

高等学校教材

# 水轮发电机组运行与维护

河海大学蒋静华 编



TM312

TM 312

360772

047

高等学校教材

---

# 水轮发电机组运行与维护

河海大学 蒋静华 编



水利电力出版社

(京)新登字115号

20045/96

### 内 容 提 要

本书共分六章，主要内容包括：水电站的水轮发电机组；水轮发电机组的试运行；水轮发电机组的运行及操作；机组有关设备的运行及维护；水电站机组的优化运行及计算机监控；水轮发电机组的现场测试。

本书可作为高等院校水动专业高年级选修课教材，还可供从事水电厂管理、运行工作的工程技术人员参考。



高等学校教材

水轮发电机组运行与维护

河海大学 蒋静华 编

\*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售·

北京市京东印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 16开本 7.25印张 163千字

1992年11月第一版 1992年11月北京第一次印刷

印数 0001—2790 册

ISBN 7-120-01586-6/TV·583

定价2.00元

# 前 言

水力发电较之于火力发电、原子能发电具有经济、运行灵活、无污染等优越性，在电力系统中起着巨大的作用。

在已建的水电厂中，用科学合理的方法对水轮发电机组及其他设备进行监测、运行操作与维护管理，使它们保持良好的工作状态，是保证水电厂安全可靠、经济运行的关键之一。完好的设备、精干的运行维护技术队伍，是水电厂安全可靠、经济运行的物质基础。为此，对水电厂的水轮发电机组及其他设备的运行维护工作，进行总结和深入研究是极有意义的。

本书从我国实际情况出发，比较详细和系统地叙述了水电厂水轮发电机组及其他设备，在正常、异常情况下的状态和操作处理方法；阐述了机组优化运行问题及其算法，对会产生巨大经济效益有极大发展前途的机组运行计算机监控课题作了介绍；最后讲述了水轮发电机组现场测试的内容和方法。限于篇幅，后两部分只能择其要者叙述于书中。

1988年5月，水利部在河南省郑州市召开的高等学校水利水电类专业教学委员会会议上，本书被列入“水利水电动力工程”专业选修课教材出版。其前身系河海大学为拓宽水动专业学生的专业知识面并能较快胜任水电站运行、管理工作而开设的一门选修课教材，原名为《水电站的运行管理》，经删选后编写为《水轮发电机组运行与维护》。

本书由华中理工大学张昌期教授和河海大学季盛林教授主审。编写过程中得到佛子岭、陈村、富春江等水电厂有关同志的支持和帮助，特致谢忱。

对书中的不足和错误，恳切希望读者批评指正。

编 者

1990年9月

# 目 录

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 前 言                 |     |
| 第一章 水电站的水轮发电机组      | 1   |
| 第一节 概述              | 1   |
| 第二节 水轮机             | 1   |
| 第三节 水轮发电机           | 6   |
| 第二章 水轮发电机组的试运行      | 12  |
| 第一节 工程验收            | 12  |
| 第二节 水轮发电机组的起动试验     | 15  |
| 第三节 水轮发电机组第一次起动试运行  | 20  |
| 第四节 水轮发电机组空载、负载试运行  | 21  |
| 第三章 水轮发电机组的运行及操作    | 24  |
| 第一节 水轮发电机组的正常运行及监视  | 24  |
| 第二节 水轮发电机组的运行及操作    | 28  |
| 第三节 发电机的异常运行及事故处理   | 39  |
| 第四节 水轮机的异常运行及事故处理   | 43  |
| 第四章 机组有关设备的运行和维护    | 51  |
| 第一节 励磁机的运行和维护       | 51  |
| 第二节 变压器的正常运行和维护     | 53  |
| 第三节 变压器的不正常运行及处理    | 57  |
| 第四节 配电装置的运行和维护      | 58  |
| 第五节 电气设备消防          | 64  |
| 第六节 机械调速器的运行和维护     | 68  |
| 第七节 水泵的运行和维护        | 70  |
| 第八节 空压机的运行和维护       | 72  |
| 第五章 水电站机组优化运行及计算机监控 | 74  |
| 第一节 水电站机组的优化运行      | 74  |
| 第二节 水电站机组运行的计算机监控   | 83  |
| 第六章 水轮发电机组的现场测试     | 96  |
| 第一节 水轮发电机组测试目的和内容   | 96  |
| 第二节 水轮机效率现场测试       | 97  |
| 第三节 机组稳定性试验         | 106 |
| 第四节 超声波法测水轮机气蚀      | 110 |

# 第一章 水电站的水轮发电机组

## 第一节 概 述

众所周知，电力是衡量国家现代化水平的重要标志，水能是一种再生能源，它广泛应用于工农业生产和人民生活的各个方面，对促进经济发展和改善人民生活起着重要作用。

按照我国能源资源的特点，电力工业开发的方针是尽可能多的开发水电。水能是自然界众多能源中的一种，水力发电是一次能源和二次能源开发同时完成的，水力发电具有如下优点：

- 1) 利用水力发电能节约燃料降低成本；
- 2) 水电站装置简单，设备元件少，便于实现水电站的自动化；
- 3) 水电站能迅速投入系统运行，提高系统供电的安全可靠性；
- 4) 水力发电无污染，并能发挥防洪、灌溉、航运等综合利用之效益。

