

高等学校规划教材

# 电力拖动与 运动控制系统

第二版

罗飞 郝晓田 文小玲 许玉格 编著



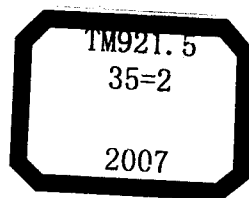
化学工业出版社

电力拖动与运动控制系统

第二版

TM921.5

化学工业出版社



高等学校规划教材

# 电力拖动与运动控制系统

第二版

罗 飞 郝晓田 文小玲 许玉格 编著



化学工业出版社

·北京·

本书系统阐述了单闭环、双闭环直流调速系统，直流可逆调速系统，基于 IGBT 构成的直流脉宽调制调速系统，数字调速系统和 MATLAB 仿真模型的结构、工作原理、动态分析及设计，并对交流调速、传统异步电动机调压调速、绕线转子异步电动机串级调速、交流异步电动机变频调速、常见六种特殊电动机的调速原理和实现方法作了系统介绍，最后概述了网络运动控制系统的结构和实现方法，以及基于现场总线的多机调速系统及其应用。

本书可作为自动化类相关专业本科生的专业课教材，也可供有关工程技术人员和研究生阅读及参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

电力拖动与运动控制系统/罗飞, 郗晓田, 文小玲, 许玉格编著. —2 版. —北京: 化学工业出版社, 2007. 2  
高等学校规划教材  
ISBN 978-7-5025-9597-5

I. 电… II. ①罗…②郗…③文…④许… 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 022899 号

---

责任编辑: 唐旭华  
责任校对: 周梦华

文字编辑: 李玉峰  
装帧设计: 关 飞

---

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张 15½ 字数 390 千字 2007 年 5 月北京第 2 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

---

定 价: 25.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

运动控制系统作为电气自动化的一个重要的应用领域,已经被广泛用于国民经济各个部门。运动控制系统主要研究电动机拖动及机械设备的位移控制问题,所涉及的领域有电动机理论及技术、电力电子技术、控制理论、计算机技术等,被列为自动化专业的主要专业课。然而,近几十年来,随着许多新的电动机技术不断成熟和电子与计算机技术的不断发展,特别是大功率电力电子技术和永磁同步电动机的成功应用,许多新方法和新技术被用于运动控制系统,导致以往的运动控制系统教材已不适应社会的发展,培养的学生不能满足社会的需要。主编于20世纪90年代初留学日本期间,曾选修运动控制系统的相关课程,回国后长期从事运动控制系统的教学与研究工作,积累了丰富的经验。2005年10月,主编在日本访问期间,参观和考察了日本九州工业大学等著名工科大学的运动控制系统的教学,与运动控制系统的教授进行了交流,深感我国的运动控制系统教学需要改革,以适应现代工业的发展。为此,拟编写一本新的运动控制系统教材。为了解决以往教材严重滞后经济发展的问题,我们参阅了大量的国内外文献,对日本和美国著名的教材进行了研究,还参考了国内外电气自动化和机械工业自动化本科生的专业教材,引入了许多目前最新的理论与技术。例如,在直流脉宽调制调速系统中,重点论述了由大功率高频开关管IGBT构成的直流脉宽调制调速系统;在论述原有的模拟调速控制系统的同时,增加了数字化调速系统的内容,并给出具体采用MATLAB软件仿真的调速系统实例,弥补了以往的运动控制系统方面的教科书的缺陷;增加了多种常见特殊电动机的工作原理和调速系统等新内容;论述了基于现场总线的网络运动控制系统,使学生能了解基于网络的多机调速系统的原理,并能进行网络运动控制系统的设计。这些新增内容使本书既有先进性和系统性,又有较强的实用性。

由于大部分机器和设备都是由电动机拖动的,所以研究运动控制系统主要是研究电动机的启动、停止及速度调节的问题,即电动机的调速系统。电动机调速系统分为直流电动机调速系统和交流电动机调速系统两大类。直流电动机的电压、电流和磁通之间的耦合较弱,使它有较好的启停特性,速度调节比较平滑,调速系统易于实现,以往的调速系统基本上都是采用直流调速;直流电动机的缺点是成本高、寿命短,但是由于它的调速性能好,调速系统结构简单,有些部门还把直流电动机用作传动装置,本书仍然把直流调速系统作为一个主要内容之一,用三章的篇幅进行详细介绍。脉宽调制是实现变流的有效方法,特别是现代电力电子技术被广泛应用于交直流电动机调速系统后,脉宽调制调速系统受到重视,本书将在第4章重点介绍基于IGBT构成的直流脉宽调制调速系统。

随着微电子技术、微机处理器的出现和运算速度的提高以及计算机控制软件的发展,电动机调速系统由原来的以模拟量反馈、模拟调速器为核心的连续调速控制系统过渡到以数字量处理为主、以高速数字信号处理器为核心的数字调速控制系统。另外,应用MATLAB仿真技术对直流调速系统进行仿真分析,建立系统的仿真模型,成为近年来被广泛应用的研究方法。本书第5章主要介绍数字调速系统和MATLAB仿真模型,对于提高学生对调速系统的设计能力是有益的。

第6章对交流调速的主要方法进行了概述,并介绍了传统的异步电动机调压调速方法和绕线转子异步电动机串级调速方法。

交流异步电动机具有结构简单、坚固耐用、成本低、寿命长等优点，随着电力电子和计算机技术的发展，特别是变频和矢量控制技术的完善，使交流调速系统发生了质的飞跃，逐步取代了直流调速系统，成为主要的传动装置。例如，现代化的高速列车、地铁、电动汽车都采用了交流调速系统。本书将在第7章中重点介绍交流异步电动机变频调速的原理和实现方法。

