

高速转子动平衡技术

邓旺群 任兴民 著



科学出版社

高速转子动平衡技术

邓旺群 任兴民 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以高速转子动平衡为核心内容,从单盘转子、多盘转子到实际复杂转子的高速动平衡,特别是高速柔性转子瞬态动平衡进行全面论述,其中还包括瞬态动平衡的原理、方法及对相关主要因素的适应性等。高速柔性转子的动平衡试验部分包括试验技术、减振技术、单元体平衡技术等。

本书适合航空发动机、旋转机械、转子动力学等研究领域的高校教师、研究生、工程技术人员阅读,也可作为相关专业的研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

高速转子动平衡技术/邓旺群,任兴民著. —北京:科学出版社,2017.3
ISBN 978-7-03-052241-2

I. ①高… II. ①邓…②任… III. ①高速转子-动平衡-研究 IV. ①TH133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 054860 号

责任编辑:牛宇锋 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017 年 3 月第一次印刷 印张:17 1/2

字数:338 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

在国务院颁布的《中国制造 2025》中,航空装备是需要大力推动的重点领域之一,其中指出“突破高推重比、先进涡桨(轴)发动机及大涵道比涡扇发动机技术,建立发动机自主发展工业体系。”因此,研制先进航空发动机是建设创新型国家、提高我国自主创新能力和增强国家核心竞争力的重大战略举措。

高速和柔性是现代先进航空发动机转子的主要特点,其不平衡是导致航空发动机振动的主要原因之一。过大的不平衡会使转子产生较大变形和应力,导致连接松动、轴承负荷过大、工作不良以至于损坏。据有关资料统计,不平衡故障约占转子故障总数的 30%以上。对转子进行严格的动平衡,是降低航空发动机振动,提高使用安全性、可靠性和寿命的重要措施,它贯穿于发动机的制造、安装、使用和维护的各个环节,在航空发动机的研制中占有非常重要的地位。

转子动平衡通过在转子上去除材料或添加配重的方法来改变转子的质量分布,使转子由于偏心离心力引起的振动或作用在轴承上、与工作转速一致的振动力减小到规定的允许范围之内,以达到机器平稳运行的目的。影响系数法和振型平衡法是柔性转子平衡中的两种基本的方法,经过许多年的发展和工程实践,在工程中已取得较好应用。在实际平衡过程中,传统的柔性转子平衡方法和理论面临一些新问题:一是实际的航空发动机转子多数都是依靠高压燃气驱动,因而很难精确稳定在某一转速下运转,用传统的稳态平衡理论对其进行平衡将存在一定的困难。二是平衡转速接近转子的临界转速,长时间在该转速下停留测量对航空发动机十分不利。三是需要进行多次试车才能确定校正质量,平衡周期长、费用比较高。因此,结合发动机转子实际运行的特点,研究一种基于过临界响应信息的、启车次数少的瞬态动平衡方法具有重要的理论意义和实用价值。

本书提出的利用航空发动机高速柔性转子加速起动瞬态响应信息进行转子不平衡识别,是对经典动平衡理论的发展,可提高航空发动机转子动平衡的效率,具有重要的工程应用价值,可推广应用在航天、化工、钢铁、冶金等行业中高速旋转机械的转子动平衡试验中,为这些行业的转子设计和试验提供技术支持。

本书以高速转子动平衡为核心内容,从单盘转子、多盘转子到实际复杂转子的高速动平衡,特别是对作者提出的高速柔性转子瞬态动平衡进行全面论述,包括瞬态动平衡的原理、方法、适应性等。书中另一部分内容是高速柔性转子的动平衡试验,包括试验技术、减振技术、单元体平衡技术等。

