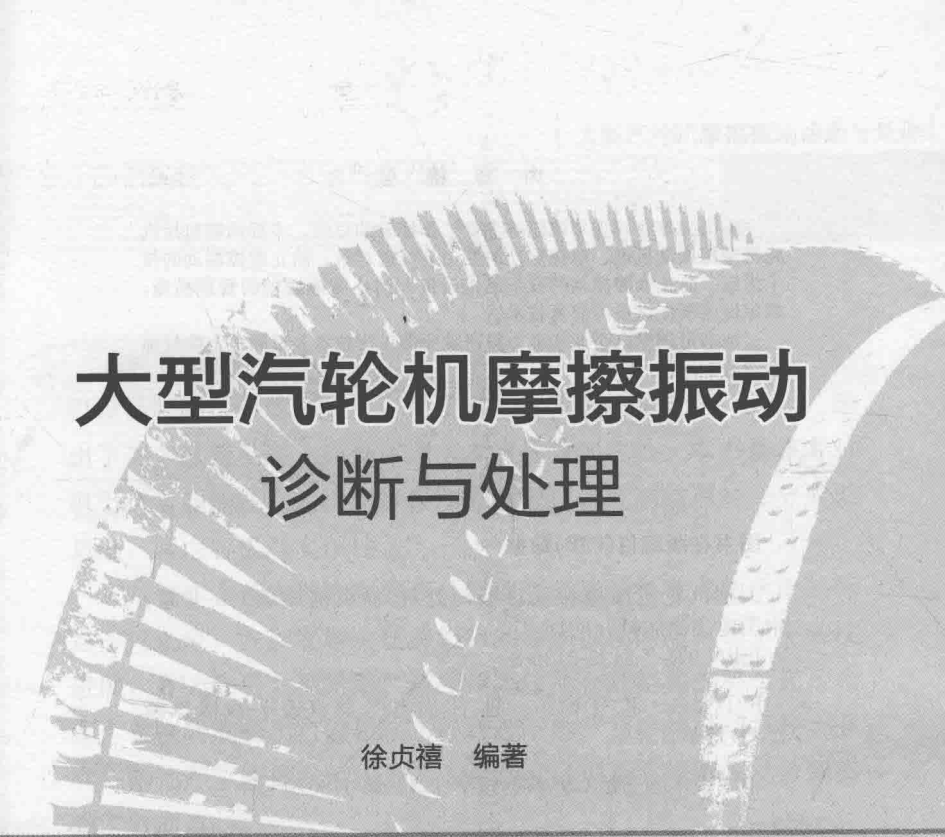


大型汽轮机摩擦振动 诊断与处理

徐贞禧 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



大型汽轮机摩擦振动 诊断与处理

徐贞禧 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为作者对多年汽轮机专业工作经验的总结, 主要内容包括汽轮机摩擦振动机理、摩擦振动的发生与处理对策、防止摩擦振动的技术措施、防止摩擦振动的设备结构改进、防止摩擦振动的管理措施、摩擦振动损伤设备的修复技术。

本书可供发电企业和电力科研院所的工程技术人员和电力院校师生参考学习。

图书在版编目(CIP)数据

大型汽轮机摩擦振动诊断与处理/徐贞禧编著. —北京:
中国电力出版社, 2016. 1

ISBN 978-7-5123-8130-8

I. ①大… II. ①徐… III. ①火电厂-蒸汽透平-故障诊断
IV. ①TM621. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 179070 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 1 月第一版 2016 年 1 月北京第一次印刷

850 毫米×1168 毫米 32 开本 7.75 印张 205 千字

印数 0001—2000 册 定价 42.00 元

敬 告 读 者

本书封底贴有防伪标签, 刮开涂层可查询真伪
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

序



本书作者毕业于西安交通大学汽轮机制造专业，长期从汽轮机设计和制造角度客观地审视发电厂汽轮机的安全运行问题，提出了许多独特见解，充分体现出本书的独到之处。本书是作者对电力企业此前在汽轮机摩擦振动方面进行研究和治理的部分成果总结，其内容极具实用性。

本书作者首先发现高中压分缸双死点汽轮机死点轴承座的死点不死现象，为彻底解决这类机组的摩擦振动故障取得了突破性进展，并为此后大型机组广泛采用高中压合缸结构提供了充足论据。首次明确提出汽轮机在工作转速下的严重摩擦振动特征，并详细阐述严重摩擦振动机理，为诊断和处理重大摩擦振动故障指明了方向。

