

F A D I A N J I L E N G Q U E J I E Z H I
J I Q I J I A N D U

发电机冷却介质 及其监督

李培元 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

F A D I A N J I L E N G Q U E J I E Z H I
J I Q I J I A N D U

发电机冷却介质 及其监督

李培元 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书从发电机组的安全、经济运行考虑,阐述了发电机的各项能量损耗、温升限值及冷却方式、发电机各种冷却介质特性、发电机内冷水的水质控制原理和控制方法,还详细介绍了电解水制氢的原理,低压电解水制氢、中压电解水制氢及国外引进机组电解水制氢的设备、控制参数、运行管理、气体置换、气体分析、异常现象分析,制氢站的安全管理、发电机的油密封原理及系统等内容。

本书可作为发电厂制氢运行人员、电气运行人员及其相关专业管理人员的培训教材,也可作为高等电力院校应用化学专业、水质科学与技术专业的本科生、研究生、青年教师的教学参考用书,还可作为热动、电气专业人员的学习参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

发电机冷却介质及其监督/李培元编著. —北京:

中国电力出版社, 2008

ISBN 978-7-5083-6482-7

I. 发… II. 李… III. 发电机-冷却-研究-淬火
介质 IV. TM310.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 192401 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 3 月第一版 2008 年 3 月北京第一次印刷

850 毫米×1168 毫米 32 开本 6.5 印张 170 千字

印数 0001—3000 册 定价 14.00 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

发电机是电网电能的主要生产者，只有发电机安全运行，才能保证电网源源不断地向外输送电能。随着工农业生产不断发展和人民生活水平的不断提高，要求电网提供的电量也越来越大，这就要求提高单机发电容量。单机发电容量越大，不仅各种能量损耗越小，节省材料，降低成本，而且还可减少电源点的数量，降低基本投资和运行成本。但是增大单机容量一方面受到转子锻造许用应力和机组临界转速的制约，另一方面也受到制造技术、运输能力及安装条件的限制。目前，两极转子的外径不能大于1300mm，长径比不能大于6.5，即转子长度受到刚度的限制。如采用提高电磁负荷增大单机容量，则又受到绝缘材料和机械性能的制约。因此，只有改进冷却技术，及时将定子绕组、转子绕组、定子铁芯所产生的热量带出机外，确保各部件的温升在允许范围之内，才是提高单机容量的有效途径。下表列出了不同容量的汽轮发电机可以选择的冷却方式，也表示出同一容量的汽轮发电机组可有不同的冷却方式。历史实践证明，发电机的冷却技术，从空气冷却到氢气冷却，从氢气冷却到水冷却，从表面冷却到内部直接冷却，每一次冷却技术的进步，都使发电机的单机容量得到一次飞跃性的发展。

汽轮发电机通常采用的冷却方式

冷却方式			。单 机 容 量 (MW)							简称
定子绕组	转子绕组	定子铁芯	25	50	100	200	300	600	1200	
空外	空外	空								空外冷
空外	空内	空								空内冷
氢外	氢外	氢								氢外冷

续表

冷却方式			单 机 容 量 (MW)							简称
定子 绕组	转子 绕组	定子 铁芯	25	50	100	200	300	600	1200	
氢外	氢内	氢								氢内冷
氢内	氢内	氢								全氢冷
水内	水内	空								双水内冷 (水水空)
水内	氢内	氢								水氢氢
水内	水内	氢								水水氢 (四极)
水内	水内	水内								全水冷

20 世纪 50 年代初,我国电厂最大单机容量只有 25~50MW,至今已发展到 600~1000MW,目前单机容量正在向 1200~1500MW 发展。单机容量的快速发展,主要是采用了先进的冷却介质和冷却技术。因此,熟悉发电机的冷却介质性质和冷却技术及冷却介质的制备和运行管理,对保证大型发电机组安全运行具有重要意义。

有关发电机冷却介质的性质、制备、操作控制及运行监督等,不仅与电厂化学专业有关,还与汽轮机专业和电气专业有关。因此考虑到以上相关专业的特殊性、综合性和复杂性,编写中力求融会贯通,使本书成为一个有机的整体。

在本书编写过程中,夏中明副教授、曹顺安教授、左学渊高级工程师、张丙山高级工程师在提供资料方面都给予了大力支持。本书承原北京市石景山发电总厂教授级高级工程师刘玉仁负责主审,他提出了许多宝贵意见,在此一并向他们表示深切的谢意。

