



高等院校电子信息与电气学科特色教材

电力拖动自动控制系统 与MATLAB仿真

顾春雷 陈中 编著

清华大学出版社



高等院校电子信息与电气学科特色教材

电力拖动自动控制系统 与MATLAB仿真

顾春雷 陈中 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书主要介绍直流和交流调速系统的组成原理和应用,以及调速系统的建模与仿真技术,在适当阐述理论的基础上,重点介绍系统的分析和工程应用,以提高读者处理实际问题的能力。书中遵循理论和实际相结合的原则,以系统控制规律为主线,在强调闭环控制的前提下,由浅入深地介绍了系统的动、静态性能和设计方法及系统的工程实现。还介绍了 MATLAB 及其图形仿真界面 Simulink 的应用基础知识、Simulink 模型库的电机模块的功能和使用,并通过实例介绍了交直流调速系统的仿真方法和技巧。

本书特点是将交、直流调速运动控制技术和 MATLAB/Simulink 仿真技术有机地结合在一起,叙述简练,概念清楚,体现了应用型本科的教学特色。

本书适合作为电气工程及其自动化专业、自动化专业和其他以培养应用型人才为目的的相近专业的教材或教学参考书,也可供有关工程技术人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电力拖动自动控制系统与 MATLAB 仿真/顾春雷,陈中编著. —北京:清华大学出版社,2011.4
(高等院校电子信息与电气学科特色教材)

ISBN 978-7-302-24488-2

I. ①电… II. ①顾… ②陈… III. ①电力传动—自动控制系统—高等学校—教材 ②自动控制系统—系统仿真—软件包, MATLAB—高等学校—教材 IV. ①TP273 ②TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 003740 号

责任编辑:文 怡

责任校对:焦丽丽

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62795954, jsjic@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京季蜂印刷有限公司

装 订 者:三河市兴旺装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:16.5 字 数:399 千字

版 次:2011 年 4 月第 1 版 印 次:2011 年 4 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:29.00 元

产品编号:031847-01

出版说明

随着我国高等教育逐步实现大众化以及产业结构的进一步调整,社会对人才的需求出现了层次化和多样化的变化,这反映到高等学校的定位与教学要求中,必然带来教学内容的差异化和教学方式的多样性。而电子信息与电气学科作为当今发展最快的学科之一,突出办学特色,培养有竞争力、有适应性的人才是很多高等院校的迫切任务。高等教育如何不断适应现代电子信息与电气技术的发展,培养合格的电子信息与电气学科人才,已成为教育改革中的热点问题之一。

目前我国电类学科高等教育的教学中仍然存在很多问题,例如在课程设置和教学实践中,学科分立,缺乏和谐与连通;局部知识过深、过细、过难,缺乏整体性、前沿性和发展性;教学内容与学生的背景知识相比显得过于陈旧;教学与实践环节脱节,知识型教学多于研究型教学,所培养的电子信息与电气学科人才还不能很好地满足社会的需求等等。为了适应 21 世纪人才培养的需要,很多高校在电子信息与电气学科专业建设和课程建设方面都做了大量工作,包括国家级、省级、校级精品课的建设等,充分体现了各个高校重点专业的特色,也同时体现了地域差异对人才培养所产生的影响,从而形成各校自身的特色。许多一线教师在多年教学与科研方面已经积累了大量的经验,将他们的成果转化为教材的形式,向全国其他院校推广,对于深化我国高等学校的教学改革是一件非常有意义的事。

为了配合全国高校培育有特色的精品课程和教材,清华大学出版社在大量调查研究的基础之上,在教育部相关教学指导委员会的指导下,决定规划、出版一套“高等院校电子信息与电气学科特色教材”,系列教材将涵盖通信工程、电子信息工程、电子科学与技术、自动化、电气工程、光电信息工程、微电子学、信息安全等电子信息与电气学科,包括基础课程、专业主干课程、专业课程、实验实践类课程等多个方面。本套教材注重立体化配套,除主教材之外,还将配套教师用 CAI 课件、习题及习题解答、实验指导等辅助教学资源。

由于各地区、各学校的办学特色、培养目标和教学要求均有不同,所以对特色教材的理解也不尽一致,我们恳切希望大家在使用本套教材的过程中,及时给我们提出批评和改进意见,以便我们做好教材的修订改版工作,使其日趋完善。相信经过大家的共同努力,这套教材一定能成

为特色鲜明、质量上乘的优秀教材,同时,我们也欢迎有丰富教学和创新实践经验的优秀教师能够加入到本丛书的编写工作中来!

