



并联机构柔性 多体系统的动态特性

..... 朱春霞 / 著



科学出版社

并联机构柔性多体系统的 动态特性

朱春霞 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

并联机构一直是机构学领域研究的重点。本书论述了并联机构动态特性的发展现状、研究意义和概况,简要介绍了并联机构柔性多体动力学研究方法,以及在并联机构动力学研究中引入多体动力学的必要性,在此基础上详细介绍了并联机构柔性多体系统的动力学建模方法和数字化仿真技术,并通过试验进行了验证。

本书可供在机械工程领域从事相关研究的人员参考使用,也可作为机械工程领域相关专业教师、研究生和高年级本科生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

并联机构柔性多体系统的动态特性/朱春霞著. —北京:科学出版社,2016.1
ISBN 978-7-03-046986-1

I. 并… II. ①朱… III. ①机构学 IV. ①TH111

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第311378号

责任编辑:姜红 张震 / 责任校对:胡小洁

责任印制:张伟 / 封面设计:无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年1月第一版 开本:B5(720×1000)

2016年1月第一次印刷 印张:77/8

字数:160000

定价:66.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

并联机构是国际上机械装备研究领域的新兴课题，国内外学者做了大量的研究工作。因其具有承载能力强、累积误差小、刚度大、精度高、动力性好等一系列优点，其在制造领域具有良好的发展前景，随着并联机构向轻型方向的发展，构件的柔度增大，并联机构中构件的柔性变形不仅会导致系统的运动精度降低，同时也会引起系统的弹性振动，使得并联机构系统的运动学、动力学性能受到很大的影响。因此，对具有高精度和性能要求的并联机构，就必须计入构件的弹性变形对动力性能和运动精度的影响。并联机构的柔性多体系统是一个多闭环、刚柔耦合的非线性动力学系统，单纯地运用刚体动力学或弹性力学都无法准确描述构件的力学行为，而必须采用柔性多体系统动力学理论进行分析。本书将并联机构与柔性多体系统有机地结合起来，以具有柔性构件的空间三自由度并联机构为研究对象，基于柔性多体动力学对一种 3-TPT 型并联机构的动态特性进行研究，为此类含有柔性部件的并联机构的动态特性和误差分析的进一步研究奠定了基础。

本书是集作者多年来在并联机构动态特性、柔性多体系统动力学以及有限元理论等多方面的建模研究成果而成，同时为了保持全书的系统性也吸收了国内外一些学者的观点和研究成果，已在参考文献中详细列出。

本书的主要研究内容得到了国家自然科学基金面上项目（51575365）和青年基金项目（51105258）、辽宁省博士启动基金项目（20111079）、辽宁省自然科学基金项目（2015020127）、辽宁省教育厅优秀人才支持计划项目（LJQ2014061）的资助。

本书紧紧围绕并联机构柔性多体系统的动态特性这一主题，从五个方面分若干个层次进行了较为系统的深入研究。①3-TPT 型并联机构的结构特点；②并联机构柔性多体系统的动力学建模；③并联机构柔性多体系统的仿真分析；④并联机构的动态特性的试验研究；⑤并联机构柔性多体系统的误差分析。

本书共分 7 章。第 1 章为绪论，主要简要介绍并联机构的发展前景、现状、研究意义和柔性多体系统建模理论的研究概况；第 2 章为 3-TPT 并联机构的位置及运动学分析，主要对所研究的 3-TPT 并联机构的机构特点和运动学问题进行了分析；第 3 章为并联机构柔性多体系统动力学建模，主要介绍对并联机构进行柔性多体动力学理论建模的方法；第 4 章为 3-TPT 并联机构柔性多体系统动力学仿

真，主要利用相关软件对第3章的理论建模进行仿真分析；第5章为并联机构虚拟样机建模及仿真分析，主要介绍利用柔性多体动力学软件对并联机构的多体系统进行建模和仿真分析；第6章为并联机构动态特性仿真及试验研究，主要通过试验研究对前面的理论分析和仿真分析进行验证；第7章为并联机构柔性多体系统的误差分析和仿真，主要分析并联机构在进行柔性多体系统考虑的基础上，其系统误差的建模和仿真研究。

