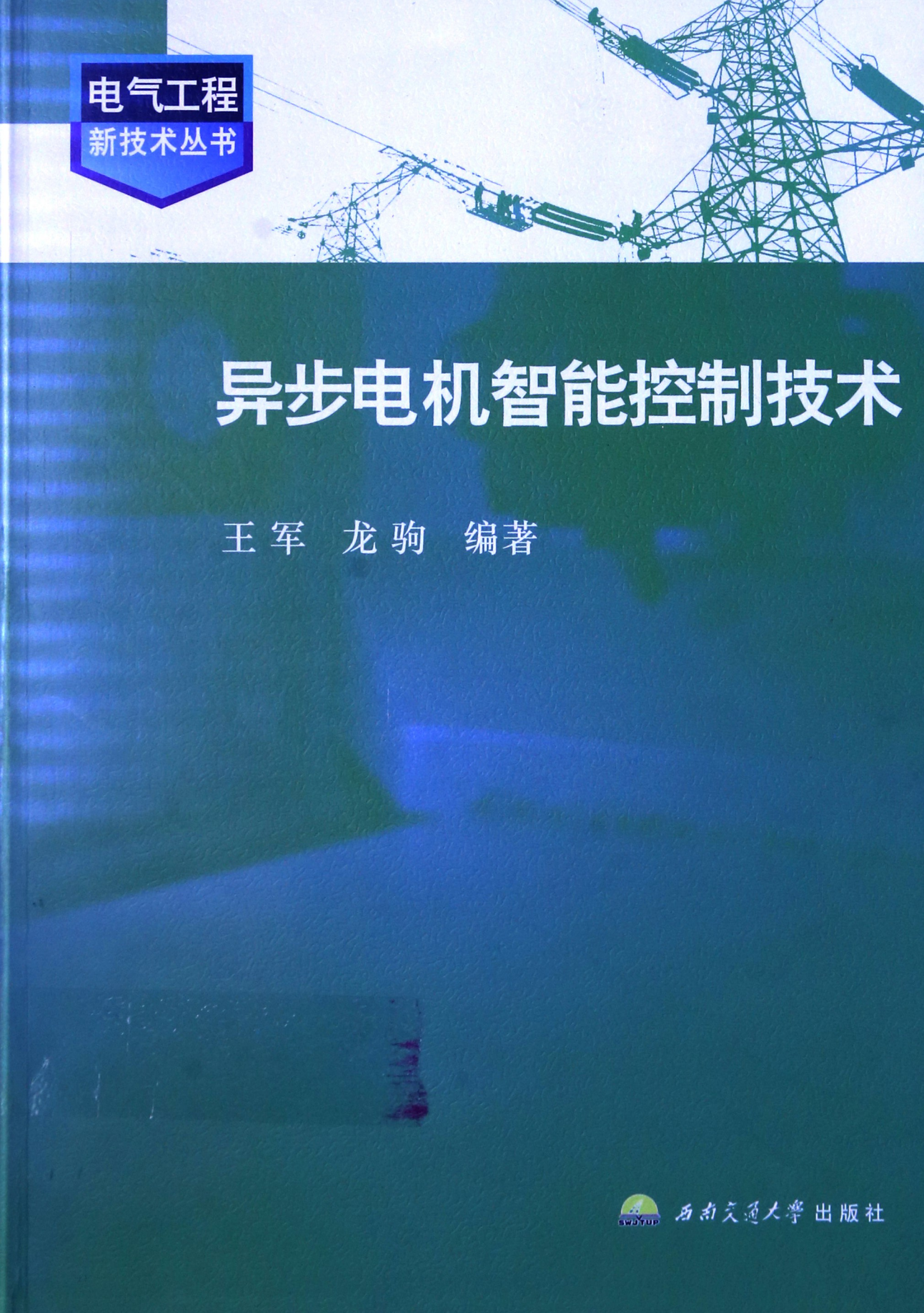




电气工程
新技术丛书

异步电机智能控制技术

王军 龙驹 编著



西南交通大学出版社

电气工程
新技术丛书

异步电机智能控制技术

YIBU DIANJI ZHINENG KONGZHI JISHU

王军 龙驹 编著

西南交通大学出版社

• 成都 •

图书在版编目 (C I P) 数据

异步电机智能控制技术 / 王军, 龙驹编著. —成都:
西南交通大学出版社, 2014.11

(电气工程新技术丛书)

