

电机内热交换

魏永田 孟大伟 温嘉斌 编著



机械工业出版社

本书是关于大中型电机内热交换的一本专著，书中较系统地叙述了电机内热量的产生、传递及热交换的理论基础及计算方法，基本上反映了我国近年来电机内热交换过程的研究成果。

全书共分七章：第1章为电机内热交换的一般问题；第2章为电机内热交换的流体力学基础；第3章为电机内热交换的传热学基础；第4章为电机的通风系统计算；第5章为电机的发热计算；第6章为电机内冷却介质变相传热计算；第7章为电机热交换中的测试技术。

本书主要供从事电机设计、制造的工程技术人员阅读，也可供电机安装、运行及维护等方面的科技人员使用，还可作为高等学校电机专业高年级学生和研究生的教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机内热交换/魏永田等编著. —北京：机械工业出版社，1998.5

ISBN 7-111-06385-6

I. 电… II. 魏… III. 电机-传热 IV. TM301.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 12266 号

出版人：马九荣（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

责任编辑：周娟 版式设计：冉晓华 责任校对：魏俊云

封面设计：姚学峰 责任印制：王国光

机械工业出版社京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1998 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

850mm×1168mm^{1/32}·13.125 印张·1 插页·346 千字

0 001--2 000 册

定价：28.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

前 言

随着电机制造工业的发展,电机的单机容量不断增大,经济技术指标(包括热负荷)普遍提高。电机运行时产生的单位体积损耗的增长,引起电机各部分温度升高,这直接影响到电机的寿命和运行可靠性,所以电机内热交换问题日益受到重视,它已经成为当今各种电机,特别是大中型电机设计中的重要问题。

本书是讨论电机内热交换的一本专著,电机内热过程是一个复杂的过程,它既涉及电机的电磁理论,又涉及电机结构学,还涉及到流体力学、热传学、弹性力学等学科的理论。而这些常常是远非电机设计及研究工作者能全部掌握的,本书作者在研究电机热交换中,总希望能有一本综合性比较强而又有一定理论的参考书。正是出于上述目的,我们把几年来为研究生教学过程中的教学内容、国家自然科学基金课题所研究的部分内容及所带研究生的研究成果加以整理,编纂成为此书。由于在电机行业中这方面的专著甚少,如果这本书能给电机行业同仁一些启迪,就是对我们的最大安慰。

本书包括7章,第1章至第3章属于共同性和基础部分内容,包括电机热交换的一般问题;电机热交换的流体力学基础、电机热交换的传热学基础。第4章至第7章为电机热交换中的专论部分内容,包括电机的通风冷却计算、电机的发热计算、电机中变相传热及电机内热交换过程中的测试技术。

本书的读者对象主要是大中型电机设计、制造专业的技术人员,工厂等使用部门从事安装、运行及维护的工程技术人员;本书也可以作为高等学校电机专业高年级学生及研究生的教学参考书。

本书编写分工为第1章至第3章由魏永田、孟大伟编写;第

4 章由温嘉斌编写；第 5 章由孟大伟、温嘉斌编写；第 6 章由张鹏洲编写；第 7 章由刘荣林编写。全书由魏永田、孟大伟、温嘉斌进行了统稿，由魏永田定稿。本书全部内容完成后由白延年高级工程师进行了审阅，他为本书提出了很多宝贵的意见。

在本书编写过程中得到了哈尔滨电机股份有限公司陈季平高级工程师、苗立杰高级工程师、迟速高级工程师，东方电机厂陈锡芳高级工程师、欧阳全安高级工程师，中国科学院电工所顾国标研究员，沈阳工业大学唐任远教授，哈尔滨工业大学陆永平教授，哈尔滨理工大学汤蕴璆教授、刘增祜教授的指导和帮助。书中还应用了已毕业的研究生黄立民、张静、张大为、侯文斌、付敏、白宏哲、张松、侯云鹏等人的研究成果。在此一并表示谢意。

