

交直流调速系统的运行与维护

原传煜 谢冬梅 主 编
孙海军 冯珊珊 高 馨 副主编

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

交直流调速系统的 运行与维护

主 编 原传煜 谢冬梅
副主编 孙海军 冯珊珊 高 馨

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 提 要

本书内容分为直流篇、交流篇以及实训篇和实践篇共4篇,全书共分10个模块,依照项目式教学模式编写。书中阐述了交直流电动机调速控制的基本原理和实现方法及应用场合,每个项目的开头明确了学生学习的知识目标 and 能力目标。书中所涉及的内容包括单闭环和双闭环直流调速系统、可逆直流调速系统、直流脉宽调速系统、数字调速、交流调压调速、串级调速、变频调速、矢量控制以及变频器。本书的实训内容与理论教学内容紧密联系,实践部分以西门子6SE70变频器为例。

本书可作为高等院校自动化类专业及相关专业的教材,也可作为电大、高职高专院校的参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

交直流调速系统的运行与维护 / 原传煜, 谢冬梅主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2017. 2
ISBN 978 - 7 - 5682 - 3597 - 6

I. ①交… II. ①原… ②谢… III. ①交流调速 - 控制系统 - 运行②交流调速 - 控制系统 - 维修③直流调速 - 控制系统 - 运行④直流调速 - 控制系统 - 维修 IV. ①TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 016145 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京国马印刷厂

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 13.25

字 数 / 312 千字

版 次 / 2017 年 2 月第 1 版 2017 年 2 月第 1 次印刷

定 价 / 42.00 元

责任编辑 / 王艳丽

文案编辑 / 王艳丽

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

前言

Preface

本书依照教育部高等院校自动化专业建设与教学改革研讨会的会议精神编写。“交直流调速系统的运行与维护”这门课程是自动化类专业的一门重要的专业技术课。为适应高等教育的迅速发展,在教学实施中,我们对教材内容进行了调整。删去了理论推导过程和复杂的计算公式,尽量简化教材,注重实践和结论,以适应高等院校学生的学习需要,本书就是在此基础上编写而成的。

本书内容分为直流篇、交流篇以及实训篇和实践篇共4篇,全书共分10个模块,依照项目式教学模式编写。书中阐述了交、直流电动机调速控制的基本原理和实现方法及应用场合,每个项目的开头明确了学生学习的知识目标和能力目标。书中所涉及的内容包括单闭环和双闭环直流调速系统、可逆直流调速系统、直流脉宽调速系统、数字测速、交流调压调速、串级调速、变频调速、矢量控制及变频器,着重物理概念的阐述和系统工作过程的分析。本书包括部分实训内容和实践内容,实训内容与理论教学内容紧密联系,实践部分以西门子6SE70变频器为例,本书强调工程应用,可根据工程现场需要进行内容取舍。

本书根据当前交直流调速技术的发展现状,侧重反映工业中新的调速技术和调速系统,突出针对性、实用性,加强实践能力的培养,提高学生的实际操作水平和应用能力,提高学生的学习兴趣,充分体现高等教育的特色。让学生能学以致用,了解就业岗位,准确定位就业方向。

本书由原传煜、谢冬梅主编。第一、二、三、十模块由原传煜编写;第四、五模块由冯珊珊编写;第六、七模块由谢冬梅编写;第八模块由孙海军编写;第九模块由高馨编写。全书由原传煜统稿并审核。

由于编者水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

编者

目录

Contents

第一篇 直流篇

► 模块一 单闭环直流调速系统	3
项目一 单闭环直流调速系统的概念和性能指标	3
任务一 直流调速系统的基本概念	3
任务二 直流调速系统的调速性能指标	4
项目二 转速负反馈有静差直流调速系统	7
任务一 单闭环转速负反馈调速系统的组成及静特性	7
任务二 闭环反馈的控制规律	10
任务三 单闭环转速负反馈的动态特性	11
项目三 转速负反馈无静差直流调速系统	14
任务一 比例积分调节器的组成及控制规律	15
任务二 比例积分调节器组成的无静差直流调速系统	15
任务三 电流截止负反馈	17
思考与练习	20
► 模块二 双闭环直流调速系统	21
项目一 双闭环直流调速系统的组成	21
任务一 双闭环直流调速系统的原理	21
任务二 双闭环直流调速系统的自动调节过程	22
项目二 双闭环直流调速系统的静特性	23
任务一 双闭环直流调速系统的稳态结构框图	24
任务二 双闭环直流调速系统的起动过程	25
项目三 双闭环直流调速系统的动态特性	26
任务一 抗负载扰动	26
任务二 抗电网电压扰动	27

