



国防科技图书出版基金

并联结构 六维力传感器

Parallel Six-axis Force Sensor

赵永生 姚建涛 侯雨雷 王志军 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

014057998

TH823
08



国防科技图书出版基金

并联结构六维力传感器

Parallel Six-axis Force Sensor

赵永生 姚建涛 侯雨雷 王志军 著



国防工业出版社

· 北京 ·



北航

C1742736

TH823
08

885720410

图书在版编目(CIP)数据

并联结构六维力传感器 / 赵永生等著. —北京:国防
工业出版社, 2014. 4

ISBN 978 - 7 - 118 - 09183 - 0

I. ①并... II. ①赵... III. ①力传感器 - 研究
IV. ①TH823

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 047593 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 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 13 字数 220 千字

2014 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 69.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

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

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)				
	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

前 言

先进的信息技术作为引领和衡量一个国家迈向高度现代化的支撑性技术之一,已成为世界各发达国家瞩目的焦点。作为信息技术的源头,传感技术正以传感器为核心逐渐外延,与机械、测量、电子、材料等学科密切相关,并相互渗透、互相融合,形成一门新技术密集型工程技术学科。

现代科学技术迅猛发展,人们在研究自然现象和规律及生产活动时,必须从外界获取信息,而要及时准确地获取这些信息,就必须合理地选择和应用各种传感器。传感器是认识、掌握、利用客观世界的重要工具。21 世纪是信息化时代,其特征是人类社会活动和生产活动的信息化,传感器的重要性愈发突出。

传感器是构成信息系统的基础部件,是不可缺少且在一定程度上决定系统性能的关键部件,在现代信息技术中占有举足轻重的地位。所有的自动化测控系统,都需要传感器提供赖以作出实时决策的信息。

力传感器是最为基本的一种传感器。六维力与力矩传感器以其能够感知外力和外力矩的全部信息而成为最重要的一类力传感器,在空间站对接仿真、航空机器人、火箭发动机推力测试等领域极其重要,同时也是研制难度大、挑战性高的研究课题。

事物总是辩证统一的。并联机构以其结构紧凑、刚度高、承载能力强、累积误差小及动态响应好等特点与串联机构形成鲜明对比,在许多领域得到独特应用。本世纪以来,并联式六维力传感器逐渐成为国际热点研究课题。

在力传感器研究中,敏感元件的结构是其核心问题。多维力传感器的结构影响着传感器的灵敏度、刚性、动态性能、维间耦合等最关键的因素,在很大程度上决定着传感器性能的优劣。并联机构所具有的对称性与明了的力映射关系等诸多特点使其适合于作为多维力传感器结构。

传统并联结构六维力传感器一般采用球面副作为连接副,存在结构较为复杂、预紧力难以一致、摩擦力矩大、存在维间耦合且很难解耦、受力过零性差及易产生迟滞现象等一系列问题,因此如何从机构学角度改进现有六维力传感器结构,进而实现更高精度、更高刚度和更高稳定性,值得去思考、去研究。

机构的性能评价是对其进行分析与设计首先要解决的问题。传感器构型与参数设计是在一定的约束条件下通过优化性能指标来完成的,而这些指标应具有明确的物理意义和可计算性。尽管国内外已有许多关于机构性能评价指标的研究,

但鉴于并联机构自身的特殊性,以及工程实际中问题的复杂性和多样性,目前,相关研究还多针对个例进行,缺乏系统全面的理论方法,对多维力并联结构传感器性能评价指标的研究还很不成熟。

工业革命以来,传感器为提高和改善机器的性能发挥了巨大的作用,随着系统自动化程度和复杂性的提高,对传感器的要求也越来越高。掌握传感器技术、合理应用传感器几乎是所有技术领域工程技术人员必须具备的基本素养。作为理工科学生,学习和掌握现代先进的传感器技术知识自然是非常必要的。

