



· 普通高等教育“十三五”规划教材

UTO MOBILE

汽车机电液一体化技术

QICHE JIDIANYE YITIHUA JISHU

张铁山 编



教学资源库
<http://www.ndip.cn>



国防工业出版社

National Defense Industry Press

普通高等教育“十三五”规划教材

汽车机电液一体化技术

张铁山 编

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书介绍了汽车机电液技术。在介绍机电液基本模型、汽车常用传感器与执行器、控制理论基础理论知识的基础上,介绍了动力与传动、防滑控制、悬架及转向控制、故障诊断的理论及技术知识,最后一章给出了几个实例。本书编写的目的是为汽车机电液系统设计建立一定的基础。

本书可作为汽车工程专业硕士研究生教材使用,也可作为汽车工程专业高年级本科生参考书,并且也可以作为从事该领域工作的工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

汽车机电液一体化技术/张铁山编. —北京:国防工业出版社, 2016. 10

ISBN 978-7-118-11016-6

I. ①汽… II. ①张… III. ①汽车—机电一体化—液压控制—系统设计 IV. ①U463

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 238631 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)

三河市德鑫印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 22½ 字数 561 千字

2016 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 44.80 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

前 言

汽车机电液一体化是汽车工程的发展方向,也是汽车设计、研发中的重要领域。本书力求将汽车机电液技术的相关内容整合到一起,便于师生使用与参考读者阅读。本书主要介绍和讨论控制理论基础、基本的机电液系统建模、汽车应用的主要执行机构、汽车动力与传动、汽车防滑控制、汽车悬架、汽车转向控制的相关理论或技术,简要介绍汽车故障诊断的理论。并给出了几个例子。通过学习,使得学生对汽车机电液的原理和相关技术总体上有一定程度的认识,并且掌握其中的基本内容。

本教材具有以下三个特点:

(1) 以现有相关教材的资料为基础,并收集了一些国内外的相关研究文献,所涉及的汽车机电液系统内容比较全面。

(2) 本教材编写过程中,力求对基础的和重点内容进行介绍与讨论,在建模的基础上,针对汽车的主要系统的主要问题进行讨论。

(3) 本教材的例子更多地体现解决问题的思路,以帮助学习者掌握重点,为汽车设计、研发建立一定的基础。

教材中的内容可以根据实际需要进行选择教学,其他内容可以作为学习者参考资料。例如,第3章中的部分内容、第8章内容、第9章中的部分内容可留作学习者自己阅读学习。

本书可作为车辆工程或相近学科专业硕士研究生教材,也可作为车辆工程专业高年级本科生以及汽车行业工程技术人员的参考书。

由于作者的水平有限,书中疏漏与不当之处在所难免,欢迎广大读者指正。

编者

目 录

第1章 概述	1
1.1 机电液一体化技术内涵	1
1.2 机电液一体化系统的组成	2
1.3 机电液一体化系统优化设计关键技术	3
1.4 机电液控制系统的组成	5
1.5 控制理论概述	13
1.6 本书的目的	35
思考题	35
第2章 机电液系统模型	37
2.1 数学模型的基本概念	37
2.2 机械传动系统数学模型	38
2.3 电路系统数学模型	43
2.4 液压系统数学模型	54
2.5 电液伺服系统数学模型	68
2.6 机电液系统仿真软件简介	70
思考题	72
第3章 车辆工程中常用检测元件与执行机构	73
3.1 车辆工程中常用的传感器	73
3.2 车辆工程中常用执行机构	88
思考题	103
第4章 汽车动力与传动	104
4.1 燃油供给控制概述	104
4.2 电子控制点火系统	109
4.3 汽油机电子控制	119
4.4 柴油机电控系统简介	127
4.5 传动系统匹配问题	130
4.6 金属带式无极自动变速器的结构和原理	134
4.7 CVT 控制问题	137
4.8 CVT 的控制	144

思考题	150
第5章 汽车防滑控制	151
5.1 绪论	151
5.2 制动工况的模型	152
5.3 ABS 逻辑控制算法	158
5.4 防抱死制动逻辑的相平面分析	163
5.5 用庞加莱映射分析 $P-R$ 控制规律	176
5.6 基于滑移率的控制系统	183
5.7 ABS 的整车控制技术	186
5.8 驱动控制的基本原理及应用	195
5.9 驱动控制装置的控制方法	197
5.10 ASR 与 ABS 控制算法比较	217
思考题	218
第6章 汽车悬架	219
6.1 概述	219
6.2 悬架的力学模型	224
6.3 路面输入模型	229
6.4 悬架性能分析	232
6.5 悬架的固有特性	250
6.6 半主动悬架控制	256
6.7 主动悬架控制策略	265
6.8 主动控制悬架的整车控制方法	273
思考题	278
第7章 汽车转向系统	279
7.1 助力转向设计概论	279
7.2 四轮转向系统概述	281
7.3 4WS 汽车模型及转向特性分析	286
7.4 汽车 4WS 系统的最优控制工作程序	291
思考题	295
第8章 汽车故障诊断概述	296
8.1 前言	296
8.2 汽车诊断参数与诊断信息获取	300
8.3 特征信号分析	303
8.4 状态识别方法	310
思考题	319

