

大型火电机组运行维护培训教材

DAXING HUODIAN JIZU YUNXING WEIHU PEIXUN JIAOCAI



汽轮机分册

高澍茺 等编著



中国电力出版社

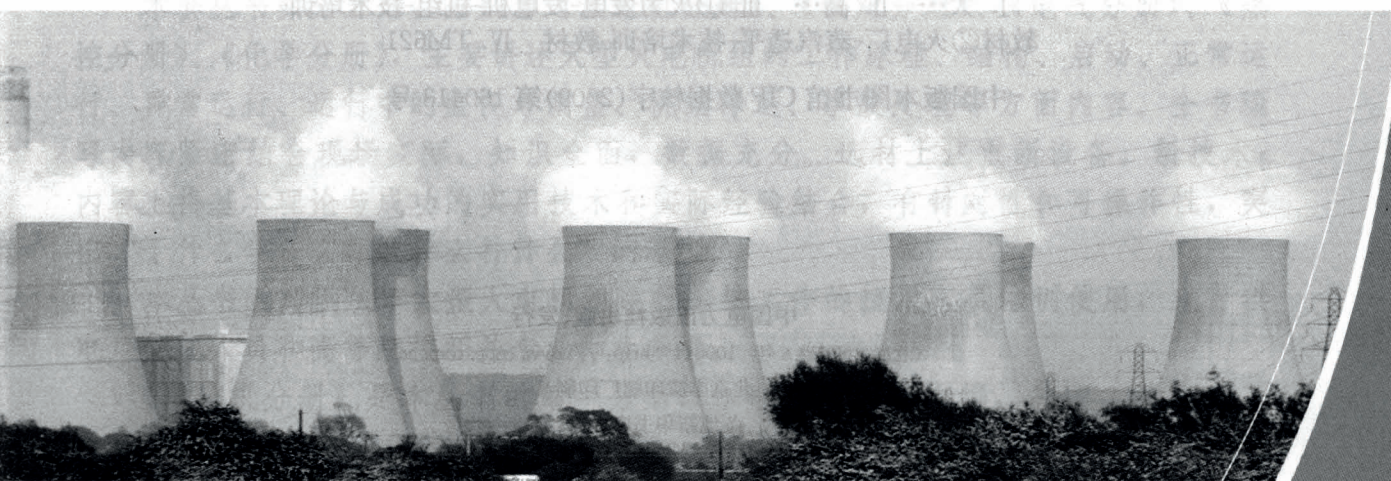
www.cepp.com.cn

大型火电机组运行维护培训教材

DAXING HUODIAN JIZU YUNXING WEIHU PEIXUN JIAOCAI

汽轮机分册

高澍茈 王晓明 文二小 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书为《大型火电机组运行维护培训教材》之一，本丛书按专业进行分册，从汽轮机、锅炉、电气、热控、化学等方面较系统、完整地介绍了大型火电机组的工作原理、结构、启动、正常运行、异常运行、运行中的监视与调整、机组停运、事故处理等方面内容，紧密结合现场实际。

本丛书的作者和审稿人均是长年工作在生产一线的技术人员，有较扎实的理论基础以及丰富的实践经验和培训经验。

本分册主要包括汽轮机概述、汽轮机的热力系统、汽轮机的 DEH 及调节保安系统、汽轮机的启停方式与维护及安全知识等内容。

本丛书既可供从事大型火电机组运行维护工作的技术人员培训使用，也可供电厂管理人员和高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

大型火电机组运行维护培训教材. 汽轮机分册/高澍芑等编著. —北京: 中国电力出版社, 2009

ISBN 978-7-5083-9409-1

I. 大… II. 高… III. ①火力发电-发电机-机组-技术培训-教材②火电厂-蒸汽透平-技术培训-教材 IV. TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 160413 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)

印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 月第一版 2009 年 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15.25 印张 369 千字

印数 0001—00000 册 定价 0.00 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

前言



在电力工业快速持续发展的今天，积极发展清洁、高效的发电技术是国内外共同关注的课题，对于能源紧缺的我国更显得必要和迫切。在国家有关部、委的积极支持和推动下，我国大型火电机组的国产化及高效大型火电机组的应用逐步提高。我国现代化、高参数、大容量火电机组正在不断投运和筹建，其发电技术对我国社会经济发展具有非常重要的意义。因此，提高发电效率、节约能源、减少污染，是新建火电机组、改造在运发电机组的头等大事。

为帮助大型火电机组专业技术人员更快、更好地掌握新技术、新设备、新工艺，适应本职工作，了解、掌握高参数、大容量机组的结构、系统及运行知识，增强专业实践操作技能，提高处理异常、故障的应急能力，特组织专家编写本套丛书。希望广大技术人员通过本套丛书的学习，能够提高运行管理能力，做好设备的运行维护工作，从而更加有效地将这些新知识运用到实际的工作中。

本套丛书共分五册，分别为《汽轮机分册》、《锅炉分册》、《电气分册》、《热控分册》、《化学分册》，主要讲述大型火电机组的工作原理、结构、启动、正常运行、异常运行、运行中的监视与调整、机组停运、事故处理等方面内容。全书编写内容紧密结合现场实际，知识全面，数据充分。选材上注重新设备、新技术；内容上将基本理论与成功的实用技术和实际经验结合，有较强的针对性和可操作性，突出“干什么学什么，缺什么补什么”。

本丛书既可供从事大型火电机组运行维护工作的技术人员培训使用，也可供电厂管理人员和高等院校相关专业师生参考。

本书编写过程中，得到了鲁能山西河曲发电厂、山西武乡和信电厂、国电河北怀安热电厂、山西太原第一热电厂、山西榆次热电厂、山西省电力科学试验研究院等电厂、科研院所及相关技术人员的支持和帮助，在此表示感谢。

