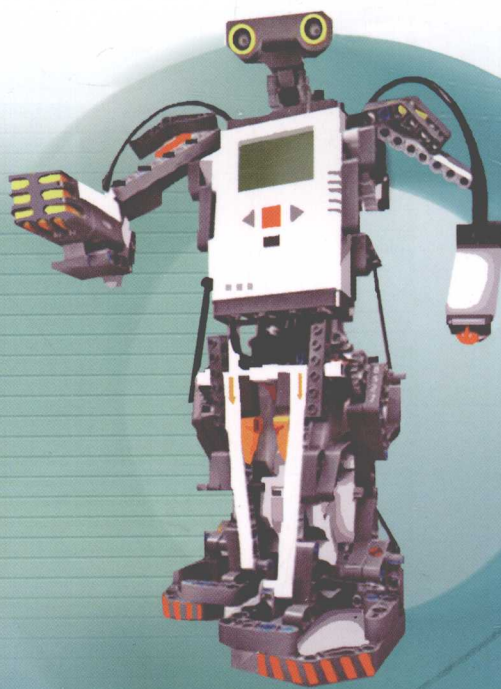


高等学校实验实训规划教材

机械电子工程 实验教程

宋伟刚 罗忠 主编



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

TH-39/124

2009

高等学校实验实训规划教材

机械电子工程实验教程

宋伟刚 罗 忠 主编

北 京

冶金工业出版社

2009

内 容 简 介

本书是在机械电子工程系列课程实验教学体系与内容改革研究和实践的基础上编写的,以培养学生的创新能力为目标,按实验课程自身的体系引导学生掌握机械基础实验的基本原理、基本技能和方法。

本书阐述了机械电子工程实验的意义和要求,构建了机械电子工程实验的体系,介绍了机械电子工程实验的基础知识。书中分别以单片机、DSP、PLC 等为核心设计了综合性、设计性、创新性实验。此外还设计了虚拟实验,包括经典控制理论虚拟实验、现代控制理论虚拟实验、S7-200 仿真软件认识及模块扩展地址分配虚拟实验、TD200 学习虚拟实验等。作为课内实验的拓展,本书还给出了运动控制器的调整实验、移动机器人的串口通信控制、“乐高”创意设计与制作等课外科技实践内容。

本书可作为高等工科学校机械基础课程的实验教材,也可供有关教师、工程技术人员和科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械电子工程实验教程 / 宋伟刚, 罗忠主编. —北京: 冶金工业出版社, 2009. 6

高等学校实验实训规划教材

ISBN 978-7-5024-4922-3

I. 机… II. ①宋… ②罗… III. 机电一体化—实验—高等学校—教材 IV. TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 082709 号

出版人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 陈慰萍 宋 良 美术编辑 张媛媛 版式设计 张 青

责任校对 王贺兰 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4922-3

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2009 年 6 月第 1 版, 2009 年 6 月第 1 次印刷

787 mm × 1092 mm 1/16; 14.5 印张; 382 千字; 221 页; 1-3500 册

29.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010) 64044283 传真: (010) 64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100711) 电话: (010) 65289081

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

机械电子工程实验课程着重培养学生的基本机电系统实验技能和创新设计能力,是高等工科教学中不可缺少的实践性教学环节。为了培养适应我国社会主义现代化建设需要的高级工程技术人才,机械基础实验课程必须不断深化改革,这是一项责任重大的历史任务。东北大学在国家工科基础课程机械基础教学基地建设中,立项对机械电子工程实验课程进行改革实践,并在总结改革实践经验和多年教学经验的基础上,编写了本书。

“机械电子工程实验教程”是教学改革的产物,也是为了满足现代社会对机械电子工程技术人才的需求所采取的一项教学内容。它以培养学生创新能力和综合设计能力为目标,以机械电子工程实验自身教学规律为主线,合理构建实验教学体系。在教学组织上,加大实践教学的改革力度,增加实验教学的学时,培养学生的动手能力,由此构建独立的机械电子工程实验教学体系,单独设立机械电子工程实验课程,单独计算学生实验课成绩。在实验教学管理方面,实现实验教学的开放管理、电子信息化管理。学生按照教学基本要求,结合自身特点自主选择实验项目,实现实验教学内容和选题的灵活性与开放性,体现个性化培养,为学生提供更多的实践学习机会。

本书在明确机械电子工程实验的意义基础上,结合东北大学实验教学的具体条件构建了机械电子工程的实验课程体系,并与“机械工程控制基础”、“机电一体化技术基础”、“机器人技术基础”等机械电子工程专业的主干课程衔接。在实验项目的开发和配置方面,改革原有的验证性实验项目,开发先进的设计性、综合性、研究性实验项目,实现实验内容由单一型、局部型向综合型、整体型的转变;在实验方法方面,实现由演示型、验证型向参与型、开发型和研究型转变;实验测试手段向计算机辅助测试的方向拓展,设置多个虚拟实验和课外科技实践项目。

本书由宋伟刚、罗忠主编,参加编写工作的人员有李东升、李允公、刘宇、戴丽、于清文、颜世玉、喻春阳、赵海滨、刘冲、宫照民、鄂晓宇等。东北大学的刘杰教授、柳洪义教授审阅了书稿。

本书是在东北大学国家工科机械基础课程教学基地实验教学体系与内容改革研究和实践的基础上编写的,其中的实验项目、实验内容和实验方法是以东北大学机械电子工程研究所现有的软硬件条件为基础的,兄弟院校在使用时可根据自身的具体情况作适当调整。

