

目 录

第一章 绪论	1
第一节 机电一体化概述	1
第二节 机电一体化系统的设计	9
第三节 机电一体化系统应用的技术	14
第四节 机电一体化系统的发展	17
第二章 机械设计技术	20
第一节 机械设计概述	20
第二节 齿轮（系）传动	23
第三节 谐波齿轮传动	32
第四节 滚珠丝杠螺母副	33
第五节 同步带传动装置	43
第六节 导轨的设计计算与选用	51
第三章 检测传感器及其接口电路	58
第一节 传感器	58
第二节 位移测量传感器	62
第三节 速度、加速度传感器	91

第四节	位置传感器	93
第五节	传感器前期信号处理	96
第六节	传感器接口技术	102
第七节	传感器非线性补偿原理	105
第八节	数字滤波	109
第四章	运动控制系统设计	114
第一节	运动控制的概念与分类	114
第二节	运动控制的功能与形式	118
第五章	执行装置及伺服电动机	122
第一节	常用执行装置	122
第二节	伺服电动机	131
第三节	直流伺服电动机	135
第四节	交流伺服电动机	145
第五节	步进电动机	153
第六章	机电一体化系统设计方法	166
第一节	设计方法及设计类型	166
第二节	机电一体化系统开发流程	168
第三节	优化设计	176
第四节	有限元方法	185
第五节	可靠性设计	189
第六节	抗干扰设计	198
第七节	接口设计	212
第八节	机电一体化系统集成	226
参考文献		233

第一章

绪 论

第一节 机电一体化概述

一、机电一体化概念

“机电一体化”是由机械学与电子学相互交叉融合形成的一门学科。最早是指机械学、电子学交叉融合，在发展过程中又融入了计算机、信息学等学科内容。机电一体化（Mechatronics）一词是由机械学（Mechanics）单词的前半部分和电子学（Electronics）单词的后半部分组合构成的，它最早出现在 1971 年日本杂志《机械设计》副刊上。随着技术的快速发展，机电二体化概念逐渐被人们接受，并被广泛使用。并且，在机电一体化概念上又衍生出了机电一体化技术、机电一体化系统、机电一体化产品、机电一体化专业等与机电一体化相关的专业名词。

“机电一体化系统”这一术语是从系统角度来描述机电一体化的组成与结构的，它是由能够完成一种或者多种功能的基本模块或单元按照一定的次序组合在一起构成的系统。具体就是指由机械单元、控制单元、检测单元、伺服驱动单元、执行单元等按照一定的次序组合起来，能够实现一种或多种功能的系统。

“机电一体化技术”包括设计与制造机电一体化系统所运用到的机械学与电子学的相关技术，具体包括机械技术、计算机技术、信息技术、自动控制技术、检测技术、接口技

术以及系统技术等。机电一体化技术的内涵随着科学技术的发展在不断变化与延伸，在不同历史阶段被赋予了不同的内容。早期的机电一体化技术主要包括机械技术和电子技术，机械技术主要包括机械设计与机械制造技术，电子技术主要是以晶体管为主要器件的控制技术。机械与电子技术结合主要表现为在产品中利用以电子元件构成的控制器来代替原有的机械控制，以电子控制技术代替机械控制技术，使产品的功能得到较大的提升。随着计算机、信息、自动控制等技术的发展，机电一体化技术也在不断发展，机械结构优化技术、CAD 技术、微电子技术、信息技术、自动控制技术、人工智能技术不断被应用到机电一体化系统的设计与制造中，使机电一体化技术的内涵不断拓展，内容不断丰富。

“机电一体化产品”是运用机电一体化技术设计、制造的满足人们某种需求的物品，它具有机电一体化技术的基本特征，是机电一体化系统的物理表现形式。由于机电一体化产品较多，为了更好地了解和区分它们的用途、功能、制造过程等，可以按不同方式对机电一体化产品进行分类。

“机电一体化专业”（也称为“机械电子工程专业”）是高等院校里培养从事机电一体化系统设计（或产品制造）、系统维护、销售及生产管理等技术人才的一个专业。机电一体化专业培养的人才规格包括专科、本科以及研究生层次的技术人才。

二、机电一体化产品分类

随着机电一体化技术的发展，机电一体化产品已渗透到社会的各个领域，纯机械的产品将越来越少，而机电一体化的产品越来越多。图 1-1 所示为典型的机电一体化产品，有数控机床、工业机器人、扫地机器人、纸币清分机、高铁、盾构隧道掘进机等。

机电一体化产品分类方式较多，例如，按产品所服务的行业性质可分为工业生产类、农林渔业类、家庭服务类、社会服务类、交通运输类等类型；按产品的机电融合方式可分为功能改进型、创新型；按产品的自动化程度可分为半自动型、全自动型、智能型。

（一）按照产品所服务的行业性质分类

1. 工业生产类

工业生产类产品主要用于工业生产，具体有生产制造设备、检测设备、搬运设备等。例如，用于工业生产的数控机床、包装机、塑料成型机、激光加工机；用于生产搬运的工业机器人、AGV 运输小车；用于生产检测的三坐标测量机、激光干涉仪、扫描探针显

显微镜。

2. 农林渔牧业类

现代农林渔牧业装备比传统的作业工具有了较大进步，以机、电、液相结合为技术特征的现代农业生产设备已经替代了传统的生产工具，这些现代化机械的应用提高了劳动效率。例如用于农作物种植、采摘、收割、施肥、农药喷洒的机械设备；用于林业移栽、采伐的机械设备等。

3. 家庭服务类

家庭服务类机电一体化产品可分为制冷、电热、电动、电子电器类等，常见的产品有手机、电视机、洗衣机、冰箱、热水器、洗碗机、血压测量仪、跑步机、多功能按摩椅、扫地机器人等。家庭服务类机电一体化产品的需求量较大，产品更新周期短。例如，电视机平均换代时间从过去的 8-10 年缩短为 3-5 年，手机更新的平均时间只有 1-2 年。随着新一代移动网络及人工智能技术的发展，以智能化、网络化、功能集成化为特征的家庭服务类机电一体化产品将是社会发展的主流之一。

