

高性能变频调速 及其典型控制系统

马小亮 编著

电气自动化新技术丛书

51



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



电气自动化

高性能变频调速及其典型控制系统

-85

马小亮 编著

7m921.51

m194



机械工业出版社

本书介绍了变频器、高性能变频调速系统、典型调速系统及控制环节以及其应用时的注意事项。它是笔者在该领域多年工作的体会和总结,其特点是以工程师和教授的双重眼光来看待和认识这项技术,既有原理介绍又有应用。在介绍原理时,强调物理概念,无抽象的矩阵推导;在介绍应用时,把众多工艺要求中的共性问题提炼出来,按照实现这些共性要求的控制方法的不同,归纳出几类典型工艺控制系统,分别予以介绍。

本书可作为从事电气传动自动化技术的工程技术人员及高等院校教师、研究生及学生的参考书,也可作为继续教育培训班的教材。希望通过本书能够帮助工程技术人员提高理论知识水平,帮助在校的初学者了解工业应用。

图书在版编目(CIP)数据

高性能变频调速及其典型控制系统/马小亮编著.

—北京:机械工业出版社,2010.4

(电气自动化新技术丛书)

ISBN 978-7-111-30268-1

I. ①高… II. ①马… III. ①变频调速—控制系统

IV. ①TM921.51

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第056145号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:林春泉 责任编辑:赵任

版式设计:霍永明 责任校对:陈延翔

封面设计:姚毅 责任印制:乔宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2010年7月第1版第1次印刷

169mm×239mm·20印张·396千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-30268-1

定价:49.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

销售一部:(010)68326294

销售二部:(010)88379649

读者服务部:(010)68993821

门户网:<http://www.cmpbook.com>

教材网:<http://www.cmpedu.com>

封面无防伪标均为盗版

第5届电气自动化新技术丛书

编辑委员会成员

主 任：王志良

副主任：赵相宾 牛新国 王永骥 赵光宙

孙 跃 阮 毅 何湘宁 霍勇进

委 员：王永骥 王 旭 王志良 王 炎

牛新国 尹力明 许宏纲 孙 跃

孙流芳 李永东 李崇坚 陈伯时

陈敏逊 阮 毅 赵光宙 赵 杰

赵争鸣 赵相宾 张 浩 张承慧

张彦斌 徐殿国 何湘宁 彭鸿才

霍勇进 戴先中

秘 书：刘 娟 林春泉

电气自动化新技术丛书

序 言

科学技术的发展,对于改变社会的生产面貌,推动人类文明向前发展,具有极其重要的意义。电气自动化技术是多种学科的交叉综合,特别是在电力电子、微电子及计算机技术迅速发展的今天,电气自动化技术更是日新月异。毫无疑问,电气自动化技术必将在提高国民经济水平中发挥重要的作用。

为了帮助在经济建设第一线工作的工程技术人员能够及时熟悉和掌握电气自动化领域中的新技术,中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会联合成立了电气自动化新技术丛书编辑委员会,负责组织编辑“电气自动化新技术丛书”。丛书将由机械工业出版社出版。

本丛书有如下特色:

一、本丛书是专题论著,选题内容新颖,反映电气自动化新技术的成就和应用经验,适应我国经济建设急需。

二、理论联系实际,重点在于指导如何正确运用理论解决实际问题。

三、内容深入浅出,条理清晰,语言通俗,文笔流畅,便于自学。

本丛书以工程技术人员为主要读者,也可供科研人员及大专院校师生参考。

编写出版“电气自动化新技术丛书”,对于我们是一种尝试,难免存在问题和缺点,希望广大读者给予支持和帮助,并欢迎大家批评指正。

电气自动化新技术丛书
编辑委员会

第5届电气自动化新技术丛书

编辑委员会的话

自1992年本丛书问世以来,在学会领导和广大作者的支持下,在前4届编辑委员会的努力下,至今已发行丛书48种50多万册,受到广大读者的欢迎,对促进我国电气传动自动化新技术的发展和传播起到了巨大作用。

