



普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12·5" GUIHUA JIAOCAI

电气传动控制技术

钱晓龙 闫士杰 主编



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



普通高等教育“十二五”规划教材

电气传动控制技术

钱晓龙 闫士杰 主编



北 京
冶金工业出版社
2013

内 容 提 要

本书主要讲述电气传动控制技术。书中遵循理论和实际相结合的原则,针对不同的控制对象及要求,选择合适的控制规律、系统结构、单元部件和系统参数,使学习者建立起系统的工程概念。同时,从理论和实践的角度,阐述了电气传动系统控制的基本理论和相关技术,在强调闭环控制的前提下,介绍了系统的静态和动态性能、设计方法及系统的工程实现;并重点介绍了 PWM 控制技术、电压源型变频器、矢量控制变频器、同步电动机调速系统等传动系统的主流技术,力求反映最前沿的技术成果。

本书内容深入浅出、通俗易懂,非常适合作为自动化和电气工程类专业的本科生与研究生教材,对企业相关专业的工程技术人员也有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

电气传动控制技术/钱晓龙,闫士杰主编. —北京:冶金工业出版社,2013. 2

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5024-6156-0

I. ①电… II. ①钱… ②闫… III. ①电力传动—控制系统—高等学校—教材 IV. ①TM921. 5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 024932 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcbs@cnmip.com.cn

责任编辑 张耀辉 宋 良 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 李 娜 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-6156-0

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京百善印刷厂印刷

2013 年 2 月第 1 版,2013 年 2 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 12.75 印张; 309 千字; 195 页

28.00 元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿邮箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

随着科技及其工程应用的发展,特别是数字化技术的实现,原有《自动控制系统》教材中的大部分内容已和当今工业实际系统不能吻合,教材内容严重滞后于当前的应用技术。而交流调速系统借助计算机技术、功率电子技术及现代控制理论的飞速进步,在生产生活中的应用越来越广泛,已成为传动领域的主流。这就促使着高校在基础教学中必须做出相应的调整或改革。交流传动系统对专业知识的要求很高,它涉及的知识面广、理论基础性强、实践应用性强,且需要创新能力,因此对教材进行改革创新不但势在必行,而且迫在眉睫。正是在这样的背景下,我们着手编写了本教材。根据教学大纲的要求,在编写过程中,我们力求做到教材内容的精选和完整,分析和论述的深入浅出与准确,理论与工程实践经验的融合。

本书以电机传动系统为研究对象,对自动控制系统的概念、系统的工作原理及其分析方法、系统的工程设计方法等进行了全面深入的介绍。全书共分6章:第1章是电气传动系统的基础,梳理了后续章节将要用到的交直流电动机基本理论的分析方法;第2章为自动控制系统的设计,着重介绍了系统的基本概念、组成原理及设计思路;第3章以闭环控制直流调速系统为例,讲解了各种多闭环调速系统的工程设计方法;第4章为电压型变频调速系统,详细讲述了PWM变频器的工作原理,介绍了适于大功率电动机的三电平逆变器及其空间矢量调制模式;第5章根据交流电动机的基本原理,通过引入空间矢量方法,经过坐标变换,仿照直流电动机调速系统,建立异步电动机矢量控制系统;第6章以可逆式轧机主传动为背景,分析了目前广泛采用的同步电动机矢量控制系统设计方法。

本书由东北大学教师组织编写,其中,第1章、第4章和第5章由闫士杰副教授编写,第3章由谭树彬副教授编写,第2章和第6章由钱晓龙教授编写。

由于作者水平所限,书中不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者
2012年11月

目 录

1 电气传动系统基础	1
1.1 直流调速概述	1
1.1.1 直流电机	1
1.1.2 可控直流电源	3
1.1.3 直流调速系统的调速方式及机械特性	5
1.1.4 生产机械对调速系统的控制要求及调速指标	7
1.2 交流调速概述	8
1.2.1 交流电动机调速的基本类型	8
1.2.2 变频调速的原则	10
1.2.3 变频控制时的电动机运行状态	16
1.2.4 变频器的控制方式	18
1.3 小结	25
习题与思考题	26
2 自动控制系统的设计	27
2.1 自动控制系统的基本控制方式	27
2.1.1 开环控制方式	27
2.1.2 闭环控制方式	28
2.2 自动控制系统的指标	29
2.2.1 对自动控制系统的基本要求	29
2.2.2 自动控制系统的单项性能指标	30
2.3 PID 控制器的设计方法	32
2.3.1 PID 调节规律	33
2.3.2 数字式 PID 调节器	37
2.4 数字式 PID 调节器参数的整定	38
2.4.1 PID 整定方法综述	39
2.4.2 工程实验法	40
2.5 小结	42
习题与思考题	43
3 闭环控制的直流调速系统	44
3.1 双闭环直流调速系统的组成	44

