

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 1 页 共 80 页

共两部分:

1. 电子设备的自然冷却热设计规范
2. 电子设备的强迫风冷热设计规范

电子设备的自然冷却热设计规范

2004/05/01 发布

2004/05/01 实施

艾默生网络能源有限公司

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 3 页 共 80 页

目录

目录.....	3
前言.....	5
1 目的.....	6
2 适用范围.....	6
3 关键术语.....	6
4 引用/参考标准或资料.....	7
5 规范内容.....	7
5.1 遵循的原则.....	7
5.2 产品热设计要求.....	8
5.2.1 产品的热设计指标.....	8
5.2.2 元器件的热设计指标.....	8
5.3 系统的热设计.....	9
5.3.1 常见系统的风道结构.....	9
5.3.2 系统通风面积的计算.....	10
5.3.3 户外设备(机柜)的热设计.....	11
5.3.3.1 太阳辐射对户外设备(系统)的影响.....	11
5.3.3.2 户外柜的传热计算.....	13
5.3.4 系统前门及防尘网对系统散热的影响.....	15
5.4 模块级的热设计.....	15
5.4.1 模块损耗的计算方法.....	15
5.4.2 机箱的热设计.....	15
5.4.2.1 机箱的选材.....	15
5.4.2.2 模块的散热量的计算.....	15
5.4.2.3 机箱辐射换热的考虑.....	16
5.4.2.4 机箱的表面处理.....	17
5.5 单板级的热设计.....	17
5.5.1 选择功率器件时的热设计原则.....	17
5.5.2 元器件布局的热设计原则.....	17
5.5.3 元器件的安装.....	18
5.5.4 导热介质的选取原则.....	19
5.5.5 PCB 板的热设计原则.....	20
5.5.6 安装 PCB 板的热设计原则.....	22
5.5.7 元器件结温的计算.....	22
5.6 散热器的选择与设计.....	23
5.6.1 散热器需采用的自然冷却方式的判别.....	23
5.6.2 自然冷却散热器的设计要点.....	23
5.6.3 自然冷却散热器的辐射换热考虑.....	24
5.6.4 海拔高度对散热器的设计要求.....	24
5.6.5 散热器散热量计算的公式.....	25
5.6.6 强化自然冷却散热效果的措施.....	25

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 4 页 共 80 页

6 产品的热测试	25
6.1 进行产品热测试的目的.....	25
6.1.1 热设计方案优化.....	26
6.1.2 热设计验证.....	26
6.2 热测试的种类及所用的仪器、设备	26
6.2.1 温度测试.....	26
7 附录.....	27
7.1 元器件的功耗计算方法.....	27
7.2 散热器的设计计算方法.....	29
7.3 自然冷却产品热设计检查模板.....	30

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 5 页 共 80 页

前言

本规范由艾默生网络能源有限公司研发部发布实施,适用于本公司的产品设计开发及相关活动。本规范替代以前公司的同名规范,老版本同名规范一律废除。本规范更换了新的模板,并根据公司产品开发需求的变化及已积累的设计经验增加了新的内容。本规范由我司所有的产品开发部门遵照执行。

本规范于 2004/05/01 批准发布;

本规范拟制部门: 结构设计中心;

本规范拟制人: 李泉明;

审核人: 张士杰;

本规范标准化审查人: 数据管理中心;

本规范批准人: 研发管理办;

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 6 页 共 80 页

1 目的

建立一个电子设备在自然冷却条件下的热设计规范，以保证设备内部的各个元器件如开关管、整流管、IPM 模块、整流桥模块、变压器、滤波电感等的工作温度在规定的范围内，从而保证电子设备在设定的环境条件下稳定、安全、可靠的运行。

2 适用范围

本热设计规范适用于自然冷却电子设备设计与开发，主要应用于以下几个方面：

- 机壳的选材
- 结构与布局
- 器件的选择
- 散热器的设计与选用
- 通风口的设计、风路设计
- 热路设计

3 关键术语

3.1 热环境

设备或元器件的表面温度、外形及黑度，周围流体的种类、温度、压力及速度，每一个元器件的传热通路等情况

3.2 热特性

设备或元器件温升随热环境变化的特性，包括温度、压力和流量分布特征。

3.3 导热系数(λ w/m.k)

表征材料热传导性能的参数指标，它表明单位时间、单位面积、负的温度梯度下的导热热量。

3.4 对流换热系数 (α w/m².k)

对流换热系数反映了两种介质间对流换热过程的强弱，表明了当流体与壁面间的温差为 1℃时，在单位时间通过单位面积的热量。

3.5 热阻(℃/w)

反映介质或介质间传热能力的大小，表明了 1W 热量所引起的温升大小。

3.6 雷诺数 (R_e)

雷诺数的大小反映了流体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。

3.7 普朗特数(P_r)

普朗特数是说明流体物理性质对换热影响的相似准则。

3.8 格拉晓夫数(G_r)

格拉晓夫数反映了流体所受的浮升力与粘滞力的相对大小，是说明自然对流换热强度的一个相似准则。

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 7 页 共 80 页

3.9 定性温度

确定对流换热过程中流体物理性质参数的温度。

3.10 肋片的效率

表示某扩展表面单位面积所能传递的热量与同样条件下光壁所能传递的热量之比。

3.11 黑度

实际物体的辐射力和同温度下黑体的辐射力之比,它取决于物体种类、表面状况、表面温度及表面颜色。

3.12 外部环境温度的定义

自冷时指距设备各主要表面80mm处的温度平均值;强迫风冷(使用风扇)时指距离空气入口80~200mm截面的温度平均值。

3.13 机箱表面的温度定义

机箱表面温度指在机箱各表面几何中心处的温度。

3.14 设备风道的进、出口风温的定义

冷却空气入口、出口温度指在入口或出口处与风速方向垂直的截面内各点温度的平均值。

3.15 冷板散热器

指采用真空钎焊、锡焊、铲齿或插片工艺成型的齿间距较密、宽高比较大的散热器。

3.16 太阳辐射强度

太阳辐射强度指 1m^2 黑体表面在太阳照射下所获得的热量值,单位为 W/m^2 。

4 引用/参考标准或资料

下列标准包含的条文,通过在本标准中引用而构成本标准的条文。在标准出版时,所示版本均为有效。所有标准都会被修订,使用本标准的各方应探讨使用下列标准最新版本的可能性。

- GBxxxxx-89 电力半导体器件用散热器使用导则
- GB11456-89 电力半导体器件用型材散热器技术条件
- GJB/Z27-92 国家军用标准汇编,电子设备可靠性设计手册
- GB/T 12993-91 电子设备热性能评定
- 电子设备结构设计标准手册
- TS-S0E0199002 电子设备的自然冷却热设计规范 V1.0
- 分散式散热产品的热设计规范

5 规范内容

5.1 遵循的原则

5.1.1 进行产品的热设计应与电气设计、结构设计同时进行,平衡热设计、结构设计、电气设计各种需求。

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 8 页 共 80 页

- 5.1.2 热设计应遵循相应的国际、国内标准、行业标准、公司标准。
- 5.1.3 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正常工作, 并保证达到设定的 MTBF 指标。
- 5.1.4 各个元器件的参数选择、安装位置与方式必须符合散热要求。
- 5.1.4.1 元器件的发热表面与散热表面之间的接触热阻应尽可能小。
- 5.1.4.2 根据元器件的损耗大小及温升要求确定是否加装散热器。
- 5.1.4.3 模块的控制回路中尽可能加装温度继电器、压力继电器等热保护回路, 以提高系统的可靠性。
- 5.1.5 在进行热设计时, 应考虑相应的设计冗余, 以避免在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。
- 5.1.6 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。
- 5.1.7 采用自然冷却的条件: 常压下单位面积的最大功耗: 小于 $0.024-0.039\text{w}/\text{cm}^2$, 上限适应于通风条件较恶劣的情况, 下限适应于通风条件较好的场合。

5.2 产品热设计要求

5.2.1 产品的热设计指标

- 5.2.1.1 散热器的表面温度最高处的温升应小于 50°C 。
- 5.2.1.2 模块内部空气的平均温升应小于 25°C 。

5.2.2 元器件的热设计指标

元器件的热设计指标应符合 [TS-S0A0204001](#) 《器件应力降额规范》, 具体指标如下:

- 5.2.2.1 功率器件的工作结温应小于最大结温的 (0.5-0.8) 倍
 - 对额定结温为 175°C 的功率器件, 工作结温小于 140°C 。
 - 对额定结温为 150°C 的功率器件, 工作结温小于 120°C 。
 - 对额定结温为 125°C 的功率器件, 工作结温小于 100°C 。
- 5.2.2.2 碳膜电阻 120°C
 金属膜电阻 100°C
 压制线绕电阻 150°C
 涂剥线绕电阻 225°C
- 5.2.2.3 变压器、扼流圈表面温度
 - A 级 90°C
 - B 级 110°C
 - F 级 150°C
 - H 级 180°C
- 5.2.2.4 电容器的表面温度

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 9 页 共 80 页

纸质电容器	75-85℃
电解电容器	65-80℃
薄膜电容器	75-85℃
云母电容器	75-85℃
陶瓷电容器	75-85℃

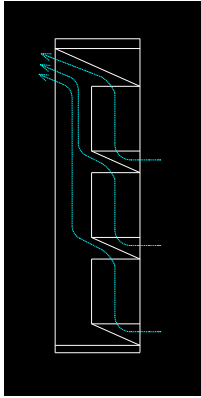
5.3 系统的热设计

5.3.1 常见系统的风道结构

5.3.1.1 系统风道设计的一些基本原则:

- 进、出风口尽量远离，以强化烟囱效果。
- 出风口尽可能设计在系统的顶部。
- 在机柜的面板、侧板、后板没有特别要求一般不要开通风孔，以利于形成有效的烟囱。
- 系统后部应留一定空间以利于气流顺畅流出。
- 为了避免下部热源对于上层热源的影响，可采用隔板形成独立风道。
- 为了避免热空气流入配电单元而影响其可靠性，可把气流风道隔离，形成完整、独立的风道。

5.3.1.2 一些典型的风道结构

	
风道1	
<ul style="list-style-type: none"> ● 系统为自然对流独立散热风道，机柜出风口在后门的顶部或顶部。 ● 模块或插框自然冷却。 ● 机柜后面的风道要求有足够的宽度，通常推荐大于200mm以上。 ● 配电单元如果位于系统顶部，需与风道隔离，以避免热空气对配电器件的影响。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 系统为自然对流独立散热风道，机柜出风口在后门的顶部或顶部。 ● 模块或插框强迫风冷且必须为上下风道。 ● 机柜后面的风道要求有足够的宽度，通常推荐大于200mm以上。 ● 配电单元如果位于系统顶部，需与风道隔离，以避免热空气对配电器件的影响。

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 10 页 共 80 页

<ul style="list-style-type: none"> 除进、出风口外, 其它部位须完全密封。 	<ul style="list-style-type: none"> 除进、出风口外, 其它部位须完全密封。
<p style="text-align: center;">风道2</p>	<p style="text-align: center;">风道3</p>
<ul style="list-style-type: none"> 系统为自然对流独立散热风道, 机柜出风口在后门的顶部或顶部。 模块或插框为前后通风冷却。 机柜后面的风道要求有足够的宽度, 通常推荐大于200mm以上。 配电单元如果位于系统顶部, 需与风道隔离, 以避免热空气对配电元器件的影响。 除进、出风口外, 其它部位须完全密封。 	<ul style="list-style-type: none"> 系统为自然对流独立散热风道, 机柜出风口在后门的顶部或顶部。 模块或插框强迫风冷且必须为上下风道。 机柜后面的风道要求有足够的宽度, 通常推荐大于200mm以上。 配电单元如果位于系统顶部, 需与风道隔离, 以避免热空气对配电元器件的影响。 除进、出风口外, 其它部位须完全密封。

图1 典型系统风道结构示意图

5.3.2 系统通风面积的计算

系统进风口的面积大小按下式计算:

$$S=Q/(7.4 \times 10^{-5} H \times \Delta t^{1.5}) \dots\dots\dots(1)$$

s-通风口面积的大小, cm^2

Q-机柜内总的散热量, W

H-机柜的高度, cm

$\Delta t=t_2-t_1$ --内部空气温度 t_2 与外部空气温度 t_1 之差, $^{\circ}\text{C}$

出风口的面积大小应为进风口面积大小的 1.5-2 倍;

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 11 页 共 80 页

5.3.3 户外设备(机柜)的热设计

5.3.3.1 太阳辐射对户外设备(系统)的影响

5.3.3.1.1 太阳辐射强度及其影响因素

户外柜由于处于室外, 太阳辐射将是其热设计必须考虑的重要一环。到达地面的太阳辐射主要受大气层厚度的影响, 大气层越厚, 对太阳辐射的吸收、反射和散射就越严重, 到达地面的太阳辐射就越少。此外大气的状况和大气的质量对到达地面的太阳辐射也有影响。到达地面的太阳辐射强度的大小, 主要取决于地球对太阳的相对运动, 也就是取决于被照射地点与太阳射线形成的高度角 β 和太阳光线通过大气层的厚度, 显然地球上不同地区、不同季节、不同气象条件下到达地面的太阳辐射强度都是不相同的。到达地面的太阳辐射有两部分:

直接辐射 太阳以平行光线的形式直接投射到地面上的, 称为太阳直接辐射。太阳直接辐射的强弱和许多因子有关, 其中, 最主要的是太阳高度角(直射或斜射), 其次为大气透明度, 或者说, 太阳辐射(直射时)经过大气的路程愈短, 被大气削弱的愈少, 到达地面的太阳辐射愈多; 反之, 愈少。

一天当中, 日出、日没时太阳高度最小, 直接辐射最弱; 中午太阳高度角最大, 直接辐射最强。在一年当中, 直接辐射在夏季最强, 冬季最弱。以纬度而言, 低纬度地区一年各季太阳高度角都很大, 地表面得到的直接辐射就比中、高纬度地区大得多。

散射辐射 太阳高度角增大时, 到达地面层的直接辐射增强, 散射辐射也就相应地增强; 相反, 太阳高度角减小时, 散射辐射也弱。太阳经过大气路程长, 参与散射作用的质点增多, 散射辐射增强; 相反, 减弱。云也能强烈地增大散射辐射。阴天的散射辐射比晴天强。一日内正午前后散射辐射最强, 一年内夏季最强。

总辐射 同时到达地面(水平面)的太阳直接辐射和散射辐射之和, 称为总辐射。

5.3.3.1.2 户外柜表面所吸收的太阳辐射热

当太阳射线照射到户外柜表面时, 一部分被吸收, 一部分被反射, 二者的比例取决于表面材料的种类、粗糙度和颜色, 表面愈粗糙、颜色愈深, 吸收的太阳辐射热愈多。同一材料对于不同波长的辐射光的吸收率也是不同的, 黑色表面对各种波长的辐射几乎全部吸收, 而白色表面对不同波长的吸收率不同, 对于可见光几乎 90%都反射回去, 所以户外柜表面最好为白色和相近色, 以减少进入户外柜内部的太阳辐射热。表 1 列举出了常用户外柜材料及表面颜色的吸收率和发射率。表 2 列举出了建筑常材料及表面颜色的吸收率和发射率。

表 1 常用户外柜材料及表面颜色的吸收率和发射率

SURFACE	Shortwave (solar) absorptance	Longwave emittance
Polished Aluminum	0.03	0.05

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 12 页 共 80 页

Oil-Based Paints:		
White	0.2	0.9
Light Green	0.5	0.9
Light Gray	0.75	0.9

表 2 常用建筑材料及表面颜色的吸收率和发射率

Material		Absorp- tance (a)%	Emitt- tance (e)%
Aluminium sheet	New	20-40	10
	Oxidized	30-50	20-30
Burnt clay bricks	Cream	30-50	85-95
	Yellow	55	90
	Red	65-80	85-95
Concrete	Light	45-70	85-95
	Dark	90	90
Earth		80	90
Grass, leaves		75-80	85-95
Paint	White	20-30	85-95
	Light grey	30	90
	Light green	50-60	90
	Medium grey, yellow, orange	55	90
	Light brown, grey, red	65-70	90
	Dark brown/ red/green	80-90	90
	Black	85-95	85-95
Steel sheet	Galvanized, new	30-65	15-30
	Galvanized, oxidized	80	20-40
	Rusty	60-85	60-90
Stone	White marble	50	85-95
	Limestone	60	85-95
	Yellow	50-70	85-95
	Red	65-80	85-95
Thatch		60-70	85-95
Whitewash	New	10-15	20-30
	Weathered	20-30	20-40
Wood	Pine	60	90-95

户外柜表面所吸收的太阳辐射热按式 (2) 进行计算。

$$Q_{\alpha} = \alpha_{sol} Q_{sun} \dots \dots \dots (2)$$

其中: Q_{α} —户外柜表面所吸收的总太阳辐射热, W

α_{sol} —户外柜表面的太阳短波吸收率

Q_{sun} —照射到户外柜表面的总太阳辐射热, W, 包括太阳直射、
散射到户外柜表面以及周围其它表面反射的太阳辐射热
(开放式空间除外)。

$$Q_{sun} = I_0 \times A$$

I_0 —太阳辐射强度, W/m², 从当地的气象资料中查取。

A —户外柜被太阳照射到的表面积, m²

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 13 页 共 80 页

5.3.3.2 户外柜的传热计算

户外柜的传热模型可以简化为如图2所示的热阻网络。

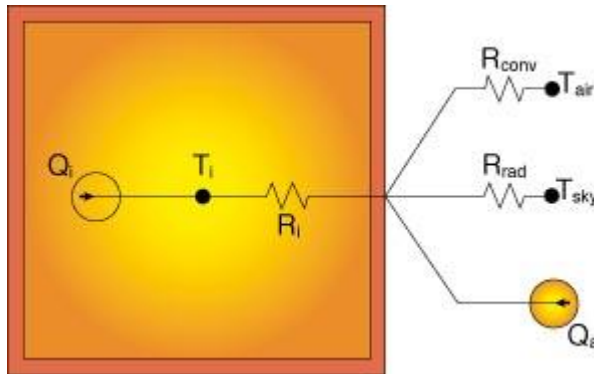


图2 户外柜传热简化模型

其传热路径包括两个部分:

路径一: 户外柜内部生成的热量通过对流及辐射传给户外柜内表面, 再通过夹层材料(如空气、海面、泡沫等)的导热传到户外柜外表面, 最后通过对流及辐射传给周围的大气。

路径二: 户外柜外表面吸收了太阳辐射的热量, 一部分通过对流及辐射传给周围大气, 另一部分则通过夹层材料(如空气、海面、泡沫等)的导热传到户外柜内。

要保持户外柜内的温度 T_i 恒定, 进入户外柜的热量加上内部生成的热量应等于户外柜表面的散热量。如果不能够平衡, 则需要借助热交换器或空调来强制维持热量的平衡, 保证内部温度达到设计要求并保持恒定。户外柜传热计算的目的就是要计算出需要依靠热交换器或空调来强制维持热量平衡的净热量 Q_{net} 。

依据热网络图2给出的传热方程式为:

$$T_i - T_{air} = R_i Q_i + R_o Q_i + R_o Q_{\alpha} - [R_o / R_{rad}] [T_{air} - T_{sky}] \dots \dots \dots (3)$$

$$1/R_o = 1/R_{conv} + 1/R_{rad}$$

Q_{α} -- 户外柜吸收的太阳辐射的热量, W, $Q_{\alpha} = \alpha_{sol} Q_{sun}$

Q_{sun} -- 太阳辐射的总热量, W

T_i -- 户外柜内部允许的环境温度, °C

T_{air} -- 户外柜周围的外部环境温度, °C

T_{sky} -- 户外柜远处的环境温度, °C

R_o -- 户外柜外表面的总热阻, °C、W

R_{conv} -- 户外柜外表面的对流热阻, °C/W

R_{rad} -- 户外柜外表面向周围环境及大气的辐射热阻, °C/W

R_i -- 户外柜外内表面的热阻, °C/W

α_{sol} -- 户外柜表面的太阳辐射吸收率

具体计算方法按照表3提供的小程序即可快速计算出冷却所需的净热量 Q_{net} 。

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 14 页 共 80 页

表 3 太阳辐射热负荷计算表

Sun Load Calculation for the Outside Cabinet		
Solar radiation parameters		
Solar radiation	Solar tensity(W/m ²):	1120
Sunshine or Shadow Area	Area sunshine(m ²):	1.8
	Area shadow(m ²):	1.44
Coefficient(refer to right table)	Absorbance of the outter surface(α):	0.2
	Emittance of the outter surface(ξ):	0.9
Constant Coefficient	Stefan-Boltzmann Coefficient	5.67E-08
Input Parameters		
Dimensions of the Cabinet	Width(mm):	600
	Depth(mm):	600
	Height(mm):	1200
Heat Transfer Coefficient	Outside natural convection coefficient(α_1 W/m ² C):	3
	Inside forced convection coefficient(α_2 W/m ² C):	40
Ambient Temperature	Outside ambient temperature($T_{\text{outside-ambient}}$):	40
	Inside ambient temperature($T_{\text{inside-ambient}}$):	55
Cabinet's Wall Property	Thickness of the outside plane(mm):	3
	Heat conductivity of the outside plane(W/mC):	180
	Thickness of the insulated material(mm):	7
	Heat conductivity of the insulated material(W/mC):	0.033
Ouput Parameters		
Temperature of the Wall (Sunshine)	Inside temperature of the wall $T_{\text{inside-wall}}$ (C):	55.56
	Outside temerature of the wall $T_{\text{outside-wall}}$ (C):	60.34
Temperature of the Wall (Shadow)	Inside temperature of the wall $T_{\text{inside-wall}}$ (C):	53.91
	Outside temerature of the wall $T_{\text{outside-wall}}$ (C):	44.64
Sun Load	Absorbed heat from the sun(W):	403.20
Convection heat transfer to the ambient	Sunshine side(W):	109.84
	Shadow side(W):	20.05
Radiation heat transfer to the ambient	Sunshine side(W):	252.83
	Shadow side(W):	42.84
Heat transfer in the cabinet from the sun in the sunshine side(W):		40.53
Total amount of Heat Net Increase from the sun to the cabinet Q_{net} (W):		(22.36)

1E-07
0.0
403.2

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 15 页 共 80 页

Note: (1) When run this program, firstly fill in the input parameters and select the surface color of the cabinet, then write the data of right table to the C6 and C7. Secondly, make the value of D30 equal to the C30 by changing the value of C27. Thirdly, make the value of D28 equal to D29, i.e 0.0, by changing the value of C29. Finally, enjoy the results at the line 35 or line 36.(2)If this value is less than 0.0, that means the outer surface of the cabinet has so good heat transfer performance that it can decrease the heat load of heat exchanger.

