产品热设计技术规范

前　　言

本规范根据通信产品热设计相关资料及热实验结果等编制而成。

本规范起草单位：

本规范授予解释单位：

本规范主要起草人：

本规范批准人：

目　　录

1 **概述** ……1
1.1 热设计的目的 ……1
1.2 热设计的基本问题 ……1
1.3 热设计应遵循的原则 ……1
2 **热设计的基本知识** ……3
2.1 基本概念 ……3
2.2 热量传递的基本方式极其基本方程式……5
2.3 增强散热的方式……6
3 **自然对流散热** ……7
3.1 自然对流热设计应考虑的问题 ……7
3.2 自然对流换热系数的计算 …… 9
4 **强迫对流散热——风扇冷却**……11
4.1 风道的设计 ……11
4.2 抽风与鼓风的区别 ……16
4.3 风扇选型设计 ……17
4.4 机柜/箱强迫风冷热设计 ……22
5 单板元器件安全性热分析……24
5.1 元器件温升校核计算 …… 24
5.2 元器件的传热分析 ……27
5.3 散热器选型参数的确定 ……27
5.4 散热器选用与安装的原则 ……29
6 通信产品热设计步骤 ……30
7 附录 ……32
7.1 热仿真软件介绍 ……32
7.2 参考文献 ……32

本文针对公司产品的特点，提供了热设计的基础理论知识、热设计的基本方法与步骤、热设计的原则等内容。

产品热设计技术规范

第一章 概 述

1.1 热设计的目的

采用适当可靠的方法控制产品内部所有电子元器件的温度，使其在所处的 工作环境条件下不超过稳定运行要求的最高温度，以保证产品正常运行的安全性，长期运行的可靠性。

1.2 热设计的基本问题

1.2.1 耗散的热量决定了温升，因此也决定了任一给定结构的温度；

1.2.2 热量以导热、对流及辐射传递出去，每种形式传递的热量与其热阻成反比；

1.2.3 热量、热阻和温度是热设计中的重要参数；

1.2.4 所有的冷却系统应是最简单又最经济的，并适合于特定的电气和机械、环境条件，同时满足可靠性要求；

1.2.5 热设计应与电气设计、结构设计、可靠性设计同时进行，当出现矛盾时，应进行权衡分析，折衷解决；

1.2.6 热设计中允许有较大的误差；

1.2.7 热设计应考虑的因素：包括

结构与尺寸

功耗

产品的经济性

与所要求的元器件的失效率相应的温度极限

电路布局

工作环境

1.3 遵循的原则

1.3.1热设计应与电气设计、结构设计同时进行，使热设计、结构设计、电气设计相互兼顾;

1.3.2 热设计应遵循相应的国际、国内标准、行业标准;

1.3.3 热设计应满足产品的可靠性要求，以保证设备内的元器件均能在设定的热环境中长期正常工作。

1.3.4 每个元器件的参数选择及安装位置及方式必须符合散热要求；
1.3.5 在规定的使用期限内，冷却系统(如风扇等)的故障率应比元件的故障率低；
1.3.6 在进行热设计时，应考虑相应的设计余量，以避免使用过程中因工况发生变化而引起的热耗散及流动阻力的增加。
1.3.7 热设计不能盲目加大散热余量，尽量使用自然对流或低转速风扇等可靠性高的冷却方式。使用风扇冷却时，要保证噪音指标符合标准要求。
1.3.8 热设计应考虑产品的经济性指标，在保证散热的前提下使其结构简单、可靠且体积最小、成本最低。
1.3.9 冷却系统要便于监控与维护

第二章 热设计基础知识

2.1某些基本概念

2.1.1 温升

指机柜内空气温度或元器件温度与环境温度的差。如果忽略温度变化对空气物性的非线性影响，可以将一般环境温度下（如空调房27℃）测量获得的温升直接加上最高可能环境温度获得最恶劣环境下的器件近似温度。例如在空调房内测得某器件温升为40℃，则在55℃最高环境温度下该器件的温度将为95℃。

2.1.2 热耗

指元器件正常运行时产生的热量。热耗不等同于功耗，功耗指器件的输入功率。一般电子元器件的效率比较低，大部分功率都转化为热量。计算元器件温升时，应根据其功耗和效率计算热耗，当仅知道大致功耗时，对于小功率设备，可认为热耗等于功耗，对于大功耗设备，可近似认为热耗为功耗的75%。其实为给设计留一个余量，有时直接用功耗进行计算。但注意电源模块的效率比较高，一般为70%~95%，对于同一个电源模块，输出功率越小，效率越低。

2.1.3 热流密度

单位面积上的传热量，单位W/m^2。

2.1.4 热阻

热量在热流路径上遇到的阻力，反映介质或介质间的传热能力的大小，表明了1W热量所引起的温升大小，单位为℃/W或K/W。用热耗乘以热阻，即可获得该传热路径上的温升。

可以用一个简单的类比来解释热阻的意义，换热量相当于电流，温差相当于电压，则热阻相当于电阻。

以下是一些单板元器件热分析使用的重要热阻概念，这些热阻参数一般由元器件生产厂商根据标准实验测量提供，可在器件的用户说明书中查出：

2.1.4.1 结至空气热阻Rja：元器件的热源结（junction）到周围冷却空气（ambient）的总热阻，乘以其发热量即获得器件温升。

2.1.4.2 结至壳热阻Rjc：元器件的热源结到封装外壳间的热阻，乘以发热量即获得结与壳的温差。

2.1.4.3 结至板热阻Rjb：元器件的结与PCB板间的热阻，乘以通过单板导热的散热量即获得结与单板间的温差。

2.1.5 导热系数

—

表征材料导热性能的参数指标，它表明单位时间、单位面积、负的温度梯度下的导热量，单位为W/m.K或W/m.℃

2.1.6 对流换热系数

反映两种介质间对流换热过程的强弱，表明当流体与壁面的温差为1 ℃时，在单位时间通过单位面积的热量，单位为$W/m^2.K$或$W/m^2.℃$

2.1.7 层流与紊流(湍流)

层流指流体呈有规则的、有序的流动，换热系数小，热阻大，流动阻力小；

紊流指流体呈无规则、相互混杂的流动，换热系数大，热阻小，流动阻力大。层流与紊流状态一般由雷诺数来判定。在热设计中，尽可能让热耗大的关键元器件周围的空气流动为紊流状态，因为紊流时的换热系数会是层流流动的数倍。

2.1.8 流阻

反映流体流过某一通道时所产生的静压差。单位帕斯卡或In. water

2.1.9 黑度

实际物体的辐射力和同温度下黑体的辐射力之比，在0~1之间。它取决于物体种类、表面状况、表面温度及表面颜色。表面粗糙，无光泽，黑度大，辐射散热能力强。

2.1.11雷诺数Re(Reynlods)

雷诺数的大小反映了空气流动时的惯性力与粘滞力的相对大小，雷诺数是说明流体流态的一个相似准则数。其定义一般为

式中u为空气流速，单位m/s；D为特征尺寸，单位m，根据具体的对象结构情况取值； 为运动粘度，单位m^2/s。

2.1.12 普朗特数Pr(Prandtl)

普朗特数是说明流体物理性质对换热影响的相似准则数。空气的Pr数可直接根据定性温度从物性表中查出。

2.1.13 努谢尔特数Nu(Nusseltl)

反映出同一流体在不同情况下的对流换热强弱，是一个说明对流换热强弱的相似准则数。其定义一般为

h为换热系数，单位$W/m^2.℃$；D为特征尺寸； 为导热系数，单位W/m.℃。

2.1.14 通风机的特性曲线

指通风机在某一固定转速下工作，静压随风量变化的关系曲线。当风机的出风口完全被睹住时，风量为零，静压最高；当风机不与任何风道连接时，其静压为零，而风量达到最大。

2.1.15 系统的阻力特性曲线

系统(或风道)的阻力特性曲线：是指流体流过风道所产生的压降随空气流量变化的关系曲线，与流量的平方成正比。

2.1.16 通风机工作点

系统(风道)的特性曲线与风机的静压曲线的交点就是风机的工作点。

2.1.17 速度头

一般使用空气的动压头来作为电子设备机箱压降的惯用基准，其定义为

为空气密度，u为空气流速。风道中空气的静压损失就由速度头乘以阻力损失系数获得。

2.2 热量传递的基本方式及传热方程式

热量传递有三种方式：导热、对流和辐射，它们可以单独出现，也可能两种或三种形式同时出现

2.2.1导热的基本方程：

导热是在同一种介质中由于存在温度梯度所产生的传热现象。

(2-1)

