

中型电机冷却系统的流阻计算

石 斌

安徽德科电气科技有限公司 安徽 合肥 231501

【作者简介】

石 斌 男 1973 年 9 月 3 日 山东省淄博市人 汉 专科 中级工程师 研究方向:机械制造与设计

DOI:10.18686/jxgc.v1i4.20162

【摘要】本文为满足中型电机通风冷却系统的设计需要而编写,着重于冷却系统风阻及其压降损失的理论分析,并且包含了较为系统全面而实用的计算公式。

【关键词】中型电机;通风冷却;风阻计算

0 引言

电机冷却系统各回路中冷却介质流阻是冷却系统的重要指标。在满足冷却系统通风冷却的一般需要时,对应冷却回路的流阻一般倾向于选用较小尺寸的冷却风扇,从而即能降低通风噪声,又可以提高冷却系统通风效率,降低整机的通风损耗。因此,对冷却回路中的流阻进行定量核算,对于提高电机效率具有重要意义。特别是对于大中型电机,尤其有必要。

1 理论基础

1.1 流阻的分类与流阻计算模型

流体在管道中流动时,伴随着流体中包含的机械能(即总压力,也称水头,包括静压与动压)常常会产生某种程度的损耗。根据产生的部位和原因不同,损耗一般可分为两类:摩擦损耗(即沿程阻力损耗)、局部损耗。

在循环回路中,沿程阻力和局部阻力通常总是同时并存的。有时局部压力损失相对很小,可以略去不计,这种管被称为长管;局部阻力不能略去的管子就称为短管。一般来说,电机工程中短管流动占主要地位,而大中型封闭式电机的空空冷却系统则可能包含长管流动,有时沿程阻力还相当大。

1.2 流阻压降计算的一般形式

根据流体力学理论,理想流体在稳态运动过程中,从过流断面 1 到过流断面 2 流动产生的压力降表示为:

$$\Delta P = (p_1 - p_2) + (\gamma_1 h_1 - \gamma_2 h_2) + \frac{(\rho_1^2 v_1^2 - \rho_2^2 v_2^2)}{2g} \quad (\text{N/m}^2)$$

这是以压力形式表示的单位体积内流体总能量的变化情况。另外还能以对应产生的压头变化表示为:

$$\Delta H = \left(\frac{p_1}{\gamma_1} - \frac{p_2}{\gamma_2} \right) + (h_1 - h_2) + \frac{(v_1^2 - v_2^2)}{2g} \quad (\text{m})$$

这是以压头(即以某一流体高度来表示此流体具有的压力的表示方法)表示的流体单位重量内所包含的能量的变化。

上两式中

h_i — 为高程,即两指定断面位置的高度差(m);

p_i — 指定断面位置处的压力(N/m²);

γ_i — 指定断面位置处的流体的重度(N/m³);

v_i — 指定断面位置处的流速(m/s);

g — 重力加速度,9.81m/s²;

p_i / γ_i — 指定断面位置处的静压头(m);

$v_i^2 / (2g)$ — 动压头。

在电机冷却系统中,流体在运动过程中高度位置变化不大时,特别是对于空气等轻质流体,其对应重力的位能 $\Delta h \gamma$ 可以略去不计,于是以上两公式可分别简化为:

$$\Delta P = (p_1 - p_2) + \frac{(\rho_1^2 v_1^2 - \rho_2^2 v_2^2)}{2g}$$

$$\Delta H = \left(\frac{p_1}{\gamma_1} - \frac{p_2}{\gamma_2} \right) + \frac{(v_1^2 - v_2^2)}{2g}$$

注:①常用参数:

1个标准大气压(760mmHg 或 10332mmH ₂ O 或 406.8inH ₂ O 或 101325Pa 或 1.0332 表压)下, 不同温度空气的重度						
空气温度(°C)	0	10	20	30	40	50
密度 ρ_0 (kg/m ³)	1.293	1.247	1.2045	1.165	1.1267	1.093
重度 γ_0 (N/m ³)	12.684	12.233	11.816	11.429	11.053	10.722
空气温度(°C)	60	70	80	90	100	
密度 ρ_0 (kg/m ³)	1.059	1.029	0.9998	0.972	0.9458	
重度 γ_0 (N/m ³)	10.389	10.094	9.808	9.535	9.278	

