

广东省高等学校“九五”规划重点教材

电力拖动自动控制系统

编写

冯焱生

邓则名

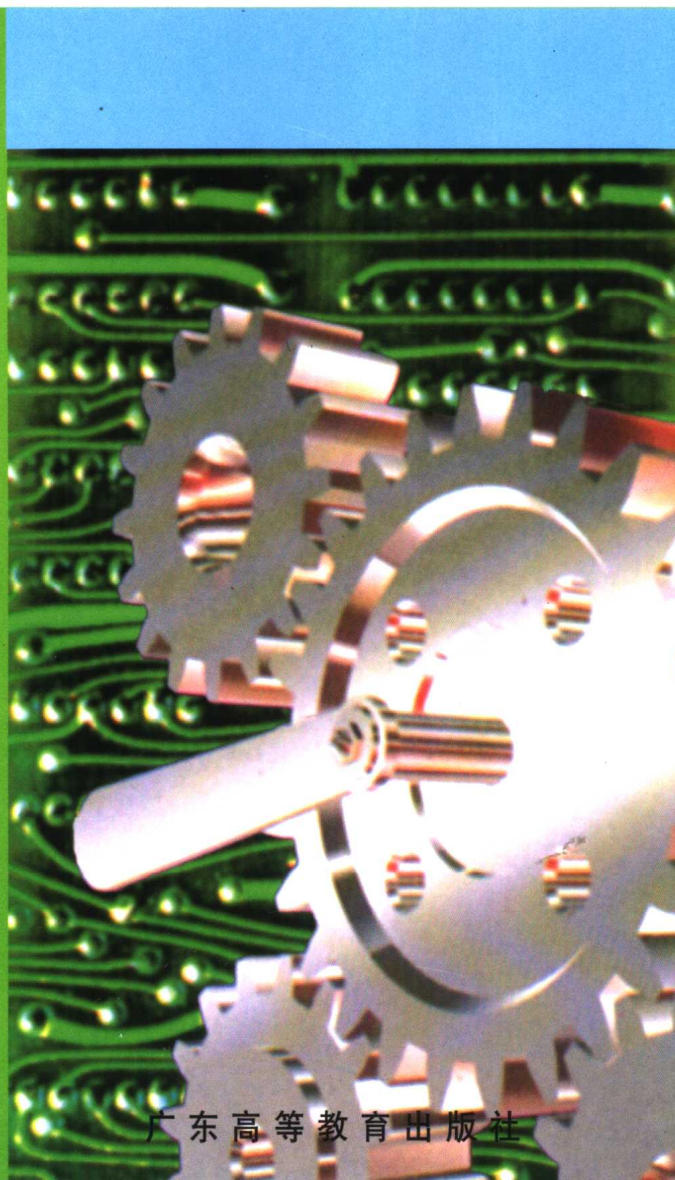
沈起奋

陈林康

主编

冯焱生

邓则名



1.5

广东高等教育出版社

广东省高等学校“九五”规划重点教材

电力拖动自动控制系统

主编：冯焱生 邓则名
编写：冯焱生 邓则名
沈起奋 陈林康

广东高等教育出版社
·广州·

图书在版编目 (CIP) 数据

电力拖动自动控制系统/冯焱生, 邓则名主编. —广州: 广东高等教育出版社, 1998. 8
广东省高等学校“九五”规划重点教材

ISBN 7-5361-2206-3/TP·30

I. 电… II. ①冯… ②邓… III. 电力拖动自动控制系统-高等学校-教材
IV. TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 10772 号

广东高等教育出版社出版发行

广东农垦总局印刷厂印刷

开本: 787mm×1092mm 1/16 19.5 印张 448 千字

1998 年 9 月第 1 版 1998 年 9 月第 1 次印刷

2003 年 6 月第 2 次印刷

印数: 1301~2300

定价: 28.00 元

前 言

《电力拖动自动控制系统》是工业自动化专业的主干课程，也是重要的专业课程。根据广东省“九五”期间重点教材建设规划（即“1352工程”中重点建设100本教材）的要求，经过评选，本书被入选为广东省高等院校重点建设教材之一。我校工业自动化专业是1958年创办的，是广东省最早创办的这一类专业，1986年被批准建立工业自动化硕士点，1993年工业自动化学科被评定为省级重点学科，《自动控制系统》被评定为省级重点课程。我校电气工程及自动化系的教师积极开展科学研究和技术开发工作，在电力电子技术、计算机控制技术、现代交直流调速系统等方面，取得了多项科研和推广应用的成果。同时不断深化教学改革和开展教学研究，并取得了一些可喜的成绩。本书就是根据《电力拖动自动控制系统》的教学大纲、多年来的教学和科研经验的总结、本学科发展的趋势和广东的省情与特色、并吸收有关教材中的优点及参考有关文献的内容编写而成的。本书有如下的主要特点：

一是交直流调速系统相结合。根据学科性和系统性，把属于电气传动领域的直流调速和交流调速这两种系统（以往一般分设为两门课程）合在一起编写，便于对这两种调速系统进行比较和理解，又可节省学时。这也是对课程结构改革的尝试。