λ---- 导热系数，W/m.K或W/m.℃;　$A_{导}$--- 导热方向上的截面面积，m^2

---- x方向上的温度变化率，℃;　$R_{导}$----- 导热热阻, ℃/W

根据方程的形式，可以看出，要增强散热量，减小温升，可以增加导热系数，选用导热系数高的材料，如铜（约360W/m℃）或铝（约160W/m℃）；增加导热方向上的截面积；减小导热方向上的路径。

2.2.2 对流的基本方程：

对流是由流体与流体流经的固体表面之间存在的温差产生的换热现象。

(2-2)

h---- 对流换热系数，$W/m^2.K$或$W/m^2.℃$; $A_{对}$--- 有效对流换热面积，m^2

t_w---- 热表面温度，℃;　t_a---- 冷却空气温度，℃;

$R_{对流}$----- 对流热阻, ℃/W

由方程可见，要增强对流换热，可以加大换热系数和换热面积。

2.2.3 辐射的基本方程：

(2-3)

---- 系统黑度，

ε_1， ε_2----分别为高温物体表面（如发热器件）和低温物体表面（如机壳内表面）的黑度;

F_{12}------ 表面1到表面2的角系数。即表面1向空间发射的辐射落到表面2的百分数。

A_1 ---物体1的有效辐射面积，m^2;

T_1, T_2--分别为物体1和物体2的绝对温度，K

由方程可见，要增加辐射换热，可以提高热源表面的黑度和到冷表面的角系数，增加表面积。

2.3 增强散热的方式

以下一些具体的散热增强方式，其实就是根据上述三种基本传热方程来增加散热量的：

2.3.1 增加有效散热面积。如在芯片表面安装散热器；将热量通过引线或导热绝缘材料导到PCB板中，利用周围PCB板的表面散热。

2.3.2 增加流过表面的风速，可以增加换热系数。

2.3.3破坏层流边界层，增加扰动。紊流的换热强度是层流的数倍，抽风时，风道横截面上速度分布比较均匀，风速较低，一般为层流状态，换热避面上的不规则凸起可以破坏层流状态，加强换热，针状散热器和翅片散热器的换热面积一样，而换热量却可以增加30%，就是这个原因。吹风时，风扇出口风速分布不均，有主要流动方向，局部风速较高，一般为紊流状态，局部换热强烈，但要注意回流低速区换热较差。

2.3.4 尽量减小导热界面的接触热阻。在接触面可以使用导热硅胶（绝缘性能好）或铝箔等材料。

2.3.5 设法减小散热热阻。在屏蔽盒等封闭狭小空间内的单板器件主要通过空气的受限自然对流和导热、辐射散热，由于空气的导热系数很小，所以热阻很大。如果将器件表面和金属壳内侧通过导热绝缘垫接触，则热阻将大大降低，减小温升。

第三章 自然对流换热

当发热表面温升为40℃或更高时，如果热流密度小于0.04W/cm^2，则一般可以通过自然对流的方式冷却，不必使用风扇。自然对流主要通过空气受热膨胀产生的浮升力使空气不断流过发热表面，实现散热。这种换热方式不需要任何辅助设备，所以不需要维护，成本最低。只要热设计和热测试表明系统通过自然对流足以散热，应尽量不使用风扇。

3.1 自然对流热设计要考虑的问题

如果设计不当，元器件温升过高，将不得不采用风扇。合理全面的自然对流热设计必须考虑如下问题：

3.1.1 元器件布局是否合理。 在布置元器件时，应将不耐热的元件放在靠近进风口的位置，而且位于功率大、发热量大的元器件的上游，尽量远离高温元件，以避免辐射的影响，如果无法远离，也可以用热屏蔽板（抛光的金属薄板，黑度越小越好）隔开；将本身发热而又耐热的元件放在靠近出风口的位置或顶部；一般应将热流密度高的元器件放在边沿与顶部，靠近出风口的位置，但如果不能承受较高温度，也要放在进风口附近，注意尽量与其他发热元件和热敏元件在空气上升方向上错开位置；大功率的元器件尽量分散布局，避免热源集中；不同大小尺寸的元器件尽量均匀排列，使风阻均布，风量分布均匀。

单板上元器件的布局应根据各元件的参数和使用要求综合确定。

3.1.2 是否有足够的自然对流空间。 元器件与元器件之间，元器件与结构件之间应保持一定距离，通常至少13mm，以利于空气流动，增强对流换热。一些具体的参考距离尺寸如下：

3.1.2.1 对相邻的两垂直发热表面，**d/L=0.25，**如图3-1-(a)所示;

3.1.2.2 对相邻的垂直发热表面与冷表面间距,**d_{min}=2.5mm,** 如图3-1-(b)所示;

3.1.2.3.对邻近的水平发热圆柱体和冷的上表面之间,**d/D=0.85,** 如图3-1-(c)所示;

3.1.2.4 对邻近的水平发热圆柱体和冷的垂直表面之间,**d/D=0.7,** 如图3-1-(d)所示;

3.1.2.5 对邻近的水平发热圆柱体和冷的水平底面之间,**d/D=0.65,** 如图3-1-(e)所示;

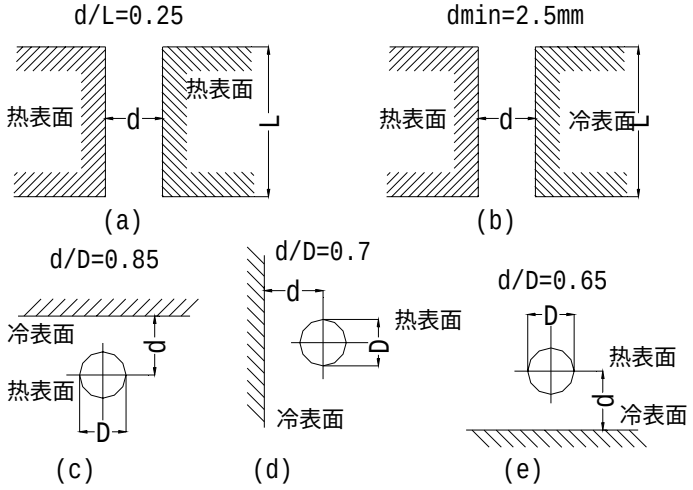


图3 自然对流时元器件排列的距离关系

竖直放置的电路板上的元件与相邻单板之间的间隙至少为19mm。进出风口应尽量远离，避免气流短路，通风口尽量对准散热要求高的元件。

3.1.3 是否充分运用了导热的传热途径。由于自然对流的换热系数很低，一般为3~10W/m^2℃，元件表面积很小或空间较小无法充分对流时，散热量会很小，这时应尽量采用导热的方式，利用导热系数较高的金属或导热绝缘材料（如导热硅胶，云母，导热陶瓷，导热垫等）将元件与机壳或冷板相连，将热量通过更大的表面积散掉。

3.1.4 使用散热器。对于个别热流密度较高的元器件，如果自然对流时温升过高，可以设计或选用散热器以增加散热表面，设计选用方法见第5章。

3.1.5 是否充分运用了辐射的传热途径。高温元件可以通过辐射将部分热量传递给机壳，机壳对辐射热的吸收强度和表面的黑度成正比。表面粗糙度越高，黑度越高，而颜色对黑度的影响并不如人们一般认为的那样明显。当机壳表面涂漆，黑度可以达到很高，接近1。在一个密闭的机盒中，机壳内外表面涂漆比不涂漆时元件温升平均将下降10%左右。

3.1.6 其他的冷却技术。如果高热流密度元器件附近的空间有限，无法安装大散热器，可以采用冷管，将热量导到其他有足够空间安装散热器的位置。

综合考虑上述问题时，将会有许多不同的结构布局方案，用一般的理论公式较难分析有限空间的复杂流动和换热，也难以比较方案的好坏。最好采用热设计仿真分析软件对机箱/盒建模划分网格并计算，然后可以方便地改动布局方案再次计算，比较不同方案的计算结果，即可获得最佳的或满足要求的方案。国外许多通信公司都采用这种软件帮助新产品的热设计，使一些产品避免采用风扇散热。

3.2 自然对流换热系数的计算

电子设备的自然对流通常属于层流状态，可以采用如下实验关联式计算

(3-1)

C---常数，取决于加热面的形状与位置，由表3-1查出

g---重力加速度，9.8m/s^2 ---空气体积膨胀系数，1/℃

Pr---普朗特数 ---空气运动粘度，m^2/s

---壁面与空气的温差 l---特征尺寸，m，计算方法由表3-1查出

---空气导热系数，W/m℃

式中属于空气物性的参数可根据定性温度从空气物性表查出，定性温度可取壁面温度与空气温度的算术平均值。由于空气物性在常温范围内随温度的变化不大，为方便使用，将40℃时的值代入上式，得如下简单关联式

(3-2)

