



高职高专“十一五”规划教材

DIANJI TIAOSU YINGYONG JISHU JI SHIXUN

电机调速 应用技术及实训



葛芸萍 主编



化学工业出版社

高职高专“十一五”规划教材

电机调速应用技术及实训

葛芸萍 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书从实际工程应用和便于教学需要出发,按项目教学方式编写,主要介绍交、直流调速系统组成、原理及应用等。全书共有5个项目,其中项目1集中介绍了直流调速系统有关知识和应用技术;项目2介绍变频调速原理、控制方式和通用变频器的功能等;项目3介绍了MM440变频器的基本结构、安装与调试;项目4通过实例介绍了MM440变频器在变频调速中的应用;项目5通过实际案例介绍了S7-300系列PLC和MM440联机实现对电动机的控制技术。

本书可作为高职高专院校电类相关专业教材,也可作为应用型本科院校、电大、中等职业学校电类相关专业的教材或参考书,还可供相关的工程技术人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

电机调速应用技术及实训/葛芸萍主编. —北京:化学工业出版社, 2010.7
高职高专“十一五”规划教材
ISBN 978-7-122-08900-7

I. 电… II. 葛… III. 电机-调速-高等学校: 技术学院-教材 IV. TM3

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第116589号

责任编辑:王听讲

文字编辑:孙科

责任校对:蒋宇

装帧设计:韩飞

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:北京市彩桥印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张11¼ 字数288千字 2010年9月北京第1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:24.00元

版权所有 违者必究

前 言

电机调速技术课程是电气及自动化专业的重要专业课程之一,本书在吸收有关教材长处及本领域新技术内容的基础上,注重内容的整合,将电力电子技术和交直流调速系统整合在一起编写,精选课程内容,注重先进技术的应用。本书重点介绍了直流调速系统及应用,电力电子器件及应用,交流变频调速系统及应用,以及 MM440 变频器结构、参数设置及应用等内容。

本书按项目教学的要求编写,共分 5 个项目,项目 1 直流调速系统,通过 7 个任务阐述直流调速系统的原理和结构;项目 2 交流变频调速基本知识有 5 个学习任务;项目 3 西门子 MM440 变频器的基本结构、安装与调试,由 4 个任务组成;项目 4 MM440 变频器在变频调速中的应用,由 3 个任务组成;项目 5 PLC 和 MM440 变频器的配合应用,由 4 个任务组成。

本教材根据高职高专的教学要求、特点和本课程新技术的发展,注重结合工业应用选材和新技术介绍,尽量简化理论推导,书中配有相关的技能操作,做到学以致用;将实践内容与理论教学内容紧密结合。在阐述理论的基础上,列举工程应用实例,并配有技能训练,有助于学生理解掌握理论知识,提高学生的操作技能与应用能力。

本书可作为高职高专院校电类相关专业教材,也可作为应用型本科院校、电大、中等职业学校电类相关专业的教材或参考书,还可供相关的工程技术人员参考阅读。

本书由黄河水利职业技术学院葛芸萍担任主编,项目 1 由葛芸萍编写,项目 2 由杨箐编写,项目 3 由高杨编写,项目 4 由章若冰(湖南铁道职业技术学院)编写,项目 5 由刘云潺编写。全书由葛芸萍统稿。

我们将为使用本书的教师免费提供电子教案,需要者可以到化学工业出版社教学资源网站 <http://www.cipedu.com.cn> 免费下载使用。

由于时间仓促,加之编者的水平所限,书中不妥之处在所难免,敬请读者不吝指正。

编 者
2010 年 5 月

目 录

项目 1 直流调速系统	1
任务 1 直流电动机的调速方法	1
1.1.1 调速控制系统的性能指标	1
1.1.2 直流电动机的调速方法	3
1.1.3 技能训练	6
任务 2 直流调速用可控直流电源	8
1.2.1 旋转变流机组	8
1.2.2 静止可控整流器	8
1.2.3 直流斩波器或脉宽调制变换器	13
1.2.4 技能训练	16
任务 3 单闭环直流调速系统	20
1.3.1 开环系统存在的问题	20
1.3.2 速度负反馈单闭环调速系统的组成及特性	20
1.3.3 单闭环无静差直流调速系统	25
1.3.4 带电流截止负反馈的单闭环转速负反馈调速系统	28
1.3.5 技能训练	29
任务 4 转速、电流双闭环直流调速系统组成及特性	31
1.4.1 问题的提出	31
1.4.2 转速、电流双闭环调速系统的组成	32
1.4.3 转速、电流双闭环调速系统的静特性	32
1.4.4 双闭环直流调速系统的数学模型和动态性能分析	34
1.4.5 技能训练	37
任务 5 可逆调速系统	40
1.5.1 两组晶闸管装置反并联线路与可逆 V-M 系统的四象限运行	40
1.5.2 $\alpha=\beta$ 配合控制的有环流可逆 V-M 系统	43
1.5.3 技能训练	44
任务 6 脉宽调制 (PWM) 调速控制系统	49
1.6.1 脉宽调制变换器	49
1.6.2 脉宽调速系统的控制电路	53
1.6.3 直流脉宽调速系统的机械特性	54
1.6.4 脉宽调速系统的特殊问题	55
1.6.5 技能训练	56