4. 社会服务类

社会服务类机电一体化产品是指用于政府、银行、学校、餐饮、旅游等行业的机电一体化产品，例如打印机、复印机、自动售货机、收银机、服务机器人、点钞捆钞一体机、ATM 存取一体机、自动包装机、物流分拣机器人等。

5. 交通运输类

交通运输类机电一体化产品主要是指用于铁路及城轨、道路、水路、航空等的交通运输设备。铁路设备有高铁机车、自动铺轨机、信号控制设备等；水路交通设备有卫星通信、定位、数字通信、计算机控制设备等；航空交通设备有飞机控制、雷达、通信设备等。

6. 道路、桥梁及建筑类

道路、桥梁及建筑类机械多为大型机电一体化产品，多以电液控制方式为主。例如用于隧道开挖的盾构掘进机，它是集光、机、电、液、传感、信息技术于一体的机电一体化产品。再如建筑用的起重机械、高空作业机械、大型运输机械等已经从传统的电气控制方式转变为计算机控制方式，并且运用了多种传感器对机械的工况进行检测。

7. 航空、航天及武器装备类

航空、航天及武器装备类机电一体化产品有战斗机、飞船、坦克、火炮、火箭等。例如，战斗机就是由多系统构成，采用分布式控制的复杂机电一体化产品。它的飞行控制系

统十分复杂，其控制对象包括主翼、水平尾翼、垂直尾翼、进气口、发动机、起落架、雷达、驾驶员座舱、火控系统、通信系统、机关炮、导弹发射吊架等多个子功能系统。这类产品中采用了先进的控制技术，对控制的实时性、精度、可靠性有极高的要求。

（二）按产品的机电融合方式分类

1. 功能改进型

功能改进型产品是在原有产品的基础上对产品的功能进行改进，用微电子、计算机控制等装置替换产品原来的机械结构、控制方式等，使它成为新一代产品。根据改进的方式不同又分为功能附加型产品和功能替代型产品两种类型。

（1）功能附加型产品。功能附加型产品是在原有机机械产品基础上采用电子技术使产品性能提高或功能增强。例如，利用老机床改造的经济型数控机床、电子秤、带有数显功能的万用表与千分尺、全自动洗衣机等都属于这一类。

（2）功能替代型产品。功能替代型产品是采用计算机控制技术取代原产品中的机械或电气控制方式，使产品结构简化、性能提高、柔性增加。功能替代型产品的具体替换方式有以下几种。

①在原有机机械系统的基础上采用微型计算机控制装置，使系统的性能提高、功能增强。例如，模糊控制洗衣机能根据衣物的洁净度自动控制洗涤过程，从而实现节水、节电、省时、节省洗涤剂的功能；机床的数控化是另一个典型的例子。

②用电子装置局部替代机械传动装置和机械控制装置，简化结构，增强控制的灵活性。例如，数控机床的进给系统采用伺服系统，简化了传动链，提高了进给系统的动态性能；将传统电机的电刷用电子装置替代而形成的无刷电机，具有性能可靠、结构简单、尺寸小等优点。

③用电子装置完全替代原来执行信息处理功能的机构，既简化了结构，又极大地丰富了信息传输的内容，提高了传输速度。例如，石英电子钟表、电子秤、按键式电话等。

④用电子装置替代机械系统的主功能机构，形成特殊的加工能力。例如，电火花加工机床、线切割加工机床、激光加工机床等都属于这一类。

2. 创新型

创新型机电一体化产品是指在工作原理、主结构上自主创新开发的产品。它是根据产品的功能、性能要求及技术规范，采用机电一体化技术进行专门设计或采用具有特定用途的集成电路来实现产品中的控制和信息处理等功能，从而使产品结构新颖、体积缩小、功

能增强、成本进一步降低。例如生产机械中的激光快速成型机，信息机械中的传真机、打印机、复印机，检测机械中的 CT 扫描仪、扫描隧道显微镜等。

（三）按产品的自动化程度分类

1. 半自动型

半自动型机电一体化产品在工作时，需要人为参与操作才能够完成它的全部工作，即当其中一个工作步骤完成时，需要手动操作才能进行下一步工作。例如，具有洗衣、脱水及烘干功能的半自动洗衣机，当洗衣步骤完成后，需要手动按一下脱水功能键进行脱水，脱水完成后再按一下烘干功能键进行烘干。

2. 全自动型

全自动型机电一体化产品在工作时不需人为参与操作就可以完成全部工作。例如某零件的加工过程由加工中心自动完成，但是如果上料、下料工序需由人工完成，那么只能称为半自动加工；如果在加工中心的基础上再配置机器人完成上下料，则可称为全自动加工。再例如，若洗衣机的洗衣、脱水、烘干等步骤自动完成，就称为全自动洗衣机。

3. 智能型

智能型机电一体化产品是指在机器中采用人工智能控制，在无人干预的情况下自主地驱动机器，实现控制目标。例如汽车无人驾驶系统，它主要依靠车内的以计算机系统为主的智能驾驶仪来实现无人驾驶的目的，涉及的技术包括人工智能控制、环境感知、定位与导航、路径规划、运动控制等。再例如智能机器人，它能够理解人类语言，用人类语言同操作者对话，分析出现的情况，调整自己的动作以达到操作者所提出的要求。

三、机电一体化产品特征

机电一体化产品与传统的机械产品相比在控制方式、结构组成和功能方面有着自身的特点，它除了具有产品的基本属性之外，还具有以下特征。

（一）具有机电一体化系统的基本组成单元

典型的机电一体化产品应该包括机械单元、控制单元、检测单元、伺服驱动单元、执行单元五个基本组成部分。例如，数控机床包括了由床身、主轴、导轨、传动机构等组成的机械单元；由计算机、控制软件及接口组成的数控系统（控制单元）；由光栅、编码器

等组成的检测单元；由伺服驱动器、电机构成的伺服驱动单元；由工作台、主轴、机械手等组成的执行单元。但是，有一些机电一体化产品由于集成度较高或者是功能相对简单，各个组成部分的区分不是十分明显。

