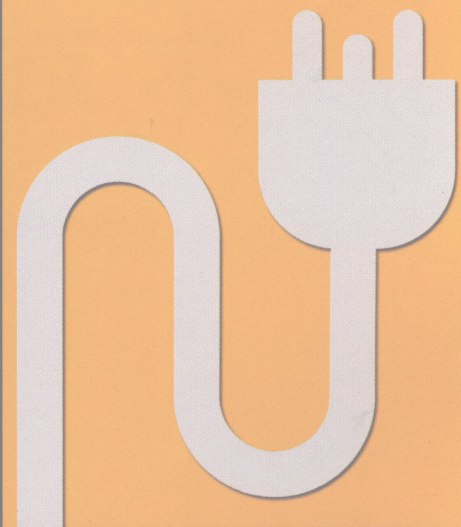


全国中等职业技术学校电工模块教材



直流调速技术

diangongmokuai jiaocai



中国劳动社会保障出版社



国家级职业教育培训规划教材
劳动保障部培训就业司推荐

全国中等职业技术学校电工模块教材

直流调速技术

劳动和社会保障部教材办公室组织编写

中国劳动社会保障出版社

图书在版编目(CIP)数据

直流调速技术/杨中华主编. —北京: 中国劳动社会保障出版社, 2006
全国中等职业技术学校电工模块教材

ISBN 7-5045-5499-5

I. 直… II. 杨… III. 直流电机-调速-专业学校-教材 IV. TM330.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 033739 号

中国劳动社会保障出版社出版发行

(北京市惠新东街 1 号 邮政编码: 100029)

出 版 人: 张梦欣

*

北京外文印刷厂印刷装订 新华书店经销

787 毫米×1092 毫米 16 开本 4.5 印张 110 千字

2006 年 5 月第 1 版 2006 年 5 月第 1 次印刷

定价: 9.00 元

读者服务部电话: 010-64929211

发行部电话: 010-64927085

出版社网址: <http://www.class.com.cn>

版权专有 侵权必究

举报电话: 010-64911344

前 言

为了更好地适应全国中等职业技术学校电工类专业的教学要求，劳动和社会保障部教材办公室组织全国有关学校的教师 and 行业专家编写了这套电工模块教材。

这次教材编写工作坚持了以下几个原则：

第一，根据电工类专业毕业生所从事职业的实际需要，合理确定学生应具备的能力结构与知识结构，对教材内容的深度、难度作了较大程度的调整，坚持以能力为本位教学理念，强调基本技能的培养。

第二，吸收和借鉴各地中等职业技术学校教学改革的成功经验，以模块化教学的方式实现理论知识与技能训练相结合，以任务驱动法的编写方式导入教学内容，使教材内容更加符合学生的认知规律，易于激发学生的学习兴趣。

第三，根据科学技术发展，合理更新教材内容，尽可能多地在教材中充实新知识、新技术、新设备和新材料等方面的内容，力求使教材具有较鲜明的时代特征。

第四，努力贯彻国家关于职业资格证书与学生证书并重、职业资格证书制度与国家就业制度相衔接的政策精神，力求使教材内容涵盖有关国家职业标准（中级）的知识和技能要求。同时，在教材编写过程中，严格贯彻了国家有关技术标准的要求。

第五，教材编写模式上力求突出模块化特点，每个模块都有其明确的教学目的，并针对各自教学目的的要求展开相关知识的介绍及技能训练，且给出了每个模块的任务评分表，以供教学参考。同时，还针对每个模块设置了相应的巩固与提高练习，以便学生切实掌握相关知识与技能。

第六，在内容的承载方式上，力求图文并茂，尽可能使用图片或表格形式

将各个知识点生动地展示出来，从而提高了教材的可读性和亲和力。

本套教材主要包括《模拟电子电路》《脉冲与数字电路》《气液传动》《电动机》《变压器》《电气控制线路安装与维修》《变流技术及应用》《变频调速技术》《直流调速技术》《PLC 操作技能（松下系列）》《PLC 操作技能（西门子系列）》《电工基本技能训练》《钳工基本技能训练》《焊工基本技能训练》《工厂配电装置的安装与维修》《常用机床电气设备维修》《生产自动线结构与调试》《数控机床电气设备维修（2007 年出版）》《电工 EDA（2007 年出版）》等，可供中等职业技术学校电工类专业使用，也可作为职工培训教材。

本次教材的编写得到了天津、上海、江苏、广东、山东、河南、辽宁、湖南等省、市劳动和社会保障厅（局），以及天津工程师范学院、上海工程技术大学高等职业技术学院等学校的大力支持，在此我们表示诚挚的谢意。

