

高等职业教育电气自动化专业“双证课程”培养方案规划教材

The Projected Teaching Materials of "Double-Certificate Curriculum" Training for Electrical Automation Discipline in Higher Vocational Education



交直流 调速系统

陈相志 主编

郭艳萍 副主编

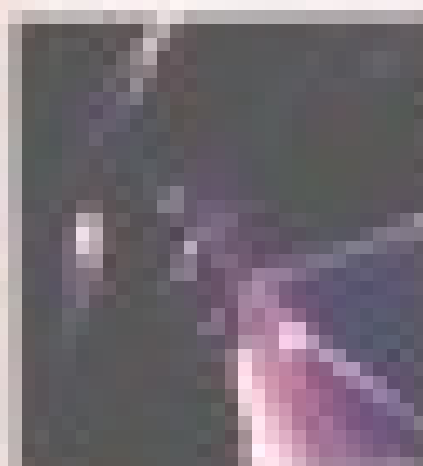
AC&DC Motor
Speed Control System

- ◆ 内容编写重点突出
- ◆ 实训案例典型实用
- ◆ 理论实训紧密结合



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

“十二五”国家重点图书出版规划项目



交直流 调速系统

张耀明 主编
张耀明 副主编

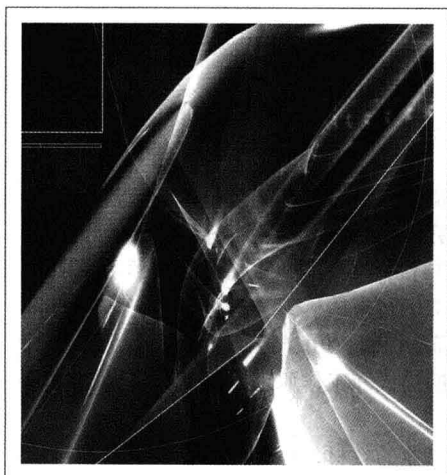
张耀明, *Minister*
Applied Electronics Engineering

——
——
——

中国电力出版社

高等职业教育电气自动化专业“双证课程”培养方案规划教材

The Projected Teaching Materials of "Double-Certificate Curriculum" Training for Electrical Automation Discipline in Higher Vocational Education



交直流 调速系统

陈相志 主编

郭艳萍 副主编

AC&DC Motor
Speed Control System

人民邮电出版社

北京

图书在版编目 (C I P) 数据

交直流调速系统 / 陈相志主编. — 北京 : 人民邮电出版社, 2011. 2
高等职业教育电气自动化专业“双证课程”培养方案
规划教材
ISBN 978-7-115-24500-7

I. ①交… II. ①陈… III. ①直流电机—调速—高等学校: 技术学校—教材②交流电机—调速—高等学校: 技术学校—教材 IV. ①TM330.12②TM340.12

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第257646号

内 容 提 要

本书以实验、实训项目为主导, 将理论知识的介绍与实训操作紧密结合, 根据实验、实训需要安排各章节内容。直流调速以熟悉调速系统的构成、工作原理及调试方法为目的, 设置了开环调速、单闭环调速、双闭环调速、可逆调速及脉宽调速 5 个综合性实验、实训项目; 交流调速以熟悉变频器的应用和变频调速系统的构成为目的, 设置了变频器的面板运行模式、外部运行模式、组合运行模式、加减速和直流制动参数设定、点动控制与输出端子功能检测、多段速及升降速控制、PLC 控制多段速 7 个实训项目。通过学习和实验、实训, 学生不仅能够掌握交直流调速系统的构成和工作原理, 而且具备一定的系统安装、调试和维护能力。

