



中国建筑工业出版社  
学术著作出版基金项目

# 工业工程振动控制关键技术

徐建 尹学军 陈骝 著

中国建筑工业出版社

# 工业工程振动控制关键技术

徐 建 尹学军 陈 骝 著

中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

工业工程振动控制关键技术/徐建, 尹学军, 陈骝著. —北京:  
中国建筑工业出版社, 2016.10  
ISBN 978-7-112-19854-2

I. ①工… II. ①徐…②尹…③陈… III. ①工业工程-工程振  
动学-振动控制 IV. ①TB123

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 222970 号

本书是由“工业工程振动控制关键技术研究与应用”项目组对十多年来的研究成果和工程实践进行总结而成的, 该项目研究成果获得 2014 年度国家科学技术进步奖。

本书在科学研究基础上, 对工业工程振动控制从基础理论到工程实践作了较全面的阐述, 全书共分 6 章, 主要内容包括: 振动控制技术概论、振动控制基础性技术理论、精密装备振动控制、大型回转装备与大型冲击装备振动控制、一般装备振动控制。本书具有较强的针对性和可操作性, 对工业工程振动控制有较强的指导和借鉴作用。

本书可供从事建筑工程设计、施工、勘察和科研人员使用, 也可供有关大专院校师生参考。

责任编辑: 刘瑞霞 李天虹

责任设计: 李志立

责任校对: 李欣慰 张颖

## 工业工程振动控制关键技术

徐建 尹学军 陈骝 著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

北京画中画印刷有限公司印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 19¼ 字数: 467 千字

2016 年 12 月第一版 2016 年 12 月第一次印刷

定价: 58.00 元

ISBN 978-7-112-19854-2  
(29327)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

## 编 委 会

主 编 徐 建 (中国机械工业集团有限公司)

副主编 尹学军 (隔而固 [青岛] 振动控制有限公司)

陈 骝 (中国电子工程设计院)

编 委 俞渭雄 (中国电子工程设计院)

王伟强 (隔而固 [青岛] 振动控制有限公司)

万叶青 (中国汽车工业工程有限公司)

高星亮 (隔而固 [青岛] 振动控制有限公司)

邵晓岩 (青岛科而泰环境控制技术有限公司)

胡明祎 (中国中元国际工程有限公司)

杨 俭 (中国汽车工业工程有限公司)

曹雪生 (中国机械工业集团有限公司)

黄 伟 (中国中元国际工程有限公司)

## 序 言

随着我国工业化的发展，装备对振动控制的要求越来越严格，振动控制已经成为工业工程建设的关键技术。如果振动控制不满足要求，会影响机器装备的正常工作和使用年限，影响仪器仪表的正常测量，影响工作人员和附近居住者的身体健康，严重时会影响工业建筑的寿命和安全。过去我国高端振动控制技术均从国外引进，不仅价格昂贵，涉及国家安全和高科技核心技术一直受到封锁，影响了我国工业化发展的进程。

中国机械工业集团有限公司徐建教授及其研究团队通过长期的联合攻关，进行了理论方法、标准体系及成套技术研究，解决了工业工程振动控制关键技术难题，取得了突出的科技创新成果：

(1) 为解决工业工程振动控制理论分析和应用中存在的难题，系统地建立了基于振动在工程介质中传递规律的工业振动控制分析方法，首次提出了振源等效量化技术和振动精细化控制技术，确定了完整的振动控制指标和评价准则，创立了工业装备复杂激励下多元振动控制理论分析方法。

(2) 在精密装备振动控制方面，国内外首次提出了微振动传递函数相似比快速分析算法、模型自修正和智能优化动态配置方法，建立了微振动控制系统自由度解耦、微振动稳定低频模态分布设计方法和复杂振动系统一体化控制技术，研制了低频微幅高性能振动控制装置，形成了精密装备振动控制成套技术。

(3) 在大型装备振动控制方面，建立了振动控制系统整体分析、荷载精确定位和抗疲劳优化技术，国内外首次进行了大型回转装备振动控制系统模型试验研究，创建了大型冲击装备振动响应预测技术，发明了高承载、高性能振动控制装置，形成了大型装备振动控制成套技术。

研究成果显著提升了我国工业工程振动控制技术水平，在机械制造、航空航天、电子信息、国防军工、电力工程等领域广泛应用，取得了显著的社会效益和经济效益，成果经住房和城乡建设部有关部门主持鉴定，认为总体达到国际先进水平，部分成果达到国际领先水平，研究成果获得 2014 年度国家科技进步奖。

