辽宁工程技术大学“十五”规划教材

电力拖动自动控制系统

主　编　孟庆春

副主编　任志玲　郭　瑞

东北大学出版社

·沈　阳·

需要全本请访问 www.ertongbook.com

© 孟庆春 2005

图书在版编目（CIP）数据

电力拖动自动控制系统 ／孟庆春主编 .— 沈阳 ：东北大学出版社，2005.12
ISBN 7-81102-226-5

Ⅰ. 电… Ⅱ. 孟… Ⅲ. 电力传动—自动控制系统—高等学校—教材 Ⅳ. TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2005）第 155170 号

出 版 者：东北大学出版社
地址：沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号
邮编：110004
电话：024—83687331（市场部） 83680267（社务室）
传真：024—83680180（市场部） 83680265（社务室）
E-mail：neuph @ neupress.com
http：//www.neupress.com
印 刷 者：沈阳农业大学印刷厂
发 行 者：东北大学出版社
幅面尺寸：184mm × 260mm
印 张：12.125
字 数：310 千字
出版时间：2005 年 12 月第 1 版
印刷时间：2006 年 1 月第 1 次印刷
责任编辑：牛连功
责任校对：潘佳宁
封面设计：唐敏智
责任出版：杨华宁

定 价：27.50 元

前言

电力拖动自动控制系统是自动化、电气工程及其自动化专业的主要专业课之一.

据统计，我国有62%左右的用电量是由电动机消耗的. 电动机拖动生产机械广泛地应用于机械制造、冶金、矿业、交通、石油化工、航空航天、国防工业、家电生产、轻工、农业等国民经济的各个领域. 研究电力拖动自动控制对提高产品质量，改善系统性能，节约能源都有重要作用.

辽宁工程技术大学1981年取得电力电子与电力传动专业硕士学位授予权，2002年该学科被确定为辽宁省重点建设学科. 多年来，学校围绕该学科在教学、科研等方面取得多项成果. 本教材是在多年的教学及自编教材《自动控制系统》《矿山自动控制系统》基础上并吸取兄弟院校同类教材优点编写而成的.

本书共8章. 第1章至第4章为直流调速系统，主要内容包括单闭环控制系统，有静差系统和无静差系统，双闭环调速系统，可逆调速系统、脉宽调制系统及工程设计方法；第5章至第8章为交流调速系统，主要内容有异步电动机调压调速、变频调速、串级调速及同步电动机的变频调速系统. 本书着重阐述了各种交直流调速系统的基础理论、组成结构、工作原理、特性性能及工程设计和典型应用.

本书第1章和第3章由任志玲编写；第2章第2.1～2.3节由刘桂芬编写，第2章2.4和2.5节由刘宏志编写；第4章和第8章由孟庆春编写；第5章、第6章和第7章由郭瑞编写. 全书由孟庆春教授担任主编，任志玲副教授和郭瑞副教授担任副主编.

本书的编写，得到辽宁工程技术大学电气工程系的大力支持. 在审稿过程中，徐建华副教授、赵国才教授和吕振教授提出了不少宝贵的修改意见，硕士研究生秦伟做了大量的工作. 在此向上述单位和同事致以衷心的谢意！

限于编者的水平，特别是时间仓促，书中可能存在不妥之处，恳请广大读者、专家和学者予以批评、指正.

编　者

2005年11月

目 录

第 1 章 单闭环直流调速系统 …… 1

1.1 直流调速系统的电源 …… 1
1.1.1 相控整流电源 …… 1
1.1.2 直流斩波器 …… 2
1.2 V-M 系统的开环机械特性及稳定性能指标 …… 3
1.2.1 V-M 系统的开环机械特性 …… 3
1.2.2 转速控制的要求和稳态调速指标 …… 4
1.3 转速负反馈单闭环调速系统的组成及其特性分析 …… 6
1.3.1 系统的组成及静特性分析 …… 6
1.3.2 开环系统的机械特性与闭环系统静特性的比较 …… 8
1.3.3 转速闭环调速系统的基本性质 …… 9
1.3.4 转速负反馈单闭环调速系统的稳态参数计算 …… 11
1.4 其他单闭环调速系统 …… 12
1.4.1 带电流截止环节的转速负反馈调速系统 …… 12
1.4.2 电压负反馈电流补偿控制的调速系统 …… 14
1.5 单闭环调速系统的动态分析 …… 17
1.5.1 系统的动态数学模型 …… 17
1.5.2 单闭环系统的稳定条件 …… 21
1.6 无静差调速系统 …… 21
1.6.1 积分控制规律 …… 22
1.6.2 采用比例积分调节器的单闭环无静差调速系统 …… 22
习 题 …… 26

第 2 章 双闭环直流调速系统 …… 28

2.1 双闭环调速系统的构成及静特性 …… 28
2.1.1 单闭环系统存在的问题 …… 28
2.1.2 转速、电流双闭环调速系统的组成 …… 28
2.1.3 双闭环调速系统的稳态结构图及其静特性 …… 29
2.2 双闭环调速系统的动态分析 …… 30
2.2.1 双闭环调速系统的动态数学模型 …… 30
2.2.2 双闭环调速系统的动态特性 …… 31
2.3 双闭环调速系统的工程设计 …… 33
2.3.1 设计方法与步骤 …… 33
2.3.2 系统的动态性能指标 …… 34

2.3.3 典型Ⅰ型系统参数和性能指标的关系 …… 35
2.3.4 典型Ⅱ型系统参数和性能指标的关系 …… 39
2.3.5 调节器结构的选择和传递函数的近似处理——非典型系统的典型化 …… 43
2.3.6 调节器最佳整定设计法 …… 47
2.4 按工程设计方法设计双闭环系统的电流调节器和转速调节器 …… 51
2.4.1 电流调节器的设计 …… 51
2.4.2 转速调节器的设计 …… 55
2.4.3 转速调节器退饱和时转速超调量的计算 …… 58
2.4.4 设计举例 …… 61
2.5 转速超调的抑制——转速微分负反馈 …… 65
2.5.1 问题的提出 …… 65
2.5.2 带转速微分负反馈双闭环调速系统的基本原理 …… 65
2.5.3 退饱和时间和退饱和转速 …… 67
2.5.4 转速微分负反馈参数的工程设计方法 …… 68
2.5.5 带转速微分负反馈双闭环调速系统的抗扰性能 …… 68
习 题 …… 69

