

同步电机热计算与通风计算

李文宇

(中国船舶重工集团公司第 712 研究所 武汉 430064)

摘 要: 本文对不同型式同步电机热计算与通风计算, 提出一套简化的计算方法, 计算中考虑了有影响的各种因素, 有助于设计者对电机发热、温升及通风设计作出适当评估, 并对方案优选提供适当依据。

关键词: 同步电机 电机热计算 电机通风计算

中图分类号: TM341

文献标识码: A

文章编号: 1003-4862 (2007) 02-0072-04

Calculation of Heat and Ventilation for Synchronous Machine

Li Wenyu

(Wuhan Institute of Marine Electric Propulsion, CSIC, Wuhan 430064, China)

Abstract: A simplify calculating method is put forward for heat and ventilation calculation of synchronous machine in this paper. Various essential factors have been taken into account at this calculation. It is beneficaly for designer to carry out a suitable evaluate for electric machine heat, temperature rise and ventilation design, and to bring up a appropriate opinion for excellent selection.

Keywords: synchronous motor; heat calculation; ventilation calculation

1 引言

电机设计中, 热计算与通风计算是必不可少的重要内容之一。在电机设计过程中, 必须对通风冷却系统、风路结构、绝缘结构、参数选择合理性进行评估, 为此应进行电机的热计算与通风计算。但是, 由于电机内部风量分布和各部件散热系数都不易精确计算, 所以即使经过周密而复杂的理论考虑, 温升与通风计算结果也往往与试验数据不一致, 反之, 在简化计算中, 所采用的散热系数是根据结构相同或相似的电机温升试验结果确定的, 因此计算结果反而常常能够比较接近实际。本文综合有关资料, 提出同步电机热计算与通风计算简化方法。结合系列公式与图表, 在同步电机电磁设计及初步技术设计结果基础上, 计算出电机定转子各部温升及通风设计有关参数。

2 同步电机热计算

2.1 定子绕组铜耗^[1] (W)

$$P_{cu1} = m \cdot m_T \cdot I_\phi^2 \cdot r_1 \quad (1)$$

式中: m : 电机相数; m_T : 绝缘温升等级系数; B 级温升 $m_T=1.4$; F 级温升 $m_T=1.48$; H 级温升 $m_T=1.58$; I_ϕ : 额定相电流; r_1 : 绕组 20 °C 相电阻。

2.2 励磁绕组铜耗 (W)

$$P_{fn} = I_{fn}^2 \cdot r_f \quad (2)$$

式中: I_{fn} : 额定负载下的励磁电流 (A); r_f : 20 °C 下励磁绕组电阻 (Ω)。

2.3 定子铁心内表面冷却面积 (mm²)

$$S_{n1} = \pi \cdot D_1 \cdot l_1 \quad (3)$$

式中: D_1 定子铁心内径; l_1 定子铁心长度。

2.4 定子槽周长 (mm)

$$\Pi_1 = 2 \cdot (h_{n1} + b_{n1}) \quad (4)$$

式中: h_{n1} 槽高; b_{n1} 槽宽

2.5 定子槽冷却面积 (mm²)

$$S_{un1} = Z_1 \cdot \Pi_1 \cdot l_1 \quad (5)$$

式中: Z_1 定子槽数

2.6 定子绕组端部冷却表面积 (mm²)

收稿日期: 2006-05-20

作者简介: 李文宇 (1939-), 男, 研究员, 长期从事充电发电机研制工作。

$$S_{l1} = 4 \cdot \pi \cdot D_1 \cdot l_{B1} \quad (6)$$

式中: l_{B1} 绕端轴向伸出长度, 如设计无此数据可按下式计算: $l_{B1} = (0.12 + 0.15 \cdot p) \cdot b_{cp1} + 10$

其中: p 极对数; b_{cp1} 绕组平均宽度, 可按下式计算:

$$b_{cp1} = \frac{\pi \cdot (D_1 + h_{n1})}{Z_1} \times y_1$$

其中 y_1 定子绕组节距。

2.7 机座冷却表面积 (mm^2)

a) 对机座外无冷却筋的机座冷却表面积

$$S_M = \pi \cdot D_{H1} \cdot (l_1 + 2 \cdot l_{B1}) \quad (7)$$

式中: D_{H1} 为机座外径。

b) 对机座外有冷却筋的机座冷却面积

$$S_M = (\pi \cdot D_{H1} + 8 \cdot h_p \cdot n_p) \cdot (l_1 + 2 \cdot l_{B1}) \quad (8)$$

