



普通高等教育“十二五”规划教材



江苏省高等学校重点教材

交直流调速系统与 MATLAB仿真 (第二版)

周渊深 主编



- “十一五”国家级规划教材
- 2009年普通高等教育国家级精品教材



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材



江苏省高等学校重点教材 (编号: 2013-1-131)

交直流调速系统与 MATLAB仿真 (第二版)

主编 周渊深

编写 朱希荣 宋永英 周玉琴

主审 张万忠 张春光



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书以作者编写的“2009年普通高等教育国家级精品教材”《交直流调速系统与 MATLAB 仿真》为基础,精简传统调速系统技术内容,加强了调速系统的实验内容,更新了仿真软件版本,丰富了仿真实验和实物实验研究内容,将交直流调速技术和 MATLAB 仿真技术有机结合在一起。本书遵循理论和实践相结合的原则,具有如下特点:典型的调速系统都配有相关的仿真实验和实物实验内容,做到学以致用;书中安排了课程设计大纲、任务书、指导书和相关的设计资料,将实践内容与理论教学内容紧密结合;本书采用的基于调速系统电气原理结构图的仿真技术方法与实物实验方法相似,仿真效果好,部分调速系统的仿真实验是以系统的工程计算为基础的。

本书可作为普通高等院校本科电气工程及其自动化、自动化、机械设计制造及其自动化等专业的教材,也可作为电气爱好者和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. —2 版.

—北京:中国电力出版社,2015.6

普通高等教育“十二五”规划教材 江苏省高等学校重点教材

ISBN 978-7-5123-7250-4

I. ①交… II. ①周… III. ①交流调速—系统仿真—Matlab 软件—高等学校—教材②直流调速—系统仿真—Matlab 软件—高等学校—教材 IV. ①TM921.5-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 035831 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.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

2015 年 6 月第二版 2015 年 6 月北京第六次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 22.75 印张 561 千字

定价 46.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
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

本书根据应用型本科院校的教学要求而编写,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。本书针对应用型本科学生的特点,在内容上做到理论联系实际,强调工程应用,主要具有如下特点:①典型的调速系统都配有相关的仿真实验和实物实验内容,可做到学以致用;②书中安排了课程设计大纲、任务书、指导书和相关的设计资料,将实践内容与理论教学内容紧密结合;③每章都设有导语和习题。

“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,作者利用自身科研成果,采用基于调速系统电气原理结构图的图形化仿真技术,完成了交直流调速系统中典型系统的仿真实验。该仿真方法与实物实验方法相似,仿真效果好,简单易学好理解。本次修订还增加了部分调速系统的工程计算,并以此为基础进行仿真实验。

全书除绪论外,分为8章。第1章介绍了典型的直流调速系统。以研究直流可控电源为线索讨论调速系统的主回路;在熟悉常用反馈检测装置的基础上,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、直流可逆调速系统和PWM-M直流调速系统;着重介绍各种闭环控制系统的建立、系统的工程实现,以及分析调速系统的基本方法。本章内容按照调速系统不断改进和完善的过程进行内容编排。

第2章为直流调速系统的动态设计内容,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,同时适当介绍了内模控制等智能控制方法。

第3章采用较新版本的MATLAB7.6仿真软件,针对前述介绍的各种典型直流调速系统,在进行工程计算的基础上,运用面向调速系统电气原理结构图的图形化仿真技术进行了仿真实验。

第4章介绍了交流调压调速系统、串级调速系统和传统的变频调速系统,注重与直流调速系统进行对比分析;分别讨论了三种系统所涉及的晶闸管交流调压电源、串级调速系统的转子整流器和晶闸管有源逆变电源、变频调速系统使用的变频电源。

第5章重点介绍了异步电动机高性能的矢量控制技术、矢量控制变频调速系统及其调节器的设计方法。

第6章简要介绍了同步电动机变频调速系统。

第7章分别进行了交流调压和串级调速系统的工程计算,采用面向电气原理结构图的图形化仿真技术,对各种典型的交流调速系统进行了仿真实验。

第8章根据交直流调速系统实践性强的特点,基于与课程相关的教学实验设备,介绍了交直流调速系统的实验研究内容;安排了专业课程设计,给出了课程设计大纲和课程设计任务书模板,提供了基本的课程设计指导书和相关的设计资料,将实践内容与理论教学内容紧密结合。

