

开关磁阻调速电动机

刘迪吉 张焕春
傅丰礼 高 超 编著



机械工业出版社

(京) 新登字 054 号

本书阐述开关磁阻电动机调速系统的基本原理、性能特点、计算方法和应用。全书是以作者的研究与实践成果为基础撰写的,力求内容完整、体系合理和技术先进实用。可供广大电气技术人员及其他有关科技人员了解、开发及应用开关磁阻调速电动机时参考,也可作为大专院校电工类专业师生专题学习研究的参考书或教材。

开关磁阻调速电动机

刘迪吉 张焕春 傅丰礼 高 超 编著

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: 周 娟 版式设计: 冉晓华 责任校对: 曹志亮

封面设计: 陈惠生 责任印制: 周德生

南京航空航天大学飞达印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1994 年 8 月第 1 版·1994 年 8 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32·6 印张·170 千字·200 页

印数 0 001—2 000 册

定价: 8.20 元

※

ISBN7-111-04461-4/TM·550 (X)

前 言

开关磁阻电动机是机电一体化调速系统。十多年来，在国内外电工界同行们的共同努力下，已确立了这种新型调速电动机的重要地位，引起了人们的广泛兴趣。但是关于它的机理研究和应用开发，多见于一些论文，少有完整、系统的论述。因此，几年前，作者就有撰写本书的构想，以期促进我国开关磁阻调速电动机的研究开发与推广应用。由于种种原因，当时只搞了一个同名内部资料。现在结合作者多方面的研究实践，经补充加工，终于成稿并付之出版。希望为有兴趣研究开发与应用开关磁阻调速电动机的人们提供参考、讨论，起到抛砖引玉的作用。

本书共五章。第一章阐述了开关磁阻调速电动机的基本原理，读者也可以从中了解其发展概况和动向。第二章是开关磁阻电机和功率变换器的主要结构，应该说其结构是不断推陈出新，分类是不断发展的，因此，本章只是以作者目前认识与实践体会，做了初步的归类介绍。第三章是分析与计算，按线性模式、准线性模式和非线性模式分别推导基本计算关系，分析各种内部和外部参数的影响，部分定量地介绍开关磁阻调速电动机的特性特点。第四章则集中阐述开关磁阻电机的控制原理和控制器的主要构成，其中有一些典型的电路实例和特殊控制方案，以便读者对控制器和调节控制有一个比较实在和完整了解。最后是第五章，介绍开关磁阻调速电动机的应用，这可谓是作者部分实践成果的汇总，从中可以展示它在工业应用中的广阔前景。全书五章，前后内容有所交叠，读者可以顺序阅读，也不妨有选择地参阅，如能前后对照、反复推敲，则可得到更好的效果。

本书作者来自三个单位，都有从事开关磁阻电机调速系统研究开发的较长经历，也有不少成果，而且相互有着良好的合作。其中张焕春教授（南京航空航天大学博士导师）特长微电子技术和系统控制，傅丰礼博士（上海电器科学研究所高级工程师）从事系统计算与电机 CAD，高超（中国纺织总会纺织机电研究所高级工程师，中达一斯米克公司副总工程师）全方位开展系统设计、生产和应用开发，刘迪吉教授从事机理研究和主持设计、开发与实践。本书由刘迪吉教授整理统稿，并经作者们认真反复地讨论、修改定稿。但由于作者水平有限，不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

本书由机械工业部上海电器科学研究所副总工程师季杏法（教授级高级工程师）审稿，季先生认真地审定了全部书稿，并提出了许多宝贵的意见，谨此表示衷心地感谢。我们还要感谢南京航空航天大学的同仁们，如陈昊（博士生）、居美华（工程师）、张旭蔚、陈惠生（工程师）等同志，他们在成稿和出版中做了大量辅助工作。最后作者对所在单位的课题组同事及协作者（包括用户）的支持，表示诚挚地感谢。