思考与练习	27
► 模块三 可逆直流调速系统	29
项目一 可逆直流调速系统的组成	29
任务一 可逆电路的连接形式	29
任务二 电动机的工作状态	31
任务三 晶闸管的工作状态	31
项目二 有环流可逆直流调速系统	33
任务一 可逆系统的环流分析	33
任务二 $\alpha = \beta$ 配合工作制系统的工作原理	34
任务三 脉动环流	35
任务四 有环流可逆直流调速系统的组成和工作原理	37
项目三 无环流可逆直流调速系统	38
任务一 逻辑控制的无环流可逆直流调速系统	39
任务二 错位控制的无环流可逆直流调速系统	45
思考与练习	47
► 模块四 直流脉宽调速系统	48
项目一 脉宽调制原理	48
任务一 PWM 变换器原理	48
任务二 不可逆 PWM 变换器	49
项目二 可逆 PWM 变换器	52
任务一 双极式可逆 PWM 变换器	52
任务二 单极式 PWM 变换器	53
任务三 受限单极式可逆 PWM 变换器	54
任务四 脉宽调速系统的开环机械特性	55
思考与练习	56
► 模块五 计算机控制的直流调速系统	57
项目一 数字化控制	57
任务 计算机数字控制的主要特点	57
项目二 数字控制分析	63
任务一 数字测速	63
任务二 数字滤波	66
任务三 数字 PI	67
思考与练习	68

第二篇 交流篇

► 模块六 交流调速系统	71
项目一 三相异步电动机调速调压系统	71
任务一 交流调速系统的应用	71
任务二 交流调速系统的类型	72
任务三 三相异步电动机调压调速的工作原理	72
任务四 交流调压调速控制系统	75
项目二 绕线式三相异步电动机串级调速系统	76
任务一 串级调速的工作原理	76
任务二 串级调速的控制系统	81
思考与练习	83
► 模块七 变频调速系统	84
项目一 变频器的基本组成	84
任务一 电力电子变频器的主要类型	84
任务二 滤波电路	87
任务三 逆变电路	87
项目二 变频调速的基本原理	88
任务一 V/F 控制	89
任务二 矢量控制	90
项目三 正弦脉宽调制技术	93
任务一 SPWM 调制原理	93
任务二 SPWM 调制波的实现	97
思考与练习	102
► 模块八 变频器	103
项目一 通用变频器的基本结构	103
任务一 变频器的基本结构	103
任务二 通用变频器的硬件结构图	104
任务三 变频器的主要功能	105
项目二 变频器的选择、安装与维护	107
任务一 变频器的选择	107
任务二 变频器的外围设备的选择	109
任务三 变频器的安装	109

任务四 变频器的保养与维护	110
任务五 变频器的故障诊断	111
思考与练习	113

第三篇 实训篇

► 模块九 调速系统实训	117
项目一 单闭环不可逆直流调速系统实训	117
项目二 双闭环晶闸管不可逆直流调速系统实训	121
项目三 晶闸管直流调速系统主要单元的调试实训	126
项目四 逻辑无环流可逆直流调速系统实训	131
项目五 双闭环三相异步电动机调压调速系统实训	137
项目六 双闭环三相异步电动机串级调速系统实训	142
项目七 三相 SPWM、马鞍波、SVPWM 变频调速系统实训	146