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借助计算机自行完成;

实物实验可结合课程教学安排 10~12 实验学时进行,建议完成 5 个实验项目;设计性、综合性实验可安排在专业实习中进行;课程设计时间以 2~3 周为宜。

本书是一本将交直流调速技术与 MATLAB 仿真技术以及实验技术有机结合在一起的教材,它选择了典型的交直流调速系统为基本内容,配套相应的 MATLAB 仿真实验和实物实验内容,以体现其针对性。同时,第 3、7、8 章的仿真实验、实物实验和课程设计内容也可自成体系。

本书由淮海工学院周渊深教授主编,并编写了绪论、第 1、2、3、7 章;淮海工学院朱希荣副教授编写了第 4~6 章;淮海工学院宋永英高级实验师、江苏省溧阳市电子电器设备厂的许开其高级工程师编写了实验和课程设计指导书,并对全部实物实验进行了试做;周渊深、宋永英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。

在编写本书的过程中参考了部分相关教材及国内外文献,在此向原作者致谢!

此外,本书配备了多媒体课件,请登录中国电力出版社教材服务网(<http://jc.cepp.sgcc.com.cn>)下载;习题答案、与教材配套的仿真实验模型请与编者联系,电子邮箱 zys62@126.com。

限于编者水平和编写时间仓促,书中疏漏和错误之处在所难免,特别是以工程计算为基础进行仿真实验的内容属于初次尝试,请读者批评指正,以便改进。

编 者

2015 年 5 月

目 录

前言

0 绪论	1
习题	5
1 直流调速系统及其控制技术	7
1.1 直流调速系统的基本概念	7
1.2 单闭环直流调速系统	22
1.3 转速电流双闭环调速系统	39
1.4 三环调速系统	44
1.5 直流脉宽调速系统	45
1.6 可逆直流调速系统	47
习题	62
2 直流调速系统的动态分析与设计	67
2.1 单闭环直流调速系统的动态分析	67
2.2 双闭环直流调速系统的动态分析	73
2.3 工程设计方法及其在双闭环调速系统中的应用	75
2.4 多环调速系统的内模控制设计方法	97
习题	104
3 直流调速系统的工程计算与 MATLAB 仿真实验	107
3.1 开环直流调速系统的工程计算和仿真实验	107
3.2 单闭环直流调速系统的工程计算和仿真实验	119
3.3 多环直流调速系统的仿真实验	133
3.4 直流脉宽调速系统的仿真实验	150
习题与思考题	160
4 交流调速系统及其控制技术	161
4.1 概述	161
4.2 交流异步电动机调压调速系统	162
4.3 绕线式异步电动机串级调速系统	167
4.4 交流异步电动机变频调速系统	178
4.5 交流调速系统的实例分析	203
习题	205
5 矢量控制的高性能异步电动机变频调速系统	209
5.1 矢量控制的基本原理	209
5.2 矢量坐标变换及变换矩阵	211

5.3	异步电动机在不同坐标系上的数学模型	216
5.4	异步电动机转子磁链观测器	223
5.5	异步电动机的无转速传感器技术	226
5.6	异步电动机交叉耦合电压的解耦控制	228
5.7	矢量控制的变频调速系统	235
5.8	异步电动机的交—交变频矢量控制调速技术	239
	习题与思考题	247
6	同步电动机调速系统及其控制技术	249
6.1	同步电动机的种类及其调速原理	249
6.2	正弦波永磁同步电动机调速系统	251
6.3	方波永磁同步电动机调速系统	254
6.4	大功率同步电动机交—交变频调速技术	258
	习题与思考题	261
7	交流调速系统的工程计算与 MATLAB 仿真实验	262
7.1	交流调压调速系统的工程计算和仿真实验	262
7.2	绕线式异步电动机串级调速系统的工程计算和仿真实验	272
7.3	交流异步电动机变频调速系统的建模与仿真	282
7.4	同步电动机变频调速系统的建模与仿真	298
	习题与思考题	304
8	交直流调速系统实验与课程设计	305
8.1	交直流调速系统实验概述	305
8.2	交直流调速系统课程设计	335
	参考文献	358