许多读者来信,表示这套丛书对他们的工作帮助很大,希望我们再接再厉,不断地推出介绍我国电气传动自动化新技术的丛书。本届编委会决定选择一些大家所关心的新选题,继续组织编写出版,同时对受读者欢迎的已经出版的丛书,我们将组织一些作者进行修订再版,以满足广大读者的需要。为了更加方便读者阅读,我们对今后新出版的丛书进行了改版,扩大了开本。

我们诚恳地希望广大读者来函,提出您的宝贵意见和建议,以使本丛书搞得更好。

在本丛书的出版过程中,得到了中国电工技术学会、天津电气传动设计研究所等单位提供的出版基金支持,在此我们对这些单位再次表示感谢。

第5届电气自动化新
技术丛书编辑委员会
2007年12月18日

序

高性能变频调速系统的诞生标志着“电力电子与交流可调传动”时代的来临，在当今工业、交通、国防、家电等各行各业运动控制中广泛应用着变频调速系统。目前，书市中各种介绍变频调速的书籍虽已琳琅满目，但能够既阐明基本理论又深入工程实际的书并不多。本书作者马小亮教授曾担任天津电气传动设计研究所的副总工程师，在研究和设计电力电子直传动装置、大功率交-交变频装置和交-直-交三电平变频装置、三峡升船机、双馈变频调速系统等工作积累了丰富的经验。他在20世纪80年代曾在美国加州大学伯克利分校和加州理工学院访问研究三年，后又赴德国西门子公司参加宝钢交流传动装置的联合设计，自1990年起受聘担任天津大学教授和电力电子与电力传动学科博士生导师。这本书是他多年工作的体会和总结，以工程师和教授的双重眼光看待和认识这项技术，既有概念清晰的原理介绍，又有切合实际的工程应用，还有一些论述是他的创见。

职是之故，从事电气传动自动化的工程技术人员阅读这本书，可以有助于澄清物理概念，提高理论水平，从而提升其研究和设计能力。高等院校教师、研究生及高年级学生阅读这本书，可以有助于其熟悉实际的工程系统，提高研发能力，从而加强真正的学术水平。



2010年3月3日

前 言

在我国，大约 60% 的发电量用于电动机。电气传动是一项通过控制电动机转速来满足各种机械工作要求，改善工作效果的技术，它是信息、能源和机械的接口。早期的电动机调速是直流调速的天下，自 20 世纪 80 年代以来，随着电力电子变频技术、数字控制技术的发展和高性能交流调速方法的发明，现在已基本实现了以交流调速取代直流调速。

目前介绍变频调速的书籍很多，主要有两类：一类是介绍原理的书，多由教授编写，理论严谨，但数学推导多，特别是用抽象的矩阵公式描述电动机，让工程技术人员难接受；另一类是介绍应用的书，多由工程师编写，主要是罗列应用实例，使人难有系统的认识，普及性不足。笔者是一位在该领域工作几十年的工程师，也是一位大学兼职教授，在本书的撰写中以工程师和教授的双重眼光来看待和介绍这项技术，既有原理介绍又有应用总结。在介绍原理时，强调物理概念，无抽象的矩阵推导；在介绍应用时，将众多工艺要求中的共性问题提炼出来，按照实现这些共性要求的控制方法的不同，归纳出几类典型工艺控制系统，分别予以介绍。书中有些内容是笔者个人看法，仅供参考，欢迎讨论。

不同于其它同类书籍，本书特点如下：

1) 从电动机统一控制理论出发，介绍了各种高性能变频调速方法，在讨论原理时，尽可能地与实用系统相结合；

2) 矢量控制系统需要电动机参数，本书专辟一节介绍了异步电动机参数的获取方法；

3) 磁链轨迹控制是近几年新研究出来的一种新控制方法，主要解决由于使用高压开关器件后，开关频率低带来的问题，它既不同于常规矢量控制，又不同于直接转矩控制，性能优于二者，在本书第 8 章中将介绍该方法；