第1章

概述

现代科学技术的发展,极大地推动了不同学科的相互交叉与渗透,导致了几乎所有工程领域的技术革命与改造,纵向分化、横向综合已成为当代科学技术发展的重要特点。在机械 engineering 领域,由于微电子技术的飞速发展及其向机械工业的渗透所形成的机电一体化,使机械工业的技术结构、产品结构、功能与构成、生产方式及管理体系均发生了巨大变化,使工业生产由“机械电气化”迈入了以“机电一体化”为特征的发展阶段。汽车机电液一体化,是机电工程中的一个特例。

“机电一体化”源于“Mechatronics”,是一个新兴的边缘学科,国内外都处于发展阶段,它代表着机械工业技术革命的前沿方向。

20 世纪 60 年代以来,一大批逐步形成的高技术群体,如微电子技术、信息技术、自动化技术、生物技术、新材料技术、新能源技术、空间技术、海洋开发技术、激光与红外技术、光纤通信技术等,已经且继续向家用电器、办公自动化系统、机械制造工艺设备、汽车、筑路机械、现代化武器装备的各个领域渗透,以空前的规模向现实生产迅速转化。

机械电子技术的基础是精密机械技术与微电子技术。由于微电子技术的发展,才使机械、电子和信息一体化成为可能。自美国英特尔公司 1971 年推出四位通用微处理器至今,已经过数代:1971—1972 年,4 位微型计算机、8 位微型计算机;1973—1977 年,8 位中档微型计算机;1978—1981 年,16 位高档微型计算机;1981 年后,32 位高档微型计算机;目前,进入了更新一代计算机的研究。微处理器与半导体存储器的高集成化、高性能、高可靠性和低价格使其应用范围大大扩大,体积小而价廉的微型计算机作为机械系统的一部分。今天,计算机技术与电子技术又获得了更大的发展,机电液一体化理论与技术更加完备和丰富,促进了机电产业的发展。

机电一体化产生和发展的根本原因是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。

机电一体化的发展趋势可以概括为三个方面:性能上朝高精度、高效率、高性能、智能化的方向发展;功能上朝小型化、轻型化、多功能方向发展;层次上朝系统化、复合集成化的方向发展。机电一体化技术的研究与应用强调技术的融合与学科交叉,机电一体化技术依赖于相关技术的发展,同时促进了相关技术的发展。



1.1 机电液一体化技术内涵

机电液一体化技术是在大规模集成电路和微型计算机为代表的微电子技术高度发展并向

传统机械工业迅速渗透、机械技术与电子技术深度融合的基础上,综合运用机械、液压、电子、自动控制、计算机及接口等技术,依据工具系统功能目标配置机械本体、执行结构、动力驱动单元、传感测试元件、控制计算机及接口元件等硬件要素,并使之在软件程序控制下形成物质和能量的有序规则运动,在高功能、高质量、高可靠性、低能耗的意义上实现特定功能价值的系统工程技术。由此而产生的功能系统,成为一个以电子技术为主导的、以现代高新技术支持的机电液一体化系统或产品。

机电液一体化技术有机结合了机械、液压和电子等技术,是在融合了机械、液压、计算机、电子、控制等学科技术基础上发展起来的一门技术。随着科学技术的迅猛发展,机电液一体化技术迅速应用于工程机械、精密机床、飞行器、大型设备、汽车工程等,促进了机械行业的变革,成为未来机械行业发展的主流方向。机电液一体化是电气控制液压—液压控制机械—机械在运动中通过电气将信息反馈回来再控制液压,设备的自动化、智能化程度很高。

1.2 机电液一体化系统的组成

机电液一体化系统涵盖了机械本体、动力与液压装置、检测装置、执行机构、控制器与信息处理以及接口等。机电液一体化系统控制对象是机械本体,驱动装置为液压装置,控制器主要是计算机及硬件系统,控制的物理量包括执行机构的位移、速度、加速度、力或力矩、功率以及液压系统的压力和流量等。

