

自动化工程师职业培训丛书

机电一体化 技术基础及应用

主 编 武兰英
副主编 高勇伟 雷冀南



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

自动化工程师职业培训丛书

机电一体化 技术基础及应用

主 编 武兰英
副主编 高勇伟 雷冀南
参 编 纪占铃 刘楷安



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书为《自动化工程师职业培训丛书》之一。

本书简要介绍了机电一体化基础知识，系统地阐述了机械与电子技术基础、伺服驱动技术、传感检测技术、微机自动控制技术等内容。本书在讲解基础知识的同时配以工程实例，使读者可尽快熟悉机电一体化设备，以及系统设计的思想和方法，充分掌握机电一体化的相关技术。

本书可供从事机电一体化工作的现场工程技术人员参考，也可作为高等院校相关专业的教学参考书。

图书在版编目（CIP）数据

机电一体化技术基础及应用/武兰英主编. —北京：中国电力出版社，2010.7

（自动化工程师职业培训丛书）

ISBN 978-7-5123-0581-6

I. ①机… II. ①武… III. ①机电一体化—技术培训—教材 IV. ①TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2010）第 118045 号

中国电力出版社出版、发行

（北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>）

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 1 月第一版 2011 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 11.5 印张 277 千字

印数 0001—3000 册 定价 20.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



前 言

机电一体化是一个综合性、应用性都比较强的学科，涉及的技术范围很广。该书在内容安排上遵循循序渐进的方式，以理论与实际相结合的原则。一方面介绍机电一体化基础知识同时，也列举了大量的工程实例，每章后面附有相关思考题，从而使得理论知识和实际应用能够有机融合，为读者的学习提供很大方便，使读者了解机电一体化的基本概念和产品分类，熟悉机电一体化设备和系统的设计思想和方法，掌握机电一体化产品所涉及的相关技术。

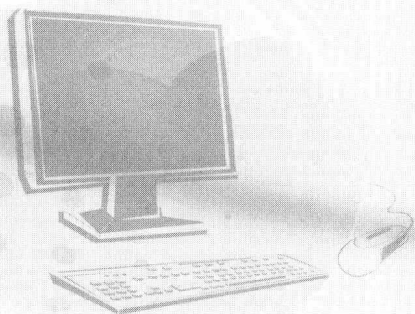
本书共分六章，第一章为机电一体化概论；第二章~第五章主要介绍机电一体化相关技术，内容包括：机械和电子技术基础知识、伺服驱动技术、传感器检测技术、微机自动控制技术；第六章主要介绍了典型的机电一体化应用实例。

本书第一章由高勇伟编写，第二章由高勇伟、纪占玲编写，第三章由纪占玲编写，第四章由刘楷安编写，第五章、第六章由雷冀南编写，全书由武兰英统稿。

在本书编写过程中，得到许多朋友的关心和帮助，在此一并表示衷心的感谢，向本书所参考和引用的资料和文献的作者表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限，书中难免有所不足，恳请读者和专家批评指正。

作 者



目 录

前言	
第一章 机电一体化概论	1
第二章 机械和电子技术基础知识	8
第一节 机械基础	8
第二节 电学基础	38
思考题	54
第三章 伺服驱动技术	56
第一节 伺服驱动的概述	56
第二节 伺服驱动的组成及要求	61
第三节 控制电动机	63
思考题	82
第四章 传感器检测技术	83
第一节 传感器概述	83
第二节 传感器的性能指标及其选用原则	87
第三节 常用传感器	95
思考题	122
第五章 微机自动控制技术	124
第一节 可编程序控制器	124
第二节 单片机	129
第三节 接口技术	137
思考题	154
第六章 机电一体化应用实例	155
第一节 打印机	155
第二节 全自动洗衣机	157
第三节 工业机器人	161
第四节 数控机床	166
第五节 自动门	172
思考题	175
参考文献	177

