

基于 MATLAB 的开关磁阻电机调速系统的建模与仿真

目录:

第一章 开关磁阻电机调速系统的研究现状.....	1
1.1 开关磁阻电机调速系统的发展.....	
1.2 开关磁阻电机调速系统的特点和应用领域.....	错误!未定义书签。...
1.3 当前的主要研究热点和发展方向.....	1
第二章 开关磁阻电机调速系统的基本理论分析.	2
2.1 开关磁阻电动机调速系统的组成.....	2
2.2 开关磁阻电动机介绍.....	
2.3 开关磁阻电机的国内外研究.....	
2.4 开关磁阻电机结构原理.....	
2.5 SRD 系统功率变换器.....	
2.6 SRD 系统功率控制器.....	
2.7 SRD 系统检测单元.....	
第三章 SRD 系统的控制策略.....	
3.1 角度位置 (APC) 控制.....	
3.2 电流斩波 (CCC) 控制.....	
3.3 电压 PWM 控制.....	
3.4 小结.....	
第四章 开关磁阻电机调速系统的数学建模与仿真	
.....	
4.1 开关磁阻电机调速系统的数学建模.....	22

4.2 开关磁阻电机调速系统的仿真.....	33
总结.....	

基于 MATLAB 的开关磁阻电机调速系统的建模与仿真

第一章 开关磁阻电机调速系统的研究现状

1.1 开关磁阻电机调速系统的发展

20 世纪 60 年代以前，在需要可逆、可调速与高性能的电气传动技术领域，直流传动系统一直占领统治地位。自 60 年代以后，随着电力电子技术、微电子技术和现代控制理论的发展，交流电气传动技术发生了日新月异的变化，特别是异步电动机矢量控制和直接转矩控制理论的产生及应用技术的推广，使得异步电动机变频调速系统具备了宽

调速范围、高稳态精度，快速动态响应及四象限运行等良好的技术性能，其动、静态特性完全可以和直流传动系统相媲美，于是出现了交流传动取代直流传动的趋势。但是，异步电动机变频调速系统也尚有一些未尽如人意之处。

正是在电气传动技术得到迅猛发展的时代背景下，20 世纪 80 年代国际上推出了一种新型交流电动机调速系统——开关磁阻电动机调速系统简称 SRD (Switched Reluctance Motor Drive)。它是继变频调速、无换向器电动机调速系统之后，于 80 年代中期发展起来的新型交流调速系统。该系统是将新的电动机结构——开关型磁阻电动机 (Switched Reluctance Motor, 简称 SRM) 与现代电力电子技术、控制技术合为一体，兼有异步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。

1.2 开关磁阻电机调速系统的特点和应用领域

开关磁阻电机是一种新型调速电机，调速系统兼具直流、交流两类调速系统的优点，是继变频调速系统、无刷直流电动机调速系统的最新一代无极调速系统。

开关磁阻电机调速系统的特点：

- (1) 电动机结构简单、成本低、适用于高速
- (2) 各相工作独立、系统可靠性高
- (3) 功率电路简单可靠
- (4) 起动转矩高，启动电流小
- (5) 可控参数多，调速性能好
- (6) 适用于频繁启动、停车以及正反转运行
- (7) 效率高，损耗小

开关磁阻电动机调速系统作为一种新型的调速系统，兼有直流传动和普通交流传动的优点，以向各种传统调速系统挑战的势头正在逐步应用在家用电器、一般工业、伺服与调速系统、牵引电动机、高速电动机、航天器械以及汽车辅助设备等领域，显示出强大的市场竞争力。

开关磁阻电动机由于具有串励直流电动机的特性，因此在发展的初期主要应用在电力机车的牵引上。随着进一步的发展，开关磁阻电动机调速系统将逐渐占据电气传动市场。另外，对于低压、小功率的应用场合，开关磁阻电动机远优于普通的异步电动机和直流电动机。例如使用开关磁阻电动机驱动风扇、泵类、压缩机等，可以在宽广的速度范围内实现高效率的运行，且节能明显，可以在短期

内收回成本。经济型小功率开关磁阻电动机调速系统有广阔的市场，尤其是在家用电器方面的应用。

1.3 当前的主要研究热点和发展方向

开关磁阻电动机调速系统同样也存在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动机，其能量转换密度低于电磁式电动机。

