



普通高等学校“十二五”规划教材
普通高等学校研究生系列优秀教材

机械电子工程原理 与系统设计

主 编 隋修武

编 著 隋修武 牛雪娟 刘欣 赵方方 桑宏强



国防工业出版社

National Defense Industry Press

普通高等学校“十二五”规划教材
普通高等学校研究生系列优秀教材

机械电子工程原理 与系统设计

主编 隋修武
编著 隋修武 牛雪娟 刘欣
赵方方 桑宏强

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书系统地阐述了机械电子工程的基本原理和设计方法,重点介绍机电系统的集成。具体内容包括机电测试技术、机电系统的控制器与控制算法、机电传动与控制技术、机电系统的集成与电磁兼容,并详细介绍了自动导引搬运车 AGV、汽车 ABS 系统两个综合设计实例。

本书可作为高等学校机械科学与工程学科的研究生教材,也可作为机械电子工程专业、测控技术与仪器及相关专业高年级的本科生教材,也可供相关工程领域的技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

机械电子工程原理与系统设计/隋修武主编. —北京:
国防工业出版社,2014. 1
普通高等学校“十二五”规划教材
ISBN 978-7-118-09154-0

I. ①机... II. ①隋... III. ①机电-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(2013)第 262362 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

涿中印刷厂印刷
新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 14 字数 342 千字
2014 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3500 册 定价 36.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776
发行业务:(010)88540717

前 言

机电一体化(Mechatronics)于1971年起源于日本,它取英语Mechanics(机械学)的前半部和Electronics(电子学)的后半部拼合而成,在我国通常称为机械电子或机电一体化,但是机械电子学并不是机械技术和电子技术的简单叠加,而是有着自身体系的新学科。

机械电子工程的本质是:机械与电子技术的规划应用和有效结合,以构成一个最优的产品或系统,很好地体现机械、电子、计算机的学科交叉。现代的机械工程已不是简单的机械结构的设计与应用,机电一体化是大势所趋,机械与电子结合的例子随处可见。机电一体化技术具有极为广泛的应用前景,已成为科研发展和社会需求的主要热点领域之一。

机械电子工程是机械工程学科(特别是机械电子工程学科)的一门综合性很强的课程,是该学科硕士研究生培养的重要支撑。在我国绝大多数拥有机械工程学科硕士点的高等院校,都开设有这门课程,或者类似的“机电一体化技术”、“机电系统计算机控制”等课程。

从多年的研究生教学来看,“机械电子工程”在研究生的培养中发挥着重要的作用,几乎机械工程学科的所有研究生在进行课题研究时,都要用到机电一体化的知识,大多数的硕士研究生毕业后也都从事机电一体化相关的工作或在相近领域进行深造。

本教材在总结多年的教学和科研经验的基础上,科学合理地安排章节内容,在综合机电测试技术、机电系统控制器与控制算法、机电传动与控制技术、机电系统的集成与电磁兼容等专项知识的基础上,立足机械工程学科,重在机电系统集成,将上述知识有机地结合起来,突破单一知识点的束缚,突出系统的综合设计与集成,培养学生在进行系统设计之初就具备机电一体化的设计思想,培养学生的综合应用能力。为此,教材安排了自动导引搬运车AGV、汽车ABS系统两个典型的机电系统的综合设计实例。

本书由天津工业大学隋修武副教授主编,并负责全书的策划与统稿。天津工业大学的一线教师组成了编写组,牛雪娟博士编写了第3章,赵方方副教授编写了第4章,刘欣博士编写了第5章,隋修武编写了其他章节,桑宏强副教授、杜玉红副教授以及范博学、刘蕾、李志君、葛辉等研究生进行了大量的资料编辑整理与实验验证工作,北方工业大学的郑勇副教授为本书的编写提供了指导和帮助,为提高本书的质量做出了重要贡献。本书的出版是编写组集体智慧的结晶,同时得到天津工业大学优秀研究生教材建设项目的资助,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,又试图在编写教材的指导思想和内容上做出重大改变,错误与不足之处在所难免,敬请广大教师和同学们在使用过程中能够给予批评和指正,以利于作者的改进和提高。让我们一起携手将机械电子工程领域的研究生培养工作做得更好!

