



面向21世纪课程教材

Textbook Series for 21st Century



★★★★★
普通高等教育“九五”国家级重点教材

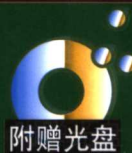
电力拖动自动控制系统

——运动控制系统

上海大学 陈伯时 主编

第3版

5
机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



面向 21 世纪课程教材
普通高等教育“九五”国家级重点教材

电力拖动自动控制系统 ——运动控制系统

第 3 版

主编 陈伯时
参编 阮毅 陈维钧
倪国宗 陈敏逊
主审 赵家璧



机械工业出版社

本书是根据全国高等院校电工及自动化类专业教学指导委员会制定的教材规划编写的,是本教材的修订第3版。自本书第2版1992年出版以来,有关的科学技术已经取得了很大进步,电力电子变换器中以晶闸管为主的可控器件已逐步被功率开关器件所取代,变换技术也因此由相位控制转变成脉宽调制(PWM);模拟电子控制器已基本上让位于数字电子控制器;交流可调拖动逐步取代直流拖动已经成为不争的事实,交流拖动控制技术本身也有不小的进展。本书针对这些技术发展进行了全面的修订。

在内容上,本书包括直流拖动控制系统和交流拖动控制系统两篇。编写思路继承了前两版的特色,理论和实际相结合,应用自动控制理论解决电力拖动控制系统的分析和设计问题,以控制规律为主线,由简入繁、由低及高地循序深入,主要论述了系统的静、动态性能,并发展了实用价值很高的工程设计方法。

本书可作为高等学校电气工程与自动化、电气工程及其自动化专业和自动化专业的教材,也可供有关工程师和技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力拖动自动控制系统:运动控制系统/陈伯时主编.
—3版. —北京:机械工业出版社,2003.7
面向21世纪课程教材.普通高等教育“九五”国家级
重点教材
ISBN 7-111-12222-4

I.电… II.陈… III.电力传动—自动控制系
—高等学校—教材 IV.TM921.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第026476号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:韩雪清 版式设计:冉晓华 责任校对:魏俊云
苏颖杰

封面设计:鞠杨 责任印制:闫焱

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004年7月第3版·第3次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·20.25印张·502千字

定价:30.00元(含1CD)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、88379646
封面无防伪标均为盗版

前 言

本书第1版的书名是《自动控制系统》，于1981年出版，第2版改名为《电力拖动自动控制系统》，于1992年出版。现根据全国高等院校电工及自动化类专业教学指导委员会制定的教材规划，修订后出版第3版。目前，全国可能使用本教材的专业有电气工程与自动化、电气工程及其自动化、自动化等。各校自主编制的教学计划有不少差别，有些学校的课程名称照旧，有些使用了“运动控制系统”这一名称，为了适应不同学校的需要，本书修订后的书名改为《电力拖动自动控制系统——运动控制系统》。

近年来，本书所涉及的主要技术进步体现在以下三个方面，这也是本书修订的依据：

1) 在电力电子变换器中，以晶闸管为主的可控器件已经基本上被功率开关器件所取代，因而变换技术也由相位控制转变成脉宽调制(PWM)。

2) 在控制器中，模拟电子控制已基本上让位于数字电子控制。

3) 交流可调拖动系统逐步取代直流拖动系统已经成为不争的事实，而且交流拖动控制技术本身也有不小的进展。

第3版的改编主要体现了这三方面的技术进步，但全书的主线仍然是控制系统的原理、分析和设计。因此，编写本书的主要思路仍继承了前两版的特色，理论和实际相结合，应用自动控制理论解决电力拖动控制系统的分析和设计问题，不是单纯罗列各种控制系统，而是以控制规律为主线，由简入繁、由低及高地循序渐进，论述电力拖动控制系统的静、动态性能。在设计方法上，首先以经典控制理论为基础，发展了实用价值很高的工程设计方法；对于多输入多输出的交流拖动控制系统，则在多变量数学模型的基础上分析其控制规律，并采用解耦或其他方法解决控制系统的设计问题。以上特色已在20余年国内教学和工程应用中证明是很有效的。

在总体内容上，本书和第2版一样，分为直流拖动控制系统和交流拖动控制系统两篇。

在电力电子变换器方面，本书与全国重点教材《电力电子技术(第4版)》(西安交通大学王兆安、黄俊主编，机械工业出版社出版)相衔接，有关的电力电子器件、整流电路、斩波电路、逆变电路和变频电路等都是该书的内容，本书不再详述。但为了承上启下，编写了第1.2节“晶闸管-电动机系统(V-M系统)的主要问题”，第1.3节“直流脉宽调速系统的主要问题”，第6.3节“电力电子变压变频器的主要类型”，而删去第2版中单独设置的第4章“直流脉宽调速系统”。除特殊情况外，在直流控制系统中的电力电子变换器都统一用UPE表示，它既可表示晶闸管可控整流装置，也可表示直流斩波或PWM变换器，具有统一的传递函数 $\frac{K_s}{T_s s + 1}$ ，在例题中专门给出实例，以表明两种变换器在性能上的差别。

在控制器方面，现在实际系统中已主要应用数字控制器，但模拟控制器的物理意义清晰，从模拟控制器入门，容易掌握控制规律的基本概念。因此第1篇第1、2章仍从模拟控制器入手，接着增设第3章“直流调速系统的数字控制”，在学生已学过微型计算机原理、程序设计基础、计算机控制系统等课程的基础上，首先阐明微型计算机数字控制的主要特

点,然后着重讨论以下四项内容:

