

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

电子设备热设计及分析技术

Thermal Design and Analysis

Techniques of Electronic Equipment

余建祖 编著



高等教育出版社

电子设备热设计及分析技术

Thermal Design and Analysis
Techniques of Electronic Equipment

余建祖 编著

高等教育出版社

内容简介

电子设备热设计及分析技术是为适应电路集成度剧增,芯片热量大幅度增加,必须解决电子元器件及设备的温升控制问题而发展起来的新学科,在国内外受到越来越广泛的重视。

本书系统地介绍了电子元器件、组件及整机设备或系统的热设计、热分析技术和相关理论,其中包括:电子设备热设计的理论基础概述,电子设备用肋片式散热器及冷板设计,机箱和电路板的传导冷却,电子元件的安装冷却技术,电子设备的风冷设计,电子设备的辐射冷却,相变冷却、热管传热及热电制冷在电子设备热设计中的应用,电子设备的瞬态冷却及电子设备热设计技术的新进展等。对上述各种热设计及分析技术所涉及的传热学和流体力学的基础理论,本书都用相当篇幅简明、扼要地进行了介绍。书中给出了大量的公式、曲线、图表和具体的技术参数,各部分内容均配有实际设计计算例题,供工程应用时参考。

本书提供了有关电子设备热分析和热设计的独特方法。全书取材丰富,适用面广,融学术性和实用性为一体,并力求反映国内外目前采用的一些先进的热设计技术及其发展状况。

本书可作为高等院校有关专业研究生教材,亦可供从事电子设备热设计、结构设计和可靠性技术研究的科研工作者、工程技术人员,以及从事飞行器环境控制工程、低温制冷工程的专业人员阅读使用。

前 言

自从硅集成电路问世以来,电路的集成度增加了几个量级,相应地,每个芯片产生的热量也大幅度增加。功率增加,体积缩小,热密度急剧上升,电子设备的温度迅速增高,从而使电子设备的故障越来越多,集成电路的散热问题已成为计算机微型化的关键。电子设备因过热发生的故障,会使设备(或系统)性能下降,对军事电子系统和设备可靠性影响尤为巨大,甚至造成灾难性后果。因此,为适应现代电子设备的冷却需要而迅速发展起来的热设计及热分析技术,受到了广泛的重视。

电子设备热设计系指对电子设备的耗热元器件以及整机或系统采用合适的冷却技术和结构设计,以对它们的温升进行控制,从而保证电子设备或系统正常、可靠地工作。

鉴于电子设备热设计问题在保证军用、民用电子设备的性能及可靠性方面的重要作用和广泛适用性,以及在计算机微型化中的关键作用,美国于20世纪70年代即开始投入人力、物力进行研究。美国政府和军方从那时起颁布了一系列有关电子设备热管理、热设计的规范,并明确规定,从方案论证阶段起就必须分析过热引起的各种后果和危险程度,提供最佳热设计方案,并要求在整个设计过程中,电子设备设计工程师、热设计工程师和可靠性工程师要相互制约,密切合作,将热管理贯穿电子系统和设备设计生产的全过程。电子设备的热设计技术,已作为电子元器件、设备和系统可靠性设计的一项重要内容。国内电子行业已愈来愈重视电子产品的可靠性热设计,尤其是研究用于航空、航天等部门的高可靠性电子元器件时更是如此。

对军用电子设备设计方案的热分析有两个重要的要求,即

- (1) 预计各器件的工作温度,包括环境温度和热点温度;
- (2) 使热设计最优化,以提高可靠性。

显然,热分析的目的是以最好的经济效益获得热设计所需的准确信息,因此热分析是热设计的基础。由于热分析不需消耗硬件,因此热分析较热测试成本低,这使得热分析法还被广泛用于预测许多器件热可靠性的温度和故障,以及为需要进行热测试的产品和器件确定最有效的测试方案。随着计算机软、硬件技术的发展,热分析技术的精度越来越高,成

