



国家出版基金资助项目
“十三五”国家重点图书出版规划项目
湖北省学术著作出版专项资金资助项目
智能制造与机器人理论及技术研究丛书



总主编 丁汉 孙容磊

磁悬浮智能支承

胡业发 王晓光 宋春生◎著



CIXUANFU ZHINENG ZHICHENG



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>



国家出版基金资助项目
“十三五”国家重点图书出版规划项目
湖北省学术著作出版专项资金资助项目
智能制造与机器人理论及技术研究丛书
总主编 丁汉 孙容磊

磁悬浮智能支承

胡业发 王晓光 宋春生◎著



CIXUANFU ZHINENG ZHICHENG



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

内 容 简 介

本书尝试将磁悬浮旋转支承与磁悬浮直线支承结合起来,以磁悬浮支承技术为研究对象,阐述磁悬浮智能支承的共同特征。本书主要阐述了磁悬浮支承的发展历史与现状、磁悬浮智能支承的概念与内涵、磁悬浮支承结构的冗余与重构、磁悬浮支承的智能控制算法等磁悬浮智能支承的基础理论,说明了常导磁悬浮列车、超导磁悬浮列车、真空管道磁悬浮列车的工作原理及发展现状与趋势,介绍了磁悬浮电梯、磁悬浮导轨的应用,以及磁悬浮支承的减振隔振原理、方法与装置。本书可供从事磁悬浮研究的科研工作人员和高等学校相关专业的教师、研究生等阅读参考,也可以作为研究生的教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

磁悬浮智能支承/胡业发,王晓光,宋春生著. —武汉:华中科技大学出版社,2021.5
(智能制造与机器人理论及技术研究丛书)
ISBN 978-7-5680-6704-1

