高等工科院校系列教材

自动控制系统

谢宗安　主编

重庆大学出版社

内容简介

本书阐述电力拖动自动控制系统的组成、工作原理、控制规律、工程设计方法。直流拖动控制部分包括调压与弱磁两类系统。感应电动机拖动控制部分包括变转差率与变频两类系统。本书为工业自动化专业的专科教材，也可供从事电力拖动自动控制领域科研与生产的科技人员参考。

自动控制系统

谢宗安　主编

责任编辑　黄开植

*

重庆大学出版社出版发行

新　华　书　店　经　销

重庆花溪印制厂印刷

*

开本：787×1092　1/16　印张：16.75　字数：412千

1996年6月第1版　　1997年10月第2次印刷

印数：8001—14000

ISBN　7-5624-1109-3/TP·78　　定价：13.80元

序

近年来我国高等专科教育发展很快，各校招收专科生的人数呈逐年上升趋势，但是专科教材颇为匮乏，专科教材建设工作进展迟缓，在一定程度上制约了专科教育的发展。在重庆大学出版社的倡议下，中国西部地区14所院校（云南工学院、贵州工学院、宁夏工学院、新疆工学院、陕西工学院、广西大学、广西工学院、兰州工业高等专科学校、昆明工学院、攀枝花大学、四川工业学院、四川轻化工学院、渝州大学、重庆大学）联合起来，编写、出版机类和电类专科教材，开创了一条出版系列教材的新路。这是一项有远见的战略决策，得到国家教委的肯定与支持。

质量是这套教材的生命。围绕提高系列教材质量，采取了一系列重要举措：

第一，组织数十名教学专家反复研究机类、电类三年制专科的培养目标和教学计划，根据高等工程专科教育的培养目标——培养技术应用型人才，确定了专科学生应该具备的知识和能力结构，据此制订了教学计划，提出了50门课程的编写书目。

第二，通过主编会议审定了50门课程的编写大纲，不过分强调每门课程自身的系统性和完整性，从系列教材的整体优化原则出发，理顺了各门课程之间的关系，既保证了各门课程的基本内容，又避免了重复和交叉。

第三，规定了编写系列专科教材应该遵循的原则：

1. 教材应与专科学生的知识、能力结构相适应，不要不切实际地拔高；

2. 基础理论课的教学应以“必须、够用”为度，所谓“必须”是指专科人才培养规格之所需，所谓“够用”是指满足后续课程之需要。

3. 根据专科的人才培养规格和人才的主要去向，确定专业课教材的内容，加强针对性和实用性；

4. 减少不必要的数理论证和数学推导；

5. 注意培养学生解决实际问题的能力，强化学生的工程意识；

6. 教材中应配备习题、复习思考题、实验指示书等，以方便组织教学；

7. 教材应做到概念准确，数据正确，文字叙述简明扼要，文、图配合适当。

第四，由出版社聘请学术水平高、教学经验丰富、责任心强的专家担任主审，严格把住每门教材的学术质量关。

出版系列专科教材堪称一项“浩大的工程”。经过一年多的艰苦努力，系列专科教材陆续面市了。它汇集了中国西部地区14所院校专科教育的办学经验，是西

部地区广大教师长期教学经验的结晶。

纵观这套教材，具有如下的特色：它符合我国国情，符合专科教育的教学基本要求和教学规律；正确处理了与本科教材、中专教材的分工，具有很强的实用性；与出版单科教材不同，有计划地成套推出，实现了整体优化。

这套教材立足于我国西部地区，面向全国市场，它的出版必将对繁荣我国的专科教育发挥积极的作用。这套教材可以作为大学专科及成人高校的教材，也可作为大学本科非机类或非电类专业的教材，亦可供有关工程技术人员参考。因此我不揣冒昧向广大读者推荐这套系列教材，并希望通过教学实践后逐版修订，使之日臻完善。

吴云鹏

1993年

仲夏

前　言

本教材是根据1992年12月在重庆召开的“西部地区系列专科教材主编会议”审定的《自动控制系统》课程大纲编写的。本书的前修课程有《电机及拖动基础》、《电力电子技术》、《自动控制原理》等。本教材遵照理论与实践相结合的原则，阐明了电力拖动自动控制系统的组成、分析、设计、运行、维修等方面的专业知识与实用技术。编写的特点是：取材上交、直流拖动系统兼顾，由于近代理论与科技的发展，交流拖动控制系统将会在更多的场合逐步取代直流拖动系统，但是成熟的直流拖动系统所运用的一些控制思想与有关控制技术在整个交、直流拖动控制系统中是具有普遍意义的。对不同系统的理论分析尽量注重对物理概念的理解，以及更多地注重选材的实用价值。每章附有思考题与习题，以利于加深理解与拓宽思路。

