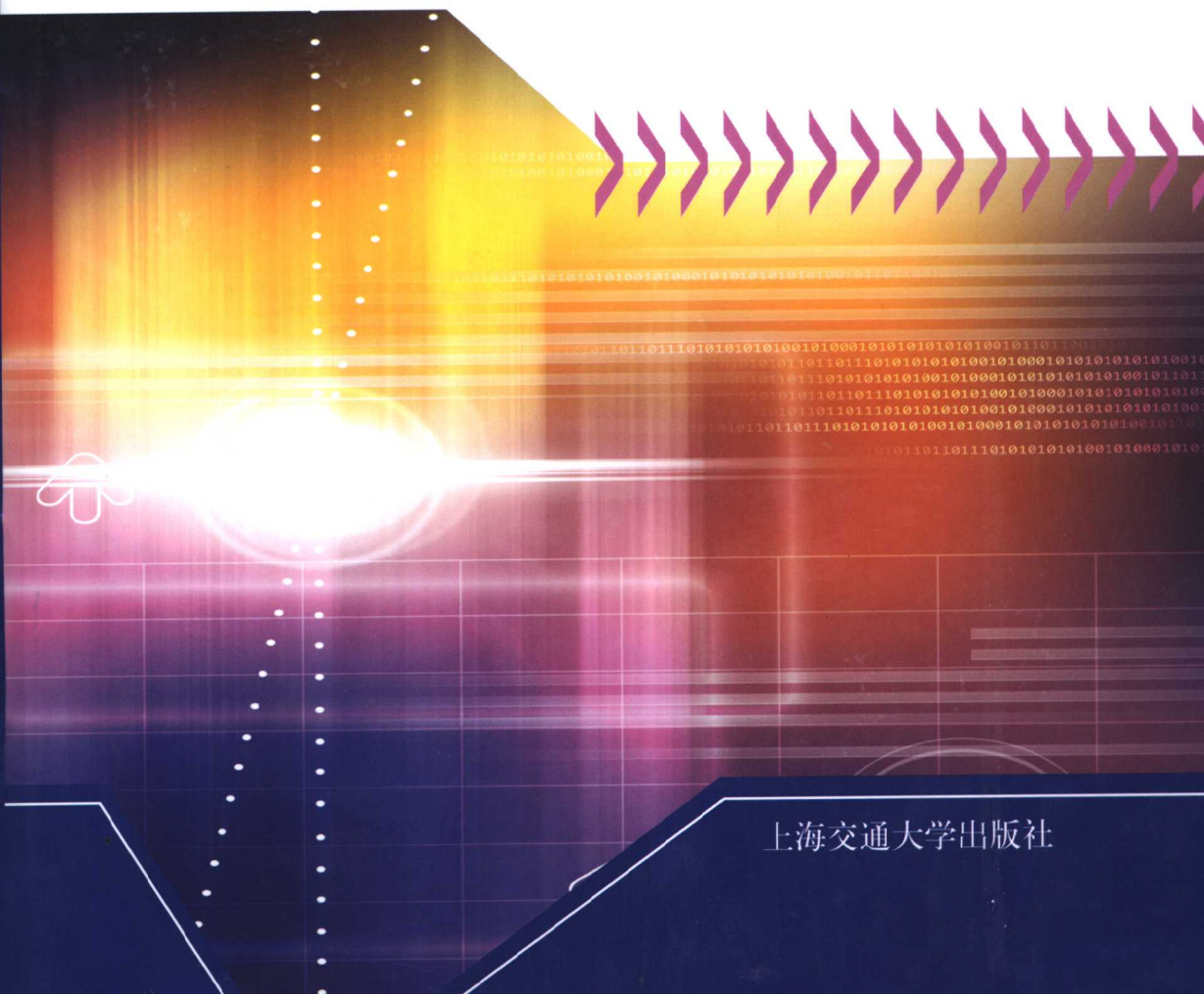




国家“十五”重点图书
微米纳米科学与技术丛书

微执行器

► 张琛 陈文元 陈佳品 编著



上海交通大学出版社

国家“十五”重点图书
微米纳米科学与技术丛书

微 执 行 器

张 琛 陈文元 陈佳品 编著

上海交通大学出版社

内 容 提 要

微执行器是现代自动控制技术的关键技术。近年来,随着微电子技术和微细加工工艺的快速发展,特别是微纳米技术的蓬勃兴起,为微执行器的开发、研究提供了有力的技术支持。本书共分9章,系统阐述和介绍了微执行器中电磁型微马达、光学执行器、微阀门、微型泵、生物微执行器、微机械执行器和化学执行器的基本原理、技术基础、制造工艺和应用实例。