第 3 章 直流可逆调速系统 …… 71

3.1 可逆方案 …… 71
3.1.1 电枢反接可逆线路 …… 71
3.1.2 励磁反接可逆线路 …… 72
3.2 晶闸管直流可逆调速系统的回馈制动 …… 73
3.3 有环流可逆调速系统 …… 73
3.3.1 可逆调速系统中的环流 …… 73
3.3.2 直流平均环流与配合控制 …… 74
3.3.3 瞬时脉动环流及其抑制 …… 76
3.3.4 直流可逆调速系统的制动分析 …… 77
3.4 可控环流的可逆调速系统 …… 79
3.5 逻辑控制的无环流可逆调速系统 …… 81
3.5.1 系统的组成及工作原理 …… 81
3.5.2 可逆系统对无环流逻辑控制器的要求 …… 82
3.5.3 无环流逻辑控制器的实现 …… 83
习 题 …… 87

第 4 章 DC—DC 调速系统 …… 88

4.1 简单 DC—DC 变换器 …… 88
4.2 基本控制电路分析 …… 89
4.2.1 换向电容 C 充电，过程开始 …… 89
4.2.2 直流变换器截止 (从 t_4 开始) …… 89
4.2.3 主晶闸管关断 (t_5) …… 90
4.2.4 换向结束 …… 90
4.2.5 小 结 …… 90

需要全本请访问 www.ertongbook.com

4.3 直流变换器的控制 …… 90
4.3.1 脉宽控制（T 为常量） …… 90
4.3.2 脉冲列控制（T 变化） …… 91
4.3.3 滞环控制 …… 92
4.4 直流电机一象限至四象限运行 …… 93
4.4.1 一象限运行 …… 93
4.4.2 两象限运行 …… 94
4.4.3 四象限运行 …… 96
4.5 DC—DC 系统的开环机械特性 …… 97
4.6 DC—DC 调速系统的构成及原理 …… 98
4.6.1 脉宽调制器 …… 98
4.6.2 逻辑延时与瞬时过电流保护 …… 99
4.6.3 基极驱动电路 …… 99
习 题 …… 100

第 5 章 异步电动机变压调速系统 …… 101

5.1 交流调速系统概述 …… 101
5.1.1 交流调速的发展 …… 101
5.1.2 交流调速的基本方法 …… 102
5.2 闭环控制的异步电动机变压调速系统 …… 104
5.2.1 异步电动机变压调速电路 …… 104
5.2.2 异步电动机改变电压时的机械特性 …… 105
5.2.3 闭环控制的变压调速系统及其静特性 …… 106
5.2.4 闭环变压调速系统的近似动态结构图 …… 107
习 题 …… 110

第 6 章 异步电机变压变频调速系统 …… 111

6.1 变频调速的基本原理 …… 111
6.1.1 变压变频调速的基本控制方式 …… 111
6.1.2 异步电动机电压频率协调控制时的机械特性 …… 113
6.2 变频器 …… 117
6.2.1 交—直—交变频器与交—交变频器 …… 118
6.2.2 电压源型和电流源型变频器 …… 121
6.2.3 180°导通型和 120°导通型逆变器 …… 122
6.2.4 PAM 控制与 PWM 控制 …… 123
6.3 交流变频调速系统中的脉宽调制（PWM）技术 …… 123
6.3.1 正弦波脉宽调制（SPWM）技术 …… 124
6.3.2 脉宽调制变频器的控制方法 …… 128
6.4 基于静态模型的异步电动机变频调速系统 …… 132
6.4.1 转速开环恒压频比控制的变频调速系统 …… 133
6.4.2 转速闭环转差频率控制的变频调速系统 …… 135
6.5 异步电动机的动态数学模型和坐标变换 …… 138

6.5.1 异步电动机动态数学模型的性质 …… 138
6.5.2 三相异步电动机的多变量非线性数学模型 …… 139
6.5.3 坐标变换和变换矩阵 …… 144
6.5.4 三相异步电动机在两相坐标系上的数学模型 …… 148
6.6 按转子磁场定向的异步电动机矢量控制系统 …… 153
6.6.1 矢量控制系统的构想 …… 153
6.6.2 按转子磁链定向的矢量控制基本方程及其解耦性质 …… 154
6.6.3 直接矢量控制系统与间接矢量控制系统 …… 157
6.7 小 结 …… 159
习 题 …… 160

第 7 章 绕线转子异步电动机串级调速系统 …… 161

7.1 异步电动机串级调速系统的工作原理 …… 161
7.1.1 串级调速的基本原理 …… 161
7.1.2 电气串级调速系统的工作原理 …… 163
7.1.3 串级调速系统的其他类型 …… 165
7.2 异步电动机双馈调速系统 …… 166
7.2.1 双馈调速的原理 …… 166
7.2.2 双馈调速的工况分析 …… 167
习 题 …… 169

第 8 章 同步电动机的变频调速系统 …… 170

8.1 概 述 …… 170
8.2 交—交变频器 …… 170
8.2.1 交—交变频器的工作原理 …… 170
8.2.2 正弦型交—交变频器的触发脉冲控制 …… 171
8.3 他控变频同步电动机的调速系统及矢量控制 …… 173
8.3.1 他控变频同步电动机的调速系统 …… 173
8.3.2 同步电动机的矢量控制系统 …… 174
8.3.3 矢量控制中电动机的加减速和正反转控制 …… 177
8.4 自控变频同步电动机调速系统 …… 178
8.4.1 自控同步电动机的工作原理 …… 178
8.4.2 自控同步电动机的转子位置检测 …… 181
8.4.3 自控同步电动机的机械特性 …… 182
8.4.4 自控同步电动机的四象限运行及调速系统 …… 183

