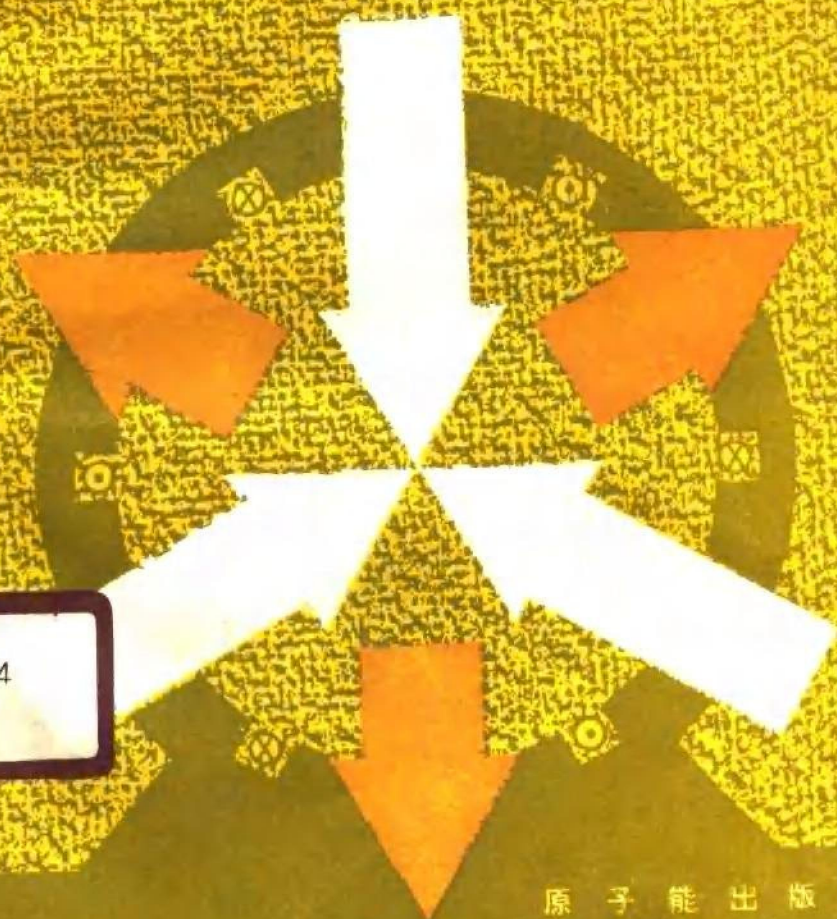


电机中的热交换

[苏] H. Ф. 菲利包夫 著
杨斌 译



M301.4

原子能出版社

内 容 简 介

本书阐述了电机中热交换的工程基础，介绍了电机冷却系统热计算和空气动力学阻力计算的实用方法，分析了不同冷却系统。同时还给出了计算实例。

本书可作为大学电机专业学生的学习参考书，也可供从事电机制造的工程技术人员参考。

译 序

本书译自 1986 年苏联原子能出版社出版的 И.Ф. 菲利包夫所著《ТЕПЛООБМЕН В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ》一书。原书被苏联教育部批准为大学电机专业学生的学习参考书。

原著阐述了电机中热交换的理论和工程基础，讨论了电机的热计算和与热计算有关的通风计算的实用方法，详细分析了冷却系统，并给出了计算实例。

原著全书分两篇，共十二章。考虑到原著中部分章节内容纯属热工基础理论，需要时可以从《传热学》及《流体力学》等有关书籍中查阅；第 12 章为加深知识，实用性不大；所以译者在翻译时删除了这些内容，并对书的章节重新作了编排。

