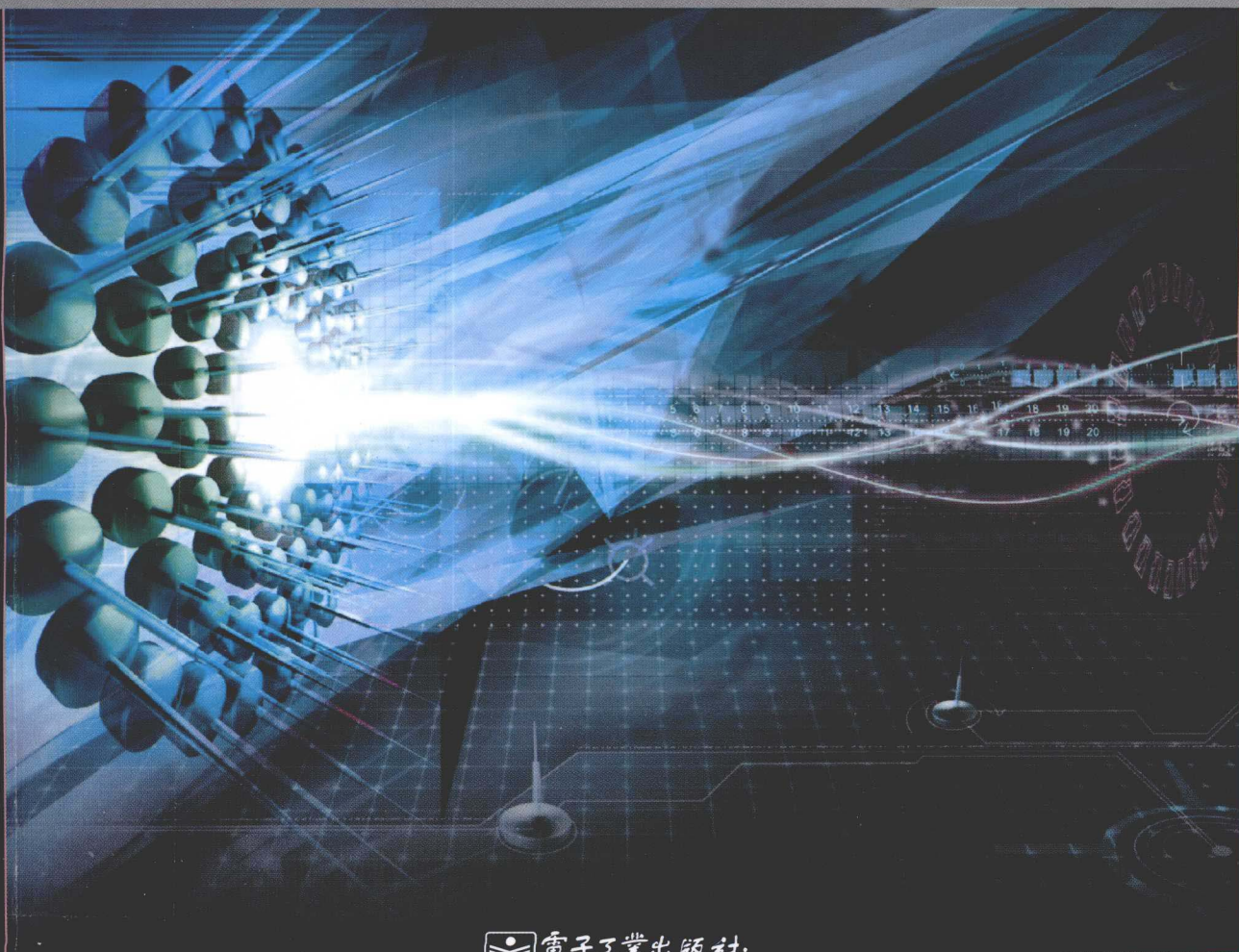


高等院校精品教材系列

# 机电一体化系统设计

◎ 张保成 主编



高等院校精品教材系列

# 机电一体化系统设计

张保成 主编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书详细地介绍了机电一体化系统的功能、构成、原理和机电一体化的共性关键技术，并系统地介绍了机电一体化系统中机械系统、伺服驱动系统、检测系统、控制系统的设计方法。最后通过典型机电一体化产品的实例，进一步阐述了机电一体化系统设计的分析与综合。

全书共7章，第1章绪论；第2章机械系统设计；第3章传感检测系统选择与设计；第4章控制系统设计；第5章伺服系统选择与设计；第6章机电一体化系统机电有机结合分析与设计；第7章典型的机电一体化装置。全书内容清晰、结构紧凑、实用性强。为了方便教师课堂教学和学生学习，本书配有PPT等教学资源，相关章节配有思考题。

本书可作为普通高等院校机械电子工程、机械设计制造及其自动化、数控机床、汽车等相关专业的教材，也可选作相关专业高职高专、成人教育的教材，亦可供相关工程技术人员参考。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

### 图书在版编目（CIP）数据

机电一体化系统设计/张保成主编. —北京：电子工业出版社，2012.9

高等院校精品教材系列

ISBN 978-7-121-17789-7

I. ①机… II. ①张… III. ①机电一体化—系统设计—高等学校—教材 IV. ①TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 178087 号

策划编辑：严永刚

责任编辑：史鹏举

印 刷：三河市鑫金马印装有限公司

装 订：

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1 092 1/16 印张：13.5 字数：346 千字