本书可供从事自动化领域及微纳米技术研究的工程技术人员阅读参考,也可作为大专院校中相关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

微执行器 / 张琛, 陈文元, 陈佳品编著. —上海: 上海交通大学出版社, 2005
(微纳米科学与技术丛书)
国家“十五”重点图书
ISBN 7-313-04177-2

I. 微... II. ①张... ②陈... ③陈... III. 微型 - 执行器 IV. TH86

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 150981 号

本书出版由上海科技专著出版资金资助

微 执 行 器

张 琛 陈文元 陈佳品 编著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030)

电话: 64071208 出版人: 张天蔚

昆山市亭林印刷有限责任公司印刷 全国新华书店经销

开本: 787mm×960mm 1/16 印张: 19.25 字数: 359 千字

2005 年 12 月第 1 版 2005 年 12 月第 1 次印刷

印数: 1-3 050

ISBN 7-313-04177-2/TH·111 定价: 39.00 元

版权所有 侵权必究

出版说明

科学技术是第一生产力。21 世纪,科学技术和生产力必将发生新的革命性突破。

为贯彻落实“科教兴国”和“科教兴市”战略,上海市科学技术委员会和上海市新闻出版局于 2000 年设立“上海科技专著出版资金”,资助优秀科技著作在上海出版。

本书出版受“上海科技专著出版资金”资助。

上海科技专著出版资金管理委员会

近百年来,随着科学技术的进步和社会需求的不断增加,特别是进入 20 世纪 60 年代后,由于计算机技术的普及和近代控制理论的飞速发展。自动控制技术的应用如雨后春笋般地遍及国民经济的各个领域,有力地促进了劳动生产率快速增长。执行器是自动控制系统中的关键部件之一,其主要功能是根据控制器得出的控制规律,输出一个相应的控制量或动作,促使该系统的被调量达到并保持在期望值上。

微型化是当今自动控制系统的主要发展方向之一,20 世纪 80 年代末兴起的微电子机械系统(MEMS)和微纳米技术,为自动控制系统的微型化开辟了一个崭新局面。也为执行器的微型化开辟了一条行之有效的新途径。

从直观上看,微执行器的功能和一般自动控制系统中的执行器非常相似,它仅仅是一般执行器在几何尺寸上的缩小。其实不然,当微执行器的特征尺寸小到一定数量级后,某些传统机械特性不再适用。使得两者之间在设计思想、结构特点、材料选择直至基本机理均有很大的区别。微执行器的种类很多,牵涉面广,它涉及到微电子学、微机械学、微动力学、微摩擦学、材料学、微热力学等多种学科,是一门多学科综合交叉技术。

自 20 世纪 90 年代以来,笔者主要从事微执行器方面的教学和科研工作,先后研制成直径仅 2 mm 和 1 mm,高度仅 0.7 mm 的电磁型微马达。并初步解决了它们的实用化关键技术。与此同时,国内外的同仁们在该领域的应用研究异常活跃,各种新型微执行器相继问世。由于微执行器的发展历史很短,国内尚缺少较系统介绍微执行器方面的参考材料,为此,笔者总结近年来科研成果并结合国内外有关参考文献编写此书,供读者参考。

全书共分 9 章。第 1 章绪论,第 2 章电磁型微马达和第 3 章电磁型微马达应用举例由张琛编写;第 4 章光学执行器由陈佳品、李以贵编写;第 5 章微阀门和第 6 章微型泵由陈佳品编写;第 7 章生物微执行器,第 8 章微机械执行器和第 9 章化学执行器由陈文元编写。

