

《仪器系统设计基础》第九讲

仪器热设计技术



仪器科学与工程系专业必修课

主讲： 宋开臣 教授

kcsong@zju.edu.cn

13600513662

仪器热设计技术

1. 仪器热环境和热控制目的
2. 仪器热设计的基本理论
3. 仪器热设计原则和步骤
4. 冷却方法的选择



1. 仪器热环境和热控制目的

外部热环境

仪器使用场所的热环境的可变性是热设计必须考虑的一个重要因素。

- (1)环境温度和压力(或高度)的极限值;
- (2)环境温度和压力(或高度)的变化率;
- (3)太阳或周围物体的辐射热;
- (4)可利用的热量(包括种类、温度、压力和湿度);
- (5)冷却剂的种类、温度、压力和允许的压降(当由其他系统或设备提供冷却剂时)。

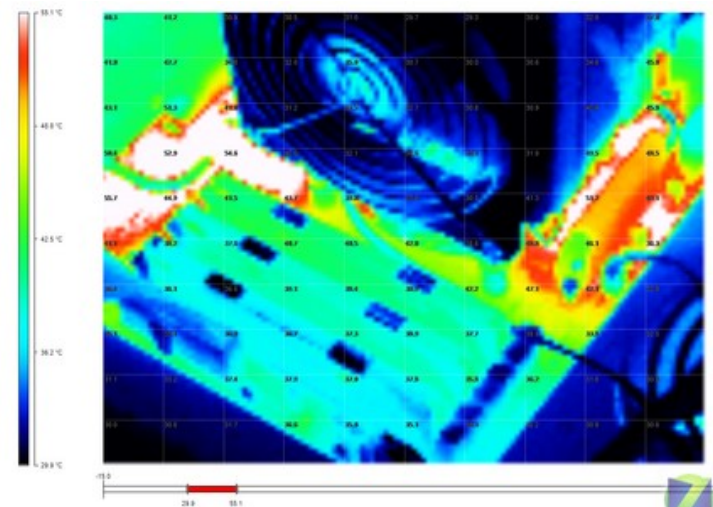
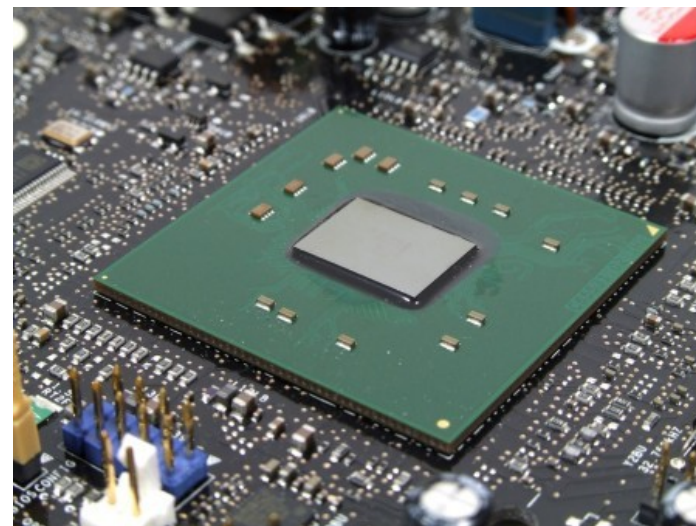


1. 仪器热环境和热控制目的

内部热环境

研究表明，芯片级的热流密度高达 $100\text{W}/\text{cm}^2$ ，若不采取合理的热设计技术，必将严重影响电子元器件和设备的热可靠性。

- (1) 温度对变压器、扼流圈的影响；
- (2) 温度对半导体器件的影响；
- (3) 温度对电阻器的影响；
- (4) 温度对电容器的影响。



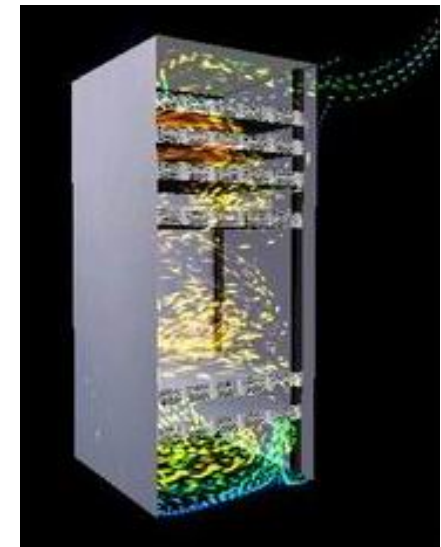
1. 仪器热环境和热控制目的

热控制的目的

仪器热控制的目的是要为芯片级、元件级、组件级和系统级提供良好的热环境。

防止电子元器件的热失效是热设计的主要内容。

热失效是指电子元器件直接由于热因素而导致完全失去其电气功能的一种失效形式。





2. 仪器热设计的基本理论

相关术语定义：

1. **热流密度**：单位面积的热流量，单位： W/m^2
2. **体积功率密度**：单位体积的热流量，单位： W/m^3
3. **热阻**：热量在热流路径上遇到的阻力。用 R 表示，即： $R = \Delta t / Q$ ，单位： $^{\circ}\text{C}/\text{W}$
4. **导热系数**：材料传导性能的参数指标。用 K 表示，单位： $\text{W}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}$
5. **对流换热系数**：反映了两种介质间对流换热过程的强弱，表明了流体与壁面间温差为 1°C 时，在单位时间内通过单位面积的热量。用 h_c 表示，单位： $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$
6. **黑度**：表明物体的辐射力接近绝对黑体辐射力的程度，用 ε 表示，单位：无
7. **雷诺数**：该数反映了流体流动时的惯性力与粘滞力的大小之比，是说明流体流态的一个相似准则。用 Re 表示，单位：无



2. 仪器热设计的基本理论

热量传递的动力是温差的存在，热量总是从高温区传向低温区，且高温区发出的热量必定等于低温区吸收的热量。

热量的传递有三种基本方式：**传导、对流和辐射**。它们可以单独出现也可以两种或三种形式同时出现。

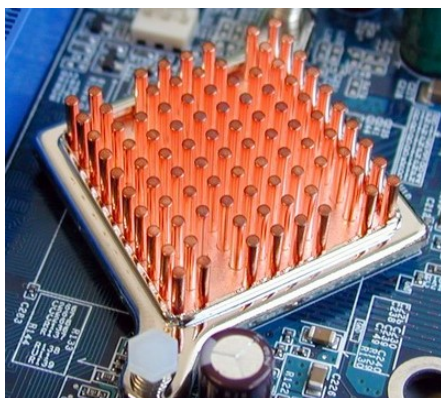
但是对于不同的散热系统，一般只有一种或几种散热方式起主导作用：

- (1) 对于自然冷却系统，一般需要同时考虑以上三种传热方式；
- (2) 对于强迫对流冷却系统，只需考虑导热和对流；
- (3) 对于室外设备，必须考虑日光辐射因素。