本书按60学时编写。全书共分七章与两个附录。第一章介绍反馈控制在直流调速系统中的应用，11学时；第二章介绍双闭环直流调速系统，9学时；第三章介绍调速系统的工程设计方法，8学时；第四章介绍直流可逆调速系统，7学时；第五章介绍直流脉宽调速系统的基本知识，3学时；第六章介绍改变转差率的异步电动机调速系统，8学时；第七章介绍异步电动机变频调速系统，14学时。附录介绍调速系统的维修、调试知识以及少数国产电气传动装置的规格与技术参数。各章学时分配为建议学时，书中个别加*的小节作为参考内容。

本书第一、二章与附录Ⅰ、Ⅱ由张建峡编写。第三、四、五章由谢宗安编写。第六、七章由黎英编写。全书由谢宗安主编并统编全稿。

本书承蒙东南大学赵家璧教授主审，提出了许多宝贵意见，特此表示衷心的感谢。

本书为工业自动化专业的专科教材，也可作为电气技术等相近专业相同学历的教学用书以及有关科研和工程技术人员的参考书籍。也可作为有关本科专业的参考书籍。编写过程中参阅了兄弟院校同行们的著作与论文，一并表示感谢。限于作者的水平，书中错误和不妥之处在所难免，殷切期望广大读者批评指正。

编者

1995年10月

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

目　录

第一章　闭环控制直流调速系统 …… 1

§1-1　直流调速系统的基本概念 …… 1

一、直流电动机调速方案 …… 1

二、调速系统的静态指标 …… 5

三、晶闸管-电动机系统及其开环机械特性 …… 7

四、开环控制系统与闭环控制系统 …… 10

§1-2　转速负反馈直流调速系统 …… 11

一、闭环调速系统的组成及其工作原理 …… 11

二、静态结构图与静特性方程式 …… 12

三、静特性及其分析 …… 14

四、转速负反馈直流调速系统计算举例 …… 17

五、电流截止负反馈的应用 …… 18

§1-3　电压负反馈直流调速系统 …… 22

一、调速系统的组成及其工作原理 …… 22

二、电流正反馈的应用 …… 24

三、带电流截止环节的电压负反馈、电流正反馈调速系统 …… 26

§1-4　无静差调速系统 …… 27

一、积分控制规律 …… 27

二、积分调节器与比例-积分调节器 …… 29

三、无静差调速系统 …… 31

§1-5　直流调速系统中的检测装置 …… 34

一、转速检测 …… 34

二、电流检测 …… 36

三、电压检测 …… 40

本章小结 …… 41

思考题与习题 …… 42

第二章　多环控制直流调速系统 …… 45

§2-1　最佳动态过程的基本概念 …… 45

一、拖动控制系统的动态过程 …… 45

二、理想的动态过程 …… 46

§2-2　转速、电流双闭环调速系统及其静态分析 …… 48

一、双闭环调速系统的组成 …… 48

二、静态结构图及静特性 …… 49

三、静态参数计算 …… 50

§2-3 双闭环调速系统的动态分析 …… 51
一、系统各环节传递函数与系统动态结构图 …… 51
二、起动过渡过程分析 …… 56
三、抗扰动调节过程分析 …… 59
*§2-4 电流自适应调节 …… 60
一、电流断续时内环中调节对象的变化 …… 60
二、对电流自适应调节器的要求 …… 61
三、自适应电流调节器 …… 62
§2-5 三环调速系统 …… 63
一、带有电流变化率环的三环调速系统 …… 63
二、带有电压环的三环调速系统 …… 66
§2-6 弱磁控制的直流调速系统 …… 69
一、独立励磁控制的调压调磁的调速系统 …… 69
二、非独立励磁控制的调压调磁的调速系统 …… 70
本章小结 …… 74
思考题与习题 …… 75
第三章 调速系统的工程设计方法 …… 78
§3-1 控制系统的性能指标 …… 78
一、跟随性能指标 …… 78
二、抗扰性能指标 …… 78
§3-2 工程设计与典型系统 …… 79
一、工程设计方法 …… 79
二、典型系统 …… 80
§3-3 典型Ⅰ型系统 …… 81
一、跟随性能指标与参数选择 …… 81
二、抗扰性能指标与参数选择 …… 83
§3-4 典型Ⅱ型系统 …… 84
一、跟随性能指标与参数选择 …… 84
二、抗扰性能指标与参数选择 …… 87
§3-5 调节器串联校正 …… 88
一、调节器类型选择与参数计算 …… 89
二、校正对象传递函数的近似处理 …… 90
三、调节器电路 …… 91
§3-6 双闭环调速系统的动态设计 …… 95
一、电流闭环的设计 …… 95
二、转速闭环的设计 …… 99
三、设计举例 …… 103
§3-7 微分负反馈校正及其分析 …… 105
一、Ⅰ型系统的反馈校正 …… 105