表3-1 常数C的典型值与特征尺寸的取值方法

加热面的形状与位置	C	特征尺寸l
垂直的板、圆柱体、管	0.56	垂直高度（如果大于0.6m，则取0.6）
水平的圆柱体或管	0.52	直径
水平板，加热面朝上	0.52	
水平板，加热面朝下	0.26	
形状不规则的小元件或线（如晶体管、电阻、继电器、小型变压器）	1.45	直径

算例：某交换机插框电路板垂直放置，间距25.4mm，单板尺寸233.3mmX280mm（高X深），每个单板功耗为11.5W，初步估算可认为热耗在单板上均匀分布，空气温度27℃，求单板平均表面温度。

解：由于电路板面对面安装，相互间的辐射换热互相抵消，元件到机壳的角系数很小，辐射可以忽略。插框采用塑胶滑道，导热可以忽略。单板主要换热方式为对流，可采用式2-2计算

(3-3)

式中换热系数h可按垂直平板的情况由式3-2计算，查表3-1，C为0.56，特征尺寸l为单板高0.233m，将参数代入式3-3，得

解得 ，故单板平均温度为 。

电子元件的引线穿过电路板，在背面与印制敷铜导线用锡焊焊牢，部分热量将通过引线导到单板的背面。实验表明，PCB板背面能增加有效传热面积约达30%。将上面计算中使用的面积增大为1.3倍，单板温度为55.3℃。

注意到单板的平均热流密度为 ，一般初步估计分析对象是否可以采用自然对流散热的方式时，可以先根据其热流密度是否小于0.04W/cm^{2}来判断。

第四章 强迫对流换热-风扇冷却

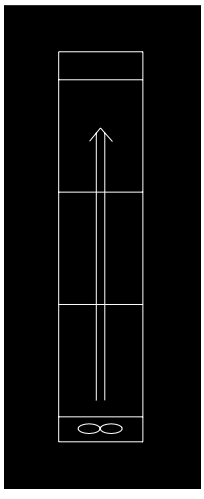
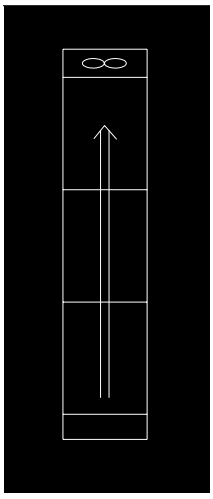
当散热面热流密度超过0.08W/cm^2，就必须采用强迫风冷的方式散热。强迫风冷在我公司产品中应用最多。有时尽管不用风扇可以散热，但散热器和机箱体积会很大，采用风扇冷却可以将体积减小许多。

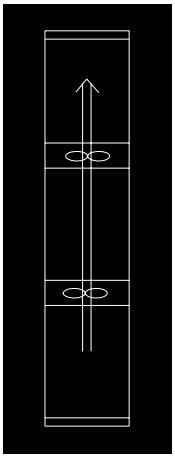
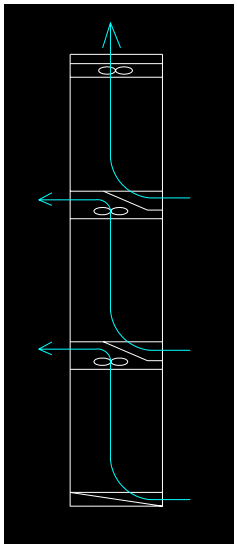
4.1 风道的设计

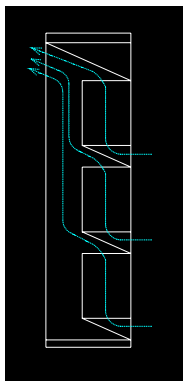
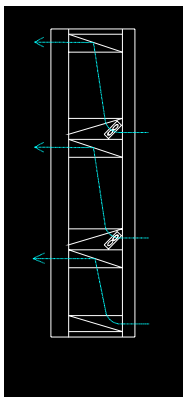
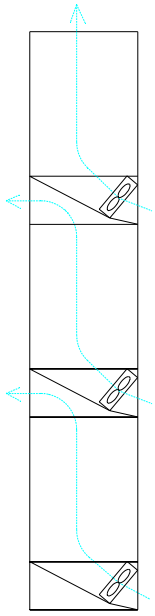
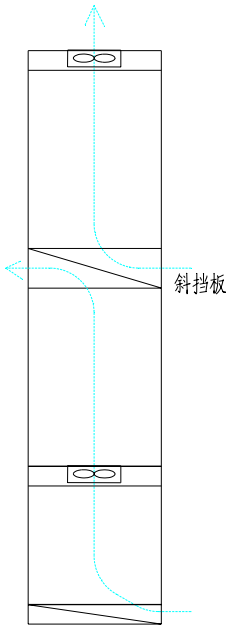
强迫风冷中风道的设计非常重要。以下是设计的一些基本原则：

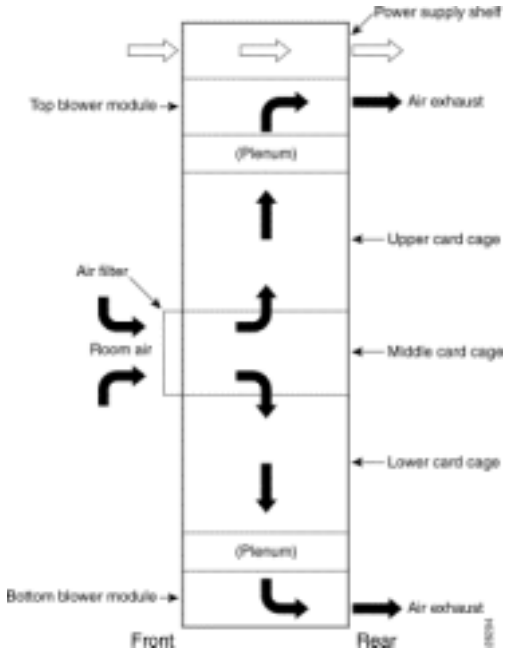
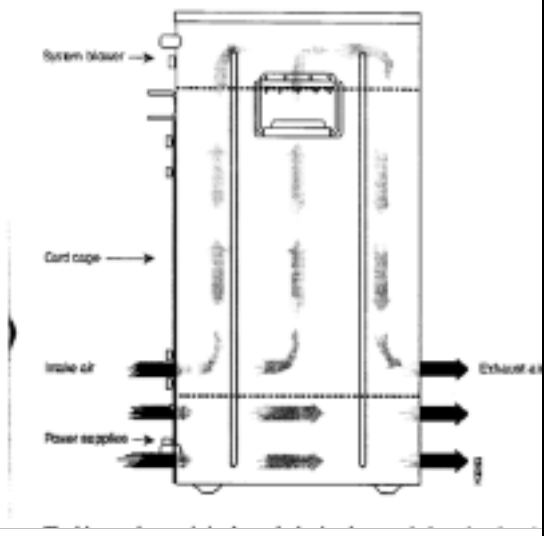
- 尽量采用直通风道，避免气流的转弯。在气流急剧转弯的地方，应采用导风板使气流逐渐转向，使压力损失达到最小。
- 尽量避免骤然扩展和骤然收缩。
- 进出风口尽量远离，防止气流短路。
- 在机柜的面板、侧板、后板没有特别要求一般不要开通风孔，防止气流短路。
- 为避免上游插框的热量带入下游插框，影响其散热，可以采用独立风道，分开散热。
- 风道设计应保证插框单板或模块散热均匀，避免在回流区和低速区产生热点。
- 对于并联风道应根据各风道散热量的要求分配风量, 避免风道阻力不合理布局
- 要避免风道的高低压区的短路

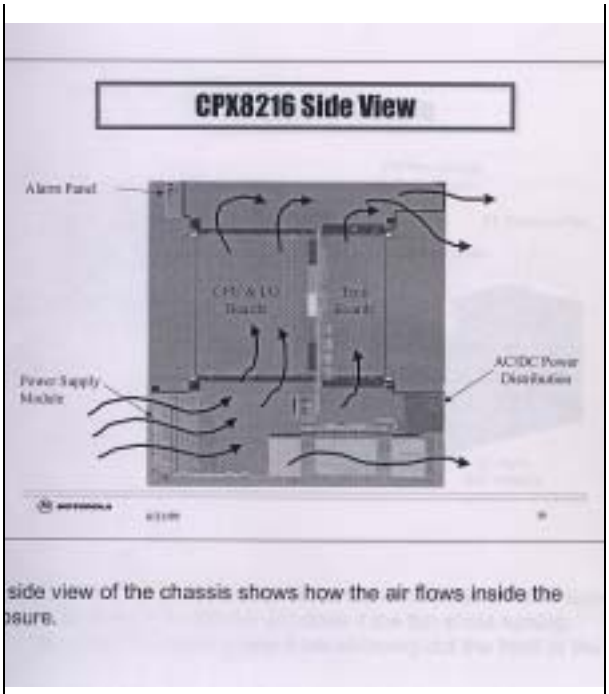
以下是一些典型的风道

	
风道1	风道2
最简单的鼓风风道，由机柜底部进风，可由机柜顶部出风。如果要求防滴落，可在顶部加盖板，侧出风，或顶部安装金属丝网。	最简单的抽风风道，由机柜底部进风。流场分布均匀，各插框换热强度相差不大。但如果风道中有较大的缝隙，如拉

