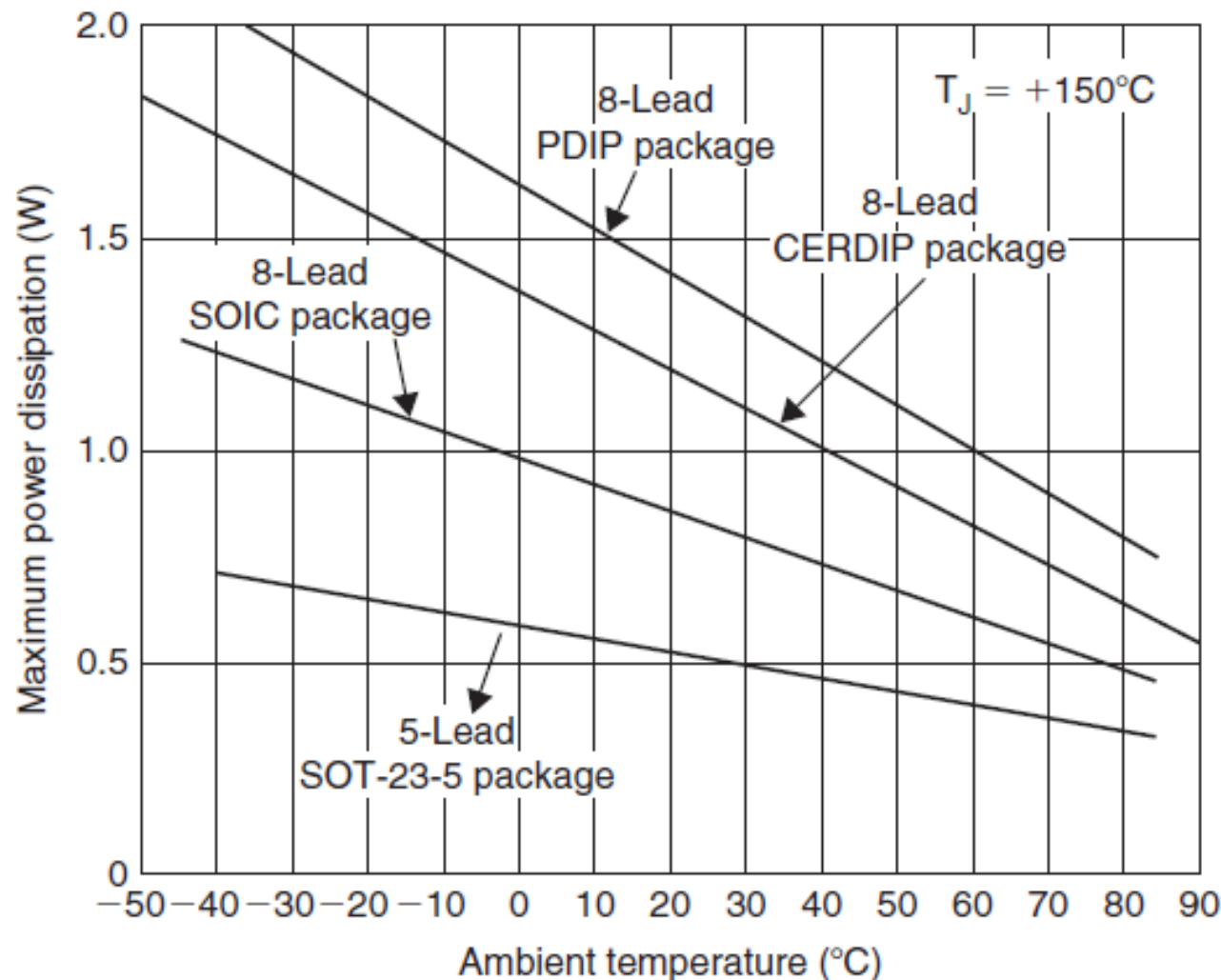


计算机中光驱内芯片的温度远高于环境温度

2.7.2 可靠性相关特性

封装-热阻关系

降低结温方法2：尽量采用低热阻的封装形式



同一芯片或者管脚数相同的同类芯片，若采用不同的封装形式，则具有不同的热阻，因此具有不同的允许最大功耗

在最大允许结温为 150°C 条件下，不同封装形式的同一型号运放（AD8001）的最大允许功耗与

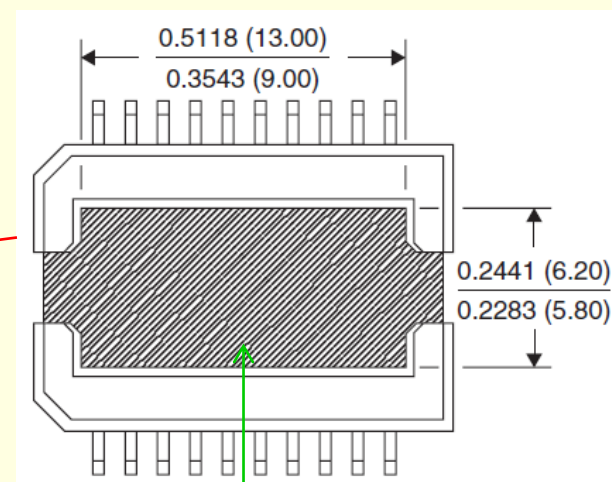
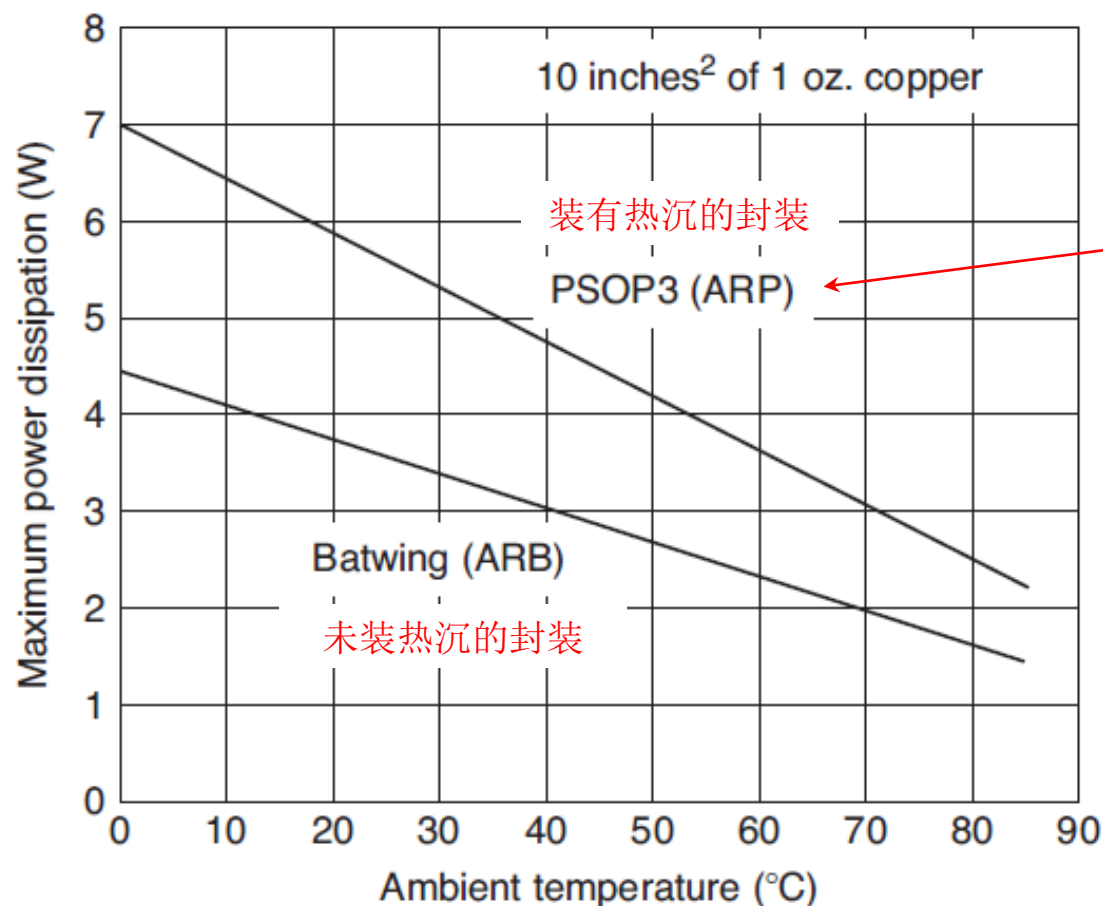