式中 h_p, n_p 分别为机座外冷却筋高度及数量。

2.8 定子表面有效冷却表面对定子铜耗与铁耗的比热流 (W/mm^2)

$$p_{n1} = k_1 \cdot (P_{cu1} \cdot 2l_1 / l_{cp1} + P_c) / S_{n1} \quad (9)$$

式中: P_c 电机铁耗; l_{cp1} 定子绕组平均长度, 可按下式计算: $l_{cp1} = 2(l_1 + l_{l1})$

l_{l1} 定子绕组长, 可按下式计算:

$$l_{l1} = (1.16 + 0.14 \cdot p) \cdot b_{cp1} + 15$$

式中: k_1 数据查表 1^[1], 其物理意义如下: 在定子绕组热计算中, 电机内空气带走的仅为部分有效损耗 (即有效损耗乘以 k_1), 余下部分损耗直接经过电机机座由外部空气带走。 k_1 数据与电机防护型式及极数有关。

表 1 系数 k_1 值

电机极数	电机防护型式	
$2p$	IP44	IP23
2, 4	0.20~0.22	0.80~0.84
6, 8	0.18~0.19	0.76~0.78
10, 12	0.16~0.17	0.72~0.74

2.9 定子槽部冷却表面对绕组有效部分损耗的比热流 (W/mm^2)

$$p_{un1} = (P_{cu1} \times 2l_1 / l_{cp1}) / S_{un1} \quad (10)$$

2.10 定子绕组端部冷却表面对绕端损耗的比热流 (W/mm^2)

$$p_{l1} = (P_{cu1} \times 2l_{l1} / l_{cp1}) / S_{l1} \quad (11)$$

2.11 转子表面线速度 (m/s)

$$v_2 = \pi \cdot D_{H2} \cdot n / 60000 \quad (12)$$

式中: D_{H2} 为转子表面直径。

2.12 定子有效部分内表面对电机内空气的温升 ()

$$\Delta t_{n1} = p_{n1} / \alpha_1 \quad (13)$$

式中: α_1 为定子表面散热系数 ($\text{W}/\text{mm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$), α_1 值与转子表面周速, 电机防护型式, 冷却方式, 极数, 机座外径等参数有关。

α_1 可从图 1, a~f 图中求得。

a) 对防护型式为 IP44, 冷却方式为 ICO141, $U \leq 660 \text{ V}$, $2p=2$ 的电机;

b) 对 $2p=4, 6, 8, 10$ 的电机, 其余要求同 a 图;

c) 对 IP44, ICO151, $U = 6000 \text{ V}$, $2p=4, 6, 8, 10, 12$ 的电机;

d) 对 IP23, ICO1, $U \leq 660 \text{ V}$, $2p=2$ 的电机;

e) 对 $2p=4, 6, 8, 10, 12$ 的电机, 其余要求同 d 图;

f) 对 IP23, ICO1, $U = 6000 \text{ V}$, $2p=4, 6, 8, 10, 12$ 的电机。

注: ICO1 为轴带风扇防护式电机; ICO141 为轴带风扇, 机壳外冷却的封闭式电机; ICO151 为带内装式冷却器利用外界介质冷却的封闭式电机。

2.13 定子槽中导体在绝缘中的温度降 ()

$$\Delta t_{un1} = p_{un1} \cdot b_{u1} / \lambda_{ak} \quad (14)$$

式中: b_{u1} : 定子槽中单边绝缘厚;

λ_{ak} : 槽中绝缘含空气层的等效导热系数;

$$\lambda_{ak} = 16 \times 10^{-5} \text{ W}/\text{mm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

2.14 定子绕组端部外表面对电机内空气的温升 ()

$$\Delta t_{l1} = p_{l1} / \alpha_1 \quad (15)$$

2.15 定子绕组端部绝缘中的温差 ()

$$\Delta t_{ul1} = p_{l1} \cdot b_{ul1} / \lambda_{ak} \quad (16)$$

式中: b_{ul1} 绕组端部单边绝缘厚度。

2.16 定子绕组对电机内部空气的平均温升 ()

$$\Delta t_1' = (\Delta t_{n1} + \Delta t_{un1}) \cdot 2l_1 / l_{cp1} + (\Delta t_{l1} + \Delta t_{ul1}) \cdot 2l_{l1} / l_{cp1} \quad (17)$$

