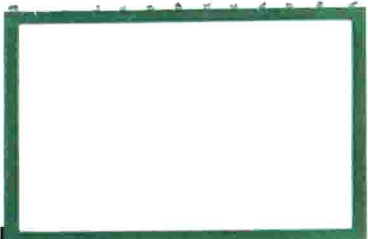


# 高速平衡技术装备

王悦武 田社平 徐锡林 等 编著



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



# 高速平衡技术装备

王悦武 田社平 徐锡林等 编著



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

## 内 容 提 要

本书主要介绍挠性转子的高速平衡技术装备,阐述了挠性转子高速平衡技术的基本概念与原理、高速平衡机及高速平衡、超速试验室的构成及基本设计方法、DG 系列高速平衡机产品的技术规格参数等。

本书可供从事高速平衡技术专业的工程技术人员和研究人员参考,也可作为高等院校高年级本科生、研究生及教师的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

高速平衡技术装备/王悦武,田社平,徐锡林编著. —上海:上海交通大学出版社, 2013

ISBN 978-7-313-10188-4

I. ①高… II. ①王… ②田… ③徐… III. ①机械运动—平衡 IV. ①TH113.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 192923 号

### 高速平衡技术装备

王悦武 田社平 徐锡林 编著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话: 64071208 出版人: 韩建民

浙江云广印业有限公司印刷 全国新华书店经销

开本: 787mm×960mm 1/16 印张: 8.75 插页: 8 字数: 171 千字

2013 年 10 月第 1 版 2013 年 10 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-313-10188-4/TH 定价: 28.00 元

---

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有质量问题请与印刷厂质量科联系

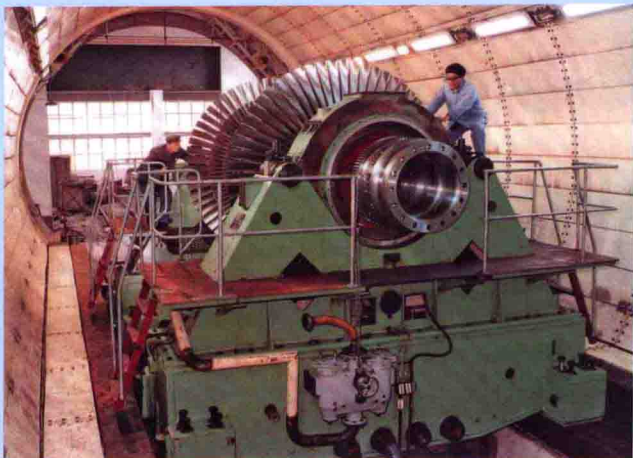
联系电话: 0573-86577317



**王悦武**, 1940年生, 研究员级高级工程师, 1965年毕业于西安交通大学机械系, 毕业后进入原第一机械工业部第二设计研究院, 从事机械及工程设计工作, 1975~1982年参与设计、研制 200t 高速动平衡机, 获机械工业委员会科技进步一等奖、国家科技进步奖二等奖, 因独立设计高速动平衡试验室关键驱动装置, 再次获机械工业委员会科技进步一等奖和国家科技进步二等奖。2000年, 参与援外高速平衡试验室工程全套装备的设计和调试, 获机械工业委员会和中国机械工程委员会颁发的一等奖。1991年获机械电子工业部授予的“有特殊贡献的专家”称号, 1992年被授予国务院颁发的政府特殊津贴证书。目前担任上海电气集团下属的上海辛克试验机有限公司总工程师, 负责高速平衡机的技术设计及产品研发工作。



**田社平**, 1967年7月生, 1999年毕业于上海交通大学仪器工程系, 获工学博士学位, 现任上海交通大学电子信息与电气工程学院副教授, 上海交大-上海辛克联合研发中心负责人, 一直从事动态测试、电路理论的科研和教学工作, 在国内外学术期刊发表论文 150 余篇, 负责、参加多项纵、横向课题, 拥有国家发明专利十余项, 获国家机械工业部科技进步二等奖 1 次, 主编、参编多本教材, 其中《电路基础》获上海普通高校优秀教材二等奖, 获上海交通大学各类奖励及优秀教师称号多次。