由于我们水平有限，加之审稿、定稿时间仓促，书中一定有不少缺点和错误，恳切希望读者提出宝贵意见，以便在再版中修正。

作者

1998 年 1 月

目 录

前言

第 1 章 电机内热交换的一般问题	1
1.1 电机内发热热源	1
1.1.1 铁心内损耗	1
1.1.2 绕组内损耗	5
1.1.3 机械损耗	7
1.1.4 电机内损耗分布	11
1.2 电机的冷却方式	13
1.2.1 电机的冷却系统	13
1.2.2 电机内的冷却介质	20
1.2.3 冷却方式对电机性能的影响	23
1.3 电机的温升限度	24
1.3.1 电机的温升限度简介	24
1.3.2 电机发热对材料性能的影响	30
1.3.3 外界条件对电机温升的影响	33
1.4 电机的工作制与定额	37
1.4.1 连续定额工作制	37
1.4.2 短时定额工作制	37
1.4.3 周期定额工作制	37
参考文献	41
第 2 章 电机内热交换的流体力学基础	42
2.1 流体静压力特性及运动规律	42
2.1.1 流体基本物理性质	42
2.1.2 流体静压力特性	44
2.1.3 流体运动的一般概念	50
2.1.4 流体运动规律	55
2.2 流动形态及管内流动	66

2.2.1 量纲分析法	66
2.2.2 流动形态及管内层流	71
2.2.3 圆管内的湍流	78
2.3 流体的多元流动及边界层理论基础	80
2.3.1 粘性流体力学基本方程	80
2.3.2 边界层理论基础	85
2.3.3 平板边界层计算	91
参考文献	103
第3章 电机内热交换的传热学基础	105
3.1 热传导基础及稳态导热	105
3.1.1 导热基本定律及导热微分方程	105
3.1.2 一维稳态导热	109
3.1.3 发热体的稳态导热	120
3.1.4 多维稳态导热	124
3.2 非稳态导热计算	124
3.2.1 非周期性非稳态导热的物理过程	124
3.2.2 非稳态导热的数学分析法	127
3.2.3 非稳态导热的数值解法	140
3.3 对流传热基础及无相变对流传热	141
3.3.1 对流传热基础	141
3.3.2 流体对流传热中的相似理论	149
3.3.3 流体无相变时对流传热	157
参考文献	165
第4章 电机通风系统计算	166
4.1 电机的通风系统	166
4.1.1 水轮发电机的通风系统	166
4.1.2 汽轮发电机的通风系统	174
4.1.3 交直流电机的通风系统	180
4.2 电机的风道阻力系数	185
4.2.1 摩擦阻力系数	185
4.2.2 局部阻力系数	190
4.2.3 旋转体流动阻力系数	205
4.3 风扇的工作原理与设计	209

4.3.1 离心风扇的工作原理与设计	209
4.3.2 轴流式风扇的工作原理与设计	220
4.4 电机通风系统计算	228
4.4.1 概述	228
4.4.2 通风系统的工程算法	230
4.4.3 通风系统的网络矩阵算法	239
参考文献	250
第5章 电机的发热计算	251
5.1 电机应用材料的导热系数及表面传热系数	251
5.1.1 电机应用材料的导热系数	251
5.1.2 电机静止壁面表面传热系数	262
5.1.3 旋转体表面传热系数	273
5.2 电机稳态温升计算的工程算法——等效热路法	278
5.2.1 水轮发电机的热计算	278
5.2.2 汽轮发电机的热计算	290
5.2.3 中小型交流电机的热计算	301
5.3 电机稳态发热温度场计算	308
5.3.1 分段等效热路法	308
5.3.2 等效热网络法	311
5.3.3 有限元法	321
5.4 电机暂态温升的计算	337
5.4.1 暂态温升的解析算法	337
5.4.2 分段等效热路法	341
5.4.3 暂态温升的数值解法	344
参考文献	357
第6章 电机内冷却介质变相传热计算	359
6.1 变相传热原理及冷却方式	359
6.2 管道内冷式变相传热计算	359
6.2.1 低温冷却系统	360
6.2.2 常温冷却系统	361
6.2.3 管道内冷式变相传热计算	362
6.3 浸润式变相传热计算	367
6.4 开放式管道变相传热计算	371