4) 由于矢量控制系统中存在耦合，在介绍矢量控制的书中大多回避了调节器参数计算，在本书第 10 章中将专门介绍如何解耦及进行调节器参数工程计算；

5) 介绍了应用最广泛的电压型变频器的应用问题；

6) 归纳及介绍了多种典型工艺控制系统；

7) 在以往分析调速系统时，都认为负载是刚性体。而实际的负载有时是弹性体，会产生扭振。本书补充介绍了弹性对系统的影响，包括多质量系统、有弹性机械联系的主从控制系统和弹性张力系统等；

8) 在以往介绍系统时，变量多用实际的测量值，而在实际的数字控制装置中

多用相对值，本书将介绍如何用相对值设计数字控制系统。

本书是笔者多年工作的总结，其中有教训，也有大量他人的经验，包括天津电气传动设计研究所众多同事和本行业其它工作者，对于他们的支持，在此表示感谢。陈伯时教授是笔者的良师益友，本书中许多内容都和他讨论过或请他审核过，在此深表谢意。在本书的编写及绘制插图的过程中，得到了我的学生及天津电气传动设计研究所伍丰林及其团队的大量帮助，在此也一并感谢。

变频调速技术发展很快，笔者的学识和经历有限，殷切地希望得到读者的批评指正。

作者

2009年11月9日

目 录

电气自动化新技术丛书序言

第5届电气自动化新技术丛书编辑委员会的话
序

前言

第1章 变频调速引言	1
1.1 调速系统指标	1
1.1.1 调速系统的静态调速指标	1
1.1.2 调速系统的动态调速指标	2
1.2 调速系统分类	4
1.2.1 按驱动电动机类型分类	4
1.2.2 按应用领域分类	4
1.2.3 按调速方式分类	5
1.3 交流调速系统分类	6
1.4 变频调速概述	7
1.5 典型工艺控制系统概述	9
参考文献	11
第2章 数字控制基础	12
2.1 模拟控制和数字控制	12
2.2 离散和采样	12
2.3 变量和参数的相对值	14
2.4 连续变量的量化	16
2.5 电压、电流等模拟信号的量化	17
2.5.1 瞬时值法	17
2.5.2 平均值法	18
2.6 脉冲频率信号的量化(f/D 变换)	22
2.7 常用数字控制单元	24
2.7.1 常用数字调节器	25
2.7.2 数字斜坡给定(数字给定积分)	28
2.8 开环前馈补偿	32
2.9 处理器和现场可编程门阵列	33
2.9.1 常用处理器	33
2.9.2 现场可编程门阵列	35

参考文献	36
第3章 调速系统中的信号检测	37
3.1 电压和电流检测	37
3.1.1 取样电阻直接检测法	37
3.1.2 隔离放大器	38
3.1.3 交流互感器	39
3.1.4 霍尔传感器	41
3.1.5 基于 Σ/Δ 变换的电压、电流检测器	43
3.2 转速和位置测量	44
3.2.1 测速发电机	44
3.2.2 编码器	44
3.2.3 旋转变压器	47
参考文献	48
第4章 变频调速用变频器	49
4.1 基于晶闸管移相控制的变频器	49
4.1.1 电源自然换相的交-交变频器	49
4.1.2 负载自然换相的交-直-交电流型变频器	58
4.1.3 CC 和 LCI 变频器的应用	63
4.1.4 CC/LCI 混合变频器	64
4.2 基于可关断器件的 PWM 低压变频器	65
4.2.1 PWM 变流基础	66
4.2.2 交-直-交电压型变频器	68
4.2.3 交-直-交电压型变频器的应用	75
4.2.4 交-直-交电流型变频器	83
4.2.5 矩阵变频器	85
4.3 基于可关断器件的 PWM 中压交-直-交变频器	90
4.3.1 中压电压等级问题	90
4.3.2 电压型中点钳位三电平变频器	91
4.3.3 电压型电容钳位四电平变频器	99
4.3.4 电压型 H 桥级联变频器	100
4.3.5 电流型变频器	104
4.4 电压型 PWM 控制策略	105
4.4.1 几个名词和概念	105
4.4.2 二电平变频器的 PWM 控制策略	106
4.4.3 三电平中点钳位变频器的 PWM 控制策略	123
4.4.4 H 桥级联变频器的 PWM 控制策略	132
参考文献	133
第5章 高性能交流电动机调速基础	135

