

电机中的空气动力学 与热传递

〔苏〕A. M. 鲍里先科

B. T. 别科 A. M. 亚科夫列夫 著



机 械 工 业 出 版 社

内 容 简 介

本书阐述空气动力学与热传递的原理及其在旋转电机发热与通风计算上的应用。考虑到计算方法的迅速改进和冷却系统的复杂化,本书第一部分给出了有关空气动力学与热传递的一般特性的某些广义概念,第二部分综合了电机通风系统的研究成果,给出了流体计算与热计算的方法。

本书可供电机制造专业的工程技术人员以及动力与机械制造高等院校的实验室工作人员和大学生参考。

АЭРОДИНАМИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

А.И.БОРИСЕНКО, В.Г.ДАНЬКО, А.И.ЯКОВЛЕВ

М. «Энергия» 1974

* * *

电机中的空气动力学与热传递

А.И. 鲍里先科

〔苏〕 В.Г. 丹 科 著

А.И. 亚科夫列夫

魏书慈 邱建甫 译

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $17^{1/8}$ · 字数 449 千字

1985 年 9 月北京第一版 · 1985 年 9 月北京第一次印刷

印数 0,001—4,250 · 定价 4.05 元

*

统一书号: 15033 · 5696

译 序

随着近代电机制造工业的发展,单机容量不断增大,技术经济指标也普遍提高。因此,电机的发热与冷却问题日益受到重视,它已成为当今电机工程中最重要课题之一。

电机的发热与冷却,属于流体力学(空气动力学)、传热学、电磁学和电机工程的边缘学科。解决这一问题,需要综合应用上述各学科。迄今国内有关这方面的著作尚未见到,国外也为数很少。尽管国内各主要电机制造厂和研究所在电机冷却方面已经积累了一定的经验,但往往因为缺少系统的理论指导而停滞在感性认识阶段;由于缺少较完整的计算技术(方法、图表、数据),电机冷却和发热的计算方法基本上还处于初级阶段;有些概念也常常是肤浅和模糊的。因此,这方面的工作远远不能适应近代大电机发展的需要。

1974年苏联《动力》出版社出版的由A. И. 鲍里先科、B. Г. 丹科和A. И. 亚科夫列夫合著的《电机中的空气动力学与热传递》(Аэродинамика и Теплопередача в Электрических Машинах)一书,系统地介绍了流体力学和传热学在电机工程中应用的理论基础,分析和推演了电机通风冷却和发热的物理过程与计算公式,以大量实验数据说明了当前电机冷却问题的概况,并给出了以电子计算机解电机温度场的一些方法和实例。本书内容比较丰富。但也有不足,如对大型电机的冷却问题讲得较少,若干公式符号有些混乱,刊错和笔误之处不少。在翻译过程中对这些地方都作了尽可能的纠正。该书中文本的出版,对我国电机冷却专业的科研、试验、设计人员将有所帮助,同时也可作为高等院校电机工程专业的教学参考书。

本书第一章至第七章第6节由邱建甫同志翻译,第七章第7

IV

节至第十章及附录由魏书慈同志翻译。全书译稿经上述两同志互校，最后经魏书慈同志校订。

本书的翻译和出版得到丁舜年同志的热情鼓励和关怀，在此表示衷心的感谢。

由于水平有限，错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

译 者

前 言

除了增加有效部分的负荷、采用新的绝缘材料和优质钢以外，减少电机重量最重要的手段就是合理地进行冷却。根据热源来分配冷却气流，应能保证导体具有容许的均匀分布温度。

电机中有六种能和物质的通量：电流、磁通量、力、热流、冷却介质流和润滑流。

对前三种——电流、磁通量和力，已进行过许多研究工作，很好地揭示了这些现象的物理状况，并已用一些足够精确的计算方法将它们表示出来。这些方法现今在电机设计中仍得到广泛的应用。至于其余三种——热流、冷却流和润滑流，即空气流体动力学和热交换方面的课题，对它们研究得较少。

如果说，在电机制造业的初始阶段，基本上是根据正确安排电流、磁通量和力的一些要求来确定电机结构的，那末，随着单位负荷的提高，正确地进行电机有效部分的散热就具有决定性的意义。为了使新系列电机（其中包括新的大型汽轮发电机）获得良好的性能，必须采取措施，以增强电机的散热能力和降低它的温度。选择结构措施应该以热计算为依据。在设计过程中，应能计算出电机内的温度分布，并确定不同因素对它的影响。