I. ①磁… II. ①胡… ②王… ③宋… III. ①磁悬浮轴承-设计 IV. ①TH133.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2021)第080816号

磁悬浮智能支承

Cixuanfu Zhineng Zhicheng

胡业发 王晓光 宋春生 著

策划编辑:俞道凯

责任编辑:罗雪

封面设计:原色设计

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

电话:(027)81321913

邮编:430223

录排:武汉市洪山区佳年华文印部

印刷:湖北新华印务有限公司

开本:710mm×1000mm 1/16

印张:17.5

字数:309千字

版次:2021年5月第1版第1次印刷

定价:128.00元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究



智能制造与机器人理论及技术研究丛书

专家委员会

主任委员 熊有伦（华中科技大学）

委 员（按姓氏笔画排序）

卢秉恒（西安交通大学）

朱 荻（南京航空航天大学）

阮雪榆（上海交通大学）

杨华勇（浙江大学）

张建伟（德国汉堡大学）

邵新宇（华中科技大学）

林忠钦（上海交通大学）

蒋庄德（西安交通大学）

谭建荣（浙江大学）

顾问委员会

主任委员 李国民（佐治亚理工学院）

委 员（按姓氏笔画排序）

于海斌（中国科学院沈阳自动化研究所）

王飞跃（中国科学院自动化研究所）

王田苗（北京航空航天大学）

尹周平（华中科技大学）

甘中学（宁波市智能制造产业研究院）

史铁林（华中科技大学）

朱向阳（上海交通大学）

刘 宏（哈尔滨工业大学）

孙立宁（苏州大学）

李 斌（华中科技大学）

杨桂林（中国科学院宁波材料技术与工程研究所）

张 丹（北京交通大学）

孟 光（上海航天技术研究院）

姜钟平（美国纽约大学）

黄 田（天津大学）

黄明辉（中南大学）

编写委员会

主任委员 丁 汉（华中科技大学） 孙容磊（华中科技大学）

委 员（按姓氏笔画排序）

王成恩（上海交通大学）

方勇纯（南开大学）

史玉升（华中科技大学）

乔 红（中国科学院自动化研究所）

孙树栋（西北工业大学）

杜志江（哈尔滨工业大学）

张定华（西北工业大学）

张宪民（华南理工大学）

范大鹏（国防科技大学）

顾新建（浙江大学）

陶 波（华中科技大学）

韩建达（南开大学）

蔺永诚（中南大学）

熊 刚（中国科学院自动化研究所）

熊振华（上海交通大学）

作者简介



▶ **胡业发** 工学博士，武汉理工大学二级教授、博士生导师，机械工程专业责任教授，美国密歇根大学访问学者。国际磁悬浮轴承学术委员会委员、全国磁悬浮技术专业委员会副主任委员、中国人工智能学会智能制造专业委员会常务委员、湖北省电工技术学会副理事长。主要研究领域：磁悬浮技术、复合材料设计、数字制造。主持国家重点研发计划项目、国家自然科学基金项目、中俄国际合作项目、湖北省自然科学基金重点类项目、湖北省科技创新项目重大专项和企业横向项目等30余项。长期从事磁悬浮技术方面的研究。获得湖北省科学技术奖（技术发明奖二等奖）1项；获得国家发明专利授权16项；出版学术专著2部，教材1部；发表论文100多篇，其中80篇被SCI/EI/ISTP收录。



▶ **王晓光** 工学博士，武汉理工大学教授。1982年毕业于华中工学院（今华中科技大学）机械系机械制造及其自动化专业；1982年至1989年在铁道部大桥工程局桥梁机械厂工作，工程师；1989年至今在武汉理工大学机电工程学院从事教学与科研工作。主要研究领域：机械制造、机电一体化设备、磁悬浮技术及其应用、工业工程。在国内外学术期刊和会议上发表学术论文60多篇；获得国家发明专利授权20多项。参与“磁悬浮转子的关键技术”项目，获2005年度湖北省科学技术奖（技术发明奖二等奖）。参与了《磁力轴承的基础理论与应用》一书的编写工作。

作者简介



▶ **宋春生** 工学博士，武汉理工大学机电工程学院教授、博士生导师。湖北省磁悬浮工程技术研究中心副主任，入选武汉市“黄鹤英才计划”。主要研究领域：磁悬浮主动隔振技术、状态监测与故障诊断等。在国内外重要学术期刊及会议上发表高水平学术论文40余篇，其中SCI收录30余篇；参编专著1部；获批软件著作权4项；申请国家专利30项，授权14项；主持国家自然科学基金项目3项，主持和承担其他国家级、省部级项目及军工与企业项目20余项。兼任中国电子学会电子机械工程分会委员、中国机械行业卓越工程师教育联盟智能制造专业委员会委员、全国材料新技术发展研究会第一届理事会理事、湖北省电机工程学会理事、中国机械工程学会高级会员、中国电子学会高级会员。



总序

近年来,“智能制造+共融机器人”特别引人注目,呈现出“万物感知、万物互联、万物智能”的时代特征。智能制造与共融机器人产业将成为优先发展的战略性新兴产业,也是“中国制造 2049”创新驱动发展的巨大引擎。值得注意的是,智能汽车与无人机、水下机器人等一起所形成的规模宏大的共融机器人产业,将是今后 30 年各国争夺的战略高地,并将对世界经济发展、社会进步、战争形态产生重大影响。与之相关的制造科学和机器人学属于综合性学科,是联系和涵盖物质科学、信息科学、生命科学的大科学。与其他工程科学、技术科学一样,制造科学、机器人学也是将认识世界和改造世界融合为一体的大科学。20 世纪中叶,Cybernetics 与 Engineering Cybernetics 等专著的发表开创了工程科学的新纪元。21 世纪以来,制造科学、机器人学和人工智能等领域异常活跃,影响深远,是“智能制造+共融机器人”原始创新的源泉。

华中科技大学出版社紧跟时代潮流,瞄准智能制造和机器人的科技前沿,组织策划了本套“智能制造与机器人理论及技术研究丛书”。丛书涉及的内容十分广泛。热烈欢迎各位专家从不同的视野、不同的角度、不同的领域著书立说。选题要点包括但不限于:智能制造的各个环节,如研究、开发、设计、加工、成形和装配等;智能制造的各个学科领域,如智能控制、智能感知、智能装备、智能系统、智能物流和智能自动化等;各类机器人,如工业机器人、服务机器人、极端机器人、海陆空机器人、仿生/类生/拟人机器人、软体机器人和微纳机器人等的发展和应用;与机器人学有关的机构学与力学、机动性与操作性、运动规划与运动控制、智能驾驶与智能网联、人机交互与人机共融等;人工智能、认知科学、大数据、云制造、物联网和互联网等。

