

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: 18220051301708

UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

**3R3T 六自由度绳牵引并联机构
系统分析与运动控制**

**System Analysis and Motion Control of a 6-DOF
Wire-driven Parallel Manipulator with 3R3T type**

梁 斌

指导教师姓名: 林 麒 教授

专 业 名 称: 机械电子工程

论文提交日期: 2008 年 月

论文答辩时间: 2008 年 月

学位授予日期: 2008 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2008 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。
本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘 要

近年来,绳牵引并联机构逐渐成为国内外研究的热点之一,它有着广泛的应用领域,涉及到航空、军事、工业、科研等方方面面,在诸多领域都有着潜在的应用前景,如起重机器人、虚拟现实的力反馈装置和触觉装置、建筑机器人、大型运动仿真器、大型射电望远镜的馈源支撑系统、超高速机器人、超大工作空间的轻型机器人、风洞支撑系统、大型轮船舰艇制造和机械加工等。

本文将用于低速风洞的绳牵引并联机构支撑系统作为研究对象,对3R3T六自由度绳牵引并联机构进行了机构设计、理论分析、动态仿真、原理样机搭建以及实例运动控制等方面的研究。

文中对在所设计的3R3T六自由度绳牵引并联机构——WPDSS-8建立了数学模型;对其进行了运动学分析,包括位姿运动学正逆解、速度运动学正逆解以及加速度运动学正逆解;对位姿运动学的正解运用MATLAB优化工具箱进行了编程求解;还对WPDSS-8机构进行了静力学和动力学方面的分析,并对牵引绳的张紧力以及飞行器模型在WPDSS-8机构中的工作空间作了初步的探讨。

论文在MATLAB环境下,对飞行器模型在几种不同的典型运动规律下的位姿、速度、加速度、以及牵引绳长度、速度、加速度的变化进行了仿真分析。为使研究结果的应用更具一般性,本文将该方法推广到飞行器模型在WPDSS-8机构中做螺旋线轨迹的3R3T六自由度的运动中,给出一系列相关参数的变化规律。经分析,研究获得的所有结果都符合物理意义,是科学合理的。这表明,本文的仿真分析方法是正确的,而且具有通用性。

在理论分析和运动仿真的基础上,本文设计并搭建了WPDSS-8原理样机,建立了飞行器模型在原理样机中运动控制的软硬件平台,并进行了一系列的运动控制实验。运动控制实例与理论仿真结果相互印证,检验了理论分析的科学性和可行性。

本文的研究为绳牵引并联机构在风洞试验中的应用打下理论及实践基础,并为绳牵引并联机构在其它领域的应用提供了参考。

关键词:绳牵引并联机构;六自由度;运动控制;系统分析;风洞试验

厦门大学博硕士学位论文摘要库

ABSTRACT

The research on wire-driven parallel manipulator becomes one of hotspots in the world recently. It's so valuable in various areas including aviation, military affairs, industry, science research and so on. There is potential appliance foreground in many fields. For example, robot of architecture, force feedback setting and touch setting of dummy practice, large motion emulator, large radio telescope, super high speed robot, light robot in super large workspace, aviation spaceflight, manufacture of large steamship and naval ships, mechanical process and other situation.

In this paper, a 6-DOF wire-driven parallel manipulator support system for low speed wind tunnel has been researched including manipulator design, theory analysis, dynamic simulation, constructing manipulator and motion control experiment.

A 6-DOF wire-driven parallel manipulator with 3R3T type WDPSS-8 (WDPSS: Wire-Driven Parallel Suspension System) has been designed. The analysis has been carried out in the paper to the positive and inverse solutions of position kinematics, velocity kinematics and acceleration kinematics. The MATLAB optimization Toolbox was involved in the positive solution of position kinematics.

The static and dynamic analysis has been applied to WPDSS-8. The cable's tension and the controllable workspace of the aircraft model have been discussed and the model's trace in helix line has been designed. The simulation including the position, velocity, acceleration of the aircraft model and the length, velocity and acceleration of the cables has been finished. The result of simulation is reasonable and accord with the physical sense completely.