限于编者水平,书中疏漏与不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者
2009年2月

目 录

1 绪论	1
1.1 实验的内涵及意义	1
1.2 机械电子工程实验课程的体系和内容	1
1.2.1 基本实验	1
1.2.2 综合性、设计性、创新性实验	2
1.2.3 虚拟实验	3
1.2.4 课外科技实践	3
1.3 机械电子工程实验课程的要求	4
2 机电系统中的常用驱动器及传动机构	5
2.1 直流伺服电动机	5
2.1.1 直流伺服电动机的工作原理	5
2.1.2 直流伺服电动机的调速方式	6
2.1.3 直流伺服电动机的 PWM 调速控制系统	7
2.2 交流伺服电动机	9
2.2.1 永磁同步交流伺服电动机	9
2.2.2 交流伺服电动机的变频调速	11
2.2.3 SPWM 波调制	11
2.2.4 微机控制的 SPWM 控制模式	12
2.2.5 交流伺服电动机的矢量控制	13
2.3 步进电动机	14
2.3.1 步进电动机的工作原理	14
2.3.2 步进电动机的主要特性	14
2.3.3 步进电动机的结构类型	15
2.3.4 步进电动机的控制	16
2.3.5 基于单片机的步进电动机控制	17
2.4 运动控制系统中的传动机构	18
2.4.1 精密齿轮传动	19
2.4.2 滚珠丝杆螺母副	22
2.4.3 挠性传动	25

3 机电系统中控制器原理与基本实验	28
3.1 机电系统中常用控制器分类	28
3.2 传感器技术	29
3.2.1 传感器概念及其分类	29
3.2.2 传感器的性能指标	30
3.2.3 机电控制系统中常用的传感器	31
3.2.4 传感器的选用原则	40
3.3 基于 PROTEUS 的单片机系统仿真	41
3.3.1 概述	41
3.3.2 电路原理图设计	47
3.3.3 电路仿真实验	52
3.4 可编程序控制器	57
3.4.1 CPU224XP 及编程软件认识实验	57
3.4.2 S7-200 基本指令实验	59
3.4.3 子程序、中断程序练习指令	60
3.5 工业控制机	64
3.5.1 工控机数据采集实验	64
3.5.2 基于工控机的 CAN 总线控制认识实验	68
3.6 闭环控制系统的基本组成与控制原理	71
3.6.1 控制元件	71
3.6.2 作用量和被控量	72
3.6.3 对闭环控制系统的要求	72
4 综合性、设计性、创新性实验	73
4.1 单片机实验	73
4.1.1 8251 串口实验	73
4.1.2 A/D 和 D/A 转换实验	78
4.1.3 单片机步进电动机控制实验	82
4.1.4 直流电动机控制与测速实验	84
4.2 直流电动机 DSP 控制实验	86
4.3 PLC 实验	91
4.3.1 PLC 控制迷你相扑机器人实验	91
4.3.2 数控机床的 PLC 控制实验	94
4.4 ARM 实验	98
4.4.1 概述	98
4.4.2 ARM9-2440EP 实验箱	99
4.4.3 C 语言编程实验	101
4.4.4 I/O 接口实验	103

4.4.5	ARM 串口通信实验	104
4.5	机器人系统控制实验	106
4.5.1	机器视觉实验	106
4.5.2	二维插补原理及实现实验	112
4.5.3	数控代码编程实验	122
4.6	直流伺服位置控制实验	131
4.7	基于 IPC 机的电磁振动定量给料系统设计实验	135
4.8	基于单片机的电磁振动定量给料系统设计实验	138
4.9	惯性振动机停机减振系统设计实验	140
4.10	基于单片机的电磁振动给料机定振幅控制设计实验	143
5	虚拟实验	146
5.1	MATLAB 基础	146
5.1.1	MATLAB 的操作界面	146
5.1.2	MATLAB 的帮助界面	147
5.1.3	MATLAB 定义的常用特殊变量	147
5.1.4	MATLAB 操作的注意事项	147
5.2	机械工程控制系统的数学模型	148
5.3	机械工程控制系统的时域分析	150
5.4	机械工程控制系统的根轨迹分析	153
5.5	机械工程控制系统的频域分析	158
5.6	机械工程控制系统的设计与校正	162
5.7	离散控制系统	175
5.8	现代控制理论基础	177
5.9	S7-200 仿真软件认识及模块扩展地址分配虚拟实验	190
5.10	TD200 学习虚拟实验	194
5.11	“乐高”机电一体化系统设计实验	199
6	课外科技实践	201
6.1	运动控制器的调整	201
6.2	移动机器人的串口通信控制	206
6.3	“乐高”创意设计制作	215
附表	机械电子工程实验报告(样式)	218
参考文献	220

1 绪 论

1.1 实验的内涵及意义

实验一般多指科学实验,是按照一定的目的,运用相关的仪器设备,在人为控制条件下,模拟自然现象进行研究,认识自然界事物的本质和规律。实验是纯化、简化、强化和再现科学研究对象,延缓或加速自然过程,为理论概括提供充分可靠的客观依据,可以超越现实生产所涉及的范围,缩短认识周期。纵观机械的发展史,人类从使用原始工具到原始机械、古代机械、近代机械乃至今天的智能机器人、宇航飞行器等现代机械,都历经了科学实验的探索和验证。随着科学技术的发展,科学实验具有越来越重要的作用,其广度和深度不断拓展,成为自然科学理论的直接基础。许多伟大的发现、发明和突破性理论都来自科学实验。