本书作者从汽轮机结构特点分析发生于 20 世纪 80~90 年代的三起国产 200MW 汽轮发电机组轴系断裂及转子飞脱事故，首次阐明机组处于超速状态时的摩擦振动特点。书中指出该两型 200MW 机组的轴系在结构设计和组装工艺上存在弱点，在超速状态下发生严重摩擦振动，又因为轴承和轴承座的设计强度差，难以承受机组超速状态下强烈振动时转子对其的撞击力，而轴承或轴承座破坏性损伤使转子失去约束，正是导致轴系断裂及转子飞脱的直接原因。这一见解为彻底解决汽轮机的同类故障提供了有效手段。

为避免严重摩擦振动发生，确保发电厂汽轮机组的安全运行，在本书的第四章中，较为完整地提出汽轮机结构评价及改进建议，特别是在发电厂已投运的汽轮机上进行汽封结构及材质改

进、轴承和轴承座结构改进等，对发电厂汽轮机设备的改进具有指导意义。

汽轮机通流部分状态监测一直是困扰人们的一大技术难题，在本书第三章中提出的“调节级汽压监测”“中间级相对内效率 and 膨胀线夹角判据”“高压缸前后压比监测”“末级组长叶片运行工况监测”等内容，使这一难题得以顺利解决，从而使汽轮机通流部分的运行状态能经常处于运行人员的监视之下，有利于及早发现因摩擦振动等因素所造成的汽轮机通流部分损伤，可有力地确保汽轮机的安全运行。

作者在本书中明确指出，冷态找转子中心时应预留合理的转子冷热态中心差值；采用镶片式汽封可避免严重摩擦振动发生，且不致引起大轴弯曲事故。这些关键性的汽轮机零部件结构和工艺技术措施，对于确保汽轮发电机组安全、经济运行至关重要。

本书第六章中所介绍的“汽轮发电机组转子低速动平衡方法”“汽轮发电机组转子高速动平衡方法”，是作者集思广益，在多年的生产实践中研发的实用科技成果。购建方便服务于电厂的汽轮机转子可移动式直轴台和具有机加工功能的可移动式低速动平衡机，作者是主要策划人和实际操办人之一。多年来按此低、高速动平衡方法和用此可移动式直轴台、可移动式动平衡机，为数十台汽轮发电机组进行的转子轴径和轴封表面机加工、转子直轴工作和转子动平衡工作，已使多个发电厂取得了可观的安全、经济效益。

本书第三章中介绍的“汽轮机通流部分径向间隙测量调整新工艺”，是作者鉴于现行的汽封间隙测量和调整工艺的弱点，经多年探讨和借鉴而提出的科学、严谨的间隙测量调整新工艺，可大大提高汽封间隙测量和调整的准确性，并可用计算机进行精确计算和管理，从而有助于避免摩擦振动发生，提高汽轮机的安全

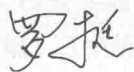
性和经济性。

本书作者根据其 10 多年来开展发电设备状态检修和安全性评价工作的体会，一改传统的故障事后处理模式，按现代管理理念，特别强调故障的预防，并建议将“设备运行及事故处理规程”中的事故处理部分改为“事故预防及处理规程”，而以事故预防为重点。提出“加强设备管理是预防设备故障发生的首选”，按“状态检修”的概念，并参照核电企业完整、严格的设备安全保障措施，在本书的第五章中，详细阐述了“防止摩擦振动的管理措施”，若能严格参照执行，必将有利于发电设备的安全、经济运行。

本书附录 D 中摘录的与汽轮机摩擦振动有关的技术和管理方面的安全性评价内容，是从《火力发电厂安全性评价》之汽轮机部分中选取的。该标准由本书作者负责为国家电网公司编写，多年来一直是火力发电厂开展汽轮机设备安全性评价的依据。