由于该领域的发展日新月异,又限于笔者的水平,加之时间匆促,论述难免有不妥之处,恳请读者指教。

作者于上海交通大学

2005 年 12 月

第1章 绪论	1
1.1 执行器与微执行器	1
1.1.1 执行器	2
1.1.2 微执行器	3
1.2 微执行器的主要特点	4
1.3 微执行器的主要加工技术	5
1.3.1 体微加工技术	6
1.3.2 表面微加工技术	8
1.3.3 高深宽比微加工技术	9
1.3.4 组封装技术	12
1.4 微执行器的现状和发展前景	13
第2章 电磁型微马达	17
2.1 前言	17
2.2 磁的基本知识	18
2.2.1 磁感应强度	19
2.2.2 磁通	20
2.2.3 磁介质	20
2.2.4 磁场强度	22
2.2.5 电流的磁效应	22
2.3 永磁材料	23
2.3.1 永磁材料的磁滞回线	24
2.3.2 磁钢特性的主要参数	25
2.4 直流无刷微马达	27
2.4.1 基本原理	27
2.4.2 直流无刷马达基本结构	29
2.4.3 直流无刷微马达的基本结构	31
2.4.4 直流无刷微马达定子	32
2.4.5 直流无刷微马达转子	34
2.4.6 电磁型微马达设计中若干问题	35
2.5 直流无刷微马达的控制方法	37

2.5.1	基本控制电路	37
2.5.2	同步微马达运行方式	41
2.5.3	变结构控制方式	42
2.6	步进微马达	44
2.6.1	步进马达的特点与分类	44
2.6.2	步进微马达基本原理	45
2.6.3	步进微马达结构	47
2.6.4	步进微马达的控制电路	48
2.6.5	提高步进微马达精度方法	49
2.7	其他类型电磁型微马达	56
2.7.1	电磁悬浮直线微马达	56
2.7.2	端面摇摆式电磁型微马达	57
2.7.3	开关型磁阻微马达	58
第3章	电磁型微马达应用举例	61
3.1	电磁型微马达在光开关中的应用	61
3.1.1	微型光开关	62
3.1.2	光开关的准直器和反射镜	65
3.1.3	摆动式微执行器的制造	66
3.1.4	光纤准直器的耦合调整和固定	67
3.2	微马达在微直升机上的应用	67
3.2.1	设计的指导思想和技术难点	69
3.2.2	机翼的研制	69
3.2.3	机身的研制	73
3.2.4	微马达的研制	74
3.2.5	控制电路的研制	75
3.2.6	微型直升机的实用化	77
3.3	电磁型微马达在医疗上的应用	78
3.3.1	系统整体构思	78
3.3.2	内窥镜检测导管前端结构设计	78
3.3.3	电磁型微马达驱动电路的设计	79
3.3.4	微马达对物镜前方光路的遮挡	80
3.3.5	微马达与上位机的通信	80
3.4	微马达在微型机器人系统中的应用	81

3.4.1	微机器人本体设计	81
3.4.2	微机器人的控制	84
3.4.3	图像采集反馈系统	87
第4章	光学执行器	89
4.1	前言	89
4.2	发光二极管	90
4.2.1	硅发光二极管	92
4.2.2	有机发光二极管	92
4.3	气态和固态激光器	93
4.4	微机械白炽灯	97
4.5	等离子体光源	99
4.6	电致发光的光源	99
4.7	场发射显示屏	100
4.8	生物发光	101
4.9	光调制器	101
4.9.1	液晶显示器	102
4.9.2	反射式微机械光调制器	106
4.9.3	透射式微机械光调制器	116
4.10	其他光调制器	116
第5章	微阀门	119
5.1	被动式阀门	120
5.2	主动式阀门	122
5.2.1	气动微阀门	123
5.2.2	热气动阀门	124
5.2.3	相变驱动阀门	126
5.2.4	固体膨胀热驱动阀门	127
5.2.5	压电驱动阀门	128
5.2.6	静电驱动阀门	129
5.2.7	电磁驱动阀门	130
5.2.8	双稳态阀门结构	131
5.3	生物阀门	132
5.3.1	被动式生物阀门	132