2. 仪器热设计的基本理论

仪器的散热途径:

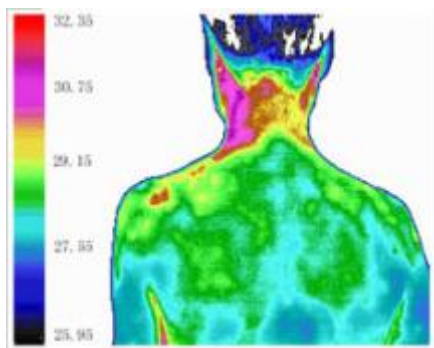
热传导



热对流



热辐射



组合散热





2. 仪器热设计的基本理论

传导

传导指物体直接接触时，通过分子间动能传递进行能量交换的现象。其计算公式为：

$$Q=KA\Delta t/L$$

其中， Q ——传导散热量， W

K ——导热系数， $W/m.^{\circ}C$

A ——导体垂直于传热路径的横截面积， m^2

Δt ——传热路径两端温差， $^{\circ}C$

L ——传热路径长度， m

常用物质的导热系数：铜：330-380 $W/m.^{\circ}C$ ；铝：150-204 $W/m.^{\circ}C$ ；铁：73 $W/m.^{\circ}C$ ；空气0.02-0.03 $W/m.^{\circ}C$



2. 仪器热设计的基本理论

对流

对流是指流体各部分之间发生相对位移时引起的热量传递过程。对流仅发生在流体中，且必然伴随着导热现象。由流体冷热各部分的密度不同所引起的对流称为自然对流；若流体的运动由外力(泵、风机等)引起的，称为强迫对流。其计算公式为：

$$Q=h_c A \Delta t$$

其中， Q ——对流散热量，W

h_c ——对流换热系数，W/m. $^{\circ}$ C

A ——有效换热面积，m 2

Δt ——换热表面与流体温差， $^{\circ}$ C

对流换热介质有气体和液体，其中液体的冷却效果比气体高出一个数量级。



2. 仪器热设计的基本理论

辐射

物体以电磁波形式传递能量的过程。辐射不需要介质，且有能量形式的转换。辐射散热的计算公式是：

$$Q = \varepsilon \sigma A (T_1^4 - T_2^4)$$

其中， Q ——辐射散热量， W

ε ——散热表面的黑度

σ ——斯蒂芬—玻尔兹曼常数， $5.67 \times 10^{-8} W / m^2 \cdot K^4$

T_1 、 T_2 ——分别为物体和环境的绝对温度， K



3. 仪器热设计原则和步骤

- 基本要求:

- ✓ 应满足设备可靠性的要求;
- ✓ 应满足设备预期工作的热环境要求;
- ✓ 应满足对冷却系统的限制要求;
- ✓ 电子设备热设计应与电路设计和结构设计同时进行;
- ✓ 热设计与维修性设计相结合
- ✓ 根据发热功耗, 环境温度、允许工作温度、可靠性要求, 以及尺寸、重量、冷却所需功率、经济性与安全等因素, 选择最简单、最有效的冷却方法;
- ✓ 热控制设计应保证电子设备在紧急情况下, 具有最起码的冷却措施, 是关键部件或设备在冷却系统某些部件遭破坏或不工作的情况下, 具有继续工作的能力。

3. 仪器热设计原则和步骤

基本原则：

- ✓ 保证热设计系统具有良好的冷却功能，即可用性
- ✓ 保证设备热设计系统的可靠性
- ✓ 良好的适应性（相容性）
- ✓ 良好的维修性
- ✓ 良好的经济性



泡泡网 PCPOP.COM





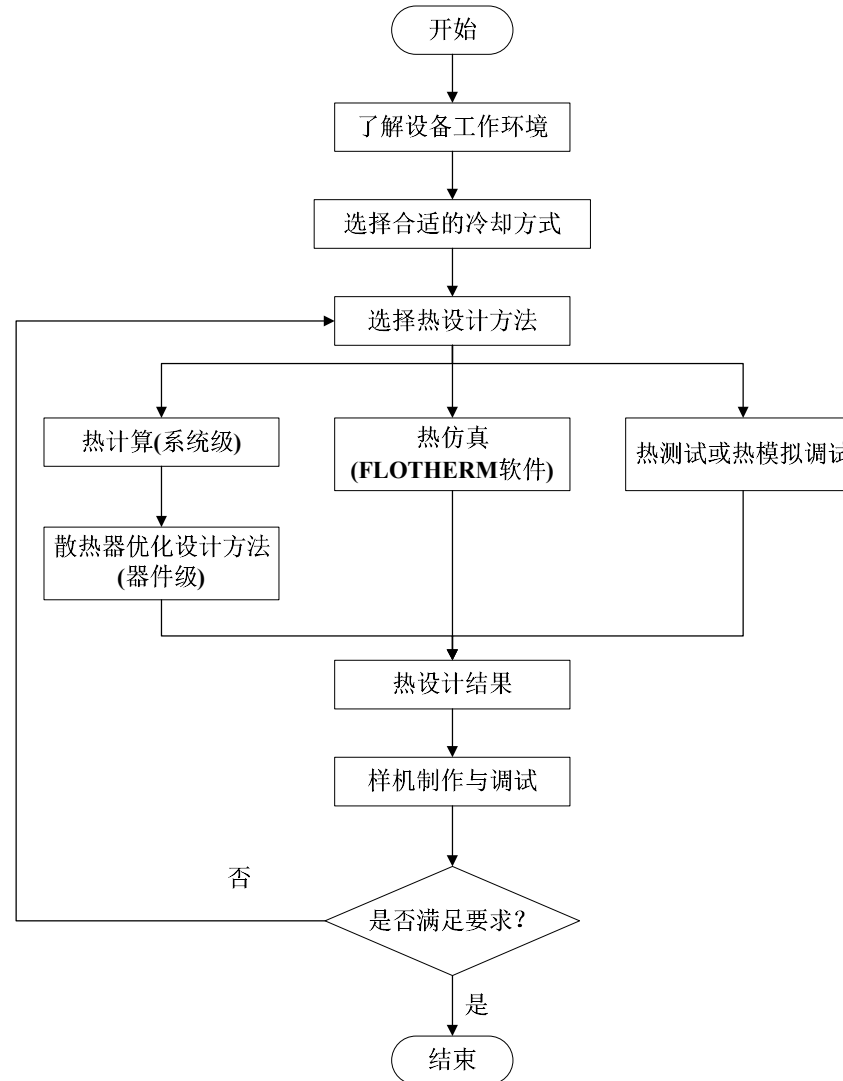
3. 仪器热设计原则和步骤

■ 设计步骤:

1. 熟悉和掌握与热设计有关的标准、规范等
2. 确定可利用的冷却技术和限制条件
3. 确定每个发热元件的功耗，进行应力分析
4. 根据热流密度和相关因素，对热阻进行分析和初步分配
5. 选择合适的冷却技术和传热方法
6. 估算成本，研究其他方案并对比，确定最佳方案
7. 热设计的同时，还应兼顾可靠性、安全性、电磁兼容性等要求

3. 仪器热设计原则和步骤

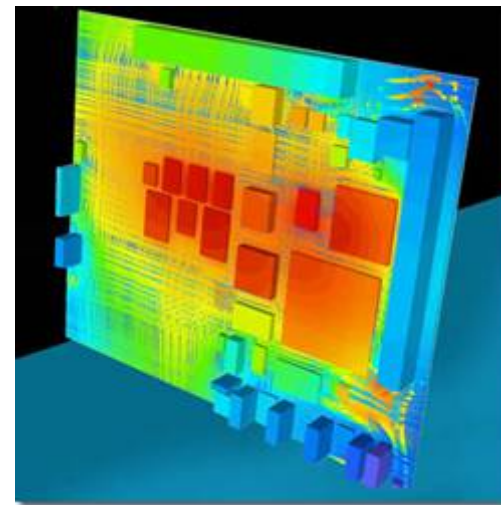
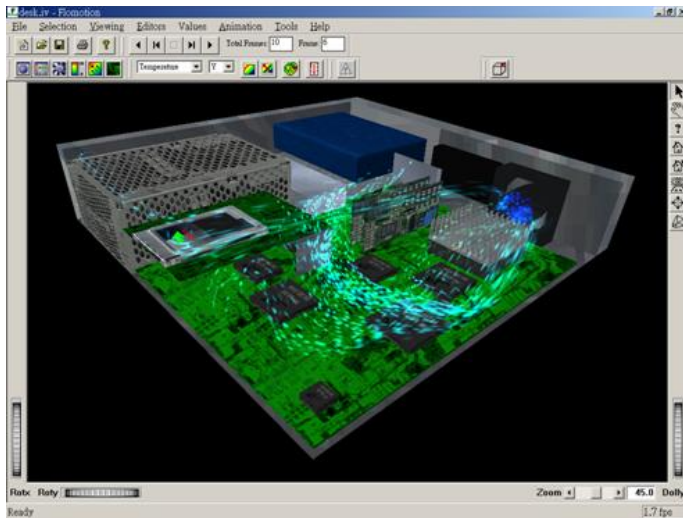
设计流程框图：



3. 仪器热设计原则和步骤

热仿真与计算

计算流体动力学（**Computational Fluid Dynamics, CFD**）
软件可以较为准确地模仿仪器设备或其组合体的温度场，
是热设计的有力工具。

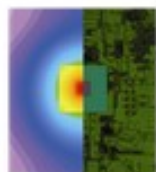


常用的热仿真软件有：**Flotherm, Icepark, ESC**等。

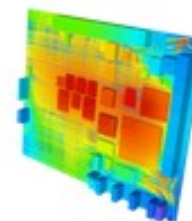
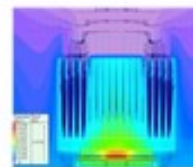
3. 仪器热设计原则和步骤

热仿真与计算

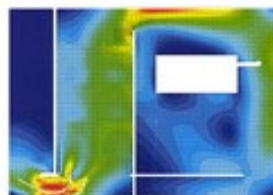
FloTHERM作为全球第一款专门针对电子器件/设备热设计而开发的仿真软件，FloTHERM可以实现从**元器件级、PCB板和模块级、系统整机级到环境级**的热分析。



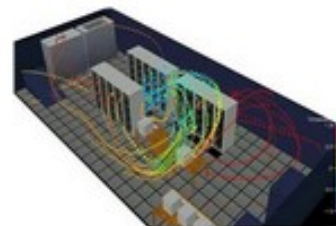
元器件级



板级和模块级



系统级

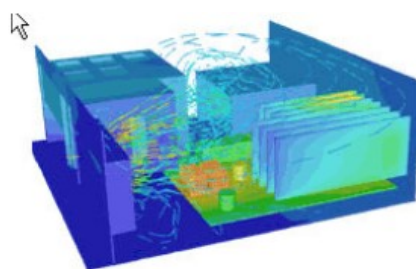


环境级

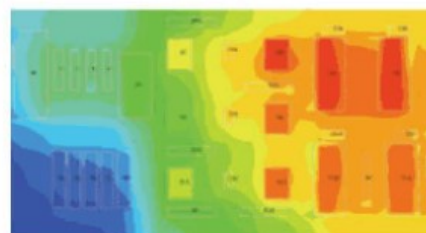
3. 仪器热设计原则和步骤

热仿真与计算

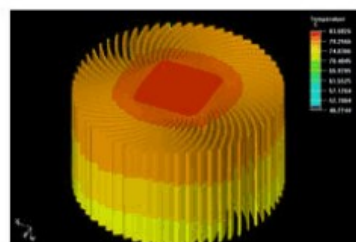
ICEPAK软件由全球最优秀的计算流体力学软件提供商Fluent公司，专门为电子产品工程师定制开发的专业电子热分析软件，广泛应用于通讯、汽车及航空电子设备、电源设备，通用电器及家电等领域。