本越来越低,它在提高电子设备可靠性热设计的质量、降低系统全寿命费用方面正起着越来越重要的作用。

本书是为适应现代电子设备热设计及分析技术迅猛发展的需要而编写的。书中系统地介绍了电子元器件、组件及整机设备或系统的热设计、热分析技术和相关理论,其中包括:电子设备热设计的理论基础概述,电子设备用肋片式散热器及冷板的设计,机箱和电路板的传导冷却,电子元件的安装冷却技术,电子设备的风冷设计,电子设备的辐射冷却,相变冷却、热管传热及热电制冷在电子设备热设计中的应用,电子设备的瞬态冷却,电子设备热设计技术的新进展等。

本书特点之一是将现代集成电路的结构设计技术同热设计技术紧密结合,并提供了从分离元件到大规模集成电路,从设备到系统进行这样综合设计的广泛工程实例,从而为将热管理贯穿电子设备设计的全过程指出了正确途径。

本书的另一特点是突出了分析问题、解决问题的方法。书中对各种热分析、热设计技术所涉及的传热学和流体力学的基础理论,都用相当篇幅简明、扼要地进行了介绍。对各种电子元器件及设备的热应力、热点温度、稳态和瞬态温度分布、冷却工质流动阻力的分析计算方法进行了深入细致的阐述,并结合工程实例提出了降低热点温度、释放热应变和进行热匹配设计等的具体措施。书中还通过大量实例,介绍了设计各种高效、可靠冷却系统既实用而又能有效利用成本的具体方法。

本书的第三个特点是在总结我国在这一领域的技术成果的同时,注意吸取国外的研究成果和最新技术成就。本书吸收了国内外资料提供的大量公式、曲线、图表和具体技术参数,以供读者在工程应用时参考。本书还力求反映国内外目前采用的一些先进的热设计技术及其发展状况,并对近年来国内外开展的大型航天器毛细抽吸两相流体回路(CPL)的研究、军用飞机电子设备吊舱环境控制技术的研究,以及为解决微细化和高密度化电子器件的散热问题而发展起来的微细尺度换热器及电子薄膜传热性能的研究进行了介绍和探讨,以使读者能更好地跟上时代前进的步伐。

最后一点是,本书对在卫星、导弹、飞机、潜艇等特殊环境中工作的电子设备的热特性及热设计技术,给予了一定篇幅进行论述研究,以满足在国防领域进行电子设备结构设计和热设计的工程技术人员需要。

国防科工委可靠性工程技术研究中心电子元器件失效分析及测试室主任高泽溪教授仔细地校阅了全书并提出了宝贵意见,国防科工委可靠性工程技术研究中心和北京航空航天大学电子工程系的有关专家,提供

了有益的资料和富有建设性的建议,余雷、赵增会、王永坤、李琳、高红霞等同志为本书的出版作了大量工作,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中不足之处请读者批评指正。

作 者

2001 - 10

目 录

第一章 电子设备热设计的理论基础概述	1
1.1 引言	1
1.2 热源和热阻	2
1.3 传热的基本方式及有关定律	4
1.3.1 导热(热传导)	4
1.3.2 对流换热	5
1.3.3 辐射换热	10
1.4 热控制方法的选择	14
1.5 稳态传热	16
1.6 瞬态传热	16
1.7 耗散功率的规定	17
第二章 电子设备用肋片式散热器	19
2.1 概述	19
2.2 肋片散热器的传热性能	20
2.3 肋片散热器设计	24
2.3.1 肋片起增强散热的条件	24
2.3.2 肋片参数的优化	26
2.3.3 针肋散热器及其它断面肋	28
2.4 肋片散热器在工程应用中的若干问题	30
2.4.1 散热器生产、使用的技术要求	30
2.4.2 减少电子器件与散热器的接触热阻	30
2.4.3 合理选用散热器,降低散热器热阻	33
第三章 电子设备用冷板设计	39
3.1 概述	39
3.2 冷板的结构类型及选用原则	39
3.3 冷板的换热计算	46
3.3.1 气冷和液冷式冷板的计算	46
3.3.2 储热冷板的计算	52
3.3.3 热管冷板的计算	53
3.4 冷板的设计步骤	53

