前 言

电动机具有使用和控制方便、工作效率高等一系列优点，在工农业生产、交通运输、国防、商业及家用电器、医疗电器设备等各方面应用广泛。尤其，三相交流异步电动机具有结构简单、运行可靠、价格便宜等优点，受到动力设备用户的广泛青睐。19 世纪 70 年代，德国学者 Blaschke 提出的交流电动机矢量控制 (vector control, VC) 理论对交流电动机控制技术的研究具有划时代的意义，使得交流电机变频调速控制性能完全达到了直流调速控制性能相媲美的程度，具有了取代直流调速的明显趋势。20 世纪 80 年代，德国学者 Depenbrock 提出了直接转矩控制 (direct torque control, DTC) 理论，交流电动机控制系统结构得以大大简化，系统鲁棒性与快速响应能力显著提高。交流电动机高性能控制理论的出现给三相异步电动机现代控制技术的研究带来机遇与挑战。目前，矢量控制和直接转矩控制向无传感器控制方向发展，尽管已取得很多成果，但是为了加大和拓宽无传感器控制技术的应用，还有许多理论和技术问题亟待解决。

目前，尚未见到有关三相异步电动机状态估计、参数辨识与现代控制的系统研究专著。为此，我将自己十年来在三相异步电动机状态估计、参数辨识与现代控制等方面取得的研究成果整理成书，期盼对我国电机控制理论与技术发展起到一定的推动作用。本书的创新性研究工作总结如下：

(1) 为了实现三相异步电动机既能高效又能保证具有自适应能力的高动态特性运行，提出了一套完善的定子磁链与电磁转矩的逆解耦控制理论。

首先，从异步电动机的机理模型及其固有电磁特性出发，证明了定子磁链与电磁转矩的逆模型在全局工作范围内的存在性。在此基础上，实现了电磁转矩与定子磁链的动态解耦控制，这为轻载弱磁减少铁心损耗、重载磁场接近饱和充分利用铁心的高效运行及电磁转矩高动态特性控制提供理论基础。

然后，为了解决检测噪声、电机参数随着运行工况变化对逆模型精度的影响，充分利用神经网络非线性映射能力、泛化能力及容错能力，对神经网络异步电动机逆模型进行了深入研究，并提出了将反向传播 (back propagation, BP) 神经网络、状态重构与矩阵求逆模型相结合的神经网络逆解耦控制方法。

接着，将非线性状态反馈的解析方法与具有对未知非线性系统逼近能力的神经网络方法结合，构造适合工程应用的基于 BP 神经网络补偿的逆模型，运用主元分析法 (principal components analysis, PCA) 对 BP 神经网络输入数据样本进行预处理，降低了神经网络的输入维数，简化了网络的结构，提高了 BP 神经网络

络输出精度与泛化能力。主元分析法得到的新变量为原变量的加权平均，具有滤波作用，可以大大提高系统的抗干扰能力。

最后，针对定转子电阻参数时变性是影响逆模型建模精度及逆解耦控制性能的关键，设计了基于模型参考自适应系统的定转子电阻变化量估计器，并在此基础上提出了一个基于定转子电阻误差补偿的三相异步电动机自适应逆解耦控制方法。

(2) 针对基于逆模型的逆解耦控制及矢量控制方法过分依赖于电机参数的问题，提出一套滑模变结构控制、基于参考模型的神经网络自适应控制与逆解耦控制及矢量控制相融合控制理论。

首先，本书证明了定子磁链与电磁转矩的滑模变结构控制律的存在性，并设计了三相异步电动机的直接滑模变结构控制器。在滑模控制过程中定子磁链与电磁转矩对电机参数及干扰具有完全鲁棒性，然而在李雅普诺夫稳定意义下设计的滑模变结构控制律增益参数过大，又带来较大转矩与定子磁链的抖振问题。为了保证定子磁链的平滑性与稳定性，提出基于逆解耦的滑模变结构控制理论，在定子磁链与电磁转矩逆解耦控制的基础上，定子磁链外环采用传统的比例、积分、微分 (proportional-integral-derivative, PID) 控制，电磁转矩外环采用滑模变结构控制，实现了定子磁链与电磁转矩的解耦控制、定子磁链的平滑特性，并增强了转速 (转矩) 控制的鲁棒性，大大提高了稳态及动态性能。在定子磁链定向的矢量控制基础上，提出了比例、积分 (proportional-integral, PI) 与滑模变结构混合自适应控制方法，充分发挥 PID 控制与滑模变结构控制的优点，增强了定子磁链与电磁转矩控制的鲁棒性与快速性，同时保证了定子磁链与电磁转矩稳定运行的平滑性。

