



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

江苏省高等学校精品教材

JIAOZHILIU TIAOSUXITONG
YU MATLAB FANGZHEN

交直流调速系统 与MATLAB仿真

周渊深 主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

江苏省高等学校精品教材

要 容 内

JIAOZHILIU TIAOSUXITONG
YU MATLAB FANGZHEN

交直流调速系统 与 MATLAB 仿真

主编 周渊深

编写 宋永英 朱希荣

冯 源

主审 张万忠

江苏工业学院图书馆
藏书章



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。本书主要介绍典型的直流和交流调速系统,以及调速系统的仿真技术,是一本将交直流调速技术和 MATLAB 仿真技术有机结合在一起的新颖教材,它满足了应用型本科的教学需要。全书共分 7 章,主要内容包括直流调速系统及其仿真、直流调速系统的动态设计及其仿真、直流脉宽调速系统及其仿真、交流调压调速系统和串级调速系统及其仿真、交流异步电动机变频调速系统及其仿真、交流异步电动机矢量控制变频调速系统及其仿真、同步电动机调速系统及其仿真。另外,本书还附有实验及课程设计指导书。

本书可作为高等学校电气信息类专业教材,也可作为高职高专相关专业教材,还可作为工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

交直流调速系统与 MATLAB 仿真/周渊深主编;宋永英等编写. —北京:中国电力出版社,2007

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5083-7395-9

I. 交… II. ①周…②宋… III. ①直流电机—调速—系统仿真—软件包, MATLAB—高等学校—教材②交流电机—调速—系统仿真—软件包, MATLAB—高等学校—教材 IV. TM330.12
TM340.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 091835 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 12 月第一版 2007 年 12 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 22.75 印张 556 千字

定价 36.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

本书是根据应用型本科教学要求而编写,主要介绍典型的直流和交流调速系统,以及调速系统的仿真技术。本书遵循理论和实际相结合的原则,使学生既能掌握各种系统的基本原理,又能掌握这类系统的分析方法及应用。本书注重反映工业中新的调速技术、调速系统,将交流和直流调速系统融合在一本书中。

本书内容选材合理,理论联系实际,强调工程应用,根据工程现场要求进行内容取舍。具有如下特点:①本着实用的原则,尽量简化理论推导,注重物理概念的阐述与分析;②主要理论教学内容配有相关的实例分析和仿真实验,做到学以致用;③书中安排了实验及课程设计指导书,将实训内容与理论教学内容紧密结合;④每章开头有内容提要,章尾有小结和习题。

《交直流调速系统》是一门实践性很强的专业课程。为了加强实践教学内容,本教材利用作者的科研成果,首次运用基于调速系统电气原理结构框图的仿真技术,完成了交直流调速系统中典型系统的仿真实验。

全书除绪论、实验、课程设计指导书和附录外,分为七章:第一章为直流调速系统及其仿真,按照系统由简单到复杂的发展过程,系统地介绍了直流开环调速系统、单闭环调速系统、转速电流双闭环调速系统、三环调速系统、直流可逆调速系统及其仿真技术。着重介绍闭环控制系统基本概念的建立、系统的工程实现,学习分析调速系统的基本方法,重点讨论可逆系统中的环流问题及相关处理技术,并且对上述介绍的典型调速系统进行了建模与仿真实验。第二章为直流调速系统的动态设计及其仿真,首先介绍了传统的频率域 Bode 图设计方法,然后重点介绍了简洁的直流调速系统的工程设计方法,最后介绍了先进的内模控制设计方法,并进行不同方法的性能比较。第三章介绍了直流脉宽调速系统及其仿真,概要介绍了直流 PWM-M 调速系统,以及直流 PWM-M 调速系统的仿真。第四章介绍交流调压调速系统和串级调速系统及其仿真,注重与直流调速系统进行对比分析,给出了交流调压调速系统和串级调速系统的仿真实例。第五章介绍了交流异步电动机的变频调速系统及其仿真,重点讨论了各种变频器尤其是 SPWM 变频技术以及由其构成的变频调速系统,并进行了系统的仿真。第六章重点介绍了矢量控制技术、矢量控制变频调速系统及其调节器的设计方法,并进行了系统的仿真。第七章介绍了同步电动机调速系统及其永磁同步电动机调速系统的仿真。全书按 64 学时理论教学内容编写,仿真实验可由学生在课后时间利用计算机自行完成,实物实验可结合课程教学安排 8~12 学时进行,复杂和大型实验可安排在专业实习中进行,课程设计时间以 1~2 周为宜。