3.4.1 均温冷板的设计计算	53
3.4.2 非均温冷板的换热计算	56
3.5 冷板式强迫液体冷却系统	59
3.5.1 液体冷却系统用泵	60
3.5.2 存储和膨胀箱	62
3.5.3 液体冷却剂	63
3.5.4 强迫液体流动的基本方程	63
第四章 机箱和电路板的传导冷却	70
4.1 集中热源的稳态传导	70
4.2 电子元件在托架上的安装	72
4.3 均匀分布热源的稳态传导	73
4.4 铝质散热芯电路板	76
4.5 非均匀截面壁的机箱	78
4.6 二维模拟电阻网络	81
4.7 空气接触面的热传导	85
4.8 接触面在高空的热传导	89
4.9 电路板边缘导轨	90
4.10 薄金属盖板的热传导	92
4.11 径向热流	93
第五章 电子元件的安装和冷却技术	95
5.1 各种类型的电子元件	95
5.2 印制电路板上元件的安装	95
5.3 大功率元件的安装	103
5.4 大功率元件的电绝缘	106
5.5 罐封组件	108
5.6 元件引线应变的释放	111
第六章 机箱及电路板的风冷设计	117
6.1 引言	117
6.2 印制板机箱的自然对流冷却	117
6.2.1 印制板之间的合理间距	117
6.2.2 自然对流换热表面传热系数的计算式	120
6.2.3 自然对流模拟电阻网络	123
6.2.4 开式机箱的换热	124
6.2.5 闭式机箱的换热	125
6.2.6 闭合空间内空气的等效自然对流换热表面传热系数	128

6.2.7 高空对自然对流散热的影响	131
6.3 印制板机箱的强迫通风设计	133
6.3.1 风机的选择	133
6.3.2 风道设计	143
6.3.3 高空条件对风扇冷却系统性能的影响	147
6.3.4 强迫对流换热表面传热系数的实验关联式	150
第七章 电子设备的辐射冷却	155
7.1 电子设备辐射冷却概述	155
7.2 宇宙空间的辐射传热	161
7.3 宇宙空间中 α/ε 对温度的影响	162
7.4 辐射传热的简化方程	165
7.5 对流和辐射的综合传热	166
7.6 大型机柜内的密封组件	168
7.7 等效环境温度在可靠性预测中的应用	172
7.8 扩大表面积提高有效发射率	175
第八章 电子设备的相变冷却	177
8.1 概述	177
8.2 相变冷却系统	178
8.2.1 浸没式相变冷却系统	178
8.2.2 间接式相变冷却系统	180
8.3 相变冷却系统设计	181
8.3.1 制冷剂的选择	182
8.3.2 电子器件表面的形状	183
8.3.3 凝汽器的选用	183
8.3.4 压力效应与温度控制	184
8.3.5 其它问题	185
8.3.6 设计步骤	185
8.4 各类电子设备采用相变冷却时应注意的事项	186
8.5 汽-水两相流冷却系统	187
8.5.1 汽-水两相流冷却系统的工作原理	187
8.5.2 汽-水两相流冷却系统的换热计算	188
第九章 热管散热器的设计	193
9.1 概述	193
9.2 热管的类型及其工作原理	193
9.2.1 普通热管	194