印 次：2012 年 9 月第 1 次印刷

定 价：29.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn)，盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线：（010）88258888。

# 前 言

随着机械技术、微电子技术和信息技术的飞速发展，机械技术、微电子技术和信息技术间相互渗透的特征越来越突出。“机电一体化”作为新兴的交叉学科，是机械工业的重要发展方向。所谓“机电一体化”并不是机械技术、微电子技术和信息技术的简单组合，而是相互取长补短、有机结合，以实现系统构成及其性能的最佳化。“机电一体化”是通过实现系统或产品的短、小、轻、薄和智能化，从而达到节省能源、节省材料，实现多功能、高性能和高可靠性目标的根本手段。本书的最大特点是从机电有机结合的角度较系统地阐述了机电一体化系统的设计原理与设计方法，充分体现了“以机为主、以电为用、机电有机结合”的原则。

作为教材，本书在论述中力求简明扼要，前后连贯；在内容安排上，以系统分析和设计为主线。考虑到机电一体化专业的课程设置还在不断地改进，以及课程的系统性，本书编入了步进电机、伺服电机的工作原理等内容，因此在讲授时，可根据学生的实际情况适当删减。

全书共7章。第1章为概述。第2章介绍机械系统的设计，包括传动机构、支承部件、数控机床的机械结构等。第3章介绍了传感检测系统的选择与设计，包括机电一体化系统中常用的传感器、传感检测系统的设计方法、传感器与计算机的接口技术，以及传感器在数控机床中的应用实例。第4章阐述了计算机控制系统的设计方法，内容涉及控制器数学模型的建立、数字控制器的模拟化和离散化设计方法，并给出了典型的计算机数控实例。第5章分别讨论了伺服系统中步进电机、伺服电机的工作原理，阐述了电动机的驱动与控制方法。第6章针对机电一体化系统中稳态设计和动态设计方法进行了详细的阐述。第7章分别介绍了喷涂机器人和汽车防抱死制动系统机电一体化装置，通过具体实例对机电一体化系统设计方法进行了综合，以达到学以致用目的。

本书配有PPT等教学资源，可登录电子工业出版社华信教育资源网([www.hxedu.com.cn](http://www.hxedu.com.cn))，免费注册、下载。

本书是编者多年来从事教学和实践工作的概括与总结，同时又博采了目前各有关教材和著作的精华。全书由张保成教授主持编写和负责统稿，参加本书编写工作的有张保成（第1章）、刘璐（第2章）、史源源（第3章）、王智兴（第4章）、郭彦青（第5章）、赵鹏飞（第6章）、王春花（第7章）。樊文欣教授审阅了全部书稿，并给予了指导性的编写意见。

本书的编写得到电子工业出版社的热情帮助，中北大学教务处给予了大力支持，在此表示真诚的谢意！本书在编写过程中参考和引用了许多前人优秀教材与研究成果的结晶和精华，在此向本书所参考和引用资料、文献和教材的编著者表示最诚挚的敬意和感谢！

本书力求实现学用一致、理论联系实际、“教、学、用”一体化等教学特色，又要注重对大学生素质和技能的培养和提高，所以编写难度较大。鉴于编者的知识水平有限和经验不足，书中的错误、疏漏等不足之处难免，恳请读者和专家批评指正。

编 者

## 反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 机电一体化的基本概念 .....	1
1.2 机电一体化的发展概况 .....	2
1.3 机电一体化系统的构成 .....	3
1.4 机电一体化系统的共性关键技术 .....	4
思考题 .....	6
<b>第 2 章 机械系统设计</b> .....	7
2.1 概述 .....	7
2.2 传动机构的设计 .....	7
2.3 支承部件 .....	28
2.4 数控机床的机械结构 .....	47
思考题 .....	55
<b>第 3 章 传感检测系统选择与设计</b> .....	57
3.1 概述 .....	57
3.2 机电一体化系统常用传感器 .....	63
3.3 传感检测系统设计方法 .....	77
3.4 传感器检测系统与计算机的接口 .....	84
3.5 传感器在数控机床中的应用 .....	92
思考题 .....	95
<b>第 4 章 控制系统设计</b> .....	96
4.1 概述 .....	96
4.2 控制系统的数学模型 .....	102
4.3 典型数字控制器的设计 .....	109
4.4 计算机控制技术 .....	118
4.5 控制量输出接口设计 .....	125
4.6 典型计算机数控系统介绍 .....	131
思考题 .....	136
<b>第 5 章 伺服系统选择与设计</b> .....	138
5.1 概述 .....	138
5.2 步进电机 .....	143
5.3 直流伺服电机与驱动 .....	154

5.4 交流伺服电机 .....	162
思考题 .....	166
<b>第 6 章 机电一体化系统机电有机结合分析与设计 .....</b>	<b>168</b>
6.1 机电有机结合设计概述 .....	168
6.2 机电一体化系统稳态设计考虑方法 .....	169
6.3 机电一体化系统动态设计考虑方法 .....	175
思考题 .....	185
<b>第 7 章 典型的机电一体化装置 .....</b>	<b>186</b>
7.1 喷涂机器人设计 .....	186
7.2 汽车防抱死制动系统 (ABS) 设计 .....	191
<b>参考文献 .....</b>	<b>207</b>

