

## 电动机的发热计算

叶金虎

(中国电子科技集团第二十一研究所, 上海 200233)

电动机运行时产生的各种损耗将主要转变为热能, 使电动机的各组成部分的温度升高。由于各组成部分在电动机内部所处的位置不同, 它们各自的温度也不同。电动机各发热部分的温度与周围环境温度之差称为温升。

电机的发热计算主要解决电机的温升计算问题。电机的工作状态主要有两种: 一种是连续工作状态, 电机将持续工作无限长时间, 这时电机的温升被称之为稳定温升; 另一种是断续的工作状态, 这时电机的温升被称之为不稳定温升。

在研究电机的发热过程时, 我们要假设所研究的某一部分, 例如铁心或绕组等, 是一个均匀物体。假定某一个均匀物体在单位时间内产生的热量为  $Q$ , 它的一部分热量将使该物体的温度升高, 另一部分热量将散发到周围介质中去。根据能量守恒原则, 若以  $C$  表示某一个物体的热容量, 以  $\theta$  表示该发热物体表面相对于周围介质的温升, 我们就可以写出该发热物体的能量平衡方程式:

$$Q dt = C d\theta + \alpha_s S \theta dt, \quad (1)$$

式中,  $C$  是发热物体的热容量, 即物体每升高  $1^\circ\text{C}$  所需要的热量,  $C = cG$ ,  $c$  是该发热物体的比热,  $G$  是该发热物体的质量;  $\alpha_s$  是该发热物体的表面散系数,  $\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , 即当该发热物体的表面与周围介质温差为  $1^\circ\text{C}$  时, 单位时间内由单位表面积散发到周围介质中去的热量;  $S$  是该发热物体的表面散面积,  $\text{cm}^2$ 。

当一个物体的发热达到稳态时, 该物体就达到稳定温升  $\theta_\infty$ , 这时, 温升不再发生变化, 即有  $C d\theta = 0$ , 式(1)将变成如下的形式:

$$Q dt = \alpha S \theta_\infty dt, \quad (2)$$

$$\theta_\infty = \frac{Q}{\alpha_s S}。 \quad (3)$$

式(3)表示: 某一发热物体的稳定温升仅取决于由它所产生的热量、它的散热表面积和表面散热系数, 而与该发热物体的重量、比热和初始温度无关。

对式(1)求解, 可以得到任一时刻的温升  $\theta$  的通解:

$$\theta = \theta_0 + (\theta_\infty - \theta_0) (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (4)$$

式中,  $\theta_0$  为起始温升;  $T$  为某一个均匀物体的发热时间常数, 其值为  $T = C/\alpha_s S$ 。

式(4)可以用图 1 所示的曲线来描述。由此可

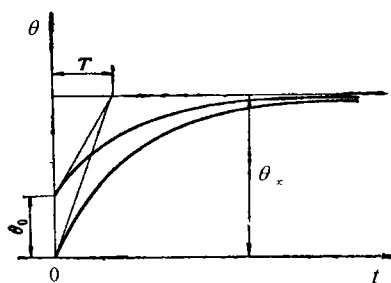


图 1 均质物体的发热曲线

见, 电机的温升是随着时间按指数规律变化的。从理论上讲, 要经过无穷大时间, 才能达到稳定状态的温升, 但在实际上,  $t = (4 \sim 5)T$  时温升就已经很接近稳定值了, 例如, 当  $t = 4T$  时,  $\theta = 0.982\theta_{\infty}$ 。由于发热时间常数  $T = C/\alpha_s S$ , 电机的热容量  $C$  愈大和散热量  $\alpha_s S$  愈小时, 时间常数  $T$  就愈大, 也就是说电机达到稳定温升所需要的时间愈长。

