

开关磁阻电动机

詹琼华

华中理工大学出版社

前 言

20世纪70年代以来,随着科学技术的迅猛发展和由此产生的巨大需求,步进电动机、晶闸管无换向器电动机、永磁材料及其它新材料制作的电动机等不断研制和推出。开关磁阻电动机将新的电动机构造与现代电子控制技术融为一体,以其结构简单、运行可靠和快响应、高效率的优良特性,成为交流电动机驱动系统、直流电动机驱动系统及无刷直流电动机驱动系统的强有力的竞争者,已引起国内外电机工程学界的关注。目前已研制出各种型式的开关磁阻电动机产品,它们试用于车辆牵引、机床驱动、航天器械、风机调控、家用电器等领域,发展前景广阔,很可能成为其它电动机的换代产品之一。

本书是在阅读和综合分析了开关磁阻电动机各方面文献的基础上,并根据作者1985年以来从事7.5kW开关磁阻电动机课题研究的成果而写成的。全书共分九章,第一章概述了开关磁阻电动机的特点、国内外发展概况;第二章扼要叙述了研究SR电动机所需的基本电工定律和机电能量转换原理;第三章论述了开关磁阻电动机的工作原理与基本关系式;第四章至第七章分析了开关磁阻电动机的磁场、磁化曲线和转矩等方面的计算,以及电动机的运行状态分析;第八章介绍了开关磁阻电动机的设计方法;第九章扼要说明了开关磁阻电动机驱动系统的功率转换器、控制器及位置、电流检测器的原理和结构,它们是开关磁阻电动机驱动系统中的主要部件,有其相对独立的理论和方法,本书主要研究开关磁阻电动机本身,因此,对它们不详细介绍。

本书初稿（《开关磁阻电动机讲义》）曾于1990年7月在中国电工技术学会、中国电子元件学会微特电机分专业委员会举办的新型电机技术培训班上讲授和印发，听取了学员和有关学者的意见后修改成此书。但由于新型开关磁阻电动机与传统电动机在理论和方法上有很大的不同，与步进电动机也有相当大的区别，很多问题正在探讨之中，目前尚没有一本系统、全面的专著可供借鉴，加上编写时间仓促、作者水平有限，所以本书从结构到内容难免有不确切和疏漏之处，敬希同行和读者多多批评指正。

本书能够完成和出版，有赖于林金铭教授的培养和支持，以及赵光新博士、马志源副教授和黄声华博士等在课题研究上的协作，在此谨表示衷心的感谢。本书还参阅和引用了国内外开关磁阻电动机驱动系统的大量文献资料，已在书中分别注明，亦在此一并致谢。

詹琼华

1991年9月于武昌喻家山

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1.1 概述	(1)
§ 1.2 开关磁阻电动机驱动系统的工作原理及基本部件	(2)
1.2.1 开关磁阻电动机	(2)
1.2.2 功率转换器	(3)
1.2.3 控制器	(4)
1.2.4 位置检测器	(4)
1.2.5 开关磁阻电动机驱动系统的工作原理	(5)
1.2.6 几个术语	(5)
§ 1.3 开关磁阻电动机驱动系统的特点	(6)
§ 1.4 国内外发展概况	(11)
第二章 基本电磁定律及机电能量转换原理	(15)
§ 2.1 电磁感应定律	(15)
2.1.1 电磁感应定律	(15)
2.1.2 自感电势和自感系数	(17)
2.1.3 互感电势和互感系数	(18)
§ 2.2 安培环路定律和磁通连续性原理	(19)
2.2.1 安培环路定律	(19)
2.2.2 磁通连续性原理	(20)
§ 2.3 磁路定律	(20)
2.3.1 磁路的欧姆定律	(21)
2.3.2 磁路的基尔霍夫第一定律	(22)
2.3.3 磁路的基尔霍夫第二定律	(23)
§ 2.4 磁场能量和磁场共能	(24)
2.4.1 磁场能量(磁场储能)	(24)
2.4.2 磁场储能的分布	(26)