3.2 双闭环直流调速系统稳态结构图与参数计算	45
3.2.1 稳态结构图和静特性	45
3.2.2 各变量的稳态工作点和稳态参数计算	47
3.3 双闭环直流调速系统数学模型与动态过程	47
3.3.1 双闭环直流调速系统的动态数学模型	47
3.3.2 双闭环直流调速系统的动态过程分析	48
3.4 双闭环直流调速系统的工程设计	50
3.4.1 调节器的工程设计方法	51
3.4.2 I 型典型系统	52
3.4.3 II 型典型系统	57
3.4.4 工程设计中的近似处理	63
3.4.5 双闭环直流调速系统的设计	66
3.5 直流调速系统的数字控制	73
3.5.1 数字控制的特殊问题	74
3.5.2 转速检测的数字化	75
3.5.3 调节器的数字化	79
3.5.4 触发器的数字化	80
3.5.5 数字无环流控制逻辑	81
3.5.6 数字控制软件的实现	82
3.5.7 SIMOREG 6RA70 直流数字控制系统	82
3.6 小结	89
习题与思考题	89
4 电压型变频器系统	91
4.1 电压型 PWM 逆变器的基本工作原理	91
4.1.1 单相电压型 PWM 逆变器及其控制方法	92
4.1.2 三相电压型 PWM 逆变器及其控制方法	94
4.2 脉冲宽度调制技术	96
4.2.1 SPWM 调制法	96
4.2.2 加入 3 次谐波的 HIPWM 调制法	100
4.2.3 规则采样法	101
4.2.4 谐波消除法	106
4.2.5 电流滞环跟踪法	108
4.2.6 电压空间矢量法	109
4.3 电压型变频调速系统	118
4.3.1 PWM 变频器控制系统硬件电路	118
4.3.2 SPWM 逆变器控制系统	122
4.3.3 SVPWM 逆变器控制系统	125
4.4 三电平逆变器	127

4.4.1 三电平逆变器主电路结构	127
4.4.2 三电平逆变器工作原理	129
4.4.3 三电平逆变器空间矢量调制	131
4.5 小结	134
习题与思考题	135
5 异步电动机矢量控制系统	136
5.1 异步电动机在 ABC 坐标系下的动态数学模型	136
5.1.1 磁链方程式	137
5.1.2 电压方程式	140
5.1.3 转矩方程式	141
5.2 异步电动机空间矢量	143
5.2.1 空间矢量的定义	143
5.2.2 空间矢量的变换	145
5.2.3 异步电动机空间矢量方程式	146
5.3 异步电动机坐标变换	148
5.3.1 坐标变换的意义	148
5.3.2 3相/2相坐标变换的一般公式	149
5.3.3 3相/2相之间的静止变换	151
5.3.4 2相/2相之间的旋转变换	152
5.3.5 3相/2相之间的旋转变换	152
5.3.6 直角坐标系与极坐标系之间的变换	154
5.4 异步电动机在两相坐标系上的数学模型	154
5.4.1 异步电动机在任意两相坐标系上的数学模型	154
5.4.2 异步电动机在两相静止坐标系上的数学模型	156
5.4.3 异步电动机在转子两相旋转坐标系上的数学模型	157
5.4.4 异步电动机在两相同步旋转坐标系上的数学模型	157
5.5 异步电动机的矢量控制	159
5.5.1 矢量控制的基本思想	159
5.5.2 异步电动机的矢量控制原理	160
5.5.3 转子磁链模型	163
5.5.4 异步电动机矢量控制系统	167
5.6 小结	171
习题与思考题	172
6 同步电动机矢量控制系统	173
6.1 引言	173
6.1.1 同步电动机概述	173
6.1.2 同步电动机的变频调速	174

6.2 永磁同步电动机矢量控制系统	175
6.2.1 ABC 三相坐标系下的数学模型	176
6.2.2 dq 两相坐标系下的数学模型	177
6.3 励磁同步电动机矢量控制系统	178
6.3.1 励磁同步电动机的数学模型	179
6.3.2 转矩、磁链和励磁电流的控制	181
6.3.3 气隙磁链计算方法	183
6.3.4 定子磁链矢量控制方法	186
6.4 凸极励磁同步电动机控制系统	188
6.4.1 凸极励磁同步电动机模型	188
6.4.2 凸极励磁同步电动机的转矩、电流控制	189
6.4.3 系统控制器的设计	189
6.5 小结	194
习题与思考题	194
参考文献	195

1 电气传动系统基础

【内容提要】本章在介绍交直流电动机调速类型的基础上，阐述了可控直流电源的控制方式以及直流调速的机械特性；交流电动机调速的恒磁通和恒功率变频原则，以及四象限运行的机械特性；分别讲解 180° 导电型六拍变频器、 120° 导电型六拍变频器和 PWM 型变频器的工作原理和输出波形。

