

电子束、离子束、光子束微纳加工技术系列专著

WEINA JIAGONG ZHONGDE JINGMI  
GONGJIAITAI JISHU

# 微纳加工中的精密 工件台技术

刘俊标 薛虹 顾文琪 著

北京工业大学出版社

电子束、离子束、光子束微纳加工技术系列专著

# 微纳加工中的精密工件台技术

刘俊标 薛虹 顾文琪 著

北京工业大学出版社

**图书在版编目 (CIP) 数据**

微纳加工中的精密工件台技术/刘俊标, 薛虹, 顾文琪著. —北京: 北京工业大学出版社, 2004.12

(电子束、离子束、光子束微纳加工技术系列专著)

ISBN 7-5639-1432-3

I. 微... II. ①刘... ②薛... ③顾... III. 超大规模集成电路-集成电路工艺-电子束光刻-设备

IV. TN470.598

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 098074 号

**微纳加工中的精密工件台技术**

刘俊标 薛虹 顾文琪 著

\*

北京工业大学出版社出版发行

邮编: 100022 电话: (010) 67392308

各地新华书店经销

徐水宏远印刷厂印刷

\*

2004 年 12 月第 1 版 2004 年 12 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 16 开 18.25 印张 343 千字

印数: 1~2000 册

ISBN 7-5639-1432-3/T·219

定价: 45.00 元

## 内 容 简 介

本书是“电子束、离子束、光子束微纳加工技术系列专著”中的一个分册。它与已出版的《电子束曝光微纳加工技术》一书相辅相成,重点讲述微纳加工中的关键部件——精密工件台的结构、原理和主要技术,以及通过精密工件台提高加工精度和生产效率的有效方法。全书分为九章。第一章讲述精密工件台的组成、发展现状和主要技术指标。第二章至第五章系统介绍精密测量技术、驱动技术、直线导向技术的工作原理、技术特点和选用准则。第六章通过实例阐明微位移技术的原理及结构特点。第七章和第八章讲述精密工件台的控制系统、精度分析及精度补偿方法。第九章主要介绍精密工件台在微电子产业、精密测量、生物芯片技术、纳米表面形貌测量和纳米加工设备中的具体应用和发展前景。

在当前微纳加工技术迅猛发展和相关专著及技术图书十分匮乏的情况下,本书的出版对促进我国微纳加工技术的研发工作必将起到积极的作用。

## 作者简介



**刘俊标** 1974年4月生,中国科学院电工研究所副研究员。1995年毕业于福州大学本科,2001年毕业于南京航空航天大学,获博士学位。2002年进入中国科学院电工研究所博士后流动站工作,2004年出站。一直从事精密机械设计和电子束曝光技术的研究。曾获国防科工委科技进步一等奖一项,王宽诚博士后奖励基金等。曾发表学术论文十余篇。



**薛虹** 1956年生,中国科学院电工研究所高级工程师。1982年毕业于上海同济大学本科。长期从事电子束曝光技术和相关设备的电气控制方面的研究与开发工作。曾发表学术论文十几篇。



**顾文琪** 1941年生,中国科学院电工研究所研究员,博导。曾任中国科学院电工研究所微细加工研究室主任、副所长,中国科学院高技术局局长、综合计划局局长。

1967年中国科学院电工研究所研究生毕业,专业为电火花加工物理基础。毕业后留所工作,从事微细加工技术研究,创建该所微细加工研究室。1980年起,曾在联邦德国亚琛工业大学从事亚微米曝光技术研究2年,后又作为特聘专家在香港从事电子束制版技术研究3年。长期研究电子束曝光技术和相关设备开发,先后主持并完成国家攻关项目2项,中国科学院重大科研项目3项,其中有微米级可变矩形电子束曝光机、 $0.1\mu\text{m}$ 扫描电子束曝光机和缩小投影成像电子束曝光实验系统。目前正在主持中国科学院创新工程重大项目——纳米级电子束曝光系统实用化研究。在国内外发表论文40多篇。

# 前 言

随着集成电路、数字控制等技术的迅速发展,对精密工件台的需要量不断增加,同时对工件台的精度和运行速度等也提出了越来越高的要求。作为精密仪器和设备的关键部件,精密工件台决定了仪器和设备的精度及其生产效率。事实表明,我国光刻设备的研制水平一直落后于发达国家,其中一个重要原因就是未能研制出性能可靠的精密工件台,这一点制约着我国光刻技术的发展和应