5.3.2 主动式生物阀门	132
第6章 微型泵	133
6.1 气泡泵	133
6.2 隔膜泵	134
6.3 扩散泵	136
6.4 旋转式泵	137
6.5 水电泵	138
6.5.1 注入型 EHD 泵	139
6.5.2 非注入型 EHD 泵	139
6.6 电泳/电析泵	140
6.7 超声波泵	142
6.8 真空泵	142
6.9 生物泵	144
第7章 生物微执行器	145
7.1 概述	145
7.2 细胞骨架和微管	146
7.3 纤毛和鞭毛	146
7.4 肌肉	150
7.5 分子马达	154
7.5.1 概述	154
7.5.2 旋转运动分子马达	155
7.5.3 线性运动分子马达	157
7.5.4 人造分子马达	161
第8章 微机械执行器	163
8.1 静电执行器	163
8.1.1 概述	163
8.1.2 静电悬臂梁执行器	164
8.1.3 静电梳状微执行器	166
8.1.4 静电旋转执行器	171
8.1.5 静电直线执行器	179
8.1.6 静电微继电器	197

8.1.7 静电微夹	206
8.2 热力执行器	211
8.2.1 热耦合执行器	212
8.2.2 形状记忆合金执行器	235
8.3 微机械焦耳—汤普生制冷机	239
第9章 化学执行器	241
9.1 概述	241
9.2 电化学机械执行器	241
9.3 高分子凝胶执行器	243
9.3.1 凝胶及其执行器概述	243
9.3.2 高分子凝胶致动的刺激类型	246
9.3.3 高分子凝胶微执行器的应用举例	250
9.4 导电聚合物执行器	261
9.4.1 导电聚合物概述	261
9.4.2 导电聚合物执行器应用举例	263
9.5 IPMC 人工肌肉执行器	269
9.5.1 几种人工肌肉执行器概述	269
9.5.2 IPMC 人工肌肉的驱动特性及应用	273
9.6 金属氢化物(MH)执行器	280
9.6.1 贮氢合金与 MH 执行器	280
9.6.2 MH 执行器应用实例	283
9.7 薄膜电池	285
9.7.1 电池的基本原理	285
9.7.2 薄膜电池及其材料选择	286
9.7.3 锂薄膜电池	287
参考文献	289

第 1 章 绪 论

1.1 执行器与微执行器

1787 年英国工程师瓦特发明了用于蒸汽机的离心式调节器,在蒸汽机中引进了带负反馈的自动控制技术,使得蒸汽机成为非常实用有效的动力设备,有力地推动整个工业生产的飞速发展,从而在世界上引发了一场产业革命。之后,在各种社会需求的大力推动和各国工程技术人员的不努力下,自动控制技术如雨后春笋般蓬勃发展起来。特别是近几十年来,随着现代科学技术的飞速发展和人类生产需求的快速增长,自动控制技术的应用已遍及国民经济的各个领域,并有力地促进了社会生产率的飞快发展。归纳起来,自动控制技术有如下几个特点:

- ① 它可以显著提高劳动生产效率,大量减少工作人员的数量和降低生产成本;
- ② 把工作人员从繁重的体力劳动中解放出来;
- ③ 提高产品的质量,可确保整个工艺过程的高度精确和一致性;
- ④ 可以在某些人所不能适应的条件下或人所不能到达的地区进行生产科研活动。

进入 21 世纪以后,在国民经济快速发展需求的牵引下,自动控制技术的应用范围将更加日趋广泛,在国民经济中所起的作用也将越来越大。

虽然各种自动控制系统的结构形式多种多样,控制方法层出不穷,应用领域也各不相同,但就其基本功能而言,一个自动控制系统至少应包括以下几个部分:

1) 测量环节 测量环节的主要作用是通过相应的传感器测量出被控对象输出的实际值,并将它传送到控制器中。如果是数控系统,则还要将它转换成相应的数字量,然后再输入到控制器中。自动控制系统的控制精度主要取决于它的测量精度。