特殊电动机目前已经广泛应用于印刷、航空航天、家用电器、交通等许多领域，传统教材对这一部分介绍得非常少，而且重视度也不够，这是目前国内教材存在的严重问题，使得国内学生在工作中遇到特殊电动机的问题时却束手无策，因此有必要在本科教学阶段介绍特殊电动机的调速系统。本书第8章介绍了常见的六种特殊电动机的工作原理和调速方法。

针对目前运动控制系统数字化和网络化的趋势，本书第9章对网络运动控制系统的结构和实现方法进行了概述，并介绍了基于现场总线的多机调速系统及其应用。

为方便教学，本书配套的多媒体教学课件可免费提供给采用本书作为教材的大专院校使用。如有需要，请发电子邮件至 txh@cip.com.cn。

本书作为自动化类相关专业本科生的专业课教材，也可供有关工程技术人员和研究生阅读和参考。全书是由华南理工大学自动化科学与工程学院罗飞教授主编，郝晓田副教授、许玉格讲师和武汉工程大学文小玲副教授参与编写完成的。罗飞教授编写了本书的第3、4章和第9章，郝晓田副教授编写了本书的第6章和第7章，文小玲副教授编写了本书的第1、2章，许玉格讲师编写了本书的第5章和第8章。华南理工大学自动化科学与工程学院的方昌始高工对第3章进行了增补，研究生林小兰、田晓丹、王士华、陈治明、周辉、梁筱斌、冯柄枢、黄东、罗范谊、赵少华等同志为本书的文字录入和插图绘制作了大量的工作，在此谨致衷心的感谢。

此外，本书是在2001年9月化学工业出版社出版的《运动控制系统》教材的基础上改编的，本书许多部分仍然采用原教材的内容，在此，对曾参加原教材编写的麦崇裔、苏开才等老师表示感谢。

由于编者水平有限，时间仓促，不妥之处在所难免，殷切期望读者批评指正。

编 者  
2007年3月

# 目 录

<b>1 单闭环直流调速系统</b> .....	1
1.1 直流调速系统的构成 .....	1
1.1.1 由旋转变流机组供电的直流调速系统 .....	1
1.1.2 晶闸管-电动机直流调速系统 .....	1
1.2 单闭环调速系统的稳态分析与设计 .....	3
1.2.1 V-M 系统的开环机械特性 .....	3
1.2.2 转速负反馈单闭环调速系统的组成及其静特性 .....	6
1.2.3 开环系统机械特性与闭环系统静特性的比较 .....	8
1.2.4 闭环调速系统的基本性质 .....	9
1.2.5 转速负反馈单闭环调速系统稳态参数计算 .....	10
1.2.6 闭环调速系统中的电流截止负反馈环节及其特性 .....	12
1.3 单闭环调速系统的动态分析与设计 .....	14
1.3.1 系统的动态数学模型 .....	14
1.3.2 单闭环调速系统的稳定条件 .....	17
1.3.3 动态校正——PI 调节器设计 .....	18
1.4 无静差调速系统 .....	23
1.4.1 系统无静差的实现 .....	23
1.4.2 采用积分 (I) 调节器 .....	23
1.4.3 采用比例积分 (PI) 调节器的单闭环无静差调速系统 .....	24
1.4.4 稳态抗扰误差分析 .....	27
1.5 电压反馈电流补偿控制的调速系统 .....	28
1.5.1 电压负反馈单闭环有静差调速系统 .....	29
1.5.2 电流正反馈——扰动量的补偿控制 .....	30
1.5.3 电流补偿控制调速系统的稳定性 .....	31
习题与思考题 .....	32
<b>2 双闭环直流调速系统</b> .....	34
2.1 双闭环调速系统的构成 .....	34
2.1.1 转速、电流双闭环调速系统的组成 .....	35
2.1.2 调节器输出限幅值的整定 .....	35
2.1.3 调节器锁零 .....	35
2.1.4 系统中调节器输入、输出电压极性的确定 .....	36
2.2 双闭环调速系统的稳态结构及其静特性 .....	37
2.2.1 双闭环调速系统的稳态结构图 .....	37
2.2.2 双闭环调速系统的静特性 .....	37
2.2.3 双闭环调速系统的稳态工作点及其稳态参数的计算 .....	38
2.3 双闭环调速系统的动态分析与设计 .....	38
2.3.1 双闭环调速系统的动态数学模型 .....	38