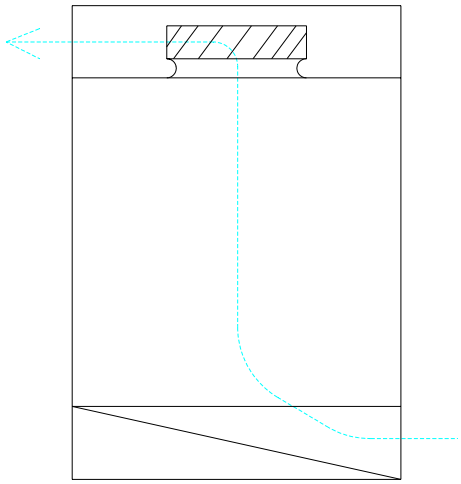
靠近风扇的插框换热效果最佳，由于风道必然存在漏风，而且离风扇较远处流场分布已较均匀，所以上插框的风速相对较低，换热比较弱，而且下面插框的热量将带入上插框。 由于机柜内为正压，灰尘不会从缝隙进入机柜。	手条间的间隙，则会形成气流部分短路，下面插框的通风量将大大降低。 下面插框的热量依然被带入上面的插框。机柜内为负压，灰尘将通过缝隙进入机柜。
 风道3	 风道4
风扇框串联风道，适用于机柜风阻较大的情况。靠近风扇出风口的部分换热最强烈，但要注意风扇的HUB附近将形成回流死区。中间插框由于上下风扇串联，气流不能充分扩散，靠近拉手条和母板的部分风速会比较低，宜将发热元器件与热敏元器件布于单板的中间。如果单板较深，根据需要在深度方向上可采用两排风扇。 风扇也可分别置于机柜的顶部和底部，但噪音将比置于插框间大。	插框独立抽风散热风道，适用于各框散热量都比较大的情况，各插框散热互不干扰。机柜由开孔前门进风，顶插框可以上出风，下面的插框后出风。采用轴流风扇时，出风直接受阻挡，风阻较大。如果机柜不宜做得较深，必须在后门开孔，并且机柜离墙有足够的距离；如果机柜可以做得较深，可以在后门与母板间流出足够宽度的空间作为风道，将风从机柜顶部排出，由于风道多次垂直转弯，将形成较大的风阻，宜在后风道安装导风装置或采用离心风扇。 注意，由于进风为水平方向，单板的右上区（拉手条端）将形成回流区，此处不宜布置热流量较高的元件和热敏元件。

<table>
<tr><td>
风道5</td><td>
风道6</td></tr>
<tr><td>自然对流独立散热风道，与风道4类似，无风扇，机柜出风口在后门的顶部。插框进出风口的大小根据发热量和插框高度而定。机柜后面的风道要求有足够的宽度，根据具体设计而定。
如果机柜中有的插框需要风扇冷却，有的插框自然散热即可（如发热量不大的电源模块框），则采用独立风道的方式，结合风道4与风道5，均可满足要求。这样可以减少风扇，降低噪音与成本。</td><td>为LUCENT宽带传输的机柜风道，与风道4、5类似，插框独立散热。两个子框采用鼓风方式，最下面的插框自然散热。风扇斜放的角度尽量大于45°，避免风扇进风不利和产生较大的噪音。风扇前面的斜板为防尘板，在这里安置防尘板，可以增加防尘面积，减小阻力，均化流场。
如图可见，采用鼓风方式的独立风道将大大增加机柜高度。</td></tr>
<tr><td>
风道7</td><td>
风道8</td></tr>
<tr><td>为风道6的改进版，将风扇框与出风口作为一体，可节省高度空间，斜板还有导风作用。注意对于常用的直径120的风</td><td>利用斜挡板将上下风道分为两个部分独立散热，由于风扇进出风口没有受到直接阻挡，其风阻将比风道4、7的情况要</td></tr>
</table>

扇，标准风扇框的高度将达3U，比风道4中的一体化风扇框高1U，但局部散热效果应比风道4的情况好，适用于散热元器件比较集中且分布在风量集中区域的情况。风扇也可平放，高度可降低为2U，但噪音与进风会受一定影响。	小，而且插框的流场均匀，无回流低速区。可根据风阻情况增加风扇框。 在富士通和三菱电机的宽带CDMA样机中均采用类似风道结构，但风扇框直接放在进风口上面，噪音会比较大，但鼓风换热强度高，这种方式进风量会受一定影响。
 风道9	 风道10
此为CISCO 12016的系统风道设计。顶框为电源框，自带风扇前后通风。下面有三个插框，风道的顶部与底部各有一个风扇框，采用离心风扇后排风，风扇的进风口前有一定高度的静压腔使各单板送风均匀。由中间插框的前面板进风，装有防尘网。这种风道将上下框的散热量分开，避免了热量的叠加，直接利用插框高度作为进风口，节省了机柜的高度空间。	此为CISCO 7513的系统风道设计。底部为电源模块，自带风扇前后通风。顶部为离心风扇，向单板区抽风冷却，由机箱后下方进风，经机箱前面深约200的风道向前下方排出。



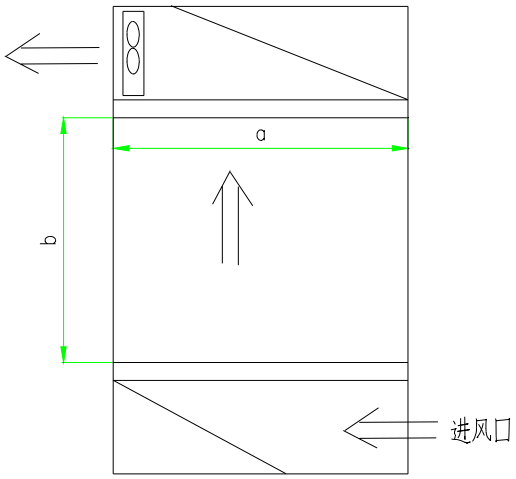
风道11



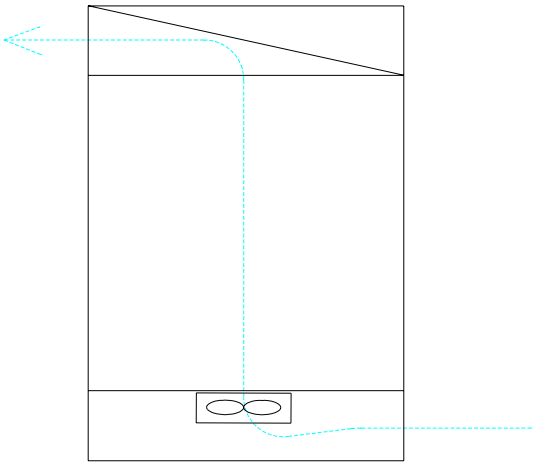
风道12

Motorola CPX8216机箱风道。采用可变速轴流风扇鼓风，风扇竖放，风扇的出风口处装有导风叶片，将气流按系统热量分布分为三个部分，一部分冷却电源模块，一部分冷却后插单板部分和前插单板的后半部分，一部分冷却前插单板靠近拉手条的发热元器件。这种设计使结构紧凑，风量合理分配。

这是典型的机箱通风风道设计，采用离心风扇抽风，向后排出，进风口在机箱前下方。威图和国外一些产品都采用这种风道。我们目前掌握的离心风扇资料中没有合适的型号可用于这种设计，主要因为离心风机的风量过小，尺寸大，噪音也大。