6.5 热管式变相传热计算	374
6.5.1 热管的工作原理	374
6.5.2 旋转热管的变相传热计算	375
6.6 变相传热冷却介质和冷却管材料	378
参考文献	381
第7章 电机热交换中的测试技术	382
7.1 电机内温度测试	382
7.1.1 电机内温度测试基础	382
7.1.2 电机内应用测温元件	385
7.1.3 电机的温升试验	392
7.2 电机内通风系统参数的测试	394
7.2.1 电机通风系统风压测试	394
7.2.2 电机通风系统风速测试	396
7.2.3 电机通风系统风量测试	398
7.3 电机热参数的模拟测试	398
7.3.1 模拟测试的理论基础	399
7.3.2 电机内导热系数的测试	401
7.3.3 电机内表面传热系数的测试	405
参考文献	410

第 1 章 电机内热交换的一般问题

1.1 电机内发热热源

电机是一种机电能量转换机构，在机电能量转换过程中不可避免地要产生损耗，这些损耗最终绝大部分变成热量，使电机各部分温度升高。

电机的损耗从产生的部位划分可以分成以下几种：

(1) 铁心损耗 包括铁心中主磁场变化时产生的铁心损耗，这种损耗一般称为基本铁耗。包括定转子开槽引起气隙磁导谐波磁场在对方铁心中引起的损耗，以及电机带负载后，由于存在漏磁场和谐波磁场而产生的损耗。前者称为空载附加铁耗，后者称为负载附加铁耗。

(2) 绕组损耗 包括电流在绕组中产生的损耗，这种损耗称为基本铜耗。包括电刷与集电环或换向器接触而产生的损耗，以及工作电流产生的漏磁场和谐波磁场在绕组中产生的损耗，前者称为接触损耗，后者称为绕组中附加铜耗。

(3) 机械损耗 机械损耗包括轴承摩擦损耗、电刷磨擦损耗、转子旋转时引起转子表面与冷却气体之间的摩擦损耗，以及与电机同轴的风扇所需功率。

1.1.1 铁心内损耗

在铁心中产生的损耗包括铁心中的基本铁耗和附加铁耗。基本铁耗是主磁场在铁心中交变时产生的，而附加铁耗则是由于铁心开槽而引起的气隙磁导谐波磁场在对方铁心中产生的损耗，在铁心表面产生的损耗称为表面损耗，而在齿内部产生的损耗称为脉振损耗。上述两种损耗通称为空载附加损耗。电机带负载后，漏磁场及谐波磁场还会在铁心及结构件中引起损耗。这部分损耗称

为负载附加损耗。

1. 铁心的基本铁耗

铁心的基本铁耗由于产生原因的不同,可分为磁滞损耗和涡流损耗。但两者同时发生在铁心中时,没有必要将两者分开计算。因而基本铁耗的表达式为

$$P_{Fe} = K_a p_{Fe} G_{Fe} \quad (1.1-1)$$

式中 G_{Fe} ——铁心净用铁量;

K_a ——由于硅钢片加工、磁通密度分布不均,以及其不随时间正弦变化等原因而引起损耗增加的系数;

p_{Fe} ——单位质量的损耗,也称比损耗。

由于铁心中轭部和齿部加工情况及磁通密度分布不同,因而铁心中轭部与齿部基本铁耗应分别计算。

(1) 轭部铁心的基本铁耗 轭部铁心的基本铁耗为

$$P_{Fej} = K_a p_{Fej} G_j \quad (1.1-2)$$

式中 G_j ——轭部铁心的重量;