(2) 开关磁阻电动机运行时转矩脉动较大，通常转矩脉动的典型值为 $\pm 15\%$ ，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) 开关磁阻电动机相数越多，主接线数越多。

(4) 系统运行需要电动机位置信号的反馈，而位置传感器的引入使电动机结构复杂，安装调试困难。电动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。

(5) 笼型异步电动机可以直接接入电网稳定运行，可以没有控制环节，而开关磁阻电动机必须配合控制器才能稳定工作。

针对上述缺点，国内外对开关磁阻电动机调速系统做了进一步的研究，研究的方向有：

(1) 进一步完善开关磁阻电动机的设计理论，建立一套效率高、适用于工程设计要求的优化设计法。

(2) 加强对铁心损耗理论的研究。

(3) 加强对转矩脉动及噪声的理论研究，提高电机的功率因数。

(4) 改善电机静态及动态性能仿真模型。

(5) 完善开关磁阻电动机、功率变换器及控制器三者之间的协调设计。

(6) 实用无位置传感器方案的研究。

(7) 开关磁阻电机转矩波动最小化技术。

第二章 开关磁阻电机调速系统的基本理论分析

2.1 开关磁阻电动机调速系统的组成

开关磁阻电动机调速系统是一种新型机电一体化交流调速系统，主要由四部分组成：开关磁阻电动机、功率变换器、控制器和检测器，如图 2-1

所示。

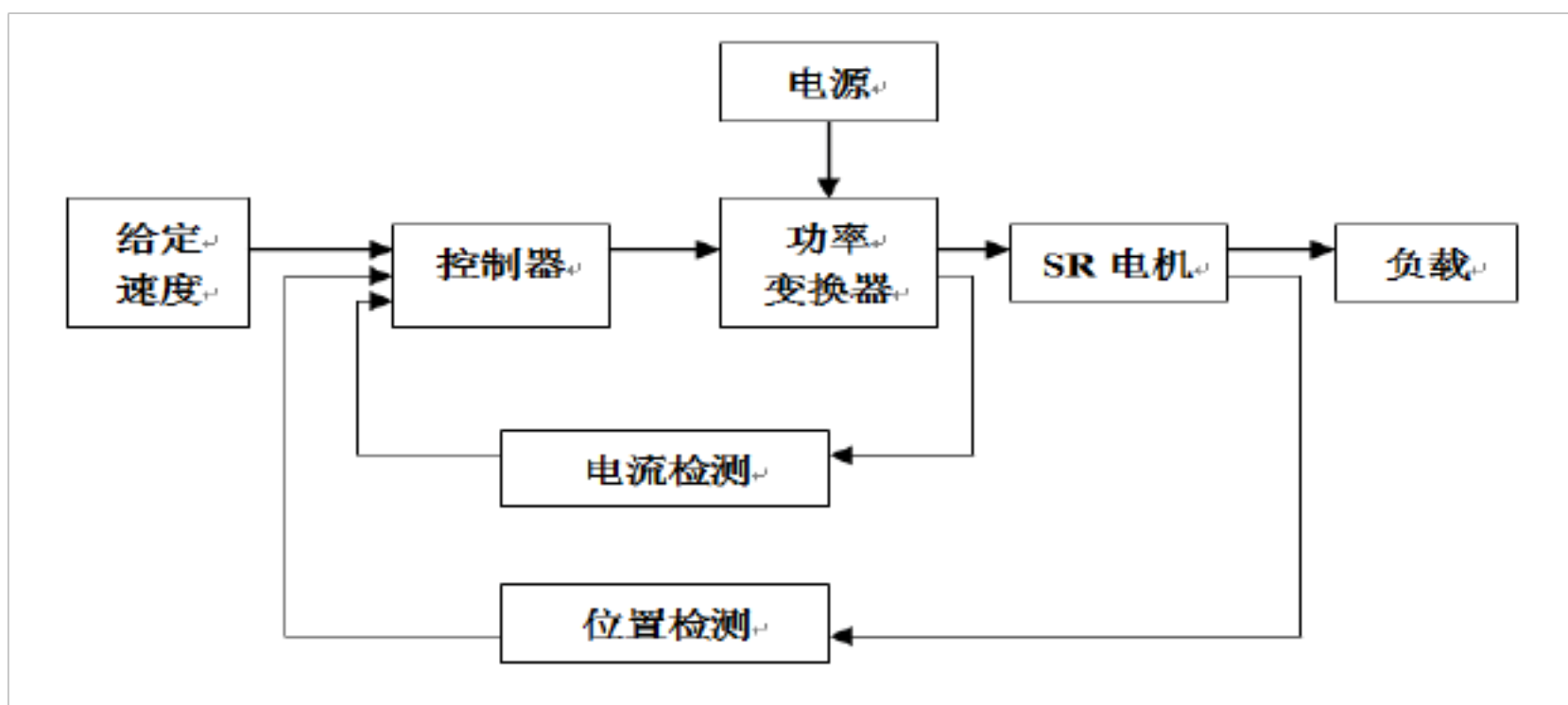


图 2-1: 开关磁阻电机调速系统 (SRD) 框图

2.2 开关磁阻电动机介绍

开关磁阻电机（SR 电机）的基本结构及基本原理的提出可追溯到19世纪40年代，那时的电机研究人员已认识到利用顺序磁拉力使电机旋转是简单易行的，但由于电机的运行特性（效率、功率因数、利用系数等）很差，仅应用于少数小功率场所，因而一直没有引起人们的研究兴趣。直到20世纪60年代，大功率晶闸管投入使用，为开关磁阻电机的研究和发展奠定了重要的物质基础。

“开关磁阻电机（Switched Reluctance Motor）”一词源见于美国学者 S. A. Nasar 1969年所撰论文，他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，这是为什么在各种新型半导体器件可以获得后这种电机才可以发展的主要原因；②磁阻性——它是

