

汽轮发电机译文集

哈尔滨大电机研究所译

26

第一机械工业部情报所

说 明

本文集主要选译自第二十三届（1970）国际大电网会议（CIGRE）旋转电机部分有关发电机的论文，此外，又选译自第二十二届（1968）和第二十一届国际大电网会议部分论文。这些资料对我国汽轮发电机科研、设计、运行等有一定的参考价值。由于水平所限，错误和不当之处请批评指正。

哈尔滨大电机研究所

1974年9月

目 录

冷却部分

关于大型氢冷汽轮发电机的某些问题.....	1
50万千瓦汽轮发电机转子冷却系统的发展.....	9
直接冷却汽轮发电机端部温升和损耗的研究.....	17
大型汽轮发电机的导体冷却式转子经验与展望.....	22
60万千瓦汽轮发电机转子运动气流和温升的实物及模型研究.....	41
有关冷却问题论文的讨论摘要.....	49

机械部分

用正交函数理论平衡柔性汽轮发电机转子.....	69
汽轮发电机定子的磁振动.....	77
现代大型汽轮发电机和水轮发电机的机械强度问题.....	81
有关大型汽轮发电机设计的一般问题.....	87
对于机械问题论文的讨论摘要.....	95

励磁部分

大型同步电机励磁系统的最新发展和主要问题.....	98
苏联大型汽轮发电机的基本尺寸、性能及其励磁系统	101
对于励磁系统问题论文的讨论摘要	106

关于大型氢冷汽轮发电机的某些问题

(11-02)/70*

(匈) M. wallenstein 等

提 要

大容量汽轮发电机的主要问题之一是可靠地解决转子绕组的有效冷却。本文研究了导体直接氢冷的设计原理,并在此基础上提出一种实际设计方案,原则上该方案是应用为数甚多的短而狭的风道。

对于供给转子的励磁系统,本文对实心转子的主励磁机时间常数的降低问题和整个励磁系统的瞬态计算问题进行了探讨。

一、引 言

电能需要量具有按指数增长的趋势(约每十年增长一倍),电站造价和电能生产的单位成本力求降低。因此,汽轮发电机的单机容量正在不断地增长。与此同时,由于采用新设计,困难也在增加。这样一来,极为重要的是必须了解:根据多年经验和通过大量电机运行考验的现行解决方案加以引伸,能否满足新的需要,能上升到多大的功率极限。

氢冷汽轮发电机设计方案可以认为是一种经过考虑的方案,这种方案是:定子直接液冷(定子铁耗,绕组以外的附加损耗以及风摩耗和通风损耗由流过电机中的氢气带走),转子直接氢冷。

由于采用具有高电气强度的最新热固性合或树脂绝缘的绕组;采用导磁性能良好的低损耗电工钢片;并采用合适的设计来解决起吊和运输,消除有害振动以及消除因集中的附加损耗而引起的局部高热等,因而端电压约达 25 仟伏的定子方面的问题认为可以得到解决。

至于转子,则认为也能获得直径达 1200 毫米、屈服点为 65~70 公斤/毫米² 和良好导磁性能的高纯度合金钢锻件,以及用以支承转子绕组端部、屈服点为 100~105 公斤/毫米² 的非磁性合金钢护环。转子是功率极高的汽轮发电机关键性部件,后面将可以看到,对于转子方面的问题,我们仅考察重要程度不同的某些问题,寻求其解决途径,并指出哪些已能满足需要。虽说设计人员都必然会同意问题的选择不是随意的,但是当趋近于很大的单机容量时,有些问题以往并不引人注目,如今则可能变得极为重要。

对气体直接冷却的转子提出的要求同样适用于很大容量的机组,这些要求是:

- (1) 即使电流密度高,转子绕组的平均温升仍应是低的。
- (2) 绕组中不应存在热点,即局部最高温度接近于平均温度。
- (3) 转子中要能放进大量的铜(梯形槽在制造上应无困难),因此,转子铜耗应予降低,这特别是为了能够保持低的励磁功率,同样也由于铜耗对效率的影响。
- (4) 由于表面比压力高,转子绕组宜采用具有高抗拉强度的硬铜材料,以防止其轴向

* 即1970年国际大电网会议第11~02号论文。

残余变形。同时，为了便于转子嵌线，转子导体可能由两根或更多的股线组成。在绕组中铜线应为扁绕，这样就能避免退火。

(5) 关于支撑转子线圈端部的护环的设计，可取的解决方法是将无通风孔的护环牢固地装配（径向或既径向又轴向）在转子本体上，而转子与护环之间为弹性联接。因为护环是机械方面受力最大的，所以它成为决定转子是否实际可行的部件，在最大容量的电机中能否缩小线圈端部导体尺寸，根据端部导体尺寸缩小的可能性对护环应力提出要求。

(6) 从转子本体的机械强度观点出发，当不考虑冷却时，只要脉振损耗允许，转子槽数越少越是有利。这除加工方面的优点外，槽数少则齿较宽，因此，其强度受材料不均匀性的影响就会较小。无论采取什么预防措施，这种材料不均匀性可以认为是存在的。从线圈端部需要的轴向空间来考虑，转子槽数（线圈数）少也是有利的，这可以提高护环的机械强度。

(7) 转子绕组的电流和电压的选择最好是与所采用的通风系统无关，这样我们就能够在一定励磁功率下按照由最高许用的励磁电压得出的最小电流来确定励磁系统和载流部件（主要是滑环）尺寸。

(8) 转子的快速反应励磁系统的功率极限应与该转子系统的适用范围相一致。

二、直接氢冷式转子

为了满足上述(1)、(2)两点的要求，根据最大额定容量汽轮发电机的有效长度对转子直径的比值(L_2/D_2)很大这个事实，我们一开始就只限于研究“气隙取气”通风系统，这种通风系统能最好地保证沿绕组长度上的温度均匀分布。另一方面，在导体直接冷却情况下，可用提高氢压来加强冷却，这可认为是一个可值得利用的重大优点。因此，要寻求另外一种对提高氢压反应最为灵敏的气隙取气系统。