本书是一本将交直流调速技术和 MATLAB 仿真技术有机结合在一起的新颖教材,它选择了典型的交直流调速系统为基本内容;然后将 MATLAB 仿真技术的内容穿插到“交直流调速系统”的各章节,以体现其针对性。但仿真技术的内容也可自成体系。调速技术和仿真技术两内容既有机结合,又可各自独立,自成体系。即将附录与各章最后的仿真内容组合起来,就是调速系统的 MATLAB 仿真技术的内容,其余内容即为交直流调速技术的基本

内容。

本书由淮海工学院周渊深教授主编，并编写了第一、二、六章；朱希荣老师编写了绪论、第四、五、七章；宋永英高级实验师编写了实验和课程设计指导书、附录以及第三章，并对全部实物实验进行了试做；冯源实验师完成了仿真实验的调试和相关内容的编写；周玉琴老师绘制了本书插图，全书由周渊深统稿。

本书由淮海工学院张万忠、张春光两位教授主审，提出了许多衷恳和建设性的意见，在此表示诚挚的谢意。江苏省溧阳市电子电器设备厂的许开其高级工程师也审阅了本书并提出了修改意见。在编写本书的过程中参阅和利用了部分兄弟院校的教材及国内外文献资料，对原作者也一并致谢。

由于编者水平有限和编写时间比较仓促，书中疏漏和不妥之处，敬请读者批评指正。

编著者

2007年12月

目 录

前言	1
绪论	1
第一章 直流调速系统及其仿真	7
第一节 直流调速系统的基本概念	7
第二节 单闭环转速负反馈有静差直流调速系统	11
第三节 其他反馈形式在调速系统中的应用	21
第四节 转速负反馈无静差直流调速系统	24
第五节 转速电流双闭环调速系统	28
第六节 三环调速系统	33
第七节 可逆调速系统的可逆电路	34
第八节 晶闸管单环直流调速系统的 MATLAB 仿真	54
第九节 晶闸管多环直流调速系统的 MATLAB 仿真	67
第十节 晶闸管直流可逆调速系统的 MATLAB 仿真	73
本章小结	80
习题与思考题	83
第二章 直流调速系统的动态设计及其仿真	86
第一节 单闭环直流调速系统的动态分析	86
第二节 多环直流调速系统的动态分析	94
第三节 多环调速系统的工程设计方法	98
第四节 工程设计方法在双闭环直流调速系统中的应用	111
第五节 多环调速系统的内模控制设计方法	120
第六节 基于晶闸管直流调速系统动态结构图的 MATLAB 仿真	125
本章小结	126
习题与思考题	128
第三章 直流脉宽调速系统及其仿真	130
第一节 直流脉宽调速系统概述	130
第二节 PWM 变换器和 PWM-M 系统开环机械特性	130
第三节 PWM-M 直流调速系统	137
第四节 直流脉宽调速系统的 MATLAB 仿真	143
本章小结	146
习题与思考题	146
第四章 交流调压调速系统和串级调速系统及其仿真	148
第一节 概述	148

第二节 交流异步电动机调压调速系统	149
第三节 绕线式异步电动机串级调速系统	159
第四节 交流调压调速系统和串级调速系统的 MATLAB 仿真	173
本章小结	179
习题与思考题	180
第五章 交流异步电动机变频调速系统及其仿真	182
第一节 变频调速的基本控制方式和机械特性	182
第二节 变频调速系统中的无源逆变(变频)电路	187
第三节 晶闸管变频调速系统	203
第四节 脉宽调制的异步电动机变频调速系统	211
第五节 交流异步电动机变频调速系统的 MATLAB 仿真	221
本章小结	231
习题与思考题	232
第六章 交流异步电动机矢量控制变频调速系统及其仿真	234
第一节 矢量控制的基本概念	234
第二节 矢量坐标变换及变换矩阵	236
第三节 异步电动机在不同坐标系上的数学模型	241
第四节 异步电动机转子磁链观测器	248
第五节 异步电动机的无速度传感器技术	253
第六节 矢量控制的变频调速系统	255
第七节 大功率异步电动机的交-交变频调速技术	258
第八节 矢量控制变频调速系统的 MATLAB 仿真	266
本章小结	272
习题与思考题	273
第七章 同步电动机调速系统及其仿真	275
第一节 同步电动机的分类及其调速原理	275
第二节 正弦波永磁同步电动机调速系统	277
第三节 方波永磁同步电动机调速系统	281
第四节 负载换相同步电动机调速系统	285
第五节 大功率同步电动机交-交变频调速技术	293
第六节 同步电动机调速系统的 MATLAB 仿真	296
本章小结	301
习题与思考题	303
交直流调速系统实验指导书	304
交直流调速系统课程设计指导书	329
附录 Simulink/SimPower System 工具箱资源及 MATLAB 仿真基础	332
第一节 Simulink 工具箱简介	332
第二节 SimPower System 工具箱简介	339