环境温度的关系

2.7.2 可靠性相关特性

热沉的作用

降低结温方法3：尽量采用带热沉或裸焊盘的封装



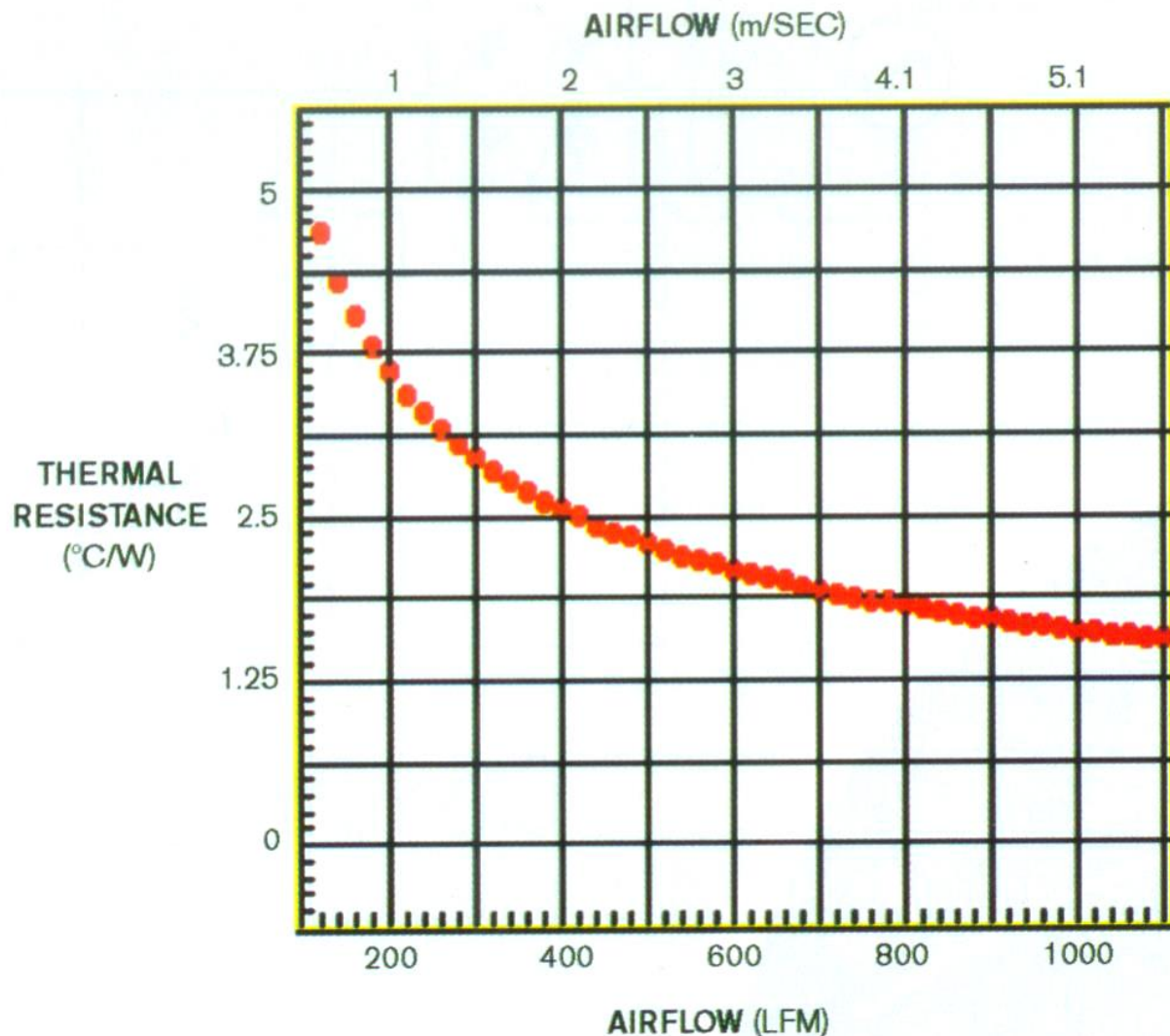
10平方英寸面积、1盎司厚的铜热沉(heat sink)，使热阻降为 $18^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ， 70°C 壳温下的最大允许功耗可达3W

