

中等专业学校教学用书



电力拖动 自动控制系统

冶金工业出版社

ZHONGDENG ZHUANYE
XUEXIAO JIAOXUE YONGSHU

中等专业学校教学用书

电力拖动自动控制系统

吉林电气化专科学校 张连科 主编

*

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街黄楼北巷39号)

新华书店总店科技发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张 16 1/2 字数391千字

1989年5月第一版 1989年5月第一次印刷

印数00,001~5,000册

ISBN 7-5024-0469-4

TP·20 (课) 定价2.95元

前 言

一九八六年九月，在吉林市召开了全国冶金、有色系统中专工业企业电气自动化专业部分教材和大纲讨论会，本书是根据这次会议制订的《电力拖动自动控制系统》课程教学大纲编写的。

全书共分八章。第一章介绍调速系统的基本概念，提出了生产机械对调速系统的基本要求和衡量这些要求的性能指标，指出了晶闸管-电动机直流调速系统存在的主要问题和解决该问题的途径；第二、三、四章讲述晶闸管-电动机直流调速系统的基本原理，内容为单环调速系统、多环调速系统和可逆调速系统；第五章介绍了晶闸管-电动机直流调速系统的工程设计方法和调试步骤，为设计、安装和调整实际系统打下一定基础；第六章是直流调速系统应用举例，以拓宽知识，培养分析实际控制系统的能力；为适应新技术发展，本书在第七章以适当篇幅对交流调速系统作了必要的介绍，第八章介绍了微机控制系统的基本概念。

本书在结构和叙述上紧紧围绕电力拖动自动控制系统的基本规律，由浅入深，循序渐进，有较强的逻辑性。

本书着重物理概念的讲解，定量分析力求简明扼要；书中各章基本都有内容提要 and 复习小结，并有一定数量的例题和思考题。本书是中等专业学校的教学用书，也可作为从事电气自动化专业人员的自学用书，对现场电气技术人员也有一定的参考价值。

本书第一、二、三、四章由吉林电气化专科学校张连科编写，第五、八章由吉林电气化专科学校李正熙编写，第六章由长沙有色金属专科学校宁志强编写，第七章由张连科和宁志强共同编写。全书由张连科主编。

吉林电气化专科学校孙德山同志是本书主审；上海冶金工业学校沈国华、攀枝花冶金工业学校周富国、山东冶金工业学校范允等同志参加了本书审稿工作；吉林电气化专科学校曲永印同志为本书第七章提供了丰富材料，并对本书编写提出了许多宝贵意见，在此一并表示感谢。

本书原稿虽几经修改，但限于编者水平，难免存在一些缺点和错误，敬请读者批评指正。

编 者

一九八七年十月

目 录

结论	1
第一章 调速系统的基本概念	3
第一节 生产机械对调速系统的基本要求	3
第二节 调速系统的技术指标	4
第三节 晶闸管整流装置供电直流调速系统的静态指标	8
第四节 自动控制系统概述	10
第五节 静态结构图和动态结构图	11
小结	16
习题	16
第二章 晶闸管——电动机单闭环直流调速系统	17
第一节 具有电压负反馈的调速系统	17
第二节 带电流正反馈的调速系统	23
第三节 具有转速负反馈的调速系统	27
第四节 单闭环有静差调速系统的稳定性分析	32
第五节 带转速负反馈的无静差调速系统	35
第六节 自动调速系统的限流保护——电流截止负反馈	42
习题	48
第三章 晶闸管——电动机多环直流调速系统	49
第一节 最佳过渡过程的概念	49
第二节 转速、电流双闭环调速系统	52
第三节 带电流自适应调节器的调速系统	65
第四节 带电压调节器的三环调速系统	69
第五节 带励磁控制的调速系统	71
习题	75
第四章 晶闸管——电动机可逆调速系统	77
第一节 晶闸管——电动机可逆调速系统的形式	77
第二节 可逆系统的工作状态	79
第三节 两组晶闸管组成的电枢可逆系统的控制方式	81
第四节 自然环流可逆调速系统	86
第五节 环流可控可逆调速系统	92
第六节 逻辑无环流可逆调速系统	97
第七节 错位无环流可逆调速系统	112
小结	118
习题	119
第五章 直流调速系统的工程设计及调试	121
第一节 典型系统的性能指标和参数关系	122
第二节 系统的校正——调节器设计	132
第三节 双闭环不可逆直流调速系统的设计	140

第四节	双闭环直流调速系统的调整	153
习题	.....	156
第六章	直流调速系统举例	158
第一节	逻辑选触无环流调速系统的构成	158
第二节	逻辑无环流调速系统的工作分析	167
第三节	调速系统主电路参数及计算	173
第四节	校正装置的参数计算	178
小结	.....	180
习题	.....	180
第七章	交流控制系统	181
第一节	交流调速系统概述	181
第二节	异步电动机的串级调速系统	182
第三节	异步电动机的变频调速系统	193
第四节	交流同步电动机晶闸管励磁装置	218
习题	.....	228
第八章	微型计算机控制系统简介	229
第一节	概述	229
第二节	过程通道	232
第三节	微型计算机控制系统举例	239
附录一	转速、电流和电压检测	244
附录二	串级调速系统的机械特性	251
参考文献	.....	256

