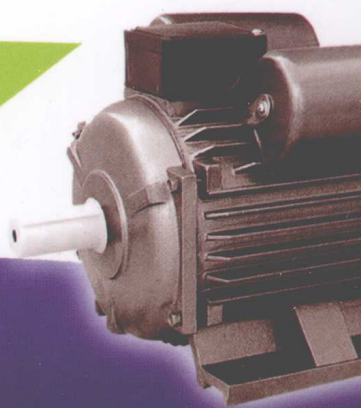


现代工业自动化技术应用丛书

# 开关磁阻电机系统 理论与控制技术

吴红星 编著



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

本书共分为 8 章。分别阐述了开关磁阻电机及其控制系统发展概况,推导了电机线性、准线性和非线性数学模型,给出了开关磁阻电机计算设计程序,讲述了开关磁阻电机有限元分析方法,研究了开关磁阻电机调速系统的控制策略,详细介绍了利用软件建立开关磁阻电机仿真模型的步骤,并进行了稳态性能仿真和动态性能仿真,最后针对 DSP 对开关磁阻电机有位置传感器和无位置传感器调速系统进行理论分析与设计。

本书适用于从事电力电子及电气传动专业高等院校教师和研究生,以及相关专业的科研机构的研究人员。

## 图书在版编目(CIP)数据

开关磁阻电机系统理论与控制技术/吴红星编著. —北京:中国电力出版社, 2010.7

(现代工业自动化技术应用丛书)

ISBN 978-7-5123-0336-2

I. ①开… II. ①吴… III. ①开关控制-磁阻电机-系统理论  
②开关控制-磁阻电机-控制 IV. ①TM352

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 070773 号

中国电力出版社出版、发行

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

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

2010 年 8 月第一版 2010 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17 印张 452 千字

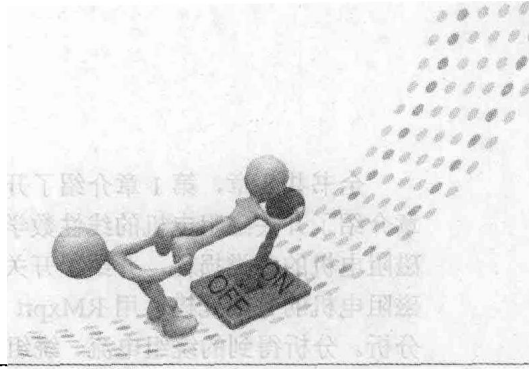
印数 0001—3000 册 定价 36.00 元

## 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



开关磁阻电机调速系统具有结构简单、坚固、工作可靠、成本低、系统控制灵活、调速性能好、运行效率高、温升低等诸多优点，它综合了交流变频调速系统的坚固耐用、适用于恶劣环境和直流调速系统的可控性好等优良特性，被专家视为电气传动系统发展过程中的一个里程碑。开关磁阻电机特别适用在恶劣环境和要求超高速的场合下运行，并可广泛地应用在纺织、造纸、煤矿、航空、机械等领域的造纸机、浆纱机、采煤机、风机、水泵、家用电器和机器人等负载上，功率范围从几瓦到几兆瓦，转速范围从几转到几万转。

本书的宗旨是，着眼于实用技术，并兼顾到发展趋势。考虑到实际应用的需要，介绍了开关磁阻电机的几种结构形式，针对新型开关磁阻电机进行论述，总结开关磁阻电机在绕组结构形式上的拓扑结构，论述各种绕组拓扑结构的优缺点。在开关磁阻电机基本方程式的基础上，推导电机线性数学模型和准线性数学模型，具体分析绕组电流、绕组磁链、绕组电感和电磁转矩，给出了开关磁阻电机设计步骤，并分析了转矩脉动产生的原因，研究开关磁阻电机调速系统的控制策略，以 DSP 为控制芯片，给出了开关磁阻电机调速系统设计方法和基本设计软件。

**电机本体设计方面：**给出计算程序，对 12/8 电机进行各类参数的计算；对开关磁阻电机进行有限元分析；利用 Ansoft 软件建立开关磁阻电机的有限元模，用 RMxpri 得到二维几何模型，在 Maxwell 2D 的瞬态求模块下进行有限元分析；分析得到的绕组电流、绕组磁链、电磁转矩曲线；对转子极弧系数、轴径、开通角等参数进行优化分析；在分析有限元计算的矩角特性曲线和系统仿真后的转矩输出波形的基础上，得出产生转矩脉动的根本原因，通过改进电机定子磁极的结构来减小气隙磁场的突变，通过修改气隙等参数从而减小和抑制转矩脉动。

**电机控制策略方面：**根据数学模型研究基于永磁磁通控制开关磁阻电机非线性数学模型。在该模型的基础上，研究基于永磁磁通控制开关磁阻电机调速系统的控制策略。设计绕组电流闭环控制器、转速调节控制器，研究基于永磁磁通控制开关磁阻电机转矩分配的控制策略，推导了转矩分配函数，并设计转矩控制器。分析开关磁阻电机的发电运行机理和能流关系，对开关磁阻电机的发电运行理论进行线性分析，推导基本电路方程和相电流解析式；通过线性模型，分析开关磁阻电机的有效发电条件。

**电机仿真技术方面：**用 MATLAB 软件建立开关磁阻电机的准非线性动态仿真模型的基础上，建立开关磁阻电机系统的系统模型，并对系统模型进行了稳态性能仿真和动态性能仿真。利用系统稳态性能仿真，综合考虑最大平均转矩和效率这两个优化目标，对开关磁阻电机的开关角进行了优化。针对传统 PI 控制策略对开关磁阻电机调速系统进行仿真，得到采用传统 PI 控制策略的电机调速系统的电机相电流波形和系统转矩波形。深入研究基于模糊控制的控制理论和控制方法，推导基于模糊控制的控制算法，提出一种模糊 PI 相结合的控制方法，并建立仿真模型，对各模型进行比较，以便得到最佳控制策略。