机械本体一般由机械结构部分和机械传动部分组成。其主要功能是使各子系统、零部件按照一定的位置装配在一起,并保持特定的时空关系。为更好地发挥机电液一体化系统的优点,机械本体必须具有较高的强度、较高的可靠性和较小的质量。机械结构部分是机电液一体化系统的主体,应具有较高的刚度、较低的惯性和较高的谐振频率。因此,对机械部分的结构、制造材料以及零件形状等方面都提出了特殊的要求。

液压装置是在系统控制信号的作用下,给机械部分提供动力,驱动执行机构,完成预定的动作和功能。机电液一体化系统要求具有高效率的驱动性和快速的响应特性,还要求适应外部环境与工作可靠。由于电子与液压技术的高度发展,高性能的电子液压伺服驱动技术和电子液压比例驱动技术已广泛应用于机电液一体化系统中。

检测部分主要是检测系统运行过程中所需要的各种参数及状态信号,并将检测的信号转换成可识别信号,然后传输给信号处理单元,经过处理后产生相应的控制信号。检测部分的功能通常由各种传感器以及仪器仪表完成。执行机构主要是根据系统控制信号和指令完成系统所要求执行的各种动作。执行机构是机电液一体化系统的运动部件,它将不同形式的能量进一步转换为机械能。执行部件主要包括液压缸和液压马达两部分。

控制器主要是集中、储存、分析和加工传感器检测的各种信号与外部输入命令,根据信号处理结果,使整个系统根据程序发出的指令进行运行。控制器主要由计算机、逻辑电路、A/D和D/A转换器、接口以及计算机外部设备等构成。接口是系统两部件之间的连接单元,其作用是使各子系统之间能正常进行信息的传递与交换,使各子系统或部件连接为一个有机整体,从而使各个部分能协调一致地运动。它的主要功能是信息传递、放大和变换。

因此,涉及的机电液一体化的相关技术有:

(1) 检测传感技术。传感器技术本身就是一门多学科、知识密集的应用技术。

(2) 信息处理技术。包括输入/输出设备、显示器、磁盘、计算机、可编程控制器、数控装置硬件设备和数据处理。

(3) 自动控制技术。在机电一体化技术中,高精度定位控制、速度控制、自适应控制、自诊断、校正、补偿、再现、检索等自动控制技术都是重要的关键技术。

现代控制理论的工程化、实用化,优化控制模型的建立,复杂控制系统的模拟仿真,自诊断监控技术及容错技术等都是有待进一步开发研究的课题。

(4) 比例与伺服驱动技术。执行机构主要包括电磁铁、液压泵、液压马达、液压缸、汽缸等。

(5) 接口技术。机电液一体化系统是机械、电子和信息等性能各异的技术融为一体的综合系统,其构成要素或子系统之间的接口极其重要。从系统外部看,输入/输出是系统与人、环境或其他系统间的接口;从系统内部看,是通过许多接口将各组成要素的输入/输出联系成一体。因此,各要素及各子系统之间的接口性能就成为系统综合性能好坏的决定性因素。

(6) 系统总体技术。系统总体技术是从整体目标出发,用系统的观点和方法,把机械与电子的功能在结构上有机地一体化的技术。即使各构成要素的功能、精度、性能都很好,但若整体系统不能很好地协调,系统照样难以正常运行而不能发挥应有的效能。为了开发出具有较强竞争能力的工程机械机电液一体化产品,系统总体设计除考虑优化设计外,还包括可靠性设计、标准化设计、系列化设计以及造型设计。



1.3 机电液一体化系统优化设计关键技术

由于机电液一体化系统的复杂性,系统的优化设计是解决系统设计的重要方法。机电液一体化系统集成机械系统、液压系统和控制系统,不同子系统之间存在的耦合和设计变量多等特点使优化问题的规模增加,从而导致计算量大。另外,整个系统可能有多个目标,系统要求采用精确的分析方法,也会增加整个系统的计算复杂性。机电液一体化系统优化设计与其他复杂系统多学科设计优化(Multidisciplinary Design Optimization, MDO)一样,涉及系统建模、近似模型、优化策略、优化算法以及集成优化平台或框架等关键技术。

