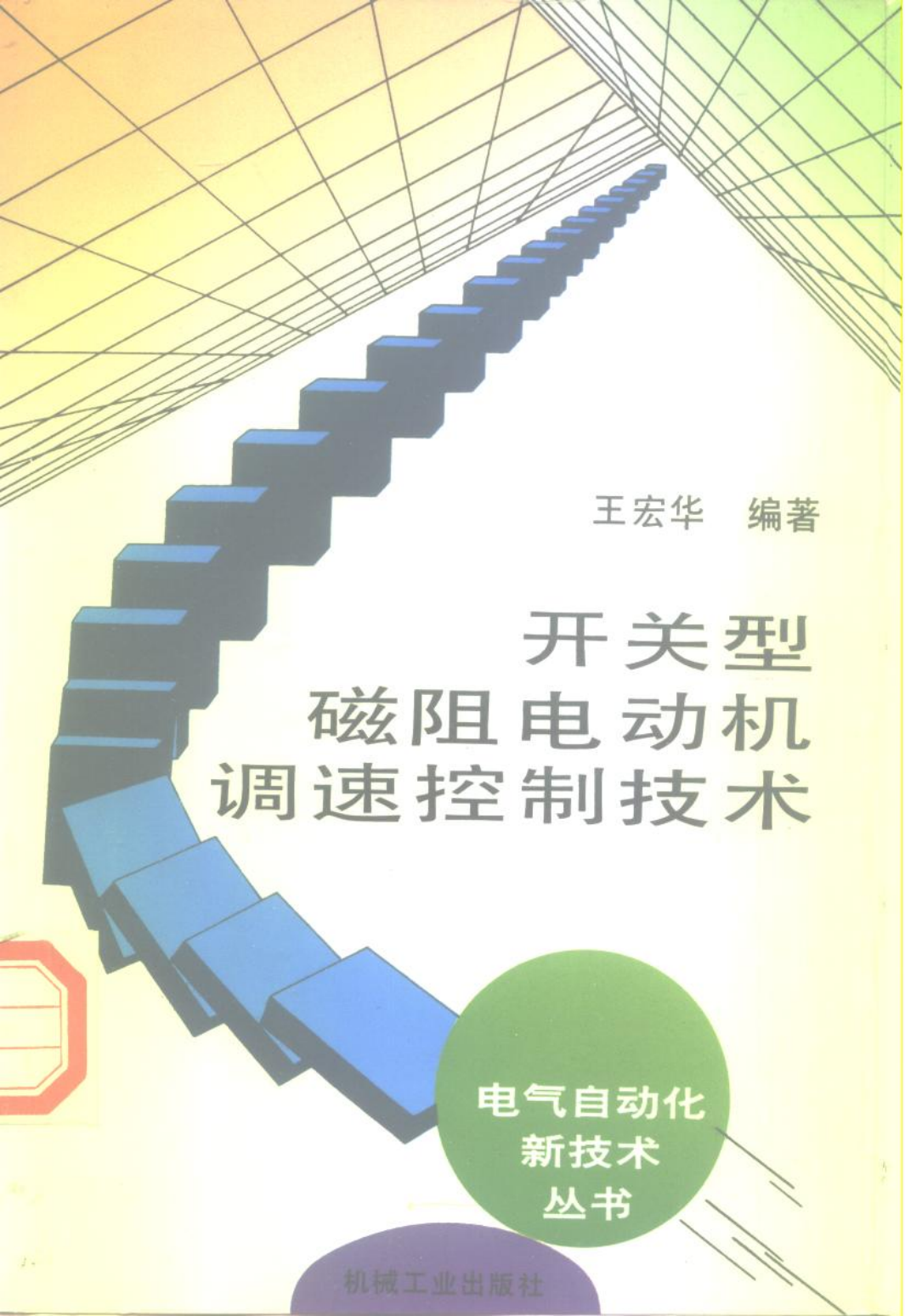




王宏华 编著

# 开关型 磁阻电动机 调速控制技术



电气自动化  
新技术  
丛书

机械工业出版社

TM352

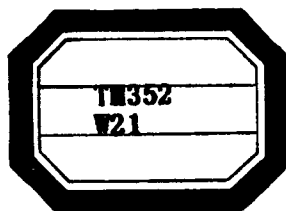
430932

W21

电气自动化新技术丛书

# 开关型磁阻电动机调速控制技术

王宏华 编著



00430932



机械工业出版社

DV9.1/10

开关型磁阻电动机调速系统 (SRD) 是 80 年代中期兴起的新型交流调速系统, 已成为普通交、直流调速系统的强有力竞争者。

本书以国内外成熟的 SRD 技术为主线, 结合作者研制实践, 系统介绍 SRD 技术的最新发展, 重点阐述 SRD 的工作原理及控制器、功率变换器各环节的设计理论与方法。全书共八章, 主要包括导论, SR 电动机数学模型及调速理论, 反馈信号检测技术, 功率变换器和调节器设计, SR 电动机脉宽调压调速系统设计, 系统的改进和性能的提高, 微机控制系统设计实例。本书回避繁琐数学推导, 注重物理概念, 强调学术性和实用性相结合, 理论联系实际。

本书可作为电气自动化领域中的工程技术人员和研究人员的参考书, 亦可供高等院校电气自动化类的教师、研究生、高年级学生阅读。

## 图书在版编目(CIP)数据

开关型磁阻电动机调速控制技术 / 王宏华编著. — 北京: 机械工业出版社, 1999.8 重印

(电气自动化新技术丛书)

ISBN 7111-04623-4

I. 开… II. 王… III. 磁阻电动机—调速控制器 IV. TM352

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 29876 号

出 版 人: 马九荣 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 孙流芳 版式设计: 李松山 责任校对: 丁丽丽

封面设计: 姚 毅 责任印制: 何全君

北京交通印务实业公司印刷·新华书店北京发行所发行

1999 年 7 月第 1 版第 3 次印刷

850mm×1168mm<sup>1</sup>/<sub>32</sub>·7.5 印张·202 千字

6 301—7 800 册