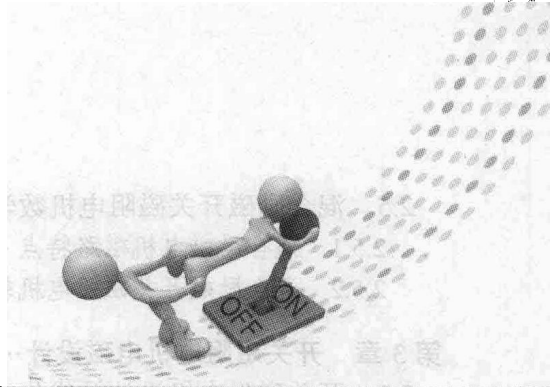
**电机控制系统方面：**介绍开关磁阻电机调速特点，分析电机驱动功率电路拓扑结构，介绍开关磁阻电机调速系统转子位置传感器分类及使用方法。设计了驱动电路，过流保护电路、过压和欠压保护电路、电机专用控制电路等硬件。利用 TI 公司的电机专用 DSP 设计开关磁阻电机有位置传感器和无位置传感器调速系统，讲述其设计方法和软件流程。

全书共 8 章,第 1 章介绍了开关磁阻电机调速系统的概况、发展趋势及主要应用领域。第 2 章介绍了开关磁阻电机的线性数学模型、准线性数学模型及非线性数学模型。第 3 章分析了开关磁阻电机的各类损耗,介绍了开关磁阻电机本体的设计方法。第 4 章利用 Ansoft 软件建立开关磁阻电机的有限元模,用 RMxpert 得到二维几何模型,在 Maxwell 2D 的瞬态模块下进行有限元分析。分析得到的绕组电流、绕组磁链、电磁转矩曲线。对转子极弧系数、轴径、开通角等参数进行优化分析。第 5 章介绍了开关磁阻电机调速系统在各种调速系统的地位,设计开关磁阻调速控制系统硬件。第 6 章针对开关磁阻电机调速特性研究开关磁阻电机控制策略和发电机理。第 7 章用 MATLAB 软件建立开关磁阻电机系统的系统模型,并对系统模型进行稳态性能仿真和动态性能仿真。第 8 章针对 DSP 对开关磁阻电机有位置传感器和无位置传感器调速系统进行理论分析与设计。

本书由吴红星编著,各章编写工作有赵哲、嵇恒、刘莹、钱海荣、黄冬林、倪天、郭庆波、叶宇骄等参与。全书由吴红星统稿,寇宝泉教授支持本书的编写并审阅了书稿。编写过程中,参阅和利用了国内外大量文献、资料,在此对原作者一并致谢。

限于作者水平,加上时间仓促,缺点、错误在所难免,热忱欢迎广大读者批评指正。

# 目 录



## 前言

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 第1章 绪论                | 1  |
| 1.1 开关磁阻电机的发展概况       | 1  |
| 1.2 开关磁阻电机的结构特点       | 2  |
| 1.2.1 开关磁阻电机的优点       | 3  |
| 1.2.2 开关磁阻电机的缺点       | 4  |
| 1.3 开关磁阻电机的优化方法       | 4  |
| 1.4 开关磁阻电机系统抑制转矩脉动技术  | 5  |
| 1.4.1 基于抑制转矩脉动的传统控制策略 | 5  |
| 1.4.2 基于抑制转矩脉动的线性化控制  | 6  |
| 1.4.3 基于抑制转矩脉动的变结构控制  | 6  |
| 1.4.4 基于抑制转矩脉动的智能控制理论 | 7  |
| 1.4.5 基于抑制转矩脉动的转矩分配策略 | 9  |
| 1.4.6 基于抑制转矩脉动的迭代学习控制 | 10 |
| 1.4.7 基于抑制转矩脉动的微步控制策略 | 10 |
| 1.4.8 其他方法            | 10 |
| 1.5 开关磁阻电机未来研究方向      | 11 |
| 1.6 开关磁阻电机的工业应用       | 12 |
| 第2章 开关磁阻电机的工作原理及数学模型  | 14 |
| 2.1 开关磁阻电机基本原理        | 14 |
| 2.2 开关磁阻电机的一些基本结构     | 14 |
| 2.2.1 单相开关磁阻电机        | 14 |
| 2.2.2 两相开关磁阻电机        | 15 |
| 2.2.3 三相开关磁阻电机        | 15 |
| 2.2.4 四相开关磁阻电机        | 16 |
| 2.2.5 五相以上开关磁阻电机      | 16 |
| 2.3 开关磁阻电机改进结构        | 16 |
| 2.4 开关磁阻电机数学模型        | 21 |
| 2.4.1 电路方程            | 21 |
| 2.4.2 机械方程            | 22 |
| 2.4.3 机电联系方程          | 22 |
| 2.4.4 线性模型            | 23 |
| 2.4.5 准线性模型           | 31 |
| 2.4.6 非线性模型           | 33 |

|                                |           |
|--------------------------------|-----------|
| 2.5 混合励磁开关磁阻电机数学模型 .....       | 34        |
| 2.5.1 混合励磁电机磁路特点 .....         | 34        |
| 2.5.2 混合励磁开关磁阻电机转矩平衡方程 .....   | 37        |
| <b>第3章 开关磁阻电机电磁设计 .....</b>    | <b>39</b> |
| 3.1 开关磁阻电机设计及优化方法 .....        | 39        |
| 3.1.1 电机本体结构设计 .....           | 39        |
| 3.1.2 电机参数优化设计 .....           | 40        |
| 3.2 开关磁阻电机损耗分析 .....           | 40        |
| 3.2.1 绕组铜损分析 .....             | 40        |
| 3.2.2 机械损耗分析 .....             | 41        |
| 3.2.3 杂散损耗分析 .....             | 41        |
| 3.2.4 电机铁损分析 .....             | 41        |
| 3.3 开关磁阻电机参数计算 .....           | 45        |
| 3.3.1 电负荷与磁负荷 .....            | 45        |
| 3.3.2 主要尺寸 .....               | 45        |
| 3.4 开关磁阻电机本体设计示例 .....         | 47        |
| 3.4.1 相数、极数和绕组端电压 .....        | 48        |
| 3.4.2 主要尺寸的选择 .....            | 48        |
| 3.4.3 其他结构尺寸及绕组匝数 .....        | 48        |
| 3.4.4 电流及转矩计算 .....            | 50        |
| 3.4.5 绕组设计 .....               | 50        |
| 3.4.6 参数计算 .....               | 51        |
| <b>第4章 开关磁阻电机性能优化 .....</b>    | <b>54</b> |
| 4.1 电机电磁场的理论基础 .....           | 54        |
| 4.2 有限元法 .....                 | 55        |
| 4.2.1 有限元法的发展 .....            | 55        |
| 4.2.2 Ansoft 软件简介 .....        | 55        |
| 4.2.3 Ansoft 有限元法 .....        | 56        |
| 4.2.4 电磁场有限元方法的特点及一般步骤 .....   | 57        |
| 4.3 RMxprt 软件设计及使用方法 .....     | 58        |
| 4.3.1 启动软件 .....               | 58        |
| 4.3.2 新建 SRM 模型 .....          | 59        |
| 4.3.3 建模结果 .....               | 68        |
| 4.3.4 仿真计算 .....               | 69        |
| 4.3.5 模型导出 .....               | 73        |
| 4.4 Maxwell 2D 软件设计及使用方法 ..... | 74        |
| 4.4.1 打开工程文件 .....             | 74        |
| 4.4.2 模型设置 .....               | 77        |
| 4.4.3 材料设置 .....               | 78        |
| 4.4.4 边界及激励源设置 .....           | 80        |
| 4.4.5 设置铁芯损耗参数 .....           | 89        |

