

普通高等教育机电类规划教材

# 机电一体化技术 基础及应用

华东冶金学院 黄筱调  
华东工业大学 赵松年 编著

机械工业出版社

普通高等教育机电类规划教材

# 机电一体化技术基础及应用

华东冶金学院 黄筱调 编著  
华东工业大学 赵松年  
上海工业大学 裴仁清 主审



机械工业出版社

(京)新登字054号

本书简要介绍机电一体化技术的基础知识，系统阐述构成机电一体化技术的主要内容：机械系统；机电一体化中集成电路的应用；微机与接口技术；传感器技术及机械量检测；伺服系统；机电一体化中的软件技术。为结合机电一体化技术的应用，书中列举并剖析了一定数量的机电一体化技术的应用和设计实例供参考。

本书简明易懂、实用性强，可用作大专院校机械类专业机电一体化方向的教材，也可供夜大、函大、职大及技术培训班等成人教育相关专业使用，还可供从事机电一体化设计、制造的工程技术人员参考。

### 机电一体化技术基础及应用

华东冶金学院 黄筱调 编著  
华东工业大学 赵松年

责任编辑：张一萍 版式设计：张世琴  
责任校对：肖新民 责任印制：卢子祥

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码：100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

四川省金堂新华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/16·印张 12.75·字数 312千字  
1995年5月北京第1版·1995年5月成都第1次印刷

印数 00 001—10 000·定价：7.85元

ISBN 7-111-04431-2/TH·555(课)

## 前 言

本书为全国高等工业学校机械设计及制造专业教学指导委员会确定的列入机械电子工业部《全国高等学校机电类专业“八五”教材编审、出版规划》的新编教材。本书是原讲义经过若干大学和进修班使用过数次后，在广泛征求意见基础上编写而成的。

机械工业已发展到机电一体化新阶段。现代机械必然是由电脑控制的伺服系统。机械产品总体方案设计的整个设计过程中，要从设计要求出发，尽可能系统地采用新的机电一体化技术和元器件。本书的目的即为培养学习者对机电一体化技术的应用能力打下基础。

本书简明扼要地介绍机电一体化技术的基础知识，较系统地阐述了构成机电一体化技术的主要内容，包括机电一体化机械系统、机电一体化中集成电路的应用、微机和接口技术、传感器技术及机械量检测、伺服系统、机电一体化中的软件技术。为结合实际，书中列举并剖析了一定数量的机电一体化技术应用和产品设计实例供参考。

本书由华东冶金学院黄筱调、华东工业大学赵松年编写。主审上海工业大学裴仁清全面详细地审查了全书初稿，并提出中肯意见，编写者据此作了大量修改，重新编写了若干章节，经复审后定稿。编者在此特向主审人致以诚挚的谢意。同时向本书所引主要参考文献的国内外作者致意。

本书可用作大专院校机械类专业机电一体化方向的教材，也可供夜大、函大、职大、业大及技术进修班、培训班等成人教育有关专业使用，还可供从事机电一体化产品设计、制造的工程技术人员参考。

限于编者水平，书中的缺点错误恳请广大读者批评指正。

1994年6月

# 目 录

## 前言

第一章 总论 .....	1
第一节 机电一体化的基本概念 .....	1
第二节 机电一体化的技术体系 .....	2
第三节 机电一体化的发展前景 .....	5
第二章 机械系统 .....	10
第一节 机械系统建模中基本物理量的描述 .....	10
第二节 机械系统中的制动和加速控制 .....	17
第三节 机械传动装置 .....	24
第三章 机电一体化中集成电路的应用 .....	48
第一节 集成电路应用基础 .....	48
第二节 数—模转换集成芯片 .....	58
第三节 多路模拟开关集成芯片 .....	64
第四章 微机与接口技术 .....	67
第一节 微处理器系统接口 .....	67
第二节 单片微型计算机 .....	83
第三节 微机可编程序控制器 .....	93
第五章 传感器技术及机械量检测 .....	101
第一节 传感器技术概述 .....	101
第二节 机械量检测传感器 .....	107
第三节 传感技术的发展 .....	129
第六章 伺服系统 .....	131
第一节 概述 .....	131
第二节 伺服电机的选择 .....	132
第三节 控制方式的选择 .....	143
第四节 机械传动方案的选择 .....	144
第七章 机电一体化中的软件技术 .....	149
第一节 概述 .....	149
第二节 软件开发的方法 .....	150
第三节 汇编语言程序的应用 .....	155
第四节 数控加工零件的程序编制 .....	161
第五节 可编程序控制器的程序编制 .....	170
第八章 机电一体化技术的应用 .....	177
第一节 可编程微机点位数控系统在滚切鼓形齿上的应用 .....	177
第二节 车床的机电一体化改造 .....	185
第三节 机电一体化技术用于金属切削加工过程的控制 .....	193
第四节 机器人的应用 .....	196
主要参考文献 .....	200