（二）采用计算机控制方式

机电一体化产品的控制方式与传统机械产品的控制方式有所不同，其控制方式从过去的凸轮控制、继电器控制、接触器控制方式转变为以计算机为核心的控制方式。目前，计算机控制已经成为机电一体化产品的主要特征之一。用于机电一体化产品控制的计算机类型主要有单片机、单板机、PLC、总线式工控机、工业平板电脑等，此外还有集成了微处理器的板卡、专用芯片、控制器等，例如运动控制卡、DSP 芯片、数控系统等。严格来说，没有采用计算机控制的机电产品不能算是真正意义上的机电一体化产品。

机电一体化产品功能的实现需要一套专用的控制程序，由它来控制系统的运行，实现所需的功能。现在机电一体化产品的大多数功能趋向于采用软件方式实现，可以减少产品功能实现对自身硬件性能的依赖性。由于对产品控制方式的要求不同，控制软件的复杂程度也不相同。现阶段有一部分机电一体化产品的控制中运用了人工神经网络、模糊控制、遗传算法等智能控制方式来实现高级的控制功能，由于控制算法复杂，其控制程序结构也比较复杂，例如人工智能机器人、汽车无人驾驶系统、人工智能翻译器、智能家电的控制软件等。

四、机电一体化系统组成

机电一体化系统是由多个功能单元组织起来的，实现一种或多种功能的结构，可分为机械单元、控制单元、检测单元、伺服驱动单元、执行单元五个组成部分，如图 1-2 所示。它们按照一定的结构或次序组织在一起，形成一个相对独立的功能体。

机电一体化系统要实现其目的功能，一般需要具备多个内部功能，包括主功能、动力功能、检测功能、控制功能和构造功能，相互关系如图 1-3 所示，其中主功能是实现系统目的直接必需的功能，其作用是进行物质、信息、能量的转换、传递和存储；检测功能收集系统内外部信息并进行转换；动力功能为系统提供运行所需的动力；控制功能进行信息处理、控制系统的运行；构造功能保持系统中各个组成单元在空间和时间上的相互关系。另外，机电一体化系统和其他系统一样也具有能量流、物质流与信息流的转换、传递和存储功能。

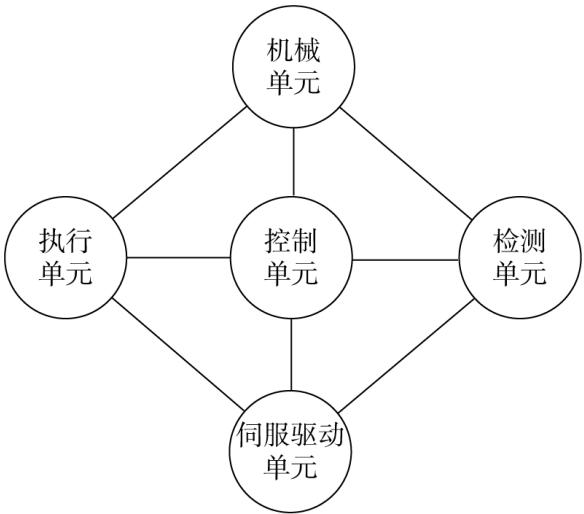


图 1-2 机电一体化系统组成

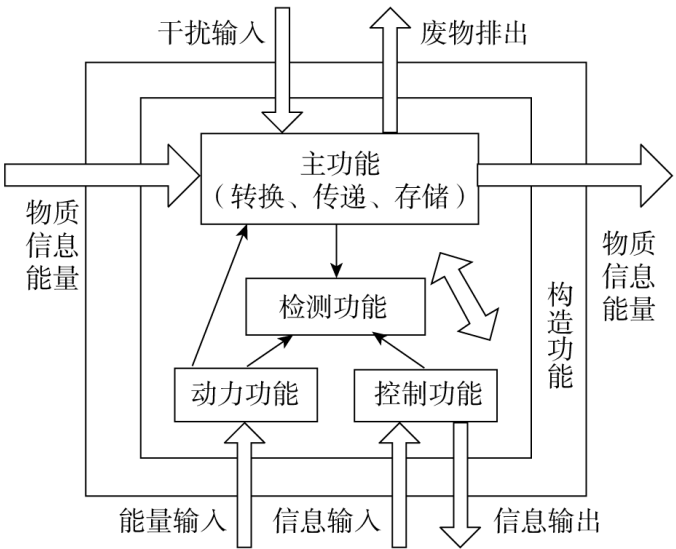


图 1-3 机电一体化系统功能

(一) 机械单元

机械单元，也称机械本体，在机电一体化系统中主要是起支承、导向、传动、连接等作用，它包括机身、框架、传动装置（齿轮、涡轮蜗杆、丝杠螺母、棘轮等）、轴、导轨等。机械单元中的各个零部件按照一定的关系装配在一起，传递系统的运动与动力，并且满足几何与运动精度等要求。随着对机电一体化系统的功能、性能等要求提高，对机械单元的结构、强度、刚度、重量、可靠性等提出更高的要求，例如要求结构新颖美观，在满足强度与刚度条件下尽可能减轻重量，保证工作稳定可靠等。

（二）控制单元

控制单元是机电一体化系统的核心单元，包括硬件与软件两部分。硬件部分由控制计算机、接口、逻辑电路等组成，软件包括系统软件与应用软件。控制单元的功能主要是信息处理与控制，具体工作过程是将来自外部传感器的检测信息和外部输入的命令进行集中、存储、分析、加工，根据信息处理结果，按照一定的程序发出相应的控制信号，通过输出接口送往驱动单元，控制整个系统有目的地运行，并达到预期的性能。对控制单元的要求指标主要有工作可靠性、信息处理速度、控制精确度等。

（三）检测单元

检测单元利用传感器将外部的位移、角度、力、速度、加速度等检测信号转换成电阻、电压、电流、频率等电信号，即引起电阻、电流、电压的变化，通过相应的信号检测装置将其反馈给信息处理与控制装置。检测单元通常由传感器、信号转换模块、信息处理模块几部分组成，信息处理一般由系统的控制计算机完成，如果要处理的信息量较大，也可以由一个单独的计算机完成。