AD8016ARP运算放大器最大耗散功率与环境温度的关系（最高允许结温 125°C ）

2.7.2 可靠性相关特性

风冷的作用

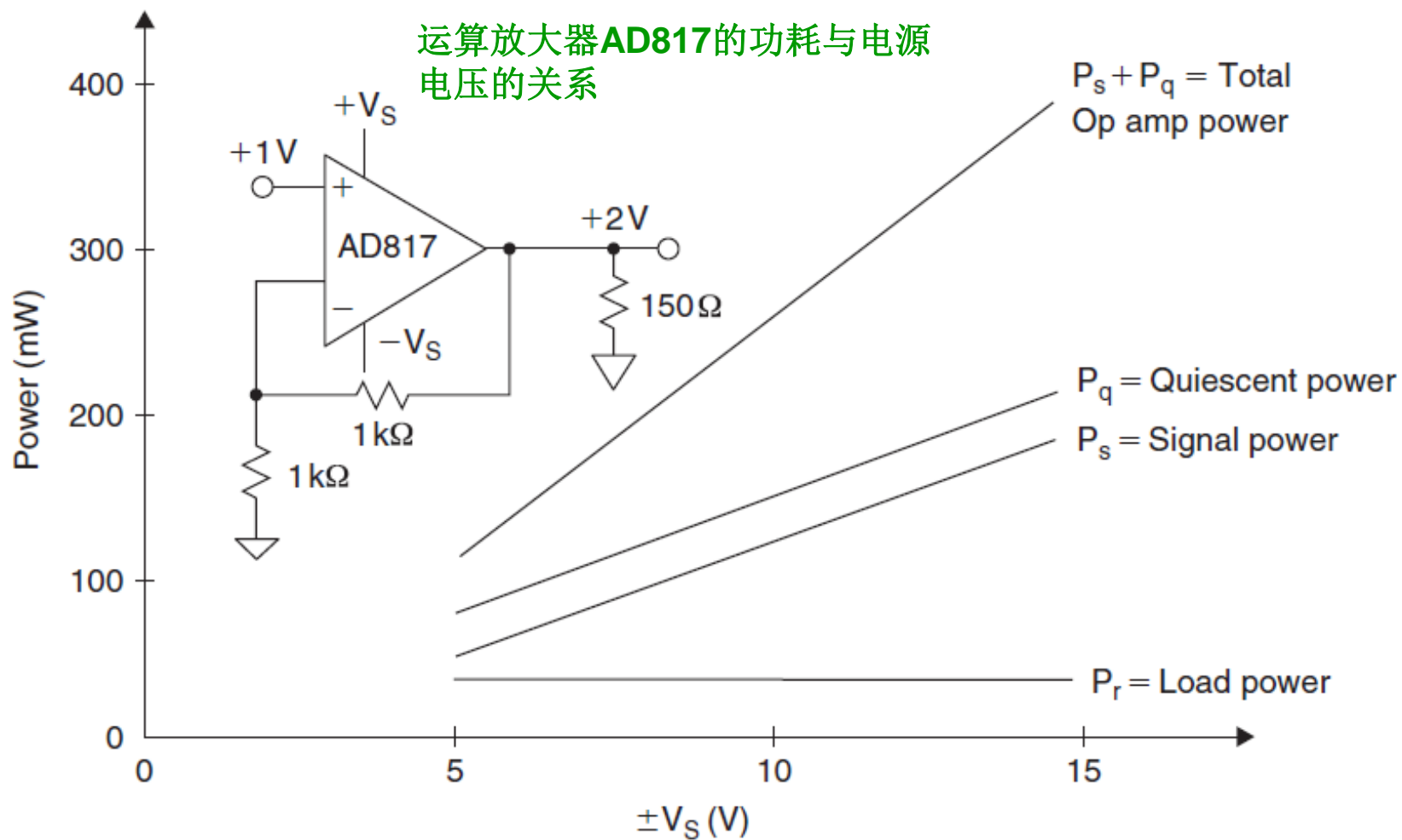
降低结温方法4：对功率达到数W级的器件，采用强制风冷



强制风冷时的风速-热阻关系。可见风速越大，热阻越小

2.7.2 可靠性相关特性

降低结温方法5：尽量采用低的电源电压

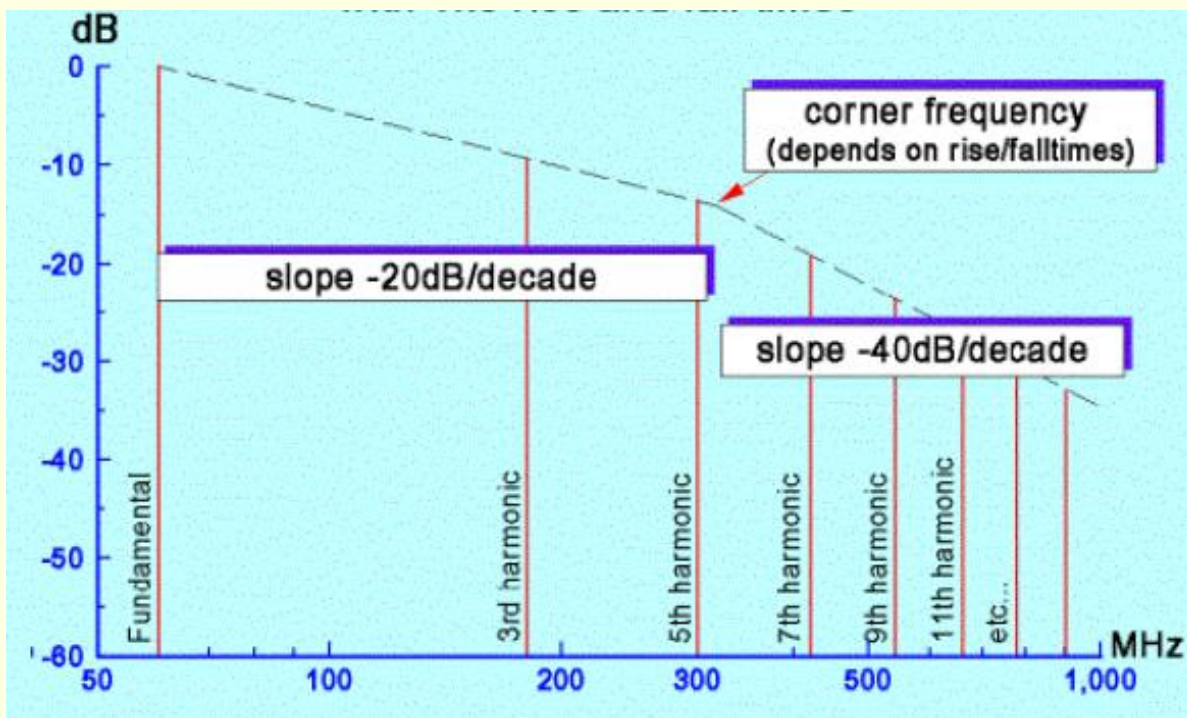


2.7.2 可靠性相关特性

时钟频率

降低结温方法6：数字电路尽量采用低的时钟频率

- 时钟频率越高，动态功耗越大，同时谐波频率及幅度也就越高，电磁发射能力越强，因此在满足技术指标要求的前提下，应选用最低的时钟频率
- 数字IC能用低速的就不用高速的，高速器件只用在关键的地方。如CMOS通用逻辑电路的选用次序为4000系列>HC系列>AC系列
- 数字电路的时钟频率最好为所选芯片允许的最高工作频率的1/2~1/3

