

面向芯片封装的高加速度运动系统的精确定位和操作*

丁 汉 朱利民 林忠钦

上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200030

摘要 介绍了下一代芯片封装设备的特点, 及其研制中亟待解决的核心科学问题: 高速、高加速度运动系统的精确定位与操纵理论. 通过对当前研究现状的分析指明了解决该问题的理想途径: 设计一种高推重比直接驱动的低摩擦并具有可控阻尼特性的运动定位工作台及其相应的位置伺服、视觉定位及力控制系统, 并列出了相应的关键技术、研究方法和技术路线, 为有关研究工作的深入展开奠定了基础.

关键词 电子制造 芯片封装 运动控制 定位 装配操作

IC工业是当前全球经济发展的高速增长点, 是国民经济中最具活力的行业. IC制造包括硅片制造、芯片制造、芯片封装和IC测试4个步骤, 其中芯片封装是指将芯片安装、固定、密封于封装基板中, 并将其上的I/O点用导线连接到封装外壳引脚上的过程. 封装基板起着保护芯片和增强芯片电热性能的作用, 目前芯片的封装成本几乎已和芯片的制造成本相当. 从过去10年的发展情况来看, 由于半导体制造工艺的进步和市场对微小芯片需求的急速增长, 芯片I/O密度越来越高, 芯片尺寸、芯片引线间距和焊盘直径持续减小, 同时为提高生产效率, 封装速度逐年递增, 因而对封装设备的运动精度(主要是定位精度)和运行速度、加速度提出了极高的要求.

本文将着眼于前瞻性基础研究, 评述下一代芯片封装设备研制中的核心科学问题、研究现状及关键技术方案.

1 芯片封装设备的特点

广义地说芯片封装过程是一个装配操作过程, 只不过零件间的连接是通过粘结和焊接完成的. 如在芯片粘接过程中, 吸盘从送料装置上吸附芯片,

运动到基座上方, 然后以一定的压力将芯片压在指定的位置, 这是一个典型的操作(装配)过程. 同样在引线焊接过程中, 键合头运动到芯片焊盘上方, 以一定的压力将引线压在焊盘上, 完成焊接后, 再运动到基座焊盘的位置, 完成另一端的焊接, 这也是一个操作过程.

与传统的机械制造相比, 芯片封装的特点在于高精度和高加速度: 由于芯片上的焊盘间距 $<40\mu\text{m}$, 因此工作台的定位精度必须 $<5\mu\text{m}$; 由于行程极短, 为实现高速装配, 工作台架必须以很高的加速度($>6G^1$)运动; 另外由于装配操作对象为脆性的硅晶片和超细的金属丝, 因此在装配过程中必须严格控制作用力(冲击力 $<100g^2$, 接触压力 $<40g$).

芯片封装设备作为一种自动化装备与传统的机械制造设备有很多共性之处, 但亦有其特殊之处, 主要表现在以下3个方面:

(1) 在高加速度工况下, 运动系统的驱动信号为突变信号, 对系统的高频动态有很大的影响;

(2) 由于粘接和机械装夹均无法实现微米级的定位精度, 所以芯片及其上的焊盘在工作台上的精确位姿需由视觉系统通过实测予以确定;

2002-11-28 收稿, 2003-01-08 收修改稿

* 国家自然科学基金重大项目资助

E-mail: hding@sjtu.edu.cn

1) $1G = 9.806\text{ m/s}^2$

2) $1g\text{ 力} = 9.806\text{ mN}$

(3) 在高速、高加速度工况下, 接触过程中的微小位移常常会引起很大的挤压作用力, 因此在沿Z轴的运动控制中必须引入力反馈。

当前封装设备的技术水平为: 工作频率 10~15 Hz, 运动加速度 6~12 G, 定位精度 2~5 μm , 力控制范围 30~60 g ($\pm 10\%$ 误差)。下一代封装设备将突破上述指标, 工作频率提高到 20~40 Hz, 运动加速度达到 12~15 G, 定位精度减小到 <1 μm 。这些指标已经进入了当前电子制造装备的极限工作范围, 对机电系统动态过程和稳态精度的要求极高, 由此产生了在常规工况下未曾遇到的许多新现象、新矛盾, 向高性能运动定位和装配操作的理论方法研究和实际系统设计制造提出了极大的挑战, 近几年 K&S 和 ASM 等国际著名的 IC 封装设备制造厂商在开发新产品时均遇到了技术上的难题, 并向有关科研机构公开了所遇到的问题, 这一领域正逐渐引起学术界的关注^[1]。