二是常用的技术内容和先进的技术内容相结合。精选直流调速系统的内容，增加直流脉宽调速和微机控制调速的内容，编入新型绕线式异步电动机串级调速、无速度传感器矢量控制和直接转矩控制方面的内容，对课程内容进行了改革与优化。这样有利于毕业后从事这方面工作的学生较容易上手，也使学生有一定的知识储备，适应学科和应用技术的发展。

三是理论与实践相结合。本课程基础理论性和工程实用性强，本书在阐述理论的基础上，也适量列举工程设计和应用实例。这有利于学生学懂理论和掌握应用。

四是深入浅出、便于教学。本书作为高等学校教材，编者根据多年的教学经验，力求做到优化课程结构，深入浅出，通俗易懂，并在每章后面附有适量习题，便于教和学。

本书共有两篇十章。第一篇介绍直流调速系统，主要内容包括单闭环有静差和无静差、双闭环与多闭环、不可逆与可逆、相位控制、脉宽调制和计算机控制的调速系统，调速系统的工程设计方法。第二篇阐述交流调速系统，主要内容有：异步电动机一般变频调速与矢量控制变频调速系统以及微机控制变频调速系统，同步电动机调速系统、绕线式异步电动机串级调速系统和交流调压调速系统等。本书着重阐述各种交直流调速系统的基础理论、组成结构、工作原理、特性性能、适用场合、工程设计、典型应用。

本书的第一、第二章和第四章第一至第五节由邓则名副教授编写。第三章、第四章第六节和第九章由沈起奋副教授编写。第五、第六和第十章由陈林康副教授编写，第七、第八章由冯焱生教授编写。全书由冯焱生和邓则名担任主编。

本书为高等学校工业自动化及相近本科专业《电力拖动自动控制系统》或类似课程的教材，部分章节的内容也可作为工业自动化硕士研究生的参考教材。此外，本书也可

作为大专层次工业自动化或类似专业《自动控制系统》课程的选用教材（选讲其中一部分章节），并可作为电气工程及自动化技术人员的参考书。

本书在编写过程中得到广东省教育厅教学处、广东高等教育出版社、广东工业大学教务处、电气工程及自动化系的大力支持，本书第一篇由梁慧冰教授审阅，第二篇由符曦教授审阅，两位主审提出不少宝贵的意见，自动化教研室的教师们对本书的编写也提出了许多有益的意见，机械工业出版社贡克勤高级工程师审阅了全书插图并安排人员描绘，华南师范大学学报副主编、编委会副主任赵端程编审对全书进行了认真的编审并提出了许多宝贵的意见，广东高等教育出版社李敏康副编审对本书的编写和出版作了精心的指导，硕士研究生王俊峰帮编者做了许多具体工作。在此，向上述单位、个人和所列主要参考文献的作者一并表示深切的谢意！

由于编者水平有限，书中难免有错误或不当之处，真诚敬请读者批评指正。

编 者

1998年3月于广州

广东工业大学

常用符号说明

一 元件和装置的符号 (根据国标 GB7159-87)

