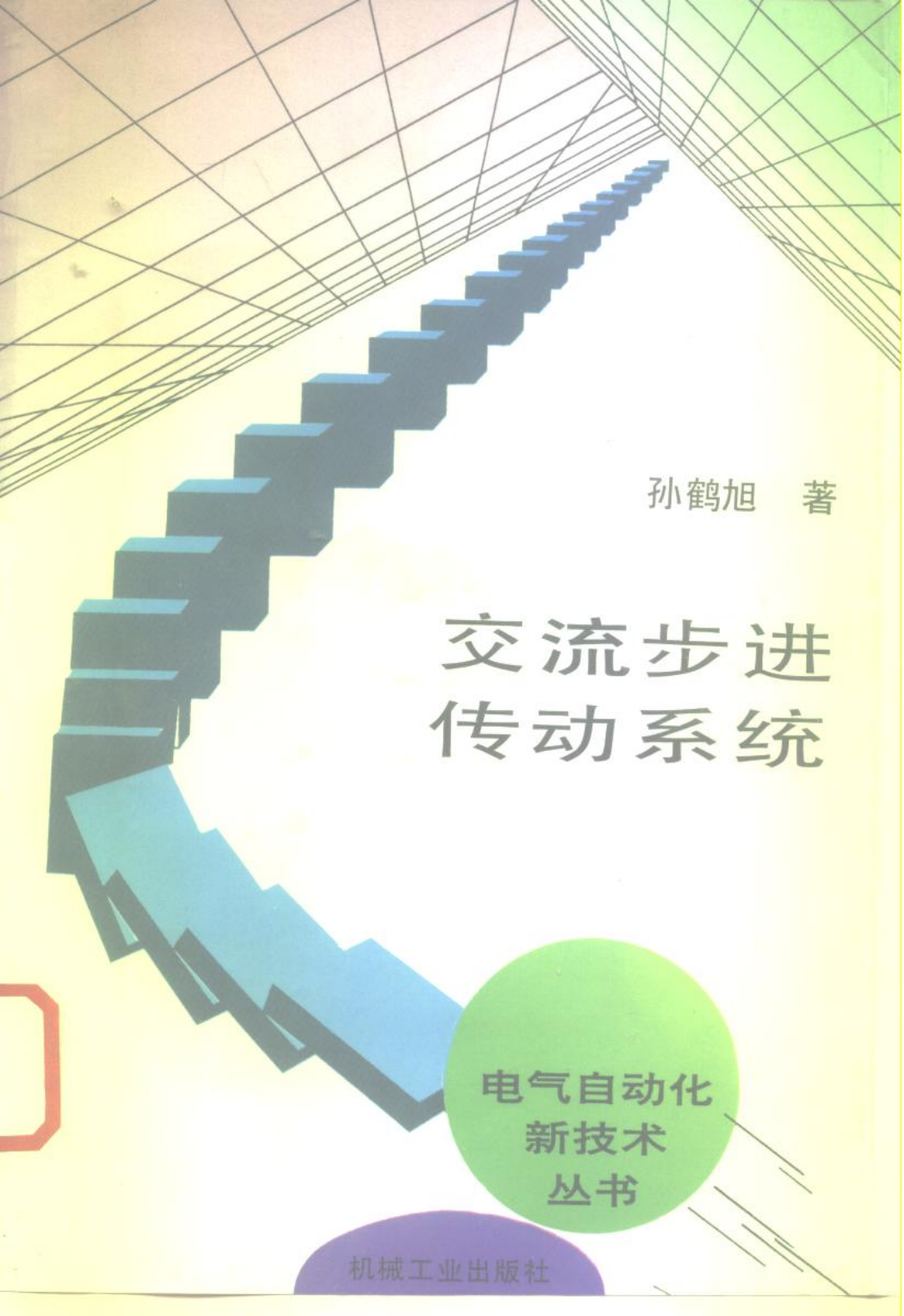




孙鹤旭 著

# 交流步进 传动系统

电气自动化  
新技术  
丛书

机械工业出版社

电气自动化新技术丛书

# 交流步进传动系统

孙鹤旭 著

刘宗富 主审



机械工业出版社

交流步进传动是运动控制中一个新的研究领域。它基于电力电子器件的开关控制、计算机的离散控制和电机的位置控制,使同步电动机步进运动形成一种全新的传动控制技术。本书系统地介绍交流步进传动的理论基础、分析方法、控制方式,系统设计及工业应用。