清华大学出版社

高等院校电子信息与电气学科特色教材编委会

联系人: 文怡 wenyi@tup.tsinghua.edu.cn

前言

电力拖动控制系统综合了电子电路、电机拖动、自动控制理论、微机原理和应用等多门学科的知识,是一门实践性和应用性很强的课程。现代计算机仿真技术为电力拖动控制系统分析提供了崭新的方法,使复杂的电力拖动自动控制系统的分析和设计变得更加容易和有效。本书是根据应用型本科教育教学要求编写的,主要介绍直流和交流调速系统的组成原理和应用,以及调速系统的仿真建模与仿真技术,在适当阐述理论的基础上,重点介绍系统的分析和工程应用,以提高读者处理实际问题的能力。

本书共分8章:第1章介绍单环控制直流调速系统的原理组成及应用;第2章介绍多环控制直流调速系统的原理组成及应用;第3章介绍可逆调速系统和脉宽调速系统的原理组成及应用;第4章为MATLAB简介及直流调速系统仿真,主要有MATLAB/Simulink/Power System简介以及单环控制直流调速系统,转速、电流双闭环调速系统,可逆直流调速系统的建模与仿真技术;第5章介绍交流调压调速系统的原理组成及应用;第6章介绍交流异步电动机变频调速系统的原理组成及应用;第7章介绍绕线转子异步电动机串级调速系统的原理组成及应用;第8章为交流调速系统仿真,主要介绍调压调速系统、正弦波脉宽调制调速系统、基于异步电动机稳态模型的变压变频调速系统、按转子磁链定向矢量控制系统、按定子磁链控制的直接转矩控制系统和双闭环控制的串级调速系统的建模与仿真分析。

本书由盐城工学院顾春雷、陈中编写,顾春雷编写了第1、2、5、7章,陈中编写了第3、4、6、8章和系统的仿真。本书由盐城工学院教授陈荣博士主审,盐城工学院王建冈博士在本书编写过程中提出了许多建设性的意见,同时本书的编写还得到了盐城工学院胡国文教授、南京航空航天大学黄文新教授、南京工程学院汪木兰教授的帮助,南京工业大学电气工程及其自动化专业的董竟宇参与了部分系统的仿真调试,谨在此表示衷心的感谢。本书受盐城工学院教材资金资助出版。

由于编著者水平有限,书中的不足之处在所难免,欢迎广大读者批评指正。

编者

2011年1月

目 录

| | |
|----------------------------------|----|
| 第 1 章 单环控制直流调速系统 | 1 |
| 1.1 开环直流调速系统及调速指标 | 1 |
| 1.1.1 直流电动机的调速方法和方案 | 1 |
| 1.1.2 晶闸管—直流电动机开环调速系统 | 2 |
| 1.1.3 V-M 系统的机械特性 | 2 |
| 1.1.4 生产机械对转速控制的要求及调速指标 | 3 |
| 1.1.5 开环调速系统存在的问题 | 4 |
| 1.2 转速负反馈单闭环有静差直流调速系统 | 5 |
| 1.2.1 调速系统的组成及其工作原理 | 5 |
| 1.2.2 闭环调速系统的静特性 | 6 |
| 1.2.3 开环系统机械特性与闭环系统静特性的比较 | 7 |
| 1.2.4 闭环控制系统的基本特征 | 9 |
| 1.2.5 限流保护——电流截止负反馈 | 10 |
| 1.3 反馈控制闭环直流调速系统的动态分析 | 12 |
| 1.3.1 反馈控制闭环直流调速系统的动态数学模型 | 12 |
| 1.3.2 单闭环有静差调速系统的动态结构图 | 15 |
| 1.3.3 单闭环有静差调速系统的稳定性分析 | 16 |
| 1.4 比例积分控制规律和无静差调速系统 | 17 |
| 1.4.1 积分调节器和比例积分调节器及其控制规律 | 17 |
| 1.4.2 采用 PI 调节器的无静差直流调速系统 | 19 |
| 1.5 电压反馈电流补偿控制的直流调速系统 | 21 |
| 1.5.1 电压负反馈直流调速系统 | 21 |
| 1.5.2 电流正反馈和补偿控制规律 | 22 |
| 思考题与习题 | 24 |
| 第 2 章 多环控制直流调速系统 | 27 |
| 2.1 转速、电流双闭环直流调速系统的组成及其静特性 | 27 |
| 2.1.1 问题的提出 | 27 |
| 2.1.2 转速、电流双闭环直流调速系统的组成 | 28 |
| 2.1.3 双闭环直流调速系统的稳态结构图和静特性 | 28 |
| 2.2 双闭环直流调速系统的数学模型和动态性能分析 | 30 |
| 2.2.1 双闭环直流调速系统的动态结构图 | 30 |
| 2.2.2 起动过程分析 | 31 |