0 绪 论

一、自动控制系统的分类

自动控制系统主要分为生产过程自动控制系统和电力拖动自动控制系统两大类。

(一) 生产过程自动控制系统

生产过程自动控制系统的特征是以温度 T 、压力 P 、流量 Q 等变量为被控量,通过自动化仪表对生产过程参数进行控制。

(二) 电力拖动自动控制系统

电力拖动自动控制系统特征是以生产机构的转速 v 、位置 θ 等运动参数变量为被控量,以电动机为执行机构,实现对生产机构运动参数的控制。

本课程主要讨论电力拖动自动控制系统。

二、电力拖动自动控制系统分类

随着科学技术的发展,电力拖动自动控制系统的应用越来越广泛。按生产机械要求控制的物理量来分类,电力拖动自动控制系统可分为如下几类。

(一) 转速控制系统

转速控制系统即调速控制系统。例如,发动机的转速控制、磁带的转速控制等。

(二) 位置控制系统

位置控制系统即位置随动(伺服)系统。例如,液面位置的控制、雷达方位角的控制、火炮角位置的控制、机械加工中的轨迹控制和数控机床的伺服控制等。

(三) 张力控制系统

在加工各种带材和线材的过程中,必须保持一定的卷进、卷出张力,才能使带材卷得紧而齐,线材拉得粗细均匀而不断,这通常需要通过张力控制系统来实现。

(四) 多电机同步控制系统

整个系统中有多个传动点,每个传动点由一个电机拖动单元拖动,从而组成多电机同步控制系统。系统中各电机应能同时按规定的速比稳速运行,并有良好的统调和单调性。

上述各类系统中,转速控制系统的实质是调速系统;位置控制系统是在调速系统基础上加上位置外环;张力控制系统是在调速系统基础上增加了张力外环;多电机同步控制系统则是在多个调速系统单元上外加同步控制装置。

总之,上述各种系统的基础都是调速控制系统。根据调速控制系统中的电动机是交流电动机还是直流电动机,又分为交流调速系统和直流调速系统。

三、交直流调速控制技术的发展概况

(一) 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,相当长时期内几乎都采用直流电力拖动系统。其按供电方式不同,可分为直流发电机机组供电、水银整流器供电、晶闸管整流器供电和脉宽调制电源(PWM)供电系统等类型。

目前,我国直流调速控制技术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,使供电电源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、诊断及自修复等多种功能。

(二) 交流调速控制技术发展概况

交流电动机自 1885 年问世后,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、无转速传感器等技术的发展方兴未艾,各种智能控制策略不断涌现,交流调速控制技术展现出更为广阔的应用前景。

四、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控制理论、计算数学与计算机技术的综合性新型技术,它是以控制系统的数学模型为基础,以计算机为工具,对控制系统进行仿真实验研究的一种方法。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。

MATLAB 是一种目前流行的控制系统仿真软件,传统的仿真方法是以控制系统的传递函数为基础,应用 MATLAB 的 Simulink 工具箱对其进行计算机仿真研究。本书将采用一种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。

五、调速控制系统的技术指标

(一) 调速控制要求

- (1) 调速要求。在一定的范围内,实现有级或无级调速。
- (2) 稳速要求。以一定的准确度在要求的转速上稳定运行,基本不受各种扰动的影响。
- (3) 加、减速要求。对频繁起动、制动的设备要求尽可能快地加、减速,缩短起动、制动时间,以提高生产效率;对不宜经受剧烈转速变化的机械,则要求起动、制动尽可能平稳。

上述三方面要求,可具体用调速控制系统的稳态和动态两方面的性能指标来衡量。

(二) 调速控制系统的性能指标

1. 稳态性能指标

衡量调速控制系统稳态性能的指标称为稳态性能指标。调速系统的稳态性能指标有调速范围和静差率。

(1) 调速范围。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

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

在调压调速系统中,电动机的最高转速 $n_{\max}$ 可用其额定转速 n_n 来表达。

D 越大,说明系统的调速范围越宽。根据这个指标的大小,交直流调速系统可分为: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负载所引起的转速降落 Δn_n 与理想空载转速 n_0 之比, 称作静差率, 用 s 表示, 即

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

或用百分数表示, 即

$$s = \frac{\Delta n_n}{n_0} \times 100\%$$

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。静差率与下列性能指标相关:

1) 静差率与机械特性硬度有关。机械特性越硬, 静差率越小, 转速稳定度越高。

2) 静差率和机械特性硬度有区别。图 0-1 中曲线 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 $\Delta n_{ra} = \Delta n_{rb}$; 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), 由于 $n_{0a} > n_{0b}$, 所以 $s_a < s_b$ 。这就是说, 对于同样硬度的机械特性, 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指的是系统在最低速时的静差率指标。

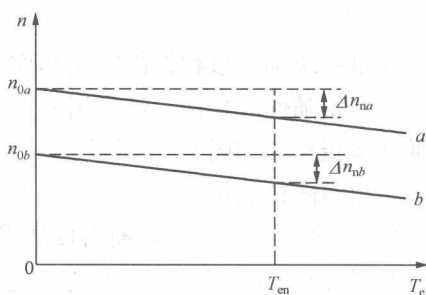


图 0-1 不同转速下的静差率

3) 调速范围和静差率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%, 电动机就停止不动了。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

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

将上式代入调速范围的表达式 $D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}}$, 得

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

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

$$D=\frac{sn_n}{\Delta n_n(1-s)}=\frac{0.25\times1450}{80\times(1-0.25)}=6.04$$

如果要求 $s\leqslant15\%$ ，则调速范围只有

$$D=\frac{sn_n}{\Delta n_n(1-s)}=\frac{0.15\times1450}{80\times(1-0.15)}=3.20$$

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。

2. 动态性能指标

衡量系统动态过程性能的指标称为动态性能指标。

(1) 跟随性能指标。通常用零初始条件下，系统对单位阶跃给定信号的输出过程来表示跟随性能指标，如图 0-2 所示。

主要跟随性能指标如下：

- 1) 上升时间 t_r ，是指输出量从零开始，第一次上升到稳态值 C_∞ 所经历的时间。
- 2) 超调量 σ ，是指输出量超出稳态值的最大偏差与稳态值之比的百分值，即

$$\sigma\%=\frac{C_{\max}-C_\infty}{C_\infty}\times100\% \tag{0-4}$$

超调量反映了系统的相对稳定性。

3) 过渡过程时间 t_s ，是指输出衰减到与稳态值之差进入 $\pm5\%$ 或 $\pm2\%$ 的允许误差范围之内所需的最小时间。它是用来衡量系统调节过程快慢的。

(2) 抗扰性能指标。典型的扰动过渡过程如图 0-3 所示。

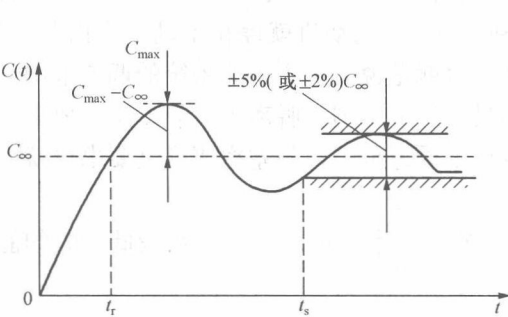


图 0-2 单位阶跃响应曲线和跟随性能指标

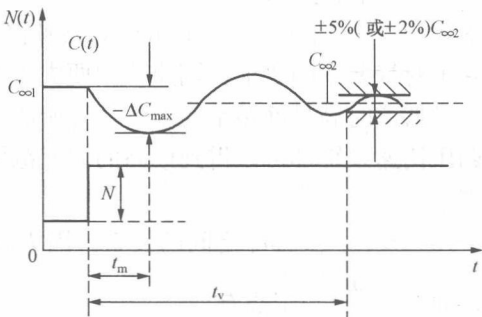


图 0-3 典型扰动过渡过程

图 0-3 中，抗扰性能指标如下：

1) 最大动态降落 $\Delta C_{\max}\%$ 。系统稳定运行时，突加扰动量 N ，在过渡过程中引起输出量的最大降落值 $\Delta C_{\max}$ 称为最大动态降落。它一般用输出量原稳态值 $C_{\infty1}$ 的百分数表示，即

$$\Delta C_{\max}\%=\frac{\Delta C_{\max}}{C_{\infty1}}\times100\% \tag{0-5}$$

当输出量在动态降落后又恢复到新的稳态值 $C_{\infty2}$ 时，偏差 $C_{\infty1}-C_{\infty2}$ 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 $C_{\infty2}$ 之差进入 $\pm5\%$ 或 $\pm2\%$ 允许误差范围之内所需的时间，称为恢复时间 t_v 。

