

图书在版编目(CIP)数据

静电悬浮控制系统/晏磊, 刘光军著. —北京: 国防工业出版社, 2001. 11

ISBN 7-118-02540-2

I. 静... II. ①晏... ②刘... III. 电浮陀螺仪—研究 IV. TN965

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 23188 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 7 $\frac{1}{2}$ 190 千字

2001 年 11 月第 1 版 2001 年 11 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 18.00 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 第三届评审委员会组成人员

名 誉 主 任 委 员	怀国模			
主 任 委 员	黄 宁			
副 主 任 委 员	殷鹤龄	高景德	陈芳允	曾 铎
秘 书 长	崔士义			
委 员	于景元	王小谟	尤子平	冯允成
(以姓氏笔划为序)				
	刘 仁	朱森元	朵英贤	宋家树
	杨星豪	吴有生	何庆芝	何国伟
	何新贵	张立同	张汝果	张均武
	张涵信	陈火旺	范学虹	柯有安
	侯正明	莫梧生	崔尔杰	

序

静电陀螺(ESG)是目前世界上最高精度的惯性器件,具有重要军事价值和国防意义。国外已用于核潜艇、远程战略轰炸机等武器装备。海湾战争美军 F-117A 隐形飞机装备 ESG 系统取得良好结果。由于这种陀螺技术难度较大,目前世界上只有为数不多的几个国家研制出了产品,因而其相关研制资料较为保密。我国进行了多年的静电陀螺的研究,取得了多方面的研究成果,但目前尚无相关的著作正式出版。本专著的内容是 ESG 技术的关键,对于当前我国国防与空间领域正在研制的静电陀螺仪提供了宝贵的工程技术基础,并对于液浮陀螺的磁悬浮支承控制技术也有一定参考价值。

晏磊博士对静电陀螺进行了系统的工程与理论研究工作,这本专著正是其博士三年、博士后两年理论与实验研究的结晶,并将它们进一步系统化、理论化的成果。由于重要章节经过了博士论文与博士后论文国内同行专家的严格审核,因此其创新性、系统性都得到了确认。刘光军硕士在大学本科阶段即参加了静电陀螺研究,并一直从事惯性导航领域的工作,对该领域有深刻的理解和丰富的实践经验。

作者独立研制出了静电陀螺的实际系统,完成了系统实验,具有较高的独创性和实用意义。

该书的理论与技术成果主要包括:

1. 等效 $0.01\mu\text{m}$ 静电悬浮间隙三维测量技术的分析论证及球转子微位移电容传感器;
2. 悬浮支承随动控制技术与控制模式;

3. 国内首次探讨实现单一频率恒流源静电悬浮的理论分析与控制函数;

4. 静电悬浮支承中的机电相互关系综合研究;

5. 实现谐振起支悬浮转子,消除了静电击穿放电现象;

6. 运用冗余控制技术探讨了冗余悬浮系统的各种方案优劣。

特推荐此书,希望有更多的年轻学者、专家像本书作者一样,关心、投身国防科学事业,为国防事业贡献青春与智慧。

中国工程院院士

王顺亭

2001 年春节

前 言

本书是我国静电陀螺领域第一部正式出版的专著。也是我国从控制与导航角度全面研究静电悬浮技术的第一部正式出版的专著。

静电陀螺是迄今为止精度最高的陀螺,静电支承系统是静电陀螺系统中的最关键技术。本书以作者在静电悬浮支承领域的研究成果作为基础,并广泛吸取该领域内研究成果的精华,从理论与实践两方面对静电支承技术进行了全面的论述,主要章节及内容包括:

第一章绪论。介绍了静电陀螺仪的基本情况,论述了静电支承系统的基本原理,并指出了目前静电支承研究中的技术热点问题。

第二章球面电极的出力计算及参数分析。对不同电极划分情况下电极的出力计算进行了推导,给出了碗电极损失系数的计算方法,并对支承参数进行了系统分析。

第三章静电加力执行系统。论述了载波频率对静电悬浮的影响,介绍了20kHz音频加力变压器,论述了带变压器容性负载的功放电路的特性,根据这一理论设计的单管乙类功率放大电路具有电路简单可靠、体积小、功耗低的特点。

