



全国高等专科教育自动化类专业规划教材

现代调速控制系统

侯崇升 主编

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



全国高等专科学校教育自动化类专业规划教材

现代调速控制系统

主 编 侯崇升
副主编 韩星海 裴永清
参 编 管丰年 王晓卫 唐述宏
主 审 曾 毅



机械工业出版社

调速控制系统广泛地应用于工业生产的不同领域和各类生产机械中,新型调速装置和控制技术不断涌现,控制方式数字化、网络化是发展的必然趋势。作为面向高职高专自动化类专业学生的一门专业课,必须做到理论适度,紧密结合生产实际。因此,本书按照循序渐进的原则,对交、直流调速系统的基本构成、控制规律、性能特点作了分析,在此基础上介绍了当今工业控制系统广泛应用的数字直流调速器和交流变频调速器,以及网络运动控制和 PROFIBUS 总线控制的基本知识。为体现高职高专教材的实用性,在尽量压缩理论公式推导等内容的同时,将 MATLAB/Simulink 仿真技术引入本书,使学生通过仿真结果直观地理解各种调速系统的原理和意义。

全书结构紧凑,内容充实,简明易懂,突出实用性和可操作性,适用于普通高职高专自动化类专业学生使用,也适用于应用型本科自动化类专业学生使用,还可作为工程技术人员的参考用书。

为方便教学,本书配有免费电子教案,凡选用本书作为授课教材的学校,均可来电索取,咨询电话:010—88379758。

图书在版编目(CIP)数据

现代调速控制系统/侯崇升主编. —北京:机械工业出版社,2006.9
全国高等专科学校教育自动化类专业规划教材
ISBN 7-111-19881-6

I. 现... II. 侯... III. 调整控制器—高等学校—教材 IV. TM571

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 107987 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑:于宁 高倩 责任编辑:高倩 版式设计:冉晓华
责任校对:李秋荣 封面设计:鞠杨 责任印制:杨曦
北京机工印刷厂印刷
2006 年 9 月第 1 版第 1 次印刷
184mm × 260mm · 16.25 印张 · 401 千字
0 001—4 000 册
定价:23.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68326294
编辑热线电话(010)88379758
封面无防伪标均为盗版

前 言

本教材是在教育部高职高专自动化类专业教学指导委员会的指导下，为适应高职高专电气工程及自动化类专业人才培养而编写的新一轮规划教材，教学安排参考学时为 50 学时，因此也可兼顾应用型本科相关专业的教学要求。

调速控制系统广泛地应用于工业生产的不同领域和各类生产机械，新型调速装置和控制技术不断涌现，使控制方式数字化、网络化成为发展的必然趋势。作为面向自动化类专业学生的一门专业课，紧密结合生产应用是必须的。因此，本书按照循序渐进的原则，对交、直流调速系统的基本构成、控制规律、性能特点作了分析，并在此基础上介绍了当今工业控制系统广泛应用的数字直流调速器和交流变频调速器，以及网络运动控制和 PROFIBUS 总线控制的基本知识；还介绍了功能强大的系统仿真工具——MATLAB/Simulink。

全书共分 7 章，包括：单闭环直流调速系统、多环直流调速系统、直流可逆调速系统及数字直流调速器、交流调压和串级调速系统、交流变频调速系统、变频器的应用、网络运动控制及 PROFIBUS 总线控制。

本书内容工程应用性强，强调实验教学环节。鉴于不同学校实验条件不同，实验教学参考内容没有列出。建议对带电流截止负反馈的单闭环直流调速系统，转速-电流双闭环不可逆直流调速系统，双闭环逻辑控制无环流可逆调速系统，双闭环可逆直流脉宽调速系统，双闭环交流调压调速系统及双闭环变压变频调速系统的相关实验要重点开设。

本书由侯崇升任主编，韩星海、裴永清任副主编。书中第 1 章由韩星海编写；第 2 章由韩星海、王晓卫、管丰年编写；第 3、4 章由裴永清、侯崇升编写；第 5 章由管丰年、唐述宏、侯崇升编写；第 6、7 章及附录由侯崇升编写。全书由侯崇升统稿。

本书由山东大学曾毅教授主审，曾毅教授认真仔细地审阅了全部书稿，并提出了许多宝贵的建议，在此表示衷心的感谢。另外，孟德昌为本书的文字录入和插图绘制作了大量的工作，在此一并感谢。

本书在编写过程中查阅和参考了大量文献资料，书中未能一一列出，在此对资料作者一并表示诚挚的谢意。编者虽竭尽全力，但由于学识和水平有限，书中难免会存有这样或那样的错误，热忱欢迎各位读者提出建议和意见。