用。中国科学院电工研究所,作为几十年来一直从事电子束光刻设备研制的单位,深感全面了解精密工件台技术状况的必要性和重要性。有关讲述精密工件台内容的资料一般散见于精密仪器或精密机械方面的书籍,而专门讨论精密工件台的专著和书籍并不多见。随着光刻加工等尖端技术的不断发展,对精密工件台提出了越来越高的要求,所幸的是,可应用于精密工件台的相关技术,如新型材料、新型驱动电机也随之不断出现,各科研机构、公司可以利用这些新的技术和产品开发并研制出各种各样性能良好的新型精密工件台来满足微纳加工技术的不断需求,因此精密工件台技术也增加了较多的新内容。为促进我国精密仪器和专用设备的发展,提高精密工件台的研制水平,有必要总结相关的研究成果和工程实践经验,系统介绍和阐明精密工件台技术的诸多方面知识。作者收集了近年来有关精密工件台的资料,总结了中国科学院电工研究所设计和使用精密工件台的工作经验,并结合自己工作中的体会在这一方面进行了初步的尝试。

本书介绍了精密加工和精密测量等方面应用的精密工件台技术,主要讨论应用在光刻机中的精密工件台,围绕着如何提高工件台的精度、运行速度、行程等目标而展开论述。全书分为九章。第一章叙述了工件台的结构组成、应用、发展状况及目前先进工件台已经达到的主要技术指标。第二章至第五章系统地介绍了精密测量技术、驱动技术、直线导向技术的工作原理、技术特点和选用准则,并附有实例;在此基础上,对当前多种工件台结构进行了归类和分析。第六章阐述了实现各种微位移技术的原理、结构、特点及其应用实例。第七章阐述了精密工件台控制系统的组成、伺服控制系统、电机的控制方式以及控制补偿方法及校正算法。第八章结合实例对工件台进行精度分析,给出了工件台的特性评价方法和精度补偿方法。第九章阐述了精密工件台在微电子产业、精密测量、生物芯片技术、纳米表面形貌测量和纳米加工设备中的具体应用和发展前景。

本书的出版,有助于应用单位了解精密工件台的功能和特性的检测方法,可为其选定精密工件台提供技术依据;而对于精密工件台的设计人员,则可以从中获得设计灵感和所需要的参考资料。

在本书的编写过程中,得到了中国科学院光电技术研究所刘业异研究员、王肇志高级工程师等许多同志的热心指导和关心;同时也得到了中国科学院王宽诚博士后奖励基金的资助,在此表示衷心的感谢。在编写本书时,引用了一些国内外资料,因此本书也包含了这些作者的贡献,对此深表谢意。

由于作者的水平限制和编写时间仓促,书中难免有不妥甚至错误之处,殷切希望读者提出宝贵意见。

作 者  
2004年12月

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
<b>第一节 精密工件台</b> .....	1
一、工件台的定义和分类 .....	1
二、精密工件台的组成和分类 .....	1
三、精密工件台的用途 .....	2
<b>第二节 精密工件台技术的发展</b> .....	5
一、精密工件台技术的发展概况 .....	5
二、当前工件台达到的最高性能指标 .....	9
三、国内的发展状况 .....	9
<b>第三节 本书的内容和目的</b> .....	10
<b>第二章 精密测量技术</b> .....	12
<b>第一节 概述</b> .....	12
<b>第二节 光栅测量技术</b> .....	13
一、光栅位移检测原理 .....	14
二、高分辨率的实现 .....	16
三、光栅测量的精度分析 .....	16
<b>第三节 激光干涉仪测量技术</b> .....	18
一、一些基本概念 .....	19
二、激光干涉仪 .....	25
三、双频激光干涉仪中的几项关键技术 .....	29
四、测量系统 .....	38
五、平面镜激光干涉仪的对准分析和测量误差分析 .....	53
六、平面镜激光干涉仪的安装与调整 .....	61
<b>第三章 高速、高精度直线驱动技术</b> .....	67
<b>第一节 高速、高精度直线驱动技术概况</b> .....	67
一、高速、高精度直线驱动技术 .....	67
二、直线驱动技术分类 .....	68
<b>第二节 间接驱动技术</b> .....	68
一、旋转电机 .....	69
二、滚珠丝杠副 .....	76
<b>第三节 直接驱动技术</b> .....	82
一、电磁式直线电机的直接驱动 .....	82



