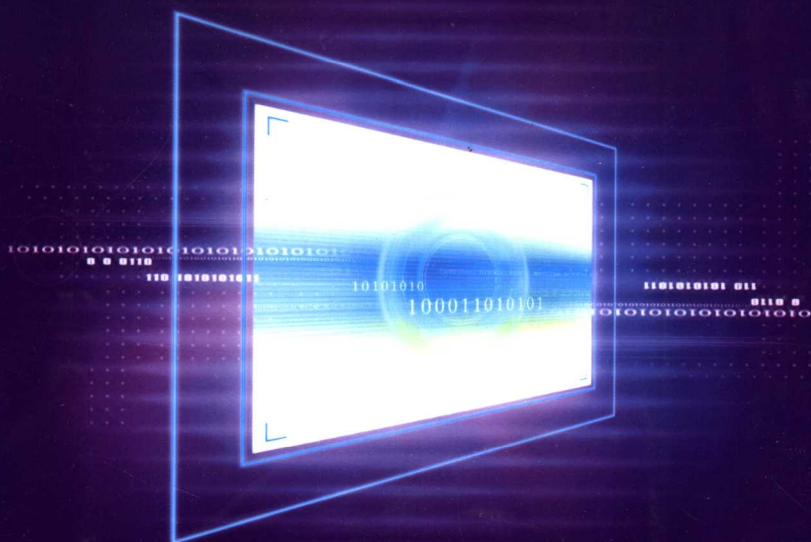




21 世纪高等院校电气信息类系列教材

电力拖动运动 控制系统

刘 军 孟祥忠 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪高等院校电气信息类系列教材

电力拖动运动控制系统

刘 军 孟祥忠 编著



机械工业出版社

本书系统地介绍了电力拖动控制系统的原理、组成、典型控制方案的分析和工程设计方法。全书分三部分：第一部分为直流电动机调速系统，主要介绍单闭环和双闭环直流调速系统的组成，动静特性分析及工程设计方法，可逆系统的组成和动静特性分析 PWM 直流调速；第二部分为伺服系统，主要介绍伺服系统的组成，稳态和动态性能分析，实际伺服系统的配置，开发平台和调试软件工具的选择；第三部分为交流调速系统，主要介绍异步交流电动机的静态和动态数学模型，调速控制方式，重点介绍了压频比恒定控制开环控制系统，转差率闭环控制系统，坐标变换和矢量控制等目前广泛应用的交流调速控制系统。

本书为高等学校自动化、电气工程及机电工程等专业的教材，也可作为电气类职业培训教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力拖动运动控制系统/刘军, 孟祥忠编著. —北京: 机械工业出版社, 2007. 4

(21 世纪高等院校电气信息类系列教材)

ISBN 978-7-111-21300-0

I. 电… II. ①刘…②孟… III. 电力传动—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 (2007) 第 053293 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: 刘亚军 版式设计: 张世琴 责任校对: 申春香

封面设计: 刘吉维 责任印制: 洪汉军

北京瑞德印刷有限公司印刷 (三河市明辉装订厂装订)

2007 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·11.5 印张·282 千字

0001—5000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-21300-0

定价: 20.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379739

封面防伪标均为盗版

出版说明

随着科学技术的不断进步，整个国家自动化水平和信息化水平的长足发展，社会对电气信息类人才的需求日益迫切、要求也更加严格。在教育部颁布的“普通高等学校本科专业目录”中，电气信息类（Electrical and Information Science and Technology）包括电气工程及其自动化、自动化、电子信息工程、通信工程、计算机科学与技术、电子科学与技术、生物医学工程等子专业。这些子专业的人才培养对社会需求、经济发展都有着非常重要的意义。

在电气信息类专业及学科迅速发展的同时，也给高等教育工作带来了许多新课题和新任务。在此情况下，只有将新知识、新技术、新领域逐渐融合到教学、实践环节中去，才能培养出优秀的科技人才。为了配合高等院校教学的需要，机械工业出版社组织了这套“21世纪高等院校电气信息类系列教材”。

本套教材是在对电气信息类专业教育情况和教材情况调研与分析的基础上组织编写的，期间，与高等院校相关课程的主讲教师进行了广泛的交流和探讨，旨在构建体系完善、内容全面新颖、适合教学的专业教材。

本套教材涵盖多层面专业课程，定位准确，注重理论与实践、教学与教辅的结合，在语言描述上办求准确、清晰，适合各高等院校电气信息类专业学生使用。

机械工业出版社

前 言

在工业自动化领域，运动控制占有相当大的比重，小到家用电器，大到冶金企业的钢材轧制过程，几乎涉及所有的行业。电力拖动运动控制系统或称电动机调速系统，分为直流调速系统和交流调速系统。在 20 世纪 70 年代以前，直流调速系统占据绝对的地位，理论和技术都已成熟。但随着电力电子技术和微电子技术的快速发展，从 80 年代开始，交流调速系统逐步得到了应用，所占比重越来越大，到今天已有取代直流调速系统的趋势。

本书的编写原则为精选内容、体系完整、与实际调速技术相结合。其特点是以经典控制理论为分析工具，结合过程控制中的相关概念，分析电动机调速系统的控制方案及动静特性；从理论分析到设计逐步展开，并结合应用实例进行讨论。