水电站是生产电能的工厂，其任务是将水能转化为电能，经变电、配电后供工农业生产和人民群众生活需要。

水电站内生产电能的设备按其作用大致可分为下列四大系统：

- 1) 主机设备系统：由水轮机及相应的进出水设备组成；
- 2) 电气一次系统：由发电机、发电机引出线、发电机电压配电装置、主变压器、厂用变压器、高低压电气设备及相应的各种母线、电力电缆等组成；
- 3) 电气二次系统：包括发电机同期装置，机旁盘，各种互感器、表计、继电器、控制电缆、自动及远动装置等；
- 4) 辅助设备系统：包括水电站的油、气、水系统，水轮机调速设备，主阀或快速闸门操作设备等。

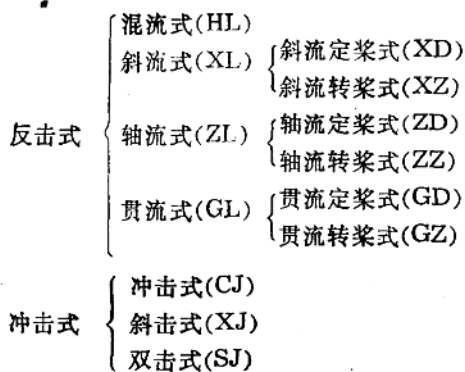
各系统之间相互联系、协调配合，在水电厂运行中共同发挥作用。

水轮机是水电站生产电能的水力原动机，它将水能转换成旋转的机械能，再由发电机将此机械能转换为电能。水轮机和发电机以及相应的辅助设备，组成水轮发电机组。

水轮发电机组是水电站中最重要的动力设备，因此，提高水轮发电机组的运行维护水平具有重大实际意义，本书将对水轮发电机组的运行维护作详细阐述。

## 第二节 水 轮 机

水轮机是将水能转换为机械能的机器，根据转轮转换水流能量的不同方式，水轮机可分为冲击式水轮机和反击式水轮机两大类。冲击式水轮机主要是将水流的动能变为机械能，而反击式水轮机则主要是转换水流的压能和动能。两类水轮机分别有下列不同的型式：



我国常采用轴流转桨式、轴流定桨式、混流式和斗叶式的水轮机，本章就这几种水轮机作些必要的介绍。

水轮机的基本参数有：水头 $H$ ，流量 $Q$ ，功率 $N$ ，转速 $n$ ，转轮直径 $D_1$ ，水轮机效率 $\eta$ ，水轮机气蚀系数 $\sigma$ 等。这些参数在水轮机课程中已作介绍，这里不再赘述。

组成反击式水轮机本体的设备可分为三部分：

(1) 埋入部分(包括浇入混凝土的水轮机部件)。其中有蜗壳，座环，转轮室，基础环，带接力器坑衬的水轮机机坑里衬和尾水管里衬。

(2) 工作机构。包括水轮机导水机构和接力器，水轮机转轮、主轴、导轴承，转桨式水轮机的受油器、管路等。

(3) 辅助设备。包括水轮机真空破坏阀、补气阀，排水泵，漏油装置，事故配压阀，蜗壳排水阀，尾水管排水阀，接力器锁定装置，转桨式水轮机的协联机构等。

现将几种有代表性的水轮机结构作一简单介绍。

### 一、混流式水轮机

混流式水轮机如图1-1所示。水流经压力水管进入蜗壳，再由蜗壳到达转轮，首先要经过座环。座环是一环形结构，它由顶环、底环及一定数量具有流线型的固定导叶组成。其功能是将水轮机上部的负荷传递到水电站的基础上。水流经座环进入导水机构，导水机构由分布在径向圆周上一定数量的导叶组成。导叶的上端安放在导叶轴承内，轴承则固定在水轮机顶盖上，导叶的下端嵌入导水机构的下环中。导叶的转动是靠油压推动推拉杆，使控制环转动而带动连杆和导叶拐臂来实现的。水轮机转轮由上冠、下环和轮叶组成。转轮所得的机械能通过水轮机主轴和发电机主轴传递给发电机，使发电机运转发电。为防止轴的摆动，装有水轮机导轴承。为了减少转动部分和固定部分的间隙漏水，在其上、下端装有固定和转动的止漏装置。从转轮流出的水经尾水管流向下游。

### 二、轴流式水轮机

兹以轴流转桨式水轮机结构为例说明之。

如图1-2所示，轴流转桨式水轮机的蜗壳、座环、导水机构、尾水管、主轴和导轴承等基本部件，与混流式水轮机无原则区别。不同之处在于转轮的形状、操纵机构及其相应的转轮室和顶盖等。轴流转桨式水轮机的转轮似螺旋桨，在圆锥形的轮毂上装有轮叶，轮叶