| | | |
|------------|-------------------------------------|-----------|
| 2.2.3 | 双闭环直流调速系统的动态抗扰性能 | 32 |
| 2.2.4 | 转速和电流两个调节器的作用 | 33 |
| 2.3 | 双闭环直流调速系统调节器的工程设计 | 33 |
| 2.3.1 | 调节器工程设计方法的必要性、可能性与基本思路 | 33 |
| 2.3.2 | 控制系统的动态性能指标 | 34 |
| 2.3.3 | 典型Ⅰ型系统以及系统性能指标和参数的关系 | 35 |
| 2.3.4 | 典型Ⅱ型系统以及系统性能指标和参数的关系 | 40 |
| 2.3.5 | 非典型系统的典型化 | 44 |
| 2.4 | 按工程设计方法设计双闭环调速系统的调节器 | 48 |
| 2.4.1 | 电流调节器的设计 | 49 |
| 2.4.2 | 转速调节器的设计 | 52 |
| 2.4.3 | 转速调节器退饱和时转速超调量的计算 | 56 |
| *2.5 | 转速超调的抑制——转速微分负反馈 | 58 |
| 2.5.1 | 带转速微分负反馈双闭环调速系统的基本原理 | 58 |
| 2.5.2 | 退饱和时间和退饱和转速 | 60 |
| 2.5.3 | 转速微分负反馈参数的工程设计方法 | 60 |
| | 思考题与习题 | 61 |
| 第3章 | 直流电动机可逆调速及直流斩波调速系统 | 64 |
| 3.1 | 晶闸管—电动机(V-M)可逆调速系统主电路结构形式 | 64 |
| 3.2 | 可逆调速系统中环流分析 | 67 |
| 3.2.1 | 环流的定义 | 67 |
| 3.2.2 | 直流平均环流产生的原因及消除办法 | 68 |
| 3.2.3 | 瞬时脉动环流及其抑制 | 69 |
| 3.3 | 有环流可逆调速系统 | 70 |
| 3.3.1 | $\alpha=\beta$ 配合控制的有环流可逆调速系统 | 70 |
| 3.3.2 | 可控环流可逆调速系统 | 72 |
| 3.4 | 无环流控制的晶闸管—电动机系统 | 75 |
| 3.4.1 | 逻辑控制无环流可逆调速系统的组成和工作原理 | 75 |
| 3.5 | 直流脉宽调速系统 | 81 |
| 3.5.1 | PWM变换器的工作状态和电压、电流波形 | 81 |
| 3.5.2 | 直流脉宽调速系统的机械特性 | 85 |
| 3.5.3 | 双闭环的PWM可逆直流调速系统 | 86 |
| 3.5.4 | 交流电源供电时的制动 | 87 |
| | 思考题与习题 | 88 |
| 第4章 | MATLAB简介与直流调速系统仿真 | 90 |
| 4.1 | MATLAB简介 | 90 |
| 4.2 | Simulink/SimPower Systems模型窗口 | 90 |