通常所采用的冷却介质有气体或液体，整个热交换过程取决于非常复杂的冷却介质流动特性，这种特性与紊动、涡流的形成以及某些情况下气体的可压缩性等现象有关，通常不可能获得有关的冷却介质运动方程的精确解答。近三、四十年来，在气体和液体的理论研究和实验研究方面虽积累了大量经验，但将它们应用于电机制造总还显得不足。个别的、甚至是大量的研究也只能取得偶然的特性，经常苦于可用的实验技术不足，没有充分的理论根据，并出现研究成果难以用于实际计算的状况。

为了综合电机的空气流体力学实验研究成果，采用相似理论

法具有重大意义。

应该指出，假如把冷却空气当作电机结构的“有效材料”来看待，那末，它是最昂贵的了，因为电机中冷却介质流动所消耗的能量，相当于它所发出电能的2~3%。

在某些情况下，电机制造的可能性是由冷却条件决定的。如果没有冷却领域所取得的重大技术成果，例如，绕组采用内部直接冷却方式，那末，制造单机容量20万、30万、50万以及现在的100万和100万千瓦以上的发电机是不可能的。因为尽管大型电机中冷却的相对损耗并不大，但主要的研究却与大电机有关。同时，成千上万台中小型电机需要消耗大型发电机所生产的电能，它们在冷却上的损耗是汽轮发电机的3~4倍或更大，况且这些电机的风扇、通风沟和散热表面在结构上是极不完善的。即便是为了充分利用发电站的电能将现有装机容量增加两倍来满足用户需要，但因几百万台中小型电动机冷却系统不完善，也会使大型发电机上所得到的全部节能化为乌有。

苏联电机制造业的奠基人A. E. 阿列克谢耶夫、M. II. 考斯琴科以及其他国家的李夫绥茨、李赫捷尔等都认为热流特性与冷却课题的求解仅仅是初步近似的。近年来，空气流体力学与热交换学所取得的成就，在很大程度上与航空业的发展有关，也可以将上述成果应用于电机制造业，用来比较细致地分析热流与冷却流。

电机中的润滑流和其他机器中的一样。求解狭窄沟内运动边界与固定边界之间粘性液体流动的某些课题，是大型电机所采用的滑动轴承和推力轴承润滑计算的理论基础。计算大型氢冷汽轮发电机的液体密封时，同样提出粘性液体流动的问题。

为了进行散热，除利用空气而外，还采用水和油，在大型汽轮发电机上则用氢气。看来，在许多场合采用液体直接冷却是适宜的，如用氟里昂进行蒸发冷却，采用涡流管和热管[⊖]的系统，应用深冷技术等。

应考虑到，在现时实际应用的许多电机中，由于电流和磁流

⊖ 原文为Вихревые и тепловые трубы——译者注。

的运动而使有效部分和结构件发热，热量往往由这些部件传递至周围介质中。这种热传递越有效，即有效材料和周围介质间的热阻越小，则所允许的单位电磁负荷就越大，电机的利用率也就越高。

近年来，制造了一些利用超导技术的大型电机模型，这里的主要损耗是维持超导电性所需的能量消耗。同时，与利用超导和纯金属材料的可能性有关的一个主要课题，就是研制可靠而具有高效能的热绝缘，并编制可靠的计算方法。

本书除叙述笔者多年来在哈尔科夫航空学院、哈尔科夫电机厂和重型电机厂所作的有关空气动力学和热传递方面的一些试验研究成果而外，还试图对所掌握的文献资料加以归纳，使其系统化，给从事电机设计和计算的工程技术人员介绍热计算和空气动力计算的新方法，希望有助于他们研制新型电机，并希望本书能使空气力学工作者和热力工程专业人员重视上述这一重要的技术领域。

我们认为，将某些工业部门（例如航空工业）所特有的空气动力和热计算的成果、试验、方法和准确性应用于电工行业，这是符合时代要求的，借此可以大大地改善电机与电器的技术指标，并获得较大的经济效益。（以下从略）