（四）伺服驱动单元

伺服驱动单元由动力和驱动部分组成，其功能是在控制信息的作用下，驱动执行机构完成各种动作和功能。机电一体化系统一方面要求驱动单元具有高效率 and 快速响应等特性，同时又要求其对水、油、温度、尘埃等外部环境因素具备一定的适应性和可靠性。由于工业实际中存在空间狭窄、动作范围小等限制，还需考虑标准化和维修的方便性。由于电力电子技术的高度发展，高性能的交直流伺服电机、直线电机将会大量应用到机电一体化系统的伺服驱动单元中。

（五）执行单元

执行单元根据控制单元输出的信息和控制指令完成所要求的动作，一般采用机械、电磁、液压、气压等方式将输入的各种形式的能量转换为机械能。执行单元的速度、位置、工作力矩的控制应满足系统的工作要求。根据机电一体化系统的匹配要求，执行单元的工作性能改善（刚性、重量、模块化、标准化和系列化等）将有利于提高机电一体化系统的整体运行性能。

第二节 机电一体化系统的设计

一、机电一体化系统设计内容

机电一体化是一门涉及光、机、电、液等技术的综合技术，是一项系统工程。机电一体化系统设计是按照机电一体化的思想、方法进行的设计，需要综合应用各项关键技术才能完成。机电一体化系统的总体设计要求从整体目标出发，综合分析产品的性能要求和机电各组成单元的特性，选择最合理的单元组合方案，使机电一体化产品整体最优。

随着大规模集成电路的出现，机电一体化产品得到了迅速普及和发展，从家用电器到生产设备，从办公自动化设备到军事装备，机与电紧密结合的程度都在迅速增强，形成了一个纵深而广阔的市场。市场的竞争规律要求产品不仅要有高性能，而且要有低价格，这就给产品设计人员提出了越来越高的要求。另一方面，种类繁多、性能各异的集成电路、传感器和新材料等，给机电一体化产品设计人员提供了众多的选择，使设计工作具有更大的灵活性。

一般来讲，机电一体化系统设计应包括下述内容。

（一）准备相关技术资料

（1）搜集国内外有关技术资料，包括现有同类产品资料、相关的理论研究成果和先进的技术资料等。通过对这些技术资料的分析比较，了解现有技术发展的水平和趋势。这是确定产品技术构成的主要依据。

（2）了解所设计产品的使用要求，包括功能、性能等方面的要求。此外，还应了解产品的极限工作环境、操作者的技术素质、用户的维修能力等方面的情况。使用要求是确定产品技术指标的主要依据。

（3）了解生产单位的设备条件、工艺手段、生产基础等，作为研究具体结构方案的重要依据，以保证缩短设计和制造周期，降低生产成本，提高产品质量。

（二）确定性能指标

性能指标是满足使用要求的技术保证，主要应依据使用要求的具体项目来相应地确

定。它受到制造水平和能力的制约。性能指标主要包括以下几项：

(1) 功能性指标：包括运动参数、动力参数、尺寸参数、品质指标等实现产品功能所必需的技术指标。

(2) 经济性指标：包括成本指标、工艺性指标、标准化指标、美学指标等关系到产品能否进入市场并成为商品的技术指标。

(3) 安全性指标：包括操作指标、自身保护指标和人员安全指标等保证产品在使用过程中不致因误操作或偶然故障而引起产品损坏或人身事故方面的技术指标。对于自动化程度较高的机电一体化产品，其安全性指标尤为重要。

(三) 拟定总体方案

(1) 方案设计：选择设计原则、设计原理，进行总体方案的初步设计。

(2) 系统性能指标分析：依据所掌握的技术资料以及以前的设计经验，分析各项性能指标的重要性及其实现的难易程度，找出设计难点，通过建立模型或通过经验分析判断，选择适当的方法对系统进行定性和定量的分析。

(3) 预选系统各环节结构：在性能指标分析的基础上，初步选出多种实现各环节功能并满足性能要求的可行结构方案。

(4) 整体评价：选定一个或多个评价指标，对上述选出的多个可行方案进行校核，对评价指标值进行比较，从中选出最优者作为拟定的总体方案。

需要注意的是：机电一体化总体设计的目的是拟定出综合性能最优或较优的总体方案，作为进一步详细设计的纲领和依据。应当指出，总体方案的确定并非是一成不变的，在详细设计结束后，应再对整体性能指标进行复查，如发现问题，应及时修改总体方案。

(四) 机电一体化系统总体布局设计与环境设计

(1) 总体布局设计的任务是确定系统各主要部件之间相对应的位置关系以及它们之间所需要的相对运动关系。布局设计是一个带有全局性的问题，它对产品的制造和使用都有很大的影响。总体布局设计要满足布局清晰、结构紧凑、统一与变化、功能合理、体现新材料和新工艺等要求。

(2) 环境设计包括人一机系统设计和艺术造型设计。人一机系统设计：把人看成系统中的组成要素，以人为主体来详细分析人和机器系统的关系。其目的是提高人一机系统的整体效能，使人能够舒适、安全、高效地工作。

艺术造型设计：机电产品进入市场后，首先给人以深刻直觉印象的就是其外观造型，

先入为主是用户普遍的心理反应。随着科学技术的高速发展和人类文化、生活水平的提高,人们的需求观和价值观也发生了变化,具有艺术造型的机电产品已进入人们的工作、生活领域,艺术造型设计已经成为产品设计的一个重要方面。

二、机电一体化系统设计方法

机电一体化产品种类繁多,涉及的技术领域及其复杂程度也不同。机电一体化产品设计的现代设计方法与传统设计方法的不同之处在于,现代设计方法是以计算机为辅助手段的。其设计步骤通常是:技术预测→市场需求→信息分析→科学类比→系统设计→创新性设计→因时制宜地选择适应的现代设计方法。现代设计方法包括创新设计、优化设计、有限元法、可靠性设计、虚拟设计、绿色设计等。