限于编者的水平和所收集的资料，书中的缺点和疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

2008年6月

目 录



前言

第一章 汽轮机概述	1
第一节 汽轮机设备总体概述	1
第二节 300MW 汽轮机组的主要技术规范	19
第三节 600MW 汽轮机组的主要技术规范	22
第四节 集控运行人员的岗位职责和运行特点	24
第五节 常用的专业术语及名词解释	40
第二章 汽轮机的热力系统	60
第一节 主蒸汽及再热蒸汽系统	60
第二节 高、低压旁路系统	64
第三节 汽封系统	65
第四节 润滑油系统	67
第五节 EH 油系统	73
第六节 给水回热系统	74
第七节 辅助蒸汽系统	88
第八节 凝结水系统	90
第九节 真空抽汽系统	95
第十节 空冷系统	96
第十一节 开式循环冷却水系统	98
第十二节 汽轮机快冷系统	102
第十三节 发电机氢气冷却及密封油系统	105
第十四节 发电机定子冷却水系统	114
第十五节 热网系统	115
第三章 汽轮机的 DEH 及调节保安系统	120
第一节 汽轮机 DEH 调速系统	120
第二节 汽轮机的保安系统	144
第三节 汽轮机组运行中的试验	152
第四章 汽轮机的启停方式与维护	158
第一节 汽轮机的启动	158
第二节 汽轮机的停运	170
第三节 汽轮机停运后的保护	177

第四节 汽轮机的运行特性分析	180
第五章 安全知识	198
第一节 公共安全知识	198
第二节 汽轮机的几种典型事故	227

汽轮机概述

第一节 汽轮机设备总体概述

一、汽轮机概述

1. 汽轮机工作原理

汽轮机是以水蒸气为工质，将蒸汽的热能转变为机械能的一种高速旋转式原动机。与其他类型的原动机相比，它具有单机功率大、效率高、运转平稳、单位功率制造成本低和使用寿命长等一系列优点，是现代火电厂和核电站中所普遍采用的发动机。在现代火电厂和核电站中，汽轮机是用来驱动发电机组生产电能的，故汽轮机和发电机合称为汽轮发电机组，全世界发电总量的80%左右是由汽轮发电机组发出的。除用于驱动发电机外，汽轮机还常用来驱动泵、风机、压缩机和船舶螺旋桨等，所以汽轮机是现代化国家中重要的动力机械设备。

汽轮机的基本工作原理及过程是：使来自锅炉的过热蒸汽依次流过各级，将其热能转换成机械能。级是汽轮机中最基本的工作单元，在结构上，它由一系列喷嘴叶栅（静叶栅）和紧邻其后与之相配合的动叶栅组成；在功能上，它完成将蒸汽的热能转变为机械能的能量转换过程。

通常，大功率的汽轮机组均设有汽轮机旁路系统，其主要功能是：

- (1) 在冷态、温态、热态和极热态下能启动机组，在整个启动过程中，能使汽轮机进口蒸汽压力、温度、流量稳步提高，满足汽轮机的要求，从而缩短机组的启动时间。
- (2) 在启动时，使蒸汽通过再热器以保护再热器不被干烧。
- (3) 满足空冷凝汽器冬季启动及低负荷时的防冻要求。

2. 汽轮机的分类

汽轮机的用途广泛，类型繁多，可以从不同的角度对汽轮机进行分类，一般常用的分类方式有以下几种：

(1) 按工作原理分类。根据工作原理的不同，可将汽轮机分为冲动式汽轮机和反动式汽轮机：

1) 冲动式汽轮机。主要由冲动级组成，蒸汽主要在喷嘴叶栅中膨胀，在动叶栅中只有少许膨胀；其结构为隔板型，动叶片嵌装在叶轮的轮缘上，喷嘴装在隔板上，隔板的外缘嵌入隔板套或汽缸内壁的相应槽道内。

2) 反动式汽轮机。主要由反动级组成，蒸汽在喷嘴叶栅和动叶栅中的膨胀程度相同；其结构为转鼓型，动叶片直接嵌装在转子的外缘上，隔板为单体静叶环结构，它装在汽缸内壁或静叶保持环的相应槽道内。采用喷嘴调节的反动式汽轮机，因其第一级为部分进汽，为避免产生过大的漏汽损失，故第一级常采用单列或双列速度级而不做成反动级。

(2) 按热力特性分类。

1) 凝汽式汽轮机。进入汽轮机的蒸汽在汽轮机中做功后,排入高度真空状态的凝汽器,凝结成水。

2) 背压式汽轮机。汽轮机的排汽压力高于大气压,排汽直接用于供热或工业用汽,无凝汽器。如排汽作为其他中低压汽轮机的工作蒸汽时,则称其为前置式汽轮机。

3) 调整抽汽式汽轮机。在汽轮机某级后抽出部分一定压力的蒸汽向外供热,其余蒸汽在汽轮机内做完功后仍排入凝汽器。由于热用户对供热蒸汽的温度和压力有一定的要求,因而需要对这部分抽汽的压力进行自动调节;根据供热需要,又将供热蒸汽分为一次调整抽汽和两次调整抽汽。