本书可作为高职电气自动化、电气工程、机电一体化等相关专业的教材, 也可供工程技术人员自学或作为培训教材使用。

高等职业教育电气自动化专业“双证课程”培养方案规划教材

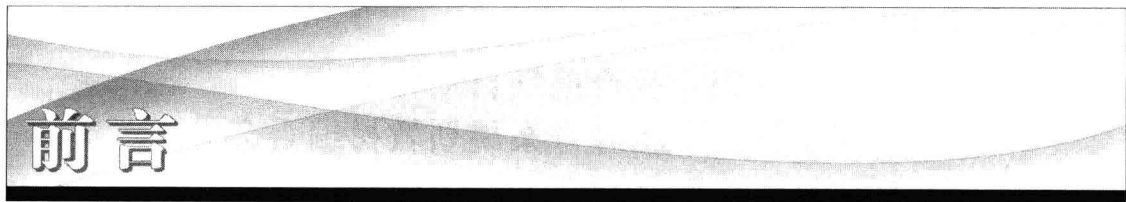
交直流调速系统

-
- ◆ 主 编 陈相志
副 主 编 郭艳萍
责任编辑 李育民
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
中国铁道出版社印刷厂印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 15.25 2011 年 2 月第 1 版
字数: 381 千字 2011 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-24500-7

定价: 29.00 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154



“交直流调速系统”是高职电气自动化、机电一体化等专业的核心课程，也是培养高职学生维修电工工程实践能力和创新能力的一门重要课程。编者根据目前我国维修电工和机电一体化岗位的人才培养目标、专业知识结构和能力结构的教学要求，结合多年来的教学经验，并借鉴其他教材，以实训项目为主导，采用“学做合一”方式组织教材内容。

本书以培养学生对调速系统的分析、安装和调试能力为核心，以熟悉基本的交直流调速系统的工作原理、安装、调试为主要学习目标，在章节内容上按照“学习目标—相关知识—实验、实训—章节总结—能力测试”这一思路进行编排，力求把理论知识和实践技能有机地结合在一起，难点分散，由浅入深、由简单到复杂。在保证知识结构相对完整、系统的前提下，根据实训项目的需要精选教材内容，突出“内容精简”、“思路清晰”、“易学易会”等特点。本书在文字叙述方面，言简意赅、重点突出；在任务选取方面，实用性强、针对性强。

全书按照直流调速和交流调速分为上、下两篇，共 9 章。上篇根据直流调速系统由简单到复杂的顺序依次介绍开环调速系统、单闭环调速系统、双闭环调速系统、可逆调速系统和脉宽调速系统，共 5 章；下篇 4 章，先简要介绍了交流电动机的调速方式及变频调速的原理，然后以三菱变频器为例介绍变频器的运行模式及功能、变频器常用控制电路及安装布线要求，为便于知识和应用能力的迁移，第 9 章介绍了西门子 MM440 变频器的运行和操作。变频器的接线端子、功能指令及控制线路类型较多，为便于读者学习和掌握，本书对相关内容加以梳理和模块化分解，并安排对应的实训操作训练，有利于循序渐进地学习和由模仿操作到应用创新能力的培养。

本书的参考学时为 94~128 学时，其中实践环节为 32~38 学时，各章节的参考学时参见下面的学时分配表。

章 节	课 程 内 容	学 时	
		理 论	实 训
第 1 章	直流调速简介	4	2
第 2 章	单闭环直流调速系统	4~6	2
第 3 章	双闭环直流调速系统	6~8	4
第 4 章	直流可逆调速系统	8~12	4
第 5 章	脉宽调速系统	6~8	4
第 6 章	交流异步电动机的调速及变频原理	4~6	
第 7 章	三菱变频器的运行方式与功能	14~18	12~16
第 8 章	变频器常用控制电路	14~18	4~6
第 9 章	西门子 MM440 变频器的操作与运行	2~4	
学时总计		62~84	32~38

本书由漯河职业技术学院的陈相志任主编，编写了上篇直流调速部分，并进行全书的精心选例、设计和统稿工作；漯河职业技术学院的郭艳萍编写了下篇交流调速部分。本书在编写过程中参阅了大量同类教材，在此对相关人员一并表示衷心的感谢！