| | | |
|--------------|---------------------------|------------|
| 4.2.1 | Simulink 的工作环境 | 90 |
| 4.2.2 | 模型窗口工具栏 | 94 |
| 4.3 | 有关模块的基本操作及仿真步骤 | 94 |
| 4.4 | 测量模块及显示和记录模块的使用 | 98 |
| 4.5 | 建立子系统和系统模型的封装 | 103 |
| 4.6 | Simulink 模型库中的模块 | 106 |
| 4.7 | SimPower Systems 模型库浏览 | 111 |
| 4.8 | 仿真算法介绍 | 119 |
| 4.9 | 单闭环直流调速系统的仿真 | 122 |
| 4.9.1 | 开环直流调速系统的仿真 | 122 |
| 4.9.2 | 单闭环有静差转速负反馈调速系统的建模与仿真 | 126 |
| 4.9.3 | 单闭环无静差转速负反馈调速系统的建模与仿真 | 128 |
| 4.9.4 | 单闭环电流截止转速负反馈调速系统的建模与仿真 | 130 |
| 4.9.5 | 单闭环电压负反馈调速系统的建模与仿真 | 132 |
| 4.9.6 | 单闭环电压负反馈和带电流正反馈调速系统的建模与仿真 | 133 |
| 4.9.7 | 单闭环转速负反馈调速系统定量仿真 | 135 |
| 4.10 | 双闭环及 PWM 直流调速系统仿真 | 137 |
| 4.10.1 | 双闭环直流调速系统定量仿真 | 137 |
| 4.10.2 | 三闭环直流调速系统仿真 | 139 |
| 4.10.3 | $\alpha=\beta$ 配合控制调速系统仿真 | 141 |
| 4.10.4 | 逻辑无环流可逆直流调速系统仿真 | 145 |
| 4.10.5 | PWM 直流调速系统仿真 | 148 |
| | 思考题与习题 | 152 |
| 第 5 章 | 交流调压调速系统 | 153 |
| 5.1 | 异步电动机改变电压时的机械特性 | 154 |
| 5.2 | 异步电动机变压调速电路 | 155 |
| 5.3 | 闭环控制的调压调速系统及其特性 | 156 |
| 5.3.1 | 具有速度反馈的调压调速系统及其静特性 | 156 |
| 5.3.2 | 闭环变压调速系统的动态结构图 | 157 |
| | 思考题与习题 | 160 |
| 第 6 章 | 交流异步电动机变压变频调速系统 | 161 |
| 6.1 | 变压变频调速的基本控制方式 | 161 |
| 6.2 | 异步电动机电压—频率协调控制时的机械特性 | 162 |
| 6.2.1 | 恒压恒频正弦波供电时异步电动机的机械特性 | 162 |
| 6.2.2 | 基频以下电压—频率协调控制时的机械特性 | 163 |
| 6.2.3 | 基频以上恒压变频的机械特性 | 165 |
| 6.3 | 电力电子变频器的主要类型 | 165 |

| | | |
|------------|----------------------------|------------|
| 6.3.1 | 交-直-交和交-交变压变频器 | 165 |
| 6.4 | 电压源型和电流源型逆变器 | 168 |
| 6.5 | 变压变频调速系统中的脉宽调制技术 | 170 |
| 6.5.1 | PWM变频调速系统中的功率接口 | 170 |
| 6.5.2 | 正弦波脉宽调制技术 | 175 |
| 6.5.3 | 电流滞环跟踪控制技术 | 178 |
| 6.5.4 | 电压空间PWM矢量控制技术 | 179 |
| 6.6 | 基于异步电动机稳态模型的变压变频调速系统 | 185 |
| 6.7 | 异步电动机的动态数学模型和坐标变换 | 189 |
| 6.7.1 | 异步电动机动态数学模型 | 189 |
| 6.7.2 | 坐标变换和变换矩阵 | 193 |
| 6.8 | 三相异步电动机在不同坐标系上的数学模型 | 198 |
| 6.9 | 基于动态模型按转子磁链定向的矢量控制系统 | 200 |
| 6.9.1 | 矢量控制系统的基本思路 | 200 |
| 6.9.2 | 按转子磁链定向的矢量控制方程及其解耦作用 | 201 |
| 6.9.3 | 转子磁链模型 | 203 |
| 6.10 | 磁链开环转差型矢量控制系统——间接矢量控制 | 204 |
| 6.11 | 转速、磁链闭环控制的矢量控制系统——直接矢量控制系统 | 205 |
| | 思考题与习题 | 206 |
| 第7章 | 绕线转子异步电动机调速系统 | 208 |
| 7.1 | 绕线转子异步电动机串级调速原理 | 208 |
| 7.1.1 | 异步电动机转子附加电动势时的工作情况 | 208 |
| 7.1.2 | 串级调速的各种运行状态及功率传递关系 | 209 |
| 7.1.3 | 串级调速系统的基本类型 | 210 |
| 7.2 | 串级调速系统的性能 | 213 |
| 7.2.1 | 串级调速系统的机械特性 | 213 |
| 7.2.2 | 串级调速装置的电压和容量 | 217 |
| 7.2.3 | 串级调速系统的效率 | 218 |
| 7.2.4 | 串级调速系统的功率因数 | 220 |
| 7.3 | 转速、电流双闭环串级调速系统 | 220 |
| 7.3.1 | 双闭环控制串级调速系统的组成 | 221 |
| 7.3.2 | 串级调速系统的动态数学模型 | 221 |
| 7.3.3 | 串级调速系统调节器参数的设计 | 223 |
| 7.3.4 | 串级调速系统的起动方式 | 223 |
| 7.4 | 超同步串级调速系统 | 224 |
| 7.4.1 | 超同步串级调速系统的工作原理 | 225 |
| 7.4.2 | 超同步串级调速系统的再生制动 | 225 |
| | 思考题与习题 | 226 |