1. 系统建模

多学科设计优化的前提是建立合适的数学模型。多学科设计优化技术主要是充分利用各学科成熟、较高精度的分析模型,尽可能地采用模块化技术建立产品系统的多学科设计优化数学模型,依据系统内部各学科相互影响的耦合因素来确定各模块之间的数据传递。机电液一体化系统优化设计中,其优化结果直接受优化模型的影响。对于复杂系统的优化来说,建立合适的优化模型更是系统优化设计的关键。机电液一体化系统由机械、控制和液压等子系统构成,各子系统又分别代表着整个系统的各个零部件或局部的物理现象。机电液一体化系统设计优化是对构成系统的多个子系统进行协同优化,以实现对整个系统的优化,从而达到整个系统性能最优。因此,建立合适的子系统模型是整个系统设计优化的前提。在机电液一体化系统中,各个子系统模型是以子系统分析模型形式来表现的。各子系统模型之间的数据交换又代表了子系统间的相互耦合情况。因此,建立机电液一体化系统优化模型,首先建立子系统分析模型以及处理好模型间的数据传输问题。

由于在子系统模型之间传输的数据作为输入量在计算之前需进行一次预处理转换和灵敏度方法的计算,这样增大了子系统模型之间数据的传输量,从而使得机电液一体化系统的数据传输在系统优化中需要一定的计算时间。因此,通过近似处理传输数据的方法,用近似模型系数的传输来替代原有数据的传输,大大减少了数据的传输量。在机电液一体化系统设计优化

数学模型的构建时,过分地追求优化数学模型的精度会大幅度地增加优化设计时间,而一味地缩短优化计算时间又有可能导致数学模型精度的降低。所以协调优化模型的计算精度与计算时间是十分关键的问题。

2. 近似技术

由于机电液一体化系统模型结构复杂、设计变量多,如果直接采用子系统分析模型参与系统优化,就会导致优化难度大、效率低等。所以,可以利用近似方法对目标函数和约束函数进行简化。使近似模型参与优化,经过多次反复迭代,可获取目标函数优化解,有效地避免反复进行学科分析,大大减少计算工作量,缩短计算时间,降低计算成本。在工程系统的传统优化近似技术中,主要采用基于导数的局部近似方法,常用的有线性近似方法和二次近似方法。然而,在多学科设计优化过程中,大多数采用全局近似,如近似可变复杂性模型。在优化过程中,采用可变复杂性模型方法不仅可以使使用较简单的全局近似模型,而且可以使使用较复杂的能够为近似模型提供修正标准的精确模型。另外一种比较适用于多学科设计优化的近似方法是响应面法,即用简单数学函数近似地代替原有的复杂数学函数。多学科设计优化在应用全局近似技术对系统精确数学模型进行简化时,需要利用试验设计方法对数据进行采样,目的是为了用尽可能少的计算量获得尽可能高的近似精度。多学科设计优化近似模型是一种用来代替系统中原有的分析模型,在满足系统精度要求的同时,优化计算量和计算时间较小的数学模型。它比较容易集成到优化计算框架中,使复杂系统的多学科设计优化更加切实可行。目前,模型构造方法和模型品质对比研究仍是多学科设计优化近似模型研究的热点。

3. 多学科设计优化方法

多学科设计优化方法一般是指多学科设计优化问题的数学表述以及这种数学表述在优化计算环境中实现的过程组织方式,也称为多学科设计优化策略。多学科设计优化方法主要研究将复杂系统的设计优化问题分解为以学科为基础的学科设计优化问题,以及在系统分解后各子系统间关系的协调以及各子系统分析结果的综合等问题。

多学科设计优化方法更加侧重于设计思想,对整个系统进行分解,建立学科优化问题以及协调学科间差异,形成解决复杂系统的多学科设计方法,从而降低多学科设计优化计算复杂性和组织复杂性,实现优化设计的目的。它是 MDO 的理论基础,决定了 MDO 框架的组织形式。目前,多学科设计优化方法主要有多学科可行方向法、同时分析优化法、单学科可行法、并行子空间优化法、协同优化法、两级集成系统综合法等。

4. 优化算法

设计空间搜索策略又称为优化算法,是进行多学科设计优化的基础。优化算法在单学科设计优化问题中的应用相对来说比较成熟,因此,在进行优化设计时可以针对具体优化问题选择合适的优化算法。而多学科设计优化中的优化算法侧重于不同优化方法或设计对象选取合适的优化算法。目前,优化算法主要有传统经典优化算法和现代智能优化算法,传统经典优化算法包含牛顿法、广义既约梯度法、序列二次规划法等,现代智能优化算法包含遗传算法、模拟退火算法、神经网络化算法等。现代智能优化算法具有较强的全局搜索能力,但搜索最优解时计算量有所增加;而传统经典优化算法中的序列二次规划法在初始点不必可行,在具备整体收敛性的同时保持局部超一次收敛性。因此,在多学科设计优化环境中,序列二次规划算法是一种应用非常广泛的优化算法。多学科设计优化的规划是采用系统分解与协同的策略,在系统层、各子系统层间以及系统层与各子系统层间需要配置优化算法程序,因而在优化过程中需要