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| 4.4.6 设置仿真参数                 | 90         |
| 4.4.7 运动部分设置                 | 95         |
| 4.4.8 仿真运算                   | 96         |
| 4.5 有限元分析结果处理                | 101        |
| 4.5.1 RMaxprt 输出的性能曲线        | 101        |
| 4.5.2 Maxwell 2D 的求解结果       | 102        |
| 4.5.3 有限元后处理                 | 104        |
| 4.6 基于转矩波动抑制电机本体优化           | 105        |
| 4.6.1 影响转矩波动的因素              | 106        |
| 4.6.2 开通角、关断角对转矩波动的影响        | 106        |
| 4.6.3 定子磁极结构对转矩波动的影响         | 107        |
| <b>第 5 章 开关磁阻电机的控制策略</b>     | <b>110</b> |
| 5.1 开关磁阻电机控制方式               | 110        |
| 5.1.1 角度位置控制 (APC)           | 110        |
| 5.1.2 电流斩波控制 (CCC)           | 111        |
| 5.1.3 电压斩波控制 (CVC)           | 111        |
| 5.2 开关磁阻电机调速特性               | 112        |
| 5.3 开关磁阻电机能量回馈控制             | 112        |
| 5.3.1 开关磁阻电机发电运行机理           | 113        |
| 5.3.2 开关磁阻电机发电运行的励磁过程        | 113        |
| 5.3.3 开关磁阻电机的能量变换理论          | 114        |
| 5.3.4 开关磁阻电机发电状态工作特点         | 116        |
| 5.4 开关磁阻电机 PID 控制            | 118        |
| 5.4.1 标准数字 PID 算法            | 119        |
| 5.4.2 其他 PID 方法              | 120        |
| 5.5 迭代学习控制                   | 121        |
| 5.5.1 基于模型控制系统和迭代学习控制系统概述    | 121        |
| 5.5.2 迭代学习控制过程和开环 PID 迭代学习控制 | 122        |
| 5.6 开关磁阻电机的转矩分配控制系统设计        | 123        |
| 5.6.1 速度调节器设计                | 123        |
| 5.6.2 转矩分配函数的设计              | 125        |
| 5.6.3 电流控制器设计                | 126        |
| <b>第 6 章 开关磁阻电机调速系统硬件设计</b>  | <b>128</b> |
| 6.1 开关磁阻电机调速系统在电机控制中的地位      | 128        |
| 6.1.1 与步进电动机驱动系统的比较          | 128        |
| 6.1.2 与反应式同步电动机的比较           | 128        |
| 6.1.3 与直流电动机的比较              | 129        |
| 6.1.4 与无换向器直流电动机的比较          | 129        |
| 6.1.5 与异步电动机变频调速系统的比较        | 129        |
| 6.2 功率电子器件                   | 130        |
| 6.2.1 功率 MOSFET 特点           | 130        |

|              |                                 |            |
|--------------|---------------------------------|------------|
| 6.2.2        | 功率 IGBT 工作特点 .....              | 131        |
| 6.3          | PWM 控制技术 .....                  | 133        |
| 6.3.1        | 传统 PWM 技术 .....                 | 134        |
| 6.3.2        | 优化后的 PWM 技术 .....               | 134        |
| 6.3.3        | 空间电压矢量 PWM 控制 .....             | 135        |
| 6.3.4        | 跟踪型 PWM 控制技术 .....              | 135        |
| 6.4          | 开关磁阻电机控制器功率拓扑结构 .....           | 136        |
| 6.4.1        | 不对称半桥主回路 .....                  | 137        |
| 6.4.2        | H 桥主回路 .....                    | 137        |
| 6.4.3        | 不对称半桥改进型 .....                  | 137        |
| 6.4.4        | $(n+1)$ 型功率变换器 .....            | 138        |
| 6.4.5        | 电容裂相型 .....                     | 138        |
| 6.4.6        | 电容转储型 .....                     | 138        |
| 6.5          | 整流及吸收回路设计 .....                 | 139        |
| 6.5.1        | 功率吸收电路设计 .....                  | 139        |
| 6.5.2        | 吸收电路参数计算 .....                  | 140        |
| 6.5.3        | 整流电路设计 .....                    | 141        |
| 6.5.4        | 电流采样与处理电路 .....                 | 142        |
| 6.5.5        | 转子位置信号采集与处理 .....               | 142        |
| 6.5.6        | 系统保护电路设计 .....                  | 149        |
| 6.6          | 功率及驱动电路 .....                   | 151        |
| 6.6.1        | SKHI24 驱动模块在 SRD 系统中的应用 .....   | 151        |
| 6.6.2        | Si9976DY——桥式驱动器的原理及应用 .....     | 152        |
| 6.6.3        | EXB841 工作原理 .....               | 157        |
| 6.6.4        | FCAS50SN60 开关磁阻电机功率模块 .....     | 159        |
| <b>第 7 章</b> | <b>基于 DSP 开关磁阻电机控制器设计 .....</b> | <b>165</b> |
| 7.1          | DSP 的特点 .....                   | 165        |
| 7.2          | 电动机 DSP 控制系统基础 .....            | 167        |
| 7.2.1        | DSP 电机控制特点 .....                | 167        |
| 7.2.2        | 数字滤波 DSP 实现方法 .....             | 168        |
| 7.3          | 有位置传感器 DSP 控制 .....             | 171        |
| 7.3.1        | 开关磁阻电机控制机理 .....                | 171        |
| 7.3.2        | DSP 控制开关磁阻电机硬件设计 .....          | 173        |
| 7.3.3        | 软件设计 .....                      | 175        |
| 7.3.4        | 电流控制 .....                      | 177        |
| 7.3.5        | 位置控制 .....                      | 178        |
| 7.3.6        | 速度控制 .....                      | 179        |
| 7.3.7        | 换相控制 .....                      | 181        |
| 7.3.8        | 速度控制器 .....                     | 183        |
| 7.3.9        | DSP 编程示例 .....                  | 184        |
| 7.4          | 开关磁阻电机无传感器 DSP 控制 .....         | 216        |