2 高性能运动平台及控制系统的研究现状

运动系统的定位精度由机械系统静态运动精度(几何误差、热和载荷变形误差)和机电系统高频动态响应的暂态特性(过渡过程)所决定, 其中静态精度取决于设备的制造精度和机构运动形式, 动态响应取决于外部跟踪信号、系统固有的开环动态特性、所采用的减振方法(阻尼)和控制器的调节作用。

由于静态运动误差具有确定性, 因此可以用软件补偿的方法予以消除, 从而以低精度的设备实现高精度的任务。误差补偿技术在机器人和机床等领域得到了广泛应用^[2], 其理论框架已比较成熟, 当前的研究重点集中在复杂机构几何误差模型的参数辨识方法和具有冗余性的热误差预测模型等方面。

封装设备高加速度启停带来的宽频微振动给运动定位、产品质量和设备寿命带来许多问题。在极短的时间内(10 ms 内)抑制运动系统的振动一直是困扰封装界的难题。寻找高阻尼材料、优化系统结构与阻尼位置、形状、数目降低高频振动, 利用作动器与控制系统主动抑制低频振动是当前发展的主要技术路线^[3,4], 香港中文大学的王煜教授与 ASM 公司合作正在开展这方面的研究¹⁾。需要指出的是采用复合材料减振的同时, 由于改变了原系统的动态模型, 运动控制器的参数必须做相应的调整, 否

则会出现新的振动问题。作为一种简单而有效的开环控制方法, 时滞滤波在运动控制中得到了广泛应用^[5,6], 其基本思想是分时施加驱动信号, 相当于对突变的驱动信号做整形处理, 滤除其中的谐振频率分量。由于运动系统的动态特性是时变的, 因此研究具有鲁棒性和自适应性的时滞滤波器设计方法是当前的一个热点。高速运动平台中由于各种原因产生的力/力矩不平衡是导致平台运动学和动力学特性变化的根源, 如何获得高速、高加速度工况下各种力/力矩的平衡工作状态是高速机构设计所必须考虑的。

封装设备所需要的高精度运动系统要求具有高刚度的机械结构, 简洁的驱动模式, 在这方面, 直线永磁同步电机以其固有的直接驱动方式, 无回差间隙, 简单的结构和高推重比性能而被广泛采用^[7]。运动系统的动态建模是研究其性能和设计控制器的基础, 目前的研究多采用一般伺服控制系统的建模方法, 对实际系统进行较多的简化后, 建立以直线电动机轴上 q -轴电压(或电流)为输入, 以工作台的直线运动速度(或位置)为输出的传递函数或状态空间模型, 这类模型由于过于简化, 与实际系统之间存在较大的差异。为了提高模型精度, 可以采用如下一些方法: 引入负载变化产生的扰动^[8,9]、考虑线性和非线性摩擦以及机械联接引起的机械谐振^[10,11]、在线辨识机电系统参数^[12,13]等, 使得系统中的不确定性因素和未建模动态在模型中得到一定程度的反映, 从而改善所建数学模型的品质。为克服摩擦给运动控制带来的困难, 气动悬浮和磁悬浮技术在 X-Y 平台上得到了一定的应用^[14]。除了串联式运动平台外, 还有一类应用交流伺服电机驱动的并联机构也因为其高刚度, 高负载能力而越来越受关注, Kock^[15]设计了应用冗余驱动的两自由度运动平台, 其最大加速度可达 10 G, 最大速度可达 4 m/s。在并联机床中, 运动平台的运动精度可以达到微米级。并联机构的分析与综合尚不成熟, 还有很多问题需要解决, 如工作空间优化, 动力学解耦设计等。柔性机构以其无回差、无间隙、无摩擦、无需润滑等优点在微动平台设计中得到广泛应用^[16], 但因其行程短(微米级), 仅适用于一些微细作业任务。宏-微机构虽然可以扩大行程, 但由于存在动力学耦合, 控制起来比较困难。