本套丛书将成为有关领域专家、学者学术交流与合作的平台,青年科学家茁壮成长的园地,科学家展示研究成果的国际舞台。华中科技大学出版社将与



施普林格(Springer)出版集团等国际学术出版机构一起,针对本套丛书进行全球联合出版发行,同时该社也与有关国际学术会议、国际学术期刊建立了密切联系,为提升本套丛书的学术水平和实用价值,扩大丛书的国际影响营造了良好的学术生态环境。

近年来,高校师生、各领域专家和科技工作者等各界人士对智能制造和机器人的热情与日俱增。这套丛书将成为有关领域专家学者、高校师生与工程技术人员之间的纽带,增强作者与读者之间的联系,加快发现知识、传授知识、增长知识和更新知识的进程,为经济建设、社会进步、科技发展做出贡献。

最后,衷心感谢为本套丛书做出贡献的作者和读者,感谢他们为创新驱动发展增添正能量、聚集正能量、发挥正能量。感谢华中科技大学出版社相关人员在组织、策划过程中的辛勤劳动。

华中科技大学教授

中国科学院院士

2017年9月



前言

随着磁悬浮技术的成熟,磁悬浮技术在旋转支承和直线支承两大应用领域得到了飞速发展。本书尝试将磁悬浮旋转支承(其典型应用为磁悬浮轴承)和磁悬浮直线支承(其典型应用为磁悬浮列车、磁悬浮导轨等)作为一个整体研究对象展开论述。工业 4.0 的到来,使智能制造的概念、理论、技术与方法迅猛发展,智能装备日新月异。轴承作为装备的核心部件,是高端装备及智能装备必须使用的核心部件。智能轴承技术是智能装备的关键技术之一。近年来,智能轴承技术得到快速发展。然而,直到目前为止,轴承的智能化主要停留在智能监测层面,更进一步的智能化需要在支承原理、支承方式等方面做较大的创新。磁悬浮支承的出现,特别是主动磁悬浮支承的出现,为智能支承的实现提供了一个绝佳的机会。这是因为主动磁悬浮支承从原理上为实现支承的全面智能化提供了支撑。对于很多现有的主动磁悬浮轴承,只需要对控制系统装载智能化算法,增加适当硬件或进行硬件改造,就能够实现磁悬浮轴承的智能化改装。

本书以磁悬浮轴承的智能化为出发点,从磁悬浮轴承的结构、冗余、故障诊断与重构、智能控制算法等磁悬浮智能轴承的基础理论与方法方面展开论述,再以磁悬浮列车与磁悬浮电梯的应用、磁悬浮振动的主动控制、磁悬浮微重力隔振平台等典型应用为例介绍磁悬浮直线支承。由于作者没有在磁悬浮直线支承的智能化方面进行专门研究,所以本书在磁悬浮列车与磁悬浮电梯的应用方面仅限于介绍国内外的研究成果,在磁悬浮振动的主动控制和磁悬浮微重力隔振平台方面仅介绍我们自己的研究成果,没有在智能化方面展开论述。将磁悬浮直线支承纳入本书的范围,旨在抛砖引玉,将磁悬浮支承技术的研究引向



更深更广的领域,特别是在智能支承方面,磁悬浮旋转支承与磁悬浮直线支承有很多共同之处,可以相互借鉴、相互促进、共同发展,把磁悬浮智能支承技术推向更高的层次、更广的范围,为磁悬浮支承技术的智能化、磁悬浮智能支承的产业化奠定坚实的理论基础,为磁悬浮列车的智能化提供技术支持,为高端装备的智能化提供借鉴。

本书具体内容如下:

第1章简要介绍了包括磁悬浮轴承与磁悬浮列车在内的磁悬浮支承技术的发展历史及现状,论述了磁悬浮轴承的分类及其特点,梳理了智能支承的发展趋势,提出了具有“4S”特征的智能支承概念,介绍了与磁悬浮智能支承相关的具体内容。第2章主要从完全约束磁悬浮支承系统与非完全约束磁悬浮支承系统,磁悬浮支承的冗余设计与可靠性,弱耦合径向、轴向磁悬浮支承等方面,阐述了磁悬浮支承的典型结构形式,特别是冗余结构为磁悬浮支承的重构与自愈提供了可能,这也是磁悬浮智能支承区别于其他支承最典型的结构特征。第3章从磁悬浮轴承三维磁场分析、磁悬浮轴承支承参数的辨识等方面着重分析了磁悬浮轴承的支承特性。这是关于磁悬浮轴承最基础的分析工作,也是磁悬浮智能支承最基础的理论支撑。磁悬浮智能支承之所以能够成为具有“4S”特征的智能支承,除了在结构上具有冗余和在线重构特征外,主要是因为它具有智能控制算法。第4章从磁悬浮控制系统的基本算法——PD(比例微分)控制算法入手,介绍了PID(比例积分微分)控制,在此基础上着重阐述了磁悬浮支承系统模糊控制、神经网络控制等智能控制算法。磁悬浮智能支承的重要特征是具有自诊断与自愈功能。第5章从磁悬浮支承的故障诊断、容错控制、冗余重构等方面,阐述了磁悬浮支承在出现故障时,通过冗余的结构或电路等,在线(自主)重新构成新的悬浮控制系统,使磁悬浮支承的支承性能不退化,从而实现磁悬浮智能支承的自愈功能。第6章主要讲述磁悬浮直线支承的应用,介绍了常导磁悬浮列车、超导磁悬浮列车及正在研究的真空管道磁悬浮列车的工作原理及其发展现状与趋势;基于轮轨列车与磁悬浮列车的工作原理,阐述了磁悬浮列车的特点与优势。同时介绍了另外两种磁悬浮直线支承的应用,即磁悬浮电梯和磁悬浮机床导轨。第7章、第8章主要从磁悬浮支承的减振隔振作用出发,阐述了磁悬浮支承的两种典型应用,旨在在更大范围内向读者介绍磁悬浮支承的广泛应用,为推动磁悬浮支承,特别是磁悬浮智能支承的

应用提供借鉴。

本书是作者团队多年研究工作的总结,书中除了关于磁悬浮直线支承的内容外,其余主要部分是团队中老师与学生共同研究的结果。在此特别感谢吴华春教授、丁国平教授、张锦光教授、程鑫副教授、郭新华副教授、陈昌皓博士、江友亮博士生等的支持与帮助,他们也参与了本书部分内容的撰写。

本书内容涉及作者团队主持或参与的多项国家自然科学基金项目的研究成果,也包含国家重点研发计划(课题编号:2018YFB2000103;课题名称:磁悬浮轴承与支承部件的耦合作用机理及设计方法研究)的研究内容。在此一并感谢这些项目的资助!

作者

2020年11月



目录

第 1 章 绪论 /1

- 1.1 磁悬浮支承的发展历史与现状 /3
- 1.2 磁悬浮旋转支承 /9
 - 1.2.1 主动磁悬浮轴承 /9
 - 1.2.2 被动磁悬浮轴承 /10
 - 1.2.3 超导磁悬浮轴承 /11
 - 1.2.4 混合磁悬浮轴承 /14
- 1.3 磁悬浮轴承的特点 /18
- 1.4 智能支承 /19
 - 1.4.1 轴承智能化的研究及其发展现状 /20
 - 1.4.2 磁悬浮智能支承 /23
- 1.5 本章小结 /25
- 本章参考文献 /25

第 2 章 磁悬浮智能支承的结构 /28

- 2.1 磁悬浮支承原理 /28
 - 2.1.1 完全约束磁悬浮支承系统 /28
 - 2.1.2 非完全约束磁悬浮支承系统 /29
- 2.2 非完全约束磁悬浮系统的实际案例 /29
 - 2.2.1 磁悬浮盘片系统的动力学模型 /29
 - 2.2.2 磁悬浮盘片系统盘片空间状态信息的获取 /31
 - 2.2.3 磁悬浮盘片系统盘片控制信号的计算 /32