The practical manipulator has been built and motion control experiments have been implemented according to both theory analysis and numerical simulation above. The mutual validation between the motion control experiments and the theory simulation indicates the research results in theory analysis obtained in the paper are scientific and feasible.

The hardware manipulator and software program related to in this paper are the basic for the in-depth research of 6-DOF wire-driven parallel manipulator, and the research WPDSS-8 also can be referenced by other wire-driven parallel manipulators.

Key Words: wire-driven parallel manipulator; 6-DOF; motion control; system analysis; wind tunnel test.

厦门大学博硕士学位论文摘要库

目 录

第一章 绪论	1
1.1 绳牵引并联机构研究概况.....	1
1.2 本文研究的背景意义及主要内容.....	4
第二章 3R3T 六自由度绳牵引并联机构的运动学分析	8
2.1 机构模型.....	8
2.2 运动学位姿逆解模型.....	10
2.2.1 基于动坐标系下的运动学位姿逆解模型.....	10
2.2.2 基于静坐标系下的运动学位姿逆解模型.....	13
2.3 运动学位姿正解问题.....	16
2.4 运动学速度及加速度的逆解问题.....	20
2.5 本章小结.....	22
第三章 3R3T 六自由度绳牵引并联机构的静力学与运动分析	23
3.1 静力学分析.....	23
3.1.1 静力学数学模型.....	23
3.1.2 牵引绳拉力的计算.....	24
3.2 动力学分析.....	25
3.3 工作空间分析.....	26
3.3.1 可控工作空间分析.....	27
3.3.2 具有拉力条件的工作空间分析.....	28
3.3.3 具有刚度条件的工作空间分析.....	29
3.3.4 工作空间的求法.....	30
3.4 本章小结.....	30
第四章 飞行器模型轨迹规划及运动仿真	32
4.1 转动自由度下的运动仿真.....	32
4.1.1 单转动自由度的绳长变化.....	32
4.1.2 组合转动自由度的绳长变化.....	34

4.2 飞行器模型运动轨迹规划	41
4.3 运动学正解运行结果	47
4.4 本章小结	48
第五章 绳牵引并联机构设计与运动控制实验	49
5.1 WPDSS-8 原理样机	49
5.1.1 原理样机机构设计	49
5.1.2 飞行器模型	50
5.2 运动控制卡	51
5.3 电机及驱动器	53
5.3.1 步进电机特性	55
5.3.2 步进电机驱动器	57
5.4 运动控制实验	57
5.4.1 运动控制实验内容	58
5.4.2 编程策略	59
5.4.3 误差分析	66
5.5 本章小结	67
第六章 总结	68
6.1 总结	68
6.1.1 总结	68
6.1.2 结论	68
6.2 展望	69
参考文献	71
攻读硕士研究生期间发表的论文	76
致谢	77

CONTENTS

Chapter 1 Preface	1
1.1 The general situation of wire-driven parallel manipulator	1
1.2 The background and content of paper	4
Chapter 2 Kinematic analysis of a 6-DOF wire driven parallel manipulator with 3R3T type	8
2.1 Model of manipulator	8
2.2 Inverse solution of position kinematics	10
2.2.1 Inverse solution of position kinematics on dynamic reference frame	10
2.2.2 Inverse solution of position kinematics on static reference frame	13
2.3 Positive solution of position kinematics	16
2.4 Inverse solution of velocity and acceleration kinematics	20
2.5 Brief summary	22
Chapter 3 Static and dynamic analysis of a 6-DOF wire-driven parallel manipulator with 3R3T	23
3.1 Analysis of statics	23
3.1.1 Mathematics model of statics	23
3.1.2 Calculation of cable's tension	24
3.2 Analysis of dynamics	25
3.3 Analysis of workspace	26
3.3.1 Analysis of controllable workspace	27
3.3.2 Analysis of workspace with tension condition	28
3.3.3 Analysis of workspace with stiffness condition	29
3.3.4 Solution of workspace	30
3.4 Brief summary	30