1) 王煜, 为电子封装设备而立的新型阻尼和运动器技术。香港政府创新和技术基金及香港 ASM 公司(Assembly Automation LTD)资助项目申请书

在控制器设计方面, Alter 等将 H_{∞} 最优反馈控制用于直线电机伺服系统中的位置反馈和力反馈, 刚度比 PD 控制的系统提高 70% ~ 100%^[8]. Tomizuka 等提出了一种基于线性控制理论的四单元控制器^[10]: 第 1 单元为摩擦补偿部分, 摩擦补偿基于精确的非线性摩擦模型, 非线性摩擦模型通过离线辨识得到; 第 2 单元为处理外部扰动的扰动观测器, 第 3 单元为 PD 控制, 它构成了渐近稳定位置反馈环节; 第 4 单元为前馈补偿环节, 主要用于补偿系统动态滞后. Efrati 等在机械系统的轨迹跟踪控制中采用了基于神经网络与 PD 控制相结合的控制器^[17]. Tung, Koren, Alter 等研究了采用最优跟踪、零相误差跟踪控制、双重位置闭环反馈控制等不同方案的前馈跟踪控制器, 以改善轨迹跟踪精度^[13,18,19]. 此外, Chiu, Lo 等还提出了协调位置控制 (coordinated position control)、切向轮廓跟踪控制 (tangential-contouring control) 等方法以减小多坐标运动轨迹跟踪误差和轮廓误差^[20,21]. 其他一些理论和方法, 如鲁棒控制 (Robust control)、最优预见控制 (optimal preview control)、离散时间重复控制 (discrete time repetitive control) 和时间延迟控制 (time delay control) 等在运动控制中也都有应用.

3 视觉定位、力控制及自装配技术的研究现状

视觉定位精度由视觉测量系统的软、硬件分辨率及其鲁棒性所决定, 当前的研究重点在硬件方面集中于光路和照明的优化设计或配置, 在软件方面集中于高性能图像对准算法的开发. 归一化相关检测技术作为一种经典的视觉定位方法已成功地应用于全自动引线键合机中^[22]. 采用插值技术该方法可以达到亚像素级的定位精度, 但当考虑图像的旋转和缩放时, 其计算量很大, 虽然采用相关点稀疏和塔式结构等计算策略可以提高计算效率, 然而其易受光照环境和图像质量影响的固有缺点始终难以克服, 已不适应半导体后封装装备发展的需要. Hiroi 等提出了差值平方和算法检测两幅图像间的平移^[23], 但这种方法仅适用于微小的平移定位. 几何特征匹配方法是另一类常用的视觉定位方法^[24], 它通过抽取模板和实测图像中的几何特征, 建立两者之间的对应关系, 采用图匹配算法求出两幅图像之间的位姿关系, 其优点是不受光照的影响, 缺点是

几何特征抽取这一步骤对于干扰噪声很敏感. Cognex 公司宣称已研制出一种新的几何模式匹配算法^[25], 将作为该公司下一代的视觉定位工具. 最近 Lai 等基于检测图像是由模板运动产生的这一观点^[26,27], 应用运动光流模型提出了一种新颖的视觉定位方法, 他们所提出的算法没有采用仿射空间中元素微分增量的内蕴表达形式, 因此不够简洁和高效.

在高速、高加速度工况下, 接触过程中的微小位移, 常常会引起很大的挤压作用力, 由于引线、键合头和芯片均为精密元件, 稍有不慎, 就会断线、损坏芯片或键合头上的毛细引线管, 因此在芯片封装过程中需要无超调力控制, 具有很大难度. 阻抗控制和力/位混合控制作为两种经典的力控制策略仅仅具有理论上的探索意义, 在实际中很难应用^[28]. 以外力环包容位置环为代表的现代控制结构和以智能力/位并环为代表的智能控制结构是两种比较有效的新策略^[29], 力控制精度为 ± 50 g, 适用于运动加速度不大的设备, 对高加速度、快起停和高精度力控制不是很有效. 从技术上讲, 高加速度、高灵敏度、高精度和快响应力传感器的设计也是一个难题^[30]. 最近香港科技大学的李泽湘教授采用速度和加速度前馈, 并将运动伺服环作为力环的执行环节, 直接对力进行反馈控制, 提高响应速度, 开发出压力为 (30 ± 2) g、频率为 10 Hz 的高性能力控制系统^[31].