本书即在此大背景下,集作者多年在传感器领域科学研究成果而写成。本书从六维力传感器的基本概念和测力原理着手,较为全面地介绍了并联式六维力传感器的构型设计、性能评价指标、结构参数优化、实体样机研制、标定实验研究以及在力控制领域的应用等内容。本书以螺旋理论和矩阵论作为理论基础开展研究,形象直观,简便易懂,且内容涵盖传感器从概念、设计直至应用的全过程,翔实丰富,各模块既密切相关又自成一体,具有较好的借鉴性。

本书可作为高等院校机械设计制造及其自动化、机械电子工程、测控技术与仪器等专业的研究生教材,也可供从事传感器与检测技术相关领域应用和设计开发的研究人员、工程技术人员参考。

在此要深深感谢国家自然科学基金委员会多年来对作者科学研究所给予的长期支持,感谢国防科技图书出版基金的资助。

本书的问世,离不开燕山大学具有无限创造力的研究生们所做的十分有意义的贡献,在此向他们表示感谢。

本书在撰写过程中,参考并引用了许多专家、学者的论著,在这里表示衷心的感谢,正是他们在各自领域的独到见解和特殊贡献为作者提供的宝贵参考资料,使作者能够在总结现有成果的基础上,汲取各家之长,形成本书。

传感器技术内容丰富、应用广泛,且技术本身处于不断的发展进步之中,本书的出版是作者在此领域的一次努力尝试。由于作者水平有限,书中难免有疏虞之处,热忱地期望各位读者和同仁不吝赐教。

赵永生

秦皇岛渤海湾 燕山大学

2014年1月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 六维力传感器研究概况	1
1.2.1 六维力传感器国外研究状况	1
1.2.2 六维力传感器国内研究状况	5
1.2.3 并联结构六维力传感器研究状况	7
1.3 六维力传感器的应用现状	10
1.3.1 力传感器在机器人中的应用	10
1.3.2 力传感器在工农业中的应用	11
1.3.3 力传感器在汽车领域中的应用	11
1.3.4 力传感器在航空航天中的应用	12
1.3.5 力传感器在生物力学和医疗中的应用	13
第2章 并联六维力传感器数学模型	15
2.1 引言	15
2.2 广义 Stewart 结构六维力传感器静态受力分析	15
2.3 Stewart 结构六维力传感器静态数学模型	17
2.3.1 经典 6/6 型 Stewart 结构六维力传感器数学模型	17
2.3.2 双环型 Stewart 结构六维力传感器数学模型	19
2.3.3 6/3-3 型 Stewart 结构六维力传感器数学模型	21
2.4 双层预紧式并联六维力传感器数学模型	23
2.4.1 双层多分支结构六维力传感器数学模型	23
2.4.2 双层七分支结构六维力传感器数学模型	24
第3章 并联式六维力传感器评价指标	27
3.1 引言	27
3.2 六维力传感器各向同性性能评价指标	27
3.2.1 各向同性理论分析	27

3.2.2	基于条件数的各向同性评价指标	28
3.2.3	力与力矩各向同性度指标	30
3.2.4	正向和逆向各向同性度指标	31
3.2.5	解耦性能约束条件	34
3.2.6	满足解耦性能约束条件的各向同性度指标	35
3.3	各向同性结构六维力传感器灵敏度分析	38
3.3.1	传感器各个分量的灵敏度分析	38
3.3.2	传感器综合灵敏度分析	41
3.4	各向同性的物理意义及其推广	43
第4章	并联六维力传感器各向同性解析分析	45
4.1	引言	45
4.2	经典6/6型Stewart结构力传感器各向同性解析分析	46
4.2.1	经典6/6型Stewart结构力传感器完全各向同性分析	46
4.2.2	经典6/6型Stewart结构力传感器各向同性度指标之间 制约关系	46
4.2.3	经典6/6型Stewart结构力传感器各向同性综合性能分析	48
4.3	双环型Stewart结构力传感器各向同性解析分析	49
4.3.1	双环型Stewart结构力传感器各向同性性能分析	49
4.3.2	等杆长双环型Stewart结构力传感器各向同性解析分析	51
4.4	等杆长6/3-3型Stewart结构力传感器各向同性解析设计	53
4.4.1	等杆长6/3-3型Stewart结构力传感器各向同性解析表达式	53
4.4.2	各向同性解有效性及有效区间的确定	55
4.4.3	传感器各向同性设计数值实例	56
第5章	整体预紧式六维力传感器构型及其超静定分析	59
5.1	引言	59
5.2	整体预紧式多分支六维力传感器构型	59
5.2.1	球窝锥头式球面副	59
5.2.2	测量分支数目的确定	60
5.2.3	预紧式六维力传感器结构组成及其特点	62
5.3	整体预紧式六维力传感器超静定分析	64
5.3.1	传感器静力平衡方程求解	64
5.3.2	预紧式Stewart结构六维力传感器超静定分析	65
5.3.3	任意 $n-SS$ Stewart结构六维力传感器超静定受力分析	68