全书共分三部分。第一部分（第 1~5 章）为直流调速系统；第二部分（第 6 章）为伺服系统；第三部分（第 7 章）为交流调速系统。各部分之间既紧密相连，又各成体系，可根据教学和实际应用自行选用。

本书强调工程设计和工程应用，在伺服系统的内容上，以实际工业伺服系统为对象，重点研究数字位置速度伺服控制系统的组成、位置速度伺服系统的分析和设计方法，对于伺服驱动器和伺服电动机技术细节，书中涉及不多，仅将其当作控制元件来看待，这样可使学生把主要精力放在系统的组成、控制方案、控制算法的分析上。最后给出实际伺服系统的设计平台和软件开发环境，使学生能够很快适应工程项目的开发和调试。

本书在交流调速内容的选取上，采用少而精和精而实用的原则。以异步电动机为研究对象，以电动机的静动数学模型为出发点，介绍交流调速控制方式的原理，重点介绍压频比恒定控制、转差率闭环控制原理及实现、坐标变换和矢量控制。交流调速部分的内容只涉及异步电动机的调速而未涉及其他，这样做的目的是使学生能集中精力学习和理解交流调速的实质。

由于作者水平有限，书中可能存在一些错误、不妥之处，敬请读者批评指正。

作 者

目 录

出版说明

前言

第1章 单闭环直流调速控制

系统	1
1.1 直流电动机的调速方法	1
1.1.1 改变电枢电压调速	1
1.1.2 弱磁调速	2
1.1.3 改变电枢回路电阻调速	3
1.2 直流调速用的可控直流电源	3
1.2.1 晶闸管可控整流器	3
1.2.2 直流斩波器和脉宽调制变换器	4
1.3 晶闸管-电动机调速系统的 特殊问题	5
1.3.1 电压和电流的脉动	5
1.3.2 电流脉动的影响及其抑制措施	6
1.3.3 电流波形的连续与断续	7
1.3.4 晶闸管-电动机调速系统的机械 特性	7
1.4 单闭环调速系统各环节的模型 和稳态性能分析	8
1.4.1 转速控制的要求和调速指标	8
1.4.2 开环调速系统的性能和存在的 问题	9
1.4.3 调速系统各环节的模型	9
1.4.4 开环系统机械特性和闭环系统 静特性的比较	15
1.4.5 单闭环调速系统的基本性质	16
1.5 限流保护——电流截止负 反馈	17
1.5.1 问题的提出	17
1.5.2 电流截止负反馈环节	18
1.5.3 带电流截止负反馈的闭环调速系统 和静特性	18
1.6 无静差调速系统比例积分 控制规律	20
1.6.1 比例积分控制器的控制规律	20

1.6.2 稳态抗扰误差分析	22
1.7 电压反馈、电流补偿控制的 调速系统	25
1.7.1 电压负反馈调速系统	25
1.7.2 电流正反馈和补偿控制规律	26
1.7.3 电流补偿控制调速系统的数学模 型和稳定条件	28
1.7.4 负载电流前馈、转速反馈的调速 系统	29
习题	30
第2章 转速、电流双闭环直流调速 系统	33
2.1 转速、电流双闭环调速系统及 其静特性	33
2.1.1 转速、电流双闭环调速系统的 组成	33
2.1.2 双闭环直流调速系统稳态结构图 和静特性	34
2.1.3 各变量的稳态工作点和稳态参数 计算	35
2.2 双闭环调速系统的动态 性能	36
2.2.1 双闭环直流调速系统动态数学 模型	36
2.2.2 双闭环直流调速系统动态过程 分析	36
2.2.3 动态性能和两个控制器的 作用	38
2.3 转速超调的抑制——转速微分 负反馈	40
2.4 弱磁控制的直流调速系统	41
2.4.1 电枢电压与励磁配合控制	41
2.4.2 非独立控制励磁的调速系统	42
习题	44
第3章 直流调速系统的工程设计 方法	46