第三节	Simulink/SimPower System 的模型窗口	345
第四节	Simulink /Power System 模块的基本操作	345
第五节	Simulink/SimPower System 系统模型的操作	348
第六节	Simulink/SimPower System 子系统的建立和 Mask 功能	349
第七节	Simulink/SimPower System 系统的仿真	350
参考文献		355

绪 论

一、运动控制系统概述

1. 运动控制系统及其分类

运动控制系统是以机械运动的驱动设备——电动机为被控对象,以控制器为核心,以电力电子功率变换装置为执行机构,在自动控制理论指导下组成的电力传动自动控制系统,这类系统控制电动机的转矩、转速和转角,将电能转换为机械能,实现运动机械的运动控制。

运动控制系统的种类繁多,用途各异。

(1) 按被控物理量分。以转速为被控量的系统叫调速系统;以角位移或直线位移为被控量的系统叫位置随动系统,有时也叫伺服系统。

(2) 按驱动电动机的类型分。用直流电动机拖动生产机械的为直流传动系统;用交流电动机拖动生产机械的为交流传动系统。

(3) 按控制器的类型分。以模拟电路构成控制器的系统称为模拟控制系统;以数字电路构成控制器的系统称为数字控制系统。

另外,按照控制系统中闭环的多少,也可分为单闭环控制系统、双闭环控制系统和多环控制系统;按控制原理的不同也可分很多种。对于某一具体的运动控制系统可能是这些分类方法的交叉,如用 8051 单片机实现的双闭环数字直流调速系统。

2. 运动控制系统的发展过程及其应用

纵观运动控制系统的发展历程,交、直流两大电气传动并存于各个工业领域,虽然各个时期科学技术的发展使它们所处的地位、所起的作用不同,但它们始终是随着工业技术的发展,特别是电力电子和微电子技术的发展,在相互竞争、相互促进中,不断完善并发生着变化。由于历史上最早出现的是直流电动机,所以 19 世纪 80 年代以前,直流电气传动是惟一的电气传动方式。直到 19 世纪末,出现了交流电动机,且解决了三相制交流电的输送和分配问题,并制成了经济适用的鼠笼异步电动机,这才使交流电气传动在工业中逐步地得到广泛应用。

随着生产技术的发展,对电气传动在启制动、正反转以及调速精度、调速范围、静态特性、动态响应等方面提出了更高要求,这就要求大量使用调速系统,由于直流电动机的调速性能和转矩控制好,从 20 世纪 30 年代起,就开始使用直流调速系统。它的发展过程是这样的,由最早的旋转变流机组控制发展为放大机、磁放大器控制;再进一步,用静止的晶闸管变流装置和模拟控制器实现直流调速;再后来,用可控整流和大功率晶体管组成的 PWM 控制电路实现数字化的直流调速,使系统的快速性、可靠性、经济性不断提高。调速性能的不断改进,使直流调速系统的应用非常广泛,然而由于直流电动机具有电刷和换向器,制造工艺复杂且成本高,维护麻烦,使用环境受到限制等缺点,并且很难向高转速、高电压、大容量发展,逐渐显示出直流调速的弱点。

普遍应用于恒速运行场合的交流电动机,可以弥补直流电动机的不足。于是人们又开始了新一轮交流调速的研究。仅对占传动总量三分之一强的风机、水泵设备而言,如果改恒速

为调速的话,就可以节电 30%左右。近三四十年来,随着电力电子技术、微电子技术、现代控制理论的发展,为交流调速产品的开发创造了有利条件,使交流调速系统逐步具备了宽调速范围、高稳速精度、快速动态响应和四象限运行等技术性能,并实现了产品的系列化,从调速性能看,完全可与直流调速系统相媲美。目前交流调速系统已逐步占据主导地位。

3. 运动控制系统的发展趋势

归纳目前大量应用的运动控制系统,并对技术发展和应用需求进行全面分析之后,我们可以总结出下列发展趋势:

(1) 高频化。在功率驱动装置中,低频的半控器件——晶闸管在中小功率范围将会被高频的全控器件所代替,这样既可提高系统性能,又可改善电网的功率因数。

(2) 交流化。由于交流电机本身的优势,交流调速系统取代直流调速系统已成为一种不可逆转的趋势。随着交流调速系统成本的逐步降低,不仅现有的直流调速系统将被交流调速系统取代;而且,大量的原来恒速运行的交流传动系统将改为交流调速系统,原来直流调速所不能达到的高转速、大功率领域,也将采用交流调速系统。

(3) 网络化。微处理器的发展,使数字控制器简单而又灵活,同时为联网提供了可能。随着系统规模的扩大和系统复杂性的提高,单机的控制系统越来越少,取而代之的是大规模多机协同工作的高度自动化系统,这就需要计算机网络的支持,传动设备及控制器作为一个节点连到现场总线或工业控制网上,实现集中的或分散的生产过程实时监控。

