

# 电子设备冷却设计手册

(下 册)



电子工业部第十四研究所

29073



# 前 言

随着电子技术的不断发展,人们对电子设备冷却技术方面的需求日益显得迫切。几乎每一个电子设备都会遇到冷却问题。电子设备的过热是设备性能下降以至引起损坏的重要原因之一。因此,电子设备冷却设计与电路设计是同等重要的,它是电子设备获得长寿命、高可靠性和低故障率的重要保证。

为了满足从事电子设备研制、生产的广大工程技术人员的迫切需要,以及供电子设备使用人员和高等院校有关师生参考,我们从78年开始着手编写这本电子设备冷却手册,全书共分上、下两册。手册以总结我们实际工作经验为主,同时吸取了国内外的一些成熟经验。手册从工程设计实用角度出发,提供了具体的计算公式和设计图表,并系统地阐述了简要原理。

尽管国际单位制势必成为今后的一种通用单位制,但由于目前一些测量仪表的计量单位尚未转变,因此,一些新版资料中的图表和曲线往往还采用公制单位。为便于使用起见,本手册仍以工程单位制为主。同时,考虑到向国际单位制的逐步过渡,手册中的不少单位也采用了国际单位制。鉴于这种情况,本手册对常用物理量各单位之间的换算作了详细的介绍。手册中引证的个别公式,因为与一些曲线密切相关,为了不致影响其准确性,所以仍保留了原来的英制单位。这样,由于所采用的单位制不同,就产生了计算公式之间表达形式的转换问题,本手册对此也作了必要的阐述。

手册由电子工业部第十四研究所第九研究室冷却组集体编写。

主编:张兆光 主审:傅宝玉。

参加编写的人员有(以章节先后为序):吉荣富、张兆光、李洪生、肖洪保、高世金、傅宝玉、邓以鼎、赵永海、张晓琴。

手册编写过程中得到了许多单位的支持和帮助,有的还提供了很多宝贵经验和资料,我们深表感谢。

由于编写人员水平有限,手册中谬误之处在所难免。我们衷心地希望广大读者批评、指正。

电子设备冷却设计手册编辑组

1984年6月

# 目 录

## 第六章 液体冷却

|                                        |        |
|----------------------------------------|--------|
| 一、前 言                                  |        |
| 二、液体冷却的基本原理                            | ( 1 )  |
| (一) 液体传导                               | ( 1 )  |
| (二) 液体对流                               | ( 2 )  |
| 三、对流换热时的应用方程式                          | ( 2 )  |
| (一) 自然对流                               | ( 2 )  |
| (二) 管内强迫对流                             | ( 3 )  |
| 四、液体冷却系统                               | ( 4 )  |
| (一) 直接液体冷却                             | ( 4 )  |
| 1. 电子器件直接浸入液体中的冷却                      | ( 4 )  |
| 2. 直接强迫液体冷却                            | ( 5 )  |
| 3. 直接液体冷却中要注意的几个问题                     | ( 5 )  |
| (二) 间接液体冷却                             | ( 5 )  |
| 五、液体冷却系统设计                             | ( 6 )  |
| (一) 设计依据                               | ( 6 )  |
| (二) 确定冷却方案                             | ( 6 )  |
| (三) 设计计算                               | ( 7 )  |
| 1. 选择冷却液                               | ( 7 )  |
| (1) 评价冷却液传热性能的综合指标                     | ( 8 )  |
| (2) 直接液体冷却的冷却液                         | ( 8 )  |
| (3) 间接液体冷却的冷却液                         | ( 10 ) |
| 2. 确定冷却液的温度、流量和压力                      | ( 10 ) |
| (1) 冷却水的温度                             | ( 10 ) |
| (2) 冷却水的流量                             | ( 10 ) |
| (3) 冷却水的压力                             | ( 11 ) |
| 3. 冷却水套的设计计算                           | ( 11 ) |
| (1) 水套设计计算                             | ( 12 ) |
| (2) 计算在环形间隙 $\delta$ 内的对流传热系数 $\alpha$ | ( 13 ) |
| (3) 核算电子器件发热表面温度 $t_s$                 | ( 13 ) |
| 4. 液冷计算的另一种方法——表面温升法                   | ( 14 ) |
| 5. 速调管、大功率三四极管水冷计算示例                   | ( 15 ) |
| 6. 换热器的种类与选用                           | ( 19 ) |
| (1) 常用换热器种类                            | ( 19 ) |
| (2) 换热器的选择原则                           | ( 20 ) |

