

电力拖动自动控制 系统原理 与 设计方法

陈 霞 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

电力拖动自动控制 系统原理 与 设计方法

陈 霞 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书力求将电力电子技术、电力拖动和相应的自动检测等方面的知识与交、直流调速系统相融合。在讲述交、直流调速系统的基础上,为适应学科和应用技术的发展,还增加了微机控制调速系统和仿真方面的内容。在阐述理论的基础上,本书也注意适量列举工程设计和应用实例,以有利于读者学习理论,并了解应用方面的问题。

本书力求将自动化专业多方面的知识融合到本书的内容中,以使读者对自动控制系统有一个全面的了解。本书可作为自动化、电气自动化、机电等专业的辅导教材,也可供现场工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力拖动自动控制系统原理与设计方法/陈霞编著. —北京:中国电力出版社, 2010

ISBN 978-7-5123-0109-2

I. ①电… II. ①陈… III. ①电力传动-自动控制系统
IV. ①TM921.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第023547号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2010年7月第一版 2010年7月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 11印张 261千字

印数0001—3000册 定价22.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

自动控制系统这门课是与自动化专业有关的重要的专业课程，它涉及的知识面很广，主要包括电力电子技术、电力拖动、交直流调速技术、计算机控制技术、自动检测技术等方面的知识。

由于自动控制系统的大部分机器、设备都是由电动机来拖动的，因此自动控制系统主要是研究电动机的启动、停止和速度调节等内容。对于电动机的速度调节（即电动机调速系统）本书按直流电动机调速系统和交流电动机调速系统来分类，分别进行论述。

本书主要特点如下：

(1) 将电力电子、电力拖动和相应的自动检测方面的知识与交流、直流调速系统相融合。普通教材一般将这五方面的内容分为五门课程来进行讲解，虽然比较详细，但是会使学生把它们看成独立的，而不是融合到一起的。本书根据学科性和系统性，把属于电力电子、电力拖动、电气传动等领域的知识融合到一起进行论述，重点突出它们都是自动控制系统这个链条上的一个环节，并对于链条的连接点特别进行论述，便于读者对整个自动控制系统的贯穿和理解。

(2) 将常用的技术内容和先进的技术内容相结合。本书在讲述交、直流调速系统的基础上，增加微机控制调速系统和仿真方面的内容，适应学科和应用技术的发展。

(3) 理论与实践相结合，自动控制系统基础理论性和工程实用性都很强，本书在阐述理论的基础上，也适量列举工程设计和应用实例，有利于学生学习理论并了解应用方面的问题。

(4) 本书深入浅出，由简到繁，力求突出特色，使读者掌握分析与设计自动控制系统的基本原理及方法。

本书在内容编排上注意循序渐进，先原理后设计，便于读者阅读和系统掌握，为今后的工作打下坚实的基础。

该书也是山东科技大学群星计划项目《电气控制技术综合创新性实验设计与研究》和研究生创新计划项目《控制理论与控制工程专业硕士研究生实践能力培养途径研究》的阶段性成果，主要研究在掌握一定的理论知识的基础上，学会将理论知识用于生产实际，注重实践能力的培养，这些研究内容在本书中都有所体现。

限于作者水平，书中难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

作 者

于山东科技大学

2010年1月

前言

第 1 章 电力拖动基础知识	1
1.1 直流电力传动系统的电源	2
1.1.1 旋转变流机组	2
1.1.2 静止式可控整流器	3
1.1.3 直流斩波器	4
1.2 直流电力传动系统的基本运动方程式	5
1.3 转速控制要求和调速性能指标	5
第 2 章 单闭环直流调速系统	9
2.1 转速负反馈直流调速系统的组成及工作原理	9
2.2 转速负反馈直流调速系统的静特性.....	10
2.2.1 闭环调速系统的组成及静特性.....	10
2.2.2 开环系统机械特性与闭环系统静特性之间的关系.....	12
2.3 单闭环有静差调速系统和单闭环无静差调速系统.....	14
2.3.1 单闭环有静差调速系统.....	14
2.3.2 单闭环无静差调速系统.....	14
2.4 转速负反馈闭环系统的动态抗扰性能.....	15
2.5 闭环直流调速系统的动态模型及系统稳定性分析.....	19
2.5.1 闭环直流调速系统的动态数学模型及结构框图.....	19
2.5.2 系统稳定性分析.....	23
2.6 动态校正.....	25
2.6.1 闭环控制系统设计的基本步骤.....	25
2.6.2 校正方式.....	25
2.6.3 控制系统对开环对数频率特性的要求.....	25
2.6.4 PI 调节器设计	26
2.7 其他形式的单闭环直流调速系统.....	32
2.7.1 带电流截止负反馈的单闭环直流调速系统.....	32
2.7.2 电压负反馈与电流补偿控制的直流调速系统.....	36
2.8 直流调速系统中的检测装置.....	41
2.8.1 转速检测装置.....	41