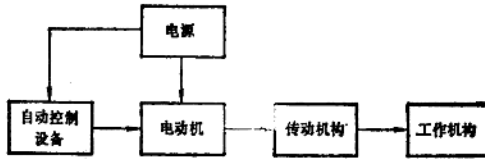
结 论

一、什么是电力拖动

由电动机通过传动装置驱动生产机械的工作机构叫电力拖动。电力拖动装置包括三个主要环节：

1. 电动机——电力拖动的动力源泉；
2. 自动控制设备——由各种电器组成的控制电动机运转的设备；
3. 传动机构——联接电动机和工作机构的装置。如减速箱、皮带、联轴节等等。

电力拖动装置的组成如图一所示。



图一 电力拖动装置示意图

二、什么是电力拖动自动控制

在没有人直接参与的情况下，利用控制设备使电动机按照预定的规律运行（包括启动、制动、调速等）叫电力拖动自动控制。控制设备和电动机组成为自动控制系统。按照被控制的物理量和它的变化规律的不同，电力拖动自动控制系统的形式有各种各样，其中自动调速系统应用最为广泛。所谓自动调速系统是指被控量是电动机转速的自动控制系统。此外，张力控制系统和位置控制系统等也都广为应用。

电力拖动自动控制系统性能指标的优劣，直接影响到产品的产量、质量和工人的劳动生产条件。几十年来，人们一直为改善控制系统的性能指标而坚持不懈的努力。因此，电力拖动自动控制系统发展迅速，经历过多次重大变革。

三、电力拖动自动控制系统的发展史

1. 按照应用电力拖动的形式，电力拖动经历了三个阶段：成组（天轴）电力拖动、单电机拖动和多电机拖动。

成组电力拖动是由一台电动机通过天轴、皮带拖动许多生产机械。此时电动机仅仅作为生产动力，无法实现电力拖动自动控制，因此已经被淘汰。

现在通用的是单电动机拖动的形式，即以一台电动机拖动一个生产机械（比如是一台车床）。这种拖动可以充分利用电动机的调速性能，简化机械结构，并且是用较小的功率去控制较大的功率，易于实现自动化。

多电动机拖动是用多台电动机分别拖动复杂机械的各个工作机构，以实现复杂机械各部分工作过程乃至整个车间工作过程的综合自动化。例如，大型的金属切削机床往往安装有十几台甚至几十台各种型式的电动机。综合自动化能改善工人的劳动条件，大幅度提高生产率。

2. 从控制装置使用的电器来看,随着电器元件的更新换代,电力拖动自动控制系统已经经历了继电器—接触器断续控制的系统,由交磁放大机—发电机—电动机组成的连续控制的系统,磁放大器和汞整流器组成的控制系统等等几代。目前,除了磁放大器和汞整流器组成的控制系统因为汞整流器可靠性差、维护量大已被完全淘汰外,另外两种控制系统现场还都有应用。现在在控制系统行列中崛起的新军是晶闸管—电动机调速系统。五十年代末出现的晶闸管具有效率高、体积小、重量轻、无噪音、寿命长、反应灵敏等一系列优点,因而显示了强大的生命力。目前,晶闸管—电动机直流调速系统在技术上已臻于成熟,在设计、运行、调整等诸方面都积累了丰富的经验。晶闸管—电动机直流调速系统正在取代由交磁放大机—发电机—电动机组成的调速系统。应当特别提出的是晶闸管交流调速系统也取得了突破性的进展。在日本,交流调速系统不仅发展到可以和直流调速系统分庭抗礼的地步,而且出现了取而代之的势头;在国内,交流调速也已经开始应用。七十年代以来,随着半导体器件和微电子技术的迅猛发展,又出现了顺序控制、数字控制、用电子计算机和微处理机控制等控制系统,使电力拖动控制系统的水平达到了一个新的高度。

四、本门课性质和学习方法

本门课主要是讲述常用控制系统(特别是直流调速系统)的组成和工作原理、设计和调试方法,它是中专工企电气化专业主要专业课。是一门理论性和实践性均很强的课程。

本门课和《电机与电力拖动》、《自动控制原理》、《晶闸管变流技术》以及《电子技术基础》等课联系密切。

本门课重点是培养学生分析问题和解决问题的能力,尤其是解决实际问题的能力。为此,要求学生对所学的概念要十分清楚,并能在实际中灵活应用。实验课是为学生提供理论联系实际的良好途径,也是增强学生动手能力的必要环节,应充分利用。