2.17 电机内空气需带走的损耗 (W)

对 IP23 型电机:

$$P_\Sigma = k_1 (p_{cu1} \cdot 2l_1 / l_{cp1} + P_c) + P_{cu1} \cdot 2l_{l1} / l_{cp1} + P_{fn} + P_{me} + P_d \quad (18)$$

对 IP44 型电机:

$$P_\Sigma = k_1 (p_{cu1} \cdot 2l_1 / l_{cp1} + P_c) + P_{cu1} \cdot 2l_{l1} / l_{cp1} + P_{fn} + 0.1P_{me} + P_d$$

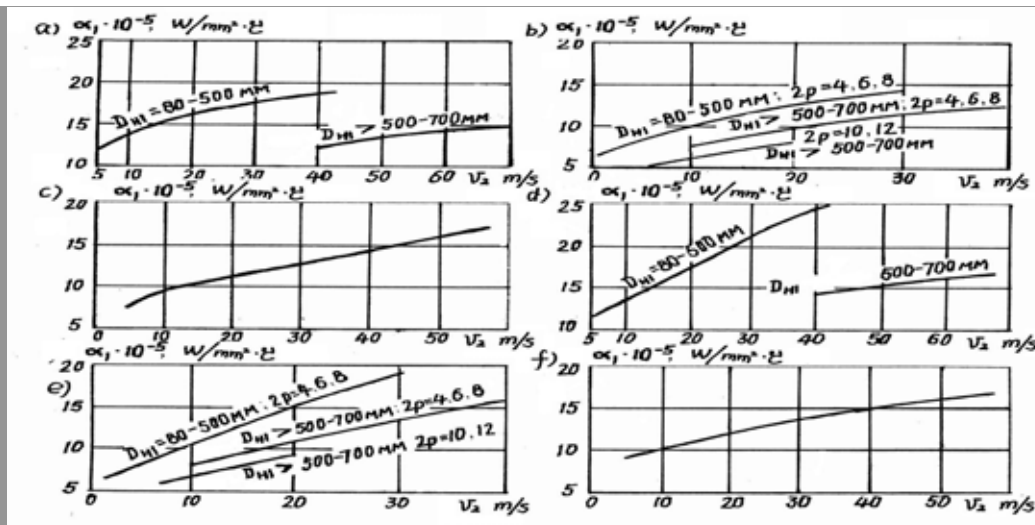
式中: k_1 见表 1; P_{me} 电机机械损耗; P_d 附加损耗。

2.18 电机内部空气对电机外部空气的平均温升 ()

$$\Delta t_B = P_\Sigma / S_m \cdot \alpha_B \quad (19)$$

式中: α_B 空气预热系数 ($\text{W}/\text{mm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$), α_B 值见图 2。

a) 防护型式为 IP44, 冷却方式为 ICO141, $U \leq 660 \text{ V}$, $2p=2$ 的电机;

图 1 系数 $\alpha_1=f(v_2)$ 曲线

b) 对 $2p=4, 6, 8, 10, 12$ 的电机, 其余要求同 a 图;

c) 对 IP44, ICO151, $U=6000\text{ V}$, $2p=4, 6, 8, 10, 12$ 的电机;

d) 对 IP23, ICO1, $U \leq 660\text{ V}$, $2p=2$ 的电机;

e) 对 $2p=4, 6, 8, 10, 12$ 的电机, 其余要求同 d 图;

f) 对 IP23, ICO1, $U=6000\text{ V}$, $2p=4, 6, 8, 10, 12$ 的电机。

2.19 定子绕组对电机外部空气温升 ()

$$\Delta t_1 = \Delta t'_1 + \Delta t_B \quad (20)$$

2.20 励磁绕组导体冷却表面积 (mm^2)

$$S_{n2} = 2p \cdot l_{cpn} \cdot \Pi_{\Pi} \quad (21)$$

式中: l_{cpn} : 励磁绕组线圈平均周长; Π_{Π} : 励磁绕组冷却表面周长, 对边绕单层线圈为励磁线圈高度。

2.21 励磁绕组损耗相对于绕组冷却表面的比热流 (W/mm^2)

$$p_n = k_2 \cdot p_{jn} / S_{n2} \quad (22)$$

式中: k_2 系数考虑到励磁绕组部分损耗经磁极及其他部件散出机外, 其值见表 2。

表 2 k_2 值

电机防护型式及冷却方式	IP22 ICO1	IP22 IC17	IP44 IC37	IP44 ICO141	IP44 IC0041
k_2	0.9	0.9	0.9	0.7	0.6