Chapter 4 Trace design and motion simulation	32
4.1 Motion simulation on rotated DOF	32
4.1.1 The length change of cable on single rotated DOF	32
4.1.2 The length change of cable on combined rotated DOF	34
4.2 Trace design	41
4.3 The result of position kinematics's positive solution	47
4.4 Brief summary	48
Chapter 5 The design of manipulator and experiment of motion control	49
5.1 WPDSS-8	49
5.1.1 Design of WPDSS-8	49
5.1.2 Aircraft model	50
5.2 Motion control card	51
5.3 Stepper motor and driver	53
5.3.1 Characteristic of stepper motor	53
5.3.2 Stepper motor Driver	55
5.4 Experiment of motion control	57
5.4.1 Content of motion control experiment	58
5.4.2 Program strategy	59
5.4.3 Error analysis	66
5.5 Brief summary	67
Chapter 6 Conclusions	68
6.1 Conclusions	68
6.2 Prospect	69
References	71
Publications	76
Acknowledgments	77

第一章 绪论

1.1 绳牵引并联机构研究概况

绳牵引并联机构是一种新型并联机构,具有结构简单、工作空间大、高负载能力、极高的负载/重量比、易拆装、可重组、模块化程度高、价格低廉和运动速度快等优点^[1,2]。

早在 1984 年 Landsberger 就提出了绳牵引并联机器人的设计问题^[3]。早期的研究领域主要是绳牵引并联机器人在集装箱吊装方面的应用,有关研究包括定位分析、刚度分析和工作空间分析等。1989 年 Dagalakis 等人研制成功带有串联子系统的绳牵引并联机构 ROBOTARANE,提出了用于起重的绳牵引并联机器人,并对其进行了工作空间分析、刚度分析和结构设计^[4]。这是绳牵引并联机构最早的应用。

绳牵引并联机构理论此后得到进一步发展。Ming A 等指出,由于绳只能承受拉力,不能承受压力,绳牵引并联机构必须采取冗余驱动,即 n 自由度绳牵引并联机构至少必须有 $n+1$ 根绳来牵引^[5]。该文中提出了完全约束定位机构 CRPMs (Compeletely Restrained Position Mechanisms) 的基本分类,指出不完全约束定位机构 IRPMs (Incompeletely Restrained Positioning Mechanisms) 需要外力(如重力)来保持稳定,而且开发了 CRPMs 构型的样机,并对其控制问题进行了研究。

在日本,绳牵引并联机构的研究始于 1988 年,是对绳牵引并联机构研究比较早和多的国家。Kawamura 等人于 1995 年提出了一种由 7 根绳牵引的力传递性能好、工作空间大的六自由度并联机构,此外这个机构还具有极高的加速度^[6]。继而 Takeda 等人对该类型的绳牵引并联机构进行了力传递性能分析^[7]。Morizono 等人研究了超高速绳牵引并联机器人 FALCON-7,对六自由度绳牵引并联机构进行了超高速控制分析、刚度分析和工作空间分析^[8]。

近十年来绳牵引并联机构的理论和应用发展迅猛。Duisburg 大学的 Verhoeven 提出了一个基于绳牵引并联机构的自动电视摄像机 Skycam 和基于 8 根绳牵引的六自由度并联机构的 Charlotte 机器人^[9]。后者是用于地面控制器来自

动控制太空站 (Space Station) 中的机组人员的任务和操作。Bergamasco 提出了一种基于六自由度绳牵引并联机构的具有力反馈的手控制器, 研究了该机构的运动学优化问题, 最大可达空间的分析问题以及过约束装置的设计问题^[10]。