压力不变时,气体的密度随温度变化的关系(近似计算):

$$\rho_t = \rho_0 / (1 + 0.00367\Delta t) \quad (\text{kg/m}^3)$$

$$\gamma_t = \gamma_0 / (1 + 0.00367\Delta t) \quad (\text{N/m}^3)$$

温度不变时,气体在不同压力下的密度计算:

$$\rho_H = \rho_0 H / 760 \quad (\text{kg/m}^3)$$

$$\gamma_H = \gamma_0 H / 760 \quad (\text{N/m}^3)$$

如果压力、温度都发生变化,可是用下列计算公式:

$$\rho_0 v_0 / T_0 = \rho_1 v_1 / T_1 = \rho_2 v_2 / T_2 = R \quad (\text{标准温度 } T_0 = 273.15\text{K, 即 } 0^\circ\text{C}.)$$

空气的气体常数 $R = 29.28 \text{kgf} \cdot \text{m} / (\text{kg} \cdot \text{K})$

②液体的密度随温度和压力的变化较小。在压力不大时(如十几个大气压力),液体的密度可以认为与压力无关。

③在考虑温度不变,随压力增加流体体积的压缩性时,应注意:

对于液体,除对压力变化很大的问题,如水锤等问题外,一般认为不可压缩;

对于气体,虽然压缩性很大,但压力变化较小时,可以不计密度的变化。通常把马赫数 $M \leq 0.3$ 的气体流动问题看成是不可压缩流体问题来处理。对于空气流动,当速度 $\leq 100 \text{m/s}$ 时,可以看成是不可压缩的气体。在电机工程中进行通风计算时,可以利用这以原则。

④常见流体的体积膨胀系数 α (体积随温度升高而增大的程度):

流体	α			
	空气	水	润滑油	
压力 1000mmHg (温度 0~100°C)	0.003673	—	—	
1个 大气压	0~10°C	—	0.14E-4	—
	10~20°C	—	1.5E-4	—
	20°C	—	—	(8.5~9)E-4
	20~50°C	—	4.22E-4	—
	90~100°C	—	7.19E-4	—

2 流阻压降的局部计算

冷却回路在某种程度上和电路相似,冷却介质流阻压降相当于电压降,其流量相当于电流;将冷却回路分解简化后,其中的局部流阻之间也存在串、并联关系。但是,由于流阻压降与介质流量之间的关系不是线性关系,以及流体的固有特性,使得冷却回路的计算比电路复杂得多。

一般来说,在为电机设计冷却系统时,冷却系统的尺寸可以根据电机的总损耗以及电机的尺寸进行初步推算。

首先,电机冷却系统中冷却介质的总流量可按下式计算:

$$Q = \frac{\sum p_h}{c_a \theta_a} \times 10^2 \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

其中: $\sum p_h$ — 电机的总损耗(kW);

c_a — 冷却介质的比热($\frac{\text{J}}{\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}}$);对于空气,按一般情况, $c_a = 1.1 \frac{\text{J}}{\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}}$;

θ_a — 冷却介质冷却电机后获得的温升($^\circ\text{C}$),一般可取为 $15 \sim 20^\circ\text{C}$ 。

接下来,根据冷却介质总流量 Q 、冷却系统的结构特征及尺寸,可进行冷却回路流阻及其流阻压降的详细计算。

2.1 冷却回路中摩擦损耗计算

在摩擦损耗大的部位,流体本身固有的黏滞性表现突出,流体内部出现速度分层,不同层面的流体相互之间摩擦力较大,主要引起流体静压力的损失。







一般表示为 $p_1 - p_2 = \Delta p$ 。其中 p_1 为头端压力, p_2 则是尾端压力, Δp 就是管道摩擦引起的压力损耗。

(1)管道中的摩擦损耗一般以圆管内径为基准进行计算,非圆形截面管道应先计算等效直径(也称水力直径): $d_s = 4A / x$ (mm)

式中, A — 过流断面面积(mm^2);

x — 湿周,即在过流断面上,被流体浸润的固壁周线长(mm)。

常用过流断面的水力直径如下表所示:

水力直径 d_s	特征尺寸	过流断面形状	水力直径 d_s	特征尺寸	过流断面形状
d	内径 d		$\frac{b}{\sqrt{3}}$	等边长 b	
a	等边长 a		$D - d$	大直径 D 小直径 d	
$\frac{2ab}{a+b}$	边长 $a \times b$		$2h$	间隙 h	