5.3.4 系统前门及防尘网对系统散热的影响

如果前门的进风口位置满足要求，并且进风面积足够，一般来讲，开门与关门有约2-5℃差异。

如果需在系统上加防尘网，即使采用粗效的防尘网，也将带来5-10℃的差异。

5.4 模块级的热设计

5.4.1 模块损耗的计算方法

模块的损耗可由下式计算.

$$P_{diss}=(1/\eta -1)P_{out}.....(4)$$

P_{diss} -- 模块的损耗,W

P_{out} --模块的输出功率,W

η --模块的效率

功率损耗 P_{diss} 是由于发热器件的发热而引起的，这些发热器件包括开关管（MOSFET，IGBT），整流管（整流二极管及 FRED），滤波电感，变压器以及开关管的驱动等。

5.4.2 机箱的热设计

5.4.2.1 机箱的选材

如果需利用模块的机箱作为散热器，则模块机箱必须选用铝合金材料，且模块内壁不得进行拉丝处理，材料的厚度不得低于 1.5mm。

如果不利用机箱进行散热，则模块机箱选材不受限制。

5.4.2.2 模块的散热量的计算

5.4.2.2.1 对密封机箱

$$Q_T=1.86(S_s+4S_t/3+2S_b/3) \Delta t^{1.25}+4 \sigma S \varepsilon T_m^3 \Delta T.....(5)$$

$$S= S_s+S_t+S_b$$

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 16 页 共 80 页

如果计算出的散热量 $Q_T \leq$ 需求散热量 Q , 则必须选用通风机箱。

5.4.2.2.2 对通风机箱

$$Q_T = 1.86(S_s + 4S_t/3 + 2S_b/3) \Delta t^{1.25} + 4\sigma S \varepsilon T_m^3 \Delta t + 1000uA \Delta T \dots\dots\dots(6)$$

- Q_T - 模块的耗散功率, W
- S_s - 机箱侧面内壁的有效面积, m^2
- S_t - 机箱顶部面积, m^2
- S_b - 机箱的底面积, m^2
- Δt - 风道进出口温差, $^{\circ}C$
- σ - 斯-波尔兹曼常数, 为 $5.67 \times 10^{-8} W/m^2.K$
- ε - 辐射系数
- $T_m = (T + T_a) / 2$
- T - 机箱的表面温度, K
- T_a - 环境温度, K
- u - 自然风速, 一般取 0.1-0.2m/s
- A - 通风面积, m^2

5.4.2.3 机箱辐射换热的考虑

对于自然冷却的机箱, 大部分需承担散热器的功能, 其表面温升一般较高, 约 $25-40^{\circ}C$, 其表面的辐射换热量在整个机箱的散热量中占有较大的比重, 有些甚至成为主要的散热途径, 所以, 在进行机箱的散热计算时, 不能忽略辐射换热, 可按计算式 (5)-(6) 中提供的方法计算辐射换热, 也可按下式进行计算:

$$Q_{\text{辐射}} = 4\sigma S \varepsilon (T_s^4 - T_a^4) \dots\dots\dots(7)$$

- S - 机箱的有效面积, m^2
- σ - 斯-波尔兹曼常数, 为 $5.67 \times 10^{-8} W/m^2.K$
- ε - 辐射系数
- T_s - 机箱的表面温度, K
- T_a - 环境温度, K

必须牢记, 电子设备由于温度不是太高, 辐射波长相当长, 处于不可见的红外区。而在红外区, 一个好的发射体也是一个良好的吸收体, 所以在考虑机箱的辐射换热时, 必须同时考虑机箱表面辐射吸收的热量及机箱表面辐射散出的热量。

对于模块, 基本处于室内, 不涉及太阳辐射的问题, 如果模块周围没有温度高于模块的物体, 其机箱表面吸收的辐射热量可以不考虑, 只需考虑机箱表面的散热量, 所以机箱表面的实际辐射散热量对于机箱表面辐射散出的热量。

$$Q_{\text{实际辐射}} = Q_{\text{辐射散热}}$$

如果模块周围有温度高于模块的物体, 其机箱表面吸收的辐射热量必须考虑, 机箱表面的实际散热量按(8)式计算:

$$Q_{\text{实际辐射}} = Q_{\text{辐射散热}} - Q_{\text{辐射吸热}} \dots\dots\dots(8)$$

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 17 页 共 80 页

5.4.2.4 机箱的表面处理

从热设计角度, 无论机箱还是散热器, 不推荐表面进行任何处理, 额外的表面处理对辐射散热贡献较小, 却增加了产品成本。

5.5 单板级的热设计

5.5.1 选择功率器件时的热设计原则

- 5.5.1.1 在其它性能参数相同的情况下, 应优先选用允许结温 T_j 高的功率器件 (根据供应商手册提供的数据进行筛选)。
- 5.5.1.2 在其它性能参数相同的情况下, 应优先选用结壳热阻 R_{jc} 较小的功率器件 (根据供应商手册提供的数据进行筛选)。
- 5.5.1.3 在其它性能参数相同的情况下, 优先选用封装尺寸较大的功率器件 (根据供应商手册提供的数据进行筛选), 以减小器件与散热器间的接触热阻 R_{cs} 。
- 5.5.1.4 对于 MOSFET 器件, 在结壳热阻 R_{jc} 相近的条件下, 应优先选用 25°C 下 $R_{D(on)}$ 较小的器件。
- 5.5.1.5 对于 IGBT 器件, 在结壳热阻 R_{jc} 相近的条件下, 应优先选用相同门极电阻下开关能量较小的器件。

5.5.2 元器件布局的热设计原则

- 5.5.2.1 电阻的散热一般是通过固定连接片或引线两端的传导以及本身的辐射, 对流进行散热的, 所以电阻表面应涂覆无光泽的粗糙漆, 放置位置应便于对流散热并加大与其它元件之间的距离。
- 5.5.2.2 对不加屏蔽罩的变压器, 铁芯与支架、支架与固定面之间应有良好的接触, 以使接触热阻最低;
 - 对带屏蔽罩的变压器, 外罩必须与固定面良好接触, 把变压器的固定面用支架垫高, 并在底板上开通风孔, 以形成气流对流。
- 5.5.2.3 对模块内部不能够吹到风的 PCB 板, 在布置元器件时, 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, 以利空气流动, 增强对流换热。
 - 5.4.3.3.1 对相邻的两垂直发热表面, $d/L=0.25$, 如图 3-(a) 所示。
 - 5.4.3.3.2 对相邻的垂直发热表面与冷表面间距, $d_{min}=2.5\text{mm}$, 如图 3-(b) 所示。
 - 5.4.3.3.3 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-(c) 所示。
 - 5.4.3.3.4 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-(d) 所示。
 - 5.4.3.3.5 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-(e) 所示。

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 18 页 共 80 页

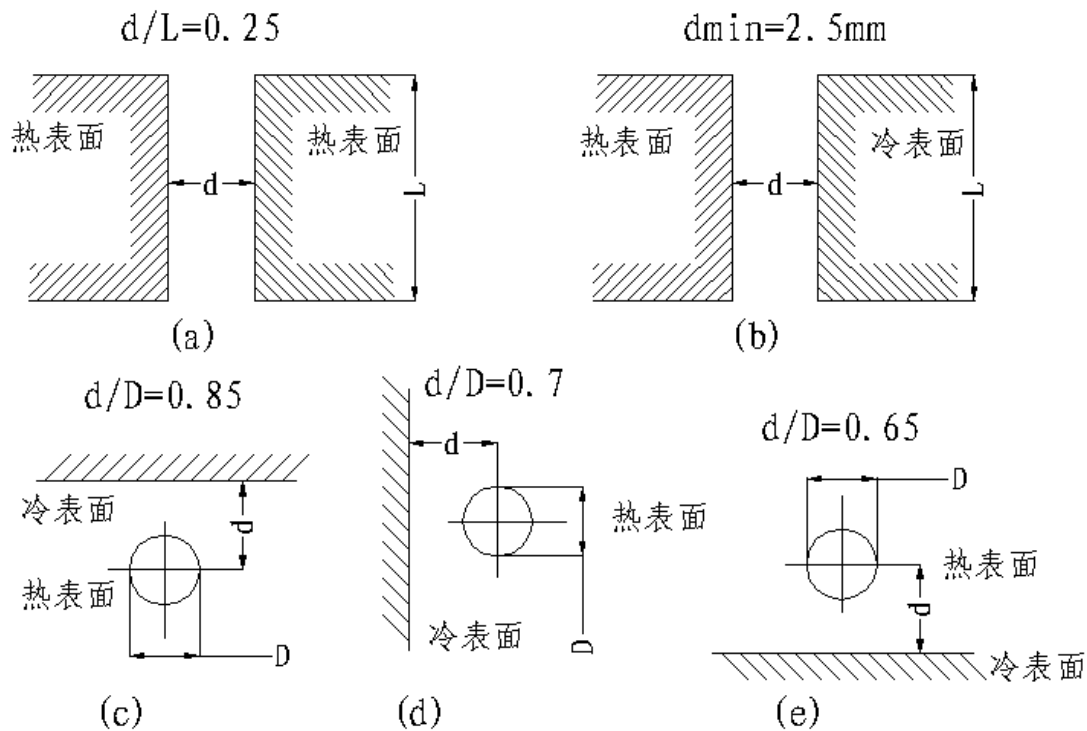


图3 自然对流时元器件排列的距离关系

- 5.4.3.4 在PCB上布置各种元器件时, 应将功率大、发热量大的元器件放在边沿和顶部, 以利于散热。
- 5.4.3.5 应将不耐热的元件(如电解电容)放在靠近进风口的位置, 而将本身发热而又耐热的元件(如电阻, 变压器等)放在靠近出风口的位置。
- 5.4.3.6 在PCB上布置各种元器件时, 应将功率大、发热量大的元器件放在出风口的位置。
- 5.4.3.7 对热敏感元件, 在结构上应采用“热屏蔽”方法解决。

5.5.3 元器件的安装

元器件的安装应尽量减少元器件壳与散热器表面间的热阻, 即接触热阻。

- 5.5.3.1 为尽量减小传导热阻, 应采用短通路, 即尽可能避免采用导热板或散热块把元器件的热量引到散热器表面, 而元器件直接贴在散热器表面则是最经济、最可靠、最有效的散热措施。
- 5.5.3.2 为了改善器件与散热器接触面的状况, 应在接触面涂导热介质, 常用的导热介质有导热脂、导热胶、导热硅油、热绝缘胶等。
- 5.5.3.3 对器件须与散热器绝缘的情况, 采用的绝缘材料应同时具有良好的导热性能, 且能够承受一定的压力而不被刺穿, 详见 5.5.4。
- 5.5.3.4 把器件装配在散热器上时, 应严格按照我司 [TS-S0E0102012](#) 《大功率管安装设计工艺规范》中提供的安装压力或力矩进行装配, 压力不足会使接触热阻增加, 压力过大会损坏器件。
- 5.5.3.5 将大功率混合微型电路芯片安装在比芯片面积大的钼片上。

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 19 页 共 80 页

5.5.3.6 对于多层印制线路板,应利用电镀通孔来减少通过线路板的传导热电阻。这些小孔就是热通路或称热道。

5.5.3.7 当利用接触界面导热时,采用下列措施使接触热阻减到最小。

5.5.3.7.1 尽可能增大接触面积。

5.5.3.7.2 确保接触表面平滑。

5.5.3.7.3 利用软材料接触。

5.5.3.7.4 扭紧所有螺栓以加大接触压力(注意不应残留过大应力)。

5.5.3.7.5 利用合理的紧固件设计来保证接触压力均匀。

5.5.4 导热介质的选取原则

为了解决功率器件与散热器间的电气绝缘问题,功率器件与散热器间应加导热绝缘材料,考虑到性价比,在散热条件不是很恶劣,如功率器件损耗较小或功率器件处于有利的通风位置时,可选用通用的导热绝缘材料SP400,其它条件下可选用散热性能较好的SP900S,只有在特殊情况下,才允许选用SP2000。其性能参数如表4所示

表4 常用热界面材料性能参数表

材料	Sil-pad2000	Sil-pad900S	Sil-pad400	陶瓷基片
材料厚度(mm)	0.25±0.025	0.23±0.025	0.23±0.025	0.63±0.025
导热系数W/m.k	3.5	1.6	0.9	27
单位面积热阻 °C-cm ² /W	1.29	2.6	4.6	1.2
使用温度°C	-60~180°C	-60~180°C	-60~180°C	-60~180°C
材料构成	硅橡胶/玻璃纤维	硅橡胶/玻璃纤维	硅橡胶/聚脂薄膜	陶瓷+三氧化二铝
实测热阻值	<0.4	<0.6	<0.9	<0.35

实测热阻值是在采用 T0-247 封装,在紧固压力为 12Kg.cm 下测得的。

5.5.4.1 由于陶瓷基片在安装时容易碎裂,所以不推荐使用陶瓷基片。

5.5.4.2 对于输出部分,由于总是处于出风口的位置,一方面通过其功率管表面及散热器表面的风均为热风,另外输出二极管部分后面总会有输出共模电感或差模电感之类的体积较大的器件,影响出风,所以该部分的散热条件总是比较恶劣,为了减小散热器的压力,可考虑采用散热器悬浮的方法去掉功率管与散热器间的导热绝缘膜,使功率管直接贴在散热器上。

5.5.4.3 为了便于安装,导热绝缘膜可考虑选用单面背胶的方法解决导热绝缘膜的定位问题,即先将导热绝缘膜粘在安装位置,再进行功率管的安装与紧固。但必须注意,导热绝缘膜背胶会增加其热阻,由于胶不是良好的导热介质,一般情况下,热阻会增加 30-40%,所以,在热设计时需考虑该部分的冗余。

5.5.4.4 我司推荐的大部分导热绝缘材料均采用硅橡胶为基体,质地较软,因此,在安装时不需要涂硅脂;只有少数材料如SP400、SPK10、陶瓷基片等质地比较硬

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 20 页 共 80 页

的材料必须涂硅脂, 要求硅脂必须涂敷均匀, 硅脂层厚度小于0.15mm。

5.5.5 PCB 板的热设计原则

PCB板热设计的主要任务是有效地把印制板上的热引导到外部(散热器和大气中)。

5.5.1 印制线的载流容量和温升

设计印制板时要保证印制线的载流容量, 印制线的宽度必须适于电流的传导, 不能引起超过允许的温升和压降。

在实际应用中, 常有较大电流流过输出端铜箔, 如果输出铜箔设计的过细, 则会导致铜箔的温度上升。印制电路板的材料、导电铜箔的厚度、容许温升将影响到铜箔厚度应该多宽、能承受多大电流。一般对1盎司的环氧玻璃板, 如果允许温升小于10℃(考虑到系统内部的环境温度可能超过70℃), 则一般可按1A电流取1mm宽铜箔的经验数据进行铜箔设计。如假如流过的电流为5A, 对1盎司的环氧玻璃板, 其铜箔宽度可取5mm。实际可按照容许温升的大小按照图4进行选择。

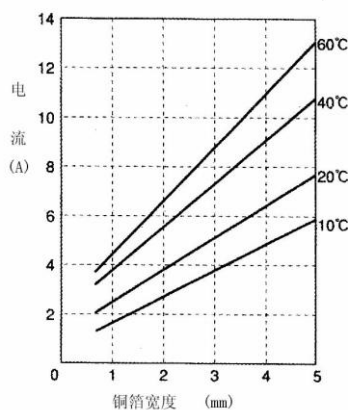


图4 1盎司环氧玻璃板电流与铜箔宽度的关系图,

需提醒的是, 不同的基板材料生产厂家, 不同的基板材料, 则图3显示的电流与铜箔的关系是不相同的。可通过实验进行确定。

5.5.2 印制板的散热

5.5.2.1 选用厚度大的印制线, 以利于印制线的导热和自然对流散热。

5.5.2.2 减小元器件引线腿及元器件引线间的热阻, 增强元器件引线腿对印制线的热传导, 增强导电性。

5.5.2.3 当元器件的发热密度超过 $0.6W/cm^3$, 单靠元器件的引线腿及元器件本身不足充分散热, 应采用散热网、汇流条等措施。

5.5.2.4 若发热密度非常高, 则元器件应安装散热器, 在元器件和散热材料之间应涂抹导热膏。

5.5.2.5 以上措施仍不能充分散热时, 就应采用热传导性能好的印制板, 如金属基底印制板和陶瓷基底(高铝陶瓷、氧化砖陶瓷、冻石陶瓷)印制板。

5.5.2.6 对塑封器件和 SMD 封装的元器件, 通过管脚散热成为主要的散热器途径之一, 其热设计应满足以下原则:

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 21 页 共 80 页

- 加散热铜箔和采用大面积电源地铜箔，以加大 PCB 的散热面积，如图 5 所示

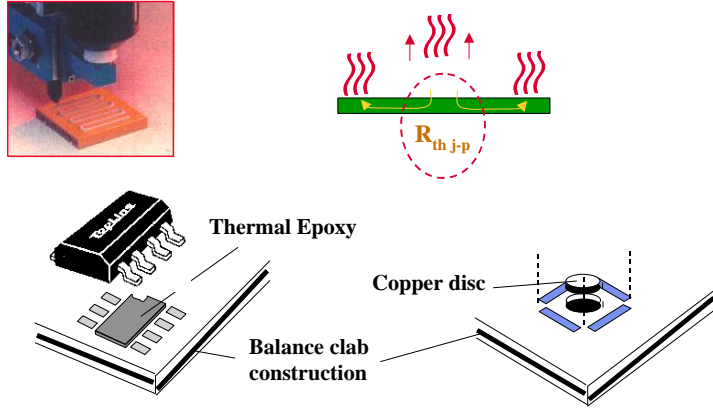


图 5: 改善管脚侧散热的措施之一

- 散热焊盘由过孔连接到内层夹心层进行散热和热平衡

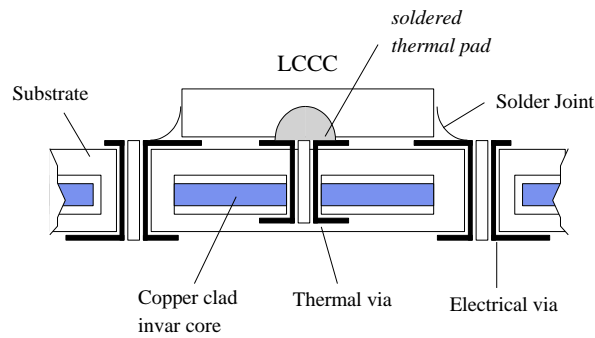


图 6: 改善管脚侧散热的措施之二

5.5.2.7 PCB 焊盘的隔热设计

较大的焊盘及大面积铜皮对管脚的散热十分有利，但在过波峰焊或回流焊时由于铜皮散热太快，容易造成焊接不良，必须进行隔热设计，常见的隔热设计方法如图 7 所示

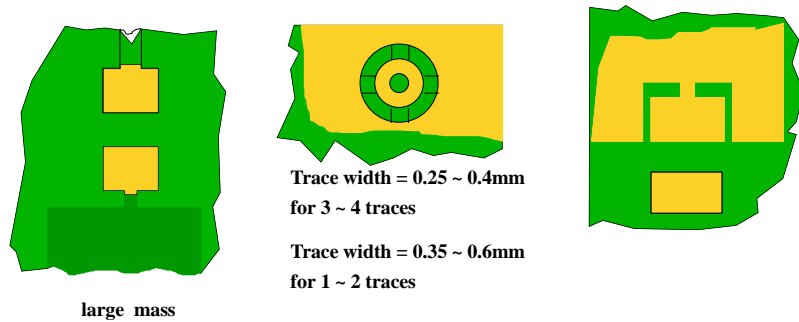


图 7: 焊盘的隔热设计

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 22 页 共 80 页

5.5.6 安装 PCB 板的热设计原则

自然冷却条件下, 对设备内有多块 PCB 板时, 应与进风方向平行并列安装, 每块 PCB 板间的间距应大于 30mm, 以利于对流散热。

5.5.7 元器件结温的计算

为保证元器件的安全散热, 需要校核元器件的结温是否工作在安全温度下, 首先得获得如下数据: 元器件的耗散功率 Q (额定值), 结点 (junction) 的安全工作温度范围 T_{jmax} (最大值和推荐值), 结至冷却空气热阻 R_{ja} , 结至壳热阻 R_{jc} , 结至板热阻 R_{jb} , 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 (由系统级估算获得), 工作结温按下式进行计算:

5.5.7.1 元器件背有散热器

对于带铜板封装的大功率元器件 (典型如 T0-220/T0-247 等), 其热量通过环氧表面 (通常为 TOP 面)、管脚及铜板共 3 个渠道传递出来, 由于结到环氧表面、结到管脚的热阻较大, 所以通过铜板的传热为主要的传热途径, 如果铜板所贴的散热器热阻足够小且流过环氧表面的风速小于 1m/s, 则通过其它两种路径的传热基本可以忽略, 在已知散热器台面温度 T_s 下, 器件的工作结温为:

$$T_j = T_s + P_T \times R_{th(j-s)} \leq 0.8 T_{jmax} \dots \dots \dots (9)$$

P_T ---元器件的热损耗, W

$R_{th(j-s)}$ ----元器件结到散热器表面的热阻, °C/W

对于无铜板的塑封器件, 其热量通过环氧表面 (通常为 TOP 面)、管脚共 2 个渠道传递出来, 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。

