



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



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

与人共融机器人的 关节力矩测量技术

刘玉旺 刘金国 骆海涛◎著



YUREN GONGRONG JIQIREN DE
GUANJIE LIJU CELIANG JISHU



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

与人共融机器人的 关节力矩测量技术

刘玉旺 刘金国 骆海涛◎著



YUREN GONGRONG JIQIREN DE
GUANJIE LIJU CELIANG JISHU



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

内 容 简 介

本书系统地介绍了基于宏观位移感知的新型高集成度嵌入式力矩传感器技术。主要包括:不同类型的力矩传感器测量方法;新型嵌入式力矩传感器的形变测量系统及整体设计技术;新型嵌入式力矩传感器的数学理论基础;新型嵌入式力矩传感器仿真分析方法和测试装置技术;基于宏观位移感知的力矩传感器的性能测试与实验研究。本书反映了与人共融机器人的关节力矩测量技术近期取得的成果。

本书可供高等学校机器人相关专业研究生使用,有关专业本科生也可使用,此外还可供从事机器人技术研究的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

与人共融机器人的关节力矩测量技术/刘玉旺,刘金国,骆海涛著. —武汉:华中科技大学出版社,2018.3

(智能制造与机器人理论及技术研究丛书)

ISBN 978-7-5680-3666-5

I. ①与… II. ①刘… ②刘… ③骆… III. ①机械手-力矩测量 IV. ①TP241

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 050420 号

与人共融机器人的关节力矩测量技术

刘玉旺 刘金国 骆海涛 著

Yurengongrong Jiqiren de Guanjie Liju Celiang Jishu

策划编辑:俞道凯

责任编辑:俞道凯

封面设计:原色设计

责任校对:刘 竣

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉市洪山区佳年华文印部

印 刷:武汉市金港彩印有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:9

字 数:148千字

版 次:2018年3月第1版第1次印刷

定 价:68.00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）

王田苗（北京航空航天大学）

甘中学（宁波市智能制造产业研究院）

朱向阳（上海交通大学）

孙立宁（苏州大学）

杨桂林（中国科学院宁波材料技术与工程研究所）

孟 光（上海航天技术研究院）

黄 田（天津大学）

王飞跃（中国科学院自动化研究所）

尹周平（华中科技大学）

史铁林（华中科技大学）

刘 宏（哈尔滨工业大学）

李 斌（华中科技大学）

张 丹（北京交通大学）

姜钟平（美国纽约大学）

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（东北大学）

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（中国科学院沈阳自动化研究所）

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



▶ **刘玉旺** 中国科学院沈阳自动化研究所研究员,中国机械工程学会机器人分会第一届委员,载人航天领域预研项目评审专家,中国载人空间站舱外机械臂复核复算专家组成员,多种学术期刊编委。主要研究方向为智能机器人、太空机器人、机器人灵巧作业、机电一体化、精密驱动传感系统、欠驱动及运动耦合机构学等。主持和参加国家科技重大专项课题、国家数控重大专项课题、载人航天工程项目、国家863计划项目、国家自然科学基金项目、中国科学院重点部署项目等20余项。发表学术论文40余篇,申请国家发明专利36项。部分成果已在灵巧作业机器人和太空操作机器人上得到应用。



▶ **刘金国** 中国科学院特聘研究员、博士生导师,中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室主任助理、空间自动化技术研究室副主任。主要研究方向为仿生智能机器人系统、空间机器人与自动化装备、空间结构与机构等。先后负责和参加载人航天工程、嫦娥工程、国家863计划项目、国家自然科学基金项目、中国科学院重点部署项目、中英牛顿国际合作基金项目等30多项。目前担任载人航天工程某型号主任设计师、嫦娥工程某型号副指挥。在Science、IEEE IROS等杂志和会议发表论文100多篇,申请专利70多项,出版著作3部;获得国家科技进步奖二等奖、辽宁省自然科学学术成果奖一等奖、IEEE ROBIO最佳论文奖、ICIRA 优秀论文奖、载人航天学术大会优秀论文奖、中国科学院院长奖等奖励20多项。