1.1 直流调速概述

1.1.1 直流电机

直流调速系统有着成熟的数学模型，调速精度高，应用范围广，具有极好的运行性能和控制特性，以及良好的启动、制动性能，易于在较大范围内平滑调速。所以，在轧钢机、矿井卷扬机、挖掘机、海洋钻机、金属切削机床、造纸机、高层电梯等需要高性能可控电力拖动的领域中，直流调速系统得到广泛应用，并且在很长一段时间内一直占据垄断地位。

为了更好地分析直流调速系统，这里首先回顾一下直流电机的工作原理以及直流电机的调速方式。

1.1.1.1 直流电机的定义及结构

A 直流电机的定义

输出或输入为直流电能的旋转电机，称为直流电机，它是能实现直流电能和机械能互相转换的电机。当它作电动机运行时是直流电动机，将电能转换为机械能；作发电机运行时是直流发电机，将机械能转换为电能。

B 直流电机的结构

直流电机的结构如图 1-1 所示。

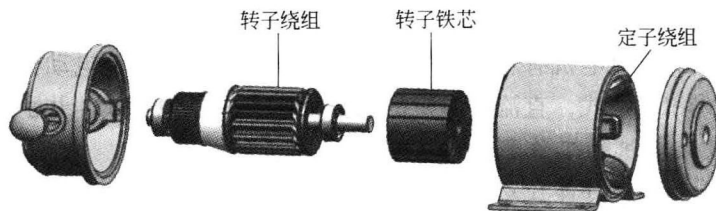


图 1-1 直流电机的结构

直流电机由定子和转子两部分组成，其间有一定的气隙。其构造的主要特点是具有一个带换向器的电枢。直流电机的定子由机座、主磁极、换向磁极、前后端盖和刷架等部件

组成,其中主磁极是产生直流电机气隙磁场的主要部件,由永磁体或带有直流励磁绕组的叠片铁芯构成。直流电机的转子则由电枢、换向器(又称整流子)和转轴等部件构成,其中电枢由电枢铁芯和电枢绕组两部分组成。电枢铁芯由硅钢片叠成,在其外圆处均匀分布着齿槽,电枢绕组则嵌置于这些槽中。换向器是一种机械整流部件,由换向片叠成圆筒形后,利用金属夹件或塑料紧固成型为一个整体,各换向片间互相绝缘。换向器的质量对运行可靠性有很大影响。

1.1.1.2 直流电机的分类

直流电机的励磁方式是指对励磁绕组如何供电以产生励磁磁通势而建立主磁场的问题。根据励磁方式的不同,直流电机可分为下列几种类型,如图1-2所示。

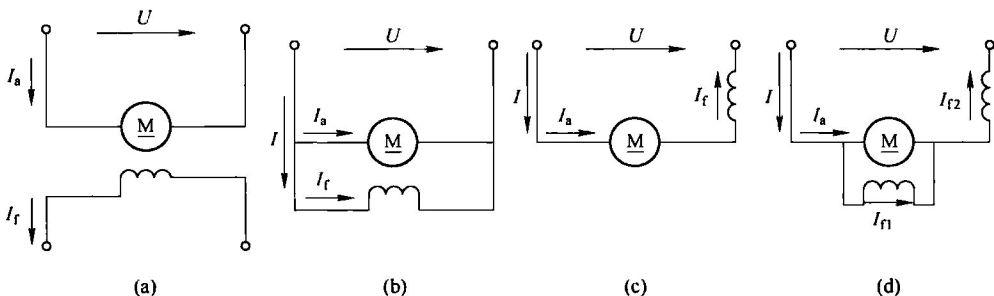


图1-2 直流电机的励磁方式

(a) 他励直流电机; (b) 并励直流电机; (c) 串励直流电机; (d) 复励直流电机

(1) 他励直流电机。励磁绕组与电枢绕组无连接关系,而由其他直流电源对励磁绕组供电的直流电机称为他励直流电机,接线如图1-2(a)所示。图中M表示电动机,若为发电机,则用G表示。永磁直流电机也可看做他励直流电机。

(2) 并励直流电机。并励直流电机的励磁绕组与电枢绕组相并联,接线如图1-2(b)所示。对于并励发电机来说,其通过电机本身发出来的端电压为励磁绕组供电;对于并励电动机来说,励磁绕组与电枢共用同一电源,从性能上讲与他励直流电动机相同。

(3) 串励直流电机。串励直流电机的励磁绕组与电枢绕组串联后,再接于直流电源,接线如图1-2(c)所示。这种直流电机的励磁电流就是电枢电流。

(4) 复励直流电机。复励直流电机有并励和串励两个励磁绕组,接线如图1-2(d)所示。串励绕组产生的磁通势与并励绕组产生的磁通势方向相同时称为积复励。若两个磁通势方向相反,则称为差复励。