2.3.2	具有有限幅输出的 PI 调节器的动态响应	39
2.3.3	双闭环调速系统的动态特性	40
2.3.4	两个调节器的作用	42
2.3.5	双闭环调速系统的工程设计	43
	习题与思考题	72
<b>3</b>	<b>直流可逆调速系统</b>	<b>75</b>
3.1	直流可逆调速系统的构成	75
3.1.1	开关切换法	75
3.1.2	晶闸管反并联法	75
3.1.3	励磁反接可逆线路	75
3.2	晶闸管直流可逆系统的回馈制动	76
3.3	有环流的可逆调速系统	77
3.3.1	可逆系统中的环流	77
3.3.2	直流平均环流与配合控制	77
3.3.3	瞬时脉动环流及其抑制	78
3.3.4	直流可逆调速系统的制动过程分析	79
3.3.5	可控环流可逆调速系统	81
3.4	无环流可逆调速系统	83
3.4.1	逻辑控制无环流系统的构成	83
3.4.2	可逆系统对无环流逻辑控制器的要求	83
3.4.3	逻辑控制无环流可逆调速系统的实现	84
3.4.4	逻辑无环流可逆调速系统的运行	85
	习题与思考题	88
<b>4</b>	<b>直流脉宽调速控制系统</b>	<b>89</b>
4.1	PWM 变换器的工作原理	89
4.1.1	不可逆 PWM 变换器	89
4.1.2	可逆 PWM 变换器	91
4.1.3	电枢电流脉动量	94
4.2	PWM 调速系统的开环机械特性	95
4.2.1	电流连续时的机械特性	95
4.2.2	电流断续时的机械特性	96
4.3	脉宽调速系统的构成	96
4.3.1	锯齿波发生器	96
4.3.2	脉宽调制器	97
4.3.3	集成脉宽调制器	98
4.3.4	PWM 直流调速系统实例	99
4.4	PWM 功率变换器的设计	102
4.4.1	直流调速系统对 PWM 功率变换器的要求	102
4.4.2	电力电子器件的选择	103
	习题与思考题	103
<b>5</b>	<b>数字控制的直流调速系统和 MATLAB 仿真</b>	<b>104</b>
5.1	概述	104

5.1.1	数字控制调速的主要特点	104
5.1.2	数字控制调速系统的结构	105
5.1.3	数字测速	106
5.1.4	数字滤波	108
5.2	数字控制双闭环直流调速系统	111
5.2.1	数字控制调速系统的设计	111
5.2.2	数字控制双闭环直流调速系统硬件	112
5.2.3	数字控制双闭环直流调速系统软件	113
5.2.4	数字PI调节器的设计	114
5.3	直流调速系统的MATLAB仿真	116
5.3.1	开环直流调速系统的MATLAB建模与仿真	117
5.3.2	单闭环直流调速系统的MATLAB建模与仿真	120
5.3.3	双闭环直流调速系统的MATLAB建模与仿真	122
	习题与思考题	124
<b>6</b>	<b>交流调速系统</b>	125
6.1	交流调速的基本类型	125
6.2	交流调压调速系统	128
6.2.1	三相交流调压电路	128
6.2.2	异步电动机在调压时的机械特性	129
6.2.3	闭环控制的调压调速系统	130
6.2.4	调压调速时的效率和出力	133
6.3	绕线型异步电动机的串级调速系统	134
6.3.1	串级调速基本原理	134
6.3.2	串级调速的四种运行状态	135
6.3.3	串级调速系统的基本类型	136
6.3.4	超同步串级调速系统	138
6.4	串级调速系统的工作特性	139
6.4.1	串级调速系统转子整流电路工作状态	139
6.4.2	串级调速系统的调速特性 $n=f(I_d, \beta)$	141
6.4.3	串级调速系统的转矩特性 $T=f(I_d)$	142
6.4.4	串级调速系统的机械特性 $T=f(s)$	143
6.5	串级调速的双闭环控制系统	144
6.5.1	双闭环串级调速系统的组成	145
6.5.2	双闭环串级调速系统的动态数学模型	145
6.5.3	双闭环串级调速系统调节器参数的确定	147
	习题与思考题	148
<b>7</b>	<b>交流异步电动机变频调速系统</b>	149
7.1	异步电动机变频调速的基本控制方式	149
7.1.1	基频以下调速	149
7.1.2	基频以上调速	152
7.2	变频器与逆变器	152
7.2.1	间接变频装置(交-直-交变频装置)	153



7.2.2	电压源和电流源变频器 .....	154
7.2.3	直接变频装置(交-交变频) .....	155
7.2.4	正弦波脉宽调制(SPWM)逆变器 .....	158
7.2.5	电流跟踪式PWM逆变器 .....	164
7.2.6	磁链跟踪式PWM逆变器 .....	165
7.3	转速开环恒压频比控制的变频调速系统 .....	168
7.3.1	电压源型晶闸管变频器-异步电动机调速系统 .....	168
7.3.2	电流源型晶闸管变频器-异步电动机调速系统 .....	169
7.4	转速闭环转差频率控制的变频调速系统 .....	170
7.4.1	基本概念 .....	171
7.4.2	控制规律 .....	171
7.4.3	转差频率控制的变压变频调速系统 .....	172
7.5	异步电动机的多变量数学模型和坐标转换 .....	174
7.5.1	三相异步电动机的多变量非线性数学模型 .....	174
7.5.2	坐标变换和变换矩阵 .....	177
7.5.3	三相异步电动机在两相坐标系上的数学模型 .....	181
7.6	按转子磁场定向的矢量控制系统 .....	186
7.6.1	矢量控制系统的构想 .....	186
7.6.2	矢量控制的基本方程 .....	187
7.6.3	转速、磁链闭环控制的矢量控制系统和转子磁链模型 .....	188
7.6.4	磁链开环转差控制的矢量控制系统 .....	190
7.7	按定子磁场控制的直接转矩控制系统 .....	191
7.7.1	基本原理 .....	192
7.7.2	定子磁链和转矩算法模型 .....	192
7.8	感应电动机直接转矩控制系统举例 .....	193
7.8.1	定子圆形旋转磁场的建立 .....	194
7.8.2	定子磁链控制规律 .....	194
7.8.3	转矩控制规律 .....	195
	习题与思考题 .....	196
<b>8</b>	<b>特殊电动机调速控制系统 .....</b>	<b>198</b>
8.1	单相异步电动机调速系统 .....	198
8.1.1	单相异步电动机的工作原理 .....	198
8.1.2	单相异步电动机的启动与调速 .....	199
8.2	无刷直流电动机调速系统 .....	201
8.2.1	无刷直流电动机的工作原理 .....	201
8.2.2	无刷直流电动机的特性 .....	204
8.2.3	无刷直流电动机的调速 .....	207
8.3	永磁同步电动机调速系统 .....	210
8.3.1	永磁同步电动机的工作原理 .....	210
8.3.2	永磁同步电动机的调速 .....	211
8.4	直线电动机调速系统 .....	213
8.4.1	直线电动机的结构 .....	213