项目研究团队把研究成果著书公布于世，对推动我国工业工程振动控制的科技进步、促进科技成果在工程中的应用必将起到积极作用。

中国工程院院士  
广州大学教授



2016 年 6 月

# 前 言

工业工程振动控制是基于土木工程的多专业综合技术，通过对地基基础、建筑结构、工业装备等构成的复杂系统的振动进行控制，为装备正常运行提供可靠的振动环境保障。随着我国工业化进程的发展，精密装备加工精度到纳米级，大型装备冲击压力达数万吨，振动控制技术面临巨大的挑战。正如中国力学学会理事长，中国振动工程学会原理事长胡海岩院士认为：当装备压力达上万吨，隔离的振动频率低至 $1\sim 2\text{Hz}$ ，振幅非常微小，是世界振动工程领域公认的难题。振动控制技术是国家科技发展的重大需求，在《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006~2020）》的16个国家重大专项中，有7项与振动控制技术有关。

为解决工程建设中振动控制关键技术难题，满足我国高端装备制造发展的需要，为编制国家标准提供技术支撑，由中国机械工业集团负责，组织国内相关单位，在基础性技术理论、精密装备振动控制、大型装备振动控制等方面进行了十多年的联合攻关，形成一套基础性理论技术、两项成套工程，提出了我国建筑振动控制标准体系，编制了系列国家标准，奠定了我国工业工程振动控制技术发展的基础。

项目的研究成果在数百项工程中得到应用，并创造了13项国内外第一，解决了从“精密”到“大型”装备振动控制关键技术难题，实现了我国工业工程振动控制技术从低端到高端，从关键技术引进到出口的重大技术跨越，创造了显著的经济和社会效益。

本书是由项目组主要成员对研究成果和工程实践总结而成，具有较强的先进性、针对性和可操作性，对工业工程振动控制具有较强的指导和借鉴作用。

参加本书编写工作的还有：黄尽才、姜成、夏艳、谷朝红、沙曾炘、窦硕、房俊喜、孙宁、王乾安、刘海宏、赵明慧、刘兴龙、左汉文、秦敬伟、吕佐超、张昕佳、王新章。在本项目完成和本书编写过程中，得到了广州大学周福霖院士、大连理工大学程耿东院士、北京理工大学胡海岩院士、东北大学闻邦椿院士以及德国振动学专家柏林大学史迪勒教授、俄罗斯动力机器专家国际原子能机构国际地震安全中心委员科斯塔勒夫、日本特许机器株式会社振动专家永田洁的大力支持，编写过程中还参考了一些专家的著作、论文和科研成果，在此一并致谢！

本书不当之处，请提出宝贵意见。

# 目 录

第 1 章 振动控制技术概论 .....	1
1.1 概述 .....	1
1.1.1 工程振动特征 .....	1
1.1.2 振动危害 .....	2
1.1.3 振动控制的重要性 .....	3
1.2 工业工程振动控制技术研究现状 .....	4
1.2.1 国内研究现状 .....	4
1.2.2 国外研究现状 .....	6
1.2.3 振动控制中的关键技术 .....	7
1.3 工业装备振动控制特点 .....	8
1.3.1 精密装备振动控制特点 .....	8
1.3.2 大型回转装备振动控制特点 .....	8
1.3.3 大型冲击装备振动控制特点 .....	9
1.3.4 一般装备振动控制特点 .....	9
1.4 振动控制标准 .....	11
1.4.1 振动控制标准化体系 .....	11
1.4.2 振动控制主要标准及规范 .....	19
第 2 章 振动控制基础性技术理论 .....	27
2.1 理论分析基础 .....	27
2.1.1 单自由度体系振动 .....	27
2.1.2 隔振体系 .....	28
2.1.3 多自由度体系振动 .....	30
2.1.4 傅里叶 (Fourier) 变换和频响函数 .....	31
2.1.5 拉普拉斯 (Laplace) 变换和频响函数 .....	33
2.2 工业工程振动荷载精确量化 .....	34
2.2.1 工业工程荷载分类 .....	34
2.2.2 振动荷载确定方法 .....	34
2.2.3 振动荷载等效量化方法 .....	35
2.3 工业工程振动传递规律 .....	38
2.3.1 工业工程振动传递路径分类 .....	38
2.3.2 振动在土介中的传播规律 .....	38
2.3.3 振动在建筑结构中的传播规律 .....	43
2.4 工业工程振动分析方法 .....	47