4) 抽汽背压式汽轮机。具有调整抽汽的背压式汽轮机。

5) 中间再热式汽轮机。蒸汽在汽轮机内部分释能、做功(膨胀)后,被全部抽出送往锅炉的再热器加热,再热后的蒸汽重新返回汽轮机继续膨胀做功。

(3) 按主蒸汽参数分类。

1) 低压汽轮机。主蒸汽压力小于 1.5MPa。

2) 中压汽轮机。主蒸汽压力为 2~4MPa。

3) 高压汽轮机。主蒸汽压力为 6~10MPa。

4) 超高压汽轮机。主蒸汽压力为 12~14MPa。

5) 亚临界压力汽轮机。主蒸汽压力为 16~18MPa。

6) 超临界压力汽轮机。主蒸汽压力大于 22.2MPa。

(4) 按典型的整体结构分类(以 600MW 汽轮机为例)。有亚临界压力反动式四缸四排汽机组、亚临界压力冲动式三缸四排汽机组、亚临界压力冲动式四缸四排汽机组、超临界压力反动式四缸四排汽机组等多种形式。

此外,还有按蒸汽在汽轮机内的流动方向的不同分为轴流式和辐流式汽轮机,按用途分为电站汽轮机、工业汽轮机、船用汽轮机,按功率大小分为大功率汽轮机和中小功率汽轮机等多种分类方法。

(一) 汽轮机本体的主要组成部件及其作用

1. 汽轮机的转子与叶片

(1) 汽轮机的转子。汽轮机转子主要由主轴、叶轮、动叶片和联轴器等部件构成,动叶片和隔板上的导叶栅构成了汽轮机的通流部分,其作用是将蒸汽的热能转变为机械能,再通过叶轮和主轴带动发电机做功、产生电能。

转子工作时做高速的旋转运动,它不仅要完成能量转换、扭矩传递的作用,且一直要承受着动叶片、叶轮和主轴上各个零件转动时所产生的巨大离心力,因此转子必须用高强度的金属材料制作,对于在高温区工作的转子还要具备很好的耐热强度。

为了提高通流部分的效率,汽轮机的转子和静止部分必须保持较小的相对间隙,这就要求汽轮机的动、静部分必须制造精密、装配正确,转子上的任何缺陷都会影响到汽轮机的安全运行,严重时还可能酿成重大的设备和人身事故。所以说,转子是汽轮机极为重要的部件之一,其从毛坯制造开始,经过机械加工、钳工装配到质量检验的整个生产过程都有着极其严格的技术标准和要求。

现代大型汽轮机采用的转子型式有套装转子、整锻转子、套装一整锻组合转子和焊接转

子四种类型。套装转子由叶轮和轴两部分组成，叶轮热套在轴上，采用过盈配合；此外，在轴上还套有推力盘、汽封套、联轴器等。这种结构的优点是加工方便，材料利用合理，叶轮与主轴锻件因尺寸小而质量容易保证等；缺点是不适用于高压转子的前几级，另外因套装叶轮在高温下可能产生叶轮与轴间的热套紧力消失而造成松动的问题，不如整锻转子安全。

整锻转子没有叶轮与主轴之间的松动问题，且结构紧凑，轴向尺寸小，强度和刚度比套装转子高，适用于在高温高压条件下工作；其主要缺点是因锻件尺寸大，需要大型的锻压设备，锻压技术要求高，锻件质量不易得到保证，成品率低，材料消耗大等。

焊接转子是由整个实心轮盘拼焊而成，其优点是轮盘无中心孔、转子应力小，且相对质量小、刚度大、材料能充分利用、能适应低压部分需较大的通流面积而需设计考虑的大直径要求；其缺点是要求加工材料要有良好的焊接性能，对加工过程中的焊接工艺要求较高且工序复杂，加工制造的周期也较长。

(2) 汽轮机的叶片。叶片是汽轮机重要的零件之一，由多个叶片组成的叶栅起着将蒸汽的热能转换为动能，再将动能转换为汽轮机转子旋转机械能的作用。叶片是汽轮机中数量和种类最多的零件，其工作条件很复杂，除因高速转动和汽流作用而承受较高的静应力和动应力外，还因其分别处在高温过热蒸汽区、两相过渡区和湿蒸汽区内工作而承受高温、腐蚀和冲蚀作用。因此叶片结构的型线、材料、加工、装配质量等直接影响着汽轮机中能量转换的效率和汽轮机工作的安全性。所以在设计、制造叶片时，考虑到叶片既要有足够的强度，又要有良好的型线，以使汽轮机安全经济地运行。

叶片按用途可以分为静叶片和动叶片。所谓静叶片就是在汽轮机工作过程中静止不动的叶片，也称作喷嘴叶片。静叶片安装在隔板或汽缸上，其作用是把蒸汽的热能转换为蒸汽的动能。所谓动叶片就是在汽轮机工作过程中随汽轮机转子一起转动的叶片，也称作工作叶片，动叶片安装在叶轮（冲动式）或转鼓（反动式）上，其作用是把蒸汽的动能转换为机械能，使转子旋转。动叶片按其型线部分的特点（叶片型线沿叶高的变化规律），可以分为等截面直叶片、变截面直叶片、扭转叶片、三元流扭转叶片及可控涡流型叶片等。前两者流通效率低，后两者流通效率比较高，扭转叶片介于两者之间。等截面直叶片的型线沿叶高是不变的，这种叶片结构简单、加工方便、制造成本低，但流动效率相对较低。等截面直叶片一般用于汽轮机的高压短叶片级。变截面扭叶片的结构较复杂、加工困难、制造成本高，但流动效率高，所以随着加工技术的不断提高，现在扭叶片得到了广泛的应用。如国产 600MW 反动式汽轮机的全部静叶片和动叶片均采用了扭叶片。