# 第一章 总 论

## 第一节 机电一体化的基本概念

在科学技术飞速发展的今天，任何一项新技术的产生都是各种技术互相渗透的结果。机电一体化是一种复合化技术，它是机械技术与微电子技术、信息技术互相渗透的产物，是机电工业发展的必然趋势。微电子技术与信息技术的引入，使古老的机械工业焕发青春，使传统的机械电器产品，在功能上、性能上以及制造技术上都提高到一个崭新水平，所带来的经济效益和社会效益是十分巨大的。

机电一体化的外文名词是Mechantronics，起源于日本，是日本人创造的英语名词。它取英语Mechanics的前半部和Electronics的后半部拼合而成，表示机械学与电子学两种学科的综合。我国通常译为机电一体化或机械电子学。

机电一体化这一门科学，至少应当包括机电一体化技术与机电一体化产品这两个组成部分。由于计算机技术与通信技术的蓬勃发展，它还应该包括信息化的内容。因为在机电一体化产品中往往要引入仪器仪表技术，所以有时称之为“机、电、仪一体化”。机电一体化这种复合技术，其定义可概括为：机电一体化技术是从系统工程观点出发，应用机械、电子、信息等有关技术，对它们进行有机的组织与综合，实现了整体最佳化。机电一体化不是机械与电子简单的叠加，而是在信息论、控制论和系统论的基础上建立起来的应用技术。

机电一体化的实体部分是机械技术和电子技术，又通过信息技术把两者有机地结合在一起，从而构成功能更为先进的技术产品。按照系统分析的观点，机电一体化就是把机械部分和电子部分各作为一个环节，统一在一个“系统”之中。为了使该系统的运行达到最优化，应该使构成系统的所有硬件采取最佳组合方式。为了强化机电一体化产品的功能，从系统观点出发，把机械部分和电子部分融合在一起进行通盘考虑，决定哪些采用机械技术，哪些采用电子技术，并通过信息传输与处理把两者有机地组合起来。因此，从某种意义上来说，机电一体化技术是系统工程学在机械、电子领域中的应用，而机电一体化产品则显示出它的应用效果。

随着微电子技术的蓬勃发展，机电一体化的产品不断涌现出来，大致可归纳成两大类。

第一类属于机械电子化产品，这类产品是机电一体化的初级形式，即原有的机械产品采用了微电子技术之后，其性能和功能都有了提高，甚至在结构上也发生了变化。这类产品为数不少，它们又可细分成：

- 1) 机械本身的主要功能被电子取代，如采用微机与激光连续加工代替了传统方式的电加工的线切割机床，电子照相机的电子快门、自动曝光、自动对焦代替传统的机械式照相机等。

- 2) 机械式信息处理机构被电子元件代替，如电子钟表、电子计算器、电子交换机、电子秤等。

3) 机械式控制机构被电子式的代替, 如缝纫机的凸轮机构被微型机控制系统代替, 在燃料喷射装置中, 加热炉中采用微机程序控制等。

4) 采用微电子技术增加了控制功能, 如数控机床、汽车防滑制动装置、微机控制的电机调速装置、微机控制的播种机、微机控制的联合收割机、微机控制的孵化器等。

第二类属于机械与电子融合的产品, 这类产品属于机电一体化的高级形式, 如工业机器人、传真复印机、声音合成装置、电子式自动售货机、计算机断层摄影装置、液晶式打字机、彩色复印机、自动探伤仪、形状识别装置、字词处理机、磁式无胶片照相机、分时计价电度表等。这些产品单靠机械或单靠电子都是无法实现的, 而必须靠机械与电子进行有机的结合才能完成。

## 第二节 机电一体化技术体系

### 一、机电一体化的构成要素

机电一体化的构成要素很多, 但其中五大要素是必需的。这是与人体的五大要素进行对比时, 从中得到启发的。

图 1-1 示出人体的五大要素。内脏是创造能源使人得以维持生命和进行活动的部分。人们通过五官接收外界传来的信息, 头脑集中所有的信息并加以处理, 与其它要素有机地统一起来进行控制, 再通过手足将意志作用到外界。骨骼是把人作为一个整体组织起来, 而且规定其运动。