(2)圆形管道中,由于摩擦所引起的压力降落:

$$\Delta P = \zeta \frac{\gamma}{2g} v^2$$

式中 ζ —为摩擦损耗系数, $\zeta = \lambda l - d_s$;
 λ —摩擦系数; l —管道长度; d_s —水力直径。

注:①若 $\zeta = 0.5$,就表示静压力的损耗为动压力的一半。

②摩擦损耗并不与 v^2 成正比,因为摩擦系数 λ 也是速度 v 的函数。在层流及紊流的初期, λ 随流速的增加而减小,并和管壁的光滑程度有关;而当达到完全紊流后, λ 只与管壁的光滑程度有关,与流速无关。

在电机中,由于空间体积的限制,以及旋转部件的作用,部分冷却回路中的空气或其他流体总是处于紊流状态。因此,一般情况下, $\lambda = 0.02 \sim 0.0065$ 。对于管壁光滑的金属管道取下限,对于粗糙的管道,例如由叠片形成的管道取上限。

当不知道流动介质是否处于紊流状态时,可通过流体流动状态参数—雷诺数来表征:

$$R_e = v d_s - u = v \rho d_s - \eta \quad (\text{无量纲})$$

式中 v —流速(m/s); ρ —流体密度(kg/m^3);
 d_s —管道水力直径(m);

u —运动黏度(m^2/s);

η —动力黏度($\text{kgf} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 或 $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$)。

不同温度下空气动力黏度表如下所示:

1个标准大气压(760mmHg 或 10332mmH ₂ O 或 406.8inH ₂ O 或 101325Pa 或 1.0332 表压)下, 不同温度空气的动力黏度 $\eta \times 10^{-6}$ ($\text{kgf} \cdot \text{s}/\text{m}^2$)						
空气温度(°C)	0	10	20	30	40	50
η	1.75	1.82	1.86	1.91	1.96	1.99
空气温度(°C)	60	80	100			
η	2.05	2.14	2.22			

一般来说,气体的黏度随温度升高而增大。压力不变时,不同温度下气体的动力粘度 η 的一般计算公式:

$$\eta = \eta_0 \frac{273+c}{T+c} \left(\frac{T}{273}\right)^{3/2} \quad (\text{kgf} \cdot \text{s}/\text{m}^2 \text{ 或 } \text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}))$$

式中, η_0 —1个标准大气压、0°C时气体的动力黏度($\text{kgf} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 或 $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$);

T —气体的绝对温度 K ($T = t + 273$, t 为摄氏温度°C);

c —校正系数, $c=124\text{K}$ 。(注:不同气体的 c 值不同)

一般来说,当 $R_e < 2300$ 时为层流, $R_e > 2300$ 时为紊流。

③摩擦系数 λ 值的较详细计算方法如下:

首先应已知管道的绝对粗糙度 Δ (常用管材的一般特征见下表),之后根据 Δ 、冷却介质的 R_e 计算 λ 。

管道形式及特征	$\Delta(\text{mm})$	管道形式及特征	$\Delta(\text{mm})$
电机定子铁心冲制的轴向通风孔	0.4~0.5	一般镀锌钢管	0.12~0.15
电机转子钻制的轴向孔道	0.2~0.3	轻微锈蚀钢管	0.1~0.2
热交换器黄铜管	0.03~0.06	一般的涂沥青的钢管	0.1~0.2
新的热轧无缝钢管或纵缝焊接钢管	0.05~0.10		

另外,微观上客观存在管壁薄层流动,被称为层流底层,圆管层流底层厚度

$$\delta_n = \frac{30d_s}{R_e \sqrt{\lambda}}, \Delta \leq 0.25 \delta_n \text{ 时即可作为流动光滑管,}$$

不必计算水头损失了; $\Delta > 0.25 \delta_n$ 时被称为流动粗糙管,必须考虑管壁粗糙度的影响。

圆截面管流沿程阻力系数 λ 的计算公式			
流动状态	雷诺数 R_e	λ 的计算公式	管壁粗糙度
层流	$R_e \leq 2300$	$\lambda = 64 / R_e$	
紊流	流动光滑区 $3 \times 10^3 < R_e < 10^5$	$\lambda = 0.31446 / R_e^{0.25}$	$\Delta \leq 0.25 \delta_n$
	过渡区 $3 \times 10^3 < R_e < 4 \times 10^6$	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg(R_e \sqrt{\lambda}) - 0.8$	
	阻力平方区	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg\left(\frac{d}{2\Delta}\right) + 1.74$	$\Delta > 6 \delta_n$

注:
* 逐次逼近计算求 λ , 初次可用 $\lambda = 0.03$ 代入。

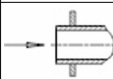
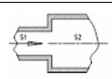
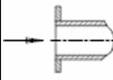
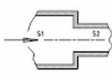
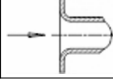
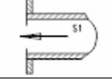
2.2 冷却回路的局部损耗计算