由于水平有限,时间仓促,书中可能会有些错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

编著者

2007 年 8 月

目 录 CONTENTS

前言

第一章 发电机的能量损耗与热量传递..... 1

第一节 发电机的能量损耗与温升限值..... 1

一、发电机的能量损耗(1) 二、发电机的温升与温升限值(1)

第二节 发电机的冷却方式..... 3

一、发电机的冷却方式(3) 二、发电机氢内冷的通风结构(4)

第三节 气体(氢气)冷却器..... 9

一、氢气冷却器的结构(9) 二、有关设计参数(10)
三、氢气冷却器的冷却水系统(11)

第四节 热量传递 13

一、热量传递的三种方式(13) 二、表面冷却对温升的影响(16) 三、直接冷却对温升的影响(17)

第二章 发电机的冷却介质特性 18

第一节 发电机的冷却介质 18

一、液体(18) 二、气体(19) 三、发电机对冷却介质的基本要求(21)

第二节 氢气的基本特性 22

一、氢原子与氢分子(22) 二、氢气的物理性质(23)
三、氢气的化学性质(25) 四、氢气的用途(26)

第三节 水的基本特性 26

一、水的基本特性(26) 二、水的电导率(29)
三、水的离子积与水的 pH 值(30) 四、纯水(31)
五、水与几种气体冷却介质的对比(32)

第三章 水内冷发电机冷却水及质量控制	34
第一节 水内冷汽轮发电机结构简介	34
一、水内冷汽轮发电机组概况(34)	
二、水内冷汽轮发电机的定子绕组及水冷却系统(34)	
三、水内冷汽轮发电机的转子绕组及水冷却系统(43)	
第二节 发电机内冷水水质控制原理	49
一、发电机内冷水水质标准(49)	
二、发电机内冷水的电导率(52)	
三、发电机铜导线腐蚀的影响因素(54)	
四、发电机空心铜导线的腐蚀危害(60)	
第三节 发电机内冷水水质控制	61
一、控制内冷水中溶解氧和二氧化碳浓度(61)	
二、控制内冷水的电导率(61)	
三、控制内冷水的 pH 值(62)	
四、添加缓蚀剂(63)	
五、清除空心铜导线的沉积物(65)	
第四节 发电机定子内冷水系统	65
一、发电机定子内冷水系统(66)	
二、定子内冷水系统设计参数(以某电厂 600MW 机组为例)(66)	
三、主要设备(68)	
四、定子内冷水质量保证措施(70)	
五、定子内冷水系统的运行与维护(71)	
第四章 制氢原理	75
第一节 氢气的工业制取方法简述	75
一、电解水制氢法(75)	
二、其他工业制取方法(75)	
第二节 电解水制氢的原理	77
一、水的电解与分解电压(77)	
二、KOH 电解液(81)	
三、物料衡算与电能消耗(81)	
第五章 电解水制氢设备	85
第一节 低压(DQ-4 型)电解水制氢设备	85
一、工艺流程(85)	
二、低压电解水制氢设备(86)	
第二节 国产中压电解水制氢设备	94
一、概况(94)	
二、中压电解水制氢装置的工艺流程(97)	

三、电解槽(101)	四、氢气分离洗涤器(106)	五、氢气冷却器(107)	六、氧气的分离与冷却(108)	七、电解液的过滤与冷却(108)	八、ZHDQ-3.2/10 型的自动调节(110)
第三节 比利时中压电解水制氢装置	115				
一、设计原则(115)	二、工艺流程(116)	三、制氢设备(120)	四、该制氢设备的特点(124)		
第四节 HS-125 型电解水制氢设备	126				
第五节 工程实例	128				
一、主要设计指标(128)	二、设备规范(129)				
第六章 发电机的气体系统与控制参数	132				
第一节 氢冷发电机的机外气体系统	132				
一、氢气连接(分配)系统(132)	二、二氧化碳分配系统(135)	三、空气分配系统(136)	四、测量与控制系统(136)	五、氢冷系统的有关参数(以某电厂 600MW 机组为例)(136)	六、氢冷发电机机壳外气体系统实例(137)
第二节 氢气的控制参数	140				
一、氢气的纯度(140)	二、氢气的湿度(143)	三、氢气的温度(146)	四、氢气的压力(147)		
第三节 漏氢量的计算	148				
一、漏氢量(149)	二、漏氢率(150)	三、等值漏氢量(151)			
第七章 制氢制备的运行与管理	153				
第一节 电解液的配制	153				
一、电解液的性能(153)	二、电解液的配制(154)				
第二节 氢气的除湿	155				
一、冷凝法(156)	二、吸附除湿(158)				
第三节 氢气质量的化学监督	160				