作者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 机械电子工程概述	1
1.2 机械电子工程的关键技术	2
1.3 机械电子工程的总体设计思想	3
1.4 机械电子工程的发展趋势	4
习题	6
第 2 章 机电系统测试技术	7
2.1 传感与测试技术基础	7
2.1.1 传感器的基本构成	7
2.1.2 传感器的静态数学模型及其静态特性指标	8
2.1.3 传感器的选用	13
2.2 位移量的检测	14
2.2.1 光栅传感器	15
2.2.2 绝对码编码器	18
2.2.3 增量码编码器	21
2.3 力学量的检测	23
2.3.1 应变式多维测力弹性体	23
2.3.2 扭矩传感器	28
2.4 机器视觉检测	30
2.5 触觉检测	35
2.5.1 指端应变式触觉传感器	35
2.5.2 多功能触觉传感器	37
2.5.3 PVDF 触觉传感器	40
2.6 机电测试新技术	42
2.6.1 现代机电测试系统的发展趋势	42
2.6.2 现场总线系统	43
2.6.3 虚拟仪器技术	46
2.6.4 多传感器数据融合	47
习题	48

第 3 章 机电系统的计算机控制	49
3.1 计算机控制技术基础	49
3.1.1 计算机控制系统的组成	49
3.1.2 计算机控制系统的分类	50
3.1.3 计算机控制系统举例	53
3.2 机电系统常用控制器	53
3.2.1 工控机	53
3.2.2 PLC	57
3.2.3 单片机	58
3.3 PLC 原理及应用	61
3.3.1 PLC 结构	61
3.3.2 PLC 的工作原理	64
3.3.3 PLC 应用	65
3.4 PMAC 原理及应用	68
3.4.1 PMAC 的组成及性能	68
3.4.2 PMAC 分类	70
3.4.3 PMAC 的附件	72
3.4.4 PMAC 卡的典型应用	74
3.5 基于 DSP 的运动控制	76
3.5.1 运动控制概述	76
3.5.2 DSP 运动控制卡	76
3.5.3 DSP 运动控制实例	78
习题	80
第 4 章 机电系统的控制策略	81
4.1 测量数据的预处理	81
4.1.1 数字滤波	81
4.1.2 线性化处理	84
4.1.3 标度变换	87
4.2 PID 控制算法	88
4.2.1 PID 控制原理	88
4.2.2 标准 PID 算法的改进	93
4.2.3 数字 PID 参数的选择	96
4.3 模糊控制	100
4.3.1 模糊控制的定义及特点	100
4.3.2 模糊控制系统的组成	101
4.3.3 模糊控制系统的基本原理	103

4.3.4	模糊控制的应用实例	111
4.4	其他先进控制方法	119
4.4.1	智能控制	120
4.4.2	自适应控制	121
4.4.3	模型预测控制和广义预测控制	123
4.4.4	神经控制	127
	习题	128
第5章	机电系统传动与控制	129
5.1	直流电动机特性及其控制	129
5.1.1	直流电动机的基本结构和工作原理	129
5.1.2	电枢电动势和电磁转矩	130
5.1.3	直流电动机的工作特性	132
5.1.4	直流电动机的速度控制	132
5.2	交流电动机特性及其控制	135
5.2.1	三相异步电动机的基本结构和工作原理	135
5.2.2	旋转磁场和电路分析	136
5.2.3	三相异步电动机的工作特性	139
5.2.4	三相异步电动机的速度控制	140
5.3	步进电机特性及其控制	144
5.3.1	步进电动机的典型结构和工作原理	144
5.3.2	通电方式与电动机转速	145
5.3.3	反应式步进电动机的运行特性	146
5.3.4	步进电动机的控制	149
5.4	伺服电机原理及控制	153
5.4.1	伺服电机结构及原理	154
5.4.2	典型伺服控制系统	156
5.5	机电传动与控制综合应用	158
	习题	163
第6章	机电系统的集成	164
6.1	模块之间的级联设计	164
6.1.1	电气性能的相互匹配	164
6.1.2	信号耦合	165
6.1.3	时序配合	166
6.1.4	电平转换接口	166
6.2	机电系统的电磁兼容	171
6.2.1	接地技术	172

