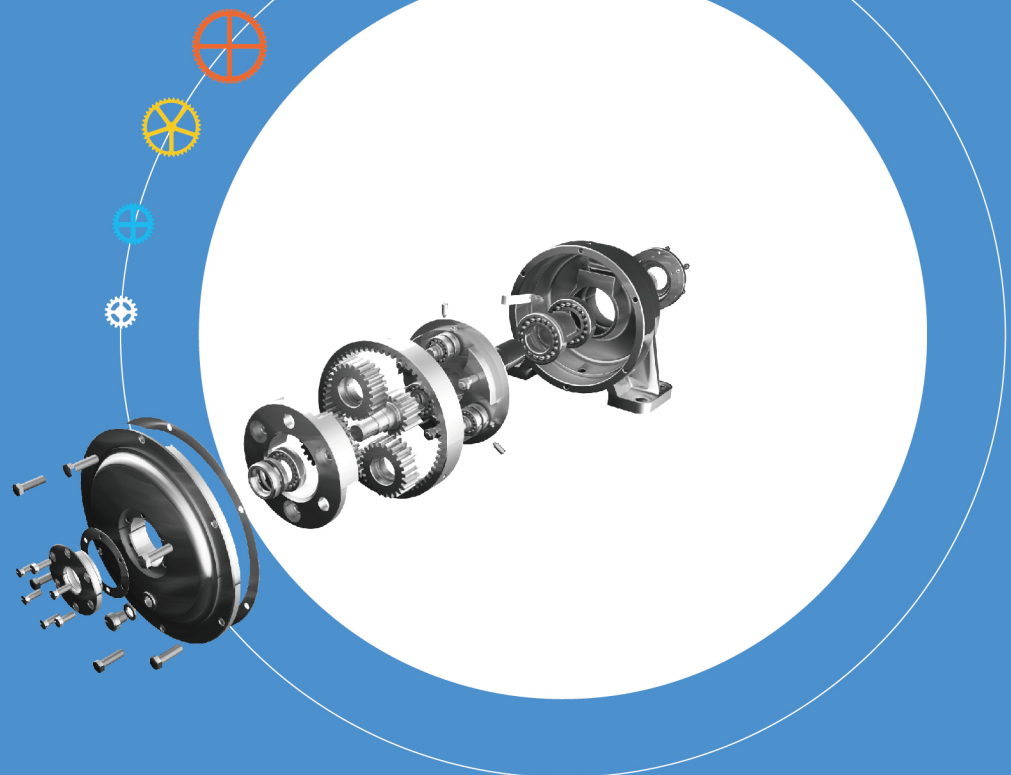


巍巍交大 百年书香
www.jiaodapress.com.cn
bookinfo@sjtu.edu.cn



策划编辑 刘子嘉
责任编辑 胡思佳 柳卫清
封面设计 刘文东



机电一体化技术

机电一体化技术

主编 晏祖根



主编 晏祖根

机电一体化技术



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

免费提供
精品教学资料包
服务热线: 400-615-1233
www.huatengedu.com.cn



扫描二维码
关注上海交通大学出版社
官方微信

ISBN 978-7-313-26859-4

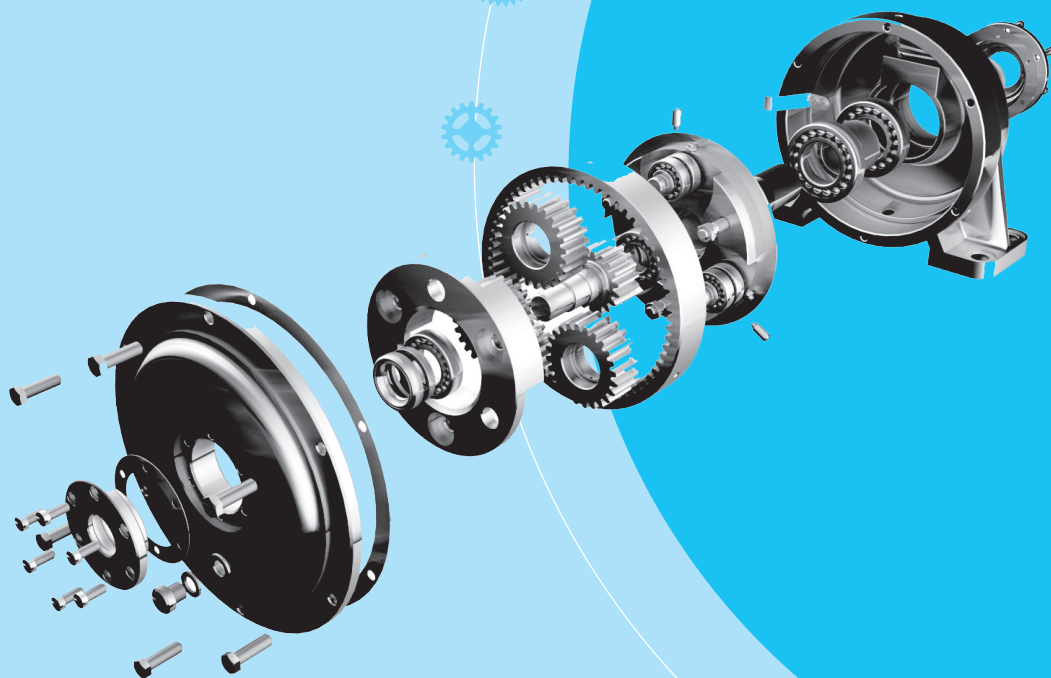


9 787313 268594 >

定价: 39.80元



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



主 编 晏祖根
副主编 钟高峰 王 凤

机电一体化技术



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书共 8 章,内容包括机电一体化总论、机电一体化机械系统、机电一体化执行机构、机电一体化控制系统、机电一体化传感系统、机电一体化伺服控制技术、机电一体化总体设计和典型机电一体化系统实例分析。本书可作为高等院校机电、数控相关专业的教学用书,也可作为相关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

机电一体化技术/晏祖根主编. — 上海:上海交通大学出版社, 2022. 9

ISBN 978-7-313-26859-4

I. ①机… II. ①晏… III. ①机电一体化—教材
IV. ①TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 139813 号

机电一体化技术

JIDIAN YITIHUA JISHU

主 编:晏祖根

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

印 制:三河市骏杰印刷有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

字 数:297 千字

版 次:2022 年 9 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-26859-4

定 价:39.80 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:12.25 插页 1

印 次:2022 年 9 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如您发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:0316-3662258

前言

PREFACE

本书以机电一体化共性关键技术为基础,围绕各种技术的融合与综合应用构建知识体系,使读者了解和掌握机电一体化的基础理论和基本方法,从而能够综合运用共性关键技术进行机电一体化产品乃至系统的分析、设计与开发。

本书详细介绍了机电一体化技术的相关知识,全书共8章。第1章是机电一体化总论部分,讲解了机电一体化的概念、机电一体化产品的特征和分类、机电一体化系统组成和相关技术、机电一体化技术的发展历程等内容;第2章是机电一体化机械系统,重点讲解机电一体化机械系统组成、机械系统性能分析、机械系统运动控制,以及精密传动机构等内容;第3章是机电一体化执行机构,重点讲解执行机构的分类、动作原理和性能特点,对电动、液压、气动以及其他新型执行装置等执行机构的组成、原理和特点进行了介绍;第4章是机电一体化控制系统,重点讲解控制系统的组成与作用、分类与设计,并对工控机、单片机、PLC和接口技术做了介绍;第5章为机电一体化传感系统,重点讲解传感系统的分类和组成,以及各种常用传感器;第6章为机电一体化伺服控制技术,讲解了伺服的概念,伺服系统的分类、组成和要求,重点讲解了直流伺服电动机、步进电动机、交流伺服电动机和液压伺服系统的组成、工作原理和性能;第7章为机电一体化总体设计,重点讲解了机电一体化总体设计的内容、性能指标分析、功能指标及性能指标分配;第8章为典型机电一体化系统实例分析,重点讲解了机器人、数控机床、电梯的结构组成和工作原理。