一、气体的取样方法(160)	二、氢气的纯度分析(160)
三、氢气的湿度分析(167)	
第四节 氢冷发电机的气体置换与泄漏检测	171
一、气体置换(171)	二、氢气泄漏检测(173)
第五节 制氢设备的运行与维护	176
一、编写运行规程(176)	二、制氢设备的正常运行和维护(176)
三、制氢设备的检修(177)	四、制氢设备常见异常及处理(180)
第六节 制氢站的安全管理	183
一、建筑与环境(183)	二、储氢装置的安全措施(183)
三、制氢站的维修及管理(184)	
第八章 氢冷发电机的油密封	185
第一节 电力用油的质量标准	185
一、电力用油的分类与名称(185)	二、电力用油的质量标准(186)
第二节 氢冷发电机的油密封	191
一、发电机的油密封(191)	二、发电机的油密封系统(192)
三、密封油系统的运行维护(194)	四、600MW发电机组的油密封系统(194)
五、密封油控制系统报警信号(198)	
参考文献	200

第一章

发电机的能量损耗与热量传递

第一节 发电机的能量损耗与温升限值

一、发电机的能量损耗

汽轮发电机在由机械能转变为电能时,难免会有一部分能量转变成热能而损耗。这些损耗的能量包括电气损耗和通风损耗两部分。电气损耗又分铜损和铁损两种,铜损又分定子铜损和转子铜损,它们都是由于电流通过铜线绕组时,电阻发热而损耗的能量;铁损也分定子铁损和转子铁损,它们都是由于磁通通过铁芯时产生涡流发热而损耗的能量。通风损耗包括风扇动力所消耗的能量和流动的气流相互摩擦而产生的能量损耗。

除此之外,还有轴承摩擦而造成的轴承损耗。这些损耗的能量最后会变成热量,使发电机各个部件的温度升高。发电机绕组的温度升高就会产生电晕现象,影响绝缘材料的使用寿命,严重时甚至可能将发电机烧毁。

所以,要想保证发电机组能在绕组绝缘材料允许的温度下长期安全运转,除采用耐热性能良好的绝缘材料之外,还必须采取一定的强制冷却措施,以连续不断地将发电机内产生的热量导出,避免这些热量在各部件上积累,引起部件的温度升高。

二、发电机的温升与温升限值

1. 发电机的温升

发电机内的各种不同绝缘材料都有相应的最高允许工作温度,在此温度下长期工作时,绝缘材料的电性能、机械性能和化学性能等都不会显著变坏;但超过此温度,绝缘材料的这些性能就会迅速变坏或引起快速老化。因此,发电机的各种部件都应该因其结构材料的不同而有一个最高工作温度的限值。

在发电机各部件温度升高的同时,热量便开始从高温向低温部分转移,热流所涉及部分的温度会相应提高。当发电机的各部

件温度高于周围介质温度时，就会向冷却介质散发热量。发电机部件某一部分的温度 t_1 与发电机周围介质的温度 t_2 之差，称为发电机该部分的温升，用 τ 表示，即

$$\tau = t_1 - t_2, ^\circ\text{C} \quad (1-1)$$

发电机各部位温升的大小不仅与发电机发热量的多少有关，而且还与散热方式和散热速度有关。所以，温升是发电机能量损耗和散热性能的一个量度，它是评价发电机性能的一个指标。

2. 温升限值（温升极限）

根据式（1-1），发电机某一部位的温升 $t_1 = \tau + t_2$ ，与具体地点的冷却介质温度 t_2 有关。为了使制造的发电机在全国各地都能使用，国家标准中规定，周围空气的最高温度 40°C 。

当周围冷却介质的最高温度一定时，发电机各部位的最高允许温度便决定于它们的温升。这时，为了保证发电机的安全运行和具有适当的使用寿命，发电机各部位的温升不应超过一定数值，也就是说，发电机各部件的允许温升有一个最大值，即温升限值或温升极限。温升限值的水平高低既影响到发电机设计的经济性，也关系到发电机的寿命。为此，各国标准基本相同，但也有差别，我国发电机的温升限值符合 GB 755—2000《旋转电机定额和性能》标准，并有以下几个特点：

