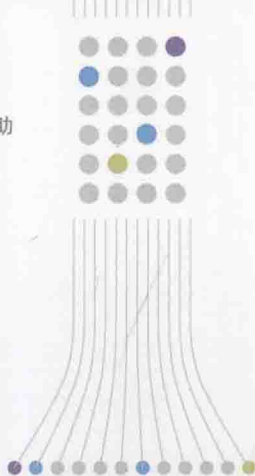




本书获上海科技专著出版资金资助



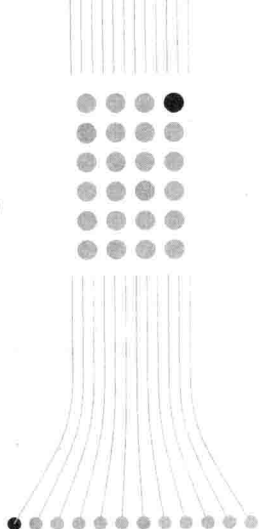
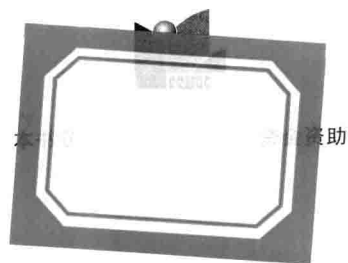
机械平衡及其装备

JI XIE PING HENG JI QI ZHUANG BEI

徐锡林 著



上海科学技术文献出版社
Shanghai Scientific and Technological Literature Press



机械平衡及其装备

JI XIE PING HENG JI QI ZHUANG BEI

徐锡林 著



上海科学技术文献出版社
Shanghai Scientific and Technological Literature Press

图书在版编目 (CIP) 数据

机械平衡及其装备 / 徐锡林著. —上海: 上海科学技术文献出版社, 2014.5

ISBN 978-7-5439-5941-5

I. ①机… II. ①徐… III. ①机械平衡—研究②机械平衡—机械设备—研究 IV. ①TH113.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 214499 号

责任编辑: 祝静怡

封面设计: 周 婧

机械平衡及其装备

徐锡林 著

出版发行: 上海科学技术文献出版社

地 址: 上海市长乐路 746 号

邮政编码: 200040

经 销: 全国新华书店

印 刷: 常熟市人民印刷厂

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 22.5

字 数: 356 000

版 次: 2014 年 5 月第 1 版 2014 年 5 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5439-5941-5

定 价: 98.00 元

<http://www.sstlp.com>

出版说明

科学技术是第一生产力。21 世纪，科学技术和生产力必将发生新的革命性突破。

为贯彻落实“科教兴国”和“科教兴市”战略，上海市科学技术委员会和上海市新闻出版局于 2000 年设立“上海科技专著出版资金”，资助优秀科技著作在上海出版。

本书出版受“上海科技专著出版资金”资助。

上海科技专著出版资金管理委员会

推動科技出版事業
提高學術研究水平

為「上海科技書著出版資金」題

徐匡迪

二〇〇〇年十月十日

内容简介

本书系有关转子机械平衡的一本专业技术书籍,全面系统地阐述工业转子机械平衡的基本概念、力学原理、平衡方法以及相关的最新技术标准。并详细介绍现代平衡机的测试原理、机械结构、新颖数字测量单元和评定规范及标准等。

撰述内容既有理论,又重实际,理论紧密结合实际,兼具实用性。本书可供从事机械平衡的广大技术人员阅读。也可供机械工程的研究、设计人员和高校相关专业的研究生参阅。

前 言

机械平衡是现代机械制造过程中不可或缺的一项重要技术。各行各业的机械制造业——从轻纺机械制造业到航天航空工业,从仪器仪表工业到大型汽轮机、水轮机、发电机制造业,从汽车制造到造船工业等等——都离不开机械平衡。

凡运转着的机器或机械设备都普遍地存在振动。机械振动在许多场合是有害的,它会影响机械设备的运行状况、工作精度,缩短使用寿命,造成噪声污染,甚至会导致发生机毁人亡的重大事故。因此,从保证机械设备的安全运行、性能及精度,减低能耗,提高效能,保障人身安全和保护环境出发,减小或消除机械振动长期来一直是机电工程界的重要课题。在引发机械振动的诸多原因中,由于机械的旋转零部件(简称转子)质量分布不均衡引起的不平衡离心惯性力是一个重要因素,所以,旨在改善转子质量分布不均衡的机械平衡早就成为减小机械振动的一个关键的技术。随着现代各种机械的转速日趋提高,转子的尺寸日益加长加大,挠性转子在工程上的出现,又使得由转子的质量不均衡而引发的机械振动变得更加复杂,它的机械平衡不仅需要考虑转子本身的动力特性,而且还必须同时考虑支承它的轴承及轴承座,以及它的台架和基础等力学条件。可以说,转子的机械平衡是一个既老又新的课题。