A	放大器	ACR	电流调节器
ADR	电流变化率调节器	AE	电势运算器
AER	电势调节器	AFR	励磁电流调节器
AR	反号器	ASR	转速调节器
A/D	模/数转换器	AΦR	磁通调节器
BQ	位置变换器	BHL	霍尔电流传感器
C	电容器	D/A	数/模转换器
DLC	逻辑控制器	DPZ	零电流检测器
FU	熔断器	GT	触发装置
GTF	正组触发装置	GTR	反组触发装置
HTL	与非门	I	积分调节器
KM	接触器	KA	继电器
KF	正向继电器	KMF	正向接触器
KMR	反向接触器	K/P	直角坐标/极坐标变换器
KR	反向继电器	L	电抗器
L _c	环流电抗器	L _d	平波电抗器
M	电动机	P	比例调节器
PG	速度传感器	PI	比例积分调节器
PID	比例积分微分调节器	PS	位置检测器
R	电阻器	ROM	只读存储器
RP	电位器		
T	变压器	TA	电流互感器
TC	测速发电机	TI	逆变变压器
TV	电压互感器	TVD	直流电压隔离变压器
U	变流器	UI	逆变器
UR	整流器	V	开关性器件: 晶体管、晶闸管等
VD	二极管	VF	正组晶闸管
VR	反组晶闸管、矢量旋转变换器	VT	晶闸管、IGBT 元件、晶体三极管等
VST	稳压器	3/2	三相/二相变换器
2s/2r	二相静止坐标/旋转坐标变换器		

二 物理量与参数的符号

C	输出被控量	C_e	电动机电势转速比
C_M	电动机转矩常数	C_∞	输出被控变量稳态值
D	调速系统调速范围	D_{cl}	闭环系统调速范围
D_{op}	开环调速系统调速范围	E	反电动势、感应电动势
F	磁动势	f	频率
GD^2	飞轮惯量	h	开环频率特性中频宽
I, i	电流	I_{bl}	堵转电流
I_e	环流	I_a, i_a	电枢电流平均值, 瞬时值
I_{cp}	瞬时脉动环流中直流分量	I_{cr}	截止电流
I_L	负载电流	I_d, i_d	电枢电流、整流电流的平均值, 瞬时值
I_n	额定电流	I_0	零电流检测最小电流
K	控制系统各环节的放大倍数	K_e	直流电动机的结构常数
J	转动惯量	K_i	电流调节器比例放大系数
K_1	电流环开环增益	K_m	直流电动机转矩结构常数
K_n	转速调节器的比例放大系数	K_N	转速环的开环增益
K_p	放大器及PI调节器放大倍数	K_s	晶闸管整流装置放大系数
L_s	自感(定子)	L_m	互感
L_r	自感(转子)	m	整流电压在一周内的脉动次数
M_r	闭环系统幅频特性峰值	n	转速
n_n	电机额定转速	n_0	理想空载转速, 同步转速
n_∞	电机稳态转速	P	功率, 磁极对数
P_s	转差功率	p, s	微分算子, d/dt
R	电枢回路总电阻	R_a	电枢电阻
R_r	整流装置等效电阻	S	转差率、静差率
T	时间常数, 开关周期, 转矩	T_L	负载转矩
T_1	电磁时间常数	T_m	机电时间常数, 最大转矩
t_s	调节时间	T_S	晶闸管平均失控时间
t_v	恢复时间	T_Σ	小时间常数之和
U, u	电压有效值, 瞬时值	U_{ct}	触发装置控制电压
U_b	晶体管基极驱动电压	U_c	环流电压
U_d, u_d	整流电压	U_{d0}	理想空载整流电压
U^*	给定电压	U_e	电势反馈电压