|              |                                     |            |
|--------------|-------------------------------------|------------|
| 7.4.1        | 调速系统硬件描述 .....                      | 216        |
| 7.4.2        | 无传感器开关磁阻电机驱动系统的控制软件 .....           | 216        |
| 7.4.3        | 无传感器换相和速度更新算法 .....                 | 218        |
| 7.4.4        | 速度环 .....                           | 221        |
| 7.4.5        | 电流控制回路 .....                        | 222        |
| 7.4.6        | 斜坡控制器 .....                         | 222        |
| 7.4.7        | 无传感器开关磁阻电机驱动系统的校准 .....             | 223        |
| <b>第 8 章</b> | <b>开关磁阻电机调速系统仿真 .....</b>           | <b>228</b> |
| 8.1          | 引言 .....                            | 228        |
| 8.2          | 基于 MATLAB/Simulink 的系统建模与仿真分析 ..... | 228        |
| 8.2.1        | 仿真软件 MATLAB/Simulink 简介 .....       | 228        |
| 8.2.2        | 电机模型的建立 .....                       | 229        |
| 8.3          | 控制系统 PI 控制策略建模与仿真 .....             | 230        |
| 8.3.1        | SRM 调速系统的无 PI 控制仿真 .....            | 230        |
| 8.3.2        | 电机调速系统的 PI 控制仿真分析 .....             | 231        |
| 8.4          | 基于模糊控制器的系统仿真分析 .....                | 236        |
| 8.4.1        | 模糊控制器的设计 .....                      | 236        |
| 8.4.2        | SRM 调速系统的模糊控制仿真及结果分析 .....          | 238        |
| 8.5          | SRM 调速系统模糊 PI 控制仿真 .....            | 242        |
| 8.6          | 开关磁阻电机能量回馈建模与仿真 .....               | 243        |
| 8.6.1        | 发电状态的基本电路方程 .....                   | 243        |
| 8.6.2        | 发电运行的相电流解析 .....                    | 243        |
| 8.7          | 开关磁阻电机控制系统模型分析 .....                | 245        |
| 8.8          | 开关磁阻电机发电系统模型的建立 .....               | 252        |
| 8.8.1        | 电流滞环控制模块 .....                      | 254        |
| 8.8.2        | 电流计算模块 .....                        | 254        |
| 8.8.3        | 转矩计算模块 .....                        | 254        |
| <b>参考文献</b>  | .....                               | <b>256</b> |

# 绪 论

## 1.1 开关磁阻电机的发展概况

磁阻式电动机最早可以追溯到 19 世纪 40 年代,即所谓“电磁制动机”。1842 年,英国的 Aberdeen 和 Davidson 用两个 U 形电磁铁制造了由蓄电池供电的电动车,其原理与现在的 SR (Switched Reluctance) 电机很相似。但是由于当时的条件所限,采用的是机械开关,其运行特性、可靠性和机电能量转换效率都十分低下,所以在其后直到功率电子开关问世前的 100 多年间,一直没有得到应有的重视。20 世纪 60 年代,随着大功率晶闸管的使用,SR 电机才重新焕发生机。SRM (Switched Reluctance Motor) 一词来源于美国学者 S. A. Nasar 1969 年所撰写的论文,文中描述了这种电机的基本特征:① 开关性:电机必须工作在一种连续的开关模式,这就是这种电机只有在出现各种新型功率半导体器件后才能发展的原因所在;② 磁阻性:它是一种双凸极电机,定、转子具有可变磁阻回路。20 世纪 70 年代初,美国福特电动机公司研制出最早的 SR 电机调速系统,其结构为轴向气隙电动机、晶闸管功率电路,具有电动机和制动机运行状态和较宽范围调速的能力。

20 世纪 70 年代中期,英国 Leeds 大学和 Nottingham 大学以电动车为目标共同研制开关磁阻电机 (SRM) 调速系统,其样机容量从 10W~50kW,转速从 750~10 000r/min。1980 年 Lawrenson 等系统地介绍了他们的工作成果,阐述了 SR 电机的原理及其设计特点,从而在国际上奠定了现代 SR 电机的地位。1993 年,英国 Tasc Drives 公司推出第一台商品化 SRD——Oulron 传动装置 (7.5kW, 1500r/min); 1984 年又推出 4~22kW 4 个规格的系列产品。各国学者将 SRD 与各类调速系统,特别是已得到推广的异步电机变频调速系统的各项综合性能进行了比较分析,得出的结论是 SRD 系统的综合性能指标达到或超过了这些传统调速系统。表 1-1 是当时对几种常用变速传动系统各项主要经济指标所作的比较结果。

表 1-1 SR 电机调速系统同其他变速传动系统的性能比较

| 项 目   | 感应电机调速系统 | 直流电机调速系统 | PWM 变速系统 | 开关磁阻电机系统 |
|-------|----------|----------|----------|----------|
| 成本    | 0.8      | 1.5      | 1        | 1.5      |
| 效率    | 85       | 76       | 77       | 83       |
| 容量体积比 | 0.65     | 1        | 0.9      | 1        |
| 控制能力  | 0.3      | 1        | 0.9      | 0.9      |
| 控制复杂性 | 0.2      | 1        | 1.8      | 1.2      |
| 可靠性   | 1.3      | 0.9      | 1        | 1.1      |
| 噪声    | 69       | 65       | 75       | 75       |