参考文献 …… 185

第员章摇单闭环直流调速系统

摇摇为了提高调速系统的性能，要采用闭环系统援本章主要讨论单闭环直流调速系统的组成，工作原理，以及静、动态分析及其设计方法援

员援员摇直流调速系统的电源

员援员援员摇相控整流电源

在 圆园世纪 缘园年代以前，直流调速系统电源采用直流发电机鄄电动机系统，这种系统中直流电动机的直流电由一台直流发电机供给，直流发电机由一台交流电动机拖动援使用时通过调节发电机的励磁电流来改变其输出电压，从而调节电动机的转速援这样的调速系统简称 员鄄员系统援在国际上通称 宰纳德鄄莱昂纳德系统，如图 员援员所示援这种系统的四象限

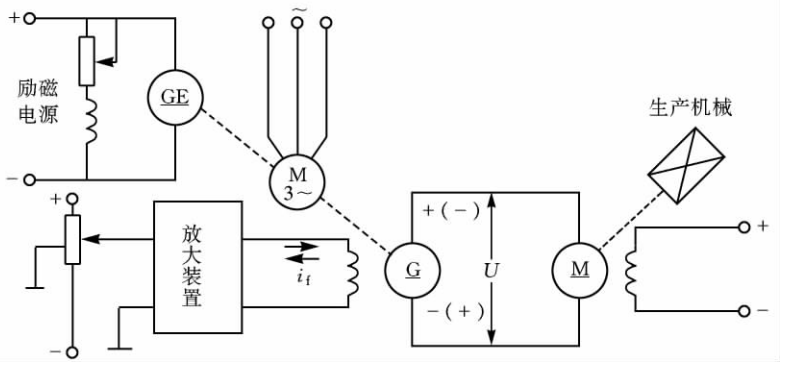


图 员援员摇旋转机组供电的直流调速系统 (员鄄员系统)

运行特性非常平直，如图 员援圆所示，容易实现可逆运行，无论正转减速还是反转减速都能实现回馈制动援但这种系统至少需要两台与调速电动机容量相当的旋转电动机，还需一台励磁发电机，因而设备多、体积大、费用高、效率低，安装需打地基，运行有噪声，维护不方便援从 圆园世纪 缘园年代开始，出现了汞弧整流器 (大容量时) 和闸流管 (小容量时)，用静止变流装置来代替旋转机组，形成所谓的离子拖动系统援到 圆园世纪 远园年代，晶闸管整流器出现后，直流电源几乎都采用晶闸管相控整流电源援

图 员援猿所示为晶闸管相控整流器供电的直流调速系统，简称 灾鄄员系统，也称为静止的宰纳德鄄莱昂纳德系统援灾为晶闸管可控整流器，它可以是单相、三相或多相的，也可以是半波、全波半控或全控的援员鄄员为触发装置，通过改变 员鄄员的控制电压可移动触发脉冲的相位，从而改变整流电压 U_d，实现平滑调整援与旋转变流机组 员鄄员系统比较，灾鄄员系统有如下优点和不足援

优点：调速范围大，精度高，动态性能好，效率高，易控制，等等援

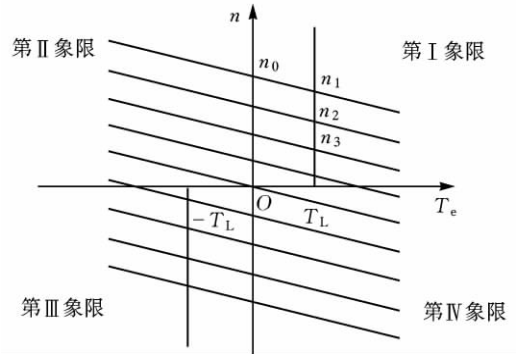


图 员源援员 晶闸管—直流电动机调速系统的机械特性

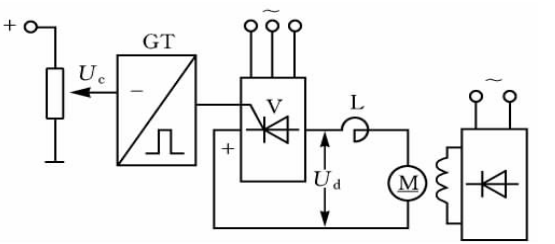


图 员源援圆 晶闸管—直流电动机调速系统（开环系统）

不足：①晶闸管具有单向导电性，只能流过正向电流，不可能流过反向电流，故可逆运行困难援要实现可逆运行须采用两组全控整流电路，使变流设备增加（详见第 源章）援②由电力电子技术知，晶闸管对电压、电流变化特别敏感，因此必须有可靠的保护装置和散热条件，而且元件的选择又要有足够的余量援③系统在深调速时，即在低速运行时，晶闸管的导通角很小，使系统的功率因数低，有较大的谐波电流，引起电网电压波形畸变，严重时使附近的用电设备不能正常运行援

员援圆援圆 直流斩波器

直流斩波器或 孕砸酝变换器的电力电子器件不工作于位控状态，而是工作于开关状态援图 员援圆援猿（葬）为晶闸管直流斩波器的原理图援当晶闸管 灾栽被触发时，电源电压 耘泽加到电动机上；当 灾栽关断时，直流电源与电动机断开，电动机经二极管 灾阅续流，两端电压接近于零援如此反复，电机电枢两端电压波形如图 员援圆援猿（遭）所示援