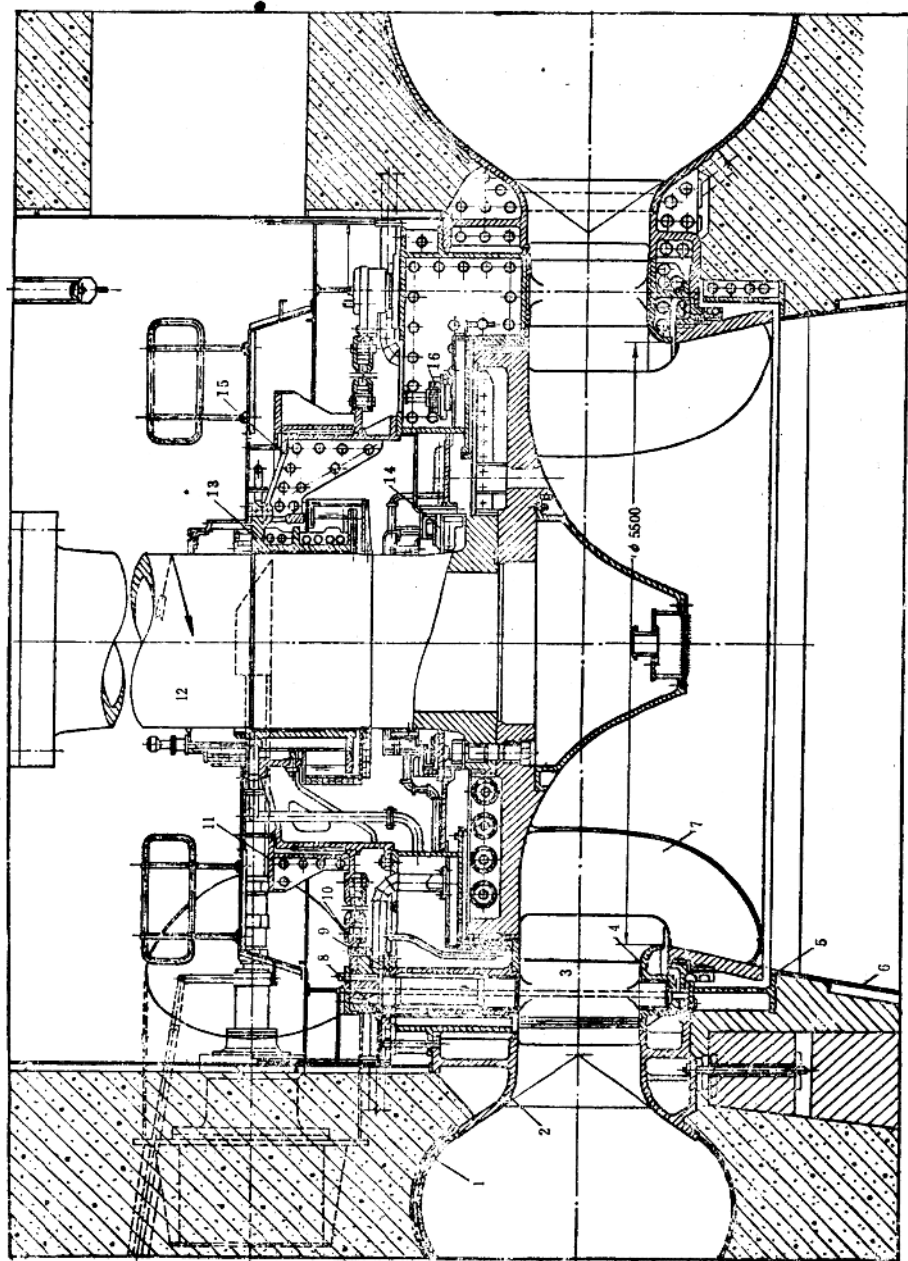


图 1-1 混流式水轮机 (单位: mm)

- 1—蜗壳; 2—座环; 3—导叶; 4—导叶下环; 5—基础环; 6—尾水管里衬; 7—转轮; 8—顶盖;
- 9—导叶栅; 10—转臂; 11—拉脚环; 12—主轴; 13—轴承; 14—密封装置; 15—轴承支架;
- 16—真空破坏阀



数一般为3~8片。转轮体内装有操纵叶片转动的机构，当水轮机负荷改变或水头变化时，根据导水机构的协联动作，即控制压力油经转轮操作油管进入转轮接力器，接力器在油压作用下带动传动机构使转轮轮叶转动，到达新的位置以适合新的运行工况。其顶盖部分由下支持盖、中间支持盖及上支持盖组成。其导水机构接力器、支持环、控制环、推拉杆与混流式水轮机类似。