ISBN 978-7-5643-3515-1

I. ①异… II. ①王… ②龙… III. ①异步电机-智
能控制 IV. ①TM343

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第251585号

电气工程新技术丛书
异步电机智能控制技术
王 军 龙 驹 编著

责任编辑	黄淑文
助理编辑	宋彦博
封面设计	米迦设计工作室
出版发行	西南交通大学出版社 (四川省成都市金牛区交大路146号)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	成都中铁三局永经堂印务有限责任公司
成品尺寸	170 mm × 230 mm
印 张	13.25
字 数	232千字
版 次	2014年11月第1版
印 次	2014年11月第1次
书 号	ISBN 978-7-5643-3515-1
定 价	36.00元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

异步电机变频调速系统由于具有节能、控制性能好、效率高等优点，已广泛应用于各种场合。特别是近十年来，随着电力电子技术、微型计算机技术和控制理论的发展，以矢量控制技术和直接转矩技术为核心的脉冲宽度调制（Pulse Width Modulation, PWM）变频调速技术，使交流电机在调速范围、调速精度、动态性能等方面发生了实质性的飞跃，形成了先进传动控制技术的发展主流，并且在需要高性能调速的现代高性能数控机床、机器人和电动汽车等各个领域得到了广泛应用。同时，人们对调速系统提出了精度更高和控制性能更好的要求，即要求其具有快速性好、无超调、无静差和抗干扰能力强等优点。然而由于异步电机控制系统本质上是非线性、强耦合和时变系统，当模型不确定性超过传统线性最优鲁棒控制所容许的范围时，控制系统就变得不稳定，因此难以满足现代控制系统要求。

有许多复杂的系统是无法用传统方法进行描述的，特别是大多数非线性的动态时变系统，还不能建立有效的数学模型。为此，从操作者和专家控制的实践中得到启发，人们提出了人工智能控制技术，包括专家系统、模糊逻辑、人工神经网络（Artificial Neural Network, ANN）和遗传算法（Genetic Algorithm, GA）等。因此，研究基于先进智能控制的异步电机控制策略势在必行。

本书正是这一背景下的研究成果。全书共分为 6 章：第 1 章重点介绍了异步电机在静止和旋转坐标系下的数学模型；第 2 章重点介绍了转子磁场矢量控制和定子磁场矢量控制技术；第 3 章介绍了直接转矩控制原理及其控制系统；第 4 章在阐述异步电机的几种模糊控制技术的基础上，介绍了 ANN 控制技术在异步电机中的应用，同时阐述了基于滑模变结构控制的异步电机矢量控制系统；第 5 章首先介绍了基于扩展卡尔曼滤波器（Extended Kalman Filter, EKF）和基于改进模型参考自适应（Model Reference Adaptive System, MRAS）方法的异步电机无速度传感器，接着重点介绍了基于 ANN 的速度估计和几种电机参数估计方法，同时介绍了几种用于电机参数估计技术的智能

优化算法;第6章介绍了基于数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)的数字化控制系统。

本书由西华大学王军教授和龙驹副教授共同撰写。其中,第2章的2.4节,第3章,第4章,第5章的5.1、5.2、5.3、5.4.1节和第6章由王军教授撰写;第1章,第2章的2.1、2.2、2.3、2.5和2.6节,第5章的5.4.2节由龙驹副教授撰写。全书的统稿工作由王军教授完成。在撰写过程中,孙章老师和李虹、涂敏、陈科、白波、唐静等研究生参与了部分图表的绘制和文字录入工作。