6.2.2	屏蔽技术	176
6.2.3	共模干扰的抑制	177
6.2.4	差模干扰的抑制	181
6.2.5	供电系统抗干扰	182
6.2.6	印制电路板的抗干扰	183
6.3	软件抗干扰技术	186
6.3.1	软件冗余技术	186
6.3.2	软件陷阱技术	188
6.3.3	“看门狗”技术	190
	习题	193
第7章	机电系统应用实例	194
7.1	自动导引搬运车(AGV)	194
7.1.1	AGV 概述	194
7.1.2	AGV 的主要功能模块	196
7.1.3	AGV 的导航/导向技术	198
7.1.4	AGV 的控制系统	203
7.2	汽车 ABS 系统	206
7.2.1	汽车 ABS 系统概述	206
7.2.2	ABS 系统的工作原理	207
7.2.3	汽车 ABS 系统的组成	208
7.2.4	ABS 系统的分类	211
	习题	212
	参考文献	213

第1章 绪论

1.1 机械电子工程概述

机电一体化(Mechatronics)于1971年起源于日本,它取英语Mechanics(机械学)的前半部和Electronics(电子学)的后半部拼合而成,字面上表示机械学和电子学两个学科的综合。在我国通常称为机械电子或机电一体化,但是机械电子学并不是机械技术和电子技术的简单叠加,而是有着自身体系的新学科。

机械工程发展新阶段是机械电子工程阶段,机械电子工程是机电一体化技术及其产品的统称,并把柔性制造系统(FMS)和计算机集成制造系统(CIMS)等先进制造技术的生产线和制造过程也包括在内。对机电一体化产品的一种认识是“在机械产品的基础上应用微电子技术和计算机技术生产出来的新一代的机电产品。”这种认识的核心是“机电一体化产品必须是由计算机控制的伺服系统”。

机械电子系统主要解决的是物质流、能量流和信息流的问题,其主要功能是对物质、能量和信息进行处理、传递、存储等。机电产品或系统很多,如汽车、机器人、生产线、机床、家电以及工业过程控制系统等。

机械电子工程的本质是机械与电子技术的规划应用和有效结合,以构成一个最优的产品或系统。现代的机械工程已不是简单的机械结构的设计与应用,机电一体化是大势所趋,机械与电子的结合的例子随处可见,机电一体化技术具有极为广泛的应用前景,其已成为科研发展和社会需求的主要热点领域之一。在现代的产品设计中,只有在设计初期,就将电子学和机械工程有效结合,才有可能设计出高质量的机电一体化产品,从而在激烈的竞争中取胜。

机械电子工程并不是一门有严格界限并且独立的工程学科,而是在设计过程中一个综合的学科。在完成这种综合的过程中,机械电子工程把它的核心部分——机械工程、电子工程、计算机技术,与许多不同的领域,如制造技术、管理技术和生产加工实践等结合在一起。机械电子工程的组成示意图如图1-1所示。

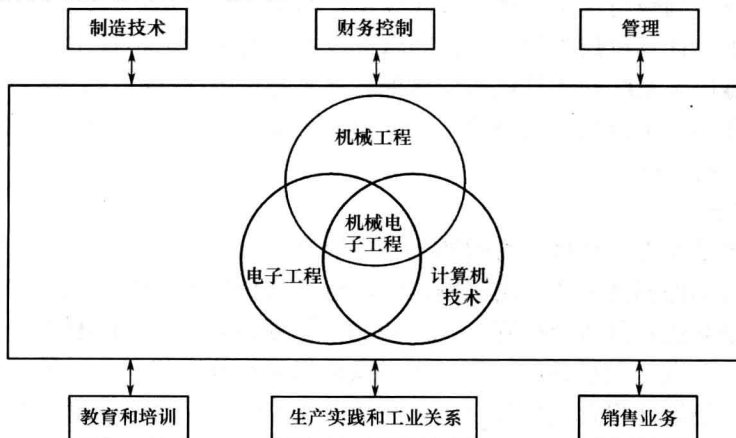


图 1-1 机械电子工程的组成示意图

1.2 机械电子工程的关键技术

由机械电子系统的构成要素可见，机械电子工程技术一般包括六大共性关键技术：机械技术、传感检测技术、计算机与信息技术、自动控制技术、伺服传动技术、系统集成技术。如图 1-2 所示。