3.1 直流调速系统的指标	46	和组成	83
3.1.1 控制系统的动态性能指标	46	4.5.2 可逆系统对无环流逻辑控制器	
3.1.2 典型Ⅰ型系统结构及其参数和		的要求	84
性能指标的关系	47	习题	86
3.1.3 典型Ⅱ型系统结构及其参数和		第5章 PWM 直流调速系统	87
性能指标的关系	51	5.1 脉宽调制变换器	87
3.2 直流调速系统模型的典型化		5.1.1 基本概念	87
处理	56	5.1.2 脉宽调制变换器的工作原理	87
3.2.1 小惯性环节的近似处理	56	5.2 脉宽调速系统的特殊问题	90
3.2.2 高阶系统的降阶处理	57	5.2.1 电流脉动量	90
3.2.3 大惯性环节的近似处理	58	5.2.2 转速脉动量	91
3.3 直流调速系统的工程设计		5.2.3 脉宽调制器和脉宽调制变换器的	
方法	58	传递函数	92
3.3.1 带给定滤波的双闭环直流调速		5.2.4 电力晶体管的开关损耗与开关	
系统结构	58	频率	93
3.3.2 电流环的等效闭环传递函数	59	5.2.5 泵升电压限制电路	94
3.3.3 电流控制器的设计	60	5.3 脉宽调速系统组成	95
3.3.4 转速控制器的设计	62	习题	95
3.3.5 转速控制器的实现	64	第6章 伺服系统原理与设计	96
3.3.6 转速控制器退饱和时转速超调量		6.1 位置伺服系统	96
的计算	65	6.1.1 位置伺服系统的应用	96
3.3.7 设计举例	68	6.1.2 位置伺服系统的主要组成部件及	
习题	71	其工作原理	96
第4章 可逆调速系统	73	6.1.3 位置伺服系统与调速系统的	
4.1 可逆调速系统结构	73	比较	97
4.2 晶闸管可逆调速系统的回馈		6.2 位置信号的检测	97
制动	74	6.3 伺服电动机	99
4.2.1 晶闸管装置的整流和逆变状态	74	6.3.1 直流伺服电动机的性能	99
4.2.2 晶闸管-电动机调速系统中实现		6.3.2 交流伺服电动机的实用特性	100
发电回馈制动	76	6.4 伺服驱动器	100
4.3 两组晶闸管可逆线路中的环流 ..	77	6.5 伺服控制系统稳态性能分析	104
4.3.1 环流及其种类	77	6.5.1 各环节传递函数	104
4.3.2 无直流平均环流的配合控制	77	6.5.2 位置单闭环比例控制时的稳态误	
4.3.3 瞬时脉动环流及其抑制	78	差分析	105
4.4 有环流可逆调速系统特性		6.5.3 位置单闭环比例积分控制时的稳	
分析	80	态误差分析	106
4.4.1 $\alpha = \beta$ 配合控制的有环流可逆调速		6.6 复合控制伺服系统的设计	107
系统的基本结构	80	6.6.1 位置、速度、电流三环控制	
4.4.2 制动过程分析	81	系统	107
4.5 逻辑无环流可逆调速系统	83	6.6.2 复合控制——负载干扰前馈、	
4.5.1 逻辑无环流可逆调速系统原理		位置反馈伺服控制系统	108

6.6.3 复合控制——位置参考顺馈、位置反馈伺服控制系统	109	空间矢量	148
6.6.4 复合控制——顺馈、前馈、位置反馈伺服控制系统	110	7.4.4 六拍阶梯波逆变器供电的电动机的旋转磁场	150
6.6.5 复合控制设计实例	110	7.5 异步电动机变频调速系统	152
6.7 伺服系统调试环境	113	7.5.1 电压与频率恒定控制的转速开环调速系统	152
6.7.1 Trio Motion 运动控制器的功能	114	7.5.2 转差率控制的转速闭环调速系统	153
6.7.2 伺服控制系统的配置	117	7.6 异步电动机的矢量控制	155
6.7.3 伺服系统的注意事项	121	7.6.1 矢量控制的基本思想	155
6.7.4 Trio Motion 运动控制器的设置和编程	122	7.6.2 坐标变换	156
习 题	132	7.6.3 二相坐标系上交流电动机的数学模型	158
第7章 交流调速系统	133	7.6.4 转子磁场定向矢量控制方程	159
7.1 概述	133	7.6.5 矢量控制调速系统的实现	160
7.1.1 交流调速系统与直流调速系统的比较	133	7.7 无速度传感器矢量控制调速	161
7.1.2 交流调速系统的主要应用领域	135	7.7.1 速度估计器	161
7.2 交流电动机数学模型	135	7.7.2 基于电压控制的无速度传感器矢量控制结构	162
7.2.1 交流电动机的数学模型	135	7.8 通用变频器实例	162
7.2.2 异步交流电动机动态数学模型	137	7.8.1 控制模式	162
7.3 交流电动机调速方式及特性	140	7.8.2 控制性能指标	165
7.3.1 恒压恒频调速控制方式	140	7.8.3 硬件配置	166
7.3.2 电压与频率协调调速控制方式	140	7.8.4 TD3000 变频器的配件	168
7.3.3 恒功率调速和特性	142	7.8.5 TD3000 基本配线	170
7.4 变频器	142	7.8.6 操作和运行	173
7.4.1 变频器基本结构	142	习 题	174
7.4.2 变频器主电路的控制方式	144	参考文献	175
7.4.3 六拍阶梯波逆变器的输出电压			

第 1 章 单闭环直流调速控制系统

单闭环直流调速系统是最基本的直流调速方案，但涉及的概念几乎涵盖了调速系统的各个方面，所以它是学习调速系统的基础。本章重点阐述了晶闸管整流装置供电的单闭环直流调速系统的构成和原理，并从直流电动机数学模型入手，分析单闭环调速系统的静动特性和抗扰动特性。

