

# 压电式微动机构 动力学与仿真分析

*Dynamics and Simulation Analysis of  
Micro Displacement Mechanism  
Based on Piezoelectric Actuator*

于月民 著



哈尔滨工业大学出版社  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

# 压电式微动机构动力学与仿真分析

于月民 著

哈爾濱工業大學出版社

## 内 容 提 要

压电驱动器是近年发展起来的新型智能微位移器件,具有体积小、推力大、精度及位移分辨率高等特点,是理想的微位移驱动器。本书阐述了压电堆栈驱动器的工作原理,对 PSt 1000/16/60VS25 型压电堆栈驱动器的输出位移和迟滞特性进行了测试分析;研究了直圆型柔性铰链的力学特性,并揭示了其设计参数对直圆型柔性铰链转动刚度的影响规律;基于直圆型柔性铰链分别设计压电式一维微动平台、微夹持器和微位移放大机构;研究了 S 型柔性机构的力学特性,并揭示其设计参数对 S 型柔性机构刚度的影响规律;基于 S 型柔性机构设计压电式一维微动平台和压电式二维微动平台;研究了直角柔性铰链的力学特性,并揭示了直角柔性铰链的设计参数对其刚度的影响规律;基于直角柔性铰链设计压电型步进式直线驱动器;分别建立上述微动机构的动力学模型和固有频率模型,利用有限元软件对微动机构进行仿真分析。

本书为压电式微动机构的研究提供了基础,具有一定的工程应用价值和理论指导意义。

### 图书在版编目(CIP)数据

压电式微动机构动力学与仿真分析/于月民著.  
—哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2015.2  
ISBN 978-7-5603-5068-4

I. ①压… II. ①于… III. ①机电系统-驱动机构-研究 IV. ①TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 290728 号

策划编辑 王桂芝  
责任编辑 范业婷 高婉秋  
出版发行 哈尔滨工业大学出版社  
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006  
传 真 0451-86414749  
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>  
印 刷 黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂  
开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 9 字数 210 千字  
版 次 2015 年 2 月第 1 版 2015 年 2 月第 1 次印刷  
书 号 ISBN 978-7-5603-5068-4  
定 价 48.00 元

---

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

# 前 言

压电式微动机构已经在微量进给、光纤对接和精密、超精密加工等要求精细操作的领域得到了广泛应用。同时,压电式微动机构在近代尖端工业生产和航空航天等领域占有极其重要的地位,其设计研究受到了相关研究人员的普遍关注。本书介绍了压电式微动机构的设计及其动力学分析与仿真分析,全书共8章,各章内容如下:

第1章为绪论,介绍研究的背景和意义以及目前压电式微动机构的国内外研究现状。

第2章介绍压电材料的基本特性与试验测试,测试压电堆栈的电压-位移特性曲线,为压电式微动机构的结构设计和理论分析提供必要的理论基础与实验数据。

第3章对直圆型柔性铰链的力学特性进行分析,揭示直圆型柔性铰链的设计参数对其转动刚度的影响规律,为基于直圆型柔性铰链的微动机构设计提供理论依据。基于直圆型柔性铰链设计压电式一维微动平台,对其建立动力学模型,并进行动力学分析和仿真分析。

第4章基于直圆型柔性铰链设计压电式微夹持器,对其建立动力学模型,并进行动力学分析和仿真分析。

第5章基于差式位移放大原理设计微位移放大机构,对其建立动力学模型,并进行动力学分析和仿真分析。

第6章对S型柔性机构的力学特性进行分析,揭示S型柔性机构的结构参数对其刚度的影响规律,为基于S型柔性机构的微动平台设计分析提供理论依据。基于S型柔性机构设计压电式一维微动平台,对其建立动力学模型,并进行动力学分析和仿真分析。

第7章基于S型柔性机构设计压电式二维微动平台,对其建立动力学模型,并进行动力学分析和仿真分析。

第8章对直角柔性铰链的力学特性进行分析,揭示直角柔性铰链的结构参数对其刚度的影响规律,为基于直角柔性铰链的微动机构设计分析提供理论依据。基于直角柔性铰链设计压电型步进式直线驱动器,建立其动力学模型,并进行动力学分析和仿真分析。

本书得到了黑龙江省教育厅普通高等学校青年学术骨干项目(1252G055)和黑龙江科技大学优秀青年才俊培养计划(20110107)的支持。

黑龙江科技大学工程力学专业的司涛、鲁天书、闫鲁华、张斌、鲁志勇、杨壮和狄升超

同学参与了本书部分内容的研究,在此表示感谢。

感谢黑龙江科技大学理学院力学系南景富教授在本书撰写过程中给予的帮助。

感谢黑龙江科技大学理学院力学系宋志勇老师和闫龙海老师在仿真计算方面给予的帮助。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏和不足之处,敬请广大读者批评指正。