本书是作者多年来从事交流步进传动系统研究工作的总结。在分析增量运动控制机理的基础上,深入浅出地论述同步电动机步进传动的基本特征、供电方式、动态特性、步进控制、离散技术、参数影响以及应用实例。内容新颖,注重概念,强调实用,适宜自学,激发读者的研究兴趣,拓宽电气传动的科研领域。

本书适宜于从事电气自动化技术的工程技术人员阅读,也可作为高等院校有关专业教师、研究生和学生的教学参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

交流步进传动系统/孙鹤旭著. —北京:机械工业出版社, 1996. 7

(电气自动化新技术丛书)

ISBN 7-111-05343-5

I. 交… II. 孙… III. 交流电传动: 步进电动机-传动系 IV. TM34

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 16803 号

出版人: 马九荣 (北京市百万庄南街 1 号 邮政编码 100037)  
责任编辑: 孙流芳 版式设计: 张世琴 责任校对: 樊中英  
封面设计: 姚毅 责任印制: 卢子祥

三河市宏达印刷厂印刷 · 新华书店北京发行所发行  
1996 年 12 月第 1 版第 1 次印刷

850mm×1168mm<sup>1</sup>/<sub>32</sub> · 10.5 印张 · 269 千字

0 001—4 500 册

定价: 20.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

# 《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建设“四化”、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，难免存在不少问题和缺点，希广大读者给予支持和帮助，并欢迎大家批评指正。

本丛书选题将随新技术发展不断扩充，凡属电气自动化领域新技术均可作为专题撰写新书。我们也面向社会公开征稿，欢迎自列选题投稿。来稿或索取稿约请函寄 300180 天津市津塘路 174 号天津电气传动设计研究所转《电气自动化新技术丛书》编辑委员会。

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会

## 《电气自动化新技术丛书》

### 编辑委员会成员

主任委员：陈伯时

副主任委员：喻士林 夏德铃 李永东

委 员：（以姓氏笔划为序）

|     |     |     |
|-----|-----|-----|
| 王 炎 | 王文瑞 | 王正元 |
| 刘宗富 | 孙 明 | 孙武贞 |
| 孙流芳 | 过孝瑚 | 许宏纲 |
| 朱稚清 | 夏德铃 | 陈伯时 |
| 陈敏逊 | 李永东 | 李序葆 |
| 张 浩 | 张敬民 | 周国兴 |
| 涂 健 | 蒋静坪 | 舒迪前 |
| 喻士林 | 霍勇进 | 戴先中 |

《电气自动化新技术丛书》

出版基金资助单位

机械工业部天津电气传动设计研究所

深圳华能电子有限公司

北京电力电子新技术研究开发中心

天津普辰电子工程有限公司

## 前 言

交流步进传动是在运动控制的发展中形成的一个新的研究分支。它是在微机的控制下由静止变频器供电,使同步电动机定子磁动势离散运动,在电动机轴上得到位置和速度输出的一种新型传动控制方式。交流步进传动控制是把位置控制、速度控制及伺服控制等不同的传动控制方式有机地结合起来,从而实现高性能的交流传动控制系统。

在增量运动控制的发展过程中,一直是以步进电动机为主。然而,步进电动机是以精确定位作为主要目标进行设计的,要求堵转转矩大、定位转矩大、定位精度高,在结构设计上保留着组合电磁铁的基本特征,即各绕组之间产生的磁场是彼此孤立的,电动机的容量小,效率低。对于交流电动机,追求的最佳性能指标是一个空间正弦分布的圆旋转磁场,可获得大容量和高效率。随着电力电子学,计算机控制技术和近代交流传动理论的发展,人们对传统的传动控制理论和控制方式不断进行反思。能满足增量运动控制要求的不仅仅只有步进电动机,开关磁阻电动机、无刷直流电动机、同步电动机等在不同的应用领域中得到了广泛的应用。由于电力电子器件的应用,使交流电动机连续的圆旋转磁场变成了难于实现的理想目标,步进离散波成为电动机的实际波形,它具有增量运动控制的本质。我们已经很难找到增量控制与连续控制之间的严格界线。交流步进传动就是这两种控制方式有机地结合而产生的一种新的传动控制方式。