K_a ——经验系数,具有下列统计平均值:

对交流电机,当容量 $P_N < 100\text{kVA}$ 时, $K_a = 1.5$; 当容量 $P_N \geq 100\text{kVA}$ 时, $K_a = 1.3$ 。

对直流电机, $K_a = 3.6$ 。

在进行比损耗 p_{Fej} 计算时, B 值应选用轭中最大磁通密度值 B_j , 可用下式计算:

$$p_{Fej} = p_{10/50} B_j^2 \left(\frac{f}{f_0} \right)^{1.3} \quad (1.1-3)$$

式中 $p_{10/50}$ ——当 $B = 1\text{T}$, $f = 50\text{Hz}$ 时,单位重量内的损耗,其值可从硅钢片损耗曲线中查取。

(2) 齿部铁心的基本损耗 齿部铁心的基本损耗为

$$P_{Fet} = K_a p_{Fet} G_t \quad (1.1-4)$$

式中 G_t ——齿部铁心重量;

K_a ——经验系数,具有下列统计平均值:

对异步电动机, $K_a = 1.8$;

对同步电机, 当 $P_N < 100 \text{ kVA}$ 时, $K_a = 2.0$; 当 $P_N \geq 100 \text{ kVA}$ 时, $K_a = 1.7$;

对直流电机, $K_a = 4.0$ 。

比损耗可用下式计算:

$$p_{\text{het}} = p_{10/50} B_t^2 \left(\frac{f}{f_0} \right)^{1.3} \quad (1.1-5)$$

式中 B_t ——齿部磁通密度的平均值。

2. 空载铁心中的附加损耗

空载铁心中的附加损耗是由气隙中谐波磁场引起的。这些谐波磁场基本由以下两种原因造成: (1) 铁心开槽导致气隙磁导分布不均而产生的谐波磁场; (2) 空载励磁磁动势空间分布曲线中有谐波存在而产生的谐波磁场。谐波磁通的路径与气隙沿圆周方向边界凹凸面的间距有关。如果凹凸面的间距比谐波波长大得多(如磁极), 则谐波磁通集中在铁心表面一薄层中, 当谐波磁场对磁极表面运动时, 就会在磁极表面产生涡流损耗, 当然也产生磁滞损耗, 但其值较小, 可忽略不计。由于此涡流损耗只在磁极表面, 故称为表面损耗。

如果边界凹凸面的间距比谐波波长小得多(如齿部), 则谐波深入齿部并经过轭部形成闭合回路, 当谐波磁场相对齿部运动时, 就会在齿部形成涡流和磁滞损耗。这种损耗称为脉振损耗。

(1) 磁极的表面损耗 在同步电机及直流电机中, 当磁极采用实心结构时, 由于电枢开槽, 使气隙主磁场叠加了一个气隙磁导谐波磁场。电磁场计算可得, 磁极单位面积的涡流损耗为

$$p_A = K_c (B_0 t)^2 (zn)^{1.5}$$

式中 K_c ——系数, 与磁极所用材料有关;

B_0 ——齿谐波磁通密度最大值; B_0 值可由 $B_0 = (K_{\delta-1}) B_\delta$ 求得;

t ——电枢齿距;

z ——齿数;

n ——磁极转速。

如果磁极面积 A_p 已知, 则整个电机表面损耗为

$$P_{Feo} = p_{\Lambda} A_p \quad (1.1-6)$$

当磁极采用叠片结构时, 冲片之间能形成一层绝缘层, 会增加涡流回路的电阻。据分析、叠片磁极表面损耗计算方法与上式不同, 但工厂仍习惯于按上式计算, 采用经验系数修正。