9.2.2 重力辅助热管	197
9.2.3 可变导热管	199
9.3 普通热管的传热性能	200
9.3.1 热管的传热过程	200
9.3.2 热管的传热极限	204
9.4 热管设计	210
9.4.1 设计技术要求	210
9.4.2 工质选择	210
9.4.3 吸液芯的选择	211
9.4.4 管壳设计	217
9.5 热管在电子设备中的应用	219
第十章 热电制冷器	226
10.1 概述	226
10.2 热电制冷的基本原理	227
10.2.1 帕尔帖效应	227
10.2.2 塞贝克效应	228
10.2.3 汤姆逊效应	228
10.2.4 焦耳效应	228
10.2.5 傅里叶效应	229
10.2.6 平衡中的塞贝克、帕尔帖和汤姆逊效应	229
10.2.7 α 、 π 和 σ 的关系	230
10.3 制冷器冷端净吸热的基本方程	231
10.4 最大抽吸热设计方程	234
10.5 最大抽吸热制冷器的设计方法	241
10.6 最佳性能系数设计方程	242
10.7 最佳性能系数电流的推导	244
10.8 最佳性能系数制冷器的设计方法	245
10.9 多级制冷器的性能	247
10.10 简化假设的影响	251
10.10.1 忽略汤姆逊电压	251
10.10.2 温度损失	251
10.10.3 结电阻的影响和并联热路	252
10.11 热电制冷器的结构设计	253
第十一章 电子设备的瞬态冷却	257
11.1 简单绝热系统	257

11.2 热容量	258
11.3 时间常数	259
11.4 加热期间的瞬态温升	259
11.5 不同时间常数下的温升	263
11.6 冷却期间瞬态温度的变化	264
11.7 温度循环试验的瞬态分析	266
11.8 用拉普拉斯变换求解元件的瞬态温度	277
11.9 工程实例——电子设备吊舱瞬态热载荷分析与计算	284
11.9.1 吊舱传热的数学模型	284
11.9.2 典型飞行剖面计算	288
11.9.3 采用“蓄冷节能”的设计思想确定吊舱设计热载荷	291
11.9.4 结论	292
第十二章 电子设备热设计技术的新进展	293
12.1 毛细抽吸两相流体回路(CPL)的研究	293
12.1.1 引言	293
12.1.2 CPL 工作原理及其特点	294
12.2 电子设备吊舱的环境控制技术	300
12.2.1 蒸气压缩制冷的吊舱环控系统	300
12.2.2 逆升压式冲压空气循环制冷的环控系统	303
12.2.3 逆升压回冷式冲压空气循环制冷的环控系统	304
12.2.4 系统比较及发展前景	307
12.3 微尺度换热器的研究及相关问题的探讨	308
12.3.1 微尺度换热器产生的背景及特点	308
12.3.2 理论分析及相关问题探讨	309
12.4 电子薄膜传热性能测量及分析研究概述	312
参考文献	315

第一章 电子设备热设计的 理论基础概述

1.1 引言

电子设备热设计系指对电子设备的耗热元件以及整机或系统采用合适的冷却技术和结构设计,以对它们的温升进行控制,从而保证电子设备或系统正常、可靠地工作。

近几十年来,电子设备在军用和民用方面的应用大大增加,实践使人们普遍认识到需要对电子元件进行热封装和热设计,同时也促使热控制技术的发展。例如,为了改善真空管的冷却,进一步发展了加强表面对流换热技术和进行大功率行波管冷却剂(液体)通道的研制;为了安装小型电子元件并使其良好地散热,对各种冷板的设计技术进行了广泛的研究。晶体管的采用大大减少了总的功耗,但是晶体管结温的稳定性要求,使得电子设备的设计要有新的热约束条件。因为结温与晶体管的效率和可靠性成反比。而在卫星、导弹、飞机、潜艇等特殊环境中的电子设备,其密集程度和可靠性方面的要求比地面设备更为严格,因而也更需要解决好散热问题。热封装是在 20 世纪 50 年代提出的一个重要的技术问题。