设计方法具有时序性和继承性,之所以冠以“现代”二字,是为了强调其科学性和前瞻性,其实有些方法也并非是最新的。图 1-4 所示为现代设计方法的基本工作流程。该工作流程不是绝对的,只是一个大致的设计路线。现代设计方法继承了传统设计中的某些精华,在各个设计步骤中应考虑传统设计的一般原则,如技术经济分析、造型设计、市场需求、类比原则、冗余原则、经验原则以及三化原则(标准化、系列化、模块化)等。

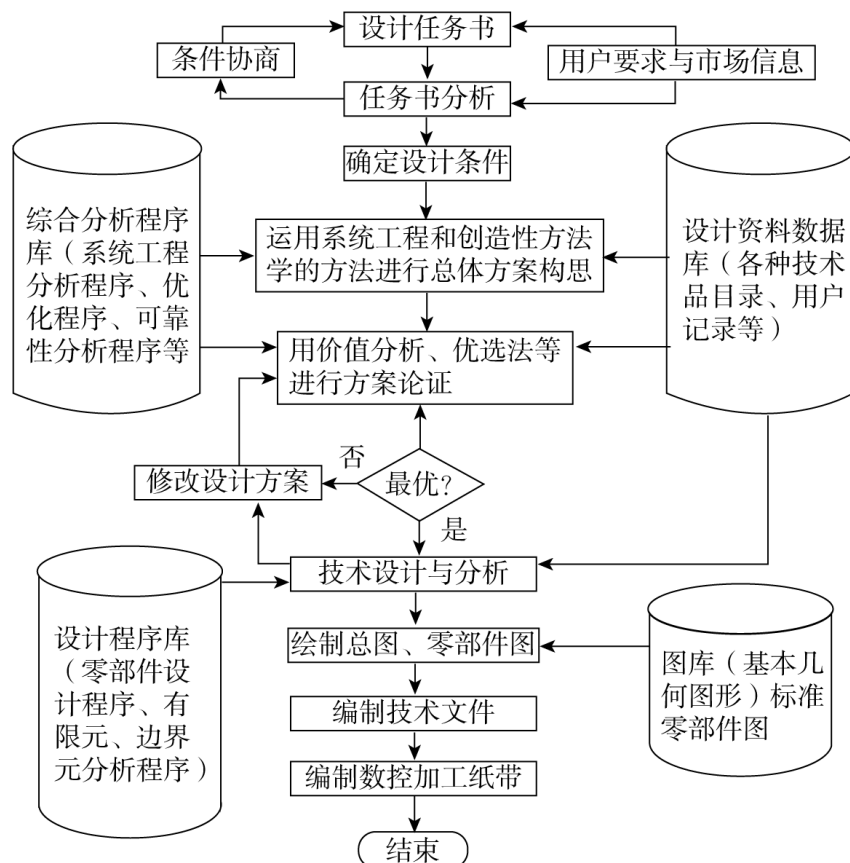


图 1-4 现代设计方法的基本工作流程

（一）创新设计

创新是设计的本质，也是设计活动的最终目标，机电一体化产品竞争优势来源于创新设计。机电一体化产品设计通过对机械技术、电子技术、信息技术等相关新技术的有机结合，创造出满足社会需求、具有较强市场竞争能力的机电一体化产品。

常用的创新设计方法很多，如演绎推理创新法、列举分析创新法、检索提示创新法、智力激励创新法、组合创新法、逆向思维创新法等。

（二）优化设计

传统的设计中很早就存在着“选优”的思想。设计人员可以根据需要同时提出几种不同的设计方案，通过分析评价，从中选出较好的方案。这种选优的方案在很大程度上带有经验性，即具有一定的局限性。

目前优化设计方法不仅用于机械结构设计、化工系统设计、电气传动设计，也用于运输路线的确定、商品流通量的调配、产品配方的配比等方面。优化设计理论与方法最大的特点在于把经验的、感性的、类比的传统设计方法转变为科学的、理性的、立足于计算分析的设计方法；特别是近年来，随着有限元、可靠性、计算机辅助设计等理论与技术的发展，整个设计过程逐步向自动化、集成化、智能化方向发展。

（三）有限元法

有限元法是以电子计算机为工具的一种现代数值计算方法。其基本思想是：假想将连续的结构分割成数目有限的小单元体，即有限单元；各单元之间仅在有限个指定结合点处相连接，用组成的单元集合体来近似代替原来的结构；在结点上引入等效结点力，以代替实际作用单元上的动载荷；对每个单元，选择一个简单函数式来近似地表达单元位移分量的分布规律，并按弹性力学中的变分原理建立单元结点力与结点位移（速度、加速度）的关系（质量、阻尼和刚度矩阵），最后把所有单元的这种关系集合起来，就可以得到以结点位移为基本未知量的动力学方程。给定初始条件和边界条件，就可求解动力学方程，从而得到系统的动态特性。

（四）可靠性设计

可靠性是产品在一定的条件下，在规定时间内完成规定功能的能力。这其中的两个规

定具有数值的概念，一个是“规定的时间”内，它具有一定寿命的数值概念，不能认为寿命越长越好，必须有一个经济有效的使用寿命；另一个是完成“规定功能的能力”，它具有一定使用功能范围的数值概念，只有在规定使用功能范围内使用，才能安全可靠地工作与运行。

可靠性设计是常规设计方法的深化和发展。它从可靠性概念的角度出发，认为零部件上的载荷和材料性能等都是随机变量，具有离散性、模糊性和灰色性，在数学上通常用分布函数、模糊数学、灰色理论来描述。可靠性设计法认为所设计的任何产品都存在一定的失效可能性，并且可以定量地回答产品在工作中的可靠性程度问题，从而弥补常规设计方法的不足。

（五）虚拟设计与制造

虚拟设计可以理解为实物原型出现之前的产品开发过程。虚拟设计的基本构思是：用计算机来虚拟完成整个产品的开发过程；设计者经过调查研究，在计算机上建立产品模型，并进行各种分析，改进产品设计方案。具体来说，就是通过建立产品的数字模型，用数字化形式来代替传统的实物原型实验（如使用 UGNX 软件对产品进行三维建模），在数字状态下对产品进行静态和动态性能分析，研究分析新产品的可制造性、可装配性、可维护性、运行适应性以及销售性等。