2.8.2	电流检测装置	42
2.8.3	电压检测装置	45
第3章	双闭环直流调速系统	47
3.1	转速、电流双闭环直流调速系统的组成	48
3.2	转速、电流双闭环直流调速系统的静特性	49
3.3	转速、电流双闭环直流调速系统的动态特性	52
3.3.1	转速、电流双闭环直流调速系统的动态结构图	52
3.3.2	转速、电流双闭环直流调速系统对给定信号的跟随性能分析	52
3.3.3	转速、电流双闭环直流调速系统对给定信号的抗扰性能分析	55
第4章	可逆直流调速系统	57
4.1	晶闸管直流调速系统	57
4.1.1	晶闸管直流调速系统的可逆运行方案	57
4.1.2	可逆运行方案比较	58
4.1.3	晶闸管直流调速系统制动能量的处理	59
4.2	有环流控制可逆晶闸管直流调速系统分析	63
4.2.1	配合控制	63
4.2.2	$\alpha=\beta$ 配合控制的可逆晶闸管直流调速系统	63
4.3	可控环流可逆调速系统分析	72
4.3.1	可控环流可逆调速系统的组成部分	72
4.3.2	可控环流可逆调速系统的工作原理	73
4.4	无环流控制可逆晶闸管直流调速系统分析	74
4.4.1	逻辑控制无环流调速系统	75
4.4.2	错位无环流可逆调速系统	77
第5章	自动控制系统工程设计	82
5.1	分析系统动态性能的基本步骤	82
5.1.1	建立系统的动态数学模型	82
5.1.2	控制系统性能指标	82
5.1.3	动态校正	84
5.2	典型系统	85
5.2.1	典型Ⅰ型系统	85
5.2.2	典型Ⅰ型系统的性能指标与参数之间的关系	86
5.2.3	典型Ⅱ型系统	90
5.2.4	典型Ⅱ型系统的性能指标与参数之间的关系	92
5.3	如何校正成典型系统	95
5.3.1	被控对象是两个惯性型校正成典型Ⅰ型系统	95
5.3.2	被控对象是积分-双惯性型校正成典型Ⅱ型系统	96

5.4	被控对象传递函数的近似处理	96
5.4.1	高频段小惯性环节的近似处理	97
5.4.2	大惯性环节的近似处理	98
5.4.3	高阶系统的降阶处理	99
第6章	转速、电流双闭环调速系统设计	100
6.1	总体分析	100
6.2	电流环的设计	100
6.3	转速环的设计	102
6.4	双闭环不可逆直流调速系统设计举例	105
第7章	直流调速系统的 MATLAB 建模与仿真	109
7.1	开环直流调速系统的 MATLAB 建模与仿真	109
7.2	单闭环直流调速系统的 MATLAB 建模与仿真	112
7.2.1	采用 P 调节器的单闭环直流调速系统的仿真	112
7.2.2	采用 PI 调节器的单闭环直流调速系统的仿真	114
7.3	双闭环直流调速系统的 MATLAB 建模与仿真	115
第8章	异步电动机变频调速系统	118
8.1	变频装置的基本类型及控制方式	118
8.1.1	交—直—交变频装置的基本类型及控制方式	118
8.1.2	交—直—交变频器装置逆变器的基本类型	119
8.1.3	正弦波脉宽调制 (SPWM) 逆变器	121
8.1.4	交—交变频装置的工作原理	126
8.2	异步电动机变频调速的基本控制方式	130
8.2.1	基频以下调速	130
8.2.2	基频以上调速	131
8.3	异步电动机电压—频率协调控制调速时的机械特性	132
8.3.1	基频以下电压—频率协调控制调速时的机械特性	132
8.3.2	基频以上电压—频率协调控制调速时的机械特性	134
8.4	异步电动机变频调速控制系统	135
8.4.1	转速开环恒压频比变频调速系统	135
8.4.2	以微处理器为核心的异步电动机调速系统	136
8.4.3	转速闭环转差频率控制调速系统	138
8.4.4	电流型转差频率控制变频调速系统	140
第9章	矢量变换控制变频调速系统	143
9.1	矢量变换控制的基本概念	143
9.2	矢量变换规律	145