发电厂若能参照本书所述内容进行汽轮机摩擦振动的诊断、预防和处理，加强汽轮机设备的管理，发电厂的设备安全运行水平定能得到进一步提高。

前华北电力集团公司总工程师
教授级高级工程师



前 言



在电力企业多年从事汽轮机专业工作期间,我深刻认识到汽轮机的绝大部分设备故障均源于摩擦振动。摩擦振动能导致许多重大设备事故发生,汽轮机轴系断裂、汽轮机大轴弯曲、汽轮机轴瓦烧损等事故的发生和发展均可能和摩擦振动有关。因此认真研究摩擦振动发生的机理和特征,确定消除摩擦振动的有效技术措施和管理措施,以确保汽轮机长周期安全经济运行,是汽轮机运行部门的主要职责所在。

我亲身经历和处理过由多种原因所引起的不同类型的摩擦振动,亲眼目睹了严重摩擦振动所造成的重大设备损伤,因而对汽轮机摩擦振动进行了深入的探索,积累了多项防止和处理摩擦振动的经验和技能,亟愿作为前车之鉴奉献给广大读者,以期为发电企业汽轮机组的安全经济运行略尽绵力。

20 世纪 70 年代初,我在北京重型电机厂召开的高压单缸 100MW 汽轮机设计审查会上,巧遇我母校恩师——西安交通大学轮机教研室主任蔡颐年教授,当他得知我在发电厂工作后,认为学习汽轮机制造专业的毕业生在发电厂这样的汽轮机运行部门工作,在专业上将难有建树。此话对我感触颇深,决定另辟蹊径,充分发挥自己的专业优势,运用我母校恩师邵济煦教授所倡导的逻辑分析方法,从设计和制造角度客观地审视发电厂的汽轮机安全运行问题,为提高发电厂的安全经济运行水平做出努力。这就使首先发现高中压分缸双死点汽轮机轴承座死点不死现象、首次总结出汽轮机在工作转速下的严重摩擦振动特征等成为可能,为彻底解决这类机组的摩擦振动故障取得了突破性进展,为

此后大型机组广泛采用高中压合缸结构提供了充足论据，为诊断和处理汽轮机工作转速下的异常振动问题指明了方向。

对发生于 20 世纪 80~90 年代的 3 台国产 200MW 汽轮发电机组超速和轴系断裂飞脱事故，从分析设备结构设计和制造工艺上的弱点阐明其起因，提出了独特见解，认为机组在超速状态下发生严重摩擦振动，轴系、轴承和轴承座等结构薄弱，是扩大事故的症结所在。总结提出的 100、200、300MW 汽轮机的结构评价及改进建议，使在运设备的安全性得到提高。向北京大唐高井热电厂推荐的高压双缸 100MW 纯凝汽式机组改造为热电联产机组设计方案，早已在该厂的全部 6 台机组上实施；向天津国华盘山发电厂提出的俄罗斯产超临界 500MW 机组低压通流部分改造和高压主汽门、调节汽门降低压损改造的建议已在该厂的机组上实施（此建议同样适用于同一制造厂生产的超临界 300MW 和 800MW 机组），为这两个电厂取得了重大的安全、节能、环保和社会效益。

早年所提出的国产 100、200MW 汽轮机液压调节系统油动机反馈滑阀改进设计，以及其他多项汽轮机调节汽门及液压调节系统零部件结构改进措施，均已被有关汽轮机制造厂采纳，用于其产品中。针对设备实际结构所研发的实用大型汽轮机末级动叶片除湿防水蚀结构改进方案，已在已投运的多台机组上推广应用。为完整地修复大型汽轮机通流部分零部件损伤，在对故障长叶片和隔板的测绘基础上进行了改进设计。关于国产“909”末级长叶片采用高可靠性的“自带冠整周阻尼围带”结构设计建议，得到该产品研制厂家的认可，成为该叶片的定型设计。是国产大型机组机械式危急遮断器动作转速整定和弹性调速器转速一行程试验台的主要策划者和方案制定人之一；是汽轮机停机空气和蒸汽快冷技术及装备的主要研制人之一；是防止汽轮发电机组

转子停机惰走期间烧瓦的轴承润滑油高位油箱设计方案的提出者；是成功利用汽轮机主射水抽气器扩压管后的剩余真空，进行氢冷发电机空侧密封油真空净化的固定式油净化装置的研制者。这些技术和装备的研制和开发，均有助于缩短汽轮机检修工期、提高机组运行技术和安全经济水平。