2.4.3 磁共能	(28)
§ 2.5 机电能量转换的基本原理	(29)
2.5.1 机电装置的端对表示法	(29)
2.5.2 储能元件、保守系统、状态函数	(30)
2.5.3 机电装置中的能量转换关系	(32)
2.5.4 电磁力 f 的物理分析	(33)
2.5.5 电磁力 f 的数学推导	(35)
2.5.6 感应电势 e	(38)
2.5.7 多对电端对的机电装置	(38)
§ 2.6 能量转换公式在旋转电机中的应用	(41)
第三章 开关磁阻电动机的工作原理与基本关系式	(43)
§ 3.1 开关磁阻电动机的工作原理	(43)
3.1.1 工作原理	(43)
3.1.2 相数与定子、转子极数的关系	(47)
3.1.3 绕组的连接方式	(49)
§ 3.2 理想线性化SR电动机模型的基本电磁关系	(52)
3.2.1 电感与转子位置角的关系	(52)
3.2.2 磁通与磁链	(54)
3.2.3 绕组电流	(63)
3.2.4 转矩与功率	(66)
3.2.5 能量传递、能量比	(69)
3.2.6 SR电动机的运行特性	(71)
§ 3.3 实际开关磁阻电动机的物理状态及准确的数学模型	(73)
3.3.1 物理状态	(73)
3.3.2 开关磁阻电动机的基本方程式	(78)
3.3.3 准线性模型	(86)
第四章 开关磁阻电动机的磁场和静态参数的有限元分析	(89)
§ 4.1 用有限元法计算磁场	(90)
4.1.1 物理模型及基本假设	(90)

4.1.2	场方程与边界条件	(91)
4.1.3	等价变分问题	(93)
4.1.4	单元剖分、插值与变分问题的离散化	(93)
4.1.5	边界条件的修改	(100)
4.1.6	非线性代数方程组的解法	(103)
4.1.7	铁磁材料磁化曲线的处理	(108)
§ 4.2	开关磁阻电动机静态参数的计算	(109)
4.2.1	绕组磁链 $\psi(i, \theta)$ 的计算	(110)
4.2.2	绕组电感 $L(i, \theta)$ 与互感 $M(i, \theta)$ 的计算	(112)
4.2.3	磁场储能和磁共能的计算	(113)
4.2.4	静态转矩的计算	(114)
§ 4.3	有限元计算程序框图	(116)
§ 4.4	举例	(117)
附录	变分等价性证明	(122)
第五章	开关磁阻电动机磁化曲线的近似计算	(126)
§ 5.1	概述	(123)
§ 5.2	最大电感位置的磁化曲线	(127)
5.2.1	最大电感位置的等效磁路	(127)
5.2.2	分段磁路算法	(130)
5.2.3	各段磁路的磁势计算	(131)
5.2.4	最大电感位置的磁化曲线	(134)
5.2.5	分段拟合法	(135)
§ 5.3	最小电感位置的磁化曲线	(137)
5.3.1	最小电感位置的等效磁路	(137)
5.3.2	简化磁路中各磁阻的计算	(141)
5.3.3	最小电感位置的磁化曲线	(142)
§ 5.4	气隙最小磁导 $\lambda_{g,j}$ 的计算	(143)
5.4.1	近似解析法 (C-S法)	(143)
5.4.2	位势通量法 (STM)	(150)
5.4.3	分割法	(157)
第六章	开关磁阻电动机的转矩计算	(176)