U_{ex}	输出电压	U_{in}	输入电压
U_i	电流反馈电压	U_{if}	励磁电流反馈电压
U_n	转速反馈电压, 电动机额定电压	U_T	转矩极性鉴别器输出电压
U_Z	零电流检测器输出电压	$W(S)$	传递函数
$W_{cl}(S)$	闭环传递函数	$W_{op}(S)$	开环传递函数
X	电抗	Z	阻抗
α	转速反馈系数, 交流装置控制角	β	电流反馈系数, 交流装置逆变角
α, β	两相静止坐标系	M, T	两相旋转坐标系
γ	电压反馈系数, 相角裕量, 换流重叠角	γ_0	换流提前角
Δn	转速降落	ΔU	偏差电压
δ	脉冲宽度, 换流裕量角	$\delta\%$	超调量
η	效率	θ	电角位移, 相位角, 晶闸管导通角
λ	电机允许过载倍数	ρ	电位器分压比, 占空比
τ	时间常数	Φ	磁通, 磁通矢量值
$\hat{\Phi}$	磁通观测值	φ	相位角, 阻抗角
Ψ, ψ	磁链	Ω	机械角速度
ω	电角速度, 角频率	$\hat{\omega}$	速度观测值
ω_b	闭环特性通频带	ω_c	开环频率特性截止频率
ω_n	自然振荡角频率		

三 常用下角标

a	电枢	d	整流
cl	闭环	ex	输出
F, f	正(向、组), 磁场	in	输入
L	负载	m	峰值
max	最大值	min	最小值
n	额定值	op	开环
R, r	反(组、向), 转子	0	空载
1	定子, 一次侧	2	转子, 二次侧

注: 上面仅列出本书中主要的常用符号, 其余的在书中均有说明。

目 录

第一篇 直流调速系统

第一章 单闭环直流调速系统	(1)
第一节 开环直流调速系统及调速指标	(1)
一、直流电动机的调速方法和方案	(1)
二、晶闸管——直流电动机开环调速系统	(2)
三、V-M系统的机械特性	(2)
四、生产机械对转速控制的要求及调速指标	(4)
五、开环调速系统存在的问题	(5)
第二节 转速负反馈单闭环有静差直流调速系统	(6)
一、系统的组成及其工作原理	(6)
二、闭环系统的静特性	(6)
三、开环系统机械特性与闭环系统静特性相比较	(7)
四、静态参数计算举例	(9)
五、闭环控制系统的基本特征	(12)
六、单闭环有静差调速系统的动态分析	(13)
第三节 带电流截止负反馈环节的转速闭环调速系统	(18)
一、系统的组成和工作原理	(18)
二、系统的静特性及参数选择	(18)
三、几点说明	(20)
第四节 带有电压负反馈和电流正反馈的调速系统	(21)
一、电压负反馈调速系统	(21)
二、带有电压负反馈和电流正反馈的调速系统	(22)
第五节 无静差调速系统及调节器	(23)
一、积分调节器和积分控制规律	(23)
二、比例积分调节器和控制规律	(24)
三、采用PI调节器的单闭环无静差调速系统	(27)
第六节 自动调速系统中的检测环节	(29)
一、转速检测环节	(29)
二、电流检测环节	(30)
三、电压检测环节	(32)
第七节 小容量有静差直流调速系统应用实例	(34)
习题	(35)

第二章 多闭环和弱磁控制的直流调速系统	(38)
第一节 转速负反馈、电流负反馈双闭环调速系统	(38)
一、转速、电流双闭环调速系统的组成	(38)
二、双闭环调速系统的静特性和稳态参数	(39)
三、双闭环调速系统的动态性能	(41)
第二节 带电流变化率内环的三闭环调速系统	(45)
第三节 弱磁控制的直流调速系统	(48)
一、调压与调磁相配合的调速方式	(48)
二、非独立控制励磁的直流调速系统	(49)
第四节 具有转速自适应调节的弱磁控制调速系统	(50)
习题	(52)
第三章 调速系统的工程设计	(54)
第一节 控制系统的动态性能指标与工程设计的基本思路	(54)
一、控制系统的动态性能指标	(54)
二、工程设计方法的可能性与基本思路	(55)
第二节 典型系统	(56)
一、典型Ⅰ型系统	(56)
二、典型Ⅱ型系统	(60)
三、典型Ⅰ型系统与典型Ⅱ型系统的性能比较	(65)
四、调节器的最佳整定设计法	(65)
第三节 非典型系统的典型化	(67)
一、调节器结构的选择	(67)
二、传递函数的近似处理	(69)
第四节 按工程设计方法设计双闭环调速系统的调节器	(72)
一、电流调节器的设计	(72)
二、转速调节器的设计	(75)
三、转速调节器退饱和时转速超调量的计算	(77)
四、双闭环调速系统的工程设计举例	(79)
第五节 并联微分校正——转速微分负反馈	(82)
一、带转速微分负反馈的双闭环调速系统的基本原理	(82)
二、退饱和时间和退饱和转速	(83)
三、转速微分负反馈参数的工程设计方法	(85)
习题	(85)
第四章 可逆直流调速系统	(87)
第一节 晶闸管——电动机的可逆线路	(87)
一、电枢反接可逆线路	(87)
二、励磁反接可逆线路	(88)
第二节 晶闸管——电动机可逆系统的工作状态和回馈制动	(89)