作者

1994 年春节

主要符号说明

B	磁感应强度
C	电容；常数
e	电动势
f	频率
h	高度
i, I	电流
K	常系数
L	电感
m	相数
n	转速
P	功率；位置基本信号
Q	位置基本信号
R	位置基本信号
t	时间
T	周期；转矩
U	电压
W	能量
Z	齿极数
α	角度；极弧系数
δ	气隙长度
η	效率
θ	转子位置角
θ_1, θ_2	主开关开通角，主开关关断角
Ψ	磁链
Ω	转子角速度

目 录

前 言

主要符号说明

第一章 开关磁阻调速电动机的基本原理

第一节 基本工作原理

- 一、开关磁阻调速电动机的组成 (1)
- 二、电磁转矩基本理论 (4)

第二节 开关磁阻电动机的特点

- 一、类比 (9)
- 二、基本特点 (13)

第三节 开关磁阻电动机发展概况

- 一、回顾 (16)
- 二、典型开关磁阻电动机简介 (21)
- 三、开关磁阻电动机研究方向 (26)

第二章 开关磁阻调速电动机的主要结构与分类

第一节 电机的结构与分类

- 一、三相开关磁阻电机 (35)
- 二、四相开关磁阻电机 (37)
- 三、两相开关磁阻电机 (39)
- 四、单相开关磁阻电机 (40)
- 五、位置检测器 (41)

第二节 功率变换器的组成与分类

- 一、常用的开关磁阻电动机主电路 (43)
- 二、开关磁阻电动机主电路的续流形式 (46)
- 三、开关磁阻电动机的 PWM 调压调速主电路 (51)
- 四、开关磁阻电动机变换器的主元器件选择 (53)

第三章 开关磁阻电动机的分析与计算

第一节 线性模式分析

- 一、基本电路方程 (56)
- 二、相电流解析 (57)
- 三、转矩计算 (62)
- 四、算例 (64)
- 五、讨论 (66)

第二节 准线性模式分析

- 一、电机的饱和磁特性及分段线性化 (67)
- 二、工作磁状态及能量关系 (68)
- 三、讨论 (70)

第三节 非线性模式分析与计算

- 一、电机的非线性磁场计算 (73)
- 二、主电路非线性网络解算 (76)
- 三、讨论 (81)

第四章 开关磁阻电动机的控制

第一节 基本控制原理综述

- 一、正反转控制 (83)
- 二、低速斩波控制 (83)
- 三、高速单脉冲控制 (86)
- 四、调压调速控制 (88)
- 五、再生运行控制 (88)

第二节 主要参数检测

- 一、转子位置检测 (90)
- 二、转速检测 (95)
- 三、电流检测 (99)

第三节 典型控制器

- 一、方案 I 简介 (101)
- 二、方案 II 简介 (116)
- 三、方案 III 简介 (119)

第四节 模糊控制在开关磁阻电动机调速系统中的应用	
一、模糊控制概述	(124)
二、在开关磁阻电动机调速系统中的应用	(125)
第五节 制动运行控制	
一、基本原理	(131)
二、制动运行控制	(132)
三、发电运行讨论	(136)
第五章 开关磁阻调速电动机的应用	
第一节 开关磁阻调速电动机的选用	
一、生产机械的负载性质	(139)
二、开关磁阻调速电动机选用的基本原则	(141)
三、选用开关磁阻调速电动机的其它考虑	(145)
第二节 工业应用简介	
第三节 开关磁阻电动机的应用实例	
一、在涤纶抽丝机中的应用	(152)
二、在染整联合机中的应用	(156)
三、在龙门刨床中的应用	(162)
四、在卷染机中的应用	(166)
五、在可逆轧机中的应用	(173)
六、在成卷机中的应用	(175)
七、在电动自行车中的应用	(178)
八、在毛巾印花机中的应用	(181)
九、在高速平缝机中的应用	(185)
十、在造纸机中的应用	(187)
参考文献	