编 者

目 录

前言

第 1 章 单闭环直流调速系统	1
1.1 直流调速方式及晶闸管-电动机系统	1
1.2 反馈控制单闭环直流调速系统的稳态性能分析	5
1.3 电流截止负反馈	13
1.4 比例-积分控制规律和无静差调速系统	15
1.5 电压反馈-电流补偿控制的直流调速系统	18
1.6 单闭环直流调速系统的 MATLAB/Simulink 仿真	22
本章小结	39
习题	40
第 2 章 多环直流调速系统	42
2.1 转速-电流双闭环调速系统	42
2.2 双闭环系统的动态性能分析及性能改进	46
2.3 双闭环直流调速控制模块的应用	49
2.4 三环调速系统	56
2.5 双闭环直流调速系统的 MATLAB/Simulink 建模与仿真	57
本章小结	60
习题	60
第 3 章 直流可逆调速系统及数字直流调速器	62
3.1 可逆调速系统的电路结构及回馈制动	62
3.2 有环流可逆调速系统	67
3.3 逻辑无环流可逆调速系统	70
3.4 逻辑无环流可逆调速系统的 MATLAB/Simulink 仿真	83
3.5 直流脉宽调速系统	88
3.6 数字直流调速器	104
本章小结	112
习题	113
第 4 章 交流调压和串级调速系统	114
4.1 交流调速方式	114
4.2 交流调压调速系统	115
4.3 交流异步电动机的软起动与降压节能原理	122
4.4 交流串级调速系统	127
4.5 串级调速系统的主要参数计算及起动方式	138

4.6 超同步串级调速系统	140
4.7 交流调压调速系统的 MATLAB/Simulink 仿真	142
本章小结	147
习题	148
第 5 章 交流变频调速系统	150
5.1 交流变频调速技术的应用及发展	150
5.2 变频调速控制方式及机械特性	155
5.3 变频调速装置的类型与特点	160
5.4 正弦波脉宽调制变换器	164
5.5 变频调速采用的其他脉宽调制技术	173
5.6 基于单片机的交流变频调速系统	175
5.7 矢量控制与直接转矩控制	179
本章小结	183
习题	183
第 6 章 变频器的应用	185
6.1 通用变频器主电路结构和额定参数	185
6.2 通用变频器的选型和容量计算	187
6.3 变频器的安装与接线	191
6.4 变频器的运行功能	193
6.5 变频器的常见故障和抗干扰措施	200
6.6 ABB 和富士变频器的主要参数与设置方法	205
6.7 变频器应用举例	211
本章小结	215
习题	216
第 7 章 网络运动控制及 PROFIBUS 总线控制	217
7.1 拖动系统的多电动机同步网络运动控制原理	217
7.2 转速检测元件	219
7.3 PROFIBUS 总线控制技术	224
7.4 网络控制系统及 PROFIBUS 总线应用举例	233
本章小结	238
习题	239
附录	240
附录 A Simulink/Power System 模块库	240
附录 B 欧陆 590 操作面板菜单系统目录中英文对照	246
参考文献	253

第 1 章 单闭环直流调速系统

直流电动机的调速主要采用变电压调速。本章主要讨论单闭环直流调速系统的性能特点，其内容包括：直流调速方式及其机械特性；反馈控制单闭环直流调速系统的稳态性能分析；电流截止负反馈；比例-积分控制规律和无静差调速系统；电压反馈电流补偿控制的直流调速系统等。在本章最后引入了 MATLAB/Simulink 仿真软件，以协助分析单闭环直流调速系统。

1.1 直流调速方式及晶闸管-电动机系统

1.1.1 直流调速方式及调速用可控直流电源

直流电动机具有良好的起动、制动性能，宜于在大范围内平滑调速，是电力拖动控制系统的主要执行部件，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、高层电梯等高性能可控电力拖动的领域中得到了广泛的应用，而且直流拖动控制系统在理论和实践上都比较成熟。尽管近几年来交流调速发展很快，但随着电力电子技术的飞速发展，直流调速的控制越来越精准，所以直流调速的应用也越来越广泛。而且从闭环控制的角度来看，它又是拖动控制系统的基础，因此应该首先很好地掌握直流调速系统。

1. 直流调速方式

直流电动机转速稳态表达式可由式 (1-1) 描述：

$$n = \frac{U - IR}{K_e \Phi} \quad (1-1)$$

式中 n ——转速 (r/min)；
 U ——电枢电压 (V)；
 I ——电枢电流 (A)；
 R ——电枢回路总电阻 (Ω)；
 Φ ——励磁磁通 (Wb)；
 K_e ——电动势常数。

由式 (1-1) 可以看出，调节直流电动机的转速有 3 种方法，即调节电枢供电电压 U ；减弱励磁磁通 Φ ；改变电枢回路电阻 R 。其中，以调节电枢供电电压的方式为最好；改变电阻只能实现有级调速；减弱磁通虽然能够平滑调速，但调速范围不大，往往只是配合调压方案，在基速（额定转速）以上作小范围的弱磁升速。因此，自动控制的直流调速系统往往以调压调速为主。

2. 调压调速用的可控直流电源

调压调速是直流电动机调速的主要方式，调节直流电动机的电枢供电电压需要有专门的可控直流电源，常用的可控直流电源有以下 3 种。

(1) 旋转变流机组 由交流电动机和直流发电机组成机组，以获得可调的直流电压。图

1-1 所示为旋转变流机组供电的直流调速系统原理图，由交流电动机（异步机或同步机）拖动直流发电机 G 实现变流，由 G 给需要调速的直流电动机 M 供电，调节 G 的励磁电流 i_f 即可改变其输出电压 U ，从而调节电动机的转速 n ，因此简称 G-M 系统，国际上通称为 Ward-Leonard 系统。为了供给直流发电机和电动机的励磁电流，通常专门设置一台直流励磁发电机 GE，可同轴装在变流机组上，也可另外单用一台交流电动机拖动。