|                                |        |
|--------------------------------|--------|
| 7. 管道与阀门 .....                 | ( 21 ) |
| 8. 冷却系统压力损失 .....              | ( 22 ) |
| (1) 管道内流体常用流速范围 .....          | ( 22 ) |
| (2) 管径、流量、流速关系换算图 .....        | ( 23 ) |
| (3) 管径换算表 (适用于水) .....         | ( 23 ) |
| (4) 系统压力损失计算 .....             | ( 25 ) |
| 9. 泵的选用 .....                  | ( 35 ) |
| (1) F型悬臂耐腐蚀离心泵 .....           | ( 36 ) |
| (2) FS型塑料耐腐蚀离心泵 .....          | ( 40 ) |
| W型、WZ型旋涡泵 (新系列) .....          | ( 47 ) |
| (4) 泵的安装高度计算 .....             | ( 50 ) |
| 10. 冷却系统的控制和保护 .....           | ( 51 ) |
| (1) 水流接点 .....                 | ( 51 ) |
| (2) 温度接点 .....                 | ( 53 ) |
| (3) 压力接点 .....                 | ( 54 ) |
| 11. 冷却系统中的腐蚀及预防 .....          | ( 55 ) |
| (1) 由于金属在水中溶解的自然趋势而形成的腐蚀 ..... | ( 55 ) |
| (2) 电化学腐蚀 .....                | ( 56 ) |
| (3) 水中加防冻剂所引起的腐蚀 .....         | ( 61 ) |
| (4) X射线辐射引起的腐蚀 .....           | ( 61 ) |
| (5) 水冷系统中减少腐蚀的设计原则 .....       | ( 61 ) |
| 12. 电子设备水冷系统中水质要求及使用维护 .....   | ( 62 ) |

## 第 七 章 蒸 发 冷 却

|                                |        |
|--------------------------------|--------|
| 一、概述 .....                     | ( 64 ) |
| 二、沸腾换热机理 .....                 | ( 64 ) |
| 三、蒸发冷却系统计算 .....               | ( 66 ) |
| (一) 电子管总功耗计算 .....             | ( 66 ) |
| (二) 电子管的蒸发水量 .....             | ( 67 ) |
| (三) 产生的蒸汽量 .....               | ( 67 ) |
| (四) 蒸发锅最小直径 $D_0$ 的确定 .....    | ( 67 ) |
| (五) 确定汽室高度 .....               | ( 69 ) |
| (六) 汽水分离器的形式 .....             | ( 70 ) |
| (七) 蒸发锅与电子管的接触形式 .....         | ( 70 ) |
| (八) 蒸发锅的主要加工工艺 .....           | ( 70 ) |
| (九) 蒸汽管道管径计算 .....             | ( 71 ) |
| (十) 冷凝水回水管道管径计算 .....          | ( 71 ) |
| (十一) 蒸汽管道和冷凝水回水管路绝缘管长度确定 ..... | ( 72 ) |

|                               |               |
|-------------------------------|---------------|
| (十二) 均压管 .....                | ( 72 )        |
| (十三) 蒸汽管道阻力计算 .....           | ( 72 )        |
| (十四) 控制水箱 .....               | ( 73 )        |
| (十五) 蒸发锅的静态水位 .....           | ( 75 )        |
| <b>四、蒸发冷却系统的保护 .....</b>      | <b>( 75 )</b> |
| (一) 水位保护 .....                | ( 75 )        |
| (二) 蒸汽压力保护 .....              | ( 78 )        |
| (三) 排气阀 .....                 | ( 79 )        |
| (四) 防腐蚀保护 .....               | ( 79 )        |
| (五) 二次水(外循环)系统的水流量和温度保护 ..... | ( 79 )        |
| <b>五、水质要求 .....</b>           | <b>( 80 )</b> |
| <b>六、蒸发冷却的二次冷却形式 .....</b>    | <b>( 80 )</b> |
| (一) 蒸汽——水冷式冷凝器 .....          | ( 80 )        |
| (二) 蒸汽——强制风冷式冷凝器 .....        | ( 83 )        |
| (三) 自然冷却式冷凝器 .....            | ( 87 )        |
| <b>七、蒸发冷却系统安装要求 .....</b>     | <b>( 90 )</b> |
| (一) 蒸汽管道安装要求 .....            | ( 90 )        |
| (二) 冷凝水回水管道安装要求 .....         | ( 90 )        |
| (三) 透气管安装 .....               | ( 91 )        |
| (四) 均压管安装 .....               | ( 91 )        |
| (五) 冷凝器安装高度 .....             | ( 91 )        |
| <b>八、蒸发冷却系统试机 .....</b>       | <b>( 92 )</b> |
| <b>九、设计举例 .....</b>           | <b>( 92 )</b> |
| <b>十、蒸发冷却系统的另几种结构形式 .....</b> | <b>( 97 )</b> |
| (一) 下出汽锅系统 .....              | ( 97 )        |
| (二) 直接汽化冷却系统 .....            | ( 98 )        |
| <b>十一、蒸发冷却系统的使用和维护 .....</b>  | <b>( 99 )</b> |