9.3	三相异步电动机在两相坐标系上的数学模型	147
9.4	矢量变换控制的变频调速系统	149
9.5	转速、磁链闭环控制矢量变换控制变频调速系统	151
第 10 章	变频调速系统的应用设计	153
10.1	变频调速系统的设计任务和要求	153
10.1.1	变频调速系统的设计任务	153
10.1.2	变频调速系统设计的基本要求	153
10.2	变频调速系统的应用设计	154
10.2.1	负载的驱动	154
10.2.2	异步电动机的选择	155
10.2.3	变频器的选择	158
10.2.4	变频器选择的其他问题	159
10.2.5	变频器配套设备及其选择	159
10.3	对于不同性质的负载设计时应考虑的问题	162
10.3.1	恒转矩负载下设计时考虑的问题	162
10.3.2	恒功率负载下设计时考虑的问题	163
10.3.3	转矩与转速的二次方成正比的负载	164
参考文献	166

第1章

电力拖动基础知识

什么是传动？应用各种原动机使工作机械产生运动，从而完成设定的任务，称为传动。若原动机采用的是电动机，这种传动方式就叫电气传动。

电气传动系统的最基本的组成如图 1-1 所示，分为电源、电动机、生产机械三部分。其中，电源可分为直流电源和交流电源两种。直流电源驱动直流电动机的系统，称为直流电气传动系统，用交流电源驱动交流电动机的系统，称为交流电气传动系统。本书以直流电气传动系统为主，交流传动系统为辅进行介绍。

生产机械要求控制电动机的转速，以简单的电梯拖动系统控制为例，起动时需要电动机加速运转，带动电梯快速起动；达到一定的速度后电动机需匀速运转，带动电梯匀速运行；快达到目的地时，电动机减速运转带动电梯减速运行，直到停止。

那么如何控制电动机的转速呢？先看一个最简单的电路，如图 1-2 所示。

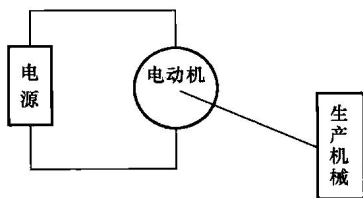


图 1-1 拖动系统示意图

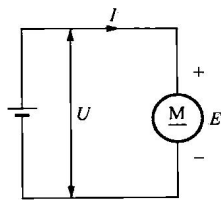


图 1-2 电动机电路原理图

直流电动机转速与电源之间的关系可表示为

$$U - IR = E \quad (1-1)$$

$$E = C_e \phi n \quad (1-2)$$

式中： U 为电源电压； I 为电路电流； R 为电动机电枢回路总电阻； E 为电动机感应电动势； C_e 为电动机结构决定的电动势常数； ϕ 为电动机励磁磁通； n 为电动机转速。

由式 (1-1) 和式 (1-2) 可知

$$n = \frac{U - IR}{C_e \phi} \quad (1-3)$$

在式 (1-3) 中， C_e 为常数，可改变的为 U 、 I 、 ϕ ，因此调节电动机转速的方法有 3 种：

(1) 调节电枢供电电压。对要求一定范围内无级平滑调速的系统来说，此种方式最好，只需要电源电压可调即可。随着电力电子技术的发展，可控电源技术发展非常快，应用也越来越广泛，因此现今的自动控制的直流调速系统一般以调压调速为主。

(2) 调节励磁磁通。此种调速方法也能平滑调速，其调速范围不大但有其自己的特点，可弱磁升速，一般配合调压方案，在额定转速以上做小范围的调速。

(3) 改变电枢回路电阻。可实现电动机的有级调速，但所串电阻本身消耗电能，而且不能无级调速，目前已很少采用。

下面我们来看一下直流电力传动系统各组成部分。

1.1 直流电力传动系统的电源

直流电力传动系统的传统电源为蓄电池，因其使用时需定期充电等诸多不便，使用范围受到限制。变压调速是当今直流电力传动系统常用的调速方法，它需要可调的直流电压，也就是需要可控的直流电源。常用的可控直流电源主要分为以下几种。

1.1.1 旋转变流机组

20 世纪 60 年代以前广泛使用的可控直流电源为旋转变流机组，如图 1-3 所示，直流发电机 G 作为电源直接给直流电动机 M 供电，直流电动机带动生产机械运动，这种系统简称 G-M 系统。