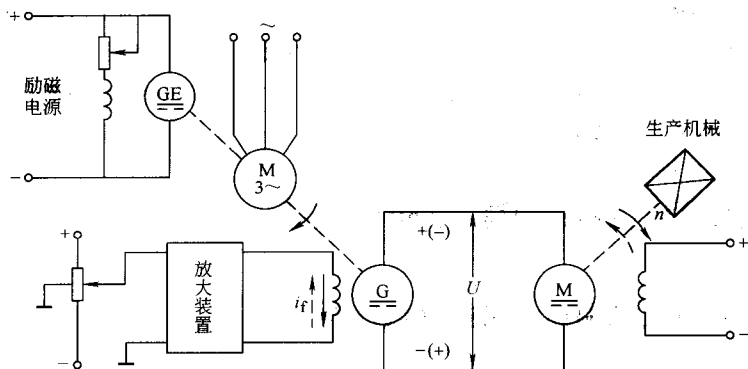


图 1-1 旋转变流机组供电的直流调速系统原理图

该系统的优点是改变 i_f 的方向时， U 的极性和 n 的转向都跟着改变，系统的可逆运行是很容易实现的。其次，无论正转减速还是反转减速都能实现回馈制动，能够方便地实现四象限运行。图 1-2 所示为采用变流机组供电时电动机可逆运行的机械特性。图中横坐标 T_e 为励磁转矩，纵坐标为电动机转速 n ， n_0 为电动机额定转速， T_L 为负载转矩。

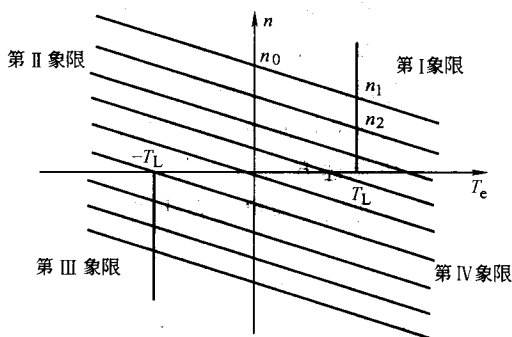


图 1-2 G-M 系统的机械特性

不足之处是该系统需要旋转变流机组，至少包含两台与调速电动机容量相当的旋转电动机，还要一台励磁发电机，因此设备多，体积大，费用高，效率低，安装需打地基，运行有噪声，维护不方便。因此，20 世纪 60 年代以后人们开始采用各种静止式的变压或变流装置来替代旋转变流机组。

(2) 静止式可控整流器 用静止式的可控整流器，获得可调的直流电压。采用静止式晶闸管整流装置供电的拖动系统称为晶闸管-电动机调速系统（简称 V-M 系统，又称静止的 Ward-Leonard 系统）。图 1-3 是它的简单原理图，图中 UR 是晶闸管可控整流器。通过调节触发装置 GT 的控制电压 U_c 来改变触发脉冲的相位，即可改变整流电压 U_d ，从而实现平滑调速。

与旋转变流机组相比，晶闸管整流装置不仅在经济性和可靠性上都有很大提高，而且在技术性能上还有很大的优势。如晶闸管可控整流器的功率放大倍数在 10^4 以上，在控制的高速性上，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。目前，世界上各主要工业国家的直流调速系统大部分都已改用晶闸管可控整流器来供电。

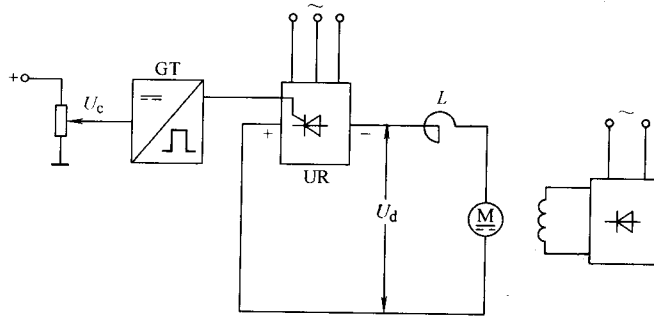


图 1-3 V-M 系统

晶闸管整流器的缺点主要表现在以下几方面。

1) 由于晶闸管的单向导电性，给系统的可逆运行造成困难。必须进行四象限运行时，只好采用正、反两组全控整流电路，所用变流设备要增加一倍。

2) 晶闸管对过电压、过电流和过高的 du/dt 与 di/dt 都十分敏感，其中任何一项指标超过允许值都可能在很短的时间内损坏器件，因此必须有可靠的保护电路和符合要求的散热条件，而且在选择器件时还应留有适当的余量。

3) 当系统处于深调速状态，即较低速运行时，晶闸管的导通角很小，使系统的功率因数很低，并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。谐波与无功功率造成的“电力公害”是晶闸管可控整流装置进一步普及的障碍。

(3) 直流斩波器或脉宽调制变换器 用恒定直流电源或不控整流电源供电，利用电力电子开关器件斩波或进行脉宽调制，以产生可变的平均电压。

在铁路电力机车、城市电车和地铁电动机车等电力牵引设备上，常采用直流串励或复励电动机，由恒压直流电源供电。过去采用切换电枢回路电阻来控制电动机的起、制动和调速，但电阻中电能损耗很大。为了节能，并实行无触点控制，现在多改用电力电子开关器件，如快速晶闸管、GTO、IGBT 等。采用简单的单管控制时，称作直流斩波器，后来逐渐发展成采用各种脉冲脉宽调制开关电路，统称脉宽调制（Pulse Width Modulation, PWM）变换器。

