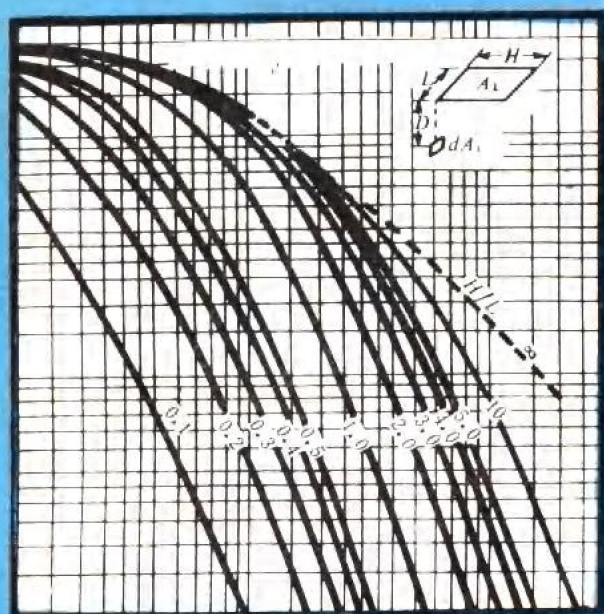


● 高等学校教学用书



电子元器件及仪器的 热控制技术

邱海平

电子工业出版社

内 容 简 介

本书提供有关电子仪器和元器件的热分析和热控制的完整论述,广泛参考了国外近年来在电子仪器传热方面的最新论著,反映了当前国际上在这方面研究的现代新发展。书中汇集了最新的技术资料,内容新颖,实用性强。本书的出版将有助于推进我国在这方面的研究,可作为高等院校有关专业的教学参考书,也可供有关工程技术人员参考。

本书内容分为二十二章,是专门结合电子热控制问题展开论述的。如:第一、二章介绍了热系统设计的要求、热环境、元件的热特性、热控制技术及其应用范围;第三章~第十一章介绍了固体接触热阻、紧凑式换热器、空气控制;第十二章~第十八章介绍了直接空气冷却、浸没冷却、热电控温器、相变控温器等;第十九章~第二十二章针对电子系统的应用介绍了惯性导航系统、晶体管、微波设备、微电子技术和印制电路板。

电子元器件及仪器的热控制技术

邱海平 编著
责任编辑:张荣琴

*

电子工业出版社出版(北京市万寿路)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国科学院印刷厂印刷
开本:787×1092毫米1/16 印张:22.75 字数:590千字
1991年3月第1版 1991年3月第1次印刷
印数:1000册 定价:6.00元
ISBN7-5053-1192-1/TN 349

前 言

电子系统已广泛而深入地遍及现代化的各个角落,从日常生活中的电视机、缝纫机、洗衣机等到生产过程自动化直至航天飞机的控制系统。这些设备的可靠性对于人们的安全和舒适是极端重要的。如果一台电视机的晶体管坏了,只能带来小小的不便,然而,由于控制系统过热而导致的事故就有可能造成重大的生产停顿、设备的损坏和人身的伤害。

在过去的一、二十年间,电子技术的进步实现了元件大规模集成的微小型化,使其复杂程度和功能以惊人的速度增长着。电子元(组)件单位容积的耗损功率已能与压水反应堆的量级相比拟,使许多电子系统中的温度急剧上升,从而强化了在组件内由热驱使的机械的、化学的和电的相互作用。实验证明,元件的失效率与其结温成指数关系,功能则与其结温成反比。所以,在整个设计和鉴定过程中,高性能应用的微电子封装技术越来越取决于作为基本要素的热控制设计。此外,如相控阵天线、微波器件和高速存贮器等的电子组件,已不是原来意义上的冷却问题了,而是要求精确的恒温控制。实际上,现有的热控制技术已限制了现代电子技术的发展,迫切要求发挥现有热控制技术的潜力,并力争有所发现有所突破。尽管如此,现代电子技术的迅猛发展还是可以追溯到热控制技术的不断进步。电子系统的热控制方案的选择,对电子系统或元器件的可靠性和成本都具有深远的影响。