《直流调速技术》的主要内容有：直流调速与开环控制、单闭环直流调速系统、双闭环直流调速系统等。

本书由杨中华、顾力平、汪小利、姜君晖、宋志鹏参加编写，杨中华主编，顾力平副主编；徐立娟审稿。

劳动和社会保障部教材办公室

2006 年 5 月

目 录

单元一 直流调速与开环控制	(1)
单元二 单闭环直流调速系统	(20)
课题一 有静差转速负反馈直流调速系统	(22)
课题二 无静差转速负反馈直流调速系统	(30)
课题三 电压负反馈直流调速系统	(34)
课题四 电压负反馈、电流补偿直流调速系统	(37)
课题五 带电流截止负反馈的转速负反馈直流调速系统	(43)
课题六 带电流截止负反馈的电压负反馈及电流补偿直流调速系统	(53)
单元三 双闭环直流调速系统	(57)

单元一

直流调速与开环控制

学习目标

1. 熟悉直流电动机的调速方法。
2. 了解直流调速系统的主要技术指标。
3. 学会正确安装和调试开环系统的方法。
4. 熟悉开环系统的静态特性。

任务引入及分析

从生产机械要求控制的物理量来看,电力拖动自动控制系统中的转速是最基本的控制量。在电力拖动系统中,直流电动机具有良好的启动、制动和调速性能,已被广泛应用于轧钢机、矿井卷扬机、挖掘机、金属切削机床、高层电梯等高性能的可控电力拖动系统中。近年来,交流调速系统发展很快,然而直流调速系统在理论上和实际应用中仍然要成熟得多。

下面用几个实例来说明直流调速系统在生产中的应用。

图 1—1 所示为一台龙门刨床,主轴电动机的调速控制采用了直流调速系统。

采用直流调速可以使电动机的转速得到很好的控制,适用于加工要求较高的产品。

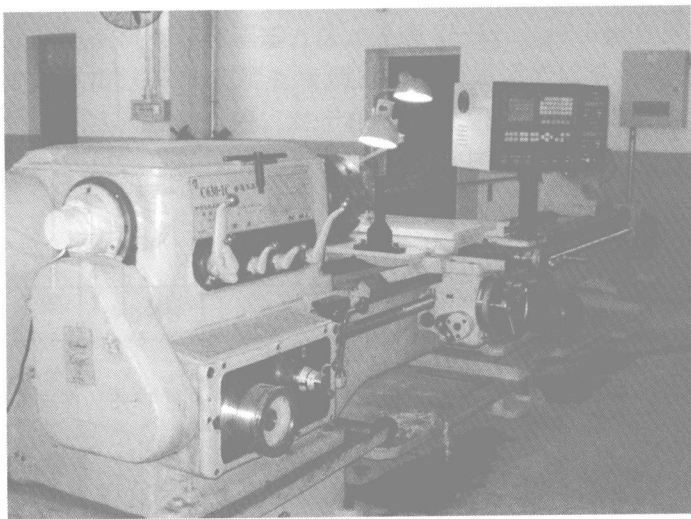


图 1—1 龙门刨床

图 1—2 所示为一台卷扬机的电动机及负载系统，图 1—3 所示为其直流调速控制系统柜，采用直流调速使得这个系列的卷扬机机械设备的控制性能更优，使用更加方便可靠。

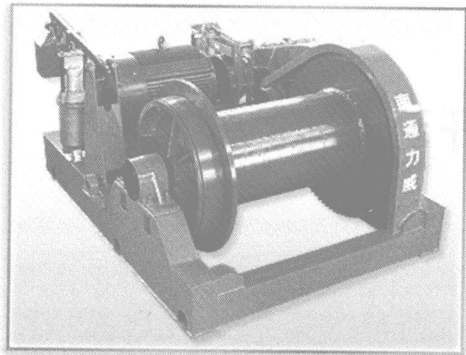


图 1—2 卷扬机电动机及负载系统

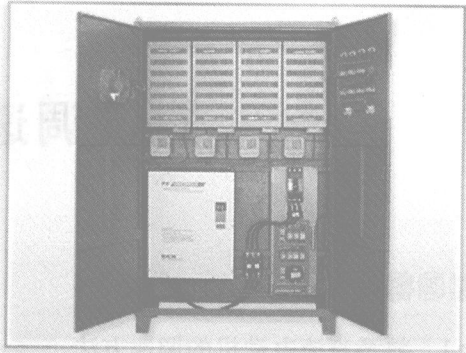


图 1—3 卷扬机的直流调速控制系统柜

相关知识

直流调速系统分为两个部分，即可控整流电路和电动机及负载电路。可控整流电路又分为触发电路和整流电路两个部分。

触发电路为晶闸管提供触发信号，对于小容量的直流电动机，其可控整流电路的触发电路可以采用单结晶体管触发电路；对于大容量的电动机，一般采用 KC 系列集成电路构成其触发电路，这种触发电路具有输出的触发信号功率大，触发角的控制灵活、方便等特点。在《变流技术及应用》中已经介绍：在单相桥式可控整流电路中，输出的平均电压为 $0.9U_2 \frac{1+\cos\alpha}{2}$ ；在三相全控整流电路中，输出的平均电压为 $2.34U_2 \cos\alpha$ 。因此，只要改变触发角 α ，就可以改变整流电路输出的直流电压。