## 第 八 章   换 热 器

|                                |                |
|--------------------------------|----------------|
| <b>一、概况 .....</b>              | <b>( 100 )</b> |
| <b>二、换热器的设计基础 .....</b>        | <b>( 100 )</b> |
| (一) 常用的传热准则 .....              | ( 100 )        |
| (二) 基本传热公式 .....               | ( 102 )        |
| (三) 有效温度差 $\Delta t$ 的计算 ..... | ( 103 )        |
| 1. 对数平均温度差 .....               | ( 103 )        |
| 2. 算术平均温度差 .....               | ( 106 )        |
| (四) 流体的平均温度 .....              | ( 107 )        |
| (五) 换热器设计、选用的一般程序 .....        | ( 108 )        |

|                                |        |
|--------------------------------|--------|
| <b>三、列管式换热器的设计</b> .....       | ( 109) |
| (一) 列管式换热器的种类和结构.....          | ( 109) |
| (二) 列管式换热器的主要构件及其参数选择.....     | ( 110) |
| 1. 传热管.....                    | ( 110) |
| 2. 管长及管径的选择.....               | ( 110) |
| 3. 流体通过壳程及管程的选择依据.....         | ( 111) |
| 4. 流速的选择.....                  | ( 111) |
| 5. 管侧行程数 $Z$ 的确定.....          | ( 111) |
| 6. 传热管的布置和排列间距.....            | ( 112) |
| 7. 管子根数和壳内径的关系.....            | ( 113) |
| 8. 折流板的形状和间隔.....              | ( 114) |
| 9. 缓冲板.....                    | ( 114) |
| 10. 管板与管子的连接.....              | ( 115) |
| (三) 无相变的列管式换热器设计.....          | ( 115) |
| 1. 管内侧对流换热系数 $\alpha_i$ .....  | ( 115) |
| 2. 壳侧对流换热系数 $\alpha_o$ .....   | ( 116) |
| 3. 管壁温度 $t_w$ .....            | ( 117) |
| 4. 求换热器的总传热系数 $K$ .....        | ( 118) |
| 5. 管内外流体的压力损失计算.....           | ( 119) |
| (四) 列管式蒸汽冷凝器设计.....            | ( 121) |
| 1. 列管式蒸汽冷凝器的设计特点.....          | ( 121) |
| 2. 蒸汽在垂直管群(光滑管)外冷凝.....        | ( 122) |
| 3. 在水平管群(光滑管)管外冷凝.....         | ( 123) |
| 4. 蒸汽冷凝时的总传热系数 $K$ .....       | ( 123) |
| 5. 冷凝侧的压力损失.....               | ( 124) |
| <b>四、板翅式换热器设计</b> .....        | ( 127) |
| (一) 结构.....                    | ( 128) |
| (二) 结构参数的计算.....               | ( 133) |
| 1. 选择翅片.....                   | ( 133) |
| 2. 计算有效传热面积及决定传热芯部(板束)各参数..... | ( 133) |
| 3. 结构参数计算.....                 | ( 134) |
| (三) 求换热系数 $\alpha$ .....       | ( 134) |
| (四) 求翅片效率.....                 | ( 140) |
| 1. 翅片效率 $\eta_f$ .....         | ( 140) |
| 2. 表面效率(总传热效率) $\eta_o$ .....  | ( 140) |
| (五) 求总传热系数 $K$ .....           | ( 141) |
| (六) 实际需要的传热面积.....             | ( 141) |
| (七) 换热器长度.....                 | ( 141) |

|                              |        |
|------------------------------|--------|
| (八) 冷凝时的换热系数                 | ( 142) |
| (九) 压力损失的计算                  | ( 142) |
| (十) 板式换热器的设计顺序               | ( 143) |
| <b>五、螺旋板式换热器</b>             | ( 147) |
| (一) 结构形式                     | ( 147) |
| (二) 密封方法                     | ( 149) |
| (三) 螺旋板式换热器的特点               | ( 149) |
| (四) 基本传热公式                   | ( 150) |
| 1. 两流体都呈螺旋流动时                | ( 150) |
| 2. 一流体螺旋流动, 另一流体轴向流动时        | ( 150) |
| (五) 螺旋板式换热器的换热系数和总传热系数       | ( 150) |
| 1. 螺旋流动时的换热系数                | ( 150) |
| (1) 无相变时的对流换热系数              | ( 150) |
| (2) 冷凝传热(垂直)                 | ( 152) |
| (3) 冷凝液的过冷却(低温冷却)            | ( 153) |
| 2. 轴向流动时的液膜换热系数              | ( 153) |
| (1) 无相变的对流换热                 | ( 153) |
| (2) 冷凝换热                     | ( 153) |
| 3. 总传热系数K                    | ( 154) |
| (六) 压力损失                     | ( 155) |
| (七) 不可拆式螺旋板式换热器形式、基本参数和尺寸    | ( 155) |
| <b>六、螺旋管式换热器</b>             | ( 163) |
| (一) 结构                       | ( 163) |
| (二) 优缺点                      | ( 163) |
| (三) 基本传热公式                   | ( 164) |
| 1. 管内侧、壳侧流体均为螺旋状流动时          | ( 164) |
| 2. 管内侧流体呈螺旋流动、壳侧呈轴向流动时       | ( 164) |
| (四) 对流换热系数 $\alpha$ 和传热系数K   | ( 165) |
| 1. 螺旋管内对流换热系数                | ( 165) |
| (1) 管内层流时的对流换热系数 $\alpha_i$  | ( 165) |
| (2) 管内紊流时的对流换热系数 $\alpha_i$  | ( 166) |
| 2. 壳侧对流换热系数                  | ( 167) |
| (1) 壳侧螺旋流动时的对流换热系数(无相变时)     | ( 167) |
| (2) 壳侧轴向流动时的对流换热系数(无相变时)     | ( 168) |
| (3) 蒸汽在壳侧冷凝时的换热系数 $\alpha_o$ | ( 168) |
| 3. 总传热系数K                    | ( 169) |
| (五) 压力损失                     | ( 169) |
| 1. 管内侧无相变时流体压力损失             | ( 169) |