如果实验室样机能成功地变成大量生产的产品,那么产品初样阶段的合理的热设计是必不可少的。不充分注意热控制设计就有可能导致在失效前短暂的、不稳定的平均无故障工作时间,无法满足用户的技术要求,以及过多的更换和维修费用。当然,过分的热控制措施也会造成产品笨重和成本过高。这些看法已为工业界和科技界普遍接受。在高速发展着的现代电子技术的今天,使现代热控制概念和设计方法的迅速传播和应用无疑已迫在眉睫,但在国内还缺乏系统地叙述电子仪器热控制方面的专著,本书正是为迎接现代电子技术的新高涨而编写。

本书的取材主要参考了美国有关电子仪器热控制方面的最新论著[1—6],反映了电子热控制技术的现代新发展。本书的内容分为四个部分:第一篇为“电子仪器设计的热考虑”;第二篇是“传热学和流体力学基础”;第三篇是“热控制技术”;第四篇是“电子系统应用”。

作为一个整体,本书提供了有关电子仪器的热分析和热控制的完整论述,并给出了确定可运用的热控制技术的变化范围和限制,以及制订较先进的技术性能方案所需要的方法。本书采用循序渐进的编列方式,首先详尽说明了电子系统热控制问题及其解决的物理意义和限制,然后解释电子元件热耗散的热学机理,有了这些基础,才能讨论为各种热控制系统适用的数学模型和经验关系式的原理,并制订以数学形式为依据的相应热优化方案,最后介绍热控制技术应用用于诸如微波设备、惯性导航系统等各种电子系统,以及印制电路板的微电子技术。

本书可供电气和电子专业作为基础课程用书,除了着重讨论近代电子系统热控制的实际问题外,也注意了问题的物理解释和数学处理。书中没有提供专用的计算机程序,不过有了以上基础,计算机程序的编制还是比较容易的。

我国已用国际单位制作为基本单位制,美国正向国际单位制过渡,英制仍在工业中沿用,这势必影响到我国的技术引进。基于这一考虑,书中有个别章节暂且保留了英制单位作为参考。

本书的编写时间比较仓促,不足和错误在所难免,敬请读者批评指正。

序

人类社会正面临着向号称“信息时代”的21世纪过渡。电子元器件的应用已日益渗进人们日常生活的作息环境，不仅电视机、计算机、监视器等正在逐步普及，就连办公室的全盘电子化也提上了日程。电子技术的不断进展，使元件微型化和组件高度密集化。大规模和超大规模的集成电路达到了在一个基片上设置一百多万个门电路，以致运行时每单位体积的发热率发展到甚至超过了大型电站锅炉炽热炉膛内的发热率，拟议中的多层封装技术还将使这种单位体积发热率继续增大。与此同时，微电子器件的失效率却随工作温度的升高而急剧增加。常用半导体器件的最高工作温度不容许超过 100°C ，成为今后组件进一步密集化发展中所必须克服的“热障”难题。电子器件的冷却推动了国际传热学界加紧探索高热负荷 ($10^6 \sim 10^7 \text{W}/\text{cm}^2$ 数量级)、又是小温差下的冷却新技术，这对电子仪器和元器件的热分析和热控制方案的设计研究具有关键性的指导意义。

邱海平同志长期从事温控和电子仪器设备的热控制设计研究，结合工作需要搜集了不少电子元器件传热方面的文献和技术资料，系统地整编成本书，内容新颖，针对性强，且有许多精辟的见解，可供相关的专业技术工作者实际参考，当然也适合于高等院校电子类专业作为专题选修课的教学用书。在这全稿付印之际爰书数语，算是简略的介绍。