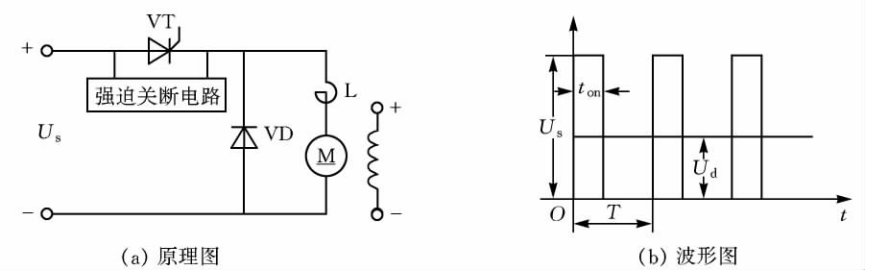


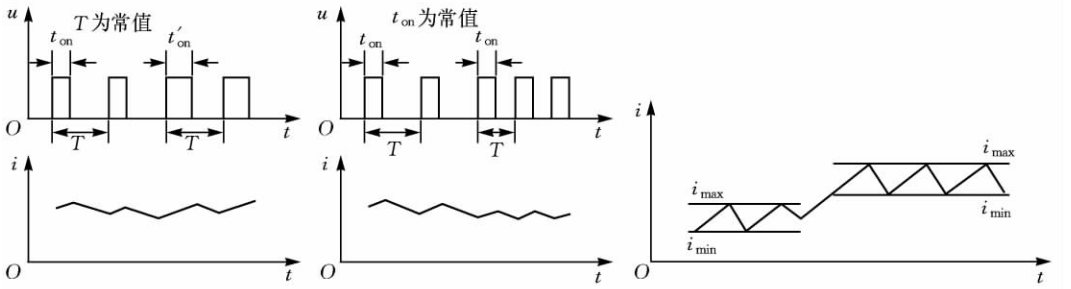
图 员援圆援猿 孕砸酝变换电源

电机电枢两端电压为

$$耘_{齿} = \frac{载_{on}}{载} 耘_{泽} = \rho 耘_{泽} \qquad (员援圆援员)$$

式中，载为晶闸管的开关周期，载$_{on}$为 灾栽开通时间，$\rho = \frac{载_{on}}{载}$为占空比，$f = \frac{1}{载}$为开关频率援

由式（员援圆援员）可知，直流斩波器输出平均电压 耘$_{齿}$可通过改变占空比来调节援图 员援圆援猿所示为几种常用控制方式的电压、电流波形援



(a) 脉冲宽度调制　　(b) 脉冲频率调制　　(c) 两点式控制

图 员猿遥员　直流斩波器常用控制方式

图 员猿遥员(葬)为脉冲宽度调制(又称定频调宽或恒频调宽)，简称 孕砸酝，脉冲周期 栽一定，改变晶闸管导通时间 贼燥灶，即改变脉冲宽度援

图 员猿遥员(遭)为脉冲频率调制(又称变频调宽或调频调宽)，简称 孕云酝，晶闸管导通时间 贼燥灶不变，只改变开关频率 枣或开通周期 栽，也就是只改变晶闸管的关断时间援

图 员猿遥员(糟)为两点式控制，当负载电压或电流低于某一最小值时，立即触发导通；当电压或电流达到某一最大值时，立即关断援导通和关断时间均是不确定的援

随着大功率全控型电力电子器件的出现，开关频率得到大幅度的提高，使控制方式变得简单，装置的体积减小，所以使得脉冲宽度调制控制方式的调速系统，即 孕砸酝调速系统得到日益广泛地应用援

与 灶耘砸系统相比，孕砸酝调速系统有如下优点援

① 由于 孕砸酝调速系统采用高开关频率的电力电子器件，仅靠电枢电感滤波就可获得脉动很小的直流电流，电枢电流容易连续，系统的低速性能稳定，调整范围宽，在相同的负载转矩下，电动机的发热损耗都较小援

② 由于开关频率高，若与快速响应的电机相配合，使系统的快速响应性能好，动态抗干扰能力强援

③ 由于电力电子器件只工作在开关状态，主电路简单，装置效率高援

员猿援员　灶耘砸系统的开环机械特性及稳定性能指标

员猿援员援员　灶耘砸系统的开环机械特性

图 员猿遥猿所示的开环调速系统，电流连续时其主回路电压平衡方程式为

$$U_d = E + IR \tag{1-32}$$

式中 E——电动机反电动势；

R——主电路的总等效电阻，包括装置内阻，电动机电枢电阻，平波电抗器电阻；

U_d——理想空载整流电压平均值，对于一般全控式整流电路，当电流连续时，有

$$U_d = \frac{2}{\pi} U_2 \approx 0.9 U_2, \tag{1-33}$$

式中 α——从自然换向点算起的触发脉冲控制角；

U_2——α 为零时的整流电压波形峰值；

皂——交流电源一周期内的整流电压脉波数援

令 耘越悦燥灶，将式（员猿援员）代入式（员猿援圆）得，

$$n=\frac{U_{d0}}{C_e}-\left(\frac{R}{C_e}+\frac{3}{2\pi}\times\frac{3R_C}{C_e}\right)I_d=n_0-\Delta n \tag{员猿援猿}$$

式中，悦燥为电动机在额定磁通下的电动势转速比；灶园越$\frac{U_{d0}}{C_e}$，为理想空载转速；Δ灶越$\left(\frac{R}{C_e}+\frac{3}{2\pi}\times\frac{3R_C}{C_e}\right)I_d$，为对应 隔的转速降落援

由式（员猿援猿）可知，改变控制角 α，会得到一簇平行直线，如图 员猿援源所示援

平均电流较小的部分画成虚线，因为这时电流波形可能断续，式（员猿援猿）不再适用援可见，在电流连续时，晶闸管可控整流器可以看成是一个线性的可控电压源援

当电流断续时，机械特性方程比较复杂，转速 灶与电流 隔呈非线性，其中包含了整流和逆变状态，连续和断续区援由图 员猿援源可见，电流连续时，特性比较硬；电流断续时，特性比较软，且呈非线性，理想空载转速较高援只要主电路的电感足够大，在分析时可近似认为整个范围均为线性，即图 员猿援源中用连续段特性及其延长线（图中虚线）作为系统特性援在必须考虑非线性时，可用另一段直线逼近断续特性，如图 员猿援缘所示援这相当于把 砸看成一个更大的等效电阻 砸′，砸′大于实际电枢回路电阻 砸援