每节课后的思考题和复习题对加深理解所学概念是非常有益的,同学们一定要认真对待。

第一章 调速系统的基本概念

本章是全书的概述，是学习调速系统的入门与基础。

本章从一个具体的生产机械的工艺过程出发，提炼出对调速系统的基本要求。然后介绍衡量这些基本要求的技术指标。以技术指标为依据分析了晶闸管—电动机直流调速系统的主要问题，并指出了解决这一问题的基本途径。本章还介绍了分析调速系统的有力工具——静态结构图和动态结构图。

本章思路是：提出调速指标——找出调速系统问题——指出解决办法

第一节 生产机械对调速系统的基本要求

在讨论一般生产机械对调速系统的要求之前，作为例子先分析一下龙门刨床这一具体机械加工车间的主要工作母机之一。它不仅几乎到处可见，而且其工艺过程具有代表性。因此，找出龙门刨床对调速系统的基本要求有典型意义。

一、龙门刨床的结构

龙门刨的结构示意图如图1-1所示。刨床左右立柱6上托有可上下移动的横梁5；横梁上装有可在横梁上横向移动并能垂直进给的左右两个垂直刀架4；左右两立柱上分别设有可上下移动并能横向进给的左右侧刀架3；工作台1放在导轨2上，可往复运动；7为龙门刨顶；8为刨刀。龙门刨床主要是加工各种大型机座及骨架零件，如箱体、床身等。加工时将工件固定在工作台1上。工作台往返运动，刨刀可进刀和抬刀。工作台和刨刀协调动作就可以完成切削任务。

二、龙门刨床工作台的速度图

工作台要求自动往返。工作台前进时为工作行程，在工作行程中切削金属。切削开始前垂直刀架要进刀。工作台后退时为返回行程，为避免划伤工件表面，返回时刀具抬起。为了保证产品质量和提高生产率，要求工作台的速度要如下变化：切削行程开始，为避免因刀具切入工件时过强的撞击而使工件崩裂和损坏刀具，工作台应低速运行；刀具切入后工作台应以稳定的高速运行，以保证加工工件的表面光洁度和提高生产率；切削行程结束前，即刀具退出工件前，为避免刀具将工件剥落，工作台应降为低速。返回行程要高速，以缩短返回时间；但为了防止返回时速度高，工作台惯性大，造成停车超程大，也要求工作台在返回行程结束前先减速后停车。龙门刨床工作台典型的速度随行程变化图如图1-2所示。

驱动工作台运动的装置叫龙门刨床的主传动。根据工作台的速度图可以提出主传动对调速系统的要求。

三、龙门刨床主传动对调速系统的要求

1. 工作台应能在一定的速度范围内进行调速，以满足工艺要求，保证加工质量，提高生产率。

2. 由于加工工件表面不平材料和材料不均匀，切削过程中切削力变动是难以避免的。如果工作台速度随负载波动而波动很大，那么就要影响加工工件的加工精度和表面光洁度，

还会降低生产能力。所以要求负载变化时，工作台速度变化不要超过允许范围，即要求有较好的速度稳定性。

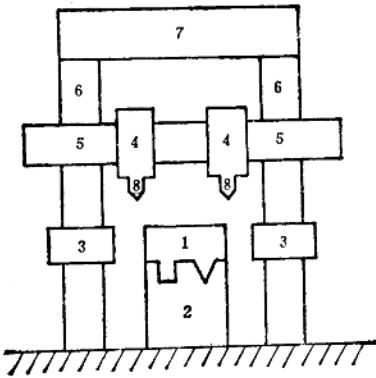


图 1-1 龙门刨床结构示意图

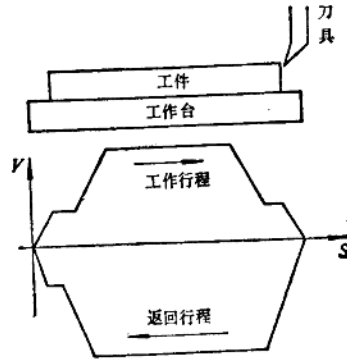


图 1-2 龙门刨床工作台的速度图

3. 工作台连续往返运动，经常起动、制动和反向，为此应尽量缩短起制动等过渡过程的时间，以提高生产率，即要求调速系统有良好的动态性能。

四、生产机械对调速系统的要求

龙门刨床的工艺过程很典型，很多生产机械例如冶金工厂的主轧机和推床、辊道等传动的工作情况都与龙门刨床的工作台类似，所以可以把龙门刨床对调速系统的要求推而广之，得出一般生产机械对调速系统的基本要求如下：

1. 调速——能在一定的最高转速和最低转速的范围内调节转速。
2. 稳速——能以一定的精度稳定在所需的转速上，尽量不受负载变化和电源变化等各种因素的影响。
3. 加减速控制——控制起制动过程，满足不同要求。例如，有的要求尽量缩短起制动时间，以提高生产率；有的要求起制动过程平稳才能既保证产品质量，又能提高生产率。