# 第1章 绪 论

## 1.1 机电一体化的基本概念

机电一体化又称机械电子学，英文称为 Mechatronics，它是由英文 Mechanics（机械学）的前半部分与 Electronics（电子学）的后半部分组合而成，机电一体化的概念起源于日本《机械设计》杂志的副刊（1971年），所给出的解释是：“机电一体化是在机械主功能、动力功能、信息功能和控制功能上引进微电子技术，并将机械装置与电子装置用相关软件有机结合而构成的系统的总称”，因此其字面上表示机械学和电子学两个学科的综合，但是机电一体化并不是机械技术和电子技术的简单组合或者拼凑，而是有着自身体系的新型学科。

到目前为止，就机电一体化这一概念的内涵，国内外学术界还没有一个完全统一的表述。一般认为，机电一体化是以机械学、电子学和信息科学为主的多门技术学科在机电产品发展过程中相互交叉、相互渗透而形成的一门新兴边缘性技术学科。这里面包含了三重含义：首先，机电一体化是机械学、电子学与信息科学等学科相互融合而形成的学科。其次，机电一体化是一个发展中的概念，早期的机电一体化就像其字面所表述的那样，主要强调机械与电子的结合，即将电子技术“融入”到机械技术中而形成新的技术与产品。机电一体化系统与传统机械产品、电气化机械产品和一般电子产品不同。后者的主要支撑技术是机械技术、电工技术，主要功能是代替或放大人的体力。但是，机电一体化系统除了将微电子装置代替机械部件的功能外，还能够赋予产品新的功能。如自动监测、自动处理信息、自动调节与控制、自动诊断与保护、自动显示等，已不仅仅是将人的体力放大，还是人的肢体、感官与大脑的延伸，具有“智能化”的特征，这是机电一体化系统与机械电气化产品在功能上的根本区别。随着机电一体化技术的发展，以计算机技术、通信技术和控制技术为特征的信息技术“渗透”到机械技术中，丰富了机电一体化的含义，现代的机电一体化不仅仅指机械、电子与信息技术的结合，还包括光（光学）机电一体化、机电气（气压）一体化、机电液（液压）一体化、机电仪（仪器仪表）一体化等；最后，机电一体化表达了技术之间相互结合的学术思想，强调各种技术在机电产品中的相互协调，以达到系统总体性能最优。换句话说，机电一体化是多种技术学科有机结合的产物，而不是它们的简单叠加。

现实生活中的机电一体化产品比比皆是。我们日常生活中使用的全自动洗衣机、空调及全自动照相机等，都是典型的机电一体化产品；在机械制造领域中广泛使用的各种数控机床、工业机器人、三坐标测量仪及全自动仓储设备等，也是典型的机电一体化产品；而汽车更是机电一体化技术成功应用的典范，目前汽车上成功应用和正在开发的机电一体化系统达数十种之多，特别是发动机电子控制系统、汽车防抱死制动系统、全主动和半主动悬架等。机电一体化系统在汽车上的应用，使得现代汽车的乘坐舒适性、行驶安全性及环保性能都得到了



很大的改善；在农业工程领域，机电一体化技术也在一定范围内得到了应用，如拖拉机的自动驾驶系统、悬挂式农具的自动调节系统、联合收割机工作部件（如脱粒清选装置）的监控系统、温室环境自动控制系统等。

## 1.2 机电一体化的发展概况

与其他科学技术一样，机电一体化技术的发展也经历了一个较长期的过程。有学者将这一过程划分为萌芽阶段、快速发展阶段和智能化阶段三个阶段，这种划分方法较为客观地反映了机电一体化技术的发展历程。

“萌芽阶段”，指 20 世纪 70 年代以前的时期。在这一时期，尽管机电一体化的概念还没有正式提出来，但人们在机械产品的设计与制造过程中，总是自觉或不自觉地将电子技术的初步成果来改善机械产品的性能。特别是在第二次世界大战期间，战争刺激了机械产品与电子技术的结合，出现了许多性能优良的军事用途的机电产品。这些机电结合的军用技术在战后转为民用，对战后经济的恢复和技术的进步起到了积极的作用。

“快速发展阶段”，指 20 世纪 70 年代到 80 年代这段时期。在这一时期，人们自觉地、主动地利用 3C（CAD/CAPP/CAM）技术的成果创造新的机电一体化产品。在这一阶段，日本在推动机电一体化技术的发展方面起了主导作用。日本政府于 1971 年 3 月颁布了《特定电子工业和特定机械工业振兴临时措施法》，要求企业界“应特别注意促进为机械配备电子计算机和其他电子设备，从而实现控制的自动化和机械产品的其他功能”。经过多年的努力，取得了巨大的成就，推动了日本经济的快速发展。其他西方发达国家对机电一体化技术的发展也给予了极大的重视，纷纷制定了有关的发展战略、政策和法规。我国机电一体化技术的发展也始于这一阶段，从 20 世纪 80 年代开始，原国家科委和原机械、电子工业部，分别组织专家根据我国国情对发展机电一体化的原则、目标、层次和途径等，进行了深入而广泛地研究，制定了一系列有利于机电一体化发展的政策法规，确定了数控机床、工业自动化控制仪表、工业机器人、汽车电子化等 15 个优先发展领域及 6 项共性关键技术的研究方向和课题，并明确提出要在 2000 年使我国的机电一体化产品产值比率（即机电一体化产品总产值占当年机械工业总产值的比值）达到 15%~20% 的发展目标。