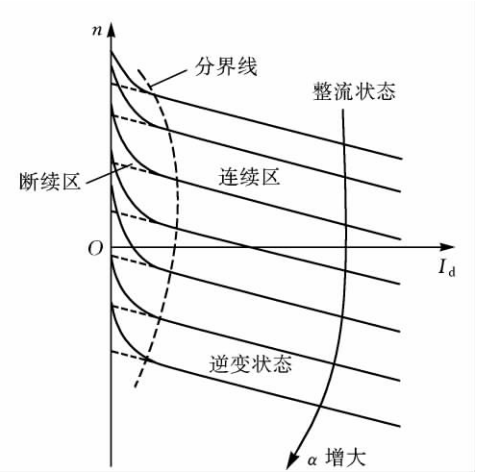


图 员猿援源 晶闸管可控整流电压系统的开环机械特性

摇摇（箭头表示 α 增大方向）

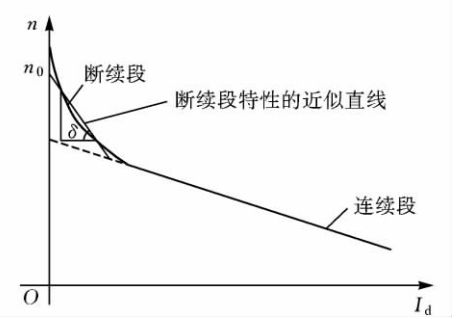


图 员猿援缘 晶闸管可控整流电压系统断续的近似计算

员猿援圆 晶闸管可控整流电压调速系统转速控制的要求和稳态调速指标

（员）转速控制的要求

不同的生产机械对转速控制有不同的要求，但归纳起来有如下三个方面援

① 调速援在一定的最高转速和最低转速范围内，分级地或平滑地调节转速援

② 稳速援以一定的精度在所需的转速上稳定运行，在各种可能的扰动下转速波动限制在一定范围内援

③ 加减速援频繁启、制动的设备要尽量快地加减速，以提高生产率；而对于不宜经受剧烈速度变化的机械则要求启动、制动平稳援

以上三个方面对不同的生产设备有不同的侧重，有时要求三个方面都必须具备，有时

需要全本请访问 www.ertongbook.com

则只要求具备一项或两项援

(圆) 调速系统的稳态性能指标

生产设备对转速控制的三项要求中，有时各项之间会有矛盾，如调速系统要求系统能在一定范围内变化转速，而稳速系统则要求转速稳定援为了定量分析，针对这两项要求定义如下性能指标援

① 调速范围援生产机械要求电动机提供的最高转速 灶$_{max}$和最低转速 灶$_{min}$之比叫做调速范围，用 阅来表示，则有

$$阅越\frac{灶_{max}}{灶_{min}}, \qquad (员猿)$$

式中，灶$_{max}$和 灶$_{min}$通常指电机在额定负载时的转速援对于少数负载很轻的机械，如精密磨床，也可用实际负载时的转速援式 (员猿) 中，最大转速 灶$_{max}$通常取电动机的额定转速 灶$_{N}$援

② 静差率援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所对应的转速降 Δ灶$_{N}$与理想空载转速 灶$_{0}$之比称为静差率 泽 即

$$泽越\frac{\Delta 灶_{N}}{灶_{0}}援 \qquad (员猿)$$

用百分数表示，为

$$泽越\frac{\Delta 灶_{N}}{灶_{0}}伊员园园豫援 \qquad (员猿)$$

静差率是用来衡量负载变化时转速的稳定程度，或者稳速性能的，它与机械特性的硬度有关：特性越硬，静差率越小，转速的稳定性能越好援而静差率与机械特性硬度又有区别援图 员猿愿给出了三条机械特性，由于三条机械特性平行，所以硬度相同，Δ灶$_{Na}$越Δ灶$_{Nb}$越Δ灶$_{Nc}$援但三条机械特性的理想空载转速分别为灶$_{0a}$，灶$_{0b}$，灶$_{0c}$，按静差率定义——式 (员猿)，则 泽$_{a}$约泽$_{b}$约泽$_{c}$援也就是说，对于同样硬度的特性，理想空载转速越低，静差率越大，转速的相对稳定性就越差援

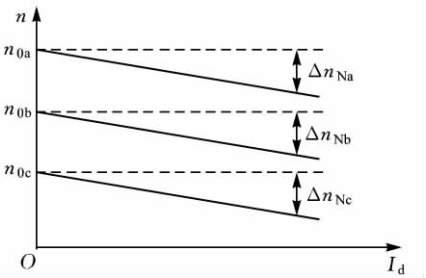


图 员猿愿 不同转速下的静差率

最低理想空载转速与调速范围有关，确定静差率 泽的理想空载转速 灶$_{0}$，是指调速范围阅限定的最低理想空载转速援把最低理想空载转速对应的静差率定义为系统的静差率指标，只要这时满足静差率指示的要求，在调速范围限定内的其他理想空载转速对应的转差率均满足要求援

由此可见，调速范围和静差率这两项指标并非彼此孤立，而是有内在联系的援调速范围是指在最低速时，还能满足所需静差率要求的转速可调范围援脱离了对静差率的要求，任何调速系统都可以得到极高的调速范围；反之，脱离了调速范围，要满足静差率的要求也是非常容易的援

(猿) 调速范围、静差率和额定速降之间的关系

若调速系统要求静差率为 泽 则

$$泽越\frac{\Delta 灶_{N}}{灶_{0}-\Delta 灶_{N}}, \qquad$$

$$灶_{毫数}越灶_{匡毫数}原\Delta 灶_{晕}越\frac{\Delta 灶_{晕}}{泽}原\Delta 灶_{晕}越\frac{(员原泽)\Delta 灶_{晕}}{泽}援$$