| | |
|--------------------------------------|-----|
| 第 8 章 交流调速系统的 MATLAB 仿真 | 227 |
| 8.1 调压调速系统的仿真 | 227 |
| 8.1.1 交流调速系统仿真中常用模块简介 | 227 |
| 8.1.2 单闭环交流电动机调压调速系统的建模与仿真 | 229 |
| 8.2 变频调速系统的仿真 | 231 |
| 8.2.1 SPWM 内置波调速系统仿真 | 231 |
| 8.2.2 SPWM 外置波调速系统仿真 | 233 |
| 8.3 电流滞环跟踪控制调速系统仿真 | 234 |
| 8.4 电压空间矢量调速系统仿真 | 237 |
| 8.5 转速开环恒压频比的交流调速系统仿真 | 240 |
| 8.6 转速、磁链闭环控制的矢量控制系统仿真 | 241 |
| 8.7 绕线转子异步电动机双馈调速系统的仿真 | 246 |
| 思考题与习题 | 248 |
| 参考文献 | 249 |

第1章

单环控制直流调速系统

1.1 开环直流调速系统及调速指标

1.1.1

直流电动机的调速方法和方案

直流电动机的转速与电动机其他参数的关系为

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

式中 n ——电动机转速(r/min)；

U ——电枢电压(V)；

I_a ——电枢电流(A)；

R_a ——电枢回路总电阻(Ω)；

K_e ——电动机的电动势常数；

Φ ——励磁磁通(Wb)。

由式(1-1)可知,直流电动机的调速方法有3种:①改变电枢电压调速;②改变励磁磁通;③改变接于电枢回路中的附加电阻。第3种调速方法损耗较大,机械特性软,故很少应用,工程上常用调压调速方法。

调压调速系统需要电压可调的可控直流电源,常用的可控直流电源有以下几种,相应的直流调速系统也有下面几种。

(1)旋转变流机组:主要由交流电动机和直流发电机构成的机组,向直流电动机提供可调直流电压。这种系统通常称为旋转变流机组供电的直流调速系统,简称G-M系统。

(2)静止可控整流器:用静止的可控整流器把交流电整流成为直流电,向电动机提供可调直流电压。如果用晶闸管构成可控整流器向电动机供电,则称为晶闸管—电动机调速系统,简称V-M直流调速系统,这种系统目前国内外应用广泛。

(3)直流斩波器或脉宽调制变换器:在铁道电力机车、工矿电力机车、城市电车和地铁电机车、电动汽车等电力牵引设备上,常采用直流串励或复励电动机,由恒压直流电网供电。过去用切换电枢回路电阻的方法来控制电机的起动、制动和调速,在电阻中耗电很大。为了节能并实行无触点控制,现在多改用电量电子开关器件,如快速晶闸管、GTO、IGBT等。采用简单的单管控制时,称为直流斩波器,后来逐渐发展成采用各种脉冲宽度调制开关的电路,统称脉宽调制变换器。

1.1.2

晶闸管一直流电动机开环调速系统

图 1-1 为晶闸管一直流电动机调速系统原理图,图中 VT 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 来移动触发脉冲的相位,即可改变平均整流电压 U_d ,从而实现平滑调速。图中 L 是平波电抗器,主要用来限制电流脉动并使电枢电流连续,如果由于负载太轻或晶闸管移相控制角较大等原因,使电枢电流不连续,会造成电动机机械特性很软,甚至引起系统振荡,工作不稳定。因此工程上一般都要设置平波电抗器。