使用多种优化算法程序。所以,只有综合应用多种算法对一个多学科设计问题进行优化,才能取得较好的效果。

5. 集成优化平台或框架构建

多学科设计优化计算平台或框架是指进行多学科设计优化的软、硬件计算环境,实现各子系统的计算和设计以及各子系统间的通信。优化平台决定了多学科设计优化方法实现的具体形式,其研究内容与计算机科学密切相关。自提出多学科设计优化方法后,多学科设计优化的软件构造框架及其内容一直是多学科设计优化问题的研究热点。为了方便地进行各种软件工具集成工作,减少工作时间与计算费用,进行多学科设计优化,构造的软件框架应能让研究人员将精力更多地投入系统设计本身而不是计算机程序开发问题。优化平台软件构造框架的内容主要有软件结构、设计问题的数学建模或物理模型、优化策略和信息处理等。目前,国外已经有多种具有优化功能的商用多学科计算框架软件,能够进行多种学科分析以及集成优化。商品化软件主要有美国 Engineous Software 公司开发的 ISIGHT、NOESIS 公司的 Optimus、Synaps 公司的 Pointer、美国航空航天局 Langley 研究中心的 FIDO、Phoenix Integration 公司的 Model-Center 等。

1.4 机电液控制系统的组成

1.4.1 测试系统组成及其基本特性

测试系统由传感器、信号变换与测量电路、显示与记录器、数据处理器,以及打印机等外围设备组成,如图 1.1 所示。此外,还有传感器标定设备、电源和校准设备等附属部分,不属于测试系统主体范围,数据处理器与打印机也按具体情况的需要而添置。

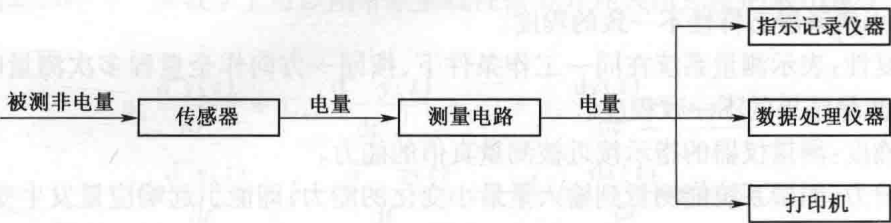


图 1.1 测试系统的组成

传感器是整个测试系统中采集信息的首要环节,传感器也称为测试系统的一次仪表,其余部分称为二次仪表或三次仪表。传感器一般由敏感元件(或称预变换器,也统称弹性敏感元件)、传感元件组两个基本环节组成,如图 1.2 所示。

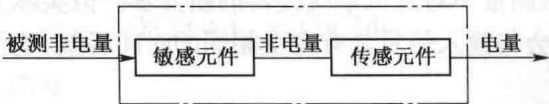


图 1.2 传感器的组成

测试系统还可分为模拟测试系统和数字测试系统。测试系统一般由三个基本环节组成,如图 1.3 所示。工程测试问题总是处理输入量 $x(t)$ 、系统的传输转换特性和输出量 $y(t)$ 三者

之间的关系。对测试系统的基本要求如下:

(1) $x(t)$ 、 $y(t)$ 是可以观察的量,则通过 $x(t)$ 、 $y(t)$ 可推断测试系统的传输特性或转换特性;

(2) $h(t)$ 已知, $y(t)$ 可测,则可通过 $h(t)$ 、 $y(t)$ 推断导致该输出的相应输入量 $x(t)$,这是工程测试中最常见的问题;

(3) 若 $x(t)$ 、 $h(t)$ 已知,则可推断或估计系统的输出量。

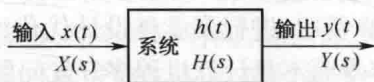


图 1.3 测试系统功能框图

1. 测试系统的静态特性

测试系统的静态特性可以用一个多项式方程表示为:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots \quad (1.1)$$