二、压电直线电机的直接驱动 .....	86
<b>第四章 直线导向技术</b> .....	92
<b>第一节 概述</b> .....	92
一、直线导轨的导向原理 .....	92
二、对导轨的基本要求 .....	92
<b>第二节 常用导轨的类型及其技术特性</b> .....	94
一、塑料(PTFE)导轨 .....	94
二、滚动导轨 .....	95
三、静压导轨 .....	99
四、弹簧导轨 .....	103
五、磁悬浮导轨 .....	104
<b>第三节 导轨对工件台的影响</b> .....	106
一、导向精度对测量精度的影响 .....	106
二、导轨类型对位移分辨率的影响 .....	107
<b>第五章 精密工件台的结构型式</b> .....	109
<b>第一节 平面单层式结构</b> .....	109
一、机械式平面单层结构 .....	109
二、气浮式平面单层结构 .....	113
三、磁悬浮式平面单层结构 .....	114
<b>第二节 双层结构</b> .....	115
一、机械式双层结构 .....	115
二、静压式双层结构 .....	117
<b>第三节 大行程纳米级精密工件台的实现</b> .....	119
一、“十字”型工件台结构 .....	119
二、“H”型工件台结构 .....	120
三、六维磁悬浮纳米级精密工件台 .....	121
<b>第六章 微位移技术</b> .....	124
<b>第一节 微位移机构</b> .....	124
一、机械传动式微位移机构 .....	126
二、扭轮摩擦传动微位移机构 .....	128
三、电热变形致动式微位移机构 .....	128
四、弹性变形传动式微位移机构 .....	130
五、磁致伸缩式微位移机构 .....	130
六、压电陶瓷或电致伸缩微位移机构 .....	131
七、电磁驱动式微位移机构 .....	138
八、其他 .....	140
<b>第二节 微位移传感器</b> .....	141
一、电阻应变式微位移传感器 .....	141
二、电容式微位移传感器 .....	141
<b>第三节 微位移工件台的设计和特性分析</b> .....	143

一、设计要求 .....	143
二、设计步骤 .....	144
三、驱动和控制 .....	144
四、实验分析 .....	144
<b>第七章 控制技术 .....</b>	<b>146</b>
<b>第一节 概述 .....</b>	<b>146</b>
一、主、从控制器 .....	147
二、位置测量 .....	147
三、驱动电路和驱动机构 .....	147
四、位置显示 .....	147
五、限位保护系统 .....	148
<b>第二节 伺服控制系统 .....</b>	<b>148</b>
一、伺服控制系统的构成 .....	148
二、伺服定位控制系统的基本分类 .....	150
三、控制系统的控制方式 .....	151
四、控制系统的特性及指标 .....	154
五、控制系统对电动机的要求 .....	156
<b>第三节 电动机的控制 .....</b>	<b>157</b>
一、直流电动机伺服控制 .....	157
二、交流电动机伺服控制 .....	168
三、步进电机控制 .....	174
四、超声电机控制 .....	179
<b>第四节 控制系统的补偿方法 .....</b>	<b>182</b>
一、串联补偿 .....	182
二、负反馈补偿 .....	182
三、前馈补偿 .....	183
四、复合控制与扰动补偿 .....	183
五、顺馈补偿 .....	185
六、常用的补偿电路 .....	185
七、常用的调节器 .....	186
八、数字控制系统的 PID 调节器 .....	189
<b>第五节 信号检测 .....</b>	<b>193</b>
一、电流检测 .....	193
二、电压检测 .....	194
三、转速检测 .....	194
四、位置检测 .....	195
<b>第六节 几种不同类型工件台的控制 .....</b>	<b>197</b>
一、光栅扫描电子束曝光机工件台的控制 .....	197
二、 $X-Y-\theta$ 工件台的伺服控制 .....	199
三、平面步进电机 $X-Y-\theta$ 超精密工件台的控制 .....	200