第一章

机电一体化概论

机电一体化是在以机械、电子技术和计算机科学为主的多门学科相互渗透、相互结合过程中逐渐形成和发展起来的一门新兴边缘技术科学，而机电一体化产品是在机械产品的基础上，采用微电子技术和计算机技术生产出来的新一代产品。初级的机电一体化产品是指采用电子技术代替和完善机械产品中的一部分，以提高产品的性能；而高级的机电一体化产品是利用机电一体化技术使机械产品实现自动化、数字化和智能化，使产品性能实现质的飞跃。因此，机电一体化是在机械产品中的机构主功能、动力功能、信息处理功能上引进电子技术和计算机技术，并将机械装置和电子设备以及计算机软件等有机结合起来构成的系统总称。机电一体化技术同时也是工程领域不同种类技术的综合及集合，它是建立在机械技术、微电子技术、计算机和信息处理技术、自动控制技术、电力电子技术、伺服驱动技术以及系统总体技术基础之上的一种高新技术。近年来，随着微电子技术和计算机应用技术的快速发展，机电一体化技术领域在不断地扩大和完善。目前机电一体化的研究和开发主要包括计算机数控系统、机器人、计算机辅助设计/辅助制造系统、柔性制造系统和计算机集成制造系统等。机电一体化产品和系统的特点是产品和系统功能的实现是机构中所有部分功能共同作用的结果，这与传统机电设备中机械与电子系统相互独立，可以分别工作具有本质的区别。随着机电一体化技术的快速发展，机电一体化产品有逐步取代传统机电产品的趋势，这完全取决于机电一体化技术所存在的优越性和潜在的应用性能。与传统的机电产品相比，机电一体化产品具有以下优点：

(1) 使用安全性和可靠性提高。机电一体化产品一般都具有自动监视、报警、自动诊断、自动保护等功能。在工作过程中，遇到过载、过压、过流、短路等电力故障时，能自动采取保护措施，避免和减少人身和设备事故，显著提高设备的使用安全性。机电一体化产品由于采用电子元器件，减少了机械产品中的可动构件和磨损部件，从而使其具有较高的灵敏度和可靠性，产品的故障率低，寿命得到了提高。

(2) 生产能力和工作质量提高。机电一体化产品大都具有信息自动处理和自动控制功能，其控制和检测的灵敏度、精度以及范围都有很大程度的提高，通过自动控制系统可精确地保证机械的执行按照设计要求完成预定的动作，使之不受机械操作者主观因素的影响，从而实现最佳操作，保证最佳的工作质量和产品的合格率。同时，由于机电一体化产品实现了工作的自动化，使得生产能力大大提高。例如，数控机床对工件的加工稳定性大大提高，生产效率比普通机床提高了5~6倍，柔性制造系统的生产设备利用率可提高1.5~3.5倍，机床数量可减少约50%，节省操作人员数量约50%，缩短生产周期40%，使加工成本降低50%。

(3) 使用性能改善。机电一体化产品普遍采用程序控制和数字显示，操作按钮和手柄

数量显著减少,使得操作大大简化并且方便、简单。机电一体化产品的工作过程根据预设的程序逐步由电子控制系统指挥实现,系统可重复实现全部动作。高级的机电一体化产品可通过被控对象的数学模型以及外界参数的变化随机自寻最佳工作程序,实现自动最优化操作。

(4) 具有复合功能且使用面广。机电一体化产品跳出了机电产品的单技术和单功能限制,具有复合技术和复合功能,使产品的功能水平和自动化程度大大提高。机电一体化产品一般具有自动化控制、自动补偿、自动校验、自动调节、自动保护和智能化等多种功能,能应用于不同的场合和领域,满足用户要求的应变能力较强。例如,电子式空气断路器具有保护特性可调、选择性脱扣、正常通过电流与脱扣时电流的测量、显示和故障自动诊断等功能,使其应用范围大为扩大。

(5) 调整和维护方便。机电一体化产品在安装调试时,可通过改变控制程序来实现工作方式的改变,以适应不同用户对象以及现场参数变化的需要。这些控制程序可通过多种手段输入到机电一体化产品的控制系统中,而不需要改变产品中的任何部件或零件。对于具有存储功能的机电一体化产品,可以事先存入若干套不同的执行程序,然后根据不同的工作对象,只需给定一个代码信号输入,即可按指定的预定程序进行自动工作。机电一体化产品的自动化检验和自动监视功能可对工作过程中出现的故障自动采取措施,使工作恢复正常。

机电一体化技术和产品的应用范围非常广泛,涉及工业生产过程中的所有领域,因此,机电一体化产品的种类很多,而且还在不断地增加。

一、机电一体化的基本原理

1. 功能和结构

机电一体化产品的功能是通过其内部各组成部分的协调和综合来共同实现的。从结构来看,机电一体化产品具有自动化、智能化和多功能的特性,而实现这种多功能一般需要机电一体化产品具备五种内部功能,即主功能、动力功能、检测功能、控制功能和执行功能,而实现这些功能的各个组成部分及其技术就构成了机电一体化产品的总体或系统。

(1) 机械系统。机电一体化产品的机械系统包括机身、框架、机械传动和连接等机械部分。这部分是实现产品功能的基础,因此对机械机构提出了更高的要求,须在结构、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、多功能、可靠、节能等要求。除一般性的机械强度、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。

