

高等学校规划教材

自动控制系统

杨仲平 郑均忠 程 斌 刘丛立 编

煤炭工业出版社

高等学校规划教材

自动控制系统

杨仲平 郑均忠 程 斌 刘丛立 编

煤炭工业出版社

(京)新登字042号

内 容 提 要

本书是工业电气自动化专业的教材。主要讲授交、直流电气传动系统的基本控制规律和工程设计方法。

全书共分九章,介绍了直流调速系统的组成、闭环调节的静、动特性及其工程设计方法;交流调速的各种类型包括:调压、变频、串级调速以及无换向器电机控制系统等。最后,还介绍了矢量变换控制的基本原理及设计线路,它是目前大型交流电机的一种理想变频控制方式。

本书可作为工业电气自动化专业本科生教材,也可供从事传动控制科研和生产的科技人员参考。

高等学校规划教材

自动控制系统

杨仲平 郑均忠 程 斌 刘丛立 编

责任编辑:胡玉雁 高 专

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街21号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

开本787×1092mm¹/₁₆ 印张 21

字数 499千字 印数 1—4,215

1993年10月第1版 1993年10月第1次印刷

ISBN 7-5020-0800-4/TD·739

书号 3568 A0228 定价 9.60元

前 言

自动控制系统是一门与生产紧密相关的专业课程，它为机械设备选择配套电气传动系统及其自动控制装置，并提供符合负载特性要求的合理调速方案。当前电气传动控制领域面临一场重大的变革，即交流电机调速技术迅猛发展，在许多方面正向传统的直流电机调速技术领域扩展；同时，微机控制技术也已成功地运用于传动调速，以微机为核心并具有控制、检测及监视的多功能电气传动系统正在形成和不断发展中。

为适应电气传动控制技术的这种新发展动向，本书根据煤炭电气自动化教材编委会制定的教学大纲，对内容取舍及讲授重点作了新的安排，主要有以下几点：（1）在选材上采取交、直流系统并重的原则。从认识规律和科学体系上看，直流系统是全书的理论基础，其有关闭环结构的组成、工程设计的思路和方法，同样也适用于交流系统。因此，这一部分篇幅必须保证。（2）交流系统涉及到调压、变频、串级调速及矢量变换控制等多种方法，在书中均以讲授基本原理为主，较少联系专门的技术问题。（3）从当前发展趋势看，工矿企业要求实现电气传动综合自动化，现代控制理论和微机技术等都是实现先进交-直流调速控制所不可或缺的工具，而这些需要由专门课程去解决，限于篇幅，本书中将不予讨论。

本课程的先修课程有：《电机与拖动基础》、《交流技术》、《自动控制原理》等，相关课程有：《现代控制理论》、《计算机控制技术》、《计算机仿真》等。

本书由杨仲平同志主编，第一、二章由郑均忠同志编写，第三、四章由程斌同志编写，第六章及附录由刘丛立同志编写，绪论、第五、七、八、九章由杨仲平同志编写。在编写过程中，参阅了兄弟院校同志的许多著作和论文，西安矿业学院魏泽国教授为我们提供了资料和帮助，在此一并致谢。

编 者

1992. 8

常用符号表

一、元件和装置的文字符号

AAR	角度调节器	KMF	正向接触器
ACR	电流调节器	KR	反向继电器
ADR	电流变化率调节器	KMR	反向接触器
AER	电势调节器	L	电抗器、电感
AFR	励磁电流调节器	M	电动机 (总称)
AP	脉冲放大器	N	运算放大器
AR	反号器	R	电阻器、电阻
ASR	转速调节器	RP	电位器
ATR	转矩调节器	T	变压器
AVR	电压调节器	TA	电流互感器
A ψ R	磁链调节器	TG	测速发电机
DLC	逻辑控制器	TI	逆变变压器
DLD	逻辑延时环节	TM	整流变压器
DPI	极性鉴别器	TV	电压互感器
DPZ	零电流检测器	TVD	直流电压隔离变换器
DRC	环形分配器	UI	逆变器
GAB	绝对值变换器	UR	整流器
GF	函数发生器	VCO	压控振荡器
GI	给定积分器	VD	二极管
GT	触发装置	VF	正组晶闸管整流装置
GTF	正组触发装置	VR	反组晶闸管整流装置
GTR	反组触发装置	V _w	稳压二极管
GVF	压频变换器	VT	晶体管、晶闸管
K	继电器、接触器	VTH	晶闸管
KF	正向继电器	VTR	晶体管