2.4.1	理论分析方法	48
2.4.2	有限元分析方法	49
2.4.3	基于质刚重合的气浮式被动控制隔振系统设计方法	52
2.4.4	基于振型质量参与系数分布规律的台座选型及优化方法	54
2.4.5	基于精密装备振动特性的气浮式隔振系统整体设计方法	55
2.5	振动工程测试	57
2.5.1	振动测试的意义	57
2.5.2	振动测试方法	58
2.5.3	振动测试数据分析	62
<b>第3章</b>	<b>精密装备振动控制</b>	<b>67</b>
3.1	概述	67
3.1.1	基本概念	67
3.1.2	工程基本特征	68
3.1.3	振源分类及特征	70
3.1.4	精密装备类型及特征	71
3.1.5	微振动控制基本原则	73
3.2	微振动控制工程设计	75
3.2.1	工程选址及总平面布置	75
3.2.2	地基基础设计	77
3.2.3	建筑结构防微振设计	77
3.2.4	动力设备及管道减振设计	79
3.2.5	精密设备防微振设计	82
3.3	微振动控制工程设计的数值计算	85
3.3.1	工业厂房微振动数值计算	85
3.3.2	气浮式振动控制系统计算	89
3.4	微振动控制装置	97
3.4.1	微振动控制装置的发展	97
3.4.2	空气弹簧类型及组合机理	100
3.4.3	空气弹簧防振器的设计及计算	103
3.4.4	空气弹簧阻尼系统	109
3.4.5	高度控制阀	114
3.4.6	控制柜	114
3.4.7	气源	115
3.4.8	空气弹簧隔振装置的试验	116
3.4.9	可视化控制界面的研发	117
3.5	微振动控制工程施工及安装技术	120
3.5.1	独立基础	121
3.5.2	基台	121
3.5.3	支撑系统	124



3.5.4	振动控制系统	126
3.6	微振动试验与测试技术	126
3.6.1	仪器的性能与配套	127
3.6.2	实场测试工况及其内容	128
3.6.3	测点布置及其方向	129
3.6.4	测试要求	129
3.6.5	测试数据处理	130
3.6.6	衡量标准的选择	131
3.6.7	微振动测试数据库开发及应用	131
3.6.8	实场测试实例	132
3.7	精密装备微振动控制工程实例	138
3.7.1	[实例 1] 某光栅刻画机微振动控制	138
3.7.2	[实例 2] 某空间光学检测微振动控制	143
3.7.3	[实例 3] 某观测卫星微振动控制	152
3.7.4	[实例 4] 某天文台空间太阳望远镜微振动控制	159
3.7.5	[实例 5] 某声阻抗检测微振动控制	166
3.7.6	[实例 6] 某铁路货物列车无损快速检测微振动控制	171
<b>第 4 章</b>	<b>大型回转装备振动控制</b>	<b>178</b>
4.1	概述	178
4.1.1	大型回转装备的特点	178
4.1.2	大型回转装备在国民经济中的作用	179
4.1.3	大型回转装备振动控制的意义	179
4.2	大型回转装备振动控制系统整体分析	181
4.2.1	整体建模分析的必要性	181
4.2.2	结构建模技术	181
4.2.3	装备建模技术	183
4.2.4	振动控制装置的建模技术	184
4.2.5	整体建模技术	184
4.2.6	动力响应分析	186
4.3	大型回转装备振动控制系统的设计	191
4.3.1	一般要求	191
4.3.2	设计资料要求	192
4.3.3	设计内容及步骤	192
4.3.4	振动控制装置布置原则	193
4.4	大型回转装备振动控制系统模型试验技术	193
4.4.1	概述	193
4.4.2	模型试验关键技术	194
4.4.3	模型试验的主要内容	195
4.4.4	运用试验结果对基础进行评估	196

4.4.5	试验的实例	196
4.4.6	模型试验成果	203
4.5	大型回转装备振动控制工程施工工艺	203
4.5.1	安装前的预压缩	203
4.5.2	柱顶施工	203
4.5.3	大型汽轮发电机组隔振基础无间隙施工方法	204
4.5.4	振动控制装置调试技术	205
4.6	大型回转装备振动控制装置	205
4.6.1	大型回转装备振动控制装置的关键元件	205
4.6.2	大型回转装备高性能振动控制装置	207
4.6.3	固体声控制专用振动控制装置	208
4.6.4	高频动力吸振控制装置	208
4.7	大型回转装备振动控制实测测试技术	210
4.7.1	实测测试工况及其内容	210
4.7.2	测点布置及其方向	212
4.7.3	测试要求	213
4.7.4	衡量标准的选择	213
4.7.5	实测测试实例	214
4.8	大型回转装备振动控制工程实例	215
4.8.1	[实例 1] 核电 1000MW 等级岭澳 2 期核电半速发电机组振动控制	215
4.8.2	[实例 2] 火电 600MW 大别山 1 期火电全速机组振动控制	218
4.8.3	[实例 3] 水电 700MW 等级三峡水电站水轮发电机运转层平台振动控制	219
4.8.4	[实例 4] 太阳宫燃气电厂固体声控制	220
4.8.5	[实例 5] 300MW 某核电全速机组中间层仪器平台振动控制	222
<b>第 5 章</b>	<b>大型冲击装备振动控制</b>	<b>224</b>
5.1	概述	224
5.1.1	大型冲击装备的含义	224
5.1.2	大型冲击装备在国民经济中的作用	224
5.1.3	大型冲击装备振动控制的意义	224
5.2	大型冲击装备振动控制系统动力分析	225
5.2.1	系统的动力计算建模技术	225
5.2.2	冲击装备动荷载激励时程输入分析法	227
5.2.3	钢结构基础的疲劳强度验算分析	227
5.3	大型冲击装备振动控制系统的设计	229
5.3.1	一般要求	229
5.3.2	隔振系统的设计内容与步骤	229
5.3.3	振动控制装置布置原则	232
5.4	大型冲击装备振动响应预测技术	233
5.4.1	响应预测的目的	233

