

超精密气浮定位工作台技术 ——气浮系统动力学与控制

Research on
Ultraprecise Positioning
Stage with Gas-Lubricated
Bearings

—— Dynamics and Control of
the Gas-Lubricated System

□ 陈学东 何学明 叶燧玺 著

华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

超精密气浮定位工作台技术

——气浮系统动力学与控制

□ 陈学东 何学明 叶焱玺 著

华中科技大学出版社

中国·武汉

图书在版编目(CIP)数据

超精密气浮定位工作台技术——气浮系统动力学与控制/陈学东
何学明 叶燧玺 著. —武汉:华中科技大学出版社,2008年1月
ISBN 978-7-5609-4610-8

I. 超… II. ①陈… ②何… ③叶… III. ①气浮陀螺仪-
动力学-研究 ②气浮陀螺仪-自动控制-研究 IV. TN965

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 086524 号

超精密气浮定位工作台技术

——气浮系统动力学与控制

陈学东 何学明 叶燧玺 著

责任编辑:钟 珊

封面设计:刘 卉

责任校对:刘 竣

责任监印:熊庆玉

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:湖北新华印务有限公司

开本:880mm×1230mm 1/32

印张:7.375 插页:2

字数:180 000

版次:2008年1月第1版

印次:2008年1月第1次印刷

定价:18.00元

ISBN 978-7-5609-4610-8/TN·117

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

*

Research on
Ultraprecise Positioning
Stage with Gas-Lubricated
Bearings

— Dynamics and Control of
the Gas-Lubricated System

*

内 容 简 介

超精密定位工作台技术是集机械学、电子学、光学、计算机控制技术于一体的综合性技术，为 IC 制造技术、精密加工技术、精密测量技术等提供精密定位装置。本书系统阐述了超精密气浮定位工作台中的气浮支承技术、系统动力学、超精密定位运动及其控制等基本理论与方法。

本书的主要内容包括：超精密气浮支承技术和精密定位工作台电磁直接驱动的基本理论和技术；超精密气浮支承的建模、有限元分析方法及其数值计算的理论与方法；超精密气浮定位工作台的动力学建模及其动态特性分析；超精密定位工作台的定位运动分析及其控制方法研究。

本书可作为数字制造设备、精密加工设备、精密测量仪器、生物医药装备等行业科研技术人员的参考书，也可作为高等院校相关专业的研究生教材。

前 言

常规的精密运动平台多以机械接触式的移动副和旋转副构成，而机械摩擦及其发热致使这类机构的结构动力学性能受到限制，运动精度一般只能达到微米级。显然，常规的精密运动机构是无法满足诸如微电子制造装备纳米级甚至亚纳米级运动精度的要求。超精密气浮定位平台通过静压气浮隔离机械运动副之间的接触，可以提高平台机构运动的精度。但由此引发的思考是：气浮气流介质的动力学行为如何，这种动力学行为又是如何影响机构运动精度的，等等。而这，正是本书要探讨的问题。

自 2002 年起，笔者所在的课题组在国家重大基础研究计划(973 计划)、“十五”国家重大科技专项、国家自然科学基金等的资助下，以超精密气浮定位运动平台为对象，对气浮系统的工作机理、气浮系统的动力学参数辨识、气浮定位平台的动力学特性，以及气浮定位平台的超精密运动控制等开展了系统的研究工作，初步探明了超精密气浮定位平台的动力学特性，揭示了气浮系统动力学行为对平台运动的影响规律，从而提出了超精密气浮平台运动控制策略，实现了超精密气浮运动平台的纳米级定位精度。这些成果得到了国内外同行的认可，是 2007 年度教育部自然科学一等奖的主要部分之一。

超精密气浮定位平台技术的研究方兴未艾，笔者所开展的工作尚是初步的和尝试性的，还有许多科学问题和技术难点需要广大同行共同去研究与探索。笔者希望本书的出版能起到抛砖引玉的作用，同时也敬请读者及广大同行对本书中的缺点和不当之处提出批评和指正。

最后，笔者衷心感谢国家 973 计划、“十五”国家重大科技专项和国家自然科学基金的资助，感谢华中科技大学机械科学与工程学院和上海微电子装备有限公司提供的研究基础和条件，感谢数字

制造装备与技术国家重点实验室、国家光刻设备工程技术研究中心的大力支持，感谢华中科技大学出版社的细致工作，感谢严天宏博士、胡元太教授等提供的帮助和建议，感谢第一作者的研究生曾理湛、余显忠、姜伟、李志鑫、雷金、贾文川、孙翊、鲍秀兰、谢德东、郭合忠、陈文枢、刘赟等同学在本书的工程实验、资料整理、图表绘制、文稿打印等方面所做的工作。