二、I 型系统的反馈校正 …… 107
本章小结 …… 108
思考题与习题 …… 108
第四章　可逆调速系统 …… 111
§4-1　晶闸管-电动机可逆系统主回路 …… 111
一、电枢可逆线路 …… 111
二、磁场可逆线路 …… 112
三、可逆系统的四象限运行 …… 113
§4-2　可逆系统的环流及系统分类 …… 114
一、可逆系统中的环流 …… 114
二、可逆系统分类 …… 115
§4-3　配合制有环流可逆调速系统 …… 116
一、系统的组成 …… 116
二、系统中各环节的可逆输入输出特性 …… 116
三、系统的工作过程 …… 117
§4-4　可控环流可逆调速系统 …… 121
一、系统组成 …… 121
二、工作原理 …… 122
§4-5　逻辑无环流可逆调速系统 …… 123
一、逻辑切换装置的功能与组成 …… 123
二、系统工作原理 …… 129
§4-6　错位无环流可逆调速系统 …… 130
一、错位控制原理 …… 130
二、系统的组成与电压环作用 …… 132
三、错位选触无环流可逆系统 …… 133
本章小结 …… 134
思考题与习题 …… 135
第五章　直流脉宽调速系统 …… 137
§5-1　概述 …… 137
一、晶体管的工作区 …… 137
二、晶体管直流脉宽调速系统的优点 …… 138
§5-2　晶体管 PWM 放大器主电路 …… 138
一、不可逆输出的脉宽调制放大器 …… 138
二、可逆输出的脉宽调制放大器 …… 139
§5-3　晶体管 PWM 放大器控制电路 …… 144
一、脉冲宽度调制器 …… 144
二、驱动电路 …… 147
§5-4　双环控制直流脉宽调速系统 …… 149
本章小结 …… 150

思考题与习题…… 151
第六章　异步电动机变转差率调速系统…… 152
§6-1　交流调速的基本类型 …… 152
一、变极调速 …… 152
二、转子串电阻调速 …… 153
三、串级调速 …… 153
四、调压调速 …… 153
五、电磁转差离合器调速 …… 153
六、变频调速 …… 153
§6-2　交流调压调速系统 …… 154
一、异步电动机改变电压时的机械特性 …… 154
二、晶闸管交流调压电路 …… 155
三、闭环控制的调压调速系统 …… 160
四、调压调速的功率损耗及适用范围 …… 161
§6-3　电磁转差离合器调速系统 …… 162
一、电磁转差离合器的基本结构与工作原理 …… 162
二、电磁转差离合器调速系统及其机械特性 …… 163
§6-4　绕线式异步电动机串级调速系统 …… 164
一、串级调速原理及其基本工作状态 …… 165
二、串级调速的分类和装置 …… 167
三、异步电动机串级调速系统的机械特性 …… 169
四、串级调速系统的性能及其应用 …… 176
五、双闭环控制的串级调速系统 …… 180
本章小结…… 183
思考题与习题…… 184
第七章　异步电动机变频调速系统…… 186
§7-1　变频调速的基本控制方式 …… 186
一、基频以下调速 …… 187
二、基频以上调速 …… 188
§7-2　变频装置的分类与各种变频器的特点 …… 188
一、交-交变频器 …… 189
二、交-直-交变频器 …… 189
三、电压源和电流源变频器 …… 190
§7-3　脉宽调制(PWM)型逆变器 …… 192
一、脉宽调制的基本概念 …… 192
二、SPWM 逆变器的工作原理 …… 195
三、SPWM 的控制模式及其实现方法 …… 196
§7-4　转速开环、恒压频比控制的变频调速系统 …… 205
一、转速开环的交-直-交电压源变频器调速系统 …… 206

二、转速开环的交-直-交电流源变频器调速系统 …… 210
*三、SPWM 变频器的功能及其应用 …… 215
§7-5 转差频率控制的变频调速系统 …… 219
一、转差频率控制的基本概念 …… 220
二、转差频率的控制规律 …… 220
三、转差频率控制的变频调速系统 …… 221
§7-6 异步电动机矢量变换控制 …… 223
一、矢量变换控制的基本概念 …… 224
二、异步电动机的坐标变换 …… 225
三、矢量变换控制中异步电动机的数学模型 …… 227
四、矢量变换控制的实现 …… 233
五、矢量变换控制的变频调速系统 …… 235
本章小结 …… 238
思考题与习题 …… 239
附录Ⅰ 调速装置调试维修知识 …… 240
一、系统的安装及检查 …… 240
二、系统的调试 …… 240
三、系统的日常维修 …… 244
附录Ⅱ 国产电气传动装置简介 …… 245
一、ZC 系列直流调速装置 …… 245
二、T 系列直流调速装置 …… 246
三、其它非联合设计调整装置 …… 250
参考文献 …… 253

第一章　闭环控制直流调速系统

在现代化的工业生产中，生产机械都在不停地运动着，几乎无处不使用电力传动装置。由于各种不同的生产机械运动规律不一样，对传动装置性能的要求也不一样。为了提高产品质量，增加产量，提高生产效率，越来越多的生产机械要求能实现转速调节与相应的自动控制，并且对电力传动装置的拖动性能要求也越来越高。电力拖动自动控制系统中应用得最普遍，且理论和实践都比较成熟的是直流电动机自动调速系统。