在此期间, 许多学者也提出了 CDDRs 这一概念。CDDRs (Cable-direct-driven robots) 是一种并联的操作机器人, 具体来说就是用 n 个电动机拉紧 n 条绳子对末端执行器进行控制。1993 年美国 NIST (National Institute of Science And Technology) 研发了早期的 CDDR 用于码头, 他们研究这种全新概念的起重机已有很多年^[11,12]。NIST 方法具有独一无二的特征: 采用了绳子作为并联的链接, 采用绞盘作为驱动器, 从而代替了用液压驱动的机械臂。在这个系统中, 重力可以保证绳子一直处于拉直状态。

McDonnell-Douglas 研发了 Charlotte 用于国际空间站, 使得一个长方形的箱体可以被 8 个电机拉紧 8 根绳子并联驱动^[13]。2000 年, Barrette 和 Gosselin 进行了平面机械结构系统的分析^[14]。他们根据实际工作的原理, 提出了速度和绳受拉力的关系式, 详细分析了工作空间, 给出了关于 2 维子集范围确定的方法。由于两种边界的存在 (两根绳平衡轨迹和三根绳的奇异轨迹), 以及工作空间的形状取决于末端执行器的加速度, 所以他们介绍一种新的动力学工作空间的概念, 并且验证了工作空间的任何子集可以看作三根绳的亚工作空间等。2002 年, Arai, et al. 展示了另一种 CDDR^[15]。这种 CDDR 是由绳子和液压驱动混合并联驱动, 目的是以设计紧凑的操作臂在大空间工作。他们研发的灵巧机械臂能够控制一个重物的六个自由度变化, 展示了混合驱动并联机械结构的基本概念, 比较了基于运动学和静力学多种混合机械结构的关系。他们也讨论了必要规范下机械臂工作空间的分析。

大多学者所提出的 CDDRs 和 CDDHIs (cable-direct-driven haptic interfaces) 都涉及到由绳子引导的末端执行器的平移运动和旋转运动。而 Williams 提出了绳悬挂高维面的概念, 并且为正解位姿运动学、逆 Jacobian 矩阵和静力学模型提出了数学转换式。同时他也提出了拉紧力最优选择的方法^[16]。CDDRs 比传统机器人质量轻, 可靠, 更加经济, 因为它们的主要结构是由重量轻, 高载荷绳子组成。其主要缺点是: 绳子只能承受拉伸作用, 不能对末端执行器施加推力。适当的设计可以保证平移的 CDDR 末端执行器保持足够的僵直, 从而在各个方向上

避免旋转趋势。

Williams 和 Gallina 于 2001 年提出了一种混合并行/链的操作机结构^[6]。平动自由度由 CDDR 提供, 旋转自由度由串联手腕机构完成。他们提出了两种 CDDR 模型: 3 绳且有一个驱动冗余的 CDDR 和 4 绳且有两个驱动冗余的 CDDR。他们还提出了 CDDR 的运动学(包括位姿运动学和速度运动学)和静力学模型、保持绳正拉力的方法, 以及串并联混合操作机的动力学模型。此外, 他们还提出了当 CDDR 以高速、高加速度状态做平移运动时, 动力学模型用于改进控制方法, 从而区别于运动学模型和静力学模型在改进控制方法中的应用。Williams 和 Gallina 全面分析研究了 CDDR 模型, 包括: 末端执行器和驱动器的 Cartesian 动力学模型, 整个系统的动力学模型, CDDR 的控制结构, 计算最优驱动力矩的方法。由于绳悬挂机器人存在一些工作空间的限制问题, 而问题源于机器人绳子的牵引。对于此, 2002 年 Robert 提出了一些关于绳悬挂机器人的逆运动学和静力学的见解, 指出绳悬挂机器人保持特定位置必需的和足够的条件^[7]。文中的另一个重要的论点是关于绳子约束机器人的程度及范围。他们为完全约束的机器人提出条件, 用公式表示达到静力平衡的问题和根据操作机逆 Jacobian 剩余零状态空间完全约束机器人, 而零状态空间的公式表达了用于研究冗余驱动绳悬挂机器人的误差。