调速系统一般应满足上述三项要求，上述三项要求是衡量调速系统性能优劣的依据。为了定量地分析问题，针对上述三项要求，规定了不同的技术指标。

第二节 调速系统的技术指标

调速系统的技术指标，通常又分为静态指标和动态指标两大类。

一、静态指标

静态指标代表系统稳定运行中的性能，是针对调速和稳速两项要求规定的。静态指标主要是指静差率 s 和调速范围 D 。

1. 静差率 s

静差率是指当电动机在某一转速下运行时，负载由理想空载变到额定负载所产生的转速降 Δn_{ed} 与对应的理想空载转速 n_0 之比。静差率 s 常用小数表示或写成百分数形式，即

$$s = \frac{n_0 - n_e}{n_0} = \frac{\Delta n_{ed}}{n_0} = \frac{\Delta n_{ed}}{n_0} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中 n_0 ——与运行速度对应的理想空载转速；

n_e ——与运行速度相对应的额定负载时电动机的转速。

静差率主要描述调速系统当负载变化时转速变化的程度，又称为静态精度。显然，在与电动机运行速度对应的理想空载速度 n_0 一定的情况下，电动机在额定负载时的转速降 Δn_{ed} 愈大，则静差率 s 也愈大。可见，静差率 s 与电动机机械特性的硬度有关。机械特性愈硬，静差率 s 愈小。

但是静差率和机械特性的硬度又是有区别的。直流发电机—电动机组调压调速特性如图1-3所示，特性①与特性②互相平行，两者在额定负载下的转速降落相等，即 $\Delta n_{ed1} = \Delta n_{ed2}$ ，两者硬度一样。但是它们对应的静差率 s 却不同。因为 $n_{01} > n_{02}$ ，显然 $s_1 < s_2$ 。可见，硬度相同的特性，理想空载转速越低，静差率就越大，转速的相对稳定性就越差。因此，对一个系统所提的静差率要求，主要是指对最低转速时的静差率要求。最低转速时的静差率满足要求了，高速时就更没有问题了。

不同生产机械其工艺过程不同，工作时允许转速波动程度大小不一样，允许的静差率也就不一样。如普通车床允许静差率为10~20%；龙门刨床为5~10%；冷轧机为2%；热轧机为0.2~0.5%。

2. 调速范围 D

调速范围是指在额定负载下，电动机所能达到的最高转速 n_{max} 与最低转速 n_{min} 之比，即

$$D = \frac{n_{max}}{n_{min}} \quad (1-2)$$

对于少数负载很轻的机械，如精密磨床，也可以用实际负载时的最高转速与最低转速之比求调速范围值。

3. 调速范围和静差率的关系

调速范围和静差率这两项调速指标是相互关联的，它们之间的关系可推导如下：

已知
$$D = \frac{n_{max}}{n_{min}}$$

在常用的调压调速系统中，例如发电机—电动机调速系统（其机械特性如图1-3所示），

其最高转速 n_{max} 就是电动机的额定转速 n_{ed} ，其最低转速 $n_{min} = n_{0min} - \Delta n_{ed}$ ，而由 $s = \frac{\Delta n_{ed}}{n_{0min}}$

知道， $n_{0min} = \frac{\Delta n_{ed}}{s}$ ，则有：

$$\begin{aligned} D &= \frac{n_{max}}{n_{min}} = \frac{n_{ed}}{n_{0min} - \Delta n_{ed}} \\ &= \frac{n_{ed}}{\frac{\Delta n_{ed}}{s} - \Delta n_{ed}} = \frac{n_{ed} \cdot s}{\Delta n_{ed}(1-s)} \end{aligned} \quad (1-3)$$

式中 n_{ed} 是电动机的额定转速，由电动机名牌上的数据给出，对于具体的电动机它是一个常量。式(1-3)表明了调速范围 D ，静差率 s 和电动机的额定转速降三者之间的关系。

从满足静态技术指标出发，根据(1-3)式，可将设计调速系统归纳为处理好下述两

个问题:

1. 在额定转速降 Δn_{ed} 一定的情况下,分析调速系统所能达到的最大调速范围和最小静差率(这是开环调速系统的课题,见本章第三节)。

2. 在生产机械对调速范围 D 和静差率 s 都有严格要求的情况下,研究采取什么办法使调速系统扩大调速范围,提高调速精度。这是调速系统经常要解决的核心问题之一。

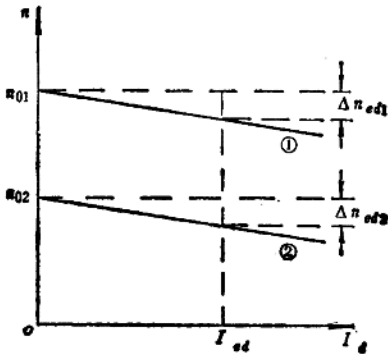


图 1-3 不同转速下的静差率

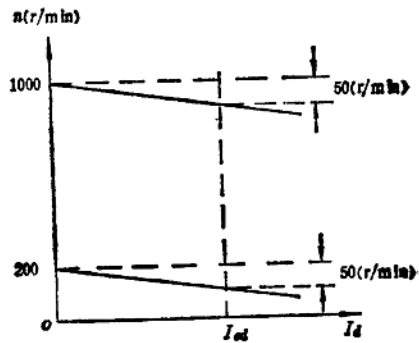


图 1-4 调速机械特性实例

例1-1 某一调速系统的调速特性如图1-4所示,求该调速系统的调速范围 D ,静差率 s ;当要求静差率 $s=0.1$ 时,求该系统的允许调速范围 D 。

解

调速范围
$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{1000 - 50}{200 - 50} = 6.3$$