5.1 电动机统一控制理论	135
5.1.1 调速的关键是转矩控制	135
5.1.2 统一的电动机转矩公式	136
5.2 直流电动机的调速控制	137
5.3 交流电动机的调速控制	138
5.3.1 标量控制系统	139
5.3.2 高性能控制概念	141
5.4 坐标系及符号规定	143
5.4.1 交流电动机的坐标系	144
5.4.2 符号规定	144
5.5 交流电动机的空间矢量概念	145
5.6 矢量的坐标变换	148
5.7 三相交流电流控制	150
5.8 三相 PWM 整流的控制	153
5.9 高性能调速系统中电动机的加、减速和正、反转	155
参考文献	156
第 6 章 异步电动机矢量控制系统	157
6.1 选取基准矢量	157
6.2 异步电动机的转矩和磁链	158
6.3 异步电动机的模型	162
6.3.1 电压模型	163
6.3.2 电流模型	168
6.3.3 电压模型和电流模型的合成	172
6.4 异步电动机矢量控制系统框图	175
6.5 异步电动机参数的估算和测量	176
6.6 无转速传感器矢量控制系统	180
参考文献	183
第 7 章 异步电动机直接转矩控制系统	185
7.1 选取和计算基准矢量	185
7.2 DTC 的磁链控制	187
7.3 DTC 的转矩控制	188
7.4 DTC 系统框图	190
7.5 DTC 与矢量控制 VC 的比较	191
参考文献	192
第 8 章 异步电动机定子磁链轨迹控制	194
8.1 问题的提出	194
8.2 同步对称优化 PWM 的应用	196
8.3 定子磁链轨迹控制	198

8.4 基于 SFTC 的闭环调速系统	202
8.5 SFTC 与常规矢量控制及直接转矩控制的比较	206
参考文献	207
第 9 章 同步电动机矢量控制系统	208
9.1 引言	208
9.1.1 调速同步电动机	208
9.1.2 同步电动机的它控变频与自控变频	211
9.2 永磁同步电动机矢量控制系统	211
9.3 励磁同步电动机矢量控制系统	214
9.3.1 励磁同步电动机矢量控制系统的特点	214
9.3.2 励磁同步电动机矢量控制原理	214
9.3.3 励磁同步电动机的电动机模型	217
9.3.4 励磁同步电动机功率因数控制	223
9.3.5 励磁同步电动机转子位置角 λ 测量	224
9.3.6 磁链闭环及弱磁控制	225
9.3.7 两个动态问题	227
参考文献	228
第 10 章 矢量控制系统的解耦与调节器参数工程计算	230
10.1 典型控制系统的调节器设计	231
10.1.1 典型 I 型系统	231
10.1.2 典型 II 型系统	232
10.1.3 调节对象传递函数的近似处理	233

11.1.5 工艺闭环控制	253
11.2 基础调速系统	254
11.3 工艺调速的典型转速控制系统	256
11.3.1 一般调速系统	256
11.3.2 稳速系统	256
11.3.3 宽调速系统	256
11.3.4 频繁加减速、正反转系统	257
11.3.5 提升系统	260
11.3.6 抗负载扰动系统	261
11.3.7 多质量系统	264
11.4 多电动机转速控制系统	269
11.4.1 有转速静差系统	269
11.4.2 多单元协调控制系统	271
11.4.3 有机械联系的多电动机主从控制系统	274
11.4.4 大型轧机的单辊传动系统	282
11.5 张力控制系统	283
11.5.1 张力控制系统分类	283
11.5.2 通过转矩给定控制张力系统的单动、联动和断带(线)保护	284
11.5.3 卷取和开卷机的间接张力控制系统	286
11.5.4 直接张力控制系统	291
11.5.5 间接张力控制系统的弹性振荡及抑制	294
11.6 位置控制系统	297
11.6.1 单电动机位置控制系统	297
11.6.2 多电动机角同步控制系统	299
参考文献	300