真正的磁阻电机，定转子具有可变的磁阻回路，更确切的说是一种双凸极电机。开关磁阻电机的概念非常久远，可以追溯到19世纪称为“电磁发动机”的发明，这也是现代步进电机的先驱。在美国，这种电机常常被称为“可变磁阻电机（Variable Reluctance Motor, VR 电机）”一词，但是 VR 电机也是步进电机的一种形式，容易引起混淆。有时人们也用“无刷磁阻电机（Brushless Reluctance Motor）”一词，以强调这种电机的无刷性。“电子换向磁阻电机（Electronically commutated Reluctance Motor）”一词也曾采用，从工作原理来看，甚至比“开关磁阻”的说法更准确一些，但容易与电子换向的永磁直流电机相混。

2.3 开关磁阻电机的国内外研究

开关磁阻电机是80年代初随着电力电子和控制技术的迅猛发展而发展起来的一种新型调速驱动系统，具有结构简单、运行可靠及效率高等突出特点，成为交流电机调速系统、直流电机调速系统和无刷直流电机调速系统的强有力的竞争者，引起各国学者和企业界的广泛关注。

2.3.1 国外研究

1970年，英国 Leeds 大学步进电机研究小组首

创一个开关磁阻电机(Switched Reluctance Motor, SRM) 雏形, 这是关于开关磁阻电机最早的研究。

1980年在英国成立了开关磁阻电机驱动装置有限公司(SRD Ltd.), 专门进行SRD系统的研究、开发和设计。

1983年英国(SRD Ltd.) 首先推出了SRD系列产品, 该产品命名为OULTON。1984年TASC驱动系统公司也推出了他们的产品。另外SRD Ltd. 研制了一种适用于有轨电车的驱动系统, 到1986年已运行500km。该产品的出现, 在电气传动界引起不小的反响。在很多性能指标上达到了出人意料的高水平, 整个系统的综合性能价格指标达到或超过了工业中长期广泛应用的一些变速传动系统。

跨国电机公司 Emerson 电气公司还将开关磁阻电机视为其下世纪调速驱动系统的新的技术、经济增长点。目前开关磁阻电机已广泛或开始应用于工业、航空业和家用电器等各个领域。

从近几年国际会议上有关开关磁阻电机调速系统的文章来看, 对开关磁阻电机调速系统的研究工作已从论证它的优点、开发应用的阶段进入设计理论、优化设计阶段。对开关磁阻电机、控制器、功率转换器等的运行理论、优化设计、结构形式等