电机各部分的温升都有一定的限度, 它们受到不同绝缘材料的耐热性能的限制, 例如导线的允许温升由导线绝缘材料的耐热程度而定; 铁心的允许温升由硅钢片表面的涂复漆膜(或氧化层)和槽绝缘的耐热程度而定。表 1 给出了不同等级绝缘材料的耐热范围。当电机各部分的温升, 尤其是电枢绕组的温升超过其允许值时, 绝缘材料将被加速老化, 直至损坏, 电机的使用寿命也将大大缩短。

表 1 不同等级的绝缘材料的允许工作温度范围

绝缘等级	允许工作温度	常用材料
<i>Y</i>	90℃	未经浸渍的天然有机材料, 如棉纱、丝绸、纸、木材等。
<i>A</i>	105℃	沥青、虫胶漆、漆布、漆绸、沥青漆、油溶性漆包线等, 以及经过浸渍处理过的 <i>Y</i> 级绝缘材料。
<i>E</i>	120℃	缩醛漆包线漆、聚酯薄膜青壳纸复合绝缘、酚醛清漆等。
<i>B</i>	130℃	聚酯漆包线漆、聚酯薄膜、聚酯无纺布、云母带、经 <i>B</i> 级绝缘漆处理过的玻璃纤维及其制品、三聚氰胺酸漆、环氧无溶剂漆等。
<i>F</i>	155℃	聚酯亚胺漆包线漆、聚酰亚胺漆包线漆、芳香族聚酰胺纤维纸复合箔(NMN)、环氧酚醛玻璃布板、聚酯浸渍漆等。
<i>H</i>	180℃	硅有机类及等材料, 如硅有机漆、硅橡胶、聚酰亚胺漆包线漆、聚酰亚胺薄膜、以及硅有机漆处理过的玻璃制品等。
<i>C</i>	180℃以上	主要是一些无机材料, 如云母、陶瓷、玻璃等。

## 1 热量的传导和绝缘层的温度降落

电动机通电后, 发热的电枢绕组不可能把热量直接传送给冷却空气, 而是从绝缘层的内表面传至外表面, 再传送给定子铁心, 或经由绕组端部表面把热量散发给冷却空气。首先我们来分析热量传导的物理过程, 当热量  $Q$  由绝缘层的内表面传至外表面时, 将会在传导的路径上建立起一个温差  $\theta_{H3}$ , 换言之, 热量  $Q$  是在温差  $\theta_{H3}$  的驱动下由绝缘层的内表面传至外表面的, 这一物理过程可以由下列公式来描述:

$$Q = \theta_{H3} \frac{S\lambda}{\delta_{H3}}, \quad (5)$$

或

$$\theta_{H3} = \frac{Q}{S} \cdot \frac{\delta_{H3}}{\lambda} \text{ [}^\circ\text{C]}, \quad (6)$$

式中,  $Q$  为电枢绕组产生的热流量, W;  $\delta_{H3}$  为绝缘层的厚度, cm;  $S$  是与热流量相垂直的截面积, cm<sup>2</sup>;  $Q/S$  是单位面积的热流量, 称为比热流量, W/cm<sup>2</sup>;  $\lambda$  为热流量传导路径的热导率, 或称导热系数, W/(cm·℃), 其物理意义为: 当绝缘层厚度为 1 cm、绝缘层的导热面积为 1 cm<sup>2</sup> 和绝缘层两侧的温差为 1 ℃时, 则单位时间内通过该绝缘层的热流量为  $\lambda$ 。电机中常用的不同

材料的热导率如表 2 所列。由表 2 中数据可知，很薄的静止空气的热导率  $\lambda \approx 0.000\ 25$ ，比一般绝缘材料的热导率小了近 10 倍，因此电枢绕组必须浸漆处理，以便尽量把绕组绝缘层内的空气层消除掉。

表 2 不同材料的热导率

材料名称	$\lambda / \text{W} \cdot (\text{cm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$
紫铜	3.86
铝	2.0
硅钢片	0.63
涂漆硅钢片(沿着热流穿过漆层的方向)	0.012
云母	0.0024
层压板	0.001
漆布	0.0021
浸漆玻璃丝带	0.0022
石棉	0.0015
很薄的静止空气	0.00025
油	0.0015