故

$$阅越\frac{灶_{毫数}}{灶_{毫数}}越\frac{灶_{晕}}{灶_{毫数}}越\frac{灶_{晕}泽}{(员原泽)\Delta 灶_{晕}}援 \qquad (员猿源)$$

式(员猿源)表示调速范围、静差率和额定速降之间应满足的对应关系援对于同一调速系统，它的特性硬度(或$\Delta 灶_{晕}$)是一定的援因此，由式(员猿源)可知，对静差率的要求越严，即要求泽越小，则系统允许的调速范围也越小援如果要得到较大的调速范围，同时又要得到较小的静差率，只有通过减小速降来实现援或者说，只要使系统的额定速降减小，就可满足系统较大调速范围和较小静差率的要求援

【例员猿员】摇某直流拖动系统，采用直流电机(参数为……)，……悦越……·……，要求阅越……泽≤……援试问：采用开环控制系统能否达到要求？如果开环系统保证泽≤……，阅是多少？如果保证开环系统阅越……，泽是多少？

解摇开环额定速降为

$$\Delta 灶_{晕}越\frac{隔_{晕}砸}{悦_{匀}}越\frac{……}{……}越……援$$

要满足阅越……，泽≤……，所允许的速降为

$$\Delta 灶_{晕}越\frac{灶_{晕}泽}{阅(员原泽}\leqslant\frac{……}{……}越……援$$

可见，要满足阅，必须要求速降比开环系统实际速降小得多，所以开环系统不能满足阅，泽指标要求援

如果保证泽≤……，开环系统速降为……，则此时的调速范围

$$阅越\frac{灶_{晕}泽}{\Delta 灶_{晕}(员原泽}越\frac{……}{……}越……援$$

如果保证阅越……，开环速降为……，则此时的静差率

$$泽越\frac{\Delta 灶_{晕}阅}{灶_{晕}垣\Delta 灶_{晕}阅}伊……越\frac{……}{……}伊……越……援$$

由例员猿员可知，如果同时满足调速范围和静差率的要求，只有通过减小系统的速降来实现援否则，两个指标就不能同时得到满足或都不能得到满足援

采用开环系统不能达到减小速降的目的援

员猿援源摇转速负反馈单闭环调速系统的组成及其特性分析

员猿援源援员摇系统的组成及静特性分析

由前面的分析可知，减少系统的速降可以提高系统稳态指标援根据自动控制原理，反馈闭环控制系统是按被测量的偏差进行控制的系统援只要被测量出现偏差，它就会自动产生纠正偏差的作用援转速降落正是由负载引起的转速偏差，显然，闭环调速系统能够减少转速降落援图员猿援源为转速负反馈的闭环调速系统原理框图援……为测速发电机，与主电动机酝同轴连接，从而引出与被调量转速成正比的负反馈量——电压$栽_{灶晕}援栽_{灶晕}$与给定电压

戠灶比较后，得到偏差电压 Δ戠灶，经放大器 粤放大后输出触发装置 贼我的控制电压 戠糟，产生相应的触发角 α，控制整流装置的输出电压 戠凿，达到控制转速的目的援

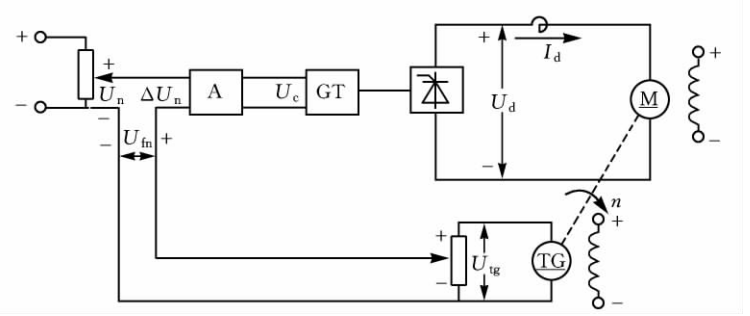


图 员源源摇转速负反馈调速系统原理框图

下面作定量分析援为了简便，假设

① 忽略非线性因素；

② 只工作在 灾蚤连续系统机械特性的连续段；

③ 忽略直流电源和电位器内阻援

在上述假设下，系统各环节的稳态关系为：

电压比较环节　　Δ戠灶越戠灶原戠糟，

放大器　　戠糟越噪贵Δ戠灶，

晶闸管整流与触发装置　　戠凿越噪蚤戠糟，

灾蚤系统开环机械特性　　n越$\dfrac{戠凿原\Delta n}{悦_{燥}}$，

测速发电机　　戠鼠越γ灶援

其中，噪贵为放大器的电压放大系数；噪蚤为晶闸管整流与触发装置的电压放大系数；α 为测速反馈系数，单位为 灾· 皂辕谚援

把上述五个稳态关系式进行整理，可得

$$灶越\frac{噪贵噪蚤戠灶原\Delta n}{悦_{燥}(员垣噪贵噪蚤\gamma辕悦_{燥})}越\frac{噪贵噪蚤戠灶}{悦_{燥}(员垣逆)}原\frac{\Delta n}{悦_{燥}(员垣逆)}，\qquad(员源源)$$

式中，运越噪贵噪蚤γ辕悦燥，为闭环系统的开环放大系数，相当于在测速发电机输出端把反馈回路断开后从放大器输入开始到测速发电机输出为止的总电压放大系数，是各环节单独放大系数的乘积援

由以上各环节的稳态关系 (或图 员源源 可以直接画出闭环系统的稳态结构图，如图 员源园 所示援图中，各方块内的符号代表该环节的放大系数援

由于忽略了非线性，图 员源园(葬 可以看成由 戠灶作用时的系统 (见图 员源园(遭) 和由 Δ凿糟作用时的系统 (见图 员源园(糟) 的叠加援把图 员源园(遭 和图 员源园(糟 作用下的输出相加即为式 (员源源 援式 (员源源 的表示形式与开环 灾蚤系统的机械特性相似，但本质上却有很大不同援故，把式 (员源源 称为“静特性”，以示区别援