5.5.7.2 元器件无散热器

如果已知结到环境的热阻, 环境温度, 则器件的工作结温为:

$$T_j = T_a + P_T \times R_{th(j-a)} \dots \dots \dots (10)$$

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 23 页 共 80 页

5.6 散热器的选择与设计

5.6.1 散热器需采用的自然冷却方式的判别

对通风条件较好的场合,散热器表面的热流密度小于 $0.039\text{W}/\text{cm}^2$ 可采用自然冷却。

对通风条件较恶劣的场合: 散热器表面的热流密度小于 $0.024\text{W}/\text{cm}^2$ 可采用自然冷却。

5.6.2 自然冷却散热器的设计要点

5.6.2.1 考虑到自然冷却时温度边界层较厚,如果齿间距太小,两个齿的热边界层易交叉,影响齿表面对流,所以一般情况下,建议自然冷却的散热器齿间距大于 12mm ,如果散热器齿高低于 10mm ,可按齿间距 ≥ 1.2 倍齿高来确定散热器的齿间距。

5.6.2.2 自然冷却散热器表面的换热能力较弱,在散热齿表面增加波纹不会对自然对流效果产生太大的影响,所以建议散热齿表面不加波纹齿。

5.6.2.3 自然对流的散热器表面一般采用发黑处理,以增大散热表面的辐射系数,强化辐射换热。

5.6.2.4 由于自然对流达到热平衡的时间较长,所以自然对流散热器的基板及齿厚应足够,以抗击瞬时热负荷的冲击,建议大于 3mm 以上。散热器基板厚度对散热器的热容量及散热器热阻有影响,太薄热容量太小,太厚热阻反

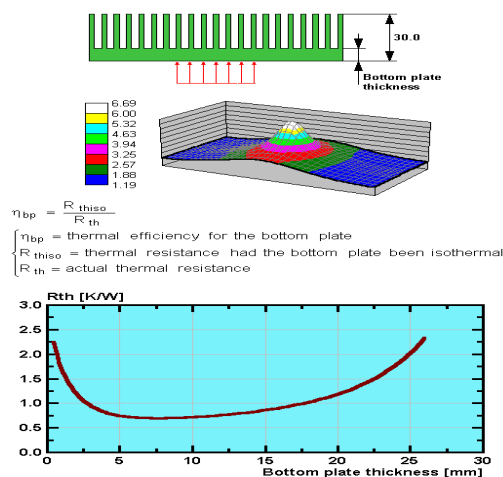
而增加,图8表示出了基板厚度的最佳范围。对分散式散热来将,基板厚度一般为 $3\text{--}6\text{mm}$ 为最佳。

5.6.2.5 自然冷却所需散热器的体积热阻为 $500\text{--}800^\circ\text{C}\text{--}\text{cm}^3/\text{W}$ (注意:表2只能作为初选散热器的参考,不能用它来计算散热器的热阻,散热器的实际热阻需按附录A提供的方法计算。)

5.6.2.6 一定的冷却体积及流向长度下,按表5确定散热器齿片最佳间距的大小

表5 不同冷却条件及流向长度与散热齿片最佳齿间距的关系

冷却条件	流向长度(mm)			
	75	150	225	300
自然冷却	6.5	7.5	10	13



$$\eta_{bp} = \frac{R_{thiso}}{R_{th}}$$

η_{bp} = thermal efficiency for the bottom plate
 R_{thiso} = thermal resistance had the bottom plate been isothermal
 R_{th} = actual thermal resistance

图8 散热器基板厚度与热阻的关系曲线

最佳范围。对分散式散热来将,基板厚度

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 24 页 共 80 页

5.6.2.7 不同形状、不同的成型方法的散热器的传热效率 如表 3 所示, 尽可能选用成型简单的工艺以降低散热器的加工成本。

5.6.2.8 散热器的表面处理

- 安装元器件的散热器表面的光洁度 $Ra \leq 1.6 \mu m$, 平面度对于 0.1mm。
- 安装元器件的散热器表面不能进行拉丝处理。

表6 不同形状、不同的成型方法的散热器的传热效率

散热器成型方法	传热效率, %	成本参考
冲压件/光表面散热器	10—18	低
带翅片的压铸散热器/常规铝型材	15—22	较低
铲齿散热器	25—32	较高
小齿间距铝型材	45—48	高
针装散热器/钎焊/锡焊/铲齿/插片成型散热器(冷板散热器)	78—90	很高

5.6.3 自然冷却散热器的辐射换热考虑

5.6.3.1 如果物体表面的温度低于50℃, 可忽略颜色对辐射换热的影响。因为此时辐射波长相当长, 处于不可见的红外区。而在红外区, 一个良好的发射体也是一个良好的吸收体, 发射率和吸收率与物体表面的颜色无关。

5.6.3.2 如果物体表面的温度低于50℃, 可不考虑辐射换热的影响。

5.6.3.3 辐射换热面积计算时, 如表面积不规则, 应采用投影面积。即沿表面各部分绷紧绳子求得的就是这一投影面积, 如图9所示。辐射传热要求辐射表面必须彼此可见。

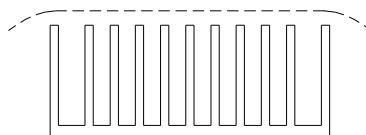


图9不规则表面的辐射投影面积

5.6.4 海拔高度对散热器的设计要求

对于自然对流, 其传热机理是由于冷却空气吸热后其密度减小, 迫使重力场中的空气上升而形成冷热空气的对流而产生热量传递。由于随着海拔高度的增加, 空气的密度逐渐减小, 空气上升的能力也就减少, 自然对流换热的能力减弱。自然对流换热能力的变化最终体现在对流换热系数的变化上, 根据美国斯坦伯格的经验公式, 如果忽略空气温度的变化, 可按(11)式计算海拔高度对自然对流的影响强弱。

$$hc_{(高空)} = hc_{(海平面)} (\rho_{高空} / \rho_{海平面})^{0.5} = hc_{(海平面)} (\rho_{高空} / \rho_{海平面})^{0.5} \dots\dots\dots (11)$$

$hc_{(高空)}$, $hc_{(海平面)}$ 一分别为高空及海平面的自然对流换热系数, W/m. k

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 25 页 共 80 页

$\rho_{\text{高空}}$, $\rho_{\text{海平面}}$ 分别为高空及海平面的空气密度, Kg/m²
 $P_{\text{高空}}$, $P_{\text{海平面}}$ 分别为高空及海平面的空气压力, 帕斯卡

5.6.5 散热器散热量计算的经验公式

按照表7的计算公式计算自然对流换热系数。

表7不同安装条件下的自然对流换热系数计算公式

	层流($10^4 < Ra < 10^9$)	紊流($Ra > 10^9$)	特征长度L
垂直安装	$h_c = 1.42(\Delta t/L)^{0.25}$	$h_c = 1.31(\Delta t/L)^{1/3}$	L=流向长度, m
水平安装热面朝上	$h_c = 1.32(\Delta t/L)^{0.25}$	$h_c = 1.43(\Delta t/L)^{1/3}$	$L = \frac{2(\text{长度} \times \text{宽度})}{\text{长度} + \text{宽度}}$
水平安装热面朝下	$h_c = 0.61(\Delta t/L)^{0.25}$		L= 长度+宽度

为了简化计算, 忽略散热器的导热热阻, 即假设模块的热量能够均匀传递到散热器的各表面, 此时计算出的散热量为模块的最大散热量:

$$Q = h_c \times F_{\text{对流}} \times \Delta t \times \eta \dots\dots\dots (12)$$

h_c -----自然对流换热系数, w/m².k

Δt ---散热器台面允许温升, °C

$F_{\text{对流}}$ ---对流表面积, m²

η ---散热器齿片效率(%)

对直齿肋:

$$\eta = th(mb) / (mb) \dots\dots\dots (12-1)$$

$$m = (2 h_c / \lambda \delta_0)^{0.5} \dots\dots\dots (12-1-1)$$

δ_0 : 肋片根部厚度(m)

b: 肋高(m)

λ : 导热系数, W/m.k

如果 $Q < [P_D]$, 表明散热器的设计不满足散热要求, 必须进行重新设计。

5.6.6 强化自然冷却散热效果的措施

5.6.6.1 尽可能增大散热面积, 增大散热面积的途径有三种:

- 加大散热器尺寸。
- 增加散热器的齿片数, 但不能太密。

5.6.6.2 散热器竖直放置, 散热齿槽与气流方向一致。

5.6.6.3 优化热源的排列方式, 使其长边与气流方向一致。

5.6.6.4 表面进行发黑处理。

6 产品的热测试

6.1 进行产品热测试的目的

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 26 页 共 80 页

6.1.1 热设计方案优化

对不同的方案进行比较, 确定较优的散热设计方案。

6.1.2 热设计验证

检验热设计的合理性与有效性, 验证产品的有关热设计指标是否满足产品的热设计验证判定标准。

6.2 热测试的种类及所用的仪器、设备

6.2.1 温度测试

6.2.1.1 温度测试的项目

- 设备内部环境温度
- 机箱表面温升 (自然对流换热时测量)
- 关键元器件和发热元器件的表面温升
- 散热器和冷板的热点温升
- 冷却空气入口温度与出口温升

6.2.1.2 温度测量仪器类型

温度测量仪器包括热电偶、玻璃温度计、示温漆和示温蜡、电阻温度计、热敏电阻、光学温度计、红外扫描系统等。

6.2.1.3 热电偶

6.2.1.3.1 热电偶的选择

热电偶的种类较多, 就通信设备来讲, 由于我们设备的温度一般低于 200°C 以下, 在该范围内铜-康铜或镍铬-铐铜热电偶具有较高的精度, 为K型热电偶, 其分度值应符合GB 2903和GB 4993的规定。热电偶的测试精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。

6.2.1.3.2 热电偶的焊接方法

通常采用熔焊的方法把铜-康铜或镍铬-铐铜焊接在一起, 不允许采用把铜-康铜丝直接绞在一起的方法。

6.2.1.3.3 热电偶的粘接方法及减小测量误差的措施

热电偶采用导热胶粘接粘贴在被测表面, 为了保证测试结果的精度, 热电偶探头固定在测温表面上时, 必须将一段热电偶导线沿测温表面的等温线布置, 这样可以消除热电偶导线本身导热而导致的测量误差。导线长度应大于 10mm , 如图10所示

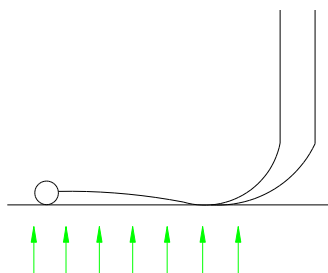


图10 热电偶与被测表面的接触形式

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 27 页 共 80 页

6.2.1.3.4 与热电偶配套的检测仪表

热电偶的温度检测通常采用多路采集器,如FLUKE公司的Hydra logger 及日本恒河公司的DR230系列等。测试精度为±0.1℃。

6.2.1.4 玻璃温度计

玻璃液体温度计通常用来测量流体温度和校准其它的测温仪器如热电偶等。玻璃温度计的精度可以达到±0.01℃。

6.2.1.5 示温漆与示温蜡

示温漆是一种随温度变化而变化的漆,漆的颜色变化达四种之多,不同的颜色代表不同的温度。示温漆还可以用于显示某个区域的温度场及热流模式。

示温蜡是在特定的温度下熔化的蜡状物质,从而显示出温度。

示温漆与示温蜡的精度较差,一般在±5℃(±9°F)

6.2.1.6 电阻温度计

电阻温度计与热电偶的原理及用途相似,两者均因辐射影响而产生误差。其精度为±0.1℃。

6.2.1.7 热敏电阻

热敏电阻遵循电阻测温学的原理,由于它的温度系数很大,所以灵敏度高得多,其缺点是容易老化,需进行定期校准,其测试精度为±0.1℃。

6.2.1.8 光学温度计、红外扫描系统等。

光学温度计、红外扫描系统均通过测量一个热源的红外辐射而得到温度。其测试精度最高可以达到±0.3℃。由于测量时必须准确知道被测表面的发射率且要求被测表面必须可见,限制了它们的使用。

7 附录

7.1 元器件的功耗计算方法

根据实际使用工况,诸如工作电流,导通压降等以及元器件的其它电气参数计算元器件实际的功耗大小。元器件的种类不同,其功耗计算方法也不一样,具体计算方法如下:

7.1.1 电阻

电阻的发热量由下式算得

$$P=I^2R$$

$$\text{或 } P=U^2/R \dots \dots \dots (13)$$

I—流过电流值(A); R—电阻值(Ω)

U—电阻两端的电压(V)

7.1.2 变压器

变压器的包括铜损和铁损两部分

$$P_b = P_w + P_c \dots \dots \dots (14)$$

铜损按下式计算:

$$P_w = 2 \times I_p \times N_p \times L_p \times R_z^{[2]} \dots \dots \dots (14a)$$

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 28 页 共 80 页

I_p -原边有效电流, A
 N_p -原边绕组的匝数, 匝
 L_p -每圈的平均长度, cm
 R_z -导线的阻抗, Ω/cm

铁损按下式计算:

$$P_c = P_v \times V_e^{[2]} \dots\dots\dots(14b)$$

P_v -单位体积的铁损, w/cm³
 V_e -铁芯体积, cm³

变压器的温升按下式计算:

$$\Delta t = 850P_b/A_s \dots\dots\dots(14c)$$

P_b -变压器的总损耗, w
 A_s -变压器的表面积, cm²

7.1.3 功率器件耗散功率计算

7.1.3.1 双极型晶体管(IGBT)

IGBT 的功耗损耗主要由通态损耗(饱和损耗或稳定损耗)及开关损耗两部分, 分别按下式计算:

通态损耗(饱和损耗或稳定损耗):

$$P_c = U_{CE} I_c \delta^{[3]} \dots\dots\dots(15a)$$

开关损耗:

$$P_s = (1/2) U_{CE0} I_c (t_{on} + t_{off}) f_s$$

$$= (E_{on} + E_{off}) f_s^{[3]} \dots\dots\dots(15b)$$

$$\text{总损耗: } P_d = P_c + P_s \dots\dots\dots(15)$$

式中: U_{CE} --通态集电极-发射极电压(V), 给定值

U_{CE0} --断态集电极-发射极电压(V), 给定值

I_c --通态电流(A), 给定值

δ --占空比, 给定值

E_{on}, E_{off} --开关能量(焦耳), 从器件数据手册中查出。

f_s --开关频率, 给定值

7.1.3.2 功率 MOSFET

MOSFET 的损耗包括开关损耗和通态损耗两部分

$$\text{通态功耗: } P_d = I_{DS}^2 R_{DS(ON)}^{[3]} \dots\dots\dots(16a)$$

I_{DS} --漏极电流, A, 给定值

$R_{DS(ON)}$ -MOSFET 在工作结温下的通态热阻, 可按直接下式计算, 也可以从器件数据手册中查。

$$R_{DS(ON)(T_j)} = R_o [1 + \alpha (T_j - 25^\circ)], \Omega, \text{ 通态电阻}$$

R_o --25°C时额定值, 给定值

α --温度系数, 一般为: 0.01

开关损耗:

$$\text{开通时损耗: } P_{ON} = I_{ce0} V_{ce} t_{off} f^{[2]} \dots\dots\dots(16b)$$

$$\text{开通过程损耗: } P_r = I_c V_{DS} t_r f / 6 = I_c^2 t_r t_r' f / 6C_{rSS}^{[2]} \dots\dots\dots(16c)$$

$$\text{关断时损耗 } P_{off} = I_c V_{ces} t_{on} f^{[2]} \dots\dots\dots(16d)$$

$$\text{关断过程损耗: } P_f = I_c V_{DS} t_f f / 6 = I_c^2 t_f t_f' f / 6C_{oss}^{[2]} \dots\dots\dots(16e)$$

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 29 页 共 80 页

式中: I_{ce0} —集电极与发射级间的穿透电流, A
 I_c —集电极电流, A
 V_{ce} —集电极与发射极间的电压, V
 V_{ce0} —饱和压降, V
 t_{on}, t_{off} —开通及关断时间, ns
 t_r, t_f — V_{ce} 的上升及下降时间, ns
 t_r', t_f' —驱动波形上升或下降时间, ns
 C_{rss}, C_{oss} —MOSFET 的输入与输出电容

MOSFET 的总损耗为:

$$P_{total} = P_d + P_{on} + P_{off} + P_r + P_f \dots \dots \dots (16)$$

7.1.3.3 DC-DC 开关变换器输出整流用功率二极管

功率二极管的损耗包括通态损耗及开关损耗两部分

通态损耗: $P_d = V_F I_F D^{[5]} \dots \dots \dots (17a)$

式中: V_F —正向导通压降, V
 I_F —正向平均电流, A
 D —占空比

开通损耗: $P_{on} = I_F V_{RFM} t_{rr} D f / 1000^{[5]} \dots \dots \dots (17b)$

V_{RFM} —正向恢复电压, V
 t_{rr} —反向恢复时间, ns
 f —工作频率, KHZ

关断损耗: $P_{off} = I_{RM} K_f V_R t_{rr} D f / 2000^{[5]} \dots \dots \dots (17c)$

I_{RM} —反向漏电流, A
 K_f —比例系数
 V_R —稳态反向电压, V

总功耗 $= P_d + P_{on} + P_{off} \dots \dots \dots (17)$

7.2 散热器的设计计算方法

根据给定的结构尺寸,遵照散热器的设计原则初步设计出一种散热器,在按以下步骤进行校核计算。

6.2.1 散热器的热阻

散热器的热阻是从大的方面包括三个部分。

$$R_{SA} = R_{对} + R_{导} + R_{辐} \dots \dots \dots (18)$$

$$R_{对} = 1 / (\alpha F1) \dots \dots \dots (19)$$

$F1$ —对流换热面积(m)

α —对流换热系数,按下表计算

	层流 ($10^4 < R_a < 10^9$)	紊流 ($R_a > 10^9$)
竖平板及竖圆柱体	$\alpha = 1.42(\Delta T/L)^{0.25}$	$\alpha = 1.31(\Delta T/L)^{1/3}$
水平圆柱体	$\alpha = 1.32(\Delta T/L)^{0.25}$	$\alpha = 1.24(\Delta T/L)^{1/3}$

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 30 页 共 80 页

水平板热面朝上	$\alpha = 1.32(\Delta T/L)^{0.25}$	$\alpha = 1.43(\Delta T/L)^{1/3}$
水平板热面朝下	$\alpha = 0.61(\Delta T/L)^{0.25}$	

ΔT --散热片与环境温度之差

L-- 高(m)

$$R_{\text{导}} = R_{\text{基板}} + R_{\text{肋导}}$$

$$= \delta / (\lambda F_2) + ((1/\eta) - 1) R_{\text{对流}} \dots \dots \dots (20)$$

λ -- 导热系数, w/m.h. °C

δ -- 散热器基板厚度(m)

F_2 --基板的导热面积(m)

$$F_2 = 0.785 * (d + \delta)^2$$

d- 发热器件的当量直径 (m)

η -- 肋效率系数

对直齿肋:

$$\eta = th(mb) / (mb)$$

$$m = (2\alpha / \lambda \delta_0)$$

α : 对流换热系数(w/m².K)

λ . 导热系数(W/m.K)

δ_0 . 肋片根部厚度(m)

b. 肋高(m)

$$R_{SA} = \delta / (\lambda F_2) + 1 / (\alpha F_1 \eta) \dots \dots \dots (21)$$

比较 $R_{sa} \leq [R_{sa}]$, 如不满足, 重新进行设计散热器形状, 重复上面的步骤进行设计, 直到符合要求为止。

7.3 自然冷却产品热设计检查模板

7.3.1 元器件的选择、排列与安装时的热设计

- 是否了解元器件的热阻及极限结温?
- 是否了解元器件的安装力矩及接触热阻?
- 是否分清了热敏感元器件?
- 是否分清了发热量大的元器件?

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 31 页 共 80 页

- 热敏感元器件与发热量大的元器件排列安装是否合适?
- 发热量大的元器件是否采用了散热器进行冷却?
- 散热器选用是否合适? 设计是否合理? 是否考虑了表面发黑?
- 发热元器件的引线应尽量短, 印制线应加宽。
- 接近发热元器件的树脂、线材等的耐热是否充分?
- 由于热引起的尺寸变化是否作了考虑?
- 元器件的排列是否考虑了烟囱效应?
- 元器件的安装方向是否最优?

7.3.2 PCB 板的排列、安装时的热设计

- PCB 板的排列是否考虑了热? (发热量大的 PCB 不能紧挨排列)
- PCB 板是否垂直安装? 排列的距离是否合适?
- PCB 板的位置是否阻塞风道?
- 是否积极利用了烟囱效应?

7.3.3 模块机箱的热设计

- 机箱的设计是否考虑了热? 选材利于散热吗?
- 机箱的上下面是否开有通风口?
- 通风口大小是否合适?
- 机箱内的流路是否通畅?
- 散热器的安装位置是否符合烟囱效应?

6.3.4 机柜的热设计

- 机柜的选材是否有利于散热?
- 机柜是否开有通风口?
- 通风口的大小合适吗?
- 是否考虑了模块间的热影响?
- 机柜的风路结构是否合理? (机柜带风道还是不带风道?)
- 是否充分利用了烟囱效应?