“交直流调速系统”课程是电气工程及其自动化专业的主干课程，它是本专业许多前导课程的综合应用。

(1) 电路、电子技术课程主要解决转速控制器 A、触发器 GT 的线路设计、参数计算、元件选择、调试等问题。

(2) 电力电子技术课程主要解决触发电路 GT、晶闸管整流器等单元的分析、计算和调试等。

(3) 电机与拖动基础课程解决负载与电动机之间的电力拖动问题。

(4) 自动控制原理课程主要解决控制系统的理论分析与设计问题。

“交直流调速系统”课程则是综合应用上述课程的相关知识去解决电动机的转速控制问题。

习题

一、判断题和单项选择题（判断题正确标“T”，错误标“F”）

1. 当系统机械特性硬度相同时,理想空载转速越低,静差率越小。 ()
2. 如果系统低速时的静差率能满足要求,则高速时肯定满足要求。 ()
3. 衡量交直流调速系统动态性能的指标分为跟随性能指标和抗扰性能指标,下列指标中属于抗扰性能指标的有 ()。
A. 上升时间 B. 调节时间
C. 恢复时间 D. 超调量
4. 当系统的机械特性硬度一定时,要求的静差率 s 越小,调速范围 D ()。
A. 越小 B. 越大 C. 不变 D. 可大可小
5. 某调速系统的调速范围是 $100 \sim 900 \text{ r/min}$,要求 $s=10\%$,系统允许的稳态速降是多少? ()。
A. 11.1 r/min B. 10 r/min C. 90 r/min D. 800 r/min

6. 当系统的机械特性硬度一定时, 如果理想空载转速 n_0 越小, 则静差率 s ()。

A. 越小

B. 可大可小

C. 不变

D. 越大

二、简答题

1. 控制系统的跟随性能指标和抗扰性能指标分别包含哪些具体指标?

2. 简述调速范围 D 、静差率 s 和额定速降间的关系。

1 直流调速系统及其控制技术

本章简述了直流调速系统的基本概念、基本组成,并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、可逆调速系统和直流脉宽调速系统的组成、工作原理、稳态分析和稳态参数计算;叙述了限流保护—电流截止负反馈环节的工作原理;简述了转速微分负反馈对转速超调的抑制作用。

1.1 直流调速系统的基本概念

直流调速系统具有良好的运行和控制特性,长期以来在调速领域占据着垄断地位。近年来交流调速系统发展很快,有望取代直流调速系统。但就目前而言,直流调速仍然是自动调速系统的主要形式。直流调速系统技术在理论和实践应用上都比较成熟,从控制技术的角度来看,它又是交流调速系统的基础。因此,着重讨论直流调速系统十分必要。

1.1.1 直流电动机的调速方法

一、直流他励电动机供电原理图

直流调速系统通常采用他励直流电动机,其供电原理图如图1-1所示。

二、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,即

$$\begin{aligned} U_{d0} &= E + I_d(R_n + R_a + R_l) = E + I_d R \\ E &= C_e n = K_e \Phi n \\ n &= \frac{E}{K_e \Phi} = \frac{U_{d0} - I_d R}{K_e \Phi} = \frac{U_d - I_d R_a}{K_e \Phi} \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中: U_{d0} 为电枢供电电源的空载电压; U_d 为电动机电枢两端的电压; E 为电枢反电动势; R 为电枢回路总电阻, $R = R_n + R_a + R_l$; R_n 为供电电源内阻; R_a 为电枢电阻; R_l 为线路及其外接电阻; n 为转速, r/min; Φ 为励磁磁通; C_e 为电动机在额定磁通下的电动势转速比, $C_e = K_e \Phi$, K_e 为由电动机结构决定的电动势系数。

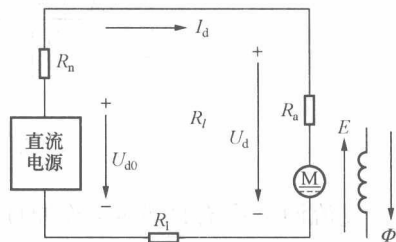


图 1-1 直流他励电动机供电原理图

三、直流他励电动机的调速方法

由式(1-1)直流他励电动机转速方程可见,其有三种调节转速方法,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

