

机械设计工程师资格考试培训教材

机电一体化 系统设计

◎ 中国机械工程学会机械设计分会 组编
◎ 芮延年 主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

机械设计工程师资格考试培训教材

机电一体化系统设计

中国机械工程学会机械设计分会 组编

主 编 芮延年

参 编 赵根林 潘 巍

主 审 陈长琦



机械工业出版社

本书为机械设计工程师资格考试培训教材。本书从机电一体化技术角度出发,系统地阐述了“机电一体化系统设计”的原理、方法与应用。本书内容包括绪论,系统总体方案设计,机械传动系统设计,电气、液压驱动系统设计,传感器与检测系统,可编程序控制器(PLC)原理及应用,单片机原理及接口技术,机电一体化系统设计范例。

本书不但可以作为机械工程及自动化等相关专业的教材,同时也可作为机电一体化产品设计、制造和生产管理人员的学习和参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

机电一体化系统设计/芮延年主编;中国机械工程学会机械设计分会组编. —北京:机械工业出版社,2014.7

机械设计工程师资格考试培训教材

ISBN 978-7-111-46732-8

I. ①机… II. ①芮…②中… III. ①机电一体化—系统设计—工程师—资格考试—教材 IV. ①TH-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第099494号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:蔡开颖 责任编辑:蔡开颖 李超 王荣 卢若薇

版式设计:赵颖喆 责任校对:丁丽丽

封面设计:张静 责任印制:乔宇

唐山丰电印务有限公司印刷

2014年11月第1版第1次印刷

184mm×260mm·18.25印张·441千字

标准书号:ISBN 978-7-111-46732-8

定价:36.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

现代科学技术的迅猛发展，尤其是微电子技术、信息技术、传感与检测技术和机械技术的相互渗透，使传统的机械工业产生了较大的变革。机械装备的面貌已经焕然一新，一些广泛应用的传统机械运动系统，逐渐被机械电子机构所取代，传感器和微电子控制系统已成为机电产品的重要组成部分。现代机电产品已成为机与电高度融合的整体机电一体化产品。

本书为机械设计工程师资格考试培训教材，也可供见习机械设计工程师资格考试培训参考使用。本书主要介绍了机电一体化系统设计过程中，系统总体方案设计、机械传动系统设计、电气、液压驱动系统设计、传感器与检测系统、可编程序控制器（PLC）原理及应用、单片机原理及接口技术，并通过机电一体化系统设计范例对全书进行了综合总结。本书以“以机为主、电为机用、机电结合”为方向进行编写。全书分为8章，主要涉及内容如下：

第1章绪论。主要介绍机电一体化基本概念、关键技术及发展趋势。

第2章系统总体方案设计。主要介绍机电一体化系统设计基本原则、一般过程、总体方案设计等内容。

第3章机械传动系统设计。主要介绍机电一体化系统的机械传动和支承机构的功能及要求、齿轮传动的设计与选择、带传动的设计与选择、链传动的设计与选择、螺旋传动的设计与选择、间隙传动的设计与选择、自动给料机构、轴系部件的设计与选择等内容。

第4章电气、液压驱动系统设计。主要介绍机电一体化系统设计中电气驱动方式、电动机的选择、三相异步电动机、步进电动机、直线电动机、压电驱动器、液压传动系统、液压伺服控制系统的设计与选择等内容。

第5章传感器与检测系统。主要介绍传感器的基本概念，温度传感器，位移传感器，速度与加速度传感器，力、压力和转矩传感器，位置传感器，红外、图像传感器等常用传感器的工作原理及应用。

第6章可编程序控制器（PLC）的原理及应用。主要介绍可编程序控制器（PLC）的基本原理、指令系统和编程技术与方法，以及PLC基本逻辑指令应用编程。

第7章单片机原理及接口技术。主要介绍单片机的基本原理、PLC的基本构成、FX系列PLC的基本指令及编程、PLC基本逻辑指令应用编程等内容。

第8章机电一体化系统设计范例。主要通过几个产品开发设计实例，介绍机电一体化产品开发设计过程与方法。

本书的第1~4章和第8章由芮延年老师编写；第6、7章由赵根林老师编

写；第5章由潘巍老师编写，参考资料的收集与翻译也由其负责；全书由芮延年老师统稿，由陈长琦老师担任主审。本书在编写过程中参阅了国内外同行的教材、参考书、手册和期刊文献，在此谨致谢意。蒋澄灿、廖黎莉、管森等博士研究生为本书的插图收集、文字整理做了大量工作，在此表示衷心的感谢！