(1) 灵敏度:仪器在静态条件下响应量的变化 Δy 和与之相对应的输入量变化 Δx 的比值用 S 表示。

(2) 量程及测量范围:测试系统能测量的最小输入量(下限)至最大输入量(上限)之间的范围称为量程;测量上限值与下限值的代数差称为测量范围。

有效量程或工作量程是指被测量的某个数值范围,在此范围内测量仪器所测得的数值误差均不会超过规定值。

(3) 非线性:通常也称线性度,是指测量系统的实际输入与输出特性曲线和理想线性输入与输出特性的接近或偏离程度。

(4) 迟滞性:又称滞后量、滞后或回程误差,表征测量系统在全量程范围内,输入量由小到大或由大到小两者静态特性不一致的程度。

(5) 重复性:表示测量系统在同一工作条件下,按同一方向作全量程多次测量时,对同一个激励量其测量结果的不一致程度。

(6) 准确度:测量仪器的指示接近被测量真值的能力。

(7) 分辨力:测量系统能测量到输入量最小变化的能力,即能引起响应量发生变化的最小激励变化量,用 Δx 表示。

(8) 漂移:当测量系统的激励不变时,响应量随时间的变化趋势。

2. 测试系统的动态特性

测试系统的动态特性是指对激励(输入)的响应(输出)特性。动态特性好的测试系统,其输出随时间变化的规律(变化曲线)能同时再现输入随时间变化的规律(变化曲线),即具有相同的时间函数。这是动态测量中对测试系统提出的新要求。但实际上除具有理想的比例特性的环节外,输出信号将不会与输入信号具有完全相同的时间函数,这种输出与输入间的差异就是动态误差。

任何测量系统或装置都有影响动态特性的“固有因素”,只不过其表现形式和作用程度不同而已。研究测量系统的动态特性主要是从测量误差角度分析产生动态误差的原因及改善措施。

测量系统的动态特性可采用瞬态响应法和频率响应法从时域和频域两个方面来分析。

在测量系统进行动态特性的分析和动态标定时,为了便于比较和评价,常采用正弦信号或阶跃信号作为标准激励源。

在采用阶跃输入研究测量系统时域动态特性时,为表征其动态特性,常用上升时间 t_{rs} 、响应时间 t_{st} 、过调量 M 等参数来综合描述,如图 1.4 所示。上升时间是指输出指示值从最终稳定值的 5% 或 10% 变到最终稳定值的 95% 或 90% 所需的时间。响应时间是指从输入量开始起作用到输出值进入稳定值所规定的范围内所需要的时间。最终稳定值的允许范围常取所允许的测量误差值 $\pm e$ 。在给出响应时间时应同时注明误差值的范围,如 $t_{st} = 2s(\pm 1\%)$ 。过调量是指输出第一次达到稳定之后又超出稳定值而出现的最大偏差,常用相对于最终稳定值的百分比来表示。

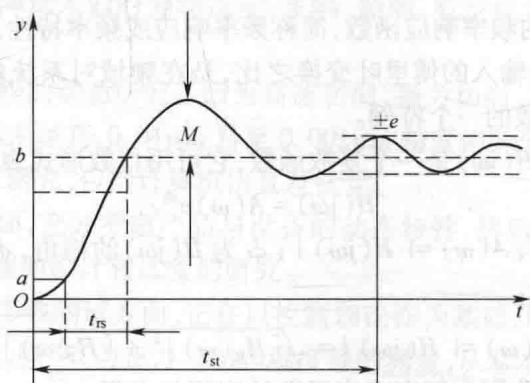


图 1.4 阶跃响应特性

1) 测试系统的数学模型

测试系统实质上是一个信息(能量)转换和传递的通道,一般用线性时不变系统理论描述测量系统的动态特性。从数学上可以用常系数线性微分方程表示系统的输出量 y 与输入量 x 的关系:

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) \\ = b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t) \end{aligned} \quad (1.2)$$

式中: $a_n, a_{n-1}, \cdots, a_1, a_0, b_m, b_{m-1}, \cdots, b_1, b_0$ 为与系统结构参数有关的常数。

线性时不变系统有两个十分重要的性质,即叠加性和频率不变性。

2) 传递函数

在工程应用中,为了便于分析计算,通常采用拉普拉斯变换来研究线性微分方程。如果 $y(t)$ 是时间变量 t 的函数,并且当 $t \leq 0$ 时, $y(t) = 0$, 则它的拉普拉斯变换定义为

$$Y(s) = \int_0^{+\infty} y(t) e^{-st} dt \quad (1.3)$$

式中: s 为复变量, $s = \beta + j\omega$, $\beta > 0$ 。

对式(1.2)两边取拉普拉斯变换,并认为 $x(t)$ 和 $y(t)$ 及它们的各阶时间导数的初值为 0, 则可得

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0} \quad (1.4)$$

式(1.4)等号右边是一个与输入无关的表达式,只与系统结构参数有关。因而,等号右边是测量系统特性的一种表达式,它联系了输入与输出的关系,是描述测试系统转换及传递信号特性的函数。定义其初始值为0时,输出拉普拉斯变换和输入的拉普拉斯变换之比称为传递函数:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (1.5)$$