目前,SR 电机在国外已经得到了很大的发展,产品已经广泛地应用于电动车驱动系统、家



用电器、通用工业（风机、泵、压缩机等）、伺服与调速系统、牵引电机、高转速电机（纺织机、航空发动机、电动工具、离心机等）；功率范围从 10W（转速为 10 000r/min）到 5MW（转速为 50r/min），转速上限高达 100 000r/min。除英国外，美国、加拿大、前南斯拉夫等相继开展研究工作，并在系统的一体化设计、电机的电磁分析、微机的应用、新型电力电子器件的应用、新型结构形式、电机（如单相电机、无传感器电机、直线 SR 电机）的开发等方面取得进展。

我国从 1984 年起，以较高的起点开始 SR 电机调速系统的研究、开发工作，并被列入中小型电机“七五”科研规划项目。在借鉴国外经验的基础上，经过 10 多年的努力，目前已经研制了 50W~30kW、20 多个规格的工业产品样机，在纺织机械、毛巾印花机以及轻型龙门刨床和食品加工等方面的应用中取得了良好的效果。国内有关 SRD 研究的学术著作也相继出版。但应该看到，目前我国 SR 电机的理论研究和实际应用都存在较大的不足和差距。

从 1984 年开始，我国许多单位先后开展磁阻电机的研究工作，如中国纺织总会纺织机电研究所、华中理工大学、南京航空航天大学、东南大学、福州大学、华南理工大学及浙江大学等。在借鉴国外经验的基础上，我国 SR 电机的研究进展很快，对 SR 电机的控制、仿真、设计理论和电磁场数值分析等都做了许多工作。在国际、国内刊物和会议上发表了许多篇论文。1988 年 11 月在南京航空航天大学，1991 年 9 月，在华中理工大学召开了开关磁阻电机研讨会。参加会议来自全国高校、研究所和工厂等 25 个单位，大会上成果交流表明，我国 SRD 的理论研究和应用已经取得了较大的进展，参加研制的单位有了显著的增加。1993 年北京开关磁阻电机调速系统工业应用研讨会上，在中国电工技术学会中小型电机专业委员会领导下，正式成立了开关磁阻电机学学组。

20 多年来，SR 电机的研究在国内外取得了很大的发展，但作为一种新型调速驱动系统，研究的历史还较短，其技术涉及到电机学、微电子、电力电子、控制理论等众多学科领域，加之其复杂的非线性特性，导致研究的困难性，在电机理论、性能分析和设计等方面都还不够成熟、完善，存在大量的工作要做，如铁芯损耗、转矩波动和噪声的理论研究，SR 电机磁场的二维有限元分析，电机优化设计及控制参数的优化，SR 电机的测试，无位置传感器 SR 电机、新结构 SR 电机的开发等。

在应用方面，SR 电机作为一种新型调速系统，兼有直流调速和交流调速的优点，无疑有广阔的市场前景。但是由于异步电动机和无刷直流电动机等经过多年的发展，目前已领先一步，有了极广泛的应用，SR 电机要进入调速市场并占据较大份额，尚需花大力气宣传和开发它的工业应用。目前，已研制了几十瓦到几千瓦的 SR 电机，并成功地用于车辆牵引、风机、泵及卷扬机等工业生产领域；美国还将 SR 电机用作飞机发动机的启动、制动装置。就我国国情而言，要使 SR 电机被人们普遍采用还需广大的科研人员和研制单位做大量艰苦的推广工作。一方面要加强通用功率等级的应用，同时可从 0.75kW 以下的小功率应用和各种特殊用途领域进入市场。SR 电机单位体积输出功率高出异步电动机或直流换向器电动机 2~4 倍，应充分利用国产功率半导体器件价格低、电机结构简单、成本低和在宽广的速度范围内实现高效率运行的优势，开发具有广泛用户的家用电器市场。SR 电机全面进入市场是必然的，只是个时间问题。

## 1.2 开关磁阻电机的结构特点

开关磁阻电机调速系统主要由开关磁阻电机、功率变换器、控制器、位置检测器和电流检测器五个部分组成，如图 1-1 所示。

“开关磁阻电动机（Switched Reluctance Motor）”一词源见于美国学者 S. A. Nasar 于 1969 年所撰写的论文，它描述了这种电机的两个基本特征：



(1) 开关性——电机必须工作在一种连续的开关模式，这也是为什么在各种新型功率半导体器件可以获得后这种电机才得以发展的主要原因。

(2) 磁阻性——定、转子具有可变磁阻回路，是真正的磁阻电机。

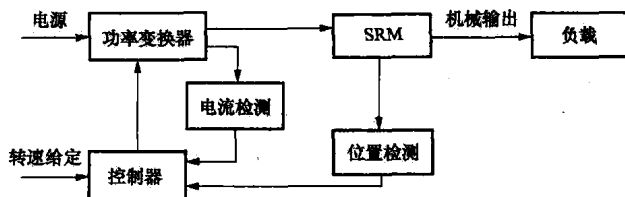


图 1-1 SRD 基本构成

图 1-1 中的 SRM 即开关磁阻电机是开

关磁阻电机调速系统中实现机电能量转换的部件，也是此系统区别于其他电机调速系统的主要标志。功率变换器负责向开关磁阻电机提供运行所需要的能量，它由蓄电池或者交流电经过整流后得到的直流电供电。控制器是整套调速系统的核心，它综合处理转速给定、速度反馈信号以及位置传感器和电流传感器的反馈信息，然后对功率变换器发出控制信号，实现功率变换器对开关磁阻电机的驱动。

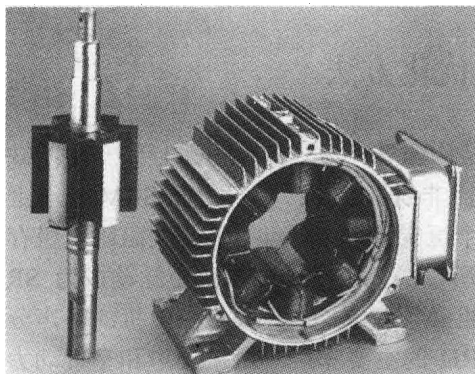


图 1-2 传统开关磁阻电机定、转子结构

SRM 的运动是由定、转子间气隙磁阻的变化产生的。图 1-2 所示为开关磁阻电机定、转子结构。当定子绕组通电时，产生一个单相磁场，其分布要遵循“磁阻最小原则”，即磁通总要沿着磁阻最小的路径闭合。因此，当转子轴线与定子磁极的轴线不重合时，便会有磁阻力作用在转子上并产生转矩使其趋于磁阻最小的位置，即两轴线重合位置，这类似于磁铁吸引铁质物质的现象。开关磁阻电机就是属于这一类型的电机。开关磁阻电机是双凸极可变磁阻电机，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”。相数多，步距角小，利于减小转矩脉动，