本章讨论直流电动机调速的基本方案，调速性能指标及直流调速系统的组成和分类。重点讨论由晶闸管供电、转速负反馈的单闭环直流调速系统。

§1-1　直流调速系统的基本概念

一、直流电动机调速方案

直流电动机电路图如图 1-1 所示。电动机电枢回路的电压平衡方程式为

$$U = E + I_a R \tag{1-1}$$

式中　U——电动机端电压；

I_a——电动机电枢电流；

R——电枢回路总电阻（$R = R_a + R_1$）；

R_a——电枢电阻（包括电枢绕组导线电阻和碳刷接触电阻）；

R_1——电枢回路串接的附加电阻；

E——电枢反电势；

由电机学可知，电枢反电势为

$$E = K_e \Phi n \tag{1-2}$$

K_e——由电机结构决定的电势系数；

Φ——励磁磁通。

将上式代入电枢回路电压平衡方程式，可得到电动机转速与其它参量的关系式

$$n = \frac{U - I_a R}{K_e \Phi} \tag{1-3}$$

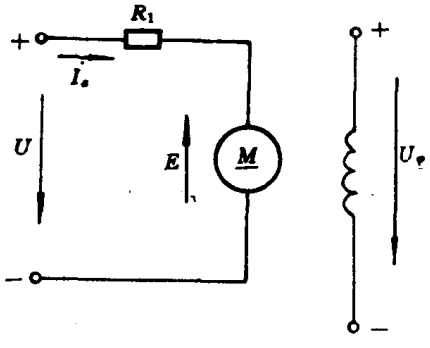

图 1-1　直流电动机电路

上式即为直流电动机的转速特性方程式。对于他励直流电动机，当励磁磁通不变时，电枢电流与转矩成正比，为方便有时把转速特性也称为机械特性。式(1-3)也就是调速公式。

由上式可见，直流电动机的调速方案可有 3 种：

①改变电枢回路总电阻 R；

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

②减弱电动机磁通 Φ；

③改变电动机的端电压 U。

下面分别介绍 3 种调速方案的特点。

1. 改变电枢回路总电阻调速

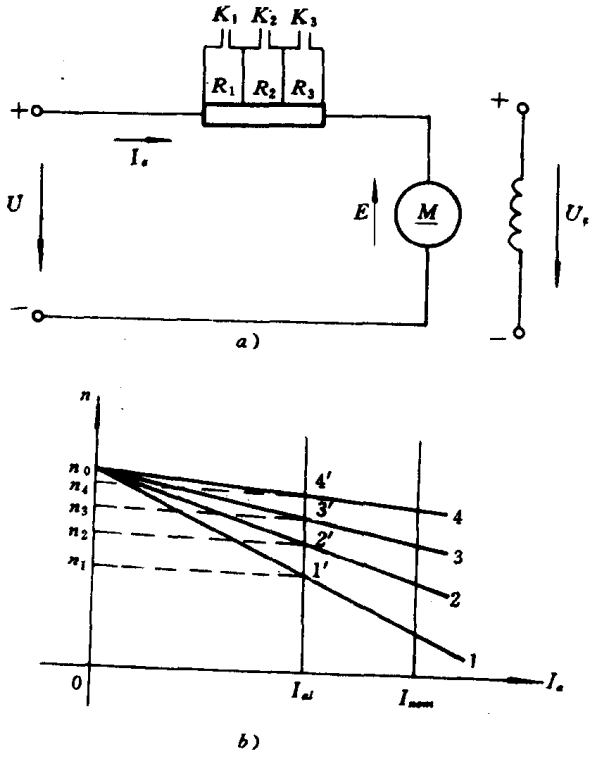

图 1-2

a)改变电枢电阻调速　b)变电阻调速特性

如图 1-2 所示，在电枢回路中串接附加电阻 R_1、R_2、R_3。电动机端电压 U 和电动机磁通 Φ 保持为额定值 U_{nom} 和 Φ_{nom}。其特性方程式为

$$n = \frac{U}{K_e\Phi} - \frac{I_aR}{K_e\Phi} \qquad (1\text{-}4)$$

当控制触点 K_1、K_2、K_3 全断开时有

$$R = R_a + R_1 + R_2 + R_3$$

其特性曲线如图 1-2b)中的特性 1。逐级闭合控制触点 K_1、K_2、K_3，则分别有

$$R = R_a + R_2 + R_3$$

$$R = R_a + R_3$$

$$R = R_a$$

其特性曲线如图 1-2b)中的特性 2，3，4。

当 $I_a=0$ 时，不论 R 为何值，都有

$$n = \frac{U}{K_e\Phi} = n_0$$

故不同阻值的特性线都通过 n_0 点。总电阻 R 越大，特性线的斜率越大，或称之为机械特性越软。

若负载转矩为 T_L，对应所需的电枢电流为 I_{aL}，则逐级闭合控制触点 K_1、K_2、$K3$，工作点将逐步改变为 1′、2′、3′和 4′。对应的工作转速为 n_1、n_2、n_3、n_4。当负载大小不变时，总电阻越大，转速就越低，通过控制触点逐级切除电阻，可使转速上升，实现有级调速。