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 32 页 共 80 页

电子设备的强迫风冷热设计规范

2004/05/01 发布

2004/05/01 实施

艾默生网络能源有限公司

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 34 页 共 80 页

目录

目录.....	34
前言.....	36
1 目的.....	37
2 适用范围.....	37
3 关键术语.....	37
4 引用/参考标准或资料.....	39
5 规范内容.....	39
5.1 遵循的原则.....	39
5.2 产品热设计要求.....	40
5.2.1 产品的热设计指标.....	40
5.2.2 元器件的热设计指标.....	40
5.3 系统的热设计.....	40
5.3.1 常见系统的风道结构.....	40
5.3.2 系统通风面积的计算.....	47
5.3.3 系统前门及防尘网对系统散热的影响.....	48
5.4 模块级的热设计.....	48
5.4.1 模块损耗的计算方法.....	48
5.4.2 机箱的热设计.....	48
5.4.2.1 机箱的选材.....	48
5.4.2.2 模块的通风面积.....	48
5.4.2.3 机箱的表面处理.....	49
5.5 单板级的热设计.....	49
5.5.1 选择功率器件时的热设计原则.....	49
5.5.2 元器件布局的热设计原则.....	49
5.5.3 元器件的安装.....	50
5.5.4 导热介质的选取原则.....	50
5.5.5 PCB 板的热设计原则.....	51
5.5.6 安装 PCB 板的热设计原则.....	53
5.5.7 元器件结温的计算.....	53
5.6 散热器的选择与设计.....	56
5.6.1 散热器需采用的强迫冷却方式的判别.....	56
5.6.2 强迫风冷散热器的设计要点.....	57
5.6.3 风冷散热器的辐射换热考虑.....	59
5.6.4 海拔高度对散热器的设计要求.....	59
5.6.5 散热器散热量计算的公式.....	59
5.6.6 强化散热器散热效果的措施.....	60
5.7 风扇的选择与安装的热设计原则.....	60
5.7.1 多个风扇的安装位置.....	60
5.7.2 风扇与最近障碍物间的距离要求.....	60
5.7.3 消除风扇 SWIRL 影响的措施.....	61

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 35 页 共 80 页

5.7.4 抽风条件下对风扇选型的限制.....	62
5.7.5 降低风扇噪音的原则.....	62
5.7.6 解决海拔高度对风扇性能影响的措施.....	63
5.7.7 确定风扇型号的方法.....	64
5.7.8 吹风与抽风方式的选择原则.....	64
5.7.9 延长风扇寿命与降低风扇噪音的措施.....	65
5.7.10 风扇的串列与并联.....	65
5.8 防尘对产品散热的影响.....	68
5.8.1 抽风方式的防尘措施.....	68
5.8.2 吹风方式下的防尘措施.....	68
5.8.3 防尘网的选择方法.....	68
6 产品的热测试.....	69
6.1 进行产品热测试的目的.....	69
6.2 热测试的种类及所用的仪器、设备.....	69
6.2.1 温度测试.....	69
6.2.2 速度测量.....	70
6.2.3 流体压力的测量.....	71
7 附录.....	73
7.1 元器件的功耗计算方法.....	73
7.2 散热器的设计计算方法.....	75
7.3 冷板散热器的计算方法.....	76
7.4 强迫风冷产品的热设计检查模板.....	79

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 36 页 共 80 页

前言

本规范由艾默生网络能源有限公司研发部发布实施，适用于本公司的产品设计开发及相关活动。本规范替代以前公司的同名规范，老版本同名规范一律废除。本规范更换了新的模板，并根据公司产品开发需求的变化及已积累的设计经验增加了新的内容。本规范由我司所有的产品开发部门遵照执行。

本规范于 2004/05/01 批准发布；

本规范拟制部门: 结构设计中心；

本规范拟制人: 李泉明；

审核人: 张士杰；

本规范标准化审查人: 数据管理中心；

本规范批准人: 研发管理办；

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 37 页 共 80 页

1 目的

建立一个电子设备在强迫风冷条件下的热设计规范，以保证设备内部的各个元器件如开关管、整流管、IPM 模块、整流桥模块、变压器、滤波电感等的工作温度在规定的范围内，从而保证电子设备在设定的环境条件下稳定、安全、可靠的运行。

2 适用范围

本热设计规范适用于强迫风冷电子设备设计与开发，主要应用于以下几个方面：

- 机壳的选材
- 结构与布局
- 器件的选择
- 散热器的设计与选用
- 通风口的设计、风路设计
- 热路设计
- 选择风扇

3 关键术语

3.1 热环境

设备或元器件的表面温度、外形及黑度，周围流体的种类、温度、压力及速度，每一个元器件的传热通路等情况

3.2 热特性

设备或元器件温升随热环境变化的特性，包括温度、压力和流量分布特征。

3.3 导热系数 (λ w/m.k)

表征材料热传导性能的参数指标，它表明单位时间、单位面积、负的温度梯度下的导热热量。

3.4 对流换热系数 (α w/m².k)

对流换热系数反映了两种介质间对流换热过程的强弱，表明了当流体与壁面间的温差为 1℃ 时，在单位时间通过单位面积的热量。

3.5 热阻 (℃/w)

反映介质或介质间传热能力的大小，表明了 1W 热量所引起的温升大小。

3.6 流阻 (Pa)

流阻反映了流体流过某一通道时所产生的压力差。

3.7 雷诺数 (R_e)

雷诺数的大小反映了流体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。

3.8 普朗特数 (P_r)

普朗特数是说明流体物理性质对换热影响的相似准则。

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 38 页 共 80 页

3.9 格拉晓夫数 (G_r)

格拉晓夫数反映了流体所受的浮升力与粘滞力的相对大小，是说明自然对流换热强度的一个相似准则。

3.10 定性温度

确定对流换热过程中流体物理性质参数的温度。

3.11 肋片的效率

表示某扩展表面单位面积所能传递的热量与同样条件下光壁所能传递的热量之比。

3.12 黑度

实际物体的辐射力和同温度下黑体的辐射力之比，它取决于物体种类、表面状况、表面温度及表面颜色。

3.13 努谢尔特数 N_u (Nusselt1)

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。

3.14 传热单元数 NTU

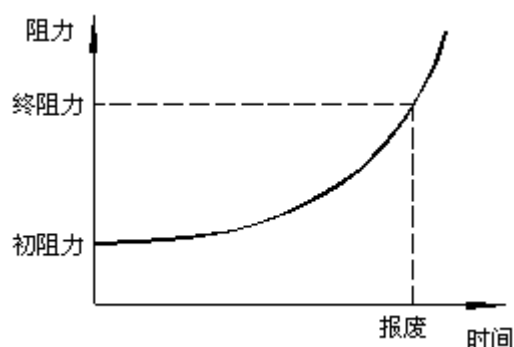
为无因次量，其数值反映了在给定条件下所需传热面积的大小，是一个反映冷板散热器综合技术经济性能的指标。

3.15 冷板的传热有效度 E

衡量冷板散热器在传递热量方面接近于理想传热状况的程度，它定义为冷板散热器的实际传热量和理论传热量之比，为无因次量

3.16 防尘网的阻力

防尘网对气流形成阻力。防尘网积灰，阻力增加，当阻力增大到某一规定值时，过滤器报废。新防尘网的阻力称“初阻力”；对应防尘网报废的阻力值称“终阻力”。设计时，常需要一个有代表性的阻力值，以核算系统的设计风量，这一阻力值称“设计阻力，惯用的方法是取初阻力与终阻力的平均值。



3.17 外部环境温度的定义

自冷时指距设备各主要表面80mm处的温度平均值；强迫风冷（使用风扇）时指距离空气入口80~200mm截面的温度平均值。

3.18 机箱表面的温度定义

机箱表面温度指在机箱各表面几何中心处的温度。

3.19 设备风道的进、出口风温的定义

冷却空气入口、出口温度指在入口或出口处与风速方向垂直的截面内各点温度的平均值。

3.20 冷板散热器

指采用真空钎焊、锡焊、铲齿或插片工艺成型的齿间距较密，宽高比较大的散热器。

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 39 页 共 80 页

4 引用/参考标准或资料

下列标准包含的条文，通过在本标准中引用而构成本标准的条文。在标准出版时，所示版本均为有效。所有标准都会被修订，使用本标准的各方应探讨使用下列标准最新版本的可能性。

GBxxxxx-89 电力半导体器件用散热器使用导则
 GB11456-89 电力半导体器件用型材散热器技术条件
 GJB/Z27-92 国家军用标准汇编, 电子设备可靠性设计手册
 GB/T 12992-91 电子设备强迫风冷热特性测试方法
 GB/T 12993-91 电子设备热性能评定
 电子设备结构设计标准手册
 TS-S0E0199001 电子设备的强迫风冷热设计规范
 分散式散热产品的热设计规范

5 规范内容

5.1 遵循的原则

- 5.1.1 进行产品的热设计应与电气设计、结构设计同时进行，平衡热设计、结构设计、电气设计各种需求。
- 5.1.2 热设计应遵循相应的国际、国内标准、行业标准、公司标准。
- 5.1.3 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正常工作，并保证达到设定的 MTBF 指标。
- 5.1.4 各个元器件的参数选择、安装位置与方式必须符合散热要求。
 - 5.1.4.1 元器件的发热表面与散热表面之间的接触热阻应尽可能小。
 - 5.1.4.2 根据元器件的损耗大小及温升要求确定是否加装散热器。
 - 5.1.4.3 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。
- 5.1.5 模块的控制回路中尽可能加装温度继电器、压力继电器等热保护回路以及风速调节回路，以提高系统的可靠性。
- 5.1.6 在进行热设计时，应考虑相应的设计冗余，以避免在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。
- 5.1.7 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。
- 5.1.8 冷却系统要便于测试与维护。
- 5.1.9 采用强迫风冷的条件：在常压下，强迫风冷的应用范围为 0.04-0.31w/cm²，小于 0.04w/cm²采用自然冷却，大于 0.31 w/cm²须采用水冷或其它表面冷却。

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 40 页 共 80 页

5.2 产品热设计要求

5.2.1 产品的热设计指标

- 5.2.1.1 散热器的表面温度最高处的温升应小于 45℃.
- 5.2.1.2 模块内部空气的平均温升应小于20℃。

5.2.2 元器件的热设计指标

元器件的热设计指标应符合TS-S0A0204001《器件应力降额规范》，具体指标如下：

- 5.2.2.1 功率器件的工作结温应小于最大结温的(0.5-0.8)倍
 - 对额定结温为 175℃的功率器件，工作结温小于 140℃.
 - 对额定结温为 150℃的功率器件，工作结温小于 120℃.
 - 对额定结温为 125℃的功率器件，工作结温小于 100℃.
- 5.2.2.2 碳膜电阻 120℃
 - 金属膜电阻 100℃
 - 压制线绕电阻 150℃
 - 涂剥线绕电阻 225℃
- 5.2.2.3 变压器、扼流圈表面温度
 - A 级 90℃
 - B 级 110℃
 - F 级 150℃
 - H 级 180℃
- 5.2.2.4 电容器的表面温度
 - 纸质电容器 75-85℃
 - 电解电容器 65-80℃
 - 薄膜电容器 75-85℃
 - 云母电容器 75-85℃
 - 陶瓷电容器 75-85℃

5.3 系统的热设计

5.3.1 常见系统的风道结构

- 5.3.1.1 系统风道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。

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 41 页 共 80 页

- 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。

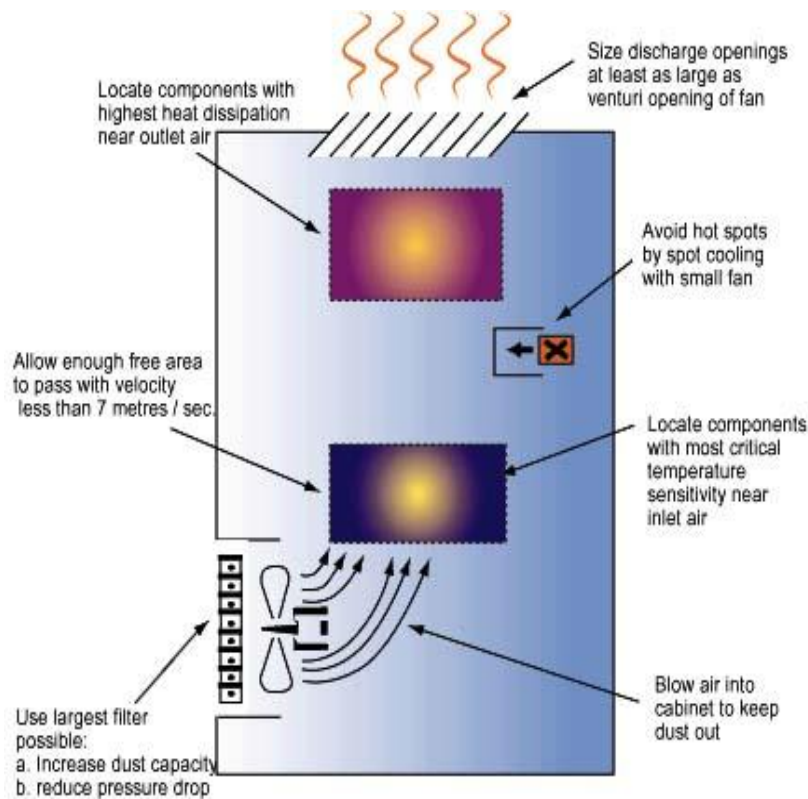


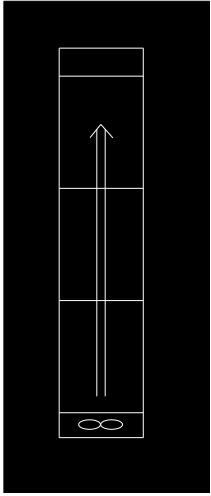
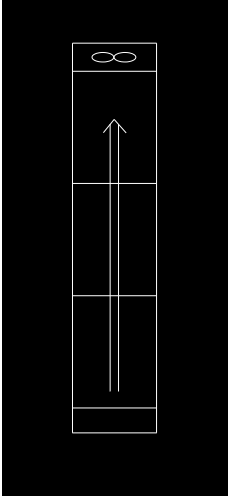
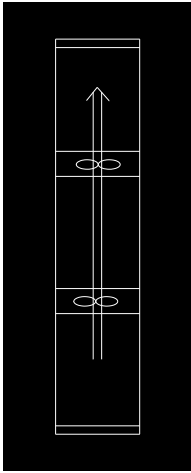
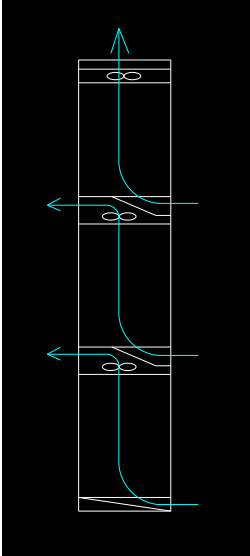
图 1 系统布局要点示意图

- 为避免上游的热量回流到下游，影响其散热，可以采用独立风道，分开散热。
- 风道设计应保证系统各个区域散热均匀，避免在回流区和低速区产生热点。
- 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。
- 最大损耗的元器件应靠近出风口。
- 保证进、出风口面积大于风扇的通风面积。
- 保证空气流通并能够以较大的风速流过较热的区域。
- 避免在两个热点之间用一个小风扇来冷却。
- 温度敏感的元器件应尽量靠近风扇入口。
- 尽可能采用吹风以防止灰尘聚积。
- 尽可能采用空隙率较大的防尘网以减小阻力。
- 高热器件的位置要求

如果不能消除SWIRL的影响，即无法保证流出风扇框的流场是近似均匀的流场，则必须避免布置高热器件在流场的旋涡区域，因为该区域风速最小。

5.3.1.2 一些典型的风道结构

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 42 页 共 80 页

 <p style="text-align: center;">风道1</p>	 <p style="text-align: center;">风道2</p>
<p>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。靠近风扇的区域换热效果最佳，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，所以上区域的风速相对较低，换热比较弱，而且下面区域的热量将带入上插框。</p> <p>由于机柜内为正压，灰尘不会从缝隙进入机柜。</p>	<p>最简单的抽风风道，由机柜底部进风。流场分布均匀，各区域换热强度相差不大。但如果风道中有较大的缝隙，则会形成气流部分短路，下面区域的通风量将大大降低。下面区域的热量依然被带入上面的区域。机柜内为负压，灰尘将通过缝隙进入机柜。</p>
 <p style="text-align: center;">风道3</p>	 <p style="text-align: center;">风道4</p>
<p>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</p>	<p>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</p>

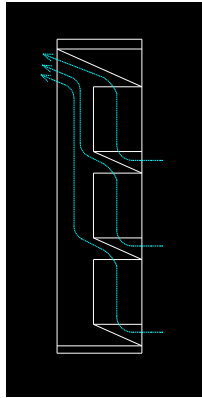
结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 43 页 共 80 页

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。

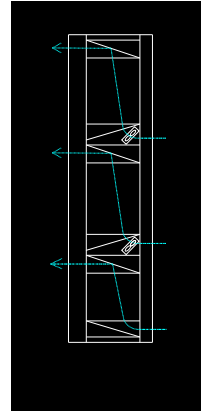
风扇也可分别置于机柜的顶部和底部, 但噪音将比置于插框间大。

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。



风道5



风道6

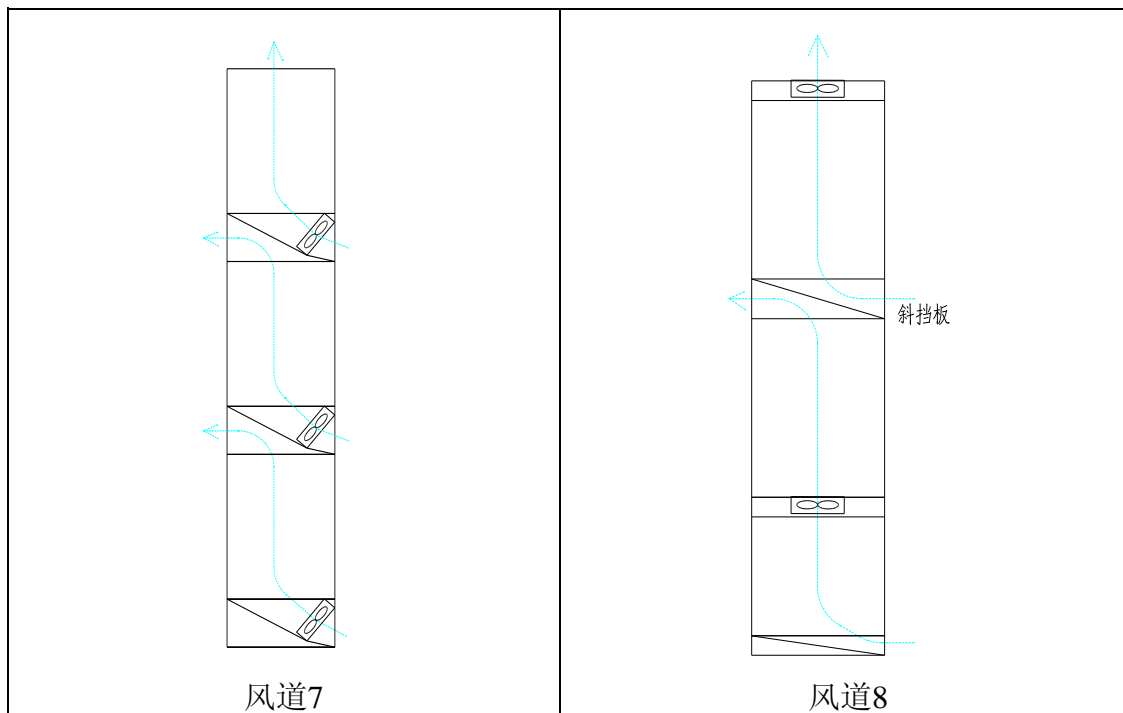
自然对流独立散热风道, 与风道4类似, 无风扇, 机柜出风口在后门的顶部。插框进出风口的大小根据发热量和插框高度而定。机柜后面的风道要求有足够的宽度, 根据具体设计而定。

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。

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。

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 44 页 共 80 页

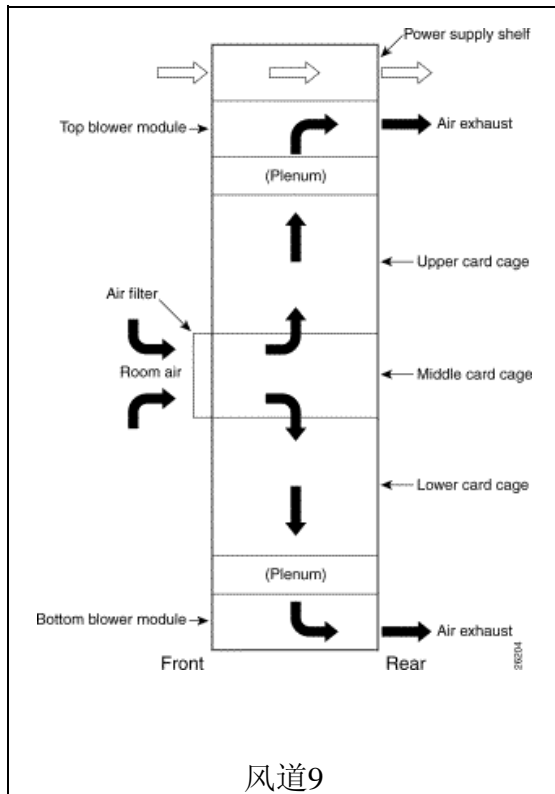


为风道6的改进版, 将风扇框与出风口作为一体, 可节省高度空间, 斜板还有导风作用。注意对于常用的直径120的风扇, 标准风扇框的高度将达3U, 比风道4中的一体化风扇框高1U, 但局部散热效果应比风道4的情况好, 适用于散热元器件比较集中且分布在风量集中区域的情况。风扇也可平放, 高度可降低为2U, 但噪音与进风会受一定影响。

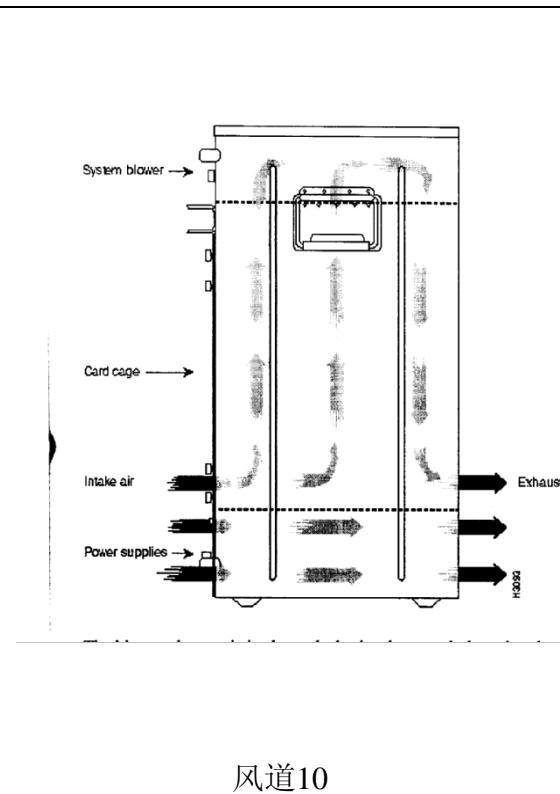
利用斜挡板将上下风道分为两个部分独立散热, 由于风扇进出风口没有受到直接阻挡, 其风阻将比风道4、7的情况要小, 而且插框的流场均匀, 无回流低速区。可根据风阻情况增加风扇框。