本书在编写上注重理论联系实际、深入浅出、难度适宜。

本书由哈尔滨商业大学晏祖根任主编,齐齐哈尔技师学院钟高峰、杭州市临安区技工学校王凤任副主编。具体编写分工如下:晏祖根编写第1章至第3章,钟高峰编写第4章、第5章、第8章,王凤编写第6章和第7章。

尽管编者在教材编写方面做出了很多努力,但由于水平有限,书中存在的疏漏和不当之处,恳请各位读者多提宝贵意见和建议。

编者

目录

CONTENTS

第 1 章 机电一体化总论

↔ 1.1 概述	1
1.1.1 机电一体化的概念	1
1.1.2 机电一体化产品的主要特征	2
1.1.3 机电一体化产品的分类	3
↔ 1.2 机电一体化系统的功能和构成	4
1.2.1 机电一体化系统的功能	4
1.2.2 机电一体化系统的构成	5
↔ 1.3 机电一体化的相关技术	7
1.3.1 检测与传感技术	8
1.3.2 信息处理技术	8
1.3.3 自动控制技术	8
1.3.4 伺服驱动技术	8
1.3.5 机械技术	9
1.3.6 系统整体技术	9
↔ 1.4 机电一体化的发展历程、现状和前景	10
1.4.1 机电一体化的发展历程	10
1.4.2 机电一体化的现状	10
1.4.3 机电一体化的前景	11
↔ 思考与练习	13

第 2 章 机电一体化机械系统

↔ 2.1 机电一体化机械系统设计概述	14
2.1.1 机电一体化对传动精度的基本要求	14
2.1.2 机电一体化机械系统的组成	14
2.1.3 机电一体化机械系统的设计思想	15
↔ 2.2 机电一体化机械系统设计的原则	15
2.2.1 机械传动要求	15

2.2.2	总传动比的确定	16
2.2.3	传动链的级数和各级传动比的分配	17
⇔	2.3 机械系统性能分析	22
2.3.1	数学模型建立	22
2.3.2	机械性能参数对系统性能的影响	26
2.3.3	传动间隙对系统性能的影响	29
⇔	2.4 机械系统的运动控制	30
2.4.1	机械系统的动力学原理	30
2.4.2	机械系统的制动控制	31
2.4.3	机械系统的加速控制	34
⇔	2.5 精密传动机构	35
2.5.1	谐波齿轮传动	35
2.5.2	滚珠螺旋传动	38
2.5.3	同步带传动	41
⇔	思考与练习	43

第 3 章 机电一体化执行机构

⇔	3.1 执行机构概述	44
3.1.1	执行机构的含义	44
3.1.2	执行机构的分类	44
3.1.3	执行机构的工作原理	45
3.1.4	执行机构的特点、性能与应用	46
⇔	3.2 电动执行机构	48
3.2.1	电动执行机构的类型和特点	48
3.2.2	电动执行机构的工作原理和结构	49
⇔	3.3 液压执行机构	50
⇔	3.4 气动执行机构	50
⇔	3.5 新型执行机构	51
3.5.1	微动机构	51
3.5.2	工业机械手末端执行器	52
3.5.3	其他新型执行机构	54
⇔	思考与练习	55

第 4 章 机电一体化控制系统

⇔	4.1 控制系统概述	56
4.1.1	控制系统的特征	56



4.1.2	控制系统的组成	57
4.1.3	控制系统的分类	57
4.1.4	控制系统的设计	59
4.1.5	控制系统的一般设计思路	61
⇔ 4.2	工控机	63
4.2.1	工控机概述	63
4.2.2	工控机的基本组成	64
4.2.3	工控机总线技术	66
4.2.4	工控机的发展趋势	67
⇔ 4.3	单片机	69
4.3.1	单片机的发展阶段	69
4.3.2	单片机的特点及应用	70
4.3.3	常用的单片机产品种类	71
4.3.4	单片机控制系统的组成形式	72
4.3.5	单片机控制系统的设计	75
4.3.6	单片机芯片的选择与系统扩展	77
⇔ 4.4	PLC 基础	81
4.4.1	PLC 简介	81
4.4.2	PLC 的发展历程和特点	81
4.4.3	PLC 的结构	82
4.4.4	PLC 的工作原理	85
4.4.5	PLC 的应用领域	88
⇔ 4.5	接口技术	90
⇔	思考与练习	98

第 5 章 机电一体化传感系统

⇔ 5.1	传感器技术基础	99
5.1.1	传感器的发展	99
5.1.2	传感器的主要特性	99
5.1.3	传感器的组成	100
5.1.4	传感器的分类	101
⇔ 5.2	常用传感器	102
5.2.1	机械式传感器及仪器	102
5.2.2	电阻式传感器	103
5.2.3	电容式传感器	105
5.2.4	电感式传感器	109
5.2.5	电磁感应式传感器	114

5.2.6	压电式传感器	117
5.2.7	热电式传感器	120
5.2.8	光电式传感器	123
⇔	思考与练习	129

第 6 章 机电一体化伺服控制技术

⇔	6.1 伺服系统概述	131
	6.1.1 伺服系统相关概念	131
	6.1.2 对伺服系统的基本要求	132
	6.1.3 伺服系统的基本结构形式	133
	6.1.4 伺服系统的分类	134
⇔	6.2 直流伺服电动机	136
	6.2.1 直流伺服电动机的分类	136
	6.2.2 直流伺服电动机的基本结构及工作原理	136
	6.2.3 直流伺服电动机的特性分析	137
	6.2.4 影响直流伺服电动机特性的因素	139
	6.2.5 直流伺服系统	141
⇔	6.3 步进电动机	142
	6.3.1 步进电动机的结构与工作原理	142
	6.3.2 步进电动机的通电方式	143
	6.3.3 步进电动机的使用特性	144
	6.3.4 步进电动机的控制与驱动	145
⇔	6.4 交流伺服电动机	148
	6.4.1 异步型交流电动机	149
	6.4.2 同步型交流电动机	149
	6.4.3 异步交流电动机的变频调速	150
	6.4.4 异步交流电动机变频调速的控制方案	151
⇔	6.5 液压伺服系统	152
	6.5.1 液压伺服系统的基本原理和特点	152
	6.5.2 液压伺服阀的分类	153
⇔	思考与练习	157

第 7 章 机电一体化总体设计

⇔	7.1 机电一体化总体设计的内容	158
	7.1.1 总体设计的主要内容	158
	7.1.2 产品的使用要求	160



7.1.3 产品的性能指标	161
↔ 7.2 性能指标分析与产品优化设计	162
7.2.1 机电一体化优化设计的条件	162
7.2.2 机电一体化优化设计的方法	163
↔ 7.3 功能指标及性能指标分配	165
↔ 思考与练习	170

第 8 章 典型机电一体化系统实例分析

↔ 8.1 机器人	171
8.1.1 机器人概述	171
8.1.2 机器人的组成及基本机能	171
8.1.3 机器人的主要技术参数	172
8.1.4 BJDP-1 型机器人	173
8.1.5 视觉传感式变量喷药系统	174
↔ 8.2 数控机床	176
8.2.1 数控机床的工作原理和组成	176
8.2.2 数控车床控制系统	177
8.2.3 计算机集成制造系统	177
↔ 8.3 电梯	180
8.3.1 电梯的结构组成	180
8.3.2 电梯的工作原理	182
↔ 思考与练习	186
参考文献	187