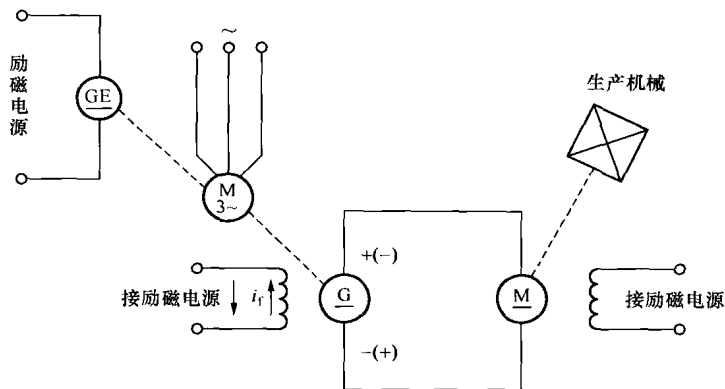


图 1-3 旋转变流机组和由它供电的直流调速系统 (G-M) 原理图

G-M 系统由交流电动机拖动直流发电机 G 运行，同时还可利用交流电动机直接拖动直流励磁发电机 GE，作为励磁电源产生励磁电流，供给直流发电机 G 和直流电动机 M。

那么它是如何实现调压的呢？通过调节直流发电机的励磁电流 i_f 的大小，来改变直流发电机的输出电压的大小，达到改变直流电动机转速大小的目的。它可不可以改变直流电动机的转速方向，实现电动机反转要求呢？答案是可以，只需改变励磁电流 i_f 的方向，即可改变发电机的输出电压极性，从而改变直流电动机的转速方向，可方便地实现电动机可逆运行，因此在正转减速和反转减速时都可回馈制动，G-M 系统在允许的转矩范围内可实现四象限运行。

它的主要缺点是：至少要两台与调速电动机容量相当的旋转电机和一台励磁发电机，因此设备多、占地面积大、安装必须打地基、运行费用高、效率低、噪声大、维护不方便，目前虽有此系统运行，已成为被改造的对象，逐渐被可控直流电源所代替。

1.1.2 静止式可控整流器

采用水银整流器的离子拖动系统于20世纪50年代问世,是最早应用静止变流装置供电的直流调速系统。它克服了旋转变流机组的许多缺点,缩短了响应时间,但水银整流器造价较高,维护麻烦,水银如果泄漏,会污染环境,危害人身健康。因而在20世纪50年代末就被另一种静止可控直流电源—晶闸管变流装置所代替。

1957年,晶闸管问世,20世纪60年代,已生产出成套晶闸管变流装置,使变流技术发生了革命性的变化,开始进入晶闸管时代。

由晶闸管装置为直流电动机供电的调速系统称为晶闸管-电动机调速系统(简称V-M系统),是直流调速系统的主要形式。

图1-4为V-M系统的原理图,其中VT是晶闸管可控整流器,它可以是单相、三相或更多相数,半波、全波、半控、全控等多种类型电路。系统的工作原理是:通过调节晶闸管触发脉冲的相位,从而改变晶闸管整流装置输出电压 U_d 的大小,实现直流电动机的平滑调速。

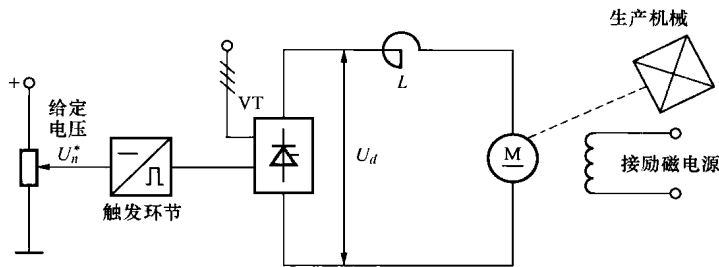


图 1-4 晶闸管—电动机 (V-M) 调速系统原理图

和旋转变流机组及离子拖动变流装置相比,晶闸管整流装置不仅在经济性和可靠性上有很大提高,在技术性能上也显示出较大的优越性,主要表现在以下几个方面:

(1) 晶闸管变流装置的功率放大倍数在 10^4 以上,不再需要像直流发电机那样需要较大功率的放大器。

(2) 在控制作用的快速性方面,变流机组是秒级,而晶闸管整流器是毫秒级,这将会大大提高系统的动态性能。

(3) 晶闸管整流器的效率高,设备投资运行费用低。

(4) 晶闸管整流器无噪声、无磨损、体积小、重量轻,可靠性高,维护方便。

当然它也有缺点,主要表现在以下几个方面:

(1) 由于晶闸管的单向导电性,它不允许电流反向,给系统的可逆运行造成困难,必须对电路改进后才可实现可逆运行,后面我们会详细讲解。

(2) 晶闸管对过电压、过电流、过高电压变化率、过高电流变化率以及温度都十分敏感,其中任何指标超过允许值都可能在很短时间内损坏元件,因此在选择元件时应留有足够的余量,必须有可靠的保护装置和符合要求的散热条件,只要元件质量过关、装置设计合理、保护设施齐备,晶闸管装置的运行就十分可靠。

(3) 功率因数低,有较大的谐波,造成“电力公害”。特别是当系统在较低速运行时,晶闸管的导通角很小,使得系统的功率因数很低,产生较大的谐波电流,引起电网电压波形

畸变，殃及附近的用电设备，这种情况下，必须增设无功补偿和谐波滤波装置。

对于以上缺点有没有更好的解决方案？答案是有，采用直流斩波器。

1.1.3 直流斩波器

直流斩波器是将恒定的直流电压斩波为一定宽度的脉冲电压加在负载两端的装置。若负载为直流电动机，则构成了由直流斩波器供电的直流调速系统（简称 PWM 系统），如图 1-5 所示，VT 为用开关符号表示的任一种全控型电力电子开关器件，VD 为续流管。本电路若使用晶闸管作为开关器件，因晶闸管无自关断能力，需设置强迫关断电路。

当 VT 导通时，直流电源电压 U 加在电动机上，VT 接通时间为 t_{on} ；当 VT 关断时，电源与电动机之间断开，电动机靠电感储能维持导通，电感储能经续流管 VD 释放续流，此时续流管 VD 两端电压接近为零，VT 关断时间为 t_{off} ；显然 VT 它是接在恒定直流电压与负载之间，用于改变负载直流平均电压平均值 U_d 的器件， t_{on} 期间被接上， t_{off} 期间被斩断，故称为“斩波”。其电压波形示意图如图 1-6 所示，由其工作原理可知，加在负载两端的电压平均值一定小于等于恒定直流电源电压值。

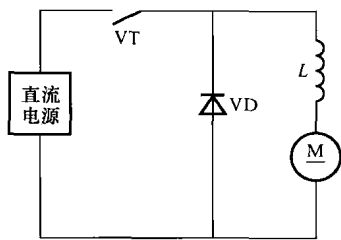


图 1-5 直流斩波器—电动机系统原理图

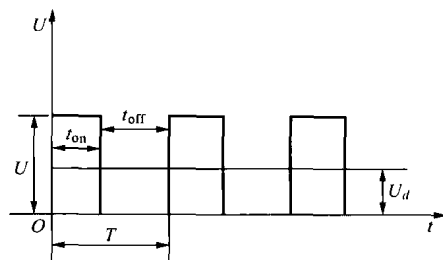


图 1-6 直流斩波器—电动机系统电压波形图

电动机得到的平均电压大小为

$$U_d = \frac{t_{on}}{T} U = \rho U \quad (1-4)$$

$$\rho = \frac{t_{on}}{T}$$

式中： T 为开关器件的开关周期； t_{on} 为开关器件开通的时间； ρ 为占空比。

由式 (1-4) 可看出，改变输出电压 U_d 大小的方法有三种：

(1) 器件开关周期 T 不变，改变开关器件开通的时间 T_{on} ，即改变脉冲宽度，一般称为脉冲宽度调制（简称 PWM）。

(2) 开关器件开通的时间 T_{on} 保持不变，改变器件开关周期 T ，一般称其为脉冲频率调制（PFM）。

(3) 器件开关周期 T 、开关器件开通的时间 T_{on} 都改变，这种工作方式不好实现，应用较少。

与上面所讲 V-M 直流调速系统相比，PWM 调速系统主要优点为：

(1) 主电路简单，需用的功率器件少。

(2) 开关频率高，仅靠电枢电感这样的小电感就可使电流连续、脉动小，所以系统低速性能好，稳态精度高，调速范围宽，谐波少，电机发热和损耗都较小。

- (3) 直流电源可采用不控整流, 电网功率因数高。
- (4) 功率开关器件工作在开关状态, 导通损耗小, 装置效率高。
- (5) 与快速电动机配合, 系统的频带宽, 动态响应快, 动态抗扰能力强。