王补宣

1990年3月于清华大学

基本符号表

α	R_e 数中物性组合函数, 式(5.70)
A	截面面积, 单位 m^2
b	温度系数, 式(3.28), 单位 $^{\circ}\text{C}^{-1}$
b	翅片高度, 图13.2, 单位 m
Bi	Biot数, 4.2节, 单位 无量纲
C	比热, 单位 $\text{J/kg}^{\circ}\text{C}$
c	光速, 式(6.1), 单位 m/s
C	热容, 单位 $\text{J/}^{\circ}\text{C}$
	摩擦系数, 式(5.36), 单位 无量纲 浓度, 式(7.1), 单位 kg/m^3
d	直径, 单位 m
D	扩散系数, 式(7.1), 单位 m^2/s
D_b	汽泡脱离直径, 式(7.25), 单位 m
D_e	当量直径, 式(5.4), 单位 m
e	风机效率, 式(10.9), 单位 无量纲 粗糙度, 式(11.8), 单位 m
E	辐射功率, 式(6.5), 单位 W/m^2
	电动势, 式(17.1), 单位 V
f	摩擦系数, 式(5.49), 单位 无量纲 汽泡脱离频率, 式(7.26), 单位 s^{-1}
F	辐射形状系数, 式(6.14a), 单位 无量纲
	摩擦系数, 式(16.4), 单位 N/Wm^2
F_o	傅里叶数, 式(4.27)
g	重力加速度, 单位 m/s^2
g_c	换算系数, 式(7.29), 单位 kgm/Ns^2
G	投射辐射, 式(6.19), 单位 W/m^2
Gr	葛拉晓夫数, 式(5.67)
h	换热系数, 单位 $\text{W/m}^2^{\circ}\text{C}$
	普朗克常数, $6.624 \times 10^{-27} \text{erg} \cdot \text{s}$
h_c	接触系数, 式(8.1), 单位 $\text{W/m}^2^{\circ}\text{C}$
h_D	传质系数, 式(7.11), 单位 m/h
h_{fg}	汽化潜热, 式(7.22), 单位 J/kg
h_r	辐射换热系数, 单位 $\text{W/m}^2^{\circ}\text{C}$
H	水力损失高度, 式(10.2), 单位 $\text{cm-H}_2\text{O}$
$i(I)$	辐射强度, 式(6.11), 单位 $\text{W/m}^2\text{Sr}$
	电流, 单位 A
j	传热因数, 式(9.9)

J	有效辐射, 式(6.19), 单位 W/m^2
k	导热系数, 单位 $W/m^{\circ}C$ 波尔兹曼常数, $1.380 \times 10^{-16} \text{ erg/K}$
K	热导, 单位 $W/^{\circ}C$ 管芯渗透率, 式(16.4), 单位 m^2
$l(L)$	长度, 单位 m
L	刘易士数, 式(7.19)
m	质量 单位 kg
$\dot{m}$	质量流量, 式(7.1), 单位 kg/s
M	分子量, 式(7.3)
M_o	Mouromtseff数, 式(21.4)
n	转速, 式(10.13), 单位 min^{-1}
n_s	比转速, 式(10.16)
N_{tu}	传热单元数, 式(9.19)
Nu	努塞尔数, 式(5.34)
p	压力, 单位 N/m^2
P	功率, 单位 W 润湿周长, 式(5.4), 单位 m
Pr	普朗特数, 式(5.30)
q	热流, 单位 W 或 W/m^2
Q	热量或热流, 单位 W 容积流量, 式(10.9), 单位 ft^3/min
r	半径, 单位 m
R	热阻, 单位 $^{\circ}C/W$
R_o	气体普适常数, 8314.41 J/kmolK
Ra	雷莱数, 式(5.69)
Re	雷诺数, 式(5.3)
s	间距或节距, 单位 m
S	熵, 单位 $J/^{\circ}C$ 传热表面面积, 单位 m^2
Sh	薛伍德数, 式(7.15)
St	斯坦顿数, 式(5.38)
t	时间, 单位 h 或 s 温度, 单位 $^{\circ}C$
T	温度, 单位 $^{\circ}C$ 或 K
u	速度, 单位 m/s
u_{∞}	自由流速度, 式(5.3), 单位 m/s
U	总传热系数, 式(3.26), 单位 $W/m^2^{\circ}C$ 内能, 单位 J