由式(1-1)可知,当磁通 Φ 和电阻 R_a 一定时,改变电枢供电电压 U_d ,可以平滑地调节转速 n ,机械特性将上下平移,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。调压调速是调速系统的主要调速方法。

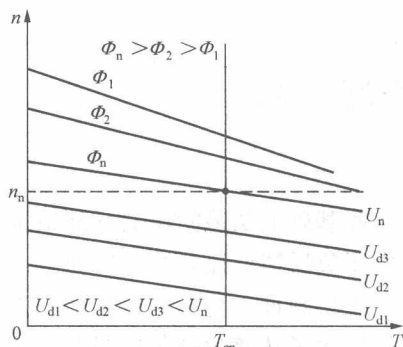


图 1-2 直流他励电动机调压调速和弱磁调速时的机械特性

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, 见图 1-2 中虚线以上部分的机械特性曲线 ϕ_2, ϕ_1 。

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, 在额定转速以上作小范围的升速。调压与调励磁相结合, 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。

1.1.2 直流调速系统的基本结构

直流调速系统的基本结构如图 1-3 所示, 一般由电源、变流器、电动机、控制器、传感器和生产机械 (负载) 组成。

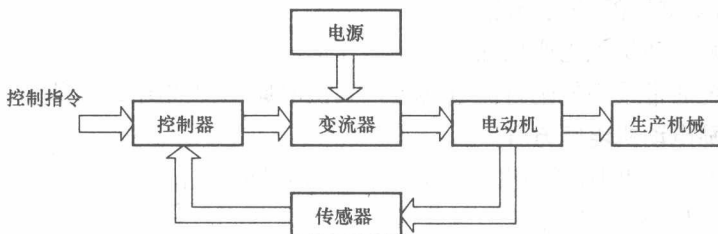


图 1-3 直流调速系统的基本结构

直流调速系统的基本工作原理是, 将控制指令信号 (如转速给定信号) 和传感器采集的反馈检测信号 (转速、电流和电压等) 经过一定的处理, 作为控制器的输入信号; 控制器按一定的控制算法进行运算并输出相应的控制信号, 控制变流器改变输入到电动机的电源参数, 使电动机改变转速; 再由电动机驱动生产机械按照相应的控制要求运动。

由图 1-3 所示的基本结构, 可以看出直流调速系统由下列两部分组成。

1. 主回路

直流调速系统的主路由电源、变流器、直流电动机等部件组成。直流电动机的控制是通过改变其供电电源参数来实现的。例如, 改变直流电动机电枢电压或励磁电压的方向, 可以控制电动机的正反转; 而改变电枢电压或励磁电流的大小, 可以实现电动机的调速。

当电源是交流电源时, 为了给直流电动机供电, 变流器应该采用整流器; 当电源是直流电源时, 变流器通常采用直流斩波器或脉宽调制变换器。

2. 控制回路

直流调速系统的控制回路由控制指令装置、控制器、反馈信号检测装置等部件组成。

(1) 控制指令装置。它是产生控制系统给定信号的部件。对直流调速系统而言,它发出转速给定信号。

(2) 反馈信号检测装置。它是构成反馈系统的重要部件,实时检测调速系统的各种状态,如电压、电流、转矩或转速等参数。

(3) 控制器。研发或选择适当的控制方法或策略,通过控制器加以实现,是自动调速系统的主要任务。有关内容将在后面介绍。

1.1.3 直流调速系统主回路中的可控直流电源

实现直流调压调速,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。采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) 静止相控整流器。采用静止的相控整流器(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。采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。

一、旋转式变流机组供电的直流调速系统

旋转式变流机组供电的直流调速系统(简称 G-M 系统)如图 1-4 所示。

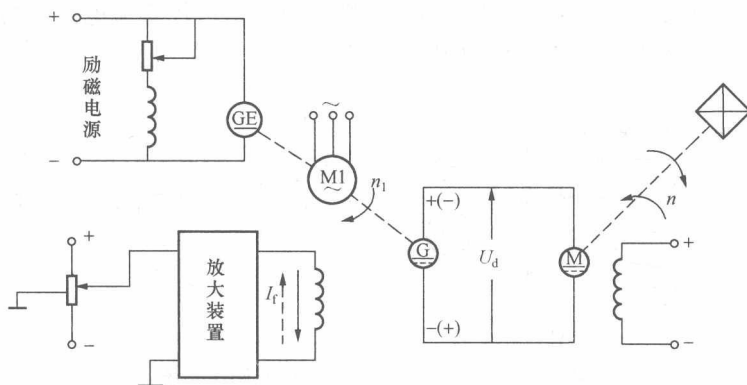


图 1-4 旋转式变流机组供电的直流调速系统

1. 系统组成

由交流电动机 M1 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_d ,从而调节直流电动机的转速 n 。