我国第一套自主研发的 200t 高速平衡机装备

20 世纪 70 年代末,我国自主研制首台高速平衡装备。该装备轴承跨距为 16m,可平衡的转子重量为 8~200t,最大直径为 6.1m,最大轴向长度可达 18m,平衡转速范围为 180~3 600r/min,最高超速试验转速可达 4 320r/min,适用于大型汽轮发电机组、汽轮机、燃气轮机和发电机转子的高速平衡和超速试验。近四十年来,该装备一直为我国的大型电站设备制造发挥着重要的作用。



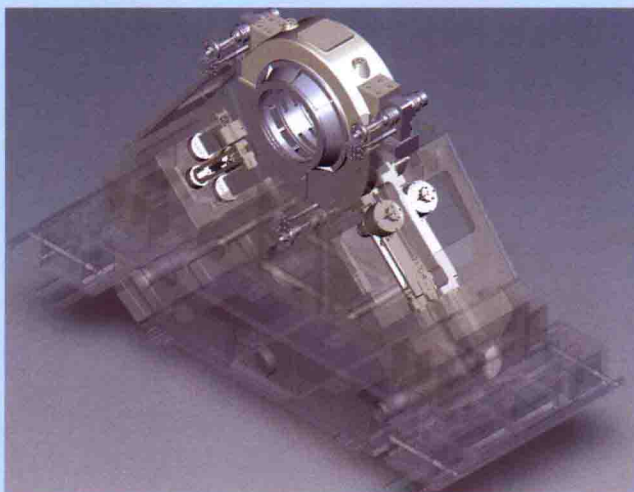
某汽轮电机有限责任公司的 100t 高速平衡、超速试验室

该试验室建成于 2008 年。该高速平衡、超速试验室的核心装备——高速平衡机由上海辛克试验机有限公司设计、制造。通过严格的质量控制,该试验室一次装配成功、一次调试合格、一次验收通过。图为 76t 发电机转子正用平车运输到试验室进行高速平衡试验。



等待高速平衡试验的汽轮机转子

大型汽轮机转子装载在运输平车上，等待运入试验室的防爆真空筒体中进行高速平衡、超速试验。高速平衡试验用的转子及左右两个机械支承座，分别由两部运输平车运入真空筒体，通过油缸将机械支承座下降就位后，运输平车退出筒体。平衡试验结束后，运输平车再将机械支承座及转子运出筒体。



高速平衡机的机械支承座

高速平衡机的机械支承座不仅要承受一定质量的转子作高速旋转，还要正确、可靠地将不平衡振动信号传递到电测单元，经电测单元处理后将转子不平衡的量值大小和相角位置显示出来。因此在设计机械支承座时，其设计应满足这一要求。在工程实践中，机械支承座也被称为摆架。



防爆真空筒体

高速平衡、超速试验室的防爆真空筒体具有防爆、抗穿甲能力以及较好的密封性和强度。转子在进行高速平衡或超速试验时，可能会发生转子叶片断裂、平衡配重块飞逸，甚至转子叶轮破碎、转子爆裂等现象。为减少转子特别是带叶片的转子和多级泵状转子在高速旋转下的摩擦、风阻功耗，高速平衡或超速试验必须在真空状态下进行。



中央控制监测室

中央控制监测系统主要由平衡测量系统、驱动操作控制系统、辅机测量监控系统组成。整个系统装置集中在控制室内进行操作、测量和控制，操作人员可直接在控制室内操作控制各系统设备和进行平衡测量。



数控加工中心

为谋求企业的更大发展,2010年3月上海辛克试验机有限公司整体搬迁至上海市松江区永丰路35号,标志着上海市高新技术产业化项目——“智能化大型高速平衡机”技改项目建成。项目总投资数千万元,用于厂房的搬迁和改造、大型数控加工中心等数控加工机床及高精度的计量器具的添置,以满足高速平衡机主要部件的加工、装配调试、精度检测等需要。图为技术人员在加工高速平衡机的机械支承座。