▶ **骆海涛** 中国科学院沈阳自动化研究所副研究员,中国科学院青年创新促进会会员,IEEE会员。主要研究方向为高速重载机器人动力学、特种环境结构力学性能、空间结构减重抗振、基于多元约束的结构优化、有限元仿真和试验测试等。主持和参加国家数控重大专项课题、载人航天工程项目、国家863计划项目、国家自然科学基金项目、中科院重点部署课题、辽宁省基金项目等10余项,发表SCI/EI检索论文20余篇,申请国家发明专利8项。



总序

近年来,“智能制造+共融机器人”特别引人瞩目,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,它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。热烈欢迎专家、教授从不同的视野、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、成型和装配等;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、车联网、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,各界人士、高校师生、各领域专家和科技工作者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、编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、编者和读者,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

工业机器人在工业领域的规模化应用,极大提升了生产效率和产品质量,降低了生产成本,但工业企业的绝大部分任务仍然需要雇用大量技术工人来完成。据国际机器人联合会(IFR)2016年的统计数据,全球每万名产业工人平均拥有机器人数量仅为69台,机器人/工人比率为0.69%,在中国这一比率仅为0.49%;同时,医疗康复、助老助残等服务领域对机器人表现出愈渐热切的期待。除制造业外,国际上各发达经济体以及像中国这样依赖相对廉价劳动力快速发展的新兴经济体,由其人口老龄化所引发的社会服务以及民生问题也备受关注。与工业、特种作业、服务等领域对机器人的热切期待,或者称为迫切需求相比,投入使用的机器人产品数量并没有大幅度增长。其根本原因在于现有机器人的能力/性能尚不能满足要求,与人们的期待相去甚远。正是由于存在这个“需求-能力”之间的巨大反差,新一代机器人技术正在被国际学术界、产业界、金融界等群体高度关注,抢占新一代机器人技术制高点成为发达国家/经济体技术发展布局的核心之一。

机器人已进入一个新的发展阶段,新一代与人共融机器人提高了对力矩传感器等关键元器件的要求。随着产业的发展,机器人的功能已由封闭空间单独作业发展到复杂环境中的生产辅助作业,并逐步深入到生活辅助领域。相对于传统封闭空间作业机器人,生产辅助和生活辅助机器人需要与人接触及协作,要求能感知到与人的接触并不对人造成伤害,这涉及的一个重要功能器件就是力矩传感器。传统的力矩传感器主要是面向封闭空间作业的大型工业机器人,安装于机器人末端,用于末端输出力矩的测量和感知。此类



力矩传感器尺寸较大,数据采集及处理较复杂。与人共融机器人尺寸较小,每个关节都需要高集成度、高可靠性、高环境适应性嵌入式小型多维力矩传感器。显然,传统力/力矩传感器不能满足新一代与人共融机器人的研发需求,研发新型力矩传感器势在必行。

作为与人共融机器人的核心关键元器件,新型力矩传感器已逐渐成为研究热点,在不久的将来必将进入产业化生产阶段。关键元器件是制约机器人发展的重要因素之一。传统工业机器人的关键元器件研发和产业化起步于国外,目前都还被国外垄断,严重制约了起步较晚的我国机器人行业的发展。由于投入的大幅度增加和科技实力的进步,我国在新一代机器人研究方面与国外的差距不大,完全有机会占有一席之地。为有效促进和保证新一代机器人产业的健康发展,实现面向下一代机器人的核心关键元器件的产业化是重中之重。