一、晶闸管装置的整流和逆变工作状态	(89)
二、晶闸管——电动机系统的发电回馈制动	(90)
三、两组反并联晶闸管——电动机系统的工作状态	(91)
第三节 可逆系统中的环流及其控制方法	(92)
一、环流及其种类	(92)
二、直流平均环流的抑制与配合控制	(92)
三、瞬时脉动环流及其抑制方法	(94)
四、消除静态环流的错位法和逻辑控制法	(95)
五、环流的两重性	(95)
第四节 有环流电枢可逆调速系统	(95)
一、 $\alpha = \beta$ 配合控制的自然环流可逆调速系统	(95)
二、可控环流可逆调速系统	(100)
第五节 电枢可逆逻辑无环流调速系统	(102)
一、系统的组成和工作原理	(102)
二、可逆系统对无环流控制器的要求	(103)
三、逻辑无环流控制器 (DLC)	(104)
四、逻辑无环流系统的优缺点和改进方案	(109)
五、DLC 切换过程分析	(113)
第六节 微机控制的直流可逆调速系统	(115)
一、调速系统数字化的必要性	(115)
二、系统结构及工作原理	(116)
习题	(125)
第五章 直流脉宽调速系统	(127)
第一节 脉宽调制变换器	(127)
一、不可逆脉宽调制变换器	(127)
二、可逆脉宽调制变换器	(129)
第二节 脉宽调制变换器的控制电路	(133)
一、三角波振荡器	(133)
二、脉冲形成及脉冲分配器	(134)
三、电力晶体管基极驱动电路	(136)
第三节 双闭环直流脉宽调速系统	(137)
一、脉宽调速系统的开环机械特性	(137)
二、双闭环直流脉宽调速系统	(138)
三、脉宽调速系统最佳开关频率的确定	(139)
四、泵升电压限制电路	(140)
第四节 直流脉宽调速系统实例	(141)
一、采用模拟电路的脉宽调速系统	(141)
二、由集成 PWM 控制器控制的不可逆调速系统	(142)

三、由单片微机控制的不可逆调速系统	(145)
习题	(146)

第二篇 交流调速系统

第六章 异步电动机的一般变频调速系统	(147)
第一节 异步电动机变频调速的控制方式及机械特性	(148)
一、保持 $U_1/f_1 = \text{常数}$ 的恒压频比控制方式	(148)
二、保持 $T_{\max} = \text{常数}$ 的恒磁通控制方式	(150)
三、保持 $P_d = \text{常数}$ 的恒功率控制方式	(151)
四、恒电流控制方式	(152)
第二节 静止变频装置及其工作原理	(152)
一、交一直—交变频装置和交—交变频装置	(153)
二、电压型变频装置和电流型变频装置	(155)
三、 180° 导通型变频装置和 120° 导通型变频装置	(156)
第三节 转速开环的变频调速系统	(159)
一、转速开环的交一直—交电压型变频调速系统	(159)
二、转速开环的交一直—交电流型变频调速系统	(163)
三、转速开环的交—交变频调速系统	(166)
第四节 转速闭环的转差频率控制变频调速系统	(167)
一、转差频率控制的基本概念	(167)
二、转差频率控制的规律	(168)
三、转差频率控制的变频调速系统	(170)
四、转差频率控制变频调速系统的优缺点	(172)
第五节 脉宽调制型变频调速系统	(172)
一、SPWM 逆变器的工作原理	(173)
二、SPWM 波形成的方法	(176)
三、其它脉宽调制方式	(179)
四、恒幅脉宽调制变频调速系统	(182)
第六节 微机控制 IGBT—PWM 电压型变频调速系统设计	(184)
一、微机控制变频调速系统结构	(184)
二、变频调速系统主电路设计	(185)
三、80C196MC 微机控制系统设计	(188)
四、IGBT 驱动电路	(192)
习题	(196)
第七章 异步电动机矢量控制变频调速系统	(197)
第一节 矢量控制基本原理和应用范围	(197)
一、直流电动机和异步电动机的转矩模型	(197)
二、矢量控制系统和 VVVF 系统、SF 系统的比较	(199)