(2) 动力系统。动力系统为机电一体化产品提供能量和动力功能,去驱动执行机构工作以完成预定的主功能。动力系统包括电、液、气等动力源。机电一体化产品以电能利用为主,包括电源、电动机及驱动电路等。

(3) 传感与检测系统。传感器的作用是将机电一体化产品在运行过程中所需要的自身和外界环境的各种参数转换成可以测定的物理量,同时利用检测系统的功能对这些物理量进行测定,为机电一体化产品提供运行控制所需的各种信息。传感与检测系统的功能一般由测量仪器或仪表来实现,一般要求应具有体积小、便于安装与连接、检测精度高、抗干扰能力强等特点。

(4) 信息处理及控制系统。根据机电一体化产品的功能和性能要求,信息处理及控制系统接收传感与检测系统的信息,并对其进行相应的处理、运算和决策,以对产品的运行

施以按照要求的控制,实现控制功能。机电一体化产品中,信息处理及控制系统主要是由计算机的软件和硬件以及相应的接口所组成的。硬件一般包括输入/输出设备、显示器、可编程控制器和数控装置。对机电一体化产品要求其具有信息处理速度快,A/D和D/A转换及分时处理时的输入/输出可靠,系统的抗干扰能力强等特点。

(5) 执行系统。执行机构在控制信息的作用下完成要求的动作,实现产品的主功能。机电一体化产品的执行机构一般是运动部件,常采用机械、电液、气动等机构。执行机构因机电一体化产品的种类和作业对象不同而有较大的差异。执行机构是实现产品目的功能的直接执行者,其性能好坏决定着整个产品的性能,因而是机电一体化产品中最重要的组成部分。

机电一体化产品的五个组成部分是相互协调的,共同来完成所规定的目的功能。在结构上,各组成部分通过各种接口及其相应的软件有机结合在一起,构成一个内部匹配合理、外部效能最佳的完整产品。

2. 分类

机电一体化技术和产品的应用范围非常广泛,涉及工业生产过程中的所有领域,因此,机电一体化产品的种类很多,而且还在不断地增加。按照机电一体化产品的功能,可以将其分成下述几类。

(1) 数控机械类。主要产品有数控机床、机器人、发动机控制系统以及全自动洗衣机等,这类产品的特点是执行机构为机械装置。

(2) 电子设备类。主要产品有电火花加工机床、线切割机、超声波加工机以及激光测量仪等,这类产品的特点是执行机构为电子装置。

(3) 机电结合类。主要产品有自动探伤机、形状自动识别装置、CT扫描诊断机以及自动售货机等,这类产品的特点是执行机构为电子装置和机械装置的有机结合。

(4) 电液伺服类。主要产品有机电液一体化的伺服装置,如电子伺服万能材料试验机,这类产品的特点是执行机构为液压驱动的机械装置,控制机构是接受电信号的液压伺服阀。

(5) 信息控制类。主要产品有传真机、磁盘驱动器、磁带录像机、录音机、复印机等,这类产品的特点是执行机构的动作由所接收的信息类信号来控制。

除此之外,机电一体化产品还可根据机电技术的结合程度分为功能附加型、功能替代型和机电融合型三类。按产品的服务领域和对象,可将机电一体化产品分成工业生产类、运输包装类、存储销售类、社会服务类、家庭日常类、科研仪器类、国防武器类以及其他用途类等不同种类。

二、机电一体化的关键技术

机电一体化的关键技术有以下方面:

(1) 信息处理技术。信息处理技术包括信息的交换、存取、判断和决策等。信息处理是否正确、及时,直接影响着系统的工作质量和效率,计算机是信息处理的工具。

(2) 自动控制技术。它是机电一体化系统的“指挥”,控制着整个系统的运行。

(3) 伺服传动技术。它是机电一体化系统中直接执行操作的技术。伺服系统是实现电信号到机械功能转换的装置与部件,对系统的动态性能、控制质量和功能具有决定性影响。

(4) 传感检测技术。它是机电一体化系统的感受器官,与信息的输入端相连,并将检测到的信号输送到信息处理部分,经过处理,从而对系统进行控制。因此传感检测技术是实现自动控制、自动调节的关键环节。其功能的强弱,直接决定着系统自动化程度的高低。

传感检测环节的关键元件是传感器。

三、机电一体化技术的发展

1. 机电一体化的起源

随着科学技术水平的不断提高和社会生产力的不断发展，传统的制造业越来越不能适应国民经济发展的需要，作为国民经济支柱产业的机械工业也越来越感到力不从心。新兴的电子技术和计算机技术的飞速发展，给传统的机械工业注入了新鲜血液，带来了新的飞跃。机械技术与电子技术的有机结合，使传统的机械产品有可能超越操作机械和动力机械的范畴，进入智能化的新时代，这就使它的功能日臻完善，结构更加优化。