从 20 世纪 90 年代开始的第三阶段，称为“智能化阶段”。在这一阶段，机电一体化技术向智能化方向迈进，其主要标志是模糊逻辑、人工神经网络和光纤通信等领域的研究成果应用到机电一体化技术中。模糊逻辑与人的思维过程类似，用模糊逻辑工具编写的模糊控制软件与微处理器构成的模糊控制器，广泛地应用于机电一体化产品中，进一步提高了产品的性能。例如采用模糊逻辑的自动变速箱控制器，可使汽车的行驶性能与司机的感觉相适应，用发动机的噪声、道路的坡度、速度和加速度等作为输入量，控制器可以根据这些输入数据给出汽车行驶的最佳方案。除了模糊逻辑理论外，人工神经网络（Artificial Neural Network, ANN）也开始应用于机电一体化系统中。ANN 是研究生物神经网络（Biological Neural Network）的结果，是对人脑的部分抽象、简化和模拟，反映了人脑学习和思维的一些特点。同时，ANN 是一种信息处理系统，它可以完成一些计算机难以完成的工作，如模式识别、人工智能、优化等；也可以用于各种工程技术，特别适用于过程控制、诊断、监控、生产管理、质量管理等方面。因此，ANN 在机电一体化产品设计中也十分重要。可以说，智能化

将是机电一体化技术发展的突出方向。

### 1.3 机电一体化系统的构成

传统的机械产品一般由动力源、传动机构和工作机构等组成。机电一体化系统是在传统机械产品的基础上发展起来的，是机械与电子、信息技术结合的产物，它除了包含传统机械产品的组成部分以外，还含有与电子技术和信息技术相关的组成要素。一般而言，一个较完善的机电一体化系统包括以下几个基本要素：机械本体，检测传感部分、电子控制单元、执行器和动力源，各要素之间通过接口相联系（见图 1.1）。

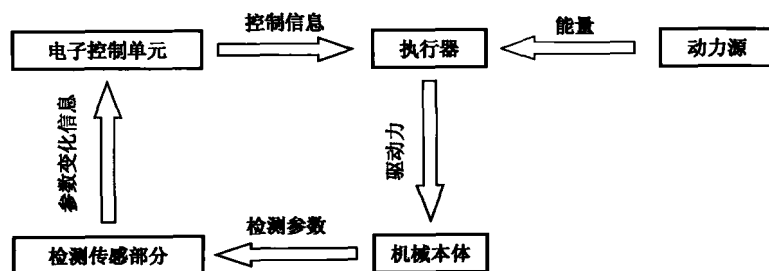


图 1.1 机电一体化系统的常见构成

(1) 机械本体。机械本体包括机架、机械连接、机械传动等。所有的机电一体化系统都含有机械部分，它是机电一体化系统的基础，起着支承系统中其他功能单元、传递运动和动力的作用。与单纯的机械产品相比，机电一体化系统的技术性能得到提高、功能得到增强。这就要求机械本体在机械结构、材料、加工工艺性以及几何尺寸等方面能够与之相适应，具有高效、多功能、可靠和节能、小型化、轻量化、美观等特点。

(2) 检测传感部分。检测传感部分包括各种传感器及其信号检测电路，其作用是监测机电一体化系统工作过程中本身和外界环境有关参量的变化，并将信息传递给电子控制单元，电子控制单元根据检测到的信息向执行器发出相应的控制指令。机电一体化系统要求传感器的精度、灵敏度、响应速度和信噪比高；漂移小、稳定性高；可靠性好；不易受被测对象特征（如电阻、磁导率等）的影响；对抗恶劣环境条件（如油污、高温、泥浆等）的能力强；体积小、重量轻、对整机的适应性好；不受高频干扰和强磁场等外部环境的影响；操作性能好，现场维修处理简单；价格低廉。

(3) 电子控制单元。电子控制单元又称 ECU (Electrical Control Unit)，是机电一体化系统的核心，负责将来自各传感器的检测信号和外部输入命令进行集中、存储、计算、分析，根据信息处理结果，按照一定的程序和节奏发出相应的指令，控制整个系统有目的地运行。电子控制单元由硬件和软件组成，系统硬件一般由计算机、可编程控制器 (PLC)、数控装置以及逻辑电路、A/D 与 D/A 转换、I/O 接口和计算机外部设备等组成；系统软件为固化在计算机存储器内的信息处理和控制程序，根据系统正常工作的要求编写。机电一体化系统对控制和信息处理单元的基本要求是：提高信息处理速度，提高可靠性，增强抗干扰能力以及完善系统自诊断功能，实现信息处理智能化和小型化、轻量化、标准化等。

(4) 执行器。执行器是根据电子控制单元的指令驱动机械部件进行运动，以完成特定的

功能。执行器是运动部件，通常采用电力驱动、气压驱动或液压驱动等几种方式。机电一体化系统，一方面要求执行器效率高、响应速度快，同时要求对水、油、温度、尘埃等外部环境的适应性好，可靠性高。由于几何尺寸上的限制，动作范围的制约，还需考虑维修方便性和标准化。由于电工电子技术的高速发展，高性能步进驱动、直流或交流伺服驱动电动机已大量应用于机电一体化系统。