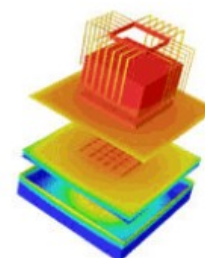
机箱内迹线与温度分布



PCB 板温度分布



CPU 太阳花散热器温度分布

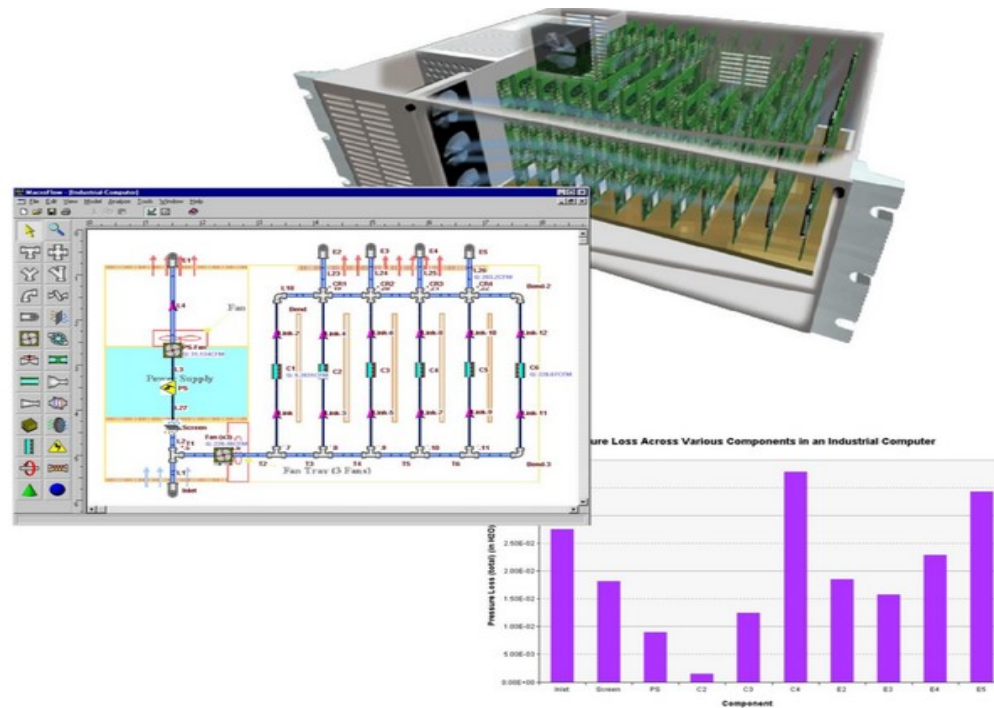


封装的温度分布

3. 仪器热设计原则和步骤

热仿真与计算

MacroFlow 是快速进行电子散热和流动分析，半导体制程和通用流体仿真的软件工具。





3. 仪器热设计原则和步骤

热仿真与计算

SINDA/FLUINT是由美国Cullimore & Ring Technologies, Inc. 公司开发的应用于复杂系统热设计分析和流体流动分析的综合性有限差分、集总参数（电路网络模拟）软件。在全世界有超过25个国家、500多个单位使用此软件。应用领域包括航空航天、电子、石油化工、生物医药、汽车等行业；

FloEFD是无缝集成于主流三维CAD软件中的高度工程化的通用流体传热分析软件，它基于当今主流CFD软件都广泛采用的有限体积法(FVM)开发，FloEFD完全支持直接导入Pro/E, Catia, Solidworks, UGS-NX, Inventor等所有主流三维CAD模型，并可以导入Parasolid, IGES, STEP, ASIC, VDAFS, WRML, STL, IDF, DXF, DWG等格式模型文件。



4. 冷却方法的选择

仪器常用的散热方法有自然散热、强迫通风散热、液体冷却、蒸发冷却、半导体制冷、热管传热等。上述几种散热方式各有各的优缺点，在使用中要根据设备的整体结构、技术水平、使用环境和经济指标等统一考虑，也可把几种冷却方式结合起来使用，以达到理想的效果。