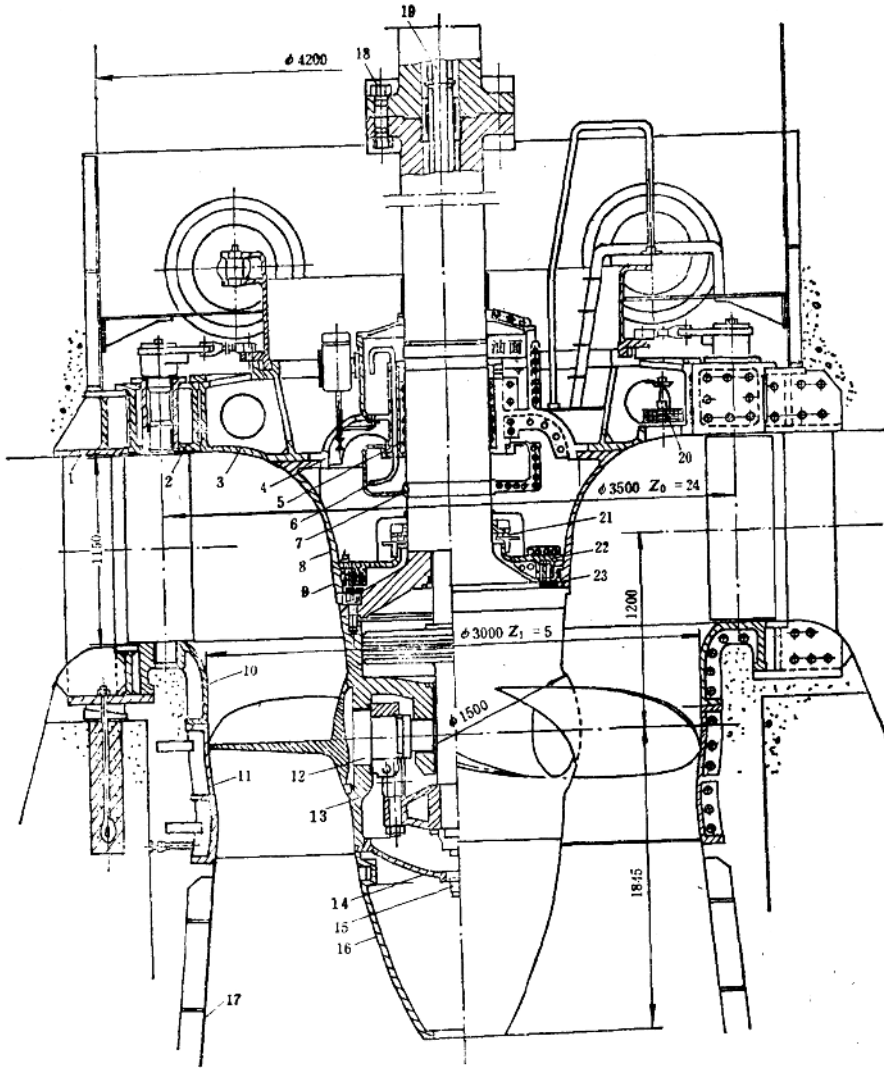


图 1-2 轴流式水轮机 (单位: mm)

- 1—底环；2—顶环；3—支持盖；4—轴承体；5—筒式轴承；6—串托管；7—转动油盆；8—轴承座；  
 9—空气围带；10—底环；11—转轮室；12—叶片轴；13—转轮体；14—下端盖；15—放油阀；  
 16—泄水锥；17—尾水管里衬；18—联轴螺栓；19—操作油管；20—真空破坏阀；21—弹簧式端面  
 自调整水封；22—密封盘；23—转动止漏环

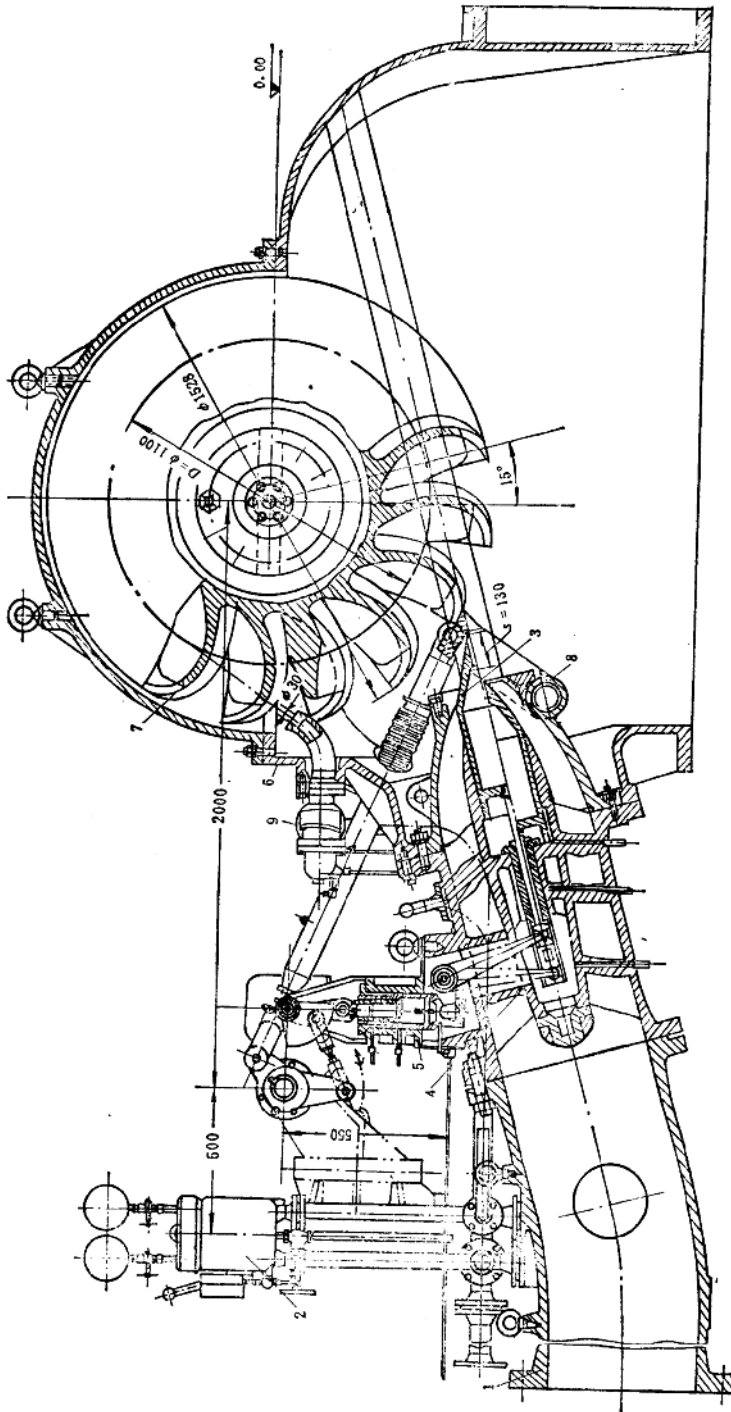


图 1-3 斗叶式水轮机 (单位: mm)  
 1—引水管; 2—控制机构; 3—喷嘴; 4—接针; 5—接力器; 6—机壳; 7—水斗; 8—折向器;  
 9—制动喷嘴