运动控制发展到今天,已经形成取代直流电动机的各种客观条件,矢量控制技术使异步电动机调速崛起,但真正符合时代需要的是同步电动机。理想的电动机应该具有两个互相独立的磁动势,一个是励磁磁动势,产生主磁通,一般情况下保持不变。另



一个是转矩磁动势,应具有较小的电磁时间常数,反应灵敏,便于控制。电力电子器件给电动机供电,电动机得到的是频率或高或低的步进磁动势,如果将步进磁动势分解为转和不转两个阶段,则对于异步电动机是有害的,为它的矢量控制增加了很多困难。但对于同步电动机,这是一种突破性的转变,大大减少了它的控制的复杂性,提高了它的控制性能。在步进控制中,利用同步电动机磁动势的位置控制,不但可以和他励直流电动机一样具有极佳的动态和静态调速品质,而且突破了直流电动机矩角只能是 $90^\circ$ 的局限,允许对矩角进行必要的调整,既可以调速,又可以定位,且功率因数可以自由调整。

今日的同步电动机结构繁多,自成体系,各具特色。其控制方式更是各具千秋,是强调圆旋转磁场理论,还是组合电磁铁理论;认为互感是首要的,还是自感是首要的;应该是正弦波,还是阶梯波;采用连续控制,还是离散控制;以速度控制为目标,还是以位置控制为目标。仁者见仁,智者见智,作者正是在这一背景下致力于交流步进传动系统研究的,目的在于使同步电动机逐步成为运动控制中的核心电动机。

东北大学刘宗富教授是这一理论的创始人,他从70年代开始致力于交流步进传动系统的研究,提出了一系列的研究方法,取得了许多研究成果,并把它应用到工业中去。作为刘宗富教授的学生,这一颇具时代感的理论深深地吸引着我,并决心从事这方面的研究工作。本书就是基于1981年刘宗富教授所著的《交流步进拖动系统》(由原东北工学院出版)一书为蓝本,结合本人的博士论文及多年来的研究成果撰写的,系统地介绍交流步进传动这一理论体系、分析方法和控制方式。

全书共10章。第1章从磁动势的离散控制来分析增量运动中电动机的共性,提出交流步进传动控制的发展的必然性。第2章从步进运动的特点来介绍几种典型步进电动机的工作原理和步进特性。第3章介绍交流步进传动的基本特征,包括圆旋转磁场的离散化、转矩矢量和解耦的分析方法以及同步电动机数学模型的

建立。第4章介绍一些常用功率主电路在步进系统中的供电特性,给出了马鞍形、星形、三角形以及双H桥等新型功率电路的特性。第5章给出了交流步进传动的基本设计方法,分析步进系统的两个重要指标:动态角误差和静态角误差,及它们的基本特性和状态。第6章分别论述了交流步进传动的开环控制系统、闭环控制系统及其它高性能控制系统。第7章从状态空间和计算机辅助分析两个方面介绍了交流步进传动的分析方法。第8章分析同步电动机参数和结构对步进传动的动态影响,为系统设计与控制提出最佳参数和结构。第9章从电动机设计、电源设计和系统设计三个方面介绍了交流步进传动的应用。还介绍了同步电动机电齿轮在异步,恒延伸轧制中的应用。内容新颖,系统性强,深入浅出,便于自学。全书由刘宗富教授主审并最后定稿。

陈伯时教授审阅了本书的写作提纲,并提出了宝贵的修改意见,作者表示由衷的感谢。本书选题和出版过程中,得到中国自动化学会电气自动化专业委员会、中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会《电气自动化新技术丛书》编委会喻士林教授级高级工程师等各位专家、教授的大力支持,东北大学自控系许多同行提供了有关资料,迟岩副教授、臧小杰副教授提出了许多宝贵建议,在此谨致谢意。