第四章球转子与碗电极测量电路理论分析。给出了转子三维位移测量一整套等效电路,详细讨论了球碗间隙差动传感器的测量传感特性,并对测量电路的灵敏度、分辨率、零位稳定性及抗干扰能力等指标进行了理论分析,从理论和技术上确定了提高品质指标的方法及手段。

第五章转子位移测量电路实现。介绍了转子位移测量电路的

设计和转子位移电容分辨率标定装置的设计,并对转子位移测量模块电路的零点稳定性、分辨率等进行了标定及实验,实现了 $0.01\mu\text{m}$ 分辨率微位移测量技术。

第六章悬浮支承随动控制技术与控制模式。论述了静电悬浮支承随动控制技术与控制模式,着重解决常规控制方案中大预载电压引起的起支击穿、静态功耗过大及增大漂移误差等不利因素。主要包括连续性变频与变结构起支方案、拟线性预载调制器和绝对开方变结构控制器。

第七章具有并行与容错性能的支承方案探讨。主要讨论了悬浮支承的并行控制与容错余度控制技术。并行技术对多种电极划分方案有效,容错余度控制方案适用于八电极。讨论了八电极并行与容错控制方案的三种形式:分频式半球支承、分时式半球支承及四电极独立支承。通过对几种支承方案比较及因素加权,分时式半球支承及四电极独立支承较佳。据此提出了Z轴半球支承,X、Y轴各用四电极支承的工程方案。

第八章静电悬浮综合技术研究及机—电相互关系。讨论了与悬浮支承密切有关的诸多参量对系统性能的影响。包括摩擦源的基本特性与机理、真空估计方法以及真空度与转速衰减的关系、恒速与转子质心偏移理论分析、干扰源的谐波分析、转子固有频率与刚度的关系等,提出了ESS超前补偿实现电场恒速的方法,与异步电机转差控制比较,设计了相应的自身电场恒速传递函数与电路;最后研究了实心球技术,对其形变等因素进行了讨论,为实心小球的实现及相应测角信号器的设计提供了技术依据。

第九章测量与支承同一频率的恒流支承系统。介绍了单一频率恒流支承系统。提出了单频恒流支承系统与传统的恒压支承系统之间的一系列对偶关系,并从理论与实践两方面证明了单频恒流支承具有的明显优点。本章首次全面推导了单频恒流支承的全部理论公式,解决并解释了单一频率转子位移测量和加力的解耦技术关键,研究了其控制规律、总增益及增益的合理分配。介绍了电路设计以及相应的实验结果。

第十章静电悬浮技术的发展与拓广。对中、美、俄等国静电技术的水平进行了分析比较,提出了我国进一步研究与发展静电技术的关键。对静电悬浮与磁悬浮技术的差异与对偶进行了比较,指出了相互技术上的可借鉴性;对静电陀螺与作者初步参与的超导陀螺研究进行了相关的对偶技术比较,预测了超导陀螺支承系统可能面临的一系列技术关键及解决对策。

本书主体内容全部由作者独立完成,是第一作者博士论文、博士后研究报告的全部内容。本书第一章主体、第二章部分、第四章部分和第十章部分由第二作者撰写,其余大部由第一作者撰写。第二作者对全书的主要公式进行了检验与修正,对全书的文字、结构(尤其是前六章)进行了全面的整理,发现并纠正了不少错误。作者感谢第一作者指导的博士后杨学智博士,他独立深入的分析形成了本书的§3.1节,并对本书§1.3节的撰写也起到了作用。他初步将第一作者的博士论文、博士后研究报告按照作者的构想进行了结构整合,期间所做工作繁杂而技术要求极高。本书可作为导航、空间技术、静电悬浮与磁悬浮、精密仪器控制领域的研究生教材,也可供相关领域科研和工程技术人员参考。