(1) 设计原理——各种式样的导体直接冷却都可以简化为一个空心导体模型，如图所示，载流管壁中产生的损耗由循环于管内的冷却介质带走。

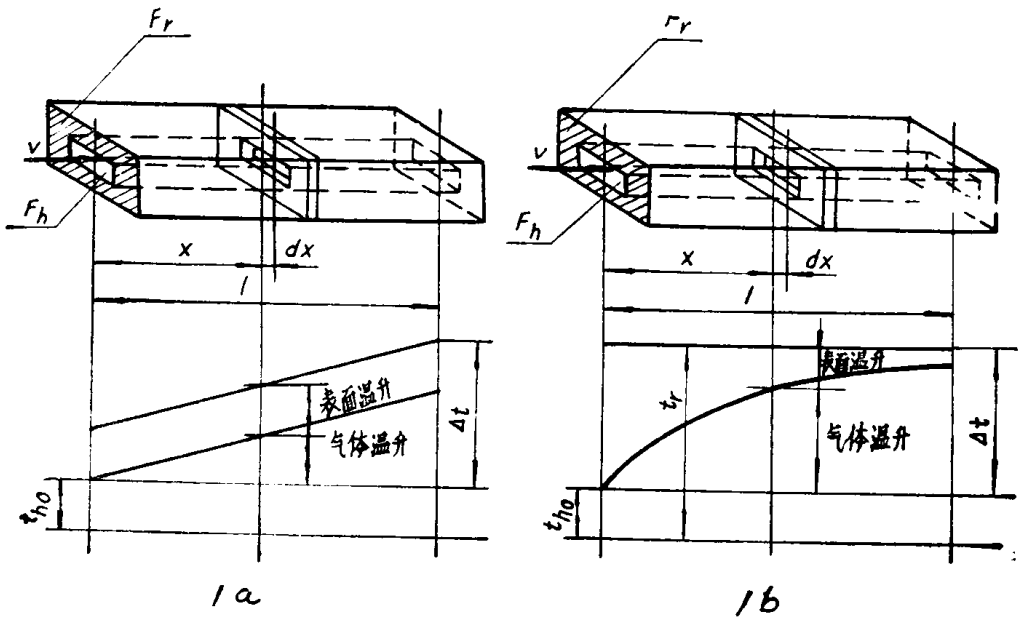


图 1
1a $\lambda_{c_{\infty}} = 0$ 时空心导体的热传递；1b $\lambda_{c_{\infty}} = \infty$ 时空心导体的热传递

在考虑空心导体中的热传递时，我们取两种近似：（a）忽略铜沿轴向的热导系数（ $\lambda_{cu} = 0$ ），即假定单位长度上所散走的损耗为恒值（图1a）；（b）认为铜沿轴向的热导系数为无穷大（ $\lambda_{cu} = \infty$ ），即假定管壁温度为恒值（图1b）。

在通常的推导中不考虑铜的电阻温度系数，并采用下列各量：

- $q = \rho i^2$ (瓦/米³)——单位铜损；
- i (安/米²)——电流密度；
- ρ (欧姆·米²/米)——导体电阻系数；
- α (瓦/米²·°C)——表面散热系数；
- F_r (米²)——导体截面积；
- F_h (米²)——冷却风道截面积；
- K (米)——冷却风道周长；
- V (米/秒)——冷却介质流速；
- C (瓦·秒/米³·°C)——冷却介质的热容；
- l (米)——冷却风道长度；
- X (米)——离进风口平面的距离；
- t_{ho} (°C)——冷却介质的进口温度；
- t_{hx} (°C)——冷却介质在距离 X 处温度；
- t_{rx} (°C)——导体在 X 处的温度；
- $d = \frac{4F_h}{K}$ ——冷却风道的流体直径。

当 $\lambda_{cu} = 0$ 时，在被冷却的一段导体中最热点相对于进入冷风的温升，可按式确定：

$$\Delta t = q \frac{F_r}{F_h} \left[\frac{l}{CV} + \frac{d}{4\alpha} \right]$$

当 $\lambda_{cu} = \infty$ 时，则按下式确定：

$$\Delta t = q \frac{F_r}{F_h} \left[\frac{l}{CV} \frac{1}{1 - e^{-\frac{1}{CV} \frac{4\alpha}{d}}} \right]$$

两个表达式中，括弧前那一部分的作用是明显的：比损耗 q 较少，亦即电流密度 i 较少，而且冷却风道截面比铜截面大很多时，温升将较低。

不过，电流密度必须随电机利用程度的提高而作必要的增大，而比值 F_r/F_h ，即铜截面与冷却风道截面之比也要尽量选大些，使得在放进尽可能多的铜和消耗尽可能少的铜的冷却面积的情况下，把能够为导体与冷却风道截面两者所利用的空间填满。由此可见，为了得到低的温升，当设想一个新的设计方案时，必须考虑使括弧中的表达式为最小值。

由按两种不同情况所得的公式，不难推出关于设计高度有效的导体直接冷却系统的结论，就是要采用：（a）冷却介质的热容要尽可能大，（b）冷却介质流速要高，（c）冷却风道长度要短，（d）冷却风道的流体直径要小，（e）表面散热系数要大。不过，还可以看到，对于冷却介质的温升说来，则冷却介质的热容、冷却介质所能达到的流速以及最短的实际冷却风道长度三者应当一起考虑。如果最短的实际风道比较长（例如有定子线棒那么长），那末，直接液冷是合适的（此时可采用近似关系 $\lambda_{cu} = 0$ ）。而如果能成功地获得短的风道，即在转子绕组中搞很多“并联”的冷却风道，那末，用氢气也能得到高度有效的冷却（此时适用

近似关系 $\lambda_{cu} = \infty$)。上述关系中, 对于获得有利的表面散热条件和采用流体直径小的狭窄冷却风道的重要性必须给予注意。在实用的压力与流速范围内, 这种窄风道中的气流将是层流。尽管如此, 特别是在窄风道中还是能够得到良好的散热系数 α 。

(2) 实际设计方案——下面将阐述应用上述设计原理的转子设计方案, 该方案在1965年首先用于一台 6.5 万千伏安试验性汽轮发电机, 而后又用于 10 万和 22 万千瓦发电机。

一根特殊的所谓带筋条铜排和另一根宽度相等的平光铜排, 按图 2 组合, 用做转子的绕组材料, 这样形成一根由两根股线组成的导体。转子线圈在全长上, 即转子本体和线圈端部的直线与弯曲部分都是由这种导体做成的。转子的通风模型则是这样的: 从通风观点来看, 沿线圈全长都能保证斜流风道各并联风道的独立给风。