（1）对于不同冷却方式，如空冷、氢内冷、氢外冷和直接液冷的温升限值，区别对待，针对性强。

（2）对电阻法测温赋以更广的含义，并将带电测温法列入国家标准。

（3）对电压与温升的影响作出明确规定，以 11kV 为基准，超过该基准后每增加 1kV，温升限值下降 $1 \sim 1.5^\circ\text{C}$ 。

（4）对氢外冷发电机在不同氢压下运行时的温升限值作出规定，以 $p_a = 150\text{kPa}$ （绝对压力）为基础，每超过 100kPa，温升限值减 5°C 。

（5）对于短时间运行的发电机，规定温升限值比连续运行高 10°C 。

(6) 对轴承温度给予新规定。当环境温度为 40°C 时, 滑动轴承的温度应小于或等于 80°C ; 滚动轴承的温度应小于或等于 95°C 。

(7) 对于采用气体-水冷却器的发电机, 环境温度是指进风温度。当进水温度小于或等于 28°C 时, 冷空气温度小于或等于 35°C , 这时, 发电机温升限值允许提高 5°C 。

第二节 发电机的冷却方式

一、发电机的冷却方式

提高发电机的单机容量, 靠增大发电机体积以增加铜线绕组和铁芯容量的办法, 受到了加工、运输、安装等条件的限制, 因此只有增加铜线绕组的电流密度。绕组的电流密度越大, 绕组产生的热量也就越多, 因此, 只有采用有效的冷却介质和冷却方式, 才能提高发电机的功率。

汽轮发电机的冷却介质主要有氢气和纯水两种, 按其冷却方式又分为外冷式和内冷式汽轮发电机两种。有关冷却介质的性质将在下面作介绍。

1. 外冷式汽轮发电机

外冷式汽轮发电机又称表面冷却式汽轮发电机, 其冷却介质为气体 (空气或氢气), 气体在绕组导线和铁芯的表面流过, 与发热体接触, 吸收发热体表面的热量后随流动的气流带走。所以, 表面冷却只有发热体产生的热量全部导至物体表面时才能被气体冷却。为提高冷却效果, 应尽量增大接触面积。

外冷式发电机是由安装在转子轴上的风扇压入 (称压入式) 或抽出 (称抽出式) 后, 通过各部位的冷通道, 对发电机进行冷却。被加热了的热气流又经过热通道进入水冷却器, 热量由水带出, 冷却后的气体再经过冷通道被风扇压入或抽出, 在发电机内部形成一个密闭式的循环通风系统。其中, 抽出式冷却系统常用于定子、转子绕组均采用水内冷, 而铁芯采用氢外冷的发电

机组。

目前，氢外冷常用于单机容量为 100MW 以下的发电机组，氢气压力一般为 0.15~0.20MPa，其冷却效率比空气冷却提高 0.6%~1.0%，所以，100MW 以上的发电机组多采用氢内冷或水内冷。

2. 内冷式汽轮发电机

内冷式汽轮发电机又称直接冷却式汽轮发电机，其冷却介质为气体（氢气）或液体（水或油）。它是将定子和转子的绕组导线做成中空式，让氢气或水通入导线内部直接将热量带出。而定子和转子的铁芯内冷则是利用开孔或开沟槽，将冷却气体用风扇压入各个被冷却部位，以提高冷却效果。单机容量提高以后，随着电压等级的提高和绝缘层厚度的增加，绝缘层上的温降上升，绕组温升增大，会影响机组长期安全运转。

内冷式不仅能提高冷却效果，而且扩大了冷却介质的种类，如氢气、油和纯水，也可两者同时应用。

由于生产及设计的继承性和经验积累等原因，氢内冷（氢气直接冷却）方式首先得到发展，尤其在转子氢内冷方面，各制造厂做了大量的研究工作，出现了多种转子氢内冷通风系统。定子的内冷方式一般限于轴向通风，这是因为定子是静止部件，无法采取自通风的方式。定子内冷风道需要靠外加高压，强迫冷却介质通过；其次，当水作为冷却介质的优点被发现后，水冷方式比较容易在定子上实现。因此，定子氢内冷，包括铁芯氢内冷的结构，采用的厂家不如转子氢内冷多。