5.3.4	基于加权广义逆的预紧式六维力传感器超静定分析	70
5.4	预紧式六维力传感器结构稳定性分析	74
5.4.1	预紧力确定方法	74
5.4.2	传感器预紧力求取数值算例	78
第6章	并联式六维力传感器结构参数优化	83
6.1	引言	83
6.2	基于各向同性的六维力传感器结构参数优化	84
6.2.1	六维力传感器性能图谱研究	84
6.2.2	六维力传感器遗传算法优化	88
6.3	面向任务的六维力传感器结构参数优化	94
6.3.1	面向任务的六维力传感器优化准则	95
6.3.2	面向任务的六维力传感器优化流程	95
6.3.3	六维力传感器结构优化实例	96
第7章	整体预紧式六维力传感器结构与样机研制	100
7.1	引言	100
7.2	大量程超静定六维力传感器结构与样机研制	101
7.2.1	传感器设计整体思路	101
7.2.2	传感器结构位形的确定	102
7.2.3	预紧支路设计	102
7.2.4	分支杆设计	104
7.2.5	传感器整体结构模型	105
7.2.6	关键零部件的校核	106
7.2.7	大量程超静定六维力传感器样机	107
7.3	双层预紧式六维力传感器结构与样机研制	108
7.3.1	测量分支结构设计	108
7.3.2	传感器整体结构设计	110
7.3.3	数据采集系统设计与开发	111
7.3.4	双层预紧式六维力传感器样机	112
第8章	六维力传感器静态标定研究	113
8.1	引言	113
8.2	六维力传感器标定系统设计	113
8.2.1	大量程超静定六维力传感器静态标定系统	113

8.2.2	双层预紧式六维力传感器静态标定系统	117
8.3	六维力传感器静态标定理论研究	124
8.3.1	六维力传感器综合静态性能评价指标	124
8.3.2	六维力传感器非线性静态标定研究	128
8.4	六维力传感器静态标定实验	130
8.4.1	静态标定步骤	130
8.4.2	大量程超静定六维力传感器静态标定实验	131
8.4.3	双层预紧式六维力传感器静态标定实验	134
第9章	六维力传感器动态标定	137
9.1	引言	137
9.2	预紧式六维力传感器振动力学理论分析	138
9.2.1	单分支振动力学方程	138
9.2.2	传感器振动力学方程	139
9.2.3	传感器系统运动微分方程求解	141
9.2.4	双层预紧式传感器运动微分方程求解实例	144
9.3	六维力传感器动态性能仿真研究	147
9.3.1	基于 ANSYS 的大量程超静定六维力传感器动态特性仿真	147
9.3.2	基于 ADAMS 的双层预紧式六维力传感器动态特性仿真	150
9.4	六维力传感器动态标定实验研究	152
9.4.1	大量程超静定六维力传感器动态标定实验	153
9.4.2	双层预紧式六维力传感器动态标定实验	157
第10章	六维力传感器的力控制理论与实验研究	161
10.1	引言	161
10.2	典型力控制模型与算法研究	162
10.2.1	六维力传感器检测的局限性	162
10.2.2	曲面跟踪运动力控制算法研究	164
10.2.3	轴孔装配力控制算法研究	168
10.3	典型力控制实验研究	171
10.3.1	基于六维力传感器的力控制机器人系统组成	171
10.3.2	控制系统软件开发	172
10.3.3	曲面跟踪力控制实验研究	174
10.3.4	轴孔装配力控制实验研究	176
参考文献		179