通常，式 (5) 被称之为热流欧姆定律，可以与电流欧姆定律一一对应， $\theta_{H3}$  是热路上的温度落差，对应于电路中的电压降落  $U$ ； $Q$  是垂直于截面  $S$  的热流量，对应于电路中的电流  $I$ ； $\frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\delta_{H3}}{S}$  是通过热流量的热路的热阻，对应于电路中的电阻  $\rho \frac{l}{S}$ ；热导率  $\lambda$  对应于导电率  $\frac{1}{\rho}$ 。因此，公式 (5) 可以改变成：

$$R_{H3} = \frac{\theta_{H3}}{Q} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\delta_{H3}}{S}, \quad (7)$$

或

$$\Lambda_{H3} = \frac{1}{R_{H3}} = \frac{\lambda S}{\delta_{H3}} \quad (8)$$

在采用多层组合绝缘的情况下，总的温度降落等于每一层各自的温度降落之和，因此，多层组合绝缘的热阻等于每一层各自的热阻之和，即有

$$R_{H3} = R_{H31} + R_{H32} + \cdots + R_{H3n},$$

式中， $R_{H3n}$  是第  $n$  层绝缘的热阻， $R_{H3n} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\delta_{H3}}{S}$ 。

因为， $S_1 = S_2 = \cdots = S_n$ ，所以有

$$\frac{\delta}{\lambda} = \frac{\delta_{H31}}{\lambda_1} + \frac{\delta_{H32}}{\lambda_2} + \cdots + \frac{\delta_{H3n}}{\lambda_n}$$

式中， $\delta = \delta_{H31} + \delta_{H32} + \cdots + \delta_{H3n}$ ； $\lambda$  是多层组合绝缘的合成热导率，可以按下式计算：

$$\lambda = \frac{\delta_{H31} + \delta_{H32} + \dots + \delta_{H3n}}{\frac{\delta_{H31}}{\lambda_1} + \frac{\delta_{H32}}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_{H3n}}{\lambda_n}}, \quad (9)$$

式中,  $\delta_{H31}$ ,  $\delta_{H32}$  是各绝缘层的厚度, cm;  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ , ... 是各绝缘层的热导率。

在实际的热计算过程中, 对于多层组合绝缘而言, 在大量试验数据的基础上, 可以采用下列数值的合成热导率:

对于 A 级绝缘而言,  $\lambda = 0.0010 \text{ W}/(\text{°C} \cdot \text{cm})$ ;

对于 B 级绝缘而言,  $\lambda = 0.0016 \text{ W}/(\text{°C} \cdot \text{cm})$ 。

下面, 我们来讨论电枢绕组通电后, 其嵌埋在定子铁心槽内的有效部分导体通过槽绝缘传导热流量的具体情况和计算方法。

根据式 (6) 来计算热流量在槽绝缘层上形成的温差  $\theta_{H3}$  时, 可以首先求取它的比热流量  $\alpha_{H3}$ :

$$\alpha_{H3} = \frac{Q}{S} = \frac{P'_{Cu(\alpha)}}{Z\Pi_Z l_a}, \quad (10)$$

式中,  $P'_{Cu(\alpha)}$  是电枢绕组在定子铁心槽内直线部分的铜损耗, 可以按下式估算:

$$P'_{Cu(\alpha)} = P_{Cu} \frac{l_a}{l_{\frac{1}{2}cp}},$$

$P_{Cu}$  是电枢绕组的铜损耗, W;  $Z$  是电枢铁心的槽数;  $\Pi_Z$  是槽壁的周长, cm;  $l_a$  是电枢铁心的长度, cm;  $l_{\frac{1}{2}cp}$  是电枢绕组的半匝长度, cm。