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。

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 45 页 共 80 页

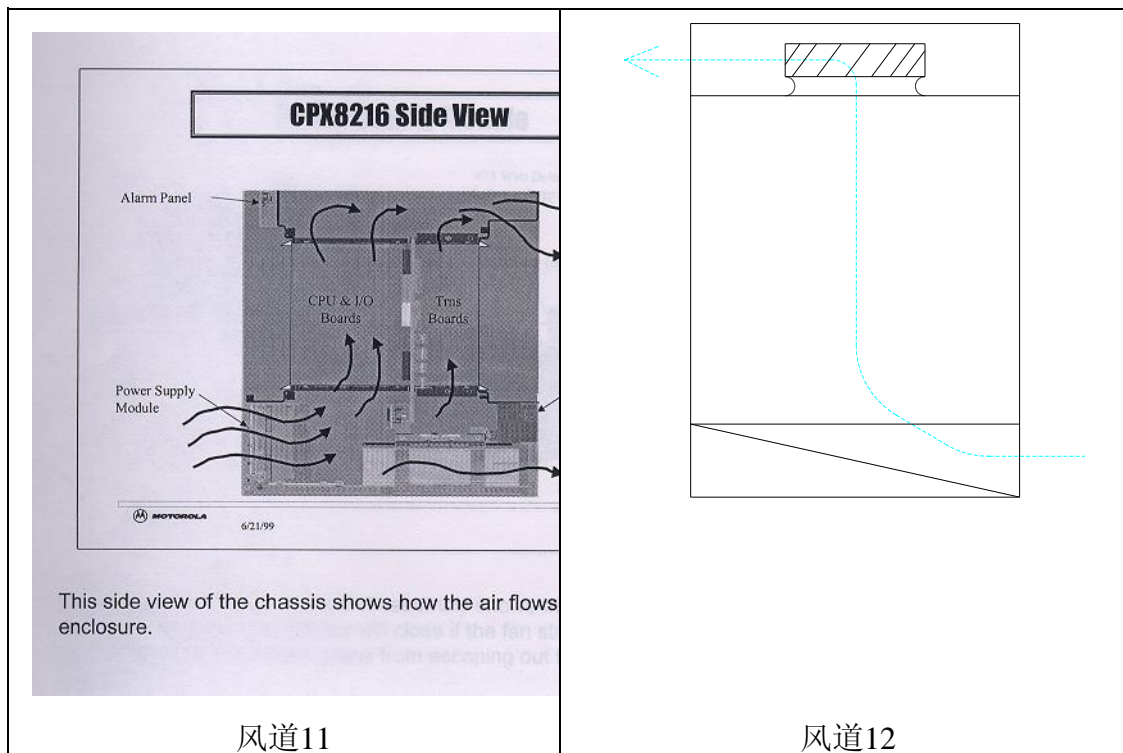


此为CISCO 12016的系统风道设计。顶框为电源框，自带风扇前后通风。下面有三个插框，风道的顶部与底部各有一个风扇框，采用离心风扇后排风，风扇的进风口前有一定高度的静压腔使各单板送风均匀。由中间插框的前面板进风，装有防尘网。这种风道将上下框的散热量分开，避免了热量的叠加，直接利用插框高度作为进风口，节省了机柜的高度空间。



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。

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 46 页 共 80 页

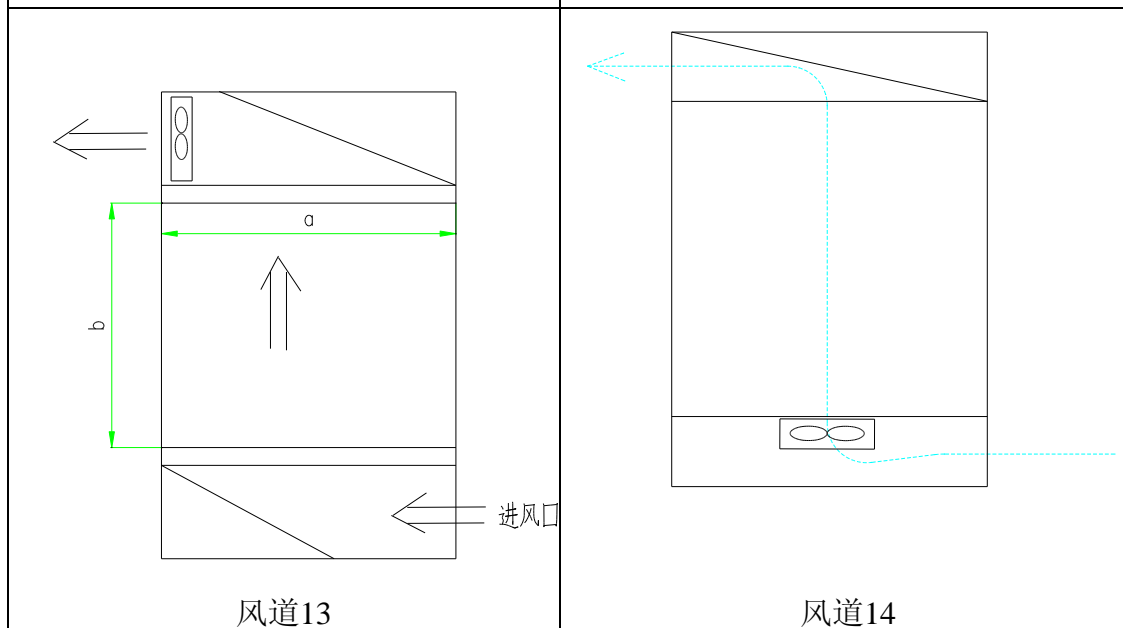


风道11

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，但风扇模块将

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风时高，

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 47 页 共 80 页

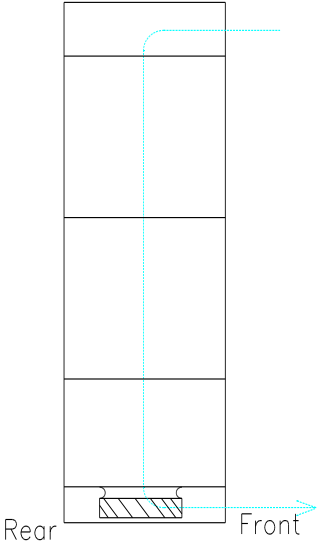
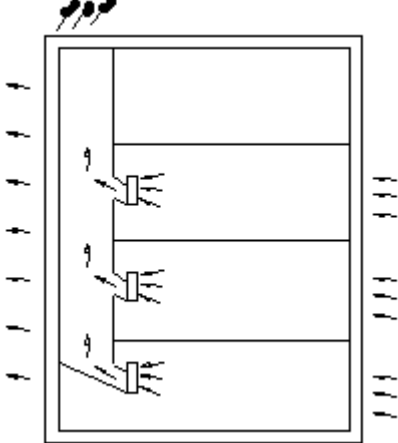
<p>占用较大高度空间。如果机箱高度有限制,可将风扇平放,但风扇出风口上方还是得留有一定出风空间,至少40mm,如风道4中的风扇框一样,这种方式风阻较大,对风量有一定影响,需要采用较大尺寸风扇。</p>	<p>但送风不均匀,在风扇中心和风扇之间都存在回流死区,要警惕这些死区的存在,将发热芯片布置在气流集中的地方。将风扇出风口和单板保持50mm的距离,可使流场均匀,但将增加高度空间。另外,风扇的进风口距离底板较近,会产生较大噪音,进风也受障碍,所以应尽量加大距离,距下壁面至少40mm。</p>
 <p style="text-align: center;">风道15</p>	 <p style="text-align: center;">风道16</p>
<p>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。</p>	<p>风道16为我司典型的模块风冷、机柜自冷的电源系统风道结构,采用并联风道,每一个单元都进行单独通风冷却,单元通风可以是吹风或抽风。如果没有前维护的需求,系统的出风口可以在后门板上,位置最好直对风扇,顶部可以密封;如果有前维护的需求,后门板不能出风,则需利用系统的“烟囱”效应,从顶部出风。</p> <p>如果系统有门,系统的进风口必须正对模块,其通风面积按5.3.2计算。</p> <p>如果系统有前维护的要求,需采用顶部出风的风道结构,系统其它部分的密封是必须的,以防止风道短路及对上层配电元器件的影响。</p>

图2 典型系统风道结构示意图

5.3.2 系统通风面积的计算

通风口的面积大小应为: $S = (1.5 - 2.0) (N \times S_{\text{模块}}) \dots \dots \dots (1)$

$S_{\text{模块}}$ --- 系统通风面积, m^2

N --- 每层模块的总数

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 48 页 共 80 页

$S_{\text{模块}}$ ——每一个模块的通风面积, m^2

5.3.3 系统前门及防尘网对系统散热的影响

如果前门的进风口位置满足要求, 并且进风面积足够, 一般来讲, 开门与关门有约2-5℃差异。

如果需在系统上加防尘网, 即使采用粗效的防尘网, 也将带来5-10℃的差异。

5.4 模块级的热设计

5.4.1 模块损耗的计算方法

模块的损耗可由下式计算.

$$P_{\text{diss}}=(1/\eta -1)P_{\text{out}} \dots\dots\dots(2)$$

P_{diss} -- 模块的损耗, W
 P_{out} -- 模块的输出功率, W
 η -- 模块的效率

功率损耗 P_{diss} 是由于发热器件的发热而引起的, 这些发热器件包括开关管 (MOSFET, IGBT), 整流管 (整流二极管及 FRED), 滤波电感, 变压器以及开关管的驱动等。

5.4.2 机箱的热设计

5.4.2.1 机箱的选材

如果需利用模块的机箱作为散热器, 则模块机箱必须选用铝合金材料, 且模块内壁不得进行拉丝处理, 材料的厚度不得低于 1.5mm。

如果不利用机箱进行散热, 则模块机箱选材不受限制。

5.4.2.2 模块的通风面积

5.4.2.2.1 风扇侧的通风面积

无论是抽风还是吹风方式, 安装风扇侧的通风面积即为风扇的流通面积, 按下式计算:

$$S=K \times 0.785(D_{\text{out}}^2 - D_{\text{HUB}}^2) \dots\dots\dots(3)$$

S —风扇侧机箱的通风面积, m^2
 k —冗余系数, 取1.1-1.2
 D_{out} —风扇框的内直径, m
 D_{HUB} —风扇中心HUB的直径, m

5.4.2.2.2 非风扇侧的通风面积

如果抽风风扇, 非风扇侧的通风面积大于等于风扇侧的通风面积。

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 49 页 共 80 页

如果吹风风扇, 考虑到空气受热体积膨胀的因素, 非风扇侧的通风面积 $= (1.5-2.0) \times$ 风扇侧的通风面积。

5.4.2.3 机箱的表面处理

从热设计角度, 无论机箱还是散热器, 不推荐表面进行任何处理, 额外的表面处理对散热贡献较小, 却增加了产品成本。

5.5 单板级的热设计

5.5.1 选择功率器件时的热设计原则

5.5.1.1 在其它性能参数相同的情况下, 应优先选用允许结温 T_j 高的功率器件 (根据供应商手册提供的数据进行筛选)。

5.5.1.2 在其它性能参数相同的情况下, 应优先选用结壳热阻 R_{jc} 较小的功率器件 (根据供应商手册提供的数据进行筛选)。

5.5.1.3 在其它性能参数相同的情况下, 优先选用封装尺寸较大的功率器件 (根据供应商手册提供的数据进行筛选), 以减小器件与散热器间的接触热阻 R_{cs} 。

5.5.1.4 对于 MOSFET 器件, 在结壳热阻 R_{jc} 相近的条件下, 应优先选用 25°C 下 $R_{D(on)}$ 较小的器件。

5.5.1.5 对于 IGBT 器件, 在结壳热阻 R_{jc} 相近的条件下, 应优先选用相同门极电阻下开关能量较小的器件。

5.5.2 元器件布局的热设计原则

5.5.2.1 一般性原则, 如图3所示

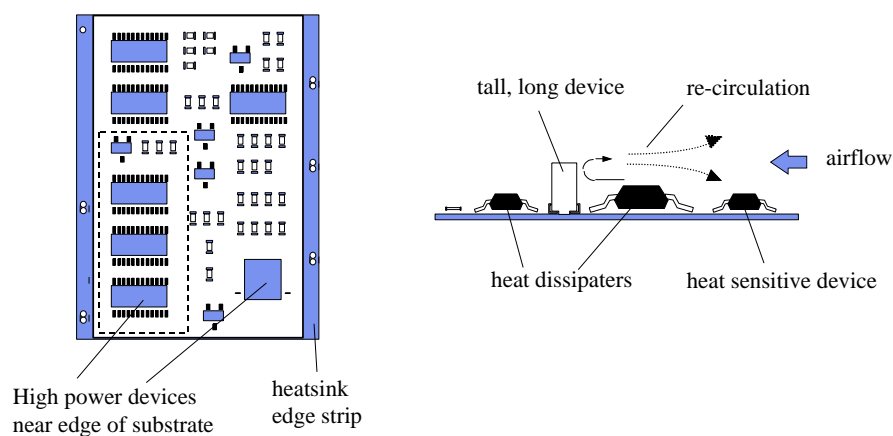


图3 元器件布局原则示意图

- 最大损耗的元器件应靠近 PCB 边缘。
- 保证空气流通并能够以较大的风速流过较热的区域。

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 50 页 共 80 页

- 温度敏感的元器件应尽量靠近进风口。
- 高、大的元器件如电磁元件、电容等不能够对气流形成阻挡。
- 如果不能消除 SWIRL 的影响，即无法保证流出风扇框的流场是近似均匀的流场，则必须避免布置高热器件在流场的旋涡区域，因为该区域风速最小。
- 散热器的安装方向：要保证散热器齿槽方向与风向平行
- 散热器周围与其它元器件的距离推荐小于10mm。

5.5.3 元器件的安装

元器件的安装应尽量减少元器件壳与散热器表面间的热阻，即接触热阻。

5.5.3.1 为尽量减小传导热阻，应采用短通路，即尽可能避免采用导热板或散热块把元器件的热量引到散热器表面，而元器件直接贴在散热器表面则是最经济、最可靠、最有效的散热措施。

5.5.3.2 为了改善器件与散热器接触面的状况，应在接触面涂导热介质，常用的导热介质有导热脂、导热胶、导热硅油、热绝缘胶等。

5.5.3.3 对器件须与散热器绝缘的情况，采用的绝缘材料应同时具有良好的导热性能，且能够承受一定的压力而不被刺穿，详见 5.5.4。

5.5.3.4 把器件装配在散热器上时，应严格按照我司 [TS-SOE0102012](#)《大功率管安装设计工艺规范》中提供的安装压力或力矩进行装配，压力不足会使接触热阻增加，压力过大会损坏器件，。

5.5.3.5 将大功率混合微型电路芯片安装在比芯片面积大的钼片上。

5.5.3.6 对于多层印制线路板，应利用电镀通孔来减少通过线路板的传导热电阻。这些小孔就是热通路或称热道。

5.5.3.7 当利用接触界面导热时，采用下列措施使接触热阻减到最小。

5.5.3.7.1 尽可能增大接触面积。

5.5.3.7.2 确保接触表面平滑。

5.5.3.7.3 利用软材料接触。

5.5.3.7.4 扭紧所有螺栓以加大接触压力(注意不应残留过大应力)。

5.5.3.7.5 利用合理的紧固件设计来保证接触压力均匀。

5.5.4 导热介质的选取原则

为了解决功率器件与散热器间的电气绝缘问题，功率器件与散热器间应加导热绝缘材料，考虑到性价比，在散热条件不是很恶劣，如功率器件损耗较小或功率器件处于有利的通风位置时，可选用通用的导热绝缘材料SP400，其它条件下可选用散热性能较好的SP900S，只有在特殊情况下，才允许选用SP2000。其性能参数如表1所示

表1 常用热界面材料性能参数表

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 51 页 共 80 页

材料	Sil-pad2000	Sil-pad900S	Sil-pad400	陶瓷基片
材料厚度(mm)	0.25±0.025	0.23±0.025	0.23±0.025	0.63±0.025
导热系数W/m.k	3.5	1.6	0.9	27
单位面积热阻 °C-cm ² /W	1.29	2.6	4.6	1.2
使用温度°C	-60~180°C	-60~180°C	-60~180°C	-60~180°C
材料构成	硅橡胶/玻璃纤维	硅橡胶/玻璃纤维	硅橡胶/聚脂薄膜	陶瓷+三氧化二铝
实测热阻值	<0.4	<0.6	<0.9	<0.35

实测热阻值是在采用 T0-247 封装, 在紧固压力为 12Kg. cm 下测得的。

- 5.5.4.1 由于陶瓷基片在安装时容易碎裂, 所以不推荐使用陶瓷基片。
- 5.5.4.2 对于输出部分, 由于总是处于出风口的位置, 一方面通过其功率管表面及散热器表面的风均为热风, 另外输出二极管部分后面总会有输出共模电感或差模电感之类的体积较大的器件, 影响出风, 所以该部分的散热条件总是比较恶劣, 为了减小散热器的压力, 可考虑采用散热器悬浮的方法去掉功率管与散热器间的导热绝缘膜, 使功率管直接贴在散热器上。
- 5.5.4.3 为了便于安装, 导热绝缘膜可考虑选用单面背胶的方法解决导热绝缘膜的定位问题, 即先将导热绝缘膜粘在安装位置, 再进行功率管的安装与紧固。但必须注意, 导热绝缘膜背胶会增加其热阻, 由于胶不是良好的导热介质, 一般情况下, 热阻会增加 30-40%, 所以, 在设计时需考虑该部分的冗余。
- 5.5.4.4 我司推荐的大部分导热绝缘材料均采用硅橡胶为基体, 质地较软, 因此, 在安装时不需要涂硅脂; 只有少数材料如 SP400、SPK10、陶瓷基片等质地比较硬的材料必须涂硅脂, 要求硅脂必须涂敷均匀, 硅脂层厚度小于 0.15mm。

5.5.5 PCB 板的热设计原则

PCB 板热设计的主要任务是有效地把印制板上的热引导到外部(散热器和大气中)。

5.5.5.1 印制线的载流容量和温升

设计印制板时要保证印制线的载流容量, 印制线的宽度必须适于电流的传导, 不能引起超过允许的温升和压降。

在实际应用中, 常有较大电流流过输出端铜箔, 如果输出铜箔设计的过细, 则会导致铜箔的温度上升。印制电路板的材料、导电铜箔的厚度、容许温升将影响到铜箔厚度应该多宽、能承受多大电流。一般对 1 盎司的环氧玻璃板, 如果允许温升小于 10°C (考虑到系统内部的环境温度可能超过 70°C), 则一般可按 1A 电流取 1mm 宽铜箔的经验数据进行铜箔设计。如假如流过的电流为 5A, 对 1 盎司的环氧玻璃板, 其铜箔宽度可取 5mm。实际可按照容许温升的大小按照图 4 进行选择。

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 52 页 共 80 页

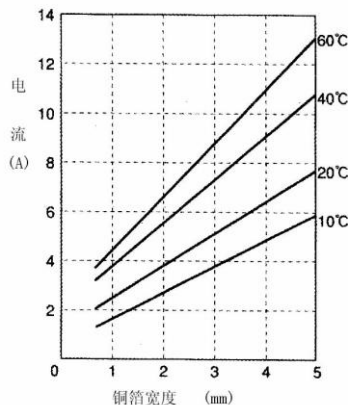


图4 1盎司环氧玻璃板电流与铜箔宽度的关系图,

需提醒的是,不同的基板材料生产厂家,不同的基板材料,则图12显示的电流与铜箔的关系是不相同的。可通过实验进行确定。

5.5.2 印制板的散热

5.5.2.1 选用厚度大的印制线,以利于印制线的导热和自然对流散热。

5.5.2.2 减小元器件引线腿及元器件引线间的热阻,增强元器件引线腿对印制线的热传导,增强导电性。

5.5.2.3 当元器件的发热密度超过 $0.6W/cm^3$,单靠元器件的引线腿及元器件本身不足充分散热,应采用散热网、汇流条等措施。

5.5.2.4 若发热密度非常高,则元器件应安装散热器,在元器件和散热材料之间应涂抹导热膏。

5.5.2.5 以上措施仍不能充分散热时,就应采用热传导性能好的印制板,如金属基底印制板和陶瓷基底(高铝陶瓷、氧化砖陶瓷、冻石陶瓷)印制板。

5.5.2.6 对塑封器件和 SMD 封装的元器件,通过管脚散热成为主要的散热器途径之一,其热设计应满足以下原则:

- 加散热铜箔和采用大面积电源地铜箔,以加大 PCB 的散热面积,如图 5 所示

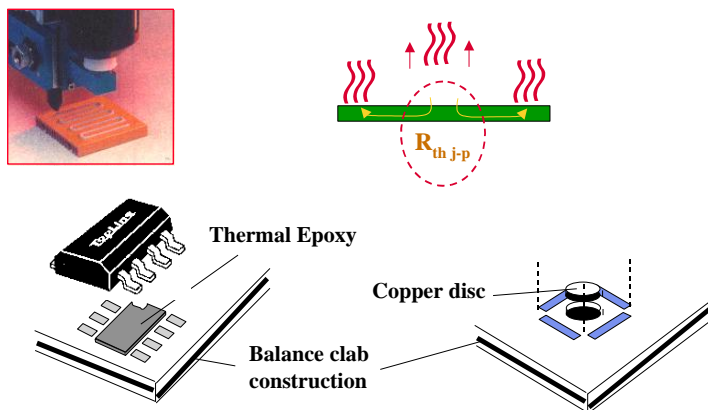


图 5: 改善管脚侧散热的措施之一

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 53 页 共 80 页

- 散热焊盘由过孔连接到内层夹心层进行散热和热平衡

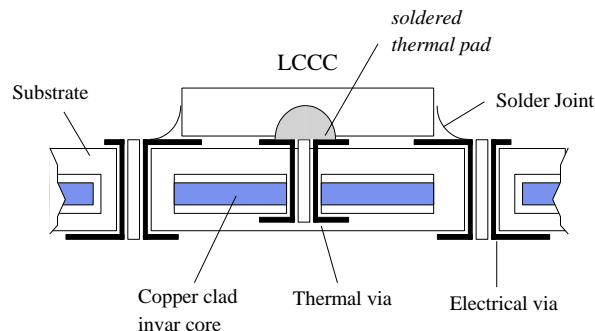


图 6: 改善管脚侧散热的措施之二

5.5.2.7 PCB 焊盘的隔热设计

较大的焊盘及大面积铜皮对管脚的散热十分有利,但在过波峰焊或回流焊时由于铜皮散热太快,容易造成焊接不良,必须进行隔热设计,常见的隔热设计方法如图 7 所示



图 7: 焊盘的隔热设计

5.5.6 安装 PCB 板的热设计原则

5.5.6.1 自然冷却条件下,对设备内有多块 PCB 板时,应与进风方向平行并列安装,每块 PCB 板间的间距应大于 30mm,以利于对流散热;对强迫风冷条件下,PCB 板的间距可以适当减小,但必须符合安规要求。