第四篇 实践篇

► 模块十 西门子 6SE70 变频器的应用	151
项目一 西门子 6SE70 变频器概述	151
任务一 西门子 6SE70 系列变频器的结构	151
任务二 西门子 6SE70 系列变频器的接线	152
任务三 西门子 6SE70 系列变频器的参数设置	155
项目一的演练	159
项目二 西门子 6SE70 变频器的详细参数设置	161
任务一 详细参数设置（专家参数设定）	161
任务二 设置流程	161
任务三 系统设定应遵照工艺过程的边界条件	165
任务四 详细参数设置（专家参数设定）——系统优化	165
项目二的演练	166
项目三 西门子 6SE70 变频器的输入和输出功能	167
任务一 功能块	167
任务二 输入/输出端子功能的设定	168
任务三 设定值输入	169
项目三的演练	170
项目四 西门子 6SE70 变频器的 BICO 数据组切换功能	174

任务一 参数数据组	174
任务二 功能单元模块	176
项目四的演练	176
项目五 西门子 6SE70 变频器的开环和闭环控制	177
任务一 变频器的控制系统结构	177
任务二 开环控制	177
任务三 闭环控制	179
项目五的演练	181
项目六 西门子 6SE70 变频器与 S7-300PLC 的联机运行	183
任务一 硬件和软件需求	183
任务二 硬件接线图	183
任务三 STEP7 硬件组态及程序编写	184
任务四 变频器的参数设置	185
项目六的演练	186
项目七 西门子 6SE70 变频器的 PROFIBUS 通信	187
任务一 硬件和软件需求	187
任务二 网络配置图	187
任务三 网络组态及参数设置	187
任务四 程序的编写	190
项目七的演练	195
► 附录 DJDK-1 型电动机控制实训装置面板	196
► 参考文献	199

第一篇

直 流 篇

模块一

单闭环直流调速系统

项目一 单闭环直流调速系统的概念和性能指标

知识目标

了解静差率的概念。

熟悉调速系统的性能指标。

理解直流电动机机械特性的变化过程。

掌握直流电动机的调速方法。

能力目标

能够根据不同的负载选择合适的直流电机的调速方法。

能够根据转速与转矩特性曲线分析静态指标。

任务一 直流调速系统的基本概念

直流电动机调速系统在电力拖动调速系统中占据很重要的地位,由于直流电动机具有良好的运行和控制特性,并且直流调速系统的理论和实践都很成熟,因此在许多工业领域得到广泛的应用,如挖掘、轧钢、造纸、纺织等诸多领域。

直流电动机转速表达式为

$$n = \frac{U_d - I_d R_a}{K_e \Phi} \quad (1-1)$$

式中 n ——电动机转速, r/min;

U_d ——电动机电枢电压, V;

I_d ——电动机电枢电流, A;

R_a ——电动机电枢回路电阻, Ω ;

K_e ——电动机结构决定的电动势常数；
 Φ ——励磁磁通，Wb。

由式（1-1）可以总结出，直流电动机有以下 3 种调速方法。

- ①调节电枢端电压 U_d 。
- ②调节励磁磁通 Φ 。
- ③改变电枢回路的电阻 R_a 。

3 种调速方法的机械特性如图 1-1 所示。

如图 1-1（a）所示，当励磁磁通 Φ 和电枢电阻 R_a 一定时，改变电枢端电压 U_d 可以得到一组平行变化的机械特性曲线。由于受电动机绝缘性能的影响，电枢电压只能向小于额定电压的方向变化，所以这种调速方式只能在电动机额定转速以下调速，最低转速取决于电动机低速时的稳定性。这种方法调速范围宽、机械特性硬、动态性能好，当连续改变电动机的电枢电压时，能实现无级平滑调速。因此，调压调速是目前主要的调速方式。