并联机构的动态特性及其柔性多体系统的理论建模研究是一个十分复杂的问题，至今依然是国际学术界研究的一个热点和难点。作者期望本书的出版能够对其研究提供一点借鉴。

由于作者学识水平有限，本书难免有不妥之处，敬请读者不吝赐教，作者对此不胜感激。

朱春霞

2015年8月于沈阳

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 相关技术的国内外研究现状	2
1.2.1 并联机构研究的概述	2
1.2.2 多体动力学在并联机构上的应用	4
1.3 并联机构多体系统动力学研究的目的和意义	6
2 3-TPT 并联机构的位置及运动学分析	8
2.1 引言	8
2.2 3-TPT 并联机构的结构分析	8
2.2.1 3-TPT 并联机构的结构简介	8
2.2.2 3-TPT 并联机构的自由度计算	9
2.3 3-TPT 并联机构的位置分析与仿真	9
2.3.1 3-TPT 并联机构的位置反解与仿真	10
2.3.2 3-TPT 并联机构的位置正解与仿真	13
2.4 3-TPT 并联机构运动学分析	14
2.4.1 3-TPT 并联机构的雅可比矩阵	15
2.4.2 3-TPT 并联机构的速度和加速度分析及仿真	17
2.5 3-TPT 并联机构的奇异性及平稳性研究	21
2.6 本章小结	22
3 并联机构柔性多体系统动力学建模	23
3.1 引言	23
3.2 柔性多体系统动力学方程建模方法	23
3.3 3-TPT 并联机构柔性多体系统动力学方程	25
3.4 本章小结	31

4	3-TPT 并联机构柔性多体系统动力学仿真	32
4.1	引言	32
4.2	3-TPT 并联机构柔性多体系统动力学仿真	32
4.3	仿真结果分析	46
4.4	本章小结	47
5	并联机构虚拟样机建模及仿真分析	49
5.1	引言	49
5.2	并联机构虚拟样机模型的建立	49
5.3	并联机构运动学仿真	53
5.4	并联机构的工作空间分析	55
5.4.1	杆长的约束分析	57
5.4.2	虎克铰摆角约束分析	58
5.4.3	工作空间的虚拟样机求解方法	59
5.5	并联机构柔性多体动力学仿真	62
5.5.1	并联机构柔性多体仿真模型的建立	62
5.5.2	仿真结果与分析	66
5.5.3	柔性杆件的有限元分析	68
5.6	本章小结	70
6	并联机构动态特性仿真及试验研究	71
6.1	引言	71
6.2	并联机构振动特性的仿真	72
6.2.1	ADAMS/Vibration 模块	72
6.2.2	振动系统模型的建立	73
6.2.3	仿真及其结果分析	74
6.3	并联机构动态特性的试验研究	76
6.3.1	试验模态分析原理	77
6.3.2	机构试验模态分析	79
6.4	本章小结	85
7	并联机构柔性多体系统的误差分析和仿真	86
7.1	引言	86
7.2	并联机构的误差分析方法	87

7.3 并联机构误差模型的建立方法	88
7.3.1 矩阵法建立误差模型	88
7.3.2 误差独立作用原理建立误差模型	90
7.4 3-TPT 并联机构基于蒙特卡罗法的误差模拟	97
7.4.1 驱动杆杆长误差的随机抽样	97
7.4.2 铰链间隙误差的随机抽样	97
7.4.3 基于用矩阵法建立的误差模型的蒙特卡罗模拟	99
7.5 本章小结	105
参考文献	107
附录	112

1

绪论

1.1 引言

我们目前正处于一个科学技术飞速发展的时代，产品更新换代的速度不断加快，功能也在不断增多，随之，复杂性也不断提高。我们每天都可以看到这个世界的科技水平的进步，世界对产品和科研工作者的要求也在不断提高。并联机构自问世以来就得到了迅速发展，近年来发展比较缓慢，因为并联机构在更多领域中不断开发和使用，其设计要求也伴随着科技水平整体的提高而不断增多：应用于高、精、尖领域的并联机构要求质量轻、高精度、高灵活性；应用于加工制造的并联机构要求高灵活性、高速度、高刚度、高承载能力等^[1-5]。不同领域对并联机构的设计要求不同，但有一个共同点是：目前并联机构正朝着轻质、高柔度的方向不断发展，这就加大了并联机构的设计和评价的难度，这个问题的出现，无疑是并联机构技术有待攻克的难关。