第 1 章

机电一体化总论

本章主要介绍了机电一体化的概念、机电一体化产品的主要特征和分类、机电一体化系统组成和相关技术、机电一体化技术发展现状及发展趋势等内容。

1.1 概 述

1.1.1 机电一体化的概念

机电一体化又称机械电子学,英文名称为 mechatronics,它是由英文 mechanics(机械学)与 electronics(电子学)拆分组合而成的。机电一体化这一名词最早出现在 1971 年日本《机械设计》杂志的副刊上,随着机电一体化技术的快速发展,机电一体化的概念被人们广泛接受和普遍使用。1996 年出版的 WEBSTER 大词典收录了 mechatronics,使这个单词得到了世界各国学术界和企业界的认可。

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。图 1-1 形象地表达了机电一体化与机械学、电子学和信息科学之间的相互关系。

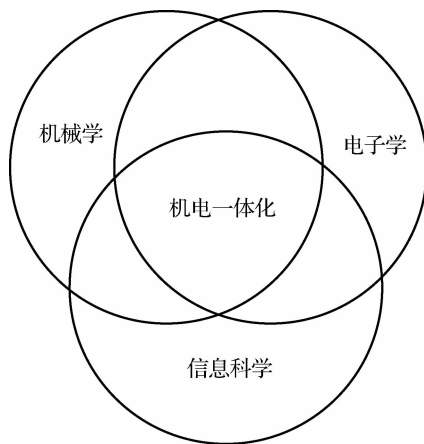


图 1-1 机电一体化与其他学科的关系

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”机械技术中而形成新的技术与产品。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,即所谓的“3C”(computer、communication 和 control technology)技术“渗透”到机械技术中,丰富了机电一体化含义。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。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,以达到系统整体最优。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。

从概念的外延来看,机电一体化包括机电一体化技术和机电一体化产品两个方面。机电一体化技术是从系统的观点出发,将机械、电子和信息等有关技术有机结合起来,以实现系统或产品整体最优的综合性技术。机电一体化技术主要包括技术原理和使机电一体化产品(或系统)得以实现、使用和发展的技术。机电一体化技术是一个技术群(族)的总称,包括检测与传感技术、信息处理技术、伺服驱动技术、自动控制技术、机械技术及系统整体技术等。机电一体化产品有时也称为机电一体化系统,它们是两个相近的概念,通常机电一体化产品指独立存在的机电结合产品,而机电一体化系统主要指依附于主产品的部件系统,这样的系统实际上也是机电一体化产品。机电一体化产品是由机械系统(或部件)与电子系统(或部件)及信息处理单元(硬件和软件)有机结合而赋予了新功能和性能的高科技产品。由于在机械本体中“融入”了电子技术和信息技术,与纯粹的机械产品相比,机电一体化产品的性能得到了根本提高,具有满足人们使用要求的最佳功能。

1.1.2 机电一体化产品的主要特征

机电一体化是在信息论、控制论和系统论基础上建立起来的应用技术。机电一体化产品是一个完整的系统,它有效地改变了传统机械产品的面貌,赋予机械产品以新的活力,同时也促进了电子技术的发展,扩大了电子技术的应用领域。不论机电一体化产品规模的大小,其功能的多少,其结构的简单或复杂,都应该从系统的角度来认识。从而可发现机电一体化产品具有许多有益的特征,其中最主要的有益特征有以下三点。

1. 整体结构最佳化

在传统的机械产品中,为了增加一种功能,或实现某一种控制规律,往往靠增加机构的办法。例如,为了达到变速的目的,出现了一系列齿轮组成的变速箱;为了控制机床的进给轨迹,出现了各种形状的靠模;为了控制柴油发动机的喷油规律,出现了凸轮机构;等等。但是随着电子技术的发展,人们逐渐发现,过去笨重的齿轮变速箱可以用轻便的电子调速装置来代替;精确的运动规律,可以通过计算机的软件来调节。由此看来,在设计机电一体化产品时,对某一功能的实现,供人们选择的方案大大增多,即可以从机、电、硬、软四种方案中去选择,设计出整体结构最佳的产品来。

机电一体化的实质是从系统的观点出发,应用机械技术和电子技术进行有机的组织、渗透和综合,以实现系统整体最佳化。因此,机电一体化岗位对人才的要求应是既懂机又懂电的复合型人才。

2. 系统控制智能化

这是机电一体化与传统的工业自动化最主要的区别之一。电子技术的引入,显著地改变了传统机械那种单纯靠操作人员,按照规定的工艺顺序或节拍,频繁、紧张、单调、重复的

工作状况。它可以靠电子控制系统,按照预定的顺序一步一步地协调各相关机构的动作及功能关系。有些高级的机电一体化系统,还可以通过被控制的数学模型根据任何时刻外界各种参数的变化情况,随机自寻最佳工作程序。大多数机电一体化产品都有自动控制、自动检测、自动信息处理、自动修正、自动诊断,直至自动记录、自动显示等功能。在正常情况下,整个系统按照人的意图(通过给定的指令)进行自动控制,一旦出现故障,就会自动采取应急措施,实现自动保护。在这种情况下,单靠人的操作是难以应付的,特别在危险、有害、高速、精确的使用条件下,这种系统不但是有利的,而且是十分必要的。

3. 操作性能柔性化

计算机软件技术的引入,不但能使机电一体化装置和系统的各个传动机构的动作,通过预先给定的程序,一步一步地由电子系统来协调,而且在需要改变传动机构的运动规律时,无须改变其硬件机构,只要调整由一系列指令组成的软件,就可以达到预期目的。这种软件可由程序技术人员根据要求的操作规律事先编好,通过穿孔纸带或数据通信方式,装入机电一体化系统的存储器中,进而对系统机构动作实施控制和协调。例如,数控机床,人们可以通过改变控制软件加工出不同形状的零件来,从而使人们在生产中的地位发生根本性的变化,由机器的“奴仆”变为“主人”。

1.1.3 机电一体化产品的分类

按照机电结合程度和形式的不同,机电一体化产品可划分为功能附加型、功能替代型和机电融合型三种。

1. 功能附加型

功能附加型产品的主要特征:在原有机械产品基础上,采用微电子技术,使产品的功能得到增加和增强,性能得到适当的提高。经济型数控机床、电子秤、数显量具、全自动洗衣机等都属于这一类机电一体化产品。

2. 功能替代型

功能替代型产品的主要特征:它是机电一体化应用的初级形式,即用微电子技术及装置取代原产品中的机械控制功能、信息处理功能或主功能,使产品结构简化,性能提高,柔性增加。这类产品为数不少,它们又可划分如下。

(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的设备代替了传统方式的电加工的线切割机床,电子照相机凭其电子快门自动曝光、自动对焦功能代替了传统的机械式照相机等。

(2)设备中机械组成的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代替,如缝纫机的凸轮被微机控制系统代替,燃料喷射装置的加热炉控制机构被微机程序代替等。

(4)采用微电子技术后增加了控制功能等,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等。

3. 机电融合型

机电融合型产品的主要特征:它是机与电在更深层次上有机结合的产品,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、中子式自动信贷机、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。这些产品根据其功能和性能要求及技术规范,采用专门设计的或具有特定用途的集成电路来实现使用中的控制和信息处理等功能,产品结构更加紧凑,设计更加灵活,成本进一步降低。这些产品功能单靠机械或电子是无法实现的,而必须利用机械与电子进行有机结合才能实现。传真机、复印机、摄像机、磁盘驱动器、计算机数控(computer numerical control,CNC)机床等都是这一类机电一体化产品。

1.2 机电一体化系统的功能和构成

1.2.1 机电一体化系统的功能

机电一体化系统(或产品)是由若干具有特定功能的机械与微电子要素组成的有机整体,具有满足人们使用要求的功能(目的功能),根据不同的使用目的,要求系统能对输入的物质、能量和信息(即工业三大要素)进行某种处理,输出所需要的物质、能量和信息。因此,机电一体化系统必须具有这样三大“目的功能”:变换(加工、处理)功能,传递(移动、输送)功能,存储(保持、积蓄、记录)功能。图 1-2 所示为机电一体化系统目的功能图。