方面进行了更深入的研究。可以预料，随着现代电子学的发展，微处理器运行速度的提高，高性能大容量电力电子器件的发展，在不久的将来有望实现高性能的控制策略，从而使开关磁阻电机调速系统的性能价格比得到进一步的提高。

2.3.2 国内研究

从1984年开始，我国许多单位先后开展了 SR 电机的研究工作，如北京纺织机电研究所、南京航空航天大学、东南大学、福州大学、华中理工大学、华南理工大学、河海大学、合肥工业大学、哈尔滨电工学院、南京调速电机厂、西安微电机研究所、上海电科所、上海中达一斯米克公司等，且开关磁阻电机调速系统的研究被列为中小型电机“七五科研规划项目”。在借鉴国外经验的基础上，我国 SR 电机调速系统的开发研究起点较高，目前各单位都集中于较优的三相和四相控制方案，至今国内已有十余家单位推出不同性能、不同用途的从1kw至55kw 等多种规格的系列产品，应用于纺织、冶金、机械、运输等行业的数十种生产机械和交通工具中。

1988年在南京召开了第一届开关磁阻电机研讨会。1991年在武汉召开了第二届研讨会。1992

年初成立了中国电工技术学会中小型电机专业委员会下设的开关磁阻电机学组，以推动开关磁阻电机研究工作的进一步发展。从此，我国对开关磁阻电机的研究工作已从摸索合理的设计方法发展为如何加速优化以进行开关磁阻电机的设计，在开关磁阻电机绕组互感对运行的影响、转矩脉振、最佳电流波形、振动与噪音、发热以及铁耗计算等方面出现了许多独特的观点和见解；在控制方面，正在进行用 Intel 公司的 MCS-96 或 Motorola 公司的 M68000 系列单片机取代 MCS51 单片机的工作，以提高控制系统的响应速度，降低成本，实现复杂的控制策略。

近20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、微电子、电力电子、微机、控制、机械及工程应用等众多学科领域的新技术，变频调速感应电机、无换向器直流电机等经历了几个年代的开发推广，目前已领先一步，有着极其广阔的市场前景。

2.4 开关磁阻电机结构原理

开关磁阻电机是一种新型调速电机，调速系统兼具直流、交流两类调速系统的优点，是继变频调

速系统、无刷直流电动机调速系统的最新一代无极调速系统。它的结构简单坚固，调速范围宽，调速性能优异，且在整个调速范围内都具有较高效率，系统可靠性高。主要由开关磁阻电机、功率变换器、控制器与位置检测器四部分组成。控制器内包含控制电路与功率变换器，而转子位置检测器则安装在电机的一端。