<b>第八章 精密工件台的精度分析</b> .....	204
<b>第一节 精度分析</b> .....	204
一、工件台的用途及其工作原理 .....	204
二、工件台开环系统的精度分析 .....	205
三、工件台闭环系统的精度分析 .....	208
<b>第二节 工件台的几个性能指标及其测试方法</b> .....	212
一、性能指标 .....	212
二、测试方法 .....	213
三、精度补偿 .....	218
<b>第三节 高精度的保证</b> .....	219
一、热变形的控制 .....	219
二、振动的控制 .....	221
三、小结 .....	224
<b>第九章 精密工件台的应用</b> .....	225
<b>第一节 精密工件台在微电子产业中的应用</b> .....	225
一、精密工件台在光刻设备中的应用 .....	225
二、精密工件台在光学曝光系统中的功能 .....	232
三、对套刻精度和生产率的影响 .....	241
四、步进重复式精密工件台 .....	242
五、步进扫描式精密工件台 .....	245
六、精密工件台在电子束扫描曝光机中的作用 .....	250
七、X 射线光刻机中应用的精密定位工件台 .....	258
八、几种光刻技术中的工件台比较 .....	259
九、精密工件台在掩模版修复仪中的应用 .....	260
十、掩模或晶片上图形尺寸的测量 .....	261
<b>第二节 精密工件台在坐标测量机中的应用</b> .....	263
一、精密工件台在工具显微镜中的应用 .....	264
二、精密工件台在三坐标测量机中的应用 .....	264
<b>第三节 在基于扫描探针显微镜技术的微加工系统中的应用</b> .....	265
一、扫描探针显微技术 .....	265
二、基于 AFM 技术的微加工系统 .....	266
<b>第四节 精密工件台在生物芯片技术中的应用</b> .....	269
<b>第五节 精密工件台在机械制造中的应用</b> .....	270
一、超精密车床 .....	271
二、电火花切割加工设备 .....	272
三、三维成型加工 .....	273
<b>第六节 小结</b> .....	273
<b>参考文献</b> .....	274

# 第一章 绪 论

## 第一节 精密工件台

### 一、工件台的定义和分类

工件台，也叫做工作台，常作为加工或测量时零部件的载物平台。作为载物平台，要求工件台能够实现一个或多个方向的运动。为了便于使用和控制，工件台在各个方向上的运动是独立和互不干涉的。

按工件台所实现运动轨迹在空间的位置来分，有一维工件台，二维工件台，三维工件台。一维工件台可实现绕某个固定轴线的旋转运动或沿某个方向的直线运动；二维工件台是实现平面运动的，如沿  $X$ 、 $Y$  轴方向的直线运动，或在此基础上再增加绕  $Z$  轴方向的旋转运动；三维工件台是实现空间运动的，如沿  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴三个方向的直线运动，或在此基础上再增加绕  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴三个方向的旋转运动。

按工件台能达到的定位精度来分，有精密工件台和普通工件台。定位精度能够达到微米级或在亚微米级以下的称为精密工件台，否则称为普通工件台。

一维和二维直线运动的普通工件台比较常见，如平面磨床、牛头刨床的一维直线工件台，镗、铣床上的二维直线工件台，普通车床的刀架、显微镜的载物台等。精密加工、精密测试仪器或设备中常用的是二维或多维精密工件台，如各种类型的光刻机和集成电路(IC)图形测量仪器等。随着科学技术的发展，对精密工件台的需要量正在不断增加。

### 二、精密工件台的组成和分类

精密工件台的种类繁多，结构型式多种多样，但都需要实现精密定位这一最基本的功能。精密工件台的基本组成部分可见图 1-1 所示，主要有驱动源、进给机构(如果驱动源是直线电机就不需要这部分)、直线移动导轨、控制装置和位置检测器等。