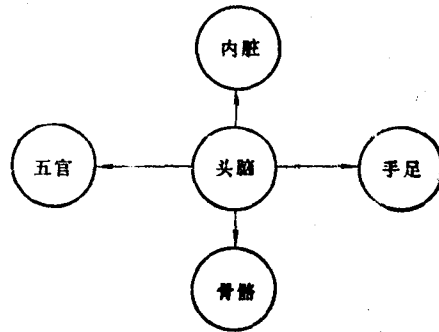


图1-1 人的五大要素

图 1-2 示出的机电一体化与人体相对应的五大功能, 图 1-3 则示出机电一体化的五大要素。

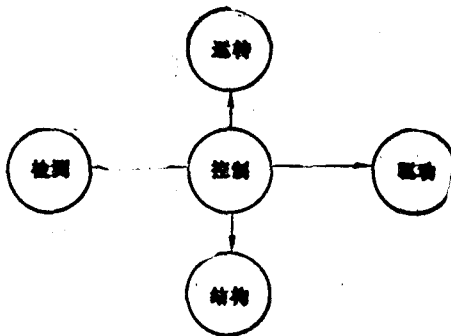


图1-2 机电一体化的五大功能

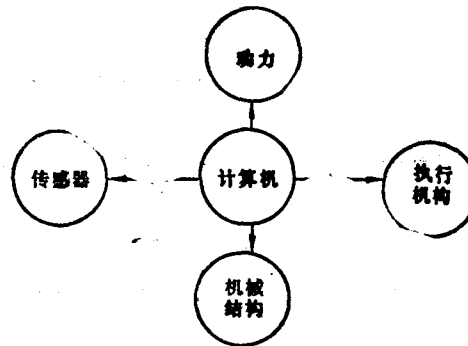


图1-3 机电一体化系统的五大要素

### 二、机电一体化所联系的主要学科领域

机电一体化技术是一门新兴的学科, 所联系的主要学科领域如表1-1所示。

从表1-1可知, 支撑“机电一体化”这一门学科的有: 1) 机械学。2) 控制论。3) 电

表1-1 机电一体化所联系的主要学科

机 械 学		控 制 论	
机械设计	动态系统分析	经典控制 数字控制	现代控制
机 电 一 体 化			
微处理机及常规仪器仪表	电机、电器及电力电子学	软件工程	微处理机系统设计
电 子 学		计 算 机 科 学	

子学。4) 计算机科学。

这四大基础学科中又可细分为九大组成部分。表1-1中的机械设计、动态系统分析、电机、电器及电力电子学是传统机械学和电工学的学科范围，其它则是适应机电一体化需要而开拓的部分。在控制论学科中，从经典的反馈控制，经过数字控制，发展为以状态参量为基础的多变量自适应控制、模式识别、系统仿真、人工智能等新技术所形成的现代控制。在电子学学科中，包括了传统的强电与弱电两个领域，也包括了电子学学科的新发展如微处理机等。在计算机学科中，软件工程包括系统软件与应用软件两个方面。系统软件是计算机本身的操作系统、编译系统等的总称。应用软件则是CNC、DNC、CAD、CAM、CAT、FMS以及计算机辅助管理等方面的技术基础。微处理机系统设计应包括两个方面，一方面是定型机种的系统开发，另一方面是专用微处理机与集成电路的设计与组装，它对于设计和制造机电一体化产品至关重要。

机电一体化，按其工程对象而言可包括以下三个方面：

- 1) 机械制造过程的机电一体化。
- 2) 机械（包括电工）产品设计的机电一体化。
- 3) 机械成套装置的机电一体化。

从上述学科基础来看，机电一体化作为一门综合性的技术，为这三种工程对象服务。随着科学技术的发展，以及电子技术、测试技术、激光技术等相互渗透，机械学科及电工学科已慢慢向多学科综合方向发展。单纯的机械产品或电器产品将会越来越少，今后机电结合的技术将在机械行业和电工行业中占主导地位。

### 三、机电一体化的相关技术

机电一体化包括软件和硬件两方面技术。硬件是由机械本体、传感器、信息处理单元和驱动单元等部分组成。因此，为加速推进机电一体化的发展，必须从以下几方面着手。

#### （一）机械本体

机械本体必须从改善性能、减轻重量和提高精度等几方面考虑。

1. 减轻重量 现代机械产品一般都是采用钢铁材料为主制造的。为了减轻重量，除了在结构上加以改进外，主要应考虑利用非金属材料。只有机械本体减轻了重量，才有可能实现驱动系统的小型化，在控制方面才能够改善快速响应特性、减少消耗能量、提高效率。

2. 提高刚度 包括静态刚度、动态刚度以及导向面、配合面的刚度问题，必须全面考虑。要保证在减轻重量的情况下，不降低刚度。

3. 实现通用化、标准化和系列化 从改进组合单元结构设计和进行性能分析入手，使零



4

部件具有互换性，并提高使用和维修水平。如在机械加工中，采用组合夹具、可调夹具等。

4. 提高系统整体的可靠性 因为机电一体化产品不是普通的单一产品，它构成一个系统。一处出现故障，会造成整个系统停止运行。因此必须形成维修和保养方便、出现问题时易于寻找故障部位的系统。

仅从机械方面来讲，开展可靠性设计及普及该项技术的应用；加强对机电产品基础元器件的失效分析研究；并在提高元器件可靠性水平的同时，开展对整机系统可靠性的研究。机电一体化产品的设计从静强度设计到动强度设计，同时采用损伤容限设计、动力优化设计、摩擦学设计、防蚀设计、低噪声设计等。

### (二) 传感技术

根据用途可以分为检测自身内部信息的传感器和检测对象的外部传感器。检测装置由检测、转换、指示、信息处理、记录等部分组成。传感信息的方式有：光、电、流体、机械等。评价指标有：功能范围、灵敏度、分辨率、耐环境性、抗干扰性、可靠性等。此外，还有加工前、加工中、加工后检测等系统化的问题，以及模拟系统、数字系统（包括混合系统）等统一化的问题等。

传感器的问题集中在提高可靠性、提高灵敏度和精确度方面。提高可靠性与防干扰有直接的关系。为了避免电干扰，目前有采用光纤电缆传感器的趋势。对外部信息传感器来说，目前发展非接触型检测技术。