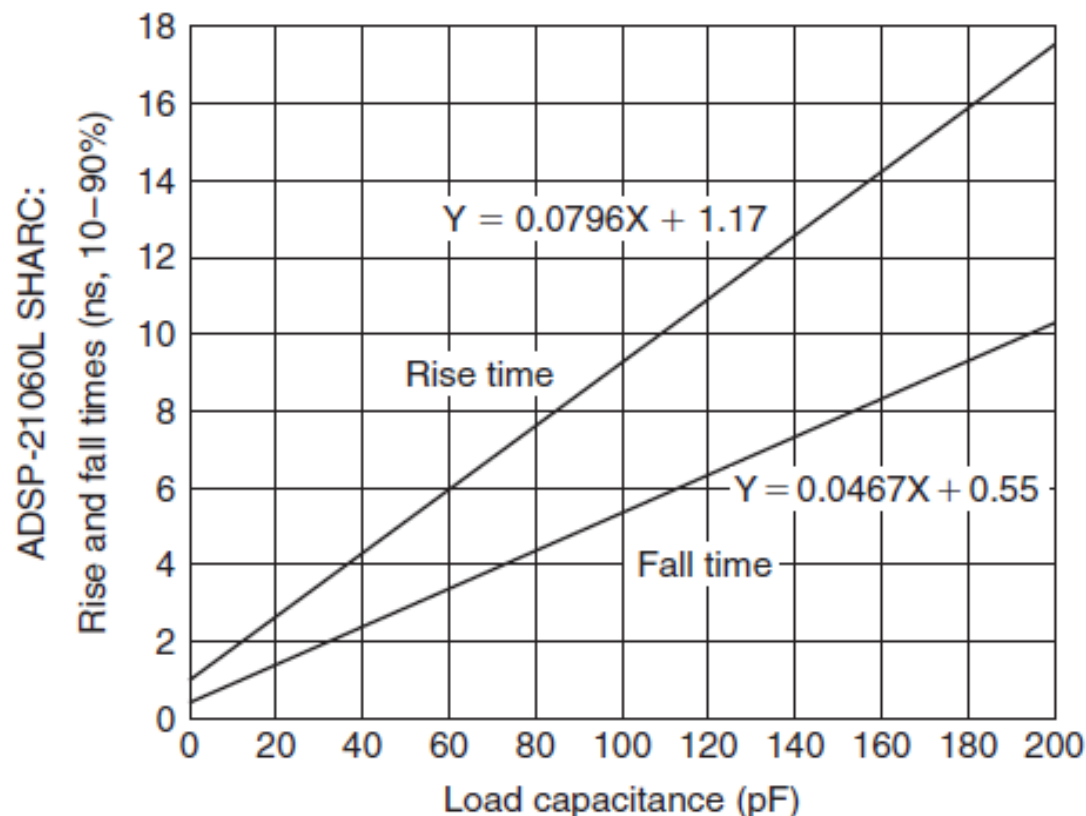


上升/下降时间为
1ns的理想60MHz
方波的频谱

2.7.2 可靠性相关特性

时钟边沿宽度

降低结温方法7：数字电路尽量采用窄的时钟边沿，但会影响电磁兼容性



- GaAs: 0.1 ns
- ECL: 0.75 ns
- ADI SHARC DSPs: 0.5 ns to 1 ns (operating on +3.3V supply)

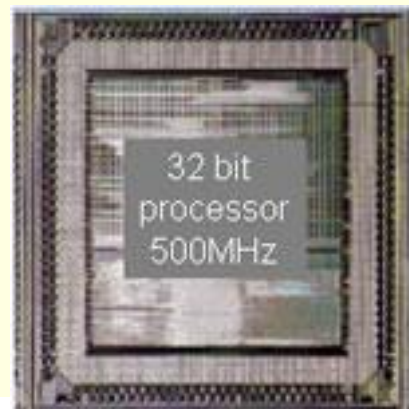
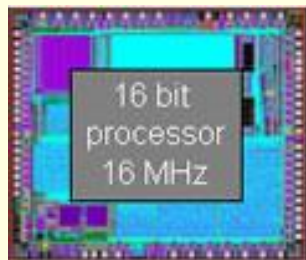
- 时钟上升和下降沿越窄，电路时延越短→速度越快，同时电源-地导通时间越短→开关功耗越小，但其谐波频率及幅度越高，电磁发射能力也越强（1ns的上升时间大约可产生大于300MHz的发射频率）
- 可通过选择不同类型的芯片及负载大小，来获得所需的信号延迟时间

上升时间与电磁发射频率(基波)的关系：

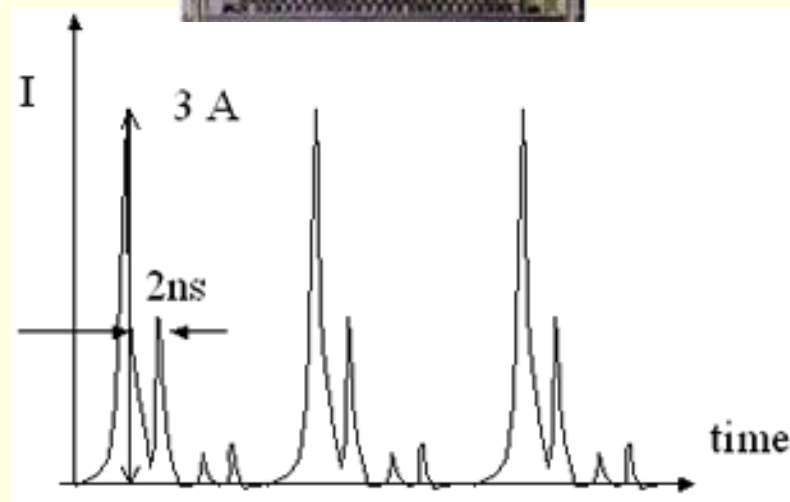
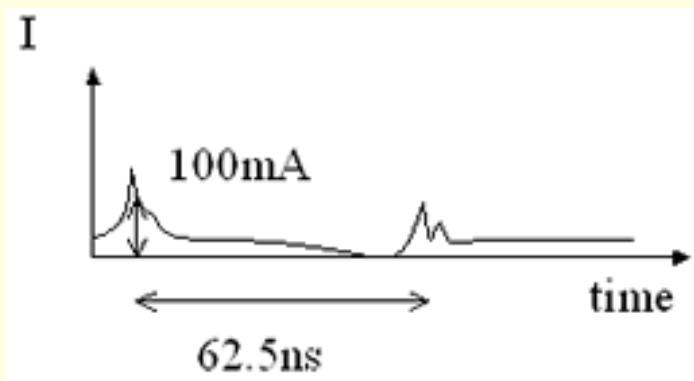
$$f_{EMI} = \frac{1}{\pi t_{rise}}$$