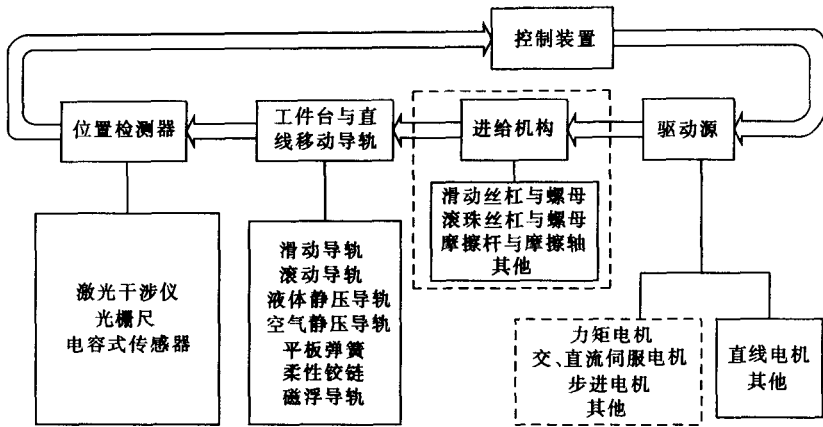


图 1-1 精密工件台的基本组成

根据精密工件台的结构和组成部分，有多种分类方法。按所使用的导轨类型可分为机械式工件台、气浮式工件台、液压式工件台三种，其中机械式工件台结构紧凑、简单，是目前较常用的工件台；按工件台中可动部件的层数，可分为单层(平面)工件台、两层工件台、多层工件台等。

为了使精密工件台能够容易地与其他系统构成一台完整的设备，如精密工件台配上光学系统(或电子光学系统)和电气控制系统构成为一台曝光机，就不仅要具备精密定位的基本功能，而且还必须具备其他功能，即应具有快速移动功能和高度的自动化来满足设备高生产率的需要。为了能够应用于电子束曝光机、离子束曝光机等设备上，还要求工件台能够提供真空环境和没有磁场干扰的环境，这对工件台上各零部件所用的材料就有特殊的要求。

### 三、精密工件台的用途

作为精密机械中的一种典型结构，精密工件台为微光刻技术、数控加工、生物芯片技术、纳米表面形貌测量及纳米加工等领域提供了一个能够实现精密定位和快速运动的载物平台。

#### 1. 光刻机

光刻工艺是制作集成电路的一种十分重要的加工工艺技术，其工艺流程如图 1-2 所示。首先是清洗基片，然后进行涂覆，即将有机聚合物(抗蚀剂或称为光刻胶)用旋转涂覆的方法在基片上形成均匀的薄膜层，经焙烘后成为固体薄膜。

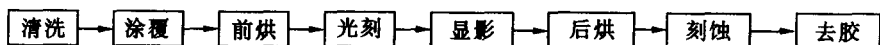


图 1-2 光刻工艺流程图

利用光刻机曝光后再采用特定的溶液进行显影,使部分区域的光刻胶被溶解掉(对于正胶,曝光区的光刻胶被溶掉;对于负胶,曝光区的光刻胶不溶而被保留下来),形成精细的光刻胶图形,有了这层图形,就可以对基片有选择性地进行处理,即在基片上的某些区域进行扩散掺杂、离子注入、金属的蒸镀或溅射淀积等处理,改变基片材料的性能。

完成上述的工艺需要许多十分复杂的设备,其中光刻机是最为主要的,它的性能直接影响着集成电路的特征尺寸。同时,在一套集成电路工艺中,常需要多次光刻,而且每次光刻得到的图形不是相互独立的,而是有密切的空间关系,这种关系需要光刻机来保证。因此可以说,光刻机是制作集成电路的一种最为关键的设备。

在当前的光刻设备中,常见的有紫外光曝光机、X射线曝光机、电子束曝光机等,这些光刻机都配有精密工件台系统。这是因为目前所有的光刻机都不可能在一个大面积的晶片上一次性完成高分辨率的曝光,必须将一个大的曝光面积分解成多个可以在视场(扫描场)范围内曝光的部分,然后通过移动工件台对晶片进行分次曝光从而实现大面积的光刻。因此,工件台是光刻机上极其重要的关键部件,其定位精度影响了曝光图形的拼接精度和套刻精度,影响了光刻机所能实现的特征线宽尺寸,其运行速度直接影响着光刻机的生产效率。

应用在光刻设备中的精密工件台的特点是:首先要具备在一个平面内两个方向上的直线运动(如 $X$ 、 $Y$ 方向),这两个直线运动的行程为几百毫米,精度为纳米级;除平面的两个方向的直线运动外,有的还要求工件台具备在垂直面上的运动(行程范围为几百微米)以及绕三个轴 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 的旋转运动(行程范围为几十个毫弧度)。