限于编者的水平，书中难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

编者

2010年10月

高等职业教育电气自动化专业 “双证课程”培养方案规划教材编委会

主 任：程 周

副主任：李金钟

委 员：刘小春 华满香 刘高锁 徐丽娟 郭艳萍 张伟林 黄 玮
韩满林 李金钟 陈相志 巩运强 刘春梅 黄 星 邹 琦 冯 凯
王文立 陈 冰 李晓波 邱丽芳 李德尧 赵亚芳 陈迎松 刘红兵
姜凤武 周欢喜 黄会雄 袁力辉 陶 敏 程 周 郭建尊 王翠兰
李育民 潘新文 王金花

目 录

上篇 直流电动机调速系统

第 1 章 直流调速简介 2

1.1 直流电动机的调速方法 2

1.1.1 调压调速 3

1.1.2 串电阻调速 4

1.1.3 弱磁调速 4

1.2 直流调速系统的发展 5

1.2.1 G-M 调速系统 5

1.2.2 V-M 调速系统 5

1.2.3 PWM 调速系统 6

1.3 直流调速系统的性能指标 6

1.3.1 动态性能指标 7

1.3.2 稳态性能指标 8

1.4 开环直流调速系统 10

1.4.1 系统的构成 10

1.4.2 系统的工作原理 10

1.4.3 开环机械特性 10

1.5 开环直流调速系统实验 11

本章小结 15

检测题 16

第 2 章 单闭环直流调速系统 18

2.1 单闭环调速系统的构成及 工作原理 18

2.2 单闭环调速系统的性能分析 19

2.2.1 单闭环调速系统的稳态 结构图 19

2.2.2 单闭环调速系统的抗干扰性 分析 20

2.2.3 单闭环调速系统的静特性 21

2.2.4 闭环调速与开环调速的 比较 21

2.2.5 闭环调速系统的基本 特征 23

2.3 无静差调速系统 23

2.3.1 调节器及其特性 24

2.3.2 无静差调速系统 25

2.4 单闭环有静差直流调速系统 实验 27

本章小结 30

检测题 31

第 3 章 双闭环直流调速系统 33

3.1 双闭环调速系统的构成 33

3.1.1 问题的提出 33

3.1.2 双闭环调速系统的构成 34

3.2 双闭环调速系统的静特性 分析 35

3.2.1 稳态结构图和静特性 35

3.2.2 稳态参数计算 37

3.3 双闭环调速系统的启动过程 分析 38

3.4 双闭环调速系统的动态 性能 39

3.4.1 动态跟随性能 39

3.4.2 动态抗干扰性能 39

3.4.3 两个调节器的作用 40

3.5 双闭环直流调速系统实验 41

本章小结 44

检测题	45
第 4 章 直流可逆调速系统	47
4.1 V-M 系统的可逆线路	47
4.1.1 V-M 系统可逆线路的 选择	47
4.1.2 可逆线路中电动机和晶闸管的 工作状态	49
4.2 可逆线路的环流问题	50
4.2.1 环流及其利弊	50
4.2.2 环流的类型及其抑制 措施	51
4.3 有环流可逆调速系统	53
4.3.1 $\alpha = \beta$ 配合控制有环流可逆 调速系统	53
4.3.2 制动过程分析	55
4.4 逻辑无环流可逆调速系统	57
4.4.1 逻辑无环流可逆调速系统的 组成	58
4.4.2 逻辑无环流可逆调速系统的 工作原理	59

4.4.3 逻辑控制器 DLC	60
4.5 逻辑无环流可逆调速系统 实验	62
本章小结	67
检测题	68
第 5 章 脉宽调速系统	71
5.1 脉宽调速基本概念	71
5.2 PWM 功率放大器	72
5.2.1 不可逆 PWM 功率 放大器	72
5.2.2 可逆 PWM 功率放大器	75
5.3 脉宽调速系统的控制电路	79
5.3.1 脉宽调制器 UPW	80
5.3.2 延时环节 DLD	82
5.3.3 基极驱动器 GD	82
5.4 可逆直流脉宽调速系统 实验	83
本章小结	87
检测题	88