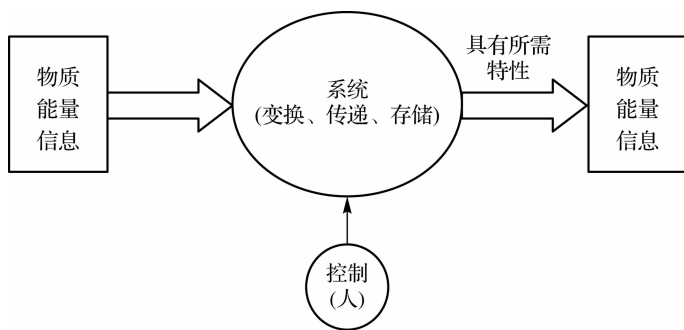


图 1-2 机电一体化系统目的功能图

以物料搬运、加工为主,输入物质(原料、毛坯等)、能量(电能、液能、气能等)和信息(操作及控制指令等),经过加工处理,主要输出改变了位置和形态的物质(或产品)的系统,称为加工机。例如,各种机床(切削、锻压、铸造、电加工、焊接、高频淬火等设备)、交通运输机械、食品加工机械、起重机械、纺织机械、印刷机械、轻工机械等。

以能量转换为主,输入能量(物质)和信息,输出不同形式的能量(物质)的系统(或产品),称为动力机。其中输出机械能的为原动机,如电动机、水轮机、内燃机等。

以信息处理为主,输入信息和能量,主要输出某种信息(如数据、图像、文字、声音等)的系统(或产品),称为信息机。例如,各种仪器、仪表、计算机、电报传真机以及各种办公器材等。

不管哪类系统(或产品),系统内部必须具备图 1-3 所示的五种内部功能,即主功能、动力功能、检测功能、控制功能、构造功能。其中,主功能是实现系统目的的直接必需的功能,主要是对物质、能量、信息或其相互结合进行交换、传递和存储;动力功能是向系统提供动力而让系统得以运转;检测功能和控制功能是根据系统内部信息和外部信息对整个系统进行控制,使系统正常运转,实施构造功能。

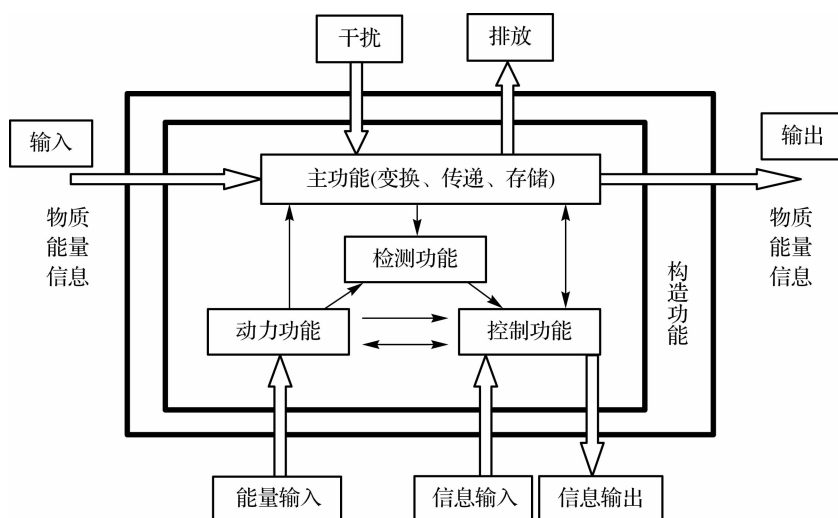


图 1-3 机电一体化系统五种内部功能

1.2.2 机电一体化系统的构成

一个机电一体化系统一般由结构组成要素、动力组成要素、运动组成要素、感知组成要素和职能组成要素五大组成要素有机结合而成。机械本体(结构组成要素)是系统的所有功能要素的机械支持结构,一般包括机身、框架、支承、连接等。动力驱动部分(动力组成要素)依据系统控制要求,为系统提供能量和动力以使系统正常运行。测试传感部分(感知组成要素)对系统的运行所需要的本身和外部环境的各种参数和状态进行检测,并将其转变为可识别的信号,传输给信息处理单元,经过分析、处理后产生相应的控制信息。控制及信息处理部分(职能组成要素)将来自测试传感部分的信息及外部直接输入的指令进行集中、存储、分析、加工处理后,按照信息处理结果和规定的程序与节奏发出相应的指令,控制整个系统有目的地运行。执行机构(运动组成要素)根据控制及信息处理部分发出的指令,完成规定的动作和获得相应的功能。

机电一体化系统一般由机械本体、检测传感部分、电子控制单元(electronic control unit, ECU)、执行器和动力源 5 个部分构成,如图 1-4 所示。

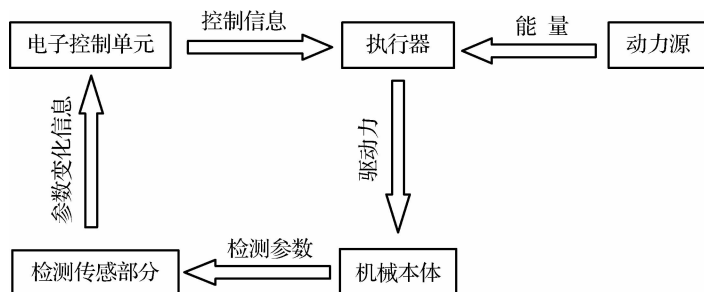


图 1-4 机电一体化系统的构成

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,起着支撑系统中其他功能单元、传递运动和动力的作用。与纯粹的机械产品相比,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、轻量、美观的特点。

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,其作用就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,以便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)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、质量轻、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(programmable logic controller, PLC)、数控装置以及逻辑电路、A/D与D/A转换器、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。机电一体化系统对电子控制单元的基本要求是提高信息处理速度,提高可靠性,增强抗干扰能力及完善系统自诊断功能,实现信息处理智能化和小型、轻量、标准化等。

4. 执行器

执行器的作用是根据电子控制单元的指令驱动机械部件的运动。执行器是运动部件,通常采用电力驱动、气压驱动和液压驱动几种方式。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,动作范围狭窄,还需考虑维修和实行标准化。随着电工电子技术的高度发展,高性能步进驱动电机、直流和交流伺服驱动电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的能量供应部分,其作用是按照系统控制要求向机器系统提供能量和动力使系统正常运行。提供能量的形式包括电能、气能和液压能,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,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,即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,人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、变焦及卷片倒片机构,从测光、测距、调光、调焦、曝光到卷片、倒片、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 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,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、废气再循环率及故障自诊断等功能。

实际上,机电一体化系统是比较复杂的,有时某些构成要素是复合在一起的。首先应该指出的是,构成机电一体化系统的几个部分并不是并列的。其中机械部分是主体,这不仅是由于机械本体是系统重要的组成部分,而且系统的主要功能必须由机械装置来完成,否则就不能称其为机电一体化产品。如电子计算机、非指针式电子表等,其主要功能已由电子器件和电路等完成,机械已退居于次要地位,这类产品应归属于电子产品,而不是机电一体化产品。因此,机械系统是实现机电一体化产品功能的基础,因而对其提出了更高的要求,需在结构、材料、工艺加工及几何尺寸等方面满足机电一体化产品高效、可靠、节能、多功能、小型、轻量和美观等要求。除一般性的强度、刚度、精度、体积和质量等指标外,机械系统技术开发的重点是模块化、标准化和系列化,以便于机械系统的快速组合和更换。其次,机电一体化系统的核心是电子技术,电子技术包括微电子技术和电力电子技术,但重点是微电子技术,特别是微型计算机或微处理器。机电一体化需要多种新技术的结合,但首要的是微电子技术,不和微电子结合的机电产品不能称为机电一体化产品。如非数控机床,一般均由电动机驱动和电气控制,故它不是机电一体化产品。除了微电子技术以外,在机电一体化产品中,其他技术则根据需要进行结合,可以是一种,也可以是多种。