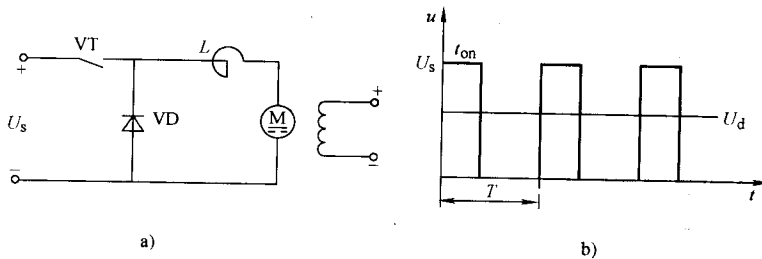


图 1-4 直流斩波器-电动机系统的原理图和电压波形

a) 原理图 b) 电压波形图

直流斩波器-电动机系统的原理图如图 1-4a，其中 VT 用开关符号表示电力电子开关器件，VD 表示续流二极管。当 VT 导通时，直流电源电压 U_s 加到电动机上；当 VT 关断时，直流电源与电动机脱离，电动机电枢经 VD 续流，两端电压接近于零。如此反复，得电枢端电压波形 $u = f(t)$ ，如图 1-4b 所示，电源电压 U_s 在 t_{on} 时间内被接上，又在 $(T - t_{on})$ 时

间内被斩断，故称“斩波”。这样，电动机得到的平均电压为

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

式中 T ——功率开关器件的开关周期 (s)；

t_{on} ——开通时间 (s)；

ρ ——占空比， $\rho = t_{on}/T = t_{on} \cdot f$ ，其中 f 为开关频率。

PWM 变换器具有一系列优点：

- 1) 主电路线路简单，需用的功率器件少；
- 2) 开关频率高，电流容易连续，谐波少，电动机损耗及发热都较小；
- 3) 低速性能好，稳速精度高，调速范围宽，可达 1:10000 左右；
- 4) 若与快速响应的电动机配合，则系统频带宽，动态响应快，动态抗扰能力强；
- 5) 功率开关器件工作在开关状态，导通损耗小，当开关频率适当时，开关损耗也不大，因而装置效率较高；
- 6) 直流电源采用不控整流时，电网功率因数比采用相控整流器时高。

1.1.2 晶闸管-电动机系统开环机械特性

前面介绍了不同直流电源供电的直流调速系统，其中 G-M 系统现在已经基本淘汰，这里主要讲述 V-M 系统的开环机械特性。

1. 电流连续时开环机械特性

当电流连续时，V-M 系统的机械特性方程式：

$$n = \frac{1}{C_e} (U_{d0} - I_d R) = \frac{1}{C_e} \left(\frac{m}{\pi} U_m \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha - I_d R \right)$$

式中 $C_e = K_e \Phi_N$ ——电动机在额定磁通下的电动势系数；

α ——从自然换相点算起的触发延迟角 (rad)；

U_m —— $\alpha = 0$ 时的整流电压波形峰值 (V)；

m ——交流电源一周内的整流电压脉波数。

图 1-5 为电流连续时 V-M 系统的机械特性，改变延迟角 α ，得一族平行直线。图中电流较小的部分画成虚线，表明这时电流波形可能断续，上式就不适应了。这说明只要电流连续，晶闸管可控整流器就可以看成是一个线性的可控电压源。

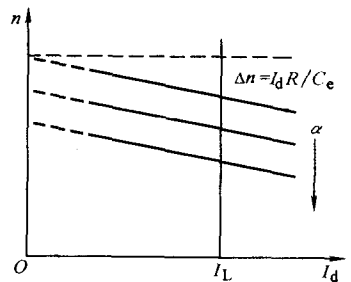


图 1-5 电流连续时 V-M 系统的机械特性

2. 电流断续时开环机械特性

当电流断续时，机械特性方程要复杂得多。以三相半波整流电路构成的 V-M 系统为例，电流断续时机械特性表达式为

$$n = \frac{\sqrt{2} U_2 \cos \varphi \left[\sin \left(\frac{\pi}{6} + \alpha + \theta - \varphi \right) - \sin \left(\frac{\pi}{6} + \alpha - \varphi \right) e^{-\theta \cot \varphi} \right]}{C_e (1 - e^{-\theta \cot \varphi})}$$

$$I_d = \frac{3\sqrt{2}U_2}{2\pi R} \left[\cos\left(\frac{\pi}{6} + \alpha\right) - \cos\left(\frac{\pi}{6} + \alpha + \theta\right) - \frac{C_e}{\sqrt{2}U_2} \theta n \right]$$

式中 $\varphi = \arctan \frac{\omega L}{R}$;

θ ——电流脉波的导通角 (rad)。

图 1-6 所示为完整的 V-M 系统机械特性图, 其中包含了整流状态 ($\alpha < 90^\circ$) 和逆变状态 ($\alpha > 90^\circ$), 电流连续区和电流断续区。当电流连续时, 特性比较硬; 断续段特性则很软, 而且呈显著的非线性, 理想空载转速翘得很高。

脉动电流会增加电动机的发热, 产生脉动转矩, 为了避免或减轻这种影响, 需采用抑制电流脉动的措施, 主要有:

- 1) 增加整流电路相数, 或采用多重化技术;
- 2) 设置平波电抗器。

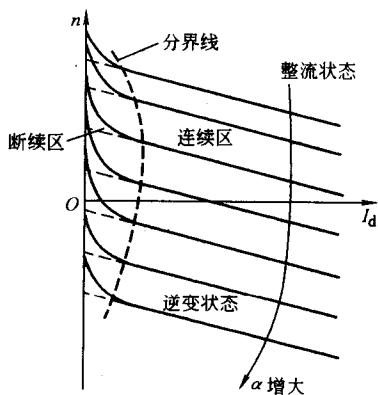


图 1-6 完整的 V-M 系统机械特性

1.2 反馈控制单闭环直流调速系统的稳态性能分析

1.2.1 稳态性能指标及开环系统性能

任何一台需要控制转速的设备, 其生产工艺对调速性能都有一定的要求。例如, 最高转速与最低转速之间的范围, 是有级还是无级调速, 在稳态运行时允许转速波动的大小, 从正转到反转运行的时间间隔, 突加或突减负载时允许的转速波动, 运行停止时要求的定位精度等等。归纳起来, 对于调速系统转速控制的要求有以下三个方面。

调速: 在一定的最高转速和最低转速范围内, 分档地 (有级) 或平滑地 (无级) 调节转速;

稳速: 以一定的精度在所需转速上稳定运行, 在各种干扰下不允许有过大的转速波动;

加、减速: 频繁起、制动的设备要求加、减速尽量快, 不宜经受剧烈速度变化的机械则要求起、制动尽量平稳。

上述三个方面要求可具体转化为调速系统的稳态和动态性能指标。

1. 稳态性能指标

为了进行定量的分析, 可以针对前两项要求定义两个调速指标, 叫作“调速范围”和“静差率”。这两个指标合称调速系统的稳态性能指标。

1) 调速范围。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} 之比叫作调速范围, 用字母 D 表示, 即

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

其中, n_{\max} 和 n_{\min} 一般都指电动机额定负载时的最高和最低转速, 对于少数负载很轻的机械, 也可用实际负载时的最高和最低转速来代替, 例如精密机床。

2) 静差率。当系统在某一转速下运行时, 负载由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, 称作静差率 s , 即

$$s = \frac{\Delta n_N}{n_0} \quad (1-3)$$

或用百分数表示为 $s = \frac{\Delta n_N}{n_0} \times 100\%$

静差率是用来衡量调速系统在负载变化下转速的稳定度的。它和机械特性的硬度有关, 特性越硬, 静差率越小, 转速的稳定度就越高。然而静差率与机械特性硬度又是区别的。对于同样硬度的特性, 理想空载转速越低时, 静差率越大, 转速的相对稳定度也就越差。一般变压调速系统在不同转速下的机械特性是相互平行的, 对于同一个负载运行在不同的机械特性上时, 静差率是不一样的, 这是因为它们的理想空载转速不同, 如图 1-7 所示。由此可见: 调速范围和静差率这两项指标并不是彼此孤立的, 必须同时提才有意义。调速系统的静差率指标应以最低速时所能达到的数值为准。

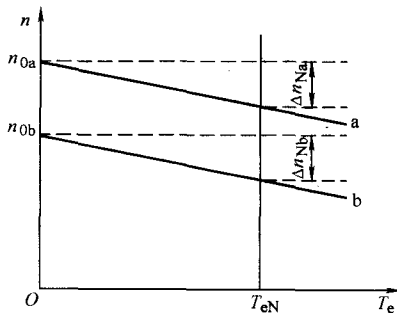


图 1-7 不同转速下的静差率

3) 调速系统中调速范围 D 、静差率 s 和额定速降 Δn_N 之间的关系。在直流电动机变压调速系统中, 一般以电动机的额定转速 n_N 作为最高转速, 因此, 该系统静差率应该是最低速时的静差率, 即

$$s = \frac{\Delta n_N}{n_{0\min}} = \frac{\Delta n_N}{n_{\min} + \Delta n_N}$$

最低转速为
$$n_{\min} = \frac{\Delta n_N}{s} - \Delta n_N = \frac{(1-s)\Delta n_N}{s}$$

而调速范围为
$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{n_N}{n_{\min}}$$

将上式代入得

$$D = \frac{n_N s}{\Delta n_N (1-s)} \quad (1-4)$$

调速系统的调速范围、静差率和额定速降之间所应满足的关系, 如果对静差率要求越严, 即要求 s 值越小, 则系统能够允许的调速范围也越小。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。

【例 1-1】某直流调速系统电动机额定转速为 $n_N = 1430\text{r/min}$, 额定速降 $\Delta n_N = 115\text{r/min}$, 当要求静差率 $s \leq 30\%$ 时, 允许多大的调速范围? 如果要求静差率 $s \leq 20\%$, 则调速范围是多少? 如果希望调速范围达到 10, 所能满足的静差率是多少?