并联机构在很大一部分上应用于担任生产加工角色的并联机床^[6]，作为一种新型的生产加工设备，其相关研究也就成为当前一种重要的研究方向，在国际机床行业中都是很重要的组成部分且受到高度重视。并联机床之所以可以迅速地在机床界占据重要的地位，是因为并联机床对串联机床而言具有弥补其工作缺陷性的作用，首先并联机床的自由度高，可以实现刀具沿多个不同运动轨迹进给；其次由于其结构的特殊性，在相同质量下，并联机床的承载能力和刚度比较大；最后由于其自由度较大，机床的加工灵活性较强，例如，并联数控机床可以在一个机床上实现工件从毛坯到成品的多道复杂加工工序，降低加工成本、提高工作效率和机床的利用率。

并联机构的应用领域非常广泛，除了在并联机床上的应用，并联机构在医疗、航空航天以及其他多种高精密的领域都发挥着重要的作用，例如，2010年，Rad设计了一种3-RPS医疗并联机器人，成为医疗中的辅助设备，用于手术中的精密操作。因此，研究和开发并联机构的企业和学者都在并联机构的研究中投入了很大的精力，其部分理论研究现已趋于成熟。

目前，关于并联机构的研究大多都将其视为多刚体系统，即将其系统中的各个部件都设定为刚性体来进行研究。对多刚体系统的动力学进行研究，理论上可以采用以拉格朗日法为代表的分析力学法和以牛顿-欧拉法为代表的矢量力学法^[6]。但是这种方法仅适用于单个刚体或是由少数刚体组成的简单的系统，伴随着刚体数目的不断增加，其运动学和动力学方程的复杂程度也就随之成倍地增长，此时寻求其动力学方程的解析解通常是不能实现的。后来随着科技的不断进步以及相关研究者的不断努力，计算机数值计算方法的出现为这一复杂问题的求解提供了一条可行道路，即针对具体的多刚体的运动学和动力学等问题列出其数学方程，即建立相对应的数学模型，再将该方程及约束条件等编制成数值计算程序来进行求解。虽然运用该方法可以得到合理的结果，但是针对每一个具体问题都要编写相应的计算机程序来进行求解的过程是非常漫长并且不断重复的，该方法的计算效率很低，所以迫切需要寻求一种合理的且可以运用计算机来进行编程和计算的建模和求解方法。

多体系统动力学是力学的一个新分支，成为力学界重要的研究课题^[7]。不少相关学者对其进行了卓有成效的研究，并且在生物工程、航天技术以及结构动力学等前沿学科的实际应用中，发挥了重要的作用。随着科技的不断进步，并联机构由于其广泛的用途和突出的优点，其相关研究受到越来越高度的重视，基于多体系统动力学并联机构的动态特性研究也受到越来越多并联机构研究者的重视。

我们可以把多体系统定义为通过特定的连接方式(关节)将诸多物体(元件)相互关联起来的系统。这些元件可以是刚体也可以是柔体，如果一个多体系统中所有的元件均为刚体，可称该多体系统为多刚体系统；如果一个多体系统中含有一个及以上的元件为柔体，则称该多体系统为柔性多体系统。

关于包含柔性元件的柔性多体系统的相关研究是当前最热门的课题^[7]，多体系统动力学家已就多刚体系统做了大量的研究工作，虽然运用含有柔性元件的系统即柔性多体系统来模拟实际系统更接近实际工程要求，但相关的研究还比较少。目前很多高、精、尖领域的相关部门对柔性多体系统也很有兴趣，加之这个课题本身的研究难度相对较大，且研究内容丰富多彩，所以引起了越来越多的科学家的关注。