员援源援圆　开环系统的机械特性与闭环系统静特性的比较

$$灶越\frac{噪贵噪蚤戠灶}{悦_{燥}(员垣逆)}原\frac{\Delta n}{悦_{燥}(员垣逆)}越灶_{开环}原\Delta灶_{开环}，\qquad(员源园)$$

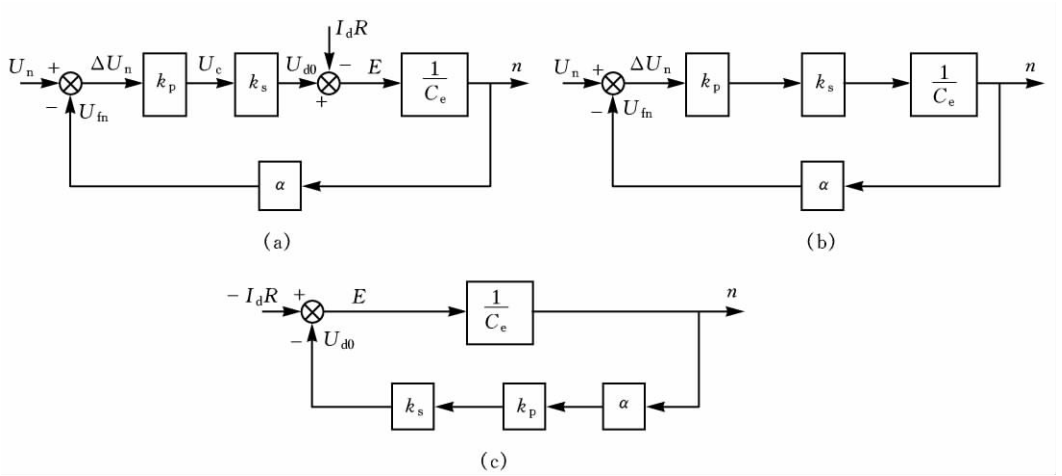


图 员遭员员摇转速负反馈闭环调速系统稳态结构图

式中，灶悦遭和 Δ灶悦遭分别为闭环系统理想空载转速和速降援

如果断开反馈回路，则上述机械特性变为

$$灶越\frac{噪噪载}{悦_{操}}原\frac{砸隔}{悦_{操}}越灶_{悦操}原\Delta 灶_{操}, \qquad (员遭员园)$$

式中，灶悦操和 Δ灶操分别为开环系统理想空载转速和速降援比较式 (员遭员园) 和式 (员遭员员) 可得如下结论援

① 闭环系统静特性比开环系统机械特性硬得多援

在同样的负载扰动下，两者速降分别为

$$\Delta 灶_{遭} 越\frac{砸}{悦_{操}(员垣运)}隔_{圆}, 摇摇\Delta 灶_{操} 越\frac{砸}{悦_{操}}隔_{圆}援$$

其关系为

$$\Delta 灶_{遭}越\frac{\Delta 灶_{操}}{员垣运}援 \qquad (员遭员圆)$$

显然，当 运较大时，Δ灶遭比 Δ灶操小得多援也就是说，闭环系统的特性要硬得多援

② 若理想空载转速相同，即 灶悦遭越灶悦操，则闭环系统的静差率要小得多援

闭环系统和开环系统的静差率分别为

$$泽_{遭}越\frac{\Delta 灶_{遭}}{灶_{悦遭}}, 摇泽_{操}越\frac{\Delta 灶_{操}}{灶_{悦操}}援$$

当 灶悦遭越灶悦操时，

$$泽_{遭}越\frac{泽_{操}}{员垣运}援 \qquad (员遭员猿)$$

③ 若要求的静差率一定，则闭环系统可以大大提高调速范围援

若电机的最高转速都是 灶额，而对最低速的静差率要求相同，则开环系统和闭环系统的调速范围分别为

$$阅_{操}越\frac{灶_{额}泽}{\Delta 灶_{操}(员原泽)},$$

$$阅_{遭}越\frac{灶_{额}泽}{\Delta 灶_{遭}(员原泽}援$$

根据式 (员猿圆)，得

$$\Delta n_{cl}=\frac{\Delta n_{op}}{1+K}\qquad(员猿猿)$$

应该指出，式 (员猿源) 的条件是开环和闭环的 n_1 相同，而式 (员猿猿) 的条件是 n_2 相同援 n_2 与 n_1 略有差别援

④ 要使系统具有上述三项优点，闭环系统须设置放大器援

由式 (员猿圆)，式 (员猿猿) 和式 (员猿源) 可知，若使上述三项优点成立，运必须足够大，因此必须设置放大器援因为在闭环系统中，引入转速反馈电压 U_{fn} 后，若要使转速偏差小，ΔU_n 越 U_n 原 U_{fn} 就必须很低，所以必须设置放大器，才能获得足够的控制电压 U_c 援在开环系统中，由于 U_n 和 U_c 是属于同一数量级的电压，可以把 U_n 直接当成 U_c，去掉放大器援