本书可作为相关专业的研究生教材,也可作为相关工程技术人员的参考用书。
不当之处请批评指正。

作 者
2016 年 8 月

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 转子动平衡技术研究现状	3
1.2 传统柔性转子平衡方法的发展过程	4
1.3 传统柔性转子平衡方法的优化和改进	4
第 2 章 转子平衡技术	7
2.1 转子平衡的概念和基本理论	7
2.1.1 转子平衡的分类	7
2.1.2 柔性转子平衡方法	8
2.2 转子的动平衡技术	10
2.2.1 转子产生不平衡的原因及不平衡所引起的振动特点	11
2.2.2 柔性转子平衡的条件、特点、评价标准、目的和要求	11
2.2.3 转子自动平衡技术	13
2.3 动平衡工艺	14
2.3.1 转子质量与许用不平衡量	14
2.3.2 平衡品质等级与工作转速和许用不平衡度的关系	14
2.3.3 平衡品质的确定	17
2.3.4 确定转子是刚性的还是柔(挠)性的方法	18
2.3.5 一般试验测量设备	19
2.4 小结	19
第 3 章 单盘转子的瞬态响应及其瞬态平衡	20
3.1 Jeffcott 转子的瞬态响应	20
3.1.1 瞬态运动方程	20
3.1.2 Newmark 积分方法	21
3.1.3 瞬态响应分析	22
3.1.4 转子瞬态不平衡响应图的叠加	29
3.2 单盘转子的瞬态平衡	32
3.2.1 单盘转子的瞬态运动规律	33
3.2.2 单盘转子的瞬态平衡理论	33

3.3	平衡算例	34
3.4	复杂柔性转子瞬态运动方程	39
3.5	转子瞬态响应的计算和分析	45
3.5.1	求解方法的有效性验证	45
3.5.2	加速瞬态响应分析	47
3.6	小结	51
第4章	基于升速响应信息的柔性转子瞬态平衡	53
4.1	转子的模态不平衡方位角	53
4.2	模态不平衡方位角的识别	55
4.2.1	单盘转子不平衡方位角的识别	55
4.2.2	多盘转子不平衡方位角的识别	59
4.3	基于加速响应信息的柔性转子瞬态平衡	62
4.4	平衡算例	65
4.4.1	平衡方案 I: 前两阶模态依次平衡	65
4.4.2	平衡方案 II: 前两阶模态同时平衡	66
4.5	小结	69
第5章	利用升速响应振幅进行柔性转子的模态平衡	70
5.1	三圆平衡法简介	70
5.2	平衡理论	72
5.2.1	测点模态比	72
5.2.2	利用升速响应振幅计算测点模态比	73
5.2.3	试重组的分解	73
5.2.4	基于升速响应振幅的柔性转子模态平衡	74
5.3	仿真平衡	75
5.4	小结	78
第6章	柔性转子瞬态平衡的影响因素研究	79
6.1	柔性转子瞬态平衡的影响因素	79
6.2	转子的升速率	79
6.3	转速波动	85
6.3.1	转速受噪声干扰	86
6.3.2	指数规律升速	94
6.4	支承非线性	100
6.4.1	支承刚度非线性	100
6.4.2	支承阻尼非线性	102
6.5	小结	103

第 7 章 柔性转子瞬态平衡试验研究	105
7.1 试验装置和测量设备	105
7.2 数据处理方法	107
7.2.1 Hilbert 变换求取转子的瞬态动挠度	107
7.2.2 低通数字滤波	108
7.3 瞬态平衡试验	110
7.3.1 单盘转子瞬态平衡试验	110
7.3.2 基于加速响应信息的转子双面瞬态平衡试验	115
7.3.3 利用升速响应振幅进行柔性转子平衡试验	117
7.4 小结	121
第 8 章 涡轴发动机动力涡轮转子动力特性理论研究	122
8.1 动力涡轮转子动力特性分析	123
8.1.1 计算模型	123
8.1.2 临界转速	126
8.1.3 振型	127
8.1.4 不平衡响应	128
8.2 动力涡轮转子动力特性影响因素	131
8.2.1 弹支刚度的影响分析	131
8.2.2 主要构件的影响分析	136
8.3 小结	151
第 9 章 涡轴发动机动力涡轮转子动力特性试验研究	153
9.1 试验及测试设备	153
9.1.1 试验设备	153
9.1.2 测试设备	153
9.2 动力特性试验	153
9.2.1 试验准备	155
9.2.2 试验步骤	157
9.2.3 试验结果	158
9.2.4 影响动力涡轮转子动力特性的其他因素	171
9.3 动力涡轮转子超速试验研究	172
9.3.1 支座振动加速度	172
9.3.2 转子挠度曲线	173
9.3.3 结果分析	175
9.3.4 超速试验小结	175
9.4 小结	176