本书不仅可供大学电机专业学生参考，也可供有关工程技术人员使用。

在翻译本书过程中得到了东南大学张正荣教授和南京化工学院孙曾闰副教授的指导和帮助，在此表示衷心感谢。

由于本人水平有限，译文中可能有不妥或谬误之处，请读者批评指正。

译者

目 录

译序

第一篇	电机中的热流运动	1
第一章	一般问题	1
1-1	电机的冷却系统	1
1-2	冷却系统的效率	2
1-3	冷却系统的经济性	3
1-4	冷却系统的计算和设计	4
1-5	热计算和通风计算的关系	5
1-6	热计算和通风计算的准确性以及实验的作用	5
1-7	计算和设计冷却系统的必要知识	6
1-8	相似理论	7
1-9	热迁移, 对流换热	10
第二章	稳态和非稳态负荷工况下电机的热计算	13
2-1	引言	13
2-2	电机结构部件中温度和温升的概念	14
2-3	当量热系统	17
2-4	计算机的应用	21
2-5	水冷绕组汽轮发电机定子的当量热系统计算	22
2-6	非稳态过程中电机的热计算	26
2-7	电机的换热器	33
第三章	电机的直接冷却	38
3-1	引言	38
3-2	通电导线的热计算	41
3-3	直接冷却电机热计算的相对单位法	53
3-4	冷却通道长度的选择	61

3-5	通道截面的选择	70
第二篇	电机中冷却介质的流动	79
第四章	电机的通风计算	79
4-1	通风计算	79
4-2	通风计算的任务	83
4-3	平衡方程式的图解法	85
4-4	离心风机的设计	87
4-5	轴流风机的设计	95
4-6	风机计算的实例	100
4-7	用压力损失平衡法计算通风系统气动阻力	102
4-8	具有不同鼓风部件系统的计算	104
4-9	桥式通风系统的近似图线分析计算	106
4-10	通风系统的图线分析计算	110
4-11	模拟计算机的应用	114
4-12	数字计算机的应用	115
4-13	200MW汽轮发电机的通风计算实例	116
4-14	电机冷却的能耗	120
4-15	水冷却系统的汽蚀计算	123
第五章	分配系统的通风计算	128
5-1	流量分配不均匀的物理原因	128
5-2	支流流量变化的计算	132
5-3	电机中的分配系统	136
5-4	分配微分方程	141
5-5	分配微分方程的简化解	143
5-6	供给通道的阻力计算	151
5-7	分配系统的一般分析	156
附录	159
参考文献	163

第一篇 电机中的热流运动

第一章 一般问题

1-1 电机的冷却系统

电机工作时释放出的热量是机械能和电能相互转换过程中产生的能量损耗。一般情况下，导体中的焦耳损耗、交变磁化损耗、磁性介质和导电介质中的涡流损耗、转子的摩擦损耗以及循环冷却介质产生的损耗均属这类损耗。

任何电机的结构均由功能部件（铁芯、绕铜组）和结构部件（绝缘和导体）组成，一般情况下，这样的系统是各向异性的。该系统的基本性质，例如热容、密度等，随着一个部件内部方向的改变以及由一个结构零件过渡到另一个结构零件而改变。

来自组成电机结构材料固体中的热流一部分增加它们的焓（在非稳态过程中），另一部分通过物体内的导热和其边界上的换热进入冷却介质。

在驱动部件（风机和泵）的作用下，冷却介质（气体或液体）沿冷却系统的通道循环。循环系统的通道和驱动部件共同组成电机冷却系统。

各种不同的电机冷却系统确定着边界面上的换热强度，而且最终确定着一定体积下电机的实际电磁功率。换热愈

强，由于释放一定数量的能耗所引起的温升将愈小。保证了所用材料能耐受的温度，也就保证了电机在额定负荷下运转的耐久性和可靠性。因此每个冷却系统的效率就成为它的重要特性。

因为冷却效率显然是与循环冷却介质所消耗的能量有关，所以也用经济性来表征冷却系统的特性。

1-2 冷却系统的效率

在设计电机时，当然力图采用足够有效的冷却系统。一般地说，各种不同的量或综合量可作为系统有效的指标。例如，可把通过单位冷却表面的允许热流值作为指标。处理问题的另一个方法是引入最大允许尺寸的概念。例如，对于所选的冷却系统，其最大允许尺寸为实际通道长度。最重要的指标是最热处的最高温度与其平均温度之比。