	管道平均流速, 单位 m/s
v	流速, 单位 m/s 比容, 单位 ft^3/lb
V	体积, 单位 m^3
W	质量流量, 单位 kg/h
Y_o	翅片特性导纳, 单位 $\text{W}/^\circ\text{C}$
z	品质因数, 式(17.27), 单位 $^\circ\text{C}^{-1}$
Z_o	翅片特性阻抗, 式(13.24), 单位 $^\circ\text{C}/\text{W}$
α	热扩散系数, 式(3.6), 单位 m^2/s 吸收率, 式(6.2), 无量纲 塞贝克系数, 式(17.1), 单位 $\text{V}/^\circ\text{C}$
β	体积膨胀系数, 单位 K^{-1}
γ	比热比, C_p/C_v , 无量纲
Γ	热传输矩阵, 式(13.28)
δ	速度边界层厚度, 式(5.5), 单位 m 翅片厚度, 式(13.3), 单位 m
δ_t	热边界层厚度, 单位 m
ϵ	辐射率或辐射系数, 式(6.7), 无量纲
ϵ	换热器效率, 式(9.18)
ξ	比值 δ_t/δ
η	翅片效率, 式(13.4), 无量纲 性能系数, 式(17.30), 无量纲
η_w	加权通道效率, 式(9.14), 无量纲
θ	过余温度, 单位 $^\circ\text{C}$ 无量纲温度, 无量纲
λ	失效率, 式(2.8), 无量纲 波长, 式(6.1), 单位 μm 汽化潜热, 式(16.4), 单位 J/kg
μ	动力粘度, 式(5.2), 单位 kg/ms
ν	运动粘度, 式(5.3), 单位 m^2/s 电磁波频率, 式(6.1), 单位 s^{-1}
ξ	局部阻力损失系数, 式(10.7), 无量纲
π	珀尔帖系数, 式(17.4), 单位 V
ρ	密度, 单位 kg/m^3 反射率, 式(6.2)
σ	斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $5.668 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$ 表面张力, 式(7.21), 单位 N/m 均方根粗糙度, 式(8.5), 单位 μm 汤姆逊系数, 式(17.5), 单位 $\text{V}/^\circ\text{C}$

τ	流体切应力, 式(5.2), 单位 N/m^2
	穿透率, 式(6.2), 无量纲
ϕ	角度, 单位 度或弧度
ω	立体角, 单位 Sr

下标

a	平均
b	黑体, 或截面平均, 或汽泡
c	冷流体, 或对流, 或收缩效应
c_r	临界状态
f	翅片, 或流体, 或膜温
g	气体,
h	热状态, 或水平
l	液体, 或纵向
m	平均值, 或中间值
$\max$	最大值
$\min$	最小值
n	法向
net	净值
0	初始状态, 或管子的轴线
r	辐射, 或半径方向
s	表面, 或环境
sat	饱和状态
$t(T)$	热状态, 或横向
T	总体
v	蒸汽, 或汽相, 或等容
W	壁面
∞	自由流, 或主流