动叶按其工作区域（工作环境）分，大体可分为三种类型：调节级动叶片（高压缸第一级）、中间级动叶片（调节级、次末级和末级以外的各级）、次末级和末级动叶片（低压缸的最后两级）。如我国东北某汽轮机厂制造的调节级动叶片，采用电脉冲加工，三只为一组，并自带整体围带，形成所谓三联叶片，叶片组沿径向插入转子叶轮槽，然后叶轮和叶片一起钻铰销钉孔。每三组有三个销钉，销钉与销孔有轻度的过盈配合（热胀冷缩原理）。三联叶片组装配合，各组围带之间留有间隙，便于膨胀。而高中低压缸其他级的动叶片全部采用可控涡流型动叶片。

2. 汽轮机的汽缸和轴承

(1) 汽轮机的汽缸。汽轮机的外壳叫汽缸，它的作用是将汽轮机的通流部分与大气隔绝，形成封闭的汽室，使蒸汽能在其中流动做功。汽缸大体呈圆筒形或近似圆锥形，它一般

做成水平对分式，分为上、下汽缸。大容量机组一般为多缸，即高压缸、中压缸和低压缸，并采用高中压缸反向布置的方式，从而达到降低轴向推力、节省和合理使用金属材料、提高机组启停灵活性的目的。

(2) 支持轴承与推力轴承。支持轴承与推力轴承是汽轮机的重要部件之一。前者支持转子的全部重量，后者承担转子转动时的轴向推力，因此它们工作的好坏直接影响到汽轮机组的安全运行。

(3) 滑销系统。汽轮机在启、停和变工况运行时，由于温度的变化。汽缸的轴向、水平和垂直方向均会产生热膨胀或收缩。为了保证汽缸能热胀冷缩，汽缸与台板、轴承座与台板之间均有一个研刮光滑的滑动面。为确保汽缸及轴承座在热胀冷缩过程中不改变汽轮机的中心位置，在汽缸与台板、轴承座与台板、汽缸与汽缸、汽缸与前轴承箱处均设有各种形式的销子，构成汽轮机的滑销系统。

滑销系统的作用是保证汽缸受热时可以自由膨胀并保持汽缸与转子中心的一致。

3. 隔板、静叶、汽封和盘车装置

(1) 隔板。隔板主要用于冲动式汽轮机，有些反动式汽轮机也将静叶栅做成隔板式结构。隔板用来把汽缸分为若干个汽室，使蒸汽的压力、温度逐渐降低，蒸汽的热能在静叶组成的汽道（喷嘴）中（对于冲动式汽轮机是大部分，对于反动式汽轮机是一部分）被转换成动能，以很高的速度进入动叶片的流道，推动转子转动。工作时，隔板除承受前、后蒸汽压差所产生的均布载荷之外，还承受着从静叶汽道中喷出的高速汽流的反作用力矩。

隔板主要由外环、外围带、静叶栅、内围带、隔板体等组成。对于高、中压缸中的隔板，在外环处还设有与动叶顶部相对应的汽封体。上隔板装于上汽缸，下隔板装于下汽缸。上、下隔板之间由定位键定位（兼密封）。

(2) 静叶。静叶（在调节级称喷嘴）是构成汽轮机级（静叶栅和动叶栅构成了汽轮机通流部分的“级”）的重要组成部分，蒸汽在其中完成膨胀、加速，将蒸汽的热转变成动能。从静叶（喷嘴）出来的高速汽流进入动叶，推动动叶从而使汽轮机转子驱动发电机发电。

为了减小静叶出流对动叶的激振，哈尔滨汽轮机厂 600MW NZK600-16.7/538/538 型机组采用了“弯曲汽道”静叶。

(3) 汽封。汽轮机的汽封可分为轴端汽封和通流部分汽封。

轴端汽封系统的功能有两方面。在汽轮机压力段，它防止蒸汽向汽轮机外泄漏，确保进入汽轮机的全部蒸汽量都沿着汽轮机的叶栅通道前进、做功，是保证汽轮机效率的重要手段之一。在真空区段，它防止汽轮机外侧的空气向汽轮机内泄漏，保证汽轮机真空系统有良好的真空，从而保证汽轮机组有尽可能低的背压参数，即保证汽轮机效率。

汽轮机通流部分的汽封设置的目的是尽量减小蒸汽从高压区段通过非做功通道泄漏到低压段，以保证尽可能多的蒸汽在做功通道做功，这样才能保证汽轮机通流部分有较高的效率。

汽轮机各部位的动、静之间的间隙比较小。因此，汽封的主要功能是保证有效的密封、对中和避免动、静部分之间的碰磨。

(4) 盘车装置。汽轮机盘车装置的主要功能，是在机组启动前或停机后用来盘动汽轮发电机组的轴系。

汽轮机在启动冲转前就要投入盘车装置，使轴系转动起来。检查汽轮机动、静部分是否

存在磨碰现象；检查转子轴系的平直度是否合格；并在暖机过程中使汽轮机转子温度场均匀，避免转子因受热不均而造成弯曲。

机组停机后，由于汽缸及通流部分上、下之间存在温差，转子在这种不均匀温度场中，将因受热不均匀而产生弯曲。为了避免这种现象的产生，在汽轮机停机时，必须自动投入盘车装置，让转子继续转动，使转子周围的温度场均匀，直到汽缸的金属温度降到 150°C 以下为止。

盘车装置的驱动方式至少要备有自动和手动两种手段。不同的机组，自动盘车方式也有不同，有电动盘车、液动盘车、气动盘车等方式。盘车转速随机组也各不相同，有高速盘车，也有低速盘车，最低盘车速度约为 2r/min ，最高盘车速度约为 49r/min 。一般常见的汽轮机的盘车速度约在 $3.35\sim 6.25\text{r/min}$ 的范围之内。