最后，在定子磁链磁场定向矢量控制的基础上，提出了基于参考模型的神经网络自适应控制策略，提高了系统自适应与学习能力。

(3) 定子磁链的估计方法一直是三相异步电动机高性能控制的关键，在基于 U-I 模型的基础上，提出了基于非线性跟踪-微分器的定子磁链状态观测理论。

基于 U-I 模型的定子磁链估计方法中含有开环纯积分环节，在实际应用中往往会带来直流偏置与积分饱和问题。首先，利用跟踪-微分器提取定子电流的角频率信息，提出了一种基于定子电流信息的可编程级联低通滤波器补偿方案。其次，在此基础上，提出了改进的 U-I 模型的定子磁链观测器。该方法可以抑制量测噪声的积累，能够适用于具有某些不确定性扰动的系统。

(4) 基于模型的三相异步电动机高性能控制方法依赖于电机参数的精度，尤其定、转子电阻随着温升而变化直接影响基于定子磁链或转子磁链定向的矢量控制性能，提出了一套定子、转子参数估计理论。

在传统的异步电动机定子电阻参数辨识方法的基础上，融合跟踪-微分器与最小二乘技术，提出了一种既可以消除电力开关器件通态压降影响，又可以解决高

频谐波干扰问题的定子电阻离线辨识方法。本方法不仅为变频器提供必要的参数，而且为在线辨识提供精确的初值，进一步提高了整个交流调速系统的性能。针对定、转子电阻参数的时变性问题，本书提出了基于波波夫 (Popov) 超稳定理论的参考模型自适应估计系统，设计了定子电阻、转子电阻、电机转速的自适应律，仿真验证了独立辨识时可以获得较高的估计精度，而多参数同时辨识时由于相互耦合影响导致估计性能下降，最后提出了各自的补偿方案。

(5) 为了实现泵机组流量和扬程的控制，以发挥泵类负载节能潜力，提出一套泵机组状态估计理论。

首先本书提供了一种管路特性方程参数的测量方法，然后提供一种利用测定的管道特性方程和某一转速下泵扬程-流量 ($H-Q$) 特性方程来在线测量运行工况的方法，也就是已知某一工况的电机转速，就可以测量出泵的扬程与流量；或者是已知某一工况的流量，就可以测量出电机转速。针对轴流泵的动力学系统，将其分为管路动态特性和流体驱动动态特性部分（每个部分都是一个非线性子系统，同时两个子系统之间存在耦合关系），利用流体力学、传动力学、电机学及泵的相似定律等相关理论和定理建立了轴流泵系统的动力学模型；其中，泵的扬程与流量模型是基于泵外特性建立的，即采用基于 k -均值聚类算法的径向基函数 (radial basis function, RBF) 神经网络方法对采集到的运行数据进行了建模。另外，针对离心式水泵系统具有严重的非线性，泵特性参数及管道特性参数很难准确获得的问题，在实际应用过程中又存在随机噪声干扰的问题，提出基于双神经网络的泵系统模型，可以大大提高建模精度、神经网络的收敛速度及泛化能力。

全书承蒙我的导师大连理工大学邵诚教授审稿，并提出很多宝贵意见，在此表示深切的谢意。

由于交流电动机控制领域还在发展中，加之本人水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请各位读者不吝指正。