传感器向高级化发展，主要是实现元件化和智能化。所谓功能元件，就是用一片集成电路实现传感器和信息处理一体化。进一步建立起可以互换的传感器功能模块系列，建成传感器群的分级结构。智能化就是发展具有自诊断、自修正功能的传感器。

### (三) 信息处理技术

信息处理设备包括计算机主机或可编程控制器及与其配套的输入输出设备、显示器和外部存储器（磁盘等）。机电一体化是与微电子学的显著进步、信息处理设备（特别是微型计算机）的普及应用分不开的。为进一步发展机电一体化，必须提高信息处理设备的可靠性，包括模/数转换设备的可靠性和分时处理时输入输出可靠性，提高处理速度，并解决抗干扰及标准化问题。

在研制小型、大容量、高速处理计算机同时，还需要开发高速、小功率运算部件。实现复杂的多信息联机处理，使硬件快速动作，则主要依赖于信息处理部分的高速处理功能。

### (四) 驱动技术

驱动方式按动力源的不同可分成：液压、气动、电动三种。前两种驱动系统比较复杂，包括泵、阀、液压缸（气缸）、过滤器、管径等。目前存在着功能可靠性、标准化以及减轻重量、减小体积等问题。

电机作为驱动机构已被广泛采用，但目前在快速响应和效率等方面还存在一些问题。目前正在积极发展内装有编码器的电机，以及控制专用组件—传感器—电机三位一体的伺服驱动单元。

### (五) 接口技术

将组成机电一体化产品各部分连接起来的元件就是接口。如在机械设备与微型机的连接中，由于机械动作相对微型机工作速度是极其缓慢，微型机输出的信号是以并行方式传递脉

冲数字代码，输入的信号是以数字脉冲形式，而机械设备所接受的电流或电平形式的信号，以及传感器从机械设备所检测并反馈给微型机的信号，都与微型机输出和输入信号存在很大的差别；这都要求解决两者间的接口电路。接口电路要完成两个作用，其一是信息交换，指的是工作速度快的计算机与工作速度慢的外围设备之间进行信息交换时所需要的接口。另一种接口是指电平转换电路，指的是同类型元器件之间进行连接时所需要的接口。

接口采用同一标准规格，不仅给信息传递和维修带来方便，而且可以简化设计。采用通用接口可使成本下降，起码的要求是输入/输出接口要标准化。为了与计算机连接，必须使数据传送的格式标准化、规格化。

目前正致力于发展低成本、高速串行接口，解决信号电缆非接触化，光导纤维以及光栅器的大容量化、小型化、标准化等问题。

#### (六) 软件技术

软件与硬件必须协调一致地发展。为了减少软件的研制成本，提高生产维修的效率，要逐步推行软件标准化，包括：子程序标准化，程序模块化，软件程序的固化，推行软件工程等。

此外，数据库的建立，作业描述语言的开发，语言理解、文字理解等软件问题，也是机电一体化中应予关注的问题。

### 第三节 机电一体化的发展前景

#### 一、机械技术发展的总趋势

关于机械技术的发展，可以概括如表1-2所列的四个阶段。在这四个阶段中分别赋予机械不同的功能。进入机电一体化阶段，就是使机械技术智能化，更好地代替人进行各项工作。

表1-2 机械技术的发展

阶 段	机 械 技 术 的 发 展		赋予机械的功能
第一阶段	机构的发明	凸轮、齿轮、联轴节、轴承、传动带、螺钉、螺母等	作业功能
第二阶段	使作业机构动作的动力机械的发明	水力、风力、蒸汽动力、内燃机、电动机等	动力功能
第三阶段	自动控制技术的发明	传感器、伺服系统等	测定功能
第四阶段	微电子学的发明	大规模集成电路、微型计算机、各种接口等	智能功能

机电一体化的前身，即机械的电子化。它首先把规定的功能变换成机械零部件，然后再与电子元件有机地结合起来或被电子元件所取代，制成完整的机械，实现比以前更加优越的功能（或性能价格比）。这里所谓的变换，既包括部分机械功能部件向电子功能部件的转换，也包括全部功能部件的转换。电子功能部件是指微处理器、运算放大器、A/D与D/A变换等等。

目前，机械技术已经发展到广泛采用微型计算机的阶段。今后将不断出现“具有神经系统的机械”或实现“机械的智能化”。实现这种目标的关键在于以集成电路为核心的电子技术的革新。

日本的工业技术开发部门早在1981年就明确提出**复合化技术、信息技术和微细加工技术**乃是今后发展的三大方向。所谓复合化技术，乃是以过去已有的技术为基础，根据多种多样的需要，通过综合或复合等手段来扩充和加强从未有过的功能而产生的新技术，机电一体化就是一个典型例子。所谓信息技术，就是以计算机为代表的硬件和软件技术。由于超大规模集成电路芯片和新功能元件的发展，即将跨入第五代计算机的时代，实现高度的计算机智能化。今后计算技术的发展，将在图象识别机器上看到文字识别和声音识别的景象，计算机完全有可能取代人的五官功能，从而出现接近人类智慧的高度智能机器人。微细加工技术是在尖端技术领域里进一步推进精致化、微小化和高密集化。可以预见到21世纪，市场上将会出现加工精度达到原子或分子水平的机床，加工处理技术也会在精密测量等方面有较大进展。