准高速平衡机安装现场

准高速平衡机是一种新型的高速平衡机，适用于低吨位挠性转子的高速平衡、超速试验。准高速平衡机采用滚轮/轴瓦支承方式，具有安装、维护方便，使用可靠，制造成本低的特点。



4.5t 高速平衡试验室

由上海辛克试验机有限公司投资建成的 4.5t 高速平衡试验室，其系统采用中央控制、分屏显示方式。试验室的防爆筒体采用移动钢结构形式。该试验室可用于 4.5t 以下挠性转子的高速平衡、超速试验(最高转速 8 000r/min)以及开展转子动力学特性的试验与研究。

创高速平衡技术之基

立民族工业装备之本

# 序

随着科学技术的发展,旋转机械日趋大型化、高速化,大型的汽轮发电机组、高速涡轮机等的工作转速大多接近或超过其转子的临界转速,从而使转子呈现出挠性转子的特性。这类转子在出厂前必须经过高速平衡,而高速平衡技术装备则是实施高速机械平衡的关键、核心装备。它可为高速旋转机械稳定、可靠、安全地运行提供技术保障。现代高速平衡技术装备涉及机械、液压、电子、传感器、计算机等多项技术领域,系属装备制造业的高端产品。我国在20世纪70年代曾通过技术攻关,独立自主设计、制造成功我国第一台200t大型高速平衡机,成为世界上少数能够设计、制造高速平衡机的国家之一。该高速平衡机作为上海汽轮机厂有限公司对汽轮机、燃气轮机转子进行工艺测试的重要装备,至今仍然发挥着它应有的作用。

创新驱动、转型发展,是上海在更高起点上推动科学发展的必由之路。如何通过创新驱动来促进转型发展?我认为应该通过技术总结、创新,改变原来主要依靠增加投资、添加设备、建造厂房来拉动发展的模式,转变为主要依靠技术进步和提高劳动者素质来推进发展的模式。上海辛克试验机有限公司作为我国唯一的一家高速平衡机设计、制造企业,近年来已为用户提供了多台高速平衡技术装备。公司核心团队在着力于组织该领域的专家、高校教师以及公司技术人员对现代高速平衡技术装备研发的同时,还重视该技术的总结并编写专著出版,我认为是一件很有意义的事。

本书的出版不仅是对高速平衡技术装备的总结,更是延续民族工业的有益之举。

是为序。

上海电气(集团)总公司董事长



二〇一三年五月

# 前 言

转子的平衡技术在国民经济特别是装备制造业中具有独特的地位。举凡旋转机械,从精密的导航用陀螺仪,到交通车辆的普通轮毂;从重达数百吨的汽轮机转子,到轻至几克的仪表转子,甚至微机电系统的转子组件;从转速仅每分钟几转的卫星,到高达每分钟十几万转速的机床主轴,其工作性能的优劣,都和它们的平衡品质密切相关。统计数据表明,转子的动不平衡是引起振动和噪声、降低设备寿命和可靠性、制约产品质量和性能的重要原因之一,也是旋转类机电产品生产、制造以及应用过程中必须解决的一个基本问题。高速平衡技术是平衡技术中的高端技术,它的应用为高速旋转机械运行的安全性和可靠性提供了保证。目前国内汽轮机、发电机、透平压缩机等大型回转机械挠性转子进行高速平衡试验已成为常规的工艺过程。可以说,高速平衡技术在降低机组振动、噪声,提高工作转速,保证机组正常、安全运行,延长使用寿命及改善工作条件方面发挥了重要作用。

