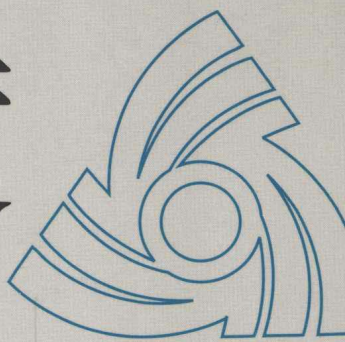


高加速度

旋转实验技术研究



The Rotary Experimental

Technique Study on High Acceleration

王成林 张之敬◎著

中国物资出版社

高加速度旋转实验技术研究

王成林 张之敬 著

中国物资出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

高加速度旋转实验技术研究 / 王成林, 张之敬著. —北京: 中国物资出版社, 2010. 12

ISBN 978 - 7 - 5047 - 3631 - 4

I. ①高… II. ①王… ②张… III. ①旋转机构—实验—研究
IV. ①TH21 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 247587 号

策划编辑 王宏琴

责任编辑 郑欣怡

责任印制 何崇杭

责任校对 孙会香 梁 凡

中国物资出版社出版发行

网址: <http://www.clph.cn>

社址: 北京市西城区月坛北街 25 号

电话: (010) 68589540 邮政编码: 100834

全国新华书店经销

北京京都六环印刷厂印刷

开本: 710mm×1000mm 1/16 印张: 13.5 字数: 214 千字

2010 年 12 月第 1 版 2010 年 12 月第 1 次印刷

书号: ISBN 978 - 7 - 5047 - 3631 - 4/TH · 0100

定价: 28.00 元

(图书出现印装质量问题, 本社负责调换)

序

高加速度实验技术是目前航天、航空领域的一项关键技术。在航天器运行过程中，由于工作状态的不断变化，组成部件的外部工作环境，特别是受力状态也随之改变，在发射阶段表现得尤为突出。组成部件的动态特性在高加速度加载条件下功能可能失效，导致航天器运行异常，因此微小型系统及结构件在高加速度运行环境下的动态特性对其工作可靠性的影响是制约航天航空技术发展的“瓶颈”问题之一。传统的高速冲击等实验方法由于受到各种因素的影响，实验获得的加速度值受到限制，实验数据不易测量，已经不能满足航天、航空发展的需要，因此必须引入新的实验方法。

本书作者根据自己多年的研究成果，提出了基于刚性传动高速传动链的大惯量固体旋转实验机设计思想，取得了较多的创新性研究成果，特别是提出了适合高速旋转装置使用的机构总体优化设计技术，进行了转子在高速旋转状态的力学特性分析和优化设计技术研究，同时利用新的实验技术进行了高频减振技术研究，研发了适合高速旋转装置使用的整机减振装置；并在分析高速传动系统不平衡量分布的特点接触基础上进行了整机动平衡保障技术研究，对多工作参数集成监控技术也进行了有益的探讨。在上述技术的基础上作者研制了新型的高速旋转实验机，利用高速旋转产生向心加速度的原理来模拟微小型结构件高加速度加载环境，并获得了成功，成功地填补了国内相关技术领域的空白。

本书比较系统地建立了高加速度旋转实验技术的理论体系，内容丰富、论述严谨，并具有较高的实际工程应用价值。解决了优化设计、减振、动平

衡等该领域的核心问题，提出了固体减振、变轮廓转子设计等创新设计思想，对该领域的技术发展起到了很好的推动作用。相信本书能够为该领域的研究人员提供有益的技术参考，希望本书的出版能够进一步地促进相关领域的研究发展，为我国的航天、航空事业作出更多的贡献。

张之敬

2010年3月于北京理工大学

前 言

在高加速度加载条件下,实验对象由于受到外力作用会发生各种特征改变。以飞行器的组成部件为例,特别是在发射阶段,会因组成部件在高加速度加载条件下产生的力学变形而导致功能失效,严重影响整机安全工作,对在高加速度承载条件下工作的一些微小型组件系统的影响更为突出,是制约其工作可靠性的瓶颈问题之一。因此,模拟微小型系统在高加速度运行环境的实验装置的研发,对于解决传统的以发射方式进行高加速度加载实验的问题,具有重要的理论意义和实用价值。

本书介绍了北京理工大学微小型机械制造工艺与装备技术课题组在国防基础研究和“九八五”建设经费资助下所进行的固体集中质量高加速度加载的高速旋转实验技术研究的部分成果,重点介绍了高速旋转产生向心加速度的原理,来模拟微小型结构件高加速度加载环境的实验系统总体技术和在整机动态特性优化、高转速下的实时动平衡、过载保护以及转子优化设计等关键技术的解决途径,其主要内容如下:

(1) 高加速度旋转实验机系统结构总体技术。在深入分析传动系统连接机构动力学模型及其工作特性的基础上,提出了适合固体大质量高加速度旋转实验使用的刚性连接技术;并通过对系统关键子机构动力学特性的分析,研究了适合高速刚性连接方式的过载保护技术;并利用模块化设计思想,优化了高速刚性传动系统的加工、装配工艺方案。

(2) 转子力学特征分析及优化设计技术。通过对实验托盘的力学特性分析,提出了适合高速旋转实验托盘使用的变厚度非线性优化设计技术;在分析标准轴孔配合动力学模型以及实验对象安装多体耦合非线性动力学模型的

基础上,研究了转子在各种安装配合条件下的力学特性,得到了适合固体集中质量高加速度实验的装配方法。

(3) 高加速度旋转实验机整机动态特性分析。在分析固体集中质量高加速度实验特性的基础上,提出了基于刚性轴、大驱动力矩的动力学特性设计方法,建立了整机动力学模型,通过对整机模态、谐响应和瞬态动力响应的计算与分析,得出了改善整机动态特性的具体措施。

(4) 高加速度旋转实验机高频减振技术。根据高速刚性连接传动系统的特点,进行了固体减振技术研究,研究了可进行多方向振动能量衰减的小尺寸、高刚度减振装置;以基础激振—共振质量法为基础,进行了环形阻尼部件的动态特性实验测试方法研究,为减振装置的优化设计提供了理论依据,并以晶粒相对运动粘弹性动力学模型的分析为基础,进行了环形阻尼部件的动态特性理论研究。

(5) 高速传动系统动平衡技术。结合高速旋转装置的工作特点,在分析了不平衡量的来源以及在传动系统分布特点的基础上,进行了高速、多体传动系统的动平衡技术研究,制定了组件离线平衡以及整机在线平衡结合的二次平衡方案,提出了校正质量的集成设计方法,使整机平衡精度在 40000 r/min 以上工况下国内首次达到了 G0.4 级。

(6) 高加速度旋转实验机的控制、振动测试及故障诊断技术。根据旋转实验机的信号特点,建立了具有双层控制体系、具备多工作参数集成检测、实时动态响应、高度集成操作环境的整机监控系统。

在以上相关理论和技术研究的基础上,研制了高加速度加载旋转实验机。该实验机最大可进行 10 万个 g (重力加速度) 动态特性加载实验,通过调整配套的成组装机卡系统可同时对三个几何尺寸小于 18mm、最大质量不超过 50g 的实验对象进行动态特性测试。可通过控制转速等工作参数满足 10 万个 g 以下任意时间长度、任意加速度值的实验要求,且对实验对象的几何形状没有严格限制,为后续进行更大质量结构实验的高加速度加载旋转实验装置的开发可提供理论和方法上的支持。

参加本书所涉及内容研究的项目组主要成员有课题组组长张之敬教授以

及王成林博士、金鑫博士、王西彬教授、张卫民教授、张虎博士等。

本书涉及的部分研究内容及出版得到了北京物资学院物流与采购科研平台、北京市物流系统与技术重点实验室、北京物资学院青年科研基金、北京博实盛业科技发展有限公司的资助，在此一并表示谢意。

目前高加速度实验技术仍然处于不断发展之中，热诚地欢迎各位专家学者对本书提出宝贵建议，希望能够通过与各位的交流提高相关领域的研究水平。

作 者

2010 年 11 月

目 录

1 绪 论	1
1.1 研究意义	1
1.2 高加速度旋转实验相关技术的研究和发展	1
1.2.1 高加速度加载实验技术的研究和发展	1
1.2.2 高速旋转设备的研究和发展	4
1.2.3 动平衡技术的研究和发展	5
1.2.4 高频减振技术的研究和发展	6
1.2.5 振动测试和故障诊断的研究和发展	7
1.2.6 动力学的发展和研究	8
1.2.7 优化设计的研究和发展	9
1.3 本书研究的主要内容	10
2 系统结构总体技术研究	12
2.1 结构总体方案优化设计技术	12
2.1.1 传动系统总体设计分析	13
2.1.2 传动系统连接方式及其动态特性对比分析	14
2.1.3 高速旋转条件下空气摩擦以及运行阻力分析	22
2.2 高速传动过载保护技术	26
2.2.1 弹簧球保护装置设计研究	26
2.2.2 力矩传递螺钉保护装置设计研究	29
2.2.3 剪切轴保护装置设计研究	34