1.3 机电一体化的相关技术

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。

机电一体化关键技术主要有检测与传感技术、信息处理技术、自动控制技术、伺服驱动技术、机械技术及系统整体技术。

1.3.1 检测与传感技术

1. 内容

检测与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。

2. 作用

机电一体化要求传感器能快速、精确地获取信息并经受住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的发展要求相适应,使得不少机电一体化产品不能达到满意的效果或无法实现设计功能。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。

1.3.2 信息处理技术

1. 内容

信息处理技术涉及信息的交换、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。

2. 作用

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的因素。人工智能、专家系统、神经网络技术等都属于计算机应用及信息处理技术。

1.3.3 自动控制技术

1. 内容

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,因而自动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、检索等控制技术。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,这是由于现实实际中的被控对象往往与理论上的控制模型之间存在较大差距,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。

2. 作用

由于微型计算机的广泛应用,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。

1.3.4 伺服驱动技术

1. 内容

伺服驱动技术的主要研究对象是执行元件及其驱动装置。执行元件有电动式、气动式、



液压式等多种类型,机电一体化产品多采用电动式执行元件,其驱动装置主要是指各种电动机的驱动电源电路,目前多采用电力电子器件及集成化的功能电路构成。执行元件一方面通过电气接口向上与微型计算机相连,以接收微型计算机的控制指令;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。

2. 作用

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。常见的伺服驱动装置有电液马达、脉冲液压缸、步进电动机、直流伺服电动机和交流伺服电动机。由于变频技术的进步,交流伺服驱动技术取得突破性进展,为机电一体化系统提供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。

1.3.5 机械技术

1. 内容

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而实现的。在机械与电子相互结合的实践中,不断对机械技术提出更高的要求,使现代机械技术相对于传统机械技术而发生了很大变化。新机构、新原理、新材料、新工艺等不断出现,现代设计方法不断发展和完善,以满足机电一体化产品对减轻质量、缩小体积、提高精度和刚度、改善性能等多方面的要求。

2. 发展趋势

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,形成了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,是其他任何技术代替不了的。如计算机辅助工艺规划(computer-aided process planning, CAPP)是目前计算机辅助设计与制造(computer-aided design and manufacturing, CAD/CAM)系统研究的瓶颈,其关键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。

1.3.6 系统整体技术

1. 内容

系统整体技术是一种从整体目标出发,用系统的观点和方法,将系统整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,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。

系统整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、人机接口。电气接口实现系统间电信号的连接;机械接口完成机械与机械部分、机械与电气装置部分的连接;人机接口提供人与系统间的交互界面。

2. 发展趋势

系统整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。

1.4 机电一体化的发展历程、现状和前景

1.4.1 机电一体化的发展历程

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,这种划分方法真实客观地反映了机电一体化技术的发展历程。

1. 萌芽阶段

20世纪70年代以前称为萌芽阶段。在这一时期,尽管机电一体化的概念没有正式提出来,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应用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。

2. 快速发展阶段

20世纪70年代到80年代为第二阶段,称为快速发展阶段。在这一时期,人们自觉地、主动地利用3C技术的成果创造新的机电一体化产品。电子技术一出现人们就开始寻求其与机械的结合,尤其是微型计算机(简称微机)问世后,机电一体化获得纵深发展,在各个领域作用凸显,日益引起人们的关注。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。机电一体化由20世纪70年代的日本厂商率先提出,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”。经过几年的努力,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。而我国到了20世纪80年代,伴随着性能更高的微型计算机的问世,机电一体化才得以广泛采用和流行。

3. 智能化阶段

20世纪90年代至今称为机电一体化技术的智能化阶段。进入20世纪90年代,通信技术飞速发展,为机电一体化的广泛普及和多种应用夯实了基础。而进入21世纪以后,微电子技术为机电一体化带来勃勃生机;PLC、电力电子等的发展为机电一体化提供了坚实的基础;激光技术、模糊技术、信息技术等新技术使机电一体化跃上新台阶,一些自动化技术有力地推动着机电一体化的发展。

1.4.2 机电一体化的现状

机电一体化向智能化方向迈进。20世纪90年代后期,各主要发达国家开始了机电一体化技术向智能化方向迈进的新阶段。一方面,光学、通信技术等进入了机电一体化领域,微细加工技术也在机电一体化中崭露头角,出现了光机电一体化和微机电一体化等新分支;另一方面,对机电一体化系统的建模设计、分析和集成方法,机电一体化的学科体系和发展趋

势都进行了深入研究。同时,人工智能技术、神经网络技术及光纤技术等获得了巨大进步,为机电一体化技术的发展开辟了广阔天地,也为其产业化发展打下了坚实的基础。

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,国家科委和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的研究,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。

机电一体化技术向智能化方向迈进的主要标志是模糊逻辑、神经网络和光纤通信等领域的研究成果应用于机电一体化技术中。模糊逻辑与人的思维过程相类似,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找出汽车行驶的最佳方案。除了模糊逻辑理论外,神经网络也开始应用于机电一体化系统中。神经网络是研究了生物神经网络的结果,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,神经网络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,神经网络在机电一体化产品设计中也十分重要。可以说,智能化将是21世纪机电一体化技术发展的底色。

1.4.3 机电一体化的前景

机电一体化是机械、电子、光学、控制、计算机、信息等多学科的交叉综合,它的发展和进步依赖并促进相关技术的发展和进步。未来机电一体化的主要发展方向有以下几个。

1. 智能化

智能化是21世纪机电一体化技术发展的一个重要方向。人工智能在机电一体化的研究中日益得到重视,机器人与数控机床的智能化就是重要应用。这里所说的“智能化”是对机器行为的描述,是在控制理论的基础上,吸收人工智能、运筹学、计算机科学、模糊数学、心理学、生理学和混沌动力学等新思想、新方法,模拟人类智能,使它具有判断推理、逻辑思维、自主决策等能力,以求得到更高的控制目标。诚然,使机电一体化产品具有与人完全相同的智能,是不可能的,也是不必要的。但是,高性能、高速的微处理器使机电一体化产品具有低级智能或人的部分智能,则是完全可能且必要的。

2. 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、电气接口、动力接口、环境接口的机电一体化产品单元是一项十分复杂但又非常重要的任务。如研制集减速、智能调速、电机于一体的动力单元,具有视觉、图像处理、识别和测距等功能的控制单元,以及各种能完成典型操作的机械装置。这样,可利

用标准单元迅速开发出新产品,同时也可以扩大生产规模。这需要制定各项标准,以便各部件、单元和接口的匹配。由于利益冲突,近期很难制定国际或国内这方面的标准,但可以通过组建一些大企业逐渐形成。显然,从电气产品的标准化、系列化带来的好处可以肯定,无论是对生产标准机电一体化单元的企业还是对生产机电一体化产品的企业,模块化将给机电一体化企业带来美好的前程。

3. 网络化

20世纪90年代,计算机技术等突出成就是网络技术。网络技术的兴起和飞速发展给科学技术、工业生产、政治、军事、教育及人们的日常生活带来了巨大的变革。各种网络将全球经济、生产连成一片,企业间的竞争也将全球化。机电一体化新产品一旦研制出来,只要其功能独到,质量可靠,很快就会畅销全球。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大势,利用家庭网络(home network)将各种家用电器连接成以计算机为中心的计算机集成家电系统(computer integrated appliance system, CIAS),使人们在家里分享各种高技术带来的便利与快乐。因此,机电一体化产品无疑将朝着网络化方向发展。