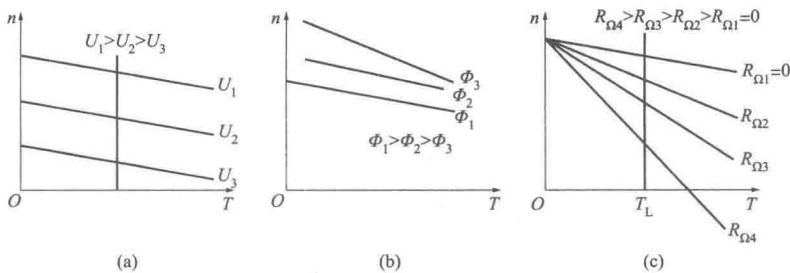


图 1-1 直流电动机 3 种调速的机械特性曲线

如图 1-1（b）所示，当电枢端电压 U_d 和电枢回路的电阻 R_a 不变时，考虑到电动机额定运行时磁路已接近饱和，励磁磁通只能向小于额定磁通的方向变化。因此，减弱磁通时电动机的转速会升高，机械特性曲线出现上翘。但受电动机换向器和机械强度的限制，调速范围很窄。如果调压和调磁相结合，可以扩大调速范围。

如图 1-1（c）所示，当电枢端电压 U_d 和励磁磁通 Φ 一定时，在电动机电枢回路中串接不同的附加电阻，也可以实现电动机的转速调节。但该方法损耗大，只能实现有级调速，并且串接附加电阻后电动机的机械特性明显变软，稳定性差，通常只用于小功率场合。

任务二 直流调速系统的调速性能指标

不同的生产机械，因生产工艺不同，对控制系统的调速性能指标要求也不相同。归纳起来主要有以下 3 个方面。

- （1）调速。电动机在某一负载下运行，它的转速能在最高转速和最低转速之间有级或无级调节。
- （2）稳速。电动机在某一速度下运行时不因外界干扰（负载变化、电网电压波动）而引起转速发生过大的波动，使速度保持一定的精度。
- （3）加、减速控制。要求电动机的起动、制动过程尽可能平稳，并尽量缩短起动、制动时间，以提高生产效率。

从上述 3 个方面考虑,调速系统的性能指标可概括为稳态性能指标和动态性能指标。

一、稳态性能指标

1. 调速范围

电动机拖动额定负载时运行的最高转速与最低转速之比,用 D 表示,即

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

对于调压调速系统而言,电动机的最高转速 $n_{\max}$ 就是其额定转速 n_n 。 D 越大,说明系统的调速范围越宽。

2. 静差率

静差率是指电动机稳定运行时,当负载由理想空载增加至额定负载时,对应的转速降落 Δn_n 与理想空载转速 n_0 之比,用 s 表示,即

$$s = \frac{\Delta n_n}{n_0} = \frac{n_0 - n_n}{n_0}$$

或用百分数表示,即

$$s = \frac{\Delta n_n}{n_0} \times 100\% \quad (1-3)$$

静差率反映了电动机转速受负载变化的影响程度,它与机械特性有关,机械特性越硬,静差率越小,转速的稳定性越高。

然而静差率和机械特性硬度又有区别。如图 1-2 所示, a 和 b 为调压调速系统的机械特性,两者机械特性硬度相同,即额定转速降落 $\Delta n_a = \Delta n_b = 10 \text{ r/min}$;但它们的静差率却不相同,其原因是理想空载转速不同。根据式 (1-3) 的定义, A 点的静差率为 1%, B 点的静差率为 10%。由于 $n_{0a} > n_{0b}$, 所以 $s_a > s_b$ 。

对于机械特性硬度相同的系统而言,理想空载转速越低,静差率越大,转速的相对稳定性也越差。一个调速系统中,如果最低速时的静差率能够达到要求,那么高于最低速时的静差率一般都能达到要求。

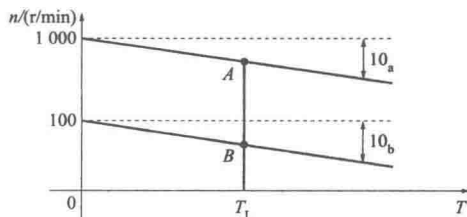


图 1-2 不同转速下的静差率曲线

调速范围和静差率这两项指标是相互联系的。离开了对静差率的要求,调速范围便失去了意义。一个调速系统的调速范围,是指在最低转速时满足静差率要求下系统所能达到的最大调速范围。