下篇 交流电动机调速系统

第 6 章 交流异步电动机调速及变频 原理	91
6.1 交流异步电动机调速的基本 类型	91
6.1.1 变极调速	92
6.1.2 变转差率调速	93
6.1.3 电磁转差离合器调速	94
6.1.4 变频调速	95
6.2 三相异步电动机的变频调速 原理	96
6.3 通用变频器的基本结构与 控制方式	99
6.3.1 基本结构	99
6.3.2 分类	101
6.3.3 控制方式	104
本章小结	105

检测题	106
第 7 章 三菱变频器的运行方式与 功能	108
7.1 通用变频器端子接线图	108
7.1.1 三菱 FR-A700 系列变频器 的端子接线图	108
7.1.2 三菱 FR-S500 系列变频器 接线图	113
7.2 通用变频器的运行模式与操作	115
7.2.1 运行模式	115
7.2.2 工作频率给定方式	116
7.2.3 操作面板	119
7.2.4 变频器面板运行模式 实训	121
7.2.5 变频器外部运行模式 实训	124

7.2.6 变频器组合运行模式 实训	125	电路	167
7.3 变频器的加速和启动功能	127	8.3 PLC 控制的变频器电路	169
7.3.1 与工作频率有关的参数	127	8.3.1 PLC 控制的变频器启/ 停电路	169
7.3.2 加速时间和加速方式	130	8.3.2 PLC 控制的变频器多段速 电路	172
7.4 变频器的减速和制动功能	131	8.3.3 PLC 控制多段速实训	174
7.4.1 减速时间和减速方式	131	8.4 变频器的恒压变频供水系统	175
7.4.2 制动方式	131	8.4.1 恒压变频供水的目的	175
7.4.3 变频器加减速、直流制动 参数设定实训	135	8.4.2 恒压供水系统的构成	177
7.5 变频器的外接端子及控制 功能	139	8.4.3 PID 控制功能	178
7.5.1 外接输入控制端的功能	139	8.4.4 变频器的内置 PID 功能	181
7.5.2 外接输出控制端的功能	142	8.4.5 单泵恒压变频供水系统	182
7.5.3 变频器点动控制与输出端子 功能检测实训	144	8.4.6 多泵恒压变频供水系统	186
7.5.4 多段速控制端功能	148	8.5 通用变频器的选择	192
7.5.5 升降速控制端功能	149	8.6 变频器外围电器的选择	196
7.5.6 变频器的多段速及升降速 控制功能实训	151	8.7 变频器的布线	197
7.6 变频器的保护和显示功能	155	8.7.1 主电路布线	198
7.6.1 保护功能	155	8.7.2 控制电路布线	199
7.6.2 瞬时停电再启动功能	156	8.7.3 变频器的接地	201
7.6.3 显示功能	156	本章小结	202
本章小结	157	检测题	203
检测题	158	第 9 章 西门子 MM440 变频器的 操作与运行	207
第 8 章 变频器常用控制电路	161	9.1 西门子 MM440 变频器的 接线图	207
8.1 变频器的基本控制电路	161	9.2 西门子 MM440 变频器的 操作运行方式	208
8.1.1 变频器的外接主电路	161	9.3 变频器的功能参数设置与面板 操作运行	211
8.1.2 变频器的启/停控制 电路	162	9.4 变频器的外端子控制运行	217
8.2 变频器的工频切换电路	164	9.5 变频器的多段速控制运行	219
8.2.1 变频器内置工频运行切换 功能	164	附录 直流调速实验设备简介	222
8.2.2 继电器控制的工频切换		参考文献	236

上篇

直流电动机调速系统

直流电动机调速系统

- 。根据图 1-1 所示的调速系统框图，可以得出该系统的传递函数为：
- 该系统的特征方程为：
- 该系统的静态增益为：
- 该系统的截止频率为：
- 该系统的相角裕度为：