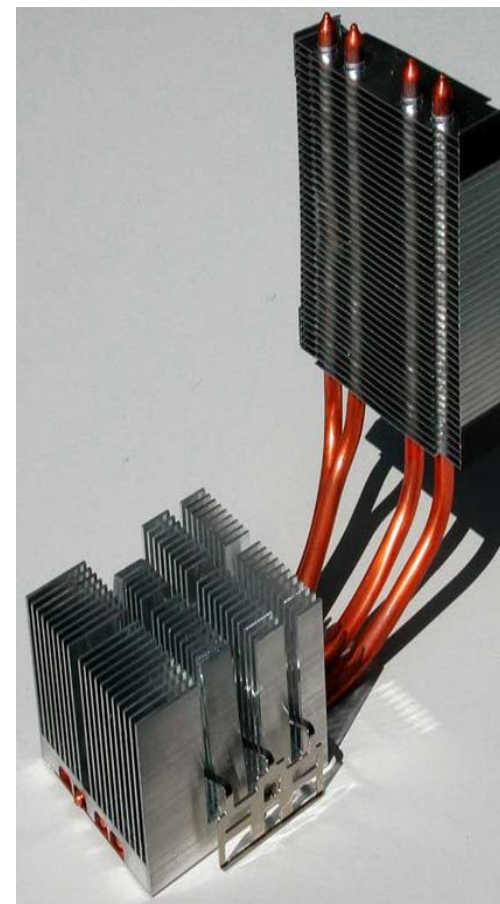


4. 冷却方法的选择

4.1 通风冷却

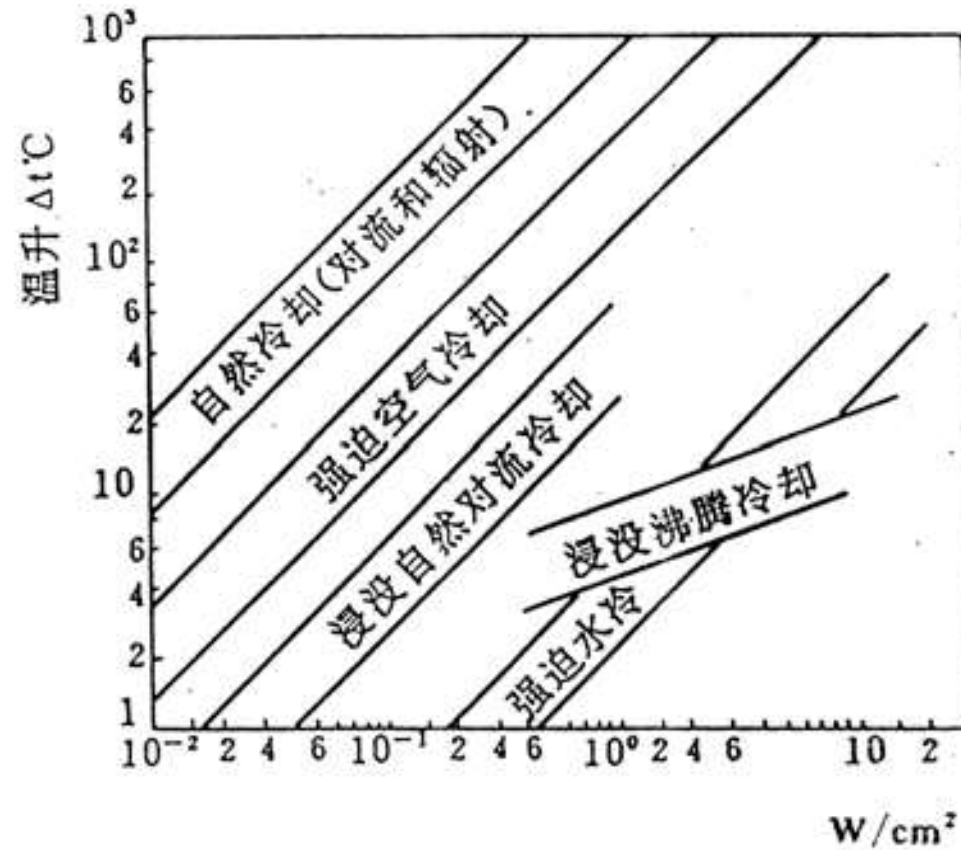
4.2 液体冷却

4.3 热电制冷与热管散热技术



4. 冷却方法的选择

根据热流密度和温升要求选择冷却方法





4.1 通风冷却

自然风冷设计

自然风冷：导热、自然对流和辐射换热的单独作用或两种以上换热形式的组合

优点：使可靠性高、成本低。因此，考虑冷却方法应优先考虑自然冷却。

缺点：是散热效率低，只能用在小功率装置上。

传热途径是设备内部电子元器件和印制板组件通过导热、对流和辐射传向机壳，再由机壳通过对流和辐射将热量传至周围介质(如空气)，使设备达到冷却的目的。

4.1 通风冷却

自然风冷设计

■ 机壳自然散热

1. 选择导热性能好的材料作为机壳

2. 选择合适的机壳表面状况，增强热辐射能力

3. 开通风孔，加强对流散热能力

材 料	W/(m·K)	材 料	W/(m·K)	材 料	W/(m·K)
金属固体:		石英 (平行于轴)	19.1	氯代甲烷 CH_3Cl	0.178
银 (最纯的)	418	刚玉石, Al_2O_3	10.4	二氧化碳 CO_2	0.105
铜 (纯的)	387	大理石	2.78	氟利昂 CCl_2F_2	0.0728
铅 (纯的)	203	冰, H_2O	2.22	气体:	
锌 (纯的)	112.7	熔融石英	1.91	氢	0.175
铁 (纯的)	73	硼硅酸耐热玻璃	1.05	氦	0.141
锡 (纯的)	66	液体:		空气	0.0243
铅 (纯的)	34.7	水银	8.21	戊烷	0.0128
非金属固体:		水	0.552	三氟甲烷	0.0066
方镁石 MgO	41.6	二氧化硫 SO_2	0.211		





4.1 通风冷却

自然风冷设计

■ 机壳自然散热

开设通风孔的基本准则是：

- (1) 通风孔的开设要有利于气流形成有效的自然对流通道的；
- (2) 进风孔尽量对准发热元器件；
- (3) 进风孔与出风孔要远离，为防止气流短路，应开在温差较大的相应位置，进风孔尽量低，出风孔则要尽量高；
- (4) 进风孔要注意防尘和电磁泄露。



4.1 通风冷却

自然风冷设计

■ 机壳自然散热

通风孔散去的热量为

$$\Phi = 7.4 \times 10^{-5} H A_0 \Delta t^{1.5} (W)$$

H为自然冷却设备的高度(或进、出风孔的中心距)(**cm**)；

A₀为进风孔的面积(取较小值)(**cm²**)；

Δt=t₂-t₁为设备内部空气温度t₂与外部空气温度t₁之差(°C)。

4.1 通风冷却

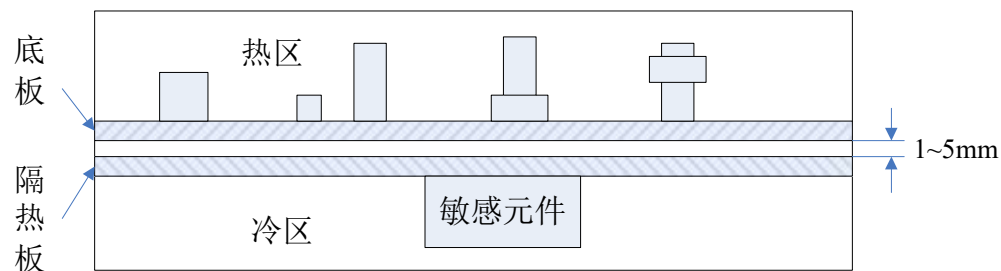
自然风冷设计

内部自然散热

仪器内部的热源主要是一些发热电子元器件，如电阻、变压器、扼流圈、晶体管、晶闸管以及集成电路等。

热安装的基本原则

1. 合理布置元器件
2. 合理安排印制板
3. 合理安排机箱内的结构件
4. 集成电路的散热主要依靠其外壳及引出线的对流、辐射和传导散热



冷热区隔离

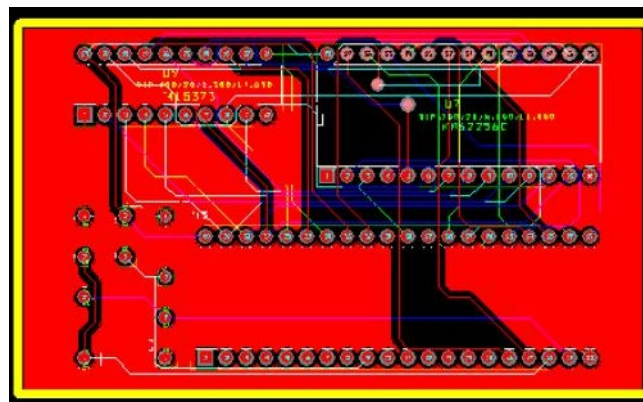
4.1 通风冷却

自然风冷设计

内部自然散热

印制电路板(PCB)的热设计

- 选材
- 保证散热通道畅通
- 元器件的排布
- 布线的要求
- 热分析



大面积铺铜

4.1 通风冷却

自然风冷设计

- 内部自然散热

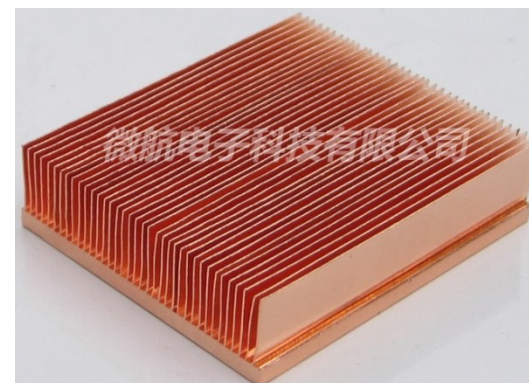
选用散热器



平板散热器



树状筋片散热器



平行筋片散热器



4.1 通风冷却

自然风冷设计

■ 内部自然散热

散热器设计的基本准则

1. 选用导热系数大的材料(如铜和铝等)制作散热器;
2. 尽可能增加散热器的垂直散热面积, 肋片间距不宜过小;
3. 用以安装晶体管的安装平面要平整、光洁, 以减小其接触热阻;
4. 散热器的结构工艺性和经济性要好。



