

64759

TM 921.54
5024

现代直流伺服控制技术 及其系统设计

秦继荣 编著
沈安俊

机械工业出版社

(京)新登字 054 号

本书从工程实践角度出发,较全面、系统地介绍了现代直流伺服控制技术、原理、系统设计及其应用。内容包括:高性能脉宽调制(PWM)直流伺服系统的特性分析和电路设计,计算机控制的现代直流伺服系统控制元件和线路,微处理机(特别是 DSP)专用集成电路的数字控制技术及其系统设计,工程典型应用伺服系统(多环路系统、复合控制系统)的设计与实践,PWM 伺服系统的电磁兼容性设计和伺服系统的可靠性设计。书中列举了大量典型应用电路和工程设计实例,附录中还给出了可供现代伺服系统工程设计查阅的有关资料。书中所介绍的大部分内容也适用于交流伺服控制技术及其系统设计。

本书可供从事电力电子技术、电气自动化、自动控制、计算机应用的科技人员阅读,亦可作为大专院校的师生参考书。



责任编辑:孙流芳 责任校对:韩 晶
封面设计:海 曙 版式设计:王 颖
责任印制:卢子祥

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码:100037

北京京建照排厂照排

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

北京交通印务实业公司印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092¹/₁₆·印张 35·插页 2·字数 858 千字

1993 年 11 月北京第 1 版·1993 年 11 月北京第 1 次印刷

印数 0 001-3 200·定价:28.00 元

ISBN 7-111-03614-X/TM·457

代 序 言

直流伺服控制技术广泛应用于军工、精密机床和机器人等工业部门。脉宽调制方式的直流调速系统可以使调速范围达到万倍以上,并具有优良的性能。随着电力电子技术、集成电路和计算机及微电子技术的日益发展,国际上已经进入一个全新一代技术产品的时代。近年来,我国在电气自动化领域的研究工作中已取得可喜的进展,不少产品已经达到国际 80 年代技术水平。可是,这些研究开发工作毕竟还处在起步阶段,与国外技术先进的国家相比,还有相当大差距。目前,各部门正在力争通过“八五”规划,来消除或缩小这些差距。在这样一个时刻,推荐一本深入论述的新参考书,相信会受到广大工程技术人员和研究工作者的欢迎,从而对我国的技术发展产生积极的作用。

这本书对现代直流伺服控制技术及其系统设计作了全面的论述和介绍,它以高性能的脉宽调制永磁直流伺服电机控制系统为主要对象,对其特性原理、电路设计、元件选择,以及系统的设计计算等,作了详细的、深入的研讨。

本书的特点是以当代的先进技术为基础,结合作者本人在设计研究工作中的经验总结,从工程实用角度出发,详细地介绍了各种新技术原理及其应用电路、实例。这在目前新技术发展迅速而有关书籍短缺的情况下,是一本值得推荐的参考书。

书中较突出介绍的新技术内容有:大功率晶体管脉宽调制技术、保护技术,SG1731 直流电机 PWM 集成电路、模块化轴角/数字转换器、单片数字信号处理器(DSP)的结构和应用技术,功率智能专用集成电路(Smart Power IC)的功能原理及其组成系统的设计和应用技术,以及微处理机控制系统的设计与工程实现等。这些都是在 80 年代中后期开发应用的新技术内容。本书将它们结合工程应用的典型电路和设计实例作具体介绍,对该读者有实际参考价值。

本书的作者从事科研工作多年,许多典型实例是作者在自己的设计研究工作中总结归纳出来的材料,有其独到见解,理论与实践结合紧密。书的另一特色是,书中全面系统地介绍了最新发展的几种集成电路元器件和智能型功率集成电路的功能原理和应用技术,这在目前其它参考书中还是不多见的。

作者还对 PWM 控制电路中存在的各元器件间的电磁干扰和运行可靠性问题,根据实践经验和资料总结,编写了电磁兼容性设计和可靠性设计两章内容,文章具体、实用,为从事工程实践的技术人员提供了有益的参考知识。

上述推荐内容希望能通过广大读者予以鉴定,并使之能真正符合要求,这就是我写这篇代序言的主要目的。

吕家元

1991 年 6 月

前 言

伺服控制技术是自动化学科中与产业部门联系最紧密、服务最广泛的一个分支。自从第二次世界大战期间雷达和火炮伺服系统出现以来,在近半个世纪中,伺服控制技术及其系统在工业、农业、国防等各个领域都得到了广泛的应用。伺服控制经历了发电机-电动机系统、交磁电机扩大机控制、磁放大器控制、晶闸管控制、晶体管控制、集成电路控制、计算机控制的发展过程,至今已经进入一个全新的鼎盛时期。反映这一时期的现代伺服控制技术及其系统的主要特征可以概括为:全控型电力电子器件组成的脉冲宽度调制(PWM)^①技术在伺服功率驱动中的广泛应用;微处理机特别是单片数字信号处理器(DSP)^②在伺服系统中的普遍应用,使得现代控制理论逐渐工程实用化;各种伺服控制元件与线路向着集成化、数字化、功能化、模块化、智能化,以便于计算机控制的方向发展;伺服系统的可靠性设计及其自诊断技术伴随着系统功能、性能以及复杂化程度的升级而受到人们的普遍重视。

虽然,目前有关伺服控制系统理论方面的书籍出版很多,但从工程实用角度出发反映现代伺服控制技术的书籍尚不多见。为了适应现代伺服控制技术的发展趋势,作者在总结整理近年来从事几个高精度伺服系统研制工作的基础上,吸收了国内外先进的技术,写成《现代直流伺服控制技术及其系统设计》一书,奉献给致力于我国伺服系统工程设计、研究的读者参考,想必它会对电气传动、精密机床控制技术、机电一体化技术以及军用控制技术的发展起到一定的推动作用。书中以 PWM 伺服系统为主线,以工程实用为宗旨,较全面地介绍了现代直流伺服控制技术及其系统设计,内容包括:直流 PWM 伺服系统的特性分析和电路设计;计算机控制的现代直流伺服系统控制元件与线路;微处理机(特别是 DSP)、专用集成电路的数字控制技术及其系统设计;工程典型应用伺服系统(多环路系统、复合控制系统)的设计与实践;PWM 伺服系统的电磁兼容性设计和伺服系统的靠性设计。