第 10 章 细长轴转子高速动平衡方法研究	177
10.1 传动轴组件在低速动平衡机上的振动特性	177
10.2 平衡卡箍的设计加工及强度校核	178
10.2.1 平衡卡箍的设计加工	178
10.2.2 平衡卡箍的强度校核	179
10.3 平衡卡箍的考核试验	180
10.3.1 在模拟轴上的考核试验	180
10.3.2 动力涡轮模拟实心轴上的考核试验	184
10.4 平衡卡箍对发动机动力涡轮轴组件和转子动力特性的影响	187
10.4.1 理论分析	187
10.4.2 试验验证	192
10.5 平衡卡箍的设计优化	193
10.6 小结	195
第 11 章 涡轴发动机动力涡轮转子高速动平衡试验技术研究	196
11.1 动力涡轮转子的结构特点及平衡难点	196
11.2 动力涡轮转子的高速动平衡技术	197
11.2.1 平衡特点	198
11.2.2 平衡要素的确定原则	198
11.2.3 平衡工艺	199
11.3 动力涡轮转子的高速动平衡试验	201
11.3.1 高速动平衡试验步骤	201
11.3.2 高速动平衡试验	205
11.3.3 装实心转动轴动力涡轮转子的高速动平衡试验	216
11.3.4 有关高速动平衡试验几个重要问题的分析	218
11.4 扭测基准轴不平衡量的估算方法	220
11.4.1 通过高速动平衡试验估算测扭基准轴的不平衡量	220
11.4.2 分析与建议	222
11.5 影响动力涡轮转子平衡状态的因素研究	223
11.5.1 考核过程	223
11.5.2 试验结果	225
11.5.3 试验结果分析	227
11.6 小结	230
第 12 章 转子高速动平衡技术在涡轴发动机整机减振中的应用	232
12.1 动力涡轮转子平衡破坏后的整机振动情况	232
12.1.1 振动和频谱分析	233

12.1.2 压气机转子前弹支应变	236
12.2 动力涡轮转子重新高速动平衡试验	237
12.3 转子重新高速动平衡后的整机振动情况	240
12.3.1 振动和频谱分析	240
12.3.2 压气机转子前弹支应变	244
12.4 小结	245
第 13 章 涡轴发动机动力涡轮单元体高速动平衡试验研究	246
13.1 高速动平衡及装配不平衡考核试验	246
13.1.1 高速动平衡及装配不平衡考核试验结果	247
13.1.2 特征转速下的挠度值对比分析	251
13.1.3 临界转速分析	255
13.1.4 高速动平衡及装配不平衡考核试验小结	255
13.2 动力涡轮单元体的高速动平衡试验	256
13.2.1 动力涡轮单元体的结构及其在试验中的安装与测试示意图	256
13.2.2 动力涡轮单元体的动力特性计算	257
13.2.3 动力涡轮单元高速动平衡试验转接段设计及后支座调心	260
13.2.4 动力涡轮单元体的高速动平衡试验	262
13.3 小结	266
参考文献	267

第 1 章 绪 论

转子动力学是研究所有与旋转机械转子及其部件和结构有关的动力学特性的科学,包括转子平衡、振动、动态响应、稳定性、可靠性、状态监测、故障诊断以及振动控制等。主要研究方向有:转子系统的动力学建模与分析计算方法;转子系统的临界转速、振型与不平衡响应分析计算;转子支承系统各类轴承的动力学特性分析;转子系统的稳定性分析;高速转子动平衡技术;转子系统的故障模式和机理、动态特性、监测方法和诊断技术;密封动力学;转子系统的非线性振动、分叉与混沌;转子系统的电磁激励与机电耦联振动;转子系统动态响应测试与分析技术;转子系统振动与稳定性控制技术;转子系统的线性与非线性设计技术与方法等^[1]。