## 2. 精密测量

在许多生产、科研活动中都需要精密测量,而测量对象有各种各样的形状,如平面形、球面形等,这些形状复杂零件的尺寸参数,不能由单一坐标确定,而需要由二个坐标或三个坐标进行测定。在测量系统中,一般使用一个移动平台和测量头部。测量头部沿单一坐标轴相对于测量对象运动,而工件台作为一个移动平台。通常工件台的传动装置可直接或间接地提供动力驱动并限制在同一平面内运动,其位置变化可以使用一个独立的位移探测器(如激光干涉测量系统、光学编码器)来测量,并提供测量基准。

在测量三维表面形貌时,通常采用逐点数据采集系统及相应数据处理系统。数据采集一般是利用等间距样本点的网格来进行的,因而要给出被测对象的一个真实的描绘,这主要依赖于工件台实现可重复性的步进移动能力。数据处理一般采用特征化逼近方法,达到测量结果的图像化和数字化。因此,工件台的定位精

度与测量表面的描述、特征化有着重要的内在联系。

### 3. 纳米表面形貌测量和纳米加工

扫描探针显微镜是用于纳米表面形貌测量的重要工具。因为分辨率的关系,扫描探针显微镜的扫描范围常常局限在样品的小范围内,为了加大其测量范围,需要具有高精度定位的工件台。同样地,当利用扫描探针技术进行纳米级加工时,为了加大其加工范围,也需要配备高精度定位的工件台。

### 4. 生物芯片技术

生物芯片是把分子识别 DNA 探针、细胞和组织等,密集排列固定在固相表面上而形成的一类器件。生物芯片可通过分子杂交或免疫反应等采集生物体的信号,自动收集到计算机中进行分析,实现生物信息的大规模检测。生物芯片技术是一类高度集成的、信息量巨大的检测技术,它是现代生物技术与现代计算机技术结合的产物。这门技术已广泛应用于基因诊断、功能基因研究、基因组文库图型分析、新药的研究与开发、环境监测等诸多领域。

在生物芯片技术中,常常使用生物芯片点样仪和生物芯片扫描仪两种设备。

生物芯片点样仪是将生物样品以一定的阵列方式快速、准确地点在玻璃片或薄膜上,形成生物样品微阵列的仪器。生物芯片点样仪的主要结构有样品台和点样头。生物芯片点样仪在工作时需要做  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三方向的直线运动,因此在实现其结构上可以分为三种:一是样品台不动,点样头实现  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三方向的直线运动;二是样品台实现  $X$ 、 $Y$  平面运动,点样头实现  $Z$  方向运动;三是样品台实现  $X$  或  $Y$  一个方向的运动,而点样头实现其他两个方向的运动。由于点样头的质量较轻,因此常采用第一种方式。

生物芯片扫描仪是在基片(晶片、玻璃、凝胶)表面上点阵地排列识别分子,在相同条件下进行结合或反应后,根据化学荧光法的原理,将反应结果显示并记录下来,最后利用计算机软件进行分析处理得到所需的生物信息的仪器。生物芯片扫描仪在工作时需要  $X$ 、 $Y$  两个方向的直线运动,其结构主要有扫描平台和获取荧光信号的光学系统,其中扫描平台就是承载生物芯片的  $X$ 、 $Y$  二维工件台。

### 5. 数控加工

数控加工是当前实现精密、超精密机械加工中的一种最为常用的手段,其实现过程是利用零件与刀具之间产生的严格相对运动,对材料进行切削,以获得极高形状精度和表面光洁度的加工过程。零件与刀具间的相对运动可分为回转运动和直线运动两种,通常回转运动由主轴实现,而精密工件台提供直线运动。因此,数控加工设备主要由高速回转运动的主轴、精密工件台、数控系统等组成。加工时,由数控设备中的数控系统控制主轴运动和精密工件台进给,实现曲线或曲面的精密加工。数控加工设备对工件台的要求是:定位准确、高速、行程大

(通常要达到米的量级)。

#### 6. 其他

精密工件台还有一些其他的用途,如,光纤的对接必须借助于精微校准工件台,要求精度达到  $0.1\ \mu\text{m}$ ;微型机械零件的操作和装配等也需要精密工件台。