直流电动机主要由磁极、电枢和换向器（整流子）三部分组成，如图 1—4 所示。直流电动机的工作原理如图 1—5 所示。

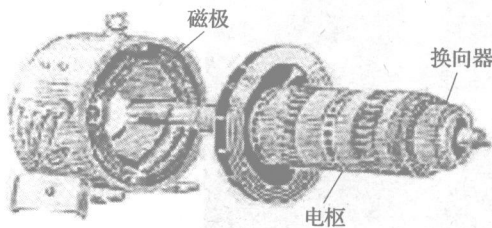


图 1—4 直流电动机的结构

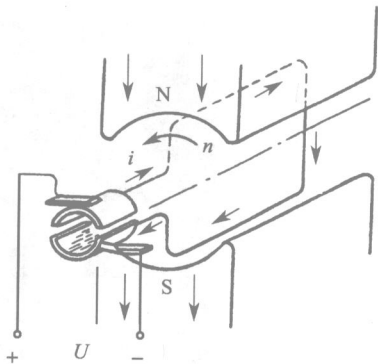


图 1—5 直流电动机工作原理图

在电刷 AB 之间加上直流电压 U ，电枢线圈中的电流方向为：N 极下的有效边中的电流总是一个方向，而 S 极下的有效边中的电流总是另一个方向。这样两个有效边中受到的电磁力的方向一致，电枢转动。通过换向器可以实现线圈的有效边从一个磁极（如 N 极）转到另一个磁极（如 S 极）下，电流的方向同时发生改变，从而使电磁力或电磁转矩的方向不发

生改变。电磁转矩是驱动转矩，其大小为：

$$T = K_T \Phi I_a$$

式中 K_T ——电动机的电磁常数；

Φ ——励磁磁通，其大小与励磁电流有关，Wb；

I_a ——电枢电流，其大小与电枢电压及电枢回路的电阻的大小有关，A。

电动机的电磁转矩 T 必须与机械负载转矩 T_2 及空载损耗转矩 T_0 相平衡。即

$$T = T_2 + T_0$$

另外，当电枢绕组在磁场中转动时，线圈中也要产生感应电动势 E ，这个电动势的方向与电流或外加电压的方向相反，称之为反电动势。其方向与 I_a 相反，大小为：

$$E = K_E \Phi n$$

式中 K_E ——由电动机结构参数决定的电势常数；

Φ ——励磁磁通，Wb；

n ——电动机转速，r/min。

因而，电动机的旋转速度与励磁、电枢电压、电枢电流及电动机本身的结构参数有关系。下面详细介绍直流电动机调速的方法。

一、直流电动机调速的基本方法

通过对电动机的学习，我们知道直流电动机转速的表达式为：

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

式中 n ——电动机转速，r/min；

U ——电枢电压，V；

I_a ——电枢电流，A；

R_a ——电枢回路电阻， Ω ；

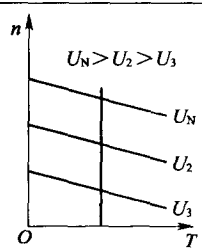
Φ ——励磁磁通，Wb；

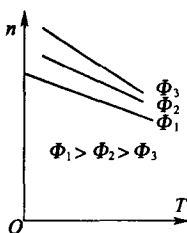
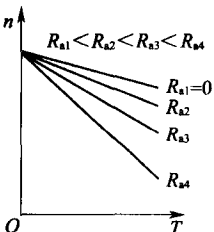
K_E ——由电动机结构参数决定的电势常数。

由上式可知，直流电动机有三种调速方法，见表 1—1。

改变电枢回路电阻的方法只能实现有级调速；减弱磁通能够平滑调速，但调速范围不大，且只能在基速以上作小范围的升速；对于在一定范围内的无级调速系统来说，以调节电枢电压的方式为最好。所以，自动控制的直流调速系统中，往往以调节电枢电压作为调速的主要手段。

表 1—1 直流电动机的调速方法

调速方法	静态特性	相关说明
调节电枢电压 U		在励磁磁通 Φ 、电枢回路电阻 R_a 不变的情况下，改变电枢电压 U ，从而改变电动机的转速 n 。这种调速的方法只能在额定电压 U_N 以下进行调节。