2) 控制环节 控制环节是整个自动控制系统的核心部分,其主要作用是将测量环节所得到的实测结果与控制系统输出的期望值进行比较,得出偏差后,再根据被控对象的特点或相应的数学模型以及对系统的其他具体要求(如要求最优控制、自适应控制等),通过控制环节的运算处理后得出相应控制规律,并将它传递给执行环节。

控制环节的主要技术分模拟控制和数字控制两种,近年来随着微电子工业和计算机技术的飞速发展,数字控制系统日趋普及,许多微电子元件生产厂家不断推出各种高性能的通用控制芯片(如高性能单片机、DSP等)和专用控制芯片。从而使得自动控制技术朝着高性能、数字化、智能化及微型化方向发展。

3) 执行环节 执行环节的主要作用是根据控制器得出的控制规律和控制系统的具体要求,输出一个相应的控制量或动作。在它的作用下力图使系统的被调量达到期望值。

综上所述,自动控制系统的简要逻辑方框图如图 1-1 所示:

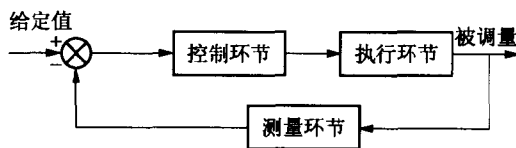


图 1-1 自动控制方框图

1.1.1 执行器

由图 1-1 可知,执行器(图 1-1 中的执行环节)是自动控制系统中的关键环节之一。其主要功能就是快速、忠实地将来自控制器的控制信号转化为相应的控制动作。并在该控制动作的作用下力图使系统的被调量达到期望值。

在形形色色的自动控制系统中,控制器的输出一般均是一个微小的控制信号,而不同自动控制系统中的执行器及其输出形式则大不一样,它们的种类繁多,工作原理涉及许多技术领域,有电气的,液压的,气动的,以及利用热能、化学能等制成的各种致动器。它们的结构形式各不相同,相互之间的差别可能非常之大。它的输出可能是电能,热能,机械能等各种形式的能量;也可能是机械位移、速度、水位、温度等各种物理参数;或者是气体或液体中某些化学元素的浓度等各种物理和化学参数。例如,一个由微电脑控制的大型电子广告牌,它的各种画面是由许多发光二极管阵列构成,因此,在这样的自动控制系统中,发光二极管就是它的执行器。而在某些高温电炉中,电阻器就是该系统的执行器。它的功能是将电能转化为热能,以此来达到控制温度的目的。

即使针对某些具有相同调节参数的自动控制系统,其执行器的输出功率也可能相差很大。例如,同样是马达的转速自动控制系统,在大型水坝上升船机的转速自动控制系统中,其执行机构由多台几百千瓦马达构成。而在台式计算机中的磁盘驱动器上,其中磁头定位系统里的执行器为音圈马达,其输出功率仅几瓦,两者

相差高达数十万倍。

1.1.2 微执行器

微型化、智能化和集成化是当前自动控制系统主要发展方向,20 世纪 80 年代以来,随着微电子技术的飞速发展,各种微电子器件和电子计算机的集成化程度不断提高,并产生了巨大的经济效益。在它的启发之下,世界上兴起了一门崭新的学科——微电子机械系统(Micro electronic mechanical system, MEMS)。其主要特点是采用微电子工业中的微细加工工艺,集微机械、微传感器、微执行器与微控制器等部件于一体,构成一个具有一定功能的微型控制系统。它可以进行批量生产,使其生产成本大大降低,也可以嵌入某些大型机械设备中,使该机械设备的自动化和智能化水平及其可靠性程度提高到一个新高度。其机理模型如图 1-2 所示。

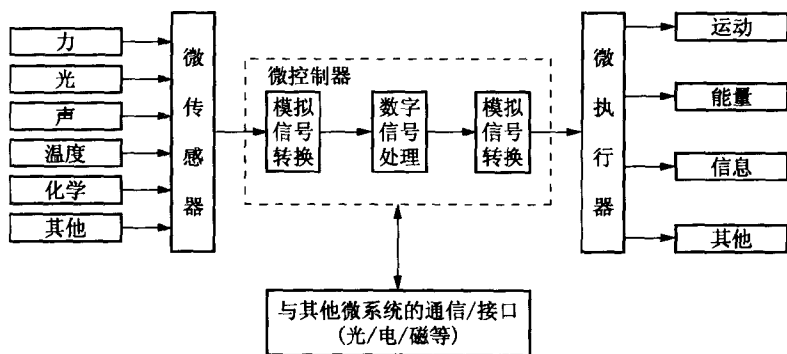


图 1-2 微系统模型

由图 1-2 可知,该系统可以分成多个独立的功能单元:

- ① 将输入的物理或化学的信号通过微传感器转换成电信号;
- ② 将该信号送入微处理器,并根据系统的具体要求,对该信号进行必要的处理加工,形成一个控制信号输出给微执行器;
- ③ 通过微执行器与外界作用,产生类似于宏观控制作用的效果。

可见其总体功能同上述自动控制系统非常相似,故在欧洲,人们称之为微系统。它主要包括微传感器、微执行器、微结构、微处理器及其接口和能源系统等多个基本组成单元。由于它在国防军工、航空航天、医疗工程等领域,如微型飞行器、微型机器人、纳卫星及皮卫星等方面的潜在应用前景,倍受各国政府和专家的高度重视,是一项被认为面向 21 世纪可以得到广泛应用的高新技术产业。

微系统是微纳米技术的重要组成部分,它包括设计、材料、工艺、测试以及微机理研究等多个方面,微系统就是建筑在上述基础之上的,如图 1-3 所示。

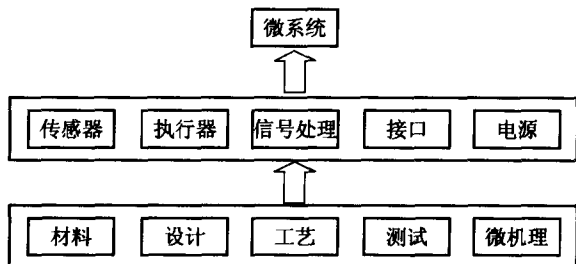


图 1-3 微系统基础

同样微执行器是微系统中的一个关键部件。具有体积小,重量轻,功耗低,谐振频率高,响应时间短以及可靠性好,便于实现低成本大批量生产等一系列优点。

1.2 微执行器的主要特点

从直观上看,微执行器的功能和一般执行器非常类似,它仅仅是一般执行器在几何尺寸上的缩小。其实不然,这是由于当微执行器的特征尺寸一旦小到微米或纳米数量级后,某些传统机械的物理特性有可能不再适用,使得两者之间在加工方法、设计思想、结构特点、材料选择、直至基本机理等方面均有很大区别。再由于微执行器的种类繁多,涉及面很广,是一门多学科的综合交叉技术。它涉及到微电子学、微机械学、微动力学、微摩擦学、材料学及微热力学等多种学科。这给微执行器的开发研制增加了许多困难,并引发出许多技术的不断创新。再者,由于微小尺寸效应,使得宏观世界的许多知识与法则不再适用,这又引起了设计思想和加工工艺的创新,并引出了许多值得深入研究的新课题,诸如:

1) 摩擦和磨损 许多执行器中往往都存在着运动部件,必然要产生相对摩擦和磨损。例如,马达是自动控制系统中最常见的执行器之一,其应用范围遍及各个领域。在一般的马达中,机械摩擦损耗仅占其总输出功率的百分之几甚至更小。而在直径仅为 1~2 mm,高度不到 1 mm 的电磁型微马达中,由于它所产生的电磁转矩很小,仅在 $\mu\text{N} \cdot \text{m}$ 数量级。机械摩擦损耗所占的比例就很大,甚至它所产生的电磁转矩不足以克服机械摩擦,从而使得该微马达不能正常运行。而许多传统的减少摩擦的有效方法(如安装滚珠轴承,加润滑油等)又往往不适用于微马达。深入研究结果表明:当微执行器中运动部件的几何尺寸小到纳米数量级时,原有宏观摩擦学中的一些基本规律将不再适用。于是出现了微观摩擦学。虽然目前微执