转子动力学的发展是与大工业的发展紧密相关的。1869 年,Rankine^[2]发表的题为“论旋转轴的离心力”的论文是第一篇有记载的研究转子动力学的文献。文章关于“转轴只能在一阶临界转速以下稳定运转”的结论使转子的工作转速一直限制在一阶临界转速以下。1919 年,Jeffcott^[3]通过对简单模型转子(该模型 1895 年由 Foppl^[4]提出)的研究,得到了在超临界运行时,转子会产生自动定心现象,因而可以稳定工作的结论。20 世纪 20 年代起,各国设计生产了很多种超临界工作的涡轮、压缩机、泵转子等,但在使用中不断发生严重的振动事故。美国通用电气公司的研究实验室对转子支承系统的稳定性进行了一系列的试验研究。1924 年,Newkirk^[5]指出转子的这类不稳定现象是油膜轴承造成的,确定了稳定性在转子动力学分析中的重要地位。Lund^[6]在稳定性研究领域也作出了重要的贡献。

20 世纪 50 年代以来,随着电力、航空、航天、石化、船舶等工业的飞速发展,各种旋转机械向高速、重载、自动化方向发展,在国防及国家经济建设中的作用越来越突出,对转子动力学的研究也提出了更重、更新的任务,以满足在旋转机械设计及使用中提出的更高要求^[7]。

转子动力学设计是旋转机械设计中的重要环节。它的主要任务是:预计临界转速,预计转子不平衡引起的振动响应,预计转子失稳的门槛转速,预计转子在叶片丢失、加速或减速等瞬态过程中的响应等。为工程设计提供实用、准确的计算和试验方法,是转子动力学研究的主要目的^[7]。

事实上,转子是不可能做到完全平衡的,转子不平衡引起的转子系统和发动机的振动是强迫振动,它使转子作正同步进动。这种过大振动常在转子临界转速或其附近发生。发动机常常因振动过大不敢开车通过转子临界转速。因此研究解决转子不平衡引起的过大振动问题也常与解决转子系统的临界转速问题关联在一

起。转子系统是发动机中最重要的部件,转子的不平衡量过大将引起整机振动过大,转子零件也将发生较大应力和变形、连接松动、轴承负荷过大、工作不良以至于损坏。转子变形过大则产生动、静件的碰摩,以及许多零组件的振动、疲劳、损伤。振动传到飞机上则会引起飞机零、组件振动,影响到仪表正常工作、精度、寿命,并引起飞机零组件的疲劳损伤,严重时将造成飞行事故^[8]。

平衡精度反映转子平衡性的好坏,平衡精度越高表示转子平衡得越好。平衡精度既考虑转速又考虑偏心矩的影响。刚性转子的平衡精度等级有国际标准可循,共分为 11 级,从 G0.4 到 G4000 按比值为 2.5 的等比级数递增排列。柔性转子的平衡尚没有统一的标准可循,不能用不平衡量的大小来表示其平衡性的好坏,而是直接用转子振动(位移、速度、加速度或过载系数)的大小来衡量转子平衡的好坏。尚未见有正式的文件对柔性转子允许的不平衡量作出规定,主要用允许的发动机振动量大小来确定柔性转子的允许不平衡量。因在生产中柔性转子仍需要在低转速按刚性转子进行静、动平衡,并且有的柔性转子还是用刚性转子平衡法进行平衡,所以目前仍规定其允许的刚性转子的不平衡量。

对于航空发动机而言,成功的转子动力学设计应满足如下要求^[7]:

(1) 转子应避免临界转速工作,若需越过临界转速时,应使其动态响应尽可能小;

(2) 转子工作过程中,叶尖、密封间隙应尽可能小,但不致发生碰摩;

(3) 不发生转子动力失稳。

为了达到所要求的转子动力学特性,必须满足五项主要设计准则^[7]:

(1) 容许的转子临界转速;

(2) 容许的挠曲应变能;

(3) 适当的转子和静子之间的间隙;

(4) 容许的支承结构载荷;

