



国防科技图书出版基金

“十二五”国家重点出版规划项目

航天器和导弹制导、导航与控制

# 磁悬浮惯性动量轮技术

Magnetically Suspended Inertial  
Momentum Wheel Technology

房建成 孙津济 樊亚洪 © 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

013023877



国防科技图书出版基金

房建成 孙津济 樊亚洪 著

V448.22  
05

# 磁悬浮惯性动量轮技术

Magnetically Suspended Inertial Momentum Wheel Technology



Introduction

Overall Structure Design of Magnetically Suspended Inertial Momentum Wheel

Electromagnetic Analysis and Design of New Permanent Magnet Biased Magnetic Bearing

High Speed Rotor Control and Stability Analysis of Magnetically Suspended Inertial Momentum Wheel System

High Precision Active Vibration Control of Magnetically Suspended Inertial Momentum Wheel System

Design of Active/Passive Magnetically Suspended Reaction Flywheel and High Precise Control of Its Output Torque

Design of High Torque Magnetically Suspended Bias Momentum Wheel and Its Application in Space



国防工业出版社  
National Defense Industry Press



北航

C1630801

V448.22  
05

013032871

**图书在版编目(CIP)数据**

磁悬浮惯性动量轮技术 / 房建成, 孙津济, 樊亚洪著. —北京: 国防工业出版社, 2012. 12

(航天器和导弹制导、导航与控制丛书)

ISBN 978 - 7 - 118 - 07991 - 3

I. ①磁... II. ①房... ②孙... ③樊... III. ①航空航天器 - 姿态控制 - 飞轮 - 电磁轴承 - 转子动力学 IV. ①V42

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 006605 号

**磁悬浮惯性动量轮技术**

著 者 房建成 孙津济 樊亚洪

责任编辑 王 华

出版发行 国防工业出版社(010 - 88540717 010 - 88540777)

地 址 邮 编 北京市海淀区紫竹院南路 23 号, 100048

经 售 新华书店

印 刷 北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

开 本 710 × 960 1/16

印 张 32¼

印 数 1—2500 册

字 数 570 千字


版 印 次 2012 年 12 月第 1 版第 1 次印刷

定 价 160.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

“十二五”国家重点出版规划项目

《航天器和导弹制导、  
导航与控制》丛书

Spacecraft   
Guided Missile

顾问

陆元九

屠善澄

梁思礼

主任委员

吴宏鑫

副主任委员

房建成

## 致读者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题



和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金  
评审委员会

# 国防科技图书出版基金 第六届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 宋家树 蔡 锺 程洪彬

秘 书 长 程洪彬

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

## 委员（按姓氏笔画排序）

于景元 才鸿年 马伟明 王小谟 甘茂治

甘晓华 卢秉恒 邬江兴 刘世参 芮筱亭

李言荣 李德仁 李德毅 杨 伟 肖志力

吴有生 吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠

陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起 崔尔杰

韩祖南 傅惠民 魏炳波

# 《航天器和导弹制导、导航与控制》 丛书编委会

顾 问 陆元九\* 屠善澄\* 梁思礼\*

主任委员 吴宏鑫\*

副主任委员 房建成  
(执行主任)

## 委员 (按姓氏笔画排序)

马广富	王 华	王 辉	王 巍	王子才*
王晓东	史忠科	包为民*	邢海鹰	孙柏林
孙承启	孙敬良*	孙富春	孙增圻	任 章
任子西	向小丽	刘 宇	刘良栋	刘建业
汤国建	严卫钢	李俊峰	李济生*	李铁寿
杨树兴	杨维廉	吴 忠	吴宏鑫*	吴森堂
余梦伦*	张广军	张天序	张为华	张春明
张弈群	张履谦*	陆宇平	陈士橹*	陈义庆
陈定昌*	陈祖贵	周 军	周东华	房建成