新产品的数字原型经反复修改确认后，即可开始虚拟制造或 3D 打印。虚拟制造或称数字化制造，其基本构思是在计算机上验证产品的制造过程。

（六）绿色设计

绿色设计是以环境资源保护为核心概念的设计，要求充分考虑在产品整个寿命周期内把产品的基本属性和环境属性（可拆卸性、可回收性、可维护性、可重复利用性等）紧密结合起来；在进行设计决策时，除了应满足产品的物理目标外，还应满足环境目标，以达到绿色设计的要求。

绿色设计还要求所设计的产品在制造、使用和回收过程中尽量少地消耗能源和资源，不对环境造成污染。

绿色设计要求在整个生命周期内，优先考虑产品环境属性，并将其作为设计目标；在满足环境目标要求的同时，保证产品应有的基本性能、使用寿命、质量等。

第三节 机电一体化系统应用的技术

一、机械技术

机械技术是指用于机电一体化系统的机械设计与制造技术，在机电一体化系统中主要指机械系统的设计、分析及制造技术。机械结构是机电一体化系统的重要载体，对整个系统的体积、重量、抗振性、稳定性、可靠性、运动精度等技术指标有着较大的影响。随着社会需求的提高和技术的发展，机械技术也面临着巨大的挑战，传统机械设计与制造技术已不能适应社会发展对机电一体化系统的功能、性能、生产效率等方面的需求。

机械技术的应用目标在于如何与机电一体化中的其他技术相适应，利用高新技术实现结构、材料、性能以及功能上的变更，满足减少重量，缩小体积，提高强度、刚度和精度，改善性能，增加功能等要求。在未来发展中，机电一体化系统的机械结构设计将会大量采用先进的设计与分析技术，例如 CAD、优化设计、可靠性设计、有限元分析等；在材料使用上，趋向使用新型金属、复合材料、轻量化材料以提高系统的强度、刚度等性能。

二、自动控制技术

控制装置（或系统）是整个机电一体化系统的核心，犹如人体的大脑。机电一体化系统设计是在自动控制理论的指导下，对具体的控制装置或控制系统进行设计，再对设计后的系统进行仿真、现场调试，最后使研制的系统可靠地投入运行。由于控制对象种类繁多，因此控制技术的内容比较丰富，例如定位控制、速度控制、自适应控制、自诊断、校正、补偿、检索等。随着计算机的广泛应用，自动控制技术与计算机控制技术紧密联系在一起，成为机电一体化系统中十分重要的关键技术。

机电一体化系统的控制技术从过去传统的机械控制、电气控制等发展为以计算机为主的控制方式，另一方面也从手动控制、半自动控制向全自动控制、智能控制方向发展。控制技术包括硬件与软件技术，硬件技术主要是超大规模集成电路技术与通信技术，为专用控制芯片和控制系统的开发提供基础，例如数控系统、机器人控制器、数字

信号处理器等；软件技术主要是用于系统自动控制、智能控制的数学模型、控制算法、编程技术等。

三、信息处理技术

信息是对客观世界中各种事物的运动状态和变化的反映，是客观事物之间相互联系和相互作用的表征，表现的是客观事物运动状态和变化的实质内容。信息处理技术是对信息进行处理的技术，包括信息收集、交换、存储、传输、显示、识别、提取、控制、加工和利用等，现阶段主要是指采用计算机进行信息处理的技术。计算机信息技术包括计算机的软件和硬件技术、网络与通信技术、数据库技术等。

在机电一体化系统中，计算机信息处理单元指挥整个系统的运行，信息处理是否正确和及时，直接影响到系统工作的质量和效率。因此计算机信息处理技术已成为促进机电一体化技术发展和变革的最活跃的因素。人工智能、云计算等技术等都属于计算机信息处理技术的范畴。

四、传感与检测技术

传感与检测技术是机电一体化系统获取外界信息，进行信息处理的一个重要步骤，是实现系统自动控制、自动调节的关键。在机电一体化系统中，利用传感与检测技术获取实时、准确、可靠的外部信息是控制单元进行正确分析、判断、决策的基础。

传感器是机电一体化系统接收内外部信息的主要元件，是将被测量（包括各种物理量、化学量和生物量等）变换成系统可识别的、与被测量有确定对应关系的有用电信号的一种装置。它与信息系统的输入端相连并将检测到的信息输送到计算机进行信息处理。

检测技术就是利用各种物理化学效应，选择合适的方法和装置，将机电一体化系统所需的信息通过检查与测量的方法赋予定性或定量结果的技术。能够自动地完成整个检测处理过程的技术称为自动检测技术。实现自动检测可以提高自动化水平，减少人为干扰因素和人为差错，进而提高机电一体化系统的可靠性及运行效率。

五、伺服驱动技术

伺服驱动技术是能够精确地跟随或复现某个过程的反馈的技术。能够运用伺服技术实

现伺服控制功能的系统称为伺服系统，它是实现电信号到机械动作的转换的装置或部件，对系统的动态性能、控制质量和功能具有决定性的影响。在机电一体化系统中，伺服系统专指被控制量（系统的输出量）是机械位移或位移速度、加速度的反馈控制系统，其作用是使输出的机械位移（或转角）准确地跟踪指令输入的位移（或转角）。

伺服驱动系统包括电动、气动、液压等各种类型的驱动装置。控制单元通过接口与伺服驱动单元相连接，控制它们的运动，带动工作机械作回转、直线以及其他各种复杂的运动。常见的伺服驱动装置有电液马达、脉冲油缸、步进电机、直流伺服电机和交流伺服电机等。变频技术的发展使交流伺服驱动技术取得了突破性进展，为机电一体化系统提供了高性能的伺服驱动装置，成为数控机床、工业机器人等设备的主要驱动形式。

六、系统总体技术

系统总体技术是一种从整体目标出发，用系统的观点和全局角度，将总体分解成相互有机联系的若干单元，找出能完成各个功能的技术方案，再把功能和技术方案进行分析、评价和优选的综合应用技术。系统总体技术解决的是系统的性能优化问题以及组成要素之间的有机联系问题，即使各个组成要素的性能和可靠性很好，如果整个系统不能很好协调，就很难保证正常运行。