第一章 开关磁阻调速电动机的基本原理

磁阻电机是结构最简单的电机，在一个半世纪前就有人关注和研究它的应用。经历了漫长的孕育期，在现代功率电子技术、计算机辅助设计及微机控制技术高度发展的基础上，才形成磁阻电机应用的新台阶，出现了今天的热门课题——开关磁阻调速电动机。这方面被公认的里程碑是本世纪 70 年代末至 80 年代初，英国 Leeds 大学和 Nottingham 大学成功合作研制了一些样机，相继发表了一系列论文，系统阐述了开关磁阻电动机的基本原理、计算方法和运行特性。其后，他们又联合组成 TASC SRD Ltd.，从事产品开发，并于 1983 年正式推出了商业系列产品，为开关磁阻调速电动机的迅速发展奠定了基础。应该说，在 80 年代，这种调速电机还是在争议中发展的。但经过国内外电气界的广泛深入地研究、开发与实践，至今已得到充分认可。目前，开关磁阻调速电动机以其调速性能好、结构简单、效率高、成本低等特点，已在迅猛发展的调速电动机领域内争得了一席之地，并在许多场合下得到了较广泛的应用。

作为开篇，本章将简要阐述开关磁阻调速电动机的基本工作原理和特点，并扼要介绍其研究和发展动向。

第一节 基本工作原理

一、开关磁阻调速电动机的组成

开关磁阻调速电动机 (Switched Reluctance Drive——SRD) 由双凸极磁阻电机、功率变换电路、位置检测器和控制调节单元等

部分组成。基本框图如图 1-1 所示。图中 M 为电动机单元，即双凸极磁阻电机，最终靠它实现将电能变换为机械能输出。

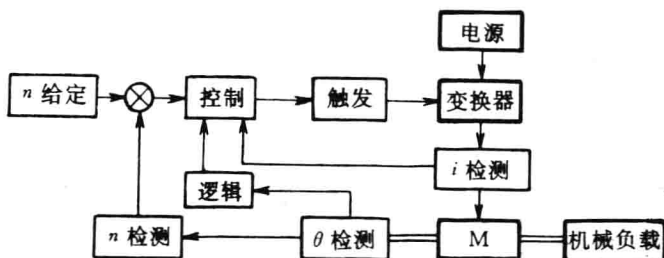


图 1-1 开关磁阻调速电动机基本框图

双凸极磁阻电机的定、转子均为凸极齿槽结构，定子设有集中绕组，转子无绕组。以目前广泛应用的三相 6/4 结构电机为例，截面如图 1-2 所示。其定子有 6 个齿极，转子有 4 个齿极，每个定子齿极上设有一个线圈，位于径向相对的两线圈串接构成一相绕组，可组成 A、B、C 三相绕组。

所谓磁阻电动机是指电机各相磁路的磁阻随转子位置而变，因此电机的磁场能量也将随转子位置而变，由此可以以磁能为媒介变换得机械能。如图 1-2 状态给 A 相供电，则所建立的磁场将吸引转子逆时针旋转。随转子偏转，通电相则应从 A 相改为 B 相，继后 B 相改为 C 相，以此相序循环供电才能保持转子持续逆时针方向旋转，输出机械能。仍如图 1-2 所示状态，给 C 相通电，则可使转子顺时针偏转，然后根据转子

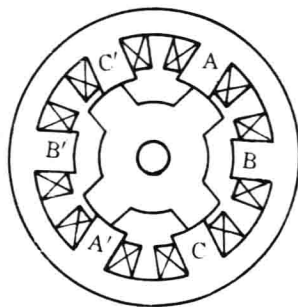


图 1-2 三相 6/4 结构双凸极磁阻电机截面图

不同位置循序以 B、A、C 规律通电，则可保持转子持续顺时针旋转。所以说，应该有一个可控的开关电路，它根据转子位置来合理地、周期性地导通和关断各相电路，实现转子以一定方向连续旋转，输出机械能。