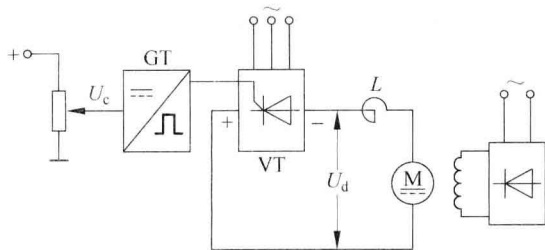


图 1-1 晶闸管一直流电动机调速系统(V-M 系统)原理图

和旋转变流机组及离子拖动变流装置相比,晶闸管整流装置不仅在经济性和可靠性上都有很大提高,而且在技术性能上也显示出较大的优越性。晶闸管可控整流器的功率放大倍数在 10^4 以上,其门极电流可以直接用电子控制,不再像直流发电机那样需要较大功率的放大器。在控制作用的快速性上,交流机组是秒级,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。

晶闸管整流器对过电压、过电流和过高的 du/dt 与 di/dt 都十分敏感,其中任一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装置和符合要求的散热条件;当系统在低速运行时,晶闸管导通角很小,致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,甚至造成所谓的“电力公害”,在这种情况下,必须增设无功补偿和谐波滤波装置;由于晶闸管的单向导电性,不允许电流反向,这给系统的可逆运行造成了困难。

1.1.3

V-M 系统的机械特性

1. 电流连续时的机械特性

当电流连续时,V-M 系统的机械特性方程式为

$$n = \frac{1}{C_e}(U_{d0} - I_d R) = \frac{1}{C_e} \left(\frac{m}{\pi} U_m \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha - I_d R \right) \quad (1-2)$$

式中 C_e ——电机在额定磁通下的电动势系数, $C_e = K_e \Phi$ 。

由式(1-2)可知,V-M 系统的机械特性曲线是一组向下倾斜的平行直线,其斜率为 R/C_e ,理想空载转速 n_0 为

$$n_0 = \frac{U_m}{C_e} \cos \alpha \quad (1-3)$$

当 α 增大时,理想空载转速 n_0 下降,其机械特性曲线如图1-2所示。

图1-2中电流较小的部分画成虚线,表明这时电流波形可能断续,式(1-2)已经不适用了。上述结论说明,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。

2. 电流断续时的机械特性

当负载电流较小或回路电感量不够大,致使电动机电流断续时,调速系统的机械特性变得很复杂,这里不作分析推导,此时调速系统机械特性如图1-3所示。

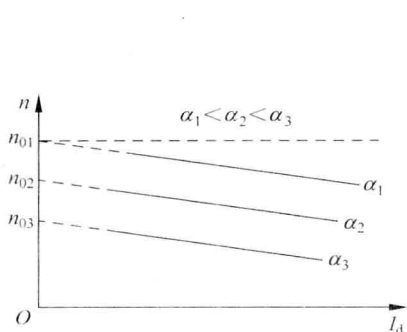


图 1-2 电流连续时 V-M 系统的机械特性

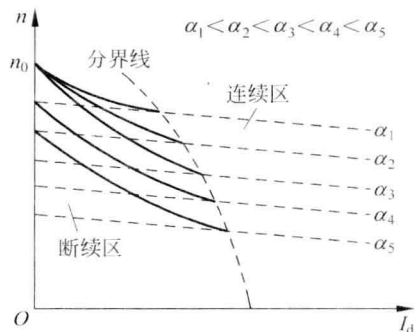


图 1-3 电流断续时 V-M 系统的机械特性

比较图1-2和图1-3可见,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。

1.1.4

生产机械对转速控制的要求及调速指标

根据各类生产机械对调速系统提出的控制要求,调速指标一般可以概括为静(稳)态和动态调速指标。静态调速指标要求电力拖动自动控制系统能在最高转速和最低转速的范围内平滑地调节转速,并要求在不同运行转速时速度要稳定。动态调速指标要求启动、制动快速且平稳;当稳定在某一设定转速上运行时,受到负载变化、电源电压波动等因素的影响尽可能小些。