应该强调，所列的每个参数，无论如何，实际上都表征系统的有效性，并且在具体研究中应给予考虑。但是，在实际中我们需要更为通用的指标，根据这些指标也许可以把电机的所有冷却系统按给定的冷却效率大小进行分类。

所谓电机常数（通常应用的），例如爱孔常数可作为这种指标。爱孔常数可以确定给定容积的电机功率：

$$C_s = \frac{S}{LD^2 n} \times 10^6 \quad (1-1)$$

式中， S ——总功率， $kV \cdot A$ （千伏·安）； L ——间隙的计算长度， cm ； D ——定子的内径， cm ； n ——转速， $转/分$

min.

常数通式(1-1)决定冷却系统用于专门用途相应的利用程度称为利用系数。正像后面我们看到的那样,每个冷却系统都有其固有的、完全确定的利用系数值范围。至于采用更能深刻地表示系统特性的个别特征来比较不同系统的问题,这类比较经常是专门研究的对象,即在研究中要考虑各种电机不同的特点。

1-3 冷却系统的经济性

所谓经济性,指的是投资费用和运行费用,投资费用是指在一定期间内要偿还的设备折旧费用。

在估价电机冷却系统的经济性时,在绝大多数情况下投资费用可以不予考虑,只有在采用独一无二的装置或冷却设备时才可能要求比较投资费用的方案。

同时,运行费用成为冷却系统的最重要的特征。已有的一系列事实表明:许多极为有效的冷却系统不能在生产中得以应用,其原因是循环冷却介质所消耗的能量已经达到使电机整个效率降低到不能允许的程度。

冷却系统的运行费用适于用冷却所需的单位功率损耗来进行评价。所谓单位功率损耗是指消耗于冷却的功率 P_0 和电机总功率损耗 P_2 之比:

$$\bar{P} = P_0 / P_2 \quad (1-2)$$

利用系数和单位功率损耗的典型数值列于下表(40):

	C_{θ}	\bar{P}
汽轮发电机	6~15	0.01~0.50
水轮发电机	4~8	0.02~0.10
交流电机	1~6	0.01~0.10
直流电机	2~5	0.02~0.20
超导体汽轮发电机	20~40	0.01~0.02

1-4 冷却系统的计算和设计

因为利用系数同时表征电机结构的种类和冷却系统的种类，所以在多数实际情况下，系统的计算和设计均按预先选定的型式进行。例如，双电枢直流辗轧电机需要强制通风可以认为是已知的。

因此，在设计冷却系统过程中，应该按电机在稳态和过渡状态正常运行时绝缘材料的级别对电机有效区出现的温度高低所提出的要求，来确定冷却介质的循环系统和驱动部件的类型。换句话说，必须完成电机的通风计算、阻力计算和热计算。这些计算或是用来论证所选冷却系统的合理性，或是用来确定对增强热交换的补充要求。

严格地说，设计冷却系统时必须确定整个电机体积内的温度场并检查所得的温度场是否与已知的技术要求相符合。

实质上，完成计算和研究的内容乃是本书的目标。

1-5 热计算和通风计算的关系

众所周知，导热方程式仅在固体边界上与冷却介质的换热条件确定时才具有唯一解。这意味着，至少冷却介质在全部冷却通道内的流动速度应该已知。因此，通风计算的结果和水力学计算结果确定了导热方程式的边界条件，也就是说，它可以作为完成电机热计算的原始数据。