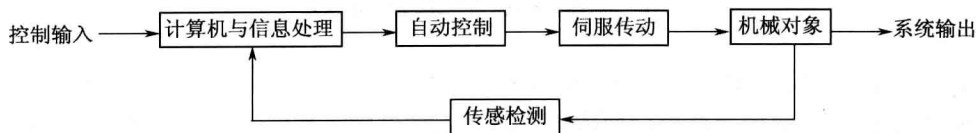


图 1-2 机械电子系统的构成要素

1. 机械技术

无论是制造类的机械工程，还是动力类的机械工程，机械技术都是机械电子工程技术的基础，机械技术的关键是如何与机械电子工程技术相适应，实现结构、材料、性能的改变，满足工程应用中对机械对象的质量轻、体积小、精度高、刚度及综合性能好的要求。在传统的机械理论与工艺条件下，应用计算机辅助技术、人工智能技术与专家系统技术等，实现现代机械制造与动力传动。

2. 传感检测技术

传感检测装置是系统的感受器，是系统的信息来源，是实现自动控制、自动调节的关键环节，其功能越强，系统的自动化程序越高。现代工程要求传感器能快速、精确地获取信息并能经受严酷环境的考验，它是机械电子系统达到高水平的保证。

传感检测技术是一门多学科、知识密集的应用技术。传感原理、传感材料和加工制造装配技术是传感器开发的三个关键技术。作为一个独立器件，传感器正向集成化、数字化、智能化方向发展。机械电子系统设计往往难以满足技术要求的关键原因，在于无合适的传感器，因此，发展传感器技术，对于机电一体化技术的发展具有十分重要的意义。

3. 计算机与信息处理技术

在机械电子系统的工作过程中，与各种参数和状态以及自动控制有关的信息输入、交换、识别、存取、运算、判断与决策、人工智能技术、专家系统技术、神经网络技术均属于计算机与信息处理技术。计算机技术包括硬件和软件技术、网络与通信技术、数据处理技术和数据库技术等。机械电子系统的计算机与信息处理装置是系统的核心，它控制与指挥整个系统的运行，信息处理的结果直接影响系统工作的质量和效率。计算机与信息处理技术是促进机电一体化技术发展的关键技术。

4. 自动控制技术

自动控制技术是在无人直接参与的情况下，通过控制器使被控对象或过程自动地按照预定的规律运行。自动控制技术的应用范围很广，包括高精度定位控制、速度控制、操作力控制等，采用的控制算法有自适应控制、PID 控制、模糊控制、预测控制等。在控制理论指导下进行系统设计、仿真、现场调试，将大大提高系统工作效率和产品质量，改善劳动条件。机械电子工程与系统设计将自动控制技术作为重要支撑技术，自动控制装置是机械电子系统的重要组成部分。

传统的机械电子系统的自动控制技术，主要以传递函数为基础，分析和设计单输入、单输出、线性的自动控制系统，如伺服系统的自动控制技术。随着科学技术和工程应用的需求，发展了以状态空间法为基础的现代控制理论。现代机械电子工程的自动控制技术研究多输入、多输出、变参量、非线性、高精度、高效能的控制系统的问题，最优控制、最佳滤波、系统辨识、自适应控制等现代控制方法已经普遍应用于机械电子工程的系统中。

5. 伺服传动技术

伺服传动技术主要是指机械电子系统的执行元件和驱动装置设计技术。伺服传动装置包括电动、气动、液压等各种类型的传动装置，是实现电信号到机械动作的转换装置与部件，对系统的动态性能、控制质量和功能有决定性的影响。例如，直流伺服电机的控制性能、速度与转矩特性的稳定性；交流电机的变频调速、电流逆变；电磁铁体积大小、工作可靠性问题；液压与气动执行结构的精度、响应速度等，是伺服传动装置设计必须考虑的问题。