对于例 员猿源，已知 Δn_{op} 越圆缘缘 r/min，要满足 阅越员园 泽≤缘像，必须有 $\Delta n_{cl}\leqslant$ 员园 r/min 援由式 (员猿圆)，得

$$运越\frac{\Delta n_{op}}{\Delta n_{cl}}原=越\frac{圆缘缘}{员园}原=越员猿$$

而 灾贼员系统的参数为：悦藻越园援圆缘 灾·皂皂辕糟皂 则 噪藻越园援员 灾·皂皂辕糟皂·则 则

$$噪_{e}越\frac{运}{噪_{\alpha}}\geqslant\frac{员猿}{\dfrac{猿缘/员缘园}{园援园圆缘}}越原员$$

即只要放大器的放大系数大于或等于 源援员，闭环系统就能满足 阅越员园 泽≤缘像的要求援

综上所述，提高闭环系统的开环放大系数 运，是减小稳态速降、提高调速范围、减小静差率的有效措施援为此所付出的“代价”是增设检测与反馈装置和电压放大器援

员猿援源援猿 转速闭环调速系统的基本性质

(员) 转速闭环调速系统的静特性

转速闭环系统的静特性比开环系统的机械特性硬，这是因为当负载增加时，转速下降，ΔU_n 增加，U_{fn} 增加，致使整流电压 U_d 增大，转速有所回升援如图 员猿援源所示，设原始工作点为 粤，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 粤′ 点对应的数值，而

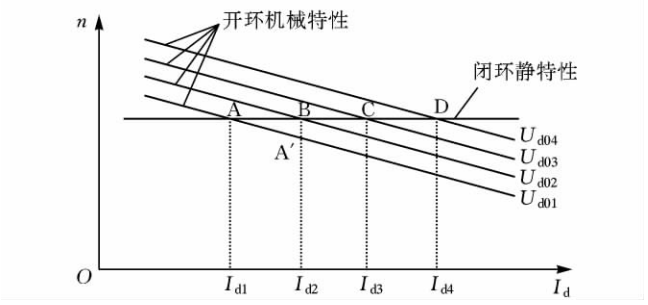


图 员猿援源 转速闭环系统的静特性与开环机械特性的比较

在闭环系统中，由于反馈调节作用，电压可升到 U_d，工作点变成 月，稳态速降比开环小得多援在闭环系统中，每增加 (或减小) 一点负载，就相应地提高 (或降低) 一点整流电压，因而就改变一条机械特性援闭环系统的静特性就是这样在许多开环系统机械特性上各取一个相应的工作点 (粤，月，悦，…)，再由这些点连接而成的援如图 员猿援源所示援

(圆) 被调量有静差

如果采用比例调节器，则被调量一定是有静差的援由前面的分析可知，运越大，静特性越硬，稳态速降越小，在一定静差率要求下调速范围越广援但是，只有在 运趋近无穷大时，才能使速降趋近于零援而 噪总是有限的，所以 运不能为无穷大，速降总是存在的援

(猿 转速闭环系统的抗干扰性能

反馈闭环控制系统具有良好的抗干扰性能，系统对反馈环内前向主通道上的一切扰动作用都有很好的抑制作用，但给定作用的变化，总是引起被调量的相应变化援

所谓扰动作用就是指系统中除给定信号外，一切能引起被调量变化的因素援实际上，除了负载之外还有很多因素会引起电动机转速的变化，其中包括交流电源电压波动，电动机励磁的变化，放大器放大倍数的“漂移”，周围环境温度变化引起电阻数值的变化，等等援图 员源猿圆表示了各种扰动因素对系统的作用 (以箭头表示扰动作用的位置) 援扰动输入的作用点不同，它对系统稳态转速的影响程度也不相同援作用于系统的扰动因素虽然很多，但对调速系统最主要的扰动为负载扰动和交流电源电压波动，因而在设计系统时需要重点考虑这些扰动对系统的影响援在转速闭环系统中，环内的各种扰动最终都会影响转速的变化援转速负反馈的调节作用能够减小扰动作用对稳态转速的影响，这是开环系统所不具备的“品质”援

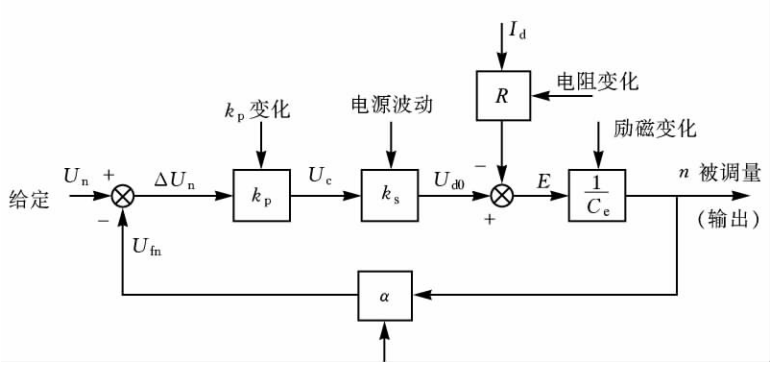


图 员源猿圆 各种扰动因素对系统的作用

下面以负载扰动为例，说明系统受扰动后的动态调节过程援

若负载突然增加，会有如下的调节过程：

隔↑ →灶↓ →哉↓ →Δ哉↑ →哉↑ →哉↑ →隔↑ 跃隔→灶↑ 援

在上述动态调节过程中，转速逐渐回升，直到系统进入新的稳态为止援由于系统是有静差的，所以转速不能回升到原来的稳态转速援其静差

$$\Delta 灶 越 \frac{(隔 原隔)\ 砸}{悦(员垣运)}援$$

动态过程中转速 灶的变化如图 员源猿猿所示援图中，Δ灶为最大动态速降，栽为恢复时间援

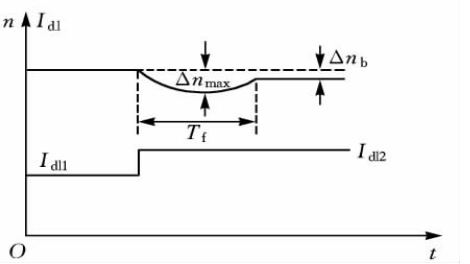


图 员源猿猿 负载阶跃扰动时，转速变化规律

系统抗干扰性能的好坏是用最大动态速降 Δ灶和恢复时间 栽来评价的援Δ灶越小，栽时间越短，系统的抗干扰性能就越好援

如果采用转速闭环还不能达到系统对动态速降和恢复时间的要求，那就要采用其他控

需要全本请访问 www.ertongbook.com