2.3 高速传动系统支撑设计技术研究	35
2.3.1 间隙补偿法安装方法研究	36
2.3.2 上、下箱体优化设计方法研究	38
2.3.3 基于环形部件模态分析的上箱体结构设计	40
2.4 模块化设计方法研究	43
2.5 本章小结	44
3 转子力学特征分析及优化设计技术	45
3.1 高速旋转条件下的常规配合特性分析	45
3.1.1 过盈配合力学特性分析	45
3.1.2 补偿机构设计分析	49
3.1.3 平键配合力学特性分析	50
3.2 高速转子力学特性分析	52
3.2.1 带有安装孔的转子力学特性分析	52
3.2.2 通孔几何参数对转子力学特性影响分析	54
3.2.3 非通安装孔对转子力学特性影响分析	57
3.3 实验对象安装方式优化分析	60
3.3.1 实验对象力学特性分析	60
3.3.2 零间隙配合力学特性分析	61
3.3.3 小间隙配合力学特性分析	65
3.3.4 小过盈配合力学特性分析	66
3.3.5 实验托盘螺钉安装预紧力影响分析	66
3.4 实验托盘形状优化设计技术	69
3.4.1 非等厚度实验托盘力学模型	69
3.4.2 转动惯量最小原则优化分析	70
3.4.3 确定使用边界条件的优化分析	72
3.4.4 实验托盘的轴向外轮廓优化分析	77
3.5 本章小结	81

4 整机动态特性计算分析	82
4.1 动力学建模技术研究	83
4.1.1 动力学建模简化原则分析	83
4.1.2 整机的简化动力学模型	85
4.1.3 有限元实体建模分析	87
4.2 整机的临界转速计算分析	87
4.2.1 刚性轴设计方法动态特性分析	88
4.2.2 系统临界转速影响因素分析	88
4.2.3 临界转速计算分析	89
4.3 整机的谐响应分析	92
4.4 整机瞬态动力响应分析	95
4.5 改善动态特性的措施	99
4.6 本章小结	100
5 旋转实验机减振技术研究	101
5.1 整机振动分析	102
5.2 减振系统设计分析	103
5.3 阻尼材料的动态特性测试方法研究	105
5.3.1 阻尼材料动态特性测试原理分析	106
5.3.2 阻尼材料动态特性测试系统设计分析	107
5.3.3 装卡系统设计分析	109
5.4 新型阻尼材料锰铜合金的动态特性测试分析	111
5.4.1 刚度系数测试分析	111
5.4.2 阻尼系数测试分析	115
5.4.3 损耗因子测试分析	116
5.4.4 阻尼合金厚度影响分析	117
5.4.5 振动的激励力幅值与动态特性之间的关系分析	118
5.5 高聚物的运动理论分析	118

5.6 高聚物的动态特性测试分析	119
5.6.1 氟橡胶与丁氢橡胶动态特性测试分析	120
5.6.2 黑色阻尼橡胶动态特性测试分析	130
5.6.3 红色阻尼橡胶动态特性测试分析	134
5.7 本章小结	137
6 旋转实验机动平衡技术研究	139
6.1 高速传动系统的动平衡量分析	139
6.1.1 高速传动系统的不平衡量根源分析	139
6.1.2 高速传动系统的不平衡量的分布分析	141
6.2 系统动平衡方法分析	142
6.3 系动平衡系统设计分析	144
6.3.1 离线动平衡系统设计分析	144
6.3.2 在线动平衡系统设计分析	147
6.3.3 动平衡系统精度分析	152
6.4 整机动平衡量精度评定分析	153
6.5 本章小结	154
7 旋转实验机的控制、振动检测及故障诊断技术研究	156
7.1 整机监控系统设计分析	156
7.2 变频器控制技术研究	157
7.2.1 变频器的控制参数设置分析	158
7.2.2 转速差补偿技术研究	159
7.3 基于变频器的外设控制方法研究	163
7.3.1 变频器控制系统设计	164
7.3.2 故障信号响应方法研究	165
7.3.3 变频器抗干扰技术研究	166
7.4 振动检测系统设计分析	166
7.5 基于振动信号分析的整机工作特性分析	168