由于作者水平有限，错漏及不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者
于苏大后庄

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 机电一体化基本概念	1
1.2 机电一体化系统的分类与应用	3
1.3 机电一体化产品设计方法	6
1.4 机电一体化技术发展方向	8
习题与思考题	13
第 2 章 系统总体方案设计	14
2.1 概述	14
2.2 机电一体化系统设计基本原则	14
2.3 机电一体化系统设计的一般过程	19
2.4 总体方案设计	24
习题与思考题	36
第 3 章 机械传动系统设计	37
3.1 机械传动和支承机构的功能及设计 要求	37
3.2 齿轮传动的设计与选择	38
3.3 带传动的设计与选择	46
3.4 链传动的设计与选择	58
3.5 螺旋传动的设计与选择	63
3.6 间歇传动的设计与选择	72
3.7 自动给料机构	75
3.8 轴系部件的设计与选择	80
习题与思考题	97
第 4 章 电气、液压驱动系统设计	99
4.1 电气驱动方式	99
4.2 电动机的选择	100
4.3 三相异步电动机	101
4.4 步进电动机	114
4.5 直线电动机	118
4.6 压电驱动器	123
4.7 液压传动系统的设计	127
4.8 液压传动系统设计计算举例	137
4.9 液压伺服控制系统	142
习题与思考题	150

第 5 章 传感器与检测系统	151
5.1 概述	151
5.2 温度传感器	153
5.3 位移传感器	159
5.4 速度与加速度传感器	168
5.5 力、压力和转矩传感器	170
5.6 位置传感器	179
5.7 红外、图像传感器	181
习题与思考题	188
第 6 章 可编程序控制器 (PLC) 的原理及应用	189
6.1 概述	189
6.2 PLC 的基本构成	193
6.3 FX 系列 PLC 概述	197
6.4 FX 系列 PLC 的基本指令及编程	201
6.5 PLC 基本逻辑指令应用编程	213
6.6 PLC 控制综合应用实例——送料 小车控制	216
习题与思考题	218
第 7 章 单片机原理及接口技术	219
7.1 单片机的工作原理	219
7.2 单片机扩展与接口技术	243
7.3 单片机应用实例	258
习题与思考题	262
第 8 章 机电一体化系统设计范例	263
8.1 机电一体化系统 (产品) 设计 基本方法	263
8.2 激光加工机的设计 (实例 1)	264
8.3 机械手自动控制 (实例 2)	272
8.4 单片机应用设计实例——机械预缩 机预缩量的控制 (实例 3)	275
习题与思考题	282
参考文献	283

第 1 章 绪 论

1.1 机电一体化基本概念

1.1.1 机电一体化的定义

“机电一体化”在国外被称为“Mechatronics”，是日本人在 20 世纪 70 年代提出来的，它是取机械学（Mechanics）的前半部分和电子学（Electronics）的后半部分组合起来构成的，意思是融合机械技术、电子技术、信息技术、自动控制技术等为一体的新兴交叉技术。

机械技术是一门古老的学科，它为人类社会的进步与发展做出了卓越贡献，直到今天机械技术仍然是现代工业的基础，国民经济的各个部门都离不开它。机械种类繁多，功能各异，不论哪一种机械，从诞生以来都经历了使用→改进→再使用→再改进，即不断革新和逐步完善的过程，可以说机械技术的发展是无止境的。

随着科学发展与进步，人们认识到机械学科发展到今天，与其他新兴学科相比，其发展速度开始变得缓慢，有些问题单从机械角度对它们进行改进是越来越不容易了。

机电一体化以新兴的微电子技术、计算机信息技术、自动控制技术、传感器检测技术、电力电子技术、接口技术、信号转换技术、软件编程技术和新材料技术等相关群体技术深度结合的基础上，产生的机电一体化系统技术。

机电一体化系统是一个综合的概念，它包含了技术和产品两方面内容。机电一体化技术主要是指包括技术基础、技术原理在内的，使机电一体化产品得以实现和发展的技术；机电一体化产品是指采用机电一体化技术，使产品的机械系统或部件与微电子等系统或部件，相互置换或有机结合而构成新的系统，且赋予其新功能和性能的新一代机电一体化产品。机械产品发展到机电一体化产品可以划分为 4 个阶段，见表 1-1。

表 1-1 机械产品发展到机电一体化产品 4 个阶段的划分

阶 段	第 1 阶段	第 2 阶段	第 3 阶段	第 4 阶段
系统构成	机械	机械 + 电器	机械 + 电子 + 软件	机械 + 电子 + 软件 + 相关新技术
驱动方式	传统机械驱动	以驱动器、电动机为主的驱动	变频电机驱动、液压伺服驱动	变频器和伺服器集成驱动
控制方式	机械开关控制	电器 + 机械开关联合控制	电气 + 电子 + 软件集成控制	计算机 + 软件智能控制