任务 7 西门子 6RA70 全数字直流调速装置	60
1.7.1 概述	60
1.7.2 6RA70 选型	61
1.7.3 参数设定单元	61
1.7.4 软件结构及各部分功能	64
1.7.5 技能训练	65
项目 2 交流变频调速基本知识	66
任务 1 三相异步电动机的调速方法	66
2.1.1 转差率调速	66
2.1.2 变极调速	68
2.1.3 变频调速	68
2.1.4 技能训练	70
任务 2 变压变频调速装置的类型与特点	70
2.2.1 按变流环节不同分类	70
2.2.2 按直流电路的滤波方式分类	72
2.2.3 按电压的调制方式分类	73
2.2.4 按控制方式分类	77
2.2.5 按输入电流的相数分类	79
2.2.6 技能训练	79
任务 3 中小容量通用变频器	79
2.3.1 变频器的基本结构	79
2.3.2 变频器的主电路	80
2.3.3 控制电路	83
2.3.4 变频器主要功能	84
2.3.5 技能训练	89
任务 4 变频调速系统的控制	89
2.4.1 变频器的外接主电路	89
2.4.2 主要电器的选择	91
2.4.3 电动机的正、反转控制电路	92
2.4.4 外接控制端子的应用	95
2.4.5 专用输出控制端子的应用	97
2.4.6 多单元拖动系统的同步控制	97
2.4.7 变频与工频的切换控制	99
2.4.8 变频器的闭环控制	100
2.4.9 技能训练	104
任务 5 变频器的选择	104
2.5.1 变频器种类的选择	104
2.5.2 变频器容量的选择	105

2.5.3 技能训练	107
项目3 西门子 MM440 变频器	108
任务1 MM440 变频器的基本结构	108
3.1.1 MM440 变频器主要特点	108
3.1.2 M440 变频器外形规格	109
3.1.3 M440 变频器的电路结构	109
3.1.4 MM440 变频器的技术规格	112
3.1.5 MM440 变频器的可选件	113
3.1.6 技能训练	114
任务2 MM440 变频器的安装	114
3.2.1 变频器的工作环境	114
3.2.2 机械安装	115
3.2.3 电气安装	116
3.2.4 技能训练	118
任务3 MM440 变频调试	118
3.3.1 用状态显示屏 (SDP) 进行调试	118
3.3.2 用基本操作板 (BOP) 进行调试	119
3.3.3 用高级操作板 (AOP) 调试变频器	120
3.3.4 BOP/AOP 的调试功能	120
3.3.5 MM440 变频器的常规操作	125
3.3.6 技能训练	126
任务4 MM440 变频器的参数与故障排除	127
3.4.1 参数结构	127
3.4.2 参数的访问	127
3.4.3 故障排除	128
3.4.4 技能训练	130
项目4 MM440 变频器在变频调速中的应用	131
任务1 MM440 变频器开关量操作	131
4.1.1 开关量输入功能	131
4.1.2 开关量输出功能	131
4.1.3 MM440 变频器开关量常用参数	132
4.1.4 技能训练	133
任务2 MM440 变频器模拟量操作	135
4.2.1 模拟量输入端子	135
4.2.2 模拟量输出端子	136
4.2.3 MM440 变频器模拟量的常用参数	137
4.2.4 技能训练	138
任务3 MM440 变频器多段速运行操作	139

4.3.1	直接选择	139
4.3.2	直接选择+ON 命令	140
4.3.3	二进制编码选择+ON 命令 (P0701~P0704=17)	140
4.3.4	MM440 变频器多段速运行操作常用参数	140
4.3.5	技能训练	141
项目 5	PLC 和 MM440 变频器的配合应用	145
任务 1	PLC、MM440 和电动机的选择	145
5.1.1	PLC 的选择	145
5.1.2	电动机的选择	146
5.1.3	变频器的参数	146
任务 2	S7-300 系列 PLC 和 MM440 联机实现开关量操作控制	146
5.2.1	控制任务	146
5.2.2	S7-300PLC 数字输入、输出变量约定	147
5.2.3	PLC 程序设计	147
5.2.4	操作步骤	147
5.2.5	技能训练	149
任务 3	S7-300 系列 PLC 和 MM440 联机实现模拟信号操作控制	149
5.3.1	控制任务	149
5.3.2	S7-300PLC 输入、输出变量约定	149
5.3.3	PLC 程序设计	150
5.3.4	操作步骤	150
5.3.5	技能训练	151
任务 4	S7-300 系列 PLC 和 MM440 联机实现 3 段固定频率控制	151
5.4.1	控制任务	151
5.4.2	MM440 变频器和 S7-300PLC 输入输出变量约定	151
5.4.3	PLC 程序设计	152
5.4.4	操作步骤	153
5.4.5	技能训练	153
附录	MM440 变频器参数表	154
参考文献		179