二、参数和物理量文字符号

B	磁通密度	i_t	励磁电流
C	电容	J	转动惯量
C_e	电机电势常数	K	控制系统各环节放大系数
C_m	电机转矩常数	K_e	直流电动机电势结构常数
D	调速范围	K_m	直流电动机转矩结构常数
E, e	反电势、感应电势	K_s	晶闸管触发整流装置放大系数
E_{TG}	测速发电机电势	K_N	绕组系数
f_1	定子频率	L_d	平波电抗器电感
f_2	转差频率	L_1	电机绕组漏感
GD^2	飞轮惯量	L_m	互感, 励磁电感
I_d	整流电流、直流电流	M	闭环系统频率特性幅值、调制度

M_r	闭环系统幅频特性峰值	U_t	励磁电压
m	整流电压一周内波头数、相数	U_x^*	变量 x 的给定电压
N	匝数, 扰动量	U_x	变量 x 的反馈电压
n	转速	U_{in}	输入电压
n_0	理想空载转速	U_{ex}	输出电压
n	同步转速	$W(s)$	传递函数、开环传递函数
p	极对数、微分算子 $\frac{d}{dt}$	$W_{cl}(s)$	闭环传递函数
P	功率	x	电抗
P_m	电磁功率	Z	阻抗
P_s	转差功率	α	转速反馈系数、控制角
Q	无功功率	β	电流反馈系数、逆变角
r_L	平波电抗器电阻 (串调系统)	γ	电压反馈系数、换流超前角
R_a	直流电机电枢电阻	Δn	转速降落
R_d	平波电抗器电阻	ξ	阻尼比
R_r	整流装置内阻	η	效率
s	转差率、Laplace变量	θ	导通角
S	静差率、视在功率	λ	电机允许过载倍数
T	时间常数、周期、电磁转矩	μ	换流重叠角
T_b	感应电机颠覆转矩	ρ	占空比、电位器分压系数
T_L	负载转矩	σ	漏磁系数
T_l	电磁时间常数	$\sigma\%$	超调量
T_m	机电时间常数	τ	调节器时间常数
T_s	滤波时间常数	Φ	磁通
t_{on}	合闸时间	Φ_e	额定磁通
t_{off}	关断时间	Ψ	磁链
T_s	晶闸管装置平均失控时间	Ω	机械角转速
t_s	调节时间	ω	电气角转速、角频率
T_{st}	起动转矩	ω_b	闭环特性通频带
U_{ct}	控制电压	ω_c	开环特性截止频率
U_d	整流电压	ω_1	定子角频率
U_{d0}	理想空载整流电压	ω_2	转差角频率

目 录

前言

常用符号表

绪论	1
第一节 国内外交直流调速系统发展概况	1
第二节 电力拖动系统设计的任务和要求	2
第三节 电动机调速的分类和指标	5
第四节 本书的结构和讲授重点	7
第一章 直流单闭环调速系统	9
第一节 晶闸管供电电动机调速系统的特点	9
第二节 单闭环有静差直流调速系统	15
第三节 无静差调速系统	34
第四节 调速系统中的检测环节	45
习题	50
第二章 直流多环调速系统	52
第一节 快速系统与最佳过渡过程的基本概念	52
第二节 转速、电流双闭环调速系统	55
第三节 三环调速系统	64
第四节 直流电动机的双域控制系统	69
习题	73
第三章 直流可逆调速系统	74
第一节 晶闸管-电动机系统的可逆线路和工作状态	74
第二节 可逆系统中的环流及其控制方法	80
第三节 电枢可逆有环流调速系统	84
第四节 逻辑无环流磁场可逆调速系统	91
习题	105
第四章 直流调速系统的工程设计	107
第一节 控制系统的动态性能指标	107
第二节 典型Ⅰ型系统	109
第三节 典型Ⅱ型系统	116
第四节 调速系统的动态校正及模型的近似处理	128
第五节 双闭环调速系统的工程设计	143
习题	163
第五章 交流调压及转差能耗调速系统	164
第一节 调压调速系统的特性及组成	164
第二节 交流相控及斩波调压电路	168
第三节 绕线型感应电动机转子斩波器调速	177
习题	181