4.1 通风冷却

强迫风冷设计

采用风机强迫空气以一定的速度流过散热器，使散热效率提高，但噪声大，结构较复杂。

强迫风冷与液体冷却、蒸发冷却相比较，具有结构简单、费用低、维护方便等优点。

适用于热流密度较大、温升要求较高的仪器中。



4.1 通风冷却

强迫风冷设计

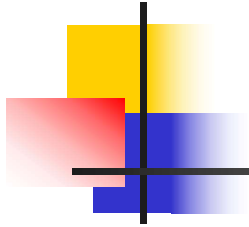
强迫风冷的基本形式

➤ 整机抽风冷却

风量大、风压小、各部分风量分布均匀，适合热耗散比较分散的整机。

➤ 整机鼓风冷却

风压大、风量集中，适合专门风道冷却、风阻较大、元件较多的整机。

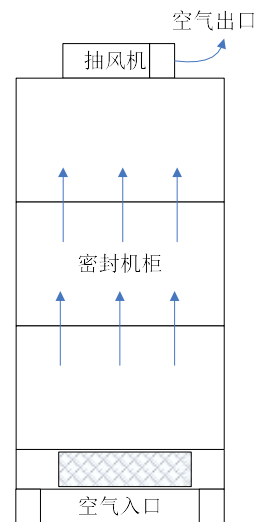


4.1 通风冷却

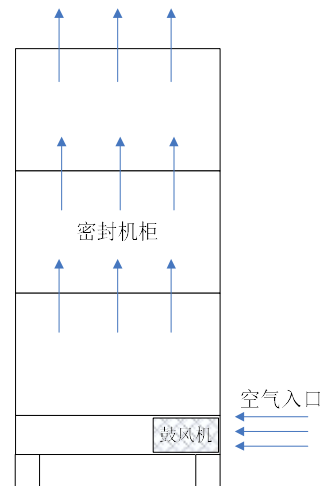
强迫风冷设计

抽风冷却

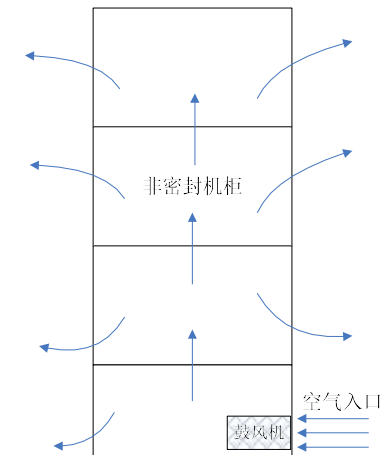
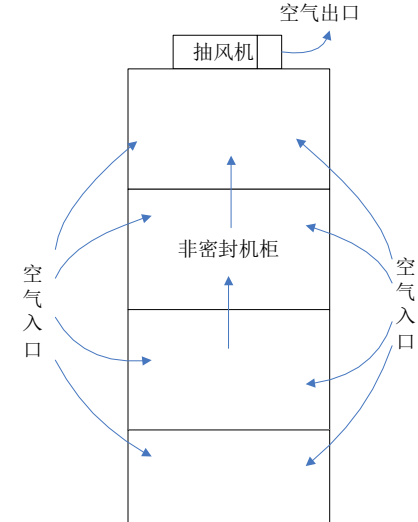
密封性



鼓风冷却



非密封性





4.1 通风冷却

强迫风冷设计

强迫风冷系统的设计步骤

- (1) 确定冷却空气入口和出口的温度和压力;
- (2) 根据可靠性要求确定每个元器件的最高允许温度(或温升);
- (3) 根据电性能和空间位置以及冷却功率的要求确定元器件的排列和布置方式;
- (4) 确定雷诺数;
- (5) 根据系统的结构尺寸和雷诺数, 计算空气流过每个电子元器件或元器件组的质量流量(或体积流量);
- (6) 计算系统的总压力损失及需要的冷却功率。



4.2 液体冷却

与通风冷却相比，**液体冷却**可将导热系数提高2个数量级，**适用于功率密度大的电力电子装置**（如速调管、行波管、返波管、磁控管等）。但液体冷却**系统较复杂，体积和重量较大，设备费用较高，维修也较困难**。

- **水冷**散热器的优点是散热效率高、噪声低，缺点是需要水处理和循环设备，且容易产生结露、漏水、电腐蚀；
- **油冷**的优点使不易结冻，不需水处理设备，但其缺点是冷却效率较差，结构复杂，维护较难；
- **沸腾冷却**是利用加热区蒸发放热，冷凝区蒸气凝结放热，这两种放热都具有很高的放热系数及散热能力，但系统复杂、昂贵，一般只用在特殊的地方。

4.2 液体冷却

直接液体冷却

直接液体冷却就是冷却液体与发热的电子元器件直接接触，进行热交换。热源将热量传给冷却液体，再由冷却液体将热量传递出去。冷却液体的对流和蒸发是热源散热的主要方式。

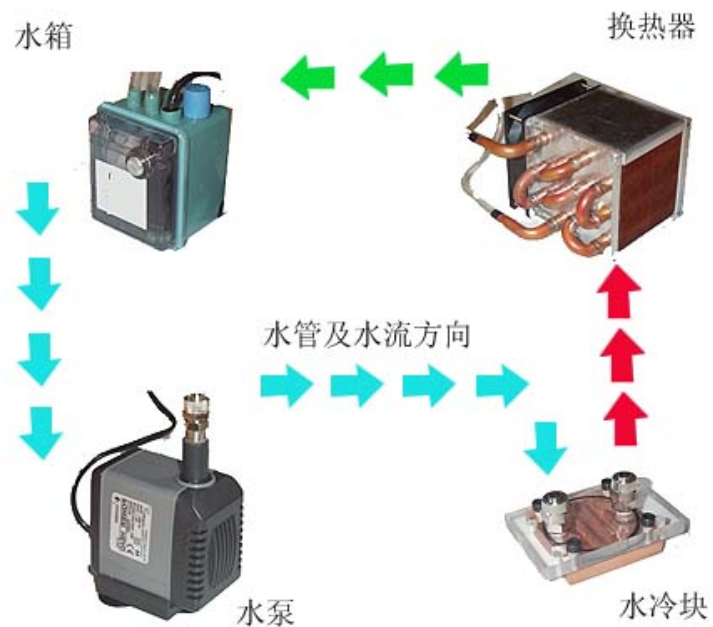
- 1、发热的电子元器件直接浸入冷却液体(无蒸发)
- 2、元器件或组件直接浸入冷却液(有蒸发)
- 3、直接强迫液体冷却