2.7.2 可靠性相关特性

降低结温方法8：尽量采用规模小的电路



电源
电流

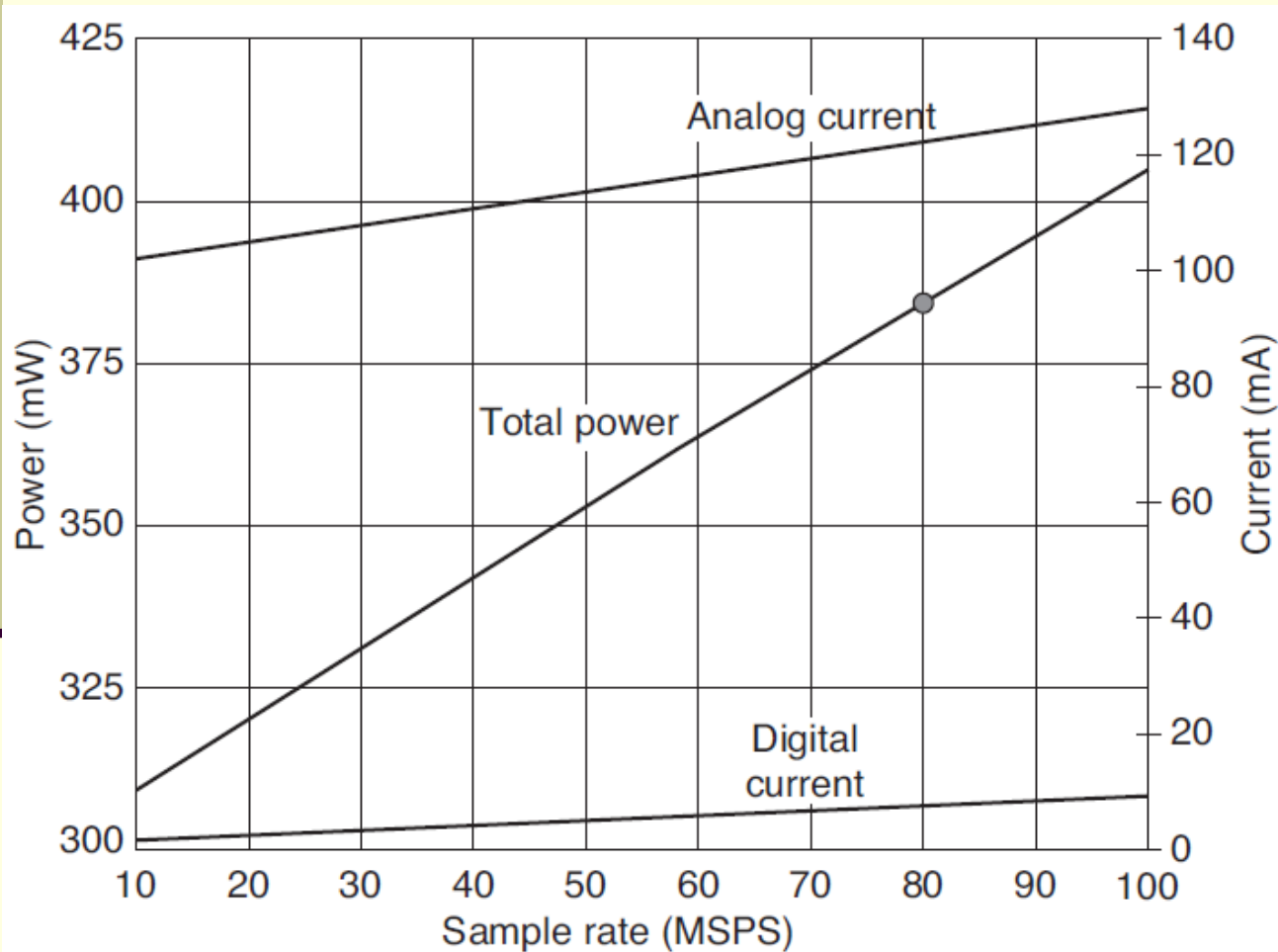


- 工作频率相同的条件下，集成规模越大，同时翻转的门数越多，则电源电流峰值越大，功耗就越大
- 集成规模相同的条件下，工作频率越高，浪涌脉冲越窄，所产生的电源电流浪涌效应越强烈