热计算结果可以发现冷却系统中冷却介质的分布不满足要求或有不合理的地方（在完成正常运行的情况下）。在这种情况下，应对冷却系统加以校正。此后的热计算可给出校正结果。由此可见，热计算和通风计算联系紧密，它们的结果互相影响。目前，出现了综合计算方法的倾向；这种以应用计算技术为基础的计算方法是按输入的数据进行返还联系来检验热计算和通风计算的循环。这种方法的最终目的在于使冷却系统的参数与电机设计的技术要求相一致。

1-6 热计算和通风计算的准确性 以及实验的作用

正像后面看到的那样，完成热计算和通风计算的方法各式各样，它们在研究电机的每一个具体情况中均有其相应的用途。

两种计算都能达到足够高的计算结果的准确性，今天可以很有把握地确信，只要精确地给定原始参数，通风计算和

热计算可以达到任何所需要的准确程度。但是，后一个要求并非总是能满足的。例如，所用材料的性质是热计算的原始数据，但是，这些性质只能确定到一定的可靠程度，还有电机中能量损耗分布特性同样地也只能一定程度地接近实际情况。

因此，计算结果的精确性受到所给定的原始数据精确性的限制。因此，一方面在制造电机的研究中可以看到实验的作用，另一方面在完善计算方法中也能看到实验的作用。

无论用什么方法去完成通风计算和热计算，只有实验研究的数据可以作为其准确性的准则。

在实验条件下对电机模型和结构的个别部件的研究在一定程度上可为计算提供客观的论据。只要严格地遵照相似定律，研究所得出的结论就可以推广应用于实际设备。在实际运行条件下进行电机的物理模型和实物原型的研究，可得到更为可靠的数据。

近代实验技术已经取得如此巨大的进步，以致不仅能测定电机静止部件的温度分布，而且也可以测定转动部件的温度。因此，在一定的实验设备条件下，实际上所得的实验结果可以是全面的。也就是这些结果最终应作为通风（水力）计算和热计算准确性的准则。应根据实验数据分析的结果对实际计算方法予以修正。设计者所做的实验提供的数据愈多，则所得相应的结果也就愈精确。

1-7 计算和设计冷却系统的必要知识

电机的热计算是建立在求解导热问题的基础上的。由于电机结构件中存在着热损耗，所以其温度场是内热源的温度

场，描述这样的温度场的导热方程式是非齐次方程。

为了获得非齐次方程的解，必须采用最新的研究成果——数学物理运算的方法，在解析解的基础上建立热计算的工程方法。

正如已指出的那样，为了求解导热方程就必须知道冷却介质在电机冷却系统中的流动规律。由于标准的冷却系统是一个通道的复杂组合体，它不仅有静止通道，而且还有旋转通道，为了确定载热体的速度和流量，在许多场合下，工程水力学中采用的典型运算方法不足以解决问题，因此有必要求助于理论流体动力学和实用流体动力学。这意味着不得不把粘性流体运动方程的解析解应用于某些简化的流动系统。这样解析解就和热计算的情况一样，是通风计算和水力学计算的工程方法的基础。

评价冷却过程的能量特性，或者也可以说，进行冷却系统的热力学分析具有很大的意义。同时，在电机自然冷却中，即利用环境中的天然介质（河水和水库的水）时，对热力学的分析来说，只考虑热力学第一定律就足够了。但是，在电机的人工冷却过程（低于周围介质的温度）中，就不得不考虑热力学第二定律所导出的结论。当然，对冷却系统的研究必须把对电机结构和电机学确定电机内能损耗场的基本定律的深入研究作为前提。

1-8 相似理论

由于电机的热计算和通风计算非常复杂且必需具有真实性，对未经研究过的结构，其计算结果还必须通过实验加以

证实。在这种情况下，所做的实验工作必须为解决每一个具体问题提供论据，否则模型上的实验结果可能错误地被推广到原型上去。而且还可能出现其他的错误。如果已有的实验数据没有很好地利用，就需进行费力而又昂贵的实验。