作 者

2014 年 11 月

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 压电式微动平台的研究现状	1
1.2.1 单驱动进给机构	2
1.2.2 双驱动进给机构	3
1.2.3 微位移机构	5
1.2.4 定位机构	8
1.3 压电式驱动器的研究现状	8
1.3.1 压电超声波驱动器	8
1.3.2 准静态压电驱动器	12
1.4 主要研究内容	21
第 2 章 压电材料的基本特性与试验测试	22
2.1 引言	22
2.2 压电本构方程	22
2.2.1 压电弹性体的应变	23
2.2.2 压电弹性体的位移	23
2.3 压电陶瓷的特性	24
2.4 压电堆栈的工作原理	26
2.5 压电堆栈的工作特性	28
2.5.1 电学特性	28
2.5.2 迟滞特性	28
2.6 本章小结	29
第 3 章 基于直圆型柔性铰链的一维微动平台	30
3.1 引言	30
3.2 直圆型柔性铰链的力学特性	30
3.2.1 常用柔性铰链的结构形式	30
3.2.2 直圆型柔性铰链转动刚度与设计参数的关系	31
3.3 基于直圆型柔性铰链的一维微动平台动力学分析	36
3.3.1 微动平台设计	36
3.3.2 微动平台动力学分析	37
3.4 基于直圆型柔性铰链的一维微动平台仿真分析	38

3.4.1	应力及位移分析·····	38
3.4.2	模态分析·····	42
3.5	本章小结·····	45
<b>第4章</b>	<b>基于直圆型柔性铰链的微夹持器</b> ·····	<b>46</b>
4.1	引言·····	46
4.2	基于直圆型柔性铰链的微夹持器动力学分析·····	46
4.2.1	微夹持器设计·····	46
4.2.2	微夹持器动力学分析·····	47
4.3	基于直圆型柔性铰链的微夹持器仿真分析·····	48
4.3.1	应力及位移分析·····	48
4.3.2	模态分析·····	51
4.4	本章小结·····	54
<b>第5章</b>	<b>基于直圆型柔性铰链的微位移放大机构</b> ·····	<b>55</b>
5.1	引言·····	55
5.2	差式微位移放大原理·····	55
5.3	基于直圆型柔性铰链的微位移放大机构动力学分析·····	56
5.3.1	微位移放大机构设计·····	56
5.3.2	微位移放大机构动力学分析·····	57
5.4	基于直圆型柔性铰链的微位移放大机构仿真分析·····	61
5.4.1	应力及位移分析·····	61
5.4.2	模态分析·····	65
5.5	本章小结·····	67
<b>第6章</b>	<b>基于S型柔性机构的一维微动平台</b> ·····	<b>68</b>
6.1	引言·····	68
6.2	S型柔性机构的力学特性·····	68
6.2.1	S型柔性机构的结构形式·····	68
6.2.2	S型柔性机构的刚度系数·····	69
6.2.3	S型柔性机构的刚度与结构参数的关系·····	74
6.3	基于S型柔性机构的一维微动平台动力学分析·····	82
6.3.1	微动平台设计·····	82
6.3.2	动力学分析·····	83
6.4	基于S型柔性机构的一维微动平台仿真分析·····	84
6.4.1	应力及位移分析·····	84
6.4.2	模态分析·····	89
6.5	本章小结·····	92
<b>第7章</b>	<b>基于S型柔性机构的二维微动平台</b> ·····	<b>93</b>
7.1	引言·····	93

---

7.2 基于 S 型柔性机构的二维微动平台动力学分析·····	93
7.2.1 微动平台设计·····	93
7.2.2 微动平台动力学分析·····	94
7.3 基于 S 型柔性机构的二维微动平台仿真分析·····	95
7.3.1 位移及应力分析·····	95
7.3.2 模态分析·····	107
7.4 本章小结·····	109
<b>第 8 章 压电型步进式直线驱动器·····</b>	<b>110</b>
8.1 引言·····	110
8.2 直角柔性铰链刚度与设计参数的关系·····	110
8.3 压电型步进式直线驱动器动力学分析·····	114
8.3.1 驱动器设计·····	114
8.3.2 驱动器动力学分析·····	119
8.4 压电型步进式直线驱动器仿真分析·····	120
8.4.1 应力及位移分析·····	120
8.4.2 模态分析·····	123
8.5 本章小结·····	125
<b>参考文献·····</b>	<b>126</b>
<b>名词索引·····</b>	<b>134</b>