|                  |        |
|------------------|--------|
| 2. 壳侧压力损失        | ( 170) |
| (六) 螺旋管式换热器的标准尺寸 | ( 171) |

## 第九章 管 道

|                  |        |
|------------------|--------|
| 一、管径系列           | ( 174) |
| 二、管路的水压试验压力      | ( 174) |
| 三、钢管主要计算数值表      | ( 175) |
| 四、常用公称压力下管道壁厚选用表 | ( 176) |
| 五、管道强度校核         | ( 176) |
| 六、铜管的最小弯曲半径      | ( 177) |
| 七、管道坡度           | ( 177) |
| 八、管径换算表          | ( 178) |
| 九、管道间距           | ( 179) |
| 十、管道连接           | ( 180) |
| (一) 焊接和法兰连接      | ( 180) |
| (二) 螺纹连接         | ( 186) |
| (三) 活接头连接        | ( 188) |
| (四) 插接式连接        | ( 192) |
| (五) 耐热聚氯乙烯管连接    | ( 196) |
| (六) 聚乙烯管连接       | ( 198) |
| (七) 尼龙管连接        | ( 201) |
| (八) 夹布胶管连接       | ( 205) |
| (九) 纯胶管连接        | ( 206) |
| (十) 玻璃钢管连接       | ( 206) |

## 第十章 物性参数

|                                    |        |
|------------------------------------|--------|
| 一、空气的物性参数                          | ( 207) |
| 表10—1 干空气的物理性质                     | ( 207) |
| 表10—2 每米 <sup>3</sup> 干空气在不同温度下的重量 | ( 208) |
| 二、水蒸汽的物性参数                         | ( 209) |
| 表10—3 在饱和线上水蒸汽的物性参数                | ( 209) |
| 三、水的物性参数                           | ( 210) |
| 表10—4 在饱和线上水的物性参数                  | ( 210) |
| 表10—5 水的沸点与大气压的关系                  | ( 211) |
| 表10—6 电子设备水冷系统的用水技术要求              | ( 211) |
| 表10—7 水的硬度分类                       | ( 211) |

|                             |                        |        |
|-----------------------------|------------------------|--------|
| 表10—8                       | 理想纯水在不同温度时的电阻率         | ( 211) |
| 表10—9                       | 全国各地水源的水温和硬度           | ( 211) |
| <b>四、几种液体的物性参数</b>          |                        | ( 214) |
| 表10—10                      | 几种液体的物性参数              | ( 214) |
| 表10—11                      | 氟里昂—113饱和液体的热物理性质      | ( 214) |
| 表10—12                      | 氟里昂—113饱和蒸汽的热物理性质      | ( 215) |
| 表10—13                      | 氟里昂—113过热蒸汽的热物理性质      | ( 215) |
| <b>五、乙二醇水溶液的物性参数</b>        |                        | ( 216) |
| 表10—14                      | 乙二醇水溶液的沸点              | ( 216) |
| 表10—15                      | 乙二醇水溶液的冰点              | ( 216) |
| 表10—16                      | 乙二醇水溶液的热物理性质           | ( 217) |
| 表10—17                      | 乙二醇水溶液的比重              | ( 220) |
| 表11—18                      | 乙二醇及其水溶液的比热            | ( 221) |
| <b>六、测温用铜—康铜热电偶温度—电势对照表</b> |                        | ( 222) |
| 表10—19                      | 铜—康铜热电偶分度表             | ( 222) |
| <b>七、某些材料的物理性能参数</b>        |                        | ( 224) |
| 表10—20                      | 金属材料及元素的物性参数           | ( 224) |
| 表10—21                      | 非金属材料的重度、导热系数、比热和线膨胀系数 | ( 227) |
| 表10—22                      | 常用保温材料性能及规格            | ( 228) |
| 表10—23                      | 几种常用材料的吸声系数            | ( 230) |
| <b>八、气象、地理资料</b>            |                        | ( 231) |
| (一) 空气的湿度                   |                        | ( 231) |
| 1. 绝对湿度                     |                        | ( 231) |
| 2. 相对湿度                     |                        | ( 231) |
| 表10—24 空气相对湿度表              |                        | ( 232) |
| 3. 露点                       |                        | ( 235) |
| 4. 饱和水蒸汽的压力和密度              |                        | ( 235) |
| 表10—25 饱和水蒸汽的压力和密度表         |                        | ( 236) |
| (二) 大气压力、温度与海拔高度的关系         |                        | ( 237) |
| 表10—26 大气压力、温度与海拔高度的关系表     |                        | ( 237) |
| <b>九、各城市的气象参数</b>           |                        | ( 238) |
| 表10—27                      | 各城市的气象参数               | ( 238) |
| <b>十、标准大气表</b>              |                        | ( 239) |
| 表10—28                      | 标准大气表                  | ( 239) |