改变电枢回路电阻调速的实质是利用电枢电流 I_a 在电阻 R 上的压降改变使电动机的反电势不得不发生变化(因为 $E=U-I_aR$)，因而得到不同的稳定转速。

这种调速方案最早被采用。一般由继电器-接触器控制电路来控制触点 K_1、K_2、K_3 的开闭。这种调速系统线路简单，安装调整方便，设备少，投资省。但附加电阻本身耗能较大，电动机机械特性软，调速范围较窄，不能实现无级平滑调速。目前的调速自动控制系统基本不用这种方案。但由于其线路简单，在一些控制简单，调速要求较低的生产机械上仍有应用。

2. 减弱电机励磁磁通 Φ 调速

一般直流电动机在额定磁通下运行时，其铁芯已接近饱和，不能再增加磁通，只能降低励磁电压，减小励磁电流，减弱磁通 Φ。由机械特性方程式(1-4)可知，Φ 减小，n_0 增大，特性线的斜率也增大。其机械特性如图 1-3 所示。$\Phi_1=\Phi_{nom}$为额定磁通，$\Phi_1>\Phi_2>\Phi_3$，若电动机工作于额

定电流状态，则转速将由 n_1 上升至 n_2 和 n_3。

弱磁调速对于普通电机调速范围最多为 2 倍，对于特殊设计的调磁电机，其调速范围为(3～4)倍。自动控制调速系统一般要求达到大范围的无级平滑调速，弱磁调速方案虽然能实现平滑调速，但其调速范围太小，特性较软，因而只是在额定转速以上作小范围升速调速时才采用此方案。

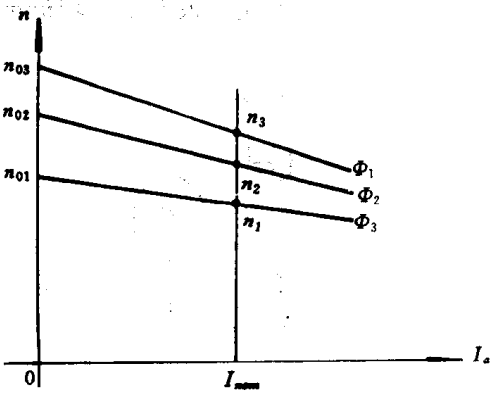

图 1-3　改变励磁调速特性

3. 改变电动机端电压调速

由式(1-4)可知，保持电动机励磁为额定励磁，改变电动机端电压 U，理想空载转速 $n_0=U/K_e\Phi$ 随之变化，而特性线的斜率 $R/K_e\Phi$ 不变。因此，特性曲线是以 U 为参数的一簇平行 直线，如图 1-4 所示。图中 $U_{nom}>U_1>U_2>U_3$。该调速方案可实现额定转速以下大范围平滑调速，并且在整个调速范围内机械特性的硬度不变。因此，该方案为目前调速系统采用的主要方案。后面我们将以调压调速方案为主进行讨论。

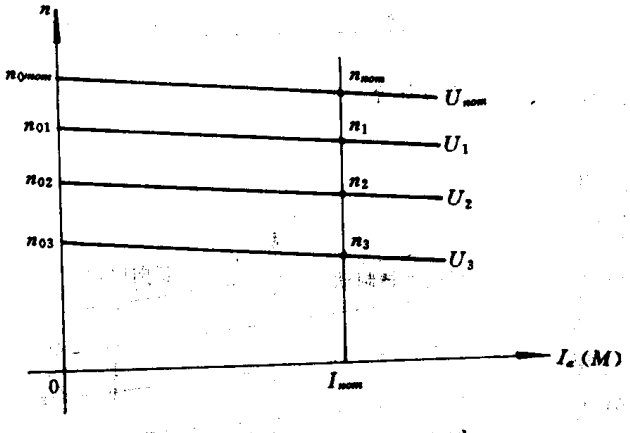

图 1-4　改变电枢电压调速特性

实现变电压调速，首先要有可调的直流电源。根据供电电源的种类不同，分两种情况：一是采用可控变流装置。将交流电经可控变流装置转变为直流电，获得可调的直流电压。二是采用直流斩波器，在具有恒定直流供电电源的地方，实现脉冲调压调速。由于工矿企业中供电系统绝大多数为交流电源，因此前一种情况应用最广。只有在电气运输中，才应用后一种。关于直流斩波器内容，请参阅本教材第五章。下面讨论交流电源供电的可控变流装置。

(1)发电机-电动机(G-M)系统

早在 40 年代就采用发电机-电动机机组构成旋转变流系统。该系统原理图如图 1-5 所示。

交流电动机 M_1 拖动直流发电机 G 实现变流，由发电机 G 给需要调速的电动机 M 供电。调节电位器 RP 改变 G 的励磁电流 i_f 即可改变其输出电压 U 的大小，从而实现调压调速。通过接触器触点 R、F 可改变 G 的励磁电流方向，也就可改变 G 输出电压 U 的极性，实现电动机的正、反转可逆运行。由一台功率较小的直流发电机 GE 提供 G 和 M 的励磁电压。GE 直流发电机也由 M_1 同轴拖动。该系统的机械特性基本上是相互平行的直线，如图 1-6 所示。