第六章 感应电动机变频调速系统	182
第一节 变频调速系统的构成和基本控制原则	182
第二节 静止式变频装置简介	184
第三节 感应电动机的电压、频率协调控制及其机械特性	194
第四节 转速开环变频调速系统	206
第五节 转速闭环、转差频率控制的变频调速系统	213
第六节 其他转速闭环变频调速系统	221
第七节 变频调速系统的动态设计	224
习题	234
第七章 线绕式感应电动机串级调速系统	235
第一节 串级调速的基本原理和运行方式	235
第二节 低同步串调系统的机械特性	237
第三节 串调系统的能量指标	244
第四节 串调控制系统的主回路	246
第五节 串调系统的起动方式	248
第六节 闭环串调系统的动态结构	249
第七节 串调系统的工程设计实例	251
习题	259
第八章 无换向器电动机调速控制系统	260
第一节 无换向器电动机调速系统的组成和原理	260
第二节 无换向器电动机的换流问题	263
第三节 无换向器电动机波形图及交直流电压电流间关系	266
第四节 调速系统的机械特性和运行方式	269
第五节 位置检测器的结构及其调试	274
第六节 系统的结构及其动态设计	275
第七节 交-直-交型无换向器电动机调速系统	279
第八节 交-交型无换向器电动机调速系统	282
习题	285
第九章 矢量变换控制的变频调速系统	286
第一节 矢量控制的基本原理	286
第二节 矢量控制中的坐标变换	288
第三节 感应电动机的数学模型	297
第四节 转子磁链 ψ_r 的观测模型	304
第五节 感应电动机矢量控制变频调速系统	308
第六节 感应电动机矢量控制系统的动态设计	311
第七节 无换向器电动机的矢量变换控制	316
习题	318
附录 静止式变频装置工作原理	320

绪 论

第一节 国内外交直流调速系统发展概况

按照拖动电动机的类型划分,自动调速系统包括直流调速系统和交流调速系统两大类。直流电动机具有良好的机械特性,能够在较大范围内平滑调速,起动、制动性能良好,故在70年代以前一直在高精度、大调速范围的传动领域内占据主导地位。但是,直流电动机的主要弱点是换向,而机械式换向器的表面线速度及换向电流、电压均有一极限容许值,这就使单台电机的转速和功率受到约束,超过这一极限时只好采用多电机拖动方案,从而增加了电机制造的难度和成本,并使调速系统复杂化。在有些特高转速、特大功率的场合,则根本无法用直流拖动方案来实现。另外,换向器必须定期停机检修,运行中还要经常观察其火花情况,因此在恶劣环境下,难以保证其安全可靠。

近年来,以电力半导体器件为核心,配合变流技术、控制技术、计算机技术等,开创了电力电子技术蓬勃发展的新时代。80年代起,在电气传动自动化领域中,出现了一个革命性的变化,这就是交流电机调速技术取得了突破性的进展。众所周知,交流感应电动机结构简单,价格便宜,制造维修容易,由于它结合了新兴的电力电子技术,使得交流调速进入了电气传动控制的各个领域,从数百瓦的伺服系统,到数万千瓦的特大功率高速传动;从一般性要求的小范围调速,到高精度快速响应、大范围调速的系统;从单机到多机协调运转,几乎达到全面覆盖的程度。在美、日及西欧等国家形成了一个交流电机调速系统排挤传统直流电机调速系统占领市场的新局面。据日本统计,在1975年的销售额中,交-直流电机调速系统之比为1:3,而到1985年已变成3:1,可见其增降速度之快。

促成交流电机调速技术的飞跃发展并不是偶然的。这是由于在70年代以后,现代控制理论、新型大功率电力电子器件、新型变频技术以及微型计算机数字控制技术等,均在实际应用中取得了很大的进展,这就为交流调速技术的发展创造了坚实的物质基础。

1. 现代控制理论的应用促成了矢量控制技术的诞生,为交流电机调速技术奠定了理论基础。

交流电机为一多变量、非线性、强耦合的被控对象,采用参数重构和状态重构等现代控制概念,可实现将定子电流中励磁分量和转矩分量的解耦,从而使交流电机能像直流电机那样,对励磁分量及转矩分量进行独立控制。这就为高性能交流电机调速技术奠定了理论基础。围绕着矢量控制的完善化,还开发了许多具体方案。例如增加前馈补偿器的解耦方案,利用变结构控制解决非线性问题,构造负载转矩观测器反馈系统抑制轴振动等等。

2. 全控型大功率快速电力电子器件的出现,为变频调速提供了物质保证。

70年代中期以前,交-直-交变频装置的核心部件逆变器是由晶闸管实现的。但因晶闸管关断的不可控性,必须配备一套有效的强迫换流装置才能实现可靠的逆变,而复杂的换流装置使变频调速系统的整体效率、可靠性、成本等均无法与同容量直流调速系统相比。80年代生产出了高效全控型器件,实现了电力电子装置的小型轻量化(可关断晶闸管斩波