## 二、机电一体化技术的发展方向

研究机电一体化技术的先驱者渡边茂先生在以“机电一体化技术的将来”为题所发表的特别讲演中，指出了以下七个方面的发展方向：1) 复合化；2) 小型化和轻量化；3) 高速化；4) 移动化；5) 智能化；6) 层次化和系统化；7) 全盘化。

### (一) 复合化

关于复合化，如在FMS基础上发展起来的FMC就是以这种复合化概念作为系统设计的基本条件，并且可在同一地点同时处理加工、装配、检测等两种以上的工作。通过这种复合处理，便可在同一空间内将工件的停留和搬运空间压缩到最低限度，以期实现多品种小批量生产的自动化和高效化。

### (二) 小型化和轻量化

小型、轻量化是指与微细加工技术相类似的一种表现。由于引进微电子技术，实现机电一体化，对提高机械的精度和功能是十分有利的。进一步来说，将机械的重量减轻到与人体重量相称的水平，乃是今后机电一体化技术发展的基本要求。

### (三) 高速化

高速化是现在所有技术开发的基本目标，在机电一体化领域中尤为重要。妨碍机电一体化产品实现高速化的原因有电子方面的，也有机械方面的。例如工业机器人就有动作速度低和粗笨等问题，其原因是计算机控制系统的速度低，或者为避免机械系统发生松动或摩擦等问题而不得不采用低速机械结构。

### (四) 移动化

移动化是指机械本身的移动。从历史的角度来看，现有的运输机械已是古老的技术。可从机械进化的意义来说，过去一直被固定的机械，今后通过移动也能提高效率。十几年前就有“能移动的机器人”问世，最近又有自动搬运车在机械制造厂中进行着工件、工具和机械组件等的自动搬运或自动交换。在交通运输工具方面，有无人驾驶的车辆，但其运行控制或信息传输以及计算机控制系统等，乃是由于电子学的发展才得以实现的。

### (五) 智能化

智能化就是把人的智慧纳入机械之中，使之发挥更好的作用。由于微型机的普及，才有可能在大型计算机的终端，为了分散处理其主机功能而设置智能终端。这个终端大概就是智能化的先驱者，它的基础便是大容量存储元件的小型化和低价格。由于集成电路特别是专用集成电路的发展，智能化将越来越高级发展。

在人与机器对话方面，需要有人机接口。由于计算机技术的发展，出现了能代替人的五官功能的电子机械。与此同时，由于图象识别技术的发展，以及通过声音输入输出实现与机器的对话，或者为人眼服务的物体识别及文字识别技术的进步，即将出现能代替多数人劳动的机械。机械制造厂通过采用这种智能化的电子技术，便可逐步实现工厂的自动化和无人化。

#### （六）层次化和系统化

层次（分级）化，在计算机词汇中是经常使用的，其原意是指“根据不同内容将对系统各要素发出的指令和进行的监督分为若干层次，使管理和控制功能与这些层次相对应的系统”而言的。在一般情况下，如果系统变大，为了使系统具有柔性而且能够迅速地运行，则将系统分为若干层次，使系统功能分散开来，能进行较好的过渡而安全地运转。把层次化系统联结起来则是软件。

层次化也是与系统设计有关的一种技术，在机电一体化技术中也是不可缺少的。

#### （七）全盘化

全盘化，原文叫“全际化”，是十几年前在研究开发方面被称之为“学际化”（学科边际之意，常译为边缘科学）的广义扩展。所谓边缘科学是介于两种以上学科之间并把这些学科结合起来的一种科学。即由不同领域的专家、学者联合起来解决某些复杂问题。

全盘化是一种非常高阶的指导方针，目前还很难理解其深远的意义，但我们可以看到机电一体化技术开放应该打破厂与厂或行业与行业的界限。例如在机械制造厂和电子机器制造厂之间，通过边缘科学进行合作，今后可望有较大的发展。

### 三、机电一体化技术对机械工业的影响

机械零部件向电子元器件的过渡和转化，以及机械零部件与电子元器件的有机结合，给机械（或最终产品）本身带来一场革命。小型、轻量和高可靠性的机械必将大量涌现出来。通过功能的复合还会出现过去只有机械零部件所无法满足的各种新功能和性能，大大提高了机械的性能价格比，更好地满足用户需要。同时还将开辟电子化的机械设或产品的新市场。

这种形势的出现，必将进一步促进工业企业的设备更新换代。例如美欧许多工业先进的国家，首先采用降低成本（合理化、省力、提高质量和材料利用率）的手段，便是发展群控系统（DNC）和柔性制造系统（FMS）。发展这些系统的先决条件，乃是积极引进工业机器人和数控机床等先进设备，使系统电子化和自动化。从这个意义来说，机电一体化技术不仅改造了设备（系统）本身，而且也会改变企业面貌。