其电机部分由于是运用了磁阻最小原理，故称为磁阻电动机，又由于线圈电流通断、磁通状态直接接受开关控制，故称为开关磁阻电动机。

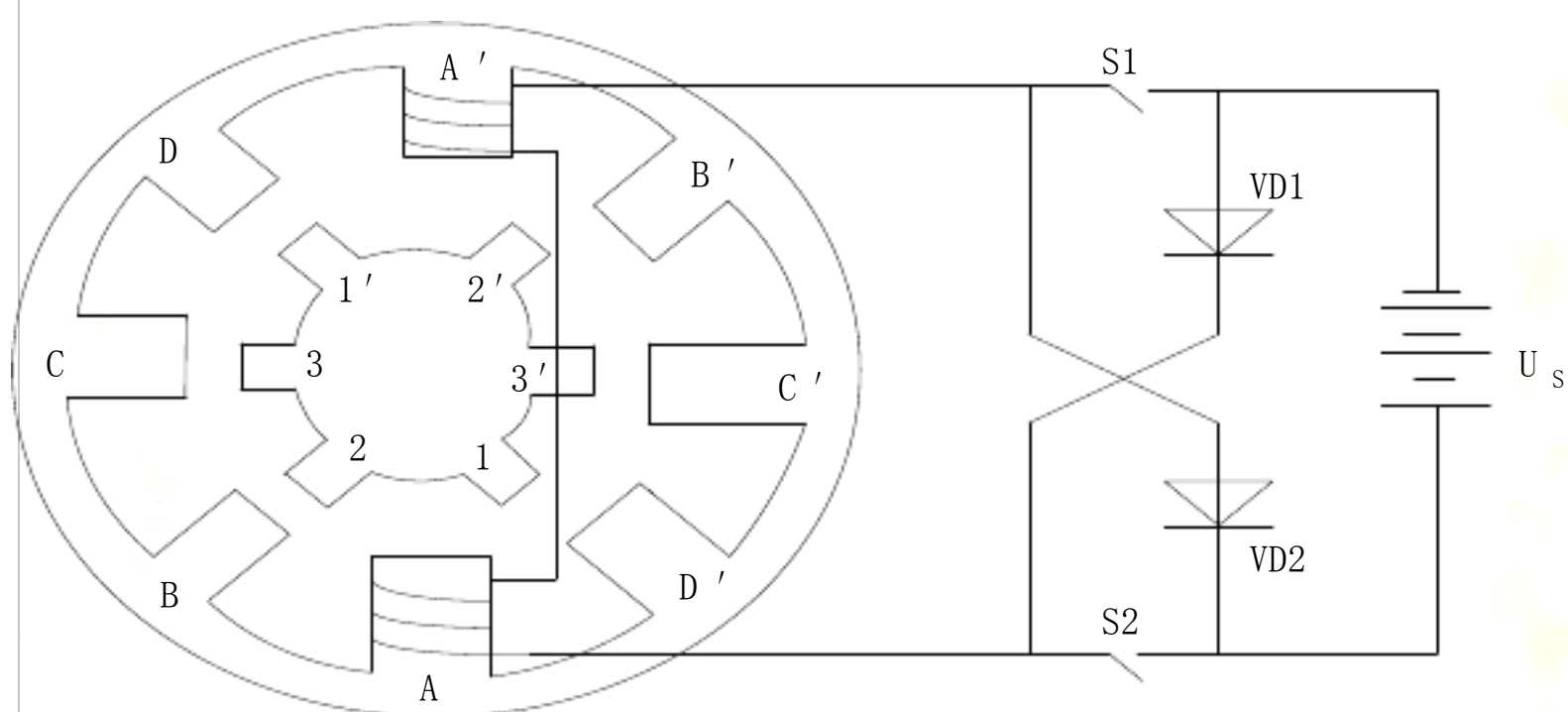


图2-2: 四相8/6极SR电动机A相电路结构

图中， S_1 、 S_2 是电子开关， VD_1 、 VD_2 是二极管， U_s 是直流电源。电机定子和转子呈凸极形状，极数互不相等，转子由叠片构成，且带有位置检测器以提供转子位置信号，使定子绕组按一定的顺序通断，维持电动机的连续运行。电机磁阻随着转子磁极与

定子磁极的中心线对准或错开而变化,当转子磁极在定子磁极中心线位置时,相绕组电感最大,当转子极间中心线对准定子磁极中心线时,相绕组电感最小。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,转子即会以逆时针方向连续旋转;反之,若依次给 B→A→D→C 相通电,则电机即会沿着顺时针方向旋转。可以看出,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,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 电机传动的共性特点是具有能量再生作用,系统效率高。