定价: 14.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821, 68326677-2527

# 《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 | 过孝珩 | 许宏纲 |
| 朱稚清 | 夏德铃 | 陈伯时 |
| 陈敏逊 | 李永东 | 李序葆 |
| 张 浩 | 张敬明 | 周国兴 |
| 涂 健 | 蒋静坪 | 舒迪前 |
| 喻士林 | 霍勇进 | 戴先中 |

## 前 言

开关型磁阻电动机调速系统 (Switched Reluctance Drive, 简称 SRD) 是 80 年代中期发展起来的新型交流调速系统, 它融新的电动机结构——开关型磁阻电动机 (Switched Reluctance Motor, 简称 SR 电动机) 与现代电力电子技术、控制技术为一体, 兼有异步电动机 (本书均指感应电动机) 变频调速系统和直流电动机调速系统的优点, 已成为当代电气传动的热门课题之一。国外已有正式的 SRD 产品, 应用在牵引运输、通用工业、航空工业、家用电器等各个领域, 显示出强大的市场竞争力。目前, 我国亦已从 SRD 理论研究阶段迈步到工业应用阶段, 相信不久的将来, SR 电动机在国内电动机调速领域内亦会取得真正的一席之地。

虽然 SRD 前景诱人, 但也有其缺点, 最主要是转矩脉动和引起的噪声较大。通过 SR 电动机的正确设计和优化控制技术, 这一问题正在逐步得到解决。

因此, 尽管 10 余年来发表的 SRD 研究论文为数不少, SRD 控制技术亦可以说已初步形成自己的体系, 但它毕竟是一项正在发展之中的新技术, 可能我们会发现更多的新观点, 也可能会看到现有的一些观点逐步被摒弃。无疑, 等待一段时间写书条件将更好, 但缺少系统介绍 SRD 原理及技术的书籍, 已成为 SRD 这一新技术推广应用的主要障碍之一, 为促进我国 SRD 研究的发展, 加快其商品化工作进程, 因而编写此书。

本书基于作者从事 SRD 研究与开发的体会, 以国内外成熟的研究成果为主线, 穿插个人研究成果, 系统阐述 SRD 工作原理及其功率变换器、控制器各环节的设计原理和方法。本书力求学术性和实用性相结合, 在注重理论分析的同时, 也给出一些实例, 避免过多的数学推导。作者希望本书能为读者熟悉、掌握 SRD 控制