现在成熟的商业力矩传感器主要是基于微观应变测量的工作模式,通过粘贴应变片采集传感器本体结构的微观应变,并转换成电信号,从而完成对力矩的感知和测量。由于基于微弱的微观应变进行感知,这种力矩传感器对本体材料、加工工艺和表面处理等都提出了较高要求,感知元件及后期的数据采集处理元件也需要做专门的封装和保护。这些特殊的处理和保护措施造成力矩传感器成本高昂、外形尺寸相对较大,与新一代与人共融机器人的关节力矩测量需求有一定差距。而基于宏观位移感知的力矩传感器,对本体、感知元件及数据采集元件的要求相对低很多,不需做特殊保护,成本较低,且容易实现小尺寸和高集成度,嵌入轻巧的与人共融机器人关节中。基于宏观位移感知的力矩传感器成本低廉,有利于推动与人共融机器人的低价化和大范围应用。

本书介绍基于宏观位移感知的新型高集成度嵌入式力矩传感器技术。针对柔性关节嵌入式力矩传感器的研制问题,综合分析了不同类型的力矩传感器测量原理,介绍了新型嵌入式力矩传感器的形变测量系统及整体设计技术,推导了宏观位移产生的数学理论基础,给出了仿真分析方法和测试装置设计技术。最后,开展了基于宏观位移感知的力矩传感器的性能测试和实验研究。具体来说,基于平面柔性弹簧的设计思想,给出了一种针对嵌入式力矩传感器的设计方法,通过三维建模、力学建模及有限元仿真分析,验证嵌入

式力矩传感器弹性本体结构构型的合理性。为获取所设计弹性本体单元在体积最小化、质量最轻型约束下的优化解,通过 ANSYS 拓扑优化模块对弹性本体单元进行拓扑优化设计,寻得其最优解。针对力矩传感器可行性及性能指标参数的验证需要,设计了一种具有一定适应性的实验测量装置。最终通过该实验测量装置,完成了对所设计力矩传感器线性度、灵敏度、重复性、迟滞性及零点漂移等性能指标的测试。

本书以解决共融机器人的最优化可靠力矩传感问题为目标,研究用于提升环境适应性能及与人协作性能所需核心部组件的相关理论方法与技术,得到了国家自然科学基金(51605474)和机器人学国家重点实验室自主基金(2016-Z09)的资助。在全书内容研究与编写过程中,机器人学国家重点实验室的教师、博士生和硕士生们投入了很大精力,特别感谢田恬、张德富、陈吉彪、王福华的大力配合及辛勤工作。

本书由国防科技大学范大鹏教授和山东大学冯显英教授审稿,他们认真审阅了全部书稿,提出了许多宝贵而中肯的修改意见,在此谨致衷心的感谢。感谢编审委员会和出版社的全面指导和高效组织。

作 者

2017 年 11 月



目录

第 1 章 与人共融机器人力矩传感器概述	/1
1.1 与人共融机器人对力矩传感器的需求	/1
1.2 力矩传感器的发展趋势	/3
1.3 高集成度力矩传感器的研究现状	/4
1.3.1 应变式	/4
1.3.2 电容式	/7
1.3.3 压电式	/7
1.3.4 光电式	/9
1.3.5 其他类型	/11
1.4 本章小结	/13
第 2 章 力矩传感器的测量方法	/14
2.1 应变式力矩测量	/14
2.2 电容式力矩测量	/17
2.2.1 极距变化型	/17
2.2.2 面积变化型	/18
2.3 压电式力矩测量	/20
2.4 光电式力矩测量	/23
2.4.1 光栅式	/23
2.4.2 光电开关式	/24
2.5 磁电式力矩测量	/26
2.6 磁致伸缩式力矩测量	/27