20 世纪 70 年代，日本人别出心裁地创造了一个英文字，叫做“Mechatronics”。它是由英文单词“Mechanics”（机械学）的前半部分和“Electronics”（电子学）的后半部分组合而成的，用日文的汉字表示即为“机电一体化”。按照中文的意思来理解，其概念和内涵比较简明、直观，因而被我国广泛采用。这一术语的出现，标志着以机械技术和电子技术相结合为主要特征的新技术革命的潮流正在形成，并在世界范围内引起了强烈的反响。

日本是推行机电一体化的先驱，尽管其他国家也在这方面作了很大努力，但从现状来看，日本仍处于领先地位，不仅实力雄厚的大型企业普遍采用了机电一体化技术和制造机电一体化产品。而且同时也涉及许多中小企业，使其面貌为之一新。在日本政府的政策支持下，机电一体化产品由小型单一品种逐步发展到大中型品种乃至成套设备或大系统。电子技术在机械产品上的应用，几乎达到无孔不入的程度。机电一体化技术和机电一体化产品的发展，极大地促进了日本国民经济的发展，使日本由 20 世纪 50 年代的技术全面进口型变成现在的技术出口型国家。

2. 机电一体化的发展状况

(1) 准备阶段（20 世纪 50 年代~60 年代末）。将机械技术和电子技术结合起来的思想和实践由来已久，早在电子计算机问世不久，科学技术界就已在酝酿。在这种思想指导下，美国于 1952 年研制成功了第一台数控机床，1959 年第一台可编程机器人问世。这些最后都发展成当今典型的机电一体化产品。这一时期的特点是：

1) 实践证明机械技术和电子技术的结合是可行的，是能够实现的。

2) 研制和开发从总体上看还处于自发状态。由于当时电子技术的发展尚未达到一定水平，机械技术和电子技术的结合还不能深入，也无法大量发展，因而已经开发的产品还不能大规模推广。

(2) 初创阶段（20 世纪 70 年代~80 年代）。Mechatronics 一词是日本安川电机公司在 20 世纪 60 年代末进行商业注册时首先创用的。这时的理解是将利用机械装置进行信息处理的机器改变成利用电子电路进行信息处理的机器，以减轻机器的质量和缩小其体积，进而使机械具有比过去更强的功能和柔性。这时只是把机电一体化看成是机械与电子的结合，并没有达到使彼此融合的程度，当时主要是利用伺服技术，所开发的产品有自动门、自动售货机、自动对焦照相机和车辆自动控制等，一般结构和功能比较简单。进入 20 世纪 70 年代以后，大规模、超大规模集成电路和微处理器的迅猛发展，为机电一体化技术的蓬勃发展奠定了充分的物质基础。

(3) 发展时期（20 世纪 80 年代~90 年代）。进入 20 世纪 80 年代，信息技术崭露头角，微处理器性能的提高一日千里，其应用迅速向各个领域渗入，于是为了被更高级的机电一体化产品所采用，并使其性能提高，微机作为关键技术引入飞行器和汽车之后，机械电子

系统在高度控制、排气控制、振动控制和保险气袋系统等方面获得广泛应用。

智能控制这一先进控制技术的发展，使机电一体化技术更上一层楼。信息技术的发展使机械系统或多或少地应用了数据库技术，甚至洗衣机和其他消费类产品也用上了数据库。这样，对机电一体化系统的设计方法、建模以及系统集成和控制的实施就日益重要起来。此外，这时光学也进入机电一体化技术中，形成了“光机电一体化”（Optomechatronics）这一新兴领域。

总结起来，这个时期的特点是：

1) Mechatronics 一词首先被日本普遍接受，大约到 20 世纪 80 年代末，在世界范围内得到广泛承认；

2) 机电一体化技术和产品得到极大发展；

3) 各国均开始对机电一体化技术和产品给以很大的关注和支持。

(4) 深入发展阶段（20 世纪 90 年代至今）。进入 20 世纪 90 年代，通信技术开始进入机电一体化领域，通信和计算机网络的发展促进了分布式系统的形成，不少机器可以遥控操作。计算机控制的网络化的机电一体化系统日益普及，而且往往和虚拟、现实以及多媒体技术紧密联系起来。

将微传感器、微执行器以及微机械和嵌入式微控制器等集成到一起出现了微机电一体化系统（Micromechatronics），这种新兴产品不仅大大减小了产品体积，而且增强了功能。这样就引发了一系列新的理论和技术问题，如新的理论基础、创新技术、加工、集成、组装及控制方法等。这里应该指出的是以光刻为基础的半导体加工工艺，已使微机电一体化技术达到一个新的高度。