技术提供引玉之砖，是否达到了这一目的，只能由读者评判。限于作者的水平和视野，书中谬误、疏漏之处在所难免，衷心希望读者批评、指正。

本书初稿承南京动力高等专科学校王耀德教授逐字审阅，提出了许多宝贵的修改和补充意见，特此表示感谢。作者感谢上海工业大学陈伯时教授、上海电器科学研究所傅丰礼高级工程师、山西矿业学院王振民教授为本书写作提供资料。对许大中教授、毛宗源教授、喻士林教授级高级工程师给予的鼓励，深表谢意。本书参阅和引用了国内外SRD研究的大量文献资料，这些文献作者的研究成果为本书提供了极有价值的素材，在此一并致谢。作者认为，本书是国内外SRD研究工作者的共同成果。另外，本书能够出版，有赖于中国自动化学会电气自动化委员会、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、机械工业出版社的支持和帮助，作者谨致以深切的谢意。

作者

1994年10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 电气传动的发展                  | 1  |
| 1.2 SR 电动机的基本结构、原理与特点        | 2  |
| 1.3 SRD 的基本结构、原理与特点          | 6  |
| 1.3.1 SRD 的基本构成与工作原理         | 6  |
| 1.3.2 SRD 与步进电动机驱动系统的比较      | 8  |
| 1.3.3 SRD 与异步电动机变频调速系统的比较    | 9  |
| 1.4 SRD 的发展简史与发展方向           | 12 |
| 1.4.1 SRD 发展简史               | 12 |
| 1.4.2 SRD 存在的问题与发展方向         | 18 |
| 1.5 SRD 的应用领域                | 19 |
| 第 2 章 SR 电动机的数学模型与调速理论       | 21 |
| 2.1 概述                       | 21 |
| 2.2 SR 电动机的基本方程式             | 22 |
| 2.2.1 电路方程                   | 22 |
| 2.2.2 机械方程                   | 24 |
| 2.2.3 机电联系方程                 | 24 |
| 2.3 SR 电动机相电流的线性分析           | 26 |
| 2.3.1 SR 电动机简化线性模型           | 26 |
| 2.3.2 理想线性模型的 SR 电动机绕组磁链波形   | 28 |
| 2.3.3 基于线性模型的 SR 电动机绕组电流解析分析 | 30 |
| 2.4 SR 电动机转矩的准线性分析           | 37 |
| 2.4.1 SR 电动机准线性模型            | 37 |
| 2.4.2 基于准线性模型的瞬时转矩解析计算       | 39 |
| 2.4.3 基于准线性模型的平均转矩计算         | 41 |

|       |                                |     |
|-------|--------------------------------|-----|
| 2.5   | SRD 的控制方法 .....                | 45  |
| 2.6   | SR 电动机起动运行分析 .....             | 50  |
| 2.7   | SR 电动机 CCC 方式运行分析 .....        | 52  |
| 2.7.1 | CCC 方式相电流线性分析 .....            | 54  |
| 2.7.2 | CCC 方式电磁转矩线性分析 .....           | 56  |
| 2.7.3 | CCC 方式绕组放电时间的特点 .....          | 57  |
| 2.8   | SR 电动机 APC 方式运行分析 .....        | 58  |
| 2.9   | SR 电动机制动运行分析 .....             | 60  |
| 第 3 章 | SR 电动机功率变换器设计基础 .....          | 65  |
| 3.1   | 概述 .....                       | 65  |
| 3.2   | 功率变换器主电路 .....                 | 65  |
| 3.2.1 | 不对称半桥线路 .....                  | 66  |
| 3.2.2 | 每相只有一个主开关管的功率变换器 .....         | 67  |
| 3.2.3 | 具有最少数量主开关器件的功率变换器 .....        | 74  |
| 3.3   | 主开关器件 .....                    | 76  |
| 3.4   | 功率变换器的伏安容量 .....               | 79  |
| 3.4.1 | SR 电动机功率变换器容量的计算 .....         | 79  |
| 3.4.2 | 能量比率——广义的功率因数 .....            | 80  |
| 3.4.3 | 饱和对要求的变换器伏安容量的影响 .....         | 85  |
| 3.5   | 主开关器件电压额定值 .....               | 87  |
| 3.6   | 主开关器件电流额定值 .....               | 88  |
| 3.6.1 | 以电流定额最小为目标的系统优化设计 .....        | 89  |
| 3.6.2 | 电流定额的估算 .....                  | 92  |
| 3.7   | 输入滤波器的设计 .....                 | 93  |
| 3.8   | 功率变换器的损耗分析 .....               | 96  |
| 3.9   | 2.2kW SR 电动机功率变换器设计举例 .....    | 100 |
| 3.9.1 | 主电路元器件选型 .....                 | 101 |
| 3.9.2 | GTR 开关过程安全保护——RCD 关断吸收网络 ..... | 103 |
| 3.9.3 | 基极驱动电路的设计 .....                | 107 |
| 3.9.4 | 散热器选配 .....                    | 108 |
| 第 4 章 | 反馈信号检测 .....                   | 109 |
| 4.1   | 概述 .....                       | 109 |