(5) 动力源。动力源是机电一体化产品能量供应部分。其作用是，按照系统控制要求向机械系统提供能量和动力，使系统正常运行。提供能量的方式包括电能、气能和液压能等，其中大多以电能为主。除了要求可靠性好以外，机电一体化产品还要求动力源的效率要高，即用尽可能小的动力输入获得尽可能大的功率输出。

机电一体化产品的五个基本组成要素之间并非彼此无关或简单拼凑、叠加在一起。在工作中，它们各司其职，互相补充、互相协调，共同完成所规定的功能。一个完整的工作周期为：在机械本体的支持下，由传感器检测产品的运行状态及环境变化，将信息反馈给电子控制单元，电子控制单元对各种信息进行处理，并按要求控制执行器的运动，执行器的能源需求则由动力部分提供。在结构上，各组成要素通过各种接口及相关软件有机地结合在一起，构成一个内部合理匹配、外部效能最佳的完整产品。

例如，我们日常使用的全自动照相机就是典型的机电一体化产品，其内部装有测光、测距传感器，测得的信号由微处理器进行处理，根据信息处理结果控制微型电动机，由微型电动机驱动快门、变焦等机构，从测光、测距、调光、调焦、曝光到闪光及其他附件的控制，都实现了自动化。

又如，汽车上广泛应用的发动机燃油喷射控制系统，也是典型的机电一体化系统。分布在发动机上的空气流量计、水温传感器、节气门位置传感器、曲轴位置传感器、进气歧管绝对压力传感器、爆燃传感器、氧传感器等，连续不断地检测发动机的工作状况和燃油在燃烧室的燃烧情况，并将信号传给电子控制装置 ECU，ECU 首先根据进气歧管绝对压力传感器或空气流量计的进气量信号及发动机转速信号，计算基本喷油时间，然后再根据发动机的水温、节气门开度等工作参数信号对其进行修正，确定当前工况下的最佳喷油持续时间，从而控制发动机的空燃比。此外，根据发动机的要求，ECU 还具有控制发动机的点火时间、怠速转速、废气再循环率、故障自诊断等功能。

## 1.4 机电一体化系统的共性关键技术

如前所述，机电一体化是在传统技术的基础上由多种技术学科相互交叉、渗透而形成的一门综合性边缘性技术学科，所涉及的技术领域非常广泛。要深入进行机电一体化研究及产品开发，就必须了解并掌握这些技术。概括而言，机电一体化共性关键技术主要包括：检测传感技术、信息处理技术、自动控制技术、伺服驱动技术、机械技术和系统总体技术。

### 1.4.1 检测传感技术

检测传感技术，指与传感器及其信号检测装置相关的技术。在机电一体化产品中，传感器就像人体的感觉器官一样，将各种内、外部信息通过相应的信号检测装置感知，并反馈给控制及信息处理装置。因此，检测与传感是实现自动控制的关键环节。机电一体化要求传感

器能快速、精确地获取信息,并经受各种严酷环境的考验。但是由于目前检测与传感技术还不能与机电一体化发展需求相适应,使得不少机电一体化产品还不能达到满意的效果或无法实现可靠的设计。因此,大力开展检测与传感技术的研究,对发展机电一体化具有十分重要的意义。

### 1.4.2 信息处理技术

信息处理技术,包括信息的交换、存取、运算、判断和决策等,实现信息处理的主要工具是计算机,因此计算机技术与信息处理技术是密切相关的。计算机技术,包括计算机硬件技术和软件技术、网络与通信技术、数据库技术等。在机电一体化产品中,计算机与信息处理装置指挥整个产品的运行。信息处理是否正确、及时,直接影响到产品工作的质量和效率。因此,计算机应用及信息处理技术已成为促进机电一体化技术和产品发展的最活跃因素。人工智能、专家系统、神经网络技术等,都属于计算机与信息处理技术。

### 1.4.3 自动控制技术

自动控制技术范围很广,包括自动控制理论、控制系统设计、系统仿真、现场调试、可靠运行等从理论到实践的整个过程。由于被控对象种类繁多,所以控制技术的内容极其丰富,包括高精度定位控制、速度控制、自适应控制、自诊断、校正、补偿、示教再现、检索等。自动控制技术的难点,在于自动控制理论的工程化与实用化,这是由于现实世界中的被控对象往往与理论上的控制模型之间存在差距,使得从控制设计到控制实施往往要经过多次反复调试与修改,才能获得比较满意的结果。由于微型机的广泛应用,自动控制技术越来越多地与计算机控制技术联系在一起,成为机电一体化中十分重要的关键技术。

### 1.4.4 伺服驱动技术

伺服驱动技术的主要研究对象,是执行元件及其驱动装置。执行元件有电动、气动、液压等多种类型。机电一体化产品中,多采用电动式执行元件,其一方面通过电气接口向上与微型机相连,以接收微型机的控制指令,另一方面又通过机械接口向下与机械传动和执行机构相连,以实现规定的动作。因此伺服驱动技术是直接执行操作的技术,对机电一体化产品的动态性能、稳态精度、控制质量等具有决定性的影响。常见的伺服驱动有电液马达、脉冲液压缸、步进电机、直流伺服电机和交流伺服电机等。由于变频技术的进步,交流伺服驱动技术取得了突破性的进展,为机电一体化系统提供了高质量的伺服驱动单元,极大地促进了机电一体化技术的发展。