# 第 1 章 绪 论

## 1.1 研究背景及意义

高精度和高分辨率的精密微位移系统是直接影响精密、超精密切削加工水平、精密测量水平及超大规模集成电路生产水平的关键环节,在近代尖端工业生产和科学研究领域占有极其重要的地位,精密微位移系统的各项技术指标是各国技术发展水平的重要标志。随着科学技术的发展,更多领域也越来越迫切需要精密的微位移系统。精密微位移系统的核心是微位移平台,微位移平台的行程小于毫米级,是灵敏度和精度很高的机构。我国的精密、超精密加工水平落后于美国、日本等发达国家。因此,开展精密微位移系统的研究有利于缩小我国与先进国家同行业的差距,促进我国精密仪器仪表、精密超精密加工水平的提高。研制高精度微位移机构,以适应精密加工和超精密加工的要求,是提高我国现代装备制造业水平的重要任务之一。

压电材料是智能材料中最常用的驱动元件材料,具有良好的动态特性和高分辨率。压电式微动机构利用压电元件的逆压电效应实现驱动,并通过柔性机构本身的弹性获得微位移输出,具有精度高、刚度大、结构紧凑、频响高和易于控制等优点,在微米级和纳米级精度的精密驱动和定位领域具有广阔的应用前景。压电驱动器是近年发展起来的新型微位移器件,具有体积小、推力大、精度及位移分辨率高等特点,在使用中无噪声、不发热,是理想的微位移驱动器,在精密测量、超精密机械加工、微电子、机器人和航空航天等领域得到了广泛应用。

压电式微动机构不仅广泛地应用于微量进给、各种精密测量仪器、精密和超精密加工等领域,而且在光纤对接、微细加工、微型机器人装配、纳米技术、大规模集成电路光刻设备、精密测量、微电子、生物工程和航空航天等领域具有广阔的应用前景。因此,压电式微动机构在近代尖端工业生产和航空航天等领域占有极其重要的地位,其设计研究受到了相关研究人员的普遍关注。

## 1.2 压电式微动平台的研究现状

智能材料系统与结构的研究最早是在 20 世纪 70 年代末期,由美国率先开展起来的,随后世界各发达国家相继开展了该领域的研究工作,使智能结构技术得到广泛承认。进入 90 年代,智能材料系统与结构的研究更是受到高度重视,特别是美国军方和一些政府机构直接参与了研究和开发工作。1995 年,白宫科技政策办公室和国家关键技术评审组将智能材料结构技术列入国家关键技术报告中。1997 年,智能结构被列为基础研究计划的六项战略研究任务之一。

智能材料与结构是一门新兴的多学科交叉的综合科学,涵盖了材料、力学、机械、电子、控制、电磁等多个学科,是当前工程学科发展的前沿。在过去的几十年里,智能材料已经在航空、航天、舰船、建筑等军事和民用领域中得到广泛运用。智能材料在仿生、传感器、动作器等方面正以前所未有的速度迅猛发展,智能材料中的压电陶瓷更是以其优异的综合性能在微动机构中得到越来越广泛的应用。

我国对智能材料与结构的研究也十分重视,1991年国家自然科学基金会将智能/机敏材料列入国家高技术发展计划纲要的新概念新构思探索课题,智能/机敏材料及其应用直接作为国家高技术研究发展计划项目课题。为推进我国智能材料与结构的研究,国家自然科学基金委员会材料与工程科学部于1992年成立了“智能材料”集团。目前从事智能材料与结构研究的单位和科研人员已逐渐增多。国家基金委员会将智能结构列入“九五”基础研究优先发展领域之一,它的重要性已引起国家科委、国家国防科技工业局的高度重视。

目前微位移系统的进给机构主要有单驱动进给机构和双驱动进给机构两种形式。单驱动进给是指采用单一的驱动方式实现驱动进给的机构。双驱动进给机构是指在同一方向上,将两种不同驱动方式组合在一起实现驱动进给的机构,通常一个用来实现大行程进给,另一个用来实现高分辨率进给。

### 1.2.1 单驱动进给机构

#### 1. 滚珠丝杠

精密滚珠丝杠在各种传动方式中是最早应用的驱动机构之一,也是超精密机床最常用的驱动方式。滚珠丝杠的安装误差、丝杠本身的弯曲、滚珠的跳动及制造上的误差、螺母的预紧程度等都会给系统的进给精度带来影响。尤其是丝杠和螺母之间的预紧力对系统的分辨率和静、动态性能影响不可忽视<sup>[1-3]</sup>。

#### 2. 静压丝杠

静压丝杠包括空气静压丝杠和液体静压丝杠。因为丝杠与螺母并不直接接触,而是有一层高压流体膜相隔,所以没有由于摩擦而引起的爬行,可长期保持精度,而且可以提高进给运动的平稳性<sup>[4-5]</sup>。但是传动精度取决于丝杠螺母副的制造精度,而且空气静压丝杠副刚性低。液体静压丝杠传动副刚度高于空气静压丝杠副,但两者从承载能力上看,体积相差很大,而且静压丝杠没有标准产品,必须专门制造。静压丝杠制造非常复杂,难以得到广泛应用。