在 20 世纪 60 年代至 70 年代期间,上述电子设备冷却技术的应用范围得到了进一步扩大,并使常规的风冷和液冷标准化。与此同时研究和开发了诸如浸没冷却、加强流体的沸腾、热管及热电制冷器件等更新的技术。但是,这些技术当时大多停留在样机试验阶段,很少投入使用,这种情况一直延续到 20 世纪 80 年代初。由于微电子技术和大规模集成电路技术的迅速发展,以及对减少电子设备维护时间所提出的更高要求,又一次推动了热控制技术的发展。

防止电子元件严重的热损坏是热控制的基本目的。热损坏可以定义为一个规定的电子元件,直接由于热的原因而导致完全失去其电子功能。这种故障可能是由于电子元件的某个部分软化或者汽化造成的,但是,最常见的故障是机械支撑件(如壳体、基板)的热破坏,或者是引线与外部电气网络之间的分离而引起的。特别在微电子装置中,严重的损坏也可以由印制电路板的塑性变形以及半导体材料中“杂质”的有害移动造成。

严重损坏,在某种程度上取决于局部温度场及元件的工作过程和形式。因此,要精确地确定可能出现故障的温度是困难的。然而,结合试验和工作经验,对大多数超过了温度上限的一般元件的故障是能够进行初步分析并避免严重损坏的。建立总的热控制方案时要求了解元件允许的最高温度和元件的热损耗量,同时也要考虑所用的传热形式、冷却剂类型、冷却剂流量和入口温度等。

本章简要介绍了与电子设备热设计有关的传热学概念及基本定律、电子元件及设备的各种热控制技术及其适用范围。而对各种热设计和分析技术所涉及的更进一步的理论知识,将结合有关内容在以后各章介绍。

1.2 热源和热阻

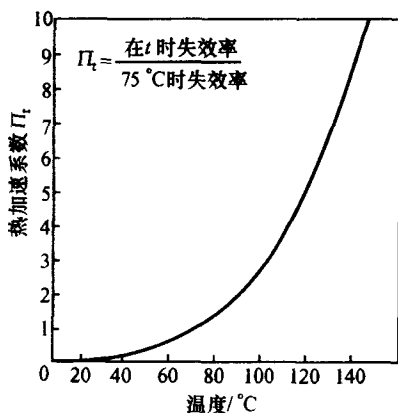
实际上,在各主要工业领域中,电子设备均依靠电流的流动与控制来完成各种奇特的功能。当电流流经电阻时即产生热量。电流和电阻值增大,元件中产生的热量便增加。只要电流连续流动,热量就不断产生。随着热量的积聚,若不找出一条流通路径将热量导走,电阻元件的温度便上升。如果热流路径不畅通,温度就会不断上升,直到电阻元件毁坏,电流中断为止。如果热流路径良好,温度可以一直上升到稳态平衡点。在这一点上,从元件中导走的热量等于电流在其中流动所产生的热量,以后温度便保持稳定。

电流在诸如电阻器、二极管、集成电路、混合电路、晶体管、微处理器、继电器、双列直插式组件、大规模集成电路和超大规模集成电路等电子元、部件中流动均能产生热量。

电子设备(或系统)的运行实践表明,随着温度的增加,元器件的失效率呈指数增长^[6](参看图 1-1),不同程度上降低了设备的可靠性。例如,超过一定值的高温带来的影响是:材料的绝缘性降低,晶体管、集成电路的电流增益变化,磁芯参数、电容量、阻值改变而引起信号失真或频率产生漂移,等等。过低的温度造成的影响是:橡胶硬化、密封失效,减震器损坏,润滑剂粘度加大,水分凝冻,缝隙扩大等。同样,温度循环或冲击也将使电子元件或机械部分的热稳定性降低。因此,热设计的目的,就是针对温度超过规定(许用)值后,为了避免引起电子设备发生故障所必须采取的各种控制温升的措施。

一般认为,电子设备经受热应力的作用,源自于三个方面:

① 电子设备工作过程中,功率元件耗散的热量,即由电能转换为热能;

图 1-1 双级数字装置的热加速系数^[6]