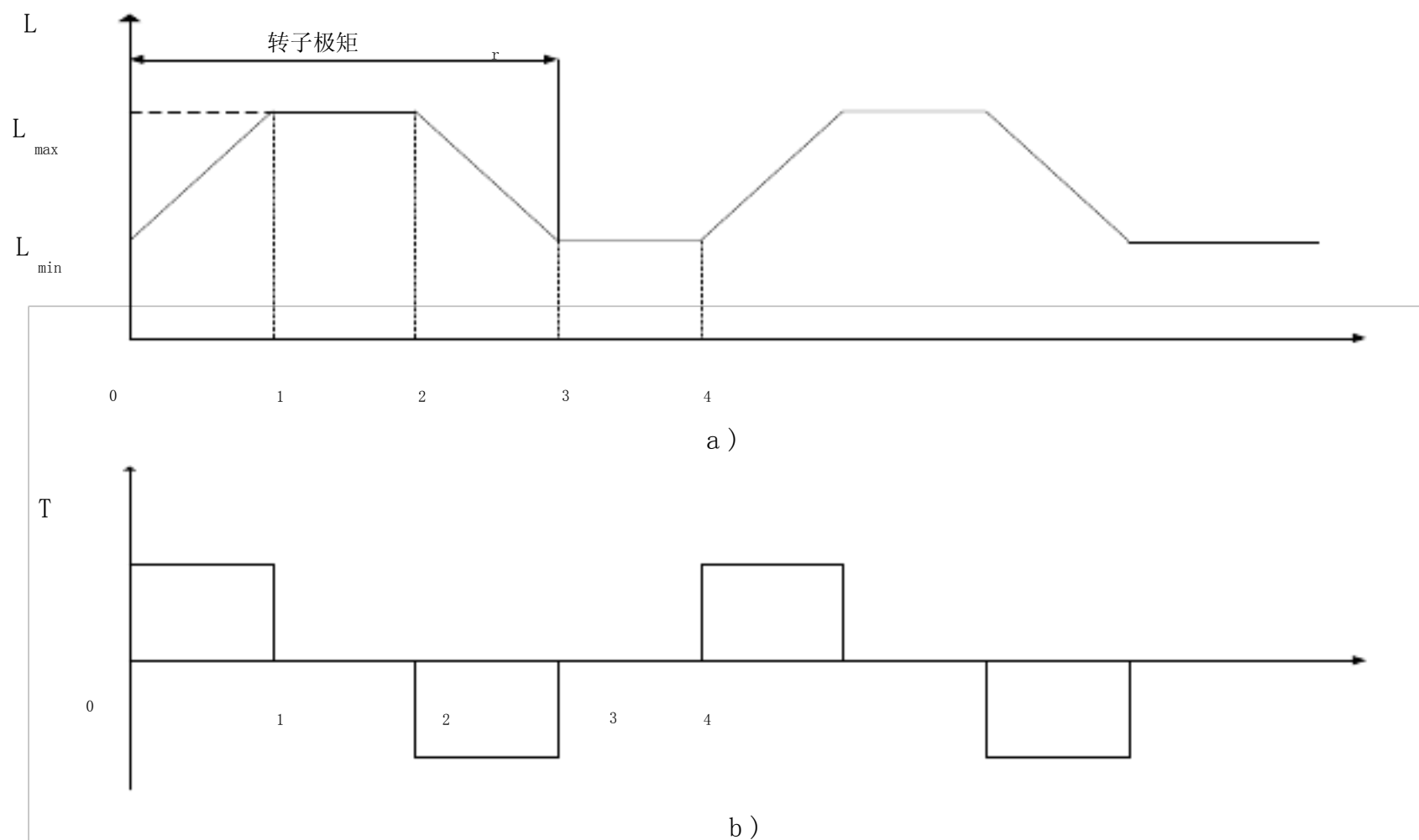


图2-3：相电感、转矩随转子位置的变化图

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：

$$T(\theta, i) = \frac{W(\theta, i)}{d\theta}$$

(2-1) 式中 T —— 转矩， W —— 磁共能， θ —— 转子位置角， i —— 绕组电流

基于图 2-3a 的简化线性模型，式(2-1)可化简为式(2-2)，即：

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

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。

2.5 SRD 系统功率变换器

功率变换器是 SRD 系统能量传输的关键部分，是影响系统性能价格比的主要因素，由蓄电池或交流电整流后得到的直流电提供电源，起控制绕组开通与关断的作用。由于 SR 电机绕组电流是单向的，使得功率变换器主电路不仅结构简单，而且相绕组与主开关器件是串联的，可以避免直通短路危险。但是合理选择和设计功率变换器是提高 SRD 的性能价格比的关键之一，功率变换器主电路形式的选取对 SRM 的设计也直接产生影响。SR 电机的功率变换器主电路的结构形式与供电电压、电动机相数及主开关器件的种类有关。