静差率
$$s = \frac{\Delta n_{ed}}{n_{0\min}} = \frac{50}{200} = 0.25$$

当要求静差率 $s=0.1$ 时,该系统允许的最低空载转速为:

$$n'_{0\min} = \frac{\Delta n_{ed}}{s} = \frac{50}{0.1} = 500 \text{ r/min}$$

对应的调速范围为:
$$D = \frac{n_{\max}}{n'_{\min}} = \frac{1000 - 50}{500 - 50} = 2.1$$

二、动态指标

动态指标代表系统产生过渡过程(如起制动)时的性能。动态指标又分为跟随指标和抗扰动指标两种。

1. 跟随指标 对给定信号的动态响应性能称为“跟随”性能,一般用最大超调量 σ ,调整时间 t_s ,振荡次数 N 三个指标来衡量。对阶跃给定信号动态响应的有关指标可参照图1-5定义如下:

(1)最大超调量 $\sigma\%$ ——最大超调量是指与给定值的最大偏差量 Δn_{\max} 与给定值 n_g (有时给定值也可叫稳态值 $n(\infty)$)之比的百分数

$$\sigma\% = \frac{n_{\max} - n_g}{n_g} \times 100\%$$

或

$$\sigma\% = \frac{\Delta n_{\max}}{n_g} \times 100\%$$

最大超调量反映了系统的动态精度。不同的调速系统对最大超调量的要求不同。比如，一般调速系统允许最大超调量 $\sigma\%$ 为10~35%，而进行张力控制的卷取机系统（如造纸机）则不允许有超调量。

(2) 调整时间 t_s ——调整时间 t_s 是指从给定量作用于系统开始到被调量进入离稳态值 $\pm 5\%$ （或 $\pm 2\%$ ）区域为止所需的时间，它反映了系统的快速性。

(3) 振荡次数 N ——振荡次数是指在调整时间内，被调量在稳态值上下摆动的次数（一上一下算一次）。振荡次数反映了系统的稳定性，一般调速系统允许振荡2~3次，有的系统则不允许振荡出现。

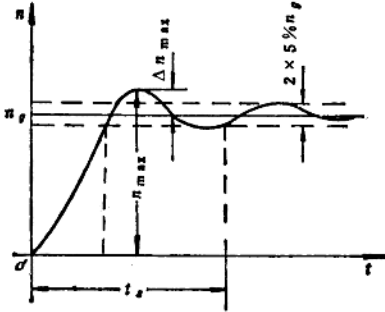


图 1-5 阶跃给定下的动态响应曲线

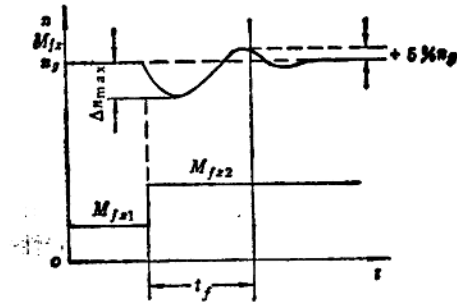


图 1-6 突加负载时的动态响应曲线

2. 抗扰指标 对扰动量作用时的动态响应性能称为“抗扰”性能，一般用最大动态速降 Δn_{\max} ，恢复时间 t_f 和振荡次数 N 三个指标来衡量。任何系统都难于避免扰动量的影响。调速系统受突加负载扰动时的动态响应曲线如图1-6所示，与其对应的抗扰性能指标定义如下：

(1) 动态速降 Δn_{\max} ——动态速降是指扰动引起的最大转速偏差，见图1-6。动态速降反映了系统抗扰动的能力和稳定性。

(2) 恢复时间 t_f ——恢复时间 t_f 是指从扰动量作用开始到被调量进入离稳态值的 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 的区域内为止所需要的时间。它反映了系统的抗扰能力。

(3) 振荡次数 N ——振荡次数为在恢复时间内被调量在稳态值上下摆动的次数，它代表系统的稳定性和抗扰能力强弱。

上述指标中，最大超调量（或动态速降）和振荡次数反映了系统的稳定性；调整时间（或恢复时间）反映了系统的快速性；系统过渡过程结束后，被调量（输出量）偏离给定量的差值反映了系统的准确性（额定负载扰动而引起的偏差量的相对值就是静差率 s ）。一般说来，总希望最大超调量小一点，振荡次数少一些，调整时间短一点，稳态误差小一些，即希望系统能达到稳、快、准。