2.2.4	电磁铁三个方向电磁力的特性	/33
2.2.5	磁悬浮支承边缘效应电磁力的实验测定	/36
2.2.6	磁悬浮盘片系统的实验	/38
2.3	磁悬浮支承的冗余设计与可靠性	/42
2.3.1	径向磁悬浮支承冗余设计方案	/43
2.3.2	轴向磁悬浮支承冗余设计方案	/44
2.3.3	控制系统冗余结构设计方案	/45
2.3.4	径向磁悬浮支承残余承载力	/46
2.3.5	轴向磁悬浮支承残余承载力	/46
2.3.6	磁悬浮支承冗余设计的可靠性	/48
2.4	弱耦合径向磁悬浮支承	/50
2.4.1	力平衡补偿控制	/51
2.4.2	弱耦合径向磁悬浮支承冗余设计	/54
2.4.3	参数的计算与选择	/55
2.4.4	各种失效类型的补偿	/56
2.5	弱耦合轴向磁悬浮支承	/59
2.5.1	结构参数的确定	/60
2.5.2	六环冗余结构残余承载力	/62
2.5.3	六环冗余结构附加弯矩	/63
2.5.4	六环冗余结构与两环冗余结构的性能对比	/67
2.5.5	六环冗余轴向磁悬浮支承的热性能	/69
2.6	本章小结	/79
	本章参考文献	/80
第3章	磁悬浮轴承磁场分析与支承参数识别	/83
3.1	磁悬浮轴承三维磁场有限元分析	/83
3.1.1	有限元建模	/83
3.1.2	求解	/89
3.1.3	解后处理	/89
3.2	磁悬浮轴承磁场耦合分析	/95
3.2.1	不同磁极布置形式的磁场分布比较	/95
3.2.2	不同磁极布置形式的磁力比较	/98

- 3.3 磁悬浮支承特性参数的测试和辨别 /99
 - 3.3.1 力-电流系数的实验测定 /100
 - 3.3.2 力-位移系数的实验测定 /101
 - 3.3.3 电控环节的数学模型辨别 /102
 - 3.3.4 磁悬浮轴承动力特性参数的辨别 /106
- 3.4 本章小结 /107
- 本章参考文献 /108
- 第4章 磁悬浮智能支承的控制算法 /109**
 - 4.1 磁悬浮支承的PD控制算法 /109
 - 4.2 磁悬浮支承的PID控制算法 /116
 - 4.3 磁悬浮支承的智能控制算法 /118
 - 4.4 磁悬浮支承系统模糊控制 /120
 - 4.4.1 模糊控制概述 /120
 - 4.4.2 模糊控制原理 /120
 - 4.4.3 模糊PID控制 /121
 - 4.4.4 基于模糊PID控制的磁悬浮系统 /124
 - 4.5 磁悬浮系统神经网络控制 /126
 - 4.5.1 神经网络控制概述 /126
 - 4.5.2 人工神经元模型 /126
 - 4.5.3 神经网络学习规则 /127
 - 4.5.4 BP神经网络PID控制 /128
 - 4.5.5 单神经元自适应控制及仿真 /129
 - 4.6 BP神经网络控制实例 /130
 - 4.7 本章小结 /132
 - 本章参考文献 /133
- 第5章 磁悬浮支承的故障诊断与重构 /134**
 - 5.1 磁悬浮支承的故障分类 /134
 - 5.1.1 针对位移检测环路的故障分析 /135
 - 5.1.2 针对电流控制环路的故障分析 /136
 - 5.2 磁悬浮智能支承的重构 /138
 - 5.2.1 基于冗余位移传感器的容错控制 /139