5.5.6.2 底板、隔热板、屏蔽板、印制板的位置以不要阻碍或阻断气流为原则。

5.5.7 元器件结温的计算

为保证元器件的安全散热,需要校核元器件的结温是否工作在安全温度下,首先得获得如下数据: 元器件的耗散功率 Q (额定值), 结点 (junction) 的安全工作温度范围 T_{jmax} (最大值和推荐值), 结至冷却空气热阻 R_{ja} , 结至壳热阻 R_{jc} , 结至板热阻 R_{jb} , 封装方式, 散热表面外形尺寸 (以上参数一般在元器件供

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 54 页 共 80 页

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(由系统级估算获得), 工作结温按下式进行计算:

5.5.7.1 元器件背有散热器

对于带铜板封装的大功率元器件(典型如 T0-220/T0-247 等), 其热量通过环氧表面(通常为 TOP 面)、管脚及铜板共 3 个渠道传递出来, 由于结到环氧表面、结到管脚的热阻较大, 所以通过铜板的传热为主要的传热途径, 如果铜板所贴的散热器热阻足够小且流过环氧表面的风速小于 1m/s, 则通过其它两种路径的传热基本可以忽略, 在已知散热器台面温度 T_s 下, 器件的工作结温为:

$$T_j = T_s + P_T \times R_{th(j-s)} \leq 0.8T_{jmax} \dots \dots \dots (4)$$

P_T ---元器件的热损耗, W

$R_{th(j-s)}$ ----元器件结到散热器表面的热阻, °C/W

对于无铜板的塑封器件, 其热量通过环氧表面(通常为 TOP 面)、管脚共 2 个渠道传递出来, 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。

5.5.7.2 元器件无散热器

如果已知结到环境的热阻, 环境温度, 则器件的工作结温为:

$$T_j = T_a + P_T \times R_{th(j-a)}$$

$$= T_a + P_T \times (R_{th(j-c)} + R_{th(c-a)}) \dots \dots \dots (5)$$

如果没有提供 R_{ja} , 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

$$R_{th(c-a)} = 1/hA \dots \dots \dots (6)$$

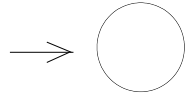
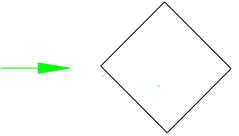
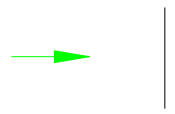
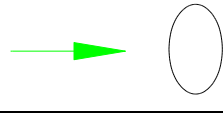
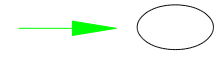
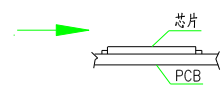
式中 A 为表面换热面积/ m^2 , h 为表面换热系数/ $W/m^2°C$, 用下式求出

$$h = b \frac{\delta}{D} Re^m \dots \dots \dots (7)$$

式中 b 和 m 为实验系数, D 为特征尺寸, 由表-2 查出; δ 为空气的导热系数/ $W/m°C$; Re 为雷诺数。

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 55 页 共 80 页

表-2. 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 $D = \frac{4d}{\pi}$, 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)	0.16	0.699	
		5000-100000 (B)	0.092	0.675	
		2500-7500 (A)	0.261	0.624	
		5000-100000 (B)	0.222	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		$< 10^5$ 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]: 一个2N2905晶体管 (T0-5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。

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 56 页 共 80 页

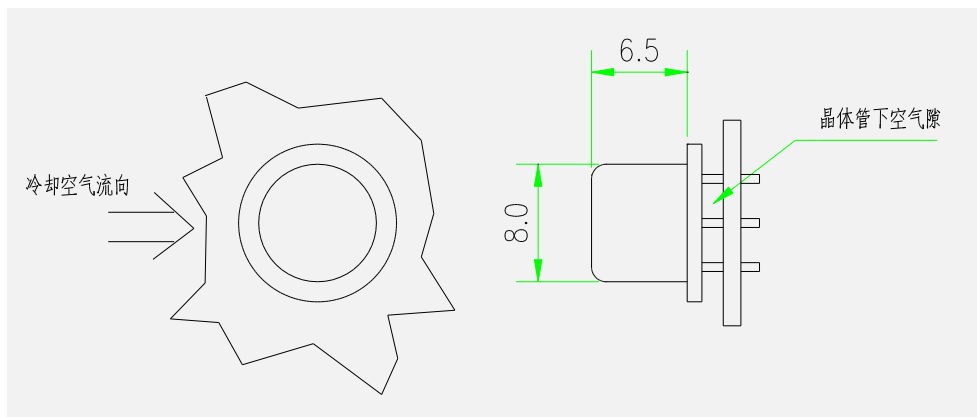


图8 2N2905晶体管示意图

解:

查得50℃时空气的物性参数为 $\rho = 1.094 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 17.95 \times 10^{-6}$, $\alpha = 2.83 \times 10^{-2}$ 。晶

体管的水力直径为 $D = 0.008 \text{ m}$, 用下式计算雷诺数

$$\text{Re} = \frac{uD}{\mu} = \frac{1.3 \times 0.008}{17.95 \times 10^{-6}} = 579$$

雷诺数在40~4000之间, 从表1中查得 $b = 0.615$, $m = 0.466$, 代入方程2得

$$h = 0.615 \frac{\alpha}{D} \text{Re}^{0.466} = 0.615 \times \frac{2.83 \times 10^{-2}}{0.008} \times 579^{0.466} = 42 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

晶体管的表面换热面积 $A = 2 \times 0.008 \times 0.008^2 + 0.008 \times 0.0065 = 2.64 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

这种封装方式下仅三根细导线与单板相连, 通过单板的导热可以忽略,

则晶体管表面的温升为 $\Delta t = \frac{Q}{hA} = \frac{0.25}{42 \times 2.64 \times 10^{-4}} = 22.5^\circ\text{C}$

结点到壳体的温升为 $\Delta t_{jc} = Q_{jc} \theta_{jc} = 0.25 \times 33 = 8.25^\circ\text{C}$

晶体管的结点温度为 $t_j = 50 + 22.5 + 8.25 = 81^\circ\text{C} < 90^\circ\text{C}$

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。

5.6 散热器的选择与设计

5.6.1 散热器需采用的强迫冷却方式的判别

对通风条件较好的场合, 散热器表面的热流密度大于 0.039 W/cm^2 而小于 0.078 W/cm^2 , 必须采用强迫风冷。

对通风条件较恶劣的场合: 散热器表面的热流密度大于 0.024 W/cm^2 而小于 0.078 W/cm^2 , 必须采用强迫风冷。

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 57 页 共 80 页

5.6.2 强迫风冷散热器的设计要点

5.6.2.1 在散热器表面加波纹齿，波纹齿的深度一般应小于0.5mm。

5.6.2.2 增加散热器的齿片数。目前国际上先进的挤压设备及工艺已能够达到23的高宽比，国内目前高宽比最大只能达到8。对能够提供足够的集中风冷的场合，可采用真空钎焊、锡焊、铲齿或插片成型的冷板，其齿间距最小可到2mm。

5.6.2.3 采用针状齿的设计方式，增加流体的扰动，提高散热齿间的对流换热系数。

5.6.2.4 当风速大于1m/s(200CFM)时，可完全忽略浮升力对表面换热的影响。

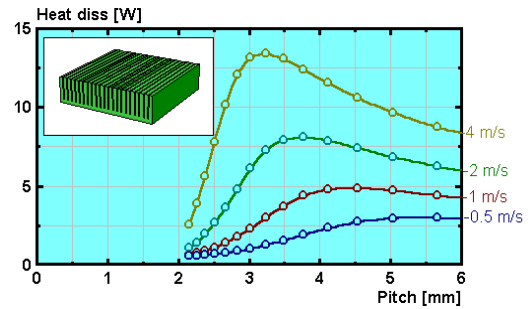
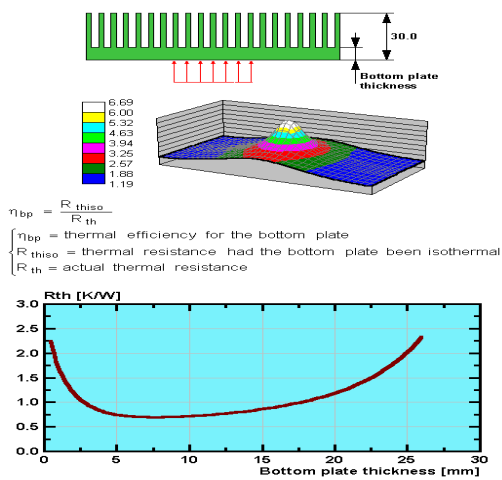


图 9 散热器基板厚度与热阻的关系曲线

图 10 不同通风条件下散热器的最佳齿间距

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 58 页 共 80 页

5.6.2.5 散热器基板厚度对散热器的热容量及散热器热阻有影响, 太薄热容量太小, 太厚热阻反而增加, 图 9 表示出了基板厚度的最佳范围。对分散式散热来讲, 基板厚度一般为 3-6mm 为最佳。

5.6.2.6 散热器齿间距的确定: 散热器齿间距的大小与风速有较大的关系, 不同通风条件, 其最佳的齿间距是不一样的, 图 10 表示出了常见通风风速下最佳的齿间距。

5.6.2.7 散热器齿片厚度的确定: 不同的齿片厚度, 其对应的齿间距是不一样的, 如图 11 所示。

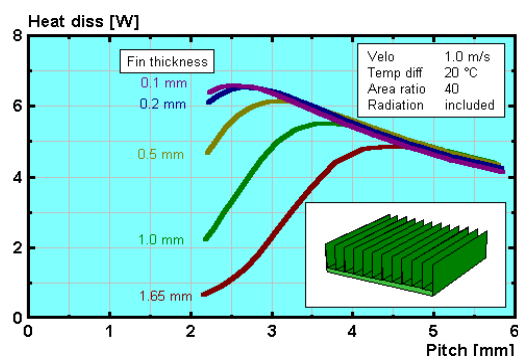


图 11 表示出了不同齿厚对应的最佳齿间距。

5.6.2.8 在一定冷却条件下, 所需散热器的体积热阻大小按表 3 进行成本确定。

表3 不同冷却条件下对应的散热器体积热阻

冷却条件	散热器体积热阻 $^{\circ}\text{C} - \text{cm}^3/\text{W}$
自然冷却	500-800
1.0m/s(200CFM)	150-250
2.5m/s(500CFM)	80-150
5.0m/s(1000CFM)	50-80

注意: 表2只能作为初选散热器的参考, 不能用它来计算散热器的热阻, 散热器的实际热阻需按附录A提供的方法计算。

5.6.2.9 一定的冷却体积及流向长度下, 按表 4 确定散热器齿片最佳间距的大小

表4 不同冷却条件及流向长度与散热齿片最佳齿间距的关系

冷却条件	流向长度(mm)			
	75	150	225	300
自然冷却	6.5	7.5	10	13
1.0m/s(200)	4.0	5.0	6.0	7.0
2.5m/s(500)	2.5	3.3	4.0	5.0
5.0m/s(1000)	2.0	2.5	3.0	3.5

5.6.2.10 不同形状、不同的成型方法的散热器的传热效率 如表 5 所示, 尽可能选用成型简单的工艺以降低散热器的加工成本。

5.6.2.11 散热器的表面处理

- 安装元器件的散热器表面的光洁度 $Ra \leq 1.6 \mu\text{m}$, 平面度小于 0.1mm。

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 59 页 共 80 页

- 安装元器件的散热器表面不能进行拉丝处理。
- 散热器表面原则上不需要任何表面处理, 因为进行表面处理对热性能的改变贡献较小, 而成本增加确实显著的。

表5 不同形状、不同的成型方法的散热器的传热效率

散热器成型方法	传热效率, %	成本参考
冲压件/光表面散热器	10—18	低
带翅片的压铸散热器/常规铝型材	15—22	较低
铲齿散热器	25—32	较高
小齿间距铝型材	45—48	高
针装散热器/钎焊/锡焊/铲齿/插片成型散热器(冷板散热器)	78—90	很高

5.6.3 风冷散热器的辐射换热考虑

一般情况下, 如果物体表面的温度低于50℃, 可忽略颜色对辐射换热的影响。因为此时辐射波长相当长, 处于不可见的红外区。而在红外区, 一个良好的发射体也是一个良好的吸收体, 发射率和吸收率与物体表面的颜色无关。

对于强迫风冷, 由于散热表面的平均温度较低, 一般可忽略辐射换热的贡献。

5.6.4 海拔高度对散热器的设计要求

海拔高度对强迫风冷影响的机理是由于随着海拔高度的增加, 空气密度减小, 空气分子间碰撞的概率降低, 对流换热能力减弱。同样, 强迫对流换热随海拔高度的变化最终体现在对流换热系数的变化上, 美国军用标准规定, 低于5000米以下的高空, 如果忽略空气温度的变化, 可按(8)式计算海拔高度对强迫风冷换热影响的强弱。

$$hc_{(高空)} = hc_{(海平面)} (p_{高空}/p_{海平面})^{0.8} \dots\dots\dots (8)$$

$hc_{(高空)}$, $hc_{(海平面)}$ 一分别为高空及海平面的强迫风冷对流换热系数, W/m.k
 $p_{高空}$, $p_{海平面}$ 一分别为高空及海平面的空气压力, 帕斯卡

5.6.5 散热器散热量计算的公式

表6 强迫风冷时对流换热系数的计算方法

层流 ($Ra < 10^5$)	紊流 ($Ra > 10^5$)
$hc = (1.1-1.4) \lambda_{空气} 0.66Re_f^{0.5}/L$	$hc = (1.1-1.4) \lambda_{空气} 0.032Re_f^{0.8}/L$

为了简化计算, 忽略散热器的导热热阻, 即假设模块的热量能够均匀传递到散热器的各表面, 此时计算出的散热量为模块的最大散热量:

$$Q = hc \times F_{对流} \times \Delta t \times \eta \dots\dots\dots (9)$$

hc -----自然对流换热系数, w/m².k

Δt ---散热器台面允许温升, °C

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 60 页 共 80 页

η ——散热器齿片效率(%)

对直齿肋:

$$\eta = th(mb) / (mb) \dots\dots\dots (9-1)$$

$$m = (2 hc / \lambda \delta_0)^{0.5} \dots\dots\dots (9-1-1)$$

δ_0 : 肋片根部厚度(m)

b: 肋高(m)

如果 $Q < P_D$, 表明散热器的设计不满足散热要求, 必须进行重新设计。

5.6.6 强化散热器散热效果的措施

5.6.6.1 尽可能增大散热面积, 增大散热面积的途径有三种:

- 在散热器表面加波纹齿, 波纹齿的深度一般应小于0.5mm。
- 加大散热器尺寸。
- 增加散热器的齿片数。目前国际上先进的挤压设备及工艺已能够达到23的高宽比, 国内目前高宽比最大只能达到8。对能够提供足够的集中风冷的场合, 建议采用真空钎焊、锡焊、铲齿或插片成型的冷板, 其齿间距最小可到2mm。

5.6.6.2 尽可能提高流过散热器的风速, 主要有两种途径:

- 采用较大流量或压头的风扇;
- 增加风扇的数量, 可采用风扇并联或串联方式。
- 优化系统及单板布局, 降低系统的流动阻力, 提供风扇的实际出力。

5.6.6.3 增加流体扰动, 提高对流换热系数, 如加导流条等。

5.7 风扇的选择与安装的热设计原则

5.7.1 多个风扇的安装位置

由于风扇出口风速的方向与风扇进口风速方向一般成约45°角, 即呈现倒圆锥的流场分布, 所以在吹风应用的场合, 要求两个风扇之间最好加一个隔板或保持一个风扇厚度的间距, 以避免两股流相交而产生的噪音和死区。

5.7.2 风扇与最近障碍物间的距离要求

为了避免风扇太靠近被冷却物体而产生噪音, 建议在吹风应用场合, 风扇与单板风道入口至少应保持一个40mm的距离, 以大于风扇直径为最佳。图12、图13显示了在吹风时与抽风时, 风扇与障碍物之间的距离对风扇静压曲线的影响, 从图中可以看出, 在吹风时, 只有在风扇与障碍物之间的距离大于75mm时其影响才较小, 而在抽风时, 在风扇与障碍物之间的距离大于50mm时其影响也较小。

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 61 页 共 80 页

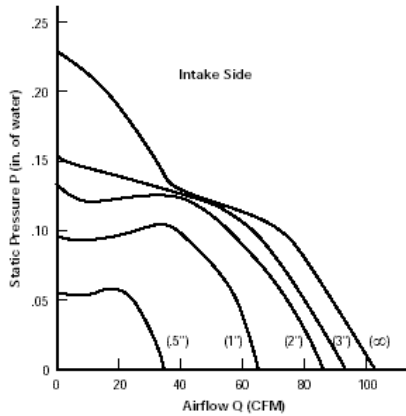


图12: 吹风时风扇与障碍物之间的距离对风扇静压曲线的影响

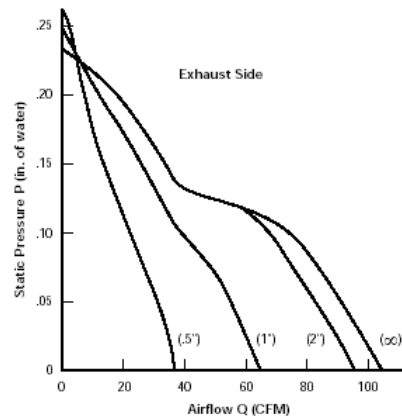


图13: 抽风时风扇与障碍物之间的距离对风扇静压曲线的影响

5.7.3 消除风扇 SWIRL 影响的措施

由于风扇旋转惯量SWIRL的影响，加之实际产品不可能有足够的空间允许流场能够充分发展，所以风扇后的流场在到达障碍物时存在明显的死区，如图14所示。如果不考虑这一点，把功率较大的元器件布置在此处，该元器件极可能应过热而损坏。为了消除SWIRL的影响，可选择以下措施：

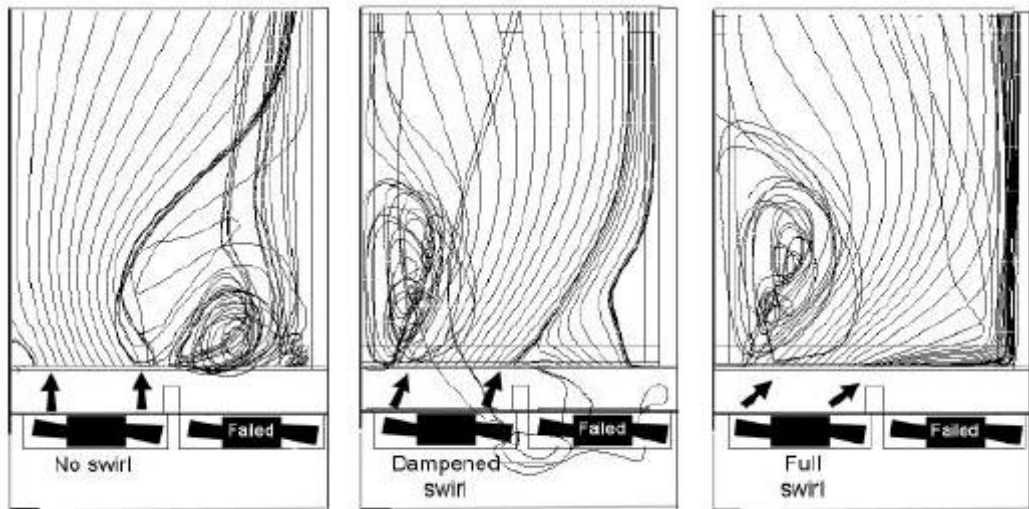


图14 风扇SWIRL对流场的影响

5.7.3.1 在风扇出口与障碍物之间加整流栅，整流栅厚度大于2mm，强迫流场在经过整流栅后变得非常均匀，如图15所示。

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 62 页 共 80 页

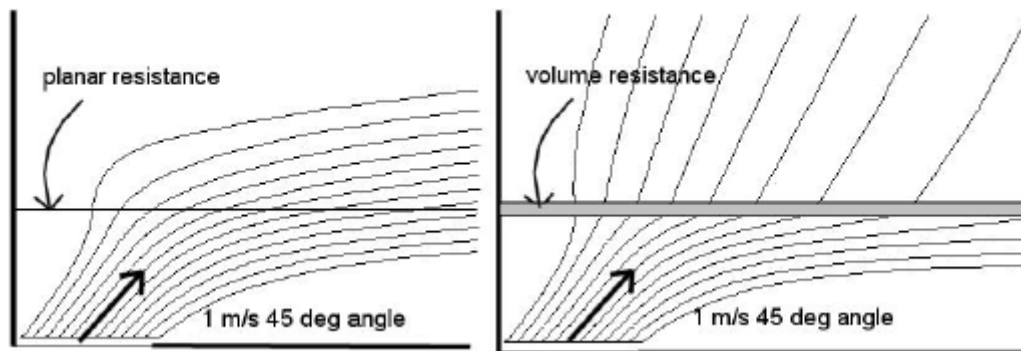


图15 加整流栅后(有厚度、无厚度)流场的变化情况

- 5.7.3.2 如果不能加整流栅,必须保证风扇出口到障碍物间的间距大于一个风扇的直径,以使流场能够充分发展而变得较均匀。
- 5.7.3.3 如果以上两条测试都无法实现,可通过仿真分析得出流场的分布图,再在PCB布局时避免把损耗较大的元器件布置在死区。