另外在 Flip Chip, BGA 等先进电子封装工艺中, 由于需要对大量的细微元件如金属焊球进行定位和装配, 人们提出了自装配 (self-assembly) 的思想, 零件的定位、定向和装配是在无传感器反馈的前提下以开环的方式实现的. 并行非抓握操作所需的运动力, Cohn 等利用高频振动与零件自身的重力产生, 将多达 1000 个硅片装配在一起^[32]. 然而, 由于操作过程中产生的静电力使细微物体以不可控的方式偏离预定位置, 这类系统可以装配的零件尺寸一般为数百个微米. 随着芯片的集成度增加、尺寸减小以及微米级甚至纳米级复合结构的使用, 需要研究更加先进的微装配技术. 最近, Cracias 等提出了基于自装配的 3D 组装方法, 通过刻有集成电路的细微多面体之间热运动作用形成 3D 电子网络^[33]. 伊利诺斯大学的 Heller 等提出了下一代微型器件组装技术——电场贴装, 利用分子生物学中的电泳原理把小型元器件准确地放在微阵列芯片上^[34].

4 高加速度运动系统精确定位和操作的研究方案

纵观国内外高性能运动控制(定位)及精密操作技术的研究现状,已有的工作主要集中在一些通用的单元技术上,研究对象的数学模型基本上源于低频工况下的数控机床,控制器设计时将忽略的次要因素视为扰动.由于国际企业竞争和商业技术保密等原因,适应芯片封装任务的高加速度运动系统控制及操作方面的报道极少.高加速度、高精度要求向运动控制及装配操作的极限性能提出了挑战,我们认为解决该问题的理想途径是设计一种高推重比、直接驱动、无/极低摩擦、并具有可控阻尼特

性的运动平台及其相应的位置伺服、视觉定位及力控制系统.对于运动定位而言,关键是协调机电系统的多影响参数,使系统在极短的时间内到达稳定状态;对于操作而言,关键是确定目标点的精确位置、实现位控到力控的快速切换.由于系统的综合品质取决于各项单元技术之间的相互协调与匹配,因此研究内容中既应包含运动平台运动学、动力学建模及设计、运动控制器设计、主/被动混合自适应减振、机器视觉定位、力控制等单元技术,又应涉及并行设计和健壮设计等系统级集成设计方法,以及原型系统研制和集成环境构建,从而形成一套完整的高性能运动定位和装配系统的设计理论,上述研究内容之间的相互关系如图1所示.