图 1-1 所示的调速系统框图，可以得出该系统的传递函数为：

该系统的特征方程为：

该系统的静态增益为：

该系统的截止频率为：

该系统的相角裕度为：

图 1-1 所示的调速系统框图，可以得出该系统的传递函数为：

该系统的特征方程为：

该系统的静态增益为：

该系统的截止频率为：

该系统的相角裕度为：

第1章

直流调速简介

学习目标

- 了解直流电动机调速的3种方法及其主要特点。
- 了解直流调速所经历的3个发展阶段。
- 了解直流调速系统的性能指标,掌握调速范围、静差率两个稳态性能指标的含义及其相关计算。
- 掌握开环直流调速系统的构成及其特点。
- 掌握开环机械特性的含义。
- 能在实验室熟练完成开环调速系统的接线和调试,会测试开环机械特性。

所谓调速就是通过改变电动机或电源的参数使电动机的转速按照控制要求发生改变或保持恒定。调速有两层含义:一是变速控制,即让电动机的转速按照控制要求改变;二是稳速控制,当控制要求没改变时,系统受到外界干扰作用,电动机的转速应保持相对恒定,即调速系统应具有抗干扰性。在实际生产过程中,调速性能的好坏直接关系到产品加工的精度、质量和生产效率,所以,调速技术广泛应用于各个领域的生产过程中。

直流调速系统是以直流电动机为受控对象,按生产工艺对电动机转速进行控制的电力拖动系统。由于直流电动机具有启动、制动性能好,调速范围宽的特点,因此,直流调速系统广泛应用于轧钢、造纸等行业。但是,随着电力电子技术和控制技术的发展,交流电动机的变频调速技术得到快速发展,交流调速性能也日趋完善,逐渐占据电力拖动控制系统的主导地位。

1.1

直流电动机的调速方法

他励直流电动机的电气符号与稳态运行时的等效电路如图 1-1 所示。

直流电动机的绕组包括电枢绕组和励磁绕组。励磁绕组上加直流励磁电压 U_f , 产生电动机工作所需的磁通 Φ , 电枢绕组加电枢电压 U_a , 电枢绕组中有电流 I_a , 通电直导线在磁场中受力, 带动电动机电枢旋转。通常情况下励磁电压不变, 通过调节电枢电压的大小来改变电动机

转速。只要电枢电压 U_d 和励磁电压 U_f 二者之一极性发生改变，电动机的转向也随之而变。

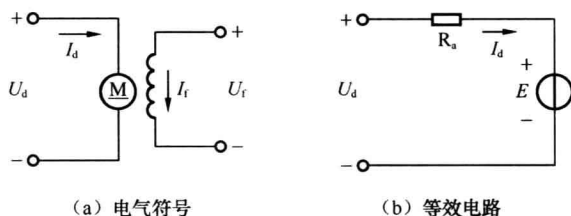


图 1-1 他励直流电动机的电气符号与稳态运行时的等效电路

电动机稳定运行时的等效电路如图 1-1 (b) 所示， E 为电枢绕组产生的感应电势，其大小与电动机的转速 n 成正比； R_a 为电枢的电阻。由等效电路不难得出

$$U_d = I_d R_a + E$$

其中

$$E = K_e \Phi n$$

整理可得直流电动机转速表达式（即机械特性方程）如下：

$$n = \frac{U_d - I_d R_a}{K_e \Phi} = \frac{U_d}{K_e \Phi_N} - \frac{R_a}{K_e \Phi_N} I_d = n_0 - \Delta n$$

式中， $n_0 = \frac{U_d}{K_e \Phi_N}$ ，称为理想空载转速；

$$\Delta n = \frac{R_a}{K_e \Phi_N} I_d, \text{ 为负载电流引起的转速降。}$$

电动机的转速与 5 个参数有关，其中 K_e 为电动势常数，由电动机结构决定，负载电流 I_d 由电动机所带负载决定，所以改变他励直流电动机的转速有 3 种方法：改变电枢电压 U_d 、改变电枢回路电阻 R 、改变磁通 Φ 。