行器中的运动部件的几何尺寸一般均在微米数量级甚至更大,还不属于微观摩擦学范畴,但随着微执行器几何尺寸的不断减小,摩擦对其输出力矩的影响将越来越大。为了提高微执行器的工作效率和品质,对其中的摩擦和磨损问题还是值得高度重视,并需要开展深入研究的。

2) 加工制造工艺 随着执行器体积的不断减小,在加工制造工艺方面,许多传统的机械加工工艺(如车、铣、锻、铸等)已不能完全胜任,需要借助于现代微电子工业中的微细加工技术、封装技术和超精密装配技术来完成。微制造技术是制造尺寸为亚毫米到纳米数量级的微小器件的重要加工方法,因此也是研究开发微执行器的工艺基础。例如在直径仅为1 mm的电磁型微马达中的定子绕组就无法采用传统绕制工艺,而只能借助于微细加工工艺来完成。

3) 多学科交叉 微执行器的发展历史很短,至今仅数十年时间。但开发和研究所涉及的面很广,是多学科前沿的综合交叉,且加工工艺复杂,加工设备先进,图1-4显示了它的设计、加工所涉及的学科和基本工艺流程。

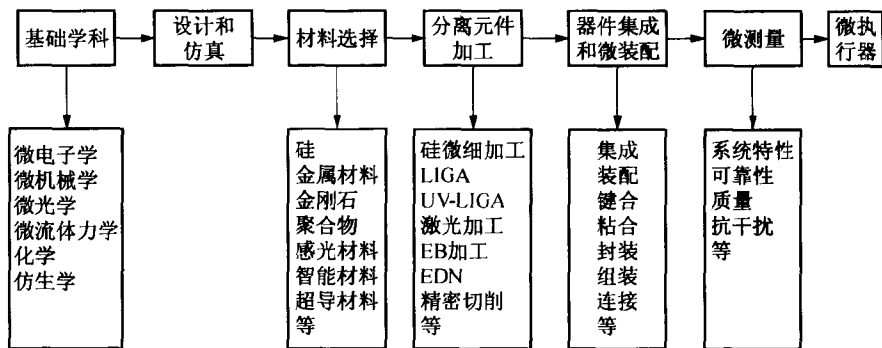


图 1-4 微执行器所涉及的工艺流程

1.3 微执行器的主要加工技术

前已指出,由于微执行器的许多特殊结构和微小尺寸效应,一般传统的加工工艺已不能完全适应微执行器的加工任务,而是要借助于微细加工技术。因此有必要对它进行简要的说明。

微细加工技术是制造尺寸为亚毫米到纳米数量级的微执行器及其零部件的重要加工方法。因此微执行器的开发与研究与微制造加工技术的进展是密不可分的,其中微电子集成工艺是其基础。它主要可分为三大类:分离加工(亦称切削加工)、结合加工(亦称附加加工)和变形加工(亦称流动加工),如表1-1所示。

表 1-1 微细加工分类表

加工方式	加工机理	加工方法
分离加工	化学分解(气体、液体、固体)	曝光、化学抛光、机械化学抛光、RIE 刻蚀、ICP
	电解(液体)	电解抛光、电解加工
	蒸发(热式)(真空、气体)	电子束加工、激光加工、热射线加工
	扩散分离(热式)(液体)	扩散去除加工
	熔解分离(热式)(液体)	熔化去除加工
	溅射(力学式)(真空)	离子溅射刻蚀
结合加工	机械剪切	刀具切、磨、刨、钻等
	化学粘着	化学镀、气相镀
	化学结合	氧化、氮化
	电化学粘着	电镀、电铸
	电化学结合	阳极氧化
	热粘着、热结合	蒸镀、晶体生长、分子束外延
	扩散结合(热式)	烧结、掺杂、渗碳
	熔化结合(热式)	浸镀、熔化镀
	物理粘着结合(力学式)	溅射淀积、离子镀膜
变形加工	注入(力学式)	离子注入加工
	热表面流动	热流动加工(气体火焰、高频电流、热射线、电子束、激光)
	粘滞性流动(力学式)	液体、气体流动加工
	摩擦流动(力学式)	微粒子流动加工
	塑性变形	电磁成形、放电、悬臂弯曲、拉伸、滚轧、挤压、锻造等