三、矢量控制系统的优点和应用范围	(200)
第二节 异步电动机的数学模型和坐标变换	(203)
一、异步电动机的基本方程式	(203)
二、异步电动机的几种等效电路	(206)
三、坐标变换	(208)
四、异步电动机在不同坐标系上的数学模型	(212)
第三节 带速度传感器的矢量控制变频调速系统的原理和结构	(214)
一、矢量控制基本方程式	(214)
二、磁链开环、转差型矢量控制变频调速系统的结构和工作原理	(216)
三、系统的单元电路和参数确定	(218)
第四节 无速度传感器矢量控制系统的结构和速度观测理论	(222)
一、无速度传感器矢量控制系统的原理和结构框图	(222)
二、速度间接观测理论	(224)
三、无速度传感器矢量控制系统举例	(225)
四、实验结果及分析	(226)
第五节 异步电动机的直接转矩控制	(232)
一、直接转矩控制技术产生的背景和主要特点	(232)
二、直接转矩控制(DTC)的基本概念	(233)
三、直接转矩控制系统的结构框图	(237)
习题	(238)
第八章 同步电动机调速系统	(239)
第一节 同步电动机调速系统的概述	(239)
一、同步电动机调速系统的发展	(239)
二、同步电动机调速系统的分类	(240)
三、同步电动机和异步电动机调速系统的比较	(242)
第二节 他控式同步电动机变频调速系统和矢量控制系统	(242)
一、交—交变频器供电的同步电动机调速系统	(242)
二、同步电动机的矢量控制系统	(243)
第三节 自控式同步电动机变频调速系统(无换向器电动机)	(246)
一、无换向器电动机概述	(246)
二、无换向器电动机的工作原理	(247)
三、无换向器电动机的换流	(249)
四、机械特性和调速系统	(250)
第四节 永磁同步电动机调速系统	(253)
一、永磁同步电动机的结构	(253)
二、永磁同步电动机的调速原理	(253)
三、永磁同步电动机全数字控制系统	(255)
习题	(256)

第九章 绕线转子异步电动机的串级调速系统	(257)
第一节 串级调速原理	(257)
一、绕线式异步电动机转子附加电动势时的工作	(257)
二、电气串级调速系统	(258)
第二节 串级调速系统的性能	(259)
一、串级调速的机械特性	(259)
二、串级调速装置的容量	(263)
三、串级调速系统的效率与功率因数	(264)
第三节 闭环控制的串级调速系统	(267)
一、双闭环串级调速系统的组成	(267)
二、串级调速系统的动态数学模型	(268)
三、调节器参数的确定	(270)
四、串级调速系统的控制方式	(270)
第四节 串级调速系统的改进线路	(272)
一、逆变器的不对称控制——纵续连接线路	(272)
二、斩波控制串级调速系统	(273)
三、直流回路无平波电抗器的串级调速系统	(274)
第五节 串级调速系统的应用实例	(275)
一、系统的结构及性能	(275)
二、变频定相恒脉宽触发器	(276)
三、应用 PLC 的逻辑控制系统	(278)
习题	(279)
第十章 其它方式的交流调速系统	(281)
第一节 异步电动机的调压调速系统	(281)
一、异步电动机改变电压时的机械特性	(281)
二、三相晶闸管交流调压电路	(283)
三、闭环控制的调压调速系统及其静特性	(285)
四、变极调压调速系统	(286)
第二节 滑差电机调速系统	(287)
一、电磁转差离合器的工作原理	(287)
二、滑差电机的机械特性	(288)
三、滑差电机调速系统的组成	(289)
四、调速性能	(290)
习题	(290)
主要参考文献	(292)