调速系统的静态品质好坏,可用调速范围和静差率两个指标来衡量。

1. 调速范围

生产机械要求电动机在额定负载时所提供的最高转速 n_{\max} 与最低转速 n_{\min} 之比称为调速范围,通常表示为

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} \quad (1-4)$$

对于不用弱磁的调速系统,电动机的最高转速就是其额定转速 n_N 。

2. 静差率

系统在某一转速下稳定运行,当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 之比称为静差率,表示为

$$S = \frac{\Delta n_N}{n_0} \quad (1-5)$$

用百分数表示

$$S = \frac{\Delta n_N}{n_0} \times 100\% \quad (1-6)$$

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。

但是静差率和机械特性硬度又是有区别的,调压调速系统在不同电压下的机械特性是相互平行的,它们的机械特性硬度相同,额定负载时的速降也相等,但它们的静差率却不同,因为两者的理想空载转速不一样。从静差率定义可知,理想空载转速高的对应静差率小,理想空载转速低的对应静差率较大,因此一个调速系统的静差率应是最低转速时的静差率,即

$$S = \frac{\Delta n_N}{n_{0\min}} = \frac{\Delta n_N}{n_{\min} + \Delta n_N} \quad (1-7)$$

3. 调速范围和静差率的关系

由式(1-7)解得 n_{\min} ,代入式(1-4)可得

$$D = \frac{n_N S}{\Delta n_N (1 - S)} \quad (1-8)$$

式(1-8)表示调速范围、静差率和转速降落三者之间的关系,表明以下几点:

(1) 调速范围和静差率这两项指标是相互联系的,并不是彼此孤立的,因此必须同时提出要求才有实际意义。

(2) 式(1-8)是按最低转速时对应的静差率推导出来的,设计时必须按最低转速的静差率进行设计,如果低速时的静差率能满足设计要求,那么较高转速的静差率自然就能更好地满足要求了。

(3) 只有设法减小静态速降 Δn_N 才能扩大调速范围,减小静差率,提高转速的稳定度。各类生产机械的工艺要求不同,对调速系统提出的静态指标(D 与 S)往往也有所不同。

1.1.5

开环调速系统存在的问题

例 1-1 设拖动某生产机械的电动机额定转速为 900r/min,要求最低转速为 100r/min,额定负载时的静态速降 $\Delta n_N = 80$ r/min,在最低转速时静差率 $S = 0.1$,试问 V-M 开环调速系统能否满足要求?

解 生产机械要求的调速范围为

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{900}{100} = 9$$

而开环调速系统能达到的调速范围为

$$D = \frac{n_N S}{\Delta n_N (1 - S)} = \frac{900 \times 0.1}{80 \times (1 - 0.1)} = 1.25$$

可见开环调速系统不能满足调速范围为 9 的要求。如果能使 Δn_N 减小到

$$\Delta n_N = \frac{n_N S}{D(1-S)} = \frac{900 \times 0.1}{9 \times (1-0.1)} = 11.11$$

就可以同时满足调速系统的静态性能指标 D 与 S 的要求了。 ■

上例说明开环调速系统在满足静差率要求下能达到的调速范围是很小的,其根本原因就是额定负载时静态速降太大,这是开环调速系统存在的一个主要问题。

另外,当负载发生变化(扰动)时,比如负载电流增加,如果没有人工进行干预,由于主回路电阻压降 $I_a R$ 增大,使加到电枢两端的电压减小,这是导致转速降低的实质性原因,因此开环调速系统没有抵抗扰动的能力。这也是开环调速系统存在的一个主要问题。

由上面分析可见,开环调速系统只能适用于调速精度和调速范围要求低的场合,如果对调速系统的静态性能指标要求较高,必须设法减小静态速降,采用反馈控制的闭环调速系统是减小或消除静态速降的一个有效途径。

1.2 转速负反馈单闭环有静差直流调速系统

1.2.1

调速系统的组成及其工作原理

图 1-4 为转速负反馈单闭环有静差直流调速系统的组成原理图,该系统与图 1-1 所示的开环 V-M 系统比较增加了一个速度闭环控制环节:测速装置、速度比较及速度调节器。测速装置的形式、类别很多,这里仅以直流测速发电机为例。在电动机轴上装上一台测速发电机 TG,引出与转速成正比的反馈电压 U_n ,与给定电压 U_n^* 比较后,得偏差电压 ΔU_n ,经放大器 A 产生触发装置所需要的控制电压 U_c ,用以控制电动机的转速。