6. 系统集成技术

机械电子工程的系统具有多功能、高精度、高效能的要求和多技术领域交叉的特点，使系统本身及其开发设计变得复杂化。系统的总体性能不仅与各构成要素功能、精度、性能有关，还与各构成要素之间的相互协调和融合相关。

系统集成技术即以整体的概念，组织应用各种相关技术，从全局角度和系统目标出发，将总体分解成相互关联的若干功能单元，找出能够完成各个功能的可能技术方案，对方案分析、评价、综合，优选出适宜的技术方案。系统总体设计的目的是在机电一体化系统各个组成部分的技术成熟、组件性能和可靠性良好的基础上，通过协调各组件的相互关系和所用技术的一致性来使系统或产品实现经济、可靠、高效率和操作方便等。

1.3 机械电子工程的总体设计思想

机械电子工程是一门综合技术，是一项多级别、多单元组成的系统工程，机电系统所包含的设计与开发范围是非常广泛的。

机械电子系统或产品的功能与规格确定后，技术人员利用机电一体化技术进行设计、制造的整个过程为机电一体化工程。机电一体化工程是系统工程在机电一体化技术中的具体应用。

机电一体化设计突出体现在两个方面：一方面，当产品的某一功能单靠某一种技术无法实现时，必须进行机械与电子及其他多种技术有机结合的一体化设计；另一方面，当产品某一功能的实现有多种可行的技术方案时，也必须应用机电一体化技术对各种技术方案进行分析和评价。在充分考虑同其他功能单元的连接与匹配的条件下，选择最优的技术方案。因此，机电一体化设计必须充分考虑各种技术方案的等效性、互补性与可比性。

在某种情况下，产品的功能必须通过机电配合才能实现，这时两种技术是相互关联、相互补充的，即具有互补性。当多种可行性技术方案同时存在时，说明在实现具体功能上它们具有等效性。由于不同的技术方案往往具有不同的参量，因此评价时应选择具有相同量纲的性能指标(如成本、可靠性、精度等)，或引入新的参量将不同的参量联系起来，以保证各种技术方案之间具有可比性。

机电一体化系统是机电一体化设备与产品的总称，它表示将这些设备与产品看成一个系统。机电一体化系统设计的第一个环节是总体设计，就是在具体设计之前对所要求设计的机

电一体化系统的各个方面，按照简单、实用、经济、安全、美观等原则进行综合性设计。其主要内容包括：系统原理方案的构思，结构方案的设计，总体布局设计与环境设计，主要参数及技术指标的确定，总体方案的评价与决策。

机电一体化总体设计就是应用系统总体设计技术，从整体目标出发，用系统的观点和方法，综合分析机电一体化产品的性能要求及各机电组成单元的特性，选择最合理的单元组合方案，实现机电一体化产品整体优化设计的过程。

在总体设计过程中，应逐步形成下列技术文件与图纸：

- (1) 系统工作原理图。
- (2) 控制器、驱动器、执行器、传感器工作原理图等。
- (3) 总体设计报告。
- (4) 总体装配图。
- (5) 部件装配图。

机电一体化总体设计的目的是设计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依据。它是机电一体化系统设计最重要的环节，其优劣直接影响系统的全部性能及使用情况，总体设计给具体设计提出了基本原则和布局，指导具体设计的开展。相反，具体设计是在总体设计基础上的具体化，在具体设计中可对总体设计进行不断的完善和改进，两者互相结合，交错进行。制定机电一体化系统总体设计方案的步骤是通用化的步骤，因为机电一体化系统所对应的产品可能是装配机械、检验仪器、测试仪器、包装机械等各行业的产品或设备。

1.4 机械电子工程的发展趋势

机械电子系统是具有机电一体化技术的新型机电系统，它的发展依赖于机械技术、电子技术、传感技术、接口技术、信息技术、计算机技术、自动控制技术等相关技术的发展，并且相互促进。因此，机械电子系统的发展主要表现在以下几个方面。