另外,借助于数字和网络技术,智能控制已深入到运动控制系统的各个方面,例如:模糊控制、神经网络控制等,各种观测器和辨识技术应用于运动控制系统中,大大改善了控制系统的性能,为运动控制系统走向复杂的多层的网络控制提供了可能。运动控制系统正由简单的单机控制系统走向多机多种控制过程协调的系统集成阶段。

二、自动调速系统概述

运动控制系统中应用最普遍的是自动调速系统,在工程实践中,有许多生产机械要求在一定的范围内进行速度的平滑调节,并且要求有良好的静、动态性能。

自动调速系统主要包括直流调速系统和交流调速系统。

1. 直流调速控制技术发展概况

直流调速系统的主要优点在于调速范围广、静差率小、稳定性好以及具有良好的动态性能。在高性能的拖动技术领域中,相当长时期内几乎都采用直流电力拖动系统。按供电方式不同,它可分为交流拖动的直流发电机组供电、水银整流器供电、晶闸管供电和脉宽调制电源(PWM)供电等类型。

目前,我国直流调速控制的发展趋势主要有以下几个方面:

(1) 提高调速系统的单机容量。

(2) 提高电力电子器件的生产水平,使变流器结构变得简单、紧凑。

(3) 提高控制单元水平,使其具有控制、监视、保护、诊断及自复原等多种功能。

2. 交流调速控制技术发展概况

交流电动机自 1885 年出现后,由于一直没有理想的调速方案,因而只被应用于恒速拖动领域。20 世纪 70 年代后,矢量控制、直接转矩控制、无速度传感器等交流调速控制技术的发展方兴未艾,各种智能控制策略不断涌现,展现出更为广阔的应用前景,必将进一步推动交流调速控制技术的发展。

三、控制系统的计算机仿真

控制系统的计算机仿真是一门涉及到控制理论、计算数学与计算机技术的综合性新型学科,它是以控制系统的数学模型为基础,以计算机为工具,对系统进行实验研究的一种方法。系统仿真就是用模型(即物理模型或数学模型)代替实际系统进行实验和研究,而计算机仿真能够为各种实验提供方便、廉价、灵活可靠的数学模型,因此,凡是要用模型进行实验的,几乎都可以用计算机仿真来研究被仿真系统的工作特点、选择最佳参数和设计最合理的系统方案。随着计算机技术的发展,计算机仿真越来越多地取代纯物理仿真。它为控制系统的分析、计算、研究、综合设计以及自动控制系统的计算机辅助教学提供了快速、经济、科学及有效的手段。

目前,较流行的控制系统仿真软件是 MATLAB,使用 MATLAB 对控制系统进行计算机仿真的主要方法是:以控制系统的传递函数为基础,使用 MATLAB 的 Simulink 工具箱对其进行计算机仿真研究。作者将在本教材中提出一种新的面向控制系统电气原理结构图,使用 SimPower System 工具箱进行调速系统仿真的新方法。

四、调速控制系统的技术指标

不同的生产机械,因生产工艺的不同,对控制系统的性能指标要求也有所不同。归纳起来有下列三个方面:

- (1) 调速。在一定的最高转速和最低转速范围内,有级或无级地调节转速。
- (2) 稳速。以一定的精度在要求的转速上稳定运行,不因各种可能的外来扰动(负载变化、电网电压波动等)而产生过大的转速波动,以确保产品质量。
- (3) 加、减速控制。对频繁启、制动的设备要求尽可能快地加、减速,缩短启、制动时间,以提高生产效率;对不宜经受剧烈速度变化的机械,则要求启、制动尽可能的平稳。

上述三方面要求,可具体转化为调速系统的稳态和动态两方面的性能指标。

(一) 稳态性能指标

所谓稳态性能指标是指系统稳定运行时的性能指标,如调速系统稳定运行时的调速范围和静差率等。下面具体介绍调速系统中的稳态性能指标。

1. 调速范围

交直流调速控制系统的调速范围是指电动机在额定负载下,运行的最高转速与最低转速之比,用 D 表示,即

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

对于调压调速系统来说,电动机的最高转速 $n_{\max}$ 等于其额定转速 n_n 。 D 越大,说明系统的调速范围越宽。对于少数负载很轻的机械,如磨床,也可以用实际负载时的转速来定义调速范围。

根据这个指标的大小,交直流调速控制系统可分为:① $D < 3$, 为调速范围小的系统;② $3 \leq D < 50$, 为调速范围中等的系统;③ $D \geq 50$, 为宽调速范围的系统。现代交直流调速控制系统的调速范围可以做到 $D \geq 10000$ 。