1.1.2 机电一体化系统的基本构成

一个较完善的机电一体化系统，应包含机械本体、动力与驱动、执行机构、传感与检测、信息处理及控制五个基本要素。这些组成部分内部及其相互之间，通过运动传递、物质流动、信息控制、接口耦合、能量转换等有机结合，集成一个完整的机电一体化系统，如图 1-1a 所示。它与构成人体的头脑、感官（眼、耳、鼻、舌、皮肤）、手足、内脏及骨骼等五大部分相类似，如图 1-1b 所示。机械本体相当于人的骨骼，动力源相当于人的内脏，执行机构相当于人的手足，传感器相当于人的感官，信息处理及控制相当于人的大脑。由此可见，机电一体化系统内部的五大功能与人体的功能几乎是一样的，因而，人体是机电一体化产品发展的最好蓝本，实现各功能的相应构成要素如图 1-1c 所示。

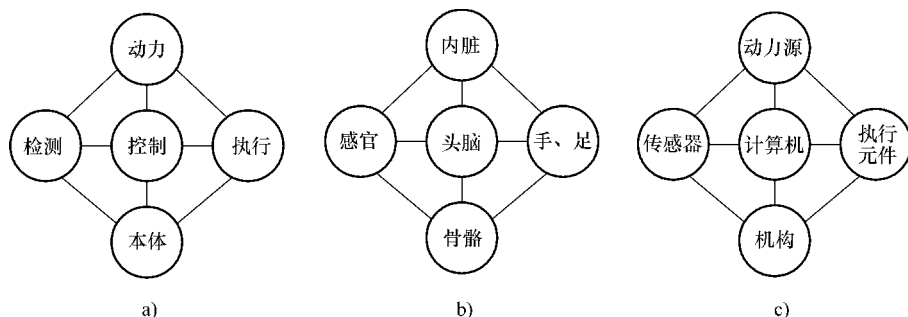


图 1-1 机电一体化系统与人体对应部分及相应功能的关系

1. 机械本体

机械本体是机电一体化系统的基本支持体，它通常包括机身、框架、连接等。由于机电一体化产品性能、水平和功能的不断提高，要求机械本体在机械结构、材料、加工工艺以及几何尺寸等方面能适应机电一体化产品多功能、高可靠性、轻量、美观和节能等要求。

2. 动力与驱动

机电一体化产品的显著特征之一，是用尽可能小的动力输入，获得尽可能大的功能输出。机电一体化产品不但要求驱动效率高、反应速度快，而且要求对环境适应性强和可靠性高。由于电力电子技术的发展，高性能伺服驱动等技术在机电一体化产品中的应用，使得动力与驱动更加简捷方便。

3. 传感与检测

传感与检测是机电一体化系统中的关键技术。传感器是将力、位移、速度、加速度、温度、距离、图像、pH 值等（物理量、化学量、生物量）转换成电量的装置，即引起电阻、电流、电压、电场及频率的变化。通过相应的信号检测与处理技术将其反馈给控制系统，因此，传感与检测是实现自动控制的关键环节。

4. 执行机构

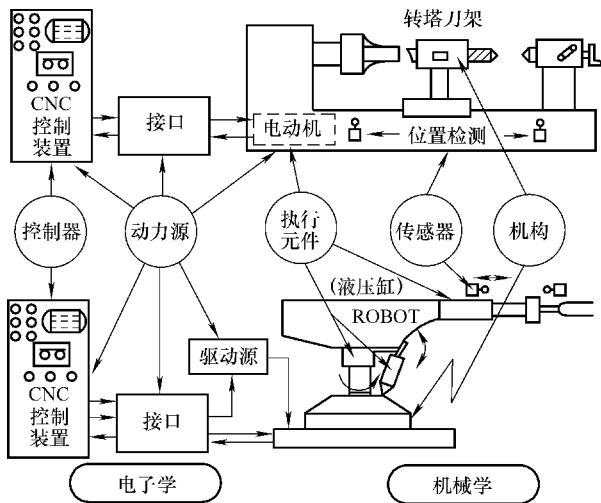
通常执行机构是根据控制信息和指令，完成要求的动作的。执行机构一般采用机械、液压、气动、电磁以及机电相结合的方式。在设计机电一体化系统的执行机构时，可以通过采用标准化、系列化和模块化等方法来提高执行机构的性能。