### 三、斗叶式水轮机

如图1-3所示，斗叶式水轮机适用于高水头。在结构上有竖轴和横轴之分，可以是单喷嘴，也可以是多喷嘴。水流沿压力钢管，经球阀，进入集流管后通入喷嘴，由喷嘴射出的射流冲击转轮，转轮装于固定在机壳上的轴承上，其上加盖以防水流外溅。依靠操纵机构移动喷嘴，调节流量，并装有反喷嘴装置制动转轮，实施停机操作。射流出口处装有折向器，以便在水轮机突然丢弃负荷需要紧急停机时，将射流引向转轮之外，避免喷嘴突然关闭时，在压力钢管内产生水击，或射流继续作用在转轮上发生飞逸。

## 第三节 水轮发电机

按水轮发电机组轴线位置布置的不同，可分为立式和卧式两种机组型式。一般，大中型机组采用立式布置，小型机组、贯流式机组和斗叶式机组则采用卧式布置。

立式布置的水轮发电机分为悬式和伞式两种。

如图1-4所示，悬式水轮发电机的推力轴承位于发电机转子上部的上机架或上机架中。如图1-5所示，伞式发电机的推力轴承位于转子下部的下机架中，或用支架支承在水轮机顶盖上。伞式发电机又可分为普通伞式（其上、下导轴承分别位于上、下机架中），半伞式（只有上导轴承，它布置在上机架中，无下导轴承）和全伞式（只有下导轴承，它布置在下机架中，无上导轴承）。发电机的上导轴承和推力轴承可设置在同一油槽中，亦可分开设置。

水轮发电机的推力轴承，主要作用是承受机组转动部分的重量及轴向水推力，并把它们传递给机架。推力轴承油槽内装有油冷却器，依靠轴承旋转部件的粘滞泵作用，使冷热油对流形成内循环冷却方式，也有将油冷却器设在油槽外形成外循环冷却方式的。

立式水轮发电机的导轴承能承受机组转动部分的径向机械不平衡力和电磁不平衡力，使机组轴线在规定范围内摆动。

发电机的转子和定子是产生电磁作用的部件。如图1-6所示，发电机转子由主轴、转子支臂、磁轭和磁极等部件组成。主轴传递转矩，转子支架用以固定磁轭并传递扭矩。

磁轭的作用是产生转动惯量和固定磁极，它是发电机磁路的一部分。磁轭外圆的“T”形槽用以固定磁极。

磁极由磁极铁芯、励磁线圈和阻尼条三部分组成。励磁线圈由扁裸铜条绕成，匝间用石棉纸或玻璃丝布作绝缘。对地绝缘采用绝缘套筒或垫板。

极靴上装有阻尼绕组，它由阻尼铜条和阻尼环组成，各极间的阻尼环用青铜片软接头联接。

转子磁轭的下部有制动环（有的也设在支臂下部或支臂与磁轭之间），用以与制动器的制动块产生摩擦力矩而使机组停机。

如图1-7所示，发电机定子由机座、铁芯和线圈等部件组成。机座用以固定铁芯，铁芯和线圈则是形成发电机磁路与电路的部件。铁芯由两面涂有绝缘漆的硅钢片叠压而成。定子线圈由带有绝缘的扁铜线绕制而成。在某些线圈底层及层间埋有电阻温度计，用以测