8.4.2	直线电动机的工作原理和特性 .....	214
8.4.3	直线电动机的控制 .....	216
8.5	步进电动机调速系统 .....	216
8.5.1	步进电动机的结构和工作原理 .....	216
8.5.2	步进电动机的控制 .....	218
8.6	开关磁阻电动机调速系统 .....	219
8.6.1	开关磁阻电动机的原理 .....	219
8.6.2	开关磁阻电动机的特性 .....	224
8.6.3	开关磁阻电动机的控制 .....	227
	习题与思考题 .....	229
<b>9</b>	<b>网络化运动控制系统</b> .....	<b>230</b>
9.1	数字化调速系统 .....	230
9.2	数字位置随动系统 .....	231
9.3	网络化运动控制系统 .....	231
9.3.1	网络化运动控制系统的结构 .....	231
9.3.2	现场总线 .....	232
9.3.3	PROFIBUS 现场总线 .....	232
9.3.4	CAN 现场总线及在网络运动控制系统中的应用 .....	233
	习题与思考题 .....	236
	<b>参考文献</b> .....	<b>237</b>

# 1 单闭环直流调速系统

调速系统是当今电力拖动自动控制系统中应用最普遍的一种系统。目前，需要高性能可控电力拖动的领域多数都采用直流调速系统。本章主要讨论单闭环调速系统的组成、工作原理、稳态分析、动态分析及其设计方法。本章所介绍的反馈控制原理及控制规律是后续章节进一步讨论其他典型系统的基础。

## 1.1 直流调速系统的构成

### 1.1.1 由旋转变流机组供电的直流调速系统

在直流调速系统中主要采用变电压调速（即通过调节直流电动机电枢供电电压来调速），需要有专门的可控直流电源。随着半导体变流技术和电子技术的发展，直流调速系统中的可控直流电源装置也随之不断更新换代。最早的直流调速系统是在 20 世纪 50 年代获得广泛使用的由旋转变流机组供电的直流调速系统，简称 G-M 系统，在国际上通称为 Ward-Leonard 系统，该系统的原理如图 1-1 所示。它由交流电动机（异步电动机或同步电动机）拖动直流发电机 G 实现变流，由发电机给需要调速的直流电动机供电。当对系统的调速性能要求不高时，可直接用励磁电源给发电机提供励磁电流  $i_f$ ；要求较高的闭环调速系统常用交磁放大机作为功率放大器直接对发电机励磁绕组供电，调节发电机的励磁电流  $i_f$  即可改变其输出电压  $U$ ，从而调节电动机的转速  $n$ ；改变发电机励磁电流  $i_f$  的方向，可以改变发电机输出电压的极性以实现电动机的正、反转可逆运行。

图 1-2 绘出了采用旋转变流机组供电时电动机可逆运行的机械特性。由图可见 G-M 系统可以在允许的转矩范围内四象限运行，无论是正转减速还是反转减速时都能实现回馈制动，可满足调速性能方面的要求。但是，这种系统至少包含两台与调速电动机容量相当的旋转电动机，还要一台励磁发电机，因而有旋转部分多、设备占地面积大、安装必须打地基、运行噪声大、费用昂贵、效率低、维护不方便等缺点。

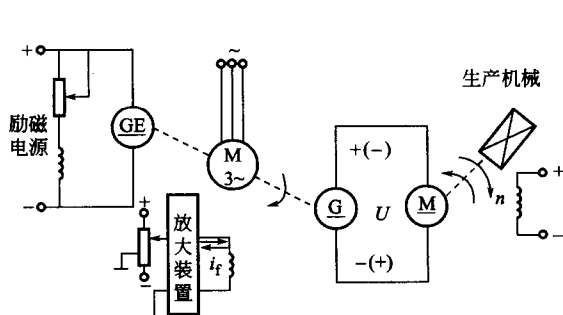


图 1-1 旋转变流机组供电的直流调速系统 (G-M 系统)

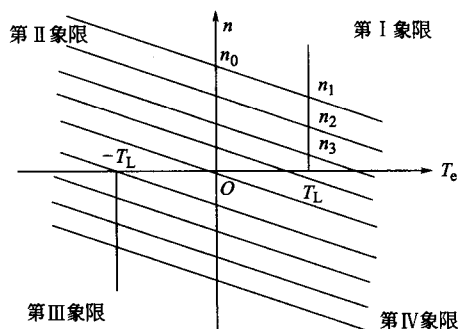


图 1-2 G-M 系统的机械特性

### 1.1.2 晶闸管-电动机直流调速系统

20 世纪 50 年代，出现了离子拖动系统。这种系统采用水银整流器（大容量时）和闸流

管（小容量时）作为可控变流装置，用静止的变流器取代了旋转变流机组。它克服了旋转变流机组的许多缺点，缩短了响应时间，但由于水银整流器造价较高，体积仍然很大，尤其是水银污染环境严重，危害人身健康，因此未能得到广泛应用。