1. 智能化

随着控制论、信息论、系统论“三论”科学与技术的应用，世界的产业面貌已经发生了巨大的变化，系统或产品不断升级。智能科学与技术已经形成体系框架，形成智能科学这一新的学科。这是一个多学科融合的结果，它由基础理论、技术方法和成果应用三大领域构成。特别是IT产业的兴起与发展，使得工业生产力、产品的质量获得了空前的提高。约半个世纪以来，专家系统作为使用计算机模拟人工智能的尝试，在许多领域获得了成功，发展到今天，已出现众多的与智能相关的理论、技术与产品。智能化技术及其产品已不仅属于计算机应用范畴，智能化机械电子系统或产品正大量涌现，如机器人、智能玩具等。

智能化机械电子系统的特征主要体现在以下三个方面。

(1) 复杂性。智能化机械电子系统具有多功能、高适应性、高可靠性，是多技术集成与优化的产物，技术和结构上非常复杂。智能化机械电子系统通常由机、光、电、计算机等装置构成，计算机与信息处理器在系统中占着重要位置，发挥着巨大的作用。

(2) 交叉性。智能化机械电子技术广泛应用了以“三论”为中心的各种现代理论，在经典控制论基础上，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

力学等新思想、新方法，模拟人类智能，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。

(3) 拟人性。智能化机械电子系统具有模拟人的思维功能。例如，有学习和判断功能，能分析物质类型和性质，根据已有的知识数据和当前的结果判定是何种物体，从而决策行为。

2. 模块化

设备或产品的系列化，零部件通用化和零件标准化统称为“三化”，三化可以缩短设计周期和生产周期，提高设计质量和加工质量，可以减少零部件品种，增加生产批量，便于组织生产、易于降低产品成本和产业升级。由于机械电子产品的种类和生产厂家繁多，所以，研制和开发具有标准机械接口、电气接口、动力接口、环境接口的机械电子产品单元非常重要。

实现机械电子产品的模块化，是实现产品“三化”的基础，利用模块化单元可以迅速开发新产品，有利于扩大生产规模，使产品增值，同时也可缩短设计周期，提高设计质量和加工质量，减少零部件品种，增加产品的通用性和适应能力。

3. 网络化

随着网络技术的发展，基于计算机网络的各种远程控制和监视技术方兴未艾，机电系统作为远程控制的终端设备也得到了发展。现场总线和局域网技术使家用电器网络化，利用家庭网络(Home Net)将各种家用电器连接成以计算机为核心的计算机集成家用系统(Computer Integrated Appliance System, CIAS)。特别是，随着全球定位系统(Global Positioning System, GPS)卫星的不断入轨，构成了定位卫星系统。GPS的普遍使用，标志着机电一体化系统及其技术也进入了网络技术时代。因此，机电一体化系统无疑将朝着网络化方向发展。

4. 微型化

微型化是指机电系统的特征尺寸小型化和微型化，最为典型的就是微机电系统。微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)泛指特征尺寸小于 1cm^3 的系统或机构，它的起源与集成电路和固态传感器密切相关。MEMS技术的发展，也为机电系统的微型化奠定了基础，微机械技术、微传感器技术、微执行器技术、微驱动器技术都是微机电系统的关键技术。MEMS机构应用于机电系统，形成微机电系统或产品，具有体积小、耗能少、运动灵活等特点，在生物医疗、军事、信息等方面具有广泛的应用。

5. 人格化

未来的机电系统或产品更加注意产品与人的关系，机电系统或产品的人格化有两个含义。一是指机电产品的最终使用对象是人，如何赋予机电产品人的智能、情感等显得越来越重要，特别是对家用机器人，其高层境界就是人机一体化；另一方面是指模仿生物机理，研制各种机电系统或产品的仿生系统，事实上，许多机电系统或产品都是受动物功能的启发研制出来的。

6. 绿色化

机电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。

工业的发达给人们生活带来了巨大变化。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，人们呼吁保护环境资源，回归自然。绿色产品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，资源利用率最高。只有设计出绿色的机电产品，才能具有长远的发展前途。