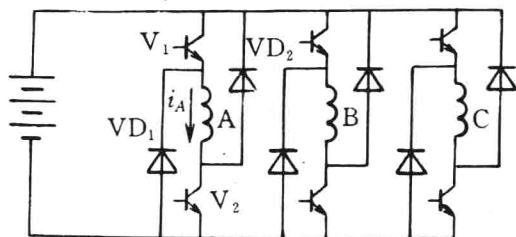


图 1-3 三相开关磁阻电机主电路

可控开关电路即变换器，它和电源及电机绕组一起构成的功率主电路如图 1-3 所示。这是最典型的三相开关磁阻电动机系统主电路。三相绕组如图中 A、B、C，电源画的是电池组，可以是蓄电池，而工业应用中更多的是交流整流电源。图中每相有两只功率三极管作为可控开关，两只二极管建立续流通路。例如 V_1 、 V_2 触发导通，则 A 相由电源供电，相电流为 i_A ；当 V_1 、 V_2 受控关断时，相电流将循续流二极管 VD_1 、 VD_2 形成通路回馈至电源而迅速衰减。可以看出，转子每转过一个齿距角（对应图 1-2 为 90° ），定子每相通断工作一个周期，其中各相按转子的相对位置不同而顺序先后循环工作。所以位置检测器是开关磁阻电动机的重要特征部件，它实时检测转子位置，有序、有效地控制变换器的工作。关于位置检测器的结构原理，将在下一章介绍。

如图 1-1 所示，它组成一个开关磁阻电动机有功率系统和控制系统两部分。功率系统即电源→变换器→电机→机械负载，图中用粗线框表示，它完成电能到磁能到机械能的变换。控制系统通常包括三个闭环，最本质的是位置闭环，即位置检测器→逻辑

变换→控制和触发→变换器→电机，从原理上保证了开关磁阻电动机的有效工作，确保了不失步同步运行。电流闭环是控制系统的一部分，它由电流检测→控制和触发→变换器组成闭环，这一电流的检测和控制，可以实现起动和加速特性控制，也是过载和过电流保护所必需的。还有一个是速度闭环，它由位置检测信号变换成速度反馈信号，然后与速度给定信号比较，以此控制变换器，实现速度控制，构成良好的调速系统。所以，开关磁阻电动机综合了电机、功率电子技术和电子控制（可包括计算机）等技术，是机电一体化新型调速电动机系统。

二、电磁转矩基本理论

电磁转矩的形成及其理论是认识开关磁阻电动机工作原理的基础。

如图 1-2 和图 1-3 所示，当单独 A 相通电，设相电流为 i_A ，则建立磁场的能量

$$W_{mag} = \int_0^{\psi_A} i \, d\psi \quad (1-1)$$

式中，相磁链 ψ 是相电流和转子位置（以 θ 角表示）的函数。如图 1-4 简示了该磁特性，P 点 (ψ_A, i_A) 为该磁工作点。图中标出了表示磁能 W_{mag} 的面积和表示磁共能 W'_{mag} 的面积

$$W'_{mag} = \int_0^{i_A} \psi \, di = \psi_A \cdot i_A - W_{mag} \quad (1-2)$$

由电磁场基本理论可知，在这个磁系统中，若转子有位移，则磁能与机械能之间发生转换，其电磁转矩

$$T_{em} = - \left. \frac{\partial W_{mag}}{\partial \theta} \right|_{\psi=c} \quad (1-3)$$

该式以磁链 ψ 不变 ($\psi=c$) 为计算的约束条件，这正表示了 $d\psi=0$ 、 $e = -\frac{\partial \psi}{\partial t} = 0$ ，即电能 ($e \, idt$) 不发生变化，所以增减的磁能和机械能的变化相平衡，数值上 $\Delta W_{mag} = T \Delta \theta$ 。式 (1-3) 中的负号是

表示产生的电磁转矩之方向将有趋于磁能减小。如图 1-2 瞬间，A 相通电后转子受逆时针方向电磁转矩，有趋势转动使转子齿极轴线与定子 A 相齿极轴线趋于重合，这将减小气隙磁能，直到至磁能为最小的稳定位置。