调速方法	静态特性	相关说明
调节励磁磁通 Φ		在电枢电压 U 、电枢回路电阻 R_a 不变的情况下, 改变励磁磁通 Φ , 从而改变电动机的转速 n 。由于只能在电动机的额定励磁下进行调节, 否则磁路将会出现饱和, 因而只能进行弱磁调速, 即将电动机的转速向高于额定转速的方向进行调节。
改变电枢回路电阻 R_a		在电枢电压 U 、励磁 Φ 不变的情况下, 改变串接在电枢回路的电阻 R_a 。图中给出的四种情况分别是 R_{a1} 、 R_{a2} 、 R_{a3} 、 R_{a4} , 其中 $R_{a1}=0$, $R_{a4} > R_{a3} > R_{a2} > R_{a1}$ 。

二、调速指标

不同的生产机械, 其工艺要求电气控制系统具有不同的调速性能指标, 这些指标可概括为静态调速指标和动态调速指标。

1. 静态调速指标

(1) 调速范围 D

电动机在额定负载下, 运行的最高转速 $n_{\max}$ 与最低转速 $n_{\min}$ 之比称为调速范围, 用 D 表示, 即 $D = n_{\max} / n_{\min}$ (对非弱磁的调速系统, 电动机的最高转速 $n_{\max}$ 即为额定转速 n_N)。

(2) 静差率 s

静差率是指电动机稳定运行时, 当负载由理想空载增加至额定负载时, 对应的转速降 Δn_N 与理想空载转速 n_0 之比, 用百分数表示为

$$s = \Delta n_N / n_0 \times 100\% = (n_0 - n_N) / n_0 \times 100\%$$

静差率反映了电动机转速受负载变化的影响程度, 它与机械特性有关, 机械特性越硬, 静差率越小, 转速的稳定性越好。但并非机械特性一致, 静差率就相同, 它还与理想空载转速有关。图 1—6 所示为不同理想空载转速下的静差率。

如 A、C 两曲线, $s_A < s_C$, 而 A 与 B 两曲线, 虽然机械特性相同, 转速降相同, 但由于理想空载转速不同, 因而静差率 $s_A < s_B$ 。

(3) 静差率与调速范围的关系

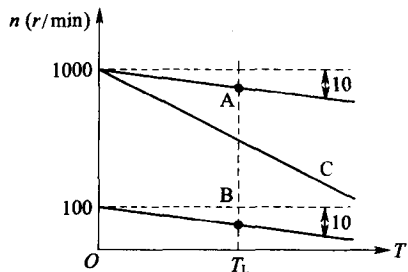


图 1—6 不同转速下的静差率

在调压调速系统中, 额定电压为最高转速, 静差率为最低转速时的静差率, 则最低转速

$$n_{\min} = n_0 - \Delta n_N = \frac{\Delta n_N}{s} - \Delta n_N = \frac{1-s}{s} \Delta n_N$$

则调速范围

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

由上式可知, 在调速系统中机械特性的硬度 (Δn_N) 一定时, 对应的静差率越高, 即 s 越小, 允许的调速范围就越小。

例 某直流调速系统的直流电动机额定转速 n_N 为 1 430 r/min, 额定转速降 Δn_N 为 120 r/min, 要求 $s \leq 30\%$ 和 $s \leq 20\%$ 时, 允许的调速范围分别是多少?

解:

$$D_1 = \frac{n_N s}{\Delta n_N (1-s)} = \frac{1\,430 \times 0.3}{120 \times (1-0.3)} = 5.1$$

$$D_2 = \frac{n_N s}{\Delta n_N (1-s)} = \frac{1\,430 \times 0.2}{120 \times (1-0.2)} = 3.0$$

2. 动态调速指标

动态调速指标包括跟随性能指标和抗干扰性能指标两类。

(1) 跟随性能指标

跟随性能指标用来衡量输出量响应的性能。

1) 上升时间 t_r

在典型的阶跃响应跟随过程中, 输出量从零起第一次上升到稳态值 n_∞ 所经过的时间称为上升时间, 它表示动态响应的快速性, 如图 1—7 所示。

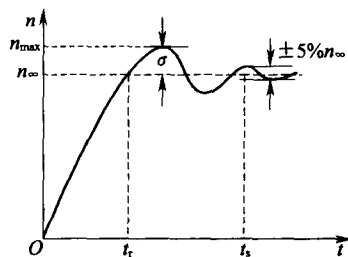


图 1—7 典型阶跃响应和跟随性能指标

2) 超调量 σ

在典型的阶跃响应跟随过程中, 输出量超出稳态值的最大偏离量与稳态值之比, 用百分数表示, 称为超调量, 即

$$\sigma = (n_{\max} - n_\infty) / n_\infty \times 100\%$$

超调量反映系统的相对稳定性。超调量越小, 则相对稳定性越好, 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, 是衡量系统整个调节过程快慢的一个参数。它是指给定量阶跃变化起到输出量到达稳态值附近 ($\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$) 所需要的时间。