20 世纪 50 年代末，晶闸管（大功率半导体器件）变流装置的相继出现，使变流技术产生了根本性的变革，开始进入晶闸管时代。由晶闸管变流装置直接给直流电动机供电的调速系统，称为晶闸管-电动机调速系统，简称 V-M 系统，又称为静止的 Ward-Leonard 系统。这种系统已成为直流调速系统的主要形式。

图 1-3 是 V-M 系统的简单原理图。图中 V 是晶闸管变流装置，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  $U_c$  来移动触发脉冲的相位，以改变整流电压  $U_d$ ，从而实现平滑调速。由于 V-M 系统具有调速范围大、精度高、动态性能好、效率高、易控制等优点，且已比较成熟，因此已在世界各主要工业国得到普遍应用。但是，必须注意以下几个问题。

① 由于晶闸管的单向导电性，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 1-4(a)]；由全控整流电路构成的 V-M 系统，可允许电动机工作在反转制动状态（如带位能性负载时），实现有源逆变，从而获得两象限运行 [图 1-4(b)]。当要实现四象限运行时 [图 1-4(c)]，必须采用正、反两组全控整流电路供电的 V-M 可逆调速系统，其所用变流设备需增加一倍。

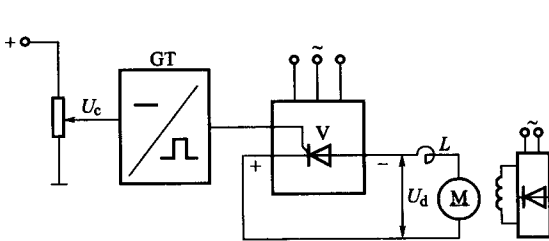


图 1-3 晶闸管-电动机直流调速系统 (V-M 系统)

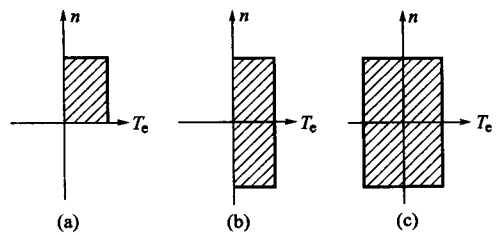


图 1-4 V-M 系统的运行范围

② 由于晶闸管元件的过载能力小，不仅要限制过电流和反向过电压，而且还要限制电压变化率 ( $du/dt$ ) 和电流变化率 ( $di/dt$ )，因此必须有可靠的保护装置和符合要求的散热条件。同时，在选择元件时应留有足够的余量。

③ 当系统处于深调速状态，即在较低速下运行时，晶闸管的导通角小，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，对电网产生不利影响。若采用晶闸管调速的设备在电网中所占容量比例较大，则会造成电力公害，这时，必须增设无功补偿和谐波滤波装置。

④ 由于整流电路的脉波数比直流电动机每对极下的换向片数要少得多，因此，V-M 系统的电流脉动比 G-M 系统更严重。这样就可能存在电流连续和断续两种情况。当 V-M 系统主电路串接的平波电抗器有足够大的电感量，且电动机的负载电流也足够大时，整流电流的波形是连续的，如图 1-5(a) 所示 ( $\omega$  为电动机转子角速度)。当电感较小，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导通之前，电流已衰减到零，从而产生电流波形断续的现象，如图 1-5(b) 所示。电流波形断续会造成 V-M 系统机械特性的非线性，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现象。

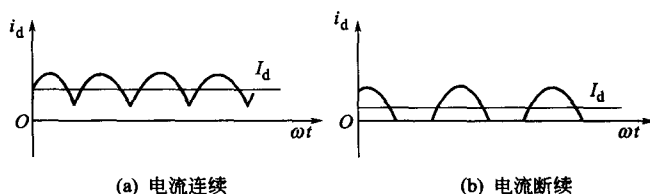


图 1-5 V-M 系统的电流波形

## 1.2 单闭环调速系统的稳态分析与设计

### 1.2.1 V-M 系统的开环机械特性

对于图 1-3 所示的 V-M 开环调速系统，当电流连续时，其主回路的电压平衡方程式为

$$U_d = E + I_d R \quad (1-1)$$

式中  $E$ ——电动机反电动势；

$R$ ——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；

$U_d$ ——理想空载整流电压的平均值，对一般全控式整流电路，当电流波形连续时，

$$U_d = \frac{m}{\pi} U_m \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha \quad (1-2)$$

式中  $\alpha$ ——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；

$m$ ——交流电源一周内的整流电压脉波数。

将  $E = C_e n$  和式(1-2)代入式(1-1)经整理可得 V-M 系统的开环机械特性方程式为

$$n = \frac{1}{C_e} (U_d - I_d R) = \frac{1}{C_e} \left( \frac{m}{\pi} U_m \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha - I_d R \right) = n_0 - \Delta n \quad (1-3)$$

式中  $n_0$ ——理想空载转速， $C_e$  为额定磁通下的电动势与转速比，改变控制角  $\alpha$ ，可得不同的  $n_0$ ， $n_0 = \frac{U_d}{C_e}$ ； $C_e = K_e \Phi$ ， $K_e$  为电动机电势常数， $\Phi$  是励磁磁通；