（二）汽缸的结构

1. 高中压缸

大功率汽轮机高压缸的工作特点是缸内承受的压力和温度都很高，一般都采用双层缸结构，如图 1-1 所示即为某型汽轮机所采用的双层缸的结构。其内缸有 6 个压力级，内外缸之间的夹层与第七级后的蒸汽相通。在内外缸夹层空间对应第 4 级的位置上设置隔热环，将夹层空间分为 2 个区域，以降低内缸的温差。高压缸采用这种结构，汽流走向和流量适当，使得高压内、外缸各区域保持合理的温度和压力分布，减小了热应力和压差引起的应力。大容量中间再热机组中压缸的运行参数，压力不是很高，但温度一般与初参数相同。从回热系统的设计考虑，中压缸一般为单层缸隔板套结构，隔板套之间即为回热抽汽口。

在高中压缸的布置上，采用合缸和分缸两种方式。

如国产的 600MW NZK600-16.7/538/538 型机组的高中压缸为合并双层结构，其内外缸均为合金钢铸造而成，高、中压缸反向布置。这种结构和布置的优点是：

（1）高中压部分的进汽均在汽缸中部，即高温集中在汽缸中部，并且又采用双层结构，使热应力较小。

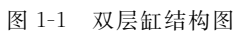
（2）高中压缸的两端分别是高压缸排汽和中压缸排汽，压力温度均较低，因此两端汽封漏汽较少，轴承受汽封温度的影响也较小。

（3）高中压通流部分反向布置，轴向推力可互相抵消一部分，再辅之增加平衡活塞，轴向推力也较易平衡，推力轴承的负荷较小，推力轴承的尺寸便小，有利于轴承座的布置。

（4）采用高中压合缸，可缩短主轴的长度，减少轴承数。

（5）采用双层结构，可以把巨大的蒸汽压力分摊给内外两层缸，减少了每层缸的压差和温差，缸壁和法兰可以相应减薄，在机组启停及变工况时，其热应力也相应减小，因此，有利于缩短启停时间和提高负荷的适应性。内缸主要承受高温及部分蒸汽压力的作用，其尺寸较小，故内缸壁可以较薄，从而减少了贵重耐热合金材料的消耗量。正常运行时，内外缸之间有蒸汽流动以使外缸得以冷却，故外缸的运行温度较低，可以采用一般的合金钢材料制造。在启动过程中，内外缸夹层中的蒸汽可使内外缸尽可能迅速同步加热，也有利于缩短启动时间。同时，外缸的内外压差比单层缸时降低了许多，因此减少了汽缸结合面漏汽的可能性，汽缸结合面的严密性能够得到保障。机组的蒸汽初参数越高，容量越大，采用双层缸的优点就越明显。

2. 低压缸



(2) 低压外缸。低压外缸采用焊接结构, 其外形尺寸较大, 为便于运输, 在轴向分为三段, 用垂直法兰螺栓连接; 上半顶部进汽部分由带螺纹的波形管作为低压进汽管与内缸进汽口连接, 以补偿内外缸胀差和保证密封。顶部两端共装有 4 个内径为 500mm 的大气阀, 作为真空系统的安全保护措施, 当缸内压力升高到 0.118~0.137MPa 时, 大气阀中 1mm 厚的石棉橡胶板破裂, 使蒸汽排空, 以保护低压叶片的安全。

（三）转子的结构形式

汽轮机转子结构分为轮式和转鼓式两种类型。轮式转子具有装动叶片的叶轮，常用于冲动式汽轮机；而转鼓式转子则没有装动叶片的叶轮，动叶片直接装在转鼓上面，这种类型的结构多用于反动式汽轮机。

轮式转子的结构按主轴与叶轮的组成方式可以分为整锻式、套装式、整锻一套装组合式及焊接式转子四种类型。

根据我们收集的资料可以看到，目前除了俄罗斯和日本三菱公司还采用有套装转子形式外，其他绝大多数的国内外汽轮机制造厂在加工制作 600MW 等级机组的汽轮机转子时，均采用的是整锻转子或焊接转子形式，且现在制造的整锻转子大多数没有中心孔。

1. 套装转子

套装转子的主轴一般都加工成阶梯形，叶轮最常用热套或其他方式套装在主轴上。多采用一个径向键，并通过转子两端的轴封套和中间叶轮与轴用轴向键连接。套装转子多适用于中、低参数的冲动式汽轮机，这种结构便于加工制造并可节省金属，某些高参数大容量机组的中、低压转子也有部分采用套装转子工艺。

2. 整锻转子

这种转子的叶轮、主轴及其他主要部件是在一整体锻件上加工成的。整锻转子常用作大型汽轮机的高、中压转子，这是因为：

- （1）高温蒸汽可能引起套装转子叶轮和轴之间的松动；
- （2）整锻转子结构紧凑，装配零件少，可缩短汽轮机的长度；
- （3）在高压级中，转子直径和圆周速度相对较小，有可能采用等厚度叶轮的整锻结构；
- （4）转子刚性较好；
- （5）启动适应性好。

在高温区工作的转子一般都采用这种结构，如 NZK600-16.7/538/538 型汽轮机的高压转子就是整锻转子。现代大型汽轮机，由于末级叶片长度增加，套装叶轮的强度已不能满足要求，所以许多机组的低压转子也采用了整锻结构。目前我国引进型 600MW 机组的高、中、低压转子均为整锻转子。

3. 整锻一套装转子

整锻一套装组合转子也是汽轮机常采用的转子结构形式，它利于整锻转子与套装转子的各自特点，在高温区采用叶轮与主轴整体锻造结构，而在低温区采用套装结构。这样，既可保证高温区各级叶轮工作的可靠性，又可避免采用过大的锻件；而且套装的叶轮和主轴可以采用不同的材料，有利于材料的合理利用。