陈学东、何学明、叶隼玺

2007年11月于喻家山

目 录

0	绪论	(1)
0.1	超精密气浮定位工作台简介	(1)
0.2	超精密定位工作台的发展概况	(2)
0.2.1	超精密定位工作台的发展过程	(2)
0.2.2	国外超精密定位工作台技术的现状	(4)
0.2.3	国内超精密定位工作台技术的现状	(9)
0.3	超精密定位工作台的关键技术	(9)
0.3.1	定位工作台的直线导向技术	(9)
0.3.2	定位工作台的控制技术	(11)
0.3.3	定位工作台的驱动技术	(11)
0.3.4	定位工作台的测量技术	(13)
0.3.5	定位工作台的材料	(14)
0.4	本书的研究目的和主要内容	(15)
0.4.1	本书的研究目的	(15)
0.4.2	本书的主要内容	(16)
1	永磁同步直线电动机的基本原理及其控制	(17)
1.1	永磁同步直线电动机的结构和工作原理	(18)
1.1.1	基本结构	(18)
1.1.2	工作原理	(21)
1.2	直线电动机的建模与分析	(23)
1.2.1	永磁同步直线电动机的数学模型	(23)
1.2.2	永磁同步直线电动机中的磁场	(25)
1.2.3	永磁同步直线电动机的电磁参数	(28)

1.2.4	永磁同步直线电动机的 d - q 轴模型和推力	(33)
1.3	交流永磁同步直线电动机的控制	(36)
1.3.1	传统控制策略	(37)
1.3.2	现代控制策略	(37)
1.3.3	智能控制策略	(39)
1.4	本章小结	(40)
2	气浮轴承模型及有限元分析法	(41)
2.1	静压气浮支承润滑系统概述	(42)
2.1.1	静压气浮支承润滑系统的组成	(42)
2.1.2	静压气浮轴承的节流形式	(43)
2.1.3	静压气浮轴承的节流原理	(44)
2.1.4	气浮导轨的类型	(45)
2.2	气浮轴承润滑问题的描述	(45)
2.2.1	小孔流量节流公式	(45)
2.2.2	雷诺方程式	(46)
2.2.3	气浮轴承润滑问题的变分表示法	(48)
2.3	用有限元法解气浮轴承的静压润滑问题	(49)
2.3.1	有限元的划分与插值函数	(49)
2.3.2	气浮轴承润滑方程的有限元法	(53)
2.3.3	有限元的计算过程	(59)
2.4	气浮轴承的静压润滑稳定性	(64)
2.4.1	影响气浮轴承稳定性的因素	(64)
2.4.2	提高气浮轴承稳定性的措施	(65)
2.5	本章小结	(65)
3	气浮轴承动力学建模与参数辨识	(66)
3.1	气浮轴承的主要性能参数	(66)
3.1.1	气浮轴承的静态特性及主要参数	(67)
3.1.2	气浮轴承的动态特性及主要参数	(70)
3.2	气浮轴承性能参数的仿真计算与辨识	(72)

3.2.1	气浮轴承性能参数的辨识方法	(72)
3.2.2	矩形气浮轴承的特性及主要参数辨识	(74)
3.2.3	环形气浮轴承的特性及主要参数辨识	(83)
3.3	气浮轴承参数的实验辨识方法	(93)
3.3.1	静态测试方法	(93)
3.3.2	动态测试方法	(95)
3.4	本章小结	(108)
4	气浮轴承动力学性能参数分析	(109)
4.1	结构形状对性能参数的影响	(109)
4.1.1	分析方法	(109)
4.1.2	仿真模型	(109)
4.1.3	有限元计算结果与分析比较	(111)
4.1.4	结构形状与性能参数之间的关系	(117)
4.2	结构设计对性能参数的影响	(118)
4.2.1	节流孔直径的影响	(118)
4.2.2	节流孔高度的影响	(122)
4.2.3	压力腔高度的影响	(126)
4.2.4	压力腔宽度的影响	(130)
4.2.5	压力腔长度的影响	(132)
4.2.6	结构设计参数与性能参数之间的关系	(134)
4.3	工艺参数对性能参数的影响	(135)
4.3.1	气膜厚度的影响	(135)
4.3.2	供气压力的影响	(140)
4.3.3	工艺参数与性能参数之间的关系	(144)
4.4	本章小结	(145)
5	超精密气浮定位工作台动力学特性研究	(146)
5.1	气浮定位工作台的数学模型	(147)
5.1.1	气浮定位工作台的结构	(147)
5.1.2	气浮定位工作台的动力学模型	(148)