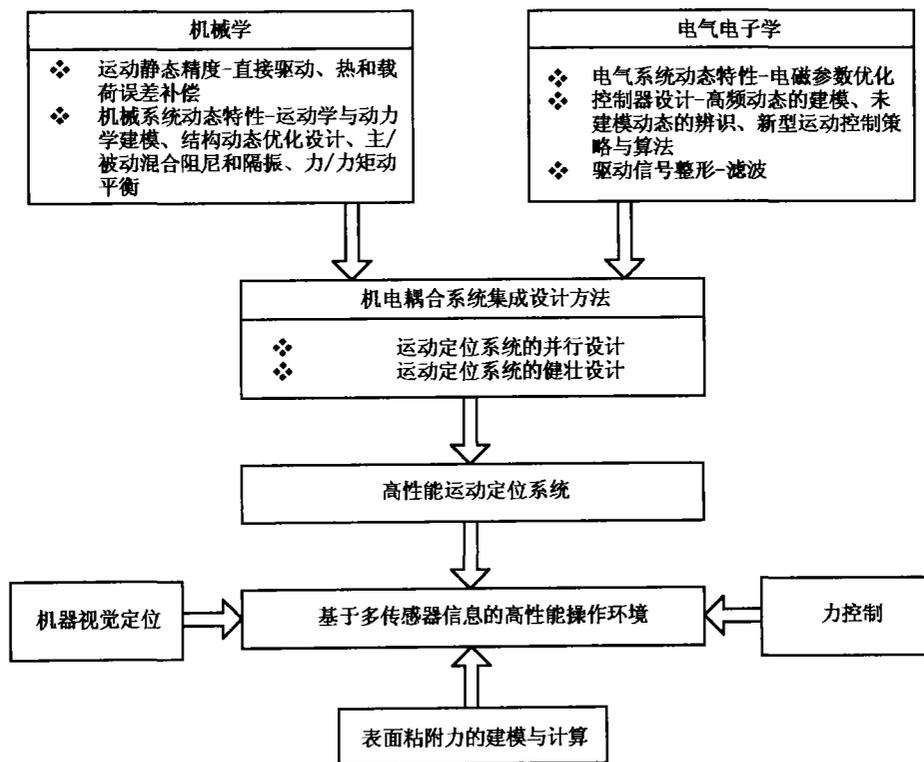


图1 研究内容之间的相互关系

高加速度运动系统的驱动信号为突变信号,将激发系统的高频响应,因此运动平台分析和设计的关键在于将结构上的薄弱环节(如联接、支撑、导轨)视为弹性体,考虑系统的多自由度运动,应用振动力学建立反映系统微振动的宽频动态模型,并据此优化系统结构参数(包括执行器和传感器位置).高加速度运动客观上要求运动台架具有轻质量

和变阻尼特性:启动时低阻尼,停止时高阻尼,因此可考虑应用主动阻尼复合材料结构(高强度轻型材料+智能材料),而沿Z方向平动或转动的轴作为悬臂梁其侧向摆动可应用高阻尼复合材料结构(高强度轻型材料+散体阻尼材料)加以抑制.我们认为采用复合材料是获得所希望的系统动态特性的一个重要手段,复合材料结构的边界条件可以采用

边界元和实验验证的方法确定,应用有限元方法可分析整体结构的动态响应特性,并对复合材料的布局 and 配置进行优化.另外在运动台架的方案设计中力/力矩平衡应是首选的目标,在设计和制造阶段可考虑采用表面涂层和润滑技术,减小工作台与导轨之间的摩擦.

当运动平台的结构形式和参数确定之后,闭环系统的静、动态性能指标将主要由伺服运动控制器决定.由于在运动平台设计阶段所建立的模型为一高阶、非线性模型,在设计控制器前需对其作适当的简化和线性化、参数化处理,以建立面向控制的机械系统动态模型.另外在宽频范围内考虑系统的动态特性时,一些在通常条件下可以忽略的次要因素将变成影响系统性能的主要因素,对系统的动态特性产生很大的影响,是产生高阶次、非线性、快时变、强耦合的根源,因此还需要研究机电系统中

非线性摩擦、间隙、磁滞效应以及驱动器饱和等因素在高加速工况下的表现形式及描述方法.建立起以上参数化数学模型之后,可应用数字仿真方法比较参数化数学模型的动态特性与实际系统的频率特性(扫频实验结果),辨识和调整有关参数,最终获得能够反映实际系统动态特性的数学模型.在控制器设计时,可采用滑模变结构控制、 H_{∞} 控制、扰动观测器、时间延迟控制、自适应鲁棒控制、扰动衰减控制等控制策略.由于已建立了可以反映系统宽频动态的数学模型,因此控制器设计时可以充分利用计算机仿真工具针对不同的条件进行大量仿真计算,根据仿真结果完善控制策略,修正控制器参数,直至获得满足系统动态性能指标的控制器.高动态、高精度运动平台分析、设计和控制的总体研究方案如图2所示.