以后的分析表明，这些指标要求，在同一个系统中往往是相互矛盾的，这时要根据具体

的对象所提出的要求，首先满足某方面性能指标，而适当降低其它方面的指标。

第三节 晶闸管整流装置供电直流调速系统的静态指标

直流他励电动机调速方法有三种：电枢回路串电阻、减弱励磁磁通、改变电动机端电压。三种方法中调压调速性能最好。它广泛应用在要求大范围无级调速的场合。

《晶闸管变流技术》中所讲的具有电动机负载的整流电路，实际上就是由晶闸管整流装置向电动机供电的最简单的调压调速系统，如图1-7所示。此系统也可简称为KZ-D调速系统

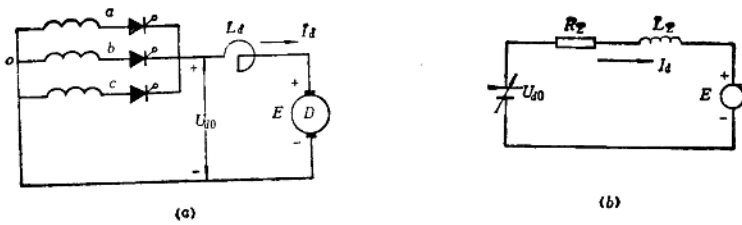


图 1-7 电动机负载的三相零式整流电路

(a) 主电路；(b) 等值电路

一、KZ-D调速系统电动机的机械特性

电动机由晶闸管整流装置供电时，其机械特性由两段组成：整流电流连续时其机械特性是直线；当整流电流断续时，其机械特性呈非线性，特性变软，理想空载转速升高，如图1-8所示。

一般调速系统都靠适当选择主回路中的平波电抗器的电感值，使整流电流断续和连续的临界值 $I_{dk} < I_{dmin}$ 。若取最小负载电流 $I_{dmin} \approx 5\% I_{ed}$ ，那么在一般情况下，电动机的负载电流都大于临界电流 I_{dk} ，所以在分析调速系统的性能指标时，只考虑机械特性的线性段。

整流电流连续时，晶闸管——电动机系统的机械特性可推导如下：由图1-7(b)可得

$$U_{d0} = E + I_d R_x \quad (1-4)$$

式中 $E = c_e n$ ——电动机的反电势；

$U_{d0} = 1.17 U_{2d} \cos \alpha$ ——三相零式整流电路的空载整流电压；

$R_x = R_x + R_d$ ——电动机电枢回路总电阻；

$R_x = \frac{3X_b}{2\pi} + R_b + R_p$ ——整流装置内阻和平波电抗器电阻和；

X_b ——变压器漏抗；

R_b ——变压器绕组折合到副边的等效电阻；

R_p ——平波电抗器电阻；

R_d ——电动机电枢绕组电阻。

将 $E = c_e n$ 代入式 (1-4)，经整理可得

$$n = \frac{U_{d0}}{c_e} - \frac{R_x}{c_e} I_d$$

$$= n_0 - \Delta n \quad (1-5)$$

式中 $n_0 = \frac{U_{2\phi}}{c_e} = \frac{1.17U_{2\phi} \cos \alpha}{c_e}$ ——理想空载转速；

$$\Delta n = \frac{R_\Sigma}{c_e} I_d \text{ ——电动机负载电流 } I_d \text{ 引起的转速降落。}$$

由式 (1-5) 可知，在控制角 α 不变的情况下，电动机转速将随着负载电流的增加而直线下降；改变控制角 α 可以得到不同的理想空载转速 n_0 ，但不改变机械特性的斜率，即机械特性平移，如图 1-9 所示 (忽略了电流断续段)。从图 1-9 可见，当电流连续时由晶闸管整流装置供电的电动机的机械特性的形状和发电机——电动机组的机械特性 (见图 1-3) 形状完全一样，所以晶闸管——电动机系统静态指标的计算公式与发电机——电动机组完全一样。

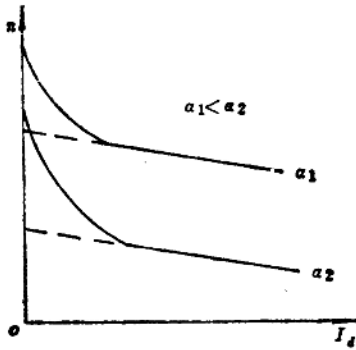


图 1-8 晶闸管整流装置供电时电动机机械特性

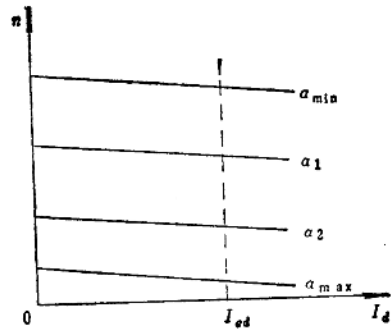


图 1-9 改变控制角的调速特性

二、晶闸管——电动机调速系统的静态指标

1. 静差率 s 由式 (1-1) 和 (1-5) 有

$$s = \frac{\Delta n_{ed}}{n_{0 \min}} = \frac{R_\Sigma I_{ed}}{c_e} \cdot \frac{1}{n_{0 \min}} \quad (1-6)$$