不同励磁方式的直流电机有着不同的特性。一般情况下,直流电动机的主要励磁方式是并励式、串励式和复励式,直流发电机的主要励磁方式是他励式、并励式和复励式。

1.1.1.3 直流电机的工作原理

直流电机是根据通电导体在磁场中会受力的原理来工作的,其中,受力方向由左手定则确定。电动机的转子上绕有线圈,通入电流;定子作为磁场线圈也通入电流,产生定子磁场。通入电流的转子线圈在定子磁场中,就会产生电动力,推动转子旋转。转子电流是通过换向器(整流子)上的炭刷连接到直流电源的。

直流电机的可逆运行原理如下:

一台直流电机原则上既可以作为电动机运行,也可以作为发电机运行,这在电机理论中称为可逆原理。当原动机驱动电枢绕组在主磁极 N、S 之间旋转时,电枢绕组上感生出电动势,经电刷、换向器装置整流为直流后,引向外部负载(或电网),对外供电,此时电机作直流发电机运行。如用外部直流电源,经电刷、换向器装置将直流电流引向电枢绕组,则此电流与主磁极 N、S 产生的磁场互相作用,产生转矩,驱动转子与连接于其上的机械负载工作,此时电机作直流电动机运行。

1.1.2 可控直流电源

直流调速系统中的可控直流电源随着电力电子技术的发展也在不断地更新换代,常用的可控直流电源主要包括旋转变流机组、静止可控整流器、直流斩波器或脉冲调制变换器三类。

1.1.2.1 旋转变流机组

20 世纪 40 年代的可控直流电源是旋转变流机组。它由交流同步电动机或交流异步电动机带动直流发电机,直流发电机直接为直流电动机供电,直流电动机再带动生产机械。通过调节发电机励磁电流的大小,可以方便地改变直流发电机的输出电压,从而达到调节直流电动机转速的目的。改变发电机励磁电流的方向,即可以改变发电机输出电压的极性,从而实现直流电动机的可逆运行。这种系统简称为 G-M 系统。在 G-M 系统中,直流发电机的磁场是由作为功率放大器的交磁放大机直接供电的,所以称之为放大机控制的发电机-电动机组调速系统。由于在这种可控直流电源中旋转设备多,所以简称其为旋转变流机组。

旋转变流机组在 20 世纪 40~60 年代得到广泛应用,在一些不发达的国家或地区,现在也还有这样的调速系统在运行,但其肯定要成为被改造的对象。这种调速系统包含与调速直流电动机容量相当的交流电动机和放大机组,因而设备多,占地大,运行费用高,安装需打地基,运行有噪声,维护不方便。因此,研制静止可控直流电源成为一种必然的需求。

1.1.2.2 静止可控整流器

(1) 水银整流器。作为可控直流电源的水银整流器于 20 世纪 50 年代问世。由于水银整流器是静止的,所以它克服了旋转变流机组的许多缺点,但由于水银的泄漏会严重污染环境,危害人身健康,并且造价高、难以维护,因而在 20 世纪 50 年代末期就被另一种静止可控直流电源——晶闸管变流装置所取代。

(2) 晶闸管变流装置。1957 年,晶闸管研制成功,晶闸管的诞生使变流技术产生了根本性的变革。到了 20 世纪 60 年代,成套的晶闸管变流装置(整流器)投入生产。由晶闸管变流装置为直流电动机供电的调速系统称为晶闸管-直流电动机调速系统,简称为 V-M 系统。直到如今,V-M 系统仍然显示出强大的生命力,是直流调速系统的主要形式。图 1-3 为 V-M 系统的原理图。

在图 1-3 中,晶闸管可控整流装置 V 可以是单相、三相或多相整流电路。系统的工作原理是:由转速给定电位器取出转速给定信号(控制信号) U_n^* ,控制触发器输出脉冲的相位,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无级调速。与旋转变流机组相比,晶闸管变流装置有以下优点:

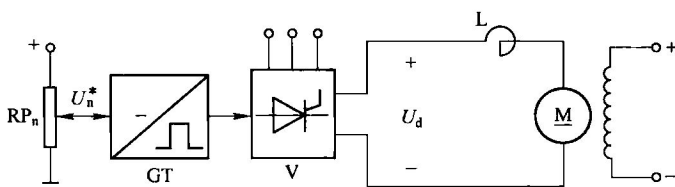


图 1-3 晶闸管-直流电动机调速系统原理图
 RP_n —转速给定电位器；GT—触发电器；V—晶闸管整流器；
 U_n^* —转速给定电压；L—平波电抗器

1) 晶闸管变流装置的功率放大倍数在 10^4 以上，比机组放大倍数高三个数量级，且门极控制所需功率也很小，不需要像直流发电机组那样大的功率放大器。

2) 晶闸管变流装置的响应速度为毫秒级，机组的响应速度为秒级，大大提高了系统的快速性。

3) 晶闸管变流装置的效率高，设备投资及运行费用低。

4) 晶闸管变流装置无噪声，无磨损，体积小，重量轻。

5) 晶闸管变流装置可靠性高，维护方便。

晶闸管变流装置的缺点是：

1) 需要有可靠的保护装置以及符合散热要求的散热条件，如散热片、风冷、水冷等。

2) 晶闸管变流装置中的半导体元件对过电压、过电流以及过高电压变化率 $\frac{du}{dt}$ 与电流变化率 $\frac{di}{dt}$ 都很敏感，任何一项指标超过允许范围都可在很短时间内使元件遭到破坏。因此，选择元件时，电流、电压等参数都要有足够的余量，对过高的 $\frac{du}{dt}$ 与 $\frac{di}{dt}$ 要采取限制措施，以保护晶闸管。