众所周知，任何机器都是要人去操作的。技术的发展有一种趋势，就是使得其内部结构越来越复杂，操作越来越困难，有时甚至会有危险。机电一体化技术的最新进展给人们带来了一线曙光，上述情况即将改变。一种对人友好的机电一体化技术正在探索一些新的办法，它们将提供设计、制造、操作和维护机电一体化设备的实际解决途径，并向人们提供指导。使得不仅是工程师、熟练工人，即使是普通人，不管他们的教育程度如何，都可以很方便地进行操作。

这一时期的特点是：

1) 机电一体化这一新兴技术引起众多学者的关注，一些有影响的国际性学术刊物相继问世，关于机电一体化技术的学术性国际会议定期召开是其主要标志。

2) 人们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在进行深入研究。

任何一门学科都是由基础理论、技术和工程系统组成的完整体系。机电一体化在技术和工程系统方面已有很大发展，但在基础理论方面还在发展之中。所有上述研究都会促进机电一体化建立完整的基础理论和逐渐形成完整的科学体系。

3. 机电一体化的发展趋势

机电一体化的产品品种类型和生产厂家繁多，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是非常重要的事情，如研制具有集减速、变频调速电动机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，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、

单元接口的匹配。由于利益冲突，近期很难制定国际或国内该方面的标准，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，规模化将给机电一体化企业带来美好的前程。

(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中的研究日益得到重视，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。即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，会给使用、操作和维护带来极大的方便。随着模糊控制、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与发展，也为机电一体化技术发展开辟了广阔天地。

(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网络化已成大势，利用家庭网络 (home net) 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，使人们在家里分享各种高技术带来的便利与快乐。因此，机电一体化产品正朝着网络化方向发展。

(3) 网络化。20 世纪 90 年代，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、教育和人们日常生活都带来了巨大的变革。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，只要其功能独特，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发展迅速，而远程控制的终端设备本身就是机电一体化产品。

(4) 人性化。机电一体化产品的最终使用对象是人，如何给机电一体化产品赋予人的智能、情感和人性显得愈来愈重要，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，对人来说还是一种艺术享受，如家用机器人的最高境界就是人机一体化。

(5) 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。微机电系统 (Micro Electronic Mechanical Systems, MEMS) 是指可批量制作的，集微型机构、微型传感器、微型执行器以及信号处理和电路，甚至接口、通信和电源等于一体的微型器件或系统。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取代的优势。

(6) 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。

(7) 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。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好处。带源化是机电一体化产品的发展方向之一。

(8) 绿色化。科学技术的发展给人们的生活带来了巨大变化，在物质丰富的同时也带

来了资源减少、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。机电一体化产品的绿色化主要是指在其使用时不污染生态环境，产品寿命结束时，产品可分解和再利用。

机械和电子技术基础知识

第一节 机械基础

机电一体化系统中的机械系统与一般的机械系统相比,除要求具有较高的定位精度外,还应具有体积小、质量小、刚度大、动态性能好等特点。

概括地讲,机电一体化机械系统应包括以下三大部分机构。

(1) 传动机构。机电一体化系统中传动机构的主要功能是传递转矩和转速,因此,它实际上是一种转矩、转速变换器。机械传动部件对伺服系统的伺服特性有很大影响,特别是其传动类型、传动方式、传动刚性以及传动的可靠性对系统的精度、稳定性和快速响应性都有较大影响。

(2) 导向机构。其作用是支承和限制运动部件按给定的运动要求和规定的运动方向运动。该机构应能保证安全、准确。

(3) 执行机构。用来完成操作任务。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,以及良好的重复性和可靠性等。

一、传动机构

机电一体化系统中所用的传动机构主要有滑动丝杠副、滚珠丝杠副、齿轮传动副、同步带传动副、间歇机构、挠性传动机构等。对于工作机中的传动机构,要求既能够实现运动的转换,又能够实现动力的转换;对于信息机中的传动机构,主要要求运动的转换;对于动力,则只需要克服惯性力(力矩)和各种摩擦力(力矩)以及较小的工作负载即可。

机电一体化机械系统的传动机构要求具有传动精度高、工作稳定性好、响应速度快等特点,随着科技的进步,机电一体化产品得到了飞速的发展,这就要求其传动机构要不断地适应新的技术要求。目前的传动机构又呈现出一些新的特点,正朝着精密化、高速化、小型化、轻量化的方向发展。