作 者

1999 年 12 月

于北大蔚秀园内

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 陀螺仪的发展与应用	1
§ 1.2 静电陀螺仪简介	3
§ 1.3 静电陀螺支承系统	3
§ 1.4 静电支承的技术热点问题	10
第二章 球面电极的出力计算及参数分析	12
§ 2.1 球面电极的划分	12
§ 2.2 静电吸力的计算	13
§ 2.3 碗电极参数分析	19
第三章 静电加力执行系统	39
§ 3.1 静电悬浮载波机理	39
§ 3.2 20kHz 静电悬浮加力变压器	42
§ 3.3 单管乙类功率放大器	43
第四章 球转子与碗电极测量电路理论分析	49
§ 4.1 不同电极划分下球碗间隙电容桥三维敏感电路 分析	49
§ 4.2 微位移电容传感器机械量与电参量的相互关系	66
§ 4.3 测量因子灵敏度分析	68
§ 4.4 加力与测量效率的分析与公式推导	71
§ 4.5 测量分辨率分析	74
§ 4.6 测量零点稳定性分析	79
§ 4.7 提高测量稳定性和排除高压干扰的措施	80
第五章 转子位移测量电路实现	83
§ 5.1 测量电路的设计	83
§ 5.2 0.01 μm 等效分辨率实现技术	93

§ 5.3 转子位移电容分辨率标定装置·····	98
第六章 悬浮支承随动控制技术与控制模式·····	109
§ 6.1 ESS 控制模式与控制环节的两大问题 ·····	109
§ 6.2 随动控制方案与控制模式 ·····	110
§ 6.3 VCR 组件及小预载调制器实现 ·····	120
第七章 具有并行与容错余度性能的支承方案探讨·····	129
§ 7.1 分频式半球支承——时间上并行的支承 ·····	129
§ 7.2 分时式半球支承——时间均分的等效并行支承 ···	136
§ 7.3 八电极独立支承(4—3—4 变换)——容错余度 控制方案 ·····	143
§ 7.4 控制方案探讨综合与优化电路研究 ·····	148
第八章 静电悬浮综合技术研究及机—电相互关系·····	159
§ 8.1 悬浮支承惯性传感器的综合技术问题 ·····	159
§ 8.2 误差源分类与精度分析 ·····	163
§ 8.3 真空分析与消气剂应用 ·····	166
§ 8.4 恒速与转子质心偏移理论研究 ·····	172
§ 8.5 超前补偿的悬浮支承控制及转子恒速技术 ·····	188
§ 8.6 实心球技术研究 ·····	195
第九章 测量与支承同一频率的恒流支承系统·····	198
§ 9.1 原理 ·····	198
§ 9.2 控制环路设计与增益分配 ·····	203
§ 9.3 实验用电路的设计 ·····	206
§ 9.4 单频恒流 ESS 开环实验研究 ·····	209
§ 9.5 实验研究结果 ·····	210
第十章 静电悬浮技术的发展与拓广·····	213
§ 10.1 静电陀螺的发展进程与技术水平·····	213
§ 10.2 我国静电悬浮控制技术尚需开展的工作·····	215
§ 10.3 超导惯性传感器的磁悬浮支承初探·····	217
参考文献·····	222

Contents

Chapter1	Introduction	1
§ 1.1	Development and Application of Gyroscopes	1
§ 1.2	Synopsis of Electrostatic Suspended Gyro(ESG)	3
§ 1.3	Electrostatic Suspension System (ESS)	3
§ 1.4	Hot Topic of Electrostatic Suspension Technique	10
Chapter2	Calculation and Analysis on Electrostatic Force and Parameters of Electrodes	12
§ 2.1	Division of Spherical Electrodes	12
§ 2.2	Calculation on Electrostatic Force	13
§ 2.3	Analysis on Parameters of Spherical Electrodes	19
Chapter3	Executive Parts of Electrostatic Force	39
§ 3.1	Carrier Wave of Electrostatic Suspension	39
§ 3.2	20kHz Electrostatic Suspension Transformer	42
§ 3.3	A Sinusoidal Power Amplifier with Only a Single VDMOS element	43
Chapter4	Measurement Circuit Theory of Rotor	