2.22 励磁绕组散热系数 ($\text{W}/\text{mm}^2 \cdot$)

$$\text{对单层线圈 } \alpha_T = (3 + 0.42v_2) \times 10^{-5}$$

$$\text{对多层线圈 } \alpha_T = (2.6 + 0.19v_2) \times 10^{-5} \quad (23)$$

2.23 励磁绕组冷却表面温升 ()

$$\Delta t_{nn} = p_n / \alpha_T \quad (24)$$

2.24 多层励磁绕组带绝缘导体的温度降 ()

$$\Delta t_{un} = p_n \cdot b_{un} / \lambda_{ak} \quad (25)$$

式中: b_{un} 线圈单边绝缘厚度。

2.25 励磁绕组对电机内空气的平均温升 ()

$$\Delta t'_n = \Delta t_{nn} + \Delta t_{un} \quad (26)$$

2.26 励磁绕组对电机外部空气的平均温升 ()

$$\Delta t_n = \Delta t'_n + \Delta t_B \quad (27)$$

3 同步电机通风计算

3.1 电机通风所需风量 (m^3/s) [2]

$$V_B = P_{\Sigma} / c_B \cdot \Delta t'_B \quad (28)$$

式中: c_B 空气热容量, $c_B = 1100\text{ J}/^\circ\text{C} \cdot \text{m}^3$;

$\Delta t'_B$ 电机出气相对于进气的温升: $\Delta t'_B = 2\Delta t_B$ (29)

3.2 径向通风系统可保证的近似风量 (m^3/s)

$$V'_B = k_3 \cdot (D_{H2}/100)^2 \cdot 10^{-2} \quad (30)$$

式中: $k_3 = 3.54 \sqrt{(n_1/1000)^3 (n_k l_k + 100)} \times 10^{-2}$ (31)

其中: n_k , l_k 为径向风道数及宽度。

计算结果 V'_B 应大于 V_B , 见 (28) 式。

3.3 径向通风系统空气压头 (Pa)

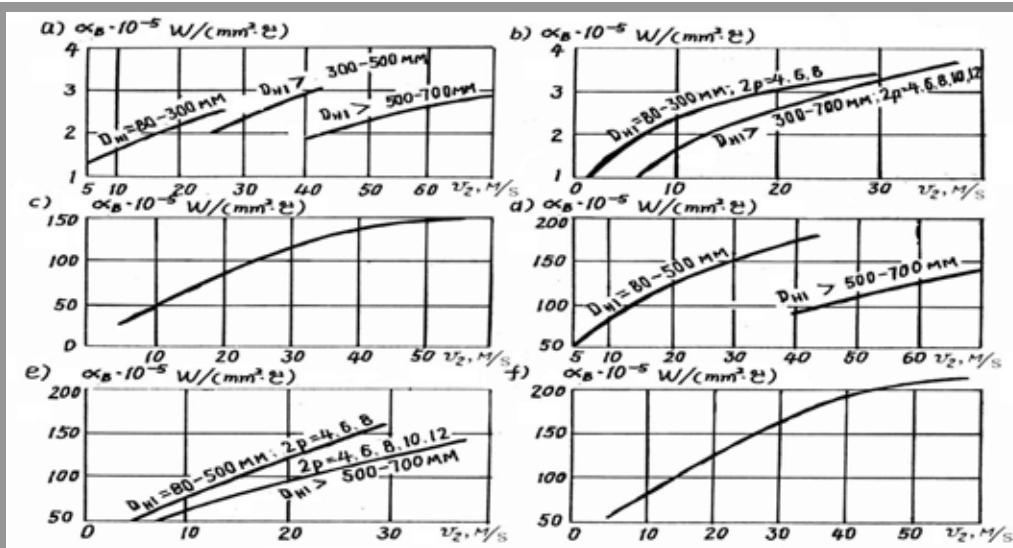
$$H = 7.85(n_1/1000)^2 (D_{H2}/100)^2 \quad (32)$$