1.1 直流电动机的调速方法

由电机学可知，直流电动机转速关系式为

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

式中 n ——转速 (r/min)；

U ——电枢电压 (V)；

I_d ——电枢回路电流 (A)；

Φ ——励磁磁通 (Wb)；

K_e ——电动机结构常数；

R ——电枢回路总电阻 (Ω)。

由式 (1-1) 可以看出，直流电动机转速的调节有三种方法：调节电枢电压调速；调节励磁调速；改变电枢回路电阻调速。

1.1.1 改变电枢电压调速

直流电动机电枢回路如图 1-1a 所示， R_s 为可控电源内阻， U_{∞} 为电源空载电压。转速方程为

$$n = \frac{U_{\infty}}{C_e} - \frac{I_d R}{C_e} = n_0 - \Delta n \quad (1-2)$$

式中 C_e ——电动机额定磁通下的电动势转速比， $C_e = K_e \Phi$ ；

n_0 ——理想空载转速， $n_0 = \frac{U_{\infty}}{C_e}$ ；

Δn ——转速降， $\Delta n = \frac{I_d R}{C_e}$ ， $R = R_s + R_a$ 为电枢回路总电阻。

改变电枢供电电压 U_{∞} 可以得到一组相互平行的机械特性曲线，如图 1-1b 所示。如果能够连续改变可控电源电压，则电动机转速就可以平滑调节（称为无级调速）。由于电枢回路电阻的存在，实际的转速要比理想空载转速低。负载不变时，电枢电流也不变，转速降也不变。当电压低到一定时（大于零），因转速降的存在，电动机转速降为零。内阻越大，特性就越软，实际的调速范围就越窄。

调压调速时,电动机轴输出功率为

$$P = \frac{Tn}{975} = \frac{1}{975} K_m \Phi I_d n \quad (1-3)$$

当负载为恒转矩负载时,

$$P = Kn \quad (1-4)$$

式中 K ——常数, $K = \frac{1}{975} T$;

T ——电磁转矩,稳定时电磁转矩等于负载转矩 T_L ;

K_m ——电动机转矩系数。

式(1-4)表明,对于恒转矩负载,电动机轴上输出功率与转速成正比。额定转速时对应额定功率。

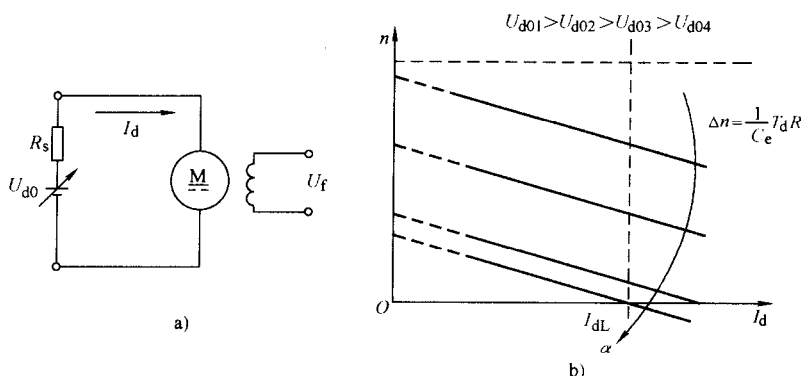


图 1-1 变电枢电压调速特性
a) 电枢电路 b) 机械特性

1.1.2 弱磁调速

由式(1-2)可知,当负载电流(负载转矩)不变时,改变励磁磁通 Φ ,电动机的理想空载转速和转速降都发生变化,因此电动机转速也发生变化。电动机磁通是按额定磁通设计的,如果增大励磁电流,则磁通磁路饱和,所以调磁通调速是在额定磁通以下调节(弱磁)。随着磁通量的减少,空载转速提高,转速降也在提高,机械特性变软,如图 1-2 所示。

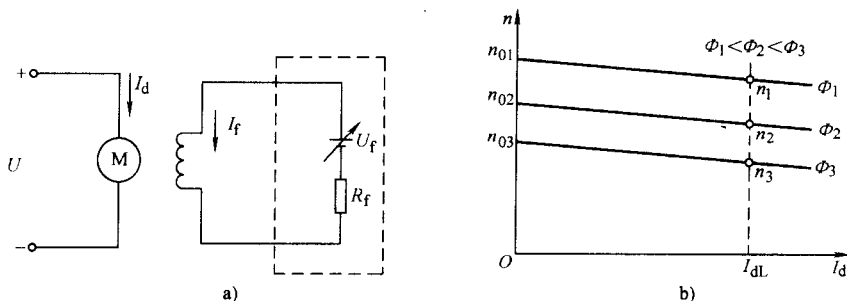


图 1-2 弱磁调速特性
a) 励磁电路 b) 机械特性

弱磁调速时,电动机轴上输出功率如式(1-5)所示,它基本不变,因此弱磁调速适合恒功率性质负载。

$$P = \frac{1}{975} K_m \Phi I_d n = \frac{1}{975} K_m \Phi I_d \frac{U - R I_d}{K_e \Phi} \quad (1-5)$$

1.1.3 改变电枢回路电阻调速

在电枢回路中串接附加电阻,来改变电动机转速关系式(1-2)中的转速降,从而实现调速的目的。这种调速方式的控制电路和机械特性如图1-3所示,其特点如下:

- 1) 理想空载转速不变。
- 2) 特性变软。
- 3) 因电阻很难做到连续可调,所以是有级调速。
- 4) 耗能。

目前,这种调速方式很少采用。

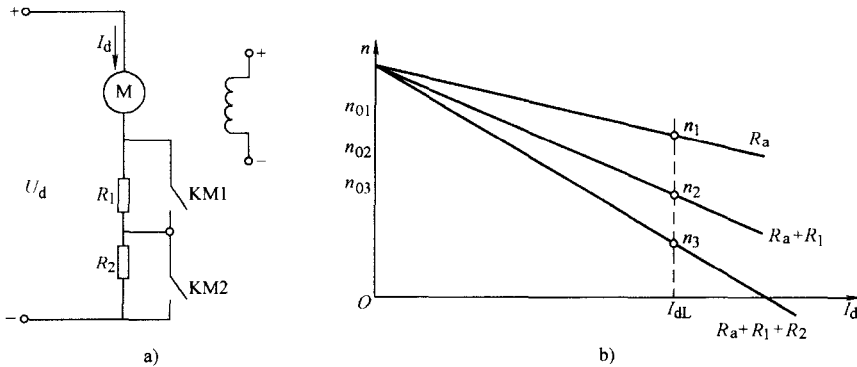


图1-3 变电枢电阻调速特性

a) 电枢电路 b) 机械特性

1.2 直流调速用的可控直流电源

在电枢额定电压以下,改变电枢电压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。目前,常用的可控直流电源有以下两种:

- 1) 晶闸管可控整流器,可以获得可调的直流电压(技术成熟,被广泛采用)。
- 2) 直流斩波器或脉宽调制变换器,用恒定直流电源或不可控整流电源供电,利用直流斩波器或脉宽调制变换器产生可变的平均电压(技术已成熟,调速效果好,但功率受器件容量的限制)。

1.2.1 晶闸管可控整流器

20世纪60年代,晶闸管整流装置的问世,使变流技术产生了根本性变革,出现了晶闸管整流装置供电的直流调速系统,称为晶闸管-电动机调速系统(简称V-M系统)。当前它已成为直流调速系统的主要形式。图1-4是V-M系统的简单原理图,图中VT是晶闸管可

控整流器，它可以是单相、三相或更多相数，半波、全波、半控、全控等类型，通过调节触发装置 GT 的控制电压来移动触发脉冲的相位，即可改变整流电压 U_d ，从而实现平滑调速。晶闸管整流装置的控制作用响应速度快，为毫秒级，提高了系统的动态性能。

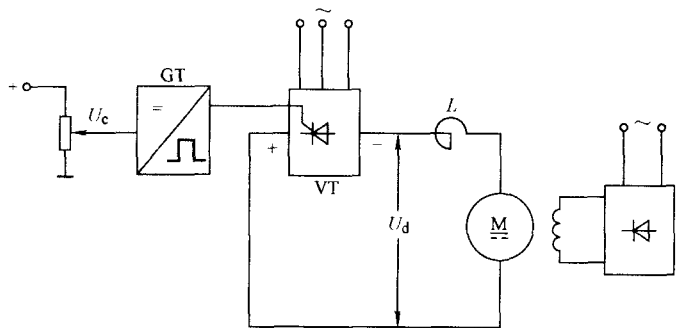


图 1-4 晶闸管可控整流器供电的直流调速系统 (V-M 系统)

晶闸管整流器的缺点是，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 1-5a)；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，因而能够获得两象限运行 (图 1-5b)。如果必须实现四象限运行时 (图 1-5c)，则必须采用正、反两组全控整流电路，所以变流设备要增加一倍，这种 V-M 可逆调速系统将在第 4 章讨论。

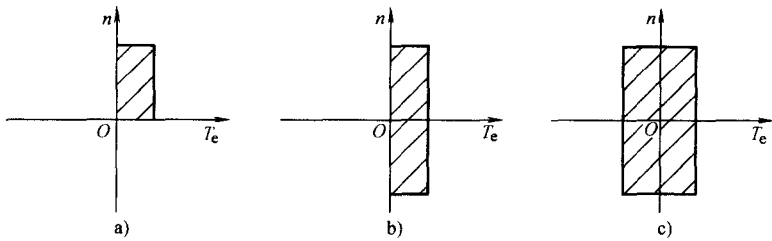


图 1-5 V-M 系统的运行范围
a) 单象限运行 b) 二象限运行 c) 四象限运行

晶闸管的容量已达 4kV/3kA 水平，只要采取技术成熟的保护电路 (限制过电流以及过高的 du/dt 和 di/dt) 符合要求的散热条件，在选择元件时留有足够的余量，晶闸管装置就可以长期可靠运行。

最后，当系统处在深调速状态，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，波及附近的用电设备。如果采用晶闸管调速的设备在电网中所占的容量比重较大，就会造成所谓的“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。

1.2.2 直流斩波器和脉宽调制变换器

自 20 世纪 70 年代以来，出现了性能优良的电力半导体器件，如电力晶体管 (GTR)、电力场效应管 (P-MOSFET) 等。这些功率器件的导通和关断控制电路比较简单，并且已研制出功率器件和驱动电路集成为一体的模块。而由它们构成的斩波器其工作频率可以提高到

1~4kHz, 甚至达到 20kHz。采用电力半导体器件实行开关控制, 对直流电压进行斩波, 输出脉冲宽度可变的直流电压, 这就是近年来应用日益广泛的 PWM 直流调速系统, 或称脉宽调速系统。脉宽调制变换器的电压和电流波形分别如图 1-6 和图 1-7 所示。关于 PWM 直流调速的详细内容在第 5 章介绍。