$\Delta n$ ——对应负载电流  $I_L = I_d$  时的转速降落， $\Delta n = \frac{R}{C_e} I_d$ 。

改变控制角  $\alpha$ ，可得一族平行直线，如图 1-6 中实直线所示，和 G-M 系统的特性很相似。上述结论表明，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。

当电流断续时，机械特性方程要复杂得多，这里不再讨论。其机械特性如图 1-6 中曲线部分所示。由图可见，当电流连续时，特性较硬；而当电流断续时，特性很软，且呈显著的非线性，理想空载转速翘得较高。

一般分析调速系统时，只要主电路电感足够大，可以近似地只考虑连续段，即用连续段特性及其延长线（图 1-6 中虚线表示）作为系统的特性。对于断续特性较显著的情况，这样做与实际相差较大，可以改用另一段较陡的直线来逼近断续段特性，如图 1-7 所示，这相当于把总电阻  $R$  换成一个更大的等效电阻  $R'$  ( $R' = C_e \tan \delta$ )，其数值可从实测特性计算出来。严重时， $R'$  可达实际电阻  $R$  的几十倍。

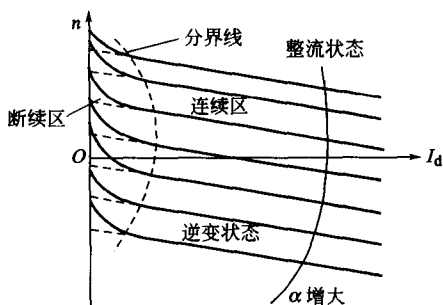


图 1-6 V-M 系统的开环机械特性

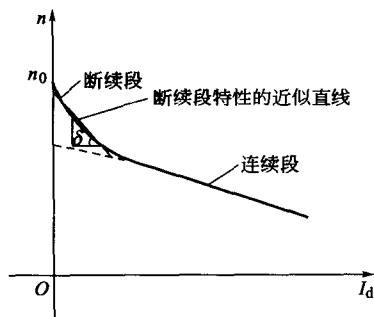


图 1-7 断续段特性的近似计算

### 1.2.1.1 调速系统的转速控制要求

大量的生产机械对调速系统提出了不同的转速控制要求，归纳起来有以下三个方面。

- ① 调速——在一定的最高转速  $n_{max}$  和最低转速  $n_{min}$  范围内分档（有级）或平滑地（无级）调节转速。
- ② 稳速——以一定的精度稳定在所需转速上运行，尽量不受负载变化、电源电压变化等各种因素的干扰。
- ③ 加减速控制——频繁启制动的生产机械要求尽量缩短启制动时间以提高生产率；不宜经受剧烈速度变化的生产机械则要求启制动越平稳越好。

以上三个方面有时都需具备，有时只要求其中一项或两项，其中调速和稳速两项，若都要实现，常相互矛盾。为了保证产品质量，要求系统在各级转速下工作时，不允许过大的速度波动，这一点往往十分重要。因此，为了定量地分析问题，针对这两项要求规定了以下两个调速指标，又称为稳态性能指标，来衡量调速系统稳态性能的好坏，它们也是设计调速系统的重要依据。

### 1.2.1.2 调速系统的两个稳态指标

#### (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  $n_{min}$  之比叫调速范围，用字母  $D$  表示，即

$$D = \frac{n_{max}}{n_{min}} \quad (1-4)$$

式中， $n_{max}$  和  $n_{min}$  一般指电动机额定负载时的转速，对于少数负载很轻的机械，如精密磨床等，也可用实际负载时的转速。设计调速系统时，通常将  $n_{max}$  视为电动机的额定转速  $n_N$ 。

#### (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所对应的转速降落  $\Delta n_N$  与理想空载转速  $n_0$  之比，称为静差率，即

$$s = \frac{\Delta n_N}{n_0} \quad (1-5)$$

或用百分数表示

$$s = \frac{\Delta n_N}{n_0} \times 100\% \quad (1-6)$$

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的。它与机械特性的硬度有关,特性越硬,静差率越小,稳速精度越高。然而,静差率与机械特性的硬度又是区别的。同样硬度的机械特性,理想空载转速越低,静差率  $s$  越大,转速的相对稳定性越差,如图 1-8 所示,  $a$ 、 $b$ 、 $c$  三条机械特性的硬度相同,即额定速降  $\Delta n_N$  一定,设  $\Delta n_N = 200 \text{ r/min}$ , 则

当  $n_{0a} = 1000 \text{ r/min}$  时,  $n_{Na} = n_{0a} - \Delta n_N = 1000 - 200 = 800 \text{ r/min}$ ,  $s_a = \Delta n_N / n_{Na} = 200 / 800 = 0.25$ ;

当  $n_{0b} = 600 \text{ r/min}$  时,  $n_{Nb} = n_{0b} - \Delta n_N = 600 - 200 = 400 \text{ r/min}$ ,  $s_b = \Delta n_N / n_{Nb} = 200 / 400 = 0.5$ ;

当  $n_{0c} = 200 \text{ r/min}$  时,  $n_{Nc} = n_{0c} - \Delta n_N = 200 - 200 = 0$ ,  $s_c = \Delta n_N / n_{Nc} = 200 / 0 = \infty$ ; 电动机就停止转动了。

由此可见,离开了对静差率的要求,调速范围便失去了意义,即  $D$  与  $s$  不能相互孤立。一个调速系统的调速范围是指在低速时满足静差率要求下所能达到的最大转速可调范围。