下面简单介绍定子、转子氢内冷的通风结构。

二、发电机氢内冷的通风结构

1. 定子氢内冷及通风结构

(1) 全轴向通风系统。定子氢内冷最普通的通风系统工作流程：冷却气体在高压风扇（高压离心风扇或多级风扇）的作用下，从定子绕组的一端进入轴向风道，流经定子线棒全长后从另一端排出，这是全轴向通风系统。图 1-1 所示为全轴向通风系统

的简图，冷却气体由冷却器出来后，一部分进入定子绕组轴向风道，另一部分进入铁芯轴向风道以冷却铁芯，第三部分从护环下面进入转子绕组的轴向风道。冷却气体被高压风扇从定子、转子的另一端抽出后进入冷却器被冷却。

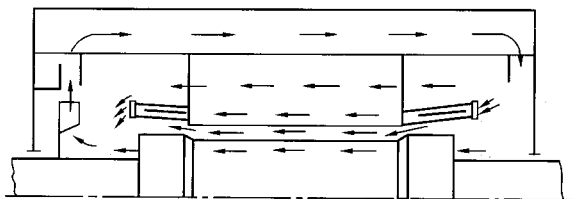


图 1-1 全轴向通风系统

(2) 半轴向通风（1/2 轴向通风）系统。除了全轴向通风系统以外，还有一种半轴向通风系统（见图 1-2）。冷却气体在两端风扇的作用下，从轴向通风孔的两端进入定子绕组和铁芯，从铁芯中部的径向风沟排到冷却器。

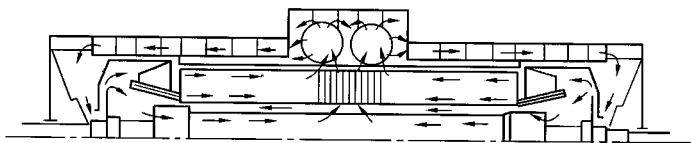


图 1-2 半轴向氢内冷通风系统

(3) 径向-轴向通风系统（见图 1-3）。冷却气体在高压风扇的作用下被压入冷却器，然后分成两路：一路由护环下进入转子

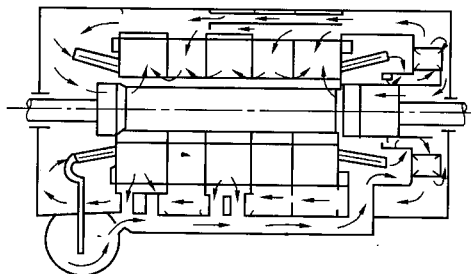


图 1-3 径向-轴向氢内冷通风系统

的轴向风道，另一路进入定子铁芯背部。后者又分为三部分：第一部分进入径向风沟冷却铁芯后由气隙排出；第二部分进入定子轴向风道冷却定子绕组；第三部分从转轴另一端的护环下进入轴向风道，在转子中部由径向风沟排至气隙。

总之，由于不能破坏定子绕组槽绝缘的完整性，定子绕组的氢内冷方式只能采用轴向通风结构。定子铁芯上设有径向风沟，这实际上是采用氢外冷方式冷却铁芯。因此，所谓径向-轴向通风系统，只不过是定子、转子采用氢内冷，而铁芯采用氢外冷的冷却方式。

定子氢内冷的轴向通风系统大多与转子氢内冷的轴向通风系统配套使用，这时，两者的散热性是相适应的。

2. 转子氢内冷及通风系统

随着发电机容量的增加，转子绕组的电流密度也越来越大，以便在有限的空间里产生足够的励磁安匝值，因而转子绕组的损耗密度随之急剧上升。100MW 发电机的转子绕组损耗密度已达 $1.5\text{W}/\text{cm}^2$ ，据估计，1000MW 可达 $3\sim 3.5\text{W}/\text{cm}^2$ 。这时，槽衬温降及齿温降将达到 $30\sim 50^\circ\text{C}$ 以上，若仍采用氢外冷，则转子绕组的温升必将超过允许限度。因此，发展转子氢内冷方式，以便更有效地降低转子绕组的温升。

转子氢内冷除具有氢外冷的优点以外，还有以下几个优点：

(1) 消除了绝缘温降（约占总温降的 40%），减少了传热热阻，降低了绕组的温升。

(2) 提高氢气压力后，散热系数增加，使绕组的表面温升降低。

(3) 提高氢气压力的结果是，氢气的体积热容量成正比地增加（氢气的密度与氢压成正比），故氢气本身的温升也降低了。

转子绕组的氢内冷通风系统分为两部分：一是转子体槽内部通风冷却系统，二是转子端部通风冷却系统，统称为发电机内气体（风路）系统。转子端部通风冷却系统由风扇、冷风道、铁芯通风沟、热风道和氢气冷却器组成。氢气由装在转子轴上的风扇