科学实验是理论的源泉、科学的基础、发明的沃土、创新人才的温床,是将新思想、新设想、新信息转化为新技术、新产品的孵化室,甚至是高科技转化为市场的中间试验基地。高等院校的绝大多数科研成果和高科技产品首先是在实验室里诞生的。科学实验是探索未知、推动科学发展的强大武器,对经济持续发展、增强综合国力具有重要意义。

1.2 机械电子工程实验课程的体系和内容

实验教学是理工科专业教学的重要组成部分,它不仅是学生获得知识的重要途径,而且对培养学生的实际工作能力、科学研究能力和创新能力具有十分重要的作用,对实现知识、能力、素质并重的培养目标起着关键作用。

新的机械电子工程实验课程体系,改变了实验仅作为理论课程的附属地位,改变了理论课程成绩不能反映学生的实践能力和水平、学生不重视实验的状况。它以培养学生创新能力和综合设计能力为目标,以机械电子工程相关课程的实验系统为主线,按实验自身体系独立设置课程,成绩单独考核和记分。新的机械电子工程实验课程的实验内容由单一型、局部型向综合型、整体型、创新型转变;实验方法由演示型、验证型向参与型、开发型转变,实验手段向计算机辅助测试转变。重视实验教学与科研、生产相结合。它将实验分为基本实验(必做),综合性、设计性与创新性实验(选做),虚拟实验(选做),课外科技创新实践项目(自由申请,立项进行)几个部分,必做实验与选做实验结合并行,实现了实验内容和选题的柔性及开放性,尊重学生个性,为学有余力的学生提供更好的锻炼机会和发展空间。

本书的内容包括以下几个方面:

1.2.1 基本实验

(1) 单片机 8251 串口实验。了解单片机 8251 的基本结构,掌握可编程串口芯片 8251 的接口原理及使用方法,熟悉芯片 8251 的性能及初始化编程和设计方法。

(2) 直流电动机控制与测速实验。熟悉直流电动机的基本结构,了解电动机控制和测速的基本原理和方法,掌握码盘测速的原理和方法,掌握速度采样的原理和软件设计方法。

(3) PLC 控制实验。了解 PLC 的基本结构,熟悉 PLC 控制直流电动机的驱动原理,掌握 PLC 驱动直流电动机的方法。

(4) 工控机控制认知实验。

(5) 位置控制实验。认识位置控制系统的基本组成,熟悉位置控制系统的硬件系统搭接方法,通过实验验证 PID 控制器的调节作用。了解计算机控制实验台的构建及数据采集和处理方法。

(6) 教学机器人与平面机构运动控制实验。了解可重组机器人的构造,进行可重组机器人的运动学实验,使学生对机电一体化产品建立感性认识。了解机器人与机构运动控制的方法。

1.2.2 综合性、设计性、创新性实验

(1) 单片机 A/D 和 D/A 转换实验。了解 ADC0809 八位 A/D 转换芯片的基本原理和功能,掌握 ADC0809 和单片机的硬件接口和软件设计方法,了解 DAC0832 的基本原理和功能,掌握 DAC0832 和单片机的硬件接口及软件设计方法。

(2) 单片机步进电动机控制实验。掌握使用单片机控制步进电动机的硬件接口技术,掌握步进电动机驱动程序的设计和调试方法,熟悉步进电动机的工作特性。

(3) 直流电动机 DSP 控制实验。让学生学习用 C 语言编制中断程序,控制 LF2407DSP 的通用 I/O 管脚产生不同占空比的脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)信号,熟悉 LF2407DSP 的通用 I/O 管脚的控制方法,学习直流电动机的控制原理和控制方法。

(4) PLC 控制迷你相扑机器人及数控机床的 PLC 改造实验。通过这两个实验,让学生熟悉直流电动机的驱动原理,熟悉 PLC 驱动直流电动机的方法,并比较 PLC 控制系统和继电器控制系统的异同点,掌握 PLC 控制系统的开发技能。

(5) 基于 ARM 的 C 语言编程实验。通过使用 ARM 实验箱,熟悉 ADS 开发环境和 ARM 指令系统,利用 C 语言编写程序并用 AXD 对程序进行调试。熟悉 ARM 芯片,掌握 I/O 口配置方法,通过实验掌握 ARM 芯片 I/O 控制 LED 显示。

(6) 机器视觉实验。机器视觉是崭新且发展十分迅速的研究领域,并且是计算机科学的重要研究领域之一。本实验教学将学生的分析能力、计算机操作能力、软件设计能力与应用实践结合起来,引导学生由浅入深地掌握计算机视觉理论与开发工具,具备实际的计算机视觉开发基础。

(7) 二维插补原理及实现实验。掌握逐点比较法、数字积分法等常见直线插补、圆弧插补原理和实现方法;通过运动控制器的基本控制指令实现直线插补和圆弧插补,掌握基本数控插补算法的软件实现。

(8) 直流伺服位置控制实验。掌握位置伺服系统的基本原理及控制过程,了解位置伺服控制的基本要求和位置伺服系统实验台的基本电路,熟悉位置伺服系统实验台主要设备的结构组成及有关的测试仪器、仪表。

(9) 基于 IPC 机的电磁振动定量给料系统设计实验。掌握工业 PC 机、812PG 卡、称重传感器、变送器、可控硅控制箱、电磁振动给料机的使用方法,灵活地用这些仪器和设备组成所需的实验系统。掌握 GENIE 组态软件的编程方法,组态软件在机电一体化产品设计中的应用,组态软件的扩展,即在组态软件中加入自己的控制算法。掌握系统的调试方法,常规 PID 算法中 PID 参数的整定方法。