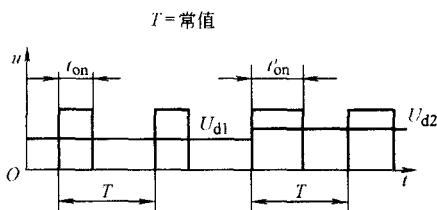


图 1-6 脉宽调制变换器电压波形

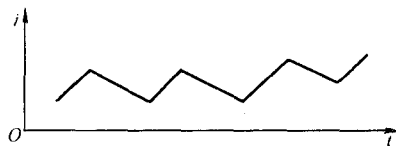


图 1-7 脉冲宽度变换器电流输出波形

与 V-M 系统相比, PWM 调速系统具有下列优点:

1) 由于 PWM 调速系统的开关频率较高, 仅靠电枢电感的滤波作用可能就足以获得脉动很小的直流电源, 电枢电流容易连续, 系统的低速运行平稳, 调速范围较宽, 可达 1:10000。又由于电流波形比 V-M 系统好, 在相同的平均电流即相同的输出转矩下, 电动机的损耗和发热都较小。

2) 同样由于开关频率高, 若与快速响应的电动机相配合, 系统可以获得很宽的频带, 因此快速响应性能好, 动态抗扰能力强。

3) 由于电力电子器件只工作在开关状态, 主电路损耗较小, 装置效率较高。

受器件容量限制, PWM 直流调速系统在大功率调速领域还不及晶闸管调速系统。

1.3 晶闸管-电动机调速系统的特殊问题

晶闸管-电动机调速系统是目前应用最广泛的直流调速系统, 分析及设计的方法比较成熟, 其产品有多种系列。由于晶闸管可控直流电源与理想可调直流电源不同, 存在谐波、电流断续等问题。

1.3.1 电压和电流的脉动

如图 1-8 所示, 直流电动机电枢电压由晶闸管整流电路的可控直流电源供给, 因此电流和电压是脉动的, 其瞬时电压平衡方程为

$$u_{a0} = E + i_d R + L \frac{di_d}{dt} \quad (1-6)$$

式中 L ——主电路总电感;

R ——主电路总的等效电阻, 包括整流装置内阻、电动机电枢电阻和平波电抗器电阻;

E ——电动机反电动势;

i_d ——整流电流瞬时值。

对 u_{a0} 进行积分即得理想空载整流电压的平均值 U_{a0} 。

U_{a0} 与触发脉冲相位 α 的关系因整流电路的形式而异。对于一般全控式整流电路, 当电

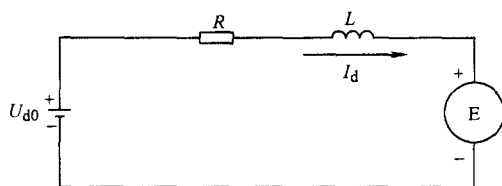


图 1-8 V-M 系统主电路的等效电路图

流波形连续时，整流电压的平均值为

$$U_{d0} = \frac{m}{\pi} U_m \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha \tag{1-7}$$

式中 α ——从自然换相点算起的触发脉冲控制角；

U_m —— $\alpha = 0$ 时的整流电压波峰值；

m ——交流电源一周内的整流电压脉动波数。

对于不同的整流电路，它们的数值如表 1-1 所示。

表 1-1 不同整流电路的整流电压波形峰值、脉动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	$\sqrt{2}U_2$	$\sqrt{2}U_2$	$\sqrt{6}U_2$	$\sqrt{2}U_2$
m	2	3	6	6
U_{d0}	$0.9U_2 \cos \alpha$	$1.17U_2 \cos \alpha$	$2.34U_2 \cos \alpha$	$1.35U_2 \cos \alpha$

在 1000kW 以上的大功率调速系统中常采用双三相桥构成的十二相整流电路，两组桥的交流电源分别由整流变压器的两套二次绕组提供，一套接成 Δ 形，另一套接成 Y 形，使输出相电压相位错开 30° ，共同构成 $m = 12$ 的整流电路（图 1-9），以进一步减少输出电流的脉动分量。

由于这种十二相整流电路结构的特殊性，式（1-7）不再适用。对于图 1-9a 的双桥并联带平衡电抗器电路，平均电压为

$$U_{d0} = 2.34U_2 \cos \alpha \tag{1-8}$$

对于图 1-9b 的双桥串联电路，平均电压为

$$U_{d0} = 4.68U_2 \cos \alpha \tag{1-9}$$

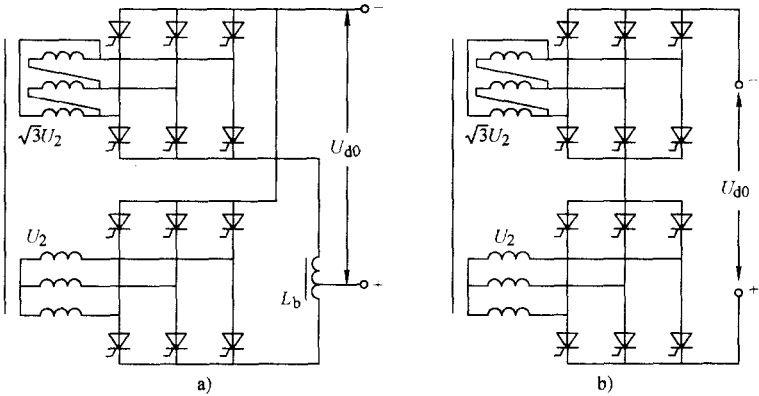


图 1-9 双三相桥构成的十二相整流电路
a) 双桥并联带平衡电抗器 b) 双桥串联

1.3.2 电流脉动的影响及其抑制措施

整流电路的脉动波数 $m = 2、3、6、12$ ，其数目总是有限的，比直流电动机每对极下换向片的数目要少得多。因此，除非主电路 $L = \infty$ ，否则 V-M 系统的电流脉动总是存在的。这样一来，会产生以下两个方面的问题：