相对于通用平衡技术而言,高速平衡技术主要应用于大型挠性转子的平衡校正和超速试验。作为转子高速平衡的主要工艺装备,高速平衡机除了具有低速平衡机的功能外,还必须满足转子高速平衡试验、转子超速试验及转子动力学研究测试等要求,其工作原理、结构、性能指标都有其自身的特点。随着工程技术特别是计算机技术的发展,平衡技术包括高速平衡技术也始终处于动态的发展之中。例如,随着电路技术和计算机技术的发展,平衡机电测系统的测量(显示)方式发生了改变,从早期的机械测量方式(机械式振幅指示计和相位计)、电子测量方式(电子放大器、滤波器等),发展到以微控制器(嵌入式系统)为特征的新型电气测量方式。此外,数字信号处理技术也大大地提升了高速平衡技术的内涵,现代高速平衡机的电测单元已不再是简单地进行不平衡测量,它还具备丰富的数据处理和分析功能。

与此同时,为了保证转子在高速旋转状态下试验过程的安全性,减少或消除空气的阻力以便能够进行正确的平衡,挠性转子的高速平衡、超速试验通常在高速平衡、超速试验室中完成。高速平衡、超速试验室通常是一个独立的建筑结构,它主要由驱动系统、防爆真空筒体、大门、真空泵房、润滑油系统、控制室、辅

机房等组成,以确保转子在高转速下的平稳运行以及在超速或突发事故发生时的安全性,并可直接监测各系统的运行情况。

我国自 20 世纪 80 年代初在某汽轮机厂装备第一套自主研发的高速平衡机以来,陆陆续续有多家企业装备不同吨位的高速平衡机,以满足大型回转机械产品平衡工艺的需要。尽管如此,目前还没有一本关于高速平衡技术装备方面的专著公开出版。我们希望本书的出版能够有助于高速平衡技术的总结及普及。

高速平衡技术涉及多种技术,我们试图从系统的角度对高速平衡原理、高速平衡机设计、高速平衡及超速试验室的构成进行全面的介绍,尽可能反映高速平衡机技术的最新发展趋势,以期让读者能够对高速平衡技术有一个整体的、全局的了解。本书共分 5 章,较为全面地介绍了平衡技术的基本概念、挠性转子的高速平衡原理、高速平衡机械结构和电测单元的设计原理、高速平衡及超速试验室的构成与基本设计原则。

本书由上海交通大学仪器科学与工程系田社平统编。参加本书编撰工作的有上海交通大学仪器科学与工程系徐锡林(第 1、2 章)、上海辛克试验机有限公司王悦武(第 3、5 章)、上海交通大学仪器科学与工程系田社平(第 4 章、第 2.1 节、第 2.4 节、第 2.5 节、第 3.4 节、附录 A)、上海辛克试验机有限公司林晓娟、杨珏(第 4.4 节)、上海辛克试验机有限公司赵志清、秦琳(附录 B、附录 C)。

本书的编撰工作得到了上海电气集团总公司领导的关心,也得到了上海辛克试验机有限公司董事长周志炎先生的支持与帮助。整个撰写过程是在上海仪器仪表协会副理事长、上海辛克试验机有限公司总经理范克雄先生主持、关心下开展的,是集体合作的结晶,也是对我国唯一一家设计、制造高速平衡机企业——上海辛克试验机有限公司数十年来探索、实践高速平衡机技术的一次总结。在此,对上海辛克试验机有限公司领导和技术人员的大力支持致以衷心的感谢。上海交通大学电子信息与电气工程学院仪器科学与工程系对本书的撰写也给予了大力支持,在此深表致谢。

本书送审稿承蒙上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室陈进教授、南京汽轮机(集团)有限责任公司邓勇高级工程师仔细审阅,提出了许多宝贵意见。本书完稿后,上海辛克试验机有限公司杜荣林、郭强、顾皓也进行了审阅并提出许多具体意见。在此向他们深致谢忱与敬意。