#### 3. 直线电机

直线电机的突出优点是可以直接传动,不需要中间转换机构,因而使机器设备总体结构大大简化,体积大大缩小,而且反应速度快、随动性好、容易密封<sup>[6]</sup>。直接驱动易引起振动,降低系统的稳定性和动态性能,驱动力与滚珠丝杠相比也较小<sup>[7]</sup>。

#### 4. 摩擦驱动

摩擦驱动机构传动无间隙,驱动轴的轴向误差对进给误差不敏感,能够较好地实现高精度平稳传动,其使用效果很好,优于滚珠丝杠副的驱动。目前,国外对摩擦驱动の利用

主要在超精密定位方面,据报道定位分辨率已达纳米级水平,英国 Nanoform 600 超精密镜面加工机床<sup>[8]</sup>,美国 LODTM 大型金刚石车床上都采用了这种驱动机构,但我国在这方面还处于实验研究阶段。摩擦驱动也有缺点:结构复杂,推力有限,且不可避免因超负荷引起滑动,所以必须给予适当的预压。若预压小则接触面有可能产生滑动,若预压过大,由于塑性变形,则难以实现正确驱动,并且还容易产生磨损问题。

### 5. 压电陶瓷微位移器

压电陶瓷微位移器在精密定位控制方面有很多优点,包括高频响应、输出力大、尺寸小和热膨胀系数小。压电陶瓷行程可从  $5\ \mu\text{m}$  到  $180\ \mu\text{m}$ <sup>[9]</sup>,分辨率与行程成反比,如果有高性能的驱动电源,可获得纳米乃至亚纳米级的分辨率。压电陶瓷微位移器已被广泛应用到许多微米级和纳米级精度的精密驱动和定位领域中<sup>[10-15]</sup>。目前国内外普遍采用压电陶瓷驱动,柔性铰链传动作为高精度微进给定位机构<sup>[16-21]</sup>。压电陶瓷的主要缺点是行程小,难以实现大行程的微进给。

### 1.2.2 双驱动进给机构

大行程和高精度始终是互相矛盾的,如何能够实现大行程范围内纳米级进给,一直是精密工程领域研究的前沿。基于双驱动的思想,将系统划分为宏动和微动两个部分,用宏动完成系统的精密定位,用微动系统实现超精密定位。采用这种宏微结合双驱动的定位机构不仅能提高系统的定位分辨率和精度,而且能保证系统具有较高的响应速度。宏/微双驱动技术是目前实现高精度、大行程微位移系统的一种有效策略。美国、韩国、德国和日本等发达国家在 20 世纪 80 年代就开始了这方面的研究工作。我国在这方面起步较晚,主要有哈尔滨工业大学、西安交通大学和中国科学院光电技术研究所等单位进行了相关技术的研究。

宏微结合的概念是由美国麻省理工学院的 S. Andere<sup>[22]</sup>于 1984 年为解决大行程与高精度的矛盾首先提出来的。如图 1.1 所示是加拿大研制的一维双驱动进给工作台系统<sup>[23]</sup>。宏动部分采用直线电机驱动,微动部分采用压电陶瓷驱动。通过跟踪幅值为  $5\ \text{mm}$ ,频率为  $5\ \text{Hz}$  的正弦波曲线进行实验,采用双驱动进给工作台比只采用直线电机驱动轨迹跟踪误差由  $\pm 40\ \mu\text{m}$  减小到  $\pm 10\ \mu\text{m}$ ,减小了 75%。

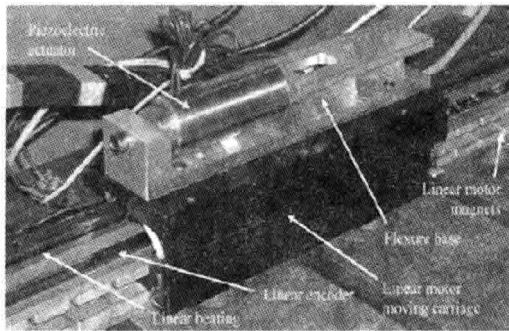


图 1.1 一维双驱动进给工作台系统

韩国汉城大学研究的宏微两级定位纳米工作台<sup>[24]</sup>如图 1.2 所示,平台由滚珠丝杠螺

母机构构成的宏动台和 PZT 驱动构成的微动台机构叠合而成。微动台安装在基于电机驱动的宏动工作台上,宏动工作台的位置反馈用编码器,微动工作台的位置反馈用激光干涉仪,这样能够实现很高的定位精度,最高可达到 30 nm。