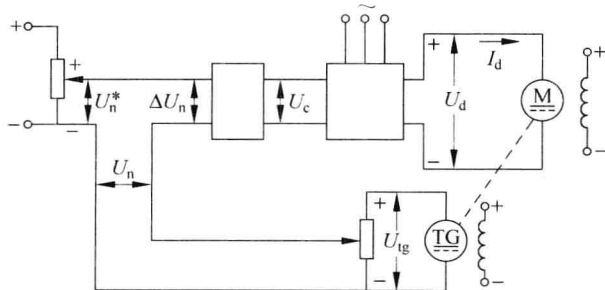


图 1-4 转速负反馈单闭环有静差直流调速系统原理框图

系统调(节)速(度)过程如下: U_n^* 值改变 $\rightarrow U_c$ 值改变 $\rightarrow \alpha$ (移相控制角)大小改变 $\rightarrow U_d$ 值改变 \rightarrow 转速 n 改变。

闭环系统稳定转速过程即抗干扰调节过程如下: 设负载发生变化,比如 $I_d \uparrow \rightarrow n \downarrow \rightarrow U_n \downarrow \rightarrow \Delta U_n \uparrow \rightarrow U_c \uparrow \rightarrow \alpha \downarrow \rightarrow U_d \uparrow \rightarrow n \uparrow$, 经过如此反复自动调节,首先抑制转速的急剧下降,然后转速逐步回升,直到转速基本上回升到给定转速时调节过程才停止,系统又进入稳定运行状态。可见,当负载变化时,整流器输出电压也相应变化,这是闭环系统能基本维持转速不变的实质原因。

1.2.2

闭环调速系统的静特性

从图 1-4 可以看出,转速负反馈闭环调速系统是由一些典型环节组成的,所以首先要确定系统中各个环节输入、输出的静态关系,然后在此基础上建立系统的静特性方程式,以便讨论分析系统的静特性。

为了抓住主要矛盾和分析方便,先作如下的假定:

- (1) 忽略各种非线性因素,各典型环节输入输出都为线性关系。
- (2) 忽略控制电源和电位器的内阻。

这样,各环节的稳态关系如下:

$$\text{电压比较环节} \quad \Delta U_n = U_n^* - U_n$$

$$\text{放大器} \quad U_c = K_p \Delta U_n$$

$$\text{晶闸管触发装置与整流桥} \quad U_{d0} = K_s U_c$$

$$\text{直流电动机转速} \quad n = \frac{U_{d0} - I_d R}{C_e}$$

$$\text{测速发电机} \quad U_n = \alpha n$$

式中 K_p ——放大器的电压放大系数;

K_s ——晶闸管触发装置与整流桥的电压放大系数;

α ——转速反馈系数。

根据以上 5 个关系式联立求解并整理后可得转速负反馈单闭环调速系统的静特性方程式为

$$n = \frac{K_p K_s U_n^*}{C_e (1 + K)} - \frac{R I_d}{C_e (1 + K)} \quad (1-9)$$

式中, $K = K_p K_s \alpha / C_e$ 称为闭环系统的开环放大系数,它相当于把转速负反馈信号输出端的引线断开,从放大器的输入端起直到测速反馈输出端为止的各个环节放大系数的乘积。

式(1-9)表明了闭环调速系统电动机转速与负载电流(或转矩)的稳态关系,它在形式上与开环机械特性相似,但在本质上有很大的不同,故称之为“静特性”,以示区别。

闭环调速系统的静特性方程式也可以用稳态结构图运算的方法求得,根据上面给出的各个环节静态输入输出的关系,可画出图 1-5 所示的转速负反馈单闭环有静差直流调速系统的稳态结构图,图中各方框内的符号代表该环节的放大系数(传递系数),对于线性系统可应用叠加原理,首先分别求出给定电压和扰动单独作用时的对应输出量,然后把两者叠加起来,则可求得系统的静特性方程。

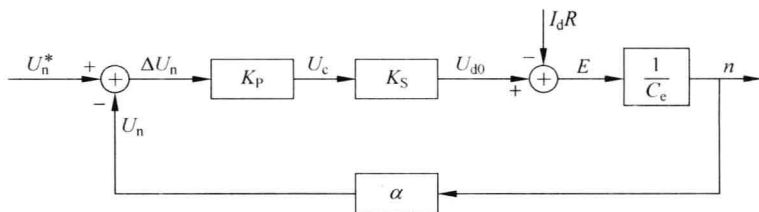


图 1-5 转速负反馈单闭环有静差直流调速系统的稳态结构图