解: 要求 $s \leq 30\%$, 调速范围为

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

如果要求 $s \leq 20\%$, 则调速范围只有

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

若调速范围达到 $D = 10$ ，则静差率只能是

$$s = \frac{D \Delta n_N}{n_N + D \Delta n_N} = \frac{10 \times 115}{1430 + 10 \times 115} = 0.446 = 44.6\%$$

2. 开环调速系统及其存在的问题

图 1-3 所示的 V-M 系统是开环调速系统，调节控制电压 U_c 就可以改变电动机的转速。如果负载的生产工艺对运行时的静差率要求不高，这样的开环调速系统都能实现一定范围内的无级调速。但是，许多需要调速的生产机械常常对静差率有一定的要求。例如龙门刨床，由于毛坯表面粗糙不平，加工时负载大小常有波动，但是，为了保证工件的加工精度和加工后的表面粗糙度，加工过程中的速度却必须基本稳定，也就是说，静差率不能太大，一般要求，调速范围 $D = 20 \sim 40$ ，静差率 $s \leq 5\%$ 。又如热连轧机，各机架轧辊分别由单独的电动机拖动，钢材在几个机架内连续轧制，要求各机架出口线速度保持严格的比例关系，使被轧金属的每秒流量相等，才不致造成钢材拱起或拉断，根据工艺要求，需使调速范围 $D = 3 \sim 10$ 时，保证静差率 $s \leq 0.2\% \sim 0.5\%$ 。在这些情况下，开环调速系统往往不能满足要求。

【例 1-2】 某龙门刨床工作台拖动采用直流电动机，其额定数据如下：60kW，220V，305A，1000r/min，采用 V-M 系统，主电路总电阻 $R = 0.18\Omega$ ，电动机电动势系数 $C_e = 0.2V \cdot \text{min}/r$ 。如果要求调速范围 $D = 20$ ，静差率 $s \leq 5\%$ ，采用开环调速能否满足要求？若要满足这个要求，系统的额定速降 Δn_N 最多能达到多少？

解：当电流连续时，V-M 系统的额定速降为

$$\Delta n_N = \frac{I_{dN} R}{C_e} = \frac{305 \times 0.18}{0.2} \text{r/min} = 275 \text{r/min}$$

开环系统机械特性连续段在额定转速时的静差率为

$$s = \frac{\Delta n_N}{n_N + \Delta n_N} = \frac{275}{1000 + 275} = 21.6\%$$

这已大大超过了 5% 的要求，更不必谈调到最低速时的情况了。

如果要求 $D = 20$ ， $s \leq 5\%$ ，则由式 (1-4) 可知：

$$\Delta n_N = \frac{n_N s}{D(1-s)} \leq \frac{1000 \times 0.05}{20 \times (1-0.05)} \text{r/min} = 2.63 \text{r/min}$$

由 [例 1-2] 可以看出，开环调速系统的额定速降是 275r/min，而生产工艺的要求却只有 2.63r/min，相差几乎百倍。由此可以看出，开环调速系统的稳速性能较差。开环调速系统通过调节控制电压 U_c ，虽然可以改变电动机的转速，实现一定范围内的无级调速，但开环调速系统稳态速降大，静差率数值高，往往不能满足生产机械的要求，只适用于对调速性能要求不高的场合。

1.2.2 闭环系统的组成及静特性

前面讲过，对于生产工艺要求较高的调速系统，开环调速已无能为力，采用反馈控制的闭环调速系统能否解决这个问题，下面进行分析。

根据自动控制原理，反馈控制的闭环系统是按被调量的偏差进行控制的系统，只要被调

量出现偏差，它就会自动产生纠正偏差的信号。调速系统的转速降落正是由负载引起的转速偏差，显然，引入转速闭环将使调速系统应该能够大大减少转速降落。

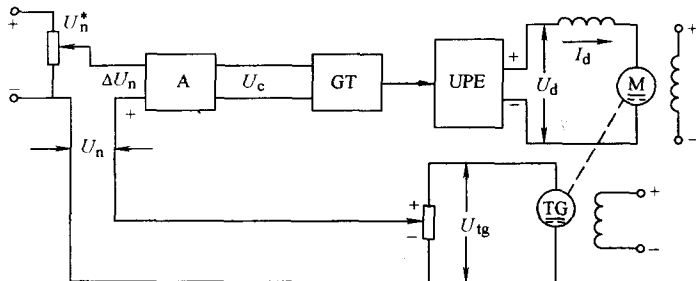


图 1-8 采用转速负反馈的直流调速系统

如图 1-8 所示，在反馈控制的闭环直流调速系统中，与电动机同轴安装一台测速发电机 TG，从而引出与被测量转速成正比的负反馈电压 U_n ，与给定电压 U_n^* 相比较后，得到转速偏差电压 ΔU_n ，经过放大器 A，产生电力电子变换器 UPE 的控制电压 U_c ，用以控制电动机转速 n 。