4.2 液体冷却

间接液体冷却

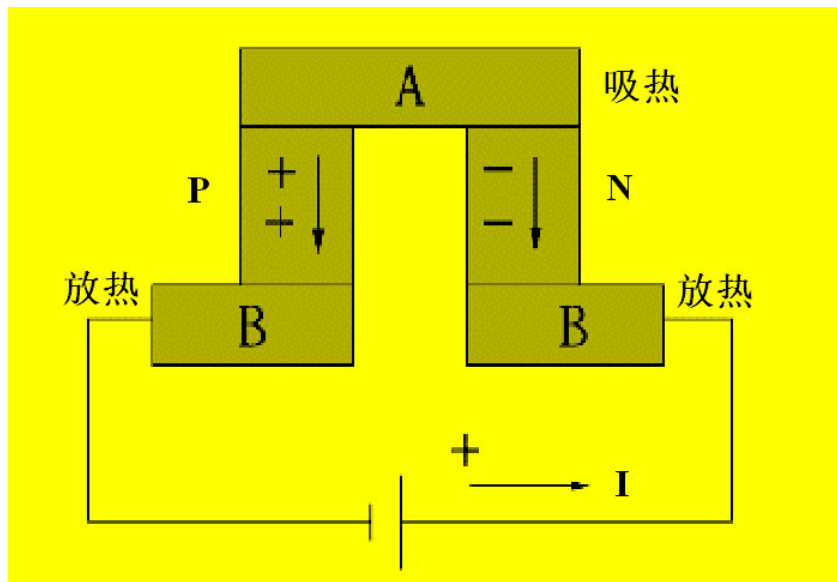
- (1) 导热模块
- (2) 机箱空气-液体冷却
- (3) 循环式水冷系统



4.3 热电制冷与热管散热技术

热电制冷技术

热电制冷(半导体制冷)是利用珀尔帖效应(Peltier Effect)达到制冷目的的。



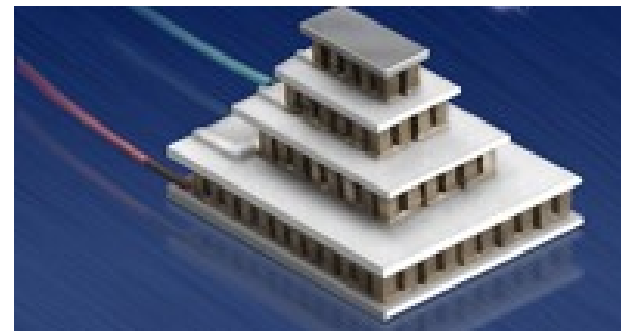
P型半导体与N型半导体之间用金属板连接，在半导体与金属板相连的上端形成珀尔帖冷效应，下端形成珀尔帖热效应。

4.3 热电制冷与热管散热技术

热电制冷技术

热电制冷装置的特点：

1. 可以采用直流电源，并可以改变电流的方向达到加热或制冷的目的；
2. 无运转部件，故可靠性高；
3. 对重力不敏感；
4. 制冷的速度和温度可通过工作电流进行控制；
5. 装置的尺寸不受限制，可根据设备的制冷要求进行组装；
6. 主要缺点是工作效率较低。