	Cavity and Spherical Electrode	49
§ 4.1	Three Dimensional Circuit Analysis on Micro-displacement Capacitance between Rotor and Cavity with Different Electrodes	49
§ 4.2	Definition and Relationship of Mechanical and Electrical Parameters for Micro-displacementCapacitance Sensors	66
§ 4.3	Sensitivity of Measurement Factors	68
§ 4.4	Formula Deduction for Electrostatic Force and Measurement Efficiency	71
§ 4.5	Measurement Resolution	74
§ 4.6	Stability of Null Position between Geometric and Electrical Centers	79
§ 4.7	Steps of Improving Measurement Stability and Lowerring High-voltage Disturbance	80
Chapter5	Measurement Circuit of Rotor Micro-displacement	83
§ 5.1	Design of Measurement Circuit	83
§ 5.2	Realization of Equivalent Resolution to Micro-displacement $0.01\mu\text{m}$	93
§ 5.3	Apparatus for Calibration to Capacitance Resolution of Measurement Circuit	98
Chapter6	Servo Control Mode and Technique of Electrostatic Suspension	109
§ 6.1	Two Questions of ESS Control Mode and Links	109
§ 6.2	Servo Control Scheme and Mode	110

§ 6.3	Realization of Low Pre-load Modulator and VCR Packages	120
Chapter7	Principle and Scheme of Parallel and Redundant Suspension	129
§ 7.1	Frequency-distributed Suspension with Half- Sphere Electrodes: Parallel in Time	129
§ 7.2	Time-distributed Suspension with Half-Sphere Electrodes: Equal Parallel in Time	136
§ 7.3	Independent-axle Suspension with Octal Electrodes (4-3-4 axle Transformation): Fault Tolerant or Redundant Control Scheme	143
§ 7.4	Different Control Schemes and Optimum Circuits	148
Chapter8	General Techniques of Electrostatic Suspension and Integrals of Mechanical and Electrical Features	159
§ 8.1	Comprehensive Techniques of Inertial Sensor for ESS	159
§ 8.2	Classification of Error resources and Analysis of Their Precision	163
§ 8.3	Vacuum Analysis	166
§ 8.4	Mass Unbalance Modulation for Constant Rotation of the Levitation Rotor	172
§ 8.5	Suspension Control of Pre-phase Compensation and Constant Rotation for Rotor	188

§ 8.6	Solid Rotor Technique	195
Chapter9	Techniques for ESS with Constant-current Source and Single Frequency for Measurement and Suspension	198
§ 9.1	Principle	198
§ 9.2	Design of Control Diagram	203
§ 9.3	Design of Real Circuit	206
§ 9.4	Open-loop ESS Experiment with Constant- current Source and Single Frequency	209
§ 9.5	Analysis of Experiment Results	210
Chapter10	Development of Electrostatic Suspension Technique	213
§ 10.1	Development Process and Technique Level of ESG	213
§ 10.2	Research Work in Future of ESS Control	215
§ 10.3	Inter-relationship between Magnetic Suspension of SCG(Super-conductor Gyro) and Electrostatic one of ESG	217
References		222

第一章 绪 论

§ 1.1 陀螺仪的发展与应用

陀螺仪作为一种惯性测量元件,已广泛地应用于航空、航天、航海、测量等领域。由于陀螺仪的精度直接影响着导航、制导和测量等系统的精度,因此,从陀螺仪问世以来,人们一直在为提高陀螺仪的精度进行着不懈的努力。转子式陀螺仪便是在不断减小支承摩擦力矩、改进支承结构、寻求新的支承方法中得到发展的,已由最初的球轴承机械陀螺发展到液浮和静压(沿输出轴浮动)气浮陀螺仪、挠性陀螺仪和静电陀螺仪。图 1-1 给出了转子式陀螺仪的发展示意图^[1]。与此同时,各国科学家还突破陀螺仪原始定义的框框,研制出多种新型陀螺仪,如环型激光陀螺仪、光纤陀螺仪、核磁共振陀螺仪、超导陀螺仪等等。这些新型陀螺仪有些已进入实用阶段,有些还处于实验室阶段。图 1-2 给出了陀螺技术的应用