4. 微型化

微型化兴起于20世纪80年代末,指的是机电一体化向微型机器和微观领域发展的趋势。国外称其为微电子机械系统(micro-electromechanical system, MEMS),泛指几何尺寸不超过 1 cm^3 的机电一体化产品,并向微米、纳米级发展。微机电一体化产品体积小、耗能少、运动灵活,在生物医疗、军事、信息等方面具有不可比拟的优势。微机电一体化发展的瓶颈在于微机械技术。微机电一体化产品的加工采用精细加工技术,即超精密技术,它包括光刻技术和蚀刻技术两类。

5. 绿色化

工业的发达给人们的生活带来了巨大的变化。一方面,物质丰富,生活舒适;另一方面,资源减少,生态环境受到严重污染。于是,人们呼吁保护环境,节约资源,回归自然。绿色化概念在这种呼声下应运而生,绿色化是时代的趋势。绿色产品在其设计、制造、使用和销毁的生命过程中,符合特定的环境保护和人类健康的要求,对生态环境无害或危害极少,资源利用率极高。设计绿色的机电一体化产品,具有远大的发展前途。机电一体化产品的绿色化主要是指使用时不污染生态环境,报废后能回收利用。

6. 系统化

系统化的表现特征之一就是系统体系结构进一步采用开放式和模式化的总线结构。系统可以灵活组态,进行任意剪裁和组合,同时寻求实现多子系统协调控制和综合管理。表现特征之二是通信功能的大大加强,特别是“人格化”发展引人注目,即未来的机电一体化更加注重产品与人的关系。机电一体化的人格化有两层含义:一是机电一体化产品的最终使用对象是人,如何赋予机电一体化产品人的智能、情感、人性显得越来越重要,特别是对家用机器人,其高层境界就是人机一体化;二是模仿生物机理,研制各种机电一体化产品。



思考与练习

1. 什么是机电一体化？机电一体化产品的主要特征有哪些？
2. 机电一体化产品的功能有哪些？机电一体化产品有哪些构成？
3. 机电一体化的相关技术有哪些？
4. 机电一体化的发展历程、现状和前景如何？

第 2 章

机电一体化机械系统

本章重点讲解机电一体化机械系统组成、机械系统设计和分析、机械系统运动控制,以及精密传动机构等内容。

2.1 机电一体化机械系统设计概述

2.1.1 机电一体化对传动精度的基本要求

与一般的机械系统相比,机电一体化机械系统除要求较高的制造精度外,还应具有良好的动态响应特性,即快速响应和良好的稳定性。

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,那么就算机电一体化产品其他系统工作再精确,也无法完成其预定的机械操作。

2. 快速响应

快速响应即要求机电一体化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,系统才能精确地完成预定的任务,且控制系统也才能及时根据机械系统的运行情况得到信息、下达指令,使其准确地完成任务。

3. 良好的稳定性

机电一体化系统要求其机械装置在温度、振动等外界干扰的作用下依然能够正常稳定地工作。即系统抵御外界环境的影响和抗干扰能力强。

为确保机械系统的上述特性,在设计中通常提出无间隙、低摩擦、低惯量、高刚度、高谐振频率和适当的阻尼比等要求。此外,机械系统还要求具有体积小、质量轻、可靠性高和寿命长等特点。

2.1.2 机电一体化机械系统的组成

概括地讲,机电一体化机械系统应主要包括如下三大机构。

1. 传动机构

机电一体化机械系统中的传动机构不仅是转速和转矩的变换器,还是伺服系统的一部分,它要根据伺服控制的要求进行选择设计,以满足整个机械系统良好的伺服性能要求。因此,传动机构除了要满足传动精度的要求,还要满足小型、轻量、高速、低噪声和高可靠性的



要求。

2. 导向机构

导向机构的作用是支承和导向,为机械系统中各运动装置能安全、准确地完成其特定方向的运动提供保障,一般指导轨、轴承等。

3. 执行机构

执行机构是用以完成操作任务的直接装置。执行机构根据操作指令的要求在动力源的带动下完成预定的操作。一般要求它具有较高的灵敏度、精确度,良好的重复性和可靠性。计算机的强大功能,使传统的作为动力源的电动机发展为具有动力、变速与执行等多重功能的伺服电动机,从而大大地简化了传动机构和执行机构。

除以上三部分外,机电一体化系统的机械部分通常还包括机座、支架、壳体等。

2.1.3 机电一体化机械系统的设计思想

机电一体化机械系统设计主要包括两个环节:静态设计和动态设计。

1. 静态设计

静态设计是指依据系统的功能要求,通过研究确定机械系统的初步设计方案。该方案只是一个初步的轮廓,包括系统主要零部件的种类、各部件之间的连接方式、系统的控制方式、所需能源方式等。

有了初步设计方案后,开始着手按技术要求设计系统的各组成部件的结构、运动关系及参数;确定零件的材料、结构、制造精度;进行执行元件(如电机)的参数、功率及过载能力的验算;选择相关元件、部件;配置系统的阻尼等。以上称为静态设计。静态设计保证了系统的静态特性。

2. 动态设计

动态设计是研究系统在频率域的特性,是借助静态设计的系统结构,通过建立系统组成各环节的数学模型和推导出系统整体的传递函数,利用自动控制理论的方法求得该系统的频率特性(幅频特性和相频特性)。系统的频率特性体现了系统对不同频率信号的反应,决定了系统的稳定性、最大工作频率和抗干扰能力。

静态设计是忽略了系统自身运动因素和干扰因素的影响状态下进行的产品设计,对于伺服精度和响应速度要求不高的机电一体化系统,静态设计就能够满足设计要求。对于精密、高速和智能化的机电一体化系统,环境干扰和系统自身的结构及运动因素对系统产生的影响会很大,因此,必须通过调节各个环节的相关参数,改变系统的动态特性以保证系统的功能。动态分析与设计过程往往会改变前期的部分设计方案,有时甚至会推翻整个方案,然后需要重新进行静态设计。

2.2 机电一体化机械系统设计的原则

2.2.1 机械传动要求

机械传动是一种把动力机产生的运动和动力传递给执行机构的中间装置,是一种扭矩和转速的变换器,其目的是在动力机与负载之间使扭矩得到合理的匹配,并可通过机构变换实现对输出的速度调节。

在机电一体化系统中,伺服电动机的伺服变速功能在很大程度上代替传统机械传动中的变速机构,只有当伺服电机的转速范围满足不了系统要求时,才通过传动装置变速。由于机电一体化系统对快速响应指标要求很高,因而机电一体化系统中的机械传动装置不仅仅是解决伺服电机与负载间的力矩匹配问题,更重要的是提高系统的伺服性能。为了提高机械系统的伺服性能,要求机械传动部件转动惯量小、摩擦小、阻尼合理、刚度大、抗振性好、间隙小,并满足小型、轻量、高速、低噪声和高可靠性等要求。

2.2.2 总传动比的确定

根据上面所述,机电一体化系统的传动装置在满足伺服电机与负载的力矩匹配的同时,应具有较高的响应速度,即启动速度和制动速度。因此,在伺服系统中,通常采用负载角加速度最大原则选择总传动比,以提高伺服系统的响应速度。传动模型如图 2-1 所示。图中 J_m 为电动机 M 转子的转动惯量, J_L 为负载 L 的转动惯量, T_{LF} 为摩擦阻转矩, i 为齿轮系 G 的总传动比。

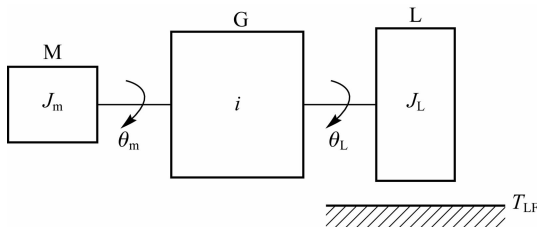


图 2-1 电动机、传动装置和负载的传动模型

根据传动关系有

$$i = \frac{\theta_m}{\theta_L} = \frac{\dot{\theta}_m}{\dot{\theta}_L} = \frac{\ddot{\theta}_m}{\ddot{\theta}_L} \quad (2-1)$$