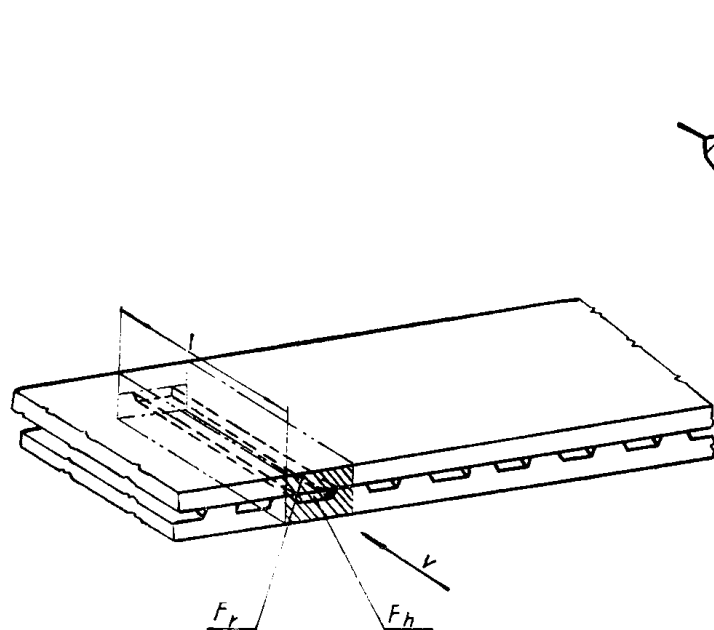


图 2 转子导体内的冷却风道

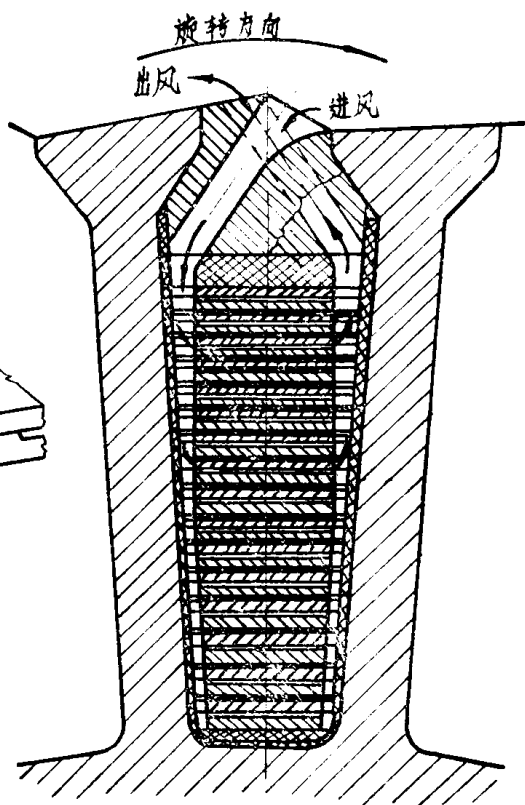


图 3 转子本体槽截面

转子本体内部冷却风道中的给风布置如图 3 的槽截面图所示。气体流经转子槽的循环是利用槽楔上进风口所建立的动压头和出风口的抽气效应而取得的。供入的冷却气体流进线圈侧面铣出的风道, 由此转入横流风道。热风通过线圈另一侧面的汇流风道, 经由槽楔上的出风口排出。

除了线圈的横流通风以外, 绕组端部的冷却方案也是这种转子导体直接冷却方式的特点, 如图 4 所示。

绕组端部通过一个装入的绝缘筒支定于定位筒上, 后者则固紧于转子本体的端头上。厚壁定位筒的内外表面上做出若干轴向通道, 这除了使筒具有弹性以外, 还用来对绕组端部供给气体。冷却气体经过定位筒内表面的风道, 并由两个筒 (定位筒与绝缘筒) 上的开口进入上下两面均被封闭的线圈之间的空间里。使端部线圈相互隔开的支撑件, 能使冷却气体经线

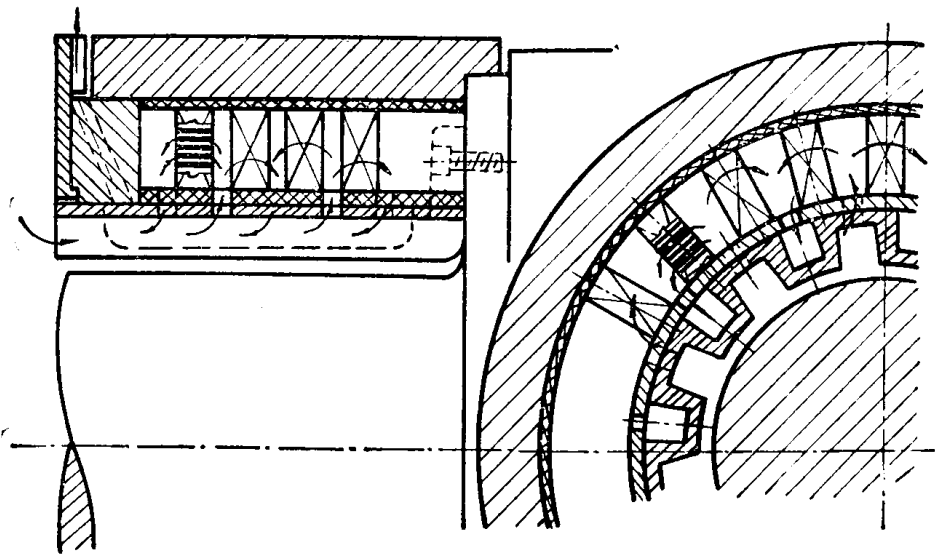


图 4 绕组端部冷却草图

圈的横流风道进入线圈的另一侧，情况与嵌于本体的线圈直线部分是一样的。线圈之间的空间经由绝缘筒上的另一些开口，与定位筒外表面的轴向风道连通，在护环端头上的离心风扇的吸气作用下，气体经过这些通道和中心环的孔。按照这一新型转子冷却系统制成的汽轮发电机，在工厂试验和电站实测中完全证实了理论与模型试验所预期的情况。6.5 万千伏安试验电机在电站测定时，3 个大气压的氢压下转子线圈的负荷甚至超过了 10 安/毫米² 的电流密度值。电站实测时，该电机满载下转子线圈对冷风的温升（氢压为 3 个大气压）在 25~30℃ 的范围内变化。转子冷风的总强度可用比传热系数正确地表示，该系数等于转子总铜耗除以转子本体表面积和绕组对冷风的温升：

$$K_t = \frac{I^2 R}{(D_2 \pi l_2) \cdot \Delta t} \text{ 千瓦/米}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

不同规格电机的相应系数值列于下表。

电 机 规 格	额 定 输 出 (万千伏安)	氢 压 (大气压)	K_t (千瓦/米 ² ·°C)	转 子 直 径 (毫 米)
试验汽轮发电机	6.5	3	1.57	840
10万千瓦汽轮发电机	12.5	3	1.49~1.57	930
22万千瓦汽轮发电机	25.9	3	1.54~1.68	1075
32万千瓦汽轮发电机 (计划制造)	37.6	3	1.5	1075
50万千瓦汽轮发电机 (计划制造)	58.8	3	1.6	1140
80万千瓦汽轮发电机 (计划制造)	88.9	4	1.8	1200