- 1) 脉动电流产生脉动的转矩，对生产机械不利。

2) 脉动电流造成较大的谐波分量, 输入电源后对电网不利, 同时也会使电动机发热。在应用 V-M 系统时, 首先要考虑抑制脉动电流的问题, 其主要措施是:

1) 增加整流电路的相数。

2) 设置平波电抗器。

平波电抗器的电感量一般按低速轻载时保证电流连续的条件来选择, 通常给定最小电流 I_{dmin} (以 A 为单位), 再利用它计算所需的总电感量 (以 mH 为单位)。电感量与电路形式有关, 表 1-2 给出了几种电路形式的电感量。

表 1-2 不同电路形式的电感量

单相桥式全控电路	三单相桥式半控电路	三相桥式全控电路
$L = 2.87 \frac{U_2}{I_{dmin}}$	$L = 1.46 \frac{U_2}{I_{dmin}}$	$L = 0.693 \frac{U_2}{I_{dmin}}$

注: I_{dmin} 一般可取电动机额定电流的 5% ~ 10%。

1.3.3 电流波形的连续与断续

由于电流波形的脉动, 可能存在电流连续和断续两种情况, 当 V-M 系统主电路串接的电抗器有足够大的电感量, 而且电动机的负载电流也足够大时, 整流电路的波形便是连续的, 如图 1-10a 所示。当电感较小而且负载较轻时, 一相导通电流上升时电感中的储能较少, 在电流下降而下一相尚未被触发以前, 电流已衰减到零, 便产生波形断续的现象, 如图 1-10b 所示。电流波形的断续给调速系统带来一种非线性因素, 造成机械特性的非线性, 以及系统运行中的一些问题。一般希望尽量避免发生电流断续。

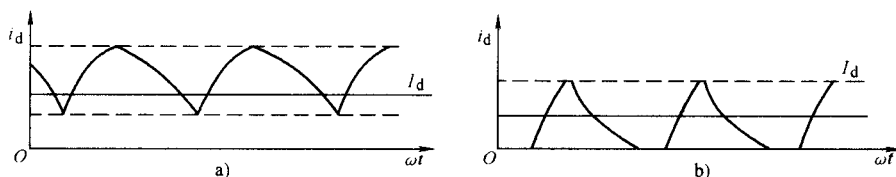


图 1-10 V-M 系统的电流波形
a) 电流连续 b) 电流断续

1.3.4 晶闸管-电动机调速系统的机械特性

当电流连续时, V-M 系统的机械特性方程式为

$$n = \frac{1}{C_e} (U_{d0} - I_d R) = \frac{1}{C_e} \left(\frac{m}{\pi} U_m \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha - I_d R \right) \quad (1-10)$$

式中 C_e ——电动机在额定磁通下的电动势转速比, $C_e = K_e \Phi_{nom}$ 。

改变控制角 α , 得一簇平行直线, 如图 1-11 所示。机械特性上平均电流较小的部分画成虚线, 因为这时电流波形可能不连续, 式 (1-10) 就不适用了。上述结论表明, 只要电流连续, 晶闸管可控整流器就可以被看成是一个线性的可控电压源。

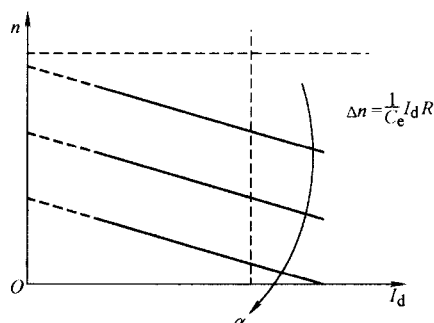


图 1-11 V-M 系统电流连续时的机械特性
(箭头表示 α 增大时, 特性曲线的变化)

当电流断续时,机械特性方程要复杂得多(详见文献[4])。但在实际调速中,通过电枢回路中串入合适的电抗器,可以保证电流的连续性,所以电流断续只是调速系统的特殊工作状态(如轻载、正反转过渡过程)。

1.4 单闭环调速系统各环节的模型和稳态性能分析

1.4.1 转速控制的要求和调速指标

任何需要转速控制的设备或系统,对转速控制的要求可大体归纳为以下三个方面:

1) 调速,在一定的最高转速和最低转速范围内,分档地(有级)或平滑地(无级)调节转速。

2) 稳速,以一定的精度在所需转速上稳定运行,在各种干扰下不允许有过大的转速波动,以确保产品质量。

3) 加、减速,频繁起、制动的设备要求加、减速尽量快,以提高生产率;不宜经受剧烈速度变化的机械则要求起、制动尽量平稳。

以上三个方面有时都需具备,有时只要求其中一项或两项,特别是调速和稳速两项,常常在各种场合下都碰到,可能还是互相矛盾的。为了进行定量分析,可以针对这两项要求先定义两个调速指标,即调速范围和静差率。这两项指标合在一起又称为调速系统的稳态性能。