在多年的工作实践基础上，总结提出了汽轮发电机组转子实用高低速动平衡方法，为提高设备安全性提供了有效手段，用于解决了多台机组的疑难振动问题。对汽轮机组热工监测、分析、诊断设备的配置，提出了完善化意见。首次提出用缸内在线热力参数监控汽轮机通流部分运行安全性的可行方案，这一方案可用计算机管理系统方便地实现。将汽轮机制造厂的零部件设计标准和通用机械零件标准应用于汽轮机的备件图纸中，规范了发电厂汽轮机备件生产。

在发电企业的生产技术管理方面也有所创新，通过观察实践和学习借鉴，总结提出了完整实用的发电厂先进设备管理模式；阐明了“发电设备状态检修”的涵义、内容及具体实施步骤；充实完善了《火力发电厂安全性评价》的内容、方法；并促成多个发电企业将电厂标识系统 KKS 应用于设备管理中。

以上工作内容中，和防止、诊断、善后处理摩擦振动相关的部分，在本书中均有所体现。

良好的汽轮机零部件结构和设计制造质量，良好的安装调试水平，是防止汽轮机摩擦振动的基础；良好的汽轮机检修质量和运行水平是防止汽轮机摩擦振动的关键。汽轮机运行部门有责任将设备在运行中发生的摩擦振动等故障的原因及结构改进建议反馈给汽轮机设计制造部门，使汽轮机设备如同新型战机研制过程那样，充分尊重用户使用意见，历经一型、二型、三型……，不断改进为成熟产品，以便从根本上杜绝汽轮机严重摩擦振动等设

备故障的发生。

书中的内容可为发电企业和电力科研院所的工程技术人员在预防、诊断、处理汽轮机摩擦振动，以及修复因摩擦振动而损伤的汽轮机零部件时提供帮助；汽轮机制造厂的设计人员和工艺人员也可从中得到助益。作为抛砖引玉之举，还可为电力院校师生提供一些汽轮机运行专业所必须重视的实用知识。

本书在编写过程中，所引用的参考文献不够齐备，有些内容仅作了必要的提示，加之作者水平和精力所限，书中疏漏和不足之处在所难免，尚请广大读者不吝指正。

书中引用了我的交大校友、享受国务院“政府特殊津贴”的国内知名汽轮机专家陈思琦教授级高级工程师有关摩擦振动的部分研究成果和独到见解，谨此致谢。

感谢前华北电力集团公司总工程师、教授级高级工程师、享受国务院“政府特殊津贴”的国内知名热能专家罗挺先生为本书作序。

值此我的母校——交通大学即将于 2016 年迎来 120 周年校庆和西迁 60 周年之际，谨以本书纪念我在校就读时的在任校长彭康先生，感恩于他视学生如子侄般的爱护、教育、培养。

作者

2015 年 7 月

目 录



序

前言

绪论	1
第一章 汽轮机摩擦振动机理	5
第二章 摩擦振动的发生与处理对策	15
第一节 摩擦振动发生的条件	15
第二节 摩擦振动特征	20
第三节 摩擦振动实例及处理对策	23
第三章 防止摩擦振动的技术措施	46
第一节 防止摩擦振动的运行技术措施	46
第二节 防止摩擦振动的检修技术措施	68
第四章 防止摩擦振动的设备结构改进	79
第一节 完善参数监测装置及参数管理系统	79
第二节 汽封结构改进	90
第三节 轴承和轴承座结构改进	98
第四节 汽缸结构改进	104
第五节 汽轮机末级动叶片除湿防水蚀结构改进	106
第六节 轴封供汽系统改进	112
第七节 汽轮机通流部分改造中防止摩擦振动的 技术改进措施	113
第五章 防止摩擦振动的管理措施	116
第一节 规程和规章制度管理	116

第二节	设备管理	123
第三节	安全管理	140
第六章	摩擦振动损伤设备的修复技术	145
第一节	汽轮机通流部分摩擦损伤处理	145
第二节	轴承和轴承座损伤处理及更换	152
第三节	长叶片备件管理	158
第四节	应力松弛法直轴	161
第五节	汽轮发电机组转子低速动平衡方法	175
第六节	汽轮发电机组转子高速动平衡方法	187
附录 A	挠性转子振动及平衡特点	200
附录 B	汽轮机压力与流量关系式(弗留格尔公式) 及其应用	207
附录 C	《防止电力生产事故的二十五项重点要求》之 8、9 的有关条文	212
附录 D	《火力发电厂安全性评价》中与汽轮机摩擦振动 有关部分	223
参考文献		235