1.2 相关技术的国内外研究现状

1.2.1 并联机构研究的概述

并联机构是由两个及以上独立的传动链将固定平台和动平台连接而成的，是具有两个及以上自由度的一种闭环机构，是由机电技术和计算机控制技术相结合

的先进技术产物^[1]。并联机构在实际应用中与目前广泛应用的串联机构形成互补的关系,其应用领域广泛,其应用前景被许多相关企业和研究机构一致看好。目前许多基于并联机构的产品已经被开发出来并投入生产,其产品的应用主要涉及运动模拟器、医疗器械、微动机器人和空间对接机构等诸多现代高、精、尖技术领域^[4]。

并联机构应用于飞行模拟器(图 1.1),是其作为运动模拟器的最广泛的应用。用飞行模拟器进行训练,在很大程度上降低了训练的成本和危险系数,由于其具有不受天气和场地限制的特点,大大缩短了训练的时间、提高了训练的效率,目前飞行模拟器已经成为各类飞行训练的重要装置。随着科技的不断发展,高、精、尖领域的相关研究不断深入,并联机构的应用领域也在不断扩大。并联机构运用于医疗领域是医疗界的一项突破性进展,目前很多微/纳级别的微动并联机构已开发并应用于医疗事业,尤其是在德国、美国等发达国家,将并联机构技术引入手术平台等医疗器械中的相关研究已经取得不错的成绩。Nonapod 微动并联机器人(图 1.2)和应用于医学领域的 M-850 微动并联机器人(图 1.3)都是由德国 PI 公司研制的。自 20 世纪 80 年代,并联机构应用于空间对接领域的相关研究就已成为热点课题,许多发达国家就此研究课题展开了丰富的研究工作,并已研制出多种样机,如航天器对接装置(图 1.4)。



图 1.1 飞行模拟器

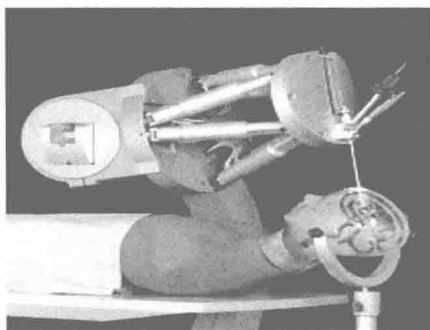


图 1.2 Nonapod 微动并联机器人

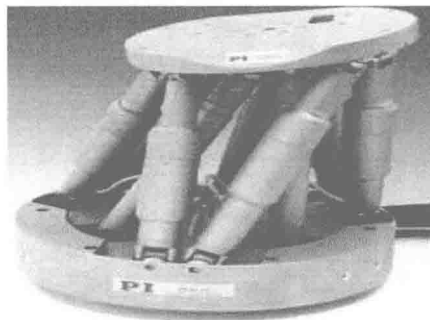


图 1.3 M-850 微动并联机器人

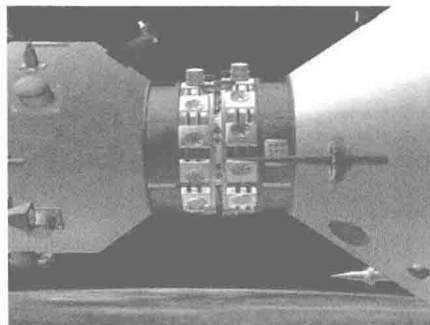


图 1.4 航天器对接口

之前已经提到，并联机床是并联机构实际应用中扮演的一个重要角色，国内关于并联机床的研究起步较晚，但成绩斐然。目前国内已有不少大学和学者就并联机构的产品开发和应用做出大量的工作，并取得卓越的成就。

在 2008 年 4 月举办的中国国际机床展览会（China International Machine Tool Show, CIMT）上，展出了一款具有突破性意义的并联结构机床 LINKS-EXE700^[5]，该机床由哈尔滨量具刃具集团所研制。该机床具有结构简单、加工范围大、刚度和精度都有所提高等特点，可以加工五面体，在工件特别装卡的情况下还可以实现六面加工，这是目前任何结构的机床都无法实现的。该机床在不同的配置下，可以应用于多个领域，如航空航天、汽车、模具等。