# 第六章 液体冷却

## 一、引言

随着电子器件的功率和频率的提高，电子器件的发热密度也就会相应提高。如果采用自然冷却和强迫风冷就无法将电子器件产生的热量带走，用液体来代替空气冷却，电子器件单位面积的散热能力可以提高1—2个数量级，冷却效果可以得到明显的提高。

当设备必须在高海拔地区工作时，强迫液冷尤其可靠，因为那里空气密度变低，强迫风冷的效果就会变坏。

强迫液冷还允许小功率的电子器件高密度组装。这不仅符合组装的需要，而且对获得所需的电性能要求也是必要的。

另外，强迫液冷还排除了风机工作时所带来的振动和噪声问题。因此，对大功率、高热流密度的电子设备，强迫液冷也是一种有效的冷却方法。

在液体冷却中，传导、对流和辐射的三种基本传热方式的相对重要性发生了变化。

辐射效应一般忽略不计，传递热量的主要方式是传导和对流。

传导换热可以通过电子器件的金属部分进行，也可以通过液体进行。液体传导只有在密闭空间热源或液体具有高粘度时才显得比较突出，因为此时的对流换热效应已趋微弱。

总之，一般情况下电子器件的液体冷却中的换热，大量的还是以对流换热为主。

## 二、液体冷却的基本原理

### （一）液体传导

热量通过液体传导的方式与热量通过其它介质传导的方式在本质上是相同的。它在使用作为密闭空间热源时与用气体密闭空间热源时相比较，传热效率要高得多。

用液体将两个固体表面分隔开，通过液体所传导的热量 $\Phi$ 可以用导热基本定律（付立叶定律）来表示

$$\Phi = \frac{\Delta t}{\frac{\delta}{\lambda \cdot A}} \quad (\text{瓦}) \quad (6-1)$$

式中  $\Delta t$  —— 液体两端的温度差（度）；  
 $\delta$  —— 液体层厚度（米）；  
 $\lambda$  —— 液体的导热系数（瓦/米·度）；

$A$ ——垂直于热流方向的液体传导面积（米<sup>2</sup>）。

## （二）液体对流

液体流过固体表面时，由于温度差而引起的热量传递过程称为对流换热。换热过程所传递的热流量 $\Phi$ 可以用牛顿公式进行计算

$$\Phi = \alpha \cdot A \cdot \Delta t \quad (\text{瓦}) \quad (6-2)$$

式中  $A$ ——对流换热面积（米<sup>2</sup>）；

$\Delta t$ ——壁面与流体间的温差（度）；

$\alpha$ ——壁面与流体之间的对流换热系数（瓦/米<sup>2</sup>·度）。

决定换热系数 $\alpha$ 大小的因素很多，不仅要考虑液体的流动状态，液体的物理特性（粘度、密度、比热和导热系数等），而且还和电子器件的表面几何形状、放置位置有关。计算 $\alpha$ 的大小通常都是采用在实验基础上所得到的准则方程来解决的。

## 三、对流换热时的应用方程式

### （一）自然对流

凡是由液体的冷热各部分的密度不同所引起的流动，称为自然对流。自然对流换热系数决定于努谢尔特准则 $Nu$ 、葛拉晓夫准则 $Gr$ 和普朗特准则 $Pr$ 所组成的准则方程式

$$Nu = C(Gr)^m \cdot (Pr)^n \quad (6-3)$$

式中  $C$ 、 $m$ 、 $n$ 都是常数，取决于冷却液的特性、温度以及物体的几何形状和位置。一般指数 $m$ 和 $n$ 近似相等，所以公式（6—3）可以写成

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n \quad (2-18)$$

公式（2—18）中的液体的物性参数应根据液体膜温 $t_m$ 来计取。

$$t_m = \frac{t_w + t_f}{2} \quad (6-4)$$

式中  $t_w$ ——物体表面的平均温度；

$t_f$ ——液体的平均温度。

公式（2—18）中准则方程的定形尺寸见上册第48页表2—7。

公式（2—18）中的常数 $C$ 取决于自然对流物体的形状和位置，可参阅上册第48页表2—6。

方程式（2—18）中的指数 $n$ 取决于 $[Gr \cdot Pr]$ 的大小。

当  $10^3 < [Gr \cdot Pr] < 10^9$ 时，  $n = 0.25$

$[Gr \cdot Pr] > 10^9$ 时，  $n = 0.33$

然而，几乎所有电子设备在液体自然对流换热计算时 $[Gr \cdot Pr]$ 的值都在 $10^3 \sim 10^9$ 范围内，因此，电子设备的液体自然对流换热计算推荐采用下面公式，它对各种表面都能得