5.7.4 抽风条件下对风扇选型的限制

选择风扇一般以风扇进出口风温的大小作为限制条件,对吹风条件下,进出口风温一般没有限制。而对于抽风的情况,由于风扇抽出的是热风,对风扇的寿命将产生严重的影响。对风扇厂家,一般均以60℃作为标定风扇寿命MTBF的条件,如果风扇应用的环境温度高于60℃,则温度每升高5℃,风扇寿命下降一半。所以抽风条件下,风扇选择应遵循以下原则:

- 5.7.4.1 如果进入风扇的风温高于60℃时,应考虑选用高温风扇以保证风扇的使用寿命。
- 5.7.4.2 如果进入风扇的风温低于60℃时,一般以(60-环境温度)℃作为限制条件来选择风扇。例如:如拟选用的风扇厂家所采用的风扇寿命MTBF标定温度为60℃,设备使用的环境温度为45℃,则应以(60-45)=15℃作为选择风扇风量的限制条件。

5.7.5 降低风扇噪音的原则

风扇产生的噪音与风扇的工作点或风量有直接关系,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,如图 14 所示,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,

- 5.7.5.1 考虑合适的热设计冗余,保持最佳的热性能与噪音之比值。一般来讲,稍微降低产品的温度要求将导致产品噪音戏剧性降低;此外,由于在选择风扇时总是以产品工作的最严酷的状态来选定风扇的型号,而实际上产品总是工作在正常的额定功率或半载状态下,所以风扇的冗余就显得过大,噪音也就降不下来,如果考虑合适的冗余或通过控制风扇的转速就可大大降低产品的噪音水平。
- 5.7.5.2 尽可能降低系统的流动阻力,低的流动阻力意味可以选用低转速的风扇,其噪音水平也会相应降低。

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 63 页 共 80 页

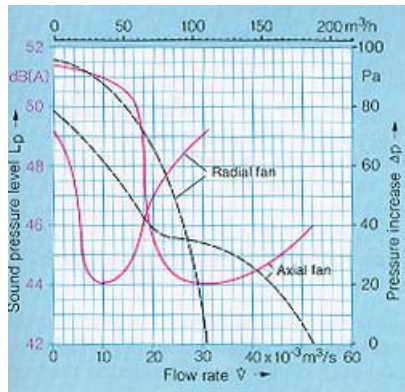


图16 风扇静压曲线与噪音变化曲线的对比图

5.7.5.3 合理调整系统阻力与风扇的匹配,使风扇的工作点处于最佳的工作区域,而在最佳工作区域内风扇具有较低的噪音水平。

5.7.5.4 相同的风速,推荐选用大一号的风扇更有利于降低系统的噪音。

5.7.5.4 避免把障碍物放在靠近风扇的气流速度较高的区域。

5.7.5.5 在风扇与结构件间加橡胶垫,以消除风扇振动而产生的噪音。

5.7.5.6 避免风扇与结构件共振而产生噪音。

5.7.5.7 把风扇安装在机箱内侧比安装在外侧噪音小。

5.7.5.8 把障碍物放在风扇的进风侧附近较放在风扇的出风侧产生的噪音大。

5.7.5.9 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。

5.7.5.10 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。

5.7.5.11 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。相应的噪音降低变化按下式计算:

$$N_2 = N_1 + 50 \log_{10} (RPM_2/RPM_1) \dots\dots\dots(10)$$

5.7.6 解决海拔高度对风扇性能影响的措施

分散式散热的基本思路是合理控制热设计冗余,所以散热器件的细微变化可能会导致产品在工作中应器件过温而热损坏。对风扇来讲,随着海拔高度的增加,风扇的性能曲线及系统的阻力曲线均会发生变化,如图17、图18所示,由于压力正比于空气的密度,而空气的密度随海拔高度的升高而逐渐降低,所以压力也会随海拔高度的升高而逐渐降低。在实际应用中,应按下式来进行校正:

$$(P_0)_{altitude} = (P_0)_{Sea Level} (\rho_{altitude}/\rho_{Sea Level}) \dots\dots\dots(12)$$

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 64 页 共 80 页

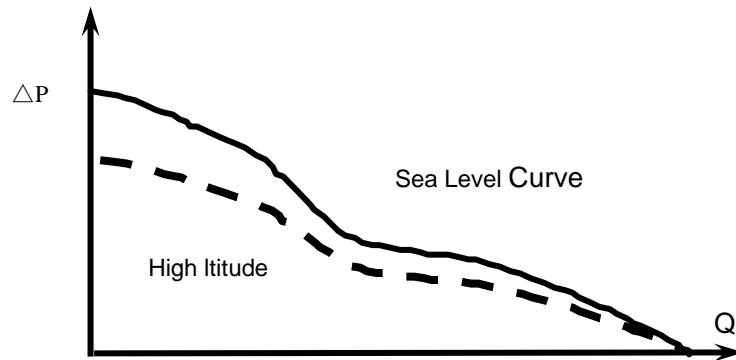


图17 海拔高度对风扇性能曲线的影响

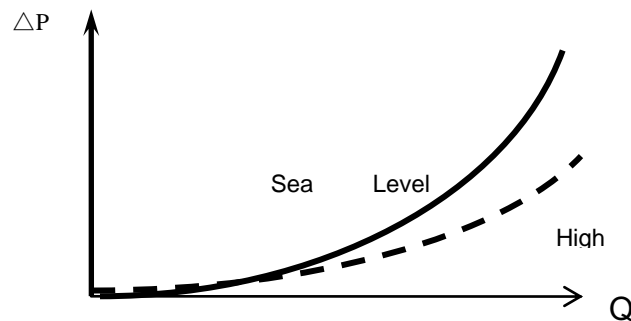


图18 海拔高度对系统阻力曲线的影响

5.7.7 确定风扇型号的方法

5.7.7.1 先计算实际所需风量:

$$q = Q / (0.335 \Delta T) \dots\dots\dots (13)$$

q --- 实际所需的风量, m^3/h

Q --- 散热量, W

ΔT --- 空气的温升, $^{\circ}C$, 一般为 $10-15^{\circ}C$ 。

5.7.7.3 确定风扇的型号

5.7.7.3.1 按经验公式: 按照1.5-2倍的裕量选择风扇的最大风量:

$$q = (1.5-2)q \quad \text{按最大风量选择风扇型号。}$$

5.7.7.3.2 按确定工作点的方法

把风道曲线与风扇的静压曲线绘在一张图上, 其交点就是风机的工作点。工作点对应的风量若大于冷却风量, 风扇即满足要求, 否则重新选择风扇, 重复上面的工作, 直到满足要求为止。

5.7.8 吹风与抽风方式的选择原则

5.7.8.1 优先采用吹风方式, 吹风有如下优点:

5.7.8.1.1 风量相对较集中, 可以以较大的风速针对局部区域进行集中冷却。

5.7.8.1.2 能够有效防止风扇马达过热, 提高风扇的使用寿命。

5.7.8.1.3 可以以较大的压力迫使灰尘不能够在机箱内聚积, 而通过出风口或

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 65 页 共 80 页

缝隙流出，原则上可省掉防尘网。

5.7.8.2 只有在以下情况下才选择抽风:

5.7.8.2.1 希望流场规则或呈现层流。

5.7.8.2.2 进风口无法安装风扇。

5.7.8.2.3 不希望风扇马达加热空气而对后面的元器件产生影响。

5.7.9 延长风扇寿命与降低风扇噪音的措施

通常我们在确定风扇型号时，均是按产品工作最恶劣的工况，实际上产品大部分时间工作在轻载状态，元器件损耗较低，根本不需要风扇高速运转。风扇高速运转由两个坏处：(1)系统噪音太大；(2)风扇寿命会较低。为了解决以上问题，可选用可调速风扇，通过监测元器件或散热器的温升来控制风扇的运转。其原理为温度传感器将检测到的温度信号送回到监控模块，监控模块根据预先设置的温度范围来判断风扇运转的快慢，并自动调整风扇的电压来使风扇按规定的转速运转。风扇的噪音变化可按等式(1)进行评估，而风扇的寿命预计可按(14)式评估：

$$L_{\text{预期}} = L_{10} \times (U_{\text{额定}}/U_{\text{实际}})^3 \times (1/(T_{\text{环}}^{-40}/10)) \dots \dots \dots (14)$$

5.7.10 风扇的串联与并联

5.7.1 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19

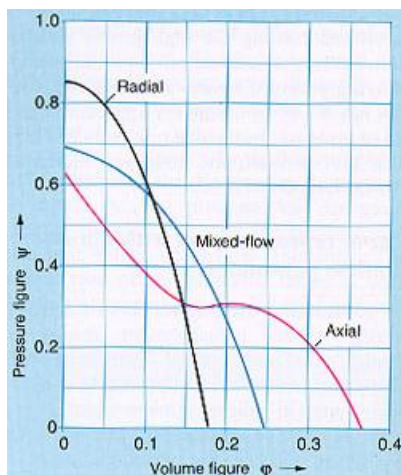


图19 不同类型风扇的静压曲线

图中横坐标表示风量，单位有m³/h、m³/min、CFM（立方英尺/分钟，1CFM=4.72X10⁻⁴m³/s）。纵坐标表示风扇产生的静压，单位有Pa、inch of water(=249Pa)、mm H₂O(=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

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 66 页 共 80 页

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。

5.7.2 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，均与当地风速的平方成正比，如局部压力损失由下式计算

$$p = \alpha \frac{\rho v^2}{2} \dots\dots\dots(15)$$

式中 α 为阻力系数， ρ 为空气密度， v 为风速。以下是一些典型的局部阻力系数

表7 典型局部阻力系数

说明	α
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20所示

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 67 页 共 80 页

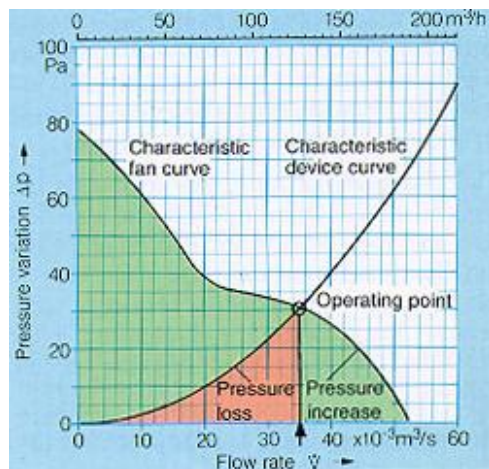


图20 风扇与系统的匹配工作点

图中表明风扇在该系统中工作时的风量为 $35\text{m}^3/\text{s}$ ，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。

5.7.3 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21所示，实际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22所示，实际曲线一般会比理论曲线略低。

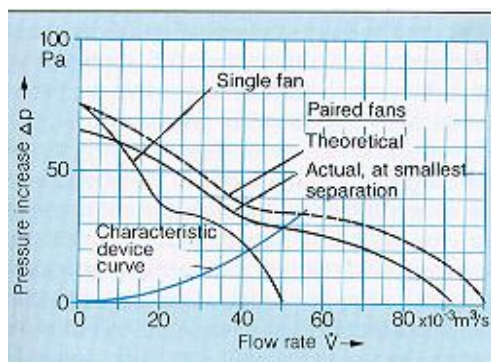


图21 风扇的并联特性曲线

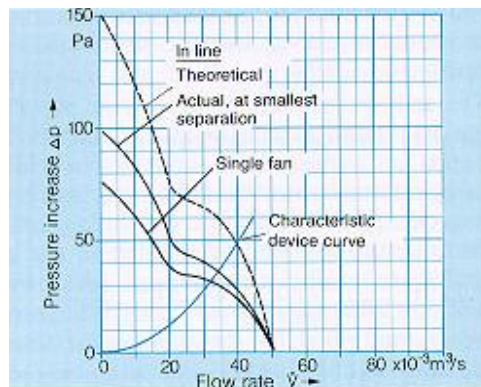


图22 风扇的串联特性曲线

5.7.4 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，

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 68 页 共 80 页

其性能曲线会发生变化,如图23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。

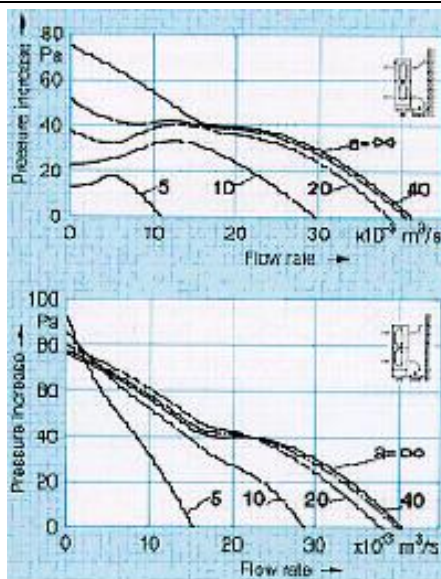


图23 风扇特性曲线随阻挡物的距离发生的变化

5.8 防尘对产品散热的影响

由于吹风与抽风方式对灰尘的吸附强弱是不一样的,因而对是否安装防尘网的需求也不一样。一般来讲,安装防尘网后,元器件的温升将升高10—15℃,在决定安装防尘网的产品,必须考虑10—15℃的热设计冗余。

5.8.1 抽风方式的防尘措施

对抽风来讲,由于外部压力大于模块内部的压力,灰尘非常容易进入模块并附着在模块内部的PCB表面及功率管表面,严重影响产品的散热性能及电气性能,所以,抽风条件下,必须安装防尘网。

5.8.2 吹风方式下的防尘措施

对吹风来讲,由于外部压力小于模块内部的压力,灰尘即使进入模块内部,也不容易附着在模块内部的PCB表面及功率管表面上,在压差的作用下,进入模块内部的会通过出风口或机箱的缝隙飞出,所有,在吹风条件下,实际上不需要安装防尘网,这在竞争对手的分散式散热产品都可以得到验证,如APC的50A模块、Delta的50A模块等。当然,为了照顾特殊应用的场合如室外或比较脏的地方,也可以把防尘网作为选件提供给用户,但选用使用防尘网时,产品必须降额使用。

如果不加防尘网,散热器的体积可以减小20%,散热成本至少可以减少30%,而噪音水平也就更加容易达到标准了。

5.8.3 防尘网的选择方法

5.8.3.1 输入条件

防尘网的性能需求

防尘网与风扇通风量的匹配需求

安装防尘网的许可空间

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 69 页 共 80 页

须满足的标准或规范 (NEBS、ETSI、CE、UL60950)

5.8.3.2 选择防尘网的布骤

5.8.3.2.1 确定防尘网的尺寸 (长、宽、高)。

5.8.3.2.2 计算气流速度

气流速度 = 所须的空气流量 / 防尘网的表面积

5.8.3.2.3 确定防尘网的回收方式: 一次性使用或可重复使用。

5.8.3.2.4 根据防尘网供应商提供的初阻力与来流速度的关系曲线 (数据表) 来初步选定防尘网的型号。

5.8.3.2.5 确定防尘网的型号及边框尺寸。

5.8.3.2.6 确定防尘网的颜色。

5.8.3.2.7 确定安装或拆卸防尘网是否需要专用工具?

5.8.3.2.8 准备出图。

6 产品的热测试

6.1 进行产品热测试的目的

6.1.1 热设计方案优化

对不同的方案进行比较, 确定较优的散热设计方案。

6.1.2 热设计验证

检验热设计的合理性与有效性, 验证产品的有关热设计指标是否满足产品的热设计验证判定标准。

6.2 热测试的种类及所用的仪器、设备

6.2.1 温度测试

6.2.1.1 温度测试的项目

- 设备内部环境温度
- 机箱表面温升 (自然对流换热时测量)
- 关键元器件和发热元器件的表面温升
- 散热器和冷板的热点温升
- 冷却空气入口温度与出口温升

6.2.1.2 温度测量仪器类型

温度测量仪器包括热电偶、玻璃温度计、示温漆和示温蜡、电阻温度计、热敏电阻、光学温度计、红外扫描系统等。

6.2.1.3 热电偶

6.2.1.3.1 热电偶的选择

热电偶的种类较多, 就通信设备来讲, 由于我们设备的温度一般低于 200℃ 以下, 在该范围内铜-康铜或镍铬-铐铜热电偶具有较高的精度, 为 K 型热电偶, 其分度值应符合 GB 2903 和 GB 4993 的规定。热电偶的测试精度为 ±0.1℃。

6.2.1.3.2 热电偶的焊接方法

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 70 页 共 80 页

通常采用熔焊的方法把铜-康铜或镍铬-铐铜焊接在一起, 不允许采用把铜-康铜丝直接绞在一起的方法。

6.2.1.3.3 热电偶的粘接方法及减小测量误差的措施

热电偶采用导热胶粘接粘贴在被测表面, 为了保证测试结果的精度, 热电偶探头固定在测温表面上时, 必须将一段热电偶导线沿测温表面的等温线布置, 这样可以消除热电偶导线本身导热而导致的测量误差。导线长度应大于10mm, 如图24所示[6]

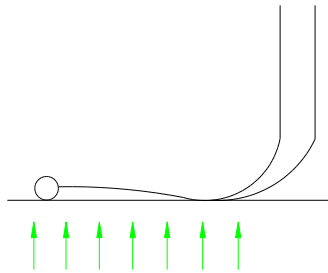


图24 热电偶与被测表面的接触形式

6.2.1.3.4 与热电偶配套的检测仪表

热电偶的温度检测通常采用多路采集器, 如FLUKE公司的Hydra logger 及日本恒河公司的DR230系列等。测试精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。

6.2.1.4 玻璃温度计

玻璃液体温度计通常用来测量流体温度和校准其它的测温仪器如热电偶等。玻璃温度计的精度可以达到 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ 。

6.2.1.5 示温漆与示温蜡

示温漆是一种随温度变化而变化的漆, 漆的颜色变化达四种之多, 不同的颜色代表不同的温度。示温漆还可以用于显示某个区域的温度场及热流模式。

示温蜡是在特定的温度下熔化的蜡状物质, 从而显示出温度。

示温漆与示温蜡的精度较差, 一般在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ($\pm 9^{\circ}\text{F}$)

6.2.1.6 电阻温度计

电阻温度计与热电偶的原理及用途相似, 两者均因辐射影响而产生误差。其精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。

6.2.1.7 热敏电阻

热敏电阻遵循电阻测温学的原理, 由于它的温度系数很大, 所以灵敏度高得多, 其缺点是容易老化, 需进行定期校准, 其测试精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。

6.2.1.8 光学温度计、红外扫描系统等。

光学温度计、红外扫描系统均通过测量一个热源的红外辐射而得到温度。其测试精度最高可以达到 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 。由于测量时必须准确知道被测表面的发射率且要求被测表面必须可见, 限制了它们的使用。

6.2.2 速度测量

6.2.2.1 空气流速测量内容

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 71 页 共 80 页

- 风道入口空气流速
- 风道出口空气流速
- 主要单板间和空槽位处的风速
- 电源模块或其它外购模块入风口的流速测量

6.2.2.2 空气流速测量仪器

通常使用的风速计有两种: (1) 翼型风速计 (2) 热电式风速计

6.2.2.2.1 翼型风速计

翼型风速计是由装在一个轴上的许多叶片组成的。它通过齿轮传动机构或信号发生器与某个经过校准的装置耦合。气流的力量使叶片转动, 其转速与气流速度成正比。其测试精度为0.1m/s, 典型的型号如台湾生产的AM-402。

6.2.2.2.2 热电式风速计

热电式风速计是由电流加热的一小段细铂丝组成, 铂丝电阻是其温度的函数。铂丝周围的气流使铂丝冷却, 因而改变了它的电阻值。如果使铂丝上的电压或流过铂丝的电流保持在一定值, 则电压或电流的变化就分别成为流经铂丝气流速度的函数。其测试精度达到0.01m/s。

典型热电时风速计如 热球式风速仪, QDF-3
电子微风仪, 型号EY3-2A。

6.2.2.2.3 两种风速计的比较

由于翼型风速计基本上机械的, 气流温度会导致轴承中的润滑油蒸发, 从而改变了系统的摩擦力矩, 导致测试误差较大。而热电时风速计在经过校准后即具有相当的精度, 故推荐采用热电式风速仪。

6.2.2.2.4 风速测量注意事项

- 风速计的定期校准

由于风速计结构复杂, 短期使用后其标定值就可能发生变化, 所以要求定期对风速计进行校准。一般要求3个月就必须校准一次。

- 减小风速测量误差的方法

使用风速计测量时, 必须进行3以上的重复测量, 以平均值作为计量结果。

6.2.3 流体压力的测量

6.2.3.1 流体压力的分类

当流体在管道中流动时, 能够测到三种压力: (1) 静压, (2) 动压, (3) 总压, 一般只需测试出其中的两种, 第三种可通过下面的公式(14) 计算出来^[4]:

$$\text{总压} = \text{静压} + \text{动压} \dots\dots\dots(14)$$

动压: 是相对于流动速度的压力, 是流体动能的一种量度。

静压: 存在于流体中的压缩压力, 是流体位能的一种量度。静压存在于静止或运动的流体中, 它能够使流体流动, 并使它克服阻力。

总压: 是静压与动压之和, 是流体总能量的一种量度。

6.2.2.3 压力的测量方法

6.2.3.2.1 总压的测量方法

总压可以用一个简单的皮托管就可测得, 其测试压力如图25所示

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 72 页 共 80 页

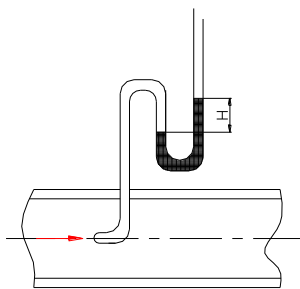


图25 总压测试原理图

6.2.3.2.2 静压的测量方法

压力计开口测量法,如图26a. b. 所示,流体的静压使流体上升一定的高度 H ,高度 H 即为所测的静压。

静压管法:静压管是一种可以不受管道内表面光滑度影响的测压仪器,它的端部或管口端迎着进口一侧的气流,其顶端封闭,并在管口端靠近出口一侧的圆柱部分有几个径向小孔的园管。如图26c. 所示。