第一篇 直流调速系统

电力拖动自动控制系统是以电动机为受控对象，按照生产机械工艺要求进行控制的系统。这类系统的基本组成部分包括电动机、功率器件、控制电器、检测元件和处理信息的微电子器件等。如果采用数字控制方案，还可能包含微型计算机。由于直流电动机具有良好的起动、制动和调速性能，所以，以往在电力拖动调速系统的实际应用中，直流电动机调速系统占主要地位。虽然，近年来交流调速系统发展很快，但是直流调速系统毕竟在理论上和实践上都很成熟，并为学习交流调速系统打下基础。因此应该首先学习掌握直流调速系统。本篇主要阐述直流调速系统的基本理论，单闭环与多闭环、有静差与无静差、不可逆与可逆、相位控制、脉宽调制和计算机控制系统的基本组成和工作原理，调速系统的工程设计方法和自动检测环节。

第一章 单闭环直流调速系统

第一节 开环直流调速系统及调速指标

一、直流电动机的调速方法和方案

直流电动机的转速与其它参量的关系为

$$n = \frac{U_d - I_d R}{K_e \Phi}, \quad (1-1)$$

式中， n 为电动机转速(r/min)； U_d 为电枢电压(V)； I_d 为电枢电流(A)； R 为电枢回路总电阻(Ω)； K_e 为直流电动机的电动势常数； Φ 为励磁磁通(Wb)。

从式(1-1)可见，直流他励电动机的调速方法有三种：(1)改变电枢供电电压 U_d ，通常只能在额定电枢电压以下调节；(2)改变励磁磁通 Φ ，一般只能在额定磁通以下调节，而且往往与调压调速方法配合使用；(3)改变串接于电枢回路中的附加电阻。第三种调速方法损耗较大，机械特性软，故很少应用。工程上常用调压调速方法。

调压调速系统需要供电枢调压用的可控直流电源。常用的可控直流电源有以下几种，相应的直流调速系统(方案)也有下面几种：

(1)旋转变流机组：主要由交流电动机和直流发电机 G 构成的机组，向直流电动机 M 提供可调直流电压。这种系统通常称为旋转变流机组供电的直流调速系统，简称 G-M

系统。

(2) 静止可控整流器：用静止的可控整流器，把交流电整流成为直流电，向 M 提供可调直流电压。如果用晶闸管可控整流器 V 供电，则构成 V-M 直流调速系统，这种系统目前国内外应用广泛，本篇将主要介绍这种系统。

(3) 直流斩波器或脉宽调制变换器：用恒定直流电源供电，利用直流斩波器或脉宽变换器产生可变的平均电压。这种直流调速系统将在第五章中进行介绍。

二、晶闸管——直流电动机开环调速系统

由晶闸管变流装置直接为他励直流电动机供电的系统(简称 V-M 系统)原理图如图 1-1 所示。改变速度给定电压 U_n^* ，则可改变触发器 GT 的输出脉冲相位，就能方便地改变晶闸管整流器 V 的输出直流平均电压 U_d ，进而改变直流电动机的转速。这就是 V-M 系统平滑无级调速的工作原理。这种变电压调速系统只能在基速(即额定励磁条件下电动机的额定转速)以下进行调节。

图中 L 是平波电抗器，主要是用来限制电流脉动并使电枢电流连续。如果由于负载太轻或晶闸管移相控制角 α 较大等原因，使电枢电流 I_d 不连续时，会造成电动机机械特性很软，甚至引起系统振荡，工作不稳定。因此工程上一般都要设置平波电抗器。

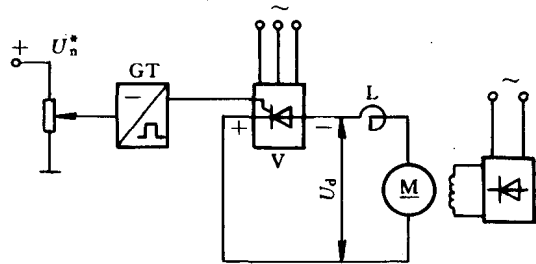


图 1-1 晶闸管整流器供电的直流调速系统(V-M 系统)