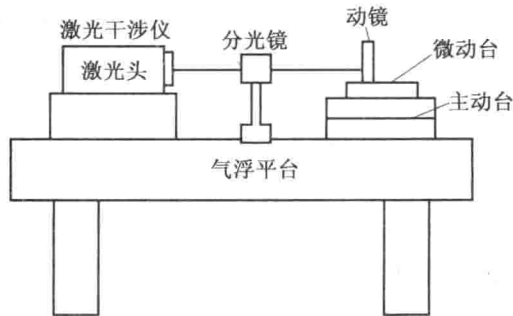


图 1.2 汉城大学研究的宏微两级定位纳米工作台

美国加州大学研制的宏微结合的定位系统装置<sup>[25]</sup>如图 1.3 所示。它采用的是直接直线驱动的形式,减少了由于传动机构带来的摩擦、间隙以及机械弹性变形的问题。宏动部分采用超声波马达驱动形式,精密定位系统采用压电陶瓷定位系统,宏/微部分分别由两个精密光栅尺实现位置反馈,微动台的光栅尺分辨率小于 10 nm。

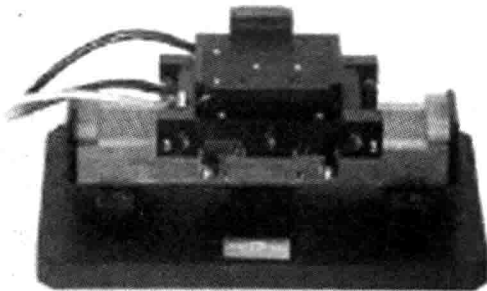


图 1.3 美国加州大学研制的宏微结合的定位系统装置

在国内对于宏/微双重驱动定位系统的研究起步比较晚,如图 1.4 所示为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的一种超精密定位工作台,该工作台采用伺服电机作为宏动平台的驱动,由滚珠丝杠和滚珠导轨传动,微动部分则用压电陶瓷驱动和柔性铰链组成的机构传动,该机构的缺点是滚珠丝杆传动存在反向间隙,精度不高。

如图 1.5 所示是 2007 年哈尔滨工业大学机器人研究所孙立宁教授等人的研究成果,该平台是由电机进行宏驱动、压电陶瓷进行微驱动,采用双光栅位移测量、硬件阈值切换的闭环控制,同时设计了 X、Y 方向解耦机构,实现了大行程、高速度、高加速度和高精度的运动定位要求<sup>[26-27]</sup>。

宏微双级定位系统方案的优越性已经得到国内外大多机构的认可和实践证明,宏微双级驱动既有宏动台运动的行程大、速度高的特点,又有压电微动台的分辨率高、响应快的特点。

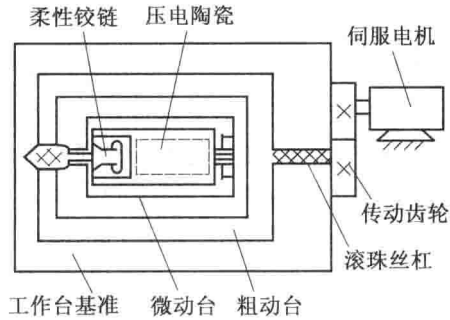


图 1.4 超精密定位工作台

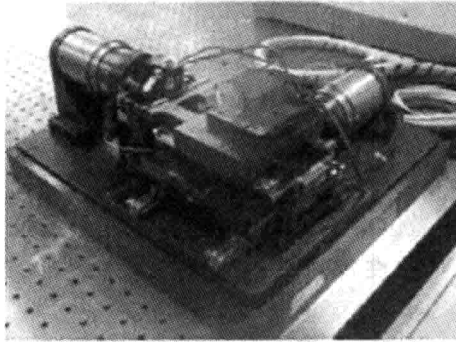


图 1.5 宏/微驱动高速高精度 X、Y 定位平台

### 1.2.3 微位移机构

当前常见的微位移机构有机械传动式、弹性变形式、热变形式、流体膜变形式、磁致伸缩式和压电式等。

#### 1. 机械传动式

机械传动机构在精密机械和仪器中应用很广,主要有螺旋机构、杠杆机构、楔块凸轮机构以及它们的组合机构。但因机构中存在机械间隙、摩擦磨损以及爬行现象等,所以运动灵敏度和精度都很难达到高精度要求,所以该机构只适用于中等精度仪器。

#### 2. 弹性变形式

弹性变形式微位移机构利用两个串动弹簧的刚度差,实现输出位移相对于输入位移的大幅度缩小,以提高输入位移的分辨率。当该机构的运动受到外力或存在摩擦力时,将直接影响精度,而且对于步进状态的输入位移,容易产生过渡性震荡,所以不适合用于动态响应情况。