全书共分 13 章。第 1 章绪论,介绍了现代直流伺服控制技术的国、内外发展概况,直流 PWM 伺服系统的工作特点、原理以及伺服系统现代控制技术的发展趋势。目的在于使读者全面了解直流伺服系统及其控制技术的国内、外概况,有助于进一步把握研究方向。第 2、3 章分别介绍了不可逆、可逆 PWM 伺服系统的控制方式、特性分析计算以及计算机辅助分析,扼要讨论了双极模式、单极模式(倍频单极模式)、受限单极模式(倍频受限单极模式)控制方案的优缺点。通过这两章的学习,读者可以全面掌握直流 PWM 伺服系统的控制特性分析计算、数学模型建立、正确选择控制参量、根据具体应用场合选取合适的控制模式。第 4 章介绍了直流 PWM 功率转换电路的设计,着重讨论了构成 PWM 功率转换电路的主要元件——GTR 的特性选用、损坏机理、暂态保护以及缓冲器设计等工程实际问题,对达林顿复合型功率模块的应用亦作了介绍。第 5 章介绍 PWM 伺服系统的控制电路设计,其中包括:频率发生器、脉宽调制器(电压/脉宽变换电路)、脉冲分配电路、基极驱动电路、检测保护电路的设计和集成控制电路的

① PWM 是英文 Pulse Width Modulated 的缩写。

② DSP 是英文 Digital Signal Processor 的缩写。

应用,并列举了大量实例电路,可供读者在工程实践中选用。第6章讨论了PWM伺服系统中的一些特殊问题,诸如泵升电压抑制、浪涌吸收、波形系数与功率损耗、开关频率选取等问题。第7章介绍了PWM伺服系统电磁兼容性设计,论述了PWM伺服系统的干扰产生、传递以及抑制、消除干扰的方法,提供了电磁兼容性设计导则。读者通过第4~7章的学习,能够较快地组成实际PWM伺服系统,并能解决工程实现中的一些问题。第8章研究现代直流伺服控制元件与线路(直流伺服电动机、测速元件与电路、轴角/数字变换、数字/轴角变换、无惯性相敏解调器、运算放大器)的工作原理、特性及其工程应用中的有关问题,以使读者在组成系统时,正确选取伺服元件,确定所需的信号形式和系统接口,实现系统方案的合理配置。第9章介绍PWM伺服系统主要元器件和部件的选择以及稳态和动态设计计算,并以工程中应用最广泛的对数频率特性设计为基础,讨论了多环路(从属控制)系统和复合控制系统的工程近似设计,给出了一个现代军用车武器伺服稳定系统的设计实例。通过本章学习,读者可以掌握PWM闭环伺服系统设计的原则,考虑问题的着眼点和处理问题的思路以及工程设计计算方法,有助于系统设计时合理选择系统性能指标和系统控制结构。第10章介绍PWM伺服系统的微处理机控制,旨在使熟悉用于模拟系统的常规设计技术的工程师尽快转移到微处理机数字控制系统设计中。着重讨论连续校正网络的等效数字滤波器设计法和 w 平面上的频域设计法,微处理机数字伺服控制系统的工程实现以及微处理机与伺服元件、执行机构的界面接口。伺服系统的全数字化是今后发展的必然趋势,然而解决实时性则是数字控制的关键问题。目前,DSP(特别是TMS320系列)发展迅速,为伺服系统的全数字化奠定了物质基础,使得现代控制理论工程实用化。在第11章中,介绍了DSP的主流芯片——美国TI公司TMS32010的结构特征、指令集,TMS320系列DSP实现伺服补偿控制器软、硬件设计中的有关问题,以及TMS32010在速率积分陀螺伺服稳定系统中的应用实例。第12章介绍功率智能IC电路在伺服系统中的应用,以SGS公司专用伺服集成电路为例,讨论其功能原理以及由这些电路构成的直流电动机速度/位置伺服系统设计方法、参数选择、误差分析。第13章讨论伺服系统的可靠性基本概念、伺服系统可靠性特征量计算、伺服系统可靠性工程设计导则,以及可靠性试验方法,以期推动我国伺服系统可靠性研究工作的进展,使从事伺服系统研究的工程技术人员掌握可靠性设计技术,为四化建设设计出高精度、高可靠性的伺服系统。另外,书末附录还给出了伺服系统工程设计中常用的有关资料,以便于工程设计时查阅。

需要说明的是,因本书内容广泛,牵涉的变量很多,故作如下约定:每章节所用字母符号的意义一般地仅限于本章节。

本书是以工程实用为出发点,注重理论联系实际,书中提供的大多数材料均经过实践考验。本书适合于从事电力电子技术应用、自动控制、计算机应用等专业的科研、设计、生产与维护人员阅读,亦可作为电气自动控制技术的工程师进行继续工程教育的教材以及大专院校师生的参考书。

在本书编写过程中,自始至终得到了中国兵器工业北方自动控制技术研究所有关领导及关心此书编著的一些同志的支持和帮助。特别是我国坦克火控专家、中国火力与指挥控制研究会副理事长、北方自动控制技术研究所副所长刘洪勋高级工程师(教授级)对本书撰写给予了极大的关怀和指导。和作者一起工作的同志们在书稿整理过程中做了许多工作,中国兵器科学研究院刘明湘高级工程师、刘西学工程师曾给予了极大的支持,感谢所有那些帮助过作者撰写本书的人们。真诚地向中国自动化学会电气自动化专委会和中国电工技术学会电控系统与装

置专委会副主任、天津市电机工程学会理事、天津市自动化学会理事、天津大学工业自动化研究室主任吕家元教授致谢,他严格地、逐字逐句地审阅了全部书稿,并提出了宝贵意见,为本书撰写了代序言,有力地促进了最后定稿。