2.7.2 可靠性相关特性

采样速率

降低结温方法9：数据转换器尽量采用低的采样速率

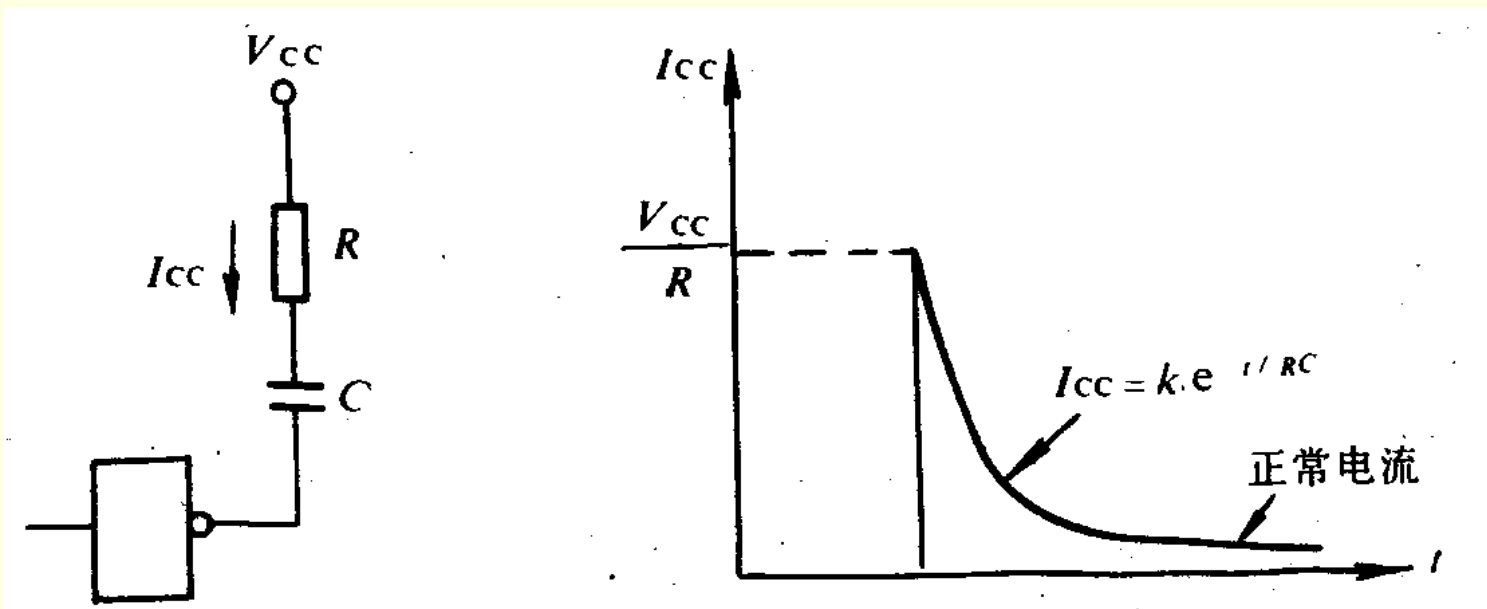


14位CMOS数模转换器AD9245的功耗及电源电流随采用速率的变化（测试条件：电源电压3V，模拟输入信号频率2.5MHz，输出负载5pF）

2.7.2 可靠性相关特性

负载大小

降低结温方法10：尽量降低负载（负载电流或负载电容越小越好）



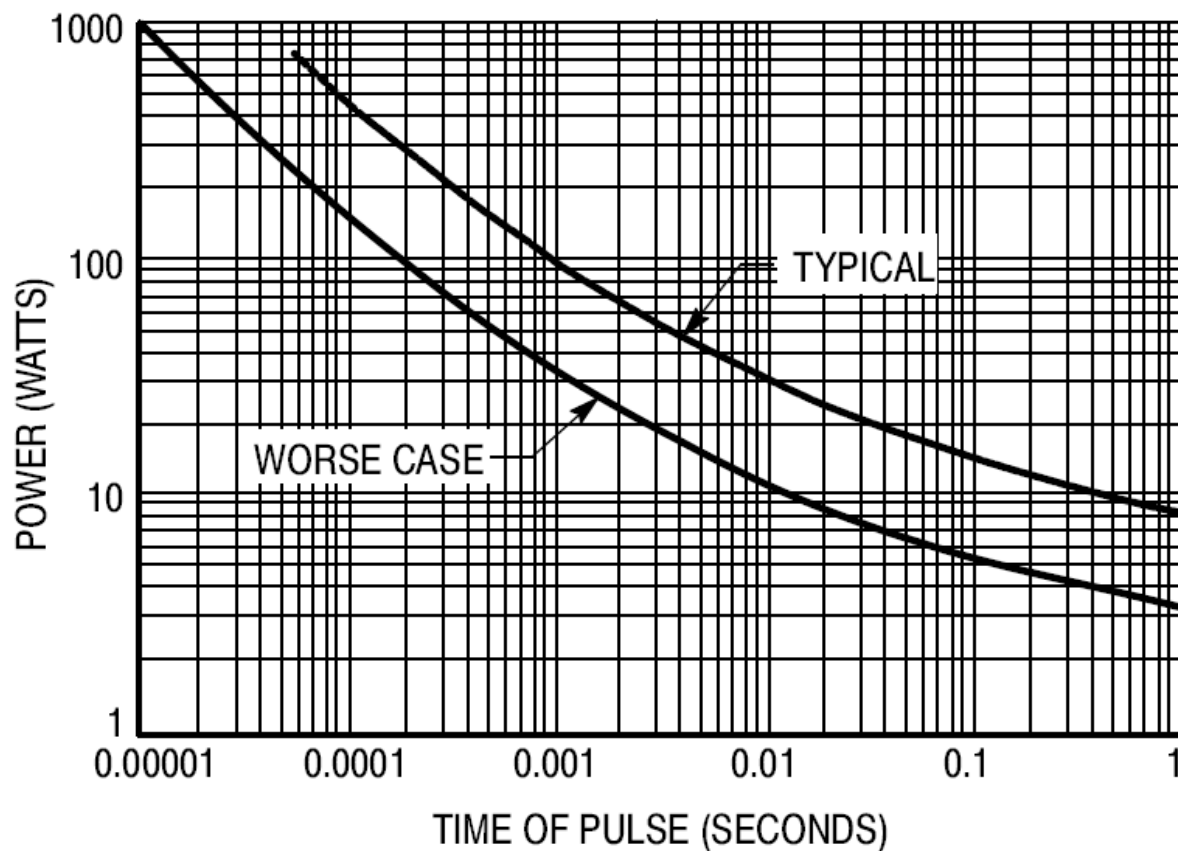
- 容性负载 C 越大，则驱动门的输出从高电平到低电平转换时形成的浪涌电流 $I=CdV/dt$ 越大，功耗越大，且有可能对驱动门产生破坏作用
- 应尽可能扩大驱动门的带负载能力（扇出尽可能大），同时尽可能降低负载量

2.7.2 可靠性相关特性

瞬态热阻

降低结温方法11：尽量降低功率脉冲的宽度

在脉冲工作条件下，结温与脉冲宽度有关。脉冲功率幅度一定的条件下，脉冲越宽，结温越高。这种情况下，器件的结温与功率的关系可以用瞬态热阻来表征



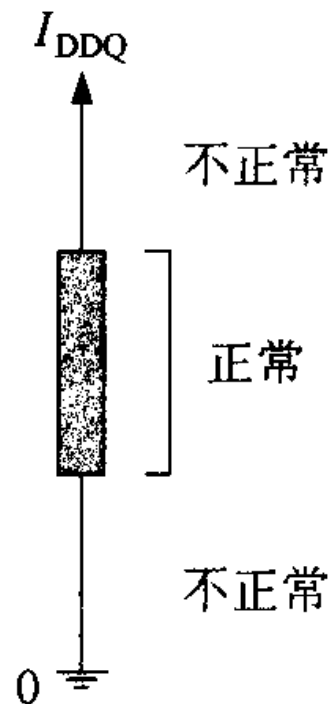
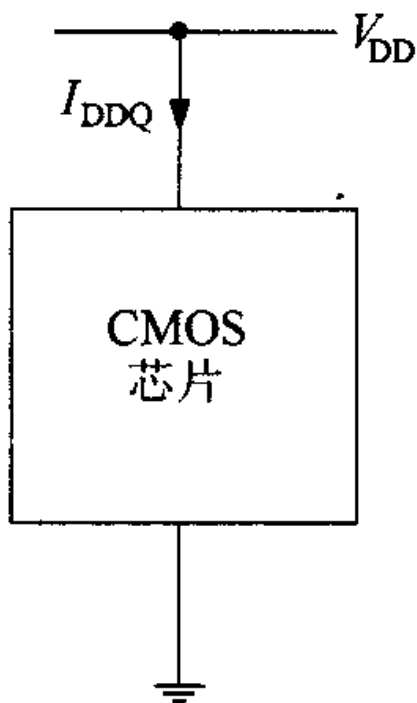
$$R_{\theta \text{瞬态}} = \frac{dT}{dP}$$

图为某器件能承受的最大脉冲功率幅度与脉冲宽度的关系，典型情况下，若器件能承受的最大结温为180~190℃，则脉冲宽度为10ms时能承受的功率为35W，脉冲宽度为1ms时能承受的功率可达90W。考虑最坏情况，则最大结温降至85~105℃

2.7.2 可靠性相关特性

静态工作电流

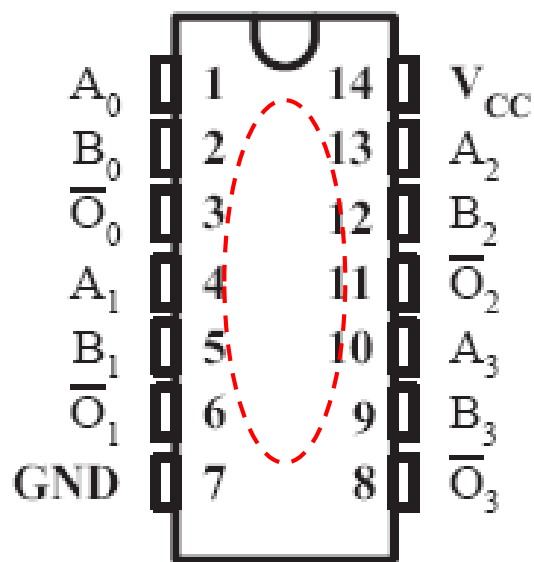
- I_{DDQ} 定义：CMOS 电路处于静态时，电源到地的电流
- I_{DDQ} 诊断： I_{DDQ} 值过大或过小，均意味着电路存在故障