#### 3. 磁致伸缩式

磁致伸缩微位移机构利用某些材料被置于磁场中时其长度变化的特性来实现微量进给,其精度可达亚微米级。磁致伸缩式微位移机构具有结构简单紧凑、输出位移大、输出力大等优点。但其磁场强度与磁致伸缩量之间不严格呈线性关系,磁场作用下还伴有发热,将影响其定位精度。由于发热一般需要冷却装置,因而其结构较大。

#### 4. 压电式

压电式微位移机构利用压电元件的逆压电效应来通过高分辨率的压电元件驱动,用柔性铰链机构的无摩擦、无间隙的高精度传动来实现超精密定位。由于该机构具有精度高、刚度大、结构紧凑、频响高、易于控制等优点,所以得到了广泛的应用。

柔性机构无需装配,没有间隙,其精度较传统的机构要高很多,所以在精密测量和定位方面具有明显的优势。随着设计技术的提高,柔性机构的应用也越来越广泛,特别是在体积限制较大的领域,如医疗器械、航空航天仪器仪表、狭小空间的精密工业检测等<sup>[28-32]</sup>。柔性机构相对传统刚性联接机构而言是一种比较新的结构形式,也是一种利用机构构件本身的弹性或挠性获得部分或全部运动的机构,它能完成一定的功能,或者传递某种特定的运动与能量。

1968年, Crossley 和 Burns<sup>[33]</sup>提出了柔性机构,其后, Burns、Her 和 Midha 等人对其进行了进一步的丰富和发展<sup>[34-35]</sup>。国内北京航空航天大学和大连理工大学等是较早从事柔性机构研究的单位,并取得了一定的研究成果。由于柔性铰链无机械摩擦、无间隙、运动灵敏度高,因此柔性支承导轨可以达到极高的分辨率,且结构紧凑、体积小、重量轻、不需要润滑。柔性铰链在精密微位移工作台、微夹钳、微定位系统、微型机器人与微装配等方面得到了大量的应用,对柔性铰链的研究也逐渐成为柔性机构研究中的一个热点<sup>[36-43]</sup>。

压电陶瓷驱动器是近年发展起来的新型智能微位移器件,具有体积小、推力大、精度及位移分辨率高等特点,在使用中无噪声、不发热,是理想的微位移驱动器,在精密测量、超精密机械加工、微电子、机器人和航空航天等领域得到广泛应用<sup>[44-46]</sup>,动态电源的研制也逐渐成为当今研究的热点<sup>[47-49]</sup>。

目前,各国学者对以压电陶瓷驱动、以柔性支承为导轨的微位移平台进行了大量的研究。国外早在 20 世纪五六十年代就开始了这方面的研究工作,并取得了一定的成果。美国国家标准局在 60 年代初采用以柔性铰链为弹性支承,以压电陶瓷微位移驱动器驱动的原理研制成功了一维微位移工作台<sup>[50]</sup>,并将其应用于航天领域。它采用杠杆原理与柔性铰链结合的整体式结构,利用叠层式压电晶体作为驱动元件。该微位移工作台的设计参数为:尺寸范围为 100 mm×100 mm×20 mm,微位移分辨率为 1 nm,行程范围为 0.50 μm。

1992年,美国国家标准与技术研究院的 J. Fu 教授研制了二维 X、Y 微位移工作台<sup>[51]</sup>,并将其用于 STM 中,实现了样品大范围二维扫描。如图 1.6 所示,该微位移工作台 X、Y 方向采用相同的运动机构形式,均通过杠杆放大机构实现压电陶瓷输入位移的传递和放大,并拉动运动部分实现微位移,运动部分可简化为平行四杆结构,四杆结构由柔性铰链支承,通过柔性铰链的弯曲变形来实现 X 方向和 Y 方向的微位移,该机构的最大行程为 500 μm,分辨率为 1 nm。

1991年,日本学者 T. Fu 研制了三维微位移工作台<sup>[52]</sup>,并将其成功地用于 Atomic Force Microscope (AFM) 中,实现了对半导体集成电路微观表面形貌的测量,如图 1.7 所示。X、Y、Z 方向微位移由位移分辨率为 0.1 nm 的高精度激光外差干涉仪实现位移探测,并反馈回控制系统实现对微位移工作台的闭环控制。该三维微位移工作台 X、Y、Z 方向最大行程分别为 12 μm、8 μm 和 5 μm,定位精度为 0.01 μm。