1.1.1 调压调速

通过改变电枢电压来改变电动机转速的方法称为调压调速。其对应的机械特性方程为

$$n = \frac{U_d}{K_e \Phi_N} - \frac{R_a}{K_e \Phi_N} I_d = n_0 - \Delta n$$

电动机的电枢电压一般以额定电压为上限值，所以，电枢电压只能在额定值以下变化。由机械特性方程可知，当电枢电压 U_d 取不同的值时，对应的理想空载转速改变，机械特性的硬度（或斜率）不变，机械特性曲线如图 1-2 所示。

调压调速的特点如下。

① 电枢电压降低，电动机的转速降低，反之，电枢电压升高，电动机的转速升高。

② 电枢电压最大值为额定电压，转速最高值为额定转速。

③ 机械特性的硬度不变，即机械特性是一组平行的斜线。

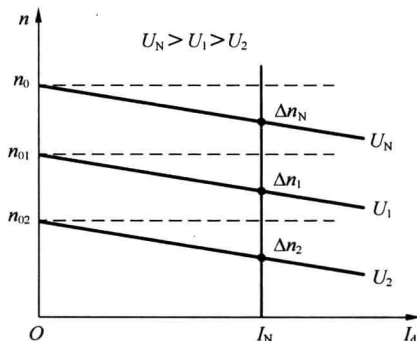


图 1-2 他励电动机调压调速特性

由于获得的机械特性硬度大，调速精度较高，调压调速在直流调速系统中应用广泛。

1.1.2 串电阻调速

串电阻调速是在电动机电枢回路串入电阻来改变电动机的转速。其机械特性方程为

$$n = \frac{U_N}{K_e \Phi_N} - \frac{R}{K_e \Phi_N} I_d = n_0 - \Delta n$$

串入电阻越大，机械特性曲线的斜率越大，即倾斜度越大，转速降 Δn 越大，特性硬度变得越软，但理想空载转速不变，机械特性如图 1-3 所示。

串电阻调速的特点如下。

① 电枢回路电阻增大，电动机转速降低，得到的转速小于额定转速。

② 机械特性曲线具有相同的理想空载转速 n_0 。

③ 特性的硬度随着串入电阻增大而变软。

由于硬度较软，调速精度较低，串电阻调速在调速系统中应用较少。

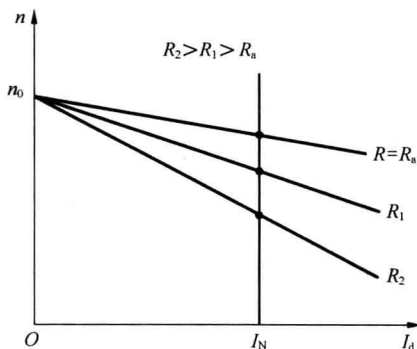


图 1-3 他励电动机串电阻调速特性

1.1.3 弱磁调速

由于直流电动机的额定磁通接近于工作磁通的饱和值，通过改变磁通来调速只能在小于额定磁通的范围内进行调节，故称为弱磁调速。弱磁调速对应的机械特性方程为

$$n = \frac{U_N}{K_e \Phi} - \frac{R_a}{K_e \Phi} I_d = n_0 - \Delta n$$

磁通减小时，机械特性曲线的理想空载转速升高，斜率增大，特性曲线的硬度变软，机械特性曲线如图 1-4 所示。

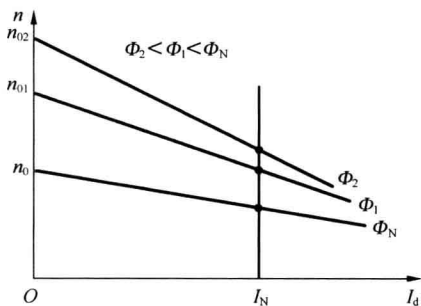


图 1-4 他励电动机弱磁调速特性

弱磁调速的特点如下。

① 可获得高于额定值的转速，磁通 Φ 越小，转速越高。

② 随着磁通减小，理想空载转速 n_0 升高。

③ 磁通减小，特性的硬度变软。

由于其硬度软，调速精度不高，弱磁调速一般不单独使用，有时可与调压调速结合，用于获得高于额定值的转速。