(2) 铁心中脉振损耗 在异步电机中, 由于定转子都有槽, 运行时定转子中将产生脉振损耗。但工厂常常不单独计算异步电动机的脉振损耗, 而是根据经验把脉振损耗计于基本铁耗的经验系数 K_a 中。

3. 负载时铁心附加损耗

电机带负载时, 由于电流的增加, 漏磁场将明显增加, 谐波磁场也不同程度地表现出来。

(1) 定子绕组磁动势谐波在转子表面引起的表面损耗 为分析方便, 气隙中绕组磁动势谐波可分成两部分, 即相带谐波与齿谐波, 相带谐波在磁极表面单位面积中产生的附加损耗为

$$P_A = K_0 (60 f_z)^{1.5} (2 \tau_z B_0)^2$$

式中 B_0 、 τ_z 、 f_z ——产生此表面损耗的磁场的磁通密度振幅极距及频率。

定子各次相带谐波磁动势产生的总的磁极表面损耗为

$$P_{2vk} = \sum K'_0 (B_0 2 \tau_v)^2 (60 f_v)^{1.5} K_{rv}^2 A_p \quad (1.1-7)$$

式中 $\nu = 5, 7, 11, \dots$;

$$K'_0 = K_0 (60)^{1.5};$$

A_p ——转子磁极表面积;

K_{rv} ——涡流反作用系数;

τ_v —— ν 次谐波的极距, $\tau_v = \tau/\nu$;

f_v ——定子 ν 次相带谐波在磁极表面感应电动势的频率,

其表达式为 $f_v = f_1 (\nu \pm 1)$ 。

定子齿谐波磁动势在磁极表面产生的损耗, 工厂中常用下式计算:

$$P_{2tk} = K' \left[\frac{2p x_{ad}^*}{z_1 (K_{\delta-1})} \right]^2 P_{Fep} \quad (1.1-8)$$

式中 K' ——比例系数, $\delta_{\max}/\delta=1.0$ 时, $K'=0.3$; $\delta_{\max}/\delta=1.5$ 时, $K'=0.2$; $\delta_{\max}/\delta=2.0$ 时, $K'=0.15$ 。

z_1 ——电枢齿数;

p ——极对数;

K_{δ} ——卡特系数;

x_{ad}^* ——电机直轴电枢反应电抗标么值。

(2) 三次谐波磁动势损耗 在凸极同步电机中, 由于气隙分布不均匀, 转子励磁磁动势及电枢反应磁动势的基波分量均会在气隙中产生三次谐波磁场。在短路时, 定转子三次谐波磁场互相叠加, 三次谐波在定子齿中产生较大的附加损耗, 根据铁耗的一般计算公式并通过经验修正, 计算式为

$$P_3 = 10.7 p_{10/50} B_{t1}^{\frac{5}{4}} G_{t1} \quad (1.1-9)$$

式中 B_{t1} ——三次谐波磁通密度幅值;

G_{t1} ——齿部铁心质量。

(3) 漏磁场在金属构件中的损耗 定子绕组端部在负载时将产生较大的漏磁场, 这些磁场在端部结构件中也产生损耗, 由于端部绕组中电流分布复杂, 且端部的压板、压指、端盖形状各异, 而且它们距端部距离不等, 要准确计算这些损耗是十分困难的。在一些不同电机中, 均用经验公式计算。