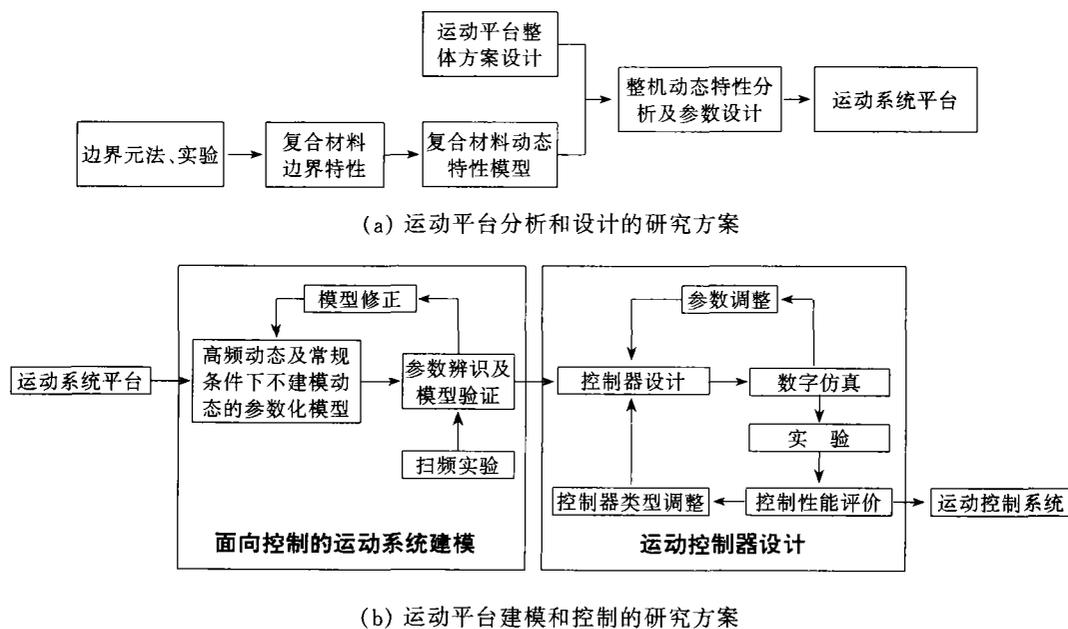


图2 高动态、高精度运动平台分析、设计和控制的总体研究方案

在力控制的研究中应考虑高加速度引起的惯性和机电耦合效应对力传感器性能的影响,提出相应的补偿策略;应用弹性接触力学分析位控到力控快速转换中的微观力交互机理(刚度变化规律),借鉴经典刚度控制理论探索快速无超调力/位混合控制策略和方法.

在机器视觉定位的研究中应重点发展“几何特征匹配”和“运动光流约束”这两种方法,对离散点-离散点,离散点-连续曲面(线)这两种情形分别

建立相应的视觉定位模型;通过对模型中有关方程的 Taylor 级数展开分析其灵敏度,确定最佳的特征点数目及位置;深入分析仿射空间的代数和拓扑性质,应用流形上的优化方法设计高效求解算法;最后通过仿真和实验筛选出最佳的视觉定位策略及光照条件.

面向芯片封装的高性能运动定位平台是典型的机、电一体化产品:控制器的设计依赖于机电系统的宽频动力学模型,电气和机械系统的动力学特征

由其结构参数决定,使用阻尼(被动或主动)将改变机械系统的动力学行为,而时滞滤波可以局部修改驱动信号.因此在机电系统设计时应建立完整的机电耦合模型,并据此实现电气、机械、阻尼、滤波器和控制器中各个设计参数的最佳匹配(并行设计);即不可调参数的近似最优,可调参数的协调控制,使整个系统具有最优的动态性能:具有最短的暂态响应过渡时间.另外为保证运动系统实现高加速度、高精度运动定位,要求其具有一定的抵抗自身变异和外部不可控干扰的能力,对于主控环节,这主要取决于控制器调节作用的鲁棒性,而对于辅助环节(即反馈调控作用较弱的环节,如Z轴的侧向运动)则依赖于机电开环系统自身的健壮性,因此在设计辅助环节参数时还应考虑其动态性能对不可控(外部作用)和可控(设计参数)因素变异的敏感性,在动态品质和健壮性之间进行平衡和折中.