以上 3 种调速方式中，最常用的是调压调速。在不作特殊说明的情况下，直流调速均指的是调压调速。



1. 直流电动机的调速方式有哪 3 种？最常用的是什么调速方式？

2. 直流电动机的 3 种调速方式中，能获得高于额定值转速的是_____调速，调速过程中机械特性硬度不变的是_____调速，理想空载转速不变的是_____调速。

1.2

直流调速系统的发展

直流调速系统是通过改变电动机电枢电压的大小来实现调速的, 根据获得可调电枢电压的方法不同, 将直流调速系统的发展分为 3 个阶段: 直流发电机-电动机调速系统 (简称 G-M 调速系统), 晶闸管整流装置-电动机调速系统 (简称 V-M 调速系统) 和直流脉宽调速系统 (简称 PWM 调速系统)。

1.2.1 G-M 调速系统

在大功率晶闸管元件出现以前, 直流电动机所需的直流电源是通过直流发电机来提供的, 这样的调速系统称为直流发电机-电动机调速系统, 简称 G-M 调速系统, 其电气原理图如图 1-5 所示。

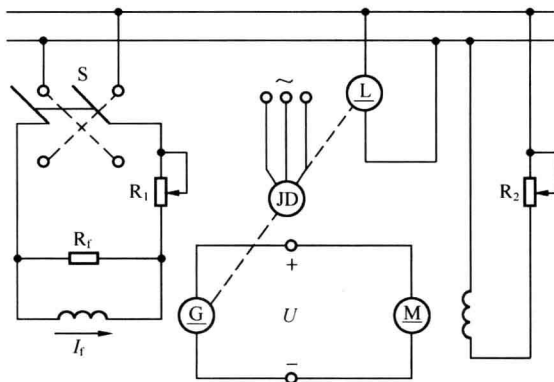


图 1-5 G-M 调速系统原理图

三相交流电动机 JD 同轴驱动两台直流发电机, 永磁式直流发电机 L 为直流电动机 M 和直流发电机 G 提供励磁电源。双掷开关 S 用于改变发电机励磁电流的方向, 可改变发电机输出电压 U 的极性, 从而改变电动机 M 的转向。为防止开关 S 断开时, 励磁绕组产生过高的感应电压, 并联电阻 R_f 为励磁绕组提供续流回路。可变电阻 R_1 用于改变电流 I_f 的大小, 从而改变直流发电机输出电压 U 的大小, 实现对直流电动机的调速。

G-M 调速系统所需设备多, 体积庞大, 效率低, 维护不方便, 运行时噪声大。但该系统在 20 世纪 50 年代曾广泛应用, 目前在尚未进行设备改造的地方仍沿用这种系统。

1.2.2 V-M 调速系统

20 世纪 60 年代以后, 随着大功率电力电子元件——晶闸管的投入使用, 经可控整流获得可调直流电源更加方便、经济, G-M 调速系统逐渐被晶闸管整流装置-直流电动机调速系统 (简称 V-M 调速系统) 所代替。图 1-6 所示为最简单的 V-M 调速系统。

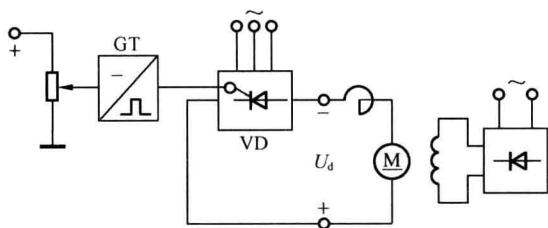


图 1-6 V-M 系统的原理图

V-M 调速系统是目前应用最广的直流调速系统，本课程直流调速部分主要介绍 V-M 直流调速系统。

1.2.3 PWM 调速系统

PWM 调速系统是脉宽调速系统的简称，是直流调速系统发展的最新阶段。交流电源经二极管不可控整流得到稳恒的直流电压 U_s ，再利用斩波电路（即 PWM 装置）将直流电压变成宽度可调的高频率脉冲电压，加在直流电动机的电枢绕组上，通过改变脉冲的宽度改变电动机电枢电压的平均值，从而实现对电动机的调速控制。图 1-7 所示为简单脉宽调速系统的原理图。