5.4.2	预测技术	233
5.4.3	工程实例	234
5.5	大型冲击装备振动控制装置	236
5.5.1	大型冲击装备振动控制装置的关键元件	236
5.5.2	大型冲击装备高性能振动控制装置	236
5.6	大型冲击装备振动控制测试技术	237
5.6.1	测试工况及其内容	237
5.6.2	测点布置	237
5.6.3	测试要求	239
5.6.4	衡量标准的选择	240
5.7	大型冲击装备振动控制工程实例	241
5.7.1	[实例1] 无锡叶片厂最大打击力 35500t 螺旋压力机振动控制	242
5.7.2	[实例2] 三角航空 40000t 模锻液压机振动控制	243
5.7.3	[实例3] 一汽解放汽车有限公司车身厂 2050t 压力机线振动控制改造	244
5.7.4	[实例4] 济宁山推 4000t 热模锻压力机振动控制	245
5.7.5	[实例5] 苏州孚杰机械 16t 模锻锤振动控制	246
<b>第6章</b>	<b>一般装备振动控制</b>	<b>248</b>
6.1	概述	248
6.2	振动控制设计方法	249
6.2.1	冲击振动控制设计方法	249
6.2.2	锻锤装备振动控制设计方法	254
6.2.3	压力机装备振动控制设计方法	257
6.2.4	发动机装备振动控制设计方法	259
6.2.5	三坐标测量机振动控制设计方法	261
6.2.6	道路模拟试验机基础动态设计	267
6.3	一般装备振动控制装置	271
6.3.1	减振装置布置形式	271
6.3.2	质量元件特性	272
6.3.3	弹性元件特性	274
6.3.4	阻尼元件特性	275
6.3.5	弹簧阻尼减振器	276
6.4	一般装备振动控制工程实例	277
6.4.1	[实例1] 半消声室隔振设计实例	277
6.4.2	[实例2] 液压振动台基础设计实例	281
6.4.3	[实例3] 三坐标测量机基础设计实例	289
	参考文献	294

# 第 1 章 振动控制技术概论

随着我国工业的发展,振动控制技术已经成为工业工程的关键技术。如果装备的振动控制不当,会影响机器装备的正常工作和使用年限,影响仪器仪表的正常测量,会影响工作人员和附近居住者的身体健康,严重时会影响工业建筑的寿命和安全。装备的振动控制,不仅仅取决于装备的本身,更重要的是装备的支撑结构和环境要满足振动控制的要求,振动控制已经成为工业工程设计和施工的重要环节。

工业工程振动控制是一个复杂的多领域交叉课题,是基于土木工程的多专业综合技术,还涉及机械、材料、自动化以及计算机等多个学科,通过对地基基础、建筑结构、工业装备等构成的复杂系统振动进行控制,为工业装备的正常运行和环境保护提供可靠的技术保障。

## 1.1 概 述

### 1.1.1 工程振动特征

地球表面的环境振动是引起工业工程振动的主要原因。地球表面的环境振动主要分为地面脉动和人类活动的干扰两种振动类型。

地面脉动主要分为两类:第一类地脉动,主要是由风暴、台风、海浪击岸、高压气流及冷热空气团交汇等自然界原因造成的,其他如雷暴、磁暴、冰雹、暴雨等也会产生地面脉动,但是不常见;此类地面脉动的振动频率为  $0.1\sim 0.5\text{Hz}$ ,甚至更低,振幅为  $0.1\sim 3\mu\text{m}$ ,振动加速度幅值可达  $10^{-7}\sim 10^{-5}g$ 。第二类地脉动,由交通运输、厂矿机械和人员活动等引起,在距离振源较近处表现为人类活动的干扰振动,距振源较远处表现为低频。第二类地面脉动,其振动频率一般大于  $2\text{Hz}$ ,振幅为  $0.01\sim 10\mu\text{m}$ ,振动加速度幅值可达  $10^{-7}\sim 10^{-3}g$ ,其振动频率及振幅不仅与振源机制有关,而且与地质有密切关系,在坚硬的岩层上,振动频率较高,振幅较小,而在一般的土壤层上则反之。第二类地脉动是一种随机振动,是不容忽视的。