(2) 抗干扰性能指标

一般以系统稳定运行中突加负载的阶跃扰动后的动态过程作为典型的抗扰过程。概括起来有三个指标, 即动态降落、恢复时间和震荡次数。

三、晶闸管—电动机开环调速系统的组成

改变电枢电压调速是直流调速的主要方法, 而采用晶闸管变流器组成的晶闸管—电动机

直流调速开环系统（即 V—M 系统）是目前广泛应用的调速系统，其原理图如图 1—8 所示。

在这个系统中包括两个部分，即主电路和控制电路。要安装和调试的开环系统，其主电路由三相全控桥式整流电路、直流电动机及负载电路、控制电路（由触发电路和给定电路组成）组成，通过调节触发器的控制电压，改变触发器输出的触发信号的相位，使得可控整流电路的输出电压改变，从而对电动机进行调速。

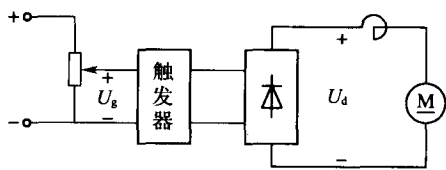


图 1—8 晶闸管—电动机直流调速开环系统的原理图

晶闸管—电动机直流调速开环系统由主电路、继电保护电路、直流稳压电源、系统控制电路、速度给定环节、三相移相脉冲触发环节、电动机及负载电路、速度变换器等组成。

1. 主电路及继电保护电路—Y101

如图 1—9 所示，T1 为隔离变压器；T2 为控制变压器，分别产生交流 17 V 和 30 V 的交流电压，由抽头 216、217、218 输出的三相 30 V 电压作为三相触发电路的同步电压。由抽头 227、228、229、230、231、232 输出的电压作为直流稳压电源的输入电压。在 T1 的二次侧有两组绕组，一组输出的电压作为三相可控整流电路的供电电压（线路中每条相线上都安装了电流互感器，在后面学习双闭环调节时使用。在完成其他课题时，应将互感器的二次侧短路）；另一组线圈的输出电压经过整流，接欠流继电器 KI1，然后接到电动机的励磁回路中，当励磁电流较小或没有励磁电流时，通过 KI1 的触点，切断控制电路的电源，使电动机停止工作，从而防止电动机出现“飞车”现象。

可控整流电路由 6 个晶闸管 VT1~VT6 组成，保护电路采用阻容吸收电路由 6 个电阻 R100~R105 和 6 个电容 C106~C111 组成，接在晶闸管门极上的虚线框的电路中，221~215 分别接 6 个触发信号，经过脉冲变压器和二极管整流分别送到晶闸管 VT1~VT6（6 个虚线框的元件和参数相同）。

2. 直流稳压电源—Y102

如图 1—10 所示，从控制变压器 T2 输出的电压经过整流滤波及三端稳压变成 ± 15 V 和 24 V 电压，供给定电路、三相触发电路及其他电路使用。

由 Y101 控制的变压器 T2 二次侧绕组的 227、228、229、230、231、232 输出端分别接到该电源的整流电路输入端，经过整流以后输出 ± 28 V 直流电压，C1、C2 为正负电源的滤波电容，IC1、IC2 和 IC3 为三端稳压集成块，IC1 为 LM7815，输出 +15 V 电压，IC2 为 LM7915，输出 -15 V 电压，IC3 为 LM7824，输出 +24 V 电压。输出电压分别从 213、214 和 215 输出，200 为电源的地端，LD1~LD3 分别为 +15 V、-15 V 和 24 V 电压指示灯。三个稳压集成电路在使用时，要装散热器，防止过热而烧坏。

3. 系统控制电路—Y103

如图 1—11 所示，按下 SB1，KM2 得电并自锁，接通控制变压器的电源，同时，为 KM1 的得电做准备。按下 SB2，KM2 失电，断开控制电路及主电路的电源。

在 KM2 得电的情况下，按下 SB3，KM1 得电并自锁，接通可控整流电路的电源，为电动机的工作提供可能性，同时为 KA 的得电做准备。按下 SB4，KM1 失电，断开可控整流电路的电源。