对公式 (10) 进行适当的改造, 可以得到:

$$\alpha_{H3} = \frac{P'_{Cu(\alpha)}}{Z l_a} \cdot \frac{t}{\Pi_Z} = \frac{P_{Cu} \cdot \frac{l_a}{l_{\frac{1}{2}cp}}}{\pi D_a l_a} \cdot \frac{t}{\Pi_Z}, \quad (11)$$

式中,  $t$  是电枢铁心的齿距, cm;  $Zt = \pi D_a$  是电枢铁心内孔的园周长, cm;  $Z l_a = \pi D_a l_a$  是电枢铁心内园的表面积,  $\text{cm}^2$ 。

同时, 根据比热负荷  $\alpha$  的定义: 电枢铁心内孔表面  $1 \text{ cm}^2$  上所承受的电枢绕组在定子铁心槽内的直线部分产生的电 (铜) 损耗, 我们可以写出电枢铁心内园表面的比热负荷  $\alpha$  的表达式为:

$$\alpha = \frac{P_{Cu} \cdot \frac{l_a}{l_{\frac{1}{2}cp}}}{\pi D_a l_a} = \frac{\rho A \Delta}{100}, \quad (12)$$

式中,  $\rho$  是电枢导体的电阻率,  $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ;  $A$  是电枢内园表面的线负荷, A/cm;  $\Delta$  是电枢导体的电流密度, A/mm<sup>2</sup>。把公式 (12) 代入公式 (11), 可得:

$$\alpha_{H3} = \frac{P'_{Cu(\alpha)}}{Z l_a} \cdot \frac{t}{\Pi_Z} = \frac{P_{Cu} \cdot \frac{l_a}{l_{\frac{1}{2}cp}}}{\pi D_a l_a} \cdot \frac{t}{\Pi_Z} = \frac{\rho A \Delta}{100} \cdot \frac{t}{\Pi_Z}, \quad (13)$$

考虑到在下列条件下的电阻率  $\rho$  和热导率  $\lambda$ ：对于 A 级绝缘(100℃)的电枢绕组而言，

$$\lambda = 0.0010 \text{ W/}^\circ\text{C}\cdot\text{cm}, \quad \rho = \frac{1}{42.5} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m};$$

对于 B 级绝缘(120℃)的电枢绕组而言，

$$\lambda = 0.0016 \text{ W/}^\circ\text{C} \cdot \text{cm}, \quad \rho = \frac{1}{40} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m},$$

最后，把公式(13)代入公式(6)，可得：对于 A 级绝缘的电枢绕组而言，即有

$$\theta_{H3} = \frac{A \Delta t \delta_{H3}}{4.25 \Pi_z}, \quad (14a)$$

对于 B 级绝缘的电枢绕组而言，即有

$$\theta_{H3} = \frac{A \Delta t \delta_{H3}}{6.4 \Pi_z}。 \quad (14b)$$

## 2 对流散热和表面温差

当冷却介质吹拂电机的发热表面时，就会把热量带走，这就是对流散热。带走的热量  $Q$  与散热面积、发热表面与冷却介质之间的温差和表面散热系数成正比，即可以用如下的关系式来描述：

$$Q = \theta_\alpha \alpha S \text{ [W]}, \quad (15)$$

式中， $\alpha$  是发热表面在平静空气中的散热系数， $\text{W/}^\circ\text{C}\cdot\text{cm}^2$ ，其物理意义为：当发热表面与冷却介质之间的温差为  $1^\circ\text{C}$  时，在单位时间内单位散热表面所能散发的热量； $S$  是散热表面积， $\text{cm}^2$ ； $\theta_\alpha$  是发热表面与冷却介质之间的温差， $^\circ\text{C}$ 。