§ 6.1	理想线性化模型的转矩计算	(177)
§ 6.2	利用理想极限转矩计算静态平均转矩	(185)
§ 6.3	非线性磁参数法	(189)
6.3.1	方法的提出	(189)
6.3.2	具体步骤	(191)
6.3.3	角度位置控制(APC)方式运行时电流、转矩的计算	(194)
6.3.4	计算框图	(197)
6.3.5	电流斩波控制(CCC)方式运行时的性能参数计算	(199)
§ 6.4	面积等效法计算平均转矩	(202)
第七章	开关磁阻电动机的运行方式	(208)
§ 7.1	SR电动机的启动运行方式	(208)
7.1.1	一相启动	(209)
7.1.2	两相启动	(210)
§ 7.2	电流斩波控制运行方式	(211)
§ 7.3	角度位置控制运行方式	(214)
§ 7.4	SR电动机的制动运行方式	(215)
§ 7.5	SR电动机运行时的转矩脉动与噪音	(216)
7.5.1	转矩脉动	(216)
7.5.2	SR电动机的噪音	(217)
第八章	开关磁阻电动机的设计与电磁参数计算	(219)
§ 8.1	概述	(219)
§ 8.2	SR电动机主要技术参数	(222)
§ 8.3	SR电动机主要尺寸与转矩间的关系——输出方程	(224)
§ 8.4	电负荷 A 和磁负荷 B 的选择	(230)
§ 8.5	主要尺寸的确定	(232)
§ 8.6	第一气隙 g 、第二气隙 g_1 的选择	(233)
§ 8.7	主要参数的选择	(235)
8.7.1	相数	(235)
8.7.2	定子、转子极弧	(237)

8.7.3 绕组匝数	(240)
§ 8.8 磁路其它几何尺寸的确定	(241)
8.8.1 定子轭高 h_c 、转子轭高 h_b	(241)
8.8.2 定子铁心外径	(242)
§ 8.9 损耗问题	(243)
8.9.1 绕组铜耗	(243)
8.9.2 铁心损耗	(245)
§ 8.10 电磁参数计算举例	(246)
第九章 开关磁阻电动机驱动系统的功率转换器、控	
制器及位置、电流检测器 (263)	
§ 9.1 功率转换器 (驱动电源)	(263)
9.1.1 功率转换器的主电路形式	(263)
9.1.2 功率转换器的伏安要求	(265)
9.1.3 开关元件的选择	(266)
9.1.4 晶闸管功率转换器的工作原理简介	(267)
§ 9.2 位置检测器	(268)
§ 9.3 控制器	(270)
§ 9.4 电流检测器	(272)
9.4.1 电阻采样光电隔离式电流检测法	(273)
9.4.2 磁电隔离磁敏元件电流检测法	(274)
参考文献	(276)

第一节	一般規定	217
第二节	同期发电机及調相机	218
第三节	直流电机	226
第四节	交流电动机	228
第五节	电力变压器 (消弧綫圈和电抗器的試驗可参照本节 中的規定)	230
第六节	互感器	234
第七节	油开关(包括自动开关、自动灭磁开关)	236
第八节	空气开关	240
第九节	隔离开关	240
第十节	套管	240
第十一节	支柱絕緣子和悬式絕緣子	243
第十二节	干式电抗器	244
第十三节	油浸紙絕緣电力電纜	245
第十四节	电容器	247
第十五节	蓄电池	247
第十六节	絕緣油	247
第十七节	閘型避雷器	249
第十八节	管型避雷器	251
第十九节	母綫	251
第二十节	二次回路	251
第二十一节	电压为 1 千伏以下的配电装置	252
第二十二节	电力和照明配綫	252
第二十三节	架空电力綫路(1 千伏以上)	253
第二十四节	接地装置	254
附录一	油浸式电力变压器安装后投入运行前絕緣潮湿的 判断和是否需要干燥的条件	257
附录二	常用空气开关的主要技术数据	插頁
附录三	常用油开关的主要技术数据	插頁

附录四	油开关操作机构調整檢查数据	269
附录五	防冻潤滑脂标准	270
附录六	緩冲器油标准	270
附录七	电纜胶的特性和适用范围	271
附录八	配电盘上模拟母綫的标志涂色的規定	271
附录九	配电盘上小母綫涂色的規定	272

第一章 绪 论

§ 1.1 概 述

磁阻电动机并不是什么新的东西，大家熟悉的定子三相绕组同步反应式磁阻电动机就是磁阻电动机中的一种，它已有一百多年的历史了，人们把它看成是传统交流电动机中的一种，但它的转子上没有绕组，是由定子方激磁，因此功率因数较低（ $\cos\varphi < 0.5$ ），效率也低。虽然近20年来，人们在一般磁阻电动机的高效率与高输出方面做了许多研究工作，但磁阻电动机一般仍只能在低速、同步运行、不考虑成本因素的情况下使用，且多作微特电机用。