本书的一部分内容来自我们十多年来在该领域的研究成果,在此感谢曾经在本实验室学习、现已毕业并分布在全国的研究生,他们是:黄艺、郭忠林、武卯泉、丁传东、丁仕光、杨文方、宋志强、李建坤、车畅和王桂娟。同时,本书的出版也得到了相关项目基金的支持,包括四川省教育厅科技创新重大培育项目基金(基金号:12ZZ007)和四川省科技厅支撑计划项目(项目编号:2013GZ0130),在此一并表示感谢。

由于作者学术水平有限,在电机智能控制系统方法和实验方法方面还有很多没有涉及,同时书中也可能存在不妥的地方,请大家给予批评和指正。

王 军

2014年8月于四川成都

主要缩略语及变量说明

一、缩略语

IGBT	绝缘栅双极性晶体管
DTC	直接转矩控制
ASR	转速调节器
AΨR	转子磁链调节器
AVR	电压调节器
ATR	转矩调节器
ACMR	定子电流励磁分量调节器
ACTR	定子电流转矩分量调节器
EKF	扩展的卡尔曼滤波器
SVPWM	空间矢量脉冲宽度调制
MRAS	模型参考自适应系统
ANN	人工神经网络
DRNN	对角递归网络
VSC	变结构控制
GA	遗传算法
PSO	粒子群算法

二、变 量

$C_{3s/2s}$, $C_{2s/3s}$	分别为从静止三相坐标系变换到静止两相坐标系的变换矩阵和其逆矩阵
$C_{2s/2r}$, $C_{2r/2s}$	分别为从静止两相坐标系变换到旋转两相坐标系的变换矩阵和其逆矩阵
$C_{3s/2r}$, $C_{2r/3s}$	分别为从静止三相坐标系变换到旋转两相坐标系的变换矩阵和其逆矩阵
p	微分算子

p_n	旋转磁场的磁极对数
f_s	定子输入电源的频率
n_0, ω_s	分别为同步转速和同步旋转角转速
ω_l	任意旋转坐标系下旋转角转速
θ_r, θ_m	分别为转子电角度和转子机械角位移
n_r, ω_r	分别为转子速度和角转速
θ_l	任意两相旋转坐标系 M 轴与静止坐标系 α 轴的夹角
ω_{sl}	转差
P_N, U_N, I_N, f_N	分别为额定功率、额定电压、额定电流、额定频率
u_s, u_r	分别为定子绕组和转子绕组相电压
u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}	分别为定子绕组在 a, b, c 三相的电压分量
u_{ra}, u_{rb}, u_{rc}	分别为电机转子绕组在 a, b, c 三相的电压分量
u_{sa}, u_{sM}, u_{sd}	分别为定子绕组在 α 轴、M 轴、d 轴的电压分量
$u_{s\beta}, u_{sT}, u_{sq}$	分别为定子绕组在 β 轴、T 轴、q 轴的电压分量
u_{ra}, u_{rM}, u_{rd}	分别为转子绕组在 α 轴、M 轴、d 轴的电压分量
$u_{r\beta}, u_{rT}, u_{rq}$	分别为转子绕组在 β 轴、T 轴、q 轴的电压分量
u_{abc}^*, u_{abc}	分别为三相参考电压和三相实际电压
$u_{sa}^*, u_{s\beta}^*$	分别为静止两相坐标系定子电压给定值的 α 轴、 β 轴分量
R_s, R_r	分别为定子绕组和转子绕组一相电阻
i_s, i_r	分别为定子绕组和转子绕组相电流
i_M, i_T	分别为定子绕组在 M 轴和 T 轴的电流
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	分别为定子绕组在 a, b, c 三相的电流分量
i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}	分别为转子绕组在 a, b, c 三相的电流分量
i_{sa}, i_{sM}, i_{sd}	分别为定子绕组在 α 轴、M 轴、d 轴的电流分量
$i_{s\beta}, i_{sT}, i_{sq}$	分别为定子绕组在 β 轴、T 轴、q 轴的电流分量
i_{ra}, i_{rM}, i_{rd}	分别为转子绕组在 α 轴、M 轴、d 轴的电流分量
$i_{r\beta}, i_{rT}, i_{rq}$	分别为转子绕组在 β 轴、T 轴、q 轴的电流分量
i_{sM}^*, i_{sT}^*	分别为给定的定子电流 M 轴和 T 轴分量
i_{abc}^*, i_{abc}	分别为三相参考电流和三相实际电流
ψ	磁链矩阵
ψ_s, ψ_r	分别为定子绕组磁链和转子绕组磁链