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所引起的额定转速降落 Δn_n , 与理想空载转速 n_0 之比,称作静差率,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

$$s\% = \frac{\Delta n_n}{n_0} \times 100\% \quad (0-2)$$

静差率是用来表示负载转矩变化时电动机转速变化的程度，它与机械特性的硬度有关，特性越硬，静差率越小，转速稳定度越高。

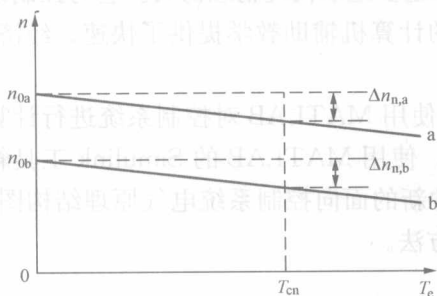


图 0-1 不同转速下的静差率

然而静差率和机械特性硬度又是有区别的。图 0-1 的两条特性 a 和 b 为调压调速系统的机械特性，两者的硬度相同，即额定速降 $\Delta n_{n,a} = \Delta n_{n,b}$ ；但它们的静差率却不同，其原因是理想空载转速不同。根据式 (0-2) 的定义，由于 $n_{0a} > n_{0b}$ ，所以 $s_a < s_b$ 。这就是说，对于同样硬度的特性，理想空载转速越低，静差率越大，转速的相对稳定度也越差。在一个交直流调速系统中，如果能满足最低速时的静差率 s 要求，则大于最低速的静差率一般都能满足要求。

所以，一般所提的静差率要求是指系统在最低速时的静差率指标。

调速范围和静差率这两项指标是相互联系的。例如，额定负载时的转速降落 $\Delta n_n = 50 \text{ r/min}$ ，当理想空载转速 $n_0 = 1000 \text{ r/min}$ 时，转速降落占 5%；当 $n_0 = 500 \text{ r/min}$ 时，转速降落占 10%；当 $n_0 = 50 \text{ r/min}$ 时，转速降落占到 100%，电动机就停止转动了。由此可见，离开了对静差率的要求，调速范围便失去了意义。也就是说，一个调速系统的调速范围，是指在最低速时满足静差率要求下系统所能达到的最大调节范围。脱离了对静差率的要求，任何调压调速系统都可以得到极高的调速范围；脱离了调速范围，静差率要满足要求也就容易得多了。

3. D 、 s 和 Δn_n 之间的关系

因为调速系统的静差率是指系统工作在最低速时的静差率，即

$$s = \frac{\Delta n_n}{n_{0\min}}$$

于是有 $n_{\min} = n_{0\min} - \Delta n_n = \frac{\Delta n_n}{s} - \Delta n_n = \frac{1-s}{s} \Delta n_n$ ，代入调速范围的表达式 $D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}}$ ，得

$$D = \frac{s \cdot n_n}{\Delta n_n (1-s)} \quad (0-3)$$

式 (0-3) 表示调速范围、静差率和额定转速降之间所应当满足的关系。对于同一个调速系统，它的特性硬度或 Δn_n 值是一定的，因此由式 (0-3) 可见，如果要求的静差率 s 越小，则系统能够达到的调速范围越小。

例如，某调速系统的额定转速 $n_n = 1450 \text{ r/min}$ ，额定速降 $\Delta n_n = 80 \text{ r/min}$ ，当要求静差率 $s \leq 25\%$ 时，系统能达到的调速范围是

$$D = \frac{s \cdot n_n}{\Delta n_n (1-s)} = \frac{0.25 \times 1450}{80 \times (1-0.25)} = 6.04$$

如果要求 $s \leq 15\%$ ，则调速范围只有

$$D = \frac{s \cdot n_n}{\Delta n_n (1-s)} = \frac{0.15 \times 1450}{80 \times (1-0.15)} = 3.20$$

当对 D 、 s 都提出一定要求时, 为了满足要求, 就必须使 Δn_n 小于某一个值。可见调速要解决的问题就是如何减少转速降落。

(二) 动态性能指标

交直流调速系统在动态过程中的指标称为动态性能指标。由于实际系统存在着电磁和机械惯性, 因此, 转速调节时总有一个动态过程。衡量交直流调速系统动态性能的指标可分为跟随性能指标和抗扰性能指标两类。

1. 跟随性能指标

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, 系统对阶跃输入的典型跟随过程如图 0-2 所示。其主要跟随性能指标有:

(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 C_∞ 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的百分值, 称为超调量, 即

$$\sigma\% = \frac{C_{\max} - C_\infty}{C_\infty} \times 100\% \quad (0-4)$$

超调量反映了系统的相对稳定性, 超调量越小, 相对稳定性越好, 即动态响应比较平稳。

(3) 调节时间 t_s 。在阶跃响应过程中, 输出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的最小时间, 称为调节时间, 又称为过渡过程时间。调节时间是用来衡量系统整个调节过程快慢的, 调节时间 t_s 越小, 系统响应的快速性越好。