(一) 齿轮传动副的设计

齿轮传动是机电一体化机械传动系统中应用最广泛的一种机械传动,通常用齿轮传动装置传递转矩、转速和位移,使电动机和滚珠丝杠副及工作台之间的转矩、转速和位移得到匹配。所以齿轮传动装置的设计是伺服机械传动系统设计的一个重要部分,在各类型机电一体化机械传动系统中得到了广泛使用。

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了传统机械传动中的变速机构,只有当伺服电动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,因此机电一体化系统中的机械传动装置不仅仅是用来解决伺服电动机与负载间的力矩匹配问题,更重要的是为了提高系统的伺服性

能。为了提高机械系统的伺服性能，要求机械传动部件的转动惯量小、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。

例如，数控机床的伺服电动机或步进电动机通常要通过齿轮传动装置配合滚珠丝杠副传递转矩和转速，并使电动机和螺旋传动机构及负载（即工作台）之间的转矩与转速得到匹配。因此，齿轮传动装置（齿轮减速箱）的设计是整个数控机床机械传动系统设计的一个重要组成部分。由于数控机床的电动机转速较高，而机械系统驱动的工作台的移动速度有时不能太高，变换范围也不能太大，故往往用齿轮装置将电动机输出轴的高转速低转矩转换为负载轴所要求的低转速高转矩。

对机电一体化机械传动系统总的要求是：精度高、稳定性好、响应快。而齿轮传动装置相当于系统中的—个—阶惯性环节或二阶振荡环节，对上述性能影响很大，因此，在设计齿轮传动装置时，以下三点应注意。

1. 传动精度

传动精度是由传动件的制造误差、装配误差、传动间隙和弹性变形等所引起的。对于开环控制来说，传动误差直接影响整个系统的精度。

2. 稳定性

对于闭环控制来说，齿轮传动装置完全在伺服回路内，其性能参数将直接影响整个系统的稳定性，因此，应考虑提高传动系统的固有频率，提高系统的阻尼能力，以便增加传动系统的抗振性能，满足稳定性要求。

3. 响应速度

无论开环还是闭环控制，齿轮传动装置都将影响整个系统的响应速度。从这个角度考虑，齿轮传动装置的角加速度是关键因素，可以采取使传动装置减少摩擦，减少转动惯量，提高传动效率等措施。

齿轮传动装置的设计内容包括：

- (1) 载荷估算；
- (2) 选择总传动比；
- (3) 选择传动机构类型；
- (4) 确定传动级数及传动比分配；
- (5) 配置传动链；
- (6) 估算传动精度；
- (7) 刚度、强度、固有频率计算。

这里我们仅介绍如何选择总传动比。

4. 最佳总传动比的确定

根据以上所述，机电一体化系统的传动装置在满足伺服电动机与负载力矩匹配的同时，应具有较高的响应速度，即启动与制动速度。齿轮传动装置的总传动比设计原则是出于使系统动作稳、准、快的考虑之上的，在具体确定系统总传动比时，可按工作时折算到电动机轴上的峰值转矩最小，等效均方根力矩最小，电动机驱动负载加速度最大三种方法计算，如图 2-1 所示。这里重点讲解采用负载角加速度最大原则来选择总传动比，以提高伺服系统的响应速度。

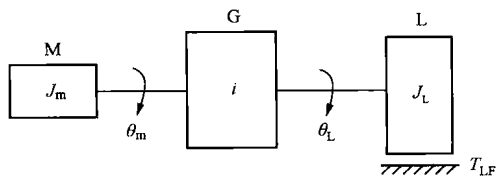


图 2-1 电动机、传动装置和负载的传动模型

设电动机的输出转矩为 T_m 、摩擦阻抗转矩为 T_{LF} 、电动机的转动惯量为 J_m 、电动机的角位移为 θ_m 、负载 L 的转动惯量为 J_L 、齿轮系 G 的总传动比为 i ，根据牛顿定律可知

$$T_m - \frac{T_{LF}}{i} = \left(J_m + \frac{J_L}{i^2} \right) \theta_m'' = \left(J_m + \frac{J_L}{i^2} \right) i \theta_L'' \quad (2-1)$$

则

$$\varepsilon = \theta_L'' = \frac{T_m i - T_{LF}}{J_m i^2 + J_L}$$

令 $\frac{d\varepsilon}{di} = 0$ ，则有负载角加速度最大的最佳总传动比为

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

若不计摩擦阻抗转矩，即 $T_{LF} = 0$ ，则

$$i = \sqrt{\frac{J_L}{J_m}} \quad \text{或} \quad \frac{J_L}{i^2} = J_m$$

上式表明：齿轮系总传动比 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，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，这样就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、摩擦阻抗转矩影响而得到的结论，实际的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。