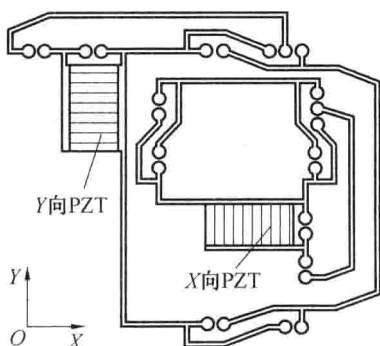


图 1.6 二维微位移工作台

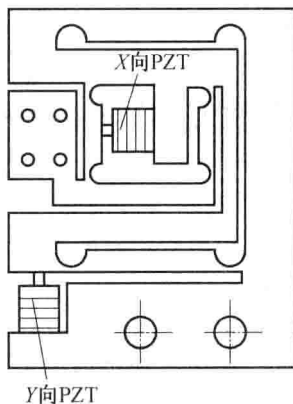


图 1.7 三维微位移工作台

韩国学者 W. Jae 和 D. Ryu 等人<sup>[53]</sup>在 1997 年研制出  $XY\theta$  微位移平台,该平台采用三个成行星分布的压电陶瓷驱动器驱动,以柔性铰链为弹性支承的一体化的杠杆放大机构作为微位移平台,其行程在  $X$ 、 $Y$  和  $\theta$  方向分别达  $41.5\ \mu\text{m}$ 、 $47.8\ \mu\text{m}$  和  $322.8^\circ$ 。他们用开环控制方式实现了  $X$ 、 $Y$  和  $\theta$  分别为  $7.6\ \text{nm}$ 、 $8.2\ \text{nm}$  和  $0.057^\circ$  的分辨率。

国内在 20 世纪 80 年代就开始了这方面的研究工作,清华大学采用柔性铰链和电致伸缩微位移器,研制了二自由度微位移工作台<sup>[54]</sup>,技术指标为:行程范围为  $0\sim 10\ \mu\text{m}$ ,定位精度为  $\pm 0.03\ \mu\text{m}$ 。另外,哈尔滨工业大学、国防科技大学、电子工业部四十五所和上海电气科学研究所等也进行了类似的研究<sup>[55-56]</sup>。但是相对于国外的研究,国内在研究范围、规模和深度上仍存在着较大的差距。

国外的学者对微进给技术在磨床上的应用进行了大量的研究,美国南加州大学 Ozisik 成功研制了用于磨削加工的微位移工作台,该工作台采用广义预测模型下的开环控制系统,阶跃响应上升时间为  $0.6\ \text{s}$ ,位移分辨率为  $0.05\ \text{nm}$ <sup>[57]</sup>。韩国 Kim 考虑到微进给磨削平台的制造成本问题,采用代替基于非接触式位移传感器反馈,发展了一个压电陶瓷微进给磨削工件平台,建立了利用压电陶瓷的压电效应产生的电压作为反馈信号的闭环反馈系统。但由于压电陶瓷驱动器自身的非线性对其有影响,因此,该平台的位移分辨

率较低。国内的天津职业技术师范学院的阎兵、田延岭等人于2002年研制了一种精密磨削微进给工件平台。根据公布的测试结果,利用压电陶瓷驱动器设计的精密磨削辅助工件平台的最小分辨率为3 nm,最大输出位移为10  $\mu\text{m}$ ,静态刚度最大达200 N/ $\mu\text{m}$ 。

要实现微位移和要求微位移机构有良好的动特性和高分辨率时,通常采用压电式微位移机构。

### 1.2.4 定位机构

目前,典型的微动平台柔性定位机构主要有单平行四杆机构、双平行四杆机构和Scott-Russell位移放大机构等<sup>[58-60]</sup>。单平行四杆机构微动平台的输出位移存在交叉耦合。双平行四杆机构微动平台结构虽然消除了位移耦合,但是结构复杂。Scott-Russell位移放大机构微动平台虽然结构紧凑,可以实现单驱动多自由度运动,但其输入输出存在非线性。S型柔性定位机构结构简单,不存在位移耦合,且稳定输出位移与输入位移呈线性关系。

## 1.3 压电式驱动器的研究现状

压电驱动器<sup>[61]</sup>是可输出精密运动的新型驱动器,具有响应速度快、驱动稳定性好和驱动力大的特点。压电驱动器不受太空电磁辐射的影响,可稳定地工作于真空和高、低温环境中,因此非常适合应用于航空航天领域<sup>[62-64]</sup>。压电堆栈是由多层压电陶瓷片构成的,其性能十分优良,在精密和超精密定位技术领域中有广泛的应用。目前国内外对压电驱动器的研究取得了一定的进展。根据驱动机理的不同压电驱动器可分为:压电超声波驱动器<sup>[65-67]</sup>和准静态压电驱动器<sup>[26-27]</sup>。压电超声波驱动器和准静态压电驱动器都是利用高频周期电场来驱动压电元件产生周期的应变以实现位移的输出,及驱动目标物体运动。