作者谨启

目 录

译序

前言

第一章 电机发热与冷却的物理基础	1
1-1 热源.....	1
1-2 冷却方式、方法与系统.....	7
1-3 空气流体力学方程与热交换方程	16
1-4 模拟	50
第二章 热传导	62
2-1 导热系数的测量	62
2-2 绕组绝缘的热物理特性	64
2-3 浇注式绝缘组成部分与磁性槽楔材料的导热系数	67
2-4 绕组槽部与端部的等效导热系数	68
2-5 金属与电工钢的导热系数、电导率与热容量	77
第三章 对流热交换	81
3-1 管中的流动与热交换	81
3-2 定子的散热	91
3-3 转子中的热交换.....	103
3-4 介于定、转子之间的气隙中的热交换.....	114
3-5 液体与气体的物理性能.....	124
第四章 电机中复杂的热交换	131
4-1 总放热系数.....	131
4-2 在有限空间内经流体层的热交换.....	131
4-3 自由对流时的热传递.....	133
4-4 无内部热源时简单物体的热传递.....	138
4-5 有内部热源时稳定状态下的热传递.....	145
第五章 翅式与筒状冷却表面的计算	151

5-1	关于选择冷却翅最优尺寸的初步依据	151
5-2	任意截面的冷却翅高度方向的一维温度分布	151
a)	最小截面的直冷却翅	153
б)	矩形断面的直冷却翅	154
в)	三角形和梯形截面的直冷却翅	156
г)	各种不同直冷却翅的比较	159
д)	圆形冷却翅热分布的一般方程式	159
5-3	采用非定常放热系数时冷却翅高度与长度方向温度的分布	160
5-4	冷却翅的二维温度分布	163
5-5	冷却翅的效率、翅厚与翅间距的最优比例	166
5-6	异步电动机机座下部不带冷却翅对有效部分温度分布的影响	176
5-7	空气-空气热交换器的计算	186
第六章	冷却系统的通风计算与流体计算	197
6-1	计算的目的	197
6-2	网路特性的确定	197
6-3	转子旋转的核算	203
6-4	电机通风系统的等效线路	212
a)	等效线路的分类	212
б)	带有冷却翅的电动机的外部冷却系统	215
в)	防爆式异步电动机的通风系统	219
г)	直流电动机的轴向通风系统	225
д)	轧钢直流电动机的通风系统	226
e)	汽轮发电机定子冷却系统	231
ж)	采用气体直接冷却绕组的汽轮发电机转子通风系统	236
第七章	大型异步电动机的热计算	238
7-1	热计算的任务	238
7-2	极限容许温升、绝缘耐热等级	238
7-3	现代的电机电热计算方法概述	241
7-4	热阻计算	244
7-5	轴向通风大型电动机的发热计算(按等效热路法)	258
7-6	防爆式电动机有效部分的温度分布	270
7-7	径向通风系统的封闭式电动机的计算	279

第八章 中小型异步电动机的热计算	293
8-1 封闭式电动机的计算	293
8-2 机座最佳冷却翅的选择	307
8-3 铁心轭背直接鼓风的封闭式防爆电动机的计算	313
8-4 潜浸式电动机计算的特点	321
8-5 防护式和开启式电动机的计算	329
8-6 带肋化轭背的外鼓风式异步电动机定子铁心的二维温度分布	343
8-7 外鼓风的封闭式电动机定子绕组发热的不均匀性	348
8-8 异步电动机转子的温度分布	355
8-9 鼠笼型转子冷却系统几何尺寸的计算	370
8-10 温度与压力对绕组发热的影响	372
第九章 大型同步电机的热计算	379
9-1 采用径向冷却系统的叠装式定子铁芯段的二维温度分布	379
9-2 铁心采用径向冷却系统、绕组为直接冷却的定子	392
9-3 铁心采用轴向冷却系统、绕组为直接冷却的定子	399
9-4 绕组采用间接冷却的隐极式转子	410
第十章 直流电机的热计算	424
10-1 非分段叠装电枢温度分布的研究	424
10-2 中型电机的发热计算(按等效热路法)	426
10-3 采用轴向冷却系统的电枢的温度分布	439
10-4 采用径向冷却系统的电枢	445
10-5 无补偿绕组的主极	455
10-6 有补偿绕组的主极	473
附录	484
参考文献	515

第一章 电机发热与冷却的物理基础

1-1 热 源

电机的热源就是电机损耗集中的部位。

设计电机时在电磁计算过程中要确定损耗〔1, 2, 11〕, 并假定这些数据在热计算时是给定的。此外所引用的一些对比关系, 只能用于初步计算。

损耗一般分为下列四类:

1. 机械损耗: а) 电刷的摩擦损耗; б) 轴承的摩擦损耗; в) 冷却介质流动所需的通风损耗。
2. 电损耗: а) 定、转子绕组的电损耗; б) 电刷滑动接触处的电损耗; в) 用于励磁的电损耗。
3. 磁损耗: а) 磁滞损耗; б) 铁心内主磁通所产生的涡流损耗。
4. 附加损耗: а) 铁心的附加损耗; б) 绕组的附加损耗。

前三类损耗通常称为主要损耗。

附加损耗是由下列因素造成的: 磁通的高次谐波、磁通挤入槽内以及磁通在端部的漏泄。这些损耗相当大且分布不均, 大部分都集中在表层几个毫米深处。因此, 其单位值可能超过主要损耗单位值的若干倍〔3, 10, 11〕。

在一般情况下, 损耗随部件位置和时间而变化[⊖]。不过, 在大多数实际的课题中, 对电机各部件在稳定发热状况下总损耗的分布是十分清楚的。

⊖ 原文为“В общем случае потери являются функцией координат и времени”直译是“损耗是坐标与时间的函数”, 但很生僻, 坐标总是指某一点的空间位置而言的, “函数”意味着随某一参数而变化, 因此改为如文中意译——译者注。

换向器与集电环的损耗 换向器与集电环的发热取决于滑动接触装置的损耗 $P_{\text{м.к}}$ 。它包括摩擦所产生的机械损耗 $P_{\text{т.п.м}}$ 和电损耗 $P_{\text{э.м}}$ [5, 11]；

$$P_{\text{м.к}} = P_{\text{т.п.м}} + P_{\text{э.м}} = k_{\text{т.п}} f_{\text{м}} s_{\text{м}} w_{\text{к}} + 2\Delta U_{\text{м}} I_{\text{м}} \quad (\text{瓦}) \quad (1-1)$$

式中 $w_{\text{к}}$ ——换向器的圆周速度 (米/秒)；

$s_{\text{м}}$ ——总的接触面积 (厘米²)；

$k_{\text{т.п}}$ ——摩擦系数；

$f_{\text{м}}$ ——换向器对电刷的压力 (公斤力/厘米²)；

$\Delta U_{\text{м}}$ ——电刷与换向器接触处的跨越电压 (伏)；

$I_{\text{м}}$ ——总电流 (安)。

通常，换向器的 $k_{\text{т.п}} = 0.2 \sim 0.3$ ，集电环的 $k_{\text{т.п}} = 0.15 \sim 0.17$ ；对于普通电机来说， $f_{\text{м}} = 0.15 \sim 0.25$ 公斤力/厘米²；对于牵引电机来说， $f_{\text{м}} = 0.5$ 公斤力/厘米² 或以上。根据全苏国家标准 ГОСТ 11828-66 的规定，碳刷和石墨电刷的 $\Delta U_{\text{м}} = 1$ 伏；金属碳刷和金属石墨电刷一次接触的 $\Delta U_{\text{м}} = 0.3$ 伏。根据试验数据 [11]， $\Delta U_{\text{м}}$ 有时达 2 伏 (图 1-1)。