10 万千瓦汽轮发电机转子绕组温度的电站实测结果示于图 5。图中所示为转子绕组对冷风的平均温升，氢压范围为 1.5~3.5 大气压，横座标为转子铜耗。

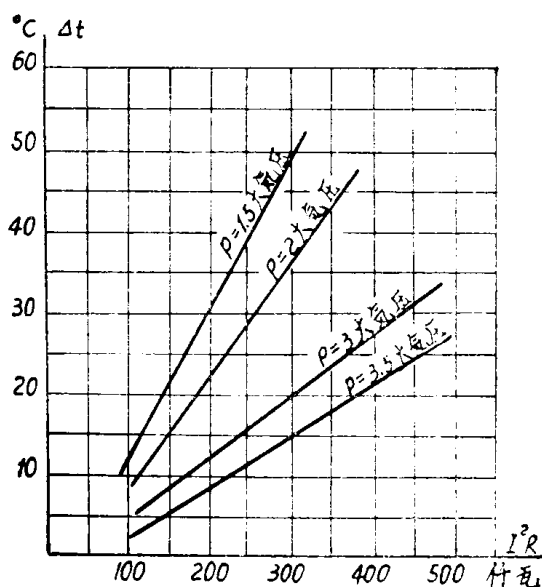


图 5 10万千瓦汽轮发电机转子温升

三、励磁系统

下面仅从不同解决方案中，抽出有关旋转励磁机与整流器配合的励磁系统的几个问题进行讨论。由于与网路无关，采用与汽轮发电机同轴拖动的主、副励磁机，对整个励磁系统的安排布置和运行安全都有很大的好处，即使是这种励磁系统，主励磁机最好尽可能采用与小容量空冷汽轮发电机相似或完全相同的设计。显然这是由于：一方面，根据多年的制造与运行经验发展起来的结构将使生产的困难最少，而且工作可靠性将最高；另一方面，如果需要增加主励磁机定额时，迁到的设计限制将最少。

只当直径相同时，整体转子能做得比叠片转子长些。因此，已经发展了一种这样的励磁系统，它用整体转子的励磁机通过静止二极管供给汽轮发电机励磁绕组。采用整体转子式电机作为励磁机时涉及两个主要问题：

(1) 由于整流负荷，转子中产生附加损耗。但能把它减到可以接受的水平，办法是在转子表面开沟，选择足够大的气隙，而且最后将定子绕组分成两部分，相互位移 30° 电角度，然后经桥式整流回路串联起来。

(2) 如果电压调节器作用于主励磁绕组，那末，两极主励磁机的控制特性是很差的。如所周知，当磁场输入电压突然变化时，由于整块铁体内涡流的存在，带有整体铁芯的线圈中的磁通将含有无限多的时间常数各不相同的分量〔4,5〕。为了鉴定平均的瞬变状态，此时可以用一条等效的指数曲线来描述磁通的变化，曲线是按面积相等的原则绘得的，该曲线的时间常数将用以表示所发生的现象。根据这一条思路（此处不予详述），便可以由与整体转子式电机相对应的微分方程〔5〕推得照上述定义的空载时间常数，其结果为：

$$T_{do} = T_1 + T_2 = \frac{L_r}{R_r} + \frac{\mu_0 \sigma \tau^2}{2u^3} \frac{\tau}{\delta} \frac{P}{P+1} = K \frac{Q}{P} \frac{\tau}{\delta} + \frac{\mu_0 \sigma \tau^2}{2u^3} \frac{\tau}{\delta} \frac{P}{P+1} \quad (1)$$

式中 L_r 和 R_r 是当频率为零时励磁绕组的电感与电阻； μ_0 为空气磁导系数； σ 为铁芯的电导系数； δ 为等效气隙； P 为极对数； Q 为转子铜的总截面； K 为与绕组系数和材料常数有关的一个常数。推导时，假定转子绕组为覆盖于转子表面的带电薄层，它沿转子表面建立

一正弦分布的磁场。

方程（1）的第一项是不考虑涡流效应时磁场绕组的时间常数，第二项是由于整体转子引起的时间常数增量，如果 $z/\sigma \approx 25$ ，则第二项约为 4 秒（转子直径为 1 米时）或约为 2 秒（转子直径为 0.7 米时）。因为在该转子直径范围内第一项具有相近的数值，所以总的时间常数可达 4~8 秒，这样的时间常数对于电压调节器所需的控制功率或对于副励磁机的定额都是很不利。根据方程（1），一个减小时间常数的明显办法是增加极数，假设改变直径和比值 τ/σ （电机的利用程度相同），我们可使第一项按线性关系减少，而第二项按二次关系减少，不过，实际上由于定子要加大，主要尺寸需要稍作修改。根据计算，6 极（ $P = 3$ ）电机对瞬变状态可望颇为有利，因而主励磁机设计成 150 赫，其设计原则上与二极机相似，二极机是经受过整流负荷考验的。

曾用数字计算机研究不同参数对整个励磁系统的影响。研究结果的部分详情示于图 6。如果主励磁机 ME 的励磁绕组电压突然发生 Δu_r 的变化，那末，由图可以观察到在线性条件下转子电压的变化（ Δu ）、转子电流的变化（ ΔI ）、以及发电机 A 运行于空载或感性负载下瞬态电抗后的电压变化（ $\Delta u'$ ），图中各个变量的最后数值都取为 1.0。