下面分析闭环调速系统的稳态特性，以确定它如何能够减少转速降落。为了突出主要矛盾，先作如下的假定：

1) 忽略各种非线性因素，假定系统中各环节的输入、输出关系都是线性的，或者只取其线性工作段；

2) 忽略控制电源和电位器的内阻。

在以上假定条件成立的前提下，转速负反馈直流调速系统中各环节的稳态关系如下：

电压比较环节
$$\Delta U_n = U_n^* - U_n$$

放大器
$$U_c = K_p \Delta U_n$$

电力电子变换器
$$U_{d0} = K_s U_c$$

调速系统开环机械特性
$$n = \frac{U_{d0} - I_d R}{C_e}$$

测速反馈环节
$$U_n = \alpha n$$

式中 K_p ——放大器的电压放大系数；

K_s ——电力电子变换器的电压放大系数；

α ——转速反馈系数，(V·min/r)；

U_{d0} ——UPE 的理想空载输出电压 (V)；

R ——电枢回路总电阻 (Ω)。

从上述五个关系式中消去中间变量，整理后，即得转速负反馈闭环直流调速系统的静特性方程式：

$$n = \frac{K_p K_s U_n^* - I_d R}{C_e (1 + K)} \quad (1-5)$$

式中 K 为闭环系统的开环放大系数， $K = \frac{K_p K_s \alpha}{C_e}$ 。

它相当于在测速反馈电位器输出端把反馈回路断开后，从放大器输入端到测速反馈输出

端止总的电压放大系数，是各环节单独的放大系数的乘积。

注意：电动机环节放大系数为

$$\frac{n}{E} = \frac{1}{C_e}$$

闭环调速系统的静特性表示闭环系统电动机转速与负载电流（或转矩）间的稳态关系，它在形式上与开环机械特性相似，但本质上却有很大不同，故定名为“静特性”，以示区别。根据各环节的稳态关系可以画出闭环系统的稳态结构图，如图 1-9 所示。

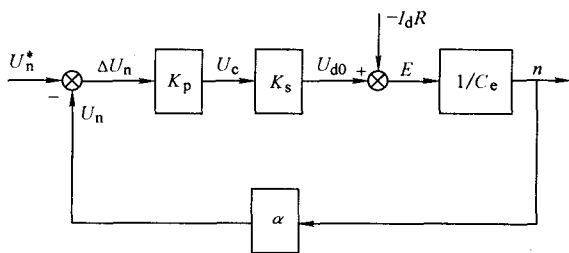


图 1-9 转速负反馈闭环直流调速系统稳态结构图

1.2.3 开环系统机械特性和闭环系统静特性的关系

系统的开环机械特性为

$$n = \frac{U_{d0} - I_d R}{C_e} = \frac{K_p K_s U_n^*}{C_e} - \frac{R I_d}{C_e} = n_{0op} - \Delta n_{op}$$

而闭环时的静特性可写成：

$$n = \frac{K_p K_s U_n^*}{C_e (1 + K)} - \frac{R I_d}{C_e (1 + K)} = n_{0cl} - \Delta n_{cl}$$

其中 n_{0op} 和 n_{0cl} 分别表示开环和闭环系统的理想空载转速； Δn_{op} 和 Δn_{cl} 分别表示开环和闭环系统的稳态速降。

1. 闭环系统静特性比开环系统机械特性硬得多

开环系统和闭环系统的转速降落分别为

$$\Delta n_{op} = \frac{R I_d}{C_e}$$

$$\Delta n_{cl} = \frac{R I_d}{C_e (1 + K)}$$

故有

$$\Delta n_{cl} = \frac{\Delta n_{op}}{1 + K} \quad (1-6)$$

当 K 值较大时， Δn_{cl} 比 Δn_{op} 小得多，也就是说，闭环系统的特性要硬得多。

2. 闭环系统的静差率要比开环系统小得多

闭环系统和开环系统的静差率分别为

$$s_{cl} = \frac{\Delta n_{cl}}{n_{0cl}}$$

$$s_{op} = \frac{\Delta n_{op}}{n_{0op}}$$

按理想空载转速相同的情况比较，即 $n_{0op} = n_{0cl}$ 时，有

$$s_{cl} = \frac{s_{op}}{1 + K} \quad (1-7)$$

故可以认为闭环系统静差率比开环小得多。

3. 如果所要求的静差率一定，则闭环系统可以大大提高调速范围

开环时:

$$D_{op} = \frac{n_N s}{\Delta n_{op} (1 - s)}$$

闭环时:

$$D_{cl} = \frac{n_N s}{\Delta n_{cl} (1 - s)}$$

可以得出:

$$D_{cl} = (1 + K) D_{op} \quad (1-8)$$

要取得上述三项优势, 闭环系统必须设置放大器, 且 K 足够大。由上述分析可得结论: 闭环调速系统可以获得比开环调速系统硬得多的稳态特性, 从而在保证一定静差率的要求下, 能够提高调速范围, 为此所需付出的代价是, 需增设放大器以及检测与反馈装置。下面来分析一下闭环系统能减少稳态速降的实质。

在开环系统中, 当负载电流增大时, 电枢压降也增大, 转速只能降下来; 闭环系统装有反馈装置, 转速稍有降落, 反馈电压就会降低, 通过比较和放大, 提高电力电子装置的输出电压 U_{do} , 使系统工作在新的机械特性上, 因而转速又有所回升。在图 1-10 中, 设原始工作点为 A , 负载电流为 I_{d1} 。当负载增大到 I_{d2} 时, 开环系统的转速必然降到 A' 点所对应的数值, 闭环后, 由于反馈调节作用, 电压可升到 U_{d2} , 使工作点变成 B , 稳态速降比开环系统小得多。这样, 在闭环系统中, 每增加 (或减少) 一点负载, 就相应地提高 (或降低) 一点电枢电压, 因而就改换一条机械特性。闭环系统的静特性就是这样在许多开环机械特性上各取一个相应的工作点, 如图 1-10 中的 A 、 B 、 C 、 D 、 \dots , 再由这些工作点连接而成的。