4. 焊接转子

焊接转子主要由若干个叶轮和两个端轴拼焊而成，焊接转子的优点是采用无中心孔的叶轮，可以承受很大的离心力，强度好，相对质量小，结构紧凑，刚度大。焊接转子不需要采用大型锻件，叶轮与端轴的质量容易得到保证，其工作的可靠性取决于焊接质量，故要求焊接工艺高、材料的焊接性能好。

汽轮机的低压转子直径大，特别是大功率汽轮机的低压转子质量较大，叶轮承受很大的离心力。采用套装结构，叶轮内孔在运行中将发生较大的弹性变形，因而需要设计较大的装配过盈量，但同时会引起很大的装配应力。若采用整锻转子，则因锻件尺寸太大，质量难以

保证，故一般采用焊接转子。

(四) 动叶片的结构

叶片一般由叶根、叶身、叶顶和叶顶连接件组成。其作用分别为：

1. 叶根

叶根是叶片与轮缘相连接的部分，其作用是紧固动叶，使叶片在经受汽流的推力和旋转离心力作用下，不至于从轮缘沟槽里拔出来。因此它的结构应保证在任何运行条件下叶片都能牢靠地固定在叶轮或转鼓上，同时应力求制造简单、装配方便。常用的叶根结构形式如图 1-2 所示。

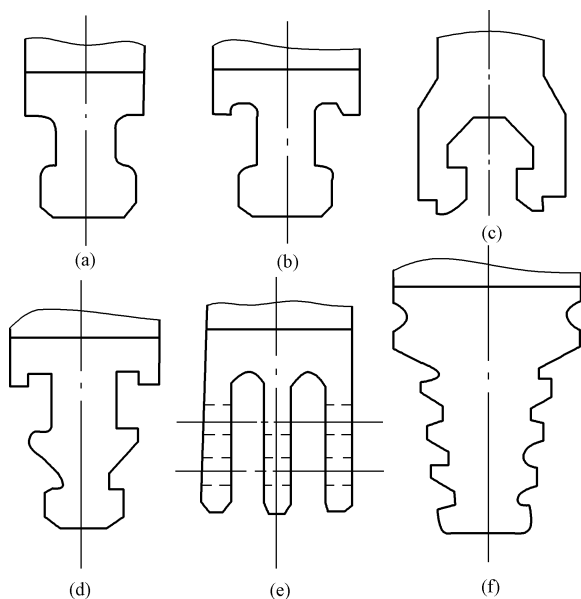


图 1-2 常用叶根结构形式图

(a) T 形叶根；(b) 外包凸肩 T 形叶根；(c) 菌形叶根；
(d) 外包凸肩双 T 形叶根；(e) 叉形叶根；(f) 枫树形叶根

(1) T 形叶根。T 形叶根结构如图 1-2 (a) 所示，这种叶根结构简单，加工装配方便，工作可靠，为短叶片所普遍采用。它的缺点是叶片的离心力对轮缘两侧截面产生变矩，而叶根承载面积小，使叶轮轮缘弯曲应力较大，轮缘有张开的趋势。为了克服这个缺点，在叶根和轮缘上做成两个凸肩，成为如图 1-2 (b) 所示的凸肩 T 形叶根（也称外包 T 形叶根）。叶根的凸肩能阻止轮缘张开，减小轮缘两侧截面上的应力。叶轮间距小的整锻转子常采用这种形式的叶根。在叶片离心力较大的场合下，可以采用带凸肩的双 T 形叶根，此种叶根的加工精度要求较高，特别是两层承力面之间的尺寸误差较大时，受力不均，叶根强度会大幅度下降。这种叶根结构，由于增大了叶根的承力面，可用于较长叶片。

(2) 菌形叶根。菌形叶根的结构如图 1-2 (c) 所示，这种叶根和轮缘的载荷分配比 T 形叶根合理，因而强度较高，但因加工复杂，故应用不如 T 形叶根广泛。T 形叶根和菌形叶根属于周向装配方式叶根，这类叶根的轮缘上开有一个或两个缺口，叶片从这些缺口一片片地依次装入轮缘槽中；最后装在缺口处的叶片为封口叶片，封口叶片的叶根与其他叶片不同，封口叶片研配装入后用两个铆钉固定在轮缘上。

(3) 叉形叶根。叉形叶根结构如图 1-2 (e) 所示，叶根的叉尾从径向插入轮缘的叉槽中，并用铆钉固定。这种叶根的轮缘不承受偏心弯矩，叉尾数目可根据叶片离心力大小选择。这种叶根强度高，适应性好，而且叶根和轮缘加工方便，检修时可以单独拆换个别叶片。为了保证叶根和轮缘的连接刚性，必须在叶片安插好后再打铆钉孔和铰配铆钉，因此最后装配工作量大，且轮缘较厚，钻铆钉孔不便，所以整锻转子和焊接转子一般不用。这种叶根结构多用于大功率汽轮机的调节级。

(4) 枫树形叶根。枫树形叶根结构如图 1-2 (f) 所示，这种叶根和轮缘的轴向断口设计成尖劈状，以适应根部的载荷分布，使叶根和对应的轮缘承载面都接近于等强度，因此在同

样的尺寸下，枞树形叶根承载能力高。叶根两侧齿数可根据叶片离心力的大小选择。但这种叶根外形复杂，装配面多，要求有很高的加工精度和良好的材料性能，而且齿端易出现较大的应力集中，所以一般多用于大功率汽轮机的调节级和叶片较长的级。