对异步电机的集电环来说，

$$P_{\text{э.м}} = m \Delta U_{\text{м}} I_{\text{к}} \quad (1-2)$$

式中 $I_{\text{к}}$ ——集电环的电流 (转子绕组接成星形时， $m = 3$ 和

$I_{\text{к}} = I_2$ ；接成三角形时， $m = 3$ 和 $I_{\text{к}} = I_2 \sqrt{3}$)。

在高速直流电机上，电刷接触的损耗可能达到电机总损耗的

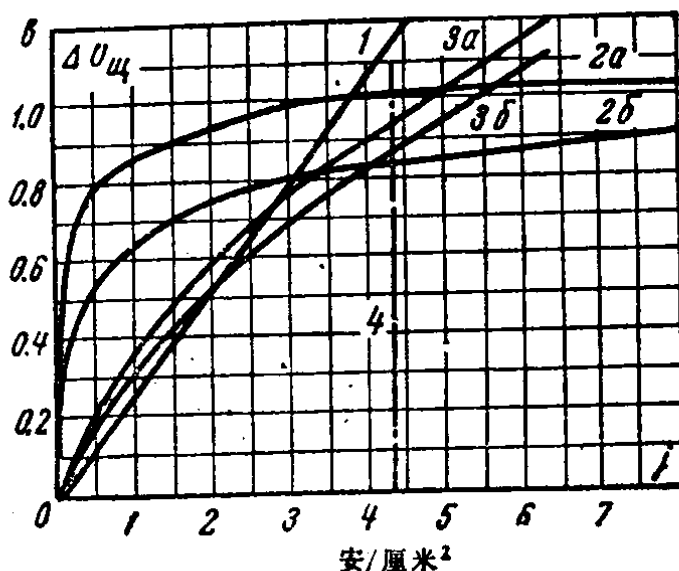


图1-1 电刷跨越电压与电流密度的关系特性

1—静止状态，直流电 2—旋转，直流电
3—旋转，交流电 4—曲线3a与3b的有效电流密度

a—电流方向是由金属至电刷 b—电流方向是由电刷至金属

40~50%[⊖]〔4〕, 同时, 换向器发热对绕组的热状态有很大影响。

电刷的损耗 $P_{\text{м}} \ominus$ 取决于电刷的热导率和换向器的转速, 按文献〔5〕, 它等于总损耗 $P_{\text{м.к}}$ 的 15~35% (图 1-2)。

轴承损耗 滑动轴承的损耗按下式计算:

$$P_{\text{н}} = k_{\text{н}} d_{\text{н}} l_{\text{н}} w_{\text{н}} f_{\text{н}} \quad (1-3)$$

式中 $f_{\text{н}} = F_{\text{н}} / S_{\text{н}}$ —— 压力 (牛顿/米²);

$S_{\text{н}}$ —— 轴颈对轴直径平面的投影 (米²);

$F_{\text{н}}$ —— 轴承的载荷 (牛顿);

$d_{\text{н}}$ 和 $l_{\text{н}}$ —— 轴颈的直径和长度 (米);

$w_{\text{н}}$ —— 轴颈的圆周速度 (米/秒);

$k_{\text{н}}$ —— 摩擦系数。

根据妥泽尔和德特玛尔所作的研究〔6〕, 当 $w_{\text{н}} = 0.5 \sim 4$ 米/秒时, $k_{\text{н}} = C \sqrt{w_{\text{н}} / f_{\text{н}} T_{\text{н}}}$; 当 $w_{\text{н}} \geq 10$ 米/秒时, $k_{\text{н}} = C / f_{\text{н}} T_{\text{н}}$ 。

式中 $T_{\text{н}}$ —— 轴颈温度;

C —— 常数, 由下式得出:

$$C = 9.75 \frac{w_{\text{н}}}{1 + 0.5 w_{\text{н}}} \quad (1-4)$$

滚动轴承的损耗按下式计算:

$$P_{\text{нм}} = k_{\text{тп}} \frac{G}{d_{\text{нм}}} w_{\text{нм}} \quad (1-5)$$

式中 G —— 轴承环的载荷 (牛顿);

$d_{\text{нм}}$ —— 经滚珠或滚柱中心的圆周直径 (米);

$w_{\text{нм}}$ —— 轴的圆周速度 (米/秒)。

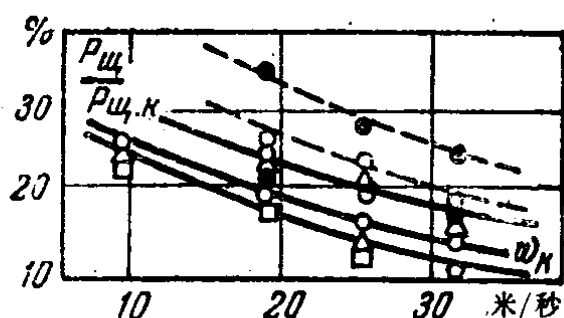


图1-2 电刷损耗与换向器

线速度的关系特性〔5〕

——Γ 8 电刷 - - - - MГC 7 电刷
换向器对机座的温升: · — 30°C
○ — 50°C △ — 70°C □ — 80°C

⊖ 原文如此, 一般没有这么大, 疑误——译者注。

⊖ 原文如此, 疑为 $P_{\text{м.к}}$ 之误——译者注。

中小型电机滚珠轴承的 $k_{rp} = 0.002 \sim 0.003$ 。

通风损耗 这种损耗主要是拖动风扇的功率〔346〕:

$$P_{\text{вex.вн}} = QH_r = QH_{\pi}/\eta_r\eta_{\text{вex}} \quad (1-6)$$

式中 Q ——空气流量;

H_r ——风扇的理论压头;