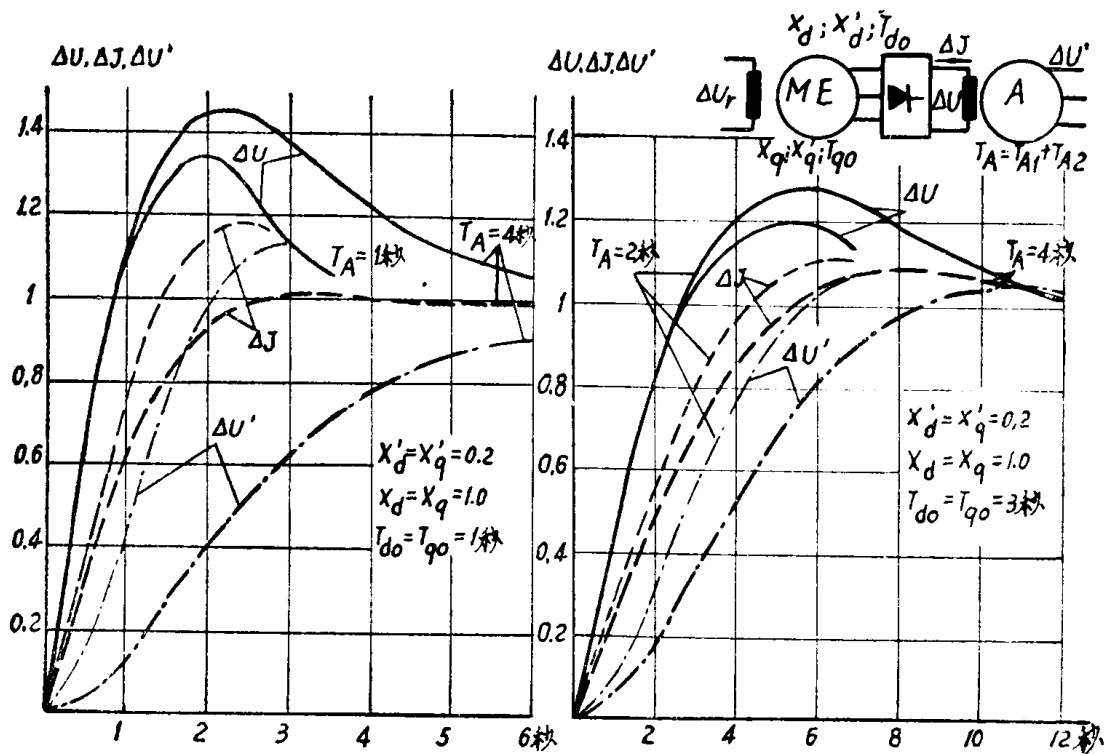


图 6 励磁系统发生 ΔU_r 突变的瞬变过程

这里，所取定的参数为：主励磁机的 $x_d = x_q = 1.0$ （校者注：图 6 中为 $x_d = x_q = 1.5$ ，疑有误），汽轮发电机 $T_A = T_{A1} + T_{A2}$ （校者注：原文为 $T_{A1} = T_{A2}$ ，疑有误），其中 T_A 是空载或负载下的转子时间常数，而 T_{A1} 和 T_{A2} 则分别为励磁绕组和整体铁芯的相应分量。 $T_{d0} = T_{q0}$ ，其中 T_{d0} 是对应于方程（1）的数值。

在稳态条件下，整流器的工作如同额定电阻的一个有功负荷。若主励磁机空载运行，则 Δu_r 将按图中标度产生 $\Delta u = 1.8$ 的变化。

参 考 资 料

- [1] HÖRCHER F. -Experimental Turbo-alternator with Hydrogen-and water-Cooling(in Hungarian)-Ganz Electric Bulletin(1966); №4, PP. 91~93.
- [2] ASZTALOSP. -100MW Turbo-alternator in the Banhida Power Plant(in Hungarian)-Ganz Electric Bulletin(1966); №4, PP. 93~95.
- [3] WALLENSTEIN M. -The New Ganz-System for Hydrogen Cooling of High-Power Turbo-alternators(in Hungarian)Elektrotechnika, 61(1968); №4; PP. 138~150.
- [4] TUSCHÁK R.-Bemerkungen Zur Arbeit "Schaltvorgänge an Magnetspulen mit massiven Eisenkern" Von Frauenberger-Archiv für Elektrotechnik 41 Bd. 1955.
- [5] TUSCHÁK R. -Transient Phenomena in the Solid Rotors of Synchronous Machines-Acta Technica Academiae Scientiarum Hungaricae, Vol. X. Part 3~4 1955.

林金铭译 徐 怡校

50万千瓦汽轮发电机转子冷却系统的发展

(11-04)/70

(捷) M. PIVRNEC
J. HLAVAC

提 要

这篇报告提出了设计大型汽轮发电机转子轴向冷却系统有关的模型与计算研究结果。由于转子本体相当长，轴向冷却的导体沿长度方向要分为几个并联的供氢段。这种安排涉及到冷却氢在各段的分配问题和沿导体温升分布的计算问题，本文概述了这些问题的答案。

一、引 言

近年来，随着汽轮发电机冷却系统的相应发展，单机容量急剧增长。除了少数转子在试水水冷外，绝大多数现代制造的大型电机转子还是采用氢气直接冷却。

直接氢冷的转子通风系统有许多种方案〔1〕。本文述及的轴向通风系统的特点，在于冷却氢是从导体内以轴向为主的通风孔系统中流过（只在绕组端部的弯曲部分气流才是切向的）。但是，当只有线圈的某一部分（如绕组端部）导体采用纵向冷却时也会遇到类似的情况。

二、转子轴向通风系统的特点

轴向通风系统可从护环下面空间和装有合适的分配隔板装置的气隙中供氢〔2〕。这类通风系统的一种典型的转子槽如图1所示。

就较短的转子而言，从绕组端部轴线处向转子导体供氢并在转子中部排出就够了。然而较长的转子则需要很多个并联通风支路才能使氢气温升保持在适当的数值，氢气温升在这种情况下是导体总温升中的主要组成部分。这是由于随着损耗的不断增长，不可能把空心导体的通风孔截面充分地增大。

其他降低氢气温升的办法，诸如增大电机内氢气的绝对压力或增加压缩机产生的压差，都会引起较高的通风损耗，给设计带来额外的困难。因此，通常选用折衷的办法〔3〕：纵向冷却采用某一最大长度，此长度在选定的氢气温升下与给定的氢压、给定的压缩机压差和选定的空心导体风孔截面相适应。

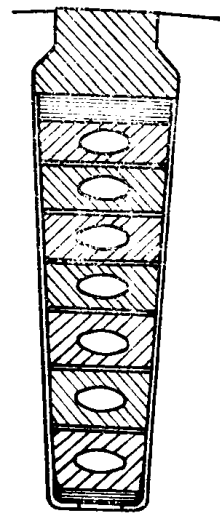


图1 轴向冷却系统的转子槽截面

在转子绕组端部建立独立的通风支路为缩短风道长度提供了最简便的途径。绕组端部支路由护环下合适的气室出风，或者热风在转子本体端部附近排出，同时由一个槽下短沟

对下一段供给冷风。

当转子本体长接近 6 米时，在转子全长的四分之一附近就需要设置下一个给风点。冷风照例是由一个槽下风沟供给，这个风沟可设想做成两级阶梯形。这种通风系统如图 2 所示，图中画出一个转子线圈的四分之一段。

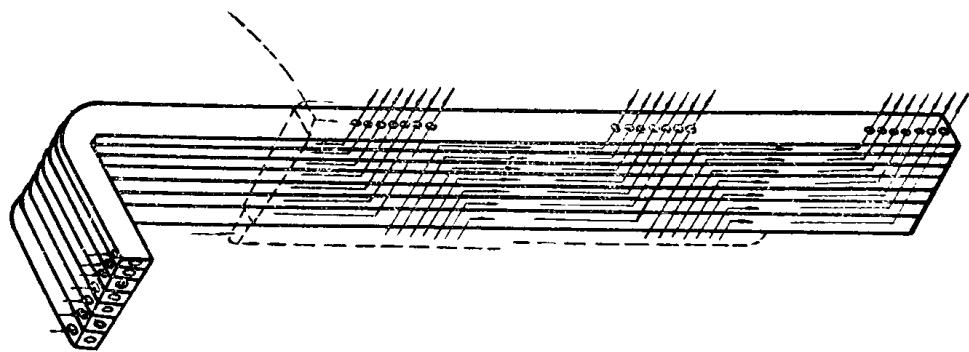


图 2 一个四分之一转子线圈的冷却系统图

这种冷却系统对功率范围为 50~100 万千瓦的电机是有典型性的。本文所提到的是为一台 50 万千瓦电机设计的。但是，模型研究和计算工作并不局限于单一的解决方案，它考虑了许多种方案和较广泛的参数范围，因此，研究结果也可以推广到其他电机中去。