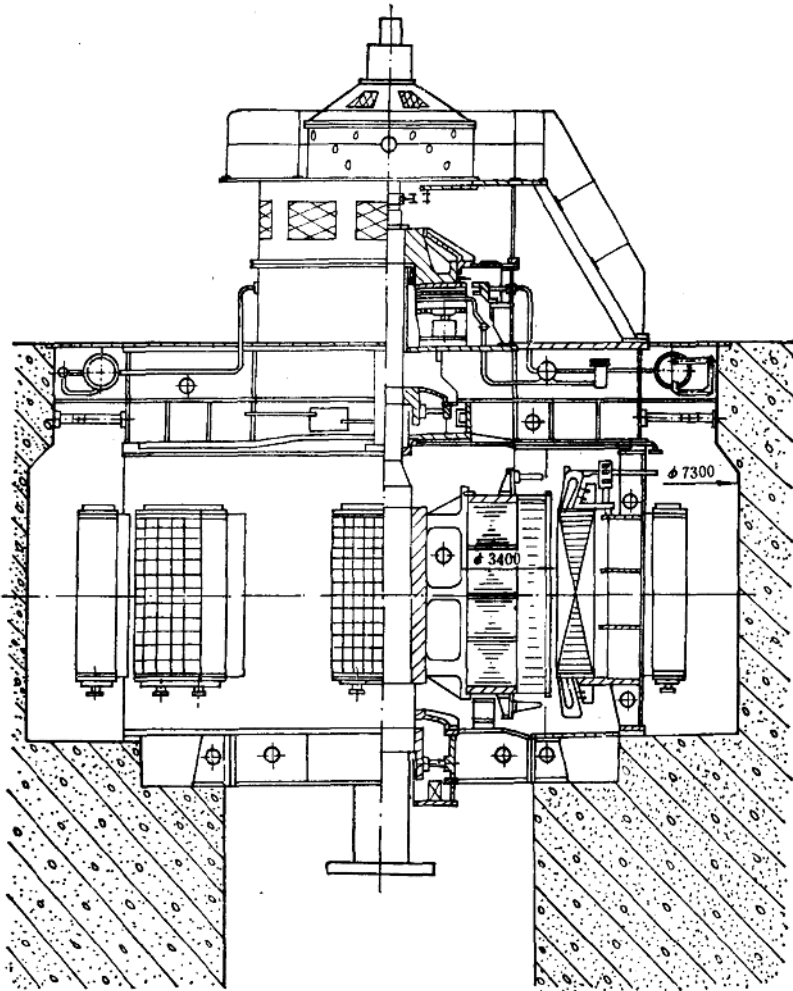


图 1-4 悬式发电机 (单位: mm)

量发电机运行中线圈的温度。

发电机空气冷却器的作用是散发发电机运转中因电气损耗和通风损耗所产生的热量,使发电机温度在正常值范围内。

按照国家有关规定,额定容量在250kVA以上的立式水轮发电机组应装有制动装置,额定容量在1000kVA以上的立式水轮发电机组,一般采用空气制动系统。在水轮发电机组的停机过程中,当机组转速降低到额定转速的30%~40%时,应对机组连续制动,以免推力轴承在低速下转动,油膜被破坏而使轴瓦毁损。制动装置的另一用途是,当机组在安装或检修后,于机组起动前将高压油注入制动装置内,使发电机旋转部分顶起,在轴瓦间形成油膜。

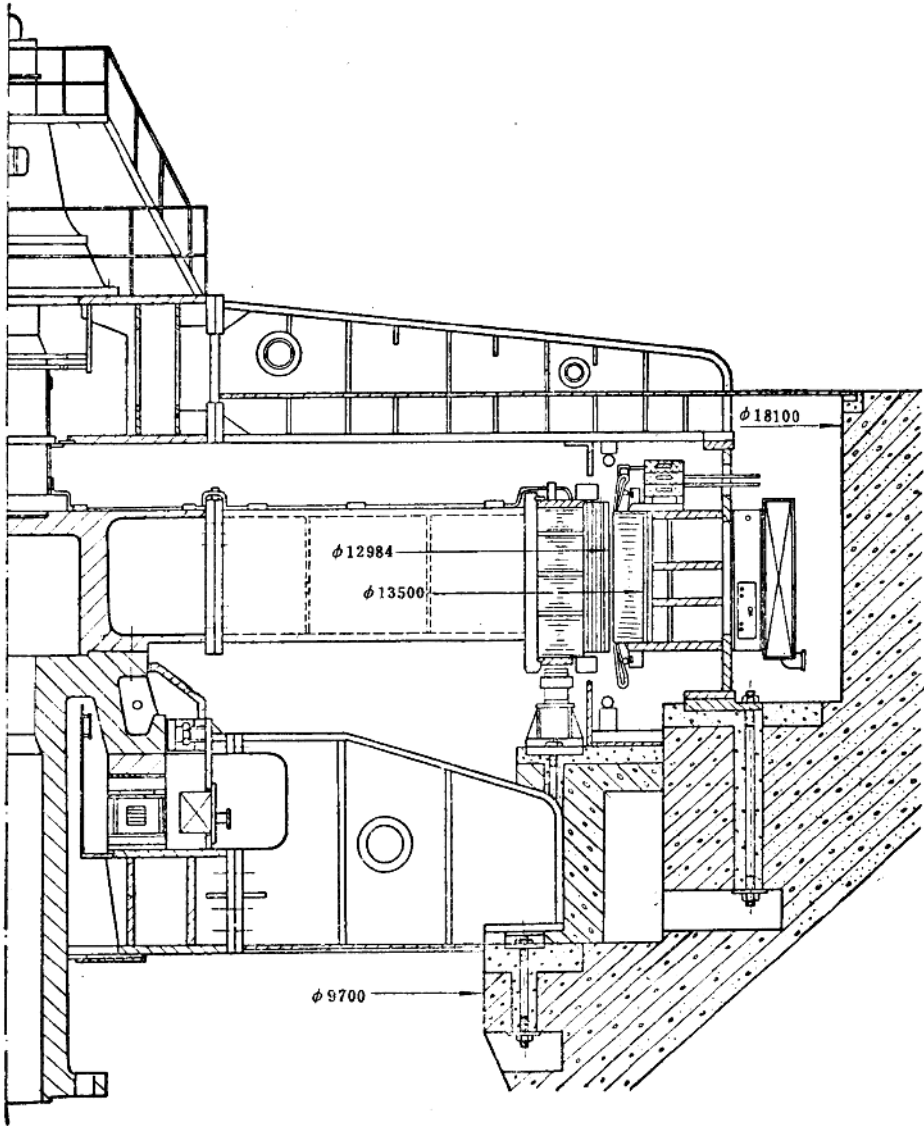


图 1-5 伞式发电机 (单位: mm)