由于水平有限,缺点错误肯定不少,恳请读者不吝指教。

秦继荣 1992 年

目 录

代序言

前 言

第 1 章 绪论	1	3.2 工作特性的定量分析	50
1 直流伺服控制技术的发展	1	3.3 计算机辅助分析	52
2 现代直流 PWM 伺服驱动技术的发展	3	3.4 受限单极模式倍频可逆 PWM 控制	55
2.1 国内外发展概况	3	4 控制方案的对比	56
2.2 直流 PWM 伺服驱动装置的工作原理和特点	4	第 4 章 PWM 功率转换电路设计	58
2.3 功率控制元件的应用及控制电路集成化	8	1 PWM 功率转换用 GTR	58
2.4 PWM 系统发展中待研究的问题	11	1.1 开关特性	58
3 现代伺服控制技术展望	12	1.2 GTR 的功率损耗及 PWM 功率转换电路对其特性的要求	64
第 2 章 不可逆直流 PWM 系统	14	1.3 GTR 存储时间对 PWM 系统的影响	68
1 无制动状态的不可逆 PWM 系统	14	2 GTR 的损坏和保护	70
1.1 电流连续时 PWM 系统控制特性分析	15	2.1 GTR 的耐压与损坏	70
1.2 电流断续时 PWM 系统控制特性分析	21	2.2 GTR 的二次击穿和安全工作区	71
2 带制动回路的不可逆 PWM 系统	27	2.3 GTR 暂态保护	75
第 3 章 可逆直流 PWM 系统	30	3 达林顿复合型功率模块的应用	79
1 双极模式可逆 PWM 系统	30	3.1 复合型达林顿模块的电路结构	79
1.1 T 型双极模式 PWM 控制原理	30	3.2 达林顿模块作为开关使用	79
1.2 H 型双极模式 PWM 控制原理	32	3.3 达林顿模块并行驱动	81
1.3 双极模式 PWM 控制特性分析	34	3.4 达林顿模块的应用	82
2 单极模式可逆 PWM 系统	42	4 缓冲器设计和负载线整形	85
2.1 H 型单极模式同频可逆 PWM 控制	43	4.1 缓冲器的必要性	85
2.2 H 型单极模式倍频可逆 PWM 控制	45	4.2 负载线分析	85
3 受限单极模式可逆 PWM 系统	49	4.3 在 PWM 系统中的缓冲器设计举例	88
3.1 受限单极模式同频可逆 PWM 控制系统	49	第 5 章 PWM 系统控制电路	93
		1 脉宽调制器的一般特性及电路	93
		1.1 脉宽调制器的一般特性	93
		1.2 恒频波形发生器	93
		1.3 脉宽调制器	96
		2 保护型脉宽调制及脉冲分配电路	102
		2.1 双门限延迟比较的 V/W 电路	102

2.2 二极管电桥反馈式窗口 V/W 电路	104	抗源抑制	165
2.3 具有阻容延迟的 PWM 变换电路	105	2.2 元器件的合理布局与布线	165
2.4 脉冲分配逻辑延时电路	105	2.3 接地设计	167
3 保护电路	109	2.4 屏蔽与隔离	175
3.1 电流保护型式与特点	109	2.5 滤波	176
3.2 保护电流的实时取样和霍尔效应电流 检测装置设计	111	3 PWM 系统电磁兼容性设计导则	179
3.3 欠电压、过电压保护	116	3.1 电源	179
3.4 瞬时停电保护	116	3.2 电动机	180
3.5 保护电路举例	116	3.3 GTR 固态开关	180
4 基极驱动电路	118	3.4 开关控制器件	180
4.1 基极恒流驱动	118	3.5 模拟电路	180
4.2 基极电流自适应驱动电路	120	3.6 数字电路	181
4.3 自保护型基极驱动电路	121	3.7 微型计算机	182
4.4 典型基极驱动电路	127	第 8 章 现代直流伺服控制元件与 线路	183
5 控制电路集成化、模块化	130	1 直流伺服电动机	183
5.1 一种新型 SG1731 型 PWM 集成 电路	131	1.1 对直流伺服电动机的要求	183
5.2 晶体管驱动模块简介	134	1.2 直流伺服电动机的分类	183
5.3 应用举例	138	1.3 直流伺服电动机的数学模型	185
第 6 章 PWM 系统工程设计中的有关 问题	141	1.4 直流伺服电动机开环驱动的稳态和 动态特性	188
1 功率转换电路供电电源的设计 问题	141	1.5 直流伺服电动机具有速度反馈驱动的 动态特性	190
1.1 泵升电压对功率转换电路及供电电源 的影响	141	2 测速元件与电路	194
1.2 PWM 系统中的反馈能量	142	2.1 模拟测速元件——直流测速 发电机	194
1.3 反馈能量的存储及其耗散	145	2.2 数字测速元件——光电脉冲 测速机	195
2 PWM 系统电流波形系数与电动机的有效出 力	148	2.3 光电脉冲测速机在模拟速度闭环中 的应用	201
3 PWM 开关频率的选择	151	3 位置测量元件与其轴角编码	201
4 电枢回路附加电感的设计原则	154	3.1 正余弦旋转变压器及其轴角编码	202
5 浪涌电流和电压抑制	155	3.2 同步机及其轴角编码	212
5.1 合闸浪涌电流的抑制	155	3.3 感应同步器及其轴角编码	217
5.2 浪涌电压吸收	158	3.4 数字/分解器(D/R)转换	219
第 7 章 PWM 系统电磁兼容性设计	160	3.5 用单片微处理机实现轴角/数字 转换	224
1 电磁干扰模型分析和干扰传递	160	4 模块化轴角/数字转换器及转换器 系统的设计与应用	226
1.1 干扰源	161	4.1 模块化自整角机/旋转变压器-数字 转换器的工作原理	227
1.2 敏感单元	162	4.2 模块化轴角/数字转换器的选用和 系统设计中的有关问题	231
1.3 干扰传递方式	162		
2 抑制或消除干扰的方法	164		
2.1 PWM 功率转换电路中 GTR 开关干			