1. 调速范围

生产机械要求电动机提供的最高转速 $n_{\max}$ 和最低转速 $n_{\min}$ 之比叫做调速范围,用符号 D 表示,即

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} \quad (1-11)$$

其中 $n_{\max}$ 和 $n_{\min}$ 一般都指电动机额定负载时的转速,对于少数负载很轻的机械,如精密机床,也可使用实际负载时的转速。

2. 静差率

当系统在某一转速下运行时,负载由理想空载增加到额定值时所对应的转速降 Δn_{nom} ,与理想空载转速 n_0 之比,称做静差率 s ,即

$$s = \frac{\Delta n_{\text{nom}}}{n_0} \quad (1-12)$$

或用百分数表示

$$s = \frac{\Delta n_{\text{nom}}}{n_0} \times 100\% \quad (1-13)$$

显然,静差率是用来衡量调速系统在负载变化下转速的稳定度。它和机械特性的硬度有关,特性越硬,静差率越小,转速的稳定度就越高。

然而静差率和机械特性硬度又是有区别的。一般调速系统期望不同转速下的机械特性是相互平行的。对于同样硬度的特性,理想空载转速越低时,静差率越大,转速的相对稳定度也就越差,如图 1-12 所示。

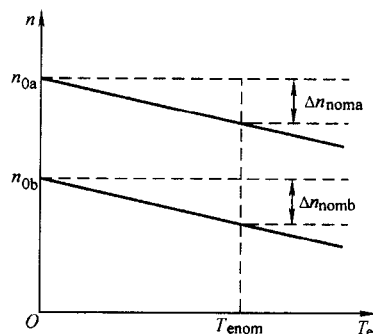


图 1-12 不同转速下的静差率

因此,调速范围和静差率这两项指标并不是彼此孤立的,必须同时提到才有意义。调速系统的静差率指标应以最低速时所能达到的数值为准。

3. 调速范围、静差率和额定速降之间的关系

在直流电动机调压调速系统中,常以电动机额定转速 n_{nom} 为最高转速,若带额定负载时的转速降为 Δn_{nom} ,则按照上面分析的结果,该系统的静差率应该是最低速时的静差率,即

$$s = \frac{\Delta n_{\text{nom}}}{n_{0\text{min}}} \quad (1-14)$$

$$\text{于是 } n_{\text{min}} = n_{0\text{min}} - \Delta n_{\text{nom}} = \frac{\Delta n_{\text{nom}}}{s} - \Delta n_{\text{nom}}$$

调速范围为

$$D = \frac{n_{\text{max}}}{n_{\text{min}}} = \frac{n_{\text{nom}}}{n_{\text{min}}} \quad (1-15)$$

将上面的 n_{min} 式代入,得

$$D = \frac{n_{\text{nom}} s}{\Delta n_{\text{nom}} (1 - s)} \quad (1-16)$$

式(1-16)表示调速范围,静差率和额定速降之间所应满足的关系。对于同一个调速系统,它的特性硬度或 Δn_{nom} 是一定的。因此,由式(1-16)可见,如果对静差率的要求越严格(s 很小),系统能允许的调速范围也越小。例如,某调速系统额定转速 $n_{\text{nom}} = 1430 \text{ r/min}$,额定速降 $\Delta n_{\text{nom}} = 115 \text{ r/min}$,当要求静差率 $s \leq 30\%$ 时,允许的调速范围是

$$D = \frac{1430 \times 0.3}{115 \times (1 - 0.3)} = 5.3$$

如果要求 $s \leq 20\%$,则调速范围只有

$$D = \frac{1430 \times 0.2}{115 \times (1 - 0.2)} = 3.1$$

1.4.2 开环调速系统的性能和存在的问题

在图1-4所示的V-M系统中,以手动调节触发装置GT的控制电压来控制电动机的转速,是开环调速制系统,如果对静差率要求不高,也能实现一定范围内的无级调速。但是,许多需要无级调速的生产机械常常对静差率提出一定的要求。例如,龙门刨床,由于毛坯表面不平,加工时负载常有波动,但为了保证加工精度和表面粗糙度,速度却不允许有较大的变化,一般要求调速范围 $D = 20 \sim 40$,静差率 $s \leq 5\%$ 。又如,热连轧机,各机架轧辊分别由单独的电动机拖动,钢材在几个机架内同时轧制,要求各机架出口线速度保持严格的比例关系,以保证被轧金属的流速相等,才不致造成钢材拱起或拉断,根据工艺要求,须使调速范围 $D = 10$ 时,保证静差率 $s \leq 0.2\% \sim 0.5\%$ 。

在这种情况下,开环调速系统是不能满足要求的。由控制理论知道,闭环负反馈控制能够克服负载变化和电网波动等干扰对给定转速的影响。下面具体讨论这个问题。

1.4.3 调速系统各环节的模型

单闭环调速系统由检测变送单元、控制器、执行器和被控制对象组成。其结构如图1-13所示。在电动机轴上安装一台测速发电机TG,检测与被控制量转速成正比的负反馈电压