到足够的近似性。

$$Nu = 0.52[Gr \cdot Pr]^{0.25} \quad (6-5)$$

但对于电子管、晶体管、电阻、继电器等小型器件，若全部浸没在液体里，并置于有限的空间内，自然对流换热计算可应用下列公式：

$$Nu = 1.45[Gr \cdot Pr]^{0.23} \quad (6-6)$$

应该指出的是：用公式（6—6）计算出来的对流换热系数要比用公式（6—5）计算出来的大，这是由于电子器件比较小，形状不规则以及外壳效应所致。

## （二）管内强迫对流

液体受外力作用而引起的流动，称为强迫对流。液体在管内强迫对流换热计算之前必须判断流动状态是层流还是紊流，因为流动状态不同直接影响到对流换热的强度。

从雷诺数来看，如果

$Re > 10^4$ ，流动是紊流；

$Re < 2300$ ，流动是层流；

$2300 < Re < 10^4$ ，属于过渡状态流动。

液体在管内作紊流、层流、过渡状态流动时的计算公式，见第三章公式（3—4）至（3—8）式。必须指出液体在管内作过渡状态流动时的换热，除可按（3—8）式计算外，还可以按精确度较高的格里斯基在1975年发表的公式计算

$$Nu_f = 0.012 (Re_f^{0.87} - 280) \cdot Pr_f^{0.4} [1 + (d/L)^{2/3}] \cdot (Pr_f/Pr_w)^{0.11} \quad (6-7)$$

上式适用范围是：

1)  $2300 < Re < 10^4$ ；

2)  $1.5 < Pr < 500$ ； $0.05 < Pr_f/Pr_w < 20$

上式与十多个研究者（从1930年至1974年）的800多个实验数据比较，90%的点偏差在±20%以内。因此，该公式还是比较准确的。式中角码“f”表示该准则数在流体平均温度下计取，角码“w”表示在壁温下计取。

在电子设备的液冷设计中，为了能使器件表面的热量有效地被冷却液带走，通常必须设计一个专用水套，使冷却液在水套和发热器件表面所构成的环形间隙内流过。

环形间隙内液体的放热<sup>[8]</sup>

（1）层流时的计算公式

$$Nu_f = 1.02 Re_f^{0.45} \cdot Pr_f^{0.5} \cdot \left(\frac{D_{eq}}{l}\right)^{0.4} \left(\frac{D}{d}\right)^{0.8} \cdot \left(\frac{\mu_f}{\mu_{w1}}\right)^{0.14} \cdot Gr_f^{0.05} \quad (6-8)$$

式中  $D_{eq}$ ——环形间隙的当量直径；

$\mu_{w1}$ ——按内管壁温计算的液体动力粘性系数；

$D$ ——环的外管直径，即水套的内径；

d——环的内管直径，即发热器件的外径。

角码“f”表示相应的准则数是在流体的平均温度下计取。

## (2) 紊流时的计算公式

在环的内外径之比 $d/D > 0.2$ 时，内管和外管都可按下式计算

$$Nu = \frac{\alpha \cdot (2\delta)}{\lambda} = 0.02 Re^{0.8} \cdot Pr^{1/3} \left(\frac{D}{d}\right)^{0.53}$$

(6—9)

式中  $\alpha$ ——环形间隙内的对流换热系数；

$2\delta$ ——环形间隙的当量直径，即 $D_{eq} = 2\delta = D - d$ ；

$\delta$ ——环形间隙。

其他参数含义与(6—8)式相同。

## 四、液体冷却系统

液体冷却系统按照电子器件与液体的接触情况大体上分为两类：直接液体冷却和间接液体冷却。

### (一) 直接液体冷却

直接液体冷却就是让冷却液直接与发热的电子器件紧密接触，电子器件将耗散的热量直接传给液体，再由冷却液将热量传给机壳，最后由机壳将热量散发出去。根据系统的结构和作用原理又可以分为

#### 1. 电子器件直接浸入液体中的冷却

由于电子器件被直接浸入液体中，液体被加热后使液体的密度减小，体积膨胀而上升，当受热上升的液体运动中直接与机壳冷表面接触后，液体变冷，体积收缩，密度增大而下降，从而形成自然对流把热量散发出去。这种方法是所有换热方法中最简单的一种。它广泛应用在功率较大的变压器、电感以及高压整流设备中，如图6—1所示。这种冷却方式中，由于液体的密度差所引起的自然对流，它的温度场是不均匀的。在设备中形成顶部温度高，底部温度低的特点。该装置放在自由空气中机壳有效表面的最大耗散密度可达 $0.0775 \text{瓦/厘米}^2$ 。若机壳外部采用通风等其它更有效的冷却，机壳有效表面的最大耗散密度可达 $0.31 \sim 0.47 \text{瓦/厘米}^2$ 。

