



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

# 磁悬浮控制力矩 陀螺技术

Magnetically Suspended Control Moment  
Gyroscope Technology

房建成 任元 © 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



房建成 任元 著

# 磁悬浮控制力矩 陀螺技术

Magnetically Suspended Control Moment  
Gyroscope Technology

Introduction

Overall Structure Design and Dynamic Modeling for a MSCMG

Whirling Modes Stability Criterion for Magnetically Suspended Rotor Systems with Heavy Gyroscopic Effects

Field Balancing Technique and Active Vibration Control Method for a High-Speed Magnetically Suspended Rotor

Harmonic Current Reduction in High-Speed Magnetically Suspended Rotor Systems with Sensor Runout

High-Stability Control Method for a Single-Gimbal MSCMG

High-Bandwidth and High-Precision Control Method for a Single-Gimbal MSCMG

Decoupling Control for a Double-Gimbal MSCMG

Robust Control for Structural Modes of a Double-Gimbal MSCMG

High-Precision Control for the Gimbal-Servo System of a MSCMG

Summary and Outlook



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

北京

V448.2  
15

## 图书在版编目(CIP)数据

磁悬浮控制力矩陀螺技术/房建成,任元著. —北京:国防工业出版社,2014.12

(航天器和导弹制导、导航与控制丛书)

ISBN 978-7-118-09919-5

I. ①磁… II. ①房… ②任… III. ①航天器-飞行控制-磁浮陀螺仪-控制力矩陀螺仪 IV. ①V448.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第302675号

## 磁悬浮控制力矩陀螺技术

著 者 房建成 任元

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 710×1000 1/16

印 张 30

印 数 1-2000册

字 数 447千字

版 印 次 2014年12月第1版第1次印刷

定 价 152.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

## 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 王 峰

副主任委员 宋家树 蔡 镭 杨崇新

秘 书 长 杨崇新

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	任 章
任子西	刘 宇	刘良栋	刘建业	汤国建
孙承启	孙柏林	孙敬良*	孙富春	孙增圻
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)

任子西	孙柏林	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,例如人造地球卫星、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高速转子的不平衡振动,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之一。

采用磁悬浮支承技术的磁悬浮控制力矩陀螺具有极微振动、高精度和长寿命的突出优势,是高分辨率对地观测卫星、激光通信卫星和空间望远镜等“超稳、超静”航天器平台以及空间站等大型长寿命航天器实现高精度、高稳定度姿态控制的关键执行机构。

本书是《磁悬浮惯性动量轮技术》的姊妹篇,作者房建成同志带领科研团队自20世纪90年代末开始,以高分辨率对地观测和载人航天等国家重大需求为背景,瞄准国际前沿技术,进行了长达十余年的磁悬浮惯性动量轮和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,部分成果已经完成型号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的兼职教授,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凝练,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,融合国内外最新研究进展,突出创新性和前瞻性的研究成果及工程中的关键技术,是国内第一部介绍磁悬浮控制力矩陀螺的专著。

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越式发展具有重要的推动作用。

吴宏鑫

2014年10月

# 前 言

在航天器的三大类姿态执行机构中,控制力矩陀螺(Control Moment Gyroscope, CMG)输出力矩可高达几百牛·米,具有力矩输出放大倍数大、动态性能好等优于反作用轮和偏置动量轮的优点,同时与框架动量矩轮相比,系统实现和姿控操纵律设计相对简单。因此,控制力矩陀螺已成为空间站等大型航天器以及敏捷机动卫星实现大力矩姿态机动控制的核心执行机构,是我国未来空间站建设的关键技术之一。

磁悬浮控制力矩陀螺(Magnetically Suspended Control Moment Gyroscope, MSCMG)不仅具有长寿命、高控制精度的优良特性,而且具有极微振动的卓越特性,可以大大提高航天器姿态的控制精度和稳定度,在国外已经得到应用并引起广泛重视。从航天器姿态执行机构的发展方向来看, MSCMG 已成为大型航天器高精度姿态控制和中小型航天器快速机动的姿控执行机构的首选方案,也是我国下一代高分辨率对地观测、对天观测、星间光通信和其他军事航天任务等迫切需要的“超稳、超静”卫星平台关键的惯性执行机构。

西方发达国家早在 20 世纪 60 年代就已经开始进行磁悬浮惯性执行机构技术的理论和实验研究。法国早在 1986 年就将 Alcatel Space Industries 公司研制的磁悬浮反作用飞轮用于高分辨率对地观测卫星 SPOT - 1 的姿态控制,此后的 SPOT - 2 ~ SPOT - 5 系列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 个二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伦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,不仅成功研制磁悬浮惯性动量轮,而且从20世纪90年代开始相继开展了集成能量与姿态控制系统(IPACS)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。除此之外,美国计划2030年前后发射的可用于探究星系与黑洞之间联系和寻找适合生命存在的太阳系外行星的太空望远镜——先进技术大孔径太空望远镜(ATLAST),其灵敏度可达“哈勃”2000倍,将采用德国Teldix公司生产的五自由度磁悬浮飞轮。