### 1.4.5 机械技术

机械技术,是机电一体化的基础。机电一体化产品中的主功能和构造功能,往往是以机械技术为主实现的。在机械与电子相互结合的实践中,不断对机械技术提出了更高的要求,使现代机械技术相对于传统机械技术而言发生了很大变化。新机构、新原理、新材料、新工艺等不断出现,以及现代设计方法的不断发展和完善,促使机电一体化产品在减轻重量、缩小体积、提高精度和刚度等多方面快速发展。

在制造过程的机电一体化系统中,经典的机械理论与工艺应借助于计算机辅助技术,同时采用人工智能与专家系统等,形成新一代的机械制造技术。这里原有的机械技术以知识和

技能的形式存在，是任何其他技术替代不了的。如计算机辅助工艺规程编制（CAPP）是目前 CAD/CAM 系统研究的瓶颈，其关键问题在于如何将广泛存在于各行业、企业、技术人员中的标准、习惯和经验进行表达和陈述，从而实现计算机的自动工艺设计与管理。

### 1.4.6 系统总体技术

系统总体技术，是一种从整体目标出发，用系统工程的观点和方法，将系统总体分解成相互有机联系的若干功能单元，并以功能单元为子系统继续分解，直至找到可实现的技术方案，然后再把功能和技术方案组合成方案组进行分析、评价和优选的综合应用技术。系统总体技术所包含的内容很多，接口技术是其重要内容之一，机电一体化产品的各功能单元通过接口连接成一个有机的整体。接口包括电气接口、机械接口、人一机接口等。电气接口实现系统间电信号的连接；机械接口则完成机械与机械部分、机械与电气装置部分的连接；人一机接口提供了人与系统间的交互界面。系统总体技术，是最能体现机电一体化设计特点的技术，其原理和方法还在不断地发展和完善之中。

## 思考题

1. 如何理解“机电一体化”的内涵？
2. 机电一体化技术发展的三个阶段各有什么特点？
3. 机电一体化系统的一般构成要素有哪些？
4. 机电一体化系统的共性关键技术有哪些？

# 第2章 机械系统设计

## 2.1 概 述

机械系统是机电一体化系统中的最基本要素,主要包括执行机构、传动机构和支承部件。机械系统的主要功能是保证其他系统的正常工作,同时完成机械运动,一部机器必须完成相互协调的若干机械运动。每个机械运动可由单独的控制电动机、传动件和执行机构组成的若干子系统来完成,若干机械运动由计算机来协调与控制,与一般的机械系统相比,除要求具有较高的定位精度之外,还应具有良好的动态响应特性,就是说响应要快、稳定性要好。为确保机械系统的传动精度和工作稳定性,通常对机电一体化系统提出以下要求:

(1) 高精度。精度直接影响产品的质量,尤其是机电一体化产品,其技术性能、工艺水平和功能比普通的机械产品都有很大的提高,因此机电一体化机械系统的高精度是其首要的要求。如果机械系统的精度不能满足要求,则无论机电一体化产品其他系统工作怎样精确,也无法完成其预定的机械动作。

(2) 快速响应性,即要求机械系统从接到指令到开始执行指令指定的任务之间的时间间隔短,这样控制系统能及时根据机械系统的运行状态信息,下达指令,使其准确地完成任务。

(3) 良好的稳定性,即要求机械系统的工作性能不受外界环境的影响,抗干扰能力强。

此外还要求机械系统具有较大的刚度,良好的耐磨和可靠性,消振和低噪声,重量轻、体积小、寿命长。

本章将机电一体化机械系统分成机械传动和支承部件两大部分,分别讨论常用的传动部件、旋转和导向支承部件等的总体布局、机构选型、结构设计优化等基本问题。

## 2.2 传动机构的设计

机电一体化系统中,用于传递能量及改变运动方向、速度和转矩的传动机构主要有带传动、齿轮传动、滚珠丝杠等,有线性和非线性传动机构之分。线性传动机构包括:减速装置、丝杠螺母副、蜗轮蜗杆副等。非线性传动机构包括:连杆机构、凸轮机构等。

不同用途的机械传动机构,其要求也不同,工作机传动机构,实现运动和力(力矩)的变换;信息机传动机构,只要求克服惯性力(力矩)和各种摩擦阻力(力矩)及较小的负载实现运动的变换。要求工作机传动机构的传动精度高、工作稳定性好,对齿轮传动来说,应该具有工作可靠、传动比恒定、结构紧凑、强度大、能承受重载、摩擦力小、效率高等特点。为此,常采用以下措施:

- (1) 采用低摩擦阻力的传动部件和导向支承件。
- (2) 缩短传动链, 以提高传动与支承刚度。
- (3) 选用最佳传动比, 以提高系统分辨率, 减少等效转动惯量, 提高加速能力。
- (4) 缩小反向死区误差, 如消除传动间隙、减少支承变形等。
- (5) 改进支承及架体的结构, 以提高刚性、减少振动、降低噪声。