1.1.2 绕组内损耗

绕组中损耗也称为电气损耗, 它是由于电流在导体中产生的损耗, 它包括基本损耗、电刷接触损耗及附加损耗。

1. 基本铜耗

根据焦耳-楞次定律, 此损耗等于绕组电流的二次方与电阻的乘积。如果电机具有多个绕组, 则应分别计算各绕组基本铜耗相加而得

$$P_{Cu} = \Sigma (I_a^2 R_a) \quad (1.1-10)$$

式中 I_x ——绕组 x 中电流；

R_x ——换算到基准工作温度绕组 x 电阻；

对 m 相绕组，如果电流一样，电阻相同，则电气损耗为

$$P_{cu} = mI^2 R \quad (1.1-11)$$

在计算基本铜耗时，假定电流在截面上均布，故式 (1.1-11) 电阻是指直流电阻。

按国标规定，供电机正常工作时做调节用变阻器、调压器、电阻、阻抗线路、辅助变压器及其他辅助设备中损耗也应计入。此外，用同轴励磁机励磁，则应把它们损耗也应计入。

2. 电刷接触损耗

电刷与集电环或换向器接触压降与电流无关，而与电刷的种类有关。因此，每极下电刷接触损耗

$$P_{cb} = \Delta U_b I \quad (1.1-12)$$

式中 ΔU_b ——电刷接触压降。

按国家标准 GB755—81 规定，每一极性（直流电机）或每一相（交流机）所有电刷接触电压为

碳-石墨、石墨电刷 1V；

金属石墨电刷 0.3V。

3. 绕组中的附加损耗

(1) 由于漏磁场引起的附加损耗 在基本铜耗计算中，绕组中电流在截面上分布均匀，此时电阻称为直流电阻。但实际上由于漏磁场的存在，导体沿高度上匝链漏磁通的不同，感应电动势不等，电流密度由槽底向上逐渐增加，这种现象称为集肤效应。由于集肤效应存在于绕组中，实际电阻比直流电阻要大，通常用系数 K_F 来计算电阻的增加。

对圈式线圈，电阻增加系数 K_F 与棒式线圈电阻增加系数不同，同是棒式线圈换位不同， K_F 也不相等。这一点可查有关参考文献。

由于集肤效应的存在，在绕组中引起的附加损耗为

$$P_{cud} = (K_F - 1)P_{cu} \quad (1.1-13)$$

式中 P_{Cu} ——绕组的直流电阻损耗；

K_F ——绕组电阻的增加系数。

(2) 由于漏电流引起的损耗 在笼型异步电动机中，由于没有槽绝缘，斜槽时便会产生横向电流，横向电流产生的附加损耗，叫做横流损耗。横流损耗主要决定于导条和铁心之间的电阻，虽然有些文献中也提出了一些算法，但由于接触电阻 R_c 与工艺条件的关系很大，到目前，尚没有准确的计算方法。

(3) 谐波磁场在绕组中产生的附加损耗 一阶齿谐波在笼型转子中产生的附加损耗为

$$P_{2z} = C_m m_1 I_1'^2 R_{2z}' \quad (1.1-14)$$

式中 R_{2z}' ——折算到定子侧的转子导条交流电阻；

C_m ——损耗系数，它与定转子槽数比有关。

有些文献指出：当 $z_2/z_1=1$ 时， $C_m=0$ ，此时 $P_{2z}=0$ ，但这时异步电动机起动困难。

负载附加损耗除上面指出的外还有一些，总的来看，这项损耗计算十分困难。在设计中小型电机时通常不详细计算，一般取输入或输出功率的一定的百分数。

1.1.3 机械损耗

机械损耗包括轴承摩擦损耗、电刷摩擦损耗、转子风摩擦耗及通风损耗。这些损耗在大多数情况下，均难以准确计算。因此一般情况下，工厂都是根据已造电机的试验数据来近似计算，或估算所设计电机的机械损耗。下述计算公式只供初步设计时参考。

1. 轴承摩擦损耗

滚动轴承的摩擦损耗可用下述公式计算：

$$P_f = 0.15 \frac{F}{d} v \times 10^{-5} \quad (1.1-15)$$

式中 P_f ——滚动轴承的摩擦损耗 (W)；

F ——轴承载荷 (N)；

d ——滚珠（或滚柱）中心处直径 (m)；

v ——滚珠中心的圆周速度 (m/s)。

滑动轴承的损耗和润滑油粘度、品质、轴承的圆周速度、工作表面加工质量及轴径与长度比等因素有关。大型卧式高速电机中，滑动轴承的摩擦损耗可用下式计算：

$$P_f = 2.3l_j \frac{50}{\theta} \sqrt{\mu_{50} p_j d_j \left(1 + \frac{d_j}{l_j}\right)} v_j^{1.5} \times 10^{-10} \quad (1.1-16)$$