H_{π} ——风扇的实际压头;

η_r 和 $\eta_{\text{вex}}$ ——流体效率与机械效率。

流量 Q 通常用理论或经验公式进行计算, 它与风扇的几何参数有关〔121, 122, 296〕。

零部件与空气 (其他气体或液体) 的摩擦损耗 总损耗中大部分是这种损耗, 特别是在高速电机中, 它产生在下列各处: 定子内膛孔内旋转的圆柱形表面; 转子端面或其附近的转子绕组端部; 端环、风扇、换向器以及在相对空间旋转的其他部件。圆盘、圆筒和锥体的空气摩擦损耗按下列各式计算:

$$P_{\text{д.тп}} = c_{f\text{д}} \pi \rho \omega^3 R^5 \quad (1-7)$$

$$P_{\text{д.тп}} = c_{f\text{д}} \pi \rho \omega^3 R^4 L \quad (1-8)$$

$$P_{\text{д.тп}} = c_{f\text{д}} \pi \rho \omega^3 R^5 \left(1 + \frac{L}{R} \right) \quad (1-9)$$

式中 $c_{f\text{д}}$ 、 $c_{f\text{л}}$ 和 $c_{f\text{к}}$ ——摩擦系数 (通常根据经验来确定)〔346〕;

R 和 L ——旋转体的外半径和长度;

ω ——角速度;

ρ ——介质的密度。

对电机进行计算时, 这些公式只能在一定条件下应用, 因为必然会有形状很复杂、表面极为粗糙的物体。

当有轴向流动的情况下, 定、转子间气隙中流体紊流时的摩擦损耗按下式计算:

$$P_{\text{д.тп}} = \frac{\pi}{16 \times 102} c_{f_p} \rho \omega_p^3 D_p^4 l_p \quad (\text{千瓦}) \quad (1-10)$$

式中 D_p 和 l_p ——转子直径和长度;

$\omega_p = 2\omega_{\varphi_1}/D_p$ ——转子的角速度。

计算流阻系数 c_{f_p} 可用阿尔特舒尔公式〔53〕,

$$c_{fp} = 0.05 \left(\frac{h_p}{\delta_1} + \frac{100}{Re_p} \right)^{0.25} \quad (1-11)$$

式中 h_p/δ_1 ——转子表面相对粗糙度；

δ_1 ——气隙；

$Re_p = \delta_1 \omega_p / \nu$ ——雷诺数；

ν ——介质的运动粘度；

h_p ——粗糙表面的凸起高度。

定子和转子绕组的电损耗 它们按下式计算：

$$P = I^2 r = I^2 \rho l / S \quad (1-12)$$

式中 I ——电流；

ρ ——导体的电阻率，它是温度的线性函数：

$$\rho_r = \rho_{15} [1 + \beta (T - 15)] \quad (1-13)$$

式中 ρ_{15} 为 $T = 15^\circ\text{C}$ 时的电阻率。对于退火的工业用铜来说， $\rho_{15} = 0.01754$ 欧姆·毫米²/米； $\beta = 0.004^\circ\text{C}^{-1}$ 。对于截面为 1 毫米² 的导线来说， $r_{15} = 0.01754$ 欧姆； $\beta = 0.004^\circ\text{C}$ 。

励磁损耗 直流电机的励磁绕组和调节装置的损耗按下式计算：

$$P_b = I_b^2 (r_b + r_p) = I_b^2 r \quad (1-14)$$

式中 I_b ——励磁电流；

$r = r_b + r_p$ ——励磁回路的电阻，它包括励磁绕组和调节变阻器的电阻。

同步电机的励磁损耗，根据励磁电流 I_b 和折算到 100°C 的转子绕组欧姆电阻 r 来进行计算。

定、转子绕组的铜耗 $P_{\Sigma 1}$ 和 $P_{\Sigma 2}$ ，用测量运行中发热的电动机绕组的电阻和电流的方法来确定，三相电机按公式 $P_{\Sigma 1} = 1.5 I_1^2 r_1$ 来计算。

式中， I_1 和 r_1 为与绕组连接方式无关的线电流和线电阻。转子铜线或铝鼠笼条的损耗 $P_{\Sigma 2}$ 取决于转差率 S 和电磁功率 P_0 ：

$$P_{\Sigma 2} = s P_0; \quad P_0 = P_1 - P_{\Sigma 1} - (P_{01} + P_{02} + P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2}) \quad (1-15)$$