人类活动的干扰振动主要是由于人类以及所使用机械设备所造成的振动干扰,在近距离内的影响较地面脉动大得多。主要分为随机性振源、稳态性振源以及瞬态性振源。随机性振源包括交通运输方面的火车、汽车、拖拉机行驶与飞机起落等振动;稳态性振源包括厂矿的各种机械如锻锤、落锤、空气压缩机、制冷压缩机、冲床、通风机等运行时的振动;瞬态性振源如水爆清砂、爆炸、成型加工等引起的振动等等。该类振动有较宽的频率范围,振动幅值也较大,是必须考虑的振源。

工业工程振动控制所研究的对象包括精密装备、一般工业装备和大型工业装备。精密

装备振动控制的关注点是装备本身的振动防护问题，对环境产生振动干扰的主要是一般装备和大型装备。一般装备量大面广，经常紧邻办公区和居民区布置，对环境的影响很大。而大型装备的激励机理复杂，激励扰力大，振动控制的难度很高。

一般工业装备的振动控制技术比较成熟，随着工业装备向精密化和大型化发展，振动控制要求越来越高，难度越来越大，如精密装备控制精度为纳米级，大型装备冲击压力达数万吨，如图 1.1.1 所示。

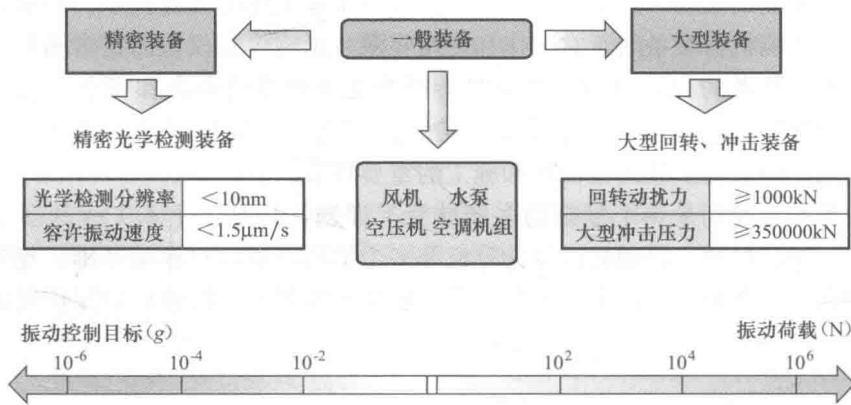


图 1.1.1 工业工程振动的特点

## 1.1.2 振动危害

### 1. 振动对工业装备本身的影响

微振动可能会降低精密仪器的加工精度。不同的机械设备，针对不同的加工精度，容许振动的要求是不尽相同的。一般精密机械设备容许振动速度控制指标一般在 0.05 ~ 0.5mm/s 的范围内。当外界的振动超过了机械的容许振动速度时，就会影响加工产品的光洁度、波纹度、垂直度或者尺寸精度，并导致累积误差的增大。实测结果表明，振动会使设备的加工精度降低一至二级，以至可能会造成最终产品的不合格。

微振动还会降低机器、仪器或工具的工作精度，严重时会造成精密仪器无法使用。例如，陕西某机床厂的激光录磁仪，由于没有采取微振动控制措施，造成磁头移动，设备倾斜，最终无法使用。

大型工业装备振动不容忽视，如果仅考虑装备产生的振动对周围环境的危害，而忽略装备自身振动，势必会导致设备及零部件因振动不断功能退化、老化，甚至引起设备提前破坏，影响工业装备正常运转，甚至造成安全事故。例如，在我国电力行业，发电机组在发电运行之前，其振动问题一直令设计和建设方担心。一旦产生振动问题，查找原因和解决问题往往非常困难且旷日持久。国内已有多个电厂因为振动超标，或延误投产发电，或多次停机检修改造，造成了较大的经济损失。此外，在大型锻压装备方面，如果设备本身的振动过大，也会影响装备的正常工作或生产效率。对于多工位冲压线，装备的振动还会影响工件的自动传输。

### 2. 振动对人体舒适度的危害

人们正常工作和生活环境的振动要求比操作区要严格得多。为保证正常的生产和操作

人员的身体健康，操作区的振动也应控制在一定的范围内。如果工作场所的振动较大，振动会使操作人员的视觉受到干扰、动作受到妨碍和精力难以集中等，往往会造成操作速度下降，生产效率降低，工人感到疲劳，并且可能出现质量事故，甚至安全事故。如果振动强度足够大，或者工人长期在相当强度振动环境中工作，则可能会对工人在神经系统、消化系统、心血管系统、内分泌系统、呼吸系统等方面造成危害或影响。

振动对民用建筑内的居民、工作者造成的影响主要为干扰其睡眠、休息以及正常工作。值得注意的是，若居民长期生活在振动干扰的环境中，由于长期心理上烦恼不堪，也会造成身心健康的危害。