(10) 基于单片机的电磁振动定量给料系统设计实验。掌握 MCS-51 单片机应用系统、称重传感器、变送器、可控硅控制箱、电磁振动给料机的使用方法,灵活地用这些仪器和设备组成所

需的实验系统。掌握 MCS-51 汇编语言的编程方法和 MCS-51 开发机(仿真器)的使用方法,会用开发机对 MCS-51 应用系统的硬件和软件进行离线调试。熟悉对整个实验系统进行在线调试的方法,以及常规 PID 算法中 PID 参数的整定方法。

(11) 惯性振动机停机减振系统设计实验。掌握 MCS-51 单片机应用系统、加速度传感器、电荷放大器、磁力启动器、水平惯性振动输送机的使用方法,灵活地用这些仪器和设备组成所需的实验系统。熟悉 MCS-51 单片机应用系统硬件系统的设计与制作方法。掌握 MCS-51 汇编语言的编程方法和 MCS-51 开发机(仿真器)的使用方法,会用开发机对 MCS-51 应用系统的硬件和软件进行离线调试。

(12) 基于单片机的电磁振动给料机定振幅控制设计实验。掌握 MCS-51 单片机应用系统、加速度传感器、电荷放大器、可控硅控制箱、电磁振动给料机的使用方法,灵活地用这些仪器和设备组成所需的实验系统。掌握 MCS-51 汇编语言的编程方法和 MCS-51 开发机(仿真器)的使用方法,会用开发机对 MCS-51 应用系统的硬件和软件进行离线调试。

1.2.3 虚拟实验

(1) 经典控制理论虚拟实验。熟悉 MATLAB 软件的各种功能和基本用法,熟悉并学会建立控制系统的数学模型。观察学习机械工程控制系统的时域分析方法。利用计算机完成控制系统的根轨迹作图,了解控制系统根轨迹图的一般规律,完成开环系统的奈奎斯特(Nyquist)图和伯德(Bode)图的绘制,分析控制系统的开环频率特性图的规律和特点。利用计算机完成系统的相位超前校正、相位滞后校正和相位超前-滞后校正,观察和分析各种校正方法的特点和步骤,分析控制系统的开环频率特性。

(2) 现代控制理论虚拟实验。了解利用计算机完成状态空间模型的建立与转换,熟悉矩阵指数函数的计算与状态空间表达式的求解和系统的可控性和可观性判断,通过实验,深入理解李雅普诺夫稳定性分析控制系统的开环频率特性的方法。

(3) S7-200 仿真软件认识及模块扩展地址分配虚拟实验。学习使用 S7-200 仿真软件,掌握选择 CPU 型号、扩展模块组态、装载程序和将 CPU 置为运行状态等步骤。熟悉 S7-200 扩展后地址分配规则。

(4) TD200 学习虚拟实验。熟悉 S7-200 仿真软件,熟悉掌握利用文本显示向导配置 TD200、选择 TD 型号、设置信息格式、分配存储区等操作步骤,学习使用 TD200。

1.2.4 课外科技实践

(1) 运动控制器的调整。了解数字滤波器的基本控制作用,掌握调整数字滤波器的一般步骤和方法,调节运动控制器的滤波器参数,使电动机运动达到要求的性能。

(2) “乐高”创意设计与制作。制作一个机电设备需要学生运用不同领域的知识,包括机械、电子、软件、控制工程等。基于“乐高”Mindstorms NXT 低成本智能系统,学生进行创意设计,构建出不同复杂程度的机械和机电一体化的整体模型,使学生不仅能运用和巩固机械知识,而且还能帮助他们从整体上理解机电一体化的内涵,并激发他们的创新意识,培养他们的综合设计能力及实践能力。

(3) 移动机器人的串口通信控制。初步认识和了解移动机器人的机械结构设计、传感系统设计、控制系统设计、定位与导航系统设计、路径规划以及多传感器信息融合等技术和方法。在熟悉移动机器人基本组成的基础上,学习基本的串口通信机器人控制。

1.3 机械电子工程实验课程的要求

通过机械电子工程实验课程的学习和实践,要求学生:

(1) 充分认识各个科学实验的内涵和重要意义。

(2) 了解和熟识机械电子工程常用的实验装置和仪器,掌握实验原理、实验方法、测试技术、数据采集方法、误差分析及处理方法。

(3) 严格按科学规律进行实验,遵守实验操作规程,求实求是,不粗心大意、主观臆断,更不能弄虚作假。

(4) 认真观察实验现象,不忽视和放过“异常”现象,敢于“存疑、探求、创新”,对实验结果和实验中观察到的现象做出自己的解释和分析,树立实验能验证理论,也能发展和创造理论的观点。

(5) 重视实验报告的撰写。实验报告是展示和保存实验成果的依据,同时也是实验教学中对学生分析综合、抽象概括、判断推理能力及语言、文字、曲线图表、数理计算等表达能力的综合训练。实验报告的文字应该简洁易懂,对所作结论应明确指出其适用范围或局限性。如果实验在某一方面取得了新成果或有新发现,则应作为重点详细阐述。实验报告也可以写经验和教训,为后续的实验者提供借鉴,避免重复或走弯路。