公式(15)可以改写成：

$$\theta_\alpha = Q \frac{1}{\alpha S} \quad (16)$$

对应于绝缘体的传导热阻，我们引入一个表面散热的热阻  $R_\alpha$ ，即为：

$$R_\alpha = \frac{1}{\alpha S}。 \quad (17)$$

不同发热表面在静止空气中的散热系数  $\alpha$ ， $\text{W/}^\circ\text{C}\cdot\text{cm}^2$ ，如表 3 所列。

表 3 不同发热表面在静止空气中的散热系数  $\alpha$

表面特征	散热系数 $\alpha / \text{W} \cdot (^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^2)^{-1}$
打腻子 and 涂漆的生铁或钢的表面(电机的机壳和轴承座)	$1.42 \times 10^{-3}$
不打腻子，也不涂漆的生铁或钢的表面	$1.67 \times 10^{-3}$
铜材的涂漆表面	$1.33 \times 10^{-3}$

散热系数  $\alpha$  主要与吹拂过散热表面的气流速度有关，当风速  $v$  在  $5 \sim 25 \text{ m/s}$  范围之内时，散热系数  $\alpha_v$  可以按下式计算：

$$\alpha_v = \alpha (1 + k_0 v) \quad (18)$$

式中， $\alpha$  是发热表面在平静空气中的散热系数， $\text{W/}^\circ\text{C}\cdot\text{cm}^2$ ； $v$  是气流速度， $\text{m/s}$ ； $k_0$  是一个考虑

气流吹拂效率的系数，对于旋转转子的外表面而言， $k_0 \approx 0.1$ ；对于电枢绕组的端部而言， $k_0 \approx 0.05 \sim 0.07$ 。

把公式(18)代入公式(16)，可以得到：

$$\theta_\alpha = \frac{Q}{\alpha_v S}。$$

### 3 稳定状态时的等效热路图

电枢绕组由两部分所组成：嵌埋在电枢铁心槽内的有效导体和直接暴露在铁心外面的端部导体。当电枢电流通过电枢绕组时，电流在电枢绕组的电阻上产生的铜耗将以热量  $Q_{Cu}$  的形式通过两条道路传送和散发出去：一条道路是直接暴露在铁心外面的端部导体所产生的热量  $Q_1$ ，将以辐射和对流的方式在周围介质中散发；另一条道路是嵌埋在电枢铁心槽内的有效导体所产生的热量  $Q_2$ ，将经由槽绝缘层传送给定子铁心。电机运行时，交变磁通在定子铁心中产生的铁耗也将以热量  $Q_{Fe}$  的形式通过两条道路传送和散发出去：一条道路是通过槽绝缘层，与电枢绕组内的损耗进行热交换；另一条道路是一部分热量  $Q_3$  在铁心表面以辐射和对流的方式在周围介质中散发。上述发热过程可以用图 2 所示的等效热路图来描述。

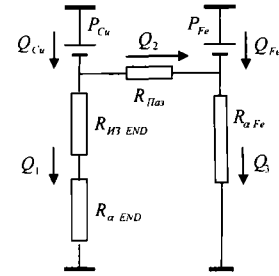


图 2 等效热路图

同时，根据图 2 所示的等效热路图，可以写出下列方程组：

$$Q_{Cu} = Q_1 + Q_2, \quad (19)$$

式中， $Q_{Cu}$  是电枢绕组内铜耗产生的热通量， $Q_{Cu} = P_{Cu}$ ，W。

公式(19)中第一部分热通量  $Q_1$  通过电枢绕组的端部热阻向周围的冷态空气散发，形成温度降落  $\theta_w$ ：

$$\theta_w = Q_1 (R_{H3-END} + R_{\alpha-END}) = R_1 Q_1, \quad (20)$$

式中， $R_1 = R_{H3-END} + R_{\alpha-END}$ ； $R_{H3-END}$  是由电枢绕组的端部绝缘的厚度所决定的热阻， $R_{H3-END} = \frac{\delta_{H3-END}}{\lambda_{H3} S_{H3-END}}$ ； $R_{\alpha-END}$  是电枢绕组的端部冷却表面的热阻， $R_{\alpha-END} = \frac{1}{\alpha_{END} S_{\alpha-END}}$ 。