开关磁阻电动机不同于上述的一般磁阻电动机，它是经过变革的一种很有生命力的新型的驱动系统，是磁阻电动机和电力电子开关电路相结合而产生的一种机电一体化的新设备。开关磁阻电动机（简称SR电动机或SRM）与磁阻电动机有质的区别。SR电动机，其定子、转子都是凸极结构，定子上有最简单的集中绕组，转子上没有绕组，也没有换向器、滑环等。SR电动机是根据转子位置采用简单的控制方式来导通和断开定子电路的电流而产生转矩的，它通过适当的措施，可以得到范围很宽的各种机械特性。由于SR电动机定子绕组电流的单向性，控制回路比异步电动机的控制回路简单，具有最少数目的开关设备，因此，这种系统完全有可能实现高精度、快响

应、高效率及高输出的性能指标，所以已引起了国内外许多研究部门、高等学校和工厂的广泛注意和研究。但目前国内外对开关磁阻电动机驱动系统（简称SRD系统）的研究还处在开创阶段，它的结构理论、运行理论、设计方法等都不成熟，有的尚未论及，还需要进行大量的研究工作。

§ 1.2 开关磁阻电动机驱动系统 的工作原理及基本部件

开关磁阻电动机驱动系统主要由四部分组成：开关磁阻电动机SRM、功率转换器（或称驱动电源、功率逆变器、逆变器）、控制器及检测器等。它们之间的关系如图1-1所示。

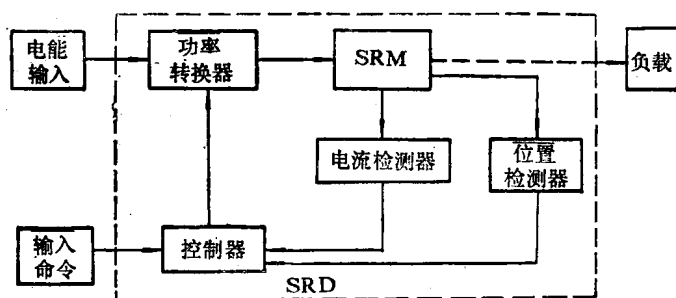


图1-1 开关磁阻电动机驱动系统框图

1.2.1 开关磁阻电动机

开关磁阻电动机是开关磁阻电动机驱动系统的执行元件，它的结构和具体工作原理与传统的交直流电动机有着根本的区别，它不像传统电动机那样依靠定、转子绕组电流产生磁场相互作用形成转矩和转速。开关磁阻电动机与反应式步进电动机一样，遵循磁通总是要沿着磁导最大的路径闭合的原理，产生

磁拉力形成转矩——磁阻性质的电磁转矩。因此，它的结构原则是转子旋转时磁路的磁阻要有尽可能大的变化。所以，开关磁阻电动机采用凸极定子和凸极转子形式，即所谓双凸极型结构，并且定、转子极数不同。定子方装有简单的集中绕组，直径方向相对的两个绕组串联成为“一相”；而转子仅由叠片构成，没有任何形式的绕组、换向器、滑环等。

开关磁阻电动机按相数分，有单相、两相、三相、四相及多相开关磁阻电动机；按气隙方向分，有轴向式、径向式结构和径向-轴向混合式结构，图1-2所示是单相径向-轴向磁通外转子电动机；按每极的齿数分，有每极单齿结构和每极多齿结构。

一般来说，小容量家用电器上用的开关磁阻电动机，常做成单相或两相径向-轴向式结构，工业用驱动电动机多采用三相、四相径向单齿式结构（见图3-1）。图1-3表示的是三相12/10SR电动机每极两齿结构的铁心冲片图。