在这种情况下，机械加工将会大幅度地减小，生产组织和劳动组织也要作相应地调整或改进。伴随机械产品电子化的进展，机械工业领域里必然会有电子机器制造厂参加，它们之间的关系不仅是生产上的协作关系，而且是密切结合甚至形成整体的关系。即在一个工厂或公司系统中，既制造机械产品又生产电子器件，乃至两者结合的机电一体化产品。

众所周知，数控机床经过几十年的发展，已经取得了辉煌的成就，数控机床的产值占机床总产值的比例逐年上升。数控技术正向无屑成形设备、锻压设备、冲剪设备和电腐蚀加工设备等非切削加工领域扩展。在数控机床上有效地利用传感功能和信息处理功能，使机床智能化来提高加工性能和功能，将是新一代机电一体化的产品。将自动化、柔性和加工控制等技术融合在一起，构成柔性制造系统。并通过它实现无人生产系统或无人化工厂，便可有效

地进行多品种小批量生产,更好地满足社会多样化的需要。日本FANUC(发那科)公司下属的高士通工厂就是这种工厂的雏型。该厂总投资为3700万美元,面积仅为20000m<sup>2</sup>,职工只有100人,而每年却能生产高达8400万美元的机器人和小型机床。该厂的加工车间,包括机加工、装配、焊接和检验等几个工段。主要特征是机加工工段,可日夜连续进行无人看管的生产。其柔性制造系统包括127个加工单元,而每个加工单元都配备有一台或多台CNC机床,一台监控器和一个相适应的机器人,以及工件托盘交换器等,从而实现了高度自动化的生产。

#### 四、机电一体化技术对机械产品的影响

机电一体化技术改变了机械产品的面貌,达到功能增多、体积减小、重量减轻、可靠性提高、性能价格比改善等目的。机电一体化技术对机械产品带来的影响可以具体归纳为以下几个方面。

##### (一) 提高性能、扩展功能

机电一体化赋予机械产品多种功能。例如过去某些精密机床利用机械校正机构,只能校正机床的系统误差。今日的数控机床充分发挥计算机的威力,运用时间序列分析和精度创成等理论建立数学模型,已有可能实时预报包括随机误差在内的机床误差,然后自动校正,从而达到前所未有的精度。采用对阻尼进行预报,一旦接近临界值时就自动调整切削用量,这又可能出现永不颤振的机床,保证很高的生产率和良好的加工表面。在过去常由不同的机床分别进行粗、精加工,而今日的数控机床,既可进行大功率的重切削,又能进行高精度的精加工,从而保证了工序的高度集中。由于其高性能和多功能,深刻地改变了传统机床的结构布局,冲破了传统机床按类别的划分。

##### (二) 简化结构

由于采用微处理机和集成电路以及新型的传动技术,代替了原有笨重的电气控制柜和驱动装置,使机电一体化的产品体积减小、零部件少而结构简化。

例如传统的电机产品是基于电磁原理而设计的,而且是以单个的电机供货,需要用户自行解决电机调速、控制等问题。机电一体化的电机产品,有的是用微电子、微机技术与电机相结合而开发的产品;有的是以微电子、微机技术为主,取代了大部分电机的功能,是电子新产品。例如:无换向器电机将电子控制部件与传统的电机结合,取消了传统的换向电刷,简化了结构,从而大大提高了电机寿命,并缩小了体积。在电机中采用单片微处理机,控制电机的功率因数,根据负荷情况调节电压,解决电机的“大马拉小车”的问题,在空载时可提高效率30%~40%,满载时可提高效率最高达10%。矢量控制异步电机,采用微型机对交流异步电机实现矢量控制,既可使异步电机具有直流电机一样的调节特性,又具有结构简单可靠,电机容量不受限制,转动惯量小、体积小、效率高等一系列优点。如固态自整角机和固态旋转变压器,就是将微电机与微处理机紧密相结合的产品。它既有原有自整角机和旋转变压器的坚固可靠,又能以数字量信息输出,改变了原有的模拟量输出,开发了新型的S/D、R/D转换技术及装置;数字式测速电机,已由传统的电机结构,改变为以直接提供数字信息的电机电子组件为主的电子结构,可直接与计算机及各类数字控制系统相连接。

##### (三) 提高可靠性

在提高电子元件质量、可靠性的前提下,机电一体化产品可以提高耐久性,减少故障率。另一方面由于赋予其自动监视诊断功能,并采取安全联锁控制,过负荷和失控保护,停

电对策，提高了设备的安全可靠性。

在火电设备中，锅炉汽轮机的协调控制系统、汽轮机的电液调节系统、自启停系统、安全保护系统等，在采用计算机后，不仅提高了机组运行的灵活性和经济性，而且使机组保护功能发展为具有预报警测、自动保护的功能，使火电设备控制逐步走向全自动控制。输电系统的继电保护系统采用微机后，解决了因电流互感器饱和而引起的保护误动作，使之具有电压差保护、失步检查、自动重合闸功能。大型轧机多级计算机分散控制系统，解决了对大型、高速、冷热轧机的多参数测量、控制和保证系统可靠性的问题。晶闸管直流传动装置使用了微机以后，实现了包括晶闸管触发、触发失效，故障自诊断，自复原逻辑限流等一系列综合功能。因而，机电一体化的产品大大地提高了原机械产品的可靠性和耐久性。