与旋转变流机组相比较，晶闸管可控整流装置投资少；可靠性高；功率放大系数大(10^4 以上)，比变流机组的约高三个数量级；控制快速性好，为毫秒级，而变流机组为秒级。

在《电力电子变流技术》课程中已介绍过，晶闸管整流器也有其缺点：怕过电压、怕过电流、怕过高的电压变化率、怕过大的电流变化率，即所谓“四怕”，因此须有可靠的保护装置和符合要求的散热条件；当系统在低速运行时，晶闸管导通角很小，致使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，甚至造成所谓的“电力公害”，在这种情况下，必须增设无功补偿和谐波滤波装置；由于晶闸管的单向导电性，不允许电流反向，这给系统的可逆运行造成困难。开环 V-M 调速系统存在的问题，后面将作介绍。

三、V-M 系统的机械特性

(一) 电流连续时 V-M 调速系统的机械特性

当电枢电流 I_d 连续时，V-M 系统的机械特性方程式为

$$n = \frac{1}{C_e} (U_{d0} - I_d R) = \frac{1}{C_e} \left(\frac{m}{\pi} U_m \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha - I_d R \right), \quad (1-2)$$

式中, $C_e = K_e \Phi_n$ 为电动机在额定磁通下的电动势转速比; U_m 为晶闸管移相控制角 $\alpha = 0$ 时的整流电压波形峰值; m 为交流电源一周内整流电压的波头数; U_{d0} 为整流器理想空载整流输出电压的平均值. U_m 、 m 和 U_{d0} 对于不同整流电路的数值如表 1-1 所示.

表 1-1 不同整流电路的整流电压波峰值、波头数及平均整流电压

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

注: 表中 U_2 为整流变压器二次侧相电压有效值.

由式(1-2)可知, 改变控制角 α , 可得一族相互平行的直线, 如图 1-2 所示, 这就是电流连续时 V-M 调速系统的机械特性, 图中实线部分为电流连续时的机械特性, 虚线部分为假定电流连续时的延伸线, 这时由于电流较小, 电流波形可能断续, 式(1-2)就不适用了. 只要电流连续, 晶闸管可控整流器就可以看成是一个线性的可控电压源.

(二) 电流断续时的 V-M 调速系统机械特性

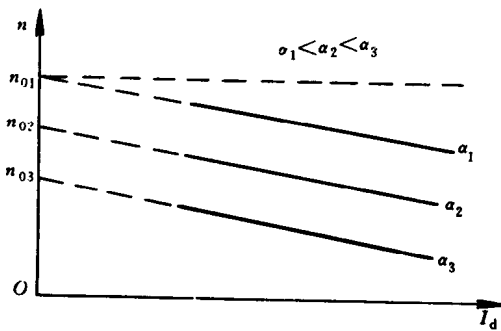


图 1-2 电流连续时 V-M 调速系统的机械特性

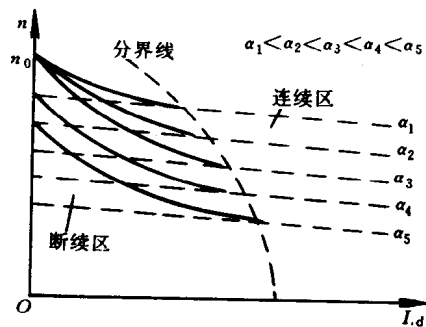


图 1-3 电流断续时 V-M 调速系统的机械特性

当负载电流较小或回路电感量不够大, 致使电动机电流断续时, 调速系统的机械特性变得很复杂, 这里不作分析推导, 读者可查阅有关文献. 此时调速系统机械特性如图 1-3 所示.

比较图 1-2 和 1-3 可见, 电流断续时的机械特性显著特点是: 机械特性很软, 呈显著非线性, 表明晶闸管整流器等效内阻陡增; 理想空载速 n_0 变得较高.