习 题

1. 简述什么是机械电子工程。
2. 机械电子工程的关键技术有哪些？
3. 机械电子工程的总体设计思想是什么？
4. 简述机械电子工程的发展趋势。

第2章 机电系统测试技术

测试技术是机电系统信息获取的主要来源，而测试技术的核心是传感技术与信息处理技术，它们对于机电一体化技术的发展和机电系统的设计具有十分重要的意义。本章将介绍传感与测试技术基础知识，机电系统最常用的位移检测、力学量检测、视觉检测和触觉检测，以及现代测试技术的发展。

2.1 传感与测试技术基础

2.1.1 传感器的基本构成

传感器是以一定的精确度把被测量(物理量、生物量、化学量)转换为与之有确定关系的，便于处理应用的某种物理量(如电量、光学量)的测量部件或装置，传感器通常由敏感元件、转换元件和转换电路组成，见图 2-1。在现有技术条件下，因为电量最容易被使用，所以传感器的输出物理量一般是电量。



图 2-1 传感器组成框图

1. 敏感元件

即直接感受被测量，以确定的关系输出某一物理量(包括电学量)的元件。如膜片和波纹管可以把被测压力变成位移量。

2. 转化元件

转化元件将敏感元件输出的非电物理量(如位移、应变、应力等)转换为电学量(包括电路参数量)，如光敏电阻和热敏电阻等。

3. 转换电路

转换电路将转换元件输出的电信号(如电阻、电容、电感)量转换成便于测量、显示、记录、控制和处理的电量，如电压、电流、频率等。

传感器的上述三部分不一定齐全，根据敏感与转换的需要，有的只有敏感元件，有的有敏感元件和转化元件，有的则三者兼备。敏感元件如果直接输出电量就同时兼为转换元件了，如热电偶感受被测温差时直接输出电动势，压阻式和谐振式压力传感器、差动变压器式位移传感器等的敏感元件和转化元件完全合为一体。敏感元件输出的虽然是电量，但不是电流、电压之类的容易直接使用的，而是电阻、电容、电感之类的中间量，则必须由转换电路转换为电流、电压。如电容式位移传感器，由敏感元件和转换电路组成。

转化元件也可以不直接感受被测量,而只感受与被测量成确定关系的其他非电量。例如,差动变压器式压力传感器,并不直接感受压力,只是感受与被测压力成确定关系的衔铁位移量,然后输出电量。有些传感器,转化元件不止一个,要经若干次转换才输出信号。

由于传感器的输出信号一般都很微弱,常需要有信号调理与转换电路对其进行放大、运算调制等,转换电路的类型视传感器的工作原理和转换元件的类型而定,如电桥电路、高阻输入电路、维持振荡的激振电路等。

传感器的输出—输入特性是传感器的最基本特性,传感器的各种性能指标都是根据其输出和输入的对应关系来描述的。研究传感器的特性,以使用理论指导其设计、制造、校准和使用。传感器所测量的被测量基本上有两种形式,一种是稳态(静态或准静态)的形式,这种信号不随时间变化或变化很缓慢;另一种是动态(周期变化或瞬态)的形式,这种信号是随着时间变化而变化的。由于输入被测量不同,传感器所表现出来的输出—输入特性也不同,因此存在所谓静态特性和动态特性。

2.1.2 传感器的静态数学模型及其静态特性指标

1. 传感器的静态模型

传感器的静态模型是指在稳态信号作用下,即输入量对时间的各阶导数等于零,其输出—输入关系的数学模型。如果不考虑滞后、蠕变效应,传感器静态模型一般可用 n 次代数方程来表示,即

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (2-1)$$

式中, x 为输入量; y 为输出量; a_0 为零位输出; a_1 为传感器线性灵敏度; a_2, a_3, \dots, a_n 为非线性项的待定常数。

上述静态模型有三种特殊形式:

(1) 线性特性。线性传感器有两种情况:

- ① 若 $a_2 = a_3 = \dots = a_n = 0$, $y = a_1x + a_0$, 特性曲线是一条不过零的直线。
- ② 若 $a_0 = a_2 = a_3 = \dots = a_n = 0$, 特性曲线是一条过零的直线,这是理想的传感器应具有的特性,只有具备这样特性才能正确无误地反映被测量的真值。

$$y = a_1x \quad (2-2)$$

(2) 仅有偶次非线性项。

$$y = a_0 + a_2x^2 + a_4x^4 + \dots + a_nx^n \quad (n = 2, 4, 6, \dots) \quad (2-3)$$