5. 信息处理与控制

信息处理与控制是指,对来自各传感器的检测信息和外部输入命令进行集中、储存、分析、加工、信息处理等,使之符合控制要求。实现信息处理的主要工具是计算机。

在机电一体化产品中,信息处理与计算机指挥着整个系统的运行,其正确与否及运行将直接影响到系统的工作质量和效率,因此,信息处理与控制已成为机电一体化技术和产品发展最活跃的因素。信息处理一般由计算机、可编程序控制器(PLC)、数控装置以及逻辑电路、A-D与D-A转换、I/O(输入/输出)接口及外部设备等组成。

从上述介绍可以看出,机电一体化系统的基本特征就是给“机械”增添了信息处理与控制头脑,信息处理只是把传感器检测到的信号转化成可以控制的信号,系统如何运动还需要通过控制来进行。也就是说,机电一体化系统的性能在很大程度上取决于控制系统。控制系统不仅与计算机及其输入、输出通道有关,还与所采用的控制技术有关。控制技术又分为线性控制、非线性控制、最优控制、学习控制等现代控制技术。控制必须从系统工程的角度出发,灵活有机地运用现有的机械技术、电子技术和信息技术等,对系统进行最优控制或智能控制。



机电一体化系统的五大要素及其相应的五大功能如图 1-2 所示。

图 1-2 机电一体化系统的五大要素及其相应的五大功能

1.2 机电一体化系统的分类与应用

正像机电一体化系统定义的那样,机电一体化系统包括技术和产品,在具体应用时往往会涉及电气、电子、光学、仪器仪表、液压和气动等技术。国内外一些研究者先后提出过光机电一体化技术(如数码照相机)、机电仪一体化技术(如核磁共振扫描仪)、机电液一体化技术(如液压挖掘机)等概念及定义。但是,不管是光机电一体化技术、机电仪一体化技术还是机电液一体化技术,都表明了该技术或产品采用了机电相关新技术,所以认为,统称为“机电一体化系统”或简称为“机电一体化”较为简洁、合适。因此,可以说机电一体化系统有着极其广泛的含义,自动化的机电产品、自动化的生产工艺、设备故障监测与诊断技术、数控技术、CAD 技术、CAPP 技术、CAM 技术、集成化的 CAD/CAPP/CAM 技术、专家系统、计算机仿真、生产过程计算机管理、机器人等都属于机电一体化系统的范畴。

目前世界上普遍认为机电一体化可以分成:生产过程的机电一体化和机电产品的机电一体化两大类。

1. 生产过程的机电一体化

生产过程的机电一体化意味着工业生产体系的机电一体化,如机械制造过程的机电一体化、化工生产过程的机电一体化、冶金生产过程的机电一体化、纺织与印染生产过程的机电

一体化、电子产品生产过程的机电一体化、排版与印刷过程机电一体化等。

生产过程的机电一体化又可根据生产过程的特点（如生产设备和生产工艺是否连续），划分为离散制造过程的机电一体化和连续生产过程的机电一体化。前者以机械制造业为代表，后者以化工生产流程为代表。

生产过程的机电一体化主要包括产品设计、加工、装配、检验的自动化和经营管理自动化等。其主要涉及以下几个方面。

(1) 计算机辅助设计 计算机辅助设计（Computer Aided Design, 简称 CAD），是指计算机和相关软件应用于产品设计的全过程，其中包括资料检索、方案构思、计算分析、工程绘图和编制文件等。计算分析主要是指利用计算机的强大数据处理和存储能力对产品进行静态分析、优化设计和计算机仿真，广义的 CAD 还包括计算机辅助分析（CAE）。采用 CAD 的目的是使整个设计过程实现自动化，CAD 系统可以把设计人员从繁重的计算、绘图工作中解放出来，使他们有更多的时间去从事创造性活动。

(2) 计算机辅助工艺设计 计算机辅助工艺设计（Computer Aided Process Planning, 简称 CAPP），是指在计算机系统的支持下，根据产品设计要求，选择加工方法、确定加工顺序、分配加工设备等整个生产加工工艺过程。CAPP 的目的是实现生产准备工作的自动化，由于工艺过程的设计复杂，工艺方法往往又与企业设备、工人和技术人员水平等因素有关，在多数情况下，把 CAPP 看做 CAM 的一个组成部分。

(3) 计算机辅助制造 计算机辅助制造（Computer Aided Manufacturing, 简称 CAM）。从广义来说，CAM 是指在机械制造过程中，利用计算机通过各种设备，如机器人、加工中心、数控机床、传送装置等，自动完成产品的加工、装配、检测和包装等制造过程，同时也包括计算机辅助工艺设计 CAPP 和 NC 编程。采用计算机辅助制造零部件，可改善对产品多变的适应能力，提高加工效率和生产自动化水平，缩短加工准备时间，降低生产成本，提高产品质量。