4.3 模块化转换器的典型应用举例	236	7.3 系统静、动态设计计算	326
5 无惯性快速相敏解调器	242	第 10 章 PWM 系统的微处理机	
6 直流伺服系统中的运算放大器	245	控制	341
第 9 章 PWM 直流伺服电动机控制		1 微处理机控制伺服系统的设计	
系统设计	252	和综合	342
1 PWM 系统设计概述	252	1.1 连续校正网络的等效数字滤波器	
1.1 系统设计步骤	252	设计法	342
1.2 对伺服系统的主要技术要求	253	1.2 w 平面上的频域设计法	350
1.3 选择方案的基本考虑	254	1.3 控制算法及流程的实现	360
2 执行电动机的选择和传动装置的		1.4 小结	368
确定	255	2 微处理机数字伺服控制系统的	
2.1 典型负载的分析与计算	255	工程实现	369
2.2 伺服电动机的选择	259	2.1 微处理机控制 PWM 伺服系统的方案	
2.3 传动比的选择和分配原则	262	确定	369
2.4 驱动装置选择方法归纳	265	2.2 A/D 转换器、CPU 和 D/A 转换器的主要性	
3 伺服检测装置的确定	268	能参数选择	371
3.1 速度控制系统测量装置的选择	268	2.3 数字伺服系统的数据预处理	373
3.2 位置控制系统测量装置的选择	272	2.4 比例因子的配置和溢出保护	380
4 校正网络和调节器补偿形式的		2.5 采样频率的选择	382
选取	274	3 微处理机与伺服元件、执行机构的	
4.1 串联校正	275	界面接口	385
4.2 并联校正	277	3.1 模拟量输入通道的设计	385
4.3 反馈校正	278	3.2 直接数字测速的接口与实现	387
4.4 复合控制	280	3.3 微处理机与 PWM 功率转换装置的	
4.5 校正方式对比	280	匹配	395
5 PWM 驱动装置的设计	282	第 11 章 单片数字信号处理器及其在现代	
5.1 伺服系统对 PWM 驱动装置		伺服控制系统中的应用	404
的要求	282	1 单片数字信号处理器简介	404
5.2 功率转换电路型式的选择	283	1.1 概述	404
5.3 功率转换电路主要器件的选取		1.2 TMS32010 的结构	405
原则	284	1.3 TMS32010 指令集	410
5.4 PWM 控制电路的选取原则	286	1.4 TMS32020 简介	424
5.5 PWM 开关频率的选取原则	288	2 用 TMS320 实现伺服系统补偿控制	425
5.6 辅助装置的选择	288	2.1 DSP 的选择与系统开发周期以及开发	
6 直流伺服系统工程设计(频域法)	289	支援工具	425
6.1 对数幅频特性的绘制及约束条件	289	2.2 数字补偿器实现中的几个问题	428
6.2 校正装置的计算	297	2.3 用 TMS32010 来实现补偿器和	
6.3 多环路(从属控制)系统的设计	300	滤波器	434
6.4 复合控制系统的设计	308	2.4 TMS320 系列 DSP 外围接口考虑	438
7 一个现代 PWM 直流伺服电动机控制		3 TMS32010 DSP 在速率积分陀螺伺服稳	
系统的分析与设计实例	312	定系统中的应用	441
7.1 系统设计概述	312	3.1 系统描述	441
7.2 主要元器件和部件的选择与设计	317	3.2 系统模型与控制补偿	442

3.3 数字控制器的硬件和软件结构	445	计算	492
3.4 程序编制举例	447	2.3 伺服系统可靠性评价	494
3.5 DSP 数字控制系统性能评价	454	3 伺服系统可靠性工程设计导则和 方法	500
第12章 专用集成电路构成的直流 PWM 伺服系统设计	457	3.1 元器件的选择和控制	500
1 L290、L291 和 L292 功能简介	457	3.2 降额设计	501
1.1 L290 转速/电压变换器	458	3.3 可靠的电路设计	503
1.2 L291 数/模转换器及放大器	461	3.4 冗余设计	504
1.3 L292 PWM 直流电机驱动器	461	3.5 电气互连技术	506
2 L292 PWM 直流电机驱动器对直流伺服 电机的速度控制	463	3.6 自动故障检测设计	507
2.1 模拟直流电压速度控制系统	464	3.7 小结	509
2.2 数字控制速度系统	466	4 伺服系统可靠性试验及其评定 方法	511
2.3 L292 驱动功率扩展	468	4.1 伺服系统可靠性试验计划	511
3 L290~L292 直流伺服控制系统设计 指南	469	4.2 伺服系统可靠性试验方法简介	513
3.1 电流调节回路的设计	469	附录	519
3.2 L290/L291 外部参数选择和速度调节 回路设计	473	附录 A BESK-FANUC 永磁直流伺服 电动机组技术性能参数	519
3.3 位置环的设计	478	附录 B 光电编码器技术性能参数	521
3.4 误差分析	479	附录 C 国产轴角/数字、数字/轴角转换 模块的技术性能参数及国外互换 型号对照	523
第13章 伺服系统的可靠性设计	486	附录 D PWM 系统常用大功率晶体管、模块 及驱动电路技术性能参数	528
1 伺服系统可靠性的基本概念	486	附录 E LEM 电流电压传感器模块的 技术性能参数及应用	539
1.1 伺服系统的可靠性定义	486	参考文献	546
1.2 度量可靠性的指标	487		
2 伺服系统可靠性计算	489		
2.1 可靠性结构图的构成	496		
2.2 串、并联结构的可靠性特征量			

第1章 绪 论

近年来,随着电力电子技术的发展及其应用技术的进步、单片微型计算机的高速发展、外围电路元件专用集成件的不断出现,使得直流伺服电动机控制技术有了显著进步。上述技术领域的发展,可以很容易地构成高精度、快速响应的直流伺服驱动系统,因而近年来世界各国在高精度、速度和位置控制场合(如机床进给伺服系统,军用伺服系统),都已由电力半导体驱动装置取代了电液驱动。特别是被人们誉为“未来伺服驱动装置”的晶体管脉冲宽度调制(PWM)直流伺服控制系统(以下简称 PWM 系统),受到了人们的普遍重视,从而得到迅速的发展和广泛的应用。作为从事伺服控制技术的工作者,掌握这一先进技术,对于促进我国高精度直流伺服控制技术的发展至关重要。

1 直流伺服控制技术的发展^{[1]~[3]}

直流伺服电机控制技术的发展,是与控制器件的发展紧密相联的,功率驱动装置发展的历史就是电动机控制技术的历史,这样说并不言过其实。世界上第一个伺服系统由美国麻省理工学院辐射实验室(林肯实验室的前身)于 1944 年研制成功,这就是火炮自动跟踪目标的伺服系统。这种早期的伺服系统都是采用交磁电机扩大机-直流电动机式的驱动方式。这种系统由于交磁电机扩大机的频响差,电动机转动部分的转动惯量以及电气时间常数都比较大,因此响应比较慢。