5.2	动力学参数的求解	(149)
5.3	动态特性的仿真分析	(152)
5.3.1	系统幅值的仿真计算	(153)
5.3.2	固有频率的计算	(153)
5.3.3	外力对定位工作台动态特性的影响	(155)
5.3.4	刚度对定位工作台动态特性的影响	(156)
5.4	超精密气浮定位工作台动态参数的实验研究	(158)
5.4.1	非气浮状态下的动态特性实验结果与分析	(159)
5.4.2	气浮状态下的动态特性实验结果与分析	(161)
5.4.3	基座中心至气浮轴承中心的传递函数分析	(162)
5.4.4	Y向直线电动机的定子至动子的传递 函数分析	(164)
5.4.5	频率对刚度参数灵敏度的影响	(166)
5.4.6	直线电动机系统多参数灵敏度分析与优化	(170)
5.5	本章小结	(178)
6	超精密气浮定位工作台定位精度研究	(180)
6.1	气浮定位工作台直线运动的数学模型	(180)
6.2	混合趋近律的滑模变结构控制模型的建立与仿真	(182)
6.2.1	滑动模态及滑模变结构控制的基本概念	(182)
6.2.2	滑模变结构控制仿真模型的建立	(185)
6.2.3	基于混合趋近律的滑模变结构控制方法	(185)
6.2.4	混合趋近律的滑模变结构控制方法的仿真	(187)
6.3	定位工作台输出位移的仿真实验与精度分析	(192)
6.3.1	输出位移的仿真实验	(192)
6.3.2	控制精度的分析	(198)
6.4	超精密气浮定位工作台的定位精度实验	(199)
6.4.1	实验系统及测量系统	(199)
6.4.2	水平直线度的实验结果与分析	(202)
6.4.3	垂直直线度的实验结果与分析	(206)

6.4.4 非气浮状态下的定位精度实验结果与分析	(209)
6.4.5 气浮状态下的定位精度实验结果与分析	(210)
6.5 本章小结	(211)
参考文献	(212)

超精密定位工作台是超精密机械中的一种典型部件，它为微光刻技术、数控加工、生物技术、纳米表面形貌测量等领域提供了一个能够实现超精密定位和精确运动的载物平台。随着信息时代的到来，微细加工技术和生物技术的特征尺寸越来越小，逐步进入亚微米级乃至纳米级、亚纳米级精度，超精密定位工作台的关键技术如驱动技术、导向技术和控制技术都在逐步提高，并且随着所需精度的提高，超精密工作台的动力学问题显得越来越重要。目前，国内外许多学者根据不同的研究重点开发了多种精密定位实验工作台，对超精密定位工作台的关键技术开展了相关的研究，推动了超精密定位工作台技术的发展和进步。

0.1 超精密气浮定位工作台简介

微光刻技术、数控加工、生物技术等领域的迅速发展，对精密定位工作台的精度、运行速度、行程、自动化程度和可靠性等提出了更高的要求。这些要求并非是孤立的，其中一些要求往往是相互联系和相互制约的。例如：定位工作台的高速度和高精度要求是相互矛盾的，为了满足高精度的要求，定位工作台的最小运动量(或位移分辨率)要越小越好，而在伺服系统调速比有限的情况下，定位工作台的速度又不能随意地提高；长行程和高精度的要求也是矛盾的，行程越长，意味着在同样精度要求下对定位工作台中的导轨直线度误差就越敏感，对零部件的加工和安装精度要求也更为苛刻，即定

位工作台的行程受到现有加工和安装精度的限制；自动化程度与可靠性也是一对矛盾，自动化程度越高，系统越复杂，实现高的可靠性就越困难，同时，高精度、高速度、长行程对控制系统的实现也提出了挑战。而在这众多的矛盾中，最突出的是如何消除精密定位工作台运动部件间的摩擦。解决这一矛盾的有效方法之一就是采用气浮技术，因而也就出现了基于气浮支承和直线电动机驱动技术的超精密、长行程气浮定位工作台。