(4) CAD/CAPP/CAM 集成系统 随着技术进步和计算技术的发展，现代制造过程中，CAD、CAPP、CAM 独立存在的情况已越来越少，基于计算机网络环境下的协同设计与制造技术是今后的发展方向。而 CAD/CAPP/CAM 集成系统是其关键技术，一些发达国家和著名公司都给予了极大的重视，投入了大量人力物力进行研究和开发。统计数据表明 CAD/CAPP/CAM 集成系统不但方便设计、查询和修改，而且可以大幅度地提高工效。

(5) 柔性制造系统 柔性制造系统（Flexible Manufacturing System, 简称 FMS）又称为计算机化的制造系统。其主要由计算机、数控机床、机器人、自动化仓库、自动搬运小车等组成。它可以随机、实时地按照工艺要求进行生产，它特别适合于多品种、小批量和离散零件的生产。

FMS 需要数据库的支持，FMS 所用的数据库一般有两种：一种是零件数据库，用于存储零件加工相关信息，如工件尺寸、工夹具要求、成组代码、材料、加工计划、进给量和速度等数据。另一种是信息管理和控制数据库，主要用于存储、管理和控制设备信息状态等。

(6) 计算机集成制造系统（CIMS） 计算机集成制造系统（Computer Integrated Manufacturing Systems, 简称 CIMS）。就是计算机辅助生产管理与 CAD/CAM 及车间自动化设备的集成。所谓车间自动化设备是指 FMS、FMC、数控机床、数控加工中心、机器人等一系列自动化生产设备。换言之，CIMS 是在柔性制造技术、信息技术和系统科学的基础上，将制造

工厂经营活动所需的各种自动化系统有机地集成起来,使其能适应市场多品种、小批量、高效益、高柔性的智能生产系统要求。

2. 机电产品的机电一体化

当传统机电产品引入电子、计算机、自动控制等新技术,就可能形成新一代的机电一体化产品,也可以这样定义,带有微处理器的机电产品才可以称为机电一体化产品。

在机电一体化产品中又可分为机械产品电子化(取代设计)和产品机电一体化(融合设计)两种形式。

机械产品电子化就是原有的机械产品采用了电子等相关技术之后,其性能和功能都有了很大的提高,甚至在原理、结构上也发生了变化,部分原理、结构被电子相关技术所替代。

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,如激光雕铣机采用激光连续加工的方法代替了传统方式的金属切削加工;数码照相机的电子曝光、对焦方式代替了机械式曝光和对焦等。

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、电子交换机等。

3) 机械传动与控制机构被电子电路代替,如缝纫机的凸轮机构被伺服电动机等所代替,加热炉中的机械顺序控制方式被 PLC 或单片机程序所替代。

4) 采用微电子技术可以增加系统和产品功能,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。

传统的机电产品加上微处理器、自动控制技术等,可使其转变为新一代的产品,而这种新机电产品较之旧机电产品往往功能强、性能好、精度高、体积小、重量轻、更可靠、更方便、经济效益显著。

机电一体化产品小到儿童玩具、家用电器、办公设备,大到数控机床、机器人、自动化生产线、航空航天器等。因此,可以说机电一体化技术和产品几乎涉及社会的各个方面,涉及的主要内容如图 1-3 所示。