1) 数字测速与滤波。这是数字控制调速系统的特殊要求。

2) 数字PI调节器。首先将模拟式PI调节器数字化,然后突出发挥数字控制器的优点,利用其强有力的逻辑判断和数值运算功能,改进数字PI算法,最后举出一类智能型的PI调节器,使读者清楚地认识到,采用数字控制器可以充分提高控制系统的性能。

3) 按离散控制系统的方法设计数字控制器。在设计过程中,还介绍了利用软件求控制系统的数值解和利用仿真软件求系统性能指标的方法。

4) 简述数字控制系统的故障检测、保护与自诊断。这是数字控制的又一个优点,全面的自诊断问题很多,作为本科教材,本书只能简述一下,达到指出问题的目的。

在交流拖动控制系统方面,本书加强了交流调速系统的基本理论和基本概念,增加了已经发展成熟的新型交流拖动控制系统。但直流拖动控制系统,特别是双闭环控制,仍是交流系统的基础,所以本书第1、2章仍从直流系统入门,建立了扎实的控制系统的分析与设计的概念和能力以后,再进入交流系统的学习。对于直流系统,为了建立基础以外的内容,包括第2版的第3、4、5章,则尽量精练,或者删去,本版只留下第4章扼要地介绍可逆调速系统和位置随动系统。交流调速系统按转差功率的去向分类,异步电动机调速系统按转差功率消耗型、不变型和馈送型分成三章,即第5、6、7章,同步电动机转差功率等于零,是一类特殊的转差功率不变型系统,单设为第8章。对于交流调速系统的控制策略,按基于稳态模型和基于动态模型两种情况分别论述。在具体分析高动态性能系统以前,先设专节描述异步电动机的动态数学模型和坐标变换,着重论述它们的基本概念和变换方法,还增加了现在常用的状态方程表示法,而把第2版中有些复杂的推导过程放进附录。对于按转子磁链定向的矢量控制系统,吸收了近年来的研究成果,加强了控制规律、转矩与磁链之间的解耦概念、磁链计算的电压模型和电流模型、直接矢量控制和间接矢量控制的分析。最后增加一节专门描述按定子磁链控制的直接转矩控制系统,并对矢量控制和直接转矩控制的优缺点做出分析和比较。

本书按60学时编写,如果有的学校课程学时更少,可以第1、2、3、6章为重点,其他内容选讲或不讲。为了满足工程技术界读者的需要,并解决学生毕业后可能遇到的一些实际问题,书中仍包含了比较全面的内容,而在次要的章节前标上“*”,以便于讲课和自学时选择。

在第2版出版时,曾单独编写了《电力拖动自动控制系统习题例题集》,由浙江大学童福尧教授编著。现根据广大师生的要求,在书中给出少量例题,而在每章后给出一定数量的习题,其计算部分的答案集中附于书后。限于篇幅及学时,所给题目的数量不多,有关教师如果需要,仍可参考已经出版的习题例题集。在此,对童福尧教授谨表衷心的感谢!

本课程是一门实践性很强的课程,实验是学好本课程必不可少的重要环节,可以随课堂教学过程进行,也可以开设单独的实验课,其目的在于培养学生掌握实验方法和运用理论分析并解决实际问题的能力。为了给实验教学提供帮助,书后列出了“教学实验参考”,包含覆盖全书内容的9个实验。称之为“参考”,是因为其具体内容受到我们现有设备的限制,数字化的程度和新型电力电子器件的应用都还是不够的。各校如果有新的教学实验设备,只须参考这里提出的实验要求,完全可以不受所列设备的限制,自行设计实验内容。

为了便于新版教材的教学使用,本书还附赠一张配套的多媒体课件光盘。该课件由上海

海运学院汤天浩教授根据亲自授课的教学实践经验，在主编陈伯时教授的指导和帮助下，以教材的电子稿为基础制作完成。课件充分运用了计算机多媒体工具，不仅忠实地体现了教材的教学思路和主要内容，而且形式多样、生动活泼，对丰富教师的教学手段，对学生学习和理解教材的精髓都很有帮助。课件的部分内容已由汤天浩教授在实际教学中试用，取得了良好的效果。

本书由上海大学陈伯时教授主编，第3章和其他有关数字控制部分由上海大学阮毅教授和上海交通大学陈维钧副教授编写，第4章部分内容由上海大学倪国宗副教授编写，第6.4节和第7章由上海交通大学陈敏逊教授编写，其余各章节均由陈伯时编写，并负责全书的统稿工作。倪国宗副教授还编写了除第3章外的全部习题、答案、教学实验参考，并绘制了插图。沈天飞博士、博士生徐静承担了大部分书稿的计算机录入工作。

本书由东南大学赵家璧教授主审，浙江大学冯培悌教授、同济大学周国兴教授、江苏大学刘国海教授参加审稿。他们都审阅了全部书稿，并提出了许多宝贵而中肯的修改意见，在此谨致深切的感谢！清华大学韩曾晋教授曾参加编写本书第1版《自动控制系统》，对本书自然有其不可磨灭的贡献，沈锡臣、窦日轩副教授都参加了不少工作，在此也谨表谢意。