采用按图 2 所示的通风系统时，在如何改变氢气总流量及其在各个导线内、不同的并联支路内的分配方面，仍然可能有几种结构。

转子绕组端部的通风支路可看作独立的回路，在绕组槽端部下面的空间这个支路与别的支路的气体动力联系是比较松的。这个支路中风道长度为绕组端部结构所限定，并沿转子圆周在各个线圈有显著差别。出于种种考虑，特别是从减少进入转子进风口处和转子绕组端部下面气流集散处的压降的角度看来，减少较短绕组端部的氢气流量，使转子不同线圈的各个端部绕组通风支路末端的导线温升接近等，这显然是合适的。将导体进风口尺寸逐级增大，就能最好地做到这一点。在此处进风口是靠导体侧面开孔形成的。

影响各个导体冷却介质分配的一个更进一步的结构措施，是线圈间隔处进风通道的安排。这个间隔最有利的形状是照以前的宽度 4.5 厘米做成的斜角形，因为它保证气体分配最均匀。

出风区的设计也有多种不同的方案，这些被考虑的方案画在图 3 中。图中水平沟道代表导体的纵向风道，而垂直的沟道则表示径向出风道系统。*a-d* 方案具有互相混合的出风口，而 *e-h* 方案各个导体风道的出风口是各自独立的（*f* 方案有三个成对的出风口）。方案 *e* 与 *g* 间的差别在于径向出风道的光滑程度不同，方案 *g* 的径向出风道是各导体出风口采用引管（图 4）。此外，方案 *h* 在拐角处用弯弧代替尖角。

空心导体沿转子槽方向相邻的两个平行的给风段，由槽下通风沟中共同的给风空间相互联系着，因而它们必须考虑成一个整体。其中任一给风段上除了中间一部分是直的光滑风道外，都有进风区和出风区，它们可按不同的方法排列（图 3）。用专门名词“过渡区”作为这种进风区与出风区的一个共同名称。槽下通风沟两个阶梯形的截面，对氢流速度和它在各个导体内的分配有很重大的影响，而这个截面尺寸要受转子轭的饱和及所需磁动势大小的限制。

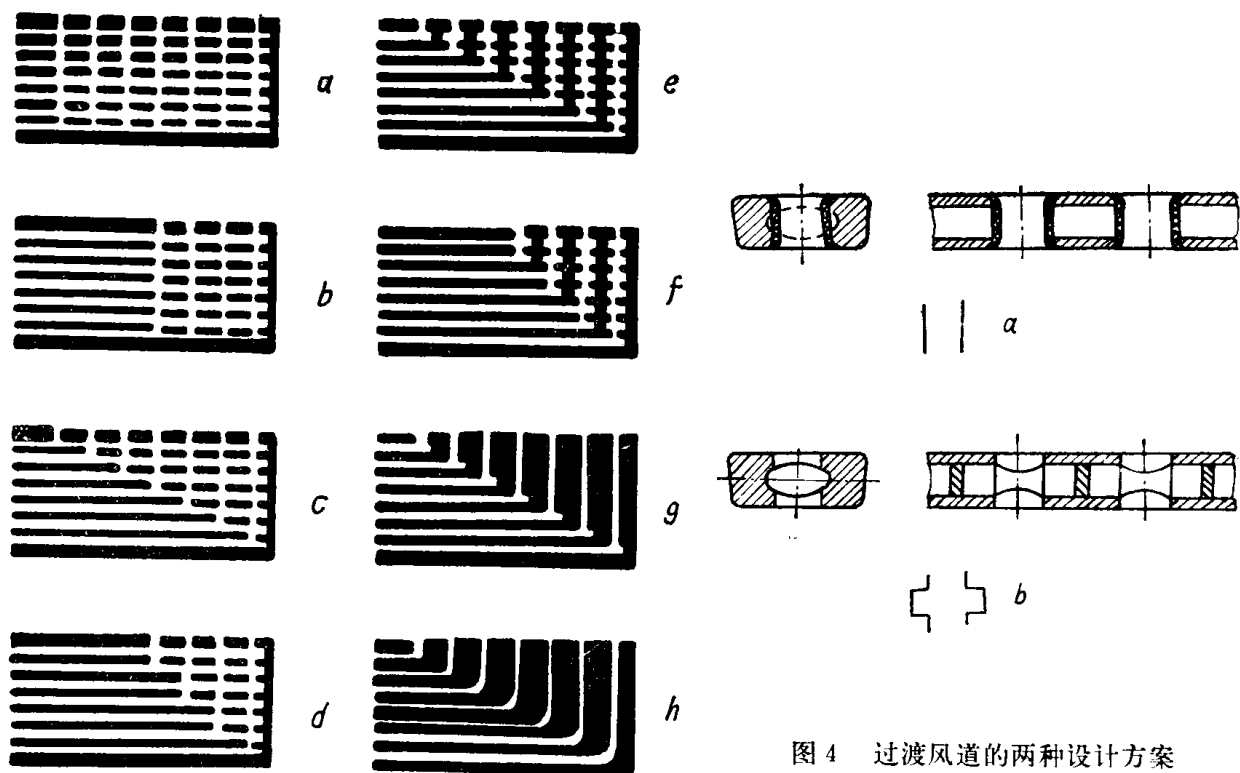


图3 过渡区风道布置方案

图4 过渡风道的两种设计方案
a—装有引导管；b—在空心导体风道内装隔板的风口

三、气体动力模型

许多设计方案对氢气流量和氢气温升都有显著的影响，因此，决定在电机设计阶段就要用在模型上测量的办法来求得最有利的布置方案。

在模型上的主要要求，是确定各风路所有几何形状下的流阻系数，并确定各种设计安排时各个支路中的冷却介质分配。

确定转子旋转对转子风道中流阻的影响是比较困难的。这类问题在20万千瓦汽轮发电机的设计阶段，曾用两个较早期的模型进行过研究〔4、5〕。这些模型表明，转子流阻在旋转时比静止时增高约10%。同时发现，转动时转子槽内各导体中冷却介质分布的不均匀性比静止时要小些。