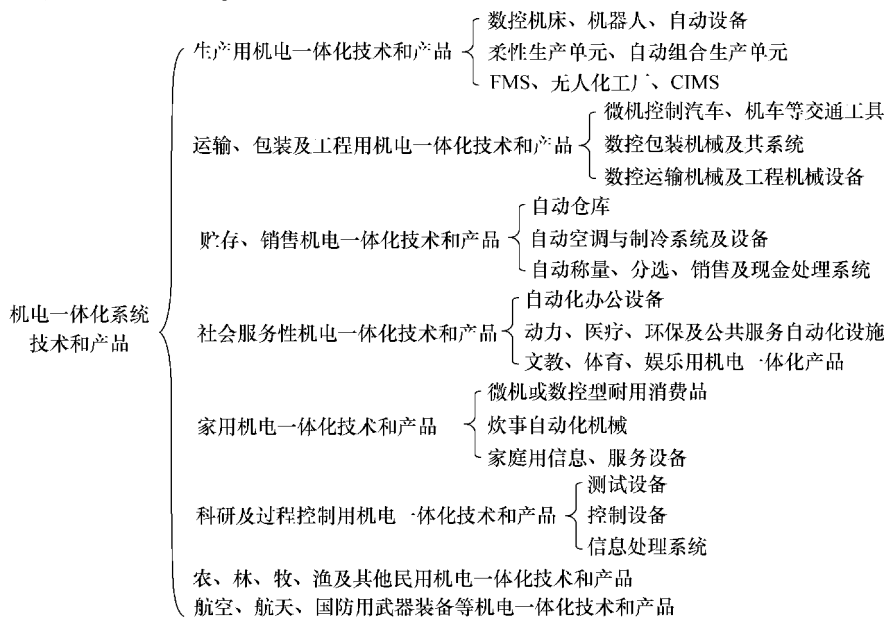


图 1-3 机电一体化技术与产品所涉及的主要内容

1.3 机电一体化产品设计方法

机电一体化产品种类繁多，涉及的技术领域及其复杂程度不同，产品设计的类型也不同。现代设计方法与传统设计方法不同之处在于，机电一体化产品设计是以计算机为辅助手段的现代设计方法。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，如创新设计、优化设计、有限元法、可靠性设计、虚拟设计、绿色设计等，才能较好地完成机电一体化产品设计。

由于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以引起重视，其实有些方法也并非是最新的。由于当前传统设计与现代设计正处在共存性阶段，现代设计与传统设计方法相比，现代设计是一种以动态分析、精确计算、优化设计为特征的设计方法，图 1-4 所示为现代设计方法的基本工作流程。

上述现代设计方法的基本工作流程不是绝对的，只是一个大致的设计路线。现代设计方法对传统设计中的某些精华必须予以承认，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。

正像前面对机电一体化定义的那样，机电一体化是机械技术、电子技术和信息技术等相关技术的有机结合。因此，在从事机电一体化产品设计时需考虑哪些功能由机械技术实现会更好一些，哪些功能由电子技术实现更合适等。同时还需要考虑哪些功能由硬件实现，哪些功能由软件实现以及机、电、液传动如何匹配整合优化等问题。这就要求在进行机电一体化产品设计时，采用现代设计方法，综合运用机械技术和电子技术的特点，充分发挥其优越性。下面对常用的现代设计方法进行简介。

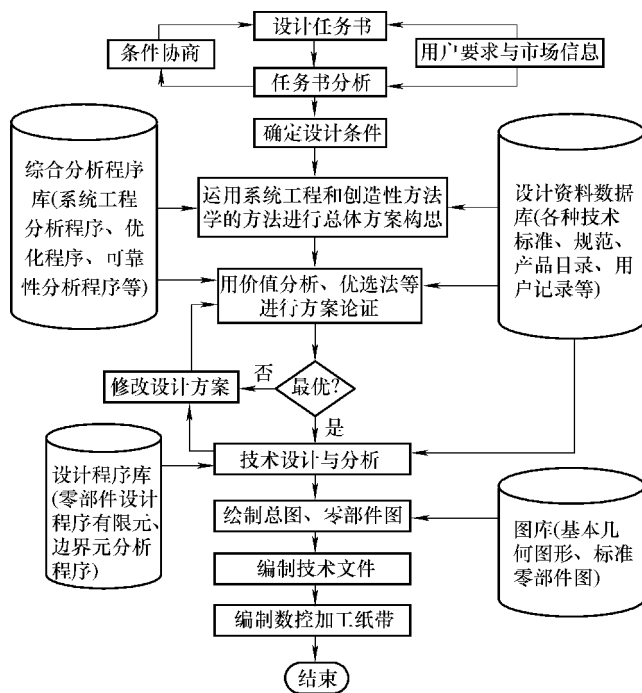


图 1-4 现代设计方法的基本工作流程

1.3.1 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。

一般把技术创新分为如下三类：

一种是不明显的创新。只是通过形式上的翻新，获得相应竞争能力。例如，按用户订单

生产不同颜色的自行车,按用户需求生产具有个性的家用小汽车等。这种创新可以简称为适应性创新。

第二种是较好的创新。是通过对技术、产品的改进优化,使之质量、性能等有了较大的提高。例如,采用数控技术对传统机床进行改造,改造后的机床性能、生产能力等都有了很大的提高;又如将喷墨打印技术与纺织印花技术结合起来,形成喷墨印花技术等。这种创新可以简称为集成式创新。

第三种是较显著的创新。由于研发了一种新技术,使得产品竞争力显著提高,形成新的竞争力和制高点。例如,研发的LED显示技术,改变了传统电视显示方式,使电视图像更清晰、体积更小、价格更低;又如,电动汽车用电池,如果谁能设计和制造出一种体积小、蓄电量高、长寿命、充电速度快的高性能电池,就会产生新的竞争力和制高点,像这种创新将不仅具有实际意义,而且也具有较好的历史意义。这种创新可以简称为创造式创新。