5.2.2	强耦合冗余支承结构的重构策略	/140
5.2.3	弱耦合冗余支承结构的重构策略	/149
5.3	本章小结	/160
	本章参考文献	/160
第6章	磁悬浮直线支承	/164
6.1	常导磁悬浮列车	/164
6.1.1	EMS式磁悬浮列车	/164
6.1.2	EDS式磁悬浮列车	/167
6.2	超导磁悬浮列车	/169
6.3	真空管道磁悬浮列车	/171
6.3.1	常导电磁悬浮	/171
6.3.2	永磁悬浮	/172
6.3.3	电动悬浮	/174
6.3.4	高温超导悬浮	/174
6.3.5	混合磁悬浮	/175
6.3.6	真空管道磁悬浮列车方面的研究	/175
6.4	磁悬浮列车的特点与悬浮模型	/178
6.4.1	磁悬浮列车的特点	/178
6.4.2	磁悬浮列车的悬浮原理与悬浮模型	/179
6.5	磁悬浮直线支承的其他应用	/185
6.5.1	磁悬浮机床导轨	/185
6.5.2	磁悬浮电梯	/185
6.6	本章小结	/187
	本章参考文献	/187
第7章	磁悬浮主动隔振技术	/191
7.1	磁悬浮主动隔振技术原理	/191
7.2	差动式磁悬浮隔振器数学模型	/192
7.3	磁悬浮隔振器的设计与分析	/193
7.3.1	结构设计及参数选择	/193
7.3.2	磁悬浮隔振器电磁场分析	/194
7.3.3	电磁力模型辨识	/197

- 7.4 磁悬浮主动隔振系统动力学特性 /199
 - 7.4.1 磁悬浮单层隔振系统动力学特性 /199
 - 7.4.2 磁悬浮双层隔振系统动力学特性 /200
 - 7.4.3 磁悬浮浮筏隔振系统动力学特性 /207
- 7.5 磁悬浮隔振系统的控制系统 /214
 - 7.5.1 控制策略 /214
 - 7.5.2 控制模型 /215
- 7.6 LQR 控制系统仿真 /216
 - 7.6.1 磁悬浮单层隔振系统 /216
 - 7.6.2 磁悬浮浮筏隔振系统 /217
- 7.7 实验分析 /219
 - 7.7.1 隔振系统结构设计 /219
 - 7.7.2 磁悬浮单层隔振系统实验分析 /222
 - 7.7.3 磁悬浮浮筏隔振系统实验分析 /223
- 7.8 本章小结 /223
- 本章参考文献 /224
- 第 8 章 磁悬浮微重力隔振系统 /225**
 - 8.1 空间微重力环境与磁悬浮隔振装置 /225
 - 8.1.1 空间微重力环境与空间科学实验 /225
 - 8.1.2 空间微重力隔振装置 /227
 - 8.1.3 磁悬浮微重力主动隔振系统面临的基础理论问题 /234
 - 8.2 磁悬浮微重力隔振系统建模 /235
 - 8.2.1 隔振控制系统基本原理 /235
 - 8.2.2 磁悬浮微重力隔振结构设计 /235
 - 8.2.3 微重力隔振装置测量模型建立 /237
 - 8.2.4 微重力隔振系统动力学建模 /245
 - 8.3 磁悬浮微重力隔振控制系统设计 /252
 - 8.4 本章小结 /257
 - 本章参考文献 /257



第 1 章 绪论

支承技术是使机械能够运动的最基本的技术之一。可以说,没有支承就没有机械运动。按照所支承的运动形式,支承部件可以分为两大类:其一是支承旋转运动的部件,被称为轴承,如滚动轴承、液压滑动轴承、空气轴承、磁悬浮轴承等;其二是支承直线运动的部件,被称为导轨,如机床滑动导轨、机床滚动导轨等。磁悬浮列车是磁悬浮直线支承的一个典型应用实例。显然,无论是旋转运动还是直线运动,离开了支承部件都是不可能实现的。自从人类发明了具有机械运动的机器,就有了支承部件的应用。因此,支承技术是最古老的机械技术之一。中国是世界上发明并应用轴承最早的国家之一。如图 1-1 所示的独轮车,图 1-2 所示的水动力抽水车,图 1-3 所示的人力抽水车,这些古代发明的旋转装置的支承均是由滑动支承部件(或称为滑动轴承)实现的。滑动轴承是人类最早应用的支承部件。然而,现代轴承技术的产生与飞速发展,是起始于滚动轴承的发明与发展的。



图 1-1 独轮车



图 1-2 水动力抽水车

十七世纪末,英国的瓦洛设计制造了球轴承,并装在邮车上试用;英国的沃思取得球轴承的专利。十八世纪末,德国的赫兹发表了关于球轴承接触应力的论文。在赫兹成就的基础上,德国的斯特里贝克、瑞典的帕姆格伦等人进行了大量的试验,对发展滚动轴承的设计理论和疲劳寿命计算做出了贡献。随后,