国产的 NZK600-16.7/538/538 型汽轮机的调节级动叶片采用三叉形叶根，其余级全部为枞树形叶根。

2. 叶身

叶身也称做叶型部分或工作部分，它是叶片的基本部分，叶型部分的横截面形状称为叶型，叶型决定了汽流通道的变化规律，为了提高能量转换效率，叶型部分应符合气体动力学要求。叶型的结构尺寸主要决定于静强度和动强度的要求和加工工艺的要求。按叶型沿叶高是否变化，叶片分为叶型沿叶高不变的等截面直叶片和叶型沿叶高变化的变截面扭叶片。

3. 叶顶、围带和拉筋

汽轮机同一级的叶片常用围带或拉筋成组连接，有的是将全部叶片连接在一起，有的是几个或十几个成组连接。采用围带或拉筋可增加叶片的刚性，降低叶片中汽流产生的弯应力，调整叶片频率以提高其振动安全性。围带还构成封闭的汽流通道，防止蒸汽从叶顶逸出，有的围带还做出径向汽封和轴向汽封，以减少级间漏汽。对于长叶片级，往往用拉筋将叶片成组连接，其连接方式有分组连接、整圈连接、组间连接、Z 型拉筋等，拉筋虽然可以改善叶片的振动特性，但由于其处在汽流通道中间，将影响级内汽流的流动，同时拉筋孔削弱了叶片的强度，所以在满足振动和强度的条件下，应尽可能不用或少用拉筋，因此有的长叶片设计成了自由叶片。

（五）汽封的结构及种类

汽轮机通流部分的汽封分径向汽封和轴向汽封，如图 1-3 所示。

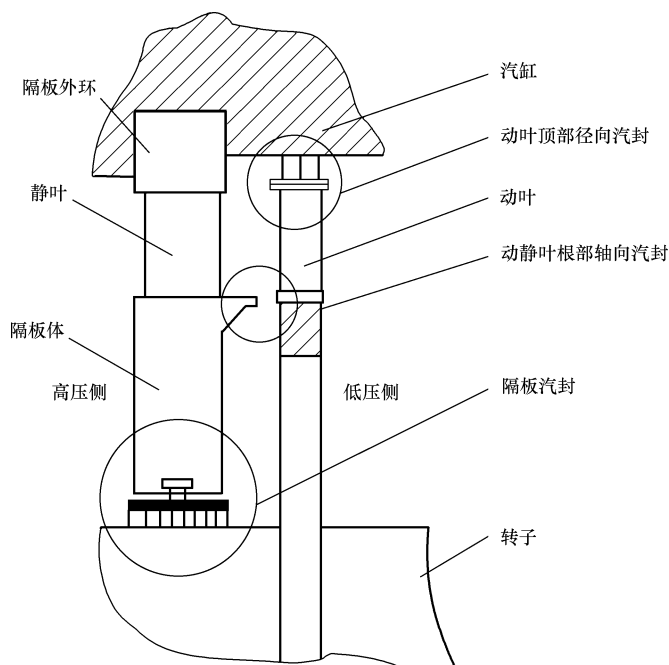


图 1-3 通流部分汽封示意

对于冲动式汽轮机，隔板汽封起主要作用；隔板汽封只用于有隔板的通流部分。对于反动式汽轮机，如静叶叶栅做成隔板式，那么隔板汽封和叶顶汽封同样重要。对于转鼓反动式汽轮机，静叶顶部和动叶顶部汽封同样重要。轴向汽封只起辅助作用。600MW 汽轮机组的轴向总长度较大，运行时汽缸、转子的相对膨胀较大，设置动静叶根轴向汽封已失去实际意义，有的制造厂将冲动式汽轮机的动、静叶叶根轴向汽封改为径向汽封，这样既保证了轴向膨胀不受影响，又起到了汽封的作用。

用于汽轮机的汽封系统大多数采用迷宫汽封（见图 1-4），因为它能经得起较高的蒸汽参数。在汽轮机的不同部位，采用的汽封结构形式各不相同，因而相应地有不同的名称。用于动叶顶部与隔板外环汽封体之间的汽封，称为动叶顶部汽封；用于隔板内环（隔板体）与转子之间的汽封，称为隔板汽封；用于汽缸前后端部与转子之间的汽封，称为端部汽封，或简称为轴封。