但是其结构复杂，而且主开关器件增多，成本高。

### 1.2.1 开关磁阻电机的优点

SRM 电机具有以下优点：

(1) 电机结构简单、成本低、适用于高速。开关磁阻电机的结构比鼠笼式感应电机还要简单，其突出的优点是转子上没有绕组，因此不会有鼠笼式感应电动机制造过程中鼠笼铸造不良和使用中的断条等问题。开关磁阻电机的转子机械弹性很好，可以用于超高速运转（如 10 000r/min）。在定子方面，它只有几个集中绕组，因此制造简单、绝缘容易。

(2) 各相独立工作，系统可靠性高。从电机的电磁结构上看，各相绕组和磁路相互独立，各自在一定轴角范围内产生电磁转矩，而不像在一般电动机中必须在各相绕组和磁路共同作用下产生圆形旋转磁场，电动机才能正常运转。从控制器结构上看，各相电路各自给一相绕组供电，一般也是相互独立工作。可见，当电机一相绕组或控制器一相电路发生故障时，只需停止该相工作，电动机除总输出功率有所下降外，并无其他影响。因此开关磁阻电机调速系统可以构成可靠性很高的系统，可以适用于一些特殊的场合，比如航天领域。

(3) 功率电路简单可靠。开关磁阻电机转矩方向只与各相通电顺序有关，而和绕组电流的方向无关，即只需要单方向绕组电流，故功率电路可以做到每相一个功率开关。对比感应电机绕组需流过双向电流，向其供电的 PWM 变频器中功率电路每相需两个功率元件。因此开关磁阻电机调速系统较 PWM 变频器功率电路中所需的功率元件少，电路结构简单。另外，感应电机 PWM 变频器功率电路中每桥臂两个功率开关直接跨接在直流电源侧，易发生直通短路烧毁功率元件。



而开关磁阻电动机调速系统中每个功率元件均直接与电机绕组相串联,根本上避免了直通短路现象,因此开关磁阻电动机调速系统中功率电路的保护电路可以简化,既降低了成本,又具有较高的工作可靠性。

### 1.2.2 开关磁阻电机的缺点

开关磁阻电机调速系统同样也存在着一些自身的不足和缺点,这主要表现在以下几个方面:

- (1) 系统采用的是磁阻式电机,其能量转换密度低于电磁式电机。
- (2) 开关磁阻电机运行时转矩脉动较大,通常转矩脉动的典型值为 15%。由转矩脉动导致的噪声问题以及特定频率下的谐振问题也较为突出。
- (3) 开关磁阻电机相数越多,主接线数越多。
- (4) 笼型异步电机可以直接接入电网稳定运行,可以没有控制环节,而开关磁阻电机必须配合控制器才能稳定工作。
- (5) 系统运行需要电机位置信号的反馈,而位置传感器的引入使电机结构复杂,安装调试困难。电机和控制器之间的连线增加,而且位置传感器的分辨率有限,使系统的运行性能下降。

## 1.3 开关磁阻电机的优化方法

开关磁阻电机的结构决定了它的优化方法,但双凸极结构和开关形式供电电源导致一定的缺点:一方面定子齿和转子齿交叠前产生的边缘磁通引起电流非线性变化;另一方面 SRM 转子上的转矩是由一系列脉冲转矩叠加而成的,合成转矩不是一个恒定值。这两点导致开关磁阻电机存在固有的转矩脉动,尤其电机低速运行时转矩脉动较大。所以最大限度地减小转矩脉动成为 SR 电机优化设计的重要内容之一。噪声问题也是开关磁阻电机必须考虑的,开关磁阻电机的噪声分为电磁噪声、机械噪声以及空气动力噪声。电磁噪声是 SRD 的主要噪声;机械噪声和空气动力噪声与电机加工工艺以及装配工艺有关。励磁电流换向期间相电流消失时,径向磁引力的迅速变化引起定子变形,变形引起的定子径向振动导致电磁噪声的产生。开关磁阻电机本身的转矩脉动问题对噪声也有一定的影响。当电磁径向引力的频率与定子固有频率或者基座等部件固有频率一致时,SRM 部件之间将产生共振。所以我们要从优化定子结构和尺寸、优化转子结构和尺寸、优化极弧这 4 个方面来优化电机。

(1) 优化定子结构和尺寸。定子的外径、轭及定子齿和槽的形状等参数对 SR 电机的转矩波动和噪声都有重要影响,在符合电机尺寸设计的要求和约束条件下,优化电机。一般通过采用大的机座号,提高输出转矩,减小转矩波动对定子外径进行优化。与定子极弧、导角等参数的变化对噪声的影响相比,定子轭的厚度变化对定子模型特性的影响更为明显,也就是说定子的轭的厚度比定子的其他参数对噪声的影响更大。

(2) 优化转子结构和尺寸。与定子外径的影响相反,转子外径越大,转矩脉动越大。在定子外径不变的情况下,增加转子外径,还会因为减少定子极身长度而减少绕组截面积,导致绕组电流峰值降低,所以转子外径要选择适当,不宜过大。SRM 噪声主要是由径向电磁引力引起定子变形产生的。当定子极和转子极重叠时,产生径向磁引力,所以减小定子极和转子极的重叠面积,就能减小径向电磁引力。

(3) 优化极弧。由于开关磁阻电机是双凸极结构,极弧对电机的转矩波动、平均电磁转矩和电感特性等电机性能的影响很大。定、转子极弧的设计不仅要满足 SRM 正、反向的自启动能力的基本要求,还需具备最佳的电机性能,所以极弧的优化非常重要。

(4) 使用软件。Ansoft——先根据 SRM 的基本参数在 Ansoft RMxpri 中生成二维几何模型,然后利用 Ansoft 本身的接口将几何模型导入 Maxwell 2D,再用 Maxwell 2D 中的瞬态模块进行有



限元计算。求解中运用了 Ansoft 软件可以定义外加电路的特点,建立了 SRM 的驱动电路模型,与模型构成一个完整系统进行仿真。这使得仿真结果更加接近电机实际运行的情况,精确地反映了电机的运行性能。