式中 P_f ——滑动轴承的摩擦损耗 (W)；

p_j ——轴颈投影面上的压力 (Pa)；

d_j ——轴颈的直径 (m)；

l_j ——轴颈长度 (m)；

θ ——工作油温 (C)；

μ_{50} ——50 C 时油的粘度， $\mu_{50} = 0.015 \sim 0.02 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ；

v_j ——轴颈的圆周速度 (m/s)。

2. 电刷摩擦损耗

对电刷摩擦损耗可用下式计算：

$$P_{fb} = \mu_b p_b A_b v \quad (1.1-17)$$

式中 P_{fb} ——电刷摩擦损耗 (W)；

μ_b ——摩擦系数，对集电环可取 0.15~0.20，而对换向器可取 0.2~0.3；

p_b ——电刷压力， $p_b \approx 20 \times 10^3 \text{ Pa}$ ；

A_b ——电刷总工作面积 (m²)；

v ——集电环或换向的圆周速度 (m/s)。

3. 通风损耗

对于水轮发电机形成通风损耗的原因很复杂，特别是附加损耗占总通风损耗的比例很大。因此，精确计算是很困难的，通风损耗只能用如下的经验公式进行粗略估算：

$$P_v = K_v \left(\frac{v}{10} \right)^2 Q_0 \quad (1.1-18)$$

式中 P_v ——通风损耗 (kW)；

Q_0 ——总风量 (m³/s)；

v ——转子圆周速度 (m/s)；

K_v ——系数，通常取 $K_v=0.175\sim0.185$ 。

在电机产生风量尚不知道的情况下，式 (1.1-18) 中 Q_0 可用需要风量 Q'_0 来代替。因为

$$Q'_0 = \frac{P_{Fe} + P_{Cu1} + P_d + P_e + P_v}{c_a \Delta t \rho} \quad (1.1-19)$$

式中 P_{Fe} ——空载铁耗 (kW)；

P_{Cu1} ——基本铜耗 (kW)；

P_d ——附加损耗 (kW)；

P_e ——励磁损耗 (kW)；

P_v ——通风损耗 (kW)；

c_a ——空气的质量热容 [J/(kg·K)]；

Δt ——空气温升 (K)；

ρ ——空气密度 (kg/m³)。

将式 (1.1-19) 代入式 (1.1-18) 可得

$$P_v = \frac{K_v \left(\frac{v}{10} \right)^2 (P_{Fe} + P_{Cu1} + P_d + P_e)}{c_a \Delta t \rho - K_v \left(\frac{v}{10} \right)^2} \quad (1.1-20)$$

对汽轮发电机通风损耗，主要与所采用的风扇形式、通风系统内风量和风压有关。

风扇的通风损耗可用经验数据来计算，即

$$P_v \approx 1.1 Q \theta_v \quad (1.1-21)$$

式中 P_v ——风扇的通风损耗 (kW)；

Q ——风扇提供总风量 (m³/s)；

θ_v ——进入风扇后的气体温升 (K)，对于发电机容量 $P_H \leq 25000\text{kW}$ ， $\theta_v = 5\text{K}$ ； $25000\text{kW} \leq P_H \leq 50000\text{kW}$ ， $\theta_v = 7\text{K}$ ； $50000\text{kW} \leq P_H \leq 100000\text{kW}$ ， $\theta_v = 10\text{K}$ 。

如果知道风扇全压力和流量，以及风扇效率，风扇损耗亦可按下式计算：

$$P_v = \frac{QH}{10.2\eta_v} \quad (1.1-22)$$