这种直接浸入式的液体冷却，当采用高粘度的冷却液时，最好装置搅拌器。因为高粘度的液体往往使冷却液的自然对

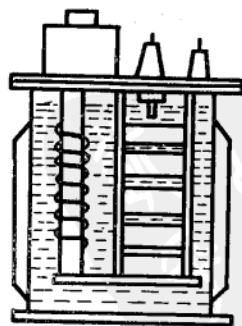


图6—1 电子器件的直接液体冷却

流难以进行，这时，只有搅拌冷却液，才能强化对流换热效果。冷却液经搅拌后，其冷却效应已不是单一的自然对流了。但是，通常自然对流的计算公式仍可应用，只不过对计算应当加以修正。

必须指出：采用高粘度的冷却液在遇有下列情况时是必不可少的。

- 1) 浸入的电子器件有绝缘要求，
- 2) 利用高粘度液体对冲击、振动起阻尼作用。

## 2. 直接强迫液体冷却

冷却液用一低压泵送出后，在电子器件的表面高速度流过而得到充分的换热，受热后的液体再通过换热器将热量散发出去，这一过程大大提高了电子器件冷却效率。如图 6—2 所示，它是一个密封循环系统。在大功率速调管的收集极、管体冷却，大功率整流管和功率三、四极管的阳极冷却中应用较广。

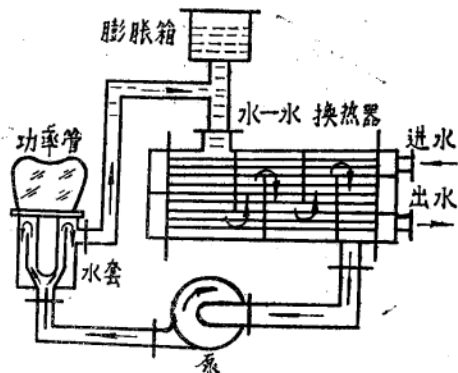


图 6—2 典型的强迫水冷系统

冷却系统中的膨胀箱，可以作为液体受热膨胀时补偿用，同时还可以用作排除系统中的气体。冷却液可以是水，变压器油，航空液压油，或者是其它有机溶液。

## 3. 直接液体冷却中要注意的几个问题

必须考虑液体的膨胀，在系统中设有膨胀箱、波纹管，或其它合适的装置；必须保证机壳有足够的强度和密封性能；应该考虑冷却液与电子器件，以及与系统中所应用的金属之间的电和化学的相容性；电子器件的布置和相对位置应该使其获得最大的对流。冷却液应首先通过热敏感元件后再通过其它发热元件；系统应考虑冷却液的泄放，以及日常维修的方便。

## (二) 间接液体冷却

在间接液体冷却中，冷却液并不与电子器件直接接触，而是将电子器件装在一个由液体冷却的冷板上。这个冷板作为安装电子器件的底盘，同时又是换热器。热量通过自然对流、传导或辐射由器件传至冷板，再由冷板传给冷却液，并由冷却液把热量带走。如图 6—3，根据电子设备的结构要求可以设计成多种形式。图 6—4 的结构特点是，

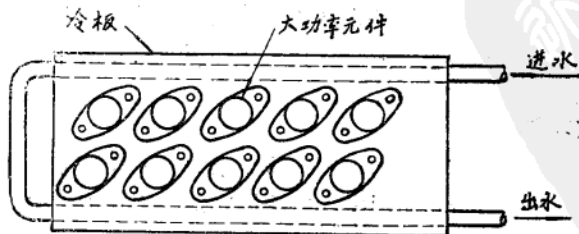


图 6—3 间接液体冷却组件

在强迫风冷情况下工作温度已经超过了电子器件的许用范围，在不变更原有结构的基础上，将机壳变成冷板。当冷却液循环通过冷板时，电子器件所耗散的一部分热量通过金属传导给冷却液带走，而剩余部分热量被冷却空气带走。这种情况实质上是间接液冷与强迫风冷的联合运用。

由图 6—3 可知，间接液体冷却的热流途径是器件通过安装面将热量传至机壳

（冷板），机壳再将热量传至冷却管壁，最后由管壁传至冷却液。为此，要改善间接液冷，必须减少热流路径中的三项热阻。要减少第一项接触热阻，器件与机壳（冷板）的安装面必须平坦、光洁，而且要有足够的压紧力，接触面之间最好填

充导热脂；要减少第二项传导热阻，必须使冷却管道尽量靠近发热器件，以缩短热传导路径。并且尽量采用导热系数高的铝或铜作为机壳（冷板）的材料；而增大管道中冷却液的流量就可以减少管道与冷却液之间的对流换热热阻。