因为它没有对称性,所以线性范围较窄。

(3) 仅有奇次非线性项。具有这样特性的传感器一般输入量 x 在相当大的范围内具有较宽的准线性,这是较接近理想线性的非线性特性。它相对坐标原点对称的,即 $y(x) = -y(-x)$,所以它具有相当宽的近似线性范围。其输出—输入特性方程为

$$y = a_1x + a_3x^3 + a_5x^5 + \dots + a_nx^n \quad (n = 1, 3, 5, 7, \dots) \quad (2-4)$$

2. 传感器的特性曲线

表示传感器输出—输入关系的曲线,称为传感器的特性曲线。代数方程式(2-1)~式(2-4)可分别用特性曲线描述为图 2-2 的(a)、(b)、(c)和(d)四种情况(图中设 $a_0 = 0$)。从图中可以看

出, 图 2-2(b)为理想特性曲线, 图 2-2 (a)、(c)、(d)都出现了非线性的情况, 图 2-2(d)在相当大的范围内有较宽的准线性。

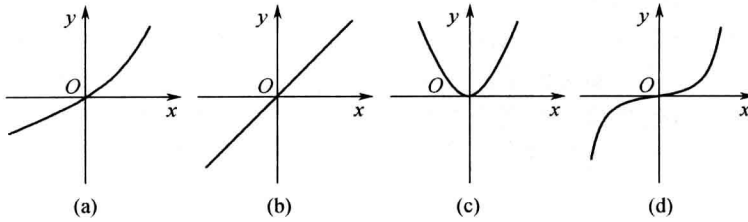


图 2-2 传感器静态特征曲线

3. 传感器的静态特性指标

传感器的静态特性指标主要包括量程与测量范围、线性度、滞后、重复性、灵敏度、分辨力、阈值、稳定性、漂移及精度等。

1) 量程与测量范围

传感器在规定的测量特性和精确度范围内所测量的被测变量的范围。用测量下限和测量上限表示的测量区间称为测量范围。测量范围有单向的(只有正向或负向)、双向对称的、双向不对称的和无零值的。测量上限和测量下限的代数差称为量程。通过量程可以知道传感器的满量程输入值及所对应的满量程输出值, 这是决定传感器性能的重要参数之一。

在实际应用中, 传感器的量程选择是一个简单却需要特别注意的问题。一般的传感器产品所给出的精度都是针对满量程的相对值, 如 0.1%FS(full span, 满量程), 因此实际使用时越接近满量程, 其测量准确度越高。

2) 线性度

线性度又称非线性, 是表征传感器输出—输入校准曲线与理论拟合直线之间吻合或偏离程度的指标, 称为该传感器的“非线性误差”或“线性度”, 也称“非线性度”。通常用相对误差表示其大小, 即

$$e_L = \pm \frac{\Delta y_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (2-5)$$

式中, e_L 为非线性误差(线性度); Δy_{\max} 为校准曲线与理想拟合直线间的最大偏差; y_{FS} 为传感器满量程输出值, 如图 2-3 所示。

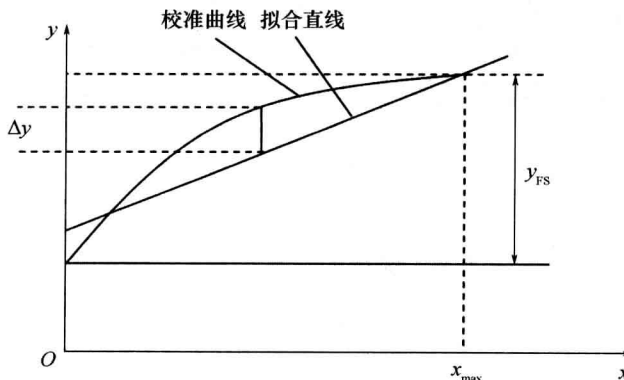


图 2-3 非线性误差