第二次世界大战期间,由于军事上的需求,先进的武器和飞机的控制系统以及加工制造武器的复杂零件的机床等控制系统,均提出了诸如大功率、高精度、快速响应等一系列高性能要求。当时,若单纯地用电磁元件已很难,甚至根本不可能满足这些要求。而液压系统具有的一些特点正好适合于这种场合,从而促使人们更深入地研究液压技术。在这种背景条件下,液压伺服技术迅速发展起来。到 50 年代末期和 60 年代初期,有关电液伺服技术的基本理论日趋完善,从而使电液伺服系统的应用达到了前所未有的高潮,并被广泛地应用于武器、舰船、航空、航天等军事工业部门以及高精度机床控制,它表现出无与伦比的快速性、低速平稳性等一系列优点。因此,在 60 年代的伺服系统中,液压控制有优于直流伺服电动机控制的趋向。有一些由电机拖动的机床进给系统,也相继改成了电液伺服系统。

但是,液压系统存在漏油、维护修理不方便、对油液中的污染物比较敏感而经常发生故障等缺点。另一方面,机电伺服系统在一些重要元器件的性能上有新的突破,尤其是 1957 年可控的大功率半导体器件——晶闸管问世,由它组成的静止式可控整流装置无论在运行性能还是可靠性上都开始具有明显的优势。70 年代以来,国际上电力电子技术(即大功率半导体技术)突飞猛进,推出了新一代的开和关都能控制的“全控式”电力电子器件,如可关断晶闸管(GTO)、大功率晶体管(GTR)、场效应晶闸管(P-MOSFET)等。与此同时,随着稀土永磁材料的发展和电机制作技术的进步,相继研制出了力矩电机、印制绕组电机、无槽电机、大惯量宽调速电机等性能良好的执行元件,与脉宽调制式变压装置相配合,使直流电源以 1~10kHz 的频

率交替地导通和关断,用改变脉冲电压的宽度来改变平均输出电压,从而调节电动机的转速,大大改善了伺服系统的性能。力矩电机是一种低速电机,调速范围宽,低速平稳性很好,最低平稳转速很低。这样可以用电动机直接拖动负载而省掉中间减速器,从根本上避免了齿隙、空回所带来的一系列问题。例如,我国自行研制的 778 电影经纬仪,由于采用了力矩电动机及 PWM 驱动控制,低速跟踪速度可达 $0.6/s^{-1}$,速度误差系数 K_v 达 $1500s^{-1}$,加速度误差系数达 $170s^{-2}$ 。

无槽电机是一种小惯量高速电机,其转矩转动惯量比甚至比同样功率容量的液压马达的还高,其调速范围比同样功率容量的液压马达还宽,加上机电系统维修简便,成本低廉,形成了对液电伺服系统的有力挑战。

大惯量宽调速电动机是一种大扭矩直流伺服电动机,它具有响应快、过载能力强、调速范围宽,在机床伺服进给系统中获得了广泛应用。70 年代后期,我国引进了这一电机的生产制作技术,初步形成了系列产品。配用 PWM 驱动装置,使系统性能得以大幅度提高。

从当前情况看,直流电动机能在大范围内实现精密的速度和位置控制,所以,要求系统性能高的场合都在广泛地使用直流伺服系统。尽管交流伺服系统发展十分迅速,但能否取代直流伺服系统尚难作出定论。

随着控制技术的发展,对伺服系统的性能不断提出了苛刻的要求。近年来,数字技术的飞速发展,将计算机与伺服控制系统相结合,使计算机成为伺服系统中的一个环节已成为现实。在直流伺服系统中利用计算机来完成系统校正,改变伺服系统的增益、带宽、完成系统管理、监控等任务,使系统向智能化的方向发展。因此,利用计算机构成的数字伺服系统,是近代直流伺服控制系统的一个方向(见第 10、11 章)。

伺服系统隶属于自动控制的一个组成部分,早先是以经典的频率法来进行分析和设计的,它是以传递函数、拉普拉斯变换和奈奎斯特稳定性理论为基础的。50 年代发展了根轨迹法。这种方法是根据闭环传递函数的特征方程的根在复平面上的分布,以及开环传递函数的零点和极点情况来判定增益对系统稳定性、动态特性、带宽等重要指标的影响面进行补偿器的设计。这些方法对于解决多变量时变系统是无能为力的。到 60 年代发展了现代控制理论,适用于多变量时变系统,为计算机在伺服控制系统中的应用奠定了理论基础。因此,广泛地吸收现代控制理论的成果是直流伺服系统设计理论的发展趋向。但是,作为单纯的速度和位置控制伺服系统,远非空间飞行器控制技术那样复杂,因此至今仍普遍采用经典的频域法和根轨迹法来进行直流伺服系统的设计。在第 9 章中将介绍这方面的内容。

随着大规模集成电路的飞速发展,以及计算机(特别是微处理机)在伺服控制系统中的普遍应用,近年来,构成伺服控制系统的重要组成部分——伺服元件发生了巨大的变革,并且向着便于计算机控制的方向发展。为了提高控制精度,便于与计算机联接,位置、速度等测量元件趋于数字化、集成化。例如,各种类型的轴角编码器(如 R/D、S/D 转换)^①,数字式测速元件(如光电脉冲发生器)等在直流伺服系统中得到了广泛的应用,由于高度集成化的结果,像轴角编码器,过去采用分立元件组装的线路部分,几乎得占用 $250mm \times 200mm$ 的三块印制板,现在已经能够作得像火柴盒那么大小。模拟式的伺服元件亦在向高精度、低噪声的方向发展。有关伺服元件的内容,我们将在第 8 章中介绍。

① R/D 是 Resolver-to-Digital Converters 的缩写, S/D 是 Synchro-to-Digital Converters 的缩写。

2 现代直流 PWM 伺服驱动技术的发展^[1~11]

目前,用大功率晶体管 PWM 控制的水磁式直流伺服电动机驱动装置,是高精度伺服控制领域应用得最为广泛的驱动形式,称之为 PWM 驱动装置,这种装置能实现宽范围的速度和位置控制,较常规的驱动方式(交磁电机扩大机驱动、晶体管线性放大驱动、电液驱动、晶闸管驱动)具有无可比拟的优点。随着大功率晶体管的容量和开关速度的不断提高,PWM 驱动装置一跃而为现代伺服驱动系统的佼佼者,受到越来越多的控制工程师的重视。