在实际系统中, 快速性和稳定性往往是相互矛盾的。减小了超调量往往就延长了过渡过程调节时间; 缩短了过渡过程调节时间却又增大了超调量。对于一般要求的系统, 可以根据生产工艺的要求, 哪一方面的性能是主要的, 就以哪一方面为主。对于特殊要求的较高性能的系统, 还可以考虑采用一些综合性的优化性能指标。

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一个使输出量降低的扰动以后的过渡过程作为典型的抗扰过程, 如图 0-3 所示。抗扰性能指标定义如下:

(1) 动态降落 $\Delta C_{\max}\%$ 。系统稳定运行时, 突加一个扰动量 N , 在过渡过程中引起输出量的最大降落值 $\Delta C_{\max}$ 称为动态降落, 一般用输出量原稳态值 $C_{\infty 1}$ 的百分数表示, 即

$$\Delta C_{\max}\% = \frac{\Delta C_{\max}}{C_{\infty 1}} \times 100\% \quad (0-5)$$

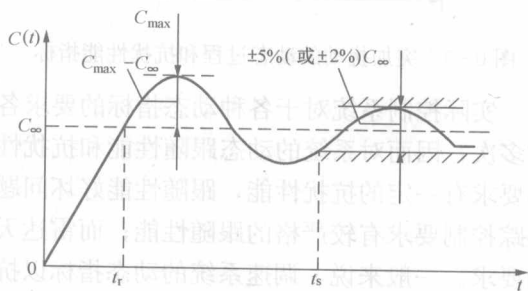


图 0-2 阶跃响应曲线和跟随性能指标

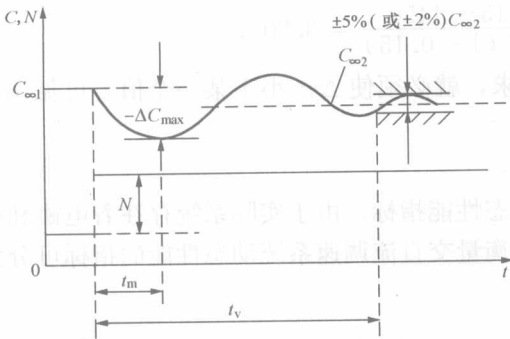


图 0-3 突加扰动的动态过程和抗扰性能指标

当输出量在动态降落后又恢复到新的稳态值 $C_{\infty 2}$ 时, 偏差 $C_{\infty 1} - C_{\infty 2}$ 表示系统在该扰动作用下的稳态降落, 动态降落一般都大于稳态降落。

(2) 恢复时间 t_v 。从阶跃扰动作用开始, 到输出量恢复到与新稳态值 $C_{\infty 2}$ 之差进入 $C_{\infty 2}$ 的 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 范围之内所需的时间, 称为恢复时间 t_v , 如图 0-3 所示。一般来说, 阶跃扰动下输出量的动态降落越小, 恢复时间越短, 系统的抗扰能力越强。

实际控制系统对于各种动态指标的要求各异。例如, 可逆轧钢机需要连续正反向轧制钢材多次, 因而对系统的动态跟随性能和抗扰性能要求都较高; 而一般不可逆的调速系统则主要要求有一定的抗扰性能, 跟随性能好坏问题不大。数控机床的加工轨迹控制和仿形机床的跟踪控制要求有较严格的跟随性能; 而雷达天线随动系统则对跟随性能和抗扰性能都有一定的要求。一般来说, 调速系统的动态指标以抗扰性能为主, 而随动系统的动态指标则以跟随性能为主。

第一章 直流调速系统及其仿真

内 容 提 要

本章概述了直流调速系统的基本概念,在此基础上从最简单的开环系统入手,系统地介绍了转速负反馈有静差、无静差调速系统、电压负反馈调速系统、转速电流双闭环调速系统、带电流变化率内环和电压内环的三环调速系统以及可逆调速系统的组成、工作原理、稳态分析和稳态参数计算;叙述了限流保护—电流截止负反馈的工作原理;简述了转速微分负反馈对转速超调的抑制。本章还应用 MATLAB 的 Simulink 和 SimPower System 工具箱,采用面向电气原理结构图的仿真技术,对各种典型的单闭环直流调速系统、转速电流双闭环调速系统、带转速微分负反馈的双闭环调速系统、带电流变化率内环和带电压内环的三环调速系统以及可逆调速系统进行了建模与仿真分析。