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Foreword	1
1.2 Research overview of the six-axis force sensor	1
1.2.1 International research status of the six-axis force sensor	1
1.2.2 Domestic research status of the six-axis force sensor	5
1.2.3 Development summary of the parallel structure six-axis force sensor	7
1.3 Application status of the six-axis force sensor	10
1.3.1 Application of the force sensor in robot fields	10
1.3.2 Application of the force sensor in agriculture and industry fields	11
1.3.3 Application of the force sensor in automobile fields	11
1.3.4 Application of the force sensor in aerospace fields	12
1.3.5 Application of the force sensor in biomechanics and medicine fields	13
Chapter 2 Mathematical model of the parallel six-axis force sensor	15
2.1 Foreword	15
2.2 Static analysis of the generalized Stewart six-axis force sensor	15
2.3 Static mathematical model of Stewart six-axis force sensor	17
2.3.1 Mathematical model of the classical 6/6 Stewart six-axis force sensor	17
2.3.2 Mathematical model of the two-circle Stewart six-axis force sensor	19
2.3.3 Mathematical model of the 6/3 - 3 Stewart six-axis force sensor	21
2.4 Mathematical model of the double-layer pre-stressed parallel six-axis force sensor	23

2. 4. 1	Mathematical model of the double-layer six-axis force sensor with multi-limb	23
2. 4. 2	Mathematical model of the double-layer six-axis force sensor with seven limbs	24

Chapter 3 Performance evaluation indices of the parallel six-axis force sensor

3. 1	Foreword	27
3. 2	Isotropy performance index of the six-axis force sensor	27
3. 2. 1	Theoretical analysis of isotropy	27
3. 2. 2	Isotropy index based on the condition number	28
3. 2. 3	Force and torque isotropy indices	30
3. 2. 4	Forward and reverse isotropy indices	31
3. 2. 5	Constraint condition of the decoupling performance	34
3. 2. 6	Isotropy indices satisfying decoupling performance constraint condition	35
3. 3	Sensitivity analysis of the isotropic six-axis force sensor	38
3. 3. 1	Sensitivity analysis of each component of the sensor	38
3. 3. 2	Integrated sensitivity analysis of the sensor	41
3. 4	Physical significance of isotropy and its extension	43

Chapter 4 Analytical analysis of isotropy of the parallel six-axis force sensor

4. 1	Foreword	45
4. 2	Analytical analysis of isotropy of the classical 6/6 Stewart force sensor	46
4. 2. 1	Complete isotropy analysis of the classical 6/6 Stewart force sensor	46
4. 2. 2	Restrictive relation between isotropy indices of the classical 6/6 Stewart force sensor	46
4. 2. 3	Comprehensive isotropy indices analysis of the classical 6/6 Stewart force sensor	48
4. 3	Analytical analysis of isotropy of the two-circle Stewart force sensor	49
4. 3. 1	Isotropy analysis of the two-circle Stewart force sensor	49