$\psi_{s\alpha}, \psi_{sM}, \psi_{sd}$	分别为定子磁链在 α 轴、M轴、d轴的分量
$\psi_{s\beta}, \psi_{sT}, \psi_{sq}$	分别为定子磁链在 β 轴、T轴、q轴的分量
$\psi_{r\alpha}, \psi_{rM}, \psi_{rd}$	分别为转子磁链在 α 轴、M轴、d轴的分量
$\psi_{r\beta}, \psi_{rT}, \psi_{rq}$	分别为转子磁链在 β 轴、T轴、q轴的分量
ψ_Q	磁链调节信号
L	电感矩阵
L_s, L_r, L_m	分别为定子、转子的每相自电感和定子每相励磁电感
$L_{s\sigma}, L_{r\sigma}$	分别为定子漏感和转子漏感
T_e	电磁转矩
T_e^*	转矩给定值
T_L	负载阻转矩
T_Q	转矩控制信号
J	机电系统转动惯量
B	阻转矩阻尼系数
K	扭转弹性转矩系数
N_3, N_2	分别为三相绕组和两相绕组每相的有效匝数
F_s, F_r, F_Σ	定子、转子和气隙合成磁动势矢量的幅值
σ	电机漏磁系数
T_r	转子电磁时间常数
δ_{sr}	负载角, 即定子磁链和转子磁链的夹角
θ_s	旋转坐标系 M 轴 (或 d 轴) 与静止坐标系 A 轴 (或 d 轴) 的夹角
θ_{sr}	定子、转子磁动势矢量之间的夹角
S_N	定子磁链所在的区间信号
ε_m	磁链容差
ε_T	转矩容差
$e_\omega(k)$	k 时刻速度误差信号
$T_e^*(k)$	离散系统 k 时刻给定的转矩
$\omega_r(k)$	k 时刻转子实际速度
$\omega_r^*(k)$	k 时刻转子给定速度
$f(\cdot)$	激活函数

$S_j(k)$	隐层输入
$Z_j(k)$	隐层输出
W_{ji}^h	输入层至隐层的连接权
W_j^o	隐层至输出层的连接权
W_{ji}^d	递归神经元连接权
$Z_j(k)$	隐层第 j 个节点输出
ε_ω	误差信息
T_s	采样周期
η	学习速率
W_{ij}	节点 i 与节点 j 之间的权值

目 录

1 三相异步电机数学模型	1
1.1 三相异步电机的结构与转动原理	1
1.2 在静止三相坐标系中的动态数学模型	3
1.3 在两相坐标系中的动态数学模型	10
参考文献	21
2 三相异步电机矢量控制的调速系统	22
2.1 转子磁场定向矢量控制	23
2.2 磁链观测器和转矩估计	32
2.3 定子磁场定向矢量控制	42
2.4 气隙磁场定向控制	46
2.5 矢量控制系统的仿真	47
2.6 本章小结	54
参考文献	55
3 三相异步电机直接转矩控制	56
3.1 直接转矩控制原理	56
3.2 直接转矩控制系统	58
3.3 直接转矩控制系统的仿真	69
3.4 改善直接转矩控制性能的措施	76
3.5 本章小结	88
参考文献	88
4 三相异步电机智能控制的调速系统	93
4.1 异步电机的模糊控制	94
4.2 异步电机的神经网络控制	118
4.3 基于滑模变结构技术的矢量控制系统	132
4.4 本章小结	140
参考文献	140