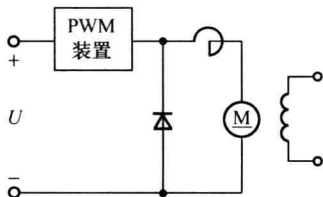


图 1-7 脉宽调速系统原理图

脉宽调速的优点如下。

① 利用二极管不可控整流，输出电压波形中含有的高次谐波较晶闸管整流大大减少，降低了对电网电压品质因数的不利影响。

② 从根本上取消了对晶闸管整流器来说不可缺少的换流电路。

直流脉宽调速系统的性能比 V-M 调速系统更为优越，近年来在中小容量的高精度控制系统中得到广泛应用。



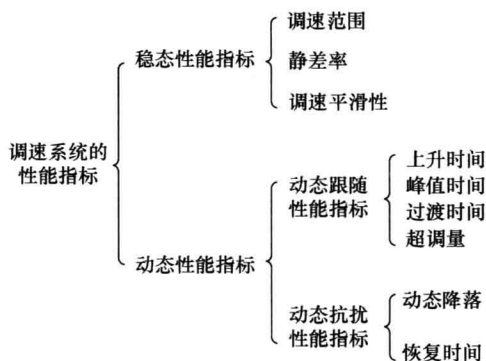
想一想

1. 直流调速系统经历了哪 3 个发展阶段？目前应用最广的是哪种调速系统？
2. V-M 直流调速系统由哪几部分构成？给定电压与电动机的转速有着怎样的控制关系？

1.3

直流调速系统的性能指标

直流调速系统的性能指标分为稳态性能指标和动态性能指标，其分类如下。



1.3.1 动态性能指标

1. 动态跟随指标

系统的输入信号变化时，输出信号的响应情况常用动态跟随性能指标来描述，图 1-8 所示为阶跃输入信号作用下，系统输出量的变化情况，根据输出响应曲线定义如下性能指标。

① 上升时间 t_r ：响应曲线首次上升到稳态值所用的时间，称为上升时间，用 t_r 表示。

② 峰值时间 t_p ：响应曲线首次越过稳态值后达到最大值所用的时间，称为峰值时间，用 t_p 表示。

③ 过渡时间 t_s ：取偏离稳态值 $\pm 5\%$ （或 $\pm 2\%$ ）的区域为允许误差带，输出量进入允许误差带并不再超出，就可认为系统完成过渡过程达到了稳态，系统完成过渡过程所用的时间称为过渡时间，用 t_s 表示。

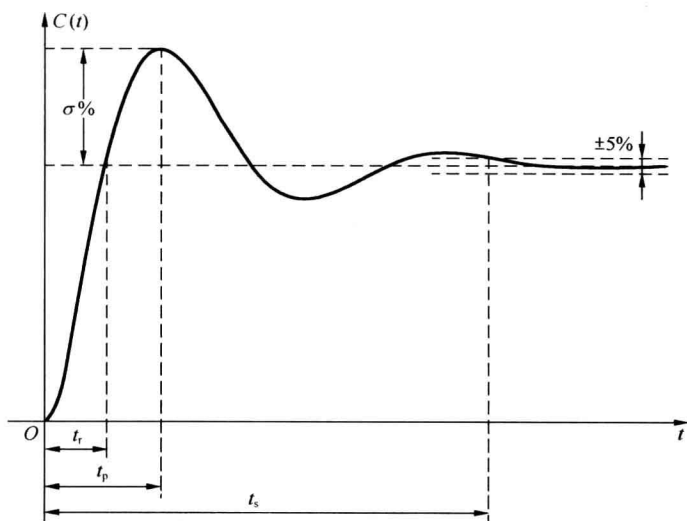


图 1-8 动态跟随性能指标