项目 1 直流调速系统

任务 1 直流电动机的调速方法

电动机是用来拖动某种生产机械的动力设备,所以需要根据工艺要求调节其转速。比如:在加工毛坯工件时,为了防止工件表面对生产刀具的磨损,加工时要求电动机低速运行;而在对工件进行精加工时,为了缩短加工时间,提高产品的成本效益,加工时要求电动机高速运行。所以,将调节电动机转速,以适应生产要求的过程称为调速,而用于完成这一功能的自动控制系统就称为调速系统。

目前调速系统分为交流调速系统和直流调速系统,由于直流调速系统的调速范围广、静差率小、稳定性好以及具有良好的动态性能,因此在相当长的时期内,高性能的调速系统几乎都采用了直流调速系统。但近年来,随着电子工业与技术的发展,高性能的交流调速系统的应用范围逐渐扩大,并大有取代直流调速系统发展趋势。但直流调速系统作为一个沿用了近百年的调速系统,了解其基本的工作原理,并加深对自动控制原理的理解还是有必要的。

1.1.1 调速控制系统的性能指标

任何一台需要转速控制的设备,其生产工艺对控制性能都有一定的要求。例如,精密机床要求加工精度达到几十微米至几微米;重型机床的给进机构需要在很宽的范围内调速,最高速度和最低速度相差近 300 倍;容量几千千瓦的初轧机轧辊电动机在不到 1s 的时间内就得完成从正转到反转的过程;高速造纸机的抄纸速度达到 1000m/min,要求稳速误差小于 0.01%。所有这些要求,都可以转化成电动机调速控制系统的稳态和动态指标,作为设计系统时的依据。

各种生产机械对调速系统提出了不同的转速控制要求,转速控制归纳起来有以下三个方面:

① 调速。在一定的最高转速和最低转速范围内,分挡(有级)地或者平滑(无级)地调节转速。

② 稳速。以一定的精度在所需转速上稳定地运行,不因各种可能的外来干扰(如负载变化、电网电压波动等)而产生过大的转速波动,以确保产品质量。

③ 加、减速控制。对频繁启动、制动的设备要求尽快地加、减速,缩短启动、制动时间,以提高生产率;对不宜经受剧烈速度变化的生产机械,则要求启动、制动尽量平稳。

以上三个方面有时都须具备,有时只要求其中一项或两项,其中有些方面之间可能还是相互矛盾的。为了定量地分析问题,一般规定几种性能指标,以便衡量一个调速系统的性能。

1. 稳态指标

运动控制系统稳定运行时的性能指标称为稳态指标,又称静态指标。例如,调速系统稳态运行时的调速范围和静差率,位置随动系统的定位精度和速度跟踪精度,张力控制系统的

稳态张力误差等。下面具体分析调速系统的稳态指标。

(1) 调速范围 D

生产机械要求电动机能达到的最高转速 $n_{\max}$ 和最低转速 $n_{\min}$ 之比称为调速范围，用字母 D 表示

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

其中 $n_{\max}$ 和 $n_{\min}$ 一般指额定负载时的转速，对于少数负载很轻的机械，例如精密磨床，也可以用实际负载的转速。在设计调速系统时，通常视 $n_{\max}$ 为电动机的额定转速 n_N 。

(2) 静差率 S

当系统在某一转速下运行时，负载由理想空载变到额定负载时所对应的转速降落 Δn_N 与理想空载转速 n_0 之比，称为静差率 S ，即

$$S = \frac{\Delta n_N}{n_0} \times 100\% \quad (1-2)$$

显然，静差率表示调速系统在负载变化下转速的稳定程度，它和机械特性的硬度有关，特性越硬，静差率越小，转速的稳定程度就越高。

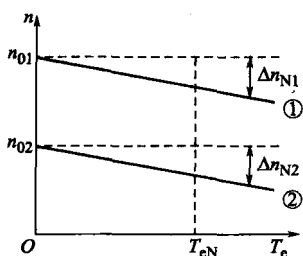


图 1-1 不同转速下的静差率

然而静差率与机械特性硬度又是有区别的。一般变压调速系统在不同转速下的机械特性是互相平行的，如图 1-1 中的两条特性曲线，两者的硬度相同，额定速降相等，但它们的静差率却不同，因为理想空载转速不一样。这就是说，对于同样硬度的特性，理想空载转速越低时，静差率越大，转速的相对稳定性也就越差。

(3) 调压调速系统中 D 、 S 和 Δn_N 之间的关系

在直流电动机调压调速系统中， $n_{\max}$ 就是电动机的额定速度 n_N ，若额定负载时的转速降落为 Δn_N ，则系统的静差率应该是最低转速时的静差率，即

$$S = \frac{\Delta n_N}{n_{0\min}} \quad (1-3)$$

而额定负载时的最低转速为

$$n_{\min} = n_{0\min} - \Delta n_N \quad (1-4)$$

考虑到式(1-3)，式(1-4)可以写成

$$n_{\min} = \frac{\Delta n_N}{S} - \Delta n_N = \frac{\Delta n_N(1-S)}{S} \quad (1-5)$$