我们在修编过程中虽然花了不少精力，但仍难免有错误与不足之处，殷切期望广大读者批评指正。

编者

目 录

前言

第 1 篇 直流拖动控制系统

第 1 章 闭环控制的直流调速系统	2	问题	20
1.1 直流调速系统用的可控直流电源	2	1.4.3 闭环调速系统的组成及其静特性	21
1.1.1 旋转变流机组	2	1.4.4 开环系统机械特性和闭环系统静特性的关系	22
1.1.2 静止式可控整流器	3	1.4.5 反馈控制规律	25
1.1.3 直流斩波器或脉宽调制变换器	4	1.4.6 闭环直流调速系统稳态参数的计算	26
1.2 晶闸管-电动机系统 (V-M 系统) 的主要问题	5	1.4.7 限流保护——电流截止负反馈	28
* 1.2.1 触发脉冲相位控制	6	1.5 反馈控制闭环直流调速系统的动态分析和设计	30
* 1.2.2 电流脉动及其波形的连续与断续	7	1.5.1 反馈控制闭环直流调速系统的动态数学模型	30
* 1.2.3 抑制电流脉动的措施	7	1.5.2 反馈控制闭环直流调速系统的稳定条件	33
1.2.4 晶闸管-电动机系统的机械特性	8	1.5.3 动态校正——PI 调节器的设计	35
1.2.5 晶闸管触发和整流装置的放大系数和传递函数	9	1.6 比例积分控制规律和无静差调速系统	40
1.3 直流脉宽调速系统的主要问题	11	1.6.1 积分调节器和积分控制规律	40
* 1.3.1 PWM 变换器的工作状态和电压、电流波形	11	1.6.2 比例积分控制规律	42
1.3.2 直流脉宽调速系统的机械特性	16	1.6.3 无静差直流调速系统及其稳态参数计算	43
1.3.3 PWM 控制与变换器的数学模型	17	1.7 电压反馈电流补偿控制的直流调速系统	44
1.3.4 电能回馈与泵升电压的限制	17	1.7.1 电压负反馈直流调速系统	45
1.4 反馈控制闭环直流调速系统的稳态分析和设计	18	1.7.2 电流正反馈和补偿控制规律	46
1.4.1 转速控制的要求和调速指标	18	* 1.7.3 电流补偿控制直流调速系统的数学模型和稳定条件	49
1.4.2 开环调速系统及其存在的		习题	50

第2章 转速、电流双闭环直流调速系统和调节器的工程设计方法	52	*2.5.4 带转速微分负反馈双闭环调速系统的抗扰性能	90
2.1 转速、电流双闭环直流调速系统的组成及其静特性	52	*2.6 弱磁控制的直流调速系统	91
2.1.1 转速、电流双闭环直流调速系统的组成	53	*2.6.1 变压与弱磁的配合控制	91
2.1.2 稳态结构框图和静特性	54	*2.6.2 非独立控制励磁的调速系统	92
2.1.3 各变量的稳态工作点和稳态参数计算	55	*2.6.3 弱磁过程的直流电动机数学模型和弱磁控制系统转速调节器的设计	93
2.2 双闭环直流调速系统的数学模型和动态性能分析	56	习题	94
2.2.1 双闭环直流调速系统的动态数学模型	56	第3章 直流调速系统的数字控制	97
2.2.2 起动过程分析	56	3.1 微型计算机数字控制的主要特点	97
2.2.3 动态抗扰性能分析	58	3.1.1 数字量化	98
2.2.4 转速和电流两个调节器的作用	59	3.1.2 采样频率的选择	98
2.3 调节器的工程设计方法	59	3.1.3 微机数字控制系统的输入与输出变量	99
2.3.1 工程设计方法的基本思路	60	3.2 微机数字控制双闭环直流调速系统的硬件和软件	100
2.3.2 典型系统	60	3.2.1 微机数字控制双闭环直流调速系统的硬件结构	100
2.3.3 控制系统的动态性能指标	62	3.2.2 微机数字控制双闭环直流调速系统的软件框图	101
2.3.4 典型I型系统性能指标和参数的关系	63	3.3 数字测速与滤波	103
2.3.5 典型II型系统性能指标和参数的关系	68	3.3.1 旋转编码器	103
2.3.6 调节器结构的选择和传递函数的近似处理——非典型系统的典型化	71	3.3.2 M法测速	103
2.4 按工程设计方法设计双闭环系统的调节器	76	3.3.3 T法测速	104
2.4.1 电流调节器的设计	76	3.3.4 M/T法测速	104
2.4.2 转速调节器的设计	80	3.3.5 各种数字测速方法的精度指标	105
2.4.3 转速调节器退饱和时转速超调量的计算	84	3.3.6 M/T法数字测速软件框图	106
*2.5 转速超调的抑制——转速微分负反馈	87	3.3.7 数字滤波	107
*2.5.1 带转速微分负反馈双闭环调速系统的基本原理	87	3.4 数字PI调节器	108
*2.5.2 退饱和时间和退饱和转速	89	3.4.1 模拟PI调节器的数字化	108
*2.5.3 转速微分负反馈参数的工程设计方法	90	3.4.2 改进的数字PI算法	110
		3.4.3 智能型PI调节器	110
		3.5 按离散控制系统设计数字控制器	112
		3.5.1 具有零阶保持器的数字控制直流调速系统	113
		3.5.2 控制对象传递函数的离散化	113