2. 调速原理

调节 $I_f \rightarrow \Phi$ 变化 $\rightarrow U_d$ 改变 $\rightarrow$ 转速 n 变化。改变 I_f 方向, n 方向跟着改变。

3. 特点

为了供给直流发电机和电动机励磁电流,还需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,目前正在被逐步淘汰。

二、相控整流电源供电的直流调速系统

随着晶闸管的问世,由晶闸管组成的相控整流电源开始取代旋转变流机组,使直流调速系统技术产生了重大变革。相控整流电源供电的直流调速系统(简称 V-M 系统)如图

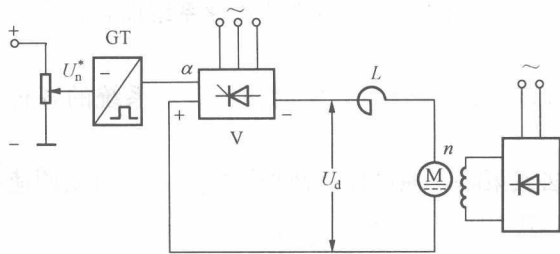


图 1-5 相控整流电源供电的直流调速系统

1-5 所示。

1. 系统组成

相控整流电源由工频交流电源供电，通过改变触发控制角 α 的大小来控制输出直流电压。相控整流器可以是单相、三相或更多相数；电路形式可以是半波、全波、半控、全控等类型。相控变流器由于没有运动部件，故称为静止变流器。

2. 调速原理

通过调节触发电路的移相控制角 α ，便可改变整流电压 U_d ，实现平滑调速。

3. 特点

相控变流器响应快，为毫秒级，比旋转变流机组快了 2~3 个数量级；体积更小、寿命更长；与旋转变流机组相比，具有效率高、噪声小等诸多优点。其主要缺点是功率因数低，电源谐波电流大，特别是当容量较大时，已成为不可忽视的“电力公害”，需要进行无功补偿和谐波治理。

三、直流斩波器供电的直流调速系统

直流斩波器亦称直流脉宽调制（PWM）变换电源，是可控直流电源的另一种主要形式。直流斩波器电源供电的直流调速系统如图 1-6 所示。

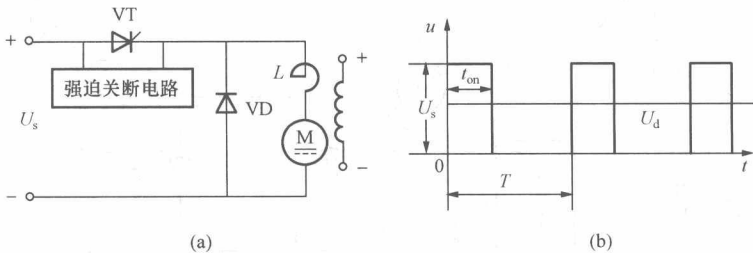


图 1-6 直流斩波器供电的直流调速系统

(a) 电气原理图；(b) 电压波形

1. 系统组成

用恒定直流电源或不可控整流电源 U_s 供电，利用直流斩波器或脉宽调制变换电源产生可变的平均电压 U_d 。

2. 调速原理

VT 工作于开关状态，VT 导通时， U_s 加到 M 上；VT 关断时， U_s 与 M 断开，M 经 VD 续流，两端电压接近于零。平均电压 U_d 可以通过改变 VT 的导通和关断时间来调节，从而调节 M 的转速。

3. 特点

转速响应更快，达到十几微秒级，比相控整流电源又高出 2~3 个数量级；在工频交流电源供电场合，可以先采用不可控整流得到固定的直流电压，再由 PWM 变换器调节直流电压，使得在提高转速响应的同时，也提高了电源功率因数；运行稳定、效率高、静态性能好。其缺点是容量不大，在大功率及超大功率（兆瓦以上）直流调速范围内，相控整流电源