而调速范围为

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{n_N}{n_{\min}} \quad (1-6)$$

将式(1-5)代入式(1-6)，得

$$D = \frac{n_N S}{\Delta n_N (1-S)} \quad (1-7)$$

式(1-7)表达了调速范围 D 、静差率 S 和额定速降 Δn_N 之间应满足的关系。对于同一个调速系统，其特性硬度或 Δn_N 值是一定的，如果对静差率的要求越严（即 S 值越小），系统允许的调速范围 D 就越小。例如，某调速系统电动机的额定转速为 $n_N = 1430 \text{ r/min}$ ，额

定速降为 $\Delta n_N = 110 \text{ r/min}$, 当要求静差率 $S \leq 30\%$ 时, 允许的调速范围为

$$D = \frac{1430 \times 0.3}{110 \times (1 - 0.3)} = 5.57$$

如果要求静差率 $S \leq 10\%$, 则调速范围只有

$$D = \frac{1430 \times 0.1}{110 \times (1 - 0.1)} = 1.44$$

2. 动态指标

如图 1-2 所示。

(1) 上升时间 t_r

单位阶跃响应曲线从零起第一次上升到稳态值 C_∞ 所需的时间称为上升时间, 它表示动态响应的快速性。

(2) 超调量 σ

动态过程中, 输出量超过输出稳态值的最大偏差与稳态值之比, 用百分数表示, 叫做超调量, 即

$$\sigma = \frac{C_{\max} - C_\infty}{C_\infty} \times 100\% \quad (1-8)$$

超调量用来说明系统的相对稳定性,

超调量越小, 说明系统的相对稳定性越好, 即动态响应比较平稳。

(3) 调节时间 t_s

调节时间又称过渡过程时间, 它衡量系统整个动态响应过程的快慢。原则上它应该是系统从给定信号阶跃变化起, 到输出量完全稳定下来为止的时间, 对于线性控制系统, 理论上要到 $t = \infty$ 才真正稳定。实际应用中, 一般将单位阶跃响应曲线衰减到稳态值的误差进入并且不再超出允许误差带 (通常取稳态值的 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$) 所需的最小时间定义为调节时间。

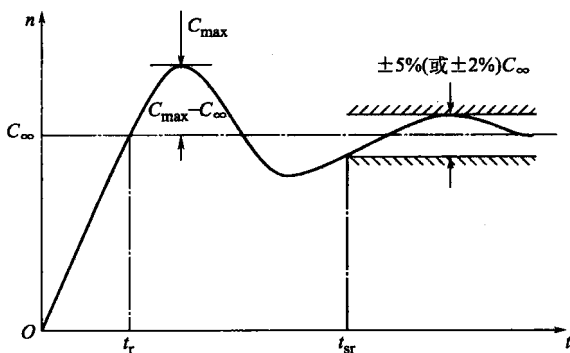


图 1-2 表示跟随性能指标的单位阶跃响应曲线

1.1.2 直流电动机的调速方法

1. 直流电动机的机械特性

直流电动机的机械特性是指在电动机的电枢电压、励磁电流、电枢回路电阻为恒值的条件下, 即电动机处于稳态运行时, 电动机的转速 n 与电磁转矩 T_{em} 之间的关系: $n = f(T_{em})$ 。并励式直流电动机的结构如图 1-3 所示, 励磁绕组与转子绕组并联之后接同一个直流电源 U 。由转子的感生电动势 $E = C_e \Phi n$ 可知, 转子的转速为

$$n = \frac{E}{C_e \Phi}$$

根据电压平衡关系式 $E = U - I_a R_a$ 可得:

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi} = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e \Phi} I_a$$

再由转矩公式 $T_{em} = C_T \Phi I_a$ 可知 $I_a = \frac{T_{em}}{C_T \Phi}$, 代入上式有:

$$\begin{aligned} n &= \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T_{em} \\ &= n_0 - \beta T_{em} = n_0 - \Delta n \end{aligned} \quad (1-9)$$

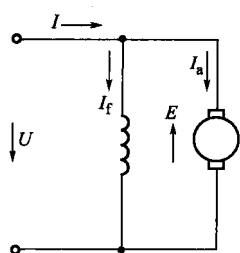


图 1-3 并励直流电动机结构

式中 C_e 、 C_T 、 Φ 和 R_a 均为常数。 $n_0 = \frac{U}{C_e \Phi}$ 为电磁转矩 $T_{em} = 0$ 时的转速，称为理想空载转速； $\beta = \frac{R}{C_e C_T \Phi^2}$ 为机械特性的斜率； $\Delta n = \beta T_{em}$ 为转速降。