3) 频率响应函数

对于稳定的常系数线性系统,可用傅里叶变换代替拉普拉斯变换,此时式(1.3)实际上是单边傅里叶变换。式(1.5)变为

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} \quad (1.6)$$

式中: $H(j\omega)$ 为测量系统的频率响应函数,简称频率响应或频率特性。

输出的傅里叶变换与输入的傅里叶变换之比,是在频域对系统传递信息特性的描述。很明显,频率响应是传递函数的一个特例。

通常,频率响应函数 $H(j\omega)$ 是一个复数函数,它可用指数形式表示:

$$H(j\omega) = A(\omega)e^{j\phi} \quad (1.7)$$

式中: $A(\omega)$ 为 $H(j\omega)$ 的模, $A(\omega) = |H(j\omega)|$; ϕ 为 $H(j\omega)$ 的相角, $\phi = \arctan H(j\omega)$ 。

测试系统的幅频特性:

$$A(\omega) = |H(j\omega)| = \sqrt{[H_R(\omega)]^2 + [H_I(\omega)]^2} \quad (1.8)$$

式中: $H_R(\omega)$ 、 $H_I(\omega)$ 分别为频率响应函数的实部与虚部。

测量系统的相频特性:

$$\phi(\omega) = -\arctan \frac{H_I(\omega)}{H_R(\omega)} \quad (1.9)$$

3. 测试系统不失真的条件

对于任何一个测试系统,总是希望它们具有良好的响应特性,即精度高、灵敏度高、输出波形无失真地复现输入波形等。但要满足上面的要求是有条件的。

设测试系统输出 $y(t)$ 和输入 $x(t)$ 满足

$$y(t) = A_0 x(t - \tau_0) \quad (1.10)$$

式中: A_0 、 τ_0 为常数。

式(1.10)说明该系统的输出波形精确地与输入波形相似。只不过对应瞬间放大了 A_0 和时间滞后了 τ_0 ,满足式(1.10)才可能使输出的波形无失真地复现输入波形。

对式(1.10)进行傅里叶变换,得

$$Y(j\omega) = A_0 e^{-j\tau_0\omega} X(j\omega) \quad (1.11)$$

可见,输出的波形要无失真地复现输入波形,测试系统的频率响应应满足

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = A_0 e^{-j\tau_0\omega} \quad (1.12)$$

即

$$\begin{cases} A(\omega) = A_0 = \text{常数} \\ \phi(\omega) = -\tau_0\omega \end{cases} \quad (1.13)$$

即从精确地测定各频率分量的幅值和相位来说,理想的测试系统的幅频特性应为常数,相

频特性应为线性关系,否则产生失真。 $A(\omega)$ 不等于常数所引起的失真称为幅值失真, $\Phi(\omega)$ 与 ω 不呈线性关系所引起的失真称为相位失真。

1.4.2 控制系统及其组成

1. 控制系统的组成

控制理论在机电领域获得了广泛应用,主要体现在以下五个方面:

(1) 机械制造过程正朝着自动化、最优化相结合的方向,以及机电一体化方向发展,如计算机集成制造系统(CIMS)等。

(2) 为了安全性且降低人们的劳动强度,车辆、船舶、航空航天器等产品的自动控制及其智能化。

(3) 制造和加工过程的动态研究。因为高速切削、强力切削、高速空程等正在日益广泛地应用,同时,加工精度越来越高, $0.01\mu\text{m}$ 乃至 $0.001\mu\text{m}$ 精度相继出现,这就要求把加工过程如实地作为动态系统加以研究,包括计算机仿真及优化。

(4) 在产品的设计方面,充分考虑产品与设备的动态特性,然后建立它们的数学模型,进行优化设计,包括计算机辅助设计和试验的研究。

(5) 在动态过程或参数测试方面,正在以控制理论作为基础,朝着动态测试方向发展。动态精度、动态位移、振动、噪声、动态力与动态温度等的测量,从基本概念、测试手段到测试数据的处理方法无不与控制理论息息相关。

总之,控制理论的应用,微处理机技术同机电一体化的结合,同机械制造技术的结合,将促使这一领域中的试验、研究、设计、制造、管理等方面发生巨大变化。

图 1.5 是恒温箱的自动控制系统。恒温箱的温度是由给定信号电压 u_1 控制的。当外界因素引起箱内温度变化时,作为测量元件的热电偶,把温度转换成对应的电压信号 u_2 ,并反馈回去与给定信号 u_1 相比较,所得结果即为温度的偏差信号 $\Delta u = u_1 - u_2$ 。经过电压、功率放大后,用以改变电动机的转速和方向,并通过传动装置拖动调压器动触头。当温度偏高时,动触头向着减小电流的方向运动,反之加大电流,直到温度达到给定值为止。即只有在偏差信号 $\Delta u = 0$ 时,电动机才停转。这样就完成了所要求的控制任务。所有这些装置组成了一个自动控制系统。