常用创新设计方法很多,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。

1.3.2 优化设计

在传统的设计中,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。

在计算机应用之前,人们曾用经典的函数极小化概念,处理简单结构优化设计问题。当工程问题较复杂时,这种理论在实际应用上受到了很大的限制。自计算机问世后,设计才从传统的设计方法,走上了优化设计方法。概括地说,优化设计就是以数学规划理论为基础,以计算机为工具的一种参数设计方法。

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是把经验的、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,使整个设计过程逐步向自动化、集成化、智能化方向发展。

1.3.3 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,称为有限单元。各单元之间仅在有限个指定结合点处相连接,用组成单元集合体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得到系统的动态特性。

1.3.4 可靠性设计

可靠性是产品在规定条件下和规定时间内,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，需要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，从而弥补了常规设计方法的不足。

1.3.5 虚拟设计与制造

虚拟设计可以理解为在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。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试验（如使用 SolidWorks 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。设计者在计算机上建立制造过程和设备模型，与产品的数字原型结合，对制造过程进行全面的仿真分析，优化产品的制造过程、工艺参数、设备性能、车间布局。所谓 3D 打印，就是利用快速成形技术（热熔塑料丝堆积、激光粉末烧结、光敏树脂固化等），进行实物制造。通过虚拟制造或 3D 打印可以预测制造过程中可能出现的问题，提高产品的制造性和装配性，使产品制造过程更加合理和经济。

1.3.6 绿色设计

绿色设计是以环境资源保护为核心概念的设计过程，它要求在产品整个寿命周期内把产品的基本属性和环境属性紧密结合。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，以达到绿色设计要求。

绿色设计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，并易于拆卸回收和翻新或能够安全废置并长期无虑。

绿色设计是这样一种方法，即在产品整个生命周期内，优先考虑产品环境属性（可拆卸性、可回收性、可维护性、可重复利用性等），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。

1.4 机电一体化技术发展方向

1.4.1 机电一体化技术发展主要模式

机电一体化技术是机械、微电子、控制、计算机、信息处理等多学科的交叉融合，其发展与进步有赖于相关技术的进步和发展，其主要发展方向有数字化、模块化、智能化、网络

化、人性化、微型化、集成化、资源化和绿色化。

(1) 数字化 微处理器和微控制器的发展奠定了机电一体化产品数字化的基础。如不断发展的数控机床和机器人；计算机网络的迅速崛起，为数字化设计与制造铺平了道路，如虚拟设计、3D 打印、计算机集成制造等。数字化要求机电一体化产品具有高可靠性、易操作性和维护性、自诊断能力以及友好人机界面。数字化的实现将便于远程操作、诊断和修复。产品的虚拟设计、3D 打印、计算机集成制造技术的运用，会进一步提高设计、制造效率，节省开发费用等。

(2) 模块化 由于机电一体化产品种类和生产厂家繁多，研发具有标准机械接口、动力接口、环境接口和信息接口的机电一体化产品单元模块是一项复杂但有前途的事情。如研制集减速、变频调速机电一体化的动力驱动单元；具有视觉、图像处理、识别等功能的机电一体化控制单元等。这样在产品开发设计时，可以利用这些标准化模块迅速开发出新的产品。

(3) 智能化 要求机电产品有一定的智能。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 CNC 数控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，这样可给使用、操作和维护带来极大的方便。模糊控制、人工神经网络、灰色理论、小波理论、混沌与分岔等人工智能技术的进步，为机电一体化技术的发展开辟了广阔天地。

(4) 网络化 由于网络的普及（互联网、物联网、云计算等），基于网络的各种远程控制和监视技术得到了发展，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集成家用电器系统，使人们在家里充分享受各种高技术带来的好处，因此，机电一体化产品无疑应朝着网络化方向发展。

(5) 人性化 机电一体化产品的最终使用对象是人，如何在机电一体化产品里赋予人的智能、情感和人性显得越来越重要。机电一体化产品除了小巧玲珑和具有完善的性能外，还要求在色彩、造型等方面都与环境相协调并柔和一体，对使用这些产品的人来说，不仅是对产品功能的享受，也是一种艺术享受，如家用机器人就是人机一体化的最高境界。

(6) 微型化 微型化是精细加工技术发展的必然，也是提高效率的需要。微机电系统（Micro Electronic Mechanical Systems，简称 MEMS）是指可批量制作的集微型机构、微型传感器、微型执行器、信号处理、控制电路、接口、通信和电源等为一体的微型器件或系统。自 1986 年美国斯坦福大学研制出第一个医用微探针，1988 年美国加州大学 Berkeley 分校研制出第一个直径为 $200\mu\text{m}$ 的微电机以来，国内外在 MEMS 工艺、材料以及微观机理研究方面取得了很大进展，开发出各种 MEMS 器件和系统，如各种微型传感器（微压力传感器、微加速度计、微触觉传感器），各种微构件如微膜、微梁、微探针、微连杆、微齿轮、微轴承、微泵、微弹簧以及微机器人等。