孟执中*	段广仁	侯建文	姚郁	秦子增
夏永江	徐世杰	殷兴良	高晓颖	郭雷*
郭雷	唐应恒	黄琳*	黄培康*	黄瑞松*
曹喜滨	崔平远	梁晋才*	韩潮	曾广商*
樊尚春	魏春岭			

常务委员（按姓氏笔画排序）

孙柏林	任子西	吴忠	吴宏鑫*	吴森堂
张天序	陈定昌*	周军	房建成	孟执中*
姚郁	夏永江	高晓颖	郭雷	黄瑞松*
魏春岭				

秘书 全伟 宁晓琳 崔培玲 孙津济 郑丹

注：人名有\*者均为院士。

# 总序

航天器(Spacecraft)是指在地球大气层以外的宇宙空间(太空),按照天体力学的规律运行,执行探索、开发或利用太空及天体等特定任务的飞行器,如人造地球卫星、飞船、深空探测器等。导弹(Guided Missile)是指携带有效载荷,依靠自身动力装置推进,由制导和导航系统导引控制飞行航迹,导向目标的飞行器,如战略/战术导弹、运载火箭等。

航天器和导弹技术是现代科学技术中发展最快、最引人注目的高新技术之一。它们的出现使人类的活动领域从地球扩展到太空,无论是从军事还是从和平利用空间的角度都使人类的认识发生了极其重大的变化。

制导、导航与控制(Guidance Navigation and Control, GNC)是实现航天器和导弹飞行性能的系统技术,是飞行器技术最复杂的核心技术之一,是集自动控制、计算机、精密机械、仪器仪表以及数学、力学、光学和电子学等多领域于一体的前沿交叉科学技术。

中国航天事业历经 50 多年的努力,在航天器和导弹的制导、导航与控制技术领域取得了辉煌的成就,达到了世界先进水平。这些成就不仅为增强国防实力和促进经济发展起了重大作用,而且也促进了相关领域科学技术的进步和发展。

1987 年出版的《导弹与航天丛书》以工程应用为主,体现了工程的系统性和实用性,是我国航天科技队伍 30 年心血凝聚的精神和智慧成果,是多种专业技术工作者通力合作的产物。此后 20 余年,我国航天器和导弹的制导、导航与控制技术又有了突飞猛进的发展,取得了许多创新性成果,这些成果是航天器和导弹的制导、导航与控制领域的新理论、新方法和新技术的集中体现。为适应新形势的需要,我们决定组织撰写出版《航天器

和导弹制导、导航与控制》丛书。本丛书以基础性、前瞻性和创新性研究成果为主,突出工程应用中的关键技术。这套丛书不仅是新理论、新方法、新技术的总结与提炼,而且希望推动这些理论、方法和技术在工程中推广应用,更希望通过“产、学、研、用”相结合的方式使我国制导、导航与控制技术研究取得更大进步。

本丛书分两个部分:第一部分是制导、导航与控制的理论和方法;第二部分是制导、导航与控制的系统和器部件技术。

本丛书的作者主要来自北京航空航天大学、哈尔滨工业大学、西北工业大学、国防科学技术大学、清华大学、北京理工大学、华中科技大学和南京航空航天大学等高等学校,中国航天科技集团公司和中国航天科工集团公司所属的研究院所,以及“宇航智能控制技术”、“空间智能控制技术”、“飞行控制一体化技术”、“惯性技术”和“航天飞行力学技术”等国家级重点实验室,而且大多为该领域的优秀中青年学术带头人及其创新团队的成员。他们根据丛书编委会总体设计要求,从不同角度将自己研究的创新成果,包括一批获国家和省部级发明奖与科技进步奖的成果撰写成书,每本书均具有鲜明的创新特色和前瞻性。本丛书既可为从事相关专业技术研究和应用领域的工程技术人员提供参考,也可作为相关专业的高年级本科生和研究生的教材及参考书。

为了撰写好该丛书,特别聘请了本领域德高望重的陆元九院士、屠善澄院士和梁思礼院士担任丛书编委会顾问。编委会由本领域各方面的知名专家和学者组成,编著人员在组织和技术工作上付出了很多心血。本书得到了中国人民解放军总装备部国防科技图书出版基金资助和国防工业出版社的大力支持。在此一并表示衷心感谢!