相似理论给实验提供了科学根据。

在安排热物理实验时，也和安排其它实验一样，极为重要的是要回答下列三个问题：1) 实验中要测量哪些量？2) 如何对测量结果进行加工？3) 什么样的现象和对象与所研究的现象和对象相似，也就是说，所得结论能推广到哪一类结构中去？

相似理论回答了这些问题^[1,2]。

读者熟知，任何微分方程式均是描述整体现象的，而不是描述某个具体现象的。在相似理论中，这个著名的原理得到了进一步新的论据：如果将微分方程式的系数以物理常数值表示，则此时方程式可以表征某类现象，其中每个现象均由对于整体现象数值相同的无因次复量（相似准数）描述。这些复量可由微分方程式推导成无量纲形式而获得。

这时，要求相似准数值相等，不仅与相似的运动方程的形式有关，而且还和确定唯一解的边值条件的形式有关。

下面对应用物理和应用流体力学中以及电机原理的相应篇章中较常用的相似准数作一简要的特性介绍：

雷诺准数 $Re = \omega l / \nu$ 是运动流体中惯性力和内摩擦力之比的量度。

傅里叶准数 $F_0 = at_0 / l^2$ 定义为周围条件 (t_0) 变化速率和物体内部重建温度场的速率之比。

比渥准数 $Bi = \alpha l / \lambda$ 是物体内的温度降对介质和物体之间温度降之比的量度。

欧拉准数 $Eu = \Delta p / (\rho \omega^2)$ 描述流体流动时的压力特性。

普朗特准数 $Pr = \nu / a$ 实际上是介质的复杂物理常数。

葛拉晓夫准数 $Gr = gl^3 \beta \Delta T / \nu^2$ 描述液相或气相介质在温差作用下自由运动的特性。

波密朗采夫准数 $P_0 = p_0 l^2 / (\lambda \Delta T)$ 是内热源释放热量的量度。

努谢尔特准数 $Nu = \alpha l / \gamma_r$ 实质上是换热系数的无量纲形式。

在上述各式中： l ——特征线性尺寸； ω ——介质运动速度； ν ——运动粘性系数； a ——导热系数； t_0 ——特征时间间隔； α ——对流换热系数； λ ——导热系数； Δp ——压力损失； ρ ——介质密度； ΔT ——温度差； β ——热膨胀系数； p_0 ——比能耗； λ_r ——气体（或液体）的导热系数。

理解这一点十分重要：如果系统相似，则由系统的特性参数组成无量纲的复量的数值相等，但参数本身并不相等。例如，空气和水的冷却体系中雷诺数相等，等直径管子中的空气和水的流动速度必须相差很大才能相似，因为空气的粘度约超出水的粘度 30 倍。考虑了这些特点后才能在模型中和模型电机中进行物理过程的研究并能在设计多种工业电机原型时应用所获得的结果。

由上可以得出结论，在实验中需要测量的只是那些包含在相似复量（准数）中的参数（但必须全部）。根据 π ——定理，相似准数的数目等于方程式参数的数目减去基本单位

数目*。此外，相似理论指出，测量结果可以整理成准数的形式。典型例子是冷却介质在长管内和长流道内强制流动时对流换热方程式： $Nu=0.23Re^{0.8}Pr^{0.4}$ 。最后，由上述可知，实验结果或计算结果，可以广泛应用于各种对象，其中的每个对象都与所研究对象相似，即其特点是具有相等的准数值。

1-9 热迁移，对流换热

当温度不同的物体相互接触时，组成结构的粒子的运动能进行交流，结果，温度较低的物体的原子和分子运动强度增强，而温度较高物体的则降低。这种过程称为导热。热物体的粒子向冷物体的粒子传递的能量流称为热流。因此，所研究的物体之间的温差是进行热交换的条件。