目前，常用的功率变换器主电路有许多种，应用最普遍的有不对称半桥电路，双绕组电路，裂相式电路，电容裂相型电路，H 桥型电路等。

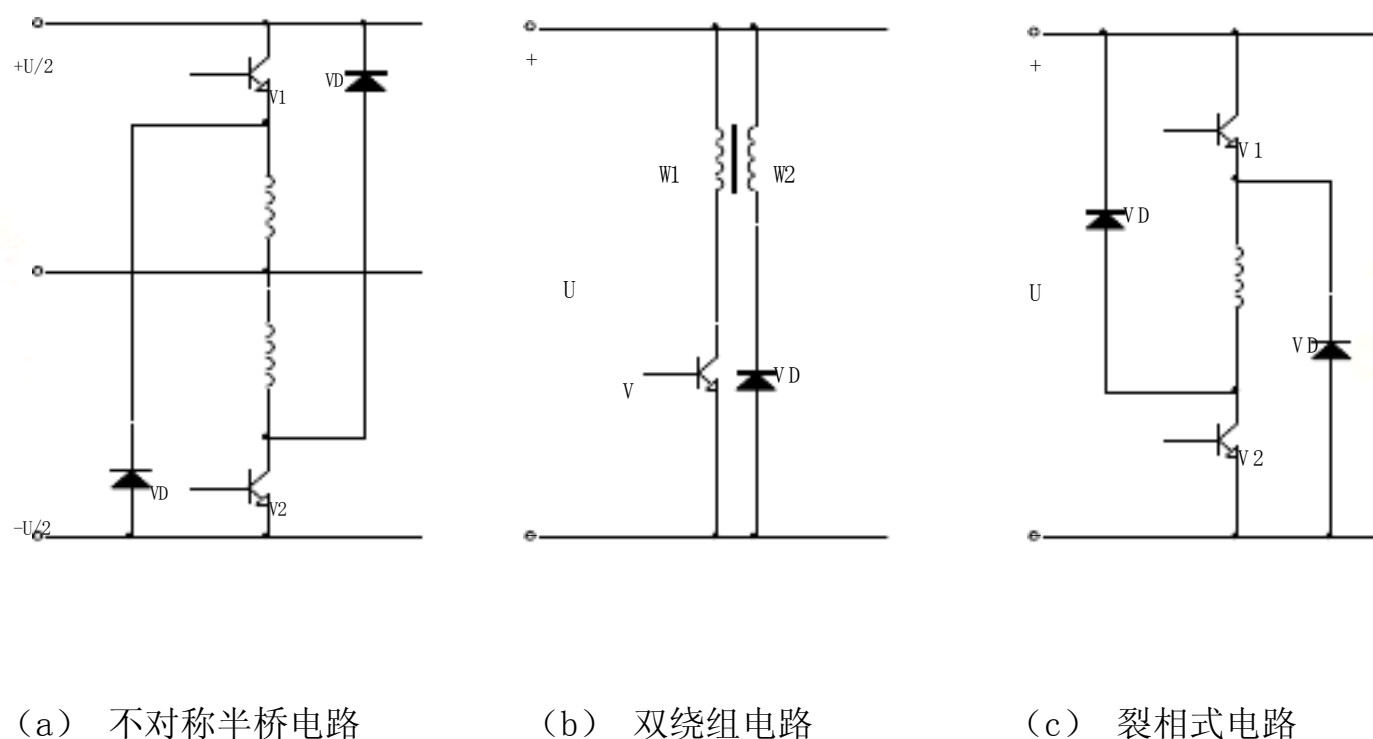


图 2.4 三种基本的功率变换电路

图 2.4 (a) 所示的主电路为单电源供电方式，每相有两个主开关，工作原理简单。斩波时可以同时关断两个主开关，也可只关断一个。这种主电路

中主开关承受的额定电压为 U_0 它可用于任何相数、任何功率等级的情况下，在高电压、大功率场合下有明显的优势，它用于任何相数，任何功率等级的情况下，在高电压、大功率场合下有明显的优势。图 2.4 (b) 所示的主电路特点是有一个初级绕组 W_1 与一个次级绕组 W_2 完全耦合（通常采用双股并绕）。工作时，电源通过开关管 V 向绕组 W_1 供电； V 关断后，磁场储能由 W_2 通过续流二极管 VD 向电源回馈。 V 承受的最大工作电压为 $2U$ ，考虑到过电压因素的影响， v 的反向阻断电压定额通常取 $4U$ 。可以看出，这种主电路每相只有一个主开关，所用开关器件数少。其缺点是电机与功率变换器的连线较多，电机的绕组利用率较低。图 2.4 (c) 所示的主电路为裂相式电路，以对称电源供电。每相只有一个主开关，上桥臂从上电源吸收能量，并将剩余的能量回馈到下电源，或从下电源吸取能量，将剩余的能量回馈到上电源。因此，为保证上、下桥电压的平衡，这种主电路只能使用于偶数相电机。主开关正常工作时的最大反向电压为 U 。由于每相绕组导通时绕组两端电压仅为 $U/2$ ，要做到 SRM 出力相当，电机绕组的工作电流须为图 2.4 (a) 所示的主电路时的两倍。这三种主电路各有优、缺