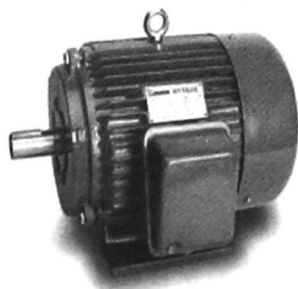
5 三相异步电机无速度传感器控制与智能控制技术	145
5.1 基于扩展卡尔曼滤波器的速度估计	145
5.2 基于改进模型参考自适应的速度估计	152
5.3 神经网络技术在速度和参数辨识中的应用	163
5.4 遗传算法和粒子群算法在电机参数辨识中的应用	172
5.5 本章小结	179
参考文献	179
6 基于DSP的数字化控制系统	184
6.1 交流电机控制系统的硬件结构	184
6.2 控制软件设计	191
6.3 实验结果	200
参考文献	201

1 三相异步电机数学模型

1.1 三相异步电机的结构与转动原理

1.1.1 三相异步电机的结构

三相异步电机主要由定子和转子两部分组成，其中定子是固定不动的部件，而转子是可以旋转的部件。为了让转子可以顺利地旋转，其与定子之间必须留有大约 1 mm 的空隙。以常用的三相鼠笼式异步电机为例，其结构示意图如图 1.1 所示，对应的结构描述如表 1.1 所示。



(a) 三相异步电机外形图



(b) 三相异步电机主要部件拆分图

图 1.1 三相异步电机结构示意图

表 1.1 三相异步电机结构描述

部 件		描 述
定子	定子铁心	由互相绝缘的硅钢片叠成，其内圆周上有均匀分布的槽，用于嵌放定子三相绕组
	定子绕组	以星形或三角形两种形式将定子绕组嵌放在定子铁心槽里
	机座	用于固定铁心和绕组
转子	转子铁心	由互相绝缘的硅钢片叠成，其外圆周上有均匀分布的槽，用于嵌放转子三相绕组
	转子绕组	有鼠笼式和绕线式两种绕组形式
	转轴	用于拖动机械负载