#### （四）节约能源

机电一体化的产品，可以节约材料、节约能源。例如目前我国各类电风扇年产量在 200 万台左右，如每台电扇的调速器和定时器（现常用电磁机械式）用电子调速器和定时器代替，估计每台风扇可节电 5W 以上，全年以用扇 100 天，每天开扇 6 h 计，则每年可节约用电量 600 万 kW·h，还可节省大批铜材和钢材。再如传统的电焊机以电磁原理和手工操作为基础，即使是一般的自动电焊机，其动作过程也仅为简单的机械动作和相应的控制。这类电焊机耗能多、效率低、质量不易保证。采用微型机技术后，发展新颖的电子控制电源以取代传统的焊接电源，实现焊接电源的节能、高效、小型化、多样化。

#### （五）操作改善

产品采用计算机等控制后，由于具有数字显示、多种信息的高度集中显示，减少了操作按钮及手柄，带有程序控制功能等，因而可以改善设备的操作性能，减少操作人员的训练时间，以达到任何人均可使用的简单程度。

## 第二章 机械系统

### 第一节 机械系统建模中基本物理量的描述

#### 一、质量和惯量的转化

质量  $m$  一般是指储有直线运动动能的部件属性，它与电气网络中的电感或电容相似。图 2-1 是力-质量系统，如不考虑其它阻力的情况下可建立如下方程：

$$F = ma = m \frac{d^2x}{dt^2} = m \frac{dv}{dt} \quad (2-1)$$

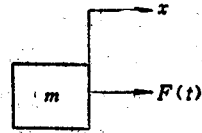


图 2-1 力-质量系统

转动惯量  $J$  表示具有转动动能的部件属性。一个给定的转动惯量取决于部件相对于转动轴的几何位置和部件的密度。

在一个机械系统中，经常是同时由数个具有一定质量和转动惯量的直线和旋转运动的部件组成，而且它们对被研究的元件参数都将有不同程度的影响，故需要将各运动元件的质量和转动惯量转化到被研究的元件上。转化的原则是转化前后系统瞬时动能保持不变，即：

$$E_k = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k m_i v_i^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=k+1}^n J_{Si} \omega_i^2 \quad (2-2)$$

式中  $n$  ——系统中所有运动元件的数目；

$k$  ——系统中移动元件的数目；

$v_i$  ——元件  $i$  的重心  $s$  的速度；

$J_{Si}$  ——元件  $i$  对其重心轴  $S$  的转动惯量；

$m_i$  ——任意元件  $i$  的质量；

$\omega_i$  ——元件  $i$  的瞬时角速度。

如果所选定的被研究元件  $i$  是转动的，并且向这一元件上转化，则其瞬时动能为：

$$E_k = \frac{1}{2} J_{Si} \omega_i^2 \quad (2-3)$$

如果所选定的被研究元件  $i$  是移动的，并且向这一元件上转化，则瞬时动能为：

$$E_k = \frac{1}{2} m_{ic} v_i^2 \quad (2-4)$$

式中  $m_{ic}$  ——转化质量（等效质量）；

$J_{ic}$  ——转化惯量（等效转动惯量）。

例 2-1 图 2-2 所示为机床传动机构原理图。已知齿轮 1、2、3、4 及丝杠 5 和工作台 6，其转动惯量  $J_1$ 、 $J_2$ 、 $J_3$ 、 $J_4$ 、 $J_5$ ，各齿轮的齿数为  $z_1$ 、 $z_2$ 、 $z_3$ 、 $z_4$ ，丝杠螺距为 12mm，求工作台 6 的转化质量。

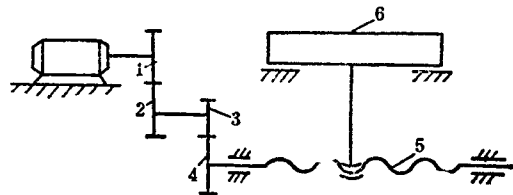


图 2-2 机床传动机构示意图

1、2、3、4—齿轮 5—丝杠 6—工作台

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} m_0 v_0^2 &= \frac{1}{2} J_1 \omega_1^2 + \frac{1}{2} J_2 \omega_2^2 + \frac{1}{2} J_3 \omega_3^2 + \frac{1}{2} J_4 \omega_4^2 + \frac{1}{2} J_5 \omega_5^2 + \frac{1}{2} m_0 v_0^2 \\ m_0 v_0 &= J_1 \left( \frac{\omega_1}{v_0} \right)^2 + J_2 \left( \frac{\omega_2}{v_0} \right)^2 + J_3 \left( \frac{\omega_3}{v_0} \right)^2 + J_4 \left( \frac{\omega_4}{v_0} \right)^2 + J_5 \left( \frac{\omega_5}{v_0} \right)^2 + m_0 \left( \frac{\omega_0}{v_0} \right)^2 \\ &= J_1 \left( \frac{\omega_1}{v_0} \right)^2 + (J_2 + J_3) \left( \frac{\omega_2}{v_0} \right)^2 + (J_4 + J_5) \left( \frac{\omega_4}{v_0} \right)^2 + m_0 \\ v_3 &= \frac{z_2 z_4}{z_1 z_3} \omega_5 = \frac{2\pi}{12} \omega_4 = \frac{2\pi}{12} \omega_2 \frac{z_3}{z_4} = \frac{2\pi}{12} \omega_1 \frac{z_3}{z_4} \frac{z_1}{z_2} \end{aligned}$$