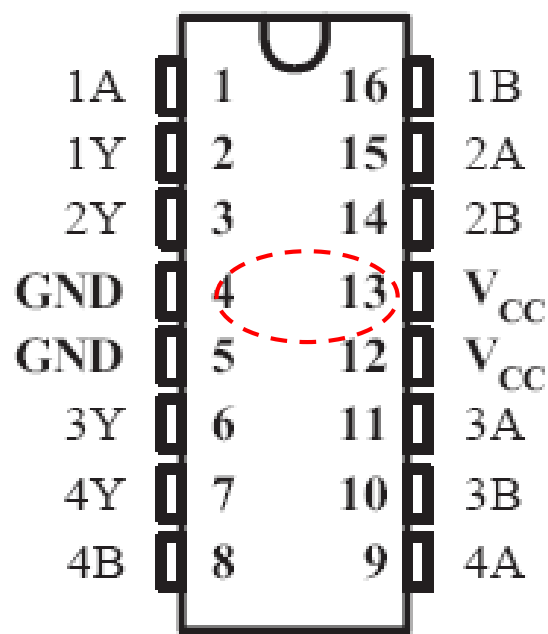
2.7.3 类型选用

管脚配置比较

采用封装的电源与地的引脚较近，或者具有多个电源及地线引脚，有利于加强电源与地之间的互感，同时减少因电源线和地线长度引起的自感



四2输入与非门

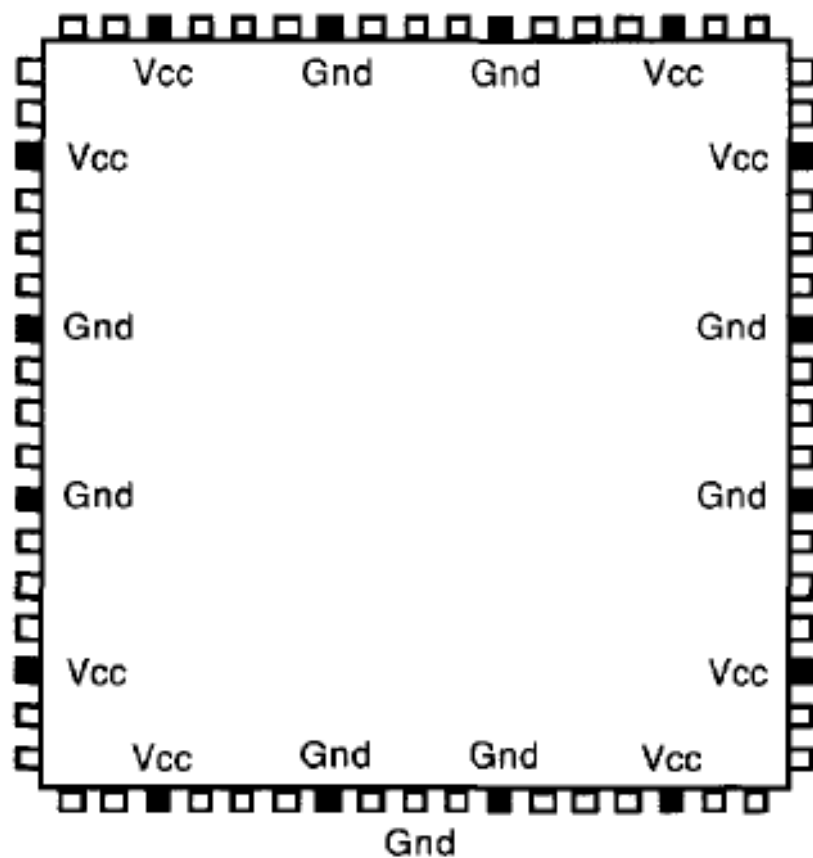


电磁兼容性差：型号为74AC00，早期产品，电源与地管脚少且相距甚远，环路面积大

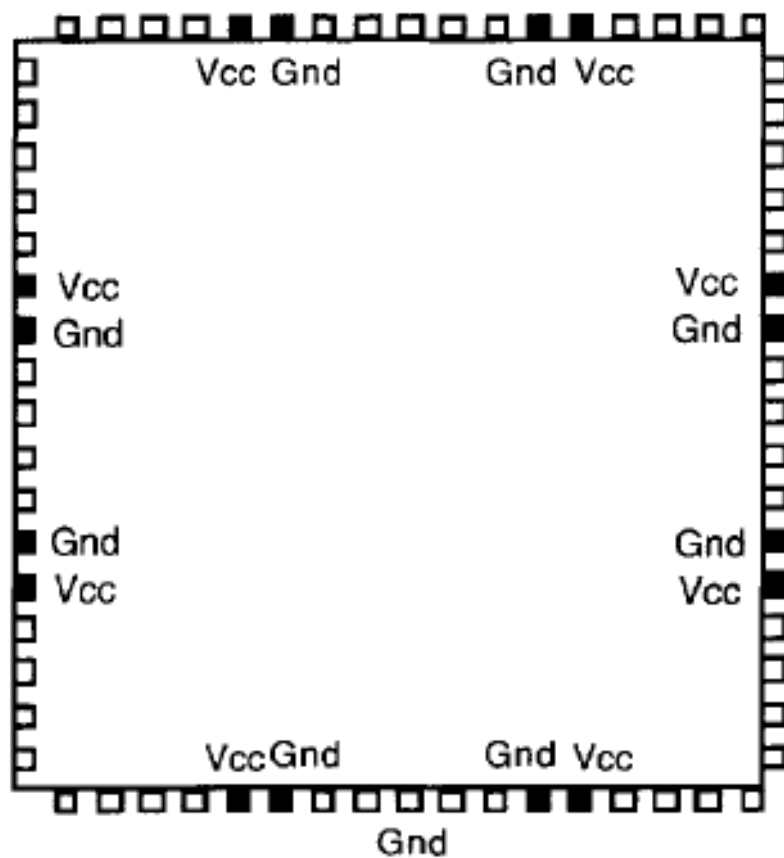
电磁兼容性好：74AC11000，改进产品，电源与地管脚增加且相邻，环路面积小

2.7.3 类型选用

管脚配置比较(续1)



Typical 68 pin PQFP configuration
power and ground

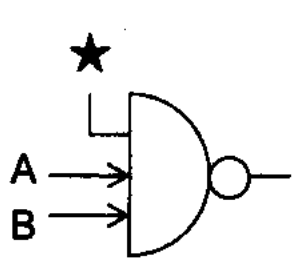


Optimal 68 pin PQFP configuration
power and ground

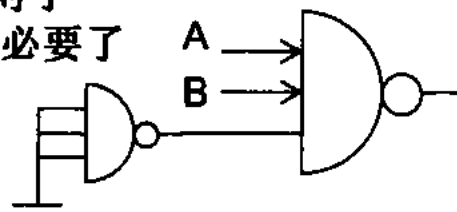
2.7.3 类型选用

CMOS 电路空置管脚的处理

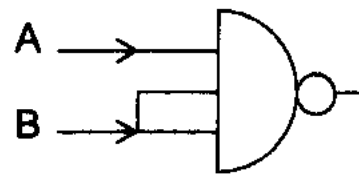
- 未使用的输入端（尤其是锁存器/触发器的输入端）不宜悬空，更不能接开路长线。悬空一会使电位不定，有可能破坏正常的逻辑关系；二易受外界噪声干扰，有可能使电路产生误动作；三有可能感应静电，导致栅极击穿
- 空置管脚应接适当节点，原则如下
 - 不影响电路逻辑功能（如与门、与非门的多余输入端接高电平；或门、或非门的多余输入端接低电平）
 - 尽量使闲置不用的门电路处于截止状态，以节省整机功耗
 - 尽量降低门电路的输入阻抗，以降低输入噪声的影响
- 实际接法
 - 通过上拉电阻接电源，或者通过下拉电阻接地，如果电源与地线噪声很低，则可直接接
 - 通过适当的逻辑门接低电平或者高电平
 - 如果电路的工作速度不高，功耗也无需特别考虑时，可将多余输入端与使用端并联



较差的做法



较好的做法



2.8 降额使用

什么是降额设计？

■ 降额设计的概念

- 降额设计是指有意识地将元器件工作是承受的热、电、机械等应力适当地降低到元器件本身指标规定的额定数值以下，从而提高其可靠性

■ 降额设计的作用

- 降额可以延长寿命，降低失效率，提高抵抗过应力的安全余量
- 电子产品的可靠性对其电应力和温度应力敏感，故降额设计的效果更为明显

■ 降额参数的选择

- **温度：**对于绝大多数元器件而言，其工作温度与失效率之间满足**10°C**法则，即工作温度每上升**10°C**,失效率近似地增大一倍。对于硅分立器件和集成电路，最大允许有源区温度（简称“结温”）是最重要的降额参数，其它降额参数（如功率、电流、电压、电流、频率等）也多是通过增加结温的方式来影响其可靠性
- **电压：**对于电容之类的工作在静电场内的元件，电压应力对其寿命影响较大（当工作电压接近电容的最大工作电压时，其失效率随电压的**5**次方增加；当电容的电压是额定值的一半时，其失效率要比额定电压时的失效率低**32**倍），因此工作电压是其最重要的降额参数
- **功率：**电阻的功率与其工作温度有一一对应的关系，因此通常使用功率作为电阻最重要的降额参数