转子的机械平衡是减小机械振动的一种行之有效的技术,作为一种技术,需要不断地赋予它更新的工艺方法及装备,以适应社会进步和发展的需要。

先进的技术需要先进的装备来支撑。伴随着科学技术的进步,尤其是电子计算机技术的普及和数字技术日新月异的迅猛发展,作为转子不平衡量的测试装备——现代平衡机已成为集机械、电子、传感

器和计算机于一体的高新技术密集型的高端装备。当今,平衡机顺应技术发展潮流进行数字化转型的战略调整有着极其重要的意义,也是一种必然的选择。

本书将全面系统地阐述转子机械平衡的基本概念,刚性转子和挠性转子两种不同类型转子机械平衡的力学原理、平衡方法以及相关的技术标准,着力培养和提高读者独立分析和解决实际问题的能力和水平。技术离不开装备,本书还详细介绍现代平衡机的类型与构成、测试原理、机械结构,新颖的数字测量单元以及评定的规范和标准等,为它的广大用户在合理选择、正确操作,定期标定等方面提供指南,也可为我国高端平衡装备的创新开发和研制提供有价值的启示。

本书题材贴近生产实际,注重反映和介绍国内外有关的先进技术和装备以及相关的最新技术标准,介绍如何制订和检验转子机械平衡的最终状态——许用剩余不平衡量的允差等级、检验方法和测试手段,以及平衡机性能的标定及规范等标准,以增强书稿的实用性,既有利于读者知识的不断提高和更新,也有利于推动机械制造业的技术进步、设备更新和平衡装备新产品的开发。

本书的撰写力求述理严谨,分析透彻,实例解释,为读者营造一个理论紧密联系实际,深入浅出、学以致用阅读氛围。

在本书的撰写过程中得到了上海交通大学田社平副教授的大力支持,尤其是他和蔡萍教授在繁忙的教学、科研工作之余,结合他们各自在平衡机测量单元方面新的研究参与了本书第五章的撰写。对此笔者深表谢意。

我国高速动平衡机的设计专家王悦武(研究员级高级工程师)审阅了本书第九章,并提出了宝贵的修改意见。对此笔者深表谢意。

本书的撰写还得到了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的支持,笔者谨表感谢。

本书的撰写也得到了上海辛克试验机有限公司和上海申克机械有限公司(SCHENCK)的支持,为本书提供了平衡机产品样本资料等,笔者在此谨表谢意。

本书能顺利出版,得益于上海市科技专著出版基金的资助,在此特表谢意。

在本书的整个撰写过程里,王纯之老师,黄建强工程师,郭夏夏、韩

天详、武承泽、忻子斌、朱春燕等在有关资料的收集和整理方面也做了不少的工作,在此向他们表示诚挚的感谢。

笔者才疏学浅,敬请读者对书中出现的错误和不妥之处予以批评和指正,笔者不胜感谢。

2014 年元月

目 录

第一篇 刚性转子的机械平衡

第 1 章 刚性转子平衡的力学原理	003
1.1 转子及其机械平衡	003
1.2 转子的不平衡离心力	004
1.3 刚性转子质点离心力系的简化	007
1.4 刚性转子不平衡量的概念	013
1.5 转子不平衡量的表示方式	020
第 2 章 刚性转子的机械平衡	025
2.1 概述	025
2.2 刚性转子的动平衡条件	026
2.3 转子的机械平衡	028
2.4 刚性转子的单面平衡与双面平衡	036
2.5 现场平衡	040
2.6 平衡校正误差分析	061
2.7 内燃机曲轴的机械平衡	068
2.8 汽车传动轴的机械平衡	078
2.9 由机械平衡谈转子设计	081
第 3 章 刚性转子的平衡规范与平衡允差	084
3.1 概述	084
3.2 许用剩余不平衡量	085
3.3 平衡允差规范	086