闭环系统能够减少稳态速降的实质在于它的自动调节作用, 在于它能随着负载的变化而相应地改变电枢电压, 以补偿电枢回路电阻压降的变化。

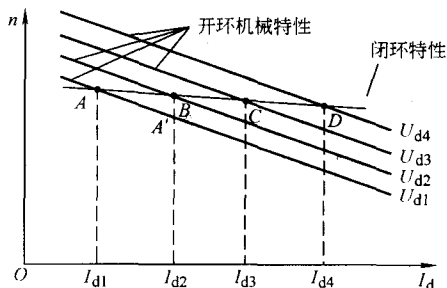


图 1-10 闭环静特性和开环机械特性的关系

1.2.4 闭环控制的性质

转速反馈闭环调速系统是一种基本的反馈控制系统, 它具有下述三个基本特征, 也就是反馈控制的基本规律。各种不另加其他调节器的基本反馈控制系统都服从于这些规律。

1. 只用比例放大器的反馈控制系统, 其被调量仍有静差

从静特性分析中可以看出, 闭环系统的开环放大系数 K 值越大, 系统的稳态性能越好。然而, 只要所设置的放大器仅仅是一个比例放大器, 即 $K_p = \text{常数}$, 稳态速差就只能减小, 却不可能消除。因为闭环系统的稳态速降为

$$\Delta n_{cl} = \frac{R I_d}{C_e (1 + K)}$$

只有 $K = \infty$, 才能使 $\Delta n_{cl} = 0$, 而这是不可能的。因此, 这样的调速系统叫作有静差调速系统。实际上, 这种系统正是依靠被调量的偏差进行控制的。

2. 反馈控制系统的作用是抵抗扰动、服从给定

反馈控制系统具有良好的抗扰性能，它能有效地抑制一切被负反馈环所包围的前向通道上的扰动作用，但完全服从给定作用。

除给定信号外，作用在控制系统各环节上的一切会引起输出量变化的因素都叫作“扰动因素”。上面只讨论了负载变化这样一种扰动因素，除此以外，交流电源电压的波动（使 K_p 变化），电动机励磁的变化（造成 C_e 变化），放大器输出电压的漂移（使 K_p 变化），由温升引起主电路电阻的增大等等，所有这些因素都和负载变化一样，最终都要影响到转速，都会被测速装置检测出来，再通过反馈控制的作用，减小它们对稳态转速的影响。在图 1-11 中，上述各种扰动作用都表示出来了，反馈控制系统对它们都有抑制功能。但是，如果在反馈通道上的测速反馈系数 α 受到某种影响而发生变化，它非但不能得到反馈控制系统的抑制，反而会增大被控量的误差。反馈控制系统所能抑制的只是被反馈环包围的前向通道上的扰动。

抗扰性能是反馈控制系统最突出的特征之一。正因为有这一特征，在设计闭环系统时，可以只考虑一种主要扰动作用。例如在调速系统中只考虑负载扰动。按照克服负载扰动的要求进行设计，则其他扰动也就自然都受到抑制了。

与众不同，在反馈环外的给定作用下，图 1-11 中的转速给定信号 U_n^* 的微小变化都会使被控量随之变化，丝毫不受反馈作用的抑制。因此，全面地看，反馈控制系统的规律是：一方面能够有效地抑制一切被包在负反馈环内前向通道上的扰动作用；另一方面，被控量紧紧地跟随着给定，对给定信号的任何变化都是“惟命是从”的。

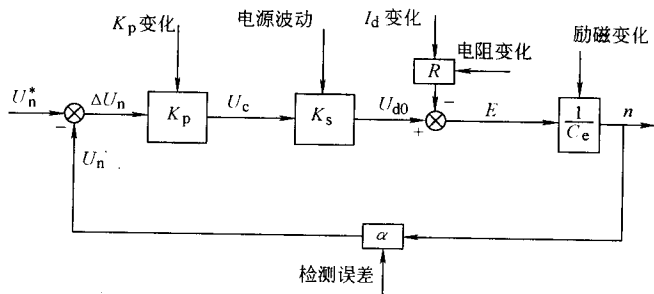


图 1-11 闭环调速系统的给定作用和扰动作用

3. 系统的精度依赖于给定和反馈检测的精度

如果产生给定电压的电源发生波动，反馈控制系统无法鉴别是对给定电压的正常调节还是不应有的电压波动。因此，高精度的调速系统必须有更高精度的给定稳压电源。

反馈检测装置的误差也是反馈控制系统无法克服的。对于上述调速系统来说，反馈检测装置就是测速发电机。如果测速发电机的励磁发生变化，会使反馈电压失真，从而使闭环系统的转速偏离应有数值。而测速发电机电压中的换向纹波、制造或安装不良造成转子偏心等都会给系统带来周期性的干扰。采用光电编码盘的数字测速，可以大大提高调速系统的精度。

1.2.5 闭环直流调速系统稳态参数的计算

稳态参数计算是自动控制系统设计的第一步，它决定了控制系统的基本构成环节，有了基本环节组成系统之后，再通过动态参数设计，就可使系统臻于完善。近代自动控制系统的控制器主要是模拟电子控制和数字电子控制。由于具有明显的优点，数字控制系统在实际应用中已占主要地位，但从物理概念和设计方法上看，模拟电子控制仍是基础。