部分单位换算

1ft	$=30.48\text{cm}$
1ft^2	$=0.092903\text{m}^2$
1ft^3	$=28.32\text{L}$
1ft^4	$=863097\text{cm}^4$
1b	$=0.453592\text{kg}$
$1''$	$=1\text{in}=25.4\text{mm}$
1mmHg	$=9.806\text{Pa}$
1mil	$=0.0254\text{mm}$

$$1^{\circ}\text{R}=(9/5)\text{K}$$

$$1\text{Psi}=4894.7\times 10^3\text{Pa}$$

$$1\text{ erg}=10^{-7}\text{J}$$

$$1\text{Btu}=1055.1\text{J}$$

$$1\text{Cal}=4.186\text{J}$$

目 录

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 热系统设计的要求	1
1.3 热环境	4
1.4 元件的热特性	6
1.5 热控制技术	9
1.6 热设计原则	10
第二章 可靠性	12
2.1 引言	12
2.2 概率、可靠性和失效率	12
2.3 可修复和不可修复实验	13
2.4 平均无故障工作时间	14
2.5 系统的可靠性	15
2.6 混联系统	17
2.7 失效率与元件温度	18
第三章 稳定热传导	19
3.1 引言	19
3.2 热传导微分方程	19
3.3 没有内热源的简单形状	22
3.4 电热模拟	24
3.5 有内热源的简单形状	25
3.6 没有内热源的复合形状	26
3.7 总传热系数	28
3.8 变导热系数	30
3.9 二维稳定热传导的分析法	31
3.10 保角变换.....	33
3.11 由分立热源产生的收缩效应.....	36
3.12 电子仪器常用材料的导热系数.....	38
第四章 不稳定热传导	40
4.1 引言	40
4.2 集总热容系统	40
4.3 受到各种形式热输入作用的小元件	43

4.4	经典(分析)法	46
4.5	模拟法	53
4.6	数值分析法	55
4.7	图解分析法	61
4.8	各种计算方法的比较	61
第五章	对流换热	64
5.1	引言	64
5.2	流体力学的基本概念	64
5.3	对流换热系数	67
5.4	强制对流换热和经验关系式	74
5.5	自然对流	79
5.6	空气的热物性	83
第六章	辐射换热	84
6.1	引言	84
6.2	热辐射的基本概念	84
6.3	普朗克定律	86
6.4	斯蒂芬—玻尔兹曼定律	87
6.5	辐射率和吸收率的关系	88
6.6	发射辐射的方向性	89
6.7	黑体间的辐射换热	90
6.8	形状系数的代数学	94
6.9	非黑体之间的辐射换热	95
6.10	辐射换热的网络法	96
6.11	两个表面之间辐射换热的特例	98
6.12	辐射遮热板	99
第七章	有相变的对流换热	100
7.1	引言	100
7.2	物质的热力学性质	100
7.3	质量传递和蒸发	101
7.4	沸腾	105
7.5	冷凝	111
第八章	接触热阻	117
8.1	引言	117
8.2	简化模型	117
8.3	接触表面的几何结构	118
8.4	名义上平的粗糙固体表面	119
8.5	真空中光滑的波状表面	121
8.6	真空中名义上平的粗糙表面	121
8.7	真空中粗糙的波状表面	123

8.8	填隙流体的影响	123
8.9	利用金属镀层强化接触系数	126
第九章	紧凑式换热器	128
9.1	引言	128
9.2	换热器的种类	128
9.3	传热和流动阻力特性	136
9.4	翅片和总通道效率	138
9.5	总传热系数	139
9.6	$\epsilon-N_{tu}$ 法	139
9.7	设计方法	141
9.8	实例: 液体—空气换热器	142
第十章	空气控制	147
10.1	引言	147
10.2	系统的阻力	147
10.3	系统的阻力特性	150
10.4	风机动力学	150
10.5	风机与系统阻力特性的匹配	154
10.6	空气冷却系统在高空下的工作	163
10.7	高空下的风扇驱动系统	166
10.8	小结	167
第十一章	量纲分析和实验数据整理	169
11.1	引言	169
11.2	换热过程的量纲分析	169
11.3	柏金汉 π 定理	172
第十二章	直接空气冷却	176
12.1	引言	176
12.2	通道中的自然对流	176
12.3	自然对流的充分发展的极限值	177
12.4	自然对流的复合关系式	179
12.5	最佳的平板间距	183
12.6	自然对流讨论小结	186
12.7	通道中的强制对流	186
第十三章	扩展传热面	197
13.1	引言	197
13.2	矩形剖面直翅	198
13.3	矩形剖面环形翅	200
13.4	其它剖面的翅片	200
13.5	最佳尺寸	202
13.6	两种直翅的比较	203