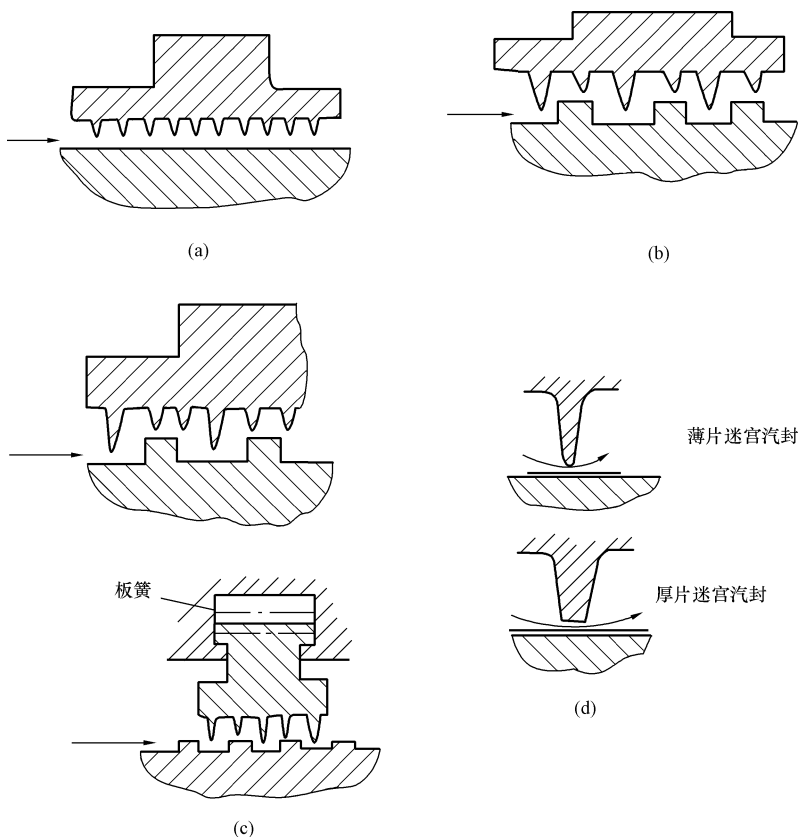


图 1-4 迷宫汽封结构示意图

(a) 平齿汽封；(b) 高低齿汽封；(c) 弹性式迷宫汽封；(d) 厚薄齿式迷宫汽封

（六）轴承的结构及种类

1. 支持轴承的结构

汽轮机轴承可分为轴承座和轴瓦两大部分。

小型汽轮机的轴承座一般是用铸铁铸成，而大型汽轮机的轴承座则基本是采用了钢板焊接结构，由水平结合面分为上盖和本体（或称为轴承箱）两部分，用法兰连接。本体内的空腔是轴瓦的油室。有些轴承座内尚装有调速部套、油泵、联轴器及盘车装置等。轴承座前后

在汽轮机轴穿过的地方设有油挡环，以防止润滑油顺轴外流。油挡环一般由铸铁或铸铝制成基体，再镶嵌上用耐磨材料（如黄铜、不锈钢等）制作的密封齿。密封齿与轴保持约 0.15~0.25mm 的间隙。

汽轮机的轴瓦一般由上下两半用螺栓连接而成，轴瓦的本体一般为铸铁或铸钢。在其内孔加工出燕尾槽，然后衬轴承合金，再加工成所需要的形状。目前汽轮机采用的轴瓦主要有：

(1) 圆筒形轴瓦。其内径等于轴颈 D 加顶部间隙，顶部间隙一般约为 $2D/1000$ ，两侧间隙为 $D/1000$ ，其接触角一般为 60° 左右。

(2) 椭圆形轴瓦。其顶隙约为 $D/1000$ ，侧隙约为 $2D/1000$ 。其与圆筒形轴瓦的不同之处为，在轴瓦上下部都形成油楔，而圆筒形轴瓦只在轴瓦下部形成油楔。

(3) 三油楔轴瓦。轴瓦两端的阻油边内孔为圆筒形，其半径稍比轴颈的半径大，内孔上开有三个油楔及三个进油口，三个油楔所占的弧长及位置，根据汽轮机转子的转动方向及轴承的负荷来确定的，其中较长的主油楔位于轴瓦的下部，其余两个较短的油楔位于上部两侧，为避免轴瓦中分面将油楔切断，轴瓦中分面需与水平面成一个倾角。

(4) 可倾瓦支持轴承。可倾瓦轴承又称活支多瓦轴承，是密切尔式的支持轴承，它通常由 3~5 块或更多能在支点上自由倾斜的弧形瓦块组成，其原理如图 1-5 所示。瓦块在工作时可以随着转速、载荷及轴承温度的不同而自由摆动，在轴颈四周形成多油楔。如果忽略瓦块的惯性，支点的摩擦阻力及油膜剪切内摩擦阻力等影响，每个瓦块作用到轴颈上的油膜作用力总是通过轴颈中心的，不易产生轴颈涡动的失稳分力，因此具有较高的稳定性，理论上可以完全避免油膜振荡的产生。另外，由于瓦块可以自由摆动，增加了支撑柔性，还具有吸收转轴振动能量的能力，即具有很好的减振性。可倾瓦还有承载能力大、耗功小以及能承受各个方向的径向载荷、适应正反转等优点，特别适合在高速轻载及要求振动很小的场合下应用。只是由于结构复杂、加工制造以及安装、检修较为困难，成本较高等原因，限制了它的应用。

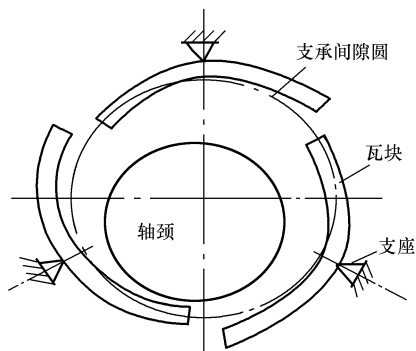


图 1-5 可倾瓦支持轴承原理图

根据对上述汽轮发电机组中几种常用的支持轴承在承载量、稳定性等方面进行的许多试验表明：圆筒形支持轴承主要适用于低速重载转子；三油楔支持轴承、椭圆形支持轴承适用于较高转速的轻、中和中、重转子；可倾瓦支持轴承则适用于高转速轻载和重载转子。

轴瓦在轴承座内的支承方式有圆柱形及球形两种。圆柱形支承是靠轴瓦外圆周上设置的四块垫铁调整轴瓦位置及紧力的。球面支承是由轴瓦、轴瓦壳及瓦枕三部分组成。将调整中心及紧力用的垫铁及销饼都装在瓦枕的外侧，瓦枕与轴瓦壳做成球形配合，使轴瓦能够随轴的挠度变化自动调整中心，保证轴瓦与轴颈保持良好接触及长度方向上负荷分配均匀。

2. 推力轴承的结构

推力轴承的作用是确定转子的轴向位置和承受作用在转子上的轴向推力。虽然大功率汽轮机通常采用高、中压缸对头布置以及低压缸分流等措施减小了轴向推力，但轴向推力仍具有较大数值，一般达几吨至几十吨。如考虑到工况变化，特别是事故工况，例如水冲击、甩