式(1-9)称为直流电动机的机械特性方程，它反映了直流电动机的转子转速 n 随电磁转矩 T_{em} 的变化关系。

2. 直流电动机的调速方法

由直流电动机的机械特性方程可知，要改变直流电动机的转速 n 可以采用三种方法，即改变转子电阻 R_a 的大小、改变转子电源电压 U 的大小或改变主磁通 Φ 的大小。

(1) 电枢回路串电阻调速

如图 1-4(a) 所示，在保持电枢电源电压 U 和主磁通 Φ 不变的情况下，在电枢回路中串联一个附加电阻 R_s ，使转子电路的总电阻变成 $(R_a + R_s)$ 。这样直流电动机的机械特性曲线的斜率将比原来增大了，而理想空载转速不变，如图 1-4(b) 所示。附加电阻 R_s 越大，特性曲线的斜率就越大。当负载转矩不变时， $T_{em} = T_L + T_0$ 不变，转子的转速 n 将随之下降了。

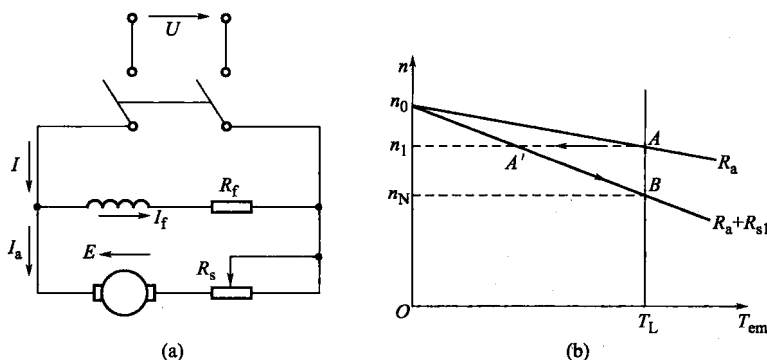


图 1-4 电枢回路串电阻调速电路和机械特性

假设直流电动机的负载转矩 T_L 不变，且直流电动机以转速 n_1 稳定运行。现以转速由 n_1 下降到 n_2 为例，说明其调速过程。

当加入或增大 R_s 时，由于惯性电动机转速还来不及变化仍为 n_1 ，相应的感应电动势 $E = C_e \Phi n$ 也不变，这就导致了电枢电流 I_a 减少，电磁转矩 T_{em} 下降，原来的转矩平衡被破坏，暂时出现 $T_{em} < T_L$ ，电动机将减速运行， n 下降。转速下降，相应地感应电动势 E 也下降，转子电流 I_a 重新增大，电磁转矩 T_{em} 也重新上升，最终转矩又重新达到平衡，再次使 $T_{em} = T_L$ ，这时电动机在较低的转速 n_2 下稳定运行。

电枢回路串接电阻调速方法的优点是设备简单，调节方便，缺点是调速范围小，电枢回路串入电阻后电动机的机械特性变“软”，即 Δn 变大，使负载变动时电动机产生较大的转速变化，即转速稳定性差，而且调速效率较低。

(2) 降低电源电压调速

电动机工作电压不允许超过额定电压，因此电枢电压只能在额定电压以下进行调节。如图 1-5 所示，在保持主磁通 Φ 和转子电路电阻 R_a 不变的情况下，调节转子电源电压 U 可改

变直流电动机的转速。

由机械特性方程 $n_0 = \frac{U}{C_e \Phi}$ 可知：当转子电源电压 U 改变时，理想空载转速将随之变化，而特性曲线的斜率 β 不变，如图 1-5(b) 所示。随着将 U 的调低，机械特性曲线将向下平移。如果负载转矩 T_L 不变，转速 n 将随之下降，起到了调速的作用。

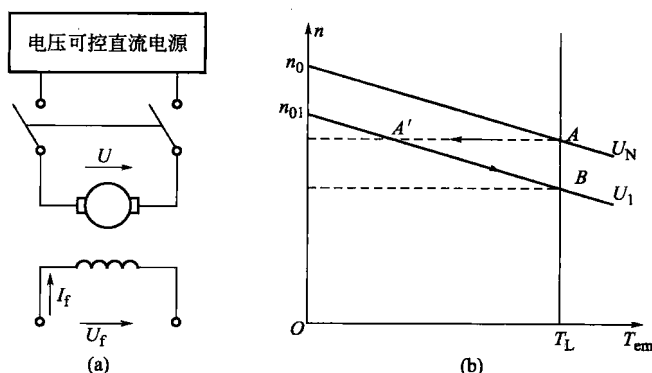


图 1-5 降压调速电路和机械特性

改变电枢电源电压调速时，电动机机械特性的“硬度”不变，因此，即使电动机在低速运行时，转速随负载变动而变化的幅度较小，即转速稳定性好。当电枢电源电压连续调节时，转速变化也是连续的，所以这种调速称为无级调速。