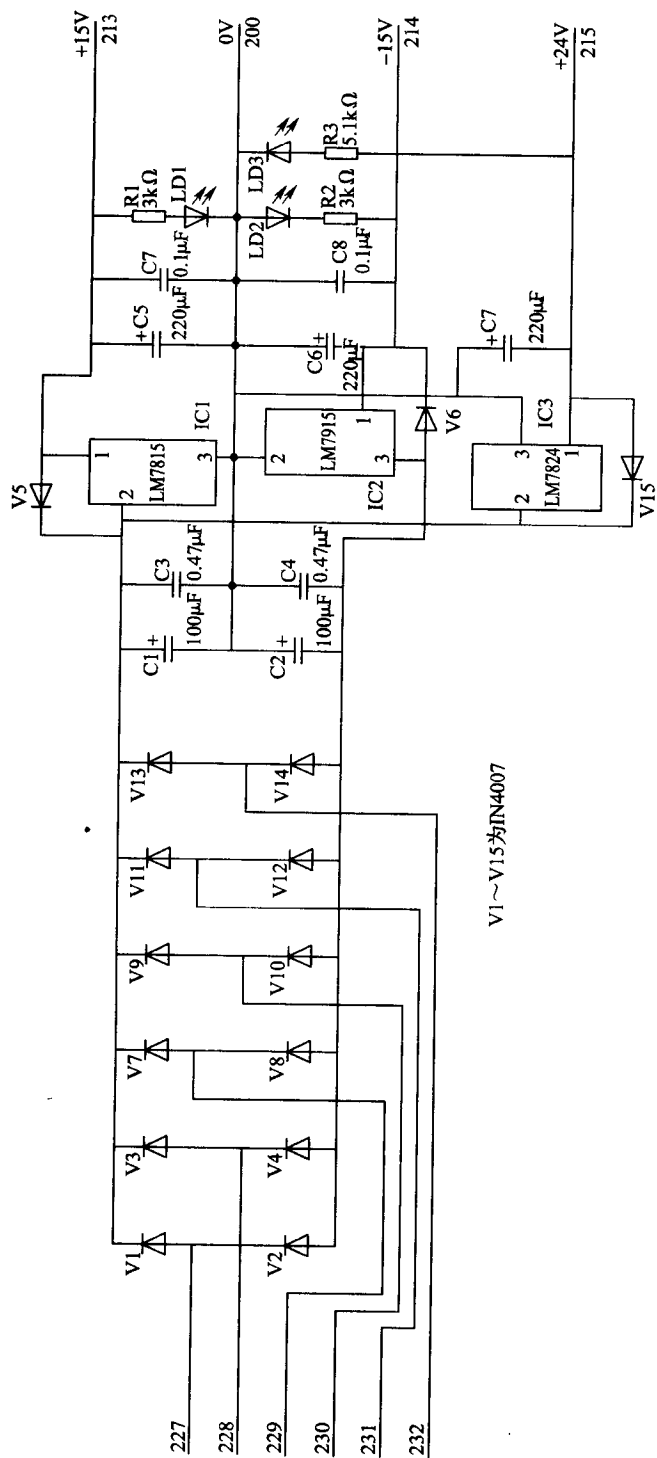


图 1—10 直流稳压电源 Y102 原理图

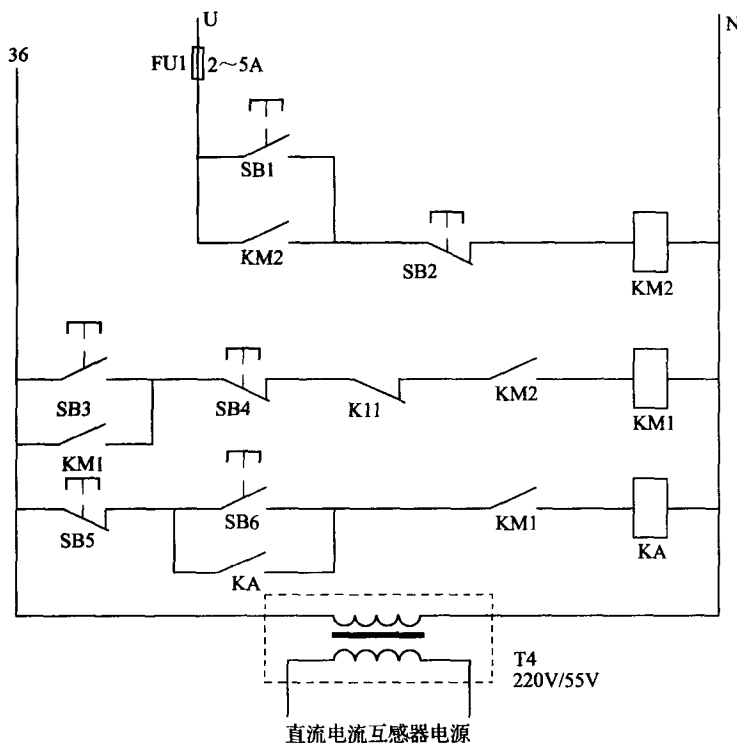


图 1—11 系统控制电路—Y103

当主电路接通电源以后，按下 SB6，KA 得电，常开触点闭合，常闭触点断开，给定电压为正值。否则，给定为负。

变压器 T4 为直流电流互感器提供交流电源。按下 SB1 时，KM2 得电，这个变压器就有 55 V 电压输出。（这一部分电路和器件在做开环系统时不用）

4. 速度给定环节—Y104

图 1—12 所示为速度给定环节，根据控制系统的形式不同，其给定值可能为正值，也可能为负值。当 KA 不动作时，给定值为负值；当 KA 动作时，给定值为正值，给定值的大小是通过调节 RP101 来实现的。

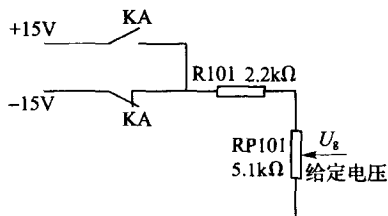


图 1—12 给定环节—Y104

5. 三相脉冲移相触发环节—Y105

三相脉冲移相触发环节是自动调速系统的一个非常重要的环节，其电路原理图如图 1—13 所示。

该触发电路采用 KC04 集成晶闸管移相触发器，它具有线性好、移相范围宽、控制方式简单、有失交保护和输出电流大等特点。从 KC04 的第 8 脚输入同步电压；第 3 脚输入相位微调电压；第 9 脚为比较端，将控制电压、偏移电压及相位微调电压进行比较后，从第 1 脚和第 15 脚输出脉冲。再放大、整形，经脉冲变压器输出触发脉冲。从 221~226 输出的触发信号分别送到 Y101 的 6 个晶闸管 VT1~VT6 的门极。