常用的另一电磁转矩数学表达式为

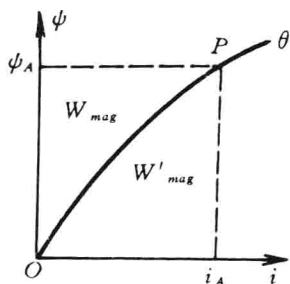


图 1-4 磁能和磁共能

$$T_{em} = \left. \frac{\partial W'_{mag}}{\partial \theta} \right|_{i=c} \quad (1-4)$$

即以磁共能对转角的偏导数来计算，其数学约束条件是电流恒定 ($i=c$)，电磁转矩的方向是有趋于磁共能增加的方向，避免了式 (1-3) 中的负号。 $\phi=c$ 或 $i=c$ ，仅仅是计算上的约束条件，决不说明只有在该条件下才能产生电磁转矩。事实上由于电磁转矩的客观存在，所以可任选一种计算方法，结果必定一致。

例如，以图 1-4 磁状态出发，当转子有虚位移 $\Delta\theta$ ，见图 1-5，按式 (1-3) 和 (1-4) 计算电磁转矩分别如下

$$\begin{aligned} T_{em} &= - \left. \frac{\Delta W_{mag}}{\Delta \theta} \right|_{\phi=c} = - \frac{\text{面积 } OTYO - \text{面积 } OPYO}{\Delta \theta} \\ &= \frac{\text{面积 } OPTO}{\Delta \theta} \\ T_{em} &= \left. \frac{\Delta W'_{mag}}{\Delta \theta} \right|_{i=c} = \frac{\text{面积 } OQZO - \text{面积 } OPZO}{\Delta \theta} \\ &= \frac{\text{面积 } OPQO}{\Delta \theta} \end{aligned}$$

当取极限 $\Delta\theta \rightarrow 0$ ，那么面积 $OPTO$ 与 $OPQO$ 趋于一致，说明计算结果一致，包括电磁转矩的方向也是一致的。

磁共能并无直接的物理意义，但计算时常用品式 (1-4)，因为它

以电流 i 为参变量, 概念清楚, 计算方便。在线性电感 ($\psi = Li$) 或作线性化处理的磁系统中, 磁共能在数值上等于磁能

$$W'_{mag} = W_{mag} = \frac{1}{2} Li^2 \quad (1-5)$$

按式 (1-4) 计算一相供电时开关磁阻电机的电磁转矩为

$$T_{em} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad (1-6)$$

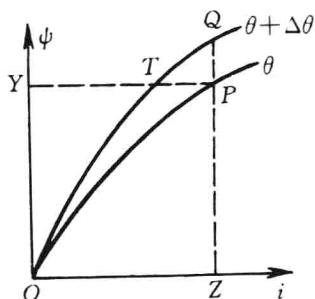


图 1-5 电磁转矩计算关系

正如前面所述, 各相磁路的磁阻及相绕组的电感均随转子位置而变。把相绕组轴线 (即对应的定子齿极轴线) 与转子槽轴线重合位置定义为 $\theta = 0^\circ$, 该位置相电感为最小值 $L_{\min}$; 再定义相绕组轴线和转子齿极轴线重合位置为 θ_m , 其时相电感具有最大值 $L_{\max}$ 。如图 1-6 所示, 相电感 $L(\theta)$ 将以转子齿距角 θ_r 为周期而变化。其中转子齿距角

$$\theta_r = \frac{2\pi}{Z_r} \quad (1-7)$$

式中, Z_r 为转子齿极数, 如图 1-2 之三相 6/4 结构, $Z_r = 4$, $\theta_r = \pi/2$ (即 90°)。

据此, 各相在一周期内 $0 \sim \theta_m$ 区间, $\partial L / \partial \theta > 0$; $\theta_m \sim \theta_r$ 区间, 则 $\partial L / \partial \theta < 0$ 。对照式 (1-6), 即控制各相绕组在 $0 \sim \theta_m$ 区间内有电流, 就可以产生正转矩; 若使相电流形成于另半周期 (即 $\theta_m \sim \theta_r$ 区间), 则产生