器体积比普通晶闸管斩波器减小70%，其调速装置体积减小50%~60%，高效率（提高5%~10%），低成本（降低约35%），良好的控制性能（实现了接近正弦波的脉宽调制等），从而提高了电力电子技术的节能指标（节约电能20%~40%，节省投资25%）。

3. 微型计算机在性能、速度、价格、体积等方面的优势，为交流调速理论的实现提供了重要保证。

以微型计算机作为控制系统的核心部件实现在线控制，已成为目前工业生产过程及调速控制的发展趋势。它能适时采集各种参数，经过比较分析及判断，提供必要的指令，指挥系统中各环节及时动作，使复杂的控制思想成为现实。现代高速计算机已不仅能记录和超限报警，并具有自检、自诊断，甚至自校正和自排除故障等功能。目前，16位、32位微机已进入实际应用阶段，形成了一系列标准控制单元，以及标准模块化结构，便于工程设计人员选用。

第二节 电力拖动系统设计的任务和要求

一、对电力拖动控制系统设计的技术要求

电力拖动自动控制系统设计属于机电系统总设计任务中的一个组成部分，应该在分析工艺过程的基础上确定对它们的要求。设计的原始资料应该包括：机械负载的性质、设备的调速范围、设备对电力拖动静特性和动特性的要求；供电电源参数，如电压、频率及其可能的波动范围；设备的工作环境，如温度、湿度、烟尘含量等。

设计完善的电力拖动自动控制系统，应能实现如下要求：

- 1) 参数最优化 在系统给定的结构和输入条件下，要求确定出系统能最好地满足预期品质指标的参数值；
- 2) 结构最优化 在性能指标已定的情况下，寻求一种工程可实现的、系统元器件数目最少的技术方案；
- 3) 功能最优化 确定实现目标的最有效控制规律，并按此规律确定系统的结构和参数。

由于实际任务的综合性质，设计者往往要同时考虑和解决以上三方面的课题。

二、电力拖动系统的分类

在第一节中我们按照拖动电动机的类型，将拖动系统划分为直流调速系统和交流调速系统两大类。实际上，按照其组成结构和自动化程度，还可分为以下三种类型：第一种是开环电力拖动系统，用于性能指标要求不高的专用设备上；第二种是闭环电力拖动系统，它具有自动控制和闭环调节的功能，广泛应用于各种工作机械；第三种是综合自动化电力拖动系统，它由多个自动控制系统和中央控制装置联合组成，应用于生产过程控制和全盘自动化等场合。现简述以上三种系统的主要组成和作用。

1. 开环电力拖动系统

开环电力拖动系统的示意图如图0-1所示。它的核心部件为电动机，其输入端经功率开关和控制元件由电网供电，输出端经传递机构与工作机械联接。系统中设置保护元件或传感器，当出现故障超限时使保护装置动作，令电动机跳闸停机。

这类系统主要用于对起、制动和调速无特殊要求、以及不要求精确调速的场合，如破碎机、输送机、电葫芦、泵类等。系统中开关和控制装置通常用人工手动操作，图中控制

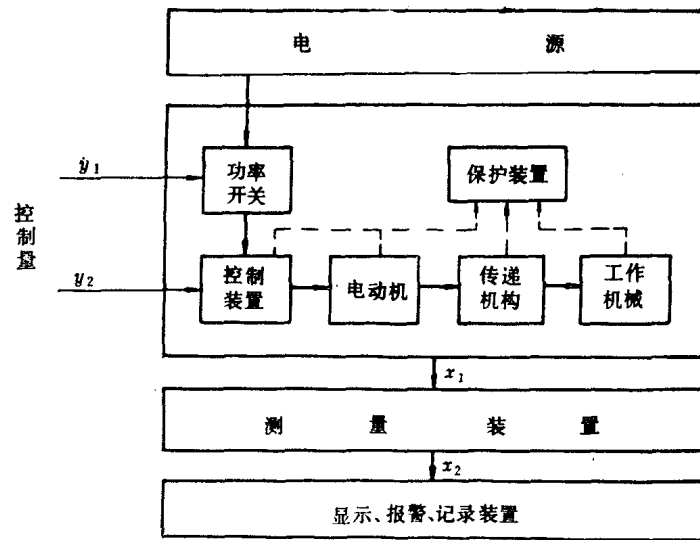


图 0-1 开环电力拖动系统的组成

量 y_1 , y_2 由人工设定, 根据现场要求, 系统中可设显示、报警和记录装置。

2. 闭环电力拖动系统

这一系统示意图如图0-2所示。由图可见, 它和前一系统的区别是增设了控制及调节装置, 它利用实测的参数作为反馈信息量, 与原先设定的指令 w 进行比较, 以完成闭环调节作用。调节单元中可装入预先规定的控制或调节算法, 调节单元的输出 y 就成为作用于电动机的实际指令, 以满足动态性能指标。输入指令 w 可以手动设定, 或由上一级自动装置给出。