总传动比对系统性能的影响有以下几个方面：

(1) 系统的稳定性。总传动比 i 偏大使得系统折算到电动机轴上的等效转动惯量变小，从二阶系统传递函数可得 $\xi = \frac{B}{2\sqrt{JK}}$ ，选择大的 i 可使 ξ 增大，系统的稳定性取决于阻尼比 ξ ，阻尼系数 ξ 增大，振荡得到抑制，稳定性提高，但 $\xi > 1$ 时影响系统的快速响应，应尽量避免。

(2) 系统的响应特性。总传动比 i 偏小时，使加速度下降；总传动比 i 偏大时，则使加速度增大为一定值。因此， i 偏大时响应特性提高。

(3) 系统的低速稳定性。伺服电动机在运行时，由于电枢反应、电刷摩擦和低速不稳定性，可能产生爬行。 i 值偏大可避免爬行。

(4) 系统的结构。总传动比 i 偏大，使得传动级数增多，结构不紧凑，传动精度、效率、刚度与系统固有频率降低。

由上可见，总传动比的选择要综合考虑。

(二) 谐波齿轮传动

谐波齿轮传动是由美国学者麦塞尔发明的一种具有重大突破的传动技术，其原理是依靠柔性齿轮所产生的可控制弹性变形波，引起齿间的相对位移来传递动力来运动的。我国1978年研究成功了谐波传动减速器，并成功地应用在了发射机调谐机构件中。1980年该项成果荣获了电子工业部优秀科技成果奖。

1. 谐波齿轮传动的工作原理

如图 2-2 所示, 谐波齿轮传动主要由波形发生器 H 、柔轮 1 和刚轮 2 组成。柔轮具有外齿, 刚轮具有内齿, 它们的齿形为三角形或渐开线型。其齿距相等, 但齿数不同。刚轮的齿数 Z_g 比柔轮齿数 Z_r 多。柔轮的轮缘极薄, 刚度很小, 在未装配前, 柔轮是圆形的。由于波形发生器的直径比柔轮内圆的直径略大, 所以当波形发生器装入柔轮的内圆时, 就迫使柔轮变形, 呈椭圆形。在椭圆长轴的两端 (图中 A 点、B 点), 刚轮与柔轮的轮齿完全啮合; 而在椭圆短轴的两端 (图中 C 点、D 点), 两轮的轮齿完全分离; 长短轴之间的齿则处于半啮合状态, 即一部分正在啮入, 一部分正在脱出。

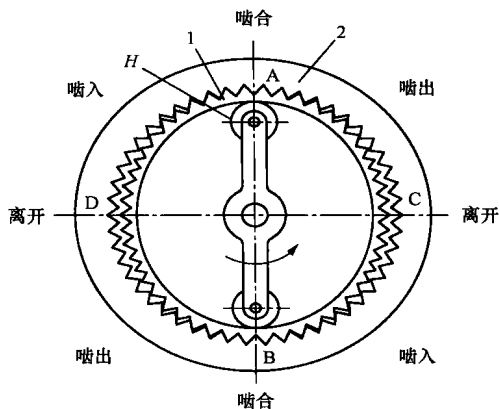


图 2-2 谐波齿轮传动

图 2-2 所示的波发生器有两个触头, 称双波发生器。其刚轮与柔轮的齿数相差为 2, 周长相差 2 个齿距的弧长。当波发生器转动时, 迫使柔轮的长短轴的方向随之发生变化, 柔轮与刚轮上的齿依次进入啮合。柔轮和刚轮在节圆处的啮合过程, 如同两个纯滚动的圆环一样, 它们在任一瞬间转过的弧长都必须相等。

2. 谐波齿轮传动的特点

与一般齿轮传动相比, 谐波齿轮传动具有以下优点:

- (1) 传动比大。单级谐波齿轮的传动比为 70~500; 多级和复式传动的传动比更大, 可达 30 000 以上。不仅用于减速, 还可用于增速。
- (2) 承载能力大。谐波齿轮传动同时啮合的齿数多, 可达柔轮或刚轮齿数的 30%~40%, 因此能承受大的载荷。
- (3) 传动精度高。由于啮合齿数较多, 因而误差得到均化。同时, 通过调整, 齿侧间隙较小, 回差较小, 因而传动精度高。
- (4) 可以向密封空间传递运动或动力。当柔轮被固定后, 它既可以作为密封传动装置的壳体, 又可以产生弹性变形, 即完成错齿运动, 从而达到传递运动或动力的目的。因此, 它可以用来驱动在高真空、有原子辐射或其他有害介质的空间工作的传动机构。这一特点是现有其他传动机构所无法比拟的。
- (5) 传动平稳。基本上无冲击振动。这是由于齿的啮入与啮出按正弦规律变化, 无突变载荷和冲击, 磨损小, 无噪声。
- (6) 传动效率较高。单级传动的效率一般在 69%~96% 的范围内, 使用寿命长。
- (7) 结构简单、体积小、质量小。