改变电枢电源电压调速方法的优点是调速平滑性好，即可实现无级调速，调速效率高，转速稳定性好，缺点是需要一套电压可连续调节的直流电源。早期常采用发电机-电动机系统，简称 G-M 系统。这种系统的性能较为优越，但设备多、投资大。目前，这种系统已被晶闸管-电动机系统（简称 SCR-M）取代。

调压调速多用在调速性能要求较高的生产机械上，如机床、轧钢机、造纸机等。

(3) 减弱磁通调速

额定运行的电动机，其磁路已基本饱和，即使励磁电流增加很大，磁通也增加很少，从电动机的性能考虑也不允许磁路过饱和。因此，改变磁通只能从额定值往下调，调节磁通调速即是弱磁调速。如图 1-6 所示，弱磁调速实际上是在保持电源电压 U 和转子电阻 R_a 不变的情况下，调节定子线圈中的串联电阻 R_f ，从而改变定子电流 I_f （也就是主磁通 Φ ）的大小进行调速。因为定子电路中串联一个附加电阻 R_f 将使 I_f 减小，主磁通 Φ 减小。由机械特性方程可知，主磁通 Φ 的减少将使理想空载转速上升，曲线斜率更显著地上升，相应的机械特性曲线上移，且倾斜程度增加。如果负载转矩不变，转速 n 将上升，如图 1-6(b) 所示。

弱磁调速的优点是设备简单，调节方便，运行效率也较高，适用于恒功率负载，缺点是励磁过弱时，机械特性的斜率大，转速稳定性差，拖动恒转矩负载时，可能会使电枢电流过大。

改变电阻调速缺点很多，目前很少采用，仅在有些起重机、卷扬机及电车等调速性能要求不高或低速运转时间不长的传动系统中采用。弱磁调速范围不大，往往是和调压调速配合使用，在额定转速以上作小范围的升速。因此，自动控制的直流调速系统往往以调压调速为主。

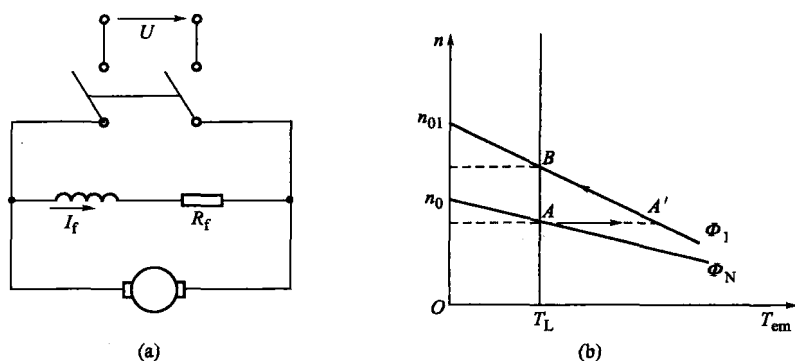


图 1-6 弱磁调速电路和机械特性

1.1.3 技能训练

1. 问答题

① 调速范围和静差率的定义是什么？调速范围、静态速降和最小静差率之间有什么关系？为什么说“脱离了调速范围，要满足给定的静差率也就容易得多了”？

② 直流电动机有几种调速方法？各有何特点？

2. 直流电动机调速方法

(1) 目的

① 掌握用实验方法测取直流并励电动机的工作特性和机械特性。

② 掌握直流并励电动机的调速方法。

(2) 设备

① DJDK-1 型电力电子技术及电动机控制实训装置；

② DD03、D44、D42、D31、DJ15、DJ23、D42 等挂箱；

③ 双踪示波器；

④ 万用表。

(3) 内容及步骤

① 并励电动机的机械特性。

a. 按图 1-7 接线。校正直流测功机 MG 按他励发电机连接，在此作为直流电动机 M 的负载，用于测量电动机的转矩和输出功率。 R_{f1} 选用 D44 的 1800Ω 阻值。 R_{f2} 选用 D42 的 900Ω 串联 900Ω 共 1800Ω 阻值。 R_1 用 D44 的 180Ω 阻值。 R_2 选用 D42 的 900Ω 串联 900Ω 再加 900Ω 并联 900Ω 共 2250Ω 阻值。

b. 将直流并励电动机 M 的磁场调节电阻 R_{f1} 调至最小值，电枢串联启动电阻 R_1 调至最大值，接通控制屏下右边方的电枢电源开关使其启动，其旋转方向应符合转速表正向旋转的要求。

c. M 启动正常后，将其电枢串联电阻 R_1 调至零，调节电枢电源的电压为 $220V$ ，调节校正直流测功机的励磁电流 I_{f2} 为校正值 ($50mA$ 或 $100mA$)，再调节其负载电阻 R_2 和电动机的磁场调节电阻 R_{f1} ，使电动机达到额定值： $U=U_N$ ， $I=I_N$ ， $n=n_N$ 。此时 M 的励磁电流 I_f 即为额定励磁电流 I_{fN} 。

d. 保持 $U=U_N$ ， $I_f=I_{fN}$ ， I_{f2} 为校正值不变的条件下，逐次减小电动机负载。测取电动机电枢输入电流 I_a ，转速 n 和校正电动机的负载电流 I_F (由校正曲线查出电动机输出对应转矩 T_2)。共取数据 9~10 组，记录于表 1-1 中。