## 1.4 开关磁阻电机系统抑制转矩脉动技术

由 SRM 的结构和运行方式可以看出,SRM 是一种高度非线性的电能—机械能转换装置,其非线性主要表现在磁链对转子角和相电流的非线性关系上,进而由此得到其电磁转矩同样是角度和电流的非线性函数的结论,因而在传统的控制方式下必然存在着较大的转矩脉动。

SRM 转矩脉动产生的机理如下:SRM 每一相的转矩特性可以用转矩—电流—角度曲线描述,对于相邻两相在空间上相差一个步距角,整个电机的转矩特性依赖于两相的重叠角、凸极形状、材料特性、凸极数目以及电机相数。最大的转矩降落可以由重叠相的矩角特性曲线得到,该转矩降落出现在相同电流产生相同转矩的相邻两相矩角特性曲线的交点处,是由于在换相时当前相关断不再产生电磁转矩而下一个导通相不能产生所需要的转矩造成的,显然该降落越小转矩脉动的抑制越容易。在传统的矩形电流开关控制方式下,SRM 存在着显著的转矩脉动,电机的转矩脉动将造成转速的上下波动,对于驱动高精度的控制装置,传统的开关控制方式难以满足要求,比如在机床主轴和伺服轴控制上还没有得到广泛的应用。

为了提高电机的运行性能,许多学者从不同角度提出了各种方案,概括起来有以下两种:

(1) 改进电机的结构设计。从以上介绍可以看出,转矩脉动主要出现在相邻相矩角特性曲线重叠的地方,重叠比例越大越有利于减小转矩脉动,而增加转子的凸极数目有利于提高重叠比例,但这样会降低磁场的饱和率,在控制时需要较大的控制电压,同时输出转矩也将降低,所以普遍采用的方法是增加定子凸极宽度以及增加每相对应的定子凸极数目,这样可以有效地降低 SRM 的转矩脉动。

(2) 采用合适的控制技术。对于给定的电机来说,其结构及磁路参数都是确定的,只有通过选择合适的控制手段来抑制转矩脉动。国内外学者在减小转矩脉动、提高系统性能方面做了大量深入的研究<sup>[42]</sup>。

### 1.4.1 基于抑制转矩脉动的传统控制策略

电流斩波和角度位置控制是比较常用的两类控制方法。

常见的电流斩波控制有调整脉宽斩波控制,电流上下限斩波控制,电流上限、关断时间恒定控制等。这几种控制方式都属于单幅值斩波控制,即在 SRM 一相导通周期内,电流的有效值被限制在唯一的幅值上。根据 SRM 的运行过程可知,在电感上升开始区和上升结束区电感变化率较小,而恰是在这两个区间上电流是上升和下降的过程,因此电流值也偏小,并造成一相绕组在开始导通和续流期间输出瞬时转矩值小,进而引起转矩脉动。

针对单幅值斩波控制存在的缺点,文献[43]中提出了电流双幅值斩波控制方案,与单幅值斩波控制方案相比,其明显降低了转矩脉动,但是仍未考虑相间转矩平滑过渡,并且由于电流初始斩波幅值的增加,主回路中对开关管的额定值要求也有所增加,且也只适用于低速运行。

角度位置控制与斩波控制的方法相比,其是一种通过调节导通角来控制电机转速的一种方式,这种方式一般在电机转速高于基速的情况下采用,此时 SRM 得到恒功率的输出特性。

上述两种控制方式是根据速度控制电机的开通角、关断角及电流限流幅值,达到控制相电流的目的,而没有直接对转矩进行控制,也没有考虑 SRM 内部磁场的非线性和相间转矩控制平滑过渡,因此传统的控制方式很难精确控制每一相瞬时转矩。

文献[44]提出考虑非线性饱和特性的开关磁阻电机最优开关角规律,通过选择优化的开通



角、关断角减小转矩脉动。虽然在一定程度上可以减小转矩脉动,但是仍然没有摆脱 CCC 和 APC 的未考虑相间转矩平滑过渡的缺陷,转矩脉动抑制的效果不显著。

#### 1.4.2 基于抑制转矩脉动的线性化控制

文献[45]和文献[46]将反馈线性化理论引入 SRM 的伺服控制和速度控制系统里,对 SRM 实现非线性状态反馈的线性化控制,利用单相参考转矩为梯形的转矩分配函数,使换相期间的原导通相转矩线性减小,新导通相转矩线性增大,并应用非线性转矩控制补偿反电动势与电感的非线性特性,使原非线性系统线性化,改善了系统性能,减小了转矩脉动。SRM 非线性状态反馈的线性化控制的轨迹跟踪系统结构如图 1-3 所示。但单纯基于线性控制律的反馈线性化控制器不足以处理 SRM 模型中的不确定性,在实现时系统性能难以保证。

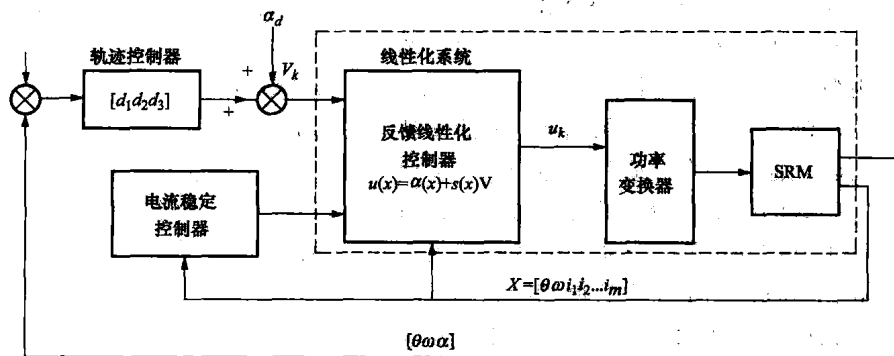


图 1-3 SRM 非线性状态反馈的线性化控制的轨迹跟踪系统

文献[47]将非线性自适应反馈线性化控制应用于三相 SRM,减小了系统建模误差的影响,使用参数的在线估计避免了预先测试,在位置控制的应用中显示了系统的高性能,即转矩脉动大大减小,且无需测量电机的加速度、先验知识,容易实现。但是它忽略了 SRM 的磁饱和效应,虽然简化了磁链、电感与相电流间的关系,可同时又带来了不小的误差。