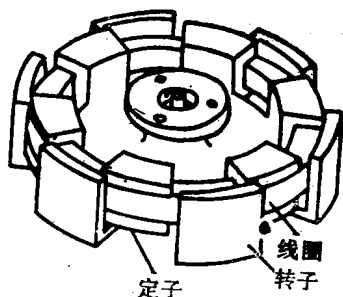


图1-2 单相径向-轴向磁通外转子电机

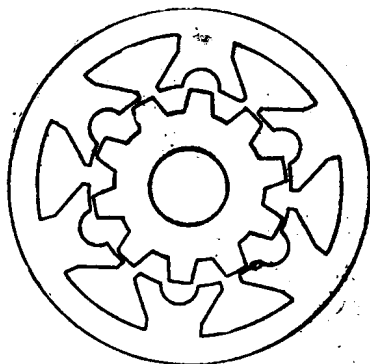


图1-3 12/10电动机纵断面图

1.2.2 功率转换器

功率转换器是开关磁阻电动机运行时所需能量的供给者，

是连接电源和电动机绕组的开关部件。因此，功率转换器包括由电瓶或整流器所产生的直流电源和开关元件等。功率转换器的线路有多种形式，并且与开关磁阻电动机的相数、绕组形式——单绕组或双绕组等有密切关系。图1-4所示为一四相开关磁阻电动机驱动系统用的功率转换器示意图。图中电源采用三相全波整流， $L_1 \sim L_4$ 分别表示SR电动机的四相绕组， $T_1 \sim T_4$ 表示与绕组相连的可控开关元件。

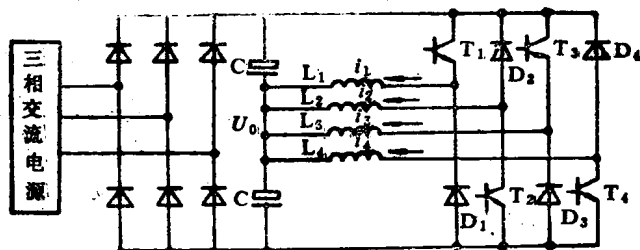


图1-4 四相SR电动机功率转换器示意图

1.2.3 控制器

控制器是SRD系统的大脑，起决策和指挥作用。它综合位置检测器、电流检测器提供的电动机转子位置、速度和电流等反馈信息及外部输入的命令，然后通过分析处理，决定控制策略，向SRD系统的功率转换器发出系列执行命令，进而控制SR电动机运行，达到控制目的。

控制器由具有较强的信息处理功能的微机或数字逻辑电路及接口电路等部分构成。微机信息处理功能大部分是由软件完成，因此，软件也是控制器的一个重要组成部分。软、硬件的配合是否恰当，对控制器的性能产生巨大的影响。

1.2.4 位置检测器

位置检测器是转子位置及速度等信号的提供者。它及时向

控制器提供定、转子极间实际相对位置的信号和转子运行的速度信号。

1.2.5 开关磁阻电动机驱动系统的工作原理

如图 1-1 所示, 当控制器接收到位置检测器提供的电动机内各相定子磁极与转子磁极相对位置信息时, 即进行判断处理, 向功率转换器发出命令, 决定定子绕组中哪一相(如 A 相)绕组激磁。被激磁相(如 A 相)绕组的开关元件即导通, 这时激磁相(如 A 相)绕组中有电流 i 流通, 产生磁通, 由于磁拉力作用转子上, 靠近定子激磁相(如 A 相)的某对转子磁极就被吸引, 使转子转动起来; 当转子转到被吸引的转子磁极与定子激磁相(如 A 相)磁极重合(即所谓平衡位置)时, 磁拉力消失, 此时控制器会根据位置检测器的信息, 在定、转子即将到达平衡位置时, 向功率转换器发出命令, 断开该激磁相(如 A 相)绕组的主开关元件。在这个过程中, 控制器还会根据位置检测器提供的其它相的定、转子磁极相对位置和电机运行速度等检测信号, 在相应的时刻命令导通其它相绕组的主开关元件, 使转子继续产生同方向的转矩, 以保证转子连续不断地在一定速度下运行。