5 结束语

高性能运动定位和装配操作的理论方法研究将为我国在芯片封装设备开发方面取得有自主知识产权的源头创新成果、完成关键技术的突破和实现跨越式发展提供理论基础.另外通过该项研究可望揭示出极限工况下产生的新现象、新规律,扩展传统的制造理论和技术领域,为我国21世纪制造科学的发展开辟新的方向,为多学科的交叉发展提供新的源泉.国家自然科学基金委员会已经意识到发展中国电子制造业的迫切性,于“十五”期间设立了重大项目“先进电子制造中的重要科学技术问题研究”,将“面向芯片封装的高加速度运动系统的精确定位和操作”列为其中的重要研究方向,目前这一项目已经启动.由于封装技术也广泛应用于MEMS领域,国内一些知名高校在211建设中均将芯片封装和MEMS技术列为重点学科发展方向,相关的研究正方兴未艾.期望本文的评述和我们的一些观点能为有关工作的深入展开提供有益的参考.

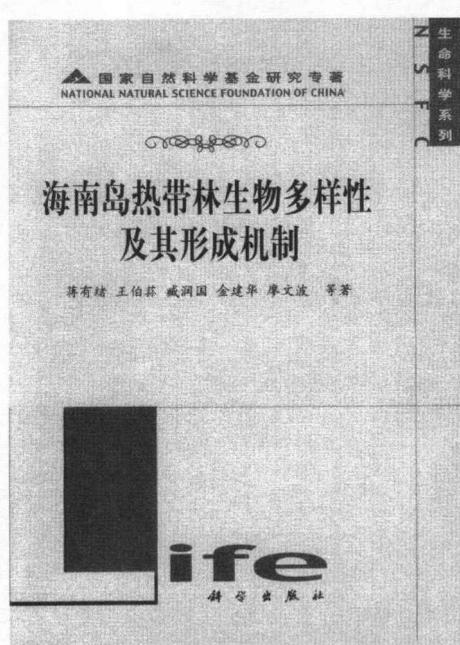
致谢 感谢北京航空航天大学刘强教授和华中科技大学尹周平博士给予的建议和帮助.

参 考 文 献

- 1 雷源忠,等. 先进电子制造中的重要科学问题. 中国科学基金, 2002, 16(4): 204
- 2 Gong C H, et al. Nongeometric error identification and compensa-

- tion for robotic system by inverse calibration. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(14): 2119
- 3 Chang T N, et al. Vibration control on linear robots with digital servocompensator. Proc of American Control Conference, 2000. 2523
- 4 Sprenger B. Design of a high speed and high precision 3 DOF linear direct drive. Proc of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 1997. 63
- 5 Singhose W E, et al. Improving repeatability of coordinate measuring machines with shaped command signals. Precision Engineering, 1996, 18(2-3): 138
- 6 Ho H T. Fast servo bang-bang seek control. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33(6): 4522
- 7 Tan K K, et al. Precision motion control system for ultra-precision semiconductor and electronic components manufacturing. Proc of 51th IEEE Electronic Components and Technology Conference, 2001. 1372
- 8 Alter D M, et al. Control of linear motors for machine tool feed drives: design and implementation of H_{∞} optimal feedback control. Trans of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1996, 118(12): 649
- 9 李庆雷,等. 永磁交流同步直线电机位置伺服控制系统设计. 中国机械工程, 2001, 12(5): 577
- 10 Tomizuka M, et al. Robust high-speed/high-accuracy motion controller. Manufacturing Systems, 1996, 25(1): 97
- 11 丛 爽,等. 两种补偿动态摩擦力的先进控制策略. 自动化学报, 1998, 24(2): 236
- 12 郭庆鼎,等. 基于在线辨识补偿的永磁直线同步电机模型参考自适应神经网络速度控制. 电气传动, 2000, 30(4): 16
- 13 Tung E D, et al. Feedforward tracking controller design based on the identification of low frequency dynamics. Trans of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1993, 115(9): 348
- 14 Akira. The development of nano-meter positioning technology in Japan. Proc of Int Conf on Advanced Manufacturing Technology, Xi'an, China, 1999
- 15 Kock S, et al. Control of a fast parallel robot with a redundant chain and gearboxes: Experimental results. Proc of IEEE Int Conf on Robotics & Automation, San Francisco, 2000. 1924
- 16 曹长江,等. 微装配系统中精密定位装置的研制. 上海交通大学学报, 2000, 34(11): 1483
- 17 Efrati T, et al. Neural network based tracking control of mechanical systems. Trans of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1999, 121(3): 148
- 18 Koren Y. Control of machine tools. Trans of ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1997, 119(11): 749
- 19 Alter D M, et al. Stability of turning processes with actively controlled linear motor feed drives. Trans of ASME, Journal of Engineering for industry, 1994, 116(8): 298
- 20 Chiu G, et al. Coordinated position control of multi-axis mechanical systems. Trans of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1998, 120(9): 389
- 21 Lo C C, et al. Tangential contouring controller for biaxial motion