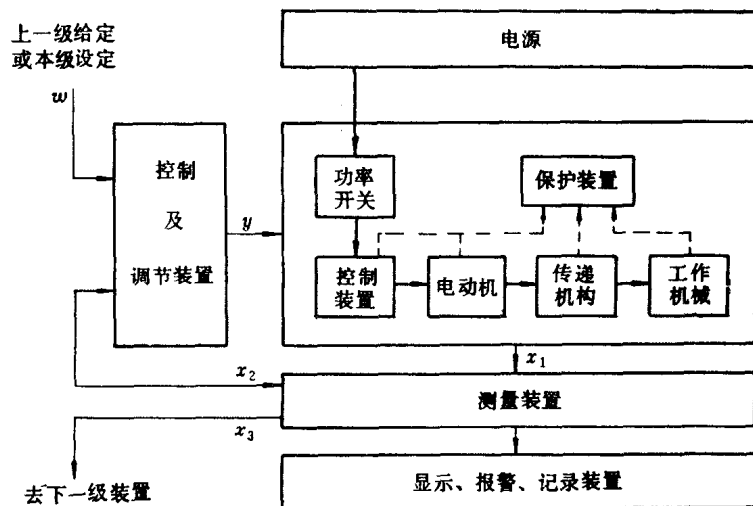


图 0-2 闭环电力拖动系统的组成

3. 综合自动化电力拖动系统

综合系统由一组闭环系统和信息处理单元联合组成。它通常按照等级排列, 上一级的

输出量即为下一级的输入量，其示意图如图0-3所示。在综合系统中共有三级，最末一级为执行级，即为图0-2所示独立的闭环系统。中间级称为功能级，最高为中央级。中央级一般设置计算机进行集中控制和管理，它向功能级的自动装置提出生产过程的工艺要求，功能级自动装置则负责向执行级下达给定值或运算指令。中央级控制装置本身由操作人员控制。

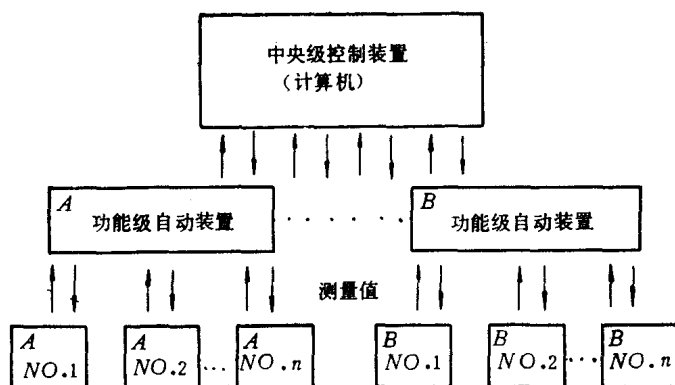


图 0-3 综合自动化电力拖动系统

这种系统的优点是发生事故时可局限在整个系统的小范围内，而不对同一层次其他级发生影响，维护修理方便，常用于计算机控制的工业自动生产线及过程控制中。

三、自动控制系统设计的一般过程

按照国内设计单位的程序，工程设计一般包括三个阶段，即初步设计、技术设计和施工图设计。

1) 初步设计 称为方案设计，它是在分析国内外同类系统拖动控制的构造特征和发展趋势的基础上，选定最佳的方案。初步设计一般包括：拖动方式选择、电动机容量计算、主回路组成方式、各种方案的技术经济分析及比较等。在初步设计中要重点列出选定该方案的依据。

2) 技术设计 在已选定初步设计的基础上，进行详细的理论计算，得出具体的控制系统中的各项调节参数。对于电气调速系统，应包括控制系统的电气原理图和对系统的计算说明书。电气原理图又分为主回路（电力回路）、控制保护回路、以及辅助回路（照明、仪表接线）等。完整的计算说明书除对主回路各元件应进行计算选型外，还包括调节系统各环节的计算和整定。最后应列出整个设计的技术经济概算、电气设备和元件清单、计算书所引用的文献索引等。