公式(19)中第二部分热通量  $Q_2$  将沿着槽绝缘的厚度造成温度降落  $\theta_{\Pi a3}$ ：

$$\theta_{\Pi a3} = Q_2 R_{\Pi a3}, \quad (21)$$

式中， $R_{\Pi a3}$  是对应于槽绝缘的热阻， $R_{\Pi a3} = \frac{\delta_{H3-\Pi a3}}{\lambda_{H3} S_{H3-\Pi a3}}$ 。

根据图 2，将有：

$$Q_3 = Q_{Fe} \pm Q_2, \quad (22)$$

式中， $Q_{Fe}$  是电枢铁心内铁耗产生的热通量，W。

电枢铁心相时冷却空气的温升  $\theta_{Fe}$  按下式计算：

$$\theta_{Fe} = Q_3 R_{\alpha-Fe}, \quad (23)$$

式中,  $R_{\alpha \cdot Fe}$  是电枢铁心相对冷却空气的热阻,  $R_{\alpha \cdot Fe} = \frac{1}{\alpha_{EFe} S_{\alpha \cdot Fe}}$ 。

对于由热阻所组成的闭合回路, 可以写出如下的方程式:

$$R_1 Q_1 = Q_1 (R_{H3 \cdot END} + R_{\alpha \cdot END}) = Q_2 R_{H3} + Q_3 R_{\alpha \cdot Fe} \quad (24)$$

在上述公式(19)、(20)、(21)、(22)、(23)和(24)所表示的六个方程式中, 含有  $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$ 、 $\theta_W$ 、 $\theta_{H3}$  和  $\theta_{Fe}$  六个未知数。通过对这六个方程组求解, 就下以求得稳态条件下的  $\theta_W$  和  $\theta_{Fe}$ 。在求解过程中, 如果得到  $Q_2 < 0$ , 则表示: 电枢铁心的温升  $\theta_{Fe}$  高于电枢绕组的温升  $\theta_W$ 。

#### 4 稳定状态时的简化热计算公式

电机运行时的各种内部损耗是各种大小不同的热源, 它们以各自不同的路径和方式向周围冷却介质发散, 从而形成了一个以多个不同热源为核心的热场。因此, 电机中的实际发热情况和散热路径是很复杂的, 等效热路图与实际热场之间存在着较大的差距, 要精确地计算损耗和发热是十分困难的, 通过发热计算得到温升与实测数据之间会有很大的偏差。但是, 在设计电机的过程中, 可以利用简化的等效热路图和经验数据, 求得一些可以用来说明电机各部分发热强度状况的近似发热数据, 对于电机的设计者和制造者来说, 这种估算也是很有价值的。因此, 在工厂的实际设计工作中, 尽量采用简化的热计算方法。

简化的热计算方法是以如下的假设为基础的: 定子(或转子)铁心的园柱冷却表面承担了在定子(或转子)铁心的有效长度范围内所产生的所有损耗; 而电枢绕组端部所产生的损耗由端部的冷却表面来承担。

在此基础上, 采用上述公式单独计算电枢绕组在其有效长度  $l_1$  范围内的温差  $\theta_1$ ; 单独计算电枢绕组端部在其长度  $l_2$  范围内的温差  $\theta_2$ 。然后, 整个电枢绕组的平均温差  $\theta_{cp}$  按下式计算:

$$\theta_{cp} = \frac{\theta_1 l_1 + \theta_2 l_2}{l_1 + l_2} \quad (25)$$

#### 5 计算实例

这里, 以 22 kW 无刷永磁电动机(PMSM)为例, 进行发热计算。

(1) 电枢绕组在槽绝缘形成的温度降落

在槽绝缘上形成的温度降落, 分两种情况计算: 对于 A 级绝缘的电枢绕组而言, 按公式(14a)计算; 对于 B 级绝缘的电枢绕组而言, 按公式(14b)计算。

本项目设计的电动机采用 B 级绝缘, 因此根据式(14b),

$$\theta_{H3} = \frac{A \Delta t \delta_{H3}}{6.4 \Pi_z} = \frac{273.32 \times 4.2 \times 4.448 \times 0.5}{6.4 \times 114} = 3.4992 \text{ (}^\circ\text{C)},$$