本人负责承担的“矿井主扇同步电动机多步预测控制的研究”科研项目中有关同步电动机的控制应用了这一理论,这一项目得到了国家自然科学基金的资助;“同步电动机多模态预测控制的研究”项目得到了辽宁省博士启动基金的资助;“交流步进拖动的可行性研究”和“机电一体化交流步进阀门的研究”项目分别两次得到煤炭工业部煤炭科学基金的资助。这些课题的研究为本书提供了丰富的素材和成果,在此对国家自然科学基金委员会、辽宁省科学基金委员会和煤炭科学基金委员会对本项研究工作给予的支持和鼓励表示深深的谢意。

交流步进传动一书反映了电气自动化领域的新技术和新成果。目前,国内外还没有系统地阐述这一新理论和技术的专著。为

此由衷地感谢《电气自动化新技术丛书》编委会给了这样一个机会,通过这本书的出版把这一新理论和新技术介绍给广大读者。由于本书是首次正式出版,无疑增加了撰写的难度。由于作者学识水平所限加之时间紧迫,谬误和欠妥之处在所难免,敬请读者不吝指教。

作 者  
1996 年 1 月

# 目 录

《电气自动化新技术丛书》序言

前言

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 第 1 章 导论 .....                    | 1  |
| 1.1 概述 .....                      | 1  |
| 1.2 增量运动中的电动机 .....               | 2  |
| 1.2.1 步进电动机 .....                 | 2  |
| 1.2.2 开关磁阻电动机 .....               | 3  |
| 1.2.3 无换向器电动机 .....               | 5  |
| 1.2.4 交流步进同步电动机 .....             | 6  |
| 1.3 增量运动的交流控制 .....               | 8  |
| 1.3.1 增量运动控制与电力电子技术 .....         | 8  |
| 1.3.2 正弦波与阶梯波 .....               | 8  |
| 1.3.3 离散控制与数字控制 .....             | 9  |
| 第 2 章 步进电动机的步进传动 .....            | 11 |
| 2.1 概述 .....                      | 11 |
| 2.2 由定位电磁铁构成的步进电动机 .....          | 12 |
| 2.3 反应式步进电动机 .....                | 13 |
| 2.3.1 多段反应式步进电动机 .....            | 13 |
| 2.3.2 单段反应式步进电动机 .....            | 17 |
| 2.3.3 反应转矩 .....                  | 20 |
| * 2.3.4 反应式步进电动机的供电方式和转矩星形图 ..... | 22 |
| 2.4 两相混合式步进电动机 .....              | 26 |
| 2.4.1 结构 .....                    | 26 |
| 2.4.2 工作原理 .....                  | 29 |
| 2.4.3 供电方式 .....                  | 33 |
| 2.5 五相混合式步进电动机 .....              | 36 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 2.5.1 结构 .....            | 36  |
| 2.5.2 工作原理 .....          | 36  |
| 2.5.3 供电方式 .....          | 41  |
| 2.6 直线步进电动机 .....         | 45  |
| 2.6.1 结构 .....            | 45  |
| 2.6.2 工作原理 .....          | 46  |
| 第3章 同步电动机步进运动的基本特征 .....  | 50  |
| 3.1 概述 .....              | 50  |
| 3.2 圆旋转磁场的离散化 .....       | 51  |
| 3.2.1 三相交流电动机的旋转磁场 .....  | 51  |
| 3.2.2 旋转磁场离散为步进磁场 .....   | 53  |
| 3.2.3 马鞍形直流电流的离散 .....    | 57  |
| 3.2.4 离散波形分析 .....        | 59  |
| 3.3 步进运动的转矩矢量 .....       | 62  |
| 3.3.1 步进运动的矩角特性 .....     | 62  |
| 3.3.2 定位转矩星形图 .....       | 64  |
| 3.4 旋转矢量的解耦 .....         | 66  |
| 3.4.1 矢量分解法 .....         | 66  |
| 3.4.2 三相电动机的矢量变换 .....    | 69  |
| 3.5 同步电动机的步进运动及数学描述 ..... | 71  |
| 3.5.1 反应式同步电动机 .....      | 71  |
| 3.5.2 永磁式同步电动机 .....      | 84  |
| 3.5.3 直流励磁同步电动机 .....     | 96  |
| 第4章 交流步进电源 .....          | 92  |
| 4.1 概述 .....              | 92  |
| 4.2 步进传动的直流供电 .....       | 93  |
| 4.2.1 步进电动机的直流供电 .....    | 93  |
| 4.2.2 马鞍形直流供电 .....       | 94  |
| 4.2.3 普通同步电动机的直流供电 .....  | 96  |
| 4.3 交-直-交流型变频器 .....      | 100 |
| 4.3.1 工作原理 .....          | 100 |
| 4.3.2 交-直-交步进电源 .....     | 104 |
| 4.4 电流型变频器的多重化 .....      | 105 |