期望这套丛书能对我国航天器和导弹的制导、导航与控制技术的人才培养及创新性成果的工程应用发挥积极作用,进一步促进我国航天事业迈向新的更高的目标。

丛书编委会

2010年8月

# 序

随着我国航天事业的飞速发展,对航天器姿态控制能力的要求越来越高。惯性动量轮和控制力矩陀螺,正是卫星、飞船和空间站等航天器进行高精度姿态稳定或姿态机动所必须采用的惯性控制执行机构。传统惯性执行机构采用机械轴承支承技术,由于存在接触摩擦和不平衡振动,成为制约航天器平台实现高精度、高稳定性和长寿命的主要技术瓶颈。

磁悬浮惯性动量轮具有高精度、长寿命、低噪声,以及能够实现多自由度动量交换和高速储能等显著的技术优势,是高分辨率对地观测卫星、激光通信卫星、空间武器平台和空间望远镜等实现高精度空间指向和高稳定度姿态控制的理想执行机构。

本书作者房建成同志带领科研团队自20世纪90年代末开始,以高分辨力对地观测卫星和载人航天为背景,瞄准国际前沿技术,进行了长达十余年的磁悬浮姿控储能两用飞轮、磁悬浮惯性动量轮以及磁悬浮控制力矩陀螺的探索研究,取得了一系列原创性科研成果,部分成果已完成工程化研制并逐渐进入工程应用,该团队已经成为推动我国磁悬浮惯性执行机构技术发展的中坚力量。

作为北京航空航天大学兼职教授,我对本书作者房建成同志及其带领的科研团队是了解的,他们一贯敬业、勤奋工作,在航天相关活动中都很积极,并颇有成就。本书是他们多年科研教学成果的总结与提炼,凝聚了作者多年来从事磁悬浮惯性执行机构技术研究和工程研制的理论成果和实践经验,融合国内外的最新技术进展,突出创新性和前瞻性的研究成果及工程应用中的关键技术,是国内第一部介绍磁悬浮惯性动量轮技术的专

著。本书力求创新、理论与实践相联系,既可供从事相关专业技术研究和应用领域的工程技术人员参考,也可作为高等学校相关专业研究生的教材或教学参考书,对于我国未来航天器姿态控制系统实现跨代式发展具有重要的推动作用。

吴宏鑫

2012年10月

# 前 言

惯性执行机构是卫星、飞船和空间站等航天器进行高精度姿态稳定或姿态机动必须采用的控制执行机构,主要包括惯性动量轮(简称飞轮)和控制力矩陀螺两类。飞轮输出力矩精度高,是各类三轴稳定卫星实现高精度、长寿命姿态稳定控制的高精度执行机构;控制力矩陀螺不仅输出力矩精度高,而且输出力矩大,是空间站和大型卫星平台进行姿态稳定控制必不可少的大力矩控制执行机构,也是新一代“敏捷”卫星平台实现快速姿态机动的关键控制执行机构。

传统惯性执行机构的高速转子采用机械轴承支承,由于存在接触摩擦和不平衡振动,成为制约卫星平台实现高精度、高稳定性和长寿命的主要技术瓶颈。而采用磁悬浮轴承支承的磁悬浮惯性执行机构,转子无接触摩擦,可通过主动振动控制,有效抑制转子不平衡等扰动,实现微振动,不仅输出力矩精度比机械轴承飞轮提高1~2个量级,而且可实现长寿命,被誉为未来航天器理想的高精度长寿命姿态控制执行机构,是我国高分辨率对地观测卫星发展急需的关键部件。