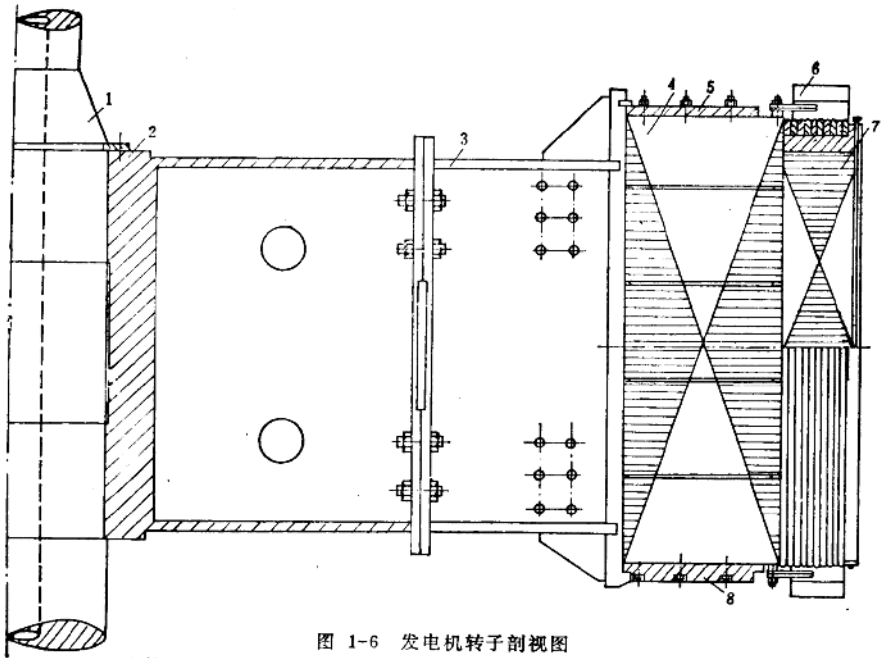


图 1-6 发电机转子剖视图

1—主轴；2—轮辐；3—支臂；4—磁轭；5—端压板；6—风扇；7—磁极；8—制动板

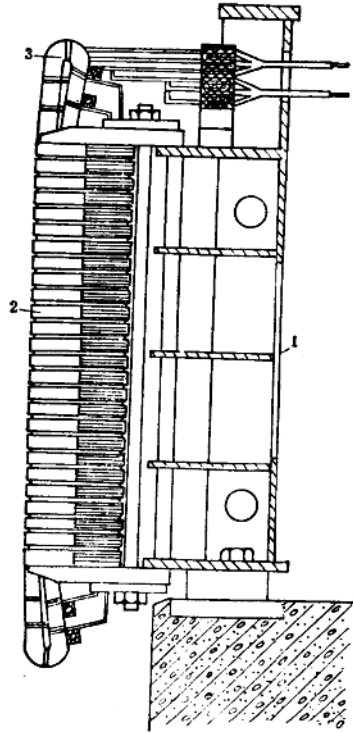


图 1-7 发电机定子剖视图

1—机座；2—铁芯；3—线圈

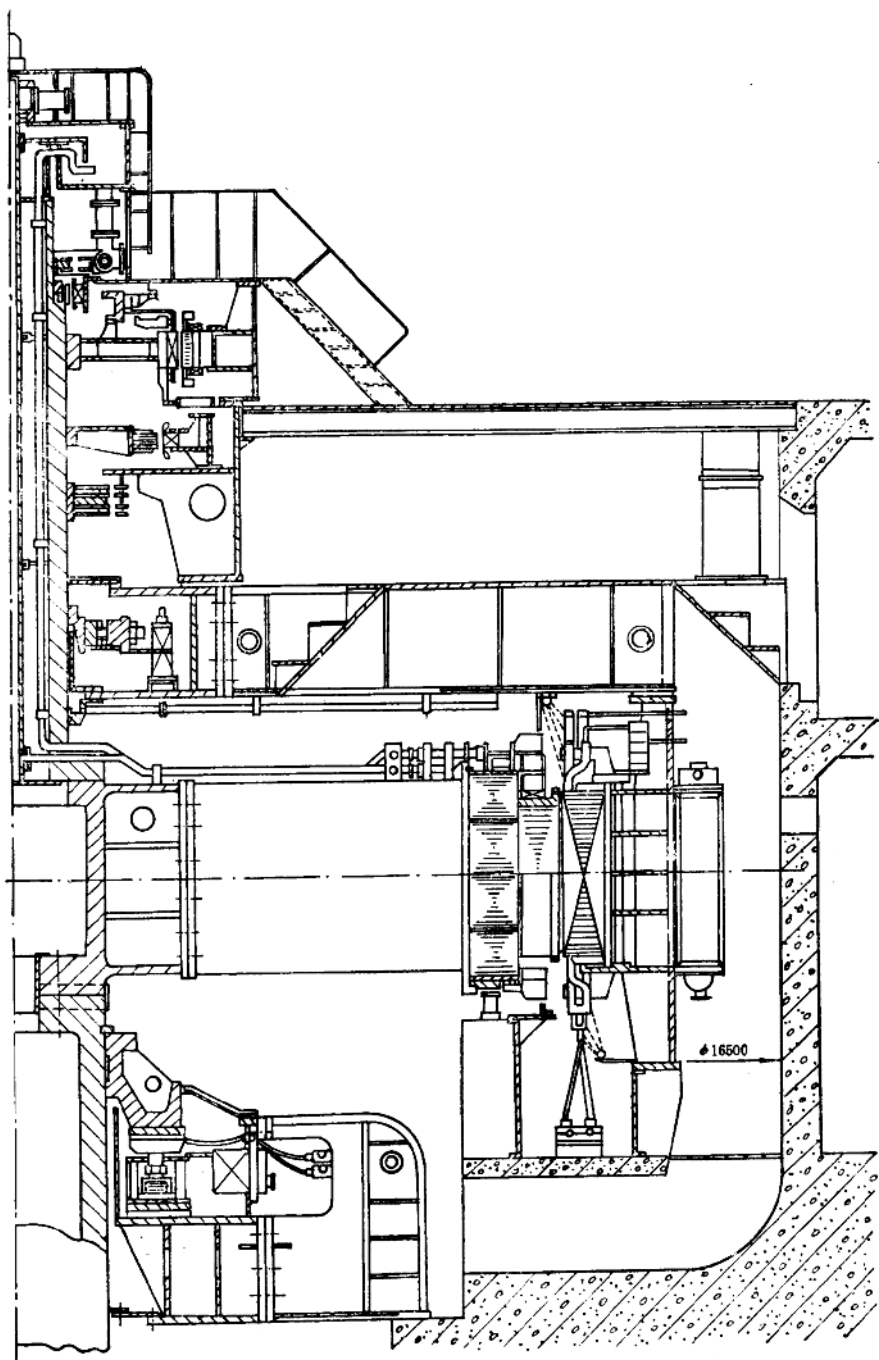


图 1-8 双水内冷水轮发电机 (单位: mm)

对转动惯量较大的水轮发电机，若采用机械制动，易使机组的制动环和制动器的制动块磨损加剧、制动环变形等，故常采用电制动<sup>[4]</sup>。电制动的最大优点是其电磁功率与机组转速无关，因而既可快速制动又可可不损伤设备。

电制动的原理是：当机组与电网解列转速降至额定转速的50%时，给发电机励磁，使它产生电制动力矩，该力矩与机组的风、水阻力矩、机械损耗阻力矩构成机组的合阻力矩，使机组很快制动。

除了采用空气冷却器的空冷水轮发电机外，还有双水内冷水轮发电机，见图1-8。

双水内冷水轮发电机的总体结构与空冷水轮发电机基本相同，所异之处在于双水内冷发电机的定子绕组、转子绕组都采用空心导线，绕组的发热量由流经空心导线内的冷却水散发，所以它的极限容量要比同样尺寸的空冷式水轮发电机大得多。

双水内冷发电机组有一套特殊的冷却水供水系统，它通入发电机定子、转子空心导线内的冷却水，常称它为一次水供水系统。它是闭式循环系统，由循环水泵、冷却器、机械过滤器、离子交换器、水箱、温度计、流量计、压力计、导电率计等组成。该系统上还设有各种保护装置，以便在发生事故时仍能照常供水。