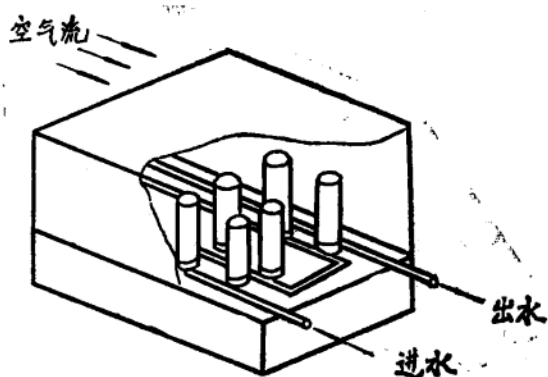


图 6—4 间接液体冷却的应用

## 五、液体冷却系统设计

一个设计良好液体冷却系统，必须确保电子设备性能稳定，可靠性高。整个冷却系统应体积小、重量轻、经济、操作维修方便。

### （一）设计依据

设计一个高可靠性的电子设备冷却系统，必须掌握如下原始数据。

需要冷却的各元器件的发热密度及其允许最高温度；元器件的耗散功率及其技术条件；电子设备所处的最高或最低环境温度（或机房、车箱内的最高、最低工作温度）；发热器件和整个电子设备从热源至周围环境热传递的热流途径；元器件的工作电位高低及所允许泄漏功率；被冷却的电子器件在设备中的分布状况，是个别元件集中发热，还是多个元件分散发热，或者两者兼有；设备工作环境的自然条件：水源的充裕程度及其质量，海拔高度，气象资料等。

### （二）确定冷却方案

1) 对于发热密度不高，又具有一定绝缘要求的元器件，如大功率脉冲变压器、充电电感，大功率整流组件等多数采用浸入式液体冷却。冷却剂为变压器油。

2) 对原先考虑自然冷却或强迫风冷的器件，在实际使用时，因工作条件变化器件出现过热现象时，可采用间接液体冷却。同时，在电子器件经常需要检测、维修而又不

允许冷却液污染的情况下，采用间接液体冷却也较为方便。

3) 器件耗散功率在1千瓦以下，平均耗散功率密度在20~60瓦/厘米<sup>2</sup>的情况下，广泛采用强迫风冷。

4) 元器件工作在高环境温度，高海拔地区，而且功率较大时必须采用强迫液冷。

5) 当元器件内表面发热密度大于60瓦/厘米<sup>2</sup>时，应当采用直接强迫液体冷却。

6) 当需要冷却的元器件较多，分布又比较分散，各自的发热密度参差不齐时，可以采用联合冷却方式。将集中式发热元件（功耗大的）采用液体冷却，功耗小的分散式元器件采用自然冷却或强迫风冷。

7) 耗散功率在20千瓦以上的冷却系统，二次冷却（外循环）宜采用水冷。换热器可采用水—水换热器。对于耗散功率小于20千瓦的冷却系统，二次冷却（外循环）宜采用风冷。换热器可采用水—空气换热器。

一个典型的强迫液体冷却系统如图6—5所示。

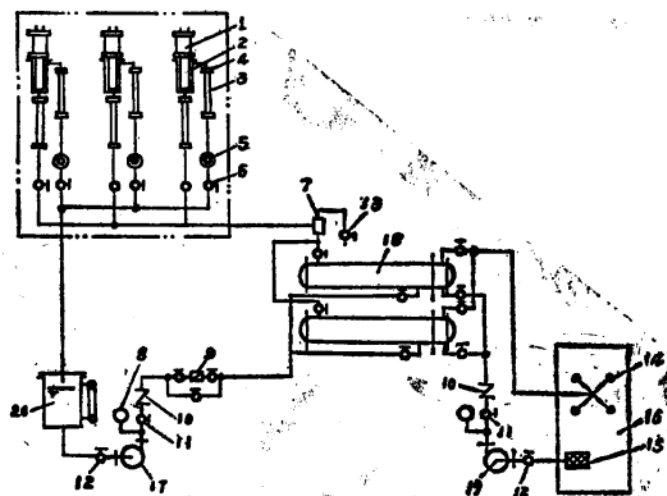


图6—5 双循环水冷系统

1—电子管；2—水管；3—绝缘管；4—防腐接头；5—水流接点；6—支管；7—集气器；8—压力计；9—流量计；10—逆止阀；11—送水管总阀门；12—吸水管总阀门；13—排气阀；14—喷头；15—吸水滤网；16—冷却池；17—内循环水泵；18—换热器；19—外循环水泵；20—储水箱。

### （三）设计计算

#### 1. 选择冷却液

应用于电子设备的冷却液种类很多，选择冷却液时，下列因素必须加以考虑。

- 1) 冷却液的热传递能力；
- 2) 冷却液的低温工作极限——冰点或者低温时的高粘度；
- 3) 冷却液的高温工作极限——沸点、分解温度、燃点；