西方发达国家早在20世纪60年代就已开始进行磁悬浮惯性执行机构技术的理论和实验研究。法国在1986年将Alcatel Space Industries公司研制的磁悬浮反作用飞轮用于高分辨力对地观测卫星SPOT-1的姿态控制,此后的SPOT2~5系列卫星均采用磁悬浮飞轮作为主要的高精度长寿命姿态控制执行机构,尤其是2002年发射入轨的地球观测卫星SPOT-5采用了3个两自由度磁悬浮反作用飞轮。德国Teldix公司从20世纪70年代末开始相继研制出单自由度和两自由度磁悬浮惯性动量轮,并于2007年研制成功了一种具有微框架能力的大力矩高精度洛仑兹力五自由度磁悬浮

惯性动量轮。与此同时,日本也开展了多种磁悬浮惯性动量轮的研究,在2010年6月发射的新技术试验卫星SERVIS-2上搭载了一种采用倾斜磁极磁轴承的五自由度磁悬浮惯性动量轮,计划用于未来高分辨率对地观测卫星和空间望远镜。美国在NASA的大力支持下,不仅研制成功磁悬浮惯性动量轮,而且从20世纪90年代初开始相继开展了IPACS(集成能量与姿态控制系统)等多个基于高速磁悬浮飞轮的研究计划,主要研究目标是实现航天器的姿控储能一体化。

苏联最早在“礼炮”号空间站上使用了磁悬浮球飞轮作为姿态控制执行机构,并在“和平”号空间站上正式采用了名为Gyrodyne的单框架磁悬浮控制力矩陀螺,“和平”号从1986年升空到2001年完成使命,单框架磁悬浮控制力矩陀螺群Gyrodynes作为主要的姿态调整和稳定控制执行机构,为其超期服役发挥了巨大作用。另外,法国和日本也开展了磁悬浮控制力矩陀螺的研究。

随着我国航天事业的飞速发展及其对航天器提出的高精度长寿命的迫切需求,研制航天器姿态控制用高精度长寿命磁悬浮惯性执行机构被提上重要日程。作者及其科研团队自“九五”末开始了高精度长寿命磁悬浮惯性执行机构的研究;“十五”期间,重点开展了卫星新型姿控/储能两用飞轮技术的研究,突破了高精度磁悬浮支承和高速高精度驱动两大关键技术,在此基础上完成了新一代卫星高精度长寿命磁悬浮反作用飞轮的工程化研制;“十一五”期间,研制成功我国第一个五自由度全主动磁悬浮惯性动量轮型号产品,并首次在新技术试验卫星中进行搭载应用。此外,以载人航天工程为背景,从“九五”末开始同时进行了磁悬浮控制力矩陀螺的研究,历时13年,取得了一系列科研成果,同时培养了一批优秀研究生,推动了我国磁悬浮惯性执行机构技术的发展。作者以十多年来北京航空航天大学在该技术领域所取得的最新研究成果为主,结合国内外的最新技术进展,撰写成《磁悬浮惯性动量轮技术》和《磁悬浮控制力矩陀螺技术》两部专著。

《磁悬浮惯性动量轮技术》以新型永磁偏置混合磁悬浮轴承及其控制技术为核心内容,以主被动磁悬浮反作用飞轮和五自由度大力矩偏置动量轮等前沿技术为主线,重点介绍了磁悬浮惯性动量轮总体设计技术、新型磁轴承的电磁设计和分析方法,以及磁悬浮大惯量扁平转子的稳定控制方法和主动振动控制方法,另外,分别介绍了几类典型磁悬浮惯性动量轮的



设计和空间应用等内容。全书重点突出了基础性、创新性和前瞻性的研究成果及工程应用中的关键技术。

全书共7章,分四部分内容。第一部分包括第1章和第2章,主要介绍空间用惯性执行机构的相关基础知识和基本理论,以及磁悬浮惯性动量轮的工作原理、分类和总体设计方法;第二部分为第3章,主要介绍新型永磁偏置磁轴承的分析方法与电磁设计方法;第三部分包括第4章和第5章,主要介绍磁悬浮惯性动量轮转子的稳定性分析方法、稳定性判据,以及高速高稳定度控制方法、磁悬浮高速转子弹性模态振动抑制方法、动框架控制方法、高精度不平衡主动振动控制方法以及鲁棒控制方法等;第四部分包括第6章和第7章,主要介绍主被动磁悬浮反作用飞轮和磁悬浮大力矩偏置动量轮的设计及其空间应用。