3) 施工图设计 指按照技术设计提供的资料绘制施工装配图纸，其中包括：电气设备布置及安装图、电气系统安装接线图、输出输入电缆安装接线图等。在图纸上均应注明电器及电缆的规格及尺寸、安装起止点及接线端子标号等。施工图设计中应列出系统全套电气设备汇总器材表，包括标准插件和备用器材一览表。

所有图纸及计算书完成后，还应编制控制系统原理说明书、电气设备使用说明书、安装及操作说明书、电气设备及元件试验指导书等。

第三节 电动机调速的分类和指标

一、调速的分类

按照调速过程是否连续（平滑性），可分为有级和无级调速；按调速高低方向，可分为基速以下和以上调速；按调速时的容许负载可分为恒转矩和恒功率调速。以上这些都是调速中的重要概念，兹分述如下：

1. 有级和无级调速

所谓有级调速是指系统包括几个有限的速度级，例如多速鼠笼电动机，利用变换极对数的方法，即可达到此目的。这种调速方法操作简便，适用于调速范围不宽及要求不高的场合，如车床及家用电器（唱机、风扇）等。

另外，交流线绕电动机转子串电阻、直流电动机电枢回路串电阻调速等，也属于有级调速范围。

无级调速又称为连续调速，是指电动机转速可以平滑连续地调节，它适应性强并易于实现调速自动化，在工业生产中被广泛采用。本书中将介绍的晶闸管变流器供电的直流电动机调速，以及感应电动机变频调速等，均属此类。

2. 基速以下和以上的调速

电动机的额定转速称为基本转速，简称基速。在大多数情况下，工业生产设备均要求进行基速以下调速，只有少数机械由于工况的需要（例如发电反馈），实际转速超过基速运转。但由于最高转速的极限受机械强度和换向条件的限制，调速上限通常不得超过基速的1~2倍。

3. 恒转矩和恒功率调速

这两种调速方式是由于负载性质不同所决定的。图0-4a表示恒转矩负载及其与拖动电动机的配合情况。无论转速为何值，负载 T_L 为一常数不变。电动机与工作机械的特性交点1，2，3代表拖动系统的稳态工作点。为充分利用电机的容量，设计时通常取额定转矩 $T_e = T_L$ ， T_e 所对应的电动机额定电流亦不变，这种调速方式称为恒转矩调速。注意在调速过程中应使 $T \propto I$ 。例如，晶闸管变流器-直流电动机调压调速系统、交流鼠笼电动机变频调速都可做到这一点。

图0-4b表示双曲线型的机械负载 T_L ，它遵循功率 $P = kT_L n = \text{const}$ 的规律，这时如仍

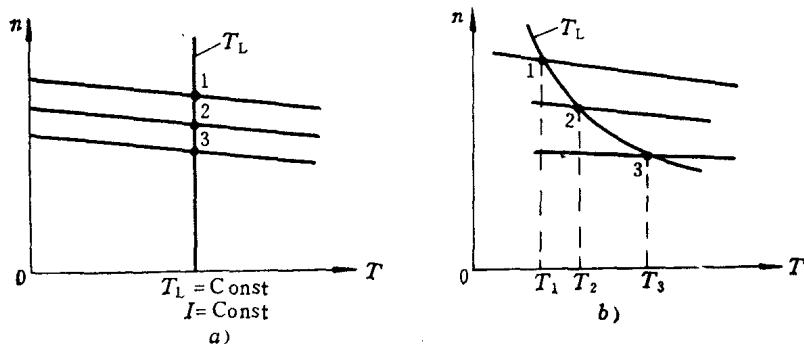


图 0-4 恒转矩和恒功率调速

用恒转矩方式拖动 ($T \propto I$)，则将使低速时电机过载，高速时轻载，电机利用不合理。由上可见，对于这种负载，调速时，要保持 $I_a = \text{const}$ ，必须令 $P \propto I$ 。第二章将介绍的直流电机双域控制调速，基速以上的弱磁升速过程即属于此种方法。由于 $T = C_m \Phi I$ ，为使 $I = I_a$ 不变， T 将随 Φ 调低而减小，但因反电势 $E = C_e \Phi n$ 近似为常数，故调 Φ 后转速 n 增加，最终保持 $P = k T n$ 近似不变，故称为恒功率调速。