2.8 降额使用

常用元器件的降额参数

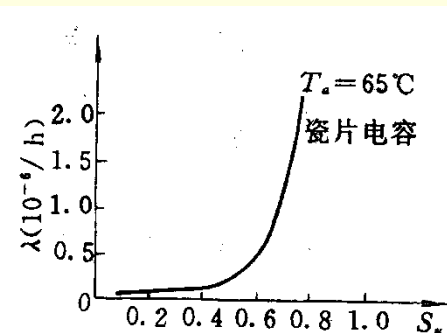
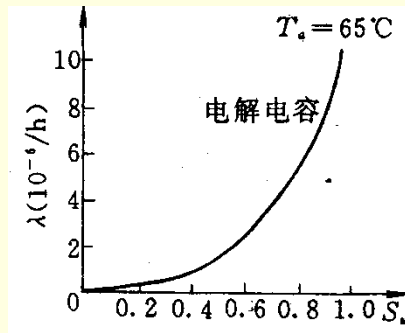
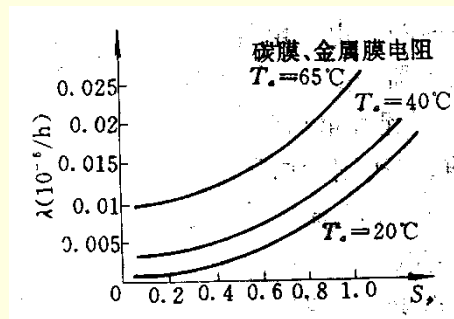
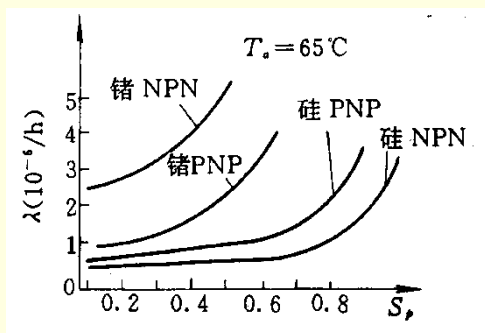
元器件类型	降额参数
模拟集成电路	电源电压、输入电压、输出电流、最大允许功率、最高允许结温*
数字集成电路	电源电压、输出电流、频率、扇出、最高允许结温*
晶体管	反向电压、电流、最大允许功率、最高允许结温*
二极管	反向电压、最大正向平均电流、最大允许功率、最高允许结温*
晶闸管	电压、平均通态电流、最高允许结温*
电阻器、电位器	电压、功率*、环境温度
电容器	直流工作电压*、环境温度
继电器	连续触点电流*、触点功率、振动、温度、工作寿命
开关	触点电流*、触点电压、功率
电连接器	工作电压、工作电流*、接插件最高温度
半导体光电器件	电压、电流、最高允许结温*
电感元件	热点温度*、电流、瞬态电压/电流、介质耐压、扼流圈电压
导线与电缆	应用电压和应用电流
白炽灯/保险丝/晶体	灯丝电压*/电流*/最低与最高温度*

*为对失效率下降起主要作用的关键降额参数

2.8 降额使用

降额因子的选择

- 降额因子亦称降额应力比或降额系数，是元器件工作应力与额定应力的比，表示为 $S < 1$
 - 电压降额因子： $S_V = V_{\text{实际}} / V_{\text{额定}}$
 - 电流降额因子： $S_I = I_{\text{实际}} / I_{\text{额定}}$
 - 功率降额因子： $S_P = P_{\text{实际}} / P_{\text{额定}}$
- 合理的降额因子应根据实验得到的降额因子与失效率比（使用失效率/额定失效率）之间的关系曲线来决定，同时也要考虑使用所要求的质量等级
- 由下图可见，失效率与降额因子的关系，晶体管和瓷介电容器近似为指数关系，电阻器和电解电容器近似为线性。对前者，降额因子值最好选在曲线的拐点，可以在可靠性改善和成本增加之间找到一个较好的折衷
- 对于不同的器件，最佳的降额因子值有可能不同，如对硅管0.5~0.6较好，对锗管0.3~0.4较好



2.8 降额使用

降额等级的选择

降额等级	可靠性改善程度	应用场合	典型应用场合	设备可维修性	尺寸、重量的增加及设计难度
I级	最大	设备失效将导致人员伤亡或装备与保障设施的严重破坏；设备有高可靠要求且采用新技术、新工艺的设计	宇航及导弹系统	无法维修或不宜维修	最大
II级	较大	设备失效将导致装备与保障设施的破坏；设备有高可靠要求且采用了某些专门设计	航空飞行设备	维修费用较高	较大
III级	中等	设备失效不会导致人员伤亡或装备与保障设施的破坏；设备采用成熟的标准设计	地面设备	可迅速、经济地维修	较小

GJB/Z35推荐的降额等级：

- 航天器与运载火箭：I级
- 战略导弹：I~II级
- 战术导弹系统、飞机与舰船系统、通信电子系统、武器与车辆系统：I~III级
- 地面保障设备：II~III级

2.8 降额使用

- 元器件降额应参考相关的标准手册，根据元器件标称的性能指标和整机的使用要求，以及允许的重量、空间、成本等约束条件，合理地确定降额参数、降额等级和降额因子的值
 - 中国：GJB/Z35《元器件降额准则》（详见附录A3.1）
 - 美国：罗姆空军发展中心《元器件可靠性降额准则》（详见附录A3.2）
 - 欧洲：欧洲空间局《电子元件降额要求和应用准则》
- 降额应注意的问题
 - 每种元器件都有其最佳的降额范围,在此范围内工作应力的变化对其失效率有较明显的影响,在设计上也较容易实现,并且不会在设备体积,重量和成本方面付出过大的代价。过度的降额并无益处，会使元器件的特性发生变化或导致元器件数量不必要的增加或无法找到适合的元器件，反而对设备的正常工作和可靠性不利。因此，降额设计时应在可靠性、经济性、体积、重量、设计难度中进行权衡
 - 某些元器件的某些参数不能降额应用，有些元器件降额应用反而降低可靠性

2.8 降额使用

降额不能过度

■ 降额过度的后果

- 增加了整机的成本、体积和重量
- 增加了设计难度
- 减少了电路的动态范围
- 引入 新的失效机理

■ 降额不当的实例

- 功率双极晶体管：电流降额过度使 h_{FE} 显著下降
- 塑料封装器件：功率降额过度，由于发热量过低而不能驱散吸进的湿气，反而会缩短寿命
- 电子管：灯丝电压降额过度使阴极温度过低，表面杂质吸附严重，也会缩短电子管的寿命
- 继电器：线圈吸合电压降额可能影响吸合的可靠性

END

第2章 电子元器件的可靠性 选用

主讲：庄奕琪