点。图 2.4 (b)、(c) 所示的主电路所需主开关的数目少，图 2.4 (a) 所示的主电路控制起来灵活，流经主开关的电流小，适配电机的范围大。由于各主电路的主开关总伏安容量大抵相等，成本相差不多。

2.6 SRD 系统功率控制器

控制电路是 SRD 系统的控制核心，与标准的自动控制系统相对应，控制电路充当比较元件和校正装置，它根据输入（给定转速）的要求，对控制对象 SRM 的转速进行合理的调节，使之与给定转速趋于一致，以达到调速的目的，是 SRD 系统的中枢。它主要由单片机和外围电路组成。单片机根据反馈的 SRM 转子位置信号和转速信号，采用一定的控制策略，控制功率电路中功率管的开通与关断控制，获得相应的机械特性。控制器是调速系统的中枢。它综合处理输入的速度指令、速度反馈信号及电流传感器、位置传感器的反馈信息。由它来控制功率变换器中主开关器件的工作状态。

在 SRD 系统中，要求控制器具有下述性能：实现电流斩波控制（CCC 控制）；实现角度位置控制（APC 控制）；实现启动、制动、停车及四象限运行；速度调节。除单片机和外围电路控制器外还有采用模

糊控制理论与 PID 调节器相结合的控制方法控制开关磁阻电机驱动控制系统，以 DSP

(TMS320LF2407)为核心开关磁阻电机调速系统控制器电路达到了简化电路结构、提高运行可靠性的目的，基于现场可编程门阵列 (FPGA) 的模糊控制器，提高整个调速系统的综合性能，基于双 DSP 的磁浮开关磁阻电机全数字控制器，以 C8051F120 为控制核心的高速开关磁阻电机数字控制器等。

2.7 SRD 系统检测单元

检测单元由位置检测和电流检测环节组成，提供转子的位置信息以决定各项绕组的开通与关断，提供电流信息来完成电流斩波控制或采取相应的保护措施以防止过电流。

2.7.1 位置检测

位置检测电路实际上是位置、速度器，负责给控制电路提供电机转子的位置和转速信息，这信息经逻辑处理后形成功率开关的触发信号，所以位置检测器是开关磁阻调速电动机的关键部件和特征部件。位置检测器通常由齿盘和光电传感器组成，传感器可以采用光敏式器件、电磁式器件或磁敏式器件。高精度的位置检测器采用旋转编码器，但价格高。

SRD 对位置检测的一般要求是在运行速度范围内能满足检测的精度要求；其次要求电路简单、工作可靠、抗干扰能力强；有的还要求能在恶劣环境下工作。

开关磁阻电机的位置检测环节，目前主要分为两大类，即直接位置检测和间接位置检测。直接位置检测一般是指使用光电式、磁敏式位置传感器以及接近开关等器件进行位置检测；而间接位置是指无位置传感器检测方法，比如定子绕组瞬态电感信息的波形检测法、基于状态观测器的无位置传感器检测法以及反串线圈检测法等技术。

2.7.2 电流检测

SRD 驱动系统无论在高速运行时，还是低速运行都需要对电流进行检测，电流检测是电流斩波控制方式的需要，也是过电流保护的需要。在 SRD 系统中，电流是单向、脉动的，而且波形随运行方式，运行条件不同而不同，因此，要求电流检测器的性能要好，快速性好；主电路与控制电路隔离良好，具有一定的抗干扰能力；灵敏度高，检测频带范围宽；工作范围大，在工作范围内有良好的线性度。电流检测可采用电阻取样隔离法、磁敏电阻法、霍尔元件直接测量法等。

SR 电动机的控制方式指电机运行时对哪些参数进行控制及如何进行控制,使电机达到期望的运行状况(如期望的转速、转向、转矩等),并使其保

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/545303243002012012>