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| 4.2 位置检测 .....                      | 109 |
| 4.2.1 光敏式转子位置传感器检测转子位置 .....        | 110 |
| 4.2.2 无传感器检测转子位置的方法 .....           | 112 |
| 4.3 相电流检测 .....                     | 116 |
| 4.3.1 电阻采样光电隔离式电流检测法 .....          | 117 |
| 4.3.2 磁电隔离霍尔元件电流检测法 .....           | 118 |
| 4.4 速度检测 .....                      | 121 |
| 4.4.1 模拟测速法 (F/V 电路测速) .....        | 122 |
| 4.4.2 数字测速法 .....                   | 123 |
| 第 5 章 SRD 控制系统设计基础 .....            | 129 |
| 5.1 概述 .....                        | 129 |
| 5.2 SRD 小信号线性化动态模型 .....            | 131 |
| 5.2.1 SRD 电动机小信号模型及其传递函数 .....      | 131 |
| 5.2.2 SRD 中其他环节的传递函数 .....          | 133 |
| 5.2.3 SRD 整体结构图及传递函数 .....          | 135 |
| 5.3 SRD 的闭环控制特性 .....               | 137 |
| 5.4 调节器设计 .....                     | 140 |
| 5.4.1 “二阶最佳”工程设计方法 .....            | 140 |
| 5.4.2 “三阶最佳”工程设计方法 .....            | 141 |
| 5.4.3 调节器设计小结 .....                 | 141 |
| 第 6 章 SR 电动机脉宽调压调速系统设计举例 .....      | 143 |
| 6.1 概述 .....                        | 143 |
| 6.2 系统原理框图 .....                    | 144 |
| 6.3 逻辑控制电路的设计 .....                 | 145 |
| 6.4 SG3524 线性 PWM 集成电路及其应用 .....    | 147 |
| 6.4.1 SG3524 线性 PWM 集成电路 .....      | 147 |
| 6.4.2 SG3524 在 SR 电动机调压调速中的应用 ..... | 149 |
| 6.5 调节器设计 .....                     | 150 |
| 6.5.1 系统参数计算 .....                  | 151 |
| 6.5.2 速度调节器的设计及具体实现 .....           | 154 |
| 6.6 系统性能分析 .....                    | 157 |
| 6.6.1 闭环机械特性 .....                  | 157 |