一种齿轮传动机构可满足一项或同时满足几项以上功能要求, 如齿轮齿条传动既可将直线运动或回转运动转换为回转运动或直线运动, 又可将直线驱动力或转矩转换为转矩或直线驱动力; 带传动、蜗轮蜗杆及各类齿轮减速器既可进行升速或降速, 也可进行转矩大小的变换。随着机电一体化技术的发展, 机械传动机构在以下三方面要不断地适应:

- (1) 精密化。为了适应产品的高定位精度, 就要求机械传动机构的精度越高越好。
- (2) 高速化。因为产品的工作效率与机械传动部分的运动速度相关, 所以, 机械传动机构应能适应高速运动的要求。

(3) 小型化、轻量化。传动机构的小型化、轻量化, 是为了提供运动更高的灵敏度(响应性), 减小冲击, 降低能耗。与电子部件的微型化相适应, 传动机构要尽量短小轻薄化。

下面以几种典型传动形式来介绍机电一体化系统中机械传动机构的设计。

### 2.2.1 齿轮传动

齿轮传动是常见的一种机械传动形式, 对于机电一体化系统来说, 为了提高其精密性和高速性等, 主要从两个方面进行说明。

#### 1. 齿轮传动系统的总传动比及其分配

设计机电一体化齿轮传动系统, 主要是研究它的动力学特性, 从而获得高精度、高稳定性、高速性、高可靠性和低噪声的齿轮传动系统。

##### (1) 最佳总传动比

首先把传动系统中的工作负载、惯性负载和摩擦负载综合为系统的总负载, 方法有:

- ① 峰值综合: 若各种负载为非随机性负载, 将各负载的峰值取代数和;
- ② 均方根综合: 若各种负载为随机性负载, 取各负载的均方根。

负载综合时, 要转化到电动机轴上, 成为等效峰值综合负载转矩或等效均方根综合负载转矩。使等效负载转矩最小或负载加速度最大的总传动比, 即为最佳总传动比。

##### (2) 总传动比分配

齿轮系统的总传动比确定后, 根据对传动链的技术要求, 选择传动方案, 使驱动部件和负载之间的转矩、转速达到合理匹配。若总传动比较大, 就需要确定传动级数, 并在各级之间分配传动比。单级传动比增大使传动系统简化, 但大齿轮的尺寸增大会使整个传动系统的轮廓尺寸变大。因此, 总传动比要进行分级分配, 并在各级之间分配传动比。其分配的原则

常用的方法有以下三种:

##### ① 最小等效转动惯量原则。

利用该原则所设计的齿轮传动系统, 换算到电动机轴上的等效转动惯量最小。

设有一小功率电动机驱动的二级齿轮减速系统, 如图 2.1 所示。设其总传动比为  $i = i_1 i_2$ 。若先假设各主动小齿轮具有相同的转动惯

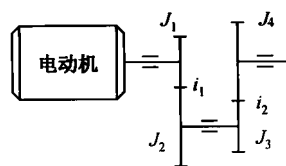


图 2.1 二级减速传动

量,各齿轮均近似视为实心圆柱体,齿宽 $B$ 、比重 $\gamma$ 均相同,其转动惯量为 $J\left(=\frac{\pi B\gamma}{32g}d^4\right)$ ,如不计轴和轴承的转动惯量,则根据系统动能不变的原则,等效到电动机轴上的等效转动惯量为

$$J_{me} = J_1 + \frac{J_2 + J_3}{i_1^2} + \frac{J_4}{i_1^2 i_2^2} \quad (2.1)$$

因为

$$J_1 = J_3 = \frac{\pi B\gamma}{32g}d_1^4, \quad J_2 = \frac{\pi B\gamma}{32g}d_2^4, \quad J_4 = \frac{\pi B\gamma}{32g}d_4^4$$

所以

$$\frac{J_2}{J_1} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4 = i_1^4, \quad \frac{J_4}{J_3} = \frac{J_4}{J_1} = \left(\frac{d_4}{d_1}\right)^4 = \left(\frac{d_4}{d_3}\right)^4 = i_2^4 = (i/i_1)^4$$

即 $J_2 = J_1 i_1^4$ ,  $J_4 = J_1 i_2^4 = J_1 (i/i_1)^4$ ,

$$J_{me} = J_1 \left(1 + i_1^2 + \frac{1}{i_1^2} + \frac{i^2}{i_1^4}\right) \quad (2.2)$$

令 $\frac{\partial J_{me}}{\partial i_1} = 0$ , 则 $i_1^2(i_1^4 - 1 - 2i_2^2) = 0$ , 得到 $i_2 = \sqrt{\frac{i_1^4 - 1}{2}}$ 。当 $i_1^4 \gg 1$ 时,  $i_2 \approx i_1^2 / \sqrt{2}$ ,  $i_1 \approx (\sqrt{2} i_2)^{1/2} = (\sqrt{2} i)^{1/3} = (2i^2)^{1/6}$ 。

对于 $n$ 级齿轮传动系做同类分析可得

$$i_1 = 2^{\frac{2^n - n - 1}{2(2^n - 1)}} \frac{1}{i^{2^n - 1}}, \quad i_k = \sqrt{2} \left(\frac{i}{2^{1/2}}\right)^{\frac{2^k - 1}{2^n - 1}}, \quad \text{其中, } k = 2, 3, 4, \dots, n$$