② 电子设备周围的工作环境,通过导热、对流和热辐射的形式,将热量传给电子设备;

③ 电子设备与大气环境产生相对运动时,各种摩擦引起的增温(如动力增温等)。

所以,热设计的总原则就是自热源至耗散空间(环境)之间,提供一条尽可能低的热阻通路。

解决热阻的办法,主要从两方面入手:一是控制电子元器件的内热阻(或结热阻);二是控制电子元器件或整机设备的外热阻。

电子设备外热阻的控制包括下面几种形式:

(1) 散热

利用空气或液体(如水、丙酮、酒精、氟里昂等)作为冷却介质,靠自然对流或强制对流方式,带走电子设备的耗热。

(2) 制冷

利用热电制冷、固体升华过程吸热、液氮蒸发过程吸热等方式进行制冷,使设备或器件的工作环境温度低于周围环境温度。

(3) 恒温

利用相变材料的吸、放热过程,可变导热管的控温特性以及热电效应,使设备或器件的工作温度严格恒定在某一温度值,保证其工作的稳定性。

(4) 热管传热

利用热管高效传热的特性,解决大温差环境条件下温度的均衡,密闭机箱内热量的传递,减少温差对设备的危害。

近几年来,随着功率密度的增加及对计算机等电子设备微型化的要求,控制电子设备外热阻的方式已不能满足要求,如何降低电子元器件的内热阻已成为热设计专家研究的热点问题。主要探索方向包括合理选用电子元器件的材料,严格生产工艺,及至直接在大规模集成电路的芯片上采取冷却措施等。计算机微型化的要求促进了微细尺度传热理论的发展、微细尺度换热器及薄膜导热性能的研究,拓展和更新了传统的传热理论和制冷技术。将这些新理论、新技术应用于电子元器件的温度控制,是电路设计工程师和热设计工程师需要充分重视和研究的课题。

1.3 传热的基本方式及有关定律

热传递有三种基本方式:导热(热传导)、对流和辐射。在电子设备的热设计工作中,与这些传递方式有关的一些概念和定律是至关重要的。

1.3.1 导热(热传导)

物体各部分之间不发生相对位移时,依靠分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动而产生的热量传递称为导热(或称热传导)。例如,物体内部热量从温度较高的部分传递到温度较低的部分,以及温度较高的物体把热量传递给与之接触的温度较低的另一物体都是导热现象。

导热现象的规律已经总结为傅里叶定律,即在导热现象中,单位时间内通过给定截面的热量正比例于垂直于该截面方向上的温度变化率和截面积。其数学表达式为

$$Q = -\lambda A \frac{\partial t}{\partial x} \quad \text{W} \quad (1-1)$$

式中: Q 为热流量^①,单位为 W; A 为垂直于热流方向的截面面积,单位为 m^2 ; $\partial t/\partial x$ 为温度 t 在 x 方向的变化率。式中负号表示热量传递方向指向温度降低的方向。比例系数 λ 称为导热系数,其单位为 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。导热系数是表征材料导热性能优劣的参数。

傅里叶定律用热流密度 q 表示时有下列形式:

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \quad \text{W}/\text{m}^2 \quad (1-2)$$

对于图 1-2 所示单层平壁,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 ,则由傅里叶定律可推得:

^① 在我国法定计量单位中,热流量的符号为 Φ ,但考虑到习惯,本书仍采用 Q 。

$$Q = -\lambda A \frac{dt}{dx} = \lambda A \frac{t_1 - t_2}{\delta} = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta}{\lambda A}} = \frac{\Delta t}{R} \quad (1-3)$$