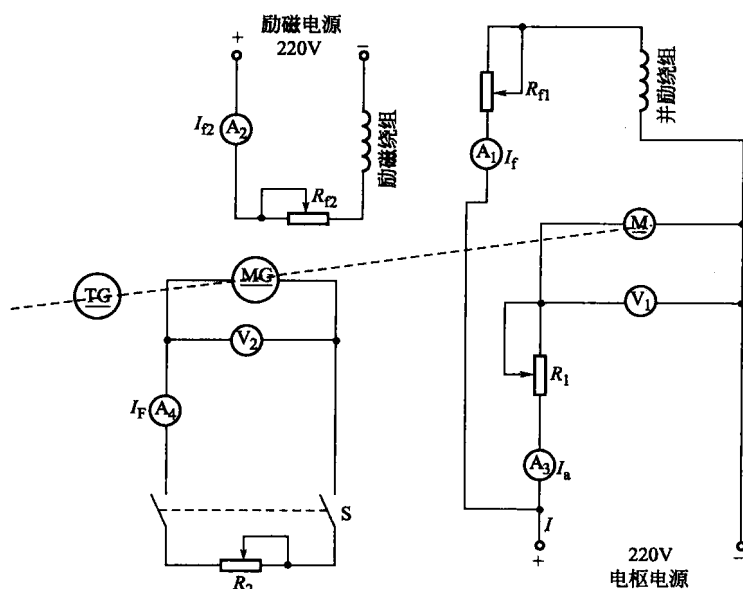


图 1-7 直流并励电动机接线

表 1-1 $U=U_N=$ _____ V $I_f=I_{fN}=$ _____ mA $I_{f2}=$ _____ mA

实验数据	I_a/A										
	$n/(r/min)$										
	I_F/A										

② 调速特性。

a. 改变电枢端电压的调速。直流电动机 M 运行后，将电阻 R_1 调至零， I_{f2} 调至校正值，再调节负载电阻 R_2 、电枢电压及磁场电阻 R_{f1} ，使 M 的 $U=U_N$ ， $I=0.5I_N$ ， $I_f=I_{fN}$ ，记下此时 MG 的 I_F 值。

保持此时的 I_F 值（即 T_2 值）和 $I_f=I_{fN}$ 不变，逐次增加 R_1 的阻值，降低电枢两端的电压 U_a ，使 R_1 从零调至最大值，每次测取电动机的端电压 U_a ，转速 n 和电枢电流 I_a 。

共取数据 8~9 组，记录于表 1-2 中。

表 1-2 $I_f=I_{fN}=$ _____ mA $T_2=$ _____ N·m

U_a/V									
$n/(r/min)$									
I_a/A									

绘出并励电动机调速特性曲线 $n=f(U_a)$ 。

b. 改变励磁电流的调速。直流电动机运行后，将 M 的电枢串联电阻 R_1 和磁场调节电阻 R_{f1} 调至零，将 MG 的磁场调节电阻 R_{f2} 调至校正值，再调节 M 的电枢电源调压旋钮和 MG 的负载，使电动机 M 的 $U=U_N$ ， $I=0.5I_N$ ，记下此时的 I_F 值。

保持此时 MG 的 I_F 值（ T_2 值）和 M 的 $U=U_N$ 不变，逐次增加磁场电阻阻值：直至 $n=1.3n_N$ ，每次测取电动机的 n 、 I_f 和 I_a 。共取 7~8 组记录于表 1-3 中。

表 1-3 $U=U_N=$ _____ V $T_2=$ _____ N · m

$n/(r/min)$								
I_f/mA								
I_a/A								

绘出并励电动机调速特性曲线 $n=f(I_f)$

(4) 思考题

① 并励电动机的速率特性 $n=f(I_a)$ 为什么是略微下降？是否会出现上翘现象？为什么？上翘的速率特性对电动机运行有何影响？

② 当电动机的负载转矩和励磁电流不变时，减小电枢端电压，为什么会引起电动机转速降低？

③ 当电动机的负载转矩和电枢端电压不变时，减小励磁电流会引起转速的升高，为什么？

④ 并励电动机在负载运行中，当磁场回路断线时是否一定会出现“飞车”？为什么？

任务 2 直流调速用可控直流电源

调压调速是直流调速系统采用的主要方法，调节电枢供电电压或者改变励磁磁通，都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，以获得可调的直流电压。

② 静止可控整流器。用静止的可控整流器，如汞弧整流器和晶闸管整流装置，产生可调的直流电压。

③ 直流斩波器或脉宽调制变换器。用恒定直流电源或不可控整流电源供电，利用直流斩波或脉宽调制的方法产生可调的直流平均电压。

1.2.1 旋转变流机组

由原动机（柴油机、交流异步或同步电动机）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。

G-M 系统在 20 世纪 60 年代以前曾广泛地使用着，但该系统设备多，体积大，费用高，效率低，安装需打地基，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。