式中, θ_m 、 $\dot{\theta}_m$ 、 $\ddot{\theta}_m$ 为电动机的角位移、角速度、角加速度; θ_L 、 $\dot{\theta}_L$ 、 $\ddot{\theta}_L$ 为负载的角位移、角速度、角加速度。

T_{LF} 换算到电动机轴上的阻抗转矩为 T_{LF}/i ; J_L 换算到电动机轴上的转动惯量为 J_L/i^2 。设 T_m 为电动机的驱动转矩,在忽略传动装置惯量的前提下,根据旋转运动方程,电动机轴上的合转矩 T_a 为

$$T_a = T_m - \frac{T_{LF}}{i} = \left(J_m + \frac{J_L}{i^2} \right) \times \ddot{\theta}_m = \left(J_m + \frac{J_L}{i^2} \right) \times i \times \ddot{\theta}_L$$

则

$$\ddot{\theta}_L = (T_m i - T_{LF}) / (J_m i^2 + J_L) \quad (2-2)$$

式(2-2)中改变总传动比 i , 则 $\ddot{\theta}_L$ 也随之改变。根据负载角加速度最大的原则, 令 $\frac{d\ddot{\theta}_L}{di} = 0$, 则解得

$$i = \frac{T_{LF}}{T_m} + \sqrt{\left(\frac{T_{LF}}{T_m} \right)^2 + \frac{J_L}{J_m}}$$

若不计摩擦, 即 $T_{LF} = 0$, 则

$$i = \sqrt{J_L/J_m} \quad \text{或} \quad T_L/i^2 = T_m \quad (2-3)$$

式(2-3)表明,传动装置总传动比 i 的最佳值就是 J_L 换算到电动机轴上的转动惯量正好等于电动机转子的转动惯量 J_m , 此时,电动机的输出转矩一半用于加速负载,一半用于加速电动机转子,达到了惯性负载和转矩的最佳匹配。

当然,上述分析是忽略了传动装置的惯量影响而得到的结论,实际总传动比要依据传动装置的惯量估算适当选择大一点。在传动装置设计完以后,在动态设计时,通常将传动装置的转动惯量归算为负载折算到电动机轴上,并与实际负载一同考虑进行电动机响应速度验算。

2.2.3 传动链的级数和各级传动比的分配

在机电一体化传动系统中,为既满足总传动比要求,又使结构紧凑,常采用多级齿轮副或蜗轮蜗杆等传动机构组成传动链。下面以齿轮传动链为例,介绍级数和各级传动比的分配原则,这些原则对其他形式的传动链也有指导意义。

1. 等效转动惯量最小原则

齿轮系传递的功率不同,其传动比的分配也有所不同。

(1) 小功率传动装置。以图 2-2 所示的电动机驱动的二级齿轮传动系统为例。

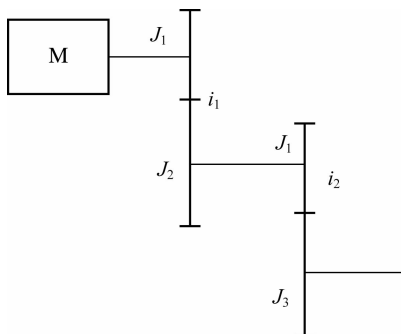


图 2-2 电动机驱动的二级齿轮传动系统

由于功率小,假定各主动轮具有相同的转动惯量 J_1 , 轴与轴承转动惯量不计,各齿轮均为实心圆柱齿轮且齿宽 b 和材料均相同,效率不计。

$$\begin{aligned} \text{则有} \quad i_1 &= (\sqrt{2} \times i)^{1/3} \\ i_2 &= 2^{-1/6} i^{2/3} \end{aligned} \quad (2-4)$$

式中, i_1 、 i_2 为齿轮系中第一、第二级齿轮副的传动比; i 为齿轮系总传动比, $i = i_1 i_2$ 。

同理,对于 n 级齿轮系

$$i_1 = 2^{\frac{2^n - n - 2}{2(2^n - 1)}} \cdot \frac{1}{2^{n-1}} \quad (2-5)$$

$$i_k = \sqrt{2} \left[\frac{i}{2^{\frac{n}{2}}} \right]^{\frac{2^{k-1}}{2^n - 1}} \quad (2-6)$$

由此可见,各级传动比分配的结果应遵循“前小后大”的原则。

【例 2-1】 设 $i = 80$, 传动级数 $n = 4$ 的小功率传动,试按等效转动惯量最小原则分配传动比。

解

$$i_1 = 2^{\frac{2^4-4-2}{2(2^4-1)}} \times 80^{\frac{1}{2^4-1}} = 1.7268$$

$$i_2 = \sqrt{2} \left(\frac{80}{2^{4/2}} \right)^{\frac{2(2-1)}{2^4-1}} = 2.1085$$

$$i_3 = \sqrt{2} \left(\frac{80}{2^{4/2}} \right)^{\frac{4}{15}} = 3.1438$$

$$i_4 = \sqrt{2} \left(\frac{80}{2^2} \right)^{\frac{8}{15}} = 6.9887$$

验算： $I = i_1 i_2 i_3 i_4 \approx 80$ 。

以上是已知传动级数进行各级传动比的确定。若以传动级数为参变量，齿轮系中折算到电动机轴上的等效转动惯量 J_e 与第一级主动齿轮的转动惯量 J_1 之比为 J_e/J_1 ，其变化与总传动比 i 的关系如图 2-3 所示。

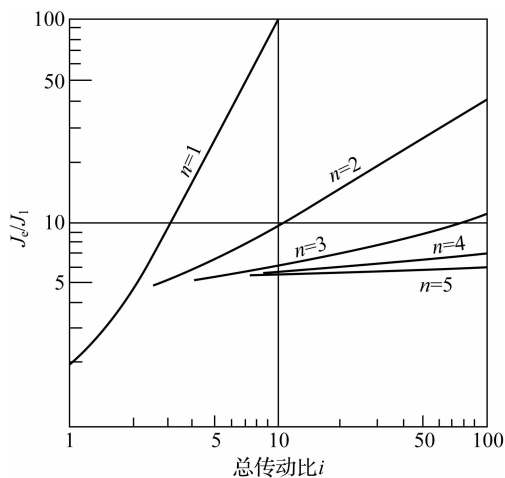


图 2-3 小功率传动装置确定传动级数曲线

(2) 大功率传动装置。大功率传动装置传递的扭矩大，各级齿轮副的模数、齿宽、直径等参数逐级增加，各级齿轮的转动惯量差别很大。确定大功率传动装置的传动级数及各级传动比可依据图 2-4、图 2-5、图 2-6 来进行。传动比分配的基本原则仍应为“前小后大”。