3) 功率因数低，有较大的谐波，尤其是在晶闸管的导通角较小时尤为严重。当晶闸管变流装置的容量在电网中占有较大的比重时，就要考虑增设无功补偿与滤波装置。

1.1.2.3 直流斩波器或脉冲调制变换器

直流斩波器是将恒定的直流电压斩波为有一定宽度的脉冲电压加在负载两端的装置。显然它是接在恒定直流电压与负载之间、用以改变负载直流电压平均值的。若负载为直流电动机，则构成直流斩波器或脉冲调制变换器供电的直流调速系统，如图 1-4 所示。晶闸管斩波器是把晶闸管作为开关，用以接通或关断电路。

在图 1-4 (a) 中，作为开关使用的晶闸管 VT 在电路中总是承受正向恒定直流电压的。当给晶闸管控制极施加脉冲时，晶闸管 VT 导通，相当于开关闭合，恒定直流电源电压施加在负载两端。晶闸管 VT 一旦导通，就不能再采用门极触发信号使其关断，只能采用强迫关断电路，才能使晶闸管承受反向电压而关断。晶闸管关断期间，电路中电感 L 贮存的能量从续流二极管 VD 中释放。

在图 1-4 (b) 中， t_{on} 为晶闸管的导通时间， T 为晶闸管的通断周期。在 t_{on} 时间内，脉冲幅值为恒定直流电源电压，加在负载两端电压的平均值 U_d 低于恒定直流电源电压值。由图 1-4 (b) 可见，输出到负载两端脉冲电压的平均值为

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

式中 ρ ——负载电压系数或占空比, $\rho = \frac{t_{\text{on}}}{T} = t_{\text{on}}f = \frac{U_d}{U_s}$ ($0 \leq \rho \leq 1$)。

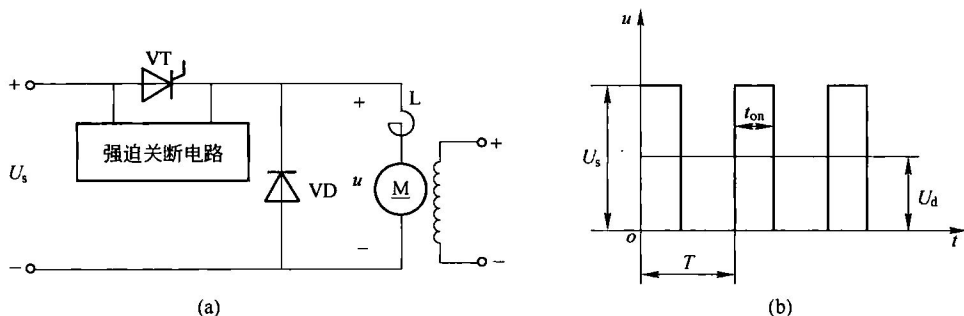


图 1-4 斩波器-电动机系统的原理与电压波形

(a) 原理; (b) 电压波形

由式 (1-1) 可以看出, 改变输出电压 U_d 的大小有两种办法:

(1) 脉冲周期 T 保持不变, 改变晶闸管 VT 的导通时间 t_{on} , 即改变脉冲宽度, 一般称其为脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation, 简称为 PWM);

(2) 晶闸管 VT 导通时间 t_{on} 保持不变, 改变开关频率或开关周期 T , 一般称其为脉冲频率调制 (Pulse Frequency Modulation, 简称为 PFM)。

普通晶闸管的关断时间比较长, 约在 $100\mu\text{s}$ 以上。所以, 由普通晶闸管构成的斩波器开关频率较低 ($100 \sim 200\text{Hz}$), 电路输出的电流脉动较大。采用逆导晶闸管构成的斩波器虽开关频率有所增加, 但仍受到一定限制。20 世纪 70 年代以来, 全控式电力电子器件问世, 如 GTO (门极可关断晶闸管)、MOSFET (电力场效应管)、IGBT (绝缘栅双极晶体管) 等。全控式器件的关断时间短, 由其构成的斩波器, 工作频率可达 $1 \sim 4\text{kHz}$, 甚至达到 20kHz 。采用全控式器件实现关断时, 多采用 PWM 控制方式, 构成 PWM 装置-电动机系统, 简称为 PWM 调速系统或脉宽调速系统。

与 V-M 直流调速系统相比, PWM 调速系统具有如下优越性:

(1) 由于 PWM 开关频率较高, 仅靠电枢电感这样小的电感就可使负载电流的脉动很小, 因此, PWM 调速系统的电枢电流极易连续, 系统低速性能好, 稳态精度高, 调速范围宽; 由于谐波少, 所以电动机损耗小, 发热少。

(2) 系统频带宽, 快速响应性能好, 动态抗扰能力强。

(3) 主电路线路简单, 损耗小, 效率高。

(4) 直流电源可采用不控整流, 电网功率因数高。

受器件容量的限制, 直流 PWM 调速系统只用于中、小功率的系统, 在诸如电力机车等驱动装置中得到广泛应用。

1.1.3 直流调速系统的调速方式及机械特性

以 V-M 系统为例, 对于晶闸管直流调速系统 (见图 1-3), 在电枢电流连续的情况下, 当系统处于稳态运行时, 其主电路电压平衡方程为

$$U_{\text{d0}} = E + I_d R_{\Sigma} \quad (1-2)$$

式中 U_{d0} ——晶闸管变流装置空载输出电压；

E ——电动机反电动势， $E = C_e \Phi n$ ；

I_d ——电动机电枢电流；

R_Σ ——电枢回路总电阻（包括电动机电枢电阻、平波电抗器电阻、整流变压器绕组折合到副边的等效电阻及其漏抗引起的换向压降所对应的等效电阻）；

C_e ——由电动机结构决定的电动势常数；

Φ ——电动机励磁磁通；

n ——电动机转速。

将 $E = C_e \Phi n$ 代入式 (1-2)，经整理可得电动机转速表达式为

$$n = \frac{U_{d0} - I_d R_\Sigma}{C_e \Phi} \quad (1-3)$$

由式 (1-3) 可知，V-M 系统的调速方式有以下三种：

(1) 保持电动机磁场为额定值，改变电动机电枢两端电压，实现电动机在一定转速范围的平滑调速，如图 1-5 所示。

(2) 电动机电枢两端电压保持额定值不变，减弱电动机磁场（即减弱励磁磁通 Φ ），实现在电动机基速（额定转速）以上范围的调速，如图 1-6 所示。

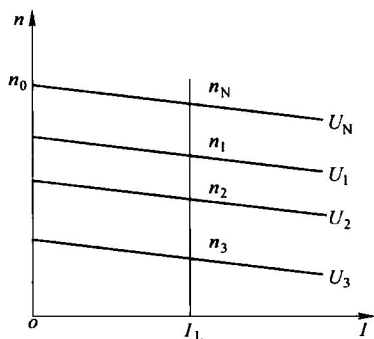


图 1-5 调压调速特性曲线

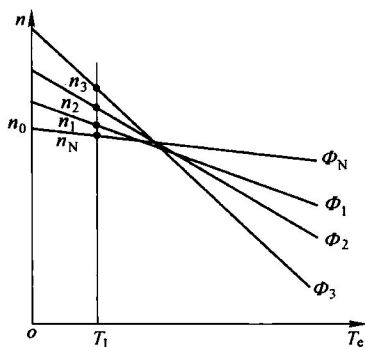


图 1-6 调磁调速特性曲线

(3) 改变电枢回路总电阻 R_Σ ，实现电动机的有级调速，如图 1-7 所示。

在这几种调速方式中，第一种方式最为常见，调速范围也大；第二种调速方式虽然也能平滑调速，但调速范围不大，而且不能单独作为一种调速方式来使用，需要与第一种调速方式配合使用；第三种调速方式由于电阻本身消耗电能，而且只能实现有级调速，所以一般很少使用。

由式 (1-3) 可推导出开环 V-M 系统的机械特性如下：

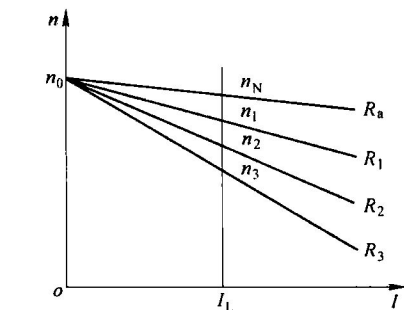


图 1-7 改变电枢回路电阻调速特性曲线

$$n = \frac{U_{d0} - I_d R_\Sigma}{C_e \Phi} = n_0 - \Delta n_{op} \quad (1-4)$$

式中 U_{d0} ——空载整流电压, $U_{d0} = AU_2 \cos \alpha$; 对三相零式整流电路, $A = 1.17$; 对三相全控桥式整流电路, $A = 2.34$;

U_2 ——整流变压器副边相电压有效值;

n_0 ——对应脉冲移相角 α 的理想空载

转速, $n_0 = \frac{U_{d0}}{C_e \Phi} = \frac{AU_2 \cos \alpha}{C_e \Phi}$;