1.2 直流电力传动系统的基本运动方程式

电动机带动工作机械运动的电气传动系统力的关系示意图如图 1-7 所示。

T_e 为电动机电磁转矩, 可近似地认为是电动机的输出转矩, T_L 为负载转矩, 那么电动机轴的角速度 ω 与 T_e 、 T_L 的关系可表示为

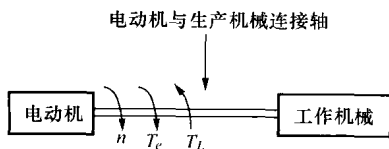


图 1-7 电气传动系统

$$T_e - T_L = \frac{d(J\omega)}{dt} = \frac{Jd\omega}{dt} \quad (1-5)$$

式中: T_e 为电动机电磁转矩; T_L 为负载转矩; J 为拖动系统折算到电动机轴上的总转动惯量 (大多数情况下可认为是常数); ω 为电动机的角速度。

工程计算中往往不习惯于用转动惯量 J , 而用飞轮惯量 GD^2 , 两者之间关系为

$$J = m\rho^2 = mD^2/4 = GD^2/4g \quad (1-6)$$

式中: ρ 、 D 为惯性半径、直径; m 为旋转部分质量; G 为旋转部分的重量; g 为重力加速度, $g=9.81\text{m/s}^2$ 。

我们平时不习惯于用角速度表达电动机速度, 换算为习惯的电动机每分钟转速 n , 则两者之间的关系为

$$\omega = 2\pi n/60 \quad (1-7)$$

由式 (1-5) 和式 (1-6) 可得出实用表达式

$$T_e - T_L = \frac{Jd\omega}{dt} = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-8)$$

通过式 (1-8) 可看出, 当 $T_e > T_L$ 时, 系统加速; 当 $T_e < T_L$ 时, 系统减速; 当 $T_e = T_L$ 时, 系统恒速运动, 即系统处于稳态运行。

总结以上几点, 以调压调速为例, 我们来看一下各部分之间的关系。当负载 T_L 为定值, 现电动机稳定运行在转速 n_1 , 希望电动机调速到稍高转速 n_2 , 我们来看一下它如何调速: 因现在稳速运行, 电磁转矩与负载转矩的关系为 $T_e = T_L$, 要加速, 则 T_e 应大于 T_L , 需提高电磁转矩 T_e , 而 $T_e = C_m I_d$ (C_m 为额定励磁下电动机的转矩系数), 即需要提高电流 I_d , 那么就需要提高电源电压, 若使用的是晶闸管变流装置, 只需调整触发脉冲相位即可, 这就是开环系统调速, 它是由人根据经验来控制调整的, 电源电压增加到此值, 转速可到 n_2 , 没有限制措施保证它一定是转速 n_2 。

上面是负载恒定, 调节转速。若是负载变化呢? 比如商场电梯运行, 随时都有可能上人使负载变化, 但我们又希望电梯转速不发生变化以保证舒适性, 再采用开环控制, 实现起来好像有些麻烦, 应该怎么办? 下面我们就来研究这个问题。

1.3 转速控制要求和调速性能指标

前面我们所讲图 1-4 所示的晶闸管—电动机系统和图 1-5 所示的直流斩波器—电动机

系统，其输出量都没有反送到输入端参与控制，其控制框图如图 1-8 所示，输出量 n 与输入量给定电压 U_n^* 没有任何直接的联系，这就是开环调速系统，要改变电动机转速只需通过改变给定电压 U_n^* 来改变整流电源电压 U_d 就可以了，控制很简单，若负载的生产工艺对转速要求不高，这样的开环调速也能实现一定范围的无级调速，使用它就可以。

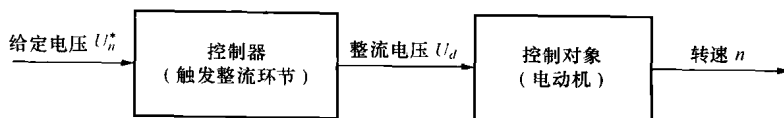


图 1-8 开环控制系统框图

但许多需调速的生产机械对速度会有一些的要求，那么就需要对转速进行控制，对转速控制的要求可归纳为以下几个方面：

(1) 调速。在一定的最高速和最低速的范围内，实现有级或无级调节转速。

(2) 稳速。以一定的精度在所需转速上稳定运行，对各种各样的干扰不允许有超过允许范围的转速波动。

(3) 加、减速。频繁起、制动的设备要求加、减速尽量快，以提高生产率；不宜经受剧烈速度变化的机械，要求加、减速要适当，以保证起、制动平稳；有许多机械对上面两方面都有要求，那么就需找出一个平衡点。