3.4	许用剩余不平衡量的分配	091
3.5	平衡误差的评定	098
3.6	剩余不平衡量的检验	101

第二篇 机械平衡装备

第4章	平衡机的机械构成及测试原理	105
4.1	平衡机及其分类	105
4.2	重力式平衡机	114
4.3	离心式平衡机	116
4.4	动平衡机支承座的工作原理	126
4.5	动平衡机支承座的结构形式	136
4.6	硬支承平衡机的测量误差及其控制	142
4.7	自动平衡机	146
第5章	平衡机测量单元	149
5.1	概述	149
5.2	测量单元的基本功能及其要求	151
5.3	传感器	158
5.4	信号调理电路	165
5.5	A/D 转换电路	178
5.6	上、下位机接口技术	180
5.7	相关检测技术在不平衡测量中的应用	189
5.8	数字信号处理技术	196
5.9	平衡机测量单元的软件设计概要	203
第6章	平衡机的评定	205
6.1	概述	205
6.2	校验转子和试验质量块	206
6.3	检测纲要	221
6.4	最小可达剩余不平衡量检测(U_{mar} 检测)	225
6.5	不平衡量减少率检测(URR 检测)	229

6.6 单面平衡机的抑制偶不平衡干扰能力的检测	239
6.7 补偿器检测	240
6.8 简易检测	241

第三篇 挠性转子的机械平衡

第 7 章 挠性转子平衡的力学原理	245
7.1 概述	245
7.2 单圆盘转子的不平衡响应	247
7.3 弹性转轴的横向自由振动	257
7.4 挠性转子的不平衡振动响应	268
7.5 挠性转子的平衡条件及特点	278
附:注释	281
第 8 章 挠性转子的机械平衡	283
8.1 概述	283
8.2 振型平衡法	285
8.3 各种不同挠性转子的平衡方法	294
8.4 挠性转子最终不平衡状态的评定准则	303
8.5 挠性转子最终不平衡状态的检测方法	308
第 9 章 高速动平衡机	314
9.1 高速动平衡、超速试验室	314
9.2 高速动平衡机的工作原理及组成	318
9.3 高速动平衡机的主要技术参数	326
9.4 高速动平衡机支承座的结构及其特征	328
附 录	337
机械振动-平衡词汇 (中英文对照)	337
参考文献	344

第一篇

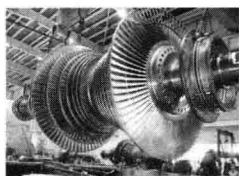
刚性转子的机械平衡

第 1 章

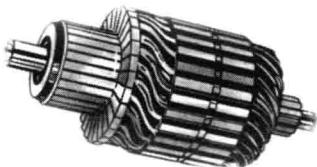
刚性转子平衡的力学原理

1.1 转子及其机械平衡

大至地球、小如儿童陀螺玩具,凡绕其自身某轴线旋转的物体泛称为旋转体。在各种机械设备中,由轴承支承并绕自身轴线旋转的零件或部件通常都简称为转子。例如电机转子、涡轮机转子、机床主轴、内燃机曲轴、陀螺仪转子、叶轮、飞轮、车轮、螺旋桨、机械钟表的摆轮等等。见图 1-1。



(a) 汽轮机转子



(b) 电机转子



(c) 风电设备叶轮

图 1-1 形形色色的转子

日常生活中不难发现,机械振动是一个十分普遍存在的物理现象。振动对于各种机械设备、车辆都是有害的,它会影响机械设备的运行状况和工作精度,给人带来不舒适感和环境的噪声污染,严重的机械振动甚至会酿成机毁人亡的重大事故。各类机械设备在运行时,由于其转子质量分布的不均衡不对称常常是引发振动的重要激励因素。而转子的机械平衡则是旨在调整转子的质量分布,将转子在运转时由原先因质量分布不均衡不对称而引发的轴颈的振动或作用轴承上的动压力减少到技术规定的允许范围内。所以说,转子的机械平衡是旨

在减小机械振动,保证机械设备平稳运行的一项必不可少的重要技术措施。

国内外的无数实践都告诉我们,各类工业转子经过机械平衡(当然不是敷衍了事的平衡,而是认真的精细的平衡)以后,通常都会收到十分显著的效果:首先是减小了机器的振动,降低了噪音(见图 1-2),使工人的工作环境和乘客的舒适感会有很大的改善;其次是,机床如磨床、车床的加工精度有所提高、工件的表面粗糙度(光洁度)有所减少;再者是,对提升整台机械的运行效能、工作质量,确保安全生产,延长各种机械产品的寿命,促进机械产品质量升级换代都有着重要意义。