(7) 集成化 集成化既包含各种技术的相互渗透、相互融合和各种产品不同结构的优化与复合，又包含在生产过程中同时处理加工、装配、检测、管理等多种工序。为了实现多品种、小批量生产的自动化与高效率，应使系统具有更广泛的柔性。首先可将系统分解为若干层次，使系统功能分散，并使各部分协调而又安全地运转，然后再通过软、硬件将各个层次有机地联系起来，使其性能最优、功能最强。

(8) 带源化 带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等。但是在许多场合,无法获得电能,而对于运动的机电一体化产品,自带动力源具有独特的好处,如手机、数码相机等,带源化是机电一体化产品的发展方向之一。

(9) 绿色化 科学技术的发展给人们的生活带来了巨大变化,在物质变得丰富的同时也导致了资源减少、生态环境恶化的后果。所以,人们呼唤保护环境、回归自然、实现可持续发展,绿色产品概念在这种呼声中应运而生。绿色产品是指低能耗、低材料、低污染、舒适、协调而可再生利用的产品。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不但指在其生产和使用过程中不对环境产生污染,而且要求在产品寿命结束时,产品残存部分还应该可以分解和再生利用。

1.4.2 从典型机电一体化产品看机电一体化技术发展趋势

随着社会进步和科学技术的发展,对制造工程中的机电一体化技术提出了许多新的和更高的要求,制造工程中出现了一系列新概念。毫无疑问,机械制造自动化中的数控技术、FMS、CIMS及机器人等都会一致被认为是典型的机电一体化技术、产品及系统。

为了提高机电产品的性能质量,一些零件的制造精度要求越来越高,形状也越来越复杂,如高精度轴承的滚动体圆度要求小于 $0.05\mu\text{m}$;激光打印机的平面反射镜和录像机磁头的平面度要求为 $0.025\mu\text{m}$,表面粗糙度值为 $0.015\mu\text{m}$ 。

一些零件为了提高效率、减少阻力和降低噪声,往往被设计成复杂的空间曲面,如螺杆压缩机包络成形螺旋曲面、膨胀机的叶轮叶片、飞机螺旋桨、潜水艇推进器等都具有极其复杂的空间曲面;现代汽车发动机的一些活塞已不是圆柱形,被设计成椭圆鼓形;为提高强度和使用寿命,一些机械轴也不再是圆柱形而是由几段圆弧组成的复合圆柱体;卫星天线的馈源要求有方与圆光滑过渡实体;而各类特殊刀具与模具,其型面也极其复杂。所有这些,都要求CNC机床具有高性能、高精度和稳定加工复杂形状零件表面的能力。因此,机电一体化技术和产品正朝着高性能、智能化、系统化以及轻量化、微型化方向发展。

(1) 机电一体化产品的高性能化 高性能化一般包含高速化、高精度、高效率和高可靠性。新一代CNC系统就是以此“四高”为满足生产急需而诞生的。它采用128位或者256位CPU结构,以多总线连接,高速数据传递。因而,在相当高的分辨率($0.1\mu\text{m}$)情况下,系统仍有高速度($150\text{m}/\text{min}$),可控及联动坐标达24轴,并且有丰富的图形功能和自动程序设计功能。如瑞士米克朗公司生产的一种新型五轴联动铣削加工中心,主轴转速最高可达到 $100000\text{r}/\text{min}$,重复定位精度不大于 $1\mu\text{m}$ 。

在高性能数控系统中,除了具有直线、圆弧、螺旋线插补等一般功能外,还配置有特殊函数插补运算,如样条函数插补等。微位置段命令用样条函数来逼近,保证了位置、速度、加速度都具有良好的性能,并设置专门函数发生器、坐标运算器进行并行插补运算。超高速通信技术、全数字伺服控制技术是高速化的两个重要方面。

高速加工机床、技术、刀具和系统可靠性方面发展也较快,如法国IBAG公司等的磁悬浮轴承的高速主轴最高转速可达 $15 \times 10^4\text{r}/\text{min}$,加工中心换刀速度快达 1.5s 。切削速度方面,目前硬质合金刀具和超硬材料涂层刀具车削和铣削低碳钢的速度达 $500\text{m}/\text{min}$ 以上,而陶瓷刀具可达 $800 \sim 1000\text{m}/\text{min}$,比高速钢刀具 $30 \sim 40\text{m}/\text{min}$ 的速度提高了数十倍。系统可靠性方面采用了冗余、故障诊断、自动检错、纠错、系统自动恢复、软硬件可靠性等技术予