### 3. 振动对建筑物的危害

工业装备所产生的振动施加于建筑物，由于振动强度和频率的不同，将会使得某些建筑物的结构受到破坏。常见的破坏现象表现为基础和墙壁龟裂、墙皮剥落、石块滑动、地基变形和下沉等，重者可使建筑物倒塌。当地下水位较高时，还可能造成地基局部液化，加大基础下沉或不均匀沉降。此外，工业装备产生的剧烈扰动会对地下交通、地下公共空间以及在建地下项目等建筑结构产生不良影响，会导致地下结构发生变形，严重的会导致坍塌事故等。

特别需要注意的是，由于古建筑年代久远，结构脆弱，环境振动会导致古建筑地基下沉、墙体开裂、寿命缩短或倒塌，而这种影响是不可逆转的，无法采取补救措施。

### 4. 振动产生噪声的危害

振动的物体可直接向空间辐射噪声，这就是空气声。振动也可以在土壤中传播，在传播过程中，又激起建筑物基础、墙体、梁柱、天花板、门窗、管道等振动，这些物体的振动会再次辐射噪声，这种噪声叫固体传声。显然，固体声加大了噪声的危害和影响。

## 1.1.3 振动控制的重要性

随着高新技术的快速发展，尤其是光学工业、感光化学、航空航天、半导体工业的发展，导致人们使用的机器设备功率日益增大，转速加快，而重量却不断减轻，刚度相对减小，精度要求越来越高，振动问题随之日益突现。大量工程实践表明，振敏型精密机械在生物科学、电子光学、精密机械加工、理化实验及其与研究相关的工厂中，振动控制不仅影响到机器设备的使用寿命、仪表器械的使用性能，操作人员的正常工作，还影响到精密加工最终产品的质量和可靠性。

微电子工业，集成电路线宽已精密到纳米级，线宽  $0.09\mu\text{m}$  (90nm, 16G DRAM) 集成电路产品已经面世，线宽  $0.07\mu\text{m}$  (70nm, 64G DRAM) 产品已进入实验室阶段，硅片加工中的光刻工序对微振动控制极为严格，已要求频域振动速度值不大于  $1\mu\text{m/s}$ 。声表面波器件、激光全息光栅、彩色显像管的阴罩等的加工、伺服磁盘的录磁等的生产，都需要提供一个微小振动的环境；在光栅刻线加工方面，3600 线/mm 的光栅刻线对微振动限制在时域振动速度不大于  $10\mu\text{m/s}$ ；在惯导技术方面，为提高导弹的打击精度，准确命中目标，需要对陀螺仪、加速度计及组合制导系统的精度提出更高的要求，这种高精度惯导系统的测试和检测已要求环境振动不大于  $1\times 10^{-8}g$ ；对于空间光学装置（可见光、红外、激光等）的地面精密检测，其光束在数十米光程的平行光管内不能有丝毫的抖动，对环境振动的限制苛刻；在海关的货物快速无损检查方面，特别是铁路货运列车的快速无损检

查,要求列车行驶通过检测站时,检测仪器不受列车振动影响必须将检测仪器安装在隔振台座上;其他诸如精密机械加工、光学器件加工、特种声学实验、理化实验、长度计量、精细加工、超薄金属箔材轧制等,都需要对微振动进行控制。

大型工业装备主要包括大型发电装备、大型锻压装备和大型精密装备,例如:1000MW 等级以上大型核电与 600MW 火电厂中的汽轮发电机组;锻造核电长叶片、大型高温合金航空发动机涡轮盘、大型飞机起落架锻件用的大型锻压机;汽车工业的大型车身冲压线,以及长度大于 10m 的大型精密数控轧辊磨床和三坐标测量机等。大型工业装备在整个国民经济和国防建设中具有举足轻重的作用,振动问题是影响这些设备能否正常工作的关键因素之一。

在制造业为主体的机械工厂中拥有大量一般装备,其装备的种类和数量庞大,分布的区域广泛。因此,一般装备的振动具有影响范围非常广的特点,往往与人们的社会生活息息相关,严重的也会危及结构安全和人们的生活起居及健康。正是由于一般装备的振动影响具有普遍性,其振动控制也是一个不容忽视的问题。

早期的工业装备比较简单,大部分配以大块式基础,不需要考虑基础的弹性,基础不会发生共振,基础只要具有足够大的质量就行,也无需考虑环保扰民问题。随着科学技术的不断发展和进步,这些大型装备的结构越来越庞大,工作时产生的激振力也越来越大,而振动控制方面的要求却越来越严格。这是因为振动问题若得不到有效控制,会导致大型装备无法正常工作,加工和测量精度降低,设备故障率提高,影响整个制造业的技术水平,乃至影响整个国民经济的运转和中国产业升级换代的实现;除此之外,工业工程振动还会造成环境振动超标,影响人们的工作和生活质量,不利于环境保护和构建和谐社会。因此,对工业工程的大型装备进行振动控制的研究,是技术发展和社会进步的必然要求。