(5) 容许的转子稳定性储备。

这五项设计准则的根本目的是保证重量轻、转速高的航空发动机不仅能安全可靠运行,而且性能好、寿命长。

现代航空涡轮轴发动机多为中小型发动机,是一种高转速(燃气发生器转速高达 30000~50000r/min,动力涡轮转速在体内减速器减速之前亦达 20000~30000r/min)、高压比、高温度的发动机,主要是作为直升机的动力。鉴于中小型涡轮轴发动机转速高、径向间隙小的特点,要求转子的挠度小、径向间隙变化小。这给转子轴系的设计和高速转子动力特性设计带来了新的问题和困难,直接关系到发动机研制的成败。减小振动、控制间隙以减小性能损失,以及降低支承结构载荷是转子动力学设计准则所涉及的关键内容。为了满足日益增长的发动机高功重比要求,希望设计出柔性更好的转子和重量更轻的结构,使得发动机成为非常柔性的

结构。影响和制约这一设计要求的主要因素是如何控制发动机系统的振动。航空涡轮轴发动机在很多情况下采用前输出轴方案及套齿结构,由于动力传动轴需穿过燃气发生器转子内腔,伸到发动机前端,即动力传动轴支承之间的跨度不可能短于燃气发生器转子的长度,导致动力涡轮转子很可能在高于弯曲临界转速之上工作,因此,有必要进行柔性转子高速动平衡并配置外部阻尼器。美国 T700 涡轮轴发动机就采用了前输出轴方案,它是一台典型的转子系统成功超越弯曲临界转速工作的发动机。其动力涡轮转子在工作转速以下有两阶临界转速,临界转速下的转子应变能分别为 26% 和 61%,均超过 25%。两阶临界转速均属于弯曲临界转速,特别是第二阶临界转速更明显,因此在 2 号轴承和 5 号轴承位置设计有挤压油膜阻尼器^[8]。追求高功重比一直是航空涡轮轴发动机研制的重要目标之一,发动机转子越来越细长,静子部件采用大量的柔性结构,以致整机振动故障成为发动机最常见的故障之一。减小整机振动的主要方法有:

- (1) 临界转速设计符合要求;
- (2) 提供足够的阻尼;
- (3) 适当的平衡;
- (4) 避免机匣共振;
- (5) 排除故障(如振荡燃烧、失稳、喘振或失速、叶片断裂、碰摩等)。

可见,转子平衡在航空发动机的研制中占有重要地位。转子平衡是在转子制成后采取的一种减振措施。通过在转子某些截面上增加或减小质量,使转子的重心和其几何中心靠近,以及使主惯性轴尽量和旋转轴线靠近,以减小转子工作时的不平衡力、力偶或在临界转速附近的横向振动量,从而减小转子系统及整机的振动。

1.1 转子动平衡技术研究现状

随着转子动力学的发展,其平衡理论也在不断地发展、成熟和完善。1907 年,德国的拉瓦切克(Lawaczeck)制造出了世界上第一台动平衡机,随后黑曼(Heyman)对其进行了改进,使之付诸于工业应用。1934 年,Thearle^[9]首先提出了采用影响系数的两平面校正法,它标志着转子动平衡方法基本思想的确立。随后转子动平衡技术经历了两个历史性的发展阶段:①20 世纪 30 年代到 50 年代是刚性转子动平衡技术的发展阶段,在此期间,几乎所有的平衡研究工作都限于刚性转子的平衡及平衡机在刚性转子平衡中的应用。②从 20 世纪 50 年代开始,随着旋转机械向高速、重载方向发展,许多转子被设计在一阶,甚至二阶临界转速以上运行,这样原来的刚性转子平衡方法已无法保证机组的平稳运行,随之开始了柔性转子动平衡的研究。

刚性转子由于其工作转速相对较低,运行过程中不考虑转子本身的弯曲变形,且其平衡状态不受转速的影响,平衡原理比较简单,采用双面加重的方法完全能满足平衡要求,故在 20 世纪 30 年代后期其平衡理论已近成熟,到了 40 年代已形成了正式的国际平衡精度标准 ISO1940。在转子平衡理论发展的初期,人们就采用平衡机对刚性转子进行平衡,大大节省了平衡的解算过程,提高了平衡效率。从最初的软支承平衡机到后来的硬支承平衡机,以及大型真空动平衡设备,目前已经有各种各样的专用或通用动平衡机可供选择。