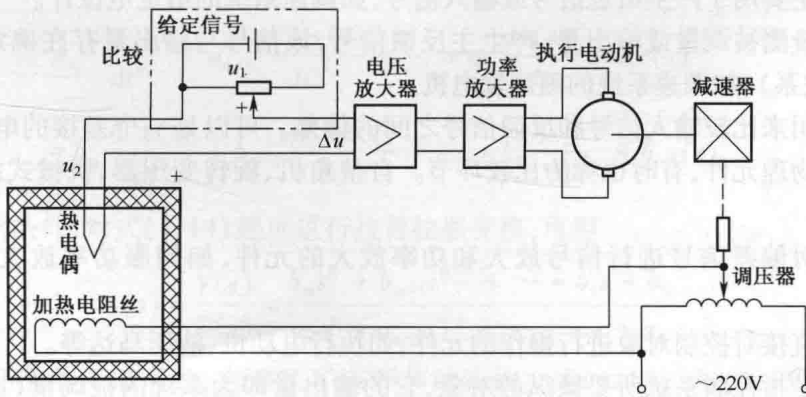


图 1.5 恒温箱的自动控制系统

系统要检测偏差,并用检测到的偏差去纠正偏差,在自动控制系统中,这一偏差是通过反馈建立起来的。图 1.6 为恒温箱温度自动控制系统职能框图。图中:“ $\oplus$ ”代表比较元件,箭头代表作用的方向。给定量也称为控制系统的输入量,被控制量称为系统的输出量。从图 1.5 中可以看到:反馈控制的基本原理;各职能环节的作用是单向的,每个环节的输出是受输入控制的。总之,实现自动控制的装置各不相同,但反馈控制的原理是相同的,反馈控制是实现自动控制最基本的方法。

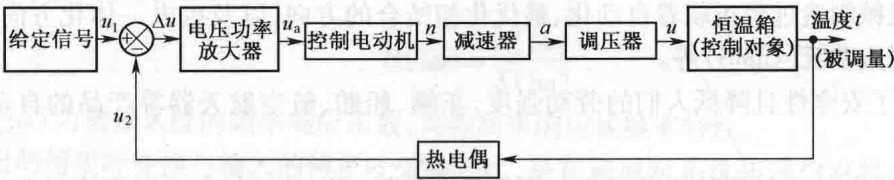


图 1.6 恒温箱温度自动控制系统职能框图

控制系统主要有开环控制与闭环控制。典型的反馈控制系统的基本组成如图 1.7 所示。图 1.7 表示了这些元件在系统中的位置及其相互间的关系。由图 1.7 可以看出,作为一个典型的反馈控制系统应该包括反馈元件、给定元件、比较元件(或比较环节)、放大元件、执行元件及校正元件等。

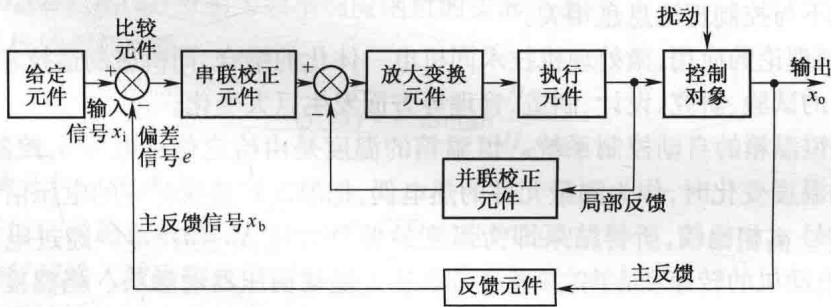


图 1.7 典型的反馈控制系统框图

给定元件主要用于产生给定信号或输入信号,如调速系统的给定电位计。

反馈元件量测被调量或输出量,产生主反馈信号,该信号与输出量存在确定的函数关系(通常为比例关系),如调速系统的测速发电机。

比较元件用来比较输入信号和反馈信号之间的偏差。可以是一个差接的电路,它往往不是一个专门的物理元件,有时也称为比较环节。自整角机、旋转变压器、机械式差动装置是物理的比较元件。

放大元件对偏差信号进行信号放大和功率放大的元件,如伺服功率放大器、电液伺服阀等。

执行元件直接对控制对象进行操作的元件,如执行电动机、液压马达等。

控制对象是指控制系统所要操纵的对象,它的输出量即为系统的被调量(或被控制量),如机床、工作台等。

校正元件用以稳定控制系统,提高性能。有反馈校正和串联校正两种形式。