2013 年大连佳林设备制造公司研发的四轴并联机器人已经实现批量生产，成为目前国内同类产品的佼佼者。大连佳林设备制造公司从 2011 年开始致力于该四轴并联机器人的研发，在攻克“嵌入式控制系统”的难关后，加入“视觉识别系统”，使得这些机器人可以根据产品的形状、颜色将产品摆放成设定的角度，便于后期的分类和包装，在很大程度上释放了劳动力。该机器人可以运用在具有严格精度和频率要求的流水线生产上，适用于很多行业和领域，达到国际先进水平。

虽然相对国外的关于并联机构的开发和应用而言国内的相关研究起步较晚，并且也没有就目前所得理论和研究基础很好地加以利用，但是我国对并联机构研究不再仅仅是停留在实验室研发阶段，不少并联机构相关产品已经可以投入市场中使用。并联机构随着市场的不断更新换代和残酷的考验，更能发现其产品存在的问题，促进其不断进步。这是目前并联机构在我国的一个良好的发展趋势。

1.2.2 多体动力学在并联机构上的应用

多体系统（multi-body system）是指由多个彼此之间相互连接且存在明显相对运动的物体所构成的系统。多体系统早已不是一个陌生的定义或者概念，在实际的生活当中，很多机械都可以看成多体系统，如兵器、车辆、航天和工业机器人等众多复杂的工程机械系统。为求解多体系统的动力学问题，多体系统动力学就应运而生，其主要作用是应用计算机技术对这些复杂的机械系统进行动力学建模和仿真分析，从而研究多体系统的动力学特性、多体系统中物体的运动学规律以及其相应的受力情况。在经历了多刚体系统动力学以及计算多体系统动力学这两个发展阶段后，目前多体系统动力学的理论研究已趋于成熟。以多体系统动力学为核心技术的分析软件 ADAMS 和 SIMPACK 的用户迅速增多，使多体系统动力学不再只是少数学者感兴趣的学科。

由于并联机构的动力学系统具有高度的非线性和时变性,所以对该系统的动力学特性进行研究就必须采用非线性动力学中的相关理论。此时,多体系统动力学理论的出现使得此类复杂的动力学问题的理论分析变得可行。

传统的多体系统动力学研究的主要对象是由多个刚性构件组成的多刚体系统。然而真正意义上的刚体在实际中是根本不存在的,只是在一些机构中构件的弹性变形量相对其系统的几何尺寸来说比较小,所以在建模时为了降低其复杂程度就忽略了构件的弹性变形,但由此求出的数据很难保证其精度的要求。目前科技水平在不断地提高,一个产品或者是技术要想在越来越快的更新换代中保证其竞争优势,就必须做到满足人们对其提出的严格要求。对于并联机构而言,多用于超精密加工、医疗器械和航空航天等微纳米级领域,对其精度的要求就非常严格。目前,并联机构正朝着质量轻量化、柔度增大的方向发展,于是并联机构的柔性部件在运动过程中的弹性变形情况会更加明显,对并联机构的运动学和动力学性能方面都会产生很大的影响,为保证其高精度的设计要求就必须考虑其柔性部件弹性变形对其动力学特性的影响^[8]。考虑柔性部件的并联机构称为并联机构柔性多体系统,在该系统中,柔性构件的弹性变形与其刚性运动之间存在相互影响、相互耦合的关系,此时需要采用柔性多体系统动力学^[9]来准确描述该柔性多体系统的动力学特性。

柔性多体系统动力学理论在并联机构等相关领域的应用不断增多。经过多年的努力,现在有许多大型通用多体动力学软件可以对并联机构进行分析和计算,这也进一步加快了关于并联机构柔性多体系统的相关研究进度,也方便了更多学者展开关于该系统的相关研究。

近年来,并联机构柔性多体系统动力学的研究引起了国内外学者的广泛关注,但是相关的研究对多刚体系统动力学的研究而言还是比较少的,相应的建模方法和求解方法目前还不够成熟。

Wang 等^[10]对考虑柔性铰链的 6-RTS 并联机构进行了运动学和动力学的分析,研究各柔性铰链的弹性变形以及因弹性变形产生的弹性力矩。基于虚功原理和拉格朗日方程法建立了该机构的动力学模型,并进行了仿真分析。