七、系统集成技术

系统集成（System Integration），就是通过结构化的综合布线系统、计算机网络技术、接口技术，采用技术整合、功能整合、数据整合、模式整合、业务整合等技术手段，将各个分离的设备、软件和信息数据等要素集成到相互关联的、统一和协调的系统之中，使系统整体的功能、性能符合使用要求，使资源充分共享，实现集中、高效、便利的管理。系统集成技术是机电一体化系统集成中采用的集成方式、网络通信、信息接口等相关技术。

机电一体化系统集成是指采用接口、网络、总线等技术把机电一体化系统的各个单元或模块有机连接在一起，使各模块之间能够正确传输控制信息、传递运动与动力。实现集成的关键在于解决系统之间的互联和交互操作问题，构建一个多厂商、多协议和面向各种应用的体系结构。

第四节 机电一体化系统的发展

一、机电一体化技术的发展方向

机电一体化的产生与迅速发展的根本原因在于社会的发展和科学技术的进步。系统工程、控制论和信息论是机电一体化的理论基础，也是机电一体化技术的方法论。微电子技术的发展，半导体大规模集成电路制造技术的进步，则为机电一体化技术奠定了物质基础。由于机电一体化技术对现代工业和技术发展具有巨大的推动力，因此世界各国均将其作为工业技术发展的重要战略之一。20 世纪 70 年代，在发达国家兴起了机电一体化热；90 年代，中国把机电一体化技术列为重点发展的十大高新技术产业之一。

机电一体化技术在制造业的应用从一般的数控机床、加工中心和机械手发展到智能机器人、柔性制造系统（FMS）、无人生产车间和将设计、制造、销售、管理集成一体的计算机集成制造系统（CIMS）。机电一体化产品涉及工业生产、科学研究、人民生活、医疗卫生等各个领域，例如集成电路自动生产线、激光切割设备、印刷设备、家用电器、汽车电子、微型机械、飞机、雷达、医学仪器、环境监测等。机电一体化技术是其他高新技术发展的基础，机电一体化的发展依赖于其他相关技术的发展。可以预料，随着信息技术、材料技术、生物技术等新兴学科的高速发展，在数控机床、机器人、微型机械、家用智能设备、医疗设备、现代制造系统等产品及领域，机电一体化技术将得到更加蓬勃的发展。

以微电子技术、软件技术、计算机技术及通信技术为核心引发的数字化、网络化、综合化、个性化信息技术革命，不仅深刻地影响着全球的科技、经济、社会 and 军事的发展，而且也深刻影响着机电一体化的发展趋势。专家预测，机电一体化技术将向以下几个方向发展。

（1）光机电一体化方向。一般机电一体化系统是由传感系统、能源（动力）系统、信息处理系统、机械结构等部件组成的。引进光学技术，利用光学技术的特点，就能有效地改进机电一体化系统的传感系统、能源系统和信息处理系统。

（2）柔性化方向。未来机电一体化产品，控制和执行系统有足够的“冗余度”，有较强的“柔性”，能较好地应付突发事件，被设计成“自律分配系统”。在该系统中，各子

系统是相互独立工作的，子系统为总系统服务，同时具有本身的“自律性”，可根据不同环境条件做出不同反应。其特点是子系统可产生本身的信息并附加所给信息，在总的前提下，具体“行动”是可以改变的。这样，既明显地增加了系统的能力（柔性），又不因某一子系统的故障而影响整个系统。

（3）智能化方向。今后的机电一体化产品“全息”特征越来越明显，智能化水平越来越高，这主要得益于模糊技术与信息技术（尤其是软件及芯片技术）的发展。

（4）仿生物系统化方向。今后的机电一体化装置对信息的依赖性很大，并且往往在结构上处于“静态”时不稳定，但在“动态”（工作）时却是稳定的。这有点类似于活的生物：当控制系统（大脑）停止工作时，生物便“死亡”，而当控制系统（大脑）工作时，生物就很有活力。就目前情况看，机电一体化产品虽然有向仿生物系统化发展的趋势，但还有一段很漫长的道路要走。

（5）微型化方向。目前，利用半导体器件制造过程中的蚀刻技术，在实验室中已制造出亚微米级的机械元件。当这成果用于实际产品时，就没有必要再区分机械部分和控制部分了。那时，机械和电子完全可以“融合”机体，执行结构、传感器、CPU 等可集成在一起，体积很小，并组成一种自律元件。这种微型化是机电一体化的重要发展方向。

二、机电一体化技术的发展趋势

机电一体化产品的发展趋势如下。

（1）智能化。智能化即要求机电产品具有一定的智能，使它具有类似人的逻辑思考、判断推理、自主决策等能力。例如在数控加工机床上增加人机对话功能，设置智能 I/O 接口和智能工艺数据库，会给使用、操作和维护带来极大的方便。模糊数学、神经网络、灰色理论、心理学、生理学和混沌动力学等人工智能技术的进步与发展，为机电一体化技术的发展开辟了广阔天地。

（2）数字化。微控制器和接口技术的发展奠定了机电产品数字化的基础，例如不断发展的数控机床和机器人。而计算机网络的迅速崛起，为数字化设计与制造铺平了道路，例如虚拟设计、计算机集成制造等。数字化要求机电一体化产品的软件具有高可靠性、通用性、易操作性、可维护性、自诊断能力及友好的人机界面。数字化的实现将便于远程控制操作、诊断和修复。

（3）模块化。模块化是一项重要而艰巨的工程。由于机电一体化产品种类和生产厂家

繁多，研制和开发具有标准机械接口、动力接口、环境接口的机电一体化产品单元模块是一项复杂而有前途的工作，如研制具有集减速、变频调速于一体的动力驱动单元，具有视觉、图像处理、识别和测距等功能的电动机一体控制单元等。这样，在产品开发设计时，可以利用这些标准模块化单元迅速开发出新的产品，从而避免利益的冲突，并能使之标准化、系列化。