式中,  $A$  为电动机的线负荷,  $A = 273.32 \text{ A/cm}$ ;  $\Delta$  为电动机的电流密度,  $\Delta = 4.2 \text{ A/mm}^2$ ;  $t$  为定子铁心的齿距,  $t = 4.448 \text{ cm}$ ;  $\delta_{H3}$  为绝缘厚度,  $\delta_{H3} \approx 0.5 \text{ mm}$ ;  $\Pi_z$  是槽的周长,  $\Pi_z \approx 2(b_{s1} + b_{s2} + h_1) = 2(12 + 19 + 26) = 114 \text{ mm}$ 。

(2) 定子铁心外表面相对冷态空气的温升  $\theta_\alpha$

首先求取定子内孔园柱表面每  $1\text{cm}^2$  的比热通量  $\alpha_C$ :

$$\alpha_c = \frac{k_{\text{доб}}(P_{Fe} + P_{Cu(c)})}{\pi D_a l_a} = \frac{1.2(571.4 + 301.5385)}{3.14 \times 17 \times 23.6} = \frac{1047.5262}{1259.768} = 0.8315 \text{ (W/cm}^2\text{)},$$

式中,  $P_{Fe}$  为电动机空载运行时的铁心损耗,  $P_{Fe} = 571.4 \text{ W}$ ;  $P_{Cu(c)}$  为处在定子铁心槽内部分的电枢绕组内的铜耗, 其数值可以按下式估算:

$$P_{Cu(c)} = P_{Cu} \cdot \frac{l_a}{l_{\frac{1}{2}cp}} = 446.1748 \times \frac{23.6}{\frac{1}{2} \times 69.84} = 301.5385 \text{ W};$$

$k_{\text{доб}}$  是一个考虑到由磁路饱和、电枢反应和气隙磁场中高次谐波分量等因素导致附加损耗损耗增加的系数,  $k_{\text{доб}} \approx 1.2$ ;  $D_a = 17 \text{ cm}$ ;  $l_{\frac{1}{2}cp} = 34.92 \text{ cm}$ ;  $l_a = 23.6 \text{ cm}$ 。

根据公式(18), 可以求得发热表面相对冷态空气的温升  $\theta_\alpha$ :

$$\theta_\alpha = \frac{\alpha_c}{\alpha(1+k_0\nu)} = \frac{0.8315}{5.7 \times 10^{-3}(1+0.1 \times 13.2)} = \frac{0.8315 \times 10^3}{13.224} = 62.88 \text{ (}^\circ\text{C)},$$

式中,  $k_0 = 0.1$ ;  $\nu$  是转子外径的圆周速度,  $\nu = \frac{n_H \pi D_r}{60 \times 100} = 13.20 \text{ m/s}$ ;  $D_r = 16.72 \text{ cm}$ ;  $\alpha$  的数值与定子铁心的长度  $l_a$  与极距  $\tau$  的比值有关, 它可以按下列关系选取: 当  $l_a/\tau \leq 2$  时,  $\alpha = 8.1 \times 10^{-3} \text{ W/}^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^2$ ; 当  $l_a/\tau \leq 4$  时,  $\alpha = 6.6 \times 10^{-3} \text{ W/}^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^2$ ; 当  $l_a/\tau \leq 5$  时,  $\alpha = 5.7 \times 10^{-3} \text{ W/}^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^2$ 。对于本项目设计的电动机而言,  $l_a/\tau = 23.6/5.338 = 4.42$ , 所以  $\alpha = 5.7 \times 10^{-3} \text{ W/}^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^2$ 。