由于作者水平有限,书中存在的不妥、错漏之处,欢迎读者批评指正。

作 者

二〇一三年六月

# 目 录

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....                    | 1  |
| 1.1 高速平衡技术概述 .....                | 1  |
| 1.2 转子及其不平衡 .....                 | 2  |
| 1.3 转子的不平衡量 .....                 | 8  |
| 1.4 刚性转子与挠性转子 .....               | 9  |
| 1.5 转子的机械平衡 .....                 | 11 |
| 第 2 章 挠性转子的高速平衡 .....             | 13 |
| 2.1 挠性转子的不平衡振动特性 .....            | 13 |
| 2.1.1 挠性转子的无阻尼自由振动 .....          | 13 |
| 2.1.2 挠性转子的不平衡强迫振动 .....          | 14 |
| 2.2 挠性转子的高速平衡 .....               | 16 |
| 2.2.1 挠性转子的平衡目标 .....             | 16 |
| 2.2.2 挠性转子的振型 .....               | 16 |
| 2.2.3 挠性转子的高速平衡 .....             | 20 |
| 2.3 振型平衡法 .....                   | 22 |
| 2.3.1 不平衡校正的计算 .....              | 23 |
| 2.3.2 振型平衡法的步骤 .....              | 24 |
| 2.4 影响系数平衡法 .....                 | 26 |
| 2.5 谐分量平衡法 .....                  | 28 |
| 2.5.1 谐分量法平衡法的步骤 .....            | 28 |
| 2.5.2 影响系数平衡法与谐分量平衡法的比较 .....     | 30 |
| 第 3 章 高速平衡机机械结构的设计与分析 .....       | 32 |
| 3.1 机械支承座 .....                   | 32 |
| 3.2 机械支承座的设计原则 .....              | 35 |
| 3.2.1 机械支承座径向支承刚度的设计及参数确定原则 ..... | 35 |
| 3.2.2 附加刚度机构的设计与分析 .....          | 38 |

|            |                                            |           |
|------------|--------------------------------------------|-----------|
| 3.2.3      | 轴向刚度及阻尼机构的设计与分析                            | 40        |
| 3.2.4      | 机械支承座的动态刚度计算                               | 40        |
| 3.2.5      | 机械支承座各个固有频率的计算与分析                          | 42        |
| 3.2.6      | 小结                                         | 43        |
| 3.3        | 机械支承座的性能参数检测                               | 44        |
| 3.3.1      | 附加刚度机构的检测                                  | 44        |
| 3.3.2      | 机械支承座沿 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 轴线的各固有频率的测试及阻尼机构的调整 | 44        |
| 3.3.3      | 机械支承座动态刚度的测试                               | 47        |
| 3.4        | 机械支承座动态特性的有限元分析                            | 47        |
| 3.4.1      | 机械支承座的动态刚度分析                               | 48        |
| 3.4.2      | 机械支承座的模态分析                                 | 50        |
| <b>第4章</b> | <b>高速平衡机电测单元的设计</b>                        | <b>54</b> |
| 4.1        | 电测单元的基本功能与构成                               | 54        |
| 4.2        | 传感器及其选型                                    | 56        |
| 4.2.1      | 振动传感器                                      | 56        |
| 4.2.2      | 转速传感器                                      | 61        |
| 4.2.3      | 传感器选型的基本原则                                 | 63        |
| 4.3        | 电路设计                                       | 63        |
| 4.3.1      | 可编程增益放大电路                                  | 63        |
| 4.3.2      | 积分电路                                       | 66        |
| 4.3.3      | 滤波电路                                       | 70        |
| 4.3.4      | A/D 转换电路                                   | 78        |
| 4.4        | 软件设计                                       | 85        |
| 4.4.1      | 电测单元软件的基本功能                                | 85        |
| 4.4.2      | 软件设计中应注意的问题                                | 86        |
| 4.5        | 数字信号处理技术                                   | 87        |
| 4.5.1      | 正弦信号幅值和相位估计算法                              | 88        |
| 4.5.2      | 数字滤波器设计                                    | 90        |
| 4.6        | 电测单元的标定及检验                                 | 98        |
| 4.6.1      | 机械支承座及传感器的灵敏度标定                            | 98        |
| 4.6.2      | 电测单元的检验与评定                                 | 99        |
| 4.6.3      | 其他项目试验                                     | 99        |