式中 $n_{0 \min} = \frac{1.17U_{2\phi}}{c_e} \cos(\alpha_{\max})$ ——与最低速度 n_{\min} 对应的理想空载转速。

2. 调速范围 D 由式 (1-2) 和式 (1-5) 有

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}}$$

式中 $n_{\max} = \frac{1.17U_{2\phi}}{c_e} \cos(\alpha_{\min}) - I_{ed} R_\Sigma / c_e$

$n_{\min} = \frac{1.17U_{2\phi}}{c_e} \cos(\alpha_{\max}) - I_{ed} R_\Sigma / c_e$

调速系统的额定转速降 Δn_{ed} 是影响调速系统静态指标的主要因素，产生转速降的根本原因是电路中存在的电阻压降 $I_d R_\Sigma$ 。而晶闸管供电调压调速系统的主回路等效电阻又恰

恰比较大,所以它能达到的静态指标并不高。

例1-2 某龙门刨床拖动工作台的直流电动机为Z₂-93型60kW、220V、305A、1000r/min、电枢电阻R_d=0.039Ω,整流装置内阻R_x为0.13Ω。要求D=20, s≤0.05,问系统能否满足要求?

解 电动机电势常数

$$c_e = \frac{U_{ed} - I_{ed}R_d}{n_{ed}} = \frac{220 - 305 \times 0.039}{1000} = 0.208 \text{V/r/min}$$

额定负载下电动机的转速降为

$$\Delta n_{ed} = \frac{I_{ed}R_s}{c_e} = \frac{305 \times (0.039 + 0.13)}{0.208} = 249 \text{r/min}$$

电动机最低转速为

$$n_{\min} = \frac{n_{\max}}{D} = \frac{n_{ed}}{D} = \frac{1000}{20} = 50 \text{r/min}$$

与n_{min}对应的理想空载转速为

$$n_{0\min} = n_{\min} + \Delta n_{ed} = 50 + 249 \approx 300 \text{r/min}$$

系统的静差率s为

$$s = \frac{\Delta n_{ed}}{n_{0\min}} = \frac{249}{300} = 0.83$$

显然系统静差率s过大,不满足要求。要想使系统满足要求,由式(1-3)应有

$$\Delta n_{ed} = \frac{n_{ed} \cdot s}{D(1-s)} = \frac{1000 \times 0.05}{20 \times (1-0.05)} = 2.5 \text{r/min}$$

从上述分析可见,系统本来额定转速降为249r/min,但要满足D=20, s=0.05的要求,Δn_{ed}必须小于或等于2.5r/min,如何解决这一矛盾是设计调速系统时要解决的关键问题之一。反馈技术是解决这一难题的行之有效的办法。

第四节 自动控制系统概述

一、开环控制系统和闭环控制系统

按照系统有无反馈环节,自动控制系统可分为开环控制系统和闭环控制系统。

1. 开环控制系统

图1-10所示的晶闸管—电动机调速系统,输出量(电动机转速n)受给定量(晶闸管的触发电压U_k)的控制,但输出量对输入端不产生任何影响,这样的系统叫开环控制系统。开环控制系统的职能方块图如图1-11所示。从图可见,控制作用是单方向的。

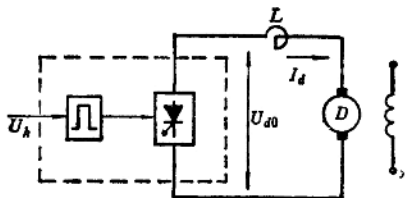


图 1-10 KZ-D 开环系统



图 1-11 开环控制的职能方块图

上述系统中, 当给定量 U_k 一定 (即 α 一定) 时, 理想空载转速 n_0 一定。但当负载波动时, 电动机主回路中的电阻压降 $I_d R_x$ 要变化, 转速降 $\Delta n = \frac{I_d R_x}{c_e}$ 显然也要变化, 输出量 (电动机转速 n) 随之变化势在必行。可见, 开环控制系统, 控制作用是单方向的, 没有自动调整作用。

2. 闭环控制系统 闭环控制系统就是把输出量检测出来, 经过物理量转换, 再反馈到输入端去与给定量比较, 利用比较后的偏差信号去控制输出量, 以减小输出量的误差。显然闭环控制是反馈控制的方法。反馈控制的一般规律是: 要想维持某一物理量基本不变, 就应引入该量的负反馈, 与恒值给定相比较, 构成该量的闭环控制系统。

二、晶闸管——电动机直流调速系统实现闭环控制的方案

在晶闸管——电动机直流调速系统中, 要减小由于电动机主回路的电阻压降 $I_d R_x$ 引起的转速降 $\Delta n = \frac{I_d R_x}{c_e}$ 对静态指标的影响, 可以采用的反馈方式有下述几种。