2.1 国内外发展概况

国外于 60 年代已开始注意 PWM 伺服控制技术,起初用于飞行器中小功率伺服系统,70 年代中后期,在中等功率的直流伺服系统上较为广泛地使用 PWM 驱动装置,到 80 年代,PWM 驱动在直流伺服系统中的应用已经普及。最近从国外引进的高精度伺服系统大都采用 PWM 伺服控制,现在各工业先进国家竞相发展 PWM 伺服机构,如美国 Kollmorgen 公司 Inland 电机部为本公司所生产的直流伺服电机研制了各种 HRB-AND PWM 驱动装置,日本的“安川电机”为数控机床研制了 CPCP-MR-N 型晶体管 PWM 驱动装置,其 YASNACB 系列新的数控装置都采用 CPCP-MR-N PWM 驱动;德国 AEG 公司为坦克火炮稳定器、舰载平台、雷达天线、自行火炮等伺服系统研制了 GEADRIVER[®] 系列晶体管 PWM 驱动装置,对于近 20t 重的大惯量坦克武器,其低速平稳跟踪速度优于 0.2mrad/s ,最大跟踪速度达 0.785rad/s ,打破了长期以来电液驱动垄断大功率武器伺服系统的局面。当然,其它国外生产制造直流 PWM 驱动装置的厂家还很多,美国的 GE、哥德、盖梯司公司,日本的三菱电机、东荣电机、FANUC、TOSNUC 公司,意大利的奥利维蒂公司,德国的西门子公司,瑞士的 BBC 公司,英国的 LUCAS 公司,法国的 CEM 公司等都有他们自己的系列产品,其中大部分用于机床数控伺服系统和机器人驱动系统,目前国外公司达到的制造水平是输出电压 320V,电流 300A,调制频率 $1\sim 10\text{kHz}$,调速范围达 $1:10^4$,输出转矩 $150\text{N}\cdot\text{m}$ 。

国内有些高校,研究所和工厂在 70 年代末期相继开展了 PWM 系统的研究,就 PWM 控制电路、驱动电路、功率转换电路以及系统的分析和设计作了不少工作,取得了一些研究成果,在一定的范围内达到了工业推广水平。1986 年 5 月中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会召开了一次全国性的“直流 PWM 控制技术学术交流会”,为推动我国 PWM 技术的发展作出了贡献。

由于目前受能制造出的大功率晶体管的电压及电流等级的限制,以它为功率转换元件的 PWM 系统,在国内仅能作到几十瓦到十几千瓦,电压达到 220V,应用于数控机床、精密机床、仿型机床、重型机床的进给,机器人驱动装置及精密速度控制中,也用于军用雷达天线驱动、天文望远镜驱动、火炮和导弹发射架驱动等快速跟踪高精度伺服系统中。直流斩波调速在电气车辆上也得到较广泛的应用,所用元件多是晶闸管系列,功率可作得较大,但调制频率低。近一二年,巨型功率晶体管的电压与电流等级日益提高,制造出的 PWM 驱动装置的容量也越来越大,应用范围日益广泛。在一定功率范围内,由它取代晶闸管驱动装置,已成为明显趋势。

尽管目前对交流伺服系统的研究比较“热门”,但是其控制性能还达不到直流 PWM 系统的要求。控制工程师切不可强调一面,而忽视了另一面,直流 PWM 控制技术作为一门新型的控制技术,其发展潜力还是相当大的。直流 PWM 技术不但可应用于新机械设备的传动装置

上,也可应用于原有设备的技术改造上,特别在机电一体化设备上大有用武之地。如我国许多大型机械制造厂的重型镗床的进给系统,多使用交磁电机扩大机、交磁电机扩大机加电子管放大器或早期的晶闸管系统,它们长期存在低速不能稳定运行的故障,致使进给的低速区无法使用,如使用 PWM 技术进行技术改造,就可以把镗床进给的低速区运用起来,将会大大提高机床的加工能力,为工厂多创造财富。在国防工业上,现装备武器的伺服系统大多数为电液驱动和交磁电机扩大机驱动,无论技术性能和战术使用要求,都不能适应现代武器装备的要求,各工业发达国家都在用直流 PWM 伺服技术来改造现有武器装备的伺服系统,使旧武器焕发青春,这已成为旧式装备改造的潮流。

总而言之,直流 PWM 伺服技术是一个正在发展中的新领域,具有很好的发展前景。

2.2 直流 PWM 伺服驱动装置的工作原理和特点

PWM 驱动装置是利用大功率晶体管的开关特性来调制固定电压的直流电源,按一个固定的频率来接通和断开,并根据需要改变一个周期内“接通”与“断开”时间的长短,通过改变直流伺服电动机电枢上电压的“占空比”来改变平均电压的大小,从而控制电动机的转速。因此,这种装置又称为“开关驱动装置”。

PWM 控制的示意图如图 1-1 所示,可控开关 S 以一定的时间间隔重复地接通和断开,当 S 接通时,供电电源 U_s 通过开关 S 施加到电动机两端,电源向电机提供能量,电动机储能;当开关 S 断开时,中断了供电电源 U_s 向电动机提供能量,但在开关 S 接通期间电枢电感所储存的能量此时通过续流二极管 VD 使电动机电流继续流通。

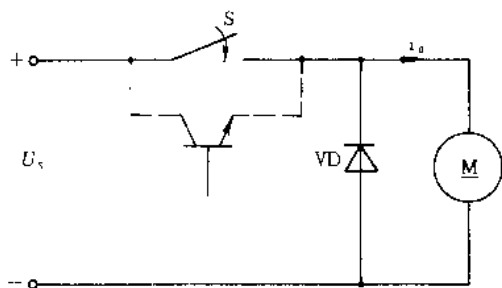


图 1-1 PWM 控制示意图

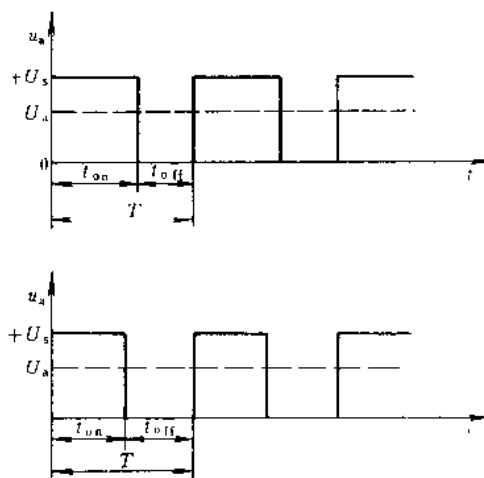


图 1-2 PWM 控制电压波形

在电动机两端间得到的电压波形如图 1-2 所示,电压平均值 U_{av} 可用下式表示:

$$U_{av} = \frac{t_{on}}{T} U_s = \alpha U_s \quad (1-1)$$

式中 t_{on} —— 开关每次接通的时间;