从上面分析可知, 电流的方向对转矩没有任何影响。只要位置检测器能即时给出定、转子极间相对位置信息, 控制器能及时和准确地控制定子各相绕组的通、断, SRM 就能产生所要求的转矩和转速, 以达到最佳运行状态。

1.2.6 几个术语

转子位置角 θ : 是指定、转子磁极轴线之间的机械夹角(设定子磁极轴线与转子极间中性线重合时的 $\theta = 0$)。

触发角(开通角) θ_{on} : 定子相绕组接通电源瞬间定、转

子极的相对位置角。

关断角 θ_o ：定子相绕组断开电源瞬间定、转子极的相对位置角。

导通角 θ_o ：绕组接通电源期间转子所转过的角度。它与 θ_o 和 θ_{on} 的关系为： $\theta_o = \theta_o - \theta_{on}$ 。

§ 1.3 开关磁阻电动机驱动系统的特点

有人认为开关磁阻电动机实质上是一种高速大步距的步进电动机，这话有一定道理，但不确切。不错，它们两者的运行原理基本相同，又同属双凸极结构，但有两个根本差别。

第一，开关磁阻电动机是借助位置检测器运行于自同步状态，它的激磁电流导通与转子位置有严格的对应关系，并且开关磁阻电动机中绕组电流脉冲波形的前后沿是可以分别独立控制的，也就是电流脉冲宽度即 θ 可以任意调节。而在步进电动机中，一般只有相电流方波反馈，没有转子位置反馈。

第二，开关磁阻电动机驱动系统多用于功率驱动系统中，对电动机的出力、效率等力能指标要求很高。而步进电动机多用于小功率的位置控制系统中，只对电动机的定位精度提出要求。与此相对应，导致它们的设计出发点不一样，即技术指标要求不同。因此，步进电动机和SRD系统两者的功率转换器、控制器，或电动机本身的结构、几何形状、尺寸，都有根本的区别。

开关磁阻电动机驱动系统综合了交流异步电动机驱动系统和直流换向电动机驱动系统的优点。因此，SRD系统是这些驱动系统的有效竞争者，它的主要优点如下：

(1) 电动机的结构简单，转子上没有任何形式的绕组；定子上只有简单的集中绕组，端部较短，没有相间跨接线。因

此,具有制造工序少、成本低、工作可靠、维修量小等特点。

(2)开关磁阻电动机的力矩与电流极性无关,只需要单向的电流激励。因此,在理论上功率变换电路中每相可以只用一个开关元件,而且每个开关元件都与电机绕组串联,不会出现像PWM逆变器那样电源有通过两个开关元件直通的危险。所以,SRD系统线路简单,可靠性高,成本低于PWM交流调速系统。

(3)SR电动机转子的结构形式对转速限制小,所以可制造造成高转速电动机。又因转子转动惯量小,在电流每次换相时可以随时改变相应转矩的大小和方向,因而系统有良好的动态响应

(4)SRD系统可以通过对电流的导通、断开,以及电流幅值等的控制,得到满足不同负载要求的机械特性,易于实现系统的软启动和四象限运行等功能,控制灵活。又由于SRD系统是自同步系统运行,所以它不会出现那种用变频供电的感应电动机在低频时出现的不稳定和振荡问题。

(5)由于SR驱动系统的SR电动机采用了独特的结构和设计方法以及相应的控制技巧,使这种电动机的单位出力完全可以与异步电动机相媲美,甚至还略占优势。由SR电动机组成的SRD系统的效率和出力在宽广的速度和负载范围内都可维持在较高水平。从英国Leeds大学和Nottingham大学共同研制的50kW电池车辆系统的功率-速度特性和效率曲线(见图1-5),华中理工大学研制的7.5kW SR电动机的功率、转矩-速度特性(见图1-6)^[4],以及一个用于轻型铁路牵引中的SRD系统中SR电动机的功率、转矩-速度特性和效率曲线(见图1-7)^[1],可以看出上述一些特点。

1989年在英国召开的“国际电机与控制”会议上,英国M. R. Harris发表的一篇题为“开关磁阻电机与感应电动机的设计与性能参数的比较”的论文中,将两种感应异步电动机