3.5.3 数字转速调节器的设计	114	机系统	122
* 3.6 数字控制系统的故障检测、 保护与自诊断	118	4.1.3 无环流控制的可逆晶闸管-电动 机系统	129
* 3.6.1 故障检测	118	* 4.2 位置随动系统	133
* 3.6.2 故障保护	119	4.2.1 位置随动系统的组成	133
* 3.6.3 故障自诊断	119	4.2.2 位置随动系统的特征及其 与调速系统的比较	134
习题	120	4.2.3 位置传感器	134
* 第 4 章 可逆直流调速系统和位置 随动系统	121	4.2.4 位置随动系统的稳态误差 分析和参数计算	136
* 4.1 可逆直流调速系统	121	4.2.5 位置随动系统的动态校正 与控制	141
4.1.1 单片机控制的 PWM 可逆 直流调速系统	121	习题	144
4.1.2 有环流控制的可逆晶闸管-电动			
第 2 篇 交流拖动控制系统			
* 第 5 章 闭环控制的异步电动机变 压调速系统——一种 转差功率消耗型调 速系统	147	步电动机的机械特性	160
* 5.1 异步电动机变压调速电路	147	6.2.2 基频以下电压-频率协调 控制时的机械特性	160
5.2 异步电动机改变电压时的机 械特性	148	6.2.3 基频以上恒压变频时的 机械特性	163
5.3 闭环控制的变压调速系统及 其静特性	150	* 6.2.4 恒流正弦波供电时的机械 特性	163
* 5.4 闭环变压调速系统的近似动 态结构框图	151	* 6.3 电力电子变压变频器的主要 类型	165
* 5.5 转差功率损耗分析	153	* 6.3.1 交-直-交和交-交变 压变频器	165
* 5.6 变压控制在软起动器和轻载 降压节能运行中的应用	155	* 6.3.2 电压源型和电流源型逆 变器	167
* 5.6.1 软起动器	155	* 6.3.3 180°导通型和 120°导通 型逆变器	169
* 5.6.2 轻载降压节能运行	156	6.4 变压变频调速系统中的脉宽 调制 (PWM) 技术	169
习题	157	6.4.1 正弦波脉宽调制 (SPWM) 技术	170
第 6 章 笼型异步电动机变压变频 调速系统 (VVVF 系统) ——转差功率不变 型调速系统	158	* 6.4.2 消除指定次数谐波的 PWM (SHEPWM) 控制技术	171
6.1 变压变频调速的基本控制方式	158	* 6.4.3 电流滞环跟踪 PWM(CHB PWM) 控制技术	172
6.1.1 基频以下调速	159	6.4.4 电压空间矢量 PWM(SVPWM) 控制技术(或称磁链跟踪 控制技术)	175
6.1.2 基频以上调速	160	6.4.5 桥臂器件开关死区对 PWM	
6.2 异步电动机电压-频率协调控 制时的机械特性	160		
6.2.1 恒压恒频正弦波供电时异			

控制变压变频器工作 的影响	182	送型调速系统	218
6.5 基于异步电动机稳态模型的 变压变频调速系统	184	7.1 异步电机双馈调速工作原理	218
6.5.1 转速开环恒压频比控制调 速系统——通用变频 器-异步电动机调 速系统	185	7.1.1 异步电机转子附加电动势 的作用	219
6.5.2 转速闭环转差频率控制的 变压变频调速系统	187	7.1.2 异步电机双馈调速的五种 工况	220
6.6 异步电动机的动态数学模型和 坐标变换	190	7.2 异步电机在次同步电动状态下的 双馈系统——串级调速系统	223
6.6.1 异步电动机动态数学模型 的性质	190	7.2.1 串级调速系统的工作原理	223
6.6.2 三相异步电动机的多变量 非线性数学模型	191	*7.2.2 串级调速系统的其他类型	225
6.6.3 坐标变换和变换矩阵	195	*7.3 异步电动机串级调速时的机械 特性	225
6.6.4 三相异步电动机在两相坐 标系上的数学模型	200	*7.3.1 异步电动机串级调速机 械特性的特征	225
6.6.5 三相异步电动机在两相坐 标系上的状态方程	204	*7.3.2 异步电动机串级调速时 的转子整流电路	227
6.7 基于动态模型按转子磁链定向 的矢量控制系统	206	*7.3.3 异步电动机串级调速机 械特性方程式	228
6.7.1 矢量控制系统的基本思路	206	*7.4 串级调速系统的技术经济 指标及其提高方案	231
6.7.2 按转子磁链定向的矢量控 制方程及其解耦作用	207	*7.4.1 串级调速系统的效率	231
6.7.3 转子磁链模型	209	*7.4.2 串级调速系统的功率因数 及其改善途径	232
6.7.4 转速、磁链闭环控制的矢量 控制系统——直接矢量 控制系统	211	*7.4.3 斩波控制的串级调速系统	233
6.7.5 磁链开环转差型矢量控制系 统——间接矢量控制系统	213	*7.4.4 串级调速装置的电压和 容量	234
6.8 基于动态模型按定子磁链控制 的直接转矩控制系统	214	7.5 双闭环控制的串级调速系统	235
6.8.1 直接转矩控制系统的原理 和特点	214	7.5.1 双闭环控制串级调速系 统的组成	235
6.8.2 直接转矩控制系统的控制 规律和反馈模型	215	*7.5.2 串级调速系统的动态 数学模型	236
6.8.3 直接转矩控制系统与矢量 控制系统的比较	216	*7.5.3 调节器参数的设计	237
习题	217	7.5.4 串级调速系统的起动方式	238
* 第7章 绕线转子异步电机双馈调 速系统——转差功率馈		*7.6 异步电机双馈调速系统	239
		7.6.1 双馈调速系统的构成	239
		*7.6.2 双馈调速系统的矢量控制	240
		习题	241
		* 第8章 同步电动机变压变频调速 系统	242
		8.1 同步电动机变压变频调速的特 点及其基本类型	242
		*8.2 他控变频同步电动机调速系统	243