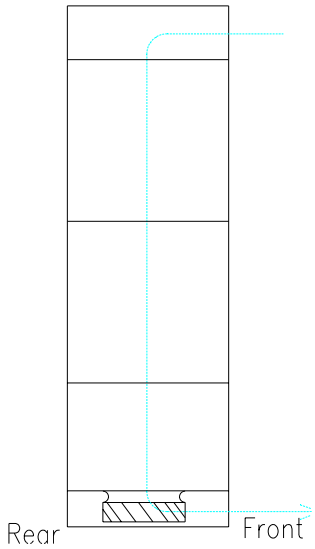
风道13



风道14

风道12中如果没有合适的离心风扇型号可选，可用轴流风扇竖放代替，但风扇

鼓风式的机箱风道设计在Motorola的一些产品中可以见到。鼓风的换热强度比抽

模块将占用较大高度空间。如果机箱高度有限制，可将风扇平放，但风扇出风口上方还是得留有一定出风空间，至少40mm，如风道4中的风扇框一样，这种方式风阻较大，对风量有一定影响，需要采用较大尺寸风扇。	风时高，但送风不均匀，在风扇中心和风扇之间都存在回流死区，要警惕这些死区的存在，将发热芯片布置在气流集中的地方。将风扇出风口和单板保持50mm的距离，可使流场均匀，但将增加高度空间。另外，风扇的进风口距离底板较近，会产生较大噪音，进风也受障碍，所以应尽量加大距离，距下壁面至少40mm。
 风道15	
Motorola曾在其基站产品中采用这种风道设计，进风口在机柜上前方，在机柜底部采用两个大离心风扇抽风，并向前方排出。这种通风方式与自然对流的方向背道而弛，主要是考虑避免高速气流正对人吹。另外向机柜前方出风，避免了后出风时靠墙安装所遇到的阻力。	

4.2 抽风与吹风的区别

4.2.1 吹风的优缺点

a. 风扇出口附近气流主要为紊流流动，局部换热强烈，宜用于发热器件比较集中的情况，此时必须将风扇的主要出风口对准集中的发热元件。
b. 吹风时将在机柜内形成正压，可以防止缝隙中的灰尘进入机柜/箱。
c. 风扇将不会受到系统散热量的影响，工作在在较低的空气温度下，风扇寿命较长。
d. 由于吹风有一定方向性，对整个插框横截面上的送风量会不均匀。
e. 在风扇HUB附近和并联风扇之间的位置有部分回流和低速区，换热较差，最好将风扇与插框保持50mm以上的间距，使送风均匀化。

4.2.2 抽风的特点

a. 送风均匀，适用于发热器件分布比较均匀，风道比较复杂的情况。

b. 进入风扇的流动主要为层流状态。

c. 风扇将在出风口高温气流下工作，寿命会受影响。

d. 机柜内形成负压，缝隙中的灰尘将进入机柜/箱。

4.3 风扇选型设计

4.3.1 风扇的种类

通信产品中运用的风扇有轴流（Axial）、离心（Radial）、混流（Mixed-flow）三种，它们的典型特性曲线见图4-1

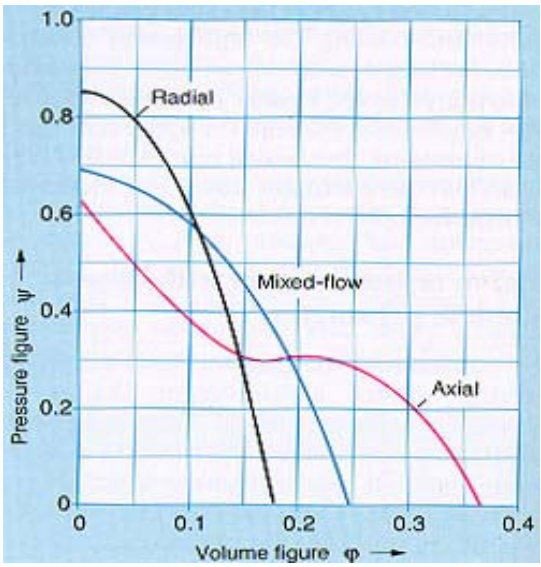


图 4-1

图中横坐标表示风量，单位有m^3/h、m^3/min、CFM（立方英尺/分钟，1CFM=4.72X$10^{-4}m^3/s$）。纵坐标表示风扇产生的静压，单位有Pa、in. of water(=249Pa)、mm H_2o(=9.8Pa)。由图中可以看出，要使风扇的风量越大，其产生的静压就越小，用于克服风道阻力的能力就越小。

从图中的对比可以看出，轴流风扇风量大、风压低，曲线中间的平坦转折区为轴流风扇特有的不稳定工作区，一般要避免风扇工作在该区域。最佳工作区在低风压、大流量的位置（曲线的后1/3段）。如果系统的阻力比较大，也可以利用高风压、低流量的工作区（曲线的前1/3段），但要注意风量是否达到设计值。离心风扇的进、出风方向垂直，其特点为风压大、风量低，最好工作在曲线中压力较高的区域。混流风扇的特点介于轴流和离心之间，出风方向与进风有一倾斜角度，则风量可以立即扩散到

插框的各个角落，而且风压与风量都比较大，但风扇HUB直径较大，正对HUB的部分风速很低，回流比较严重。

目前公司除极个别产品采用混流风扇外，一般都采用轴流风扇。我公司采用的风扇产品主要有NMB、PAPST、DELTA、SONON，其中PAPST的风扇虽然性能好，但在商务采购上评级为D，不推荐采用。NMB用得较多，DELTA样品供货较快。

4.3.2 风扇与系统的匹配

空气流过风道将产生压力损失。系统的压力损失有沿程阻力损失和局部阻力损失。沿程损失是由气流相互运动产生的阻力及气流与壁面或单板的摩擦所引起的。局部阻力损失是气流方向发生变化或风道截面发生突变所引起的损失。不管哪种损失，均和当地风速的平方成正比，如局部压力损失由下式计算

(4-1)

式中 为阻力系数， 为空气密度，v为风速。以下是一些典型的局部阻力系数

表4-1 典型局部阻力系数

说明	
空气由环境大空间进入进风口（流动突缩）	1
空气由出风口进入环境大空间（流动突扩）	1
空气经过90°转弯	1.5
流通面积率为0.3的通孔板(0.01<板厚/孔径<0.2)	18
流通面积率为0.5的通孔板(0.01<板厚/孔径<0.2)	4
流通面积率为0.7的通孔板(0.01<板厚/孔径<0.2)	1

系统的压力损失与风量呈抛物线关系，风扇产生的静压必须克服阻力损失，将风扇的特性曲线与系统的特性曲线画在同一张图中，两条曲线的交点即为风扇与系统的工作点，如图4-2所示

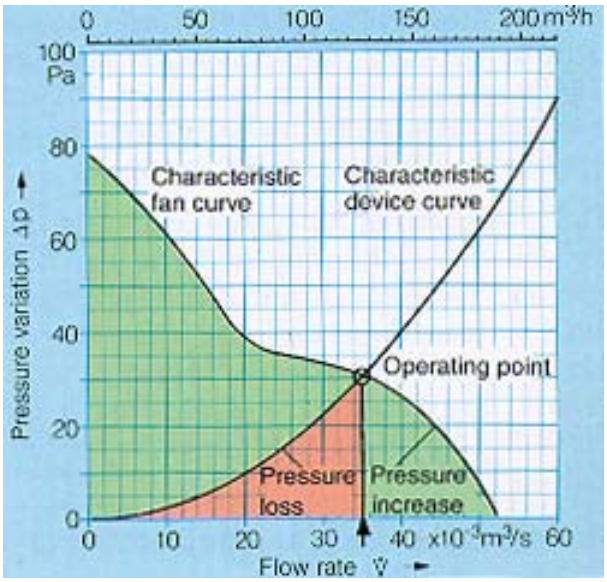


图4-2 风扇与系统的匹配工作点

图中表明风扇在该系统中工作时的风量为35m³/s，产生的静压为30Pa，系统的压力损失为30Pa。如果工作点显示的风量不满足设计要求，则需要选择其他型号的风扇来匹配，或设法降低系统阻力，增加风量。

4.3.3 风扇的串并联

在机柜/箱中一般为保证送风均匀和足够的风量，采用风扇并联使用的方式。风扇并联时的特性曲线理论上为各风扇曲线的横向叠加，如图4-3所示，实际上一般会比理想曲线略低。由图中可以看出，两个风扇并联使用产生的风量并不是仅采用一个风扇时产生风量的两倍，可能只增加30%，这和系统阻力特性曲线在工作点附近的斜率大小有关。如果系统阻力较大，阻力特性曲线较陡，当风扇并联的数目多到一定程度时，并不能明显增加风量。一般建议横向上并联风扇数目不要超过3个，如果插框较宽，可以用4个，纵向上除非插框很深，一般只用一排。