为了增强系统的鲁棒性,针对 SRM 的速度跟踪应用,需要考虑到模型具有不确定性。文献[48]通过考虑系统模型的不确定性,虽然使得 SRD 系统的暂态、稳态性能及鲁棒性有所改善,但转矩脉动仍然较大,而且在额定负载下存在 7% 的速度误差。文献[49]将反馈线性化技术和奇异摄动技术应用于 SRM 的控制,通过减小转矩脉动实现了 SRD 的高动态性能,但是这种方法使用的是 SRM 的降阶模型,而且它要求知道转矩—位置—电流特性的先验知识,要求复杂的线性化和解耦变换电路。

文献[50]利用递归最小二乘法参数识别的方法对非线性磁链模型进行在线参数辨识,并在此基础上设计了 SRM 转矩自适应控制器,结果证明该方法具有较强的鲁棒性。

#### 1.4.3 基于抑制转矩脉动的变结构控制

1993 年, Buja 首次将变结构控制应用于 SRD, 通过将转矩脉动看作是干扰, 电机非线性看作是增益偏差, 无需电机的先验特性即可克服 SRD 中的转矩脉动问题, 系统结构如图 1-4 所示。与传统控制下的 SRD 相比, 变结构控制 SRD 的性能被改善, 转矩脉动大大减小, 系统对参数的变化及干扰不敏感, 控制策略容易实现, 但是它以 SRD 工作于 SRM 磁特性的线性区为前提, 忽略了磁饱和及相间耦合的影响。文献[52]则应用直流侧电流反馈设计了近似的滑模功率控制, 同时以带有前馈与积分补偿的滑模速度控制为速度外环, 构成鲁棒的 SRD, 取得了良好的结果。

文献[53]基于考虑电磁饱和的电机模型, 以速度差为开关函数, 设计了滑模控制器, 得到了相电压的等效控制, 通过改变滑模控制器的参数对电压进行调节, 实现转矩脉动的减小及速度的跟踪。然而, 等效电压的计算需要对加速度进行测量, 这无疑增加了系统的成本和复杂性, 并





调节电流补偿信号的大小,得到优化的相电流波形,达到转矩脉动抑制的目的,控制原理如图 1-5 所示。由于实时的动态转矩难以测量,并需要昂贵的转矩传感器,使得这种方法难以适用于电机的实时控制。另外,训练数据是从电机稳态运行时仿真得到的,电机运行时参数的变化也会带来性能的改变。

针对模糊控制的不足,将模糊控制与神经网络相结合,应用模糊神经网络对开关磁阻电机的静态转矩特性逆模型进行离线学习,再利用转矩分配函数实时在线优化出期望转矩所需要的相电流波形,实现电机的转矩线性、解耦、无脉动控制。文献 [61] 通过模糊神经网络转速控制器的输出确定期望转矩,应用分配函数计算出各相转矩的指令值,利用矩角特性曲线表得到对应各相的电流指令值,并通过滞环控制实现对电流的快速跟踪控制。

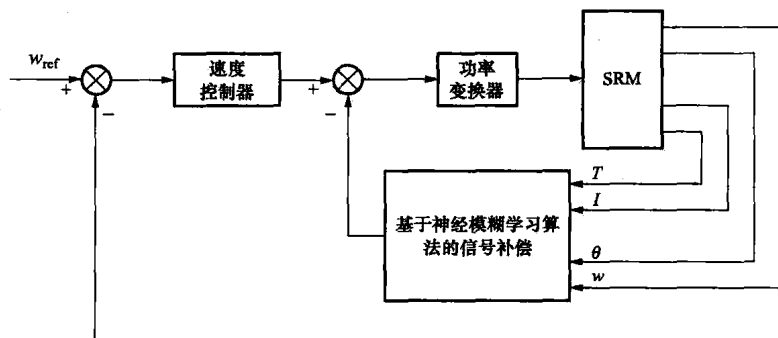


图 1-5 外加电流补偿信号的原理图

## 2. 神经网络

基于神经网络的转矩脉动减小的方法最早由 J.G.O Donovan 等提出,考虑了 SRM 的非线性特性,根据 SRM 的转矩—电流—角度关系,对电机的先验知识进行学习,通过神经网络的自学习能力学习相电流波形进而减小电机的转矩脉动,但他们所采取的常用的神经网络学习速度较慢,需要离线学习,难以用于电机的实时控制。

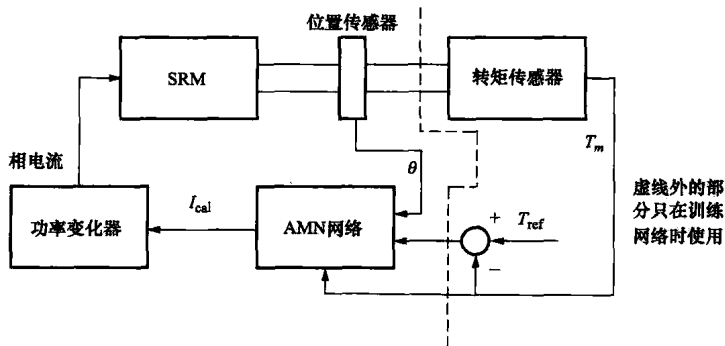


图 1-6 ANN 神经网络的控制原理图

关,当实际运行条件与学习条件有所改变时,性能难以保证。为确保网络的性能,需要对不同给定转矩信号下的情况进行学习,这又增加了网络和学习的复杂性。

基于 D.S.Reay 所提方案的缺点,Zhengyu Lin 等利用 B 样条神经网络,采用转矩估计代替文献 [63] 中的转矩传感器,降低了系统成本,并提供了转矩反馈信号,B 样条神经网络也是一种联想式记忆神经网络,所以适用于在线非线性自适应仿真。

另外,文献 [65] 提出了利用基于局部逼近神经网络 (CMAC),并采用变学习率的最小二乘自适应算法对不同开通角、关断角下的相电流波形进行训练得到优化的相电流波形,学习时考

D.S.Reay 等提出采用 AMN (Associative Memory Networks) 在线获得电机相电流优化波形的方法,其结构如图 1-6 所示。这种方法的不足之处在于:转矩传感器价格较贵,且在高速情况下测量不准确,并且只用于训练,实用性不强。从控制框图 1-7 上看,转矩传感器在正常运行时没有转矩反馈,相电流波形只与转矩给定及位置角有

虚线外的部分  
只在训练  
网络时使用