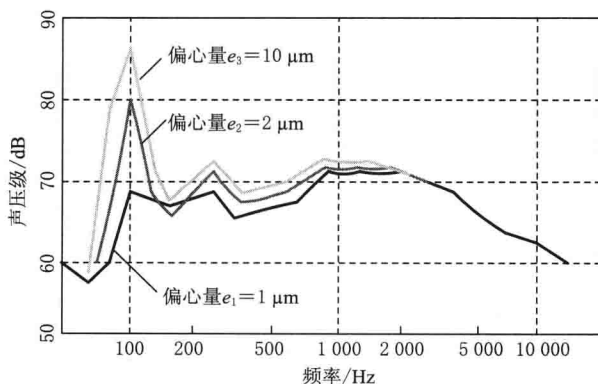


图 1-2 具有不同剩余不平衡量的主轴部件发射空气声波的频谱*

可以这样说,任何机械制造业——从航天航空工业到汽车制造业,从国防尖端工业到轻纺机械制造业,从动力工业到一般机电制造业——都离不开转子的机械平衡技术。

1.2 转子的不平衡离心力

动力学告诉我们,当物体绕自身某轴线旋转运动时,构成转子的所有质点都会产生离心惯性力。如图 1-3 所示的一圆盘转子,当它绕其旋转中心 O 点以角速度 ω 旋转时,圆盘上任一质点 i 的离心惯性力为

* 摘自:杨玉致.机械噪声控制技术.北京:中国农业机械出版社,1983.

$$\mathbf{F}_i = m_i \omega^2 \mathbf{r}_i \quad (1-1)$$

式中, m_i ——质点 i 的质量/kg;

ω ——转动角速度/ $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$;

$\mathbf{r}_i$ ——质点 i 相对于 O 点的矢径, 其模的单位为 m 。

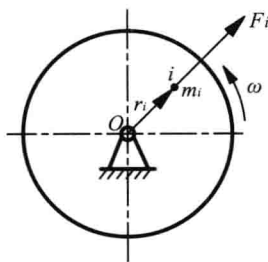


图 1-3 质点的离心惯性力

该力的单位为牛(顿)(N), 其方向与质点 i 所在位置的矢径 $\mathbf{r}_i$ 方向相同, 即背离旋转中心 O 点向外。因此, 此惯性力 $\mathbf{F}_i$ 被命名为质点的离心惯性力, 一般都简称为质点的离心力。

显然, 圆盘上所有质点都会存在这样的离心力, 它们的方向也都是自旋转中心向外。由这么多质点离心力所形成的力系为一个平面汇交力系。按照汇交力学的合成原理, 构成整个圆盘转子的所有质点离心力的合力 $\mathbf{F}$,

$$\mathbf{F} = \sum \mathbf{F}_i = \sum m_i \omega^2 \mathbf{r}_i \quad (1-2)$$

如果组成转子的圆盘及其转轴的材质分布均匀, 且其尺寸形状完全对称, 圆盘与转轴严格相互垂直, 那么, 当转子旋转时任何质点 i 的矢径 $\mathbf{r}_i$ 和与其相对称的质点 $\mathbf{r}_i^*$ 的矢径存在着关系 $\mathbf{r}_i^* = -\mathbf{r}_i$, 则质点 i 的离心力 $\mathbf{F}_i$ 和与其相对称的质点 i^* 的离心力 $\mathbf{F}_i^*$ 大小相等, 方向相反, 又都位于过旋转中心 O 点的同一直径上, 结果两力相互平衡抵消。这样, 构成转子的所有质点的离心力的合力为零, 即 $\mathbf{F} = \sum \mathbf{F}_i = \mathbf{0}$ 。合力为零的力系被称为平衡力系。这时, 对于支承转子的轴承而言, 不论转子旋转与否, 轴承所受到的外力仅仅只是转子的重力, 这是一种大小、方向都保持不变的静压力。应该说, 这是一种理想的情况。而实际上, 圆盘及其转轴的材质不太可能是均衡的, 其尺寸形状不可能加工制造得没有丝毫的误差, 装配中的同轴度、垂直度也不可能完全