### 1.3.1 压电超声波驱动器

压电超声波驱动器<sup>[68-69]</sup>是利用压电材料的逆压电效应激励驱动器的定子,使驱动器定子超声波频段范围内产生机械振动,利用共振原理将驱动器定子的微变形放大,并用摩擦将驱动器定子的机械振动转换成驱动器转子或滑块的运动。

压电超声波驱动器具有传动精确、动态响应性好、结构简单、无电磁干扰和噪声低等优点。由超声波驱动器的工作机理及其自身结构的特点决定了超声波驱动器需要性能优良的高频电源激励。由于超声波驱动器利用摩擦将驱动器定子的机械振动转换成驱动器转子或滑块的运动,因此存在严重的磨损现象,导致驱动器的传动效率低,环境适应性也差<sup>[70]</sup>。

目前的压电超声波驱动器种类繁多,从基于摩擦原理的压电超声波驱动器到基于声悬浮原理的非接触式压电超声波驱动器;从蠕动式压电驱动器到复合型步进压电驱动器。从毫米级的微型压电驱动器到厘米级的小型压电驱动器;从单自由度压电驱动器到多自由度压电驱动器。按照压电超声波驱动器的工作原理,可将其分为接触式压电超声波驱



动器和非接触式压电超声波驱动器两种。

### 1. 接触式压电超声波驱动器

接触式超声波驱动器可分为驻波型、行波型和复合型三种类型。驻波型超声波驱动器振动体薄片由压电陶瓷和金属组成,凸台分布在振动的体薄片上,凸台受到驻波激励时会运动(左倾或右倾),凸台上的滑块由摩擦力驱动会随着凸台运动(向左移动或向右移动)。接触式超声波驱动器虽然具有较大的功率,但是不易改变旋转方向。

Williams 于 1948 年发明了第一台驻波驱动器<sup>[71]</sup>,发明示意图如图 1.8 所示。Williams 将压电单元黏结在矩形管状定子的外表面,当压电单元使管状定子弯曲时,驻波在转子内部产生,定子的晃动与转子轴摩擦接触,驱动转子轴旋转。

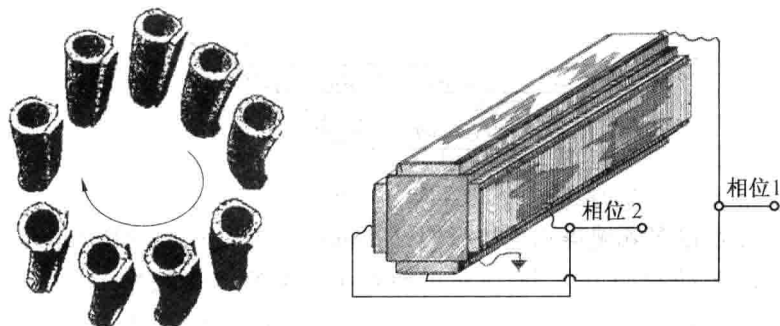


图 1.8 驻波驱动器示意图

20 世纪 90 年代, Penn State 大学的 Uchino 设计了微型驱动器,该驱动器的定子直径约为 2 mm,如图 1.9 所示。Uchino 驱动器可提供  $1.8 \text{ N} \cdot \text{mm}$  转动扭矩,转速为 14.3 r/s,最大输出功率为  $60 \text{ mW}$ <sup>[72]</sup>,功率密度为  $150 \text{ W/kg}$ 。

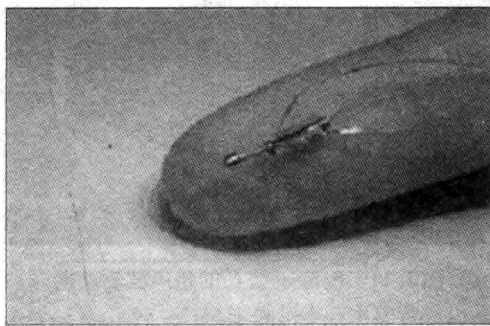


图 1.9 微型驱动器

行波型超声波驱动器主要由驱动器定子、驱动器转子、压电陶瓷和摩擦材料等组成。驱动器转子与驱动器定子接触,通过驱动器转子的变形,使得驱动器转子与驱动器定子间存在一定的压力。压电陶瓷驱动器粘在驱动器定子上,驱动器定子首先把电能转换为机械能,并通过驱动器定子和驱动器转子之间的摩擦作用将机械能传递给驱动器转子,驱动转子旋转,实现驱动器角位移的输出。

行波型超声波驱动器的工作原理<sup>[73]</sup>如图 1.10 所示,两组经过极化的压电陶瓷 A 和