(3) 电枢绕组端部外表面相对冷态空气的温升  $\theta_{END}$

首先求取每  $1 \text{ cm}^2$  的电枢绕组端部外表面的比热通量  $\alpha_{END}$ , 对于不同的绝缘有不同的计算公式:

对于 A 级绝缘的电枢绕组而言, 按下式计算:

$$\alpha_{EN3} = \frac{A\Delta t}{4250\Pi_Z},$$

对于 B 级绝缘的电枢绕组而言, 按下式计算:

$$\alpha_{END3} = \frac{A\Delta t}{4000\Pi_Z}。$$

本项目设计的电动机采用 B 级绝缘, 因此,

$$\alpha_{EN3} = \frac{A\Delta t}{4000\Pi_Z} = 0.112 \text{ W/cm}^2,$$

式中,  $A$  为电动机的线负荷,  $A = 273.32 \text{ A/cm}$ ;  $\Delta$  为电动机的电流密度,  $\Delta = 4.2 \text{ A/mm}^2$ ;  $t$  为定子铁心的齿距,  $t = 4.448 \text{ cm}$ ;  $\delta_{H3}$  为绝缘厚度,  $\delta_{H3} \approx 0.5 \text{ mm}$ ;  $\Pi_Z$  是槽的周长,  $\Pi_Z \approx 2(b_{S1} + b_{S2} + h_1) = 2(1.2 + 1.9 + 2.6) = 11.4 \text{ cm}$ 。

于是, 电枢绕组端部外表面相对冷态空气的温升  $\theta_{END}$  为:

$$\theta_{END} = \frac{\alpha_{END}}{\alpha(1+k_0\nu)} = \frac{0.112}{1.33 \times 10^{-3}(1+0.07 \times 13.2)} = 43.77 \text{ [}^\circ\text{C]},$$

式中,  $k_0 = 0.07$ ;  $\nu$  是转子外径的圆周速度,  $\nu = 13.20 \text{ m/s}$ ;  $\alpha$  的数值与极距  $\tau$  有关, 它可以按



下列关系选取：当  $\tau \leq 40$  cm 时， $\alpha = 1.33 \times 10^{-3}$  W/°C·cm<sup>2</sup>；当  $40$  cm  $< \tau \leq 60$  cm 时， $\alpha = 1.0 \times 10^{-3}$  W/°C·cm<sup>2</sup>；当  $\tau > 60$  cm 时， $\alpha = 0.66 \times 10^{-3}$  W/°C·cm<sup>2</sup>。对于本项目设计的电动机而言， $\tau = 5.338$  cm，所以  $\alpha = 1.33 \times 10^{-3}$  W/°C·cm<sup>2</sup>。

(4) 电枢绕组的平均温升  $\theta_{wcp}$

根据公式(25)，电枢绕组的平均温升  $\theta_{wcp}$  可以按下式计算：

$$\theta_{wcp} = \frac{(\theta_{H3} + \theta_{\alpha})l_a + (\theta_{H3} + \theta_{END})l_{END}}{l_z + l_{END}} = \frac{(3.4992 + 62.88)23.6 + (3.4992 + 46.77)5.5}{23.6 + 5.5} = 63.33 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

式中， $\theta_{H3} = 3.4992$  °C； $\theta_{\alpha} = 62.88$  °C； $\theta_{END} = 43.77$  °C； $l_a = 23.6$  cm； $l_{END} = (b_z + b_{s1} + b_{s2}) = 2.4 + 1.2 + 1.9 = 5.5$  cm。

根据上述分析和计算，由于电动机的损耗比较小，效率比较高，因此，可以暂时不采取冷却措施，待电动机制造后的实际情况而定。