1.1.2 三相异步电机的转动原理

图 1.2 所示是三相异步电机剖面图，其转动原理可用图 1.3 所示流程图描述。旋转磁场的转速（又叫同步转速）为

$$n_0 = \frac{60f_s}{p_n} \text{ (r/min)} \tag{1.1}$$

式中， f_s 为流入定子绕组中交流电流的频率（Hz）； p_n 为旋转磁场的磁极对数。

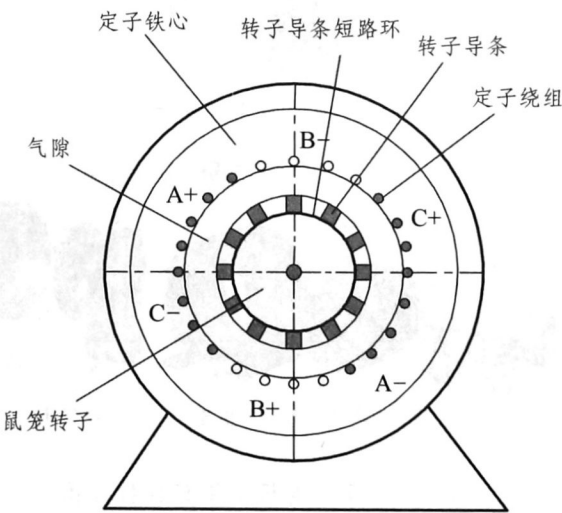


图 1.2 三相异步电机剖面图

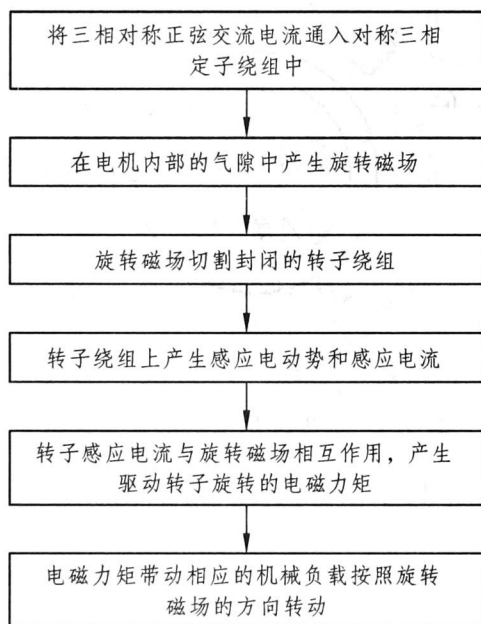


图 1.3 三相异步电机转动原理

1.2 在静止三相坐标系中的动态数学模型

三相异步电机的物理模型如图 1.4 所示，图中 ω_s 为同步旋转角转速， ω_r 为电机转子角转速， θ_r 为转子角位移（电角度）。为了描述电机的数学模型，现作如下假设：① 忽略电机定转子的铁心损耗；② 忽略电机磁路饱和因素；③ 忽略磁动势的谐波成分。在此假设条件下，异步电机的动态数学模型可用电压方程、磁链方程、转矩方程和运动方程四组方程加以描述。

1.2.1 电压方程

电压方程包括定子三相绕组和转子三相绕组的电压方程。定子三相绕组的电压方程为

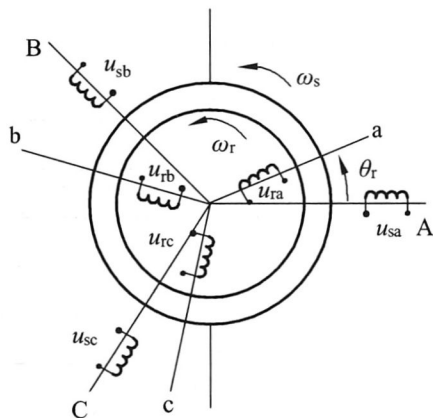


图 1.4 三相异步电机的物理模型

$$\begin{cases} u_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d\psi_{sa}}{dt} \\ u_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d\psi_{sb}}{dt} \\ u_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d\psi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (1.2)$$

转子三相绕组的电压方程（折算到定子三相绕组的方程）为

$$\begin{cases} u_{ra} = R_r i_{ra} + \frac{d\psi_{ra}}{dt} \\ u_{rb} = R_r i_{rb} + \frac{d\psi_{rb}}{dt} \\ u_{rc} = R_r i_{rc} + \frac{d\psi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad (1.3)$$

式中，下标 s 代表定子分量，下标 r 代表转子分量； u_{sa} 、 u_{sb} 、 u_{sc} 分别表示定子三相绕组电压， u_{ra} 、 u_{rb} 、 u_{rc} 分别表示转子三相绕组电压； i_{sa} 、 i_{sb} 、 i_{sc} 分别表示定子三相电流， i_{ra} 、 i_{rb} 、 i_{rc} 分别表示转子三相电流； ψ_{sa} 、 ψ_{sb} 、 ψ_{sc} 分别表示定子三相磁链， ψ_{ra} 、 ψ_{rb} 、 ψ_{rc} 分别表示转子三相磁链； R_s 代表定子一相绕组电阻， R_r 代表转子一相绕组电阻。