第 1 章 变频调速引言

1.1 调速系统指标

调速即转速控制,是指在传动系统运行中人为或自动地改变电动机的转速,以满足工作机械对不同转速的要求。从机械特性上看,就是通过改变电动机的参数或外加电压等方法来改变电动机的机械特性,从而改变它与工作机械特性的交点,改变电动机的稳定运转速度。调速指令通过人工设置或经上级控制器设置,调速系统按设定值改变电动机的转速。评价调速系统性能的指标称为调速指标,分为静态调速指标和动态调速指标两大类。

1.1.1 调速系统的静态调速指标

静态调速指标是调速系统达到稳态后的调速指标,又称稳态调速指标。

1.1.1.1 静态调速精度

静态调速精度是转速给定值 n^* 与实际值 n 之差 Δn 的相对值(%),其基值为电动机额定转速 n_N 。在计算 Δn 时要考虑三个导致转速变化的因素:

- 1) 负载转矩变化(从空载至额定转矩 T_N);
- 2) 环境温度变化($\pm 10^\circ\text{C}$);
- 3) 供电电网电压变化($-10\%\sim +10\%$)。

$$\text{静态调速精度} = \frac{\Delta n}{n_N} 100\% = \frac{n^* - n}{n_N} 100\% \quad (1-1)$$

1.1.1.2 静差率和调速范围

静差率又称转速变化率,是指在某一设定转速下负载由空载($\leq 0.1T_N$)到额定负载(T_N)变化时,空载转速 n_0 与额定负载下的转速 n 之差的相对值(%),其基值是 n (参见图 1-1)。

$$\text{静差率} = \frac{n_0 - n}{n} 100\% \quad (1-2)$$

静差率与调速系统机械特性的硬度有关,特性越硬则静差率越小;另外静差率还与工作转速有关,转速越低,静差率越大。

调速范围又称调速比,是指在符合规定的静差率条件下,电动机从最高转速 $n_{\max}$ 到最低转速 $n_{\min}$ 的转速变化倍数(参见图 1-2)。

$$\text{调速范围} = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} \quad (1-3)$$

1) 响应时间 t_{an} : 从施加阶跃给定到输出量第一次到达给定值的时间, 又称起调时间;

2) 调节时间 t_r : 从施加阶跃给定到输出量进入离最终稳态值偏差不超过 $\pm\delta$, 且不再超出该偏差的时间(δ 一般取 2% 或 5%);

3) 超调量 $\sigma(\%)$: 输出量超过给定值的最大数值与给定值之差除以最大给定值的绝对值, 以百分数表示。

$$\sigma = \left| \frac{y(t_m) - y_1}{y_m} \right| \times 100(\%) \quad (1-6)$$

式中, $y(t_m)$ 为输出量超过给定值的最大数值; y_1 为给定值; y_m 为最大给定值。

4) 振荡次数 N : 输出量在调节时间 t_r 内围绕给定值摆动的次数。

1.1.2.2 斜坡给定信号作用下的指标

斜坡给定信号及系统响应波形如图 1-5 所示。

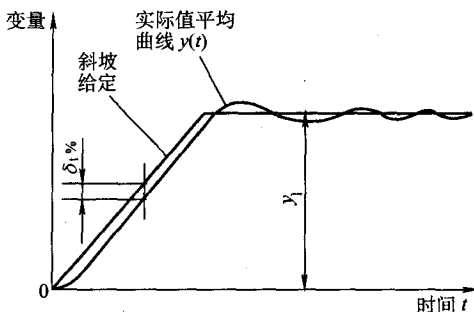


图 1-5 斜坡给定信号及系统响应波形

斜坡给定信号作用下的指标——跟踪误差: 在给定信号斜坡变化期间, 转速给定值与实际值之差 $\delta\%$ 。该指标用于考核系统对给定变化的跟踪性能, 在使用前需先规定斜坡的斜率和考核斜坡中的那一部位。