当机柜/箱的阻力较大时，可以采用风扇串联使用的方式。风扇串联时的特性曲线理论上为各风扇曲线的纵向叠加，如图4-4所示，实际曲线一般会比理论曲线略低。

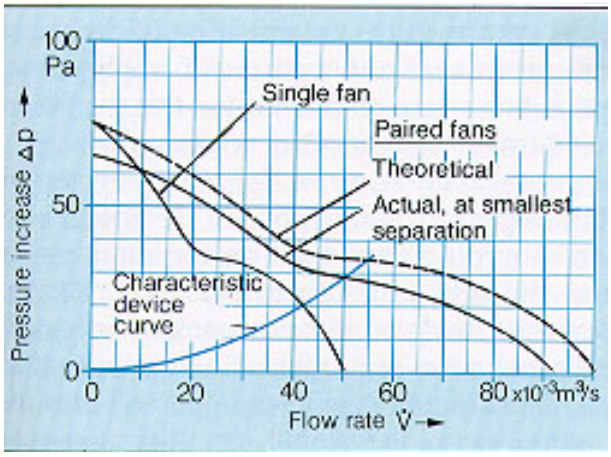


图4-3 风扇的并联特性曲线

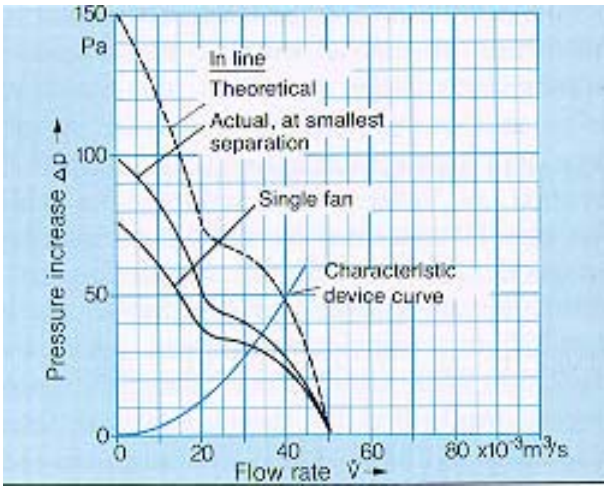


图4-4 风扇的串联特性曲线

4.3.4 在实际安装情况下风扇特性曲线的改变

风扇安装在系统中，由于结构限制，进风口和出风口常常会受到各种阻挡，其性能曲线会发生变化，如图4-5所示。由图中可以看出，风扇的进出风口最好与阻挡物有40mm的距离，如果有空间限制，也应至少有20mm。

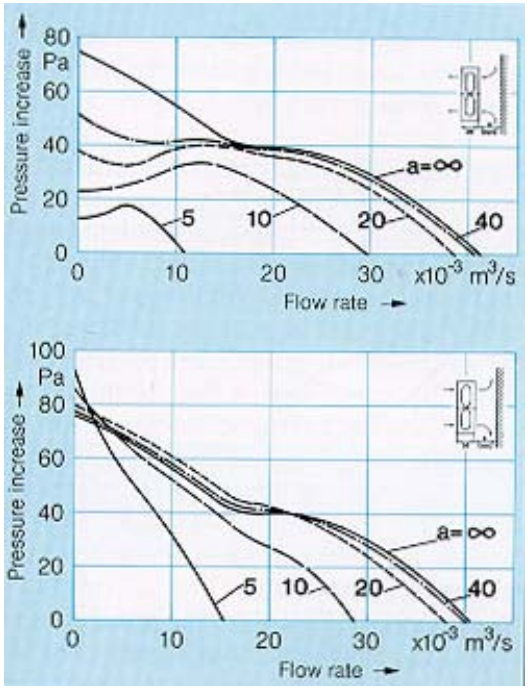


图4-5 风扇特性曲线随阻挡物的距离发生的变化

4.3.5 风扇的噪音问题

风扇产生的噪音与风扇的工作点或风量有直接关系，如图4-6所示，对于轴流风扇在大风量，低风压的区域噪音最小，对于离心风机在高风压，低风量的区域噪音最小，这和风扇的最佳工作区是吻合的。注意不要让风扇工作在高噪音区。

风扇进风口受阻挡所产生的噪音比其出风口受阻挡产生的噪音大好几倍，所以一般应保证风扇进风口离阻挡物至少30mm的距离，以免产生额外的噪音。

对于风扇冷却的机柜，在标准机房内噪音不得超过55dB，在普通民房内不得超过65dB。

对于不得不采用大风量，高风压风扇从而产生较大噪音的情况，可以在机柜的进风口、出风口、前后门内侧、风扇框面板、侧板等处在不影响进风的条件下贴吸音材料，吸音效果较好的材料主要是多孔介质，如玻璃棉，厚度越厚越好。

将风扇框置于插框之间比置于机柜的顶部或底部时噪音将略低，即插满单板或模块的插框有部分消音作用。

有时由于没有合适的风机而选择了转速较高的风机，在保证设计风量的条件下，可以通过调整风机的电压或其他方式降低风扇的转速，从而降低风扇的噪音。当风机的转速n变化不超过±10%时，相应的噪音降低变化为

式中n_2为原转速，n_1为调低后的转速。

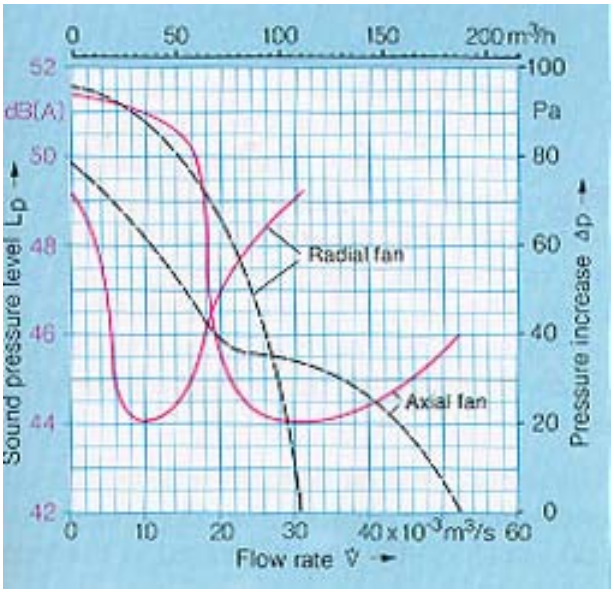


图4-6 风扇噪音随风量的变化

4.4 机柜/箱强迫风冷设计

对系统进行初步的热分析，先根据结构情况依据4.1的原则进行风道设计。然后估算机箱冷却所需的空气流量和相应的压降，据此进行风扇的选型和确定风扇的个数。根据风扇的位置和风道情况，将发热元件和热敏元件尽可能地布置在合适的位置，保证这些位置的风速较高，避开回流区和低速区。然后对具体热流密度比较高的器件进

行温升校核计算（见第五章），必要的话进行散热器设计（见第5章）。机柜/箱级计算的步骤如下：

第一步：确定风道形式和风道尺寸，了解系统总热耗Q和各单板热耗Q_i，环境温度Ta。

第二步：估计机柜/箱空气进出口温差　　。经验表明机柜直通风道的　一般在8℃~15℃，台式机箱或插框单独风道的　一般在5℃~10℃。然后由下式计算冷却空气的体积流量，即风量（m^3/s）

(4-2)

为空气的定压比热，常温下为1005W/kg℃。 为空气密度，常温下为1.16kg/m^3。Q为系统总热耗（W）。

粗略估算时由上式即可获得所需风量。除以风道流通截面积即可获得平均风速。对于机柜插框单板间的风速，经验表明，一般在1m/s~2m/s之间。如果功耗较小，有时仅需0.5m/s，如果功耗很大时，有时需要2~3m/s。

第三步：根据风道结构与单板阻力情况和空气流速，估算空气总压降。空气局部压降的计算公式为

(4-3)

为速度头，空气速度v由流量和风道横截面积计算， 为局部压力损失系数，由实验确定或凭经验估计。

第四步：根据估算获得的单板风速和空气温升进行主要大功率元器件与热敏元件的温升校核计算，具体见第五章。如果部分元器件无法满足散热要求，则需要提高风速，增加风量，或进行电气或结构方面的方案改进，或增加散热器，直到所以元器件的温升均满足要求为止。

第五章 单板元器件安全性热分析

5.1 元器件温升校核计算

4.4节中确定的风量仅仅是根据经验获得的大致估算值，为保证元器件的安全散热，需要具体校核大功率元器件与热敏元件的结温在强迫风冷下是否工作在安全温度下，首先得获得如下数据：所以较大功率元器件的耗散功率Q（额定值），结点（junction）的安全工作温度范围　　（最大值和推荐值），结至冷却空气热阻Rja，结至壳热阻Rjc，结至板热阻Rjb，封装方式，散热表面外形尺寸（以上参数一般在元器件供应商提供的用户手册中可以查到），PCB板的层数，流过元器件的空气温度和速度（由4.4节系统级估算获得）。考察结温是否满足下式

$$Tj = Ta + \Delta Ta + Q \times Rja < Tj,\max \tag{5-1}$$

式中环境温度Ta的取值应取通信产品相应环境标准中规定的最高温度或国外同类产品的最高工作温度，一般室内设备可取50℃或45℃，室外设备取55℃。空气温升根据风量和总功耗确定。