* 8.2.1 转速开环恒压频比控制的 同步电动机群调速系统	243	附 3.3 系统仿真软件	262
* 8.2.2 由交-直-交电流型负载换 流变压变频器供电的同步电 动机调速系统	244	附录 4 在功率不变条件下的坐标 变换	263
8.2.3 由交-交变压变频器供电 的大型低速同步电动机 调速系统	244	附 4.1 功率不变时坐标变换阵的 性质	263
* 8.2.4 按气隙磁场定向的同步电 动机矢量控制系统	245	附 4.2 功率不变条件下的 3/2 变换 及匝数比	263
* 8.2.5 同步电动机的多变量动 态数学模型	248	附录 5 由三相静止坐标系到两相任意 旋转坐标系上的变换 ($3s/2r$ 变换)	265
8.3 自控变频同步电动机调速系统	250	附 5.1 $3s/2r$ 旋转变换阵	265
8.3.1 梯形波永磁同步电动机(无刷 直流电动机)的自控变频调 速系统	251	附 5.2 电压方程的变换	266
8.3.2 正弦波永磁同步电动机的自控 变频调速系统	253	附 5.3 磁链方程的变换	268
习题	255	附 5.4 转矩方程的变换	270
附录	256	教学实验参考	271
附录 1 几种传递函数的近似处理 条件	256	实验 1 晶闸管直流调速系统参数和 基本环节特性测定	273
附 1.1 直流调速系统中电力电子变 换器传递函数的近似处理 条件	256	实验 2 带电流截止负反馈的转速单 闭环直流调速系统	280
附 1.2 三个小惯性环节的近似处理 条件	257	实验 3 转速、电流双闭环直流调速 系统	283
附 1.3 忽略反电动势动态影响的近 似条件	258	实验 4 逻辑无环流可逆直流调速 系统	286
附录 2 典型 II 型系统的闭环幅频特性峰 值最小(M_{min})准则——式(2-34)、 式(2-35)、式(2-37) 的证明	259	实验 5 转速、电流双闭环可逆直 流 PWM 调速系统	289
附录 3 第 3.5 节使用的计算机辅助设 计软件	260	实验 6 双闭环三相异步电动机调 压调速系统	291
附 3.1 程序变量	261	实验 7 双闭环三相绕线型异步电 动机串级调速系统	294
附 3.2 转速调节器设计软件	261	实验 8 SPWM 正弦脉宽调制变频 器-异步电动机变频 调速系统	296
		实验 9 基于 DSP 的方波无刷直流电 动机(BLDM)调速 系统	299
		部分习题参考答案	304
		参考文献	309

第 1 篇 直流拖动控制系统

直流电动机具有良好的起、制动性能，宜于在大范围内平滑调速，在许多需要调速或快速正反向的电力拖动领域中得到了广泛的应用。近年来，高性能交流调速技术发展很快，交流调速系统正逐步取代直流调速系统。然而，直流拖动控制系统毕竟在理论上和实践上都比较成熟，而且从控制的角度来看，它又是交流拖动控制系统的基础。因此，还是应该首先很好地掌握直流拖动控制系统。

从生产机械要求控制的物理量来看，电力拖动自动控制系统有调速系统、位置随动系统（伺服系统）、张力控制系统、多电机同步控制系统等多种类型，各种系统往往都是通过控制转速来实现的，因此调速系统是最基本的电力拖动控制系统。

直流电动机转速和其他参量之间的稳态关系可表示为

$$n = \frac{U - IR}{K_e \Phi}$$

式中 n ——转速 (r/min)；

U ——电枢电压 (V)；

I ——电枢电流 (A)；

R ——电枢回路总电阻 (Ω)；

Φ ——励磁磁通 (Wb)；

K_e ——由电机结构决定的电动势常数。

在上式中， K_e 是常数，电流 I 是由负载决定的，因此调节电动机的转速可以有三种方法：

- 1) 调节电枢供电电压 U 。
- 2) 减弱励磁磁通 Φ 。
- 3) 改变电枢回路电阻 R 。

对于要求在一定范围内无级平滑调速的系统来说，以调节电枢供电电压的方式为最好。改变电阻只能实现有级调速；减弱磁通虽然能够平滑调速，但调速范围不大，往往只是配合调压方案，在基速（额定转速）以上作小范围的弱磁升速。因此，自动控制的直流调速系统往往以变压调速为主。

第 1 章 闭环控制的直流调速系统

内 容 提 要

开环控制的直流电机调速方法已在“电机与拖动”课程中讲授，本书以讲授闭环自动控制系统为主，本章着重讨论基本的闭环控制系统及其分析与设计方法。直流调速系统主要采用变压调速，因此，第 1.1 节首先介绍三种可控的直流电源。采用电力电子装置的可控直流电源是“电力电子技术”课程的内容，为了承上启下，第 1.2 节和 1.3 节重点地归纳了晶闸管-电动机系统和直流脉宽调速系统的主要问题。第 1.4 节开始研究反馈控制的闭环调速系统，首先研究稳态的分析和设计方法，并总结反馈控制规律和一些实际问题。第 1.5 节则应用经典的自动控制理论解决调速系统的动态分析和设计。第 1.6 节讨论无静差调速系统，并总结积分控制规律和比例积分控制规律。第 1.7 节介绍采用电压反馈和电流补偿的调速系统，并总结补偿控制规律。