1.2.2 静止可控整流器

从 20 世纪 50 年代开始，采用汞弧整流器和闸流管这样的静止变流装置来代替旋转变流机组，形成所谓的离子拖动系统。离子拖动系统克服旋转变流机组的许多缺点，而且缩短了响应时间，但是由于汞弧整流器造价较高，体积仍然很大，维护麻烦，尤其是汞如果泄漏，将会污染环境，严重危害身体健康。因此，应用时间不长，到了 20 世纪 60 年代又让位给更为经济可靠的晶闸管整流器。

1957 年，晶闸管（俗称可控硅整流元件，简称“可控硅”）问世，20 世纪 60 年代起就

已生产出成套的晶闸管整流装置。晶闸管问世以后, 变流技术出现了根本性的变革。目前, 采用晶闸管整流供电的直流电动机调速系统(即晶闸管-电动机调速系统, 简称 V-M 系统, 又称静止 Ward-Leonard 系统) 已经成为直流调速系统的主要形式。图 1-8 所示是 V-M 系统的原理框图。

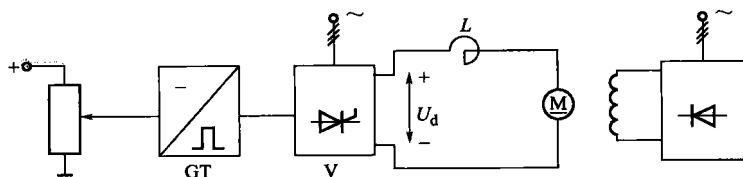


图 1-8 晶闸管-电动机调速系统原理框图 (V-M 系统)

图中 V 是晶闸管可控整流器, 它可以是任何一种整流电路, 通过调节触发装置 GT 的控制电压来移动触发脉冲的相位, 从而改变整流输出电压平均值 U_d , 实现电动机的平滑调速。和旋转变流机组及离子拖动变流相比, 晶闸管整流不仅在经济性和可靠性上都有很大提高, 而且在技术性能上显示出很大的优越性。晶闸管可控整流器的功率放大倍数大约在 $10^4 \sim 10^5$, 控制功率小, 有利于微电子技术引入到强电领域; 在控制作用的快速性上也大大提高, 有利于改善系统的动态性能。

1. 晶闸管 (SCR)

晶闸管是在半导体二极管、三极管之后出现的一种新型的大功率半导体器件。其外形、结构及图形符号如图 1-9 所示, 它有三个电极, 即阳极 A、阴极 K、控制极 G (又称门极)。根据功率的大小, 具有 TO92、TO220、螺栓形和平板形等多种封装形式, 如图 1-9(a) 所示。螺栓形带有螺栓的那一端是阳极 A, 它可与散热器固定, 另一端的粗引线是阴极 K, 细线是控制极 G, 这种结构更换方便, 用于 100A 以下元件。平板形中间的金属环是控制极 G, 离控制极远的一面是阳极 A, 近的一面是阴极 K, 这种结构散热效果比较好, 用于 200A 以上的元件。晶闸管是由四层半导体构成的, 如图 1-9(b) 所示。它由单晶硅薄片 P_1 、 N_1 、 P_2 、 N_2 四层半导体材料叠成, 形成三个 PN 结。晶闸管的图形符号如图 1-9(c) 所示。

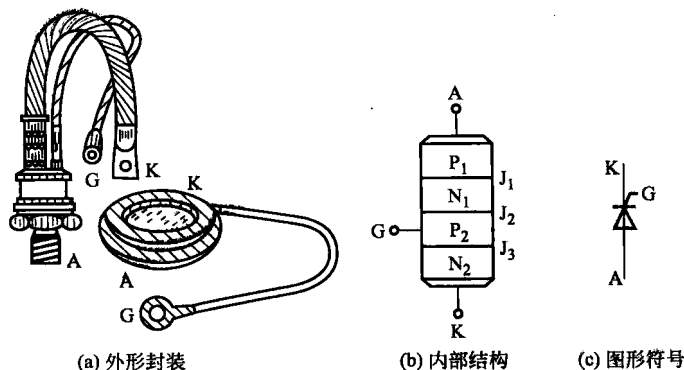


图 1-9 晶闸管外形、结构及图形符号

实验证明, 当在晶闸管的阳极与阴极之间加反向电压时, 这时不管控制极的信号情况如何, 晶闸管都不会导通。当在晶闸管的阳极与阴极之间加正向电压时, 若在控制极与阴极之间没有电压或加反向电压, 晶闸管还是不会导通。只有当在晶闸管的阳极与阴极之间加正向电压时, 在控制极与阴极之间加正向电压, 晶闸管才会导通。但晶闸管一旦导通, 不管控制