这种系统由于变流装置为两台与拖动电机 M 容量相当的直流发电机和交流原动机所组成，故又称之为“旋转变流机组”。它在 50 年代就被广泛地使用，至今对于尚未进行设备改造的地方仍在使用。旋转变流机组具有旋转部分多，占地大，效率低，运行噪音大，安装及维护不方

便等缺点，因此，在50年代出现水银整流器作为可控变流装置时，旋转变流机组就有被静止的水银变流装置取代的趋势。但是，水银整流器的造价高，在制造和使用中严重污染环境，危害人体健康，因而到了60年代又被相继出现的晶闸管变流装置取代。

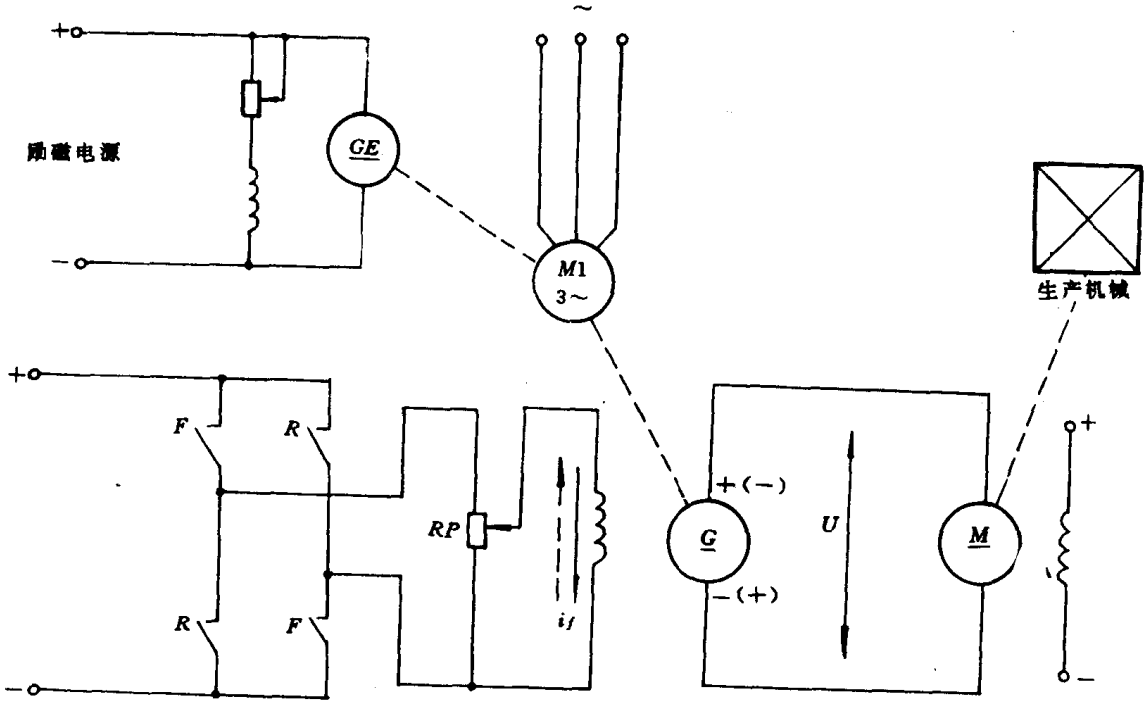

图 1-5　发电机-电动机(G-M)系统

(2)晶闸管-电动机(V-M)系统

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。如图1-7所示。晶闸管整流装置V输出的直流脉动电压U_d直接加在电抗器L和电动机电枢两端，L起滤波作用以及保持电流连续。改变晶闸管触发电路GT的移相控制电压U_g，就可改变触发脉冲的控制角α，从而改变输出平均电压U_d的大小，实现平滑的调压调速。

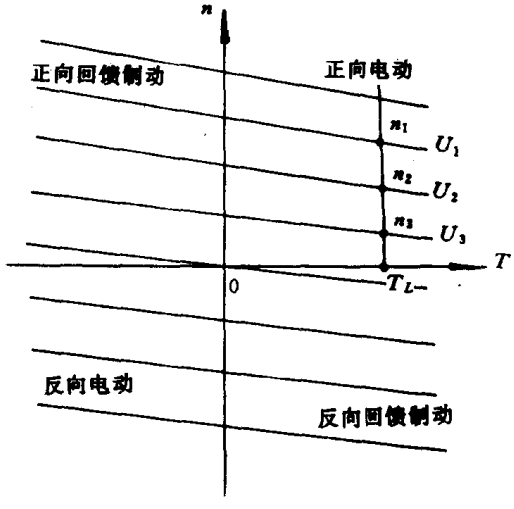

图 1-6　G-M 系统机械特性

晶闸管变流装置除了其体积小，无噪音，无污染，重量轻和实现静止变流等优于旋转变流机组的特点外，在技术性能上也大大优于旋转变流机组。其功率放大倍数在10^4以上，而旋转变流机组为10^1；其控制作用的响应快速性为毫秒级，而旋转变流机组为秒级。因此，很快就得到普遍应用。我国自行设计的中、小型晶闸管变流装置已有标准化和系列化的产品，在直流拖动系统中的应用也日益广泛。目前晶闸管变流装置的最大容量已达7000kW。在一些大容量的直流电机拖动系统中还可采用机组供电、可控硅励磁的调速控制系统，如图1-8所示。