2 机电系统中的常用驱动器及传动机构

驱动器位于机电液一体化系统的机械运行机构和微电子控制装置的接点部位,属能量转换元件。它能在微电子装置的控制下,将各种形式的能量转换为机械能,是工业机器人、数控机床、医疗器械等现代机械产品必不可少的组成部分。

根据使用能量的不同,驱动器可分为电气式、液压式和气压式等几种类型。其中,电气式驱动器主要包括步进电动机、直流和交流伺服电动机、静电电动机、超声电动机、磁致伸缩器件、压电元件等;液压式驱动器主要包括油缸、液压马达等;气压式驱动器主要包括气压缸和气压马达。各种驱动器的特点及优缺点如表 2-1 所示。

表 2-1 三种驱动器的特点及优缺点

种类	特点	优点	缺点
电气式	信号与动力传送方向相同,有直流和交流之分	操作简便,可实现定位伺服,响应快,易与 CPU 相连,体积小,动力大,无污染	瞬时输出功率大,过载性能差,易受外部噪声影响
液压式	液压源压力为 $(20 \sim 80) \times 10^5 \text{ Pa}$	输出功率大,速度快,动作平稳,可实现定位伺服,易与 CPU 相连	设备难以小型化,易泄漏且有污染
气压式	气压源压力为 $(5 \sim 7) \times 10^5 \text{ Pa}$	气源方便,成本低,无污染,速度快	功率小,体积大,动作不平稳,不易小型化,远距离输送困难,噪声大,难以伺服

2.1 直流伺服电动机

直流伺服电动机是一种微型他励式直流电动机。与普通直流电动机不同,直流伺服电动机更注重控制性能,如快速性、灵敏性、特性线性度等,并具有良好的调速性能,但功率相对较小。在机电系统中,直流伺服电动机接收控制系统的运行指令,并将其转化为相应的转速、角位移、角速度等。

2.1.1 直流伺服电动机的工作原理

直流伺服电动机由一个带绕组的转子(也称电枢)和能产生固定磁场的定子组成,其工作原理如图 2-1 所示。

当电枢绕组中有电流时,因磁通 Φ 的存在,电动机的电磁转矩

$$T = C_T \Phi I_a = K_T I_a \quad (2-1)$$

$$K_T = C_T \Phi$$

式中 C_T ——转矩常数;

K_T ——单位电流所产生的转矩, $\text{N} \cdot \text{m}/\text{A}$;

I_a ——电动机电枢回路的电流, A ;

T ——电动机的电磁转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

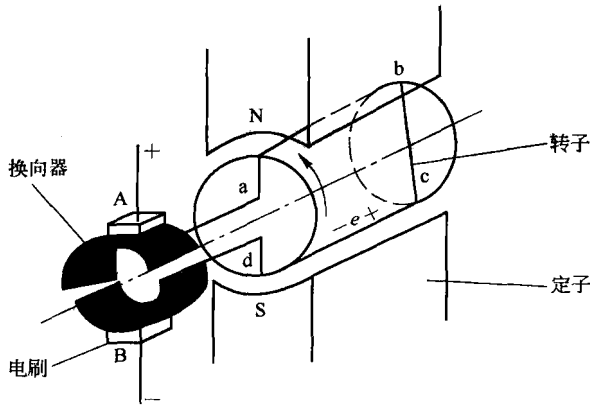


图 2-1 直流伺服电动机工作原理

当电动机旋转时,转子绕组切割磁力线,产生大小与转子转速成正比的反电动势

$$E_a = C_E \Phi n = K_E n \tag{2-2}$$

$$K_E = C_E \Phi$$

式中 C_E ——电势常数;

n ——电动机转速, r/min;

K_E ——单位转速下所产生的电势, $V/(r \cdot \text{min}^{-1})$;

E_a ——反电动势, V。

设电枢回路总电阻为 R_a , 电枢回路的外加电压为 U_a , 可得直流伺服电动机的电压平衡方程:

$$U_a = E_a + I_a R_a \tag{2-3}$$

将式(2-1)~式(2-3)联立, 可得

$$n = \frac{U_a}{C_E \Phi} - \frac{R_a}{C_E C_T \Phi^2} T_m = n_0 - K_T T_m \tag{2-4}$$

式(2-4)即为直流伺服电动机的转速公式, 其中 $n_0 = U_a / K_E$, 称为理想空载转速。

2.1.2 直流伺服电动机的调速方式

由式(2-4)可知, 通过调节 R_a 、 U_a 和 Φ 中的任一参数均可实现对转速的调节, 但调节 R_a 的方法显然是不经济的, 因此, 主要存在两种转速调节方式:

(1) 电枢控制式: 该方式是在保持电动机的磁极磁场恒定的情况下, 通过改变电枢电压的大小来调节电动机的转速, 通过改变电枢电压的极性来改变电动机的旋转方向。此时电枢电压 U_a 成为控制电压。由图 2-2(a) 可见, 随着控制电压 U_a 的增大, 电动机的机械特性曲线平行地向转速和转矩方向移动, 但斜率保持不变。

(2) 磁场控制式: 在保持电枢电压恒定的情况下, 改变励磁绕组的电流, 即改变磁场, 从而实现对电动机转速的调节。但这种方式的机械特性较软, 一般情况下调速范围小于 4:1。