(4) 网络化。网络技术的兴起和飞速发展给社会各个领域带来了巨大变革。由于网络的普及，基于网络的各种远程控制和监视技术方兴未艾。而远程控制的终端设备本身就是机电一体化产品，现场总线和局域网技术使家用电器网络化成为可能，利用家庭网络把各种家用电器连接成以计算机为中心的计算机集成家用电器系统，使人们在家里可充分享受各种高新技术带来的好处，因此，机电一体化产品无疑应朝网络化方向发展。

(5) 自源化。自源化是指机电一体化产品自身带有能源。如太阳能电池、燃料电池和大容量电池。由于在许多场合无法使用电能，因而对于运动的机电一体化产品，自带动力源具有独特的优势。

(6) 人性化。人性化是各类产品的必然发展方向。机电一体化产品除了完善的性能外，还要求在色彩、造型等方面与环境相协调。使用这些产品，对人来说更自然，更接近生活习惯。

(7) 微型化。微型化是机电一体化向微型机器和微观领域发展的趋势。微机电系统是指可批量制作的，集微型机构、微型传感器、微型执行器及信号处理和控制电路，直至接口、通信和电源等于一体的微型器件和系统。微机电系统产品体积小、能耗少、运动灵活，在生物医疗、信息等方面具有不可比拟的优势。

(8) 绿色化。工业发达给人们的生活带来巨大变化，在物质丰富的同时也带来资源减少、生态环境恶化的后果，所以绿色产品的概念在这种呼声应运而生。绿色产品是指低能耗、低材料、低污染、舒适、协调且可再生利用的产品，在其设计、制造、使用和销毁时应符合环保和人类健康的要求。机电一体化产品的绿色化主要是指在其使用时不污染环境，产品寿命结束时，产品可分解和再生利用。

第二章

机械设计技术

机电一体化产品在日常生活、机械工程等领域应用非常广泛。图 2-1 所示为某公司生产的落地镗铣加工中心（工作台未画出）。工作时，经电动机-齿轮-齿条驱动立柱在床身上沿导轨水平方向移动；主轴箱在伺服电动机-同步带-滚珠丝杠驱动下沿立柱上、下移动；而滑枕在伺服电动机-同步带-滚珠丝杠的驱动下又可以沿主轴箱伸缩。

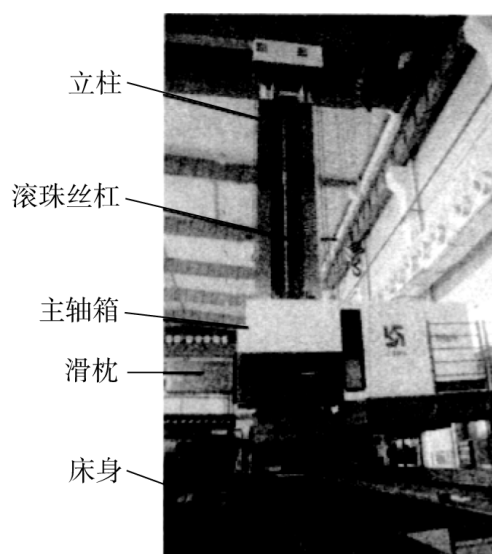


图 2-1 落地镗铣加工中心

第一节 机械设计概述

机械设计是机电一体化系统设计中必不可少的环节。它主要包含机械传动系统的设计和支撑导向装置的设计。而机械系统的传动类型、传动方式以及传动的可靠性对机电一体

化系统的精度、稳定性和快速响应性影响很大。这就要求在设计机械传动系统以及支撑和导向装置时，除了要满足强度和刚度要求外，还应该具有良好的抗振性、稳定性、可靠性以及相匹配的负载转动惯量等。

一、机械传动系统的类型及特点

常用的机械传动有齿轮传动（平行轴、相交轴和交错轴）、蜗轮蜗杆传动、带传动（V形带、平带）、同步带传动、丝杠螺母传动（普通丝杠螺母、滚珠丝杠螺母）、挠性传动、杆传动和间歇传动等。每一种传动都可以同时满足一种或几种功能要求。例如，齿轮齿条传动既可以将直线运动转换为回转运动，又可以将回转运动转换为直线运动，同时实现力和力矩的变送；带传动、蜗轮蜗杆传动及各类齿轮减速器不但可以变速，还可以变转矩。表 2-1 列举了机电一体化系统中常用的几种机械传动及其特点。

表 2-1 常用的机械传动系统及特点

类型	特点
齿轮（系）传动	用于传递平行轴、相交轴和交错轴之间的运动和动力；传动比准确。其中，直齿轮易于设计制造、成本低，使用最广泛；斜齿轮可用于高速重载和要求噪声低的场合，但存在较大的轴向力；人字齿轮传动具有斜齿轮传动的优点，且不会产生轴向力；交错轴斜齿轮传动由于齿面间的相对滑动，传动效率低，为点接触只能承受较轻负载；蜗轮蜗杆传动可用于高速重载，但传动效率低，功率损失较大；行星齿轮系结构紧凑、效率高，但结构比较复杂
谐波齿轮传动	用于传递平行轴之间的运动和动力。谐波齿轮传动是由行星齿轮传动演变而来的，可以是单端输入单端输出，也可以是双端输入单端输出，具有传动比大、结构紧凑的特点，但结构复杂
滚珠丝杠螺母传动	可以将旋转运动变为直线运动，具有摩擦损失小、传动效率高、传动平稳、寿命长、精度高、温升低等优点。但是，滚珠丝杠螺母传动不能自锁，用于升降传动时需要另加锁紧装置，且结构复杂，传动的距离和速度有限
同步带传动	兼具带传动和齿轮传动的优点传动比准确、传动平稳、允许的线速度高、噪声小、效率高、传动功率较大

注：将蜗轮蜗杆传动机构和轮系均归为齿轮系传动机构中。

二、机械系统的设计要求

在设计机械系统时，必须确定一系列的设计指标，即对所设计的产品提出必须满足的要求。设计要求不仅是设计、制造和验收的依据，也是用户检验的标准。机械系统的设计要求通常是围绕着技术性能和经济效益提出的，主要包括下列内容。