1.1 直流调速系统用的可控直流电源

变压调速是直流调速系统的主要方法，调节电枢供电电压需要有专门的可控直流电源。常用的可控直流电源有以下三种：

- 1) 旋转变流机组。用交流电动机和直流发电机组成机组，获得可调的直流电压。
- 2) 静止式可控整流器。用静止式的可控整流器获得可调的直流电压。
- 3) 直流斩波器或脉宽调制变换器。用恒定直流电源或不控整流电源供电，利用电力电子开关器件斩波或进行脉宽调制，产生可变的平均电压。

下面分别对各种可控直流电源及由它供电的直流调速系统作概括性的介绍。

1.1.1 旋转变流机组

图 1-1 所示为旋转变流机组和由它供电的直流调速系统原理图。由交流电动机（异步机或同步机）拖动直流发电机 G 实现变流，由 G 给需要调速的直流电动机 M 供电，调节 G 的励磁电流 i_f 即可改变其输出电压 U ，从而调节电动机的转速 n 。这样的调速系统简称 G-M 系统，国际上通称 Ward-Leonard 系统。为了给 G 和 M 提供励磁电源，通常专设一台直流励磁发电机 GE，可装在变流机组同轴上，也可另外单用一台交流电动机拖动。

对系统的调速性能要求不高时， i_f 可直接由励磁电源供电；要求较高的闭环调速系统一般都应通过放大装置进行控制，如交磁放大机、磁放大器、晶体管电子放大器等。改变 i_f 的方向时， U 的极性和 n 的转向都跟着改变，所以 G-M 系统的可逆运行是很容易实现的。图 1-2 所示为采用变流机组供电时电动机可逆运行的机械特性。由图可见，无论正转减速还是反转减速时都能够实现回馈制动，因此 G-M 系统是可以在允许转矩范围之内四象限

运行的系统。图 1-2 右上角是表示四象限运行的示意图。

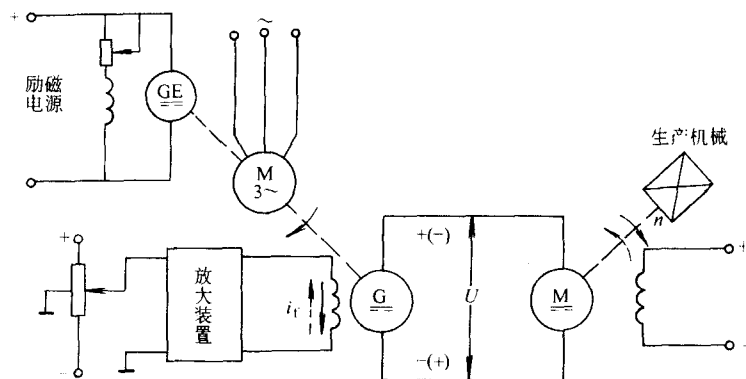


图 1-1 旋转变流机组和由它供电的直流调速系统 (G-M 系统) 原理图

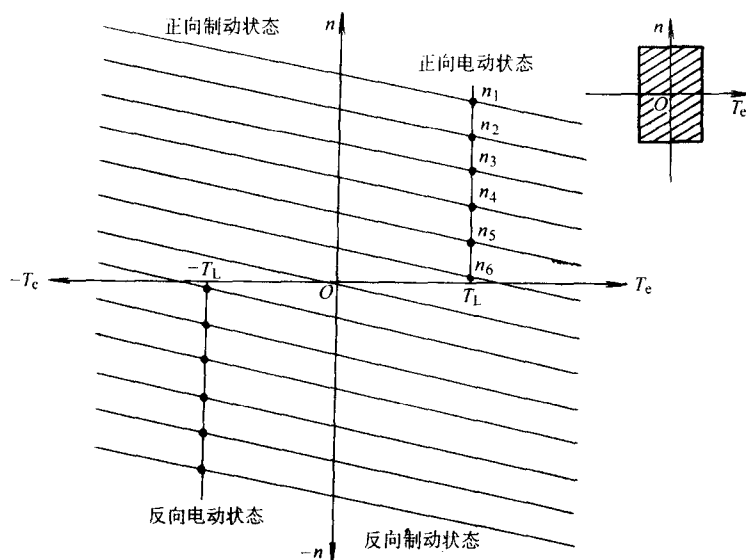


图 1-2 G-M 系统的机械特性

机组供电的直流调速系统在 20 世纪 60 年代以前曾广泛地使用着，但该系统需要旋转变流机组，至少包含两台与调速电动机容量相当的旋转电机，还要一台励磁发电机，因此设备多，体积大，费用高，效率低，安装须打地基，运行有噪声，维护不方便。为了克服这些缺点，在 20 世纪 60 年代以后开始采用各种静止式的变压或变流装置来替代旋转变流机组。

1.1.2 静止式可控整流器

采用闸流管或汞弧整流器的离子拖动系统是最早应用静止式变流装置供电的直流调速系统。它虽然克服了旋转变流机组的许多缺点，而且还大大缩短了响应时间，但闸流管容量小，汞弧整流器造价较高，维护麻烦，万一水银泄漏，将会污染环境，危害人身健康。

1957 年，晶闸管（俗称可控硅整流元件，简称“可控硅”）问世，到了 20 世纪 60 年代，已生产出成套的晶闸管整流装置，逐步取代了旋转变流机组和离子拖动变流装置，使变流技术产生了根本性的变革。图 1-3 所示是晶闸管-电动机调速系统（简称 V-M 系统，