针对以上控制要求，可用稳态调速性能指标和动态调速性能指标来描述。其中动态调速指标是指系统在给定信号和扰动信号的作用下，系统的动态过程调速指标，将在稍后的章节中进行详细介绍，我们先看一下稳态调速性能指标。

稳态调速性能指标是针对调速和稳速两项要求制定的调速指标，包括调速范围和静差率两项。

(1) 调速范围。

额定负载时，生产机械要求电动机提供的最高转速 n_{\max} 和最低转速 n_{\min} 之比叫调速范围，用字母 D 来表示，即

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} \quad (1-9)$$

许多生产机械都对调速范围有较高的要求，例如额定负载下的重型铣床，快速移动时最高转速可达 600mm/min，而精加工时，最低转速却只有 2mm/min，它的调速范围可达 200mm/min。

(2) 静差率。

当系统在某一转速下稳定运行时，负载由零（理想空载）增加到额定值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

$$S = \frac{\Delta n_N}{n_0} \quad (1-10)$$

静差率用来衡量系统运行的相对稳定程度，它同机械特性的硬度有关。在同一理想空载转速下，调速系统的静态速降 Δn_N 越小，系统的机械特性越硬，静差率越小，转速的稳定程度就越高。

然而静差率与机械特性硬度又有区别，同一调速系统同一硬度，对应不同的理想空载转

速, 会得到不同的静差率。如图 1-9 所示, 曲线 1 和曲线 2 转速降落相同, 空载转速 $n_{01} > n_{02}$, 根据定义, $S_1 < S_2$ 。这也就是说明, 对于同样的硬度, 理想空载转速越低, 静差率越大, 转速的相对稳定性就越差。

综上所述, 如果一个系统最大静差率 (即最小空载转速 n_0 所对应的静差率) 能满足设计对静态精度的要求, 则高速时的静差率 (对应最小静差率) 就更能满足要求, 因此, 设计系统时要求静差率指的是最大静差率, 是以最低速所能达到的数值为准。

从以上分析还可看出, 静差率所表达的系统静态精度是相对于理想空载转速的静态精度, 不能简单地通过它的大小来断定一个调速系统静态精度的好坏, 要将调速范围和静差率放在一起看才有意义。那么它们两者之间有什么关系? 我们从下面的推导来分析它们的关系, 即

$$S = \frac{\Delta n_N}{n_0} = \frac{\Delta n_N}{n_{\min} + \Delta n_N} \quad (1-11)$$

得到 $n_{\min} = \frac{(1-S)\Delta n_N}{S}$ 代入式 (1-9), 得

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{n_N}{n_{\min}} = \frac{n_N S}{\Delta n_N (1-S)} \quad (1-12)$$

(直流电动机变压调速系统中, 一般以电动机额定转速 n_N 作为最高转速 n_{\max})

由式 (1-12) 可清楚地看到调速范围、静差率和额定速降之间的关系。对于同一个系统, 当 Δn_N 值一定, 希望静差率 S 小时, 系统允许的调速范围也变小, 一个调速系统的调速范围, 是指在最低速时还能满足所需静差率的转速可调范围; 在一定的静差率 S 下, 要想扩大调速范围 D , 只有设法减小额定速降 Δn_N 。

Δn_N 是怎样产生的? 当负载一定时, 额定速降 Δn_N 是由电枢回路总电阻 R_Σ 决定的, 即

$$\Delta n_N = \frac{R_\Sigma I_N}{C_e \phi} \quad (1-13)$$

系统一旦组成后, 电枢回路总电阻 R_Σ 是无法改变的, 在额定状态下, 则开环系统 Δn_N 值一定, 所以若开环系统的静差率较大, 能够达到的调速范围也较大, 下面我们用一个例题来说明这一点。

【例 1-1】 某开环控制晶闸管—电动机调速系统, 直流电动机的额定转速 $n_N = 1430 \text{r/min}$, 额定速降 $\Delta n_N = 115 \text{r/min}$ 。①当工艺要求静差率 $S = 0.3$ 时, 允许的调速范围应多大? ②若工艺要求静差率 $S = 0.2$, 允许的调速范围应多大? ③若需要调速范围达到 10r/min , 静差率应为多大? 开环系统能满足吗?