谐波齿轮传动有以下缺点:

- (1) 柔轮承受较大的交变载荷, 对柔轮材料的抗疲劳强度、加工和热处理要求较高, 工艺复杂;
- (2) 传动比下限值较高;
- (3) 不能做成交叉轴和相交轴的结构。

谐波齿轮传动到目前已有不少厂家专门生产, 并形成系列化。用于如机器人、无线电天线伸缩器、手摇式谐波传动增速发电机、雷达、射电望远镜、卫星通信地面站天线的方

位和俯仰传动机构、电子仪器、仪表、精密分度机构、小侧隙和零侧隙传动机构等。

3. 谐波齿轮的传动比计算

谐波齿轮传动中，刚轮、柔轮和波发生器这三个基本构件，其中任何一个都可作为主动件，其余两个，一个作为从动件，一个为固定件。设波形发生器相当于行星轮系的转臂 H ，柔轮相当于行星轮 r ，刚轮相当于中心轮 g ，则

$$i_{rg}^H = \frac{\omega_r - \omega_H}{\omega_g - \omega_H} = \frac{Z_g}{Z_r} \quad (2-2)$$

单级谐波齿轮传动的传动比可按表 2-1 计算。

表 2-1 单级谐波齿轮传动的传动比

三个基本构件			传动比计算	功能	输入与输出运动的方向关系
固定	输入	输出			
刚轮 2	波发生器 H	柔轮 1	$i_{11}^2 = -Z_r / (Z_g - Z_r)$	减速	异向
刚轮 2	柔轮 1	波发生器 H	$i_{1H}^2 = -(Z_g - Z_r) / Z_r$	增速	异向
柔轮 1	波发生器 H	刚轮 2	$i_{H2}^1 = Z_g / (Z_g - Z_r)$	减速	同向
柔轮 1	刚轮 2	波发生器 H	$i_{2H}^1 = (Z_g - Z_r) / Z_g$	增速	同向

图 2-3 (a) 所示为波发生器输入、刚轮固定、柔轮输出的工作图，图 2-3 (b) 所示为波发生器输入、柔轮固定、刚轮输出的工作图。

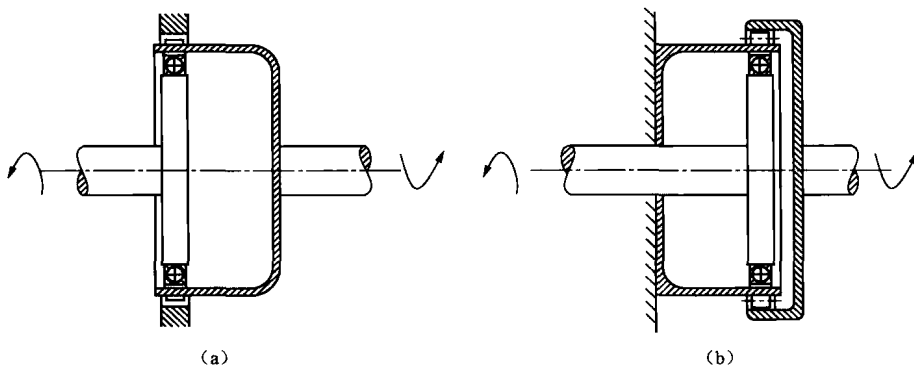


图 2-3 谐波齿轮的传动比计算

(a) 波发生器输入、刚轮固定、柔轮输出；(b) 波发生器输入、柔轮固定、刚轮输出

4. 谐波齿轮传动中柔轮与刚轮材料

(1) 柔轮。柔轮处在反复弹性变形的状态下工作，需选用强度和耐疲劳性能好的合金结构钢来制造，如轴承钢、铬钢、铬锰硅钢、铬锰钛钢、铬钼钒钢等。目前较普通的有 35CrMoSiA, 60SiZ, 50CrMn, 40Cr 等。对小功率的传动装置，有时也可选用尼龙 1010, 尼龙 6 和含氟塑料等材料。

(2) 刚轮。刚轮材料可用 45 钢、40Cr 或用高强度铸铁、球墨铸铁等，与钢制柔轮组成减摩运动副。

(三) 滚珠花键传动

滚珠花键传动装置由花键轴、花键套、循环装置及滚珠等组成，如图 2-4 所示。在花