又称静止的 Ward-Leonard 系统) 的原理图。图中 VT 是晶闸管可控整流器, 通过调节触发装置 GT 的控制电压 U_c 来移动触发脉冲的相位, 即可改变平均整流电压 U_d , 从而实现平滑调速。和旋转变流机组及离子拖动变流装置相比, 晶闸管整流装置不仅在经济性和可靠性上都有很大提高, 而且在技术性能上也显示出较大的优越性。晶闸管可控整流器的功率放大倍数在 10^4 以上, 其门极电流可以直接用电子控制, 不再像直流发电机那样需要较大功率的放大器。在控制作用的快速性上, 变流机组是秒级, 而晶闸管整流器是毫秒级, 这将会大大提高系统的动态性能。

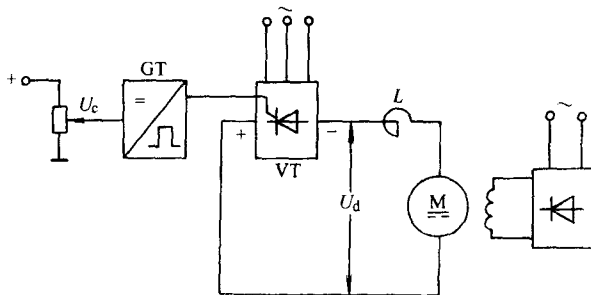


图 1-3 晶闸管-电动机调速系统 (V-M 系统) 原理图

晶闸管整流器也有它的缺点。首先, 由于晶闸管的单向导电性, 它不允许电流反向, 给系统的可逆运行造成困难。由半控整流电路构成的 V-M 系统只允许单象限运行 (图 1-4a), 全控整流电路可以实现有源逆变, 允许电动机工作在反转制动状态, 因而能获得二象限运行 (图 1-4b)。必须进行四象限运行时 (图 1-4c), 只好采用正、反两组全控整流电路, 所用变流设备要增加一倍, 详见第 4 章。

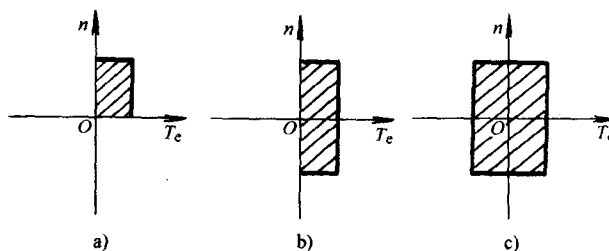


图 1-4 V-M 系统的运行范围

a) 单象限运行 b) 二象限运行 c) 四象限运行

晶闸管的另一个问题是对过电压、过电流和过高的 du/dt 与 di/dt 都十分敏感, 其中任一指标超过允许值都可能在很短的时间内损坏器件, 因此必须有可靠的保护电路和符合要求的散热条件, 而且在选择器件时还应留有适当的余量。现代的晶闸管应用技术已经成熟, 只要器件质量过关, 装置设计合理, 保护电路齐备, 晶闸管装置的运行是十分可靠的。

最后, 谐波与无功功率造成的“电力公害”是晶闸管可控整流装置进一步普及的障碍。当系统处于深调速状态, 即在较低速运行时, 晶闸管的导通角很小, 使得系统的功率因数很低, 并产生较大的谐波电流, 引起电网电压波形畸变, 殃及附近的用电设备, 这就是所谓的“电力公害”。在这种情况下, 必须添置无功补偿和谐波滤波装置^[6]。

1.1.3 直流斩波器或脉宽调制变换器

在干线铁道电力机车、工矿电力机车、城市电车和地铁电机车等电力牵引设备上, 常采用直流串励或复励电动机, 由恒压直流电网供电。过去用切换电枢回路电阻来控制电机的起动、制动和调速, 在电阻中耗电很大。为了节能, 并实行无触点控制, 现在多改用电力电子开关器件, 如快速晶闸管、GTO、IGBT 等。采用简单的单管控制时, 称作直流斩波器, 后来逐渐发展成采用各种脉冲宽度调制开关的电路, 统称脉宽调制变换器。

直流斩波器-电动机系统的原理图示于图 1-5a, 其中 VT 用开关符号表示任何一种电力电子开关器件, VD 表示续流二极管。当 VT 导通时, 直流电源电压 U_s 加到电动机上;

当 VT 关断时，直流电源与电机脱开，电动机电枢经 VD 续流，两端电压接近于零。如此反复，得到电枢端电压波形 $u = f(t)$ ，如图 1-5b 所示，好像是电源电压 U_s 在 t_{on} 时间内被接上，又在 $(T - t_{on})$ 时间内被斩断，故称“斩波”。这样，电动机得到的平均电压为

$$U_d = \frac{t_{on}}{T} U_s = \rho U_s \quad (1-1)$$

式中 T ——功率开关器件的开关周期 (s)；

t_{on} ——开通时间 (s)；

ρ ——占空比， $\rho = t_{on}/T = t_{on}f$ ，其中 f 为开关频率。

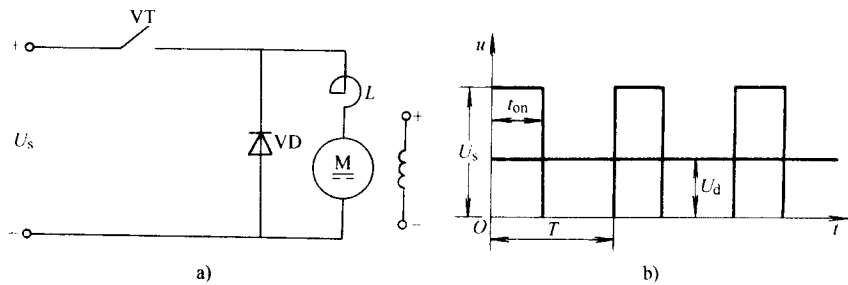


图 1-5 直流斩波器-电动机系统的原理图和电压波形

a) 原理图 b) 电压波形

图 1-6a 给出了一种可逆脉宽调速系统的基本原理图（略去续流二极管），由 $VT_1 \sim VT_4$ 共 4 个电力电子开关器件构成桥式（或称 H 形）可逆脉冲宽度调制（Pulse Width Modulation，简称 PWM）变换器。 VT_1 和 VT_4 同时导通或关断， VT_2 和 VT_3 同时通断，使电动机 M 的电枢两端承受电压 $+U_s$ 或 $-U_s$ 。改变两组开关器件导通的时间，也就改变了电压脉冲的宽度，得到电动机两端电压波形如图 1-6b 所示。