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 第 5 章 高速平衡、超速试验室的构成 .....            | 100 |
| 5.1 概述 .....                         | 100 |
| 5.2 驱动系统 .....                       | 102 |
| 5.2.1 驱动系统的工作方式 .....                | 102 |
| 5.2.2 驱动系统电机功率的确定 .....              | 102 |
| 5.2.3 齿轮箱及中间轴 .....                  | 103 |
| 5.3 防爆真空筒体 .....                     | 104 |
| 5.4 抽真空系统 .....                      | 106 |
| 5.5 油站、油路系统 .....                    | 107 |
| 5.5.1 真空润滑油系统 .....                  | 107 |
| 5.5.2 大气润滑油系统 .....                  | 109 |
| 5.5.3 变刚度油站 .....                    | 110 |
| 5.5.4 辅助油站 .....                     | 110 |
| 5.6 安全应急系统 .....                     | 110 |
| 5.7 中央控制监测系统 .....                   | 111 |
| 5.8 其他辅助装置 .....                     | 114 |
| 附录 A 高速平衡技术的理论基础 .....               | 116 |
| A.1 平衡的目的 .....                      | 116 |
| A.2 刚性转子的平衡条件 .....                  | 117 |
| A.3 挠性转子的振型平衡原理 .....                | 119 |
| A.4 挠性转子的平衡条件 .....                  | 122 |
| 附录 B DG 系列与 HY-VG 系列高速平衡机技术参数表 ..... | 125 |
| 附录 C 上海辛克试验机有限公司 .....               | 127 |
| 参考文献 .....                           | 130 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 高速平衡技术概述

机电产品的振动及其噪声,是衡量和判定产品质量高低的重要测试指标之一。对现代文明生产和生活环境而言,控制机电产品的振动及其噪声的大小,也是减振降噪、保护环境的基本要求。因此,减小振动、降低噪声,长期以来一直是机电工程界为之努力追求的目标和研究的课题。在各种机电设备当中,例如电动机、发电机、汽轮机、燃气轮机、离心泵、鼓风机、内燃机,等等,其中都不乏旋转体,这些旋转体均被简称为转子。机电工程的实践告诉我们,旋转机械在运转过程中所产生的振动及噪声,很大一部分是由其转子的质量分布不对称、不平衡而引发的。为了达到减振降噪的目的,旨在减小转子的质量分布不对称、不平衡的技术——转子的机械平衡,是旋转机械在制造、维修中一道重要的必不可少的工艺。

转子的机械平衡离不开工艺装备——平衡机。平衡机是用于检测转子质量分布不对称、不平衡量值大小及其所在相位角的装置,它是一种机、电、仪一体化的现代工艺测试装备。

20 世纪 60 年代始,随着旋转机械向大型、高速、高效率发展,各种大型的发电机组、化工和冶金设备相继问世,其中转子的轴向长度被大大加长。由于受到材料强度的限制,转子径向尺寸增加有限。这样,因横向弯曲刚度降低而导致转子的临界转速下降,甚至跌至转子的最高工作转速以下,出现了挠性转子。如何保证这类转子平稳、可靠、安全地运转,成为大型、高速机电设备设计和制造中的关键技术。于是,有关挠性转子的机械平衡技术便应运而生,它与大家早已熟悉的刚性转子的平衡技术既有联系又有很大不同。一般来说,挠性转子要求在它的最高工作转速及其最高工作转速以下可能包含的第一、二、三阶临界转速附近进行高速平衡,这不仅是为了减小机器的振动和作用在轴承座上的动压力,更是为了减小转子本身的动挠度。伴随 20 世纪后半叶的 300MW、600MW 大容量汽轮发电机组的诞生,以及发展到当今的 1 000MW 的汽轮发电机组相继投入运行,高速涡轮增压发动机也不断问世,其转速已达到每分钟一二万转,甚至更高,挠性转子的高速平衡技术越来越为人们所高度关注。为了确保制造出来的转子平