此外,由于微执行器往往具有各种各样的特殊结构和运动部件,必须采用一系列特殊加工工艺和新技术。归纳起来,目前常用的加工技术主要有体微加工技术、表面微加工技术、高深宽比微加工技术、组封装与键合技术以及超微精密加工和装配技术等多种技术。

1.3.1 体微加工技术

体微加工技术和表面微加工技术都是制造集成微电子器件的关键技术。其中体加工技术主要是为了制造微三维构件的需要而发展起来的,主要功能是按设计图形在硅片(或某些非硅材料)上有选择地去除一部分材料,形成所需的微机械构件。主要加工工艺包括晶体生长、薄膜制备、光刻、刻蚀、切片等几个部分。目前该技术已广泛用于微执行器的开发研究,如硅微加速度器,流量控制器,墨水喷嘴以及微阀等加工制造工艺上。光刻和刻蚀是体微加工技术中主要的两个关键技术。

1) 光刻 光刻是一种图形转移技术,主要分为两个部分,首先是用辐照方法将掩膜版上的图形转移到光敏材料(光刻胶)上,然后用光刻胶作掩膜通过刻蚀工艺将光刻胶上的图形转换到薄膜材料或基片上形成结构件。光刻工艺中最重要的材料是光刻胶。光刻胶可分为正胶和负胶两种。曝光、显影后光刻胶上的图形和掩膜板上的图形相同的为正胶,反之为负胶。光刻工艺一般包括硅片脱水、烘烤、涂增粘剂(如需要)、涂光刻胶、前烘、曝光、显影、检查、后烘及去胶等几个步骤。

2) 刻蚀 刻蚀分干法刻蚀和湿法刻蚀两种工艺。

干法刻蚀又分为物理法(溅射、离子铣)和化学等离子刻蚀(也称反应离子刻蚀)两种。选择合适的掩膜板可获得深宽比大且图形准确的三维结构。

湿法刻蚀主要是将微器件置于某些化学液体中进行刻蚀。它又可分为各向同性刻蚀和各向异性刻蚀两种类型。各向同性刻蚀是指在刻蚀过程中器件的刻蚀速率在各个方向均相同;而各向异性刻蚀是指在整个刻蚀过程中,器件各个方向的刻蚀速率并不相同,它与许多方面的因素有关。例如硅片的 $\langle 100 \rangle$ 面的刻蚀速率可以比它的 $\langle 111 \rangle$ 面的刻蚀速率高出 100 倍。也可以采用掺杂法来达到各向异性刻蚀,即在器件上掺入某些杂质,使得在重掺杂区的刻蚀速率比其他区域要小得多。还可以采用电化学止停刻蚀法(例如使刻蚀在 p-n 结的某极区上停止)来进行有选择的刻蚀等等。湿法各向异性刻蚀常用的方法是通过加入某些特殊刻蚀液来达到,对于硅片而言主要有 KOH 和 EDP 等多种蚀液系统:

1) KOH 系统 常用 KOH(氢氧化钾)、 H_2O 和 $(CH_3)_2CHOH$ (异丙醇)配成的混合液。

2) EDP 系统 乙烯二胺($NH_2(CH_2)NH_2$)、邻苯二酚($C_6H_4(OH)_2$)和水配成的混合液。

利用硅在 KOH 溶液中的各向异性腐蚀性能,可以制成各种各样的三维器件基本结构。如图 1-5 所示,它是开发微执行器的有力手段。

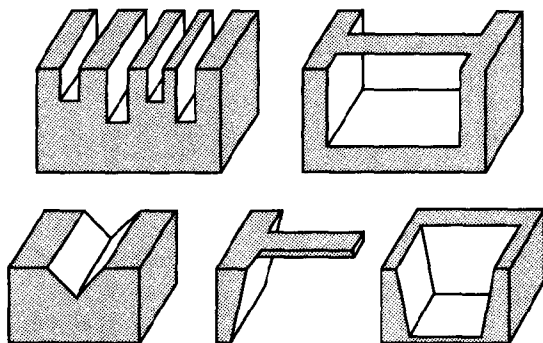


图 1-5 硅微器件的基本结构