## 第二节 精密工件台技术的发展

随着精密加工、数字控制等技术的迅速发展,对精密工件台的需要量不断增加,同时对工件台的精度、运行速度、行程、自动化程度、可靠性等都提出了很高的要求。这些要求并非是孤立的,一些要求往往相互制约,如,工件台的高速和高精度的要求是相互矛盾的。为了满足高精度的要求,工件台的最小运动当量(或位移分辨率)越小越好,但在伺服系统调速比有限的情况下,工件台的速度就不能无限制地提高;大行程和高精度的要求也是相互矛盾的,行程越大,意味着在同样精度要求下对工件台的导轨直线性误差也越敏感,对零部件的加工和安装精度则提出了更为苛刻的要求,而工件台的行程则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,高可靠性的实现越困难。

同时,高精度、高速度、大行程对控制系统能够实现实时控制也提出了很大的挑战。在工作过程中,为了保证精度,对工件台的任一点位置都需要实时控制。当精度越高、行程越大、速度越高时,控制系统需要处理的数据量和处理速度也随之增加。

精密工件台是集精密位置检测技术、驱动技术、直线导向技术、控制技术等多项技术为一体的有机综合体。在这些技术中,如果某一个方面得到改进或提高,将使精密工件台整体性能得到提高。如,当工件台驱动方法是采用直接驱动而不是间接驱动时,由于减少了传动链长度和传动环节中的误差传递,将使工件台的精度、速度和加速度性能都得到提高。因此应当及时引用新材料、新技术来满足工件台发展的需要。

### 一、精密工件台技术的发展概况

微纳米加工技术的发展,尤其是各种光刻技术的发展,离不开精密工件台技术的发展和进步。因为精密工件台直接影响光刻机所能实现的特征线宽尺寸和生产效率,所以光刻技术的更新与新一代光刻机的研制必然对工件台提出更高的要求,主要表现在精度、运行速度和行程等方面。因此,美国、日本等发达国家在



研究光刻技术的同时,也积极开展对工件台的研究,不断研制出高精度、高速度、大行程的工件台来满足光刻技术发展的需要。在过去的几十年里,应用于光刻技术中的精密工件台在材料、测量技术、驱动技术、控制技术等方面有了长足的进步,使工件台朝高精度、高速度、大行程的方向发展。现列举如下:

### 1. 材料

工件台中所用的材料直接影响着工件台的性能,如,应尽量采用低密度、高刚度的材料,这样可以减轻系统的重量,提高整个系统的刚度,从而提高工件台的动态性能。为此,通常采用铝合金、碳化硅等密度小、杨氏模量大的材料;为了减少温度、振动等外界环境对工件台精度的影响,对工件台所在的环境要采取严格的温度控制和隔振措施;在工件台的测量系统中常用殷钢作为基座,采用零膨胀玻璃作为基准反射镜材料。近年来研究人员利用 Zerodur(微晶玻璃材料的一种)的低膨胀系数和良好的加工性能,加工制作工件台中的测量部件和其他重要零件。表 1-1 列举了工件台中常用的几种材料的特性。

表 1-1 常用材料性能

材料性能	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	杨氏模量(25℃)/ GPa	热导率/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	比热容/ $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	热膨胀系数/ $10^{-6}\text{K}^{-1}$
花岗岩	3	70	2	750	5
不锈钢	7.8	210	50	500	11
SiC	2.7~3.2	210	30~43	1 050	4.8
铝	2.7	70	150	920	22
Zerodur(微晶玻璃)	2.53	90.3			0.02

### 2. 测量技术

在精密工件台中所采用的大行程测量手段主要有光栅测量和激光干涉仪测量。

光栅测量是通过记录静光栅尺和动光栅尺相互移动产生的莫尔干涉条纹数来测量位移的。目前光栅测量的分辨率可达到纳米量级,测量精度为  $\pm 0.01 \mu\text{m}$ ,测量范围为 100 mm。

激光干涉仪以激光在真空中的波长为长度基准,测量精度高,范围大,可实现非接触测量,测量的最大速度比光栅测量的速度大,在安装时容易消除“阿贝”误差等,这些优点使它更适合于高精度测量的场合。目前国外先进的光刻机都采用商品化的双频激光干涉仪。

当前激光干涉仪的发展已经出现了以下一些特点:

① 高分辨率。当前双频激光干涉仪可测量的最小分辨率已达到了  $0.15 \text{ nm}$ 。