如果没有提供Rja，就需要运用经验公式计算芯片表面换热系数，并根据器件的表面散热量计算壳体温升

(5-2)

式中Q为通过壳体表面的散热量/W，A为表面换热面积/m^2，h为表面换热系数/W/m^2℃，用下式求出

(5-3)

式中b和m为实验系数，D为特征尺寸，由表5-1查出； 为空气的导热系数/W/m℃；Re为雷诺数。壳体到结点的温升由下式计算

$$\Delta t_{jc} = QRjc \tag{5-4}$$

最终，计算出的结点温度必须满足下式

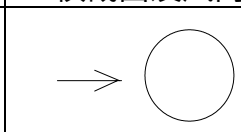
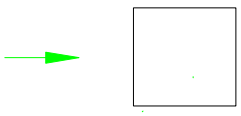
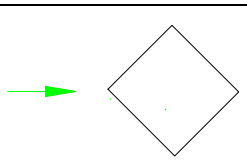
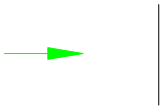
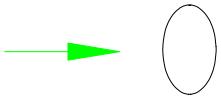
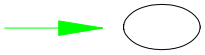
$$T_j = Ta + \Delta Ta + \Delta t_{ca} + \Delta t_{jc} < T_{j,\max} \tag{5-5}$$

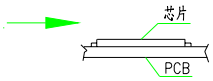
元器件不仅通过表面对流散热，还通过PCB板的导热传递热量。PCB的各层信号层、地层和电源层都铺有大面积的铜，综合的导热系数比较高，整个PCB板就象是一块大的平板散热器，具有热量均匀化的作用。所以应尽量减小结至板的热阻，如BGA封装有大量钢珠直接和板接触，热阻比QFP的封装方式小。一般较难计算散热量在这两条散热路径（表面对流与PCB导热）上的分配比例，但经验表明对于BGA和QFP这样的封装，表面无散热器时，PCB导热量将占总发热量的50%或以上，表面加散热器时，表面热阻大幅降低，则PCB导热量将减小为很小一部分。

有时尽管可根据热阻参数或经验估算获得元器件各自的结温，但热阻参数实际是在标准的测试安装条件下获得的，实际各种元器件布在单板上时相互间散热会有一定影响，例如几个大功率的芯片布置在较近的距离散热会比较恶劣，实际温升会比计算值高。而且铺铜层数也会不一样。所以最好在布板的同时，建立单板热分析仿真模型，现在热仿真软件已具有EDA软件图形文件的接口，将*.idf文件转换为几何模型，然后输入各器件的发热量和单板的层数以及来流风速和温度，即可计算出单板的温度分布与元器件温升，确认设计的安全性。利用仿真模型还可以考虑系统风道产生的回流或不均匀流场对单板散热的影响。

如果经过热阻参数或仿真计算确定元器件结温超过其最大值，则要考虑安装散热器，具体设计选型方法见5.3节。

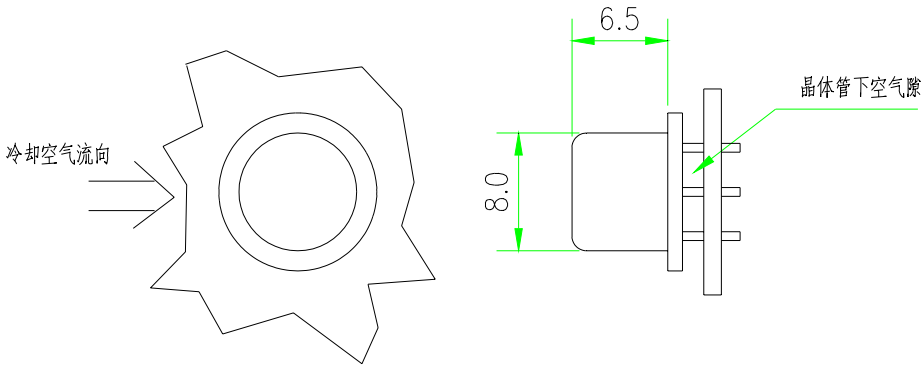
表5-1. 不同情况下的常数b和m

	横截面及风向	雷诺数	b	m	特征尺寸D
气流垂直流过不同截面小柱体		0.4~4.0	0.891	0.33	取柱体横截面的水力直径，即周长相同的圆形截面直径，如边长为d的正方形的水力直径为，对于垂直流过薄板取板宽的1/2。
		4.0~40	0.821	0.385	
		40~4000	0.615	0.466	
		4000~40000	0.174	0.618	
		40000~400000	0.024	0.805	
		2500~8000 (A) 5000~100000(B)	0.16 0.092	0.699 0.675	
		2500~7500(A) 5000~100000(B)	0.261 0.222	0.624 0.588	
		4000~15000	0.205	0.731	
		3000~15000	0.085	0.804	
		2500~15000	0.224	0.621	
沿平板流动		$\langle 10^5$ 层流	0.66	0.5	沿流动方向平板长度

		〉10^5 紊流	0.032	0.8	

注：A为Reiher的研究结果，B为Hilpert的研究结果

算例一：一个2N2905晶体管（TO-5壳体尺寸）在稳定功率条件下，在50℃的环境中耗散功率0.25W，结点到壳体的热阻为33℃/W，晶体管在90℃结温下能正常工作。晶体管安装在电路板上，如图所示，当掠过晶体管的空气速度为1.3m/s时，求晶体管能否正常工作。



解：

查得50℃时空气的物性参数为 。晶体管的

水力直径为 ，用下式计算雷诺数

雷诺数在40~4000之间，从表1中查得 ，代入方程2得

晶体管的表面换热面积

这种封装方式下仅三根细导线与单板相连，通过单板的导热量可以忽略，

则晶体管表面的温升为

结点到壳体的温升为

晶体管的结点温度为

所以在1.3m/s的冷却空气流速下可以保证晶体管正常工作。

5.2 元器件的传热分析

5.1.1 对于独立半导体器件，热源一般在PN结处。热量从PN结出发通过热传导传至半导体外壳。热量在外壳处以三种方式继续向外传播。

—

5.1.1.1 以辐射方式传向空气

5.1.1.2 以对流方式传向空气

5.1.1.3 以传导方式传向附加散热器或通过管脚（或引线）传向PCB板

5.1.1.4 热量在散热器或PCB板处以辐射和对流方式传向空气

传入空气的热量在机箱内以自然或强迫对流方式传出机箱外，完成散热的历程。并在一定条件下达到热平衡。

5.1.2 对于集成电路、大规模集成电路、微波半导体器件、混合半导体器件等，是多PN结元器件， 热量从PN结发出后互相作用再传向外壳或基板（或衬底）。

5.3 散热器的选型参数的确定

元器件安装散热器后，主要散热路径是将热量由壳体传导给散热器，由散热器通过对流的方式与冷却空气换热。在散热器选型设计时，可以先忽略通过与PCB板的接触传导的热量，这本身将给设计留有一个裕度。

热阻、温升、散热量三者的关系可通过图5-1的热电类比图清楚地表达

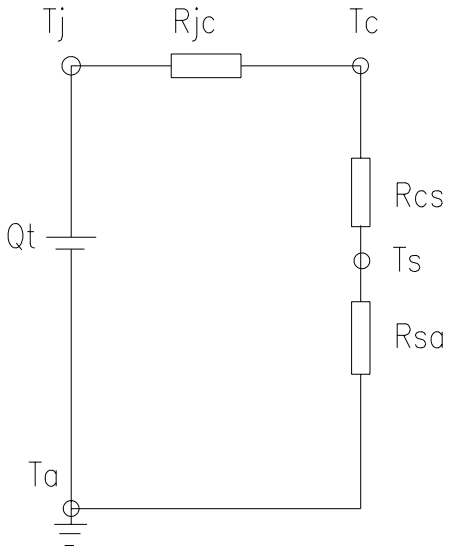


图5-1 元器件-散热器组装热阻网络简化图

Qt ---------- 元器件的典型热耗，W。

Tj ---------- 元器件的结温（Junction temp.），即发热源的温度，℃。

Rjc ---------- 结到壳体的热阻，℃/W。

Rcs ---------- 壳体到散热器之间的接触热阻，℃/W

Ts ---------- 散热器基板的温度，℃。

Rsa ---------- 散热器的热阻，℃/W。

Ta ---------- 冷却空气的温度，℃/W。

由上图可以得出如下关系式

(5-6)