由上述内容可知, 电枢控制较磁场控制的优点十分明显, 因此实际应用中多采用电枢控制方式进行转速调节。

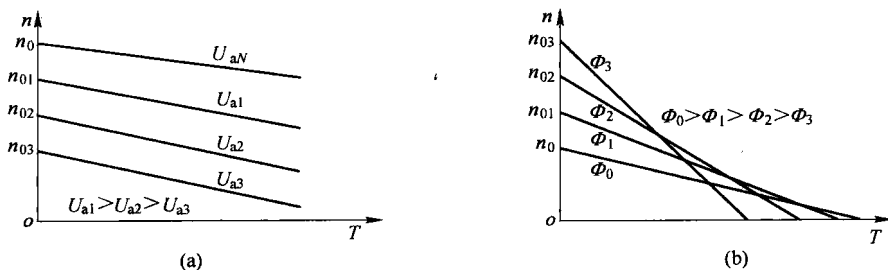


图 2-2 直流伺服电动机的机械特性曲线

(a) 电枢控制式; (b) 磁场控制式

2.1.3 直流伺服电动机的 PWM 调速控制系统

目前,直流伺服电动机的速度控制已成为独立完整的模块,主要有两大类型,即晶闸管调速系统和晶体管脉宽调制(PWM)调速系统。本节介绍 PWM 调速系统。

2.1.3.1 调速控制系统原理

PWM 调速控制系统的工作原理如图 2-3 所示。该系统的输入为电压信号,不同的电压对应不同的电动机转速;速度调节器和电流调节器多采用 PI 调节方式;脉宽调制器的作用是将电流调节器的输出转换为宽度随时间变化的电压脉冲,并使施加于电动机电枢的电压均值与电流调节器输出电压成正比。

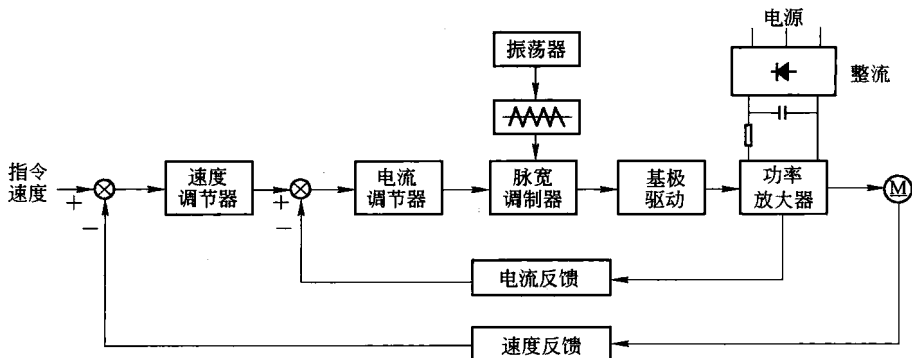


图 2-3 PWM 调速控制系统原理

PWM 调速控制系统具有以下特点:

(1) 频带宽。PWM 系统的开关工作频率一般为 2 kHz,有的高达 5 kHz,使电流的脉动频率远远超过机械系统的固有频率,从而避免机械系统产生共振。

(2) 电流脉动小。PWM 系统的电流脉动系数接近于 1,电动机内部发热小,输出转矩平稳,有利于电动机低速运行。

(3) 电源功率因数高。PWM 系统为直流电源,功率因数可达 90%。

(4) 动态硬度好。PWM 系统的频带宽,校正伺服系统负载瞬时扰动的能力强,提高了系统的动态硬度,且具有良好的线性,尤其是接近零点处的线性好。

2.1.3.2 脉宽调制器

脉宽调制器一般由调制信号发生器和比较放大器两部分组成。调制信号发生器有三角波和

锯齿波两种。图 2-4 为使用三角波发生器的脉宽调制器,其中图 2-4(a)为三角波发生器,图 2-4(b)和图 2-4(c)为比较放大电路。

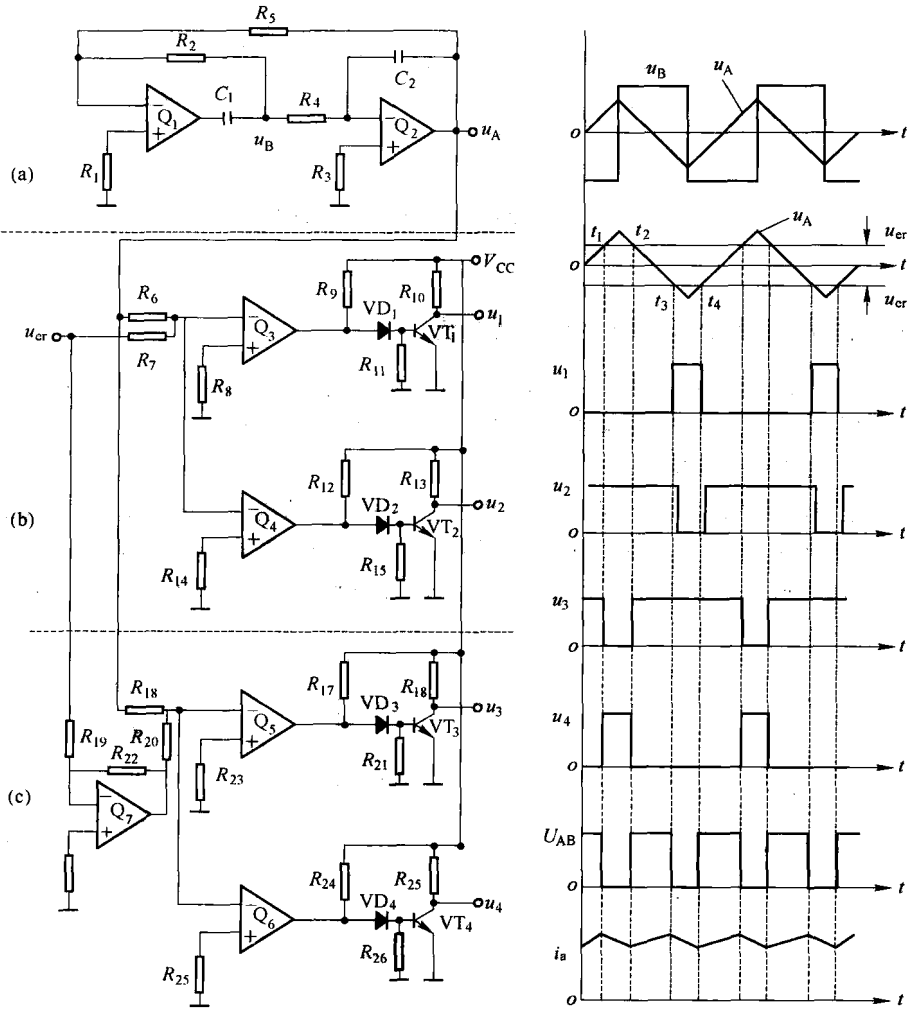


图 2-4 脉宽调制器
(a) 三角波发生器; (b), (c) 比较放大器

在三角波发生器中,运算放大器 Q_1 是频率固定的自激方波发生器,方波输出给积分器 Q_2 ,形成三角波电压信号 u_A 。图 2-4(b)和图 2-4(c)中的 4 个比较器的输入都是控制电压 u_{er} 和三角波信号 u_A 。 u_{er} 和 u_A 求和信号分别输给 Q_3 的负输出端和 Q_4 的正输入端。 u_{er} 通过 Q_7 求反后和 u_A 直接求和,信号分别输给 Q_5 的负输出端和 Q_6 的正输入端。这样 Q_3 和 Q_4 的输出电平相反, Q_5 和 Q_6 的输出电平相反。

当控制电压 $u_{er} = 0$ 时,各比较器输出的基极驱动信号均为方波,而 4 个晶体管 VT_1 、 VT_2 、 VT_3 和 VT_4 的基极输入信号 u_1 、 u_2 、 u_3 和 u_4 也是方波。当控制电压 $u_{er} < 0$ 时, u_1 的高电平宽度小于低电平,而 u_2 的高低电平正好与 u_1 相反; u_3 的高电平宽度小于低电平,而 u_4 的高低电平宽度正好与 u_3 相反。

2.1.3.3 开关功率放大器

开关功率放大器的作用是对脉宽调制器的输出信号进行放大,输出足够功率的电压信号以驱动电动机。它主要有 H 型和 T 型两种形式,每种电路又有单极性工作方式和双极性工作方式之分。现以 H 型双极性开关电路为例,介绍其工作原理。

如图 2-5 所示,H 型双极性开关功率放大器由 4 个二极管和 4 个功率管组成桥式回路,直流供电电源 $+E_d$ 由 3 组全波整流电源供电。它的工作过程为:脉宽调制器输出的脉冲波 u_1 、 u_2 、 u_3 和 u_4 经光电隔离器,被转换成与各脉冲相位和极性相同的脉冲信号 U_1 、 U_2 、 U_3 和 U_4 ,并分别被加到开关功率放大器的基极。

当电动机正常工作时,在 $0 < t < t_1$ 的时间区间内, U_2 和 U_3 为高电平,功率晶体管 T_2 、 T_3 饱和导通,此时电源 $+E_d$ 加到电枢的两端,向电动机供给能量,电流方向是从电源 $+E_d$ 经 T_3 至电动机电枢,再经 T_2 回到电源。在 $t_1 \leq t < t_2$ 时, U_1 和 U_3 均为低电平, T_1 和 T_3 截止,电源 $+E_d$ 被切断,此时 U_2 为正,因此由于电枢电感的作用,电流经 T_2 和续流二极管 D_4 继续流通。在 $t_2 \leq t < t_3$ 时, U_2 和 U_3 又同时为正,电源 $+E_d$ 又经 T_2 和 T_3 加至电动机电枢的两端,电流继续流通。在 $t_3 \leq t < T$ 时, U_2 和 U_4

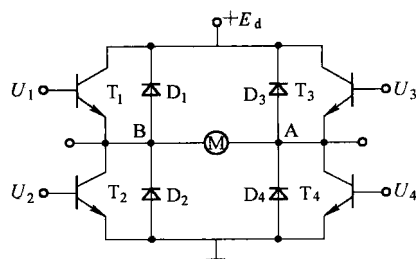


图 2-5 H 型双极性开关功率放大器

同时为负,电源 $+E_d$ 又被切断, U_3 为正,所以电枢电流经 T_3 和 D_1 续流。如此反复,主回路中得到的电压波形 U_{AB} 和电枢的电流波形 i_a 如图 2-4 所示。 U_{AB} 是在 $+E_d$ 和 0 之间变化的脉冲电压。由于电源切断时二极管的续流和电动机电枢电感的滤波作用,电枢电流 i_a 是连续波动的。

2.2 交流伺服电动机

直流伺服电动机具有优良的调速性能,20 世纪 80 年代初至 90 年代中期,在要求调速性能较高的场合中,直流伺服电动机一直占据主导地位。但它也存在一些固有的缺点,如电刷和换向器易磨损、维护麻烦、结构复杂、制造困难、成本高。而交流伺服电动机则没有上述缺点,特别是在同等体积下,交流伺服电动机的输出功率比直流电动机提高 10% ~ 70%,且可达到的转速比直流电动机高。因此,交流伺服电动机获得了越来越广泛的应用,具有取代直流伺服电动机的趋势。