4.3 热电制冷与热管散热技术

热管散热技术

热管是一种高效的传热元件，具有优异的传热特性，沿轴向的等温特性好。其传热效率比同质量的铜散热器大2~3个数量级。

热管散热是一种利用相变过程中要吸收/散发热量的性质来进行冷却的技术。

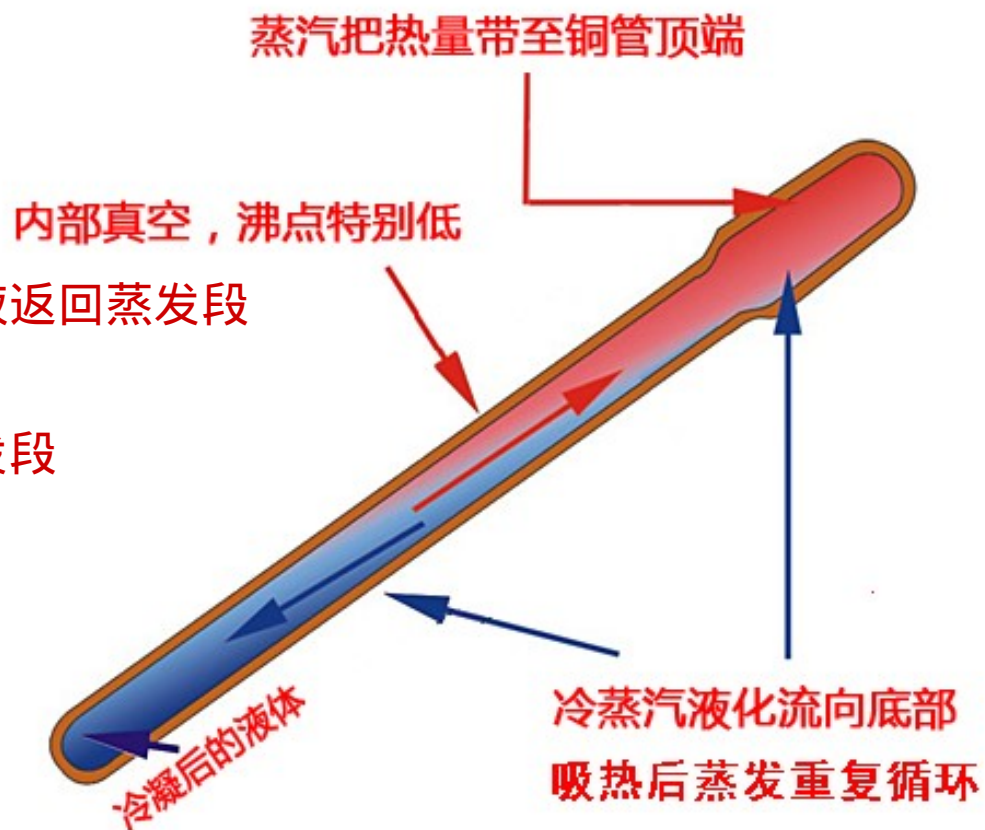
4.3 热电制冷与热管散热技术

热管散热技术

吸液芯型热管：
靠吸液芯的毛细作用使冷凝液返回蒸发段

重力型热管：
冷凝液依靠自身重力返回蒸发段

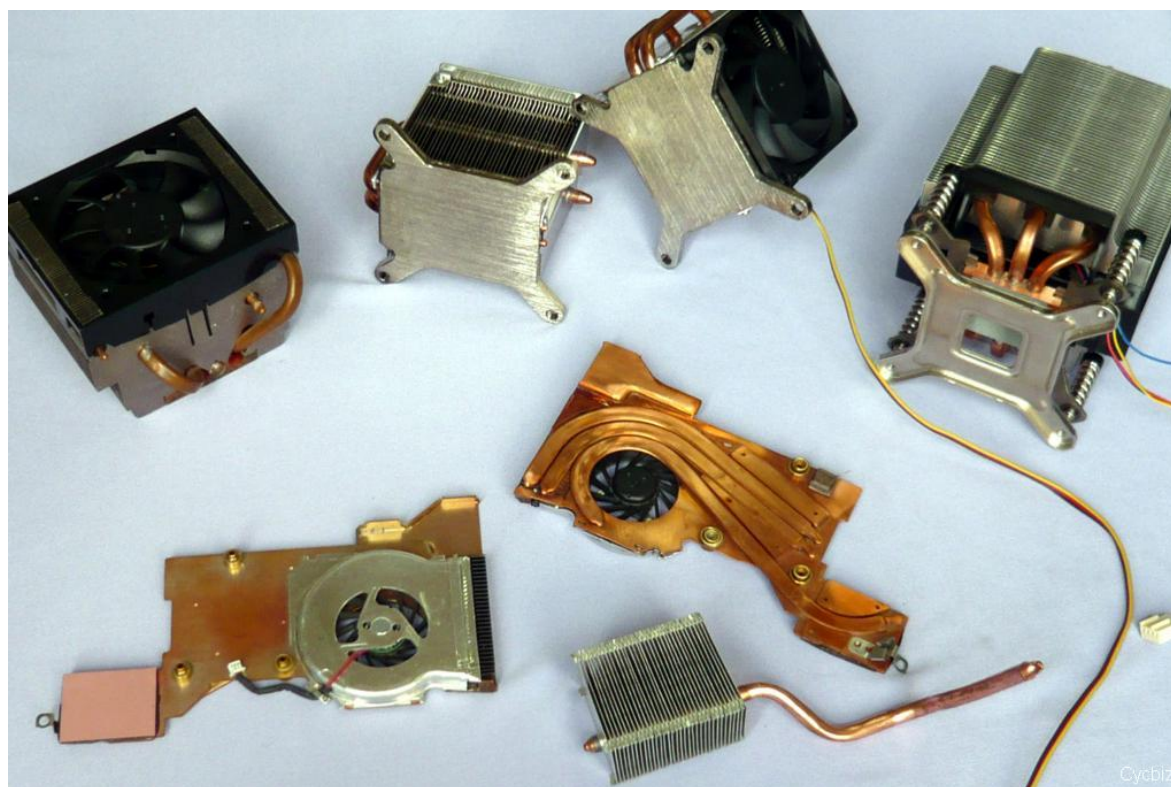
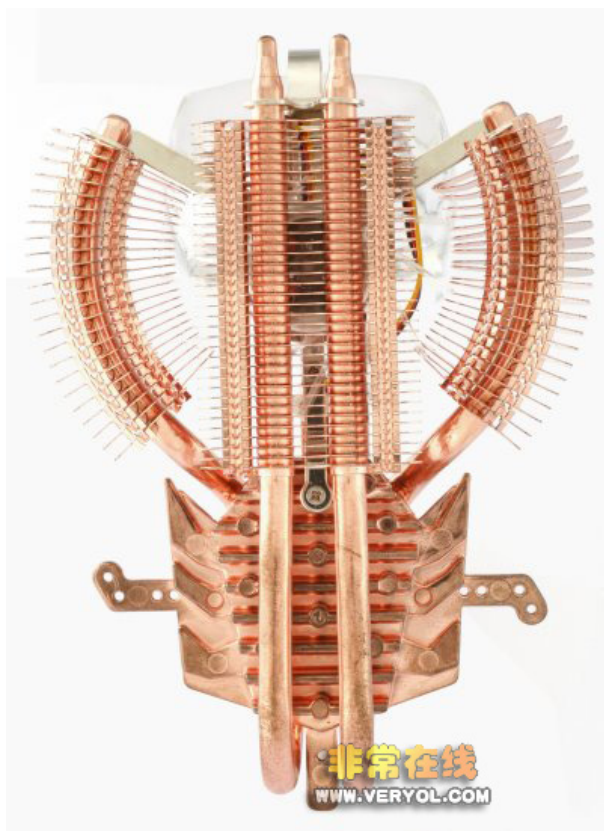
旋转型热管：
靠管子旋转产生的离心力使
冷凝液回到蒸发段



4.3 热电制冷与热管散热技术

热管散热技术

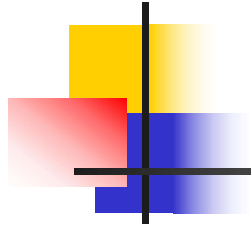
热管被广泛用于仪器散热：





参考资料

- 1、《人机工程学》 赵江洪 高等教育出版社
- 2、《智能仪器工程设计》 尚振东等 西安电子科技大学出版社
- 3、《智能仪器设计基础》 史健芳等 电子工业出版社
- 4、《智能仪器原理及设计》 王选民 清华大学出版社
- 5、《现代电子设备设计制造手册》 周旭 电子工业出版社
- 6、《电子设备结构与工艺》 周旭 北京航空航天大学出版社



课后作业

- 1、仪器热控制的目的是什么？
- 2、简述热量传递的三种基本方式及其特点。
- 3、举例说明自然风冷和强迫风冷的特点和应用场合。
- 4、描述热管的工作原理，有几种类型，各有什么特点。