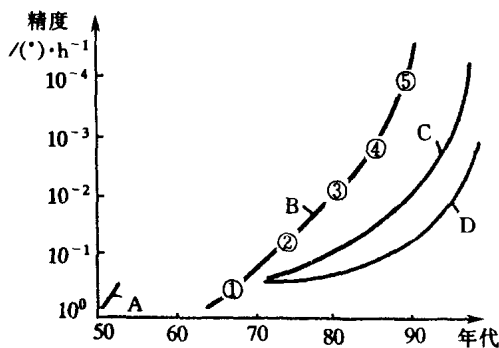


图 1-1 转子式陀螺仪的发展

A—球轴承机械陀螺仪;B—液浮陀螺仪;C—静电陀螺仪;D—挠性陀螺仪。

主轴承:①—球轴承;②—④—陶瓷气体动压轴承;⑤—覆以耐磨材料的气体动压轴承。

框架支承:①~③—宝石轴承;④~⑤—磁浮支承。

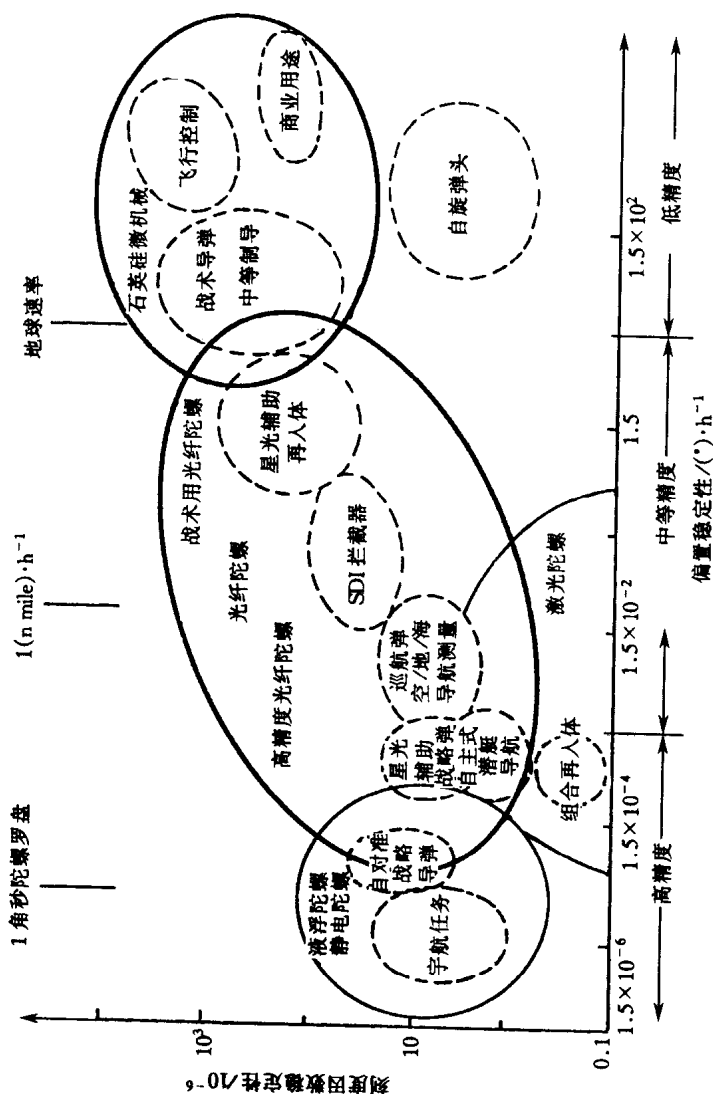


图 1-2 陀螺技术的应用与发展