式中, R 为平壁导热热阻, 单位为 K/W , 且

$$R = \frac{\delta}{\lambda A} \quad (1-4)$$

或写成

$$R = \frac{\Delta t}{Q} \quad (1-5)$$

式(1-5)与电学中的欧姆定律

$$R = \frac{\Delta U}{I}$$

有对应关系。式中: ΔU 为电位差; I 为电流。即热阻与电阻、热流与电流、温差与电位差——相对应。这种关系称为热电模拟关系。

热电模拟关系为解决传热学问题提供了很大方便。电学中的许多规律, 如电阻串、并联公式及基尔霍夫定律等各个关系均可等效地在传热工程上应用。

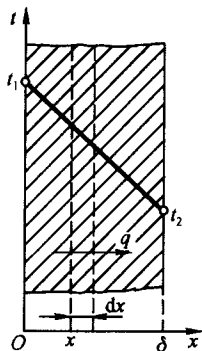


图 1-2 单层平壁导热

1.3.2 对流换热

(1) 对流换热的基本概念及计算式

对流换热是指流动的流体与其相接触的固体表面之间, 在二者具有不同温度时所发生的热量转移过程。

按流体产生流动的原因不同, 可分为自然对流和强制对流。自然对流系由于流体冷热各部分密度不同所致, 而强制对流则由于外力(风机、水泵等)迫使流体进行流动。

按流动性质来分, 则有层流和湍流之别。层流是在流体的流速相对较低时, 相邻流层之间分子相互扩散, 不存在流体质点的掺混, 呈现出一种较有规则的流动。湍流是指流速达到某一临界值后, 流体质点明显出现不规则的掺混流动过程。流体由层流过渡到湍流是由于流动失去稳定性的结果。一般以雷诺数 Re 的大小作为层流或湍流的判断依据。

对流换热以牛顿冷却公式为其基本计算式, 即对流换热量

$$Q = \alpha A \Delta t \quad (1-6)$$

式中: A ——换热面积, m^2 ;

Δt ——流体与壁面的温差, $^{\circ}C$;

α ——对流换热表面传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。

式(1-6)表明,对流换热量与换热面积和温差成正比,比例常数为对流换热表面传热系数。式(1-6)可改写成

$$Q = \frac{\Delta t}{\frac{1}{\alpha A}} = \frac{\Delta t}{R} \quad (1-7)$$

或

$$\Delta t = QR \quad (1-7a)$$

式中, R 为对流换热热阻,单位为 K/W ,且

$$R = \frac{1}{\alpha A} \quad (1-8)$$

对流换热是一种十分复杂的换热过程,流体的物性、换热表面的几何条件、流体物态的改变及换热面的边界条件等对对流换热过程都有影响。因此,工程对流换热问题的计算大多依靠实验建立起来的无量纲方程式(实验关联式)进行。

应用量纲分析法,可得到两个表示对流换热的无量纲方程式,即

$$\text{强制对流} \quad Nu = c Re^m Pr^n \quad (1-9)$$

$$\text{自然对流} \quad Nu = c (Gr Pr)^n \quad (1-10)$$

式中: $Nu = \frac{\alpha L}{\lambda}$ 为努塞尔准则(数),它表示对流换热与导热之间的关系。

$Re = \frac{uL}{\nu} = \frac{g_m L}{\mu}$ 为雷诺准则(数),它表示流体流动过程的惯性力与粘性力之间的关系。

$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{c_p \mu}{\lambda}$ 为普朗特准则(数),它表示流体流动过程的动量扩散和热量扩散之间的关系。

$Gr = \frac{L^3 \alpha_v g \Delta t}{\nu^2}$ 为格拉晓夫准则(数),它表示自然对流过程中流体的浮升力与粘性力之间的关系。

以上各式中: L ——特征尺寸,m;

u ——流体速度,m/s;

g_m ——流体的质量流速, $kg/(m^2 \cdot s)$;

c_p ——流体的比热容, $kJ/(kg \cdot K)$;

μ ——流体的动力粘度, $Pa \cdot s$;

λ ——流体的导热系数, $W/(m \cdot K)$;

ν ——流体的运动粘度, m^2/s ;

α_v ——流体的体膨胀系数, $^{\circ}C^{-1}$;