### (3) $D$ 、 $s$ 、 $\Delta n_N$ 之间的关系

由以上分析结果可知,若某一调速系统需保证静差率为  $s$ , 则要求

$$n_{\min} = n_{0\min} - \Delta n_N = \frac{\Delta n_N}{s} - \Delta n_N = \frac{1-s}{s} \Delta n_N$$

从而

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{n_N}{n_{\min}} = \frac{n_N s}{(1-s) \Delta n_N} \quad (1-7)$$

式中  $n_N$ ——电动机的额定转速;

$s$ ——额定负载时最低速时的静差率;

$\Delta n_N$ ——额定负载时电动机的转速降,简称额定速降。

式(1-7)表明,对同一个调速系统,  $n_N$  和  $\Delta n_N$  是一定的,若对静差率的要求越高(即  $s$  越小),则系统允许的调速范围  $D$  也越小。为了同时满足工艺过程对  $D$  和  $s$  的要求,必须将额定负载下电动机的转速降  $\Delta n_N$  限制在一定范围内。

**例 1-1** 某车床主轴电动机的额定转速  $n_N = 1000 \text{ r/min}$ , 最低转速  $n_{\min} = 90 \text{ r/min}$ , 已知由 V-M 系统主回路参数决定的额定速降  $\Delta n_N = 50 \text{ r/min}$ , 要求静差率  $s = 0.1$ 。试问用 V-M 开环系统能否满足要求?

**解** 车床主轴要求的调速范围为

$$D = \frac{n_N}{n_{\min}} = \frac{1000}{90} \approx 11$$

而由式(1-7)可得

$$D = \frac{n_N s}{(1-s) \Delta n_N} = \frac{1000 \times 0.1}{(1-0.1) \times 50} \approx 2$$

可见开环系统不能满足调速范围  $D$  为 11 的要求。其根本原因是额定速降  $\Delta n_N$  太大,若能使其  $\Delta n_N$  减小为

$$\Delta n_N = \frac{n_N s}{(1-s) D} = \frac{1000 \times 0.1}{(1-0.1) \times 11} \approx 10 \text{ (r/min)}$$

则可满足调速范围的要求。

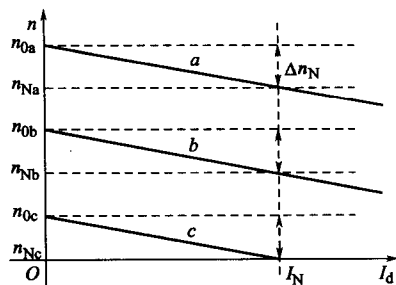


图 1-8 静差率随转速高低而改变

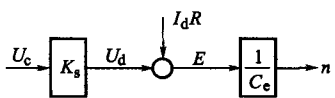


图 1-9 V-M 开环系统稳态结构图

如何才能减小  $\Delta n_N$  呢? 开环系统本身是无能为力的, 因为  $\Delta n_N = \frac{R}{C_e} I_N$ , 其中主回路总电阻  $R$ 、电动机电势常数  $K_e$  和额定电流  $I_N$  都不能改变。图 1-9 所示为 V-M 开环系统稳态结构图。在控制通道中, 只有输入量  $U_c$  对输出量  $n$  产生控制作用, 当负载扰动  $I_d R$  变化时, 若无人工干预, 则输出量  $n$  必然改变。因此, 开环系统没有抗扰动的能力。开环调速系统只适用于对调速精度要求不高的场合。若要减小  $\Delta n_N$ , 根据自动控制原理可知, 必须采用反馈闭环控制方式。

### 1.2.2 转速负反馈单闭环调速系统的组成及其静特性

#### 1.2.2.1 系统的组成

由前述分析和例题计算可知, 开环系统不能满足较高的调速指标要求。许多需要无级调速的生产机械, 常常不允许有很大的静差率。为了使系统同时满足  $D$ 、 $s$  的要求, 提高调速质量, 必须采用闭环系统, 用转速检测装置。例如, 在电动机轴上安装一台测速发电机 TG, 检测出输出量或被调量  $n$  的大小和极性, 并把它变换成与转速成正比的负反馈电压  $U_{fn}$ , 与转速给定电压  $U_n$  相比较后, 得到偏差电压  $\Delta U_n$ , 经放大器产生触发装置 GT 的控制电压  $U_c$ , 用以控制电动机的转速。这就组成了转速负反馈单闭环调速系统, 其原理图示于图 1-10。根据自动控制原理, 反馈闭环控制系统是按被调量的偏差进行控制的系统。只要被调量出现偏差, 它就会产生纠正偏差的自动调节过程。而前述转速降落正是由负载引起的转速偏差, 因此闭环调速系统应该能大大减小转速降落。

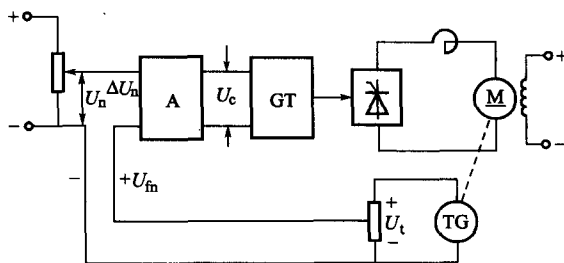


图 1-10 转速负反馈单闭环调速系统

图 1-10 转速负反馈单闭环调速系统

#### 1.2.2.2 系统的工作原理及其静特性概念

改变转速给定电压  $U_n$  的大小, 就可改变电动机的转速, 实现平滑调速。如图 1-11 所示, 设电动机在  $U_{d1}$  决定的特性上的点 1 处以转速  $n_1$  稳定运行, 这时负载电流  $I_d = I_{d1}$ , 控制电压  $U_c = U_{c1}$ , 整流平均电压  $U_d = U_{d1}$ , 当电动机轴上的负载转矩  $T_L$  加大时有如下自动调节过程

$$T_L \uparrow \rightarrow n \downarrow \rightarrow E \downarrow \rightarrow I_d \uparrow \rightarrow I_d R \uparrow$$

$$\downarrow U_{fn} \downarrow \rightarrow \Delta U_n (\Delta U_n = U_n - U_{fn}) \uparrow \rightarrow U_c \uparrow \rightarrow U_d \uparrow$$