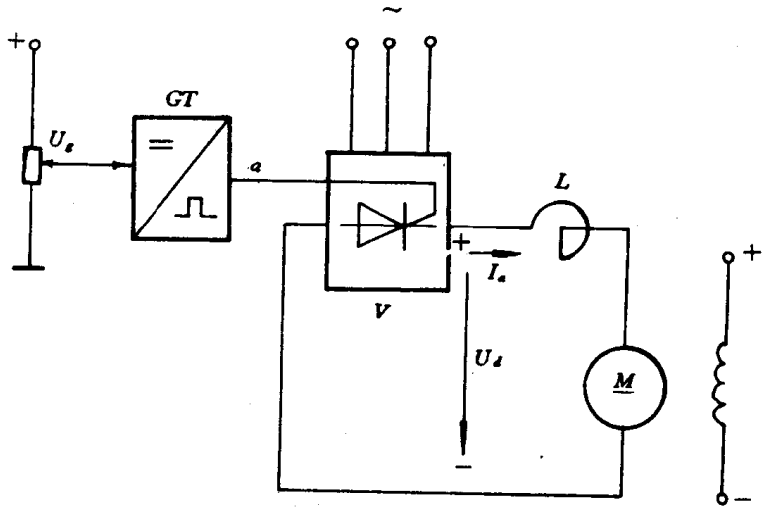

图 1-7　晶闸管-电动机(V-M)调速系统

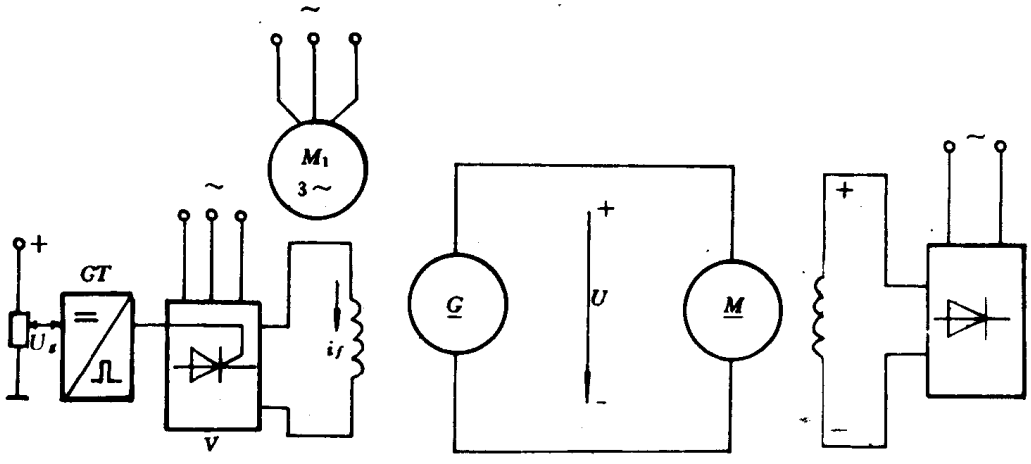

图 1-8　机组供电-晶闸管变流装置励磁的调速系统

二、调速系统的静态指标

不同的生产机械对电力拖动系统有不同的转速控制要求，归纳起来，主要有以下 3 个方面：

(1)调速——在一定的最高转速和最低转速范围内分级调速或无级平滑调速。

(2)稳速——能以一定的精度稳定运行于某一转速，尽量不受负载变化，电源电压变化等各种干扰因素所影响。

(3)加减速控制——某些频繁起、制动的生产机械，要求电动机快速起动和制动，尽量缩短过渡过程时间，以提高生产效率。例如，龙门刨床的工作台，可逆式轧钢机等生产机械。而另一些如升降机，载人电梯，地铁电车等生产机械要求起动、制动过程平稳，加减速度不能太快，以保证安全舒适。还有如造纸机、印刷机等类生产机械，也必须限制加减速度的大小，否则会损坏

机器部件或造成产品不合格。

根据生产机械的不同要求，要有一些能定量地衡量系统技术性能优劣程度的指标，作为系统设计的依据。针对上述的第(1)、(2)两项，有两个调速静态性能指标如下。

1. 调速范围 D

拖动系统能够提供给生产机械的最高转速和最低转速之比，称为调速范围，用字母 D 来表示

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} \tag{1-5}$$

在没有特殊指定时，一般地，$n_{\max}$ 和 $n_{\min}$ 都是指额定负载下的转速。在调压调速系统中，电动机励磁为额定励磁，通常 $n_{\max}$ 就认为是电动机的额定转速 n_{nom}。扩大调速范围一直是研究调速系统的重要课题。