由这一区域向另一区域的直接迁移部分热量不仅可以通
过充满所研究空间的粒子能量交换来进行，而且也可以通过
搅拌容器内由大量分子组成的介质来进行。

此外，热迁移可通过辐射来实现，在这种情况下，能量
是通过电磁场，从一个物体向另一个物体迁移的。

所以，存在三种热迁移方式：导热，对流和辐射。

对流换热的概念适用于流体介质。在对流换热中同时存
在导热和对流，也就是微观粒子接触时的相互运动以及部分
流体宏观地从一个温度区域向另一个温度区域的迁移。

液体或气体流与固体表面的换热称为对流换热。通常用
牛顿公式计算对流换热：

*译注：原文误为“等于过程方程式的未知量数目减去基本单位数目”。

$$P = \alpha F(\theta_s - \theta_x) \quad (1-3)$$

式中换热系数 α 是流动介质的性质、流动参数和固体表面性质的函数，通常称为对流换热系数；壁面温度和流体温度之差 $\theta_s - \theta_x$ 称为温压； P ——热流，W（瓦）； F ——换热面积， m^2 （米²）。

对流可分为自然对流和强制对流两种。自然对流是由于质量力场（例如，重力场）中小范围内的流体由于温度不同而造成密度差所引起的流动；强制对流是由于驱动机械（泵或风机）造成压力（压头）而引起的流动。

逻辑上很清楚，介质的流体力学性质（速度、流动情况、流动边界层厚度）对对流换热强度起着很大的作用。

与引入流动边界层的概念相似，这里引入热边界层的概念。热边界层是指近壁的一个流体层，在该流体层中流体的温度从壁面值变至远离物体（该处物体的温度已无影响）的值。

对流换热方程式是运动方程式，连续方程式，状态方程式 $Pv = RT$ 和能量方程式⁽¹⁹⁾ $D\theta/dt = aV^2\theta$ 以 (1-3) 式作为边界条件。

将上述对流换热方程组推导成无量纲形式时可得到下列的相似准数：Nu, Re, Eu, Pr, Gr。由于对流换热方程组分析求解的明显复杂性，通常实际问题均用准数方程式求解。在归纳实验研究过程的结果时，准数方程式特别有效。准数方程式通常具有下列形式：

$$Nu = f_1(Re, Pr); \quad Eu = f_2(Re, Pr)$$

例如在计算直的滑管中紊流时的平均对流换热系数通常用下式：

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} (Pr_x / Pr_c)^{0.25} \bar{\varepsilon}_L$$

此式中的 Pr_x 的值按流体的平均温度选取, Pr_c 按壁面的平均温度选取。无量纲系数 $\bar{\varepsilon}_L$ 是考虑对流换热系数随管长的变化。在 $L/d \geq 50$ 时, 系数 $\bar{\varepsilon}_L = 1$ 。在 $L/d < 50$ 时, $\bar{\varepsilon}_L$ 按下表取值:

$L/d \cdots 1$	2	5	10	15	20	30	40
$\bar{\varepsilon}_L \cdots 1.51$	1.40	1.27	1.18	1.13	1.10	1.05	1.02

电机中冷却介质的运动途径一般相当复杂。流道的表面可能是光滑的和粗糙的, 径向的和轴向的, 静止的和旋转的, 短的和长的, 截面是圆的和非圆的。此外, 非常典型的是: 转子和定子间是环形通道 (也就是两个圆柱体之间的通道, 其中一个是旋转的)。在许多电机中, 冷却气体流过由绕组端部栅栏所形成的缝隙。在冷却介质流动途径中常常会遇到一些小室空间, 在该空间中实际上形成了静止的气体或液体区 (此区常称为“死区”)。

由于这些原因, 由实验得到的对流换热方程式在不同条件下将是不同的。在有关电机热交换的文献中, 存在着大量可用于热计算的准数关系的数据 [2, 4, 5, 8, 10, 35, 49]。但对每种具体情况, 在应用上述关系式时必须确认原型和模型是几何相似的, 否则热计算中产生错误将是不可避免的。