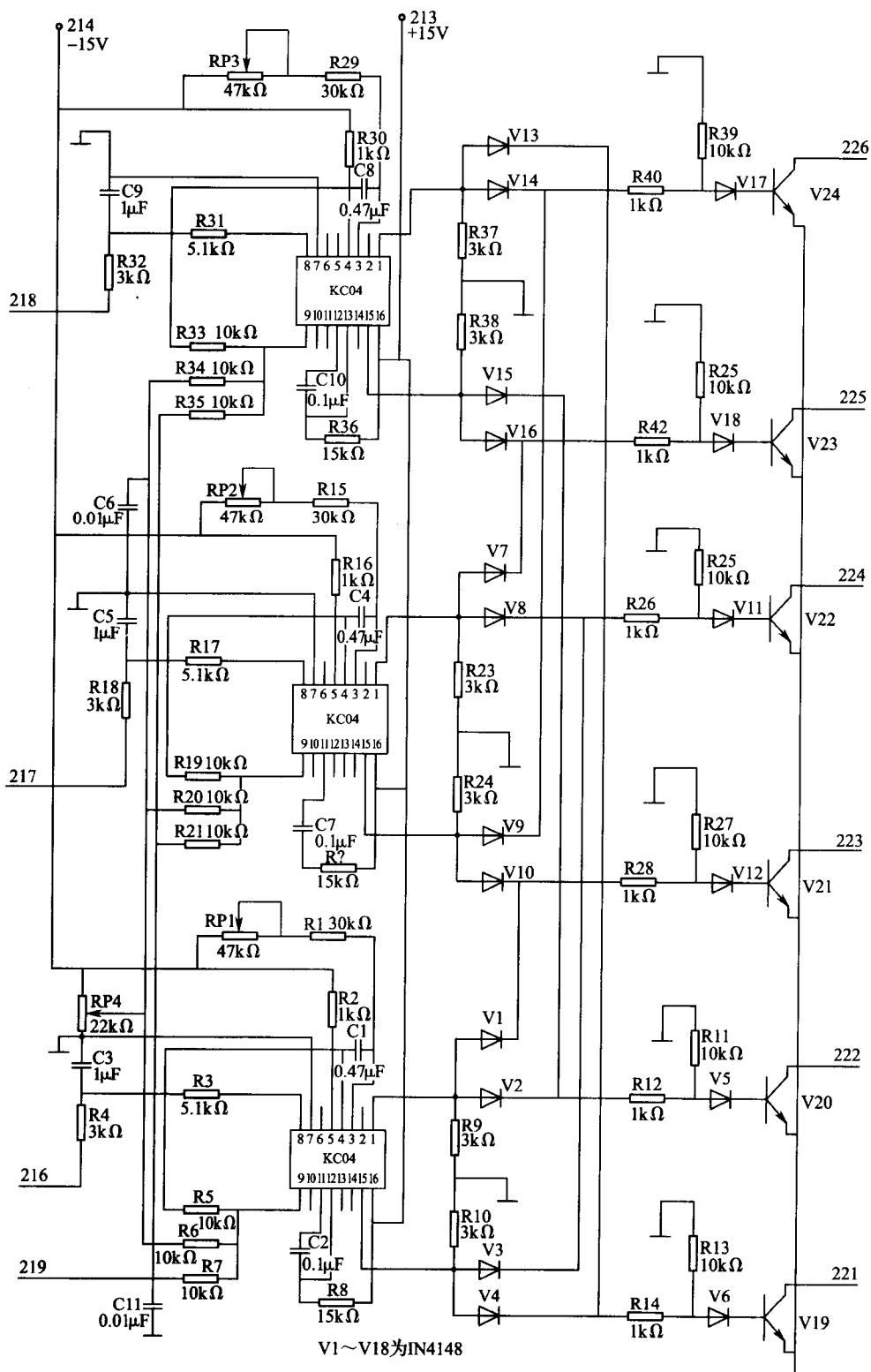


图 1-13 三相脉冲移相触发环节—Y105

6. 电动机及负载电路 Y106

如图 1—14 所示, TG 为测速发电机, 输出电压经过整流滤波后送给速度显示器, 或者作为速度反馈信号。电压表的量程为 300 V, 电流表的量程为 25 A。

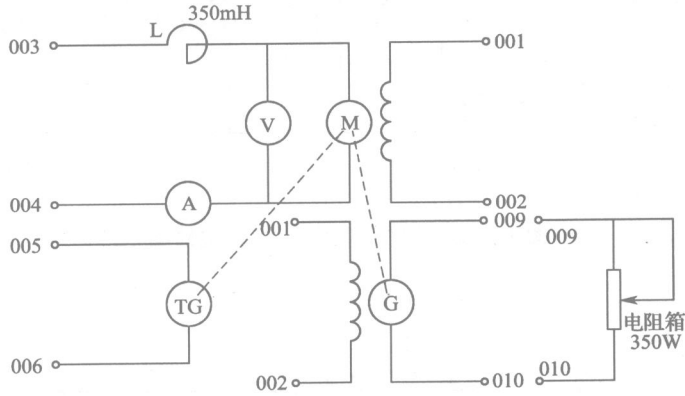


图 1—14 电动机及负载电路图

图 1—15 所示为电动机—发电机—测速发动机组。

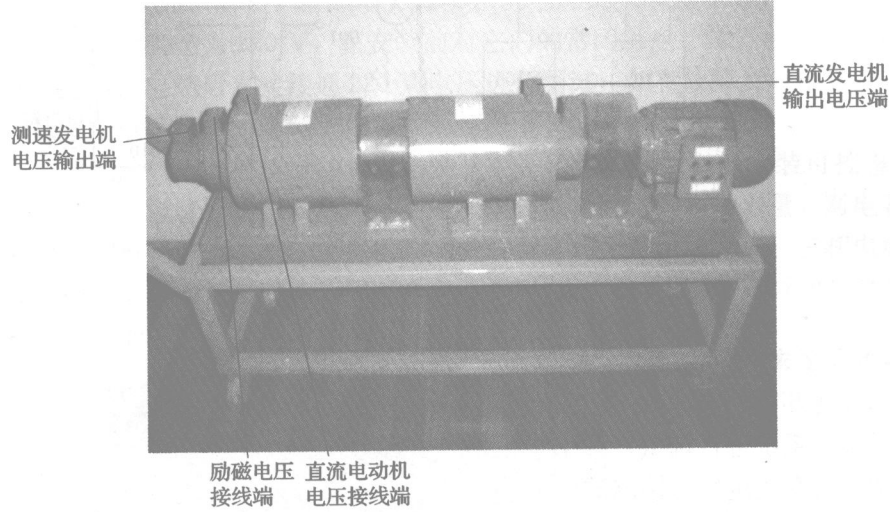


图 1—15 电动机—发电机—测速发动机组

7. 速度变换器—Y107

如图 1—16 所示, 速度变换器用于转速反馈的调速系统中, 将直流测速发电机的输出电压 U_s 变换成适用于控制单元并与转速成正比的直流电压, 作为速度反馈电压; 或者测速电压经过 RP5 的调节后, 接转速表, 显示电动机的转速。

四、开环系统的原理框图

开环系统由上述三相电源及继电保护电路 Y101、直流稳压电源 Y102、系统控制电路 Y103、给定电路 Y104、移相触发电路 Y105、电动机及负载电路 Y106 等组成, 其原理框图如图 1—17 所示。