Δn_{op} ——V-M 系统的开环转速降落;

$$\Delta n_{op} = \frac{I_d R_{\Sigma}}{C_e \Phi}。$$

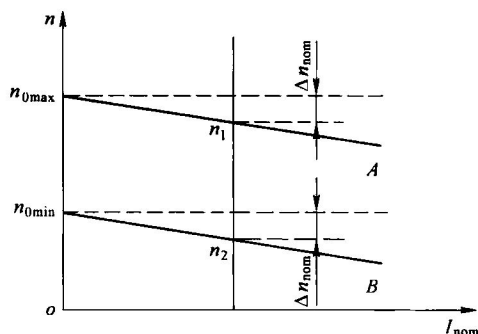


图 1-8 开环 V-M 系统的机械特性

I_{nom} ——电动机额定电流; n_{0max} ——最高理想空载转速;

n_{0min} ——最低理想空载转速

开环 V-M 系统的机械特性如图 1-8 所示。

1.1.4 生产机械对调速系统的控制要求及调速指标

生产机械对调速系统的控制要求, 一般可概括为静态调速指标与动态调速指标。

1.1.4.1 静态调速指标

静态调速指标要求调速系统能在最高转速与最低转速之间调节转速, 并且要求系统能在不同转速下稳定地工作。调速系统的静态指标包括调速范围和静差率。下面结合图 1-8 所示的 V-M 系统机械特性, 分别给出两个调速系统的静态指标。

A 调速范围

在额定负载时, 生产机械要求电动机提供的最高转速 n_{max} 与最低转速 n_{min} 之比称为调速范围, 用字母 D 表示:

$$D = \frac{n_{max}}{n_{min}} \quad (1-5)$$

许多生产机械对调速范围有较高的要求。例如, 在额定负载下, 重型铣床的进给机构快速移动时, 最高转速可达到 600mm/min; 而精加工时, 最低转速却只有 2mm/min, 最高转速是最低转速的 300 倍, 即 V-M 系统的调速范围为 300。

在不弱磁的调速系统中, 电动机的最高转速 n_{max} 就是额定转速 n_{nom} 。

B 静差率

当调速系统在某一转速下稳定运行时, 负载由零增加到额定值所产生的静态转速降落 Δn_{nom} 与对应的理想空载转速之比称为静差率, 用 S 表示:

$$S = \frac{\Delta n_{nom}}{n_0} \quad (1-6)$$

也可用百分数表示为

$$S = \frac{\Delta n_{nom}}{n_0} \times 100\% \quad (1-7)$$

静差率是用来衡量调速系统静态精度的一个性能指标。由式 (1-6) 或图 1-8 可以看出, 在同一理想空载转速下, 调速系统的静差率越小, 则表明该系统静态速降 Δn_{nom} 越小, 即系统的机械特性越硬, 也就是说该系统具有越高的静态精度。同时, 我们也清楚地

看到, 对同一调速系统, 对应不同的理想空载转速会得到大小不同的静差率, 因此, 按照式(1-6)定义的静差率 S 所表达的系统静态精度是相对(理想空载转速)静态精度, 不能简单地凭其大小来断定一个调速系统静态精度的优劣。显然, 理想空载转速 n_0 越大, 则对应的静差率 S 越小, 最小的理想空载转速 $n_{0\min}$ 将对应最大的静差率。综上不难得出结论: 如果一个调速系统最大的静差率($n_{0\min}$ 所对应的 S)能满足设计对静态精度的要求, 则该系统的静态精度就一定能满足设计要求。因此, 设计系统时要求的静差率指的是最大静差率, 即最小的理想空载转速 $n_{0\min}$ 所对应的静差率:

$$S = \frac{\Delta n_{\text{nom}}}{n_{0\min}} \quad (1-8)$$

应该说明的是, 调速范围 D 和静差率 S 是两个相互关联的技术指标, 单用其中一个指标是不能完全反映系统静态性能的。下面对调速范围与静差率之间的关系进行推导和分析。

根据调速范围 D 和静差率 S 的定义, 可进行如下推导:

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{n_{\text{nom}}}{n_{0\min} - \Delta n_{\text{nom}}} = \frac{n_{\text{nom}}}{n_{0\min} \left(1 - \frac{\Delta n_{\text{nom}}}{n_{0\min}}\right)} = \frac{S n_{\text{nom}}}{\Delta n_{\text{nom}} (1 - S)} \quad (1-9)$$

由式(1-9)可清楚地看出调速系统的两个静态性能指标之间的内在联系。当希望静差率 S 小时, 系统允许的调速范围 D 也变小; 若要增大调速范围 D , 则静差率 S 也随之变大。在一定的静差率 S 下, 只有设法减小静态速降 Δn_{nom} , 调速范围 D 才能扩大。但是在负载一定时(如额定负载), 转速降落是由电枢回路总电阻 R_{Σ} 决定的, 即 $\Delta n_{\text{nom}} = \frac{R_{\Sigma} I_{\text{nom}}}{C_e \Phi}$, 而系统一旦组成后 R_{Σ} 是无法减小的, 这就决定了开环系统的静差率较大, 而能够达到的调速范围很小, 从而使开环系统的实际应用受到了限制。