1.2 传统柔性转子平衡方法的发展过程

自 20 世纪 50 年代末开始提出柔性转子动平衡的理论以来,这项技术发展的很快,目前已趋于完善。传统的柔性转子动平衡方法可以归纳为两大类:一类是以 Federn、Bishop、Kellenberger 等为代表所提出的振型平衡法,或称为模态平衡法;另一类是以 Thearle、Baker、Goodman 为代表所提出的影响系数法,该方法可以看作是刚性转子的双面平衡法在柔性转子系统中的推广。由于技术的限制,早期的平衡方法不可能严重依靠测量和计算工具,这种情况下,模态平衡法首先应运而生。从 20 世纪 80 年代开始,随着转子动平衡理论的逐步成熟,其在各种大型旋转机械的平衡中得到了广泛的应用。转子动平衡技术进入了全新的发展阶段。

1.3 传统柔性转子平衡方法的优化和改进

随着转子系统应用日益广泛,各种与平衡相关的问题不断出现。在传统稳态平衡方法的基础上,针对平衡过程中的一些实际问题,人们提出了不同的改进方法,可归纳如下。

1. 优化平衡技术

在减小转子质量不平衡振动的各种平衡方法中,影响系数法是一种十分有效的方法,在工程实际中得到了广泛的应用。在影响系数的总体框架下,最小二乘法(LS)和最小化极大残余振动法(Min-max)是两类非常重要的优化平衡方法。

2. 无试重平衡方法

传统的转子平衡方法,无论是模态平衡法还是影响系数法,其基本过程都包括测量转子初始不平衡振动、添加平衡试重、测量添加试重后转子的振动,现场平衡时甚至要多次重复该过程。因此,用传统平衡方法进行柔性转子平衡是一个费时、费事的过程,一般都需要转子的多次起停车,这无疑降低了平衡的效率。如何在保

证动平衡精度的前提下尽可能减少平衡过程的起车次数,缩短平衡周期,许多研究者进行了大量卓有成效的工作。其中,无试重动平衡已成为一个重要的研究内容。转子的无试重平衡方法,是根据测量得到的转子振动来模拟实际的转子系统,从数学上来预测转子的不平衡量,这样就省去了加试重、试运转等复杂环节。转子的无试重平衡法属于一种典型的动力学反问题,它实际上是一个转子-轴承系统的逆向求解过程。在这个过程中,转子的平衡配重一般通过非线性规划来进行求解。转子的无试重动平衡技术始于20世纪70年代,近40年来已取得了很大进展,其平衡效果一次可达到80%以上。

3. 转子自动平衡技术

旋转机械在线自动平衡的本质就是要在不停机的情况下,在线地重新改变转子的质量分布,以抵消由于转子在运行中产生的不平衡量(或不平衡量的改变),使转子的惯性主轴和旋转主轴重合,达到减振的目的^[10,11]。这一设想在19世纪末就有人提出,其后又有许多专家和工程技术人员从事这方面的研究,提出了许多可行的方案,并进行了试验。目前,转子自动平衡装置可分为两大类:被动式自动平衡装置和主动式自动平衡装置,但是一种合理的、可靠的、适应现代技术发展的自动平衡装置还不多见,只在磨床或实验室中的某些单盘转子上有较成功的应用。