2.7	光纤式力矩测量	/28
2.8	无线声表面波式力矩测量	/30
2.9	力矩测量方法总结	/31
第3章	力矩传感器设计技术	/32
3.1	力矩传感器方案设计	/32
3.2	弹性本体单元结构构型设计	/33
3.2.1	设计方法	/33
3.2.2	材料的选择	/33
3.2.3	结构构型设计	/35
3.2.4	结构构型优化	/38
3.3	形变测量系统设计	/38
3.4	传感器整体设计	/42
3.4.1	光电开关的安装	/42
3.4.2	挡光片的安装	/43
3.4.3	整体构型	/44
3.5	本章小结	/46
第4章	力矩传感器的理论基础	/47
4.1	能量原理	/47
4.2	曲杆计算	/49
4.3	力矩传感器本体力学建模	/52
4.3.1	柔性弹簧型结构	/53
4.3.2	十字梁型结构	/57
4.4	本章小结	/59
第5章	力矩传感器的仿真分析技术	/60
5.1	有限元理论	/60
5.1.1	有限元方法的一般步骤	/60
5.1.2	强度准则	/64
5.2	有限元方法分析	/66
5.3	优化设计	/73
5.3.1	优化设计类型	/74
5.3.2	力矩传感器的拓扑优化设计	/75

5.4	本章小结	/78
第6章	力矩传感器性能测试装置技术	/79
6.1	力矩传感器实验测试装置的设计情况	/79
6.2	力矩传感器实验测试装置方案设计	/83
6.2.1	方案设计	/83
6.2.2	模型设计	/86
6.3	力矩传感器测试装置数据采集系统设计	/87
6.3.1	系统硬件设计	/87
6.3.2	上位机软件设计	/93
6.4	本章小结	/95
第7章	力矩传感器的性能测试与实验研究技术	/96
7.1	静态性能指标	/96
7.1.1	线性度	/96
7.1.2	灵敏度	/96
7.1.3	重复性	/97
7.1.4	迟滞性	/98
7.1.5	漂移	/98
7.2	实验准备	/99
7.2.1	力矩传感器样机	/99
7.2.2	测量装置	/100
7.2.3	数据采集板	/100
7.3	实验过程	/101
7.3.1	超载实验	/101
7.3.2	静态校准实验	/102
7.3.3	重复性测试	/108
7.3.4	迟滞测试	/117
7.3.5	零漂测试	/118
7.4	实验结果评估	/120
7.5	本章小结	/121
	参考文献	/122



第 1 章

与人共融机器人力矩传感器概述

与人共融、高智能、轻巧化是机器人的发展方向,也是必然趋势。这一目标的实现需要机器人对周边环境的信息有全面准确的输入。性能良好的传感器作为信息准确采集的关键部件,成为了实现这一目标的基础。力矩传感器是对周围环境力信息的采集部件,对其进行研究具有重大的作用及意义。本章主要介绍与人共融机器人对力矩传感器的需求、力矩传感器的研究现状与发展趋势。

1.1 与人共融机器人对力矩传感器的需求

尽管机器人技术已有 60 年左右的发展历史,但一直未能脱离自动化机器的范畴;人和机器人仍然被定义为使用和被使用或者替代和被替代的关系。在机器人设计过程中很少考虑其与人在同一空间的紧密协调合作,使得如本质安全、人机协同及行为互助等基本问题,没有得到很好的解决。目前被广泛使用的机器人,是一种与人隔离的、几乎不具备智能能力的自动化机器;而下一代机器人将是融入人的正常生产生活环境、与人合作交互的智能化机器,即与人共融机器人。

与人共融是机器人的发展趋势。2011 年,美国在“先进制造伙伴计划”中明确指出:下一代机器人将与人类操作者紧密合作,为产业工人、健康服务者、士兵、手术医生以及宇航员等完成复杂任务提供新的能力。2013 年 4 月,德国推出以智能工厂、智能生产为主题的工业 4.0 计划,而这种“智能”的物理实体就是机器人,通过智能机器人、机器设备以及人之间的相互合作,提高生产过程的智能性。除了上述国家级的规划,作为传统工业机器人的使用大户,也是使用期最长的用户,美国通用汽车公司对机器人做出了发展展望,指出机器人应具有灵活的感知能力,能与人主动交互,能通过触觉和力觉反馈实现灵巧/细致的操作、与人的安全交互以及理解知识,能与人一起和谐工作,甚至发展为具有成人的能力。从国家级的规划,到企业级的发展计划,无一不显示出机器人的发