例如, 某开环 V-M 系统, 直流电动机额定转速 $n_{\text{nom}} = 1450 \text{ r/min}$, 额定负载时的静态速降 $\Delta n_{\text{nom}} = 115 \text{ r/min}$ 。若工艺要求的静差率 $S = 0.2$, 则调速范围 $D = \frac{1450 \times 0.2}{115 \times (1 - 0.2)} = 3.15$; 若要求 $S = 0.1$, 则 $D = 1.4$ 。

由此可见, 调速系统的相对稳态精度越高, 即要求的 S 值越小, 则系统的开环调速范围也越小。这种矛盾的解决方法只能是减小 Δn_{nom} , 使机械特性变硬, 直至与横轴平行($\Delta n_{\text{nom}} = 0$)。当然, 这是开环系统办不到的。只有按反馈控制原理构成转速闭环系统, 才是减小或消除静态速降的有效途径。

1.1.4.2 动态调速指标

动态调速指标要求系统启动、制动快而平稳, 即当电动机在某一转速下稳定运行时, 若受负载变化、交流电源电压波动等外界因素的影响, 转速波动应尽量小。调速系统的动态指标请参见第 2.2.2 节。

1.2 交流调速概述

1.2.1 交流电动机调速的基本类型

交流电动机的同步转速表达式为

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} \quad (1-10)$$

根据异步电动机转差率的定义

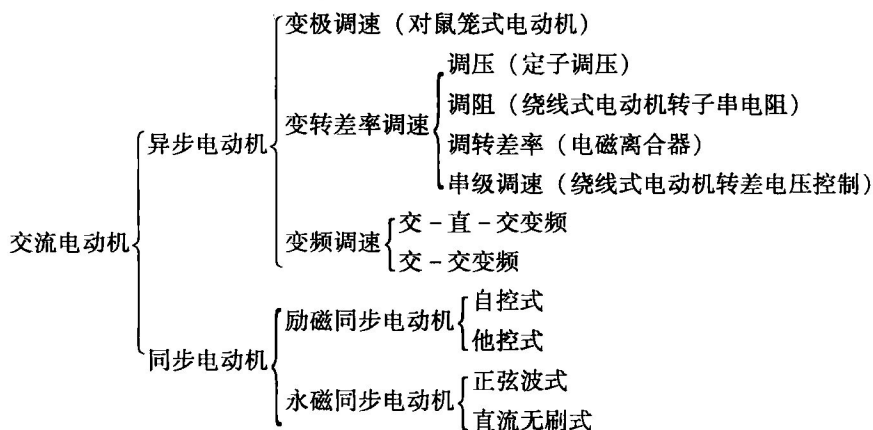
$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = 1 - \frac{n}{n_1} \quad (1-11)$$

可知异步电动机的转速为

$$n = n_1(1-s) = \frac{60f_1}{p}(1-s) \quad (1-12)$$

异步电动机的调速方法可以有变极对数、变转差率及变频三种。其中变转差率的方法又可以通过调定子电压、转子电阻、转差电压以及定、转供电频率差等方法来实现。

同步电动机的调速可以用改变供电频率，从而改变同步转速的方法来实现。这样，交流电动机就有很多不同的调速方法，如下所示：



在上述各种调速方法中，异步电动机的变频调速及同步电动机的变频调速很受人们重视，并且已在工业中获得了广泛应用。

靠改变转差率对异步电动机进行调速时，由于低速时转差率大，转差损耗也大，所以效率低。在串级调速中通过“能量回馈”的办法将这部分功率加以利用，可以提高效率。

变频调速方法与变转差率调速方法有本质的不同。变频调速时，从高速到低速都可以保持转差率基本不变，因而变频调速具有高效率、宽范围和高精度的调速性能。可以认为变频调速是交流电动机的一种比较合理和理想的调速方法。

为了使交流电动机供电频率可变，需要一套变频电源。早期的变频电源是采用一整套旋转变频机组来改变电源频率，这套设备不但投资大、效率低，而且可靠性也差。现在的变频电源是采用可关断功率器件和应用先进计算机的频率可连续调节的变频器。随着电力电子技术、微型计算机和控制理论的发展，变频器也得到了快速发展，其在系统效率、可靠性、控制精度和调速范围等方面不断提高。从小到几毫瓦的仪表执行器、几千瓦的电机调速器，大到几百兆瓦的轧钢机、大型轮船驱动和铁路机车牵引等，变频器的应用领域不断扩大。目前变频调速是交流电动机调速的主要发展方向。

变频器可以分为交-直-交变频器与交-交变频器两大类。前者又称为间接式变频器，后者又称为直接式变频器。每一类又可以根据不同分类方法加以区分，如下所示：