针对上述问题，为实现高性能、高集成、高效率以及低成本的生产，世界上各 IC 设备厂商加大研发投入，研制新一代高速高精的超精密定位运动工作台。其中，基于气浮支承技术和直线电动机驱动技术的超精密、长行程气浮定位工作台，是精密定位工作台的一种新型结构。它克服了传统定位工作台(旋转电动机+滚动丝杠+滚动或油膜滑动轴承)行程短、响应滞后大、存在摩擦等不足，实现了长行程高速运动和精确定位功能，代表着超精密、长行程定位工作台的发展方向，在半导体光刻设备、精密测量和生物医学等领域中具有十分广泛的应用前景。

我国超精密气浮定位工作台的研制水平落后于技术发达国家至少 10~15 年，国内较为先进的 IC 生产线也全是依靠进口的。由于技术发达国家对我国实行技术限制和技术壁垒政策，进口的超精密气浮定位工作台也比国外先进的定位工作台落后 4~5 代，因此我国的 IC 设备生产基本受制于人。为掌握超精密气浮定位工作台的核心技术，提高尖端超精密机械的自主研发能力，突破发达国家对我国在超精密气浮定位工作台方面的技术封锁，对超精密气浮定位工作台技术进行自主研究具有十分重大的现实意义和经济意义。

0.2 超精密定位工作台的发展概况

0.2.1 超精密定位工作台的发展过程

由于超精密定位工作台应用范围广泛，国内外多个研究所和企

业对其开展了大量的研究，经历了由早期的低精度定位工作台到最新的高精度定位工作台的发展过程。早期的精密定位工作台多为一维低速的。图 0.1 所示的为法国 Mekid 等人研制的摩擦驱动精密工作台，其重量约为 100 kg，采用液体静压导轨支承，工作行程为 220 mm，直线定位工作台的定位精度可达 16 nm，最大运动速度可达 10 mm/s。

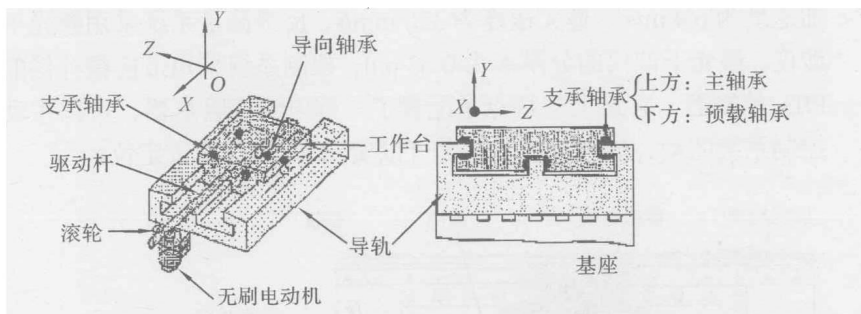


图 0.1 法国 Mekid 等人研制的摩擦驱动精密工作台示意图

图 0.2 所示的为中国台湾淡江大学 Chao 等人设计的摩擦轮驱动精密工作台，该定位工作台利用气体作为工作台的支承，其反馈测量装置是一台 Hewlett-Packard 激光干涉仪，在温度为 $(20\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 、湿度

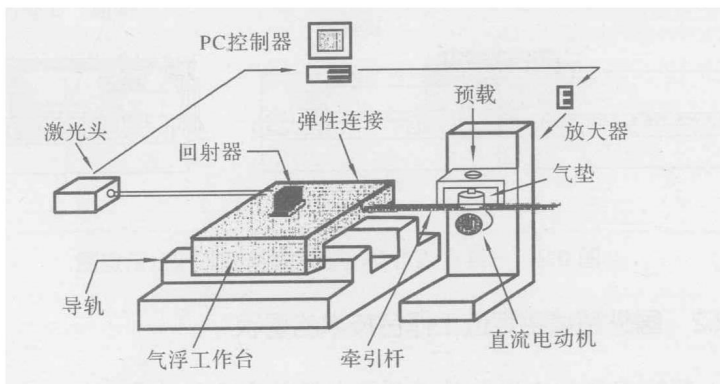


图 0.2 中国台湾淡江大学 Chao 等人设计的摩擦轮驱动精密工作台示意图

为 $(60\pm 5)\%$ 的环境中,当工作台分别以 50 nm、500 nm 和 10 mm 为行程运动时,其定位误差均小于 15 nm。

日本东京工业大学研制了具有纳米级分辨率的一维直线电动机驱动超精密工作台,如图 0.3 所示。它采用气浮导轨导向,行程为 300 mm,导轨的垂向刚度为 $600\text{ N}/\mu\text{m}$ 、水平刚度为 $220\text{ N}/\mu\text{m}$,重 19.6 kg 的工作台采用氧化铝陶瓷材料制造,直线电动机驱动力为 160 N、最大加速度为 6.4 m/s^2 、最大速度为 320 mm/s,反馈测量系统采用激光干涉仪,激光干涉仪的分辨率为 0.63 nm,控制系统采用带前馈补偿的 PID 控制器。它最大的特点是配置了一部电流变阻尼器,可以主动控制系统的动、静态特性,系统可以实现 2 nm 的步进定位。