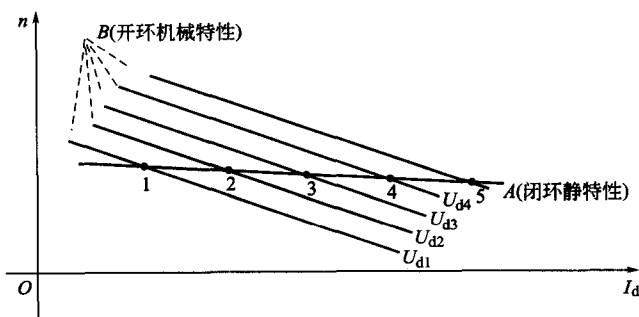


图 1-11 闭环系统静特性与开环机械特性的关系



整流电压平均值的增量  $\Delta U_d = U_{d2} - U_{d1}$ , 用于补偿电阻压降增量  $\Delta I_d R = (I_{d2} - I_{d1})R$  中的大部分, 使转速最后稳定在  $U_{d2}$  决定的特性上的点 2 处, 显然  $n_2$  略小于  $n_1$ 。

上述自动调节作用表明, 增加或减小负载, 就相应地提高或降低整流电压, 因而得到一条新的开环机械特性。按上述工作原理在每条开环机械特性上取一个相应的工作点, 再将这些点集合起来, 就是闭环系统的静特性, 也就是说, 闭环调速系统的静特性实际上是由许多机械特性上的不同运行点集合而成, 可视为一条综合的特性直线, 它代表闭环调节作用的结果。

由此可知, 闭环系统能减小稳态速降的实质在于它的自动调节作用, 在于它能随着负载的变化而相应地改变整流电压。

### 1.2.2.3 系统的静特性方程

通过以上对系统的定性分析可知, 采用被调量转速  $n$  的负反馈可以大大提高系统机械特性的硬度, 从而可以扩大调速范围。但是, 引入被调量的负反馈后, 能否完全补偿掉由于负载引起的转速降落呢? 静差率能减小到什么程度? 调速范围能扩大多少? 等等, 都是有待进一步深入研究的问题。为此, 必须求系统的静特性方程。为便于分析, 突出主要矛盾, 先作如下假定:

- ① 忽略各种非线性因素, 认为各环节的输入输出关系都是线性的;
- ② 假定只工作在 V-M 系统开环机械特性的连续段;
- ③ 忽略直流电源和电位器的内阻, 且认为电动机的磁场不变。

这样, 转速负反馈单闭环调速系统中各环节的稳态关系如下:

$$\text{电压比较环节} \quad \Delta U_n = U_n - U_{fn}$$

$$\text{放大器} \quad U_c = K_p \Delta U_n$$

$$\text{触发装置与晶闸管整流器} \quad U_d = K_s U_c$$

$$\text{测速发电机} \quad U_{fn} = \alpha n$$

$$\text{V-M 系统开环机械特性} \quad n = \frac{U_d - I_d R}{C_e}$$

以上各式中

$K_p$ ——放大器电压放大系数;

$K_s$ ——触发装置与晶闸管整流器的电压放大系数;

$\alpha$ ——转速反馈系数, 单位为  $V \cdot \text{min}/r$ 。

根据以上各环节的稳态输入输出关系, 画出闭环系统的稳态结构图, 如图 1-12(a) 所示。图中各方块内的符号代表该环节的放大系数。运用结构图运算方法将给定作用  $U_n$  和扰动作用  $I_d R$  看成两个独立的输入量, 先按它们分别作用下的系统 [图 1-12(b) 和 (c)] 求出各自的输出与输入关系, 再进行线性叠加。静特性方程如下

$$n = \frac{K_p K_s U_n - I_d R}{C_e (1 + K_p K_s \alpha / C_e)} = \frac{K_p K_s U_n}{C_e (1 + K)} - \frac{I_d R}{C_e (1 + K)} = n_{0b} - \Delta n_b \quad (1-8)$$

式中,  $K = K_p K_s \alpha / C_e$  是闭环系统的开环放大系数, 它相当于在测速发电机输出端把反馈回路断开后, 从放大器输入端到测速发电机反馈输出端的总电压放大系数, 即等于闭环系统各个环节放大系数的乘积;  $n_{0b}$  是闭环系统理想空载转速;  $\Delta n_b$  是闭环系统稳态转速降落。实际上, 也可以直接从以上五个环节的输入输出稳态关系式推导出式 (1-8)。从式 (1-8) 可看出闭环调速系统的静特性表示闭环系统电动机转速与负载电流 (或转矩) 的稳态关系, 在形式上与开环机械特性相似, 但本质上却有很大不同, 故定名为“静特性”, 以示区别。