绪 论

汽轮机是热力发电厂的原动机，其作用是将锅炉（或核反应堆）产生的蒸汽热能转化成旋转机械能，带动发电机旋转发出电能。汽轮机的技术要求严格，结构复杂，是当今热效率最高、单机功率最大的动力机械（若和燃气轮机组成蒸汽—燃气联合循环机组或热电联产机组，则可得到更高的热效率）；处于高温、高压、高真空、高转速、小动静间隙、大力矩等恶劣条件下工作。

汽轮机作为现代大型蒸汽热能发电装置（火电、核电）的原动机，其运行的安全性和经济性是最重要和最基本的考核指标，而且安全性是第一位的，没有了安全性，经济性也就无从谈起。汽轮机制造厂在科研、热力设计、强度设计、结构设计、材料及热处理、制造及组装工艺、试验和试运等诸多方面进行了大量工作，以确保其产品在安全性和经济性方面均能达到国家相关标准和用户考核指标。在设备前期工作中，发电企业应委派有经验的工程技术人员入驻汽轮机制造厂进行全面质量监督。设备到达发电企业现场后，设备的验收、安装调试、检修试运、运行监管、定期试验、更新改造、设备管理等环节则是发电企业为确保设备安全经济运行的主要工作任务。

在设备设计制造阶段及其后的安装投运阶段，任何一个环节稍有不慎，均有可能埋下安全隐患，条件具备时则酿成重大事故。对于汽轮机而言，最常见、最频发、故障率最高、损害最大的则为摩擦振动。多年来的汽轮机运行实践表明，避免了摩擦振动，就可以杜绝大部分汽轮机重大事故发生，从而即可确保汽轮



机组安全经济运行。为了避免汽轮机摩擦振动发生，首先要对摩擦振动的机理有一清楚的认识，这些内容将在本书的第一章中予以阐述。

摩擦振动之所以容易发生，是因为汽轮机动静部分间隙的变化受到多种因素影响：汽轮机动静部件（汽缸和转子）间的膨胀差（胀差）可导致汽轮机通流部分轴向间隙改变；汽轮机转子在升速过程中挠度的变化可导致汽轮机通流部分径向间隙改变；汽轮发电机组各轴承座在冷热态时因温度变化差异而引起的变形差异可导致各轴承间相对位置改变；位于低压外缸上的轴承座会因汽轮机排汽负压的改变而发生空间（三维）变形；氢冷发电机端盖轴承位置则会受到发电机内部氢压变化的影响等。汽轮机滑动轴承座移动不畅，在汽缸膨胀推力作用下变形；汽轮机死点轴承座死点不死，在汽缸膨胀推力作用下翻转等，均会引起汽轮机动静部分间隙改变。汽轮机启停机过程中，通流部分动静部件若受热不均，或进汽温度急剧变化，或低压排汽部分快速加热和冷却等，温度应力会使动静部件不均匀变形，从而改变了通流部分的动静间隙；汽轮机上下缸温差超标或汽缸左右侧法兰温差大，能导致动静部分下部或侧面径向间隙消失。轴封供汽温度和当地金属温度不匹配，轴封供汽温度低或汽中带水等，均可能引起该处汽封径向或轴向间隙改变而引起动静部分摩擦，严重时甚至能发生大轴弯曲事故。汽轮机低压缸和凝汽器喉部若为刚性连接，则凝汽器内真空变化会引起缸体位移而导致局部动静部分间隙消失。连接在汽缸上的管道在膨胀、收缩过程中，若对汽缸产生超过设计允许的推拉力，也有可能改变已整定合格的汽轮机通流部分间隙。若汽缸水平结合面张口较大，或内缸、隔板套、隔板等部件各部配合间隙超标，均可能在设备组装过程中出现组合偏差，而在机组运行时出现动静部分碰磨。机组启动过程中暖机不当，或热态启动时汽轮机进汽温度低于汽缸温度，或停机过程中有冷汽（气）、冷水进入汽缸等，均有可能引起汽轮机通流部分局部轴向或径向间隙改变。作为汽轮机转子轴向定位的推力轴承