|       |                                              |     |
|-------|----------------------------------------------|-----|
| 6.6.2 | 饱和超调分析 .....                                 | 158 |
| 6.6.3 | 速度环动态特性 .....                                | 161 |
| 6.7   | 小结 .....                                     | 162 |
| 第7章   | 改善 SRD 性能的方法 .....                           | 164 |
| 7.1   | 概述 .....                                     | 164 |
| 7.2   | SR 电动机各种运行方式的组合 .....                        | 165 |
| 7.2.1 | SR 电动机各种控制方式及其实现 .....                       | 165 |
| 7.2.2 | SR 电动机各种运行方式的适用条件及组合 .....                   | 169 |
| 7.3   | SRD 参数最优化控制 .....                            | 172 |
| 7.3.1 | 基于非线性数学模型的开关角优化法 .....                       | 173 |
| 7.3.2 | 基于线性模型的关断角优化法 .....                          | 176 |
| 7.4   | 抑制 SR 电动机转矩脉动的控制技术 .....                     | 181 |
| 7.5   | 无位置传感器 SRD .....                             | 186 |
| 7.5.1 | 由测量定子相电感估算转子位置 .....                         | 187 |
| 7.5.2 | 带状态观测器的无位置传感器 SR 电动机闭环<br>控制系统 .....         | 192 |
| 第8章   | SR 电动机微机控制系统设计举例 .....                       | 203 |
| 8.1   | 概述 .....                                     | 203 |
| 8.2   | Z80 微机控制的 SR 电动机直接数字控制 (DDC)<br>系统设计举例 ..... | 204 |
| 8.2.1 | 系统描述 .....                                   | 204 |
| 8.2.2 | 微机控制器硬件设计 .....                              | 205 |
| 8.2.3 | 系统软件设计 .....                                 | 211 |
| 8.3   | 单片机控制的 SR 电动机双闭环调速系统设计 .....                 | 217 |
| 8.3.1 | 系统描述 .....                                   | 217 |
| 8.3.2 | 硬件设计 .....                                   | 219 |
| 8.3.3 | 软件设计 .....                                   | 220 |
| 参考文献  | .....                                        | 223 |

# 第 1 章 导 论

## 1.1 电气传动的发展

1821、1831 年, 法拉第分别发现了载流导体在磁场中受力和电磁感应定律, 为电机制造奠定了理论基础。1884 年, 世界上第一台直流电动机问世。虽然, 笼型异步电动机只较直流电动机晚一年问世, 但直到本世纪 70 年代, 变速控制、转矩控制、位置控制等需要宽范围、高要求的电气调速传动领域中, 大多用直流电动机, 19 世纪 90 年代开发并使用的 Ward-Leonard 系统 (今已演变为晶闸管-直流电动机系统) 长期以来占据调速传动的统治地位。这是因为直流电动机中只有两个绕组, 无论处于稳态或暂态, 其电磁转矩均为  $T = C_T \Phi I_a$ , 电枢电流  $I_a$  所产生的电枢磁通与励磁磁通  $\Phi$  是互相垂直的, 再加上一定补偿后, 电枢反应对主磁场的去磁作用便可忽略, 故磁通  $\Phi$  只与励磁电流  $I_f$  有关, 而与  $I_a$  无关。既然  $I_a$  和  $\Phi$  是独立的, 可分别直接调节和控制, 因此, 直流电动机的电磁转矩具有十分优良的控制特性, 只要调节电动机的输入电压或励磁电流, 即可在宽广的范围内实现无级调速; 但是, 异步电动机有三相定子绕组, 电磁转矩  $T$  是定、转子三相电流的复杂函数, 且与转子的瞬时位置角  $\theta$  有关, 实际运行中能够直接控制的只是定子电压 (电流)、定子频率, 但  $T$  与它们之间不存在像直流电动机那样简洁的函数关系, 故在动态过程中, 异步电动机电磁转矩的准确、有效控制是一个难题。

然而, 直流电动机也存在致命的弱点: 利用电刷和换向器进行换向时会产生换向火花, 使之无法做成高速、大容量的机组; 而且, 直流电动机的价格往往是同功率交流电动机的 2~3 倍, 且体积大, 重量重, 需更多的维护, 更不易在多尘、潮湿、易燃气体