交流伺服电动机在结构上为两相感应电动机,可分为永磁式交流伺服电动机和感应式交流伺服电动机。永磁式交流伺服电动机相当于交流同步电动机,感应式相当于交流感应异步电动机。两种伺服电动机的工作原理都是由定子绕组产生旋转磁场,使转子跟随定子旋转磁场一起旋转。不同点是交流永磁式伺服电动机的转速与外加交流电源的频率存在着严格的同步关系,即电动机的转速等于同步转速;而感应式伺服电动机的转速低于同步转速,转速差随外负载的增大而增大。同步转速的大小等于交流电源的频率除以电动机极对数。因而交流伺服电动机可以通过改变供电电源频率来调节其转速。现主要介绍永磁同步交流伺服电动机。

2.2.1 永磁同步交流伺服电动机

永磁同步交流伺服电动机由定子、转子和检测元件三部分组成,其结构原理如图 2-6 所示。定子结构与普通感应电动机的定子结构相同,同样具有齿槽,槽内嵌有三相绕组。转子由多块永久磁铁和冲片组成。转子磁铁磁性材料的性能直接影响伺服电动机的性能和外形尺寸。永磁同步交流伺服电动机的工作原理与电磁式同步电动机的工作原理相同,即定子三相绕组产生的空

间旋转磁场和转子磁场相互作用,使定子带动转子一起旋转。所不同的是转子磁极不是由转子的三相绕组产生,而是由永久磁铁产生。其工作过程是:当定子三相绕组通交流电后,产生一旋转磁场,这个旋转磁场以同步转速 n_s 旋转。根据磁极同性相斥、异性相吸的原理,定子旋转磁场与转子永久磁场磁极相互吸引,并带动转子一起旋转。因此转子也以同步转速 n_s 旋转。当转子轴加上外负载转矩时,转子磁极的轴线将与定子磁极的轴线相差一个 θ 角,若负载增大,差角 θ 也随之增大。只要外负载不超过一定限度,转子就会与定子旋转磁场一起旋转。设电动机转速为 n_r ,则

$$n_r = n_s = 60f/p \tag{2-5}$$

式中 f ——电源交流电频率;
 p ——定子和转子的极对数。

另外,感应式交流伺服电动机的转速亦与电源频率呈线性关系。

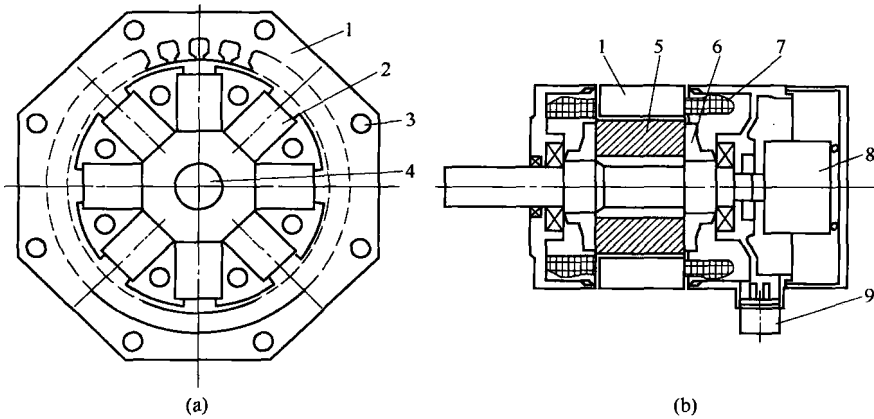


图 2-6 永磁同步交流伺服电动机结构

(a) 永磁式交流同步伺服电动机横剖面;(b) 永磁式交流同步伺服电动机纵剖面
 1—定子;2—永久磁铁;3—轴向通风孔;4—转轴;5—转子;6—压板;
 7—定子三相绕组;8—脉冲编码;9—出线盒

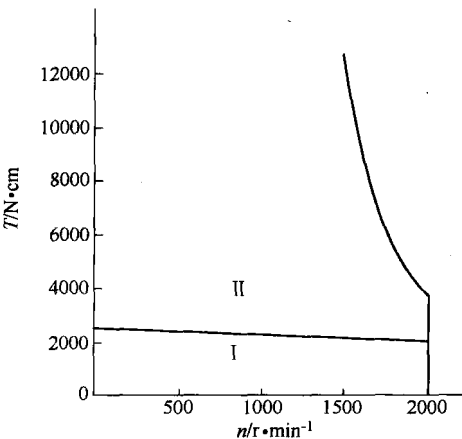


图 2-7 永磁同步电动机工作特性曲线
 I—连续工作区; II—断续工作区

永磁同步电动机的缺点是启动慢。这是因为转子本身的转动惯量大,定子与转子之间的转速差过大,使转子在启动时所受的电磁转矩的平均值为零。解决的办法是在设计时设法减小电动机的转动惯量,或在速度控制单元中采取先低速后高速的控制方法。

永磁同步电动机的转速-转矩曲线如图 2-7 所示。该曲线分为连续工作区和断续工作区两部分。在连续工作区内,速度与转矩的任何组合都可以连续工作。连续工作区的划分有两个条件:一是供给电动机的电流是理想的正弦波;二是电动机工作在某一特定的温度下。一般情况下,断续工作区的极限受到电动机的供电限制。