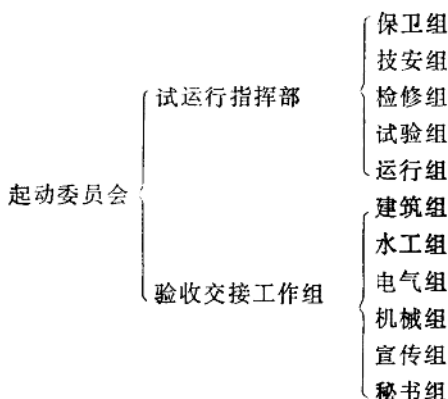


## 第二章 水轮发电机组的试运行

水轮发电机组安装或检修完成后投入正式运行前，应进行一次综合性的起动试运行。

试运行期限一般从机组模拟试验、引水道充水开始，经过机组运行中的各项试验，直至检验机组带负荷运行72h为止。

为使试运行顺利进行，须建立专门的起动委员会负责该项工作，较完善的组织形式如下：



起动委员会的职责是负责研究、解决施工和起动试运行中的重大问题，检查起动试运行的起动条件及起动日期，审查和批准起动试验程序和运行规程，对电站的设计、制造、安装质量进行鉴定并办理交接手续。

验收交接工作组的职责是协助起动委员会掌握起动试运行的工作，负责全部工程的质量检查，对竣工设备作全面的质量鉴定，审查施工单位的安装记录、测定记录和试验记录，审查竣工图纸资料等。

试运行指挥部直接负责机组起动、停机、试验与检修等工作。其中运行组负责机组起动试运行的操作及机电设备的安全运行和维护。试验组负责起动运行中机电设备的试验及调整工作，协助运行人员掌握设备性能。

以下各节具体叙述起动试运行工作。

### 第一节 工程验收

在设备起动试验前，参照设计、施工、安装等有关规范、规程及施工技术文件进行检查，验明各项工程的安装质量。

施工安装单位在工程安装结束时，应提交有关的技术资料，如：设计图纸、制造厂的