Piras 等^[11]利用有限元理论与弹性动力学分析方法研究了考虑柔性杆件的 3-PRR 平面并联机构的动力学问题,在建立该机构的动力学模型时不仅考虑了柔性杆件的轴向变形和横向变形,还考虑了驱动器的轴向弹性。分析 3-PRR 平面并联机构固有频率的收敛性,并绘制出第一阶模态固有频率随机构位置变化时相应的变化曲线。

国内,李嘉等^[12]对考虑柔性铰链的 6-PSS 并联机构的静刚度进行了研究,运用虚功原理建立了静刚度模型,分析了在工作空间中各个点的刚度情况。

刘善增^[13]通过牛顿-欧拉方程法,对 3-RRS 并联机构进行了动力学建模和求

解,对刚柔耦合系统的固有频率特性进行了分析,总结出空间刚柔耦合并联机构系统的固有频率与机构基本参量之间的内在规律,推导出柔性并联机构的动力学方程,并讨论了该方程的求解。

孙小勇^[14]等提出一种简单且实用的柔性动力学建模方法,应用该方法对风洞试验用 6-PSS 并联机构进行柔性动力学建模,运用 ADAMS 软件建立该并联机构的柔性动力学模型并进行柔性动力学分析,总结出并联机构柔性状态下的动力学特性。

目前关于平面并联机构柔性多体系统的研究比较多,虽然空间并联机构柔性多体系统和平面并联机构柔性多体系统具有相似之处,但二者还是存在本质的区别的。显然,空间并联机构柔性多体系统从运动学分析的复杂程度、动力学建模的难度以及仿真时计算机编程的规模和计算效率等多个方面都远远超过了平面并联机构柔性多体系统。并且,在柔化并联机构时,一部分研究是将其铰链进行柔化处理,一部分研究是将其传动杆看作柔性杆件进行处理,将传动杆和铰链同时柔化处理的研究非常复杂,其相关的研究也很少。因此,空间并联机构柔性多体系统动力学无论从建模还是分析方法都非常的复杂。目前,空间并联机构柔性多体系统的动力学研究部分的理论还很不完善,对其本质特性的认识有待进一步研究。

1.3 并联机构多体系统动力学研究的目的和意义

虽然目前科技水平在不断提高,国家在研发工作方面也给予了很大的支持,但由于其他各种因素的限制,关于并联机构的研究仍然很大程度上只能在实验室中进行,真正开发研制出满足要求的并联机构少之又少。但是不少学者自并联机构问世以来,就对其理论研究投入很大的精力,目前该研究已趋于成熟。

真正意义上的刚体在实际中是根本不存在的,只是在一些机构中构件的弹性变形量相对其系统的几何尺寸来说比较小,所以在建模时为了降低其复杂程度就忽略了构件的弹性变形,但由此求出的数据很难保证其精度的要求。对于并联机构而言,多用于超精密加工、医疗器械和航空航天等微纳米级领域,对其精度的要求就非常严格。目前,并联机构正朝着质量轻量化、柔度增大的方向发展,于是并联机构的柔性部件在运动过程中的弹性变形情况会更加明显,对并联机构的运动学和动力学性能方面都会产生很大的影响,为保证其高精度的设计要求就必须考虑其柔性部件弹性变形对其动力学特性的影响。考虑柔性部件的并联机构称为并联机构柔性多体系统,此时需要采用柔性多体系统动力学来准确描述该柔性多体系统的动力学特性。

动态性能是影响并联机构效率和精度的一个重要因素,由于并联机构结构的

复杂性，其运动学和动力学的分析难度较大，尤其是考虑柔性部件的并联机构柔性多体系统中机构的刚性运动和部件的弹性变形之间存在耦合关系，进一步加大了其动力学建模的难度，即加大了并联机构动态特性研究的难度。并联机构的动态特性研究的相关理论还不是很完善，尤其是在考虑部件的柔性变形时并联机构的柔性多体系统动力学的建模和求解问题，至今还是一个尚未解决的、很有难度的和受到高度重视的课题。

本书基于并联机构柔性多体系统动力学对 3-TPT 并联机构进行动力学建模和仿真分析，分析并联机构柔性部件的弹性变形对其动态特性的影响，并对基于动力学分析所得数据对该机构的误差等方面进行了进一步的研究，为此类并联机构的动力学分析提供了理论基础。