的环境中使用, 供电电压亦有限制。这就迫使人们一直孜孜以求地寻找用无换向器的交流电动机实现调速传动的途径。1973 年, 席卷全球的能源危机更推动了异步电动机调速技术的发展。事实上, 为充分利用异步电动机优良的经济性及易向高压、高速、大容量方向发展的固有优势, 又获得良好的调速性能, 电气传动领域依托多变量解耦控制、变结构控制、模型参考自适应控制等现代控制理论和性能优良的第二代大功率全控型开关器件及日新月异的微机技术, 开展了大量卓有成效的交流调速技术的研究工作, 如调频调压控制、矢量控制、直接转矩控制, 以至进入 90 年代, 交流电动机及其控制系统正在取代直流调速而占据调速领域的主导地位, 这已成为人们的共识。但这些交流调速系统尚有未尽人意之处, 存在系统复杂、价值昂贵、力能指标有待进一步提高等问题。正是在交流调速技术得到迅猛发展的 80 年代, 国外推出一种交流调速电动机新品种——开关型磁阻电动机 (SR 电动机)。因 SR 电动机结构简单、坚固, 工作可靠, 效率高, 由其构成的调速系统——开关型磁阻电动机调速系统 (SRD) 运行性能和经济指标比普通的交流调速系统, 甚至比晶闸管一直流电动机系统都好, 具有很大的应用潜力。因而近 10 年来, 它在交流调速领域异军突起, 发展颇为迅速, 成为当代电气传动领域的热门课题之一。

## 1.2 SR 电动机的基本结构、原理与特点

与反应式步进电动机相似, SR 电动机系双凸极可变磁阻电动机。其定、转子的凸极均由普通硅钢片叠压而成。转子既无绕组也无永磁体, 定子极上绕有集中绕组, 径向相对的两个绕组串联构成一个两极磁极, 称为“一相”。SR 电动机可以设计成多种不同相数结构, 且定、转子的极数有多种不同的搭配。文献〔12〕所述的研究表明, 低于三相的 SR 电动机没有自起动能力, 对于有自起动、四象限运行要求的驱动场合, 应优选表 1-1 所示的定、转子极数组合方案。

相数多, 步距角小, 利于减小转矩脉动, 但结构复杂, 且主

开关器件多，成本高。目前应用较多的是四相（8/6）结构。由于三相（6/4）结构性能并不比四相（8/6）逊色，但经济性却明显提高，故对三相（6/4）SR 电动机的研究、开发正日益受到重视。

表 1-1 SR 电动机的各种方案

| 相数         | 3   | 4   | 5  | 6  | 7     | 8     | 9    |
|------------|-----|-----|----|----|-------|-------|------|
| 定子极数 $N_s$ | 6   | 8   | 10 | 12 | 14    | 16    | 18   |
| 转子极数 $N_r$ | 4   | 6   | 8  | 10 | 12    | 14    | 16   |
| 步进角        | 30° | 15° | 9° | 6° | 4.28° | 3.21° | 2.5° |

图 1-1 示出四相（8/6）SR 电动机结构原理图。为简单计，图中只画出 A 相绕组及其供电电路。

结构上与步进电动机相似的 SR 电动机的运行原理亦遵循“磁阻最小原理”——磁通总要沿着磁阻最小的路径闭合，而具有一定形状的铁心在移动到最小磁阻位置时，必使自己的主轴线与磁场的轴线重合。图 1-1 中，当定子 D—D' 极励磁时，所产生的磁力则力图使转子旋转到转子极轴线 1—1' 与定子极轴线 D—D' 重合的位置，并使 D 相励磁绕组的电感最大。若以图中定、转子所处的相

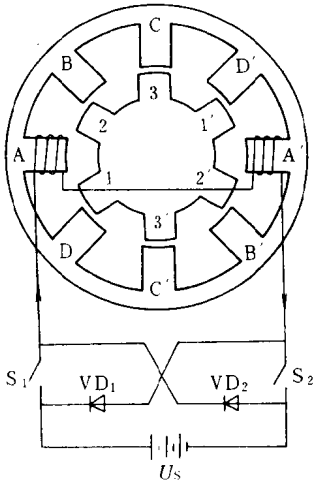


图 1-1 四相 SR 电动机结构  
（图中只画出其中的一相）

对位置作为起始位置，则依次给 D→A→B→C 相绕组通电，转子即会逆着励磁顺序以逆时针方向连续旋转；反元，若依次给 B→A→D→C 相通电，则电动机即会沿顺时针方向转动。可见，SR 电动机的转向与相绕组的电流方向无关，而仅取决于相绕组通电的顺序。另外，从图 1-1 可以看出，当主开关器件  $S_1$ 、 $S_2$  导通时，A 相绕组从直流电源  $U_s$  吸收电能，而当  $S_1$ 、 $S_2$  关断时，绕组电流经