1.1.2.3 阶跃扰动信号作用下的指标

阶跃扰动信号及系统响应波形如图 1-6 所示。

阶跃扰动信号作用下的指标:

1) 动态波动量 $\sigma_m(\%)$: 输出量与给定值的最大偏差与最大给定值之比的绝对值, 以百分数表示。

$$\sigma_m = \left| \frac{y(t_{md}) - y_1}{y_m} \right| \times 100(\%) \quad (1-7)$$

式中, $y(t_{md})$ 为输出量与给定值的最大偏差; y_1 为给定值; y_m 为最大给定值。

2) 动态波动恢复时间 t_{re} : 从施加扰动起, 至输出量第一次恢复到偏离给定值不超过某一允许

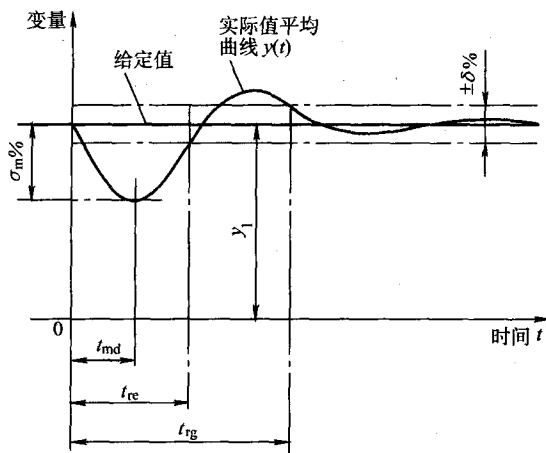


图 1-6 阶跃扰动信号及系统响应波形

值 δ (例如 $\pm 5\%$) 的时间。

3) 动态波动调节时间 t_{re} : 从施加扰动起, 至输出量恢复到偏离给定值不超过某一允许值 δ (例如 $\pm 5\%$) 且不再超出的时间。

4) 动态偏差当量 A_m : 施加扰动后, 在恢复时间 t_{re} 内转速与给定值差的积分 (偏差面积)。为简化计算, 这面积通常用三角形面积来近似:

$$A_m \approx \left| \frac{(\sigma_m t_{\text{re}})}{2} \right| \quad (1-8)$$

这个指标常用于多生产机械转速同步调速系统 (例如连续压延机械、造纸机械等) 的动态性能评价, 它反映了在 t_{re} 期间被加工材料的堆积情况。

1.2 调速系统分类

1.2.1 按驱动电动机类型分类

调速系统按驱动电动机类型分为直流调速和交流调速两大类。

直流调速的驱动电动机为直流电动机, 含他励励磁和串励励磁两大类。交流调速的驱动电动机为交流电动机, 含异步机和同步机两大类。异步机又分笼型异步机及双馈异步机两类。同步机又分永磁同步机、励磁同步机、开关磁阻电机等。

由于直流电动机具有优越的调速性能, 在 20 世纪 80 年代以前高性能调速都采用直流调速, 但直流调速具有下述缺点: 结构复杂, 换向器维护困难; 换向器的换向能力限制了电动机功率和转速 (功率与转速之积不超过 $10^6 \text{ kW} \cdot \text{r/min}$), 不能满足大型机械的需要; 主回路电流流入电枢 (电动机转子), 效率低, 散热条件差, 冷却费用高。交流电动机没有上述缺点。长期以来人们一直希望以交流调速取代直