式中， P_1 为由电网获得的功率。括弧中的四个被加数将在下面

进行研究。

在计算绕组的发热时，损耗 P_{w1} 和 P_{w2} 分成槽部和端部损耗 ($P_{w,\pi}$ 和 $P_{w,\pi\pi}$)，这与电流密度以及槽部和端部的长度成比例。

磁损耗 定、转子铁心内因磁滞和涡流所造成的主要磁损 P_{01} 与 P_{02} ，与主磁通对有效铁心的周期性反复磁化有关。反复磁化又分下列三种：静磁化——在一定限度内磁化电流缓慢变化时产生的磁化；循环磁化——由交变电流产生的磁化；旋转磁化——电枢铁心在磁场中旋转时产生的磁化。

循环磁化时单位质量的损耗可用下述的斯契因米切茨经验公式来表示：

$$P_{01} = C_2 f B_{max}^2 \quad (1-16)$$

式中 C_2 ——与电工钢牌号有关的常数；

f ——磁化频率；

B_{max} ——磁感应最大值；

α ——乘方指数（当磁感应为 0.8~1.6 特时加有硅的电工钢的 $\alpha = 2$ ）。

鼠笼型电动机铁心 $\ominus$ 的损耗 P_{02} 由转差频率来确定，它的值很小，可以忽略不计。

磁感应增加到 1.6 特时，旋转磁化的损耗 P_{02} 增大，但磁感应继续增加时，该损耗却急剧下降。在电枢铁心内磁感应通常小于 1.6 特，同时旋转磁化的损耗按斯契因米切茨公式进行计算，并引入校正因数 1.8〔1、2〕。

涡流损耗按下式计算：

$$P_{bx} = \frac{\pi^2}{6\rho} \frac{\delta^2}{\gamma_c} (fB)^2 \quad (1-17)$$

式中 δ ——硅钢片厚度；

γ_c 和 ρ ——铁心的密度和电阻率。

附加损耗 对 100 千瓦以下的大多数异步电动机来说，定、转子中的附加损耗 P_{a1} 和 P_{a2} 总共为额定功率的 1~5%〔3、9、10〕。

$\ominus$ 指转子(电枢)铁心——译者注。

11], 而不是 ГОСТ 183-66 所规定的耗去额定功率的 0.5%。

有几种计算附加损耗的方法〔10, 11〕, 可以按照参考文献〔12〕中的方法分别计算 $P_{\pi 1}$ 和 $P_{\pi 2}$ 。

在直流电机中, 由于高次谐波磁通的脉动, 附加损耗产生在电枢铁心及其齿部以及主极、换向极的铁心和绕组内。

同步电机的附加损耗是由于定子绕组槽部和端部的漏泄磁场所引起的。漏磁在定子绕组铜线和邻近的金属结构件(压板、绑环等)内感生涡流。同步电机中产生附加损耗的第二个原因, 是定、转子的谐波磁势。电机的不平衡负荷同样会导致附加损耗。

100千瓦以下的同步电机的附加损耗可按 ГОСТ183-66 作近似计算, 其值在电机额定功率的 1% 以下。各部分的附加损耗可用参考文献〔11〕中的方法进行计算。

1-2 冷却方式、方法与系统

冷却方式与方法 根据冷却介质与散热部位间有否热绝缘来区别电机部件的间接和直接冷却。没有热绝缘时, 就可以急剧地降低被冷却件和冷却介质间的温度梯度, 并能使冷却介质的单位流量带走更多的热量。

冷却介质可以采用气体或液体, 与此相应的冷却方式通常称为气体或液体冷却。近来, 为了进行冷却, 开始利用液体蒸发的热效应, 这种方法称为蒸发冷却。这种冷却方式目前在工业用电机上尚未得到广泛应用。

绝大多数中、小型电机实际上是采用大气压下的空气进行冷却, 大型电机(汽轮发电机和同步调相机)采用氢冷。氢气具有高的导热系数和热容量以及小的密度。采用压缩空气作为冷却介质可以形成一种有效的冷却系统, 因为 2 ~ 4 个大气压[⊖]下空气的体积热容比氢气的要大好几倍〔34〕。

⊖ 原文为 20~40 大气压, 有误, 因为电机中不可能用如此高压空气, 而且空气体积热容在常压下与氢气接近相等, 若为 20~40 大气压则要大好几十倍——译者注。