T —— 开关通断的工作周期(即开关接通时间 t_{on} 和关断时间 t_{off} 之和);

α —— 占空比, $\alpha = t_{on}/T$ 。

由式(1-1)可见,改变开关接通时间 t_{on} 和开关周期 T 的比例亦即改变脉冲的占空比,电动机两端电压的平均值也随之改变(如图 1-2 所示),因而电动机转速得到了控制。按照式(1-1),

改变占空比可获得两种调制方法,即开关周期 T 恒定,通过改变导通脉冲宽度来改变占空比的方式,这就是脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation,缩写为 PWM);另一种方式为导通脉冲宽度恒定,通过改变开关频率($f=1/T$)来改变占空比,亦即脉冲频率调制(Pulse Frequency Modulation,缩写为 PFM)。由于 PFM 控制是依靠脉冲频率的变化来改变占空比的,当遇到某个特殊频率下的机械谐振时,常导致系统振荡和出现音频啸叫声,这一严重缺点导致 PFM 控制在伺服系统中不适用。目前,直流电动机的控制中,以应用 PWM 控制方式为主。

我们已经知道,改变脉冲占空比即可调节电机转速,但必须有将控制转速的指令转换为脉冲宽度或开关周期的电路或装置来实现。图1-3所示为桥式 PWM 驱动装置的控制原理框图。为叙述方便,在功率转换电路框内绘出了元器件。

PWM 驱动装置的控制结构可分为两大部分:从主电源将能量传递给电动机的电路称为功率转换电路;其余部分称为控制电路。

工频电网经三相整流得到控制直流电动机所需的直流电压 U_c 、被施加到由四个大功率晶体管(GTR)V1、V2、V3、V4组成的桥式(H型)功率转换电路上,大功率晶体管由控制电路给 V1、V4和 V2、V3提供相位差 180° 的矩形波基极激励电压,而使 V1、V4和 V2、V3交替导通(亦可是其它导通方式,只要不构成同侧对管直通短路),将直流电压 u_c 调制成与给定频率相同的方波脉冲电压,作用到电动机电枢两端,为电动机提供能量。有关功率转换电路的分析设计在第4章中介绍。

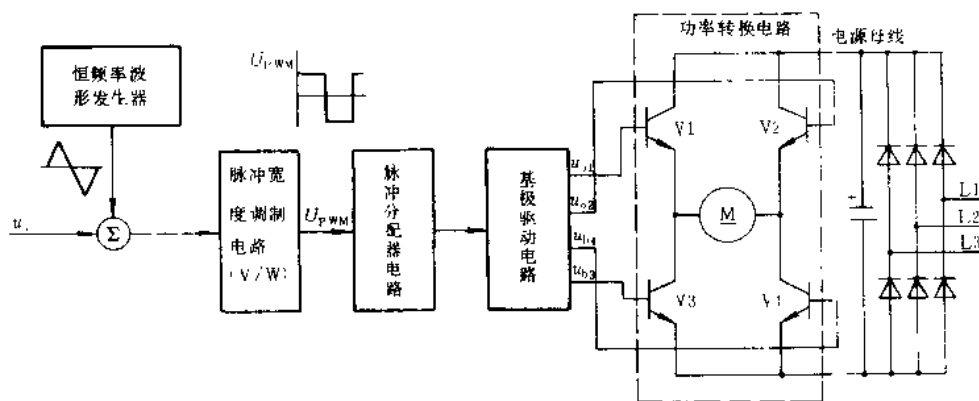


图1-3 PWM驱动装置控制原理框图

控制电路通常由恒频率波形发生器、脉冲宽度调制电路、脉冲分配电路、基极驱动电路、保护电路等基本电路组成。

1. 恒频率波形发生器 它的作用是产生恒定频率的振荡源以作为时间比较的基准,它可以是三角波,也可以是锯齿波。

2. 脉冲宽度调制电路 按功能而言,它实际上是电压/脉宽转换电路(简称 V/W 电路,它是英文 Voltage-to-Pulse Width Converters 的缩写),也就是 PWM 信号形成电路。产生 PWM 信号有多种方法,常采用图1-4a所示的电压比较器(或者具有正反馈的高增益运算放大器),它具有如图1-4b所示的继电控制特性。这样,在其两个输入端上分别施加三角波信号和控制信号电压,此时,比较器输出将按下述规律变化:

(1) 控制信号电压 $>$ 三角波电压时,输出正的电压 $+U_{cc}$;