|       |                        |     |
|-------|------------------------|-----|
| 4.4.1 | 多重化技术 .....            | 105 |
| 4.4.2 | 步进传动的多重化 .....         | 109 |
| 4.5   | 交-交变频器 .....           | 110 |
| 4.5.1 | 工作原理 .....             | 110 |
| 4.5.2 | 由六个三相全控桥构成的变频器 .....   | 114 |
| 4.5.3 | 由四个三相全控桥构成的变频器 .....   | 115 |
| 4.5.4 | 由三个三相全控桥构成的变频器 .....   | 116 |
| 4.5.5 | 双 H 桥交-交变频器 .....      | 118 |
| 第 5 章 | 步进传动的动态计算 .....        | 125 |
| 5.1   | 概述 .....               | 125 |
| 5.2   | 步进传动特性的计算 .....        | 126 |
| 5.2.1 | 步进传动系统的传动比 .....       | 126 |
| 5.2.2 | 步进传动系统的转速和调速比 .....    | 128 |
| 5.3   | 步进传动的折算 .....          | 130 |
| 5.3.1 | 转矩的折算 .....            | 130 |
| 5.3.2 | 转动惯量的折算 .....          | 132 |
| 5.4   | 步进传动的静态角误差 .....       | 136 |
| 5.4.1 | 静态角误差 .....            | 136 |
| 5.4.2 | 永磁式步进同步电动机的静态角误差 ..... | 137 |
| 5.4.3 | 反应式步进同步电动机的静态角误差 ..... | 140 |
| 5.4.4 | 步进电动机的静态角误差 .....      | 140 |
| 5.5   | 步进传动的动态角误差 .....       | 141 |
| 5.5.1 | 点动过程 .....             | 141 |
| 5.5.2 | 突跳过程 .....             | 145 |
| 5.5.3 | 动态角误差 .....            | 147 |
| 5.5.4 | 突跳频率的计算 .....          | 150 |
| 5.6   | 步进传动的基本工作状态 .....      | 151 |
| 5.6.1 | 静态 .....               | 151 |
| 5.6.2 | 极限同步状态 .....           | 153 |
| 5.6.3 | 非极限同步状态 .....          | 155 |
| 5.6.4 | 过渡状态 .....             | 156 |
| 第 6 章 | 同步电动机的步进控制 .....       | 159 |
| 6.1   | 概述 .....               | 159 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 6.2 步进传动的控制特性          | 161 |
| 6.2.1 典型控制特性           | 161 |
| 6.2.2 混合式步进电动机的矩频特性    | 164 |
| 6.3 同步电动机的位置开环控制       | 169 |
| 6.3.1 点动控制             | 169 |
| 6.3.2 恒频控制             | 173 |
| 6.3.3 升降频控制            | 177 |
| 6.3.4 电轴和电齿轮           | 179 |
| 6.4 同步电动机的位置闭环控制       | 184 |
| 6.4.1 旋转编码器            | 184 |
| 6.4.2 转换角与超前角          | 184 |
| 6.4.3 转换角与超前角在闭环控制中的作用 | 187 |
| 6.4.4 采用编码器反馈的闭环点位控制   | 190 |
| 6.4.5 同步电动机伺服系统        | 193 |
| 6.5 同步电动机的矩角直接控制       | 197 |
| 6.5.1 磁动势幅值恒定的矩角控制     | 197 |
| 6.5.2 功率因数为1的矩角控制      | 201 |
| 6.5.3 步进运动的转矩矢量控制      | 207 |
| 6.6 同步电动机的数字控制         | 210 |
| 6.6.1 电压前馈控制           | 210 |