13.7	组合扩展传热面的分析	204
第十四章	冷板	208
14.1	引言	208
14.2	紧凑型冷板	208
14.3	设计方程	208
14.4	作为 N_{re} 函数的 (LMTD) 和效率 ϵ	208
14.5	空气的传热性能	209
14.6	冷板的设计程序	210
14.7	例题: 两面均匀负载	210
14.8	单面热负载的加权总效率	213
14.9	单面热负载例题	215
14.10	叠层冷板	217
14.11	有关恒温表面的解释	217
第十五章	浸没冷却	218
15.1	引言	218
15.2	分类	218
15.3	浸没冷却研究的进展	220
15.4	热性能和工作限	221
15.5	浸没冷凝器的性能	227
15.6	浸没冷凝器的应用	231
15.7	浸没冷却小结	233
第十六章	热管	234
16.1	引言	234
16.2	工作原理	234
16.3	工质	235
16.4	管芯结构	236
16.5	控制形式	237
16.6	传热限制	239
16.7	传热极限的计算	239
16.9	热管性能	246
第十七章	热电控温器	251
17.1	引言	251
17.2	热电效应	251
17.3	热电器冷结点可制冷的热流方程	254
17.4	最大热抽吸的设计方程	256
17.5	最大热抽吸控温器的设计程序	260
17.6	最佳性能系数的设计方程	262
17.7	最佳性能系数的电流关系式	263
17.8	最佳性能系数控温器的设计程序	264

17.9	级联控温器	265
17.10	简化假定的影响	267
第十八章	相变控温器	270
18.1	引言	270
18.2	相变控温器的材料	270
18.3	相变控温器的形式	271
18.4	热计算方法	272
18.5	相变控温器的热设计	273
18.6	其它问题	277
18.7	具有不均匀热边界条件的分析	278
第十九章	惯性导航系统	281
19.1	引言	281
19.2	惯性平台	281
19.3	框架式平台	281
19.4	捷联式平台	285
19.5	液浮陀螺	285
19.6	陀螺的热问题	286
19.7	陀螺的温度梯度问题	286
19.8	惯性组件的温度控制系统	287
19.9	RI-1170陀螺简介	288
19.10	陀螺的热设计	288
第二十章	晶体管	291
20.1	引言	291
20.2	晶体管分类	291
20.3	晶体管的热分析	291
20.4	散热器的形式	295
20.5	针形散热器	297
20.6	举例	298
第二十一章	微波设备	301
21.1	引言	301
21.2	冷却剂选择原则	301
21.3	基于传热性能的流体选择	303
21.4	水负载对微波的吸收	304
21.5	行波管液体冷却系统的设计	308
21.6	有关安全裕度的说明	311
21.7	行波管收集极热设计的补充说明	314
21.8	电扫描天线的热控制	314
第二十二章	微电子技术	320
22.1	引言	320

22.2	热控制的理由·····	321
22.3	从结到外壳的传热·····	322
22.4	对流和热辐射的效应·····	325
22.5	印制电路板中的热流·····	328
22.6	电路板的表观热导·····	330
22.7	方形热阻法·····	332
22.8	具有不均匀热输入的印制电路板·····	333
22.9	电路板向机壳的导热·····	336
22.10	大规模集成组件·····	336
22.11	超高速集成电路 (VHSIC) ·····	338
参考文献·····		345