将以上两组方程合并为矩阵形式的方程为

$$\begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \\ u_{ra} \\ u_{rb} \\ u_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d\psi_{sa}}{dt} \\ \frac{d\psi_{sb}}{dt} \\ \frac{d\psi_{sc}}{dt} \\ \frac{d\psi_{ra}}{dt} \\ \frac{d\psi_{rb}}{dt} \\ \frac{d\psi_{rc}}{dt} \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

或写成

$$u = Ri + \frac{d\psi}{dt} \quad (1.5)$$

1.2.2 磁链方程

三相异步电机定子和转子共计 6 套绕组，每套绕组所交链的全部磁链都由两部分组成：自感磁链和互感磁链。所以，磁链方程用 6 阶矩阵方程描述：

$$\begin{bmatrix} \psi_{sa} \\ \psi_{sb} \\ \psi_{sc} \\ \psi_{ra} \\ \psi_{rb} \\ \psi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} & L_{Aa} & L_{Ab} & L_{Ac} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} & L_{Ba} & L_{Bb} & L_{Bc} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} & L_{Ca} & L_{Cb} & L_{Cc} \\ L_{aA} & L_{aB} & L_{aC} & L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{bA} & L_{bB} & L_{bC} & L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{cA} & L_{cB} & L_{cC} & L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

或写成

$$\psi = Li \quad (1.7)$$

式中， L 是电感矩阵，矩阵中对角线元素都代表自感； L_{AA} 、 L_{BB} 、 L_{CC} 代表定子自感， L_{aa} 、 L_{bb} 、 L_{cc} 代表转子自感，其余各项元素分别是定子和转子绕组的互感。

下面将分别分析自感与互感的数学表达式。

1. 自 感

每一相定子和转子绕组所交链的磁通都包括两部分：励磁磁通与漏感磁通。从磁通量的大小上看，励磁磁通占主导地位。由于三相定、转子绕组结构上具有对称性，且定、转子绕组折算前后的匝数相等，同时具有气隙均匀的特点，所以定、转子各相的励磁电感相等，记为 L_m 。定、转子各相绕组的自感分别为

$$L_{AA} = L_{BB} = L_{CC} = L_m + L_{s\sigma} = L_s \quad (1.8)$$

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L_m + L_{r\sigma} = L_r \quad (1.9)$$

式中， $L_{s\sigma}$ 代表定子漏感， $L_{r\sigma}$ 代表转子漏感。

2. 互 感

三相异步电机绕组中的任意两相之间都有互感存在。其互感可分成两种：

(1) 三相定子（转子）绕组之间的互感

三相定子（转子）绕组相互之间的空间位置都是固定的，三相绕组轴线在空间中的相位差是 $\pm 120^\circ$ ，故其互感为常数，所以有

$$\begin{cases} L_{AB} = L_{BC} = L_{CA} = L_{BA} = L_{CB} = L_{AC} = L_m \cos 120^\circ = -\frac{1}{2} L_m \\ L_{ab} = L_{bc} = L_{ca} = L_{ba} = L_{cb} = L_{ac} = L_m \cos 120^\circ = -\frac{1}{2} L_m \end{cases} \quad (1.10)$$

(2) 任一相定子绕组与转子绕组之间的互感

任一相定子绕组与转子绕组相互之间的空间位置是变化的，当忽略气隙磁场的空间高次谐波时，则可以近似认为定、转子绕组之间的互感是转子角位移 θ_r 的函数，可分别表示为

$$\begin{cases} L_{Aa} = L_{aA} = L_{Bb} = L_{bB} = L_{Cc} = L_{cC} = L_m \cos \theta_r \\ L_{Ab} = L_{bA} = L_{Bc} = L_{cB} = L_{Ca} = L_{aC} = L_m \cos(\theta_r + 120^\circ) \\ L_{Ac} = L_{cA} = L_{Ba} = L_{aB} = L_{Cb} = L_{bC} = L_m \cos(\theta_r - 120^\circ) \end{cases} \quad (1.11)$$

当每相对应的定、转子两相绕组的轴线重合时，两者之间的互感可达最大值 L_m 。