吸入或抽出后，通过各部分的冷却通道对发电机的发热部位进行冷却。被加热了的热氢气经热风道进入氢气冷却器进行热量交换，热量由冷却水（亦称二次冷却水）带出机外，冷却后的冷氢气再次被风扇吸入或抽出，在发电机内形成一个密闭式的循环通风系统。因此，这种通风系统具有结构简单，能量消耗小，防尘、防潮及冷却介质（氢气）不受环境影响等优点。

发电机转子的氢内冷，其转子绕组通常采用气隙取气斜流式通风结构，即利用转子本身的动能来维持氢气的内部循环，其通风能力几乎与转子长度无关，从而使转子绕组的温度分布比较均匀。这种通风结构就是：在转子铜排上开有通风孔，组装热固后形成斜流式通风通道；在转子进风区的槽楔上开有进风口（斗）；出风区的槽楔上开有出风口（斗）；进风斗的迎风面钻有进风孔；出风斗的背面钻有出风孔。氢气沿转子表面通过一组斜槽吸入斜流式通道进入槽底，在槽底径向转弯后，通过另一组斜流式通道返回气隙。氢气的流动动力是布置在转子轴两端的风扇而获得的压力（一般为 $0.38 \sim 0.40 \text{ MPa}$ ）和转子转动的动能而产生的吸力（或抽力），如图 1-4 和图 1-5 所示。

为了防止发电机内的冷热气体相互混合，降低冷却效果，发电机的定子和转子通常采用耦合式通风系统，即定子、转子的进风口（冷风区）与出风区（热风区）分别相对应。定子和转子沿轴向分成了若干个冷风区和热风区，从而将冷、热氢气分开，可称为冷热气各行其道，进风区和出风区相间隔布置。进风区数一般为奇数，出风区比进风区多一个。

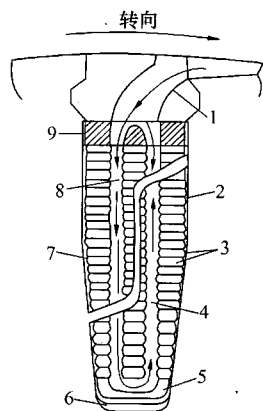


图 1-4 沿气流中心线取气的斜流通风转子横截面图

- 1—光滑进风斗；2—匝间绝缘；3—铜线；4—出风口；5—锻成的铜风口；6—绝缘垫；7—槽衬；8—进风口；9—槽口垫条

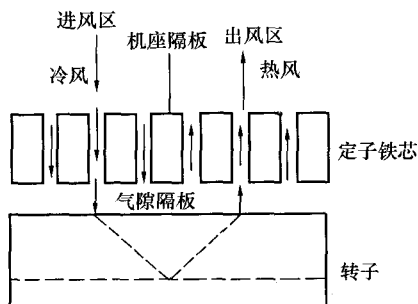


图 1-5 气体的斜流通风示意图

有的机组设计 11 个风区，其中 5 个进风区，6 个出风区，相间布置。也有的机组设计成 9 个风区，其中 4 个进风区，5 个出风区。为防止风路短路，在定子、转子之间气隙中的冷、热风区间以及定子铁芯上加装隔风环，这样使气体温度沿转子轴向分布比较均匀。图 1-6 所示为某电厂发电机的整机通风系统，它包

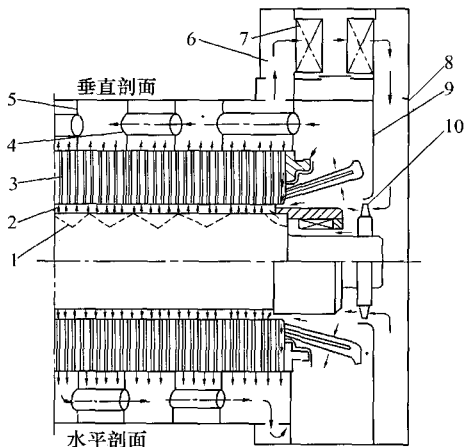


图 1-6 整机通风系统

- 1—转子绕组风道；2—气隙；3—铁芯风道；
4—机座风管；5—机座隔板；6—冷却器包；
7—冷却器；8—端罩端盖；9—内端盖、风
扇罩；10—轴流风扇