综上所述,航空航天和国防军工高端装备的研制和试验环境,电子信息和电力工程的生产和运行环境,锻压装备对周边环境影响,都需要提供振动控制技术保障。

## 1.2 工业工程振动控制技术研究现状

### 1.2.1 国内研究现状

我国对微振动控制技术的研究及工程实践始于 20 世纪 60 年代初期。1963 年到 1965 年中国电子工程设计院防微振工程设计研究所研发了国内首套具有高灵敏度 ( $10^{-6}g$ ) 的微振动测试系统。并针对电子工业厂房、机床及精密设备进行了大量实测分析,制定了《多层厂房楼盖抗微振设计规范》、《电子工业多层厂房楼层振动设计准则》,并在工程实践中建立冲床振动的计算理论,得到振动工程界的广泛认可,沿用至今。1968 年,空气弹簧首次应用于我国精密设备微振动控制。1975 年,中国电子工程设计院防微振工程设计研究所研制了国内第一套系列化金属弹簧隔振器产品;1978 年,研发了高密度结构模态识别软件,为我国结构模态识别提供了有力工具;1982 年,研制了 JYKT 系列 8 个型号的空气弹簧隔振装置,是国内首套系列化用于微振控制的空气弹簧隔振装置。1984 年,青岛橡胶工业研究所研制了  $\Phi 113$ -II 型自由式橡胶空气弹簧装置。1985 年,中国科学院高

能物理研究所发展了一种用于音叉式引力波天线的气缸-薄膜型空气弹簧，并用最小二乘法对试验数据进行拟合，得到该种空气弹簧刚度的半经验公式。同年，中国电子工程设计院防微振工程设计研究所研制了成套空气弹簧隔振系统，并成功应用于成都 773 厂机刻光栅刻线机隔振工程。这是我国拥有自主知识产权的成套空气弹簧隔振系统的最早应用。1985 年之后，以成套空气弹簧隔振系统为主的被动隔振系统被广泛地应用于惯导系统测试、集成电路光刻、空间光学装置检测、铁路货运列车快速无损检查、激光实验、光栅刻线及超薄金属箔材轧制、理化试验及军用装备检测等方面的防微振问题。1995 年，中国电子工程设计院防微振工程设计研究所研制了我国第一台超长型光学测试隔振台座，台座长 15.5m，重 38t。2005 年，研制了单向等刚度系列化用于振动控制的 ZYM 系列空气弹簧隔振装置。该系列空气弹簧隔振装置承载力达到 14.7~250kN，是国内首创的高承载力隔振器。2015 年建设中试平台 (DZYFW-140009-CG)，隔振性能满足较高要求。

近年来，国内对于隔振平台振动主动控制的制动器，如磁致伸缩材料、压电材料、电流变和磁流变液体等新型材料的隔振装置进行了一定研究。清华大学的徐登锋对超精密系统中的主被动隔振技术及相关隔振性能展开了讨论，分析指出主动隔振平台隔振效果较好；曹志彤等利用稀土-铁系功能材料进行超磁致微位移直线驱动器的研究设计，通过有限元分析其可行性；南航的顾仲权等研究了磁致伸缩材料作用器在振动主动控制中的应用；哈尔滨工业大学的盖玉先等研究了以 GMA 为作动器，采用人工模糊神经网络控制的超精密机床隔振系统，哈尔滨工业大学精密工程研究所研制的 HCM-I 亚微米超精密车床通过微制造平台混合隔振系统设计，有空气弹簧和橡胶层作为被动隔振元件，并通过超磁致伸缩制动器进行主动控制，测试结果表明振动衰减达到 80%。

在我国于 1980 年首次在河南登封电厂汽轮发电机基础中应用了弹簧隔振，该基础已运行了 20 多年，目前运行效果良好。相继选用弹簧隔振汽轮发电机基础的有 350MW 的鸭河口电厂、350MW 的合肥第二发电厂、200MW 的北京第一热电厂、600MW 的大别山电厂、1000MW 的田湾核电站等等，但均为国外公司设计。

汽轮发电机弹簧隔振基础在我国虽然有了一定的发展，但由于技术上的研究不够成熟，弹簧隔振基础的设计最初是由国外设计，在我国还没有这方面的规范，使业主认识不到弹簧隔振的先进性、必要性；使土建设计人员、热机设计人员在设计上没有导则遵循，从而阻碍了汽轮发电机弹簧隔振基础的发展。为此在 2008 年中国电力工程顾问集团确立了“汽轮发电机组弹簧隔振技术应用研究”的技术课题，由华东电力设计院负责与中南电力设计院、西北电力设计院、华北电力设计院联合，并与隔而固（青岛）振动控制有限公司协同进行该项课题的研究。经过几年的研究、开发及运用，使得这项技术在大型汽轮发电机振动控制领域中迅速发展起来，目前国内大型核电中 82% 的机组、火电中有 10 多台机组均采用了该项技术。