1. 电压负反馈方法 将晶闸管整流装置的整流电压检测出来, 反馈到输入端, 与恒值给定相比较, 构成电压闭环系统, 从而维持电动机的端电压 $U_d \approx C$ 。此时有

$$n = \frac{U_d - I_d R_d}{c_e}$$

显然整流装置内阻降被补偿了, 电动机静特性近似于自然特性, 额定转速降变为

$$\Delta n_{ed} = \frac{I_{ed} R_d}{c_e}, \text{ 它大大被减小, 静态指标得到提高。}$$

例1-3 在例1-2中令 R_x 为零 (由于电压负反馈的作用 $I_d R_x$ 大部分能被补偿掉, 可见第二章第一节), 求静差率 s 。

解 额定负载下的电动机转速降为

$$\Delta n_{ed} = \frac{I_{ed} R_d}{c_e} = \frac{305 \times 0.039}{0.208} = 57 \text{ r/min}$$

与最低转速 n_{\min} 对应的理想空载转速为

$$n_{0 \min} = n_{\min} + \Delta n_{ed} = 50 + 57 = 107 \text{ r/min}$$

系统静差率为

$$s = \frac{\Delta n_{ed}}{n_{0 \min}} = \frac{57}{103} = 0.53$$

显然, 采用电压负反馈后, 电动机额定负载转速降由 240 r/min 降为 57 r/min , 静差率由 0.83 降为 0.53 , 静态指标有很大改善。

2. 转速负反馈方法 将电动机的转速测量出来, 经过物理量转换, 再反馈到输入端与恒值给定相比较, 构成转速闭环系统, 从而维持电动机的转速 $n \approx C$ 。

3. 电流反馈 为了提高调速系统的静态指标, 控制系统有时还引入电流正反馈, 为了获得良好的动特性和特殊的静特性电流负反馈方法更是广为应用。

第五节 静态结构图和动态结构图

用结构图表示自动控制系统中各环节之间和各作用量之间的相互作用关系, 具有简明

直观，运算方便的优点，所以结构图是分析控制系统性能的有效工具。结构图有动态结构图和静态结构图两种。

一、动态结构图

1. 什么是动态结构图 系统动态结构图是将系统中所有环节用方框图表示，图中标明其传递函数，以箭头和字母符号标明其输入量和输出量，按照信号的传递方向把各个方框图依次联接起来所构成的图形。

2. 动态结构图的绘制 绘制动态结构图之前，先要求出各个环节的传递函数，然后从给定信号起始，自左至右，根据相互作用的次序，依次画出各个环节，使它们符合各作用量间的关系。反馈环节一般画在下面（有时也可画在上面）。图中还要用文字符号标明作用量和中间变量。

例1-4 求取图1-12(a)所示运算放大器的动态结构图

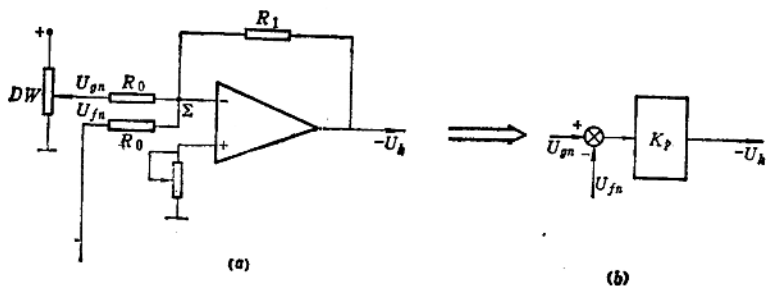


图 1-12 运算放大器及其动态结构图
(a) 运算放大器原理图；(b) 运算放大器动态结构图

图1-12 (a) 是反相输入的比例放大器， U_g 为负时， U_k 为正。由于放大器开环放大倍数极高(10^5 以上)，所以图中 Σ 点可以看成零电位（虚地），即放大器的输入电流可以认为是零。如此下述关系成立

$$\frac{U_g}{R_0} \approx \frac{U_f}{R_0} + \frac{U_k}{R_1}$$

解得 U_k 为

$$\begin{aligned} U_k &= \frac{R_1}{R_0} (U_g - U_f) \\ &= K_p (U_g - U_f) \end{aligned} \quad (1-7)$$

由式 (1-7) 可将比例放大器的动态结构图绘在图1-12 (b) 上。图中给定量和反馈量的叠加点叫比较点，给定量和反馈量极性相反表示负反馈（见图1-12b)上 U_f 的“-”号）

例1-5 求图1-13 (a) 所示晶闸管触发和整流装置的动态结构图

晶闸管整流装置总离不开触发电路，因此在分析系统时往往把它们看成是一个整体。该环节的输入量是触发电路的控制电压 U_k ，输出量是理想空载整流电压 U_d0 。如果把它们之间的放大系数 K ，看成常数(将该环节的非线性特性进行线性化处理)，则该环节可以看成是一个具有纯滞后的环节，其滞后作用是由晶闸管的失控时间引起的。一般的晶闸管整流装置都有这样的特点，即某一相的晶闸管一旦被触发导通后，如果控制电压 U_k 发生变化，