我们认为，靠上述两个模型已充分弄清转子转动的影响，因此，对50万千瓦转子通风系统看来，在静态模型上进行研究就可以了。静态模型很容易做到实际尺寸，而且易于量测多种方案。

此处模型上用的介质是空气，要保持正确的雷诺数或在所需的雷诺数范围内进行量测。

50万千瓦汽轮发电机转子模型分为独立的两部分，第一部分模拟绕组端部空间，而第二部分模拟槽部通风系统。

绕组端部模型 模拟端接线下方的气流、导线进风口、通过绕组端部导线风沟中的气流和通过出风区的气流。没有考虑绕组端部的弯曲，因为它的影响低于测量精度的极限。在这个模型上，我们改变导体进风口的数量及尺寸、导体长度以及如图3所示的所有出风区的布置方法。

槽部通风系统的模型 模拟绕组端部下方的气流和槽部范围内的气流。这里端部地区

用对应于进风口和过渡风道几何形状的实际截面大小和长度的一段风沟来代表。模型的槽部由槽下通风沟和两个进风区与出风区组成。各进风区和出风区用与空心导线内风道截面尺寸、形状相同的一些管子互相连结。在这个模型上我们接连测量了进风与出风区的所有方案。槽下风沟的尺寸也在一定限度内变动。

全部模拟设备包括一个高压风扇，一个平稳部分，一个测气流部分（内装一管咀）和一个连接部分，后一部分既与端部区域的模型相连又与槽部的槽型相连。在这个模拟装置上我们量测了一些方案某些风区空气总流量，通过每个导体的流量和通过出风口的流量，在这些风区内从各个导体的风道中流出的气流都混合起来。在这个模型的每个特征点上也测量了静压。

经大量的调正试验后，选用一个牢固地装在风道中心线上尺寸小的普兰特管（Prandtl-tube），作为测定导体通道内气流的测量元件。普兰特管读数与气流量间的关系用校准法确定。此外，由于装入普兰特管而产生的压降也已确定（在总压降中约占5%）。可用这些数值对测量结果加以校正。出风区出风口的空气流量也用普兰特管测得。

测量结果可用来确定各个方案中通过转子的冷却介质的总流量，也可求出每个导体各段的气流量。

在给定的汽轮发电机转子的通风系统中出现的所有几何形状的流阻系数，实际上都可由测得的静压及流量决定。这些测量的某些结果表示在图5和表1中。图5表示绕组端部通风支路进风段的流阻系数与进风口的相对截面之间的关系曲线。甚至在绕组端部长度有显著差别时，这个曲线可以用来调正气流量，以保证绕组端部各导体的最高温升接近相等。

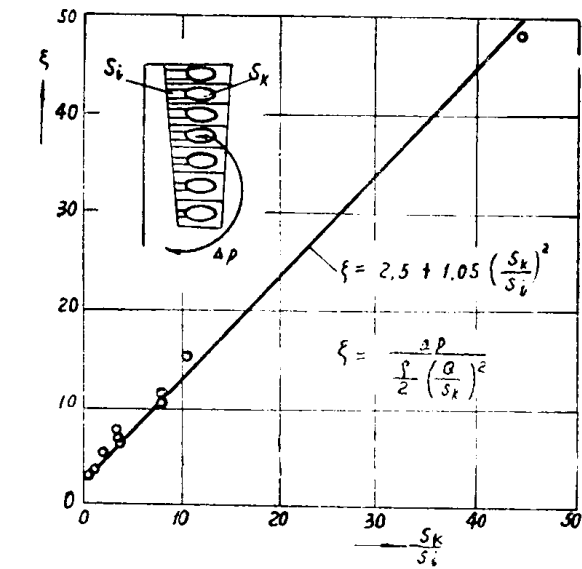


图5 进风区流阻系数与进风口相对尺寸的关系

表 1

方 案	相对 a 方案的气体总流量		导体中最小风速与平均风速之比		实际最小风速与 a 方案最小风速之比
	绕组端部	槽 部	绕组端部	槽 部	槽 部
a	1.00	1.00	0.90	0.90	1
b	0.86	0.80	0.80	0.78	0.69
c	0.98	1.01	0.69	0.76	0.85
d	0.84	0.79	0.61	0.66	0.58
e	1.06	1.10	0.92	0.94	1.15
f	0.87	0.84	0.90	0.83	0.77
g	1.07	1.11	0.91	0.91	1.12
h	1.08	1.12	0.90	0.93	1.16

表1 给出过渡区各种方案测量结果的比较。对于槽部数据此处给出的是两个支路总和，因为适当的选择长度允许我们获得任何随意所需的分布。表中头两栏是各个方案总风量的相对值。次两栏给出各导体中气流分配不均匀性。对风量大小及其均匀性全面的衡量可由最后

一系列的系数得出，它是每一方案槽部导线最小风速的一个尺度，这是重要的数据，因为最高温升发生在转子绕组槽部，虽然从导体间的热联系和沿导体壁上的热流观点看，最小风速并不直接决定导体最高温升，但其影响仍是决定性的。由比较可以看出，限制出风口数量的方案（*b, d, f*）显示本质上更坏的特性，采用这些方案是不利的。而 *e, g, h* 方案看来是最有利的且事实上三个差不多，它们都属于没有混合气流一类的。选择最佳方案还必须考虑过渡区中的局部热传导。

四、过渡区的热模型

求出气流速度后，空心导体风道内的热传导系数就能可靠地算出来，但在过渡区则是例外。在已知的参考文献中还没有可用于计算过渡区导体冷却的参考数据；因为在带 90° 拐弯的错综的几何形状排列的通风系统中有一个很强的扰流。

当保持过渡区风口间有一定的间隔时，必须考虑到槽楔的机械应力，两个相邻的过渡区总长度可以达到 0.5 米左右，故其影响不能忽视。在这些区域内有较高的比损耗，而冷却条件又多半是较差的，况且在出风区流动的冷却气流又是最热的，因此，这些区域是局部温升最高的地方，它决定绝缘使用寿命。例如，按一台 20 万千瓦电机测出的转子铜的温升分布〔6〕，出风区出现的一个最高温升比导体的其他部分高 5%。考虑到这些情况，决定在一个热模型上测出过渡区冷却的精确的参考数据。

如果我们比较图 3 中过渡区的各结构元件，我们发现它们虽包含着各种变化，但从原理上讲只有两种方案，如图 4 所示。在图 4*b* 所示的导体内的隔板会影响气流速度分布，但它对热传导的直接影响的忽略不计。因此，决定制造两种方案的模型，其中每一个代表上述两种结构安排中的一种。