续流二极管  $VD_1$ 、 $VD_2$  继续流通，并回馈给电源  $U_s$ 。因此，SR 电动机传动的共性特点是具有再生作用，系统效率高。

从上面简单的分析可以知道，SR 电动机的转矩是由磁路选择最小磁阻结构的趋势而产生的。由第 3 章的分析可知，适当的饱和有利于提高 SRD 的总体性能，因此，电动机磁路的饱和是 SR 电动机的又一个重要特征。由于电动机磁路的非线性，通常 SR 电动机的转矩应根据磁共能来计算，即

$$T(\theta, i) = \frac{\partial W'(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (1-1)$$

式中  $\theta$ ——转子位置角；

$i$ ——绕组电流。

显然，磁共能  $W'(\theta, i)$  的改变既取决于转子位置，亦取决于绕组电流的瞬时值。在对 SR 电动机性能作定性分析时，为避免繁琐的数学推导，不妨忽略磁路饱和及边缘效应，假定电感同电流无关。这时，一对定子极下电感随转子位置角的变化曲线如图 1-2a 所示。电动机每转一圈，电感变化的周期数正比于转子的极对数，该周期的长度为转子极距。

基于图 1-2a 的简化线性模型，式 (1-1) 可化简为式 (1-2)，即

$$T(\theta, i) = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (1-2)$$

由式 (1-2)，相绕组在恒定电流  $i$  作用下，产生的对应转矩如图 1-2b 所示。由此可见，SR 电动机的转矩方向不受电流方向的影响，仅取决于电感随转角的变化；若  $dL/d\theta > 0$ ，相绕组有电流流过，产生电动转矩；若  $dL/d\theta < 0$ ，流过电流，则产生制动力矩。因此，通过控制加到 SR 电动机绕组中电流脉冲的幅值、宽度及其与转子的相对位置，即可控制 SR 电动机转矩的大小与方向，这正是 SR 电动机调速控制的基本原理。另外，由图 1-2b 还可以看出，即使相绕组中通以理想的“平顶”电流，这种电动机各相绕组的合成转矩，即电动机的输出转矩亦是脉动的。显然，增加电动机的

相数可以减小转矩的脉动，但导致控制复杂和功率变换器成本的提高。

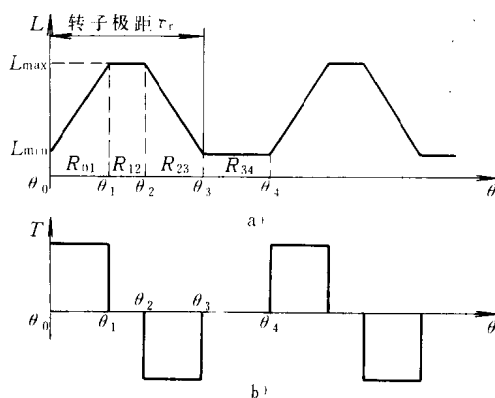


图 1-2 相电感、转矩随转子位置的变化

a) 相电感随转子位置的变化

b) 一定电流下转矩随转子位置的变化

综上所述，

SR 电动机具有如下优点：

(1) 电动机转子无绕组，成本低；电动机可高速旋转而不致变形；转子转动惯量小，易于加、减速。

(2) 定子线圈嵌装容易，端部短而牢固，热耗大部分在定子，易于冷却；转子无永磁

体，可有较高的最大允许温升。

(3) 具有再生作用。

(4) 转矩方向与相电流方向无关。只要控制主开关器件的导通关断角度，即可改变电动机的工作状态，即只要控制各相在不同电感区域内的瞬时电流，即能四象限运行，无须辅助电力电子开关器件，故可减少 SR 电动机功率变换器的开关器件数，降低系统成本。

(5) 在宽广的转速和功率范围内均具有高输出和高效率。

(6) 起动转矩大，适用于危险环境，控制灵活。

就目前的发展水平而言，SR 电动机存在的主要缺点是：

(1) 采用的是磁阻式电动机，其能量转换密度低于电磁式电动机。

(2) 转矩脉动较大，通常 SR 电动机转矩脉动的典型值为  $\pm 15\%$ 。由转矩脉动所导致的噪声及特定频率下的谐振问题也较