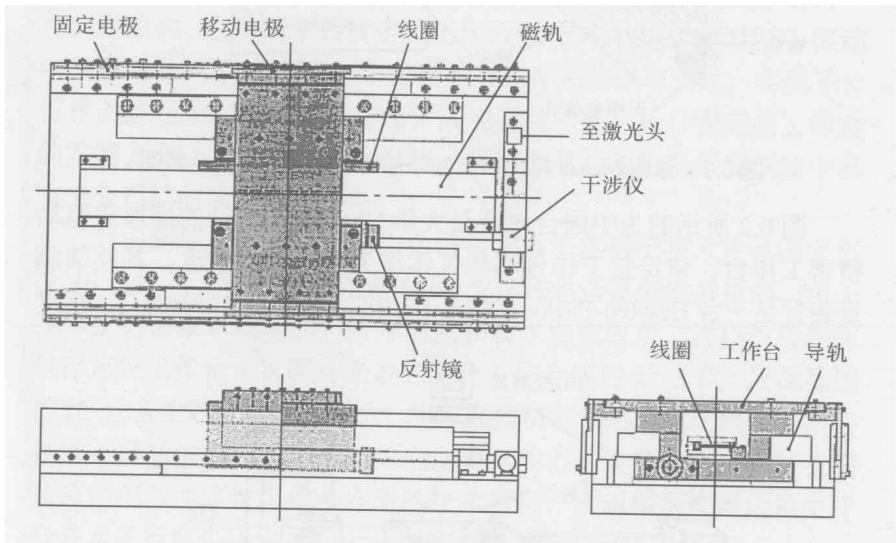


图 0.3 一维直线电动机驱动超精密工作台示意图

0.2.2 国外超精密定位工作台技术的现状

超精密定位工作台是光刻机上极其重要的关键部件,它直接影

响光刻机所能实现的特征线宽尺寸和生产率。精密加工技术的发展,尤其是各种光刻技术的发展,离不开超精密定位工作台技术的发展和进步。光刻技术的更新与新一代光刻机的研制对定位工作台提出了更高的要求,主要表现在精度、速度和行程等方面。因此,美国、日本等发达国家在研究光刻技术的同时,积极开展对定位工作台的研究,不断研制出高精度、高速度、长行程的定位工作台来满足光刻技术发展的需要,而目前最主力的产品是超精密气浮定位工作台。

光刻技术在经历了接触式—接近式—投影式—1:1 反射扫描投影式—步进缩小投影式等几个大的技术阶段后,其特征线宽变得越来越小,硅片尺寸则逐渐变大,同时要求其具有高分辨率和大视场,因此,光刻机投影光刻物镜的设计、制造难度增大,成本急剧上升。为了克服投影光刻物镜成本急剧上升的弊端,目前光刻机正在向步进扫描投影方式过渡。世界上几大光刻机生产厂家都已推出了步进扫描投影光刻机新产品。步进加扫描的工作方式虽然有利于降低投影光刻物镜成本,却对工作台提出了更高的要求。与以往的步进重复投影光刻方式相比,工作台除了要完成超精密步进、定位、调整等动作外,还要进行动态扫描曝光。对于 100 nm 线宽光刻机来说,要求两者之间的同步误差必须控制在 0.006~0.01 μm 以内,难度极大。因此,研制可精密控制的二维或多维运动的精密定位工作台成了必然的发展趋势。世界三大光刻机生产商日本的佳能公司和尼康公司、荷兰的 Asml 公司在其主力产品扫描式光刻机中都采用了基于气浮支承技术的定位工作台方案。

1. 佳能公司的扫描气浮定位工作台

图 0.4 所示的是佳能公司用于 FPA-4000ESI 步进扫描式投影光刻机的定位工作台示意图。图中, X 轴方向(扫描)运动件 1 和 Y 轴方向(步进)运动件 2 分别由直线电动机 3(单电动机质心驱动)和 4(双电动机平行驱动)驱动,支承形式采用气浮支承,在 X 轴方向运动件上叠加了一个四自由度($\theta_x, \theta_y, \theta_z, Z$)的短行程微动定位工作台。