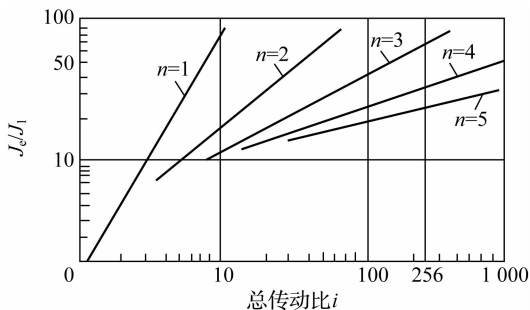


图 2-4 大功率传动装置确定传动级数曲线

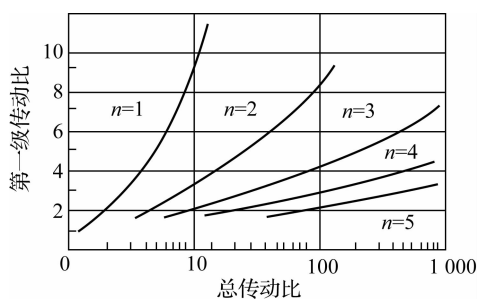


图 2-5 大功率传动装置确定第一级传动比曲线

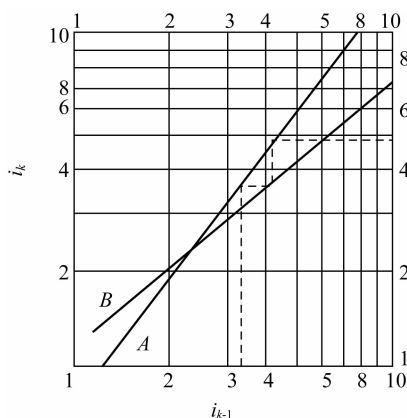


图 2-6 大功率传动装置确定各级传动比曲线

【例 2-2】 设有 $i=256$ 的大功率传动装置,试按等效转动惯量最小原则分配传动比。

解 查图 2-4,得 $n=3, J_e/J_1=70; n=4, J_e/J_1=35; n=5, J_e/J_1=26$ 。为兼顾 J_e/J_1 值的大小和传动装置结构紧凑,选 $n=4$ 。查图 2-5,得 $i_1=3.3$ 。查图 2-6,在横坐标 i_{k-1} 上 3.3 处作垂直线与 A 线交于第一点,在纵坐标 i_k 轴上查得 $i_2=3.7$ 。通过该点作水平线与 B 曲线相交得第二点 $i_3=4.24$ 。由第二点作垂线与 A 曲线相交得第三点 $i_4=4.95$ 。

验算: $i_1 i_2 i_3 i_4 = 256.26$ 。满足设计要求。

由上述分析可知,无论传递的功率大小如何,按等效转动惯量最小原则来分配,从高速级到低速级的各级传动比总是逐级增加的,而且级数越多,总等效转动惯量越小。但级数增加到一定数量后,总等效转动惯量的减少并不明显,而从结构紧凑、传动精度和经济性等方面考虑,级数不能太多。

2. 质量最小原则

质量方面的限制常常是伺服系统设计应考虑的重要问题,特别是用于航空、航天的传动装置,按质量最小的原则来确定各级传动比就显得十分必要。

(1) 大功率传动装置。对于大功率传动装置的传动级数确定主要考虑结构的紧凑性。在给定总传动比的情况下,传动级数过少会使大齿轮尺寸过大,导致传动装置体积和质量增大;传动级数过多会增加轴、轴承等辅助构件,导致传动装置质量增加。设计时应综合考虑系统的功能要求和环境因素,通常情况下传动级数要尽量少。

大功率传动装置按质量最小原则确定的各级传动比表现为“前大后小”的分配方式。减速齿轮传动的后级齿轮比前级齿轮的转矩要大得多,在同样传动比的情况下,齿厚、质量也大得多,因此减小后级传动比就相应减少了大齿轮的齿数和质量。

大功率传动装置的各级传动比可以按图 2-7 和图 2-8 选择。

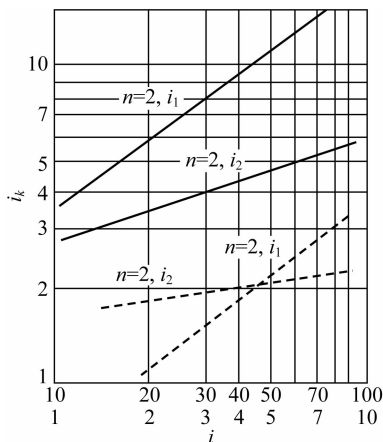


图 2-7 大功率传动装置两级传动比曲线
($i < 10$ 时,使用图中的虚线)

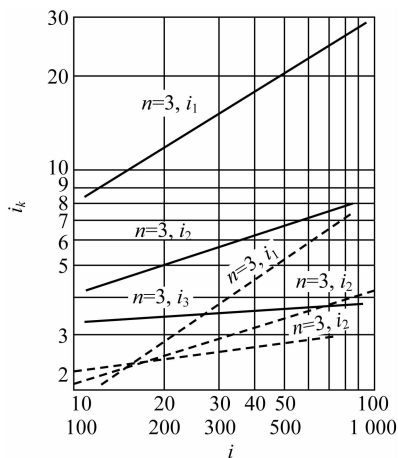


图 2-8 大功率传动装置三级传动比曲线
($i < 100$ 时,使用图中的虚线)

【例 2-3】 设 $n=2, i=40$, 求各级传动比。

解 查图 2-7 可得: $i_1 \approx 9.1; i_2 \approx 4.4$ 。

【例 2-4】 设 $n=3, i=202$, 求各级传动比。

解 查图 2-8 可得: $i_1 \approx 12; i_2 \approx 5; i_3 \approx 3.4$ 。

(2)小功率传动装置。对于小功率传动装置,按质量最小原则来确定传动比时,通常选择相等的各级传动比。在假设各主动小齿轮的模数、齿数均相等的特殊条件下,各大齿轮的分度圆直径均相等,故而每级齿轮副的中心距也相等。这样便可设计成如图 2-9 所示的回



曲式齿轮传动链,其总传动比可以非常大。显然,这种结构十分紧凑。

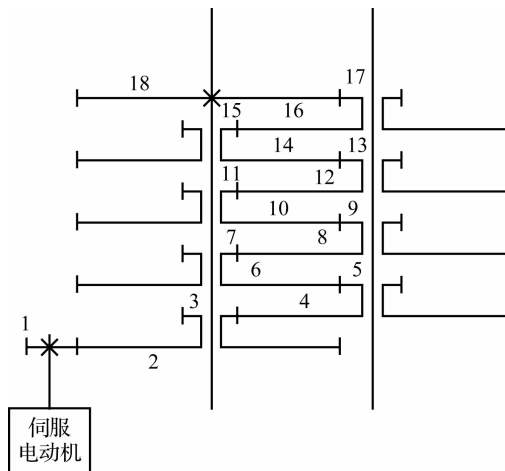


图 2-9 回曲式齿轮传动链

3. 输出轴转角误差最小原则

以图 2-10 所示的四级齿轮减速传动链为例。

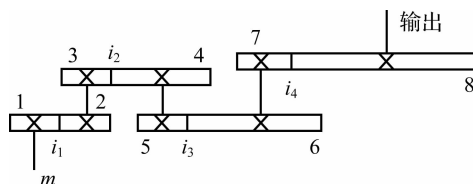


图 2-10 四级齿轮减速传动链

四级传动比分别为 i_1 、 i_2 、 i_3 、 i_4 , 齿轮 1~8 的转角误差依次为 $\Delta\Phi_1 \sim \Delta\Phi_8$ 。该传动链输出的总转角误差 $\Delta\Phi_{\max}$ 为

$$\Delta\Phi_{\max} = \frac{\Delta\Phi_1}{i_1 i_2 i_3 i_4} + \frac{\Delta\Phi_2 + \Delta\Phi_3}{i_2 i_3 i_4} + \frac{\Delta\Phi_4 + \Delta\Phi_5}{i_3 i_4} + \frac{\Delta\Phi_6 + \Delta\Phi_7}{i_4} + \Delta\Phi_8 \quad (2-7)$$

由式(2-7)可以看出,若从输入端到输出端的各级传动比按“前小后大”的原则排列,则总转角误差较小,而且低速级的误差在总误差中所占的比重很大。因此,要提高传动精度,应减少传动级数,并使末级齿轮的传动比尽可能大,制造精度尽量高。

4. 三种原则的选择

在设计齿轮传动装置时,上述三条原则应根据具体工作条件综合考虑。

(1)对于传动精度要求高的降速齿轮传动链,可按输出轴转角误差最小原则设计。若为增速传动,则应在开始几级就增速。

(2)对于要求运转平稳、启停频繁和动态性能好的降速传动链,可按等效转动惯量最小原则和输出轴转角误差最小原则设计。

(3)对于要求质量尽可能小的降速传动链,可按质量最小原则设计。