| 6.6.2 位置状态反馈控制         | 212 |
| 第7章 同步电动机步进运动的分析方法     | 215 |
| 7.1 概述                 | 215 |
| 7.2 步进运动的状态空间描述        | 216 |
| 7.2.1 转子磁链的状态方程        | 216 |
| 7.2.2 电磁转矩的状态方程        | 220 |
| 7.2.3 电压的状态方程          | 220 |
| 7.3 步进运动的状态关系          | 221 |
| 7.3.1 定子电流与磁链的状态关系     | 221 |
| 7.3.2 电压的状态关系          | 223 |
| 7.4 步进运动的状态空间分析        | 224 |
| 7.4.1 状态空间稳态分析         | 224 |
| 7.4.2 稳定性分析            | 227 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 7.5 同步电动机步进运动的电路仿真模型 .....       | 230 |
| 7.5.1 PSPICE 及器件的建模 .....        | 230 |
| 7.5.2 同步电动机的电路仿真模型 .....         | 236 |
| 7.5.3 同步电动机步进控制的电路仿真模型 .....     | 241 |
| 7.5.4 模拟计算机运算部件的电路模拟 .....       | 243 |
| 7.6 步进运动的谐波分析与抑制 .....           | 246 |
| 7.6.1 电流谐波的傅里叶分析 .....           | 246 |
| 7.6.2 谐波的抑制与消除对策 .....           | 248 |
| 第 8 章 电动机参数对同步电动机步进运动的动态影响 ..... | 251 |
| 8.1 概述 .....                     | 251 |
| 8.2 同步电动机参数的辨识 .....             | 252 |
| 8.2.1 直流衰减法中参数的辨识 .....          | 252 |
| 8.2.2 同步电动机参数的计算 .....           | 253 |
| 8.2.3 基于微机的参数测定 .....            | 256 |
| 8.3 电动机参数对步进运动特性的影响 .....        | 258 |
| 8.3.1 动态分析基础 .....               | 258 |
| 8.3.2 定子电阻对步进特性的影响 .....         | 261 |
| 8.3.3 转子电阻对步进特性的影响 .....         | 262 |
| 8.3.4 电枢反应电感对步进特性的影响 .....       | 265 |
| 8.3.5 漏感对步进特性的影响 .....           | 272 |
| 8.4 电动机结构对步进运动特性的影响 .....        | 273 |
| 8.4.1 同步电动机转子结构特性分析 .....        | 273 |
| 8.4.2 步进运动中凸极的作用 .....           | 274 |
| 8.4.3 步进运动中阻尼绕组的作用 .....         | 276 |
| 第 9 章 交流步进控制的应用 .....            | 278 |
| 9.1 概述 .....                     | 278 |
| 9.2 基于步进磁场的步进电动机设计 .....         | 279 |
| 9.2.1 伯格五相步进电动机的改进 .....         | 279 |
| 9.2.2 他励减速式步进同步电动机 .....         | 285 |
| 9.3 步进控制的大功率晶体管 PWM 变频器 .....    | 296 |
| 9.3.1 实用型 PWM 变频器 .....          | 296 |
| 9.3.2 开关模式及步进控制 .....            | 299 |
| 9.3.3 变频器及步进系统特性 .....           | 304 |



|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 9.4 同步电动机电齿轮在异步恒延伸轧制中的应用 .....   | 306 |
| 9.4.1 异步恒延伸轧制对 S 辊传动电动机的要求 ..... | 306 |
| 9.4.2 同步电动机电齿轮控制系统 .....         | 308 |
| 9.4.3 同步电动机电齿轮的实现 .....          | 313 |
| 参考文献 .....                       | 315 |