2. 静差率 s

电动机由理想空载到额定负载时的转速降 Δn_{nom} 与理想空载转速 n_0 之比，称为静差率，用字母 s 表示

$$s = \frac{n_0 - n_{nom}}{n_0} = \frac{\Delta n_{nom}}{n_0} \times 100\% \tag{1-6}$$

静差率表征负载变化引起调速系统的转速偏离原定转速的程度。系统的调速特性越硬，Δn 越小，则 s 就越小，说明系统的稳速性能越好。

后面将会证明，晶闸管-电动机系统在电流连续时的机械特性为一簇平行直线，如图 1-9 所示。对应最高转速和最低转速，有相应的空载转速 $n_{0\max}$ 和 $n_{0\min}$，由于它们的斜率相同，故转速降 Δn_{nom} 相同。显然有

$$s_1 = \frac{\Delta n_{nom}}{n_{0\max}}$$

$$s_2 = \frac{\Delta n_{nom}}{n_{0\min}}$$

$$s_1 < s_2$$

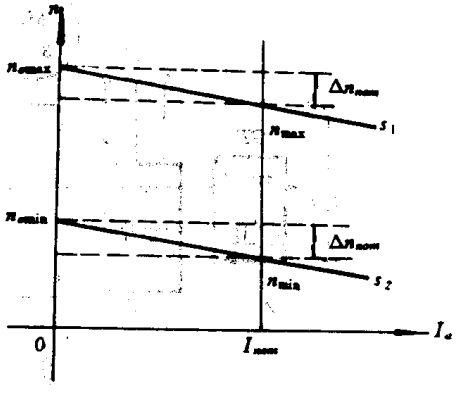

图 1-9 晶闸管-电动机系统调速特性

调速过程中，由于转速不同，静差率也就不同。转速越低，静差率越大。如果低速时的静差率能满足设计要求，则高速时一定能满足要求。因此，调速系统静差率指标应该以最低速所能达到的数值为准。

在考虑了生产机械对转速变化率(即静差率 s)的要求以后，电动机所允许达到的最低转速就受到了限制，即电动机所能达到的调速范围也就受到限制。调速范围 D 和静差率 s 之间的相互约束关系应该理解为在一定的静差率条件下，系统能达到多大的调速范围。

在调速范围 D，静差率 s 及转速降 Δn_{nom} 三者之间，有一数学关系式

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{n_{nom}}{n_{0\min} - \Delta n_{nom}}$$

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

$$=\frac{s\cdot n_{nom}}{\Delta n_{nom}(1-s)} \tag{1-7}$$

例 1 电动机额定转速 $n_{nom}=1500\text{r/min}$，在额定励磁条件下，由晶闸管变流装置供给可调直流电压。已知，系统静态速降 $\Delta n_{nom}=58\text{r/min}$，问：当要求静差率 $s=0.5$时，能达到多大的调速范围？如果调速范围增加 1 倍，能满足静差率为多少？若调速范围增加 1 倍，而静差率 $s=0.5$要求不变，则系统的静态速降应为多少？

解

$$D=\frac{s\cdot n_{nom}}{\Delta n_{nom}(1-s)}=\frac{0.5\times1500}{58\times(1-0.5)}\approx26$$

若调速范围增大 1 倍，有

$$D=2\times26=52$$

$$s=\frac{D\cdot\Delta n_{nom}}{n_{nom}+D\cdot\Delta n_{nom}}=\frac{52\times58}{1500+52\times58}\doteq0.67$$

若 $D=52$，$s=0.5$，则有

$$\Delta n_{nom}=\frac{s\cdot n_{nom}}{D(1-s)}=\frac{0.5\times1500}{52\times(1-0.5)}=28.8\text{r/min}$$

以上计算表明若要在保证调速精度（s 不变）条件下扩大调速范围（增大 D），则必须设法减小系统的速降（Δn_{nom}），否则随着调速范围的扩大，调速系统的稳速能力将不断下降。

式(1-7)又表明，当系统的 Δn_{nom}一定时，若对静差率 s 的要求越严（即 s 值越小），则允许的调速范围就越小。调速范围和静差率这两项静态调速指标是相互制约的，成对出现的。在生产机械提供静态指标要求时也必须注意这一点。表 1-1 列出了一些常用生产机械的 D、s 要求。

表 1-1

生产机械	调速范围	静 差 率
热连轧机	3～10	0.2%～0.5%
龙门刨床	20～40	5%
造纸机	3～20	0.1～1%
仪表车床	60	5%

三、晶闸管-电动机系统及其开环机械特性

晶闸管-电动机系统如图 1-7 所示。晶闸管变流装置输出电压是脉动的直流电压，而电动机由于机械惯性其转速受电压脉动的影响波动很小，完全可以认为转速 n 和反电势 E 在稳态时为常值。当电枢回路电感量较大，负载较重（即 I_a 电流较大）时，电流连续。而当电感量较小和负载较轻时，电流可能断续。电流连续与断续两种情况下系统的机械特性有很大的不同。

图 1-7 中若平波电抗器电感量 L 足够大，使电流连续，则稳定运行时，电枢回路的电压平衡方程式为

$$U_{d0}=E+I_aR \tag{1-8}$$

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com