3. D 、 s 和 Δn_n 之间的关系

在调压调速系统中,电动机的最高转速即为额定转速,静差率为系统工作在最低转速时的静差率,那么最低转速为

$$n_{\min} = n_{0\min} - \Delta n_n = \frac{\Delta n_n}{s} = \frac{\Delta n_n (1 - s)}{s}$$

则调速范围和静差率与转速降落满足

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{sn_n}{\Delta n_n (1 - s)} \tag{1-4}$$

由式(1-4)可以看出，一个调速系统的机械特性硬度或 Δn 一定时，如果对静差率要求越高，即静差率越小，则系统的调速范围越小。

二、动态性能指标

由于实际系统存在电磁和机械惯性，因此转速的调节会有一个动态响应的过程。这一动态过程的指标分为两大类，即跟随性能指标和抗扰性能指标。

1. 跟随性能指标

当给定信号变化方式不同时，输出响应也不一样。交直流调速系统的跟随性能指标一般用零初始条件下，系统对阶跃输入信号的输出响应过程来表示。阶跃输入时的典型跟随过程如图1-3所示。

(1) 上升时间 t_r 。在阶跃响应过程中，输出量从零开始，第一次上升到稳态值 n_∞ 所经历的时间，称为上升时间。它反映了系统动态响应的快速性。

(2) 超调量 σ 。在阶跃响应过程中输出量超出稳态值的最大偏差与稳态值之比，用百分数表示，即

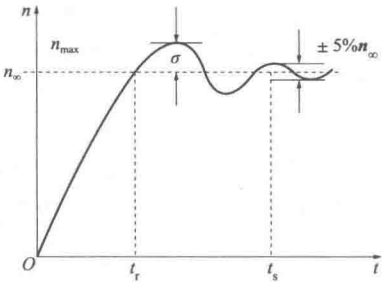


图1-3 典型阶跃响应曲线和跟随性能指标

$$\sigma \% = \frac{n_{\max} - n_{\infty}}{n_{\infty}} \times 100 \% \tag{1-5}$$

(3) 调节时间 t_s 。在阶跃响应过程中，输出量衰减到与稳态值之差进入 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 的允许误差范围之内所需要的时间，称为调节时间，又称为过渡过程时间。它能衡量系统整个调节过程的快慢，调节时间 t_s 越短，系统响应的快速性越好。

2. 抗扰性能指标

当控制系统在稳定运行过程中受到电动机负载变化、电网电压波动等干扰因素的影响时，会引起输出量的变化，经历一段动态过程后，系统总能达到新的稳态。这一恢复过程就是系统的抗扰过程。一般以系统稳定运行中突加负载的阶跃扰动后的过渡过程作为典型的抗扰过程，如图1-4所示。

(1) 动态降落 $\Delta n_{\max} \%$ 。系统稳定运行时，突加一个扰动量后引起的最大转速降落 $\Delta n_{\max}$ 称为动态降落，用输出量的原稳态值 $n_{\infty 1}$ 的百分数来表示。当输出量在动态降落后又恢复到

新的稳态值 $n_{\infty 2}$ 时, 偏差 $(n_{\infty 1} - n_{\infty 2})$ 表示系统在该扰动作用下的稳态降落, 一般动态降落都大于稳态降落。

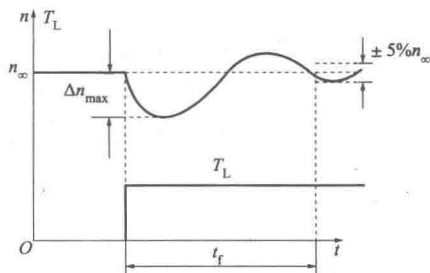


图 1-4 突加负载时的动态响应过程和抗扰性能指标

(2) 恢复时间 t_f 。从阶跃扰动作用开始, 到输出量进入新稳态值 $n_{\infty 2}$ 的 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 所需要的时间。恢复时间越短, 系统的抗扰能力越强。