电机冷却系统的短管流阻计算中,局部损耗所占的比重很大,往往是流阻计算的核心内容。局部损耗主要表现为流体动压力的损耗。以流体的动压力为基准表示为:

$$\Delta p = \zeta \frac{\gamma}{2g} v^2$$

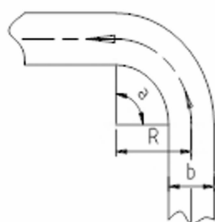
其中, ζ 为局部损耗系数,它在几何相似的管道中,是一个常数。 Δp 与 v^2 成正比,并且也表现为流体静压力的减小。常见管道结构形式及其局部损耗系

数 ζ 计算方法如下:

名称	图例	ζ	名称	图例	ζ
入口种类		0.7~1	管截面扩大		$(1 - \frac{S_1}{S_2})^2$
		0.5	管截面缩小		$0.5(1 - \frac{S_2}{S_1})$
		0.2~0.05	出口		1

另外, 顺滑方管弯头的局部损耗系数估算方法为:

$$\zeta = K \zeta_{90}$$



其中, K 值按下表选取:

a	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
K	0.40	0.55	0.65	0.75	0.83	0.88	0.95
a	90°	100°	120°	140°	160°	180°	
K	1.0	1.05	1.13	1.20	1.27	1.33	

ζ_{90} 值按下表选取:

b/2R	0.1	0.3	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
ζ_{90}	0.12	0.18	0.40	0.64	1.02	1.55	2.27	3.23

3 冷却系统复杂回路中流阻的合成与回

3.1 流阻的实用计算形式

电机冷却回路一般都由可以细化为多个管段, 这些管段之间可能形成较为复杂的串、并联关系, 各管段中的包含的流阻分别对应上述产生摩擦损耗的摩擦风阻以及产生局部损耗的扩大风阻、缩小风阻、转弯风阻、入口风阻和出口风阻。为了便于手工计算, 一般将流阻压降表示为:

$$\begin{aligned} \Delta P &= \zeta \frac{\gamma}{2g} v^2 = \zeta \frac{\gamma}{2gS^2} (Sv)^2 = \zeta \frac{\gamma}{2gS^2} Q^2 \\ &= \zeta \frac{0.5\rho}{S^2} Q^2 = ZQ^2 \end{aligned}$$

【参考文献】

- [1] 电机工程手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
[2] 陈世坤, 电机设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.

其中, Q—流管内冷却介质的流量;

ρ —冷却介质的密度;

S—管道的截面积; 当管道截面变化时, 则只对应于小截面面积;

$$Z = \zeta \frac{\gamma}{2gS^2} = \zeta \frac{0.5\rho}{S^2} \text{ 即为各段管道的流阻。}$$

由于 Q、S、 ρ 已知, ζ 也可针对回路的不同管段对应求解。当冷却回路结构比较复杂时, 可以依照本文下面的规则进行较为清晰的推算。

3.2 流阻的串、并联合成计算与总流阻计算

当冷却回路简化为以流阻的串、并联形式组合成流阻联结图后, 可根据流阻之间的串、并联关系进行逐次合成, 进而最终计算出总流阻。

当流阻 Z_1 、 Z_2 、 \dots 、 Z_n 共同串联形成支路时, 支路两端的合成流阻为:

$$Z_d = \sum_1^n Z_n$$

如果 n 个流阻 Z_1 、 Z_2 、 \dots 、 Z_n 形成 n 路并联支路, 则支路两端的合成流阻为:

$$Z_d = \frac{1}{\left(\sum_1^n \frac{1}{\sqrt{Z_n}}\right)^2}$$

4 电机冷却回路计算流阻的意义

(1) 冷却回路中, 上述计算所得的流阻压降 $\Delta P = ZQ^2$ 对于冷却回路升压装置的设计具有重要意义。

对于冷却风扇而言, 可根据额定工作状态下的压力 $H = \Delta P$, 进而确定冷却风扇的结构尺寸。

(2) 冷却系统中, 为推动冷却介质所消耗的功率

$$P_v = Q \cdot \Delta p = ZQ^3$$

其中, Q—冷却回路的介质流量;

Δp —冷却回路中介质的总流动压降;

Z—冷却回路的介质总流阻。

在此基础上, 结合冷却回路升压装置的效率 η , 即可计算出对应回路中的电机通风冷却损耗 $P_{fv} = P_v / \eta$ 。