解 ① 要求静差率 $S = 0.3$ 时, 调速范围为

$$D = \frac{n_N S}{\Delta n_N (1-S)} = \frac{1430 \times 0.3}{115(1-0.3)} = 5.3$$

② 要求静差率 $S = 0.2$ 时, 调速范围为

$$D = \frac{n_N S}{\Delta n_N (1-S)} = \frac{1430 \times 0.2}{115(1-0.2)} = 3.1$$

③ 若需要调速范围达到 10, 静差率应为

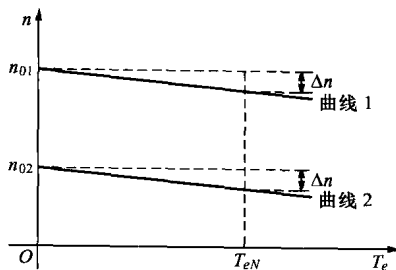


图 1-9 不同空载转速下的静差率

$$S = \frac{D\Delta n_N}{n_N + D\Delta n_N} = \frac{10 \times 115}{1430 + 10 \times 115} = 0.446$$

调速范围、静差率和额定速降之间的关系前面已讲过，由此例题可见，开环系统转速降落 $\Delta n_N = \frac{R_\Sigma I_N}{C_e \phi}$ 为一定值，调速系统的稳态精度越高，静差率 S 值越小，则开环系统的调速范围 D 也越小，那么如何解决静差率与调速范围的矛盾呢？（即怎样才能 S 值小，系统的调速范围 D 足够大呢？）由三者关系知，方法只能有一种，减小 Δn_N ，使机械特性变硬，显然开环系统是办不到的，开环系统对此已无能为力。

如何才能减小 Δn_N 呢？可不可以采用反馈控制原理构成的闭环调速系统来解决这个问题？我们将在下一章进行研究。

第 2 章

单闭环直流调速系统

开环调速系统性能指标不能满足高性能工作机械的要求，是因为负载变化时额定转速降太大，导致速度变化太大，现在我们想负载变化时稳定转速，根据反馈控制原理，要稳定哪一个参数，就引入哪一个参数的负反馈，构成闭环控制系统，因此对直流调速系统我们引入转速负反馈，构成转速负反馈闭环直流调速系统。

2.1 转速负反馈直流调速系统的组成及工作原理

转速负反馈直流调速系统如图 2-1 所示，它在开环调速系统的基础上，按照反馈控制原理，增加了转速检测环节——测速发电机，与电动机装在同一个轴上，引出了与转速成正比的负反馈电压 U_n ，与给定电压 U_n^* 比较后得到偏差电压 ΔU_n ，经过调节器产生触发装置的控制电压 U_c ， U_c 控制触发装置输出脉冲的位置，调节 α 角，以达到控制整流电压的目的，进而控制电动机的转速，使转速大小稳定在某个值左右。若想改变电动机转速，只需改变转速给定电压 U_n^* 的大小，从而实现电动机的平滑无级调速。

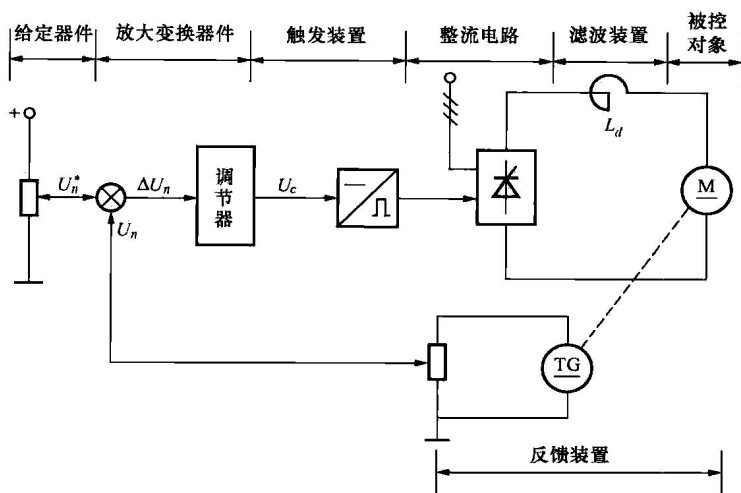


图 2-1 单闭环控制系统原理图

下面我们来看一下该系统是如何实现稳速的，假设电动机因为负载增加，而使电动机转速 n 降低，则得到如下关系：

$$\text{负载增加} \uparrow \rightarrow \text{转速 } n \downarrow \rightarrow \text{反馈电压 } U_n \downarrow \xrightarrow{\frac{\Delta U_n = U_n^* - U_n}{U_n}} \Delta U_n \uparrow \rightarrow U_c \uparrow \rightarrow U_d \uparrow \rightarrow n \uparrow$$