### ② 重量最轻原则。

对于小功率传动系统,使各级传动比 $i_1 = i_2 = i_3 = \dots = \sqrt[n]{i}$ ,即可使传动装置的重量最轻。由于这个结论是在假定各主动小齿轮模数、齿数均相同的条件下导出的,故所有大齿轮的齿数、模数也相同,每级齿轮副的中心距离也相同。上述结论对于大功率传动系统是不适用的,因其传递扭矩大,故要考虑齿轮模数、齿轮齿宽等参数要逐级增加的情况,此时应根据经验、类比方法以及结构紧凑之要求进行综合考虑。各级传动比一般应以“先大后小”原则处理。

### ③ 输出轴转角误差最小原则。

为了提高机电一体化系统中齿轮传动系统传递运动的精度,各级传动比应按“先小后大”原则分配,以便降低齿轮的加工误差、安装误差以及回转误差对输出转角精度的影响。设齿轮传动系统中各级齿轮的转角误差换算到末级输出轴上的总转角误差为 $\Delta\phi_{\max}$ , 则

$$\Delta\phi_{\max} = \sum_{k=1}^n (\Delta\phi_k / i_{kn}) \quad (2.3)$$

式中,  $\Delta\phi_k$  是第 $k$ 个齿轮所具有的转角误差;  $i_{kn}$  是第 $k$ 个齿轮的转轴至第 $n$ 级输出轴的传动比。

比如对于一个四级齿轮传动系统,设各齿轮的传动误差分别为 $\Delta\phi_1, \Delta\phi_2, \dots, \Delta\phi_8$ , 则换算到末级输出轴上的总转角误差为



$$\Delta\phi_{\max} = \frac{\Delta\phi_1}{i} + \frac{\Delta\phi_2 + \Delta\phi_3}{i_2 i_3 i_4} + \frac{\Delta\phi_4 + \Delta\phi_5}{i_3 i_4} + \frac{\Delta\phi_6 + \Delta\phi_7}{i_4} + \Delta\phi_8 \quad (2.4)$$

上述计算对小功率传动比较符合实际,而对于大功率传动,由于转矩较大,需要按其他法则进行计算。

综上所述,设计定轴齿轮传动系统,在确定总传动比、传动级数和分配传动比时,要根据系统的工作条件和功能要求,在考虑上述三个原则的同时,考虑其可行性和经济性,合理分配传动比。

## 2. 齿轮传动间隙的调整方法

常用的调整齿侧间隙的方法有以下几种。

### (1) 圆柱齿轮传动

① 偏心套(轴)调整法。如图 2.2 所示,将相互啮合的一对齿轮中的一个齿轮 4 装在电动机输出轴上,并将电动机 2 安装在偏心套 1(或偏心轴)上,通过转动偏心套(偏心轴)的转角,就可调节两啮合齿轮的中心距,从而消除圆柱齿轮正、反转时的齿侧间隙。特点是结构简单,但其侧隙不能自动补偿。

② 轴向垫片调整法。如图 2.3 所示,齿轮 1 和 2 相啮合,其分度圆弧齿厚沿轴线方向略有锥度,这样就可以用轴向垫片 3 使齿轮 2 沿轴向移动,从而消除两齿轮的齿侧间隙。装配时轴向垫片 3 的厚度应使得齿轮 1 和 2 之间既齿侧间隙小,运转又灵活。特点同偏心套(轴)调整法。

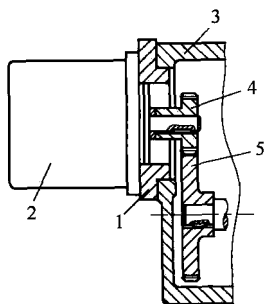


图 2.2 偏心套式间隙消除机构

1—偏心套; 2—电动机; 3—减速箱; 4、5—减速齿轮

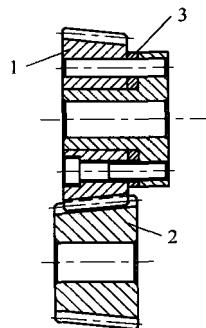


图 2.3 圆柱齿轮轴向垫片间隙消除机构

1、2—齿轮; 3—轴向垫片

③ 双片薄齿轮错齿调整法。这种消除齿侧间隙的方法是将其中一个做成宽齿轮,另一个由两片薄齿轮组成。采取措施使一个薄齿轮的左齿侧和另一个薄齿轮的右齿侧分别紧贴在宽齿轮齿槽的左、右两侧,以消除齿侧间隙,反向时不会出现死区,具体调整措施如下:

周向弹簧式(见图 2.4)。在两个薄片齿轮 3 和 4 上各开了几条周向圆弧槽,并在齿轮 3 和 4 的端面上有安装弹簧 2 的短柱 1。在弹簧 2 的作用下使薄片齿轮 3 和 4 错位而消除齿侧间隙。这种结构形式中的弹簧 2 的拉力必须足以克服驱动转矩才能起作用。因该方法受到周向圆弧槽及弹簧尺寸限制,故仅适用于读数装置而不适用于驱动装置。

可调拉簧式(见图 2.5)。在两个薄片齿轮 1 和 2 上装有凸耳 3,弹簧的一端钩在凸耳 3 上,另一端钩在螺钉 7 上。弹簧 4 的拉力大小可用螺母 5 调节螺钉 7 的伸出长度,调整好后再用螺母 6 锁紧。