苏联从“礼炮”3号开始测试名为“Gyrodynes”的单框架MSCMG群。Gyrodynes在“礼炮”5号上开始进入操作,并在“礼炮”6号、“礼炮”7号和“和平号”上作为固定设备投入使用。“和平号”空间站从1986年升空到2001年完成使命,单框架MSCMG群Gyrodyne作为主要的姿态调整和稳定控制执行机构,为其超期服役功不可没。此外,法国和日本也开展了MSCMG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、微振动的迫切需求,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磁悬浮惯性动量轮型号产品,并首次在新技术试验卫星SJ-9A中搭载试验成功。以载人航天工程为背景,从“九五”末开始进行了MSCMG的研究,历时15年,取得了一系列研究成果,同时培养了一批优秀的研究生,推动了我国磁悬浮惯性执行机构技术的发展。作者以10多年来北京航空航天大学在该

技术领域所取得的研究成果为主,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。其中,《磁悬浮惯性动量轮技术》一书已由国防工业出版社于2012年12月出版发行,并获得国防工业出版社优秀图书一等奖。

《磁悬浮控制力矩陀螺技术》以高速磁悬浮转子系统的稳定性分析与高精度主动振动控制,及单框架 MSCMG 的高精度、高稳定度控制,和双框架 MSCMG 的高精度解耦控制为核心内容,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 11 章,分为六部分。第一部分包括第 1 章和第 2 章,主要介绍 MSCMG 的工作原理和总体结构。第二部分包括第 3 ~ 第 5 章,主要介绍高速磁悬浮转子系统的稳定性分析和控制方法。其中:第 3 章提出并证明了强陀螺效应磁悬浮转子系统的涡动模态稳定判据,为后续各章磁悬浮转子系统的高稳定度、高精度和微振动控制提供理论依据;第 4 章介绍磁悬浮转子系统的现场动平衡方法和主动振动控制方法;第 5 章介绍磁悬浮高速转子系统位移传感器的多谐波电流与振动抑制。第三部分包括第 6 章和第 7 章,深入研究了单框架 MSCMG 的高稳定度、高精度控制方法。第 6 章介绍单框架 MSCMG 的高稳定度控制方法,第 7 章介绍单框架 MSCMG 的高精度、高带宽控制方法。第四部分包括第 8 章和第 9 章,分别介绍双框架 MSCMG 的解耦控制与结构弹性模态振动抑制方法。第五部分由第 10 章组成,主要介绍 MSCMG 框架伺服系统的高精度控制问题。第六部分由第 11 章组成,对磁悬浮惯性执行机构技术进行了总结与展望。

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,再加上作者水平、时间有限,难免存在不妥和错误之处,恳请广大同行、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鼓励、支持和指导!感谢“惯性技术”国防科技重点实验室、“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、“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 10 几载的研究过程中,作者所带领科研团队中的 10 多位教授及 50 多位博士与硕士先后参加了相关课题的研究工作,在此特别感谢刘刚教授、韩邦成教授、魏彤副教授、崔培玲副教授、汤继强副教授、孙津济副教授和于灵慧博士、李海涛博士、郑世强博士、徐向波博士、王英广博士、樊亚洪博士、陈冬博士、刘强博士、王春娥博士,宋玉旺、杨昌昊和周银锋 3 位博士后,谢进进、李文琢、张会娟、彭聪和刘超博士生等的研究工作。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!

还要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》丛书编委会和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

2014 年 10 月



# 目 录

## CONTENTS

<b>第 1 章 绪论</b>	1	<b>Chapter 1 Introduction</b>	1
1.1 航天器姿态控制执行机构概述	1	1.1 Overview of Attitude Control Actuator for Spacecraft	1
1.2 控制力矩陀螺的发展及应用	2	1.2 Development and Application of CMG	2
1.2.1 国外 CMG 研究及应用现状	2	1.2.1 Foreign Study and Application Status of CMG	2
1.2.2 国内 CMG 研究现状	9	1.2.2 Domestic Study and Application Status of CMG	9
1.3 本书的编写特点和内容安排	11	1.3 Writing Characteristics and Content Arrangement of the Monograph	11
1.3.1 编写特点	11	1.3.1 Writing Characteristics of the Monograph	11
1.3.2 内容安排	12	1.3.2 Content Arrangement of the Monograph	12
1.4 本章小结	14	1.4 Summary	14
参考文献	14	References	14
<b>第 2 章 MSCMG 的总体结构设计及动力学建模</b>	18	<b>Chapter 2 Overall Structure Design and Dynamic Modeling for a MSCMG</b>	18
2.1 引言	18	2.1 Introduction	18
2.2 MSCMG 的基本结构与工作原理	19	2.2 Basic Structure and Working Principle of MSCMG	19
2.2.1 单框架 MSCMG 的基本机构与工作原理	19	2.2.1 Basic Structure and Working Principle of a Single - Gimbal MSCMG	19
2.2.2 双框架 MSCMG 的基本结构与工作原理	21	2.2.2 Basic Structure and Working Principle of a Double - Gimbal MSCMG	21
2.2.3 永磁偏置混合磁轴承的基本结构与工作原理	22	2.2.3 Basic Structure and Working Principle of Permanent Magnet Biased Magnetic Bearings	22