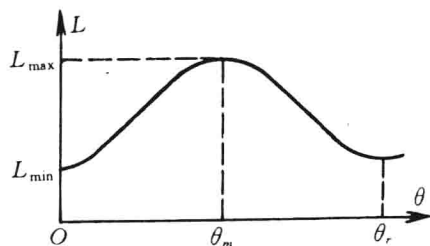


图 1-6 相绕组电感曲线

负转矩。即只要根据转子位置来控制主开关通断角度，以改变相电流的大小和波形，就可以产生不同大小和方向的电磁转矩，实现开关磁阻电机的运行控制。

进一步讲，开关磁阻电机为多相系统，各相的控制规律虽然相同，但电流可能在若干相同时存在，这时不仅应计及自感，还应计及互感。所以计算电机的电磁转矩时，应计及各相的总体效应。

先以两相绕组通电为例，该双绕组励磁的总磁能 W_{mag} 及磁共能 W'_{mag} 分别为

$$W_{mag} = \int (i_1 d\psi_1 + i_2 d\psi_2)$$

$$W'_{mag} = \int (\psi_1 di_1 + \psi_2 di_2)$$

进行线性化处理，则各相磁链与电流的关系可表达为如下磁链矩阵

$$\begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}$$

式中， L_{11} 和 L_{22} 为各相绕组自感， $L_{12} = L_{21}$ 为两相绕组之间的互感。这些感值均为转子位置角 θ 的函数，而所谓“线性”是指感值不随电流大小变化。以此代入，得双绕组励磁系统的磁共能（因为是线性系统，所以数值上与磁能相等）为

$$\begin{aligned} W'_{mag} &= W_{mag} = \int_{(0,0)}^{(I_1, I_2)} [(L_{11}i_1 + L_{12}i_2)di_1 + (L_{21}i_1 + L_{22}i_2)di_2] \\ &= \int_0^{I_1} L_{11}i_1 di_1 + \int_0^{I_2} L_{22}i_2 di_2 + \int_0^{I_1 \cdot I_2} L_{12} d(i_1 \cdot i_2) \\ &= \frac{1}{2}L_{11}I_1^2 + \frac{1}{2}L_{22}I_2^2 + L_{12}I_1I_2 \\ &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 L_{jk} I_j I_k \end{aligned}$$

式中, I_1 、 I_2 为考察瞬间的两绕组电流值。

推广到任意 m 相绕组的电机, 其总磁能

$$W_{mag} = \sum_{j=1}^m \int_0^{\psi_j} i_j d\psi_j \quad (1-8)$$

相应的磁共能为

$$W'_{mag} = \sum_{j=1}^m \int_0^{i_j} \psi_j di_j \quad (1-9)$$

若用电路的线性化参数表达, 磁链矩阵表达式为

$$\begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ \vdots \\ \psi_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \cdots & L_{1m} \\ L_{21} & L_{22} & & L_{2m} \\ \vdots & & & \vdots \\ L_{m1} & L_{m2} & \cdots & L_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_m \end{bmatrix} \quad (1-10)$$

由此计算电机的磁能 (等于磁共能) 为

$$\begin{aligned} W_{mag} = W'_{mag} &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m L_{jk} I_j I_k \\ &= \frac{1}{2} \mathbf{I}^T \mathbf{L} \mathbf{I} \end{aligned} \quad (1-11)$$

这里的大写黑体是矩阵记号, 如

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \cdots & L_{1m} \\ L_{21} & L_{22} & & L_{2m} \\ \vdots & & & \vdots \\ L_{m1} & L_{m2} & \cdots & L_{mm} \end{bmatrix} \quad (1-12)$$

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_m \end{bmatrix} \quad (1-13)$$

$\mathbf{I}^T$ 则为 $\mathbf{I}$ 的转置矩阵。

按式 (1-11), 只要正确列写电机的电感矩阵 $\mathbf{L}$, 并根据通电