本书力求原创性强、理论联系实际,但由于涉及多门学科前沿,内容较新,作者水平有限,难免存在不足之处,恳请各位专家和广大读者批评指正。本书可供从事相关专业技术研究和应用领域的工程技术人员参考,也可作为高等学校相关专业研究生的教材或教学参考书。

特别感谢中国空间技术研究院的吴宏鑫院士在本书撰写过程中所给予的热情鼓励、支持和指导!感谢“惯性技术”国家级重点实验室、“新型惯性仪表与导航系统技术”国防重点学科实验室、“导航制导与传感—先进惯性仪表与系统技术”国家自然科学基金委创新研究群体和“新型惯性仪表与系统技术”教育部长江学者创新团队给予的大力支持和帮助。在十几年的研究过程中,作者所带领科研团队中的十多位教授及四十多位博士和硕士先后参加了相关课题的研究工作。此外,本书部分内容还参考了国内外同行专家、学者的最新研究成果,在此一并向他们致以诚挚的谢意!

感谢国防科技图书出版基金评审委员会、《航天器和导弹制导、导航与控制》丛书编委会、国防工业出版社在本书出版过程中给予的大力支持,以及北京航空航天大学在科研工作中给予的支持和帮助,最后感谢在本书撰写过程中所有给予关心、支持和帮助的人们!

作者

2012年8月于北京航空航天大学

# 目 录

## CONTENTS

<b>第 1 章 绪论</b>	<b>1</b>	<b>Chapter 1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 惯性执行机构概述	1	1.1 Overview of Inertial Actuator	1
1.2 惯性执行机构工作原理及分类	4	1.2 Working Principle and Classification of Inertial Actuator	4
1.3 磁悬浮惯性动量轮组成	13	1.3 Composition of Magnetically Suspended Inertial Momentum Wheel	13
1.4 磁悬浮惯性动量轮应用概况与发展趋势	15	1.4 Application Survey and Development Prospect of Magnetically Suspended Inertial Momentum Wheel	15
1.5 本章小结	22	1.5 Summary	22
参考文献	23	References	23
<b>第 2 章 磁悬浮惯性动量轮的总体结构</b>	<b>27</b>	<b>Chapter 2 Overall Structure Design of Magnetically Suspended Inertial Momentum Wheel</b>	<b>27</b>
2.1 引言	27	2.1 Introduction	27
2.2 磁悬浮惯性动量轮整体结构	27	2.2 Whole Structure of Magnetically Suspended Inertial Momentum Wheel	27
2.3 磁悬浮惯性动量轮磁轴承结构及构型	29	2.3 Structure and Configuration of Magnetic Bearing in Magnetically Suspended Inertial Momentum Wheel	29
2.4 磁悬浮惯性动量轮驱动电机结构	51	2.4 Structure of Drive Motor in Magnetically Suspended Inertial Momentum Wheel	51
2.5 磁悬浮惯性动量轮结构设计	52	2.5 Structure Design of Magnetically Suspended Inertial Momentum Wheel	52
2.6 磁悬浮惯性动量轮的热分析与设计	65	2.6 Thermal Analysis and Design of Magnetically Suspended Inertial Momentum Wheel	65
2.7 磁悬浮惯性动量轮剩磁矩分析、设计与补偿	75	2.7 Remnant Magnetic Moment Analysis, Design and Compensation of Magnetically Suspended Inertial Momentum Wheel	75
2.8 磁悬浮惯性动量轮锁紧/解锁机构设计与测试	85	2.8 Structure Design and Test of Locking/Unlocking Device of Magnetically Suspended Inertial Momentum Wheel	85
2.9 本章小结	105	2.9 Summary	105
参考文献	105	References	105