3.4 轴向通风系统等效风阻

对带离心式风扇轴向通风系统等效风阻可按表 3 选取。

表 3

$P_2/n_1(\text{W}/\text{min})$	3	5	10	25	100
$Z_1(p_a \cdot S^2/\text{m})$	3000	1750	1100	500	150
$P_2/n_1(\text{W}/\text{min})$	250	1000	2000	5000	10000
$Z_1(p_a \cdot S^2/\text{m})$	80	25	10	4.5	2.3

图2 系数 $\alpha_B=f(v_2)$ 曲线

3.5 离心式风扇叶片外径 (mm)

$$D_{v2} = (0.8 \sim 0.9) D'_{H1} \quad (33)$$

式中: D'_{H1} 机座内径

3.6 离心式风扇叶片内径 (mm)

$$D_{v1} = (0.62 \sim 0.67) D'_{H1} \quad (34)$$

3.7 风扇叶片长度 (mm)

$$l_l = (0.12 \sim 0.14) D'_{H1} \quad (35)$$

3.8 风扇叶片数

$$N_l = D_{v2} / 20 \quad (36)$$

3.9 风扇外径处线速度 (m/s)

$$V_{v2} = \pi \cdot D_{v2} \cdot n_1 / 6 \cdot 10^4 \quad (37)$$

3.10 风扇内径处线速度 (m/s)

$$V_{v1} = \pi \cdot D_{v1} \cdot n_1 / 6 \cdot 10^4 \quad (38)$$

3.11 风扇空载压头 (Pa)

$$H_0 = \eta_a \cdot \gamma \cdot (V_{v2}^2 - V_{v1}^2) \quad (39)$$

式中: η_a 为风扇空载时气体动效率: 对前倾叶片 $\eta_a=0.75$; 对后倾叶片 $\eta_a=0.5$; 对径向叶片 $\eta_a=0.6$;

γ : 空气密度 $\gamma=1.23 \text{ kg/m}^3$ 。

3.12 风扇进风口横截面积 (m^2)

$$S_v = 0.92 \cdot \pi \cdot D_{v2} \cdot l_l \cdot 10^{-6} \quad (40)$$

3.13 最大空气流量 (m^3/s)

$$V_{B\max} = 0.42 \cdot V_{v2} \cdot S_v \quad (41)$$

3.14 离心风扇有效风量 (m^3/s)

$$V'_B = V_{B\max} \cdot \sqrt{H_0 / (H_0 + Z_1 \cdot V_{B\max}^2)} \quad (42)$$

计算所得 V'_B 应大于 V_B (见 28 式)

3.15 离心风扇压头 (Pa)

$$H = H_0 \cdot Z \cdot V_{B\max}^2 / (H_0 + Z_1 \cdot V_{B\max}^2) \quad (43)$$

4 结论

本文所述的热计算与通风计算有以下特点:

1) 计算公式具有连续性和完整性, 设计者按照电机电磁计算与初步技术设计结果, 按次序代入到文中公式中, 即能得到所需结果, 利用热计算结果可直接进行通风计算。

2) 在计算中所涉及的一些参数如定子表面散热系数, 空气预热系数等均给出了该参数与转子线速度、防护型式、冷却方式、电机外径等相关的函数曲线, 即考虑了各种因素对参数的影响, 从而使计算结果接近实际情况。

3) 对通风需带走的电机部分损耗功率 P_Σ , 文中给出了明确的计算公式, 其中对不同防护型式(IP23 与 IP44)电机的 P_Σ 值在计算中体现在 k_1 值与电机机械损耗项的计算中, 概念十分明确。同样, 在转子励磁绕组温升计算中也引入 k_2 系数(见式 22)对励磁绕组损耗对温升影响作了修正。

4) 一般文献在电机风量估算中, 冷却空气温升按 20~25 估算, 比较粗略。本文程序中对电机内空气温升作了计算。因此在电机风量计算时(式 28)以 $\Delta t'_B$ 代入比较准确。

可见, 本文所介绍的热计算与通风计算程序可广泛作为各种容量不同结构型式同步电机计算之用。经过适当转化, 并可用于直流电机及异步电机计算之中。因涉及篇幅, 待后作进一步探讨。

参考文献:

[1] 高尔特伯特. 俄国: 电机设计, 1984.

[2] 陈世坤. 电机设计. 西安: 西安交通大学, 1989.