4. 多传感器信息集成和融合

传统的柔性转子平衡所利用的振动信息,都是用一个传感器从转子单向采集的,使用的都是单维信息。这样做是基于转子系统各向刚度相等的假设,在转子各向刚度存在明显差异时,传统的平衡方法必然会带来误差,降低平衡的精度和效率。1989年,西安交通大学的屈梁生院士提出了全息动平衡技术^[12],该方法实现了将转子多向传感信息有机地集成和融合,更加真实全面地反映出转子的振动状态,提高了平衡的效率和精度。全息动平衡方法首先利用全息谱技术,精确地求出各传感器拾取信号的幅值、频率和相位,作出各个数据采集面的二维全息谱及转子转频下的三维全息谱,然后,利用二维和三维全息谱分析转子的振动行为,判断失衡状态,选择平衡面。最后利用转子的试重轨迹和移相椭圆来完成平衡计算。1998年,屈梁生院士^[13]对全息动平衡方法作了全面的总结,在分析全息谱技术应用于动平衡领域的可能性与优势的基础上,介绍了全息动平衡方法的基本概念,如试重椭圆、初相点和移相椭圆等。此后,其课题组成员邱海、徐宾刚等^[14,15]对全息动平衡方法进一步进行了补充说明。Liu^[16]基于自适应神经网络推理系统(ANFIS)和全息谱的信息融合技术,提出了一种新的柔性转子现场平衡方法。通过全息谱技术可充分利用来自传感器的振动信息,利用ANFIS建立模拟振动响应和平衡重量之间影响关系的网络模型。实验结果表明,基于ANFIS的网络平衡模

型能获得满意的平衡结果,具有现场平衡前景。Liu^[17]针对工作在一阶临界转速之上的柔性转子,传统上需低速刚体平衡和高速平衡两个阶段来实现平衡目的所带来的不足,发展了一种低速全息平衡方法(LSHB)。LSHB的原理主要基于全息谱技术,通过多个传感器的组合来构成清晰而精确地描述转子振动响应的一个三维全息谱,然后根据全息谱的分解结果,LSHB可以在一个低于一阶临界转速的低转速下很容易地平衡柔性转子。由于LSHB不像其他传统平衡方法那样需要在高于一阶临界转速下的任何试运行,平衡过程更加安全而经济。

第2章 转子平衡技术

2.1 转子平衡的概念和基本理论

转子平衡就是通过在转子上去除材料或添加配重的方法来改变转子的质量分布,使转子由于偏心离心力引起的振动或作用在轴承上、与工作转速一致的振动力减小到规定的允许范围之内,以达到机器平稳运行的目的。转子平衡的具体目标是减少转子挠曲、减少机器振动以及减少轴承动反力。这三个目标有时是一致的,有时是矛盾的,但它们必须统一于平衡的最终目标——保证机器平稳地、安全可靠地运行。

2.1.1 转子平衡的分类

转子的平衡,按平衡时转子工作转速和临界转速之间的关系,可分为刚性转子平衡和柔性转子平衡,或者称为低速动平衡和高速动平衡。工程上一般把工作转速是否超过其一阶临界转速作为挠性转子与刚性转子的分界,但从平衡的角度可按如下方法区别刚性转子和柔性转子:当工作转速 ω 与一阶临界转速 ω_{c1} 之比满足 $\omega/\omega_{c1} < 0.5$ 时,为刚性转子;当满足 $0.5 \leq \omega/\omega_{c1} < 0.7$ 时,为准刚性转子;当满足 $\omega/\omega_{c1} \geq 0.7$ 时,为柔性转子。刚性转子与柔性转子的动力学特性有很大的不同,因而它们的平衡方法也有很大的差别。

按平衡平面的多少可将转子的平衡分为单面平衡、双面平衡和多面平衡。

(1) 单面平衡。单面平衡就是只用一个校正面就可进行的平衡,在下列两种情况下可进行单面平衡:①与直径相比轴向长度短的转子的平衡,如飞轮、离合器、风扇叶轮、皮带轮等的转子;②不平衡非常大的转子的预备平衡。

(2) 双面平衡。为使转子达到平衡,至少应在转子轴向位置不同的两个平面上加平衡校正量,这样的平衡称为双面平衡。

(3) 多面平衡。挠性转子一般进行多面平衡,由低速直到 N 阶临界转速都存在不平衡问题时,需要选择 N 平面法或 $N+2$ 平面法进行平衡。一些特殊的刚性转子,也需要进行多面平衡,如多缸曲轴等一般要进行多面平衡^[18]。

按平衡时转速是否变化分为稳态平衡和瞬态平衡。稳态平衡法是让转子稳定在一个或多个转速下对它进行平衡。现有的平衡方法,不论是影响系数法、模态平衡法,还是它们的改进方法,从本质上来说都是稳态平衡法。转子平衡时,理论上