综上所述，恒功率负载应尽量采用恒功率调速方法，恒转矩负载应尽量采用恒转矩调速方法，这样才能使电机容量得到充分利用。

二、调速性能指标

调速指标包括静态和动态两种。这里只叙述静态指标，动态指标将在第四章中讲授。

静态指标主要包括调速范围和静差率两项，前者是生产机械的要求，后者是对拖动电动机特性提出的配合条件。

1. 调速范围

生产机械要求提供的最高转速 $n_{\max}$ 和最低转速 $n_{\min}$ 之比定义为调速范围 D ，即

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} \quad (0-1)$$

式中 $n_{\max}$ 、 $n_{\min}$ ——指额定负载下的转速。

不同类型工作机械所要求的调速范围不同，一般车床调速范围约在几到几十，而程序控制和随动系统可达几百至几千。

2. 静差率

设电动机的理想空载转速为 n_0 ，在额定转矩下转速为 n ，转速降落为 Δn ，定义 Δn 与空载转速 n_0 之比为静差率 S ，即转速变化相对值

$$S = \frac{\Delta n}{n_0} \% \quad (0-2)$$

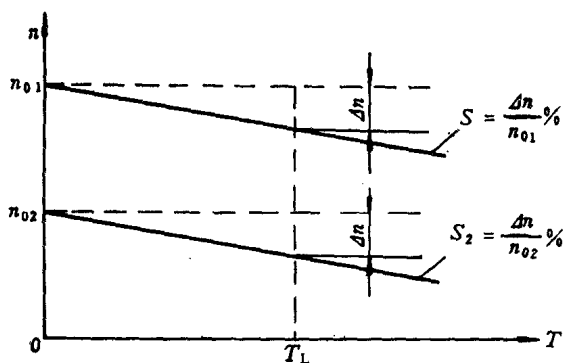


图 0-5 不同特性时的静差率

从物理概念上说，静差率表示调速系统的相对稳定性。如果电动机机械特性很软，转速降落大，则静差率大，表示系统对转矩变化太敏感，即转速的稳定性差。

注意静差率 S 这一指标在转速不同时并非常数。设有一组直流电动机调压时机械特性曲线如图 0-5 所示，在负载转矩 T_L 恒定时其转速降落 Δn 均相同，但是，外供电压和理论空载转矩成比例变化，因而高速特性的静差率 S_1 小，低速特性的静差率 S_2 大。在工程设计时应以最低速特性所对应的静差率

为依据，因为此时为最困难的工作条件。

生产机械有时从不同角度提出对调速系统的要求，因此有必要推导出调速范围 D 、静差率 S 以及转速降落 Δn 间的关系。由于电动机正常运行时不应超过其铭牌规定的额定转速

n_0 ，故设计中一般取 $n_{max} = n_0$ ，故得

$$n_{min} = n_{0min} - \Delta n_0 = \frac{\Delta n_0}{S} - \Delta n_0 = \Delta n_0 \left(\frac{1}{S} - 1 \right)$$

代入式 (0-1)，得

$$D = \frac{n_{max}}{n_{min}} = \frac{n_0}{n_{min}} = \frac{n_0 S}{\Delta n_0 (1 - S)} \quad (0-3)$$

上式表明，当要求特性曲线有一定硬度 (Δn_0 固定) 时，对静差率 S 要求越高，允许的调速范围 D 越小。例如晶闸管变流器直流调压系统中电动机额定转速 $n_0 = 1430 \text{ r/min}$ ，额定静态速降 $\Delta n_0 = 115 \text{ r/min}$ ，如果要求 S 不大于 30%，允许调速范围 $D_1 = 5.3$ ，如果要求 S 不大于 20% 时，则允许调速范围下降为 $D_2 = 3.1$ 。几种典型生产机械的调速指标如表 0-1 所示。

表 0-1 常用机械的调速指标

生 产 机 械	调 速 范 围	静 差 率
热连轧机	3~10	0.01~0.005
冷连轧机	>15	<0.02
机床主传动	2~4	0.05~0.1
造纸机	3~20	0.01~0.001
龙门刨床、矿井提升机	20~40	≤0.05

第四节 本书的结构和讲授重点

本书包括两大组成部分：即直流调速系统(第一至第四章)和交流调速系统(第五至第九章)。

直流调速系统的内容包括：晶闸管自动调速系统的基本概念，可逆及双域控制系统的特点、系统的动态特性分析和工程实用设计方法等。这一部分内容是在学习自动控制原理课程基础上进行的，特别是设计部分，它以频域分析法为核心，结合工程上常常遇到的控制对象的数学模型，给出了十分简捷的设计公式，便于工程技术人员采用，这是应该重点讲授和掌握的。针对直流调速系统的工程设计方法还能推广应用于某些交流系统。从这个意义上说，它也是全书的一个设计基础。