3-TPT 并联机构的位置及运动学分析

2.1 引言

并联机构是由两个及以上的驱动器通过独立的传动链将固定平台和动平台连接而成的空间运动机构。并联机构位置分析^[15]的主要目的是求解该机构的输入构件和输出构件之间存在的几何约束关系。位置分析是对并联机构深入研究最基础的一部分内容。已知系统各个输入构件的关节变量，求解并联机构末端的位姿称为并联机构的位置正解；已知并联机构末端的位姿，求解各个输入构件的关节变量，称为并联机构的位置反解，也可称为位置逆解。并联机构的位置反解相对比较简单，这也是并联机构与串联机构的区别之一。并联机构的运动学分析可以在已有的位置分析的基础上，在不考虑产生运动的力和力矩的情况下，进一步进行求导和计算，得出组成机械系统的各个部件的速度、加速度之间的关系。机构的运动学分析是并联机构设计中的关键技术之一，也是其进行动力学分析和误差分析的基础。

2.2 3-TPT 并联机构的结构分析

2.2.1 3-TPT 并联机构的结构简介

本书研究的空间 3-TPT 并联机构具有运动学和动力学正反计算较为简单的特点。图 2.1 为机构模型简图。从图 2.1 可以看出该并联机构由如下几部分组成：固定平台、动平台、移动副、驱动杆、虎克铰等。

动平台和固定平台通过三根并联安装的驱动杆以及杆两端的虎克铰相连接。通过电机驱动三根伸缩杆在摆动杆内进行伸缩运动，从而改变各个驱动杆的长度，最终达到调整动平台位置的目的，实现动平台相对于固定平台的在三个方向上的移动。

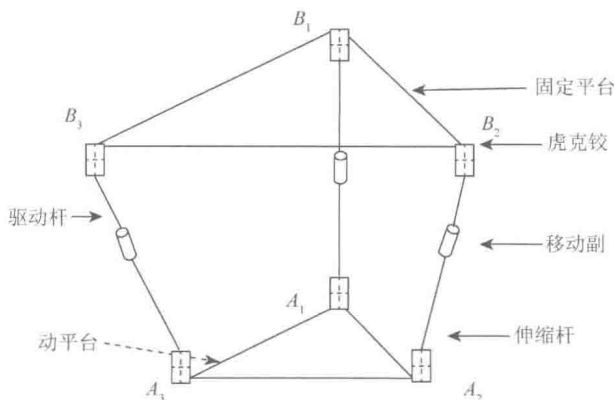


图 2.1 3-TPT 并联机构的机构简图

2.2.2 3-TPT 并联机构的自由度计算

机构自由度为机构所具有的独立运动的数目，其取决于机构中构件和运动副的数目以及运动副的类型。

假设在三维空间中有 n 个完全不受约束的构件和 g 个运动副，且所有构件由运动副相连接，设第 i 个运动副的约束数为 u_i ，此时，该机构的自由度 F 应为

$$F = 6 \times (n - 1) - \sum u_i \quad (2.1)$$

在一般情况下，式 (2.1) 中的 u_i 可以用 $(6 - f_i)$ (f_i 表示第 i 个运动副的自由度数) 代替，因此就得出一般形式的空间机构的自由度计算公式：

$$F = 6 \times (n - g - 1) + \sum f_i \quad (2.2)$$

分析 3-TPT 并联机构的结构，可以得出该机构中含有 8 个构件即 $n=8$ ，有 9 个运动副即 $g=9$ ，其中包含 6 个虎克铰和 3 个移动副，每一个虎克铰的自由度为 2，每个移动副的自由度为 1，所以：

$$\sum_{i=1}^9 f_i = 2 \times 6 + 1 \times 3 \quad (2.3)$$

将式 (2.3) 代入式 (2.2) 进行计算，可得

$$F = 6 \times (n - g - 1) + \sum f_i = 6 \times (8 - 9 - 1) + 15 = 3$$

即 3-TPT 并联机构的自由度为 3。

2.3 3-TPT 并联机构的位置分析与仿真

并联机构位置分析的主要目的是求解该机构的输入构件与输出构件之间存在的几何约束关系。由于并联机构相比串联机构而言，其结构较为复杂，所以其