第一章 绪 论

1.1 引 言

在过去的五十多年中,电子元件的热控制一直是现代传热技术的主要应用之一。与元件可靠性的改善,功率容量的增加和结构的微小型化相联系的许多好处,都可以归因于不断完善的热分析和热设计,尽管有环境条件的变化甚至恶劣环境的存在,还是使元件的温度维持在所希望的范围内。

回顾一下电子仪器热控制技术的演变是会有启发的。早在1925年, Cockroft^[7]发表了确定变压器铁心内温度分布的方法,以倡导电子元件的热分析。以后, Mouromtseff^[8,9]研究了大功率真空管的空气和液体的冷却问题, Elenbaas^[10]在1942年提出了翅片组合的自然对流换热的设计和优化方法。这是几篇早期的经典论著。

随着二次世界大战的发展,电子仪器日益广泛应用于军事和民用部门,使电子元件的热封装和热设计受到普遍重视,从此,电子仪器的热控制技术进入了盛世。真空管的冷却技术得到了进一步的改善,尤其是大功率行波管收集极的热控制系统。自从1948年采用了半导体器件以来,微电子封装向超小型化的更高阶段突进。虽然每个电路的功耗减小了,但由于微小型化使电路的元件密度提高了。结果功率密度比普通电子设备的大得多。另外,电子元件和电路的效率和可靠性与其温度成反比,电路的设计温度要比半导体材料极限温度低得多,在高速电子仪器中,硅器件的最高温度一般规定为65℃,而且还要求有稳定的温度。类似地,卫星,飞机和潜艇上导航所用的陀螺仪,向热设计者提出了恒温性的极端要求。这些都已不是原来意义上的电子仪器的冷却问题了,而是一个更高一层的热控制问题了。

在20世纪60~70年代,电子热控制技术的应用范围不断地在扩展。一方面,不少人集中于整理和论证以前的传热成果,以及常规的空气和液体的冷却技术的标准化上,另一方面,将大量费用花在研究和发展新的传热技术上,如元件的浸没冷却,强化流动沸腾,热管,热电控温器以及相变热控温器。这些技术都已陆续用于电子元件的热控制。尽管如此,微电子技术和大规模集成技术的迅速完善,与减少电子仪器维修的日益增长的要求一起,使现有的热控制技术还是跟不上微小型化的步伐,以致在一定程度上限制了集成电路微型化的发展。

1.2 热系统设计的要求

热控制系统设计的目的就是要从系统,组件,和元件三方面为它们创造良好的热环境。如前所述,元器件的微小型化导致热流密度的增加,而容许的结温和温度梯度却在减小。为了满足这些要求,热设计者必须全面分析电系统的热要求和各种传热的方式方法,从中作出最佳决策。

在集成电路出现以前,对于电子管和分立微电子元件的冷却,可以不用特殊的传热措

施，空气流过仪器内部及其外表面，靠空气的自然对流把耗散热带到周围大气环境就可以了。最多不过将固体功率管安装在散热器上以增强冷却。可是，在现代电子仪器中，元器件往往彼此紧挨着，它们对环境因素和广泛变化着的热耗散通常显示不同的灵敏度，考虑到元件的多样化提出一个可以接受的小气候是必要的。不管环境条件如何变化，热控制系统必须能在重复的和预定的方式中完成所规定的功能；在规定的使用期内，必须用最少的维修来保持其功能。很自然，热控制装置的故障理应少于它保护的元件的故障率。然而，由于半导体电路和其它元件的固有可靠性，使电子仪器也非常可靠。这样，上述要求对热设计者就显得过于苛刻。实际上这并不过分。例如，美国储备银行计算机系统的技术规范要求：该系统每周工作五天，每天工作十二小时，每年允许中断时间最多是六十分钟，而且在任何十二小时的工作中，中断不得超过五分钟。