- control. Trans of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1999, 126(3): 126
- 22 Manickam S, et al. Intelligent and optimal normalized correlation for high-speed pattern matching. Proc NEPCON West, Anaheim, California, USA, 2000
- 23 Hiroi T, et al. Precise visual inspection for LSI wafer patterns using subpixel image alignment. Proc of the Second IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, Florida, 1994. 26
- 24 Cass T A. Polynomial-time geometric matching for object recognition. International Journal of Computer Vision, 1997, 21(1-2): 37
- 25 Silver B. New Developments in PC based vision for Location and inspecting parts. White papers, Cognex Corporation, 2000
- 26 Lai S H, et al. Robust image matching under partial occlusion and spatially varying illumination change. Computer Vision & Image Understanding, 1999, 78(2): 84
- 27 Lai S H, et al. A hybrid image alignment system for fast and precise pattern localization. Real-Time Imaging, 2002, 8(1): 23
- 28 Yoshikawa T. Force control of robot manipulators. Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Automation, 2000. 220
- 29 Yin Y H, et al. Intelligent strategy of force & position parallel control for a robot. Annals of the CIRP, 1997, 46(1): 279
- 30 Fahlbusch S, et al. Force sensing in microrobotic system - An overview. Proc of IEEE Int Conf on Robotics & Automation, 1998. 259
- 31 Li Z X. ASM Force control project report, ASM Corporation and Hong Kong University of Science and Technology, 2000
- 32 Cohn M B, et al. Microassembly technologies for MEMS, Proc of SPIE Symposium on Micromachining and Microfabrication, Santa Clara CA, 1999. 2-16
- 33 Gracias D H, et al. Forming electrical networks in three dimensions by self-assembly. Science, 2000, 289(18): 1170
- 34 Heller M J, et al. 下一代微型器件组装技术-电场贴装, <http://www.eetchina.com>, 2001



国家自然科学基金研究专著

《海南岛热带林生物多样性及其形成机制》蒋有绪等 编著

科学出版社 定价：68.00 元

本书在对海南岛的生态环境介绍的基础上，概述了海南岛热带森林的主要类型及其主要特征；从海南岛的地层、古环境入手，分析了不同地质时期海南岛热带林植物群的发展和演化规律，探讨了古植物群与古环境变迁的关系；从古生物学的角度研究了现代植物区系的历史发生规律，给出了海南岛植物、孢粉和微古植物的化石目录；对海南岛的植物特有性、多样性、辐射性等进行了阐述，同时论证了海南岛的岛屿生物地理现象、边缘效应特征等对植物区系形成的影响规律；以群落内部的种群特征为对象，探讨群落内物种多样性与群落结构和群落环境的关系；从自然干扰体系所引发的森林循环为切入点，深入研究了海南岛热带林的自然干扰特征及其对群落内不同树种更新和多样性关系的影响，树种多样性特征随干扰的动态变化规律，以及森林景观中不同发育阶段森林斑块的镶嵌特征；分析了海南岛的主要热带森林群落类型及其空间格局变化规律，通过比较和分析，研究了海南岛现代森林群落与主要树种的分布特征及其驱动因素；以热带树木为主要研究对象，初步分析了海南岛热带树木的构造型、分子生态及遗传多样性特征。最后在热带林生物多样性形成机制讨论的基础上，概述了海南岛热带林生物多样性研究的理论成果。

本书可供从事生态学、林学、植物学、地理学和环境科学的研究人员和管理工作者，以及大专院校师生参考。