第一节 直流调速系统的基本概念

直流电动机具有良好的运行和控制特性,长期以来,直流调速系统一直占据着垄断地位。近年来交流调速系统发展很快,并有望在不太长的时间内取代直流调速系统。但就目前而言,直流调速仍然是自动调速系统的主要形式,在许多工业部门,如轧钢、矿山采掘、纺织、造纸等需要高性能调速的场合仍得到广泛的应用。而且,直流调速系统在理论和实践上都比较成熟,从控制技术的角度来看,它又是交流调速系统的基础。因此,首先着重讨论直流调速系统是十分必要的。

一、直流电动机的调速方法

1. 直流他励电动机供电原理图

直流他励电动机供电原理图如图 1-1 所示。

2. 直流他励电动机电气方程

由图 1-1 可得直流他励电动机的有关电气方程:

$$U_{d0} = E + I_d(R_n + R_a + R_l)$$

$$= E + I_d R$$

$$E = C_e n = K_e \Phi n$$

$$n = \frac{E}{K_e \Phi} = \frac{U_{d0} - I_d R}{K_e \Phi} = \frac{U_d - I_d R_a}{K_e \Phi} \quad (1-1)$$

$$R = R_n + R_a + R_l$$

$$C_e = K_e \Phi$$

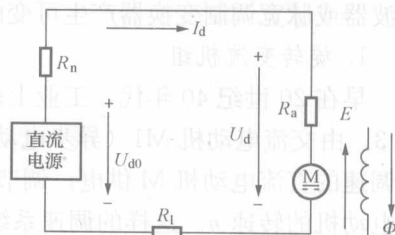


图 1-1 直流他励电动机供电原理图

式中: U_{d0} 为电枢供电电源空载电压; U_d 为电动机电枢电压; E 为电枢电动势; R 为电枢回路总电阻; R_n 为供电电源内阻; R_a 为电枢电阻; R_l 为线路或外接电阻; n 为转速, 单位 r/min ; Φ 为励磁磁通; K_e 为由电动机结构决定的电动势系数。

3. 直流他励电动机的调速方法

由直流他励电动机转速方程可见,有三种调节转速的方法,即调节电枢供电电压 U_{d0} ; 减弱励磁磁通 Φ ; 改变电枢回路电阻 R 。

(1) 调节电枢供电电压的调速。从式 (1-1) 可知,当磁通 Φ 和电阻 R 一定时,改变电枢供电电压 U_{d0} ,可以平滑地调节转速 n ,机械特性将上下平移,参见图 1-2。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。对于要求在一定范围内无级平滑调速的系统来说,以调节电枢供电电压方式为最好,调压调速是调速系统的主要调速方式。

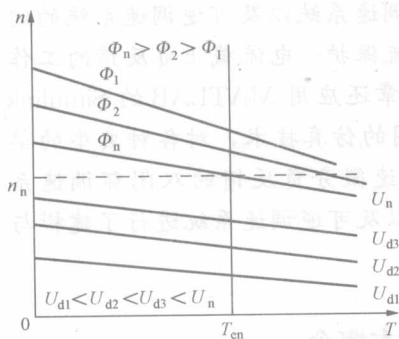


图 1-2 直流他励电动机调压调速和弱磁调速时的机械特性

(2) 减弱励磁磁通的调速。由式 (1-1) 可知,当 U_d 和 R_a 不变时,减小励磁磁通 Φ (考虑到直流电动机额定运行时,磁路已接近磁饱和,因此励磁磁通只能向小于额定磁通的方向变化),电动机转速将高于额定转速,其机械特性向上移动,参见图 1-2 中虚线以上部分的机械特性曲线。

由于弱磁调速是在额定转速以上调速,电动机最高转速受换向器和机械强度的限制,其调速范围不可能太大。在实际生产中,往往只是配合调压调速方案,在额定转速以上作小范围的升速。这样,调压与调磁相结合,可以扩大调速范围。

(3) 改变电枢回路电阻调速。改变电枢回路电阻的调速一般是在电枢回路中串接附加电阻,该调速方法损耗较大,只能进行有级调速,电动机的人为机械特性比固有特性软,通常只用于少数小功率场合。

二、直流调速系统的供电方式

实现调压调速,首先要有一个平滑可调的直流电源。常用的可调直流电源有以下三种:

- (1) 旋转变流机组:用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。
- (2) 静止可控整流器:用静止的可控整流器,如晶闸管可控整流器,以获得可调的直流电压。

(3) 直流斩波器或脉宽调制变换器:用恒定直流电源或不可控整流电源供电,利用直流斩波器或脉宽调制变换器产生可变的直流平均电压。

1. 旋转变流机组

早在 20 世纪 40 年代,工业上就广泛采用旋转式变流机组给直流调速系统供电,参见图 1-3。由交流电动机 M1 (异步电动机或同步电动机) 拖动直流发电机 G 发电,发电机给需要调速的直流电动机 M 供电。调节发电机的励磁电流 I_f 可改变其输出电压 U ,从而调节直流电动机的转速 n 。这样的调速系统简称为 G-M 系统。如果改变 I_f 的方向,则 U 的极性和 n 的转向都跟着改变,可实现 G-M 系统的可逆运行。