交流调速系统的内容包括：鼠笼型感应电动机的调压和变频调速、线绕电动机的串级调速、无换向器电动机(自控频率式同步电动机)的调速系统等。这一部分的重点是近年来发展迅速且影响广泛的变频调速系统，内容包括变频系统的组成及控制原理等。由于感应电机为一多变量的非线性数学模型，使得常规控制方案很难达到预期的性能指标要求，这一部分提供了控制的思路和实施方案。鉴于目前交流技术教科书中讲授的变频器有时未能全部满足本书系统的要求，特在文内简述了常用的电压型交-直-交变频器的基本原理，并在附录中列出其他三种常用变频器(电流型交-直-交变频器、交-交变频器和脉宽调制型变频器)的结构和原理，供读者选学之用。交流系统中最后介绍了矢量控制的内容，目前这方面的研究渐臻成熟，国外已有定型产品，供大型设备配套选用，在国内引进的矿井提升机、轧钢机中均有配套装置。矢量控制方法适用于各种类型的感应电动机和同步机。如果

学时有限，则此章也可作为选学内容。

为使读者掌握工程设计的思想，全书配置了3个篇幅较大的例题，分别为直流双闭环调速系统、交流鼠笼型电动机变频调速系统和交流线绕电动机串级调速系统的设计，希望通过这些实例，了解工程设计所包括的范围和运算过程。当然，限于篇幅，其中忽略了一些细节，在讲授中也可作为自学内容处理。

第一章 直流单闭环调速系统

本章首先介绍晶闸管供电的电动机调速系统的特点，然后讨论单闭环调速系统的组成、基本性质、静动态特性方程、结构图及其分析方法。研究闭环调速系统的反馈控制规律，并对无静差调速系统的积分控制规律进行了较详细的论述。最后对调速系统中的检测环节作了介绍。

第一节 晶闸管供电电动机调速系统的特点

一、晶闸管整流电路特点

(1) 从半导体变流技术课程已知，晶闸管元件的额定电流是以一定条件下最大通态平均电流来标定的。电动机电磁转矩 T 与电枢电流 I_d 成正比，也即与整流电流的平均值成正比。从发热的观点看，晶闸管和电动机的发热量与整流电流的有效值成正比，当电流出现不连续时，即电流时有时无，导通角变小，在平均电流相等的条件下，与它对应的有效值却大得多，发热也更严重，这说明在深控（指 α 较大）情况下晶闸管和电动机发热更厉害，这一情况在选择晶闸管元件，电动机容量、整流电路形式等方面都必须加以考虑。

(2) 由于晶闸管整流装置相位控制的特点，当晶闸管-电动机系统（以下简称V-M系统）主回路串接足够大电感量的电抗器，而且电动机的负载电流也足够大时，整流电流波形是连续的，见图1-1。

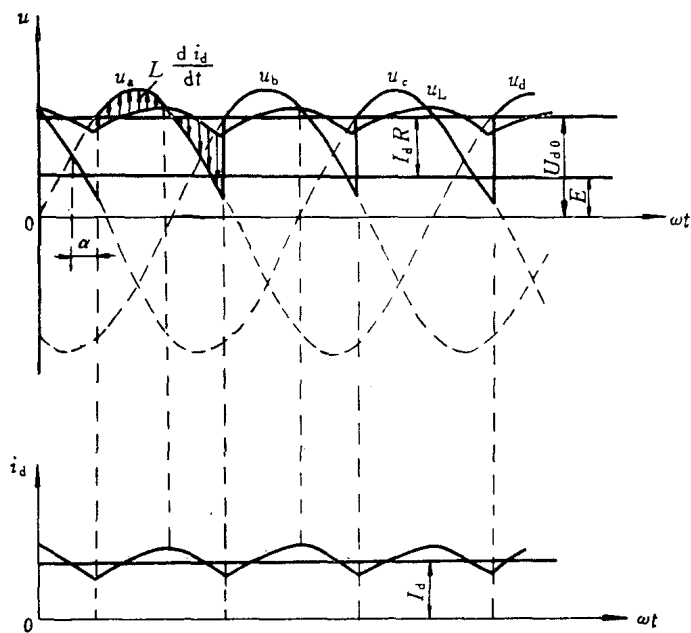


图 1-1 V-M系统电流连续波形