7.6 故障诊断技术研究	172
7.6.1 故障形式分析	172
7.6.2 故障诊断系统设计分析	173
7.7 本章小结	175
8 旋转实验机整机调试及高加速度加载实验分析	176
8.1 旋转实验机的子系统设计与调试	176
8.1.1 油气润滑子系统的设计与调试	176
8.1.2 液压冷却子系统的设计与调试	178
8.1.3 真空子系统的设计与调试	180
8.1.4 监控系统的调试分析	180
8.1.5 整机调试分析	181
8.2 高加速度加载实验分析	181
8.2.1 实验对象典型结构分析	182
8.2.2 高加速度加载实验与仿真验证	182
8.3 本章小结	186
参考文献	187
附录1 字符参数表	200
附录2 旋转实验机实物	201
附录3 机械执行机构实物	202

1 绪 论

本章阐述了利用高速旋转产生的向心加速度模拟微小型结构件高加速度加载环境,进行微小型结构件动力学特性分析实验的研究背景和意义,并介绍了高加速度加载实验相关技术的国内外发展和应用概况,提出了本书所研究的主要工作和各章的相关内容。

1.1 研究意义

微型机械研究发展至今已经能够制造出各种微器件,然而要将各种微器件有效地组合成具有一定功能的微机电系统就需要发展微机械设计理论研究,在理论研究的基础上,必须进行实验验证,从而证明相关理论的正确性。本书所涉及研究内容就是从此入手,研制微小型结构件及系统的动态特性实验装置,分析在高加速度加载情况下微小型结构件或系统的动态特征变化情况,对微小型结构件动态特性理论进行实验验证,从而建立起从理论研究到实验验证的综合平台,为仿真计算提供实验验证途径。

1.2 高加速度旋转实验相关技术的研究和发展

1.2.1 高加速度加载实验技术的研究和发展

目前已经出现了多种加速度实验技术,应用的范围也在不断地扩大,比如载人飞船的加速度模拟设备,可以让宇航员模仿太空的加速度环境,图 1-1 为加拿大开发的宇航加速度实验设备原理示意。

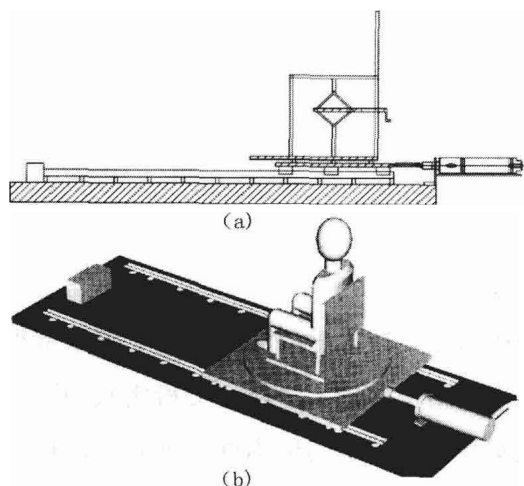


图 1-1 宇航加速度实验设备原理示意

器件和装置的持续抗高加速度过载能力的监测和判定除了实弹实验以外，主要还是采用高速冲击的方法来进行，采用这种实验方法虽然可以模拟实际需要的高加速度加载环境，但是实验能够获得的加速度值只能达到 2 万个 g ，而对于大加速度值加载实验并不适合。由于实验进行的时间比较短，实验数据的测量受到限制，很难达到较高的精度，而且实验带有很大的破坏性，多次重复实验时不能保证实验条件的同一性，效果并不理想，因此利用高速旋转产生向心加速度进行加速度加载实验是目前最有前景的实验方法。由研制的高加速度旋转实验机带动装卡在实验托盘上的实验对象旋转，通过调节实验对象的回转半径和工作转速可以获得所需的加速度值，其实验原理如图 1-2 所示。

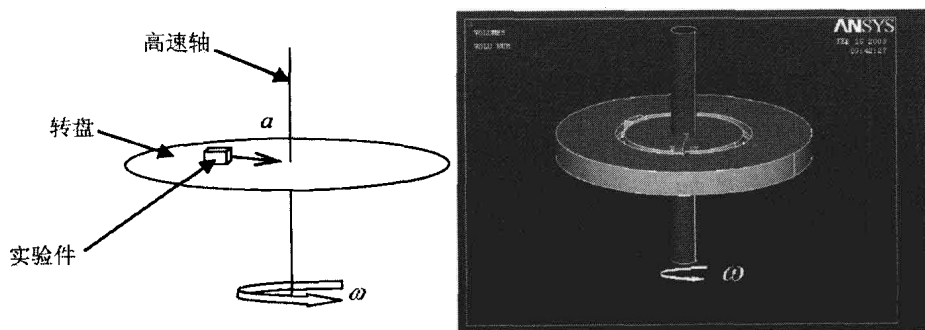


图 1-2 高加速度实验装置原理简图及仿真模型

目前国外已经开展了利用高速旋转产生向心加速度进行高加速度加载的实验研究,主要用于飞机、火箭等宇航设备的电子元器件在高加速度条件下的动态特性测试,并且能检测出冲击实验所不能检测出的结构缺陷。目前国外使用的高速旋转实验装置基本都已经达到了每分钟上万转,而且相关的加速度传感器和控制装置也已经比较成熟。图 1-3 为德国柏林大学研制的加速度实验装置。