展方向势必是与人共融。

与人共融机器人是指能够与作业环境、人和其他机器人自然交互,能够自主适应复杂动态环境并协同作业的机器人,与人共融机器人的一个重要特征是具有柔顺灵巧的结构。从技术层面而言,与人共融的主要表现形式之一是柔顺控制,该技术的应用使得机器人具有了感知周围环境的能力,柔顺控制是本质安全、人机协同及行为互助的基础。在航天领域,有宇航员机器人;在医疗领域,有可以感知人力的结肠镜机器人、按摩机械手等;在工业领域,有灵巧抓取机械臂;在家庭服务领域,有可以理解人意图的电动助力自行车等服务型机器人。这些机器人的智能实现前提都是具有感知周围环境的能力,而与环境之间的相互作用力是需要感知的一个重要信息,因此,力矩传感器是必不可少的重点传感器,其典型应用如图 1-1 所示。

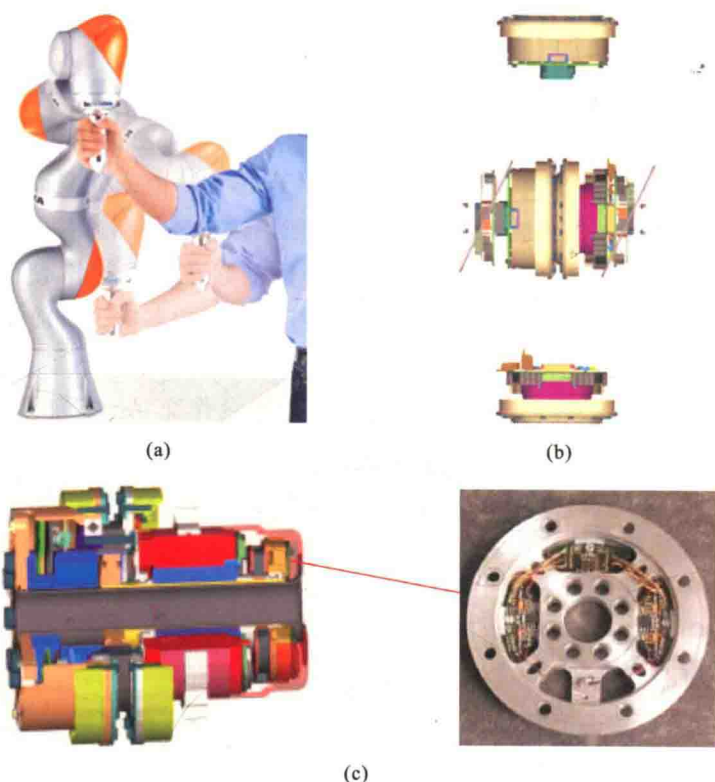


图 1-1 力矩传感器典型应用

(a) 与人共融机器人;(b) 机器人关节布置;(c) 关节及嵌入式力矩传感器

力矩传感器是一种能感知力矩并转换成可用输出信号的传感器,主要包括本体单元和应变/形变检测系统两部分。力矩传感器的核心原理是将力作用下的形变转换成电信号。当有力矩作用时,力矩施加于传感器本体单元上,并引起本体单元的应变或形变,检测系统(应变片或光学系统)可感知到本体的应变或形变,通过电路将其转化为相应电压,通过测量电压值来表征力矩大小,并转换成可用输出信号,实现力矩的测量,其工作原理如图 1-2 所示。