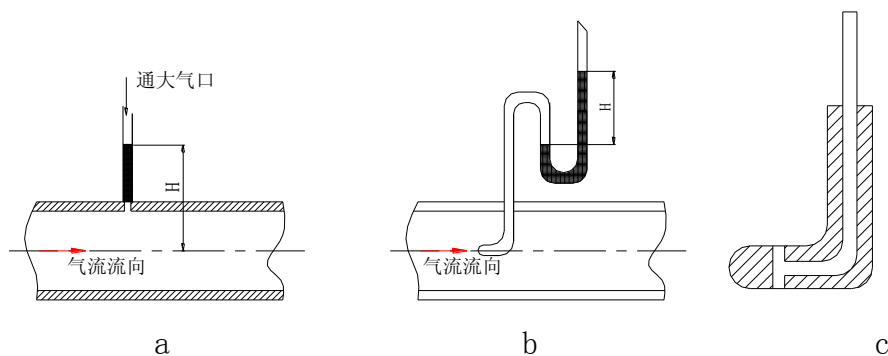


图26 a. b. 开口压力测试法c. 静压管

6.2.3.2.3 动压的测量方法

动压是测量流体流速的基础,如果只要求测量动压时,有两种方法:

- (1) 把皮托管和压力计开口测量法相结合的方法,如图27a所示

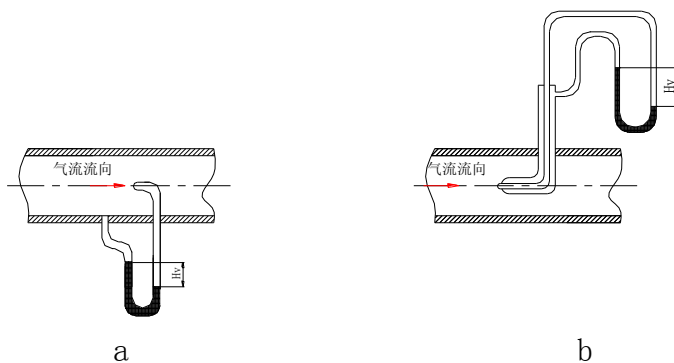


图27 a. 测动压的有压力计开口的皮托管b. 测动压用的皮托静压管

- (2) 使用静压皮托管,如图27b所示

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 73 页 共 80 页

以上三种测量方法, 如果安装、校准和操作适当, 其准确度均在2%以内。

6.2.2.4 测量压差的微压计

流体在管道中流动时, 其压差是指进口一侧的压力与出口一侧的压力之间的差值。在实际应用中, 我们通常关注的是流体流过某一通道所产生的压差, 以便于合理选择风扇。测量压差的仪器通常微压计, 推荐采用倾斜式微压计, 如上海气象仪器厂的 YJB-1500 型。

7 附录

7.1 元器件的功耗计算方法

根据实际使用工况, 诸如工作电流, 导通压降等以及元器件的其它电气参数计算元器件实际的功耗大小。元器件的种类不同, 其功耗计算方法也不一样, 具体计算方法如下:

7.1.1 电阻

电阻的发热量由下式算得

$$P=I^2R$$

$$\text{或 } P=U^2/R \dots\dots\dots(16)$$

I—流过电流值(A); R—电阻值(Ω)

U—电阻两端的电压(V)

7.1.2 变压器

变压器的包括铜损和铁损两部分

$$P_b = P_w + P_c \dots\dots\dots(17)$$

铜损按下式计算:

$$P_w = 2 \times I_p \times N_p \times L_p \times R_z^{[2]} \dots\dots\dots(17a)$$

I_p —原边有效电流, A

N_p —原边绕组的匝数, 匝

L_p —每圈的平均长度, cm

R_z —导线的阻抗, Ω/cm

铁损按下式计算:

$$P_c = P_v \times V_e^{[2]} \dots\dots\dots(17b)$$

P_v —单位体积的铁损, w/cm³

V_e —铁芯体积, cm³

变压器的温升按下式计算:

$$\Delta t = 850P_b/A_s^{[2]} \dots\dots\dots(17c)$$

P_b —变压器的总损耗, w

A_s —变压器的表面积, cm²

7.1.3 功率器件耗散功率计算

7.1.3.1 双极型晶体管(IGBT)

IGBT 的功耗损耗主要由通态损耗(饱和损耗或稳定损耗)及开关损耗两部分, 分别按下式计算:

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 74 页 共 80 页

通态损耗(饱和损耗或稳定损耗):

$$P_c = U_{CE} I_c \delta^{[3]} \dots\dots\dots(18a)$$

开关损耗:

$$P_s = (1/2) U_{CE0} I_c (t_{on} + t_{off}) f_s$$

$$= (E_{on} + E_{off}) f_s^{[3]} \dots\dots\dots(18b)$$

$$\text{总损耗: } P_d = P_c + P_s \dots\dots\dots(18)$$

式中: U_{CE} —通态集电极—发射极电压 (V), 给定值
 U_{CE0} —断态集电极—发射极电压 (V), 给定值
 I_c —通态电流 (A), 给定值
 δ —占空比, 给定值
 E_{on}, E_{off} —开关能量(焦耳), 从器件数据手册中查出。
 f_s —开关频率, 给定值

7. 1. 3. 2 功率 MOSFET

MOSFET 的损耗包括开关损耗和通态损耗两部分

$$\text{通态功耗: } P_d = I_{DS}^2 R_{DS(ON)}^{[3]} \dots\dots\dots(19a)$$

I_{DS} —漏极电流, A, 给定值

$R_{DS(ON)}$ —MOSFET 在工作结温下的通态热阻, 可按直接下式计算, 也可以从器件数据手册中查。

$$R_{DS(ON)(T_j)} = R_o [1 + \alpha (T_j - 25^\circ)], \Omega, \text{ 通态电阻}$$

R_o —25°C 时额定值, 给定值

α —温度系数, 一般为: 0.01

开关损耗:

$$\text{开通时损耗: } P_{ON} = I_{ce0} V_{ce} t_{off} f^{[2]} \dots\dots\dots(19b)$$

$$\text{开通过程损耗: } P_r = I_c V_{DS} t_r f / 6 = I_c^2 t_r t_r' f / 6 C_{rss}^{[2]} \dots\dots\dots(19c)$$

$$\text{关断时损耗 } P_{off} = I_c V_{ces} t_{on} f^{[2]} \dots\dots\dots(19d)$$

$$\text{关断过程损耗: } P_f = I_c V_{DS} t_f f / 6 = I_c^2 t_f t_f' f / 6 C_{oss}^{[2]} \dots\dots\dots(19e)$$

式中: I_{ce0} —集电极与发射级间的穿透电流, A

I_c —集电极电流, A

V_{ce} —集电极与发射极间的电压, V

V_{ce0} —饱和压降, V

t_{on}, t_{off} —开通及关断时间, ns

$t_{r,}, t_f - V_{ce}$ 的上升及下降时间, ns

t_r', t_f' —驱动波形上升或下降时间, ns

C_{rss}, C_{oss} 崩 OSFET 的输入与输出电容

MOSFET 的总损耗为:

$$P_{total} = P_d + P_{on} + P_{off} + P_r + P_f \dots\dots\dots(19)$$

7. 1. 3. 3 DC-DC 开关变换器输出整流用功率二极管

功率二极管的损耗包括通态损耗及开关损耗两部分

$$\text{通态损耗: } P_d = V_F I_F D^{[5]} \dots\dots\dots(20a)$$

式中: V_F —正向导通压降, V

I_F —正向平均电流, A

D —占空比

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 75 页 共 80 页

$$P_{on} = I_F V_{FRM} t_{rr} D f / 1000^{[5]} \dots\dots\dots(20b)$$

V_{FRM} —正向恢复电压, V
 t_{rr} —反向恢复时间, ns
 f —工作频率, KHZ

$$P_{off} = I_{RM} K_f V_R t_{rr} D f / 2000^{[5]} \dots\dots\dots(20c)$$

I_{RM} 机反向漏电流, A
 K_f —比例系数
 V_R —稳态反向电压, V

$$P_{total} = P_d + P_{on} + P_{off} \dots\dots\dots(20)$$

7.2 散热器的设计计算方法

根据给定的结构尺寸, 遵照散热器的设计原则初步设计出一种散热器, 在按以下步骤进行校核计算。

6.2.1 散热器的热阻

散热器的热阻是从大的方面包括三个部分。

$$R_{SA} = R_{对} + R_{导} + R_{辐} \dots\dots\dots(21)$$

$$R_{对} = 1 / (\alpha F_1) \dots\dots\dots(21a)$$

F_1 —对流换热面积 (m)
 α —对流换热系数, 按下式计算

自然对流: 层流 $\alpha = 1.42 (\Delta t / L)^{0.25}$

湍流 $\alpha = 1.31 (\Delta t)^{0.25}$

强迫风冷 层流 $\alpha = 0.66 Re_f^{0.5}$

湍流 $\alpha = 0.032 Re_f^{0.8}$

$R_{辐}$ —辐射换热热阻, 可忽略不计

$$R_{导} = R_{基板} + R_{肋导} \\ = \delta / (\lambda F_2) + ((1/\eta) - 1) R_{对流} \dots\dots\dots(21b)$$

λ —导热系数, w/m. h. °C

δ —散热器基板厚度 (m)

F_2 —基板的导热面积 (m)

$$F_2 = 0.785 * (d + \delta)^2$$

d —发热器件的当量直径 (m)

η —肋效率系数

对直齿肋:

$$\eta = th(mb) / (mb)$$

$$m = (2\alpha / \lambda \delta_0)$$

δ_0 . 肋片根部厚度 (m)

b . 肋高 (m)

$$R_{SA} = \delta / (\lambda F_2) + 1 / (\alpha F_1 \eta)$$

7.2.2 散热器的流阻

散热器的流阻包括沿程阻力损失及局部阻力损失

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 76 页 共 80 页

$$\Delta P = h_f + h_j$$

$$= \lambda_f \cdot L/d \cdot V^2/2g + \zeta V^2/2g^{[5]} \dots\dots\dots(22)$$

λ_f --沿程阻力系数

层流区: $Re = Vd/\nu \leq 2300$ $\lambda_f = 64/Re$

紊流光滑区 $4000 < Re < 10^5$ $\lambda_f = 0.3164/Re^{0.25}$

L--流向长度 (m)

d--当量水利直径 (m)

$d = 4A_{流通}/湿周长$

V--断面流速 (m/s)

ζ --局面阻力系数

突然扩大: $\zeta = (1 - A_2/A_1)$

突然缩小: $\zeta = 0.5(1 - A_1/A_2)$

A_1, A_2 为进口及出口面积 (m²)

ν --运动粘度系数 (m²/s), 从文献[5]中查找

比较 $Rsa \leq [Rsa]$, $\Delta P \leq [\Delta P]$, 如不满足, 重新进行设计散热器形状, 重复上面的步骤进行设计, 直到符合要求为止。

7.3 冷板散热器的计算方法

7.3.1 冷板的换热方程

冷板的换热计算的方程式包括对流换热方程和能量平衡方程。

当安装于冷板上的电子元器件所耗散的热量通过导热、对流传给冷板时, 换热关系时为:

$$Q_{放} = hA\Delta t_m \eta_o \dots\dots\dots(23)$$

其中: h-----对流换热系数, W/m². °C

A-----参与对流的总面积, m²

Δt_m ---对数平均温差, °C

η_o -----冷板的总效率

空气通过冷板后所吸收的热量为:

$$Q_{吸} = q_m C_p (t_2 - t_1) \dots\dots\dots(24)$$

其中: q_m -----空气的质量流量, kg/s

C_p -----空气的定压比热, J/kg . °C

t_1, t_2 -----空气的进、出口温度, °C

当达到热平衡时, 冷板放出的热量应等于空气吸收的热量

7.3.2 冷板的换热系数

冷板的换热系数与肋片的形状、结构形式、流量和空气的物理性质有关

$$h = JGC_p Pr^{2/3} \dots\dots\dots(25)$$

其中: J-----考尔本数, $J = 6/Re^{0.98}$ ($Re < 1800$, 层流)

$J = 0.023/Re^{0.2}$ ($Re > 10^5$, 湍流)

G-----质量流速, Kg/(s.m²)

Pr-----普朗特数。

7.3.3 冷板的总效率

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 77 页 共 80 页

$$\eta_0 = 1 - A_r(1 - \eta_f) / A \dots\dots\dots(26)$$

其中: η_f -----肋片的效率
 A_r -----肋片的面积, m^2
 A -----冷板的总面积, $A = A_t + A_r + A_b$, m^2
 A_t -----盖板的面积, m^2

7.3.4 冷板的设计计算

冷板的设计有两类问题, 校核计算和设计计算,

7.3.4.1校核计算, 已知冷板的结构类型、尺寸、冷却剂的流量和工作环境, 要求校核冷板是否满足所要求的传热量以及克服流经冷板通道的压降;

(1)、已知参数: 冷板的尺寸, 肋片参数、空气流量、当量直径 d_e ($d_e = 4\chi / A_{fi}$), 通道面积 A_f , 换热面积 A , 冷板散热器最高台面温度、风扇的流量及压头;

传热计算

(2)、确定空气流过冷板后的温升:

$$\Delta t = Q / q_m C_p \dots\dots\dots(27)$$

(3)、确定定性温度

$$t_f = (2t_s + t_1 + t_2) / 4 \dots\dots\dots(28)$$

冷板台面温度 t_s 为假定值

(4)、确定定性温度下的物性参数 (μ 、 C_p 、 ρ 、 P_r), 流体的质量流速和雷诺数

$$G = q_m / A_f \dots\dots\dots(29)$$

$$Re = d_e G / \mu$$

(5)、根据雷诺数确定流体的状态 (层流或紊流),

$Re < 1800$, 层流

$Re > 10^5$, 湍流

(6)、根据流体的状态 (层流或紊流) 计算考尔本数 J

$$Re < 1800, \text{层流} \quad J = 6 / Re^{0.98}$$

$$Re > 10^5, \text{湍流} \quad J = 0.023 / Re^{0.2}$$

也可以根据齿形及雷诺数从GJB/Z 27-92 图12-18查得

(7)、计算冷板的换热系数

$$h = J G C_p P_r^{2/3}$$

(8)、计算肋片的效率

$$m = (2h / \lambda \delta)^{0.5}$$

$\eta_f = th(ml) / ml$ (也可以根据 ml 值查相应的图表得到肋片效率)

(9)、计算冷板的总效率

忽略盖板及底板的效率, 总效率为:

$$A = A_t + A_r + A_b$$

$$\eta_0 = 1 - A_r(1 - \eta_f) / A$$

(10)、计算传热单元数

$$NTU = h \eta_0 A / q_m C_p \dots\dots\dots(30)$$

(11)、计算冷板散热器的台面温度

$$t_s = (e^{NTU} t_2 - t_1) / (e^{NTU} - 1) \dots\dots\dots(31)$$

流体流动阻力计算

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 78 页 共 80 页

(12)、计算流通面积与冷板横截面积之比

$$\sigma = A_f / A_c \dots \dots \dots (32)$$

(13)、查空气进入冷板时入口的损失系数 $K_c = f(Re, \sigma)$

根据雷诺数 Re 及 σ 从 GJB/Z 27-92 图 12-16 及图 12-16 查得

(14)、查空气流出冷板时出口的损失系数 $K_c = f(Re, \sigma)$

根据雷诺数 Re 及 σ 从 GJB/Z 27-92 图 12-16 及图 12-16 查得

(15)、查摩擦系数 $f = f(Re, \sigma)$

根据雷诺数 Re 从 GJB/Z 27-92 图 12-18 查得

(16)、计算流动阻力

$$\Delta P = G^2 [(K_c + 1 - \sigma^2) + 2(\rho_2 / \rho_1 - 1) + f \rho_1 A / (A_f \rho_m - (1 - \sigma^2 - K_c) \rho_1 / \rho_2)] / (2 \rho_1) \dots (26)$$

(17)、确定是否满足 $t_s < [t_s]$, 如不满足, 需增大换热面积或增大空气流量。

确定是否满足 $\Delta P < [\Delta P]$, 如果不满足, 需减小冷板的阻力 (如选择阻力较小的齿形、增大齿解决等) 或重新选择压头较大的风扇。

7.3.4.2 设计计算: 已知功耗、冷却剂流量、压降和工作环境, 要求设计一个满足要求的冷板装置 (结构尺寸)

(1)、根据预设的冷板结构尺寸, 选取肋片参数, 肋片间距, 单位长度通道面积 A_{c0} , 单位长度、单位宽度的换热面积 A_{r0} , 初选风扇流量及压头。

传热计算

(2)、确定空气流过冷板后的温升:

$$\Delta t = Q / q_m C_p$$

(3)、确定定性温度

$$t_f = (2t_s + t_1 + t_2) / 4$$

冷板台面温度 t_s 为假定值

(4)、设定冷板的宽度为 b , 则通道的横截面积为 A_c

$$A_c = b \times A_{c0}$$

(5)、确定定性温度下的物性参数 (μ 、 C_p 、 ρ 、 P_r), 流体的质量流速和雷诺数

$$G = q_m / A_f$$

$$Re = d_c G / \mu$$

(6)、根据雷诺数确定流体的状态 (层流或紊流),

$$Re < 1800, \text{层流}$$

$$Re > 10^5, \text{湍流}$$

(7)、根据流体的状态 (层流或紊流) 计算考尔本数 J

$$Re < 1800, \text{层流} \quad J = 6 / Re^{0.98}$$

$$Re > 10^5, \text{湍流} \quad J = 0.023 / Re^{0.2}$$

也可以根据齿形及雷诺数从 GJB/Z 27-92 图 12-18 查得

(8)、计算冷板的换热系数

$$h = J G C_p P_r^{2/3}$$

(9)、计算肋片的效率

$$m = (2h / \lambda \delta)^{0.5}$$

$$\eta_f = th(m l) / m l \quad (\text{也可以根据 } m l \text{ 值查相应的图表得到肋片效率)}$$

(10)、计算冷板的总效率

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 79 页 共 80 页

忽略盖板及底版的效率, 总效率为:

$$A = A_t + A_r + A_b$$

$$\eta_0 = 1 - A_r(1 - \eta_f) / A$$

(11)、计算传热有效度

$$\varepsilon = (t_2 - t_1) / (t_s - t_1) \dots\dots\dots(33)$$

(12)、计算传热单元数

$$NTU = \ln(1 / (1 - \varepsilon)) \dots\dots\dots(34)$$

(13)、计算所需的传热面积

$$A = q_m C_p NTU / h \eta_0$$

(14)、计算冷板散热器的长度

$$D = A / A_{f0} b$$

流体流动阻力计算

(15)、计算流通面积与冷板横截面积之比

$$\sigma = A_f / A_c$$

(16)、查空气进入冷板时入口的损失系数 $K_e = f(Re, \sigma)$

根据雷诺数 Re 及 σ 从 GJB/Z 27-92 图 12-16 及图 12-16 查得

(17)、查空气流出冷板时出口的损失系数 $K_e = f(Re, \sigma)$

根据雷诺数 Re 及 σ 从 GJB/Z 27-92 图 12-16 及图 12-16 查得

(18)、查摩擦系数 $f = f(Re, \sigma)$

根据雷诺数 Re 从 GJB/Z 27-92 图 12-18 查得

(19)、计算流动阻力

$$\Delta P = G^2 [(K_e + 1 - \sigma^2) + 2(\rho_2 / \rho_1 - 1) + f \rho_1 A / (A_f \rho_m - (1 - \sigma^2 - K_e) \rho_1 / \rho_2)] / (2 \rho_1)$$

(20)、确定是否满足 $A < [A]$, 如果不满足, 重新设定 b 、 D 值, 重复进行上述计算, 直到满足条件为止。

确定是否满足 $\Delta P < [\Delta P]$, 如果不满足, 需减小冷板的阻力(如选择阻力较小的齿形、增大齿解决等)或重新选择压头较大的风扇。

7.4 强迫风冷产品热设计检查模板

7.4.1 元器件的选择、排列与安装时的热设计

- 是否了解元器件的热阻及极限结温?
- 是否了解元器件的安装力矩及接触热阻?
- 是否分清了热敏感元器件?
- 是否分清了发热量大的元器件?
- 热敏感元器件与发热量大的元器件排列安装是否合适?
- 发热量大的元器件是否采用了散热器进行冷却?
- 散热器选用是否合适? 设计是否合理? 易于生产吗?
- 发热元器件的引线应尽量短, 印制线应加宽。
- 接近发热元器件的树脂、线材等的耐热是否充分?
- 由于热引起的尺寸变化是否作了考虑?
- 元器件的排列是否考虑了烟囱效应?
- 元器件的安装方向是否最优?

结构设计规范	规范编码:	
	版本: V2.0	密级: 秘密
艾默生网络能源研发部	执笔人: 李泉明	页码: 第 80 页 共 80 页

- 是否将发热量大的元器件放在出风口处, 将热敏感元器件放在进风口处?

7.4.2 模块布局及结构的的热设计

- PCB 板的排列是否考虑了热? (发热量大的 PCB 不能紧挨排列)
- PCB 板是否垂直安装? 排列的距离是否合适?
- PCB 板的位置是否阻塞风道?
- 是否对气流进行了合理分配和控制, 以使所有的元器件都得到好处?
- 机箱的设计是否考虑了热? 选材利于散热吗?
- 机箱是否开有通风口?
- 通风口大小是否合适?
- 机箱内的流路是否通畅?
- 风扇的风量及压头是否合适?
- 风扇的种类是否合适?
- 风扇能否耐住模块内的温升?
- 风扇发生故障时, 是否有保护措施?
- 是采用抽风还是鼓风方式?
- 对风扇的噪音是否进行了考虑?
- 风扇更换是否方便?

7.4.3 机柜的热设计

- 机柜的选材是否有利于散热?
- 机柜是否开有通风口?
- 通风口的大小合适吗?
- 是否考虑了模块间的热影响?
- 是否充分利用了烟囱效应?