其中Qt和Rjc由芯片厂商提供，要使Tj<Tj,max，必须满足下式

$$Rsa + Rcs < \frac{Tj,\max - Ta}{Q} - Rjc \qquad (5\text{-}7)$$

只要接触良好，一般接触热阻较小。接触面积、接触压力、接触介质导热系数越大，接触介质厚度越薄，接触热阻越小。一般可在接触面涂上导热硅脂，或垫一层铝箔，或使用导热绝缘双面胶降低接触热阻。对于一般的24X24左右的芯片，表面涂有均匀的薄层导热硅胶，接触热阻可以取0.5℃/W。

在其他参数已确定的情况下，由式5-7计算出散热器的热阻，即可进行选型。一般国外的散热器供应商会提供散热器的强迫风冷热阻特性曲线，如图5-3所示

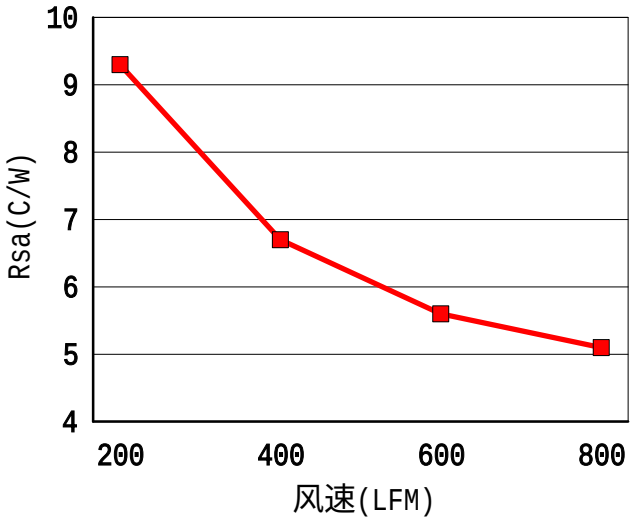


图5-3 奔腾166芯片散热器热阻特性曲线

LFM为英制单位in/min，200LFM约为1m/s。根据系统情况，估计或估算流过单板的风速（对于一般的标准插框，如果使用直径120mm的风扇，风速一般在1~2m/s左右；如果使用小风扇，风速一般为0.5~1.5m/s），查得对应的热阻值是否满足要求，如果过大，则需选择更大的散热器。公司目前使用的散热器一般为国内外协厂加工，厂家没有风洞设备，不会提供热阻曲线，选用时可以运用热仿真软件计算其散热能力，只要提供的热耗准确，一般可以获得准确的温升结果。

5.4 散热器选用和安装的原则

5.4.1 散热器与元器件接触的安装平面应光滑平整，以使与元器件有良好的紧密接触。必要时在结合面间可加导热胶、导热脂、导热垫等，以消除间隙对传热的不良影响。

5.4.2 一般应尽量选用公司已有编码的散热器，以及生产厂家的现有标准型材制造。若重新设计，其结构工艺性和经济性要好。

5.4.3 散热器配置应便于机柜内换热空气的流通。减缓对空气的过大阻碍，使机柜内换热空气的流通比较均匀。但重点散热元器件处应有较大的流速。靠自然对流换热时，散热肋片长度方向取垂直于地面方向。靠强迫空气散热时，应取与气流方向相同的方向。

5.4.4 在空气流通方向上，不宜纵向近距离排列多个散热器，由于上游的散热器将气流分开，下游的散热器表面风速将很低。应交错排列，或将散热翅片间隔错位。

5.4.5 散热器与同一块电路板上的其它元器件应有适宜的距离，通过热辐射计算，以不使其有不适宜的增温为宜。

第六章 通信产品热设计步骤

针对公司产品情况和目前热设计的状况，初步拟定产品热设计的步骤如下：

1. 必须在产品开发阶段即介入热设计工作。
2. 在制定产品系统硬件规格需求与总体方案时期，热设计人员了解产品的定位、主要配置与大体功耗，与项目组共同制定产品热设计要求与任务。同时收集国内外同类产品的相关资料，了解竞争对手的设计情况。系统集成方案讨论时，参与制定系统的配置与空间安排。与结构设计人员共同制定风道初步方案。
   文档输出：《产品开发热设计总体方案》
3. 单板硬件详细设计时，项目经理与单板开发人员需向热设计人员提供如下信息：
   3a 系统总功耗
   3b 各插框与模块的总功耗
   3c 各单板与模块的功耗
   3d 单板上发热量较大的元器件与热敏元器件的热设计参数：典型功耗与最大功耗、工作效率、长期稳定工作的最大结温或表面温度、热阻参数（Rja, Rjc, Rjb）、封装方式、表面尺寸、原配散热器热阻曲线。这些参数一般可以从所选元器件的用户说明书（PDF文件）中查到。
   3e PCB板的初步布局，3d中的元器件可能布置的位置
   文档输出：系统到器件的各相关文件
4. 结构设计人员向热设计人员提供如下内容：
   4a 机柜/箱的总体尺寸
   4b 功能模块占用的空间\可用于风道设计或温控器件的空间
   4c 机柜在防尘、屏蔽方面的考虑和进出风口的可能位置
   4d 插框内槽位间距、横梁厚度深度等与热设计相关的结构参数
5. 热设计人员与结构设计人员共同制定详细风道方案
6. 根据总体功耗进行简单估算，初步进行风扇选型；然后建立初步简化的热分析模型进行计算，优化风道结构，了解大致流场和风速。
7. 根据风道的流场分布与热设计原则对PCB板关键元器件的布置提出可行的建议，必要时可以建立单板热分析仿真模型，在满足功能设计的前提下，尽可能优化器件分布，避开死区与回流区，同时确认元器件的散热安全性。
8. 根据3d提供的参数与估算的大致风速，对有必要安装散热器的元器件进行散热器选型设计。对于热流密度特别高或散热器安装空间不足的情况，可以考虑采用其他增强散热的技术，如冷板、热管等

9. 根据具体设计情况建立系统的复杂模型或分解模型与元器件散热的详细模型，进行热分析计算，预测器件温升，完善与优化设计
10. 热设计方案内部(机电工程部)评审
11. 热设计人员向项目组提供详细的热设计方案及文档，尽量有后备方案。
12. 准备实验方案，建立物理模型或使用样机进行热测试，验证热设计效果。
    文档输出：《产品样机热测试报告》
13. 根据热测试结果进行最终的优化分析与设计
14. 根据产品应用标准进行样机高温环境箱功能测试，进行最终把关
15. 机电工程部内部汇报与交流

附：

一、热设计仿真软件介绍：

该种软件运用计算流体力学（CFD）原理对电子系统结构进行三维流场和温度场计算，可获得任意局部的流速、温度和风压，可进行机柜系统级、单板级到元器件级的综合热分析。具体可帮助热设计工程师解决如下问题：

1. 实现通风风扇与风道阻力特性的匹配选型设计。 在充分实验工作了解了机柜中典型模块（各类典型单板插框、配电箱、屏蔽板、防尘板、进出通风口等）的阻力特性经验参数后，输入到仿真软件的阻力边界条件中，软件会根据风扇的性能曲线结合计算出的风道阻力计算其工作点，获得流量、压降与风速。只要前期实验工作充分，软件计算结果可以可靠地指导设计工作。
2. 可在方案初期通过仿真预测，论证散热方式的可行性。
3. 可比较不同的风道设计、风扇与通风口的位置与尺寸、相邻单元或单板的距离、模块结构布局等方案下系统的相对散热情况，指导设计人员获得最佳方案。也可帮助设计人员避免不当的通风结构布置。
4. 可了解风道中大致的流场分布，发现回流与低速区，指导风道结构的改进设计，也可为元器件布板人员提供参考，优化关键器件的位置。
5. 可优化散热器的形状和尺寸，获得其热阻参数，便于其选型设计。
6. 在积累了足够的实践经验后，如果提供的功耗等输入参数比较准确，可以比较准确地预测元器件的大致温升，在样机制造前即避免热设计的不当之处，并进行模拟优化，减少实验的反复工作和开发周期，提高产品竞争力。这项工作可分两步走，先通过系统级计算获得单板的边界条件（空气风速和来流温度），然后再对单板进行具体细节分析，获得具体器件的温升。

二、参考文献

1. GJB/Z 27-92，电子设备可靠性热设计手册，1992年7月18日发布
2. 电子设备冷却技术，D. S. 斯坦伯格，傅军译，航空工业出版社，1989
3. “ Equipment Fans for Electronic Cooling, Function and Behavior in Practical Application” , Siegfried Harmsen, Verlag moderne industrie, 1991
4. “ Thermal Analysis & Design Process” , Applied Thermal Technologies, Inc. 1992