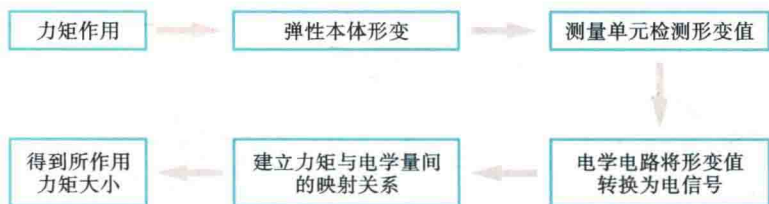


图 1-2 力矩传感器基本工作原理

力矩传感器分为多种类型,各有优缺点和适用范围。不同的工作环境和作业任务,可选用不同的力矩传感器。选择时重点关注力矩传感器的测量范围、测量精度、体积及质量大小、抗电磁干扰性能等关键指标。多数情况下,针对特定的任务,力矩传感器的可选择性并非唯一,也很难达到最优。考虑诸方面因素,选择合适的力矩传感器比研制特定性能的力矩传感器要更为经济,也更为实用。但对于与人共融机器人等高性能需要的场合,研制出具有更高测量精度、更宽测量范围、价格更为低廉的力矩传感器显然是最佳选择。然而,对于特种高性能需求,往往难以同时得到全局最优化结果。因此,如何尽可能实现力矩传感器的各参数优化,是力矩传感器研制任务的重点和难点所在。

1.2 力矩传感器的发展趋势

在发展过程中,机器人力矩传感器出现了多种类型。根据其测量原理不同,力矩传感器可以分为光电式^[1-2,14]、应变式^[3-9]、电容式^[10-11]、压电式^[12-13]等类型,每类传感器都有其优缺点,如图 1-3 所示。

从发展历程层面讲,面向机器人应用的力矩传感器出现了三大发展趋势。

1. 安装位置的变化

与传统的封闭空间作业机器人不同,新一代与人共融机器人需要在每个关节内布置力矩传感器。

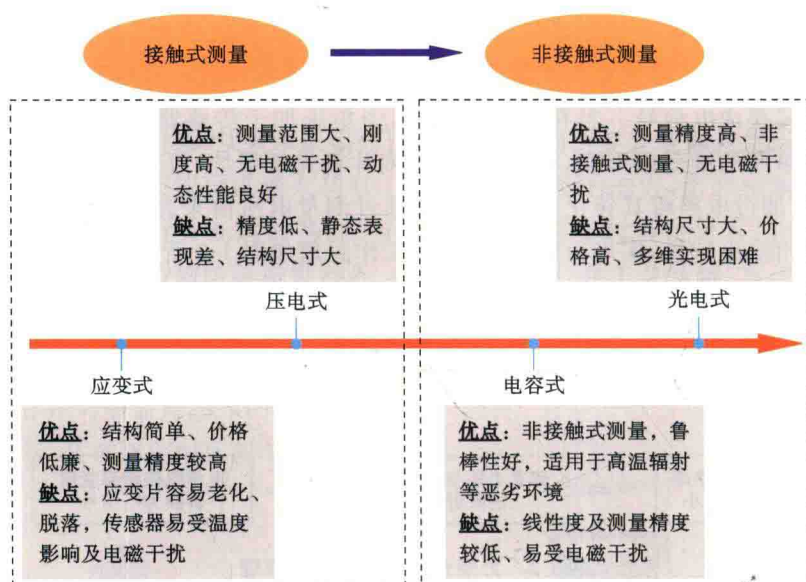


图 1-3 各类型传感器综合对比

2. 任务需求的变化导致的力矩传感器研究方向及内容的变化

主流机器人已由封闭空间作业机械臂发展到非结构环境作业与人共融小型机械臂阶段,相应力矩传感器的关注点从高刚度及高精度转变到小尺寸及良好环境适应性。

3. 可靠性及性能需求的提升导致的测量方式和本体特性的变化

在适应机器人不同需求的过程中,力矩传感器也在逐步由应变片接触式测量向光学非接触式测量方向转变,其本体形变由微观应变向宏观位移变化。

1.3 高集成度力矩传感器的研究现状

下面介绍不同类型力矩传感器的研究现状。

1.3.1 应变式

在众多类型力矩传感器中,应变式力矩传感器以其结构简单、制作容易、价格低廉等优点,得到了最为广泛的关注与使用。应变式力矩传感器通常是采用应变片测量其粘贴处的弹性元件的形变量,并利用相应的力矩换算公式及搭建的电桥电路,建立传感器输出的电信号与力矩值之间的关系,从而确定机器人