这个模型的导体采用特有的横向通风（图 6）。按槽内的安排办法把导体绑在一起，各个导体在电路上是串联的。冷却气体是空气，将它送到导体下面的配气室，使进入各过渡区的风道内的流速均匀分布。模型外部包扎热绝缘，开始量测时，它散出的热量根据导体平均温升校正。因此，进行校正后，就可以用在模型出线端量测输入电频率的办法，来精确地确定从内部冷却空气中散走的热量。在这个模型的各个导体内装了不少热电偶。

热电偶的指示装在模型外面，向周围的散热忽略不计。

所有测量结果都处理成无量纲的形式。导体风道的流体直径作为这个问题的特征尺寸，由它可算出相应的无量纲的准则。在导体轴向风道内流速同样可求出。这种表示法看来对导体沿轴向温升分布的数学分析来讲是实用的，虽然在给定段气体并不按计算速度流过。

测量风道各段的空气流量和它的压降，以求出过渡区的总流阻系数，图 7 表示按图 4 标

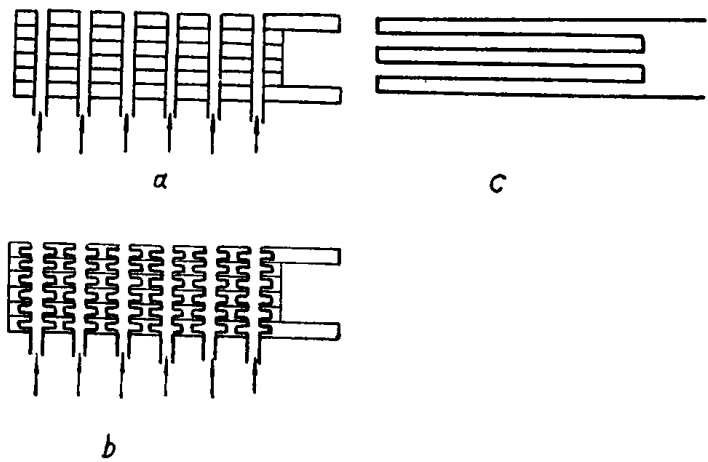


图 6 过渡区的热模型
a, b—模型两种方案的通风图；c—导体的电联接

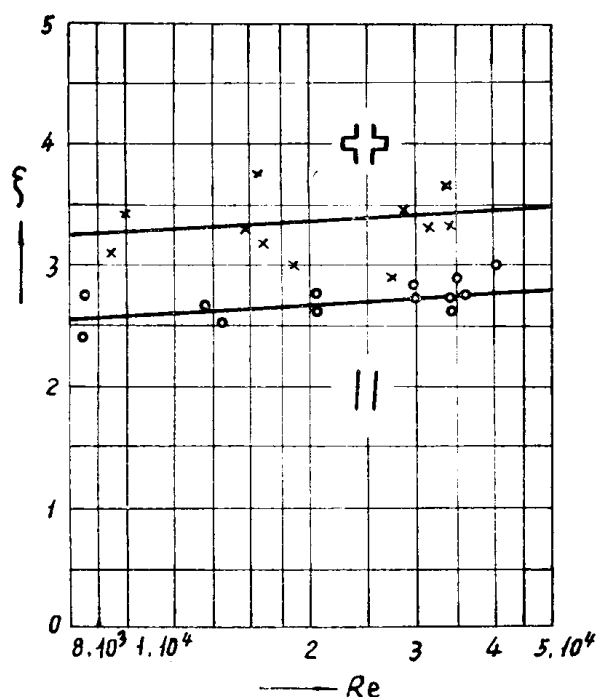


图7 两种过渡风道方案的流阻系数与雷诺数 Re 的关系

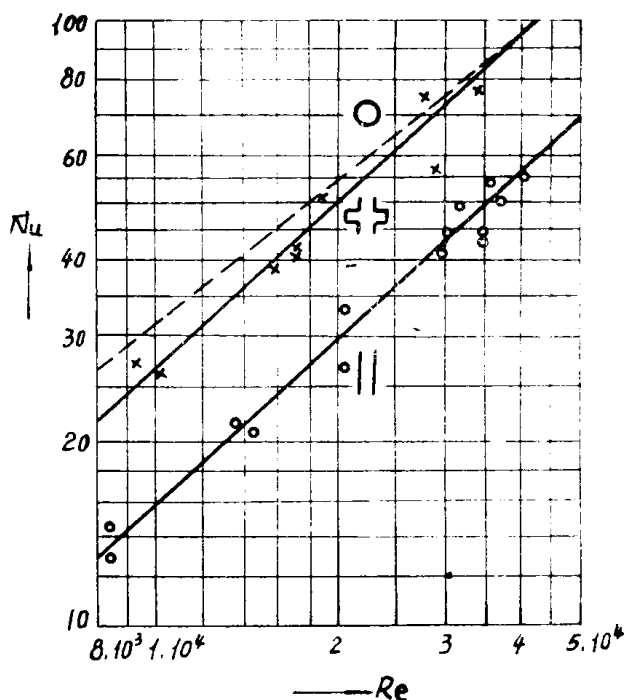


图8 两种过渡风道设计方案的无量纲准则 $Nu = f(Re)$ 的关系曲线。虚线表示按文献画出的圆形管道的类似的关系曲线

志的两种结构的模拟元件的总流阻系数与雷诺数的关系。如予计的那样，光滑风道这一方案的阻力较低，但差别并不太大。

热测量结果采用无量纲关系 $Nu = f(Re)$ ，如图8所示。从两种经检验过的过渡风道方案的数据比较可知，在较复杂的风道中冷却要有效得多。这显然是由于这种安排具有较大的冷却表面，该表面在风道内很远的地方也形成涡流，冷却得比较好。在图8中与虚线进行比较的结果表明，复杂的过渡风道的热传导几乎达到轴向部分风道的数值。

从这个局部横型所得的结果中引出一个结论是决定选用过渡风道。这种型式的风道的局部流阻增大，仅使整个系统流速降低1%，但这个缺点会被这一段所具有的显著增高的传热能力所掩盖。

五、汽轮发电机转子的热计算

用模拟实验结果来补充绕组各段所必需的全部热参数，并可以对稳态转子绕组的轴向温升分布开始进行计算。

由于热场的复杂性，需要提出如下的几项简化假定。

首先认为槽内沿径向上各导体的温升分布是一致的，因此，将各导体内的风速差忽略不计。（它按模拟量测是很小的），并且对各过渡区适度的轴向位移也不加考虑。经槽绝缘向铁心散热也进一步近似简化。导体沿轴向有温度变化，铁心温度可估算出来并在每一段都认为是一常数。热流用导体与铁芯间的热传导系数来考虑。最上一层与最下一层导线之间的较大的散热也不予计算。

在这种解释下的热计算导致对内、外冷却的复合导体的温升分布进行研究。此时冷却