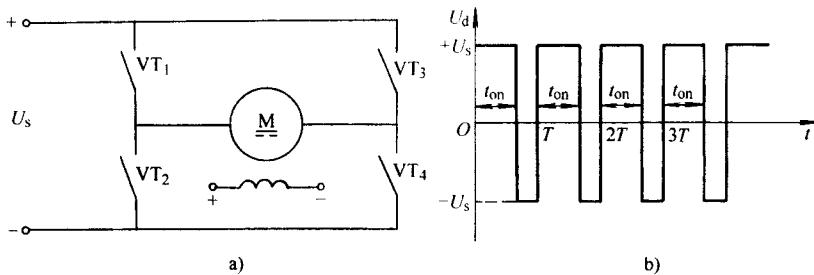


图 1-6 桥式可逆脉宽调速系统基本原理图和电压波形

a) 基本原理图 b) 电压波形

如果用 t_{on} 表示 VT_1 和 VT_4 导通的时间，开关周期 T 和占空比 ρ 的定义和上面相同，则电动机电枢端电压平均值为

$$U_d = \frac{t_{on}}{T} U_s - \frac{T - t_{on}}{T} U_s = \left(\frac{2t_{on}}{T} - 1 \right) U_s = (2\rho - 1) U_s \quad (1-2)$$

1.2 晶闸管-电动机系统（V-M 系统）的主要问题

V-M 系统本质上是带 R 、 L 、 E 负载的晶闸管可控整流电路，关于它的电路原理、电压和电流波形、机械特性等问题，都已在“电力电子技术”课程中讲授。为了承上启下，本

节按照分析和设计直流调速系统的需要,重点归纳V-M系统的几个主要问题:①触发脉冲相位控制;②电流脉动及其波形的连续与断续;③抑制电流脉动的措施;④V-M系统的机械特性;⑤晶闸管触发和整流装置的放大系数和传递函数。

* 1.2.1 触发脉冲相位控制

在图1-3的V-M系统中,调节控制电压 U_c ,从而移动触发装置GT输出脉冲的相位,即可方便地改变可控整流器VT输出瞬时电压 u_d 的波形,以及输出平均电压 U_d 的数值。如果把整流装置内阻 R_{rec} 移到装置外边,看成是其负载电路电阻的一部分,那么,整流电压便可以用其理想空载瞬时值 u_{d0} 和平均值 U_{d0} 来表示,相当于用图1-7所示的等效电路代替图1-3的实际主电路。这时,瞬时电压平衡方程式可写作

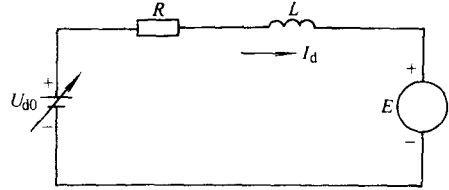


图 1-7 V-M 系统主电路的等效电路图

$$u_{d0} = E + i_d R + L \frac{di_d}{dt} \quad (1-3)$$

式中 E ——电动机反电动势 (V);

i_d ——整流电流瞬时值 (A);

L ——主电路总电感 (H);

R ——主电路等效电阻 (Ω), $R = R_{rec} + R_a + R_L$;

R_{rec} ——整流装置内阻 (Ω), 包括整流器内部的电阻、整流器件正向压降所对应的电阻、整流变压器漏抗换相压降相应的电阻;

R_a ——电动机电枢电阻 (Ω);

R_L ——平波电抗器电阻 (Ω)。

对 u_{d0} 进行积分, 并求一个周期内的平均值, 即得理想空载整流平均电压 U_{d0} 。

用触发脉冲的相位角 α 控制整流电压的平均值 U_{d0} 是晶闸管整流器的特点。 U_{d0} 与触发脉冲相位角 α 的关系因整流电路的形式而异, 对于一般的全控整流电路, 当电流波形连续时, $U_{d0} = f(\alpha)$ 可用下式表示。

$$U_{d0} = \frac{m}{\pi} U_m \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha \quad (1-4)$$

式中 α ——从自然换相点算起的触发脉冲控制角;

U_m —— $\alpha = 0$ 时的整流电压波形峰值 (V);

m ——交流电源一周内的整流电压脉波数。

对于不同的整流电路, 它们的数值见表 1-1。

表 1-1 不同整流电路的整流电压波形峰值、脉波数及平均整流电压

整流电路	单相全波	三相半波	三相全波	六相半波
U_m	$\sqrt{2}U_2^{\text{①}}$	$\sqrt{2}U_2$	$\sqrt{6}U_2$	$\sqrt{2}U_2$
m	2	3	6	6
U_{d0}	$0.9U_2 \cos \alpha$	$1.17U_2 \cos \alpha$	$2.34U_2 \cos \alpha$	$1.35U_2 \cos \alpha$

① U_2 是整流变压器二次侧额定相电压的有效值。