20 世纪 70 年代，有限元分析技术开始在国内应用，但受到计算机技术的限制，在实际振动控制工程设计中应用较为罕见，仅有少数几个小型专用有限元软件在电力设计院内使用，工程设计主要还是按照经典力学方法进行简化计算与设计。

国家标准《动力机器基础设计规范》(GB 50040) 于 1997 年开始执行，规范对常规动力设备基础设计的一般规定、构造要求和静、动力计算都有具体规定，但是规范规定的动力计算，仅限于对扰力取值及振动控制限值等做了规定，而对影响设备运行的其他基础动



力特性,如基础动刚度、静变位等没有涉及,特别是没有关于弹簧隔振汽轮发电机组基础设计方面的内容。

该阶段的工业设备基础,如大型锻造设备、压力机、大型精密、超长设备等基础的工程设计,主要为大块式常规基础设计,仅从构造、承载力等方面进行考虑,无法进行基础的详细动力计算,更无法进行弹簧阻尼支承的弹簧基础设计。振动传递到周围工作区与居民区,无法满足节能环保和谐社会的要求。对其他大型精密、超长设备的基础,如轧辊磨床基础,因无法考虑基础的动力特性,基础设计只能停留在制作一个用于安装设备的混凝土基础。总体来说,该阶段对动力设备基础的设计刚刚起步,特别是对隔振基础的设计,基本处于学习照搬阶段,国内无隔振设计理论基础与实践经验。

这一时期,国内某些厂家开始提供不同形式的隔振器来适应和满足隔振的需要。如空气阻尼式隔振器,由锥形螺旋钢弹簧与橡胶气囊组成,通过橡胶气囊在压缩和伸张过程中气孔吸入和排出空气产生摩擦而获得阻尼。但这种隔振器寿命较短。橡胶隔振垫有一定的阻尼性能,可以吸收高频振动能量,安装也较为方便。但暴露在高温、多油、露天环境中时,容易老化失效。这些隔振器能够部分隔离振动,但受性能限制,无法达到令人满意的隔振效果。

### 1.2.2 国外研究现状

国外对于精密和超精密加工设备的环境微振动影响研究开展较早,以欧美和日本等发达国家为主,大多从环境振源相关的理论推导和解析模型来分析,研究微振动在介质中的传播规律,包括地基土的动力特性及其对振动波传播的影响,振动传播途径和相关隔振理论及隔振措施等问题。

20世纪50年代,Pontryagin和Bellman奠定了冲击和振动最佳控制的现代理论基础。20世纪60年代,日本富成襄提出伺服阻尼器,通过控制液压缸上附加质量来提高振动控制的能力。20世纪70年代,Kolovshii采用非线性力学方法研究隔振系统的力学特性,并对不同用途、力学结构对减振器进行分类,同时对不同的振源也进行了分类。20世纪80年代开始,振动主动控制技术逐步实际应用于精密设备或精密产品加工中的微振动控制中。1988年,T.Takagami等人用空气弹簧实现台体的振动主动控制,空气弹簧本身起到被动支承台体的作用。通过汽缸控制主气室中空气的流入、流出,实现主动控制;阻尼由连接主气室和辅助气室之间的节流孔产生。仿真和实验表明,对于地面干扰,振幅衰减了70%以上,减振效果较明显。1992年,T.Fujita等学者提出了控制平台的概念,用于微振动的隔离,即在建筑物楼面板上安装减振平台,并在平台和楼板中间安装液压作动器,对建筑物和作动器进行一体化建模和振动控制,并且针对不用设备的使用精度要求采取不同水平的微振控制。1994年,Z.Jason Geng等人采用鲁棒自适应滤波控制算法,对6个磁致伸缩制动器组成的Stewart平台进行六自由度振动主动控制实验研究,反馈信号为加速度和力。实验结果表明,对于56.2Hz的干扰,采用主动控制可获得30dB的减振效果。1996年,K.Watanabe等人采用4个电磁制动器形成一磁悬浮隔振系统,结合PI控制算法对竖向的振动进行控制,振动加速度衰减了90%,取得了较好的减振效果。1997年,Kajiwara等人研究了用压电制动器对半导体加工装置台体的振动进行主动控制,控制后的微平版印刷精度由原来的 $0.2\mu\text{m}$ 提高到 $0.1\mu\text{m}$ 。1999年,Y.Nakamura等人对尺寸为