(2) 控制信号电压 < 三角波电压时, 输出负的电压 $-U_{DD}$ 。

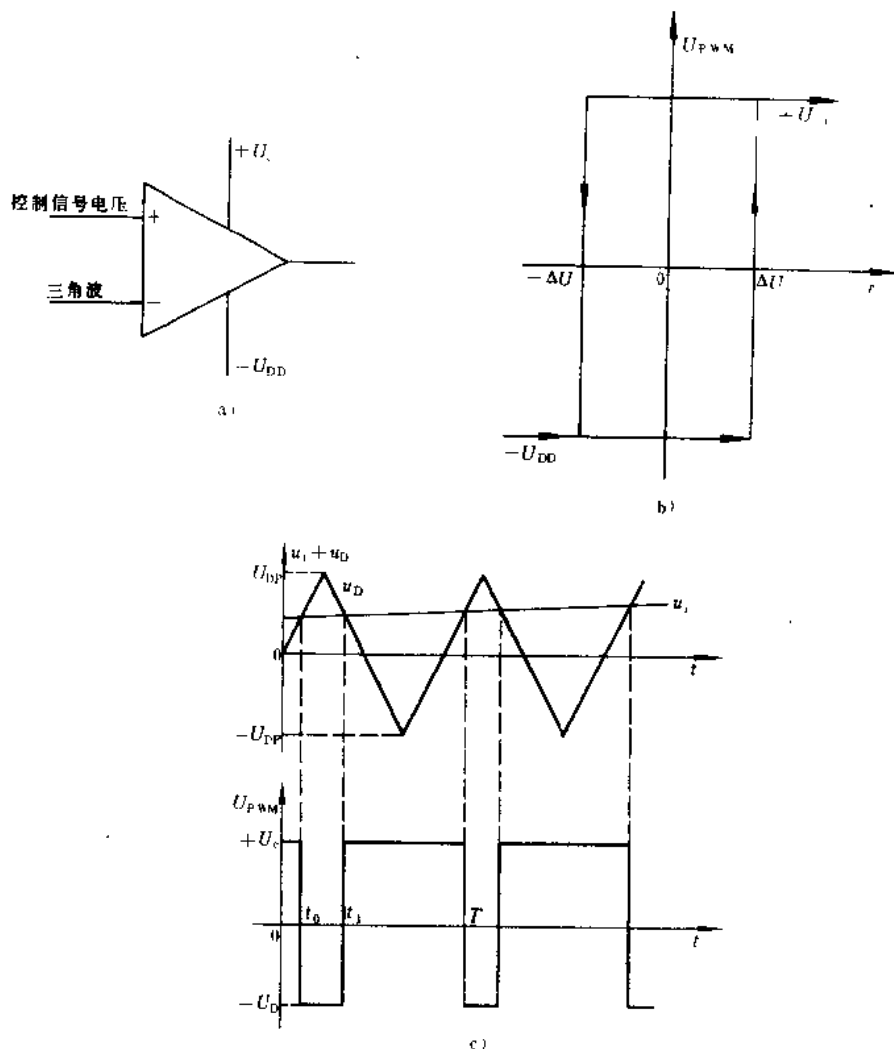


图1-4 利用比较器的 PWM 信号形成原理

a) 比较器示意图 b) 比较器的继电器特性 c) 输入-输出波形

由于输入控制信号电压 u_i 变化相对较慢, 因此在一个开关周期内认为 u_i 是常值。脉宽调制器的信号系数 ρ 为

$$\rho = u_i / U_{DP} \quad (1-2)$$

式中 U_{DP} ——三角波电压的峰值。

3. 脉冲分配电路 它根据功率转换电路工作制式, 即大功率晶体管的导通次序, 对 V/W 变换的信号进行适当的逻辑变换, 分配给基极驱动电路以满足功率转换电路工作制式“通”、“断”时序的脉冲电压。

4. 基极驱动电路 对脉冲分配电路提供的脉冲进行前置功率放大, 使之激励功率转换电路的大功率晶体管。

5. 保护电路 和晶闸管控制电路一样, PWM 驱动电路的保护显得更为重要, 必须设置过电流、过电压、欠电压保护电路, 以便一旦发生过电压、欠电压、过电流时, 中断功率转换电路。

有时也要对大功率晶体管的局部发热和电动机的温升进行监控,以提供过热保护

综上所述,当控制信号电压 u_c 增加时,它与固定频率的三角波电压 U_0 相比较,产生一个宽度与 u_c 成正比例的调制脉冲电压,经脉冲变换分配使基极驱动电路激励主电路大功率晶体管的正向导通时间增加,则电动机两端的平均电压增加,电动机转速上升至控制信号电压 u_c 所要求的数值。这便是 PWM 驱动装置的基本工作原理。

PWM 驱动装置与一般晶闸管驱动装置相比较具有下列特点:

(1) 需用的大功率可控器件少,线路简单。例如,在不可逆无制动 PWM 驱动装置中仅用一个大功率晶体管,而在晶闸管驱动装置中至少要用三个晶闸管(指三相),在可逆桥式(H型) PWM 驱动装置中仅用四个大功率晶体管,而晶闸管则至少要用六个,从而简化了系统的功率转换电路及其驱动电路,使得晶体管 PWM 驱动装置的线路较晶闸管驱动装置的简单。

(2) 调速范围宽。PWM 驱动装置与宽调速直流伺服电动机配合,可获得 6000~10000 的调速范围,而一般晶闸管驱动装置的调速范围仅能达到 100~150,如果采取低速自适应控制或锁相环控制等措施,也能达到 6000~10000,但其线路要比 PWM 系统复杂得多。

(3) 快速性好。在快速性上, PWM 系统也优于晶闸管系统。主要是调制频率高(1~10kHz),失控时间小,可减小系统的小时间常数,使系统的频带加宽,动态速降小,恢复时间短,动态硬度好。PWM 驱动装置的电压增益不随输出电压变化而改变,故系统的线性度好。

(4) 电流波形系数好,附加损耗小。由于 PWM 调制频率高,不需平波电抗器就可获得脉动很小的直流电流,波形系数约等于 1。因而电枢电流脉动分量对电动机转速的影响以及由它引起的附加损耗都小。

(5) 功率因数高,对用户使用有利。PWM 驱动装置是把交流电经全波整流成一个固定的直流电压,再对它进行脉宽调制,因而交流电源侧的功率因数高,系统工作对电网干扰小。在一个多轴机床上,可将几套 PWM 驱动装置组合为一个单元,其公共组件、电源供给及某些控制线路可以公用。

表 1-1 列出 PWM 系统与晶闸管系统的性能比较

表 1-1 PWM 系统与晶闸管系统性能比较

项 目	系 统 类 别	PWM(GTR)系统 调制频率 $f=2\text{kHz}$ 调制周期 $T=0.5\text{ms}$	晶闸管系统 $f=50\text{Hz}$ $T=20\text{ms}$	
			三相全波	单相全波
速度 闭环	有效输出功率 电动机额定输出功率 (%)	95	70~80	50~60
	调节误差 (%)	0.01~0.03	0.1	0.4
	额定角频率 $\omega_0(\text{s}^{-1})$	400	300	125
位置环	回路增益 $K(\text{s}^{-1})$	100	60	23
电流上升时间 (ms)		3~5	6~10	20~30
平均失控时间 (ms)		0.25	1.6	—
波形系数		≤ 1	1.05	1.1~1.2 (带平波电抗器)