预防元器件的热失效是电子仪器热控制的基本的和主要的目标，所谓热失效指的是，某元件的失效直接由于热因素导致电功能的完全丧失。就严重失效的本质而言，它在某种程度上取决于局部的温度场以及元件的运行历史和方式。因而，正确地预计发生上述失效的温度是困难的。尽管如此，对于大多数通用元件，利用试验和运行经验与基本失效率分析相结合，还是可以得到无事故的上限温度的。各种元件的最高容许温度及其最大耗散功率，通常都能在生产厂的产品规格中找到。这个温度是电子热控制系统的最明确的热判据。在合理的热设计中，元件的最高容许温度及其最大耗散功率可以初步确定总的热控制系统，即所用的传热方式，冷却介质，以及流量和进口温度（如用流体的话）。

在初步确定了热控制系统后，工作就转到电子仪器中每个元件的可靠性评估上。有的电子元件本来就是可靠的，在室温下，它通常可连续工作10,000年以上，也就是其基础失效率小于 $0.01/10^6$ 小时。然而，如图1.1所示，在大规模集成的技术水平下，每个电路中所包含的元件数可以超过250,000个，因而，为了避免仪器失效，每一个元件和器件都应尽可能减小失效率。很遗憾，大多数元件在温度提高时是容易失效的，这是由于结合材料的塑性变形，开关和联接器中寄生的化学反应，以及固体器件中的扩散作用。这些失效方式确定了元件可

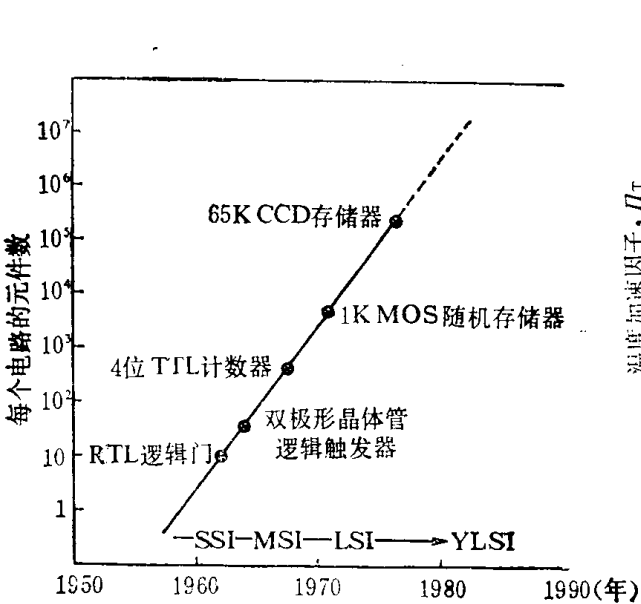


图1.1 电路集成技术的阶段

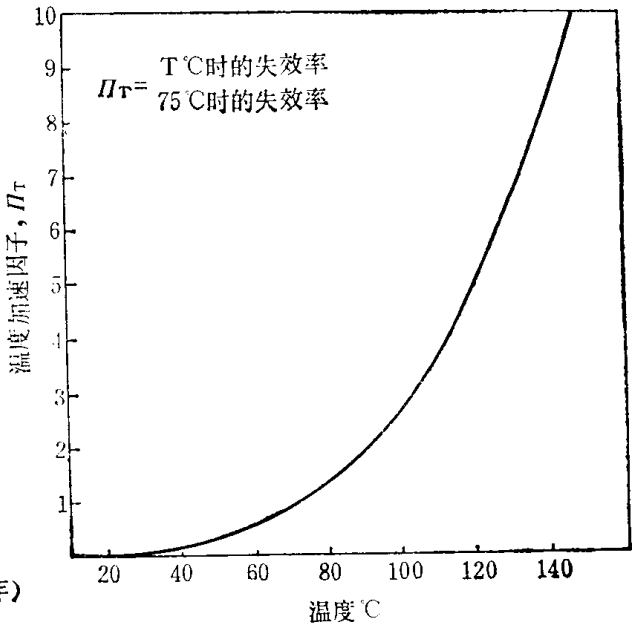


图1.2 双极数字器件的热加速因子