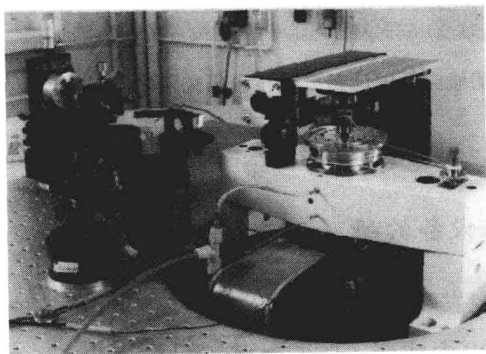


图 1-3 德国柏林大学研制的加速度实验装置

目前国内在此方面的研究还没有广泛开展,研究工作主要集中在低加速度阶段,还主要是采用冲击方法进行破坏性的高加速度加载实验,目前国内半导体行业微小型元器件的高加速度加载实验还没有超过 3 万个 g 。利用旋转原理研制的实验装置可进行的动态测试实验最大加速度值只有 100 个 g ,中国航天科技集团公司第一计量测试研究所加速度计动态测试及地面仿真设备的加速度值也只有 50 个 g ,因此高加速度加载实验领域还是空白。在前期技术研究方面,北京理工大学、上海大学、中国航空长城计量测试技术研究所和南开大学利用计算机仿真和虚拟技术进行高加速度加载方面的研究。其中,中国航空长城计量测试技术研究所研制的加速度加载实验设备如图 1-4 所示。

在高加速度加载实验领域,目前国内外的的发展趋势主要体现为提高转速,争取获得更大的加速度实验值。由于工作条件的特殊性,高速旋转装置需要解决润滑、高频减振以及过载保护等诸多关键问题,并要求具有良好的控制性能,使实验装置平稳运行;在信号检测方面和计算机信息处理方面满足高

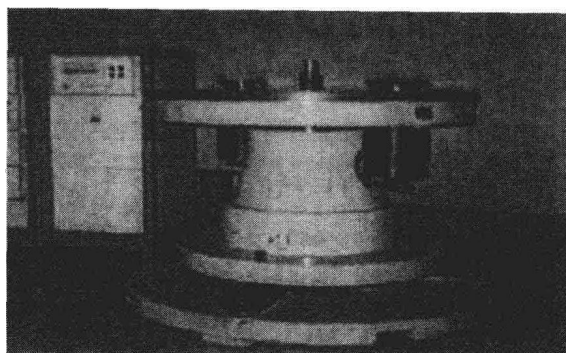


图 1-4 中国航空长城计量测试技术研究所研制的加速度加载实验设备

精度、实时性要求，建立包括实验、检测、数据分析为一体的综合实验平台。

1.2.2 高速旋转设备的研究和发展

燃气轮机、航空发动机、工业压缩机、离心机及各种电动机等高速旋转机械广泛地应用于电力能源、航空航天、机械、化工、纺织、医药等领域，起着非常重要的作用。

离心机是目前高速旋转设备最典型的应用。它是利用旋转产生的离心力模拟重力场作用，使不同密度、不同分子量的物质进行分离的仪器设备。美国 KENDRO 公司生产的 ULTRA 80 型离心机最高转速可达 80000r/min，最大离心加速度值可以达到 602644g；美国贝克曼库尔特公司生产的 Optima MAX 台式型离心机，最高转速为 130000r/min，最大离心加速度值高达 101900g；日本 HITACHI（日立）公司生产的 CP100MX 离心机最高转速已经达到 100000r/min，最大离心加速度值为 803000g，加速时间仅需 5min。最新研制的 CS150GXL 离心机是全球离心加速度最大（突破 1050000g）及转速最高（150000min）的超高速离心机。

液体离心机由于分离对象是连续的、无固定形状的物质，因此没有严格的安装、定位以及装卡要求。在工作状态下液体受到惯性离心力载荷作用，只是质量分布发生改变，其形状、位置等没有明显变化，实验过程中液体与实验装置均匀接触，整个接触区域的接触应力相等，没有局部的应力集中。