(3) 振荡次数。振荡次数为在恢复时间内被调量在稳态值上下摆动的次数, 它代表系统的稳定性和抗扰能力的强弱。

项目二 转速负反馈有静差直流调速系统

知识目标

了解开环控制。

熟悉闭环控制系统的组成。

理解闭环和开环机械特性的区别。

掌握反馈控制规律。

掌握负反馈闭环调速系统的特性方程。

掌握负反馈闭环调速系统开环和闭环特性的区别。

能力目标

能够分析有静差直流调速的控制规律。

能够分析闭环控制系统静特性硬的原因。

任务一 单闭环转速负反馈调速系统的组成及静特性

案例: 某一铣床采用直流电动机拖动, 电动机的额定转速 $n_n = 900 \text{ r/min}$, 要求最低转速 $n_{\min} = 900 \text{ r/min}$, 由开环系统决定的转速降落 $\Delta n_n = 80 \text{ r/min}$ 。现要求静差率 $s \leq 0.1$ 。

① 问开环控制的晶闸管直流调速系统能否满足要求?

② 如果不满足怎么办?

依系统要求, 调速范围 $D = \frac{900}{100} = 9$, 要满足 $s \leq 0.1$, $D = \frac{s n_n}{\Delta n_n (1-s)} = \frac{0.1 \times 900}{80 \times 0.9} = 1.25$ 。

很显然, 调速范围不满足要求, 因为系统的转速降落 Δn_n 太大。若要同时满足 $D = 9$ 和

$s \leq 0.1$ 的指标要求，则必须降低 Δn_n ，而满足要求的 Δn_n 依据式 (1-4) 有

$$\Delta n_n = \frac{sn_n}{D(1-s)} = \frac{0.1 \times 900}{9 \times 0.9} \text{r/min} = 11.1 \text{r/min}$$

若要把转速降落从开环调速系统的 80r/min 降低到 11.1r/min，实际上是使调速系统的机械特性变硬，也就是说，电动机的转速基本不受负载变化的影响。根据自控原理，引入一个被调量的负反馈，组成一个闭环控制系统即可解决这一问题。这里引入一个速度反馈信号，组成一个单闭环转速负反馈直流调速系统，如图 1-5 所示。

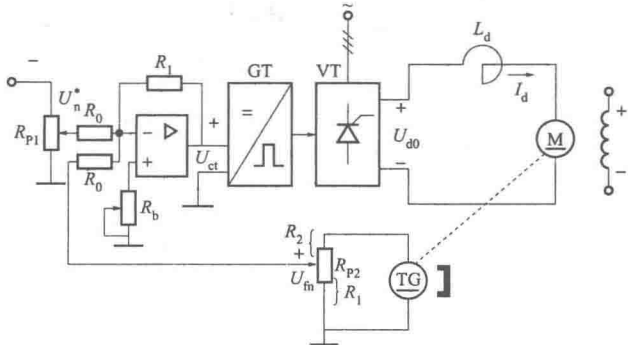


图 1-5 单闭环转速负反馈闭环调速系统原理框图

依据图 1-5 所示的调速系统的原理框图，假设系统各个物理量之间存在线性关系，依照自动控制理论，将其转换成系统的稳态结构，如图 1-6 所示。

依据图 1-6，系统各个环节物理量之间的稳态关系如下。
对于电压比较环节，有

$$\Delta U_n = U_n^* - U_{fn}$$

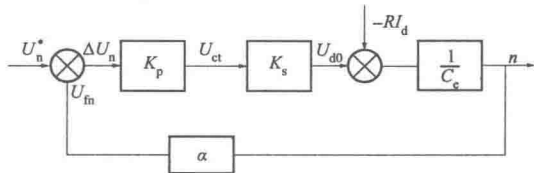


图 1-6 单闭环转速负反馈闭环调速系统的稳态结构

对于放大器，有

$$U_{ct} = K_p \Delta U_{ct}$$

对于晶闸管整流器及触发装置，有

$$U_{d0} = K_s U_{ct}$$

对于转速检测环节，有

$$U_{fn} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} C_e n = \alpha n$$

对于开环机械特性，有

$$n = \frac{U_{d0} - I_d R}{C_e}$$

式中 K_p ——放大器的放大系数；