4.3.2	Analytical analysis of isotropy of the two-circle Stewart force sensor with equal leg length	51
4.4	Isotropy analytical design of the 6/3 – 3 Stewart force sensor with equal leg length	53
4.4.1	Analytical expression of isotropic configuration of the 6/3 – 3 Stewart force sensor with equal leg length	53
4.4.2	Determination of valid solutions and range of the isotropic solutions	55
4.4.3	Numerical examples of isotropy design of the sensor	56
Chapter 5 Configuration and hyperstatic analysis of the full pre-stressed six-axis force sensor		59
5.1	Foreword	59
5.2	Configuration of the full pre-stressed six-axis force sensor with multi-limb	59
5.2.1	Cone-shaped spherical pair	59
5.2.2	Determination of the number of the measuring limbs	60
5.2.3	Structure composition and characteristics of the pre-stressed six-axis force sensor	62
5.3	Hyperstatic analysis of the full pre-stressed six-axis force sensor	64
5.3.1	Static equilibrium equations of the sensor	64
5.3.2	Hyperstatic analysis of the pre-stressed Stewart six-axis force sensor	65
5.3.3	Hyperstatic analysis of any n -SS Stewart six-axis force sensor	68
5.3.4	Hyperstatic analysis of the pre-stressed six-axis force sensor based on weighted Moore-Penrose inverse	70
5.4	Structural stability of the pre-stressed six-axis force sensor	74
5.4.1	Determination method of the pre-tightening force	74
5.4.2	Numerical example for solving the pre-tightening force	78
Chapter 6 Structure parameter optimization of the parallel six-axis force sensor		83
6.1	Foreword	83
6.2	Structure parameter optimization of the six-axis force sensor based on isotropy	84

6.2.1	Research on indices atlases of the six-axis force sensor	84
6.2.2	Optimization of the six-axis force sensor based on genetic algorithm	88
6.3	Task-oriented structure parameter optimization of the six-axis force sensor	94
6.3.1	Task-oriented optimization criteria of the six-axis force sensor	95
6.3.2	Task-oriented optimization process of the six-axis force sensor	95
6.3.3	Structure optimization examples of the six-axis force sensor	96

Chapter 7 Structural design and prototype development of the full pre-stressed six-axis force sensor

7.1	Foreword	100
7.2	Structural design and prototype development of the large range hyperstatic six-axis force sensor	101
7.2.1	Overall design mentality	101
7.2.2	Determination of structure configuration of the sensor prototype	102
7.2.3	Design of the pre-stressing limb	102
7.2.4	Design of the measuring limb	104
7.2.5	Integrated model of the sensor prototype	105
7.2.6	Strength verification of the key parts	106
7.2.7	Prototype of the large range hyperstatic six-axis force sensor	107
7.3	Structural design and prototype development of the double-layer pre-stressed six-axis force sensor	108
7.3.1	Structural design of the measuring limb	108
7.3.2	Overall structural design of the sensor	110
7.3.3	Design and development of the data acquisition system	111
7.3.4	Prototype of the double-layer pre-stressed six-axis force sensor	112

Chapter 8 Research on static calibration of the six-axis force sensor

8.1	Foreword	113
8.2	Calibration system design of the six-axis force sensor	113

8.2.1	Static calibration system of the large range hyperstatic six-axis force sensor	113
8.2.2	Static calibration system of the double-layer pre-stressed six-axis force sensor	117
8.3	Theoretical research on static calibration of the six-axis force sensor	124
8.3.1	Comprehensive static performance evaluation indices of the six-axis force sensor	124
8.3.2	Nonlinear static calibration research of the six-axis force sensor	128
8.4	Static calibration experiment of the six-axis force sensor	130
8.4.1	Steps of the static calibration process	130
8.4.2	Static calibration experiment of the large range hyperstatic six-axis force sensor	131
8.4.3	Static calibration experiment of the double-layer pre-stressed six-axis force sensor	134
Chapter 9 Dynamic calibration of the six-axis force sensor		137
9.1	Foreword	137
9.2	Theoretical analysis on vibration mechanics of the pre-stressed six-axis force sensor	138
9.2.1	Vibration mechanics equation of a single limb	138
9.2.2	Vibration mechanics equation of the sensor	139
9.2.3	Solving the differential equation of motion of the sensor system	141
9.2.4	Example of solving the differential equation of motion of the double-layer pre-stressed six-axis force sensor	144
9.3	Dynamic performance simulation of the six-axis force sensor	147
9.3.1	Dynamic performance simulation of the large range hyperstatic six-axis force sensor based on ANSYS	147
9.3.2	Dynamic performance simulation of the double-layer pre-stressed six-axis force sensor based on ADAMS	150
9.4	Experimental study on dynamic calibration of the six-axis force sensor	152
9.4.1	Dynamic calibration experiment of the large range	