德国的 Rostock 大学成立了一个绳牵引并联机构研究小组, 他们研究了欠约束绳牵引并联机构的逆解问题、刚度分析问题、动力学问题和控制问题^[8]。此后他们对冗余约束定位机构 RRPMs (Redundantly Restrained Positioning Mechanisms) 进行了研究, 已研制出样机 CableV, 并致力于控制问题的研究^[9]。Duisburg 大学的 Verhoeven 和 Hiller 等人自 1998 年起开始进行绳牵引 Stewart 平台并联机构 SEGESTA 的研究^[20], 他们侧重于 CRPMs 和 RRPMs 的研究, 主要研究运动学正解问题、工作空间和轨迹规划。迄今为止, 他们在工作空间的研究已取得了诸多突破, 其中最重要的贡献是: 给出了绳牵引并联机构可控工作空间的封闭表达式, 提出了一种对任何 RRPMs 都适用的绳拉力分布优化算法, 并证明了在一定轨迹下, 由该算法求出的绳拉力的路径是连续的。

此外, Barrette 等引入动力学工作空间概念, 给出了绳牵引平面并联机构工作空间边界的解析表达式, 并成功研制了由 9 根绳牵引的具有超大平动工作空间

的并联机构^[21]。Jeong 等研究了用于测量的绳牵引并联机构的运动学问题与工作空间分析问题^[22]。法国国家航空研究局 (ONERA) 正在支持一项研究计划——低速风洞绳牵引并联支撑系统“SACSO 项目”。SACSO 是一种新型的风洞试验支撑系统, 它采用了绳牵引并联机构。该项目的研究工作已开展了 6 年多, 系统还处于调整与测试阶段。但因“SACSO 项目”是为法国国防部研究的, 其研究成果很少见诸于学术刊物^[23,24]。

从查询到的资料和文献看, 国内对绳牵引并联机构在风洞试验应用的研究开展得不多。在应用方面, 目前只有关于六自由度绳牵引并联机构在大型射电望远镜上应用的报道^[25-28]。国内的研究人员, 如华侨大学的郑亚青对风洞绳牵引并联机构理论进行了系统的研究, 并进行了相关的模拟仿真^[29,30], 南京航空航天大学的姚裕和吴洪涛、安徽理工大学的汪选要都曾研究过风洞绳牵引并联支撑系统的机构设计问题^[31-33], 但尚未见他们有建造样机及进行试验方面的研究成果^[34,35]。

1.2 本文研究的背景意义及主要内容

风洞是发展航空航天事业的关键设备。在每一种新型飞行器(如飞机、导弹等)研制过程中, 风洞试验是必不可少的一个环节。在进行风洞试验时, 必须将飞行器缩比模型用某种支撑系统将其置于风洞试验段的均匀流中, 并根据试验的要求改变缩比模型的姿态, 而支撑系统与试验结果的可信度关系重大。我国目前正在开展大型客机的自主研制, 正在或正着手研制第四代战斗机、舰载飞机、大型运输机、远程无人机以及先进导弹等重大航空装备, 这些都离不开风洞吹风试验, 离不开模型支撑系统。

飞行器为执行预定的任务需要变化不同的飞行姿态。在设计阶段, 只有通过风洞试验才能验证其在各种飞行姿态下的飞行性能和气动特性与载荷。因此, 风洞的模型支撑系统就必须满足飞行器姿态变化的要求。常用的风洞试验支撑通常采用硬式支撑, 包括尾撑、腹撑、背撑。硬式支撑实际上在相当程度上改变了模型的局部外形, 同时它们的存在必然会对模型附近流场产生不同程度的干扰。此外, 对于现代大迎角高机动战斗机, 要求其迎角范围可达 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$, 但是单一的尾撑或腹撑系统都很难将模型调整到满足整个迎角范围, 如果在全迎角试验中分段采用不同的支撑系统方式, 又会带来对干扰修正的复杂性和试验曲线难以衔接

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库