则

$$m_0 v_0 = 3.65 \left[ J_1 \left( \frac{z_2 z_4}{z_1 z_3} \right)^2 + (J_2 + J_3) \left( \frac{z_4}{z_3} \right)^2 + (J_4 + J_5) \right] + m_0$$

## 二、弹性系数的转化

一般认为位移弹簧储有位能，这与电气网络中的电容或电感相似。当弹簧变形很小时可看成线性，其表达式为：

$$F(t) = kx(t) \quad (2-5)$$

式(2-5)的物理量模型见图2-3，这是一个力-弹簧系统。

当加一转矩至圆棒或轴时，圆棒或轴的弹性可用扭力弹簧系数  $k$  表示，单位角位移的转矩为  $T(t)$ ，其表达式为：

$$T(t) = k\theta(t) \quad (2-6)$$

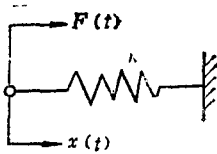


图2-3 力-弹簧系统

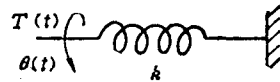


图2-4 转矩-扭力弹簧系统

转矩-扭力弹簧系统见图2-4。

系统中各环节的弹性变形将如何影响被研究的元件，这里弹性系数转化如下：

$$k = \sum_{j=1}^n k_j i_j^2 \quad (2-7)$$

式中  $k$  ——转化弹性系数；

$k_j$  ——各构件的弹性系数；

$i_j$  ——各构件到被研究元件间的传动比。

此式是对旋转传动系统而言的，如果是移动系统则需要变换。

串联弹簧的等效计算见图2-5，其数学表达式为：

$$k = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}$$

并联弹簧的等效计算见图2-6，其数学表达式为：

$$k = k_1 + k_2$$





图2-5 串联弹簧

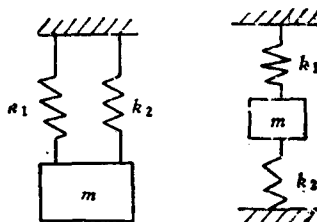


图2-6 并联弹簧

### 三、阻尼系数的转化

机械系统在工作过程中，相互运动的元件间存在着阻力，并以不同的形式表现出来，如摩擦阻力、流体（气体或液体）的阻力以及负载阻力（诸如切削力或干扰力），这些在建立物理模型时都需要进行转化，转化为与速度有关的粘滞阻尼力。

#### （一）直线运动的摩擦

如果两个部件彼此相对运动，则相互间刚有运动趋势，就有摩擦力存在。物理系统的摩擦一般是非线性的。接触面之间的摩擦力特性往往取决于表面性质、表面压力以及相对运动速度等，所以很难准确地用数学形式描述。

一般摩擦力可分为三种类型。图2-7表示出线性与非线性摩擦力的函数关系。

1. 静摩擦 见图2-7 a，静摩擦存在于物体运动速度为零但运动立刻就要发生时。静摩擦力的方向与立刻就要运动的方向相反，其数学表达式为：

$$F(t) = \pm F_s = 0 \quad (2-8)$$

2. 动摩擦 包括库仑摩擦、干摩擦，见图2-7 b。这种摩擦只存在于物体正在运动时，动摩擦系数是一个与速度大小无关的常数，这个常数的正负取决于速度的方向，其数学表达式为：

$$F(t) = F(\dot{x}/|\dot{x}|) \quad (2-9)$$

3. 粘滞摩擦 见图2-7 c、d。这种类型的摩擦表示一种阻滞力，阻滞力与该装置的速度大小成正比（线性）见图2-7 c。也有一种是非线性，见图2-7 d，其数学表达式为

$$F(t) = f\dot{x} \quad (2-10)$$

式中  $f$  ——粘滞阻尼系数。

#### （二）旋转运动的摩擦

直线运动的三种摩擦均适用于转动。因此式（2-8）、式（2-9）、式（2-10）分别转化为：

$$T(t) = \pm F_s \theta = 0 \quad (2-11)$$

$$T(t) = F(\dot{\theta}/|\dot{\theta}|) \quad (2-12)$$

$$T(t) = f\dot{\theta} \quad (2-13)$$

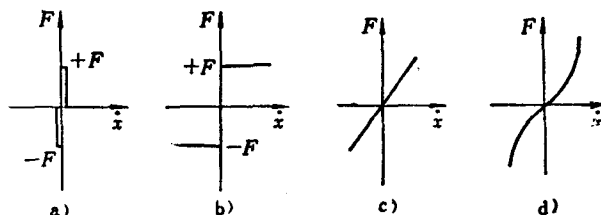


图2-7 摩擦力的函数关系

a) 静摩擦 b) 库仑摩擦 c) 粘滞摩擦（线性）  
d) 粘滞摩擦（非线性）