和径向定位的支持轴承若发生轴瓦乌金磨损故障，或推力轴承和支持轴承发生超出质量标准的位移，则必然会引起汽轮机通流部分磨损。汽轮机检修工艺不良或不严格执行质量标准或质量标准有误，均有可能导致通流部分局部间隙异常；或通流部分部件受热膨胀时卡涩、向一侧偏移，致使通流部分间隙局部消失，或弹性汽封失去弹性等，从而引起摩擦振动发生。由上述分析可知，汽轮机摩擦振动极易在机组投产或大修后的试运过程中发生，以及机组启、停等过渡过程中发生，特别是热态启、停机时。以上内容将在本书的第二章中作详细阐述。

为防止汽轮机摩擦振动发生，必须采取有效的技术措施和管理措施。首先必须严格执行检修工艺规程和质量标准，确保汽轮机通流部分各部分间隙符合质量标准的要求；冷态找中心时，预留合理的冷热态中心差值；轴承检修符合质量标准等。过去一些电厂的汽轮机检修部门提出“间隙决定一切！”的口号，就足以说明汽轮机通流部分间隙对于防止汽轮机摩擦振动乃至其所引发的重大事故的重要性。在运行管理方面，要严格执行机组集控运行规程，区分摩擦振动发生在转子临界转速以下抑或以上，采取不同的技术措施予以对症处理。在设备管理和安全管理方面，要有全面、严格、有效地防止汽轮机摩擦振动发生和发展的内容。这些将在本书的第三章和第五章中作全面阐述。

良好的汽轮机汽封结构能有效防止汽轮机严重摩擦振动和大轴弯曲事故发生。采用在汽轮机转子上镶片的轴端汽封和隔板汽封能避免转子表面发生直接摩擦，因而能防止摩擦引起的转子热弯曲效应，是防止严重摩擦振动发生的关键技术手段。本书将在第四章中对能有效防止汽轮机摩擦振动的良好零部件结构作详细阐述。

严重摩擦振动会给设备造成灾难性的后果，例如，能导致汽轮机通流部分和轴承严重损伤；能导致大轴弯曲事故发生；能导致设备摩擦部位产生裂纹；能导致轴系断裂飞脱等等。对于这些设备损伤的处理和修复，直接影响到汽轮机设备的安全经济运行



行,发电厂和电力修造企业以及电力科研院所为此积累了丰富的经验,研制和采购了多种适用的装备,研究并开发了多项适用的技术,本书将在第六章中对此作全面介绍。

第一章

汽轮机摩擦振动机理

由于汽轮机结构上的特点：动静部分径向间隙小，冷热态时轴承座的标高变化大，以及汽缸膨胀受阻、偏移和变形等原因，动静部件间摩擦而引起的摩擦振动故障已屡见不鲜。因此而引发的汽轮机轴系断裂、汽轮机大轴弯曲、通流部分严重磨损和轴承乌金面损伤等事故时有发生，给社会和电力企业本身造成了重大经济损失，故汽轮机摩擦振动故障的诊断和防止日益为人们所重视。

一、摩擦振动故障的发生机理

对于汽轮机而言，影响最大的则是由于摩擦引起的热弯曲效应。因动静部分发生摩擦时，转子表面沿圆周向各点的摩擦程度不同，重摩擦侧的温度高于轻摩擦侧，由此而导致转子径向截面上的温度分布不均匀，从而引起转子热弯曲。热弯曲会产生一个新的不平衡力作用到转子上并引起振动，这便是摩擦的热弯曲效应。

如图 1-1 (a) 所示转子表面圆周向摩擦部位图所示，设汽封和转子的平均间隙为 d ，转子的动挠度为 y ；当 $y > d$ 时就会出现动静摩擦，使转子局部温度升高，如图 1-1 (b) 所示转子摩擦部位温度分布。假定转子表面某点与转子挠度方向的夹角为 θ ，当 $y \cos \theta > d$ 时，转子上的该点就会与汽封齿接触，故摩擦发生在以转子挠度方位 [图 1-1 (a) 中为 H 点] 为中心的一段弧长上。当 $y > d$ 时，动静部件间将出现负间隙，对应于图 1-1 (a) 中的 H 点，负间隙为 $\delta = y - d$ ，相应地，该处动静部件接触面的正压力为 $F = k\delta$ ，式中 k 为转子的刚度。对于两端简支的