为了供给直流发电机和电动机励磁电流,通常专门设置一台直流励磁发电机 GE。因此 G-M 系统设备多、体积大、费用高、效率低、安装维护不便、运行有噪声。

2. 静止可控整流器

20 世纪 60 年代,出现了晶闸管可控整流装置,它具有效率高、体积小、成本低、无噪

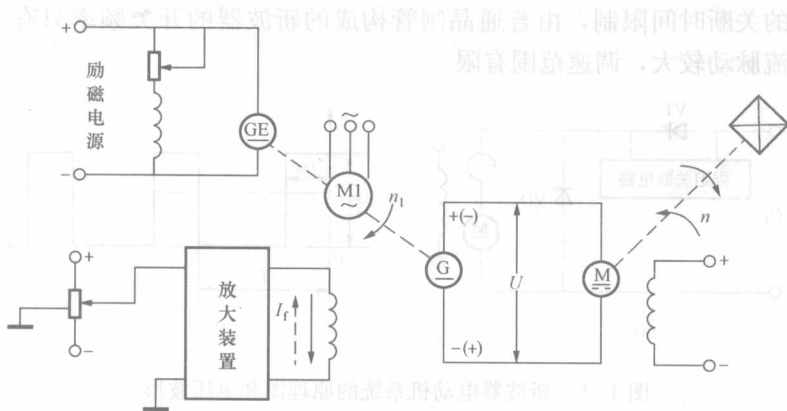


图 1-3 旋转变流机组供电的直流调速系统

声等优点。其中，晶闸管可控整流器的功率放大倍数在 10^4 以上。在控制快速性方面，变流机组是秒级，而晶闸管整流器是毫秒级，这将大大提高系统的快速性。

由晶闸管整流装置给直流电动机供电的调速系统简称为 V-M 系统。图 1-4 是最简单的 V-M 系统。

电动机 M 是被控对象，转速 n 是被调量。晶闸管可控整流器可以是单相、三相或更多相数，可采用半波、全波、半控、全控等类型，通过调节触发电路的移相电压，便可改变整流电压 U_d ，实现平滑调速。

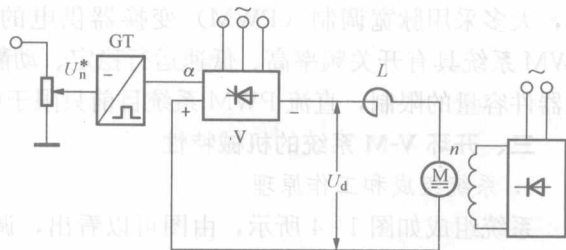


图 1-4 晶闸管直流调速系统

晶闸管整流器也有缺点，如晶闸管的单向导电性，给系统的可逆运行造成困难。晶闸管元件对过电压、过电流以及过高的 du/dt 和 di/dt 都很敏感，因此晶闸管整流电路需设置许多保护环节。当系统处在深调速状态时，晶闸管的导通角很小，使得系统的功率因数低，并产生较大的谐波电流，引起电网电压畸变，殃及附近的用电设备。若其设备容量在电网中所占比重较大，则必须增设无功补偿和谐波滤波装置。

另外，晶闸管元件的额定电流是用最大通态平均电流来度量的，电动机的转矩是和整流电流的平均值成正比的。而晶闸管元件和电动机的发热却和整流电流有效值的平方成正比。因此，当电流断续时，导通角小，同样的平均电流比它对应的有效值要大得多，发热也严重得多。这个特点是在选择晶闸管元件、电机容量、整流电路形式和电抗器时必须注意的。

3. 直流斩波器

在铁路电力机车、城市电车和地铁电机等电力牵引设备上，常采用直流串励或复励电动机，由恒压直流电源供电。晶闸管也可用来控制直流电压，即所谓的直流斩波器，也称直流调压器。参见图 1-5 (a)。在直流斩波器中，晶闸管工作于开关状态。当 VT 被触发导通时，直流电源电压 U_s 加到电动机上；当 VT 关断时，直流电源与电动机断开，电动机经二极管 VD 续流，两端电压接近于零。如此反复，得电枢端电压波形，如图 1-5 (b) 所示。直流斩波器的平均电压可以通过改变晶闸管的导通和关断时间来调节，从而实现转速的调节。若要关断普通晶闸管，必须在阴、阳极间施加反向电压，这就需要附加一种强迫关断电