作 者

2016年10月于渤海大学

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 磁链与转矩控制	2
1.1.1 基于 Bang-Bang 控制的改善方法	3
1.1.2 基于空间矢量调制控制的改善方法	4
1.2 磁链与转矩状态观测器	6
1.2.1 低通滤波器的补偿方法	7
1.2.2 非线性闭环观测器	8
1.3 电机参数辨识	8
1.3.1 参考模型自适应系统	9
1.3.2 人工智能技术	10
1.3.3 其他定子电阻估计方法	10
1.4 无速度传感器技术	10
1.4.1 基于状态方程的转速直接计算方法	11
1.4.2 参考模型自适应方法的转速辨识方法	13
1.4.3 基于闭环观测器的转速辨识方法	14
1.4.4 不依赖于电机模型的转速估计方法	14
2 三相异步电动机直接转矩控制技术	16
2.1 直接转矩控制原理	16
2.1.1 动态数学模型及转矩控制原理	16
2.1.2 电压空间矢量与逆变器开关状态的关系	17
2.2 基于六边形磁链轨迹的直接转矩控制	19
2.3 基于圆形磁链轨迹的直接转矩控制	20
2.4 本章小结	22
3 三相异步电动机的矢量控制技术	24
3.1 三相异步电动机的动态数学模型	24
3.1.1 三相异步电动机在静止坐标系下的数学模型	25

3.1.2	坐标变换和变换矩阵	28
3.1.3	三相异步电动机在两相静止坐标系下的数学模型	30
3.1.4	三相异步电动机在两相同步旋转坐标系下的数学模型	31
3.1.5	三相异步电动机在按转子磁场定向旋转坐标系下的数学模型	32
3.2	矢量控制原理	33
3.2.1	矢量控制技术思想	33
3.2.2	矢量控制基本方程式	33
3.2.3	三相异步电动机按转子磁链定向的矢量控制系统	34
3.3	电压空间矢量脉宽调制技术	35
3.3.1	SVPWM 的基本原理	36
3.3.2	SVPWM 的控制算法	38
3.4	本章小结	40
4	逆解耦控制	41
4.1	引言	41
4.2	三相异步电动机逆解耦控制	42
4.2.1	三相异步电动机调速系统的动态数学模型	42
4.2.2	三相异步电动机逆模型的存在性	43
4.2.3	电磁转矩与定子磁链的解耦控制	45
4.2.4	解耦线性化系统的综合设计	46
4.2.5	仿真实验	46
4.3	基于 BP 神经网络的异步电动机逆模型	48
4.3.1	基于神经网络的逆模型原理	48
4.3.2	神经网络的 BP 算法	49
4.3.3	仿真结果	50
4.4	基于 BP 神经网络的逆解耦控制	52
4.4.1	控制系统结构框图	52
4.4.2	转矩与磁链控制设计	54
4.4.3	仿真结果	54
4.5	基于 PCA-BP 神经网络逆模型补偿的逆解耦控制	56
4.5.1	逆模型的补偿原理	56
4.5.2	控制系统结构框图	57
4.5.3	基于 PCA-BP 神经网络补偿器设计	57
4.5.4	仿真结果	60
4.6	基于定转子电阻误差补偿的三相异步电动机自适应逆解耦控制	64
4.6.1	基于 MRAS 的定转子电阻变化量估计原理	64

4.6.2	自适应逆解耦复合控制系统	70
4.6.3	仿真实验	71
4.6.4	结论	72
5	三相异步电动机滑模变结构与智能控制理论	73
5.1	引言	73
5.2	直接滑模变结构控制研究	74
5.2.1	三相异步电动机调速系统的动态数学模型	74
5.2.2	滑模变解耦控制器设计	74
5.2.3	仿真实验	77
5.2.4	结论	81
5.3	基于逆解耦的滑模变结构控制研究	81
5.3.1	基于逆解耦的伺服驱动系统模型	81
5.3.2	滑模变结构控制器	82
5.3.3	系统仿真与分析	85
5.3.4	结论	91
5.4	基于矢量控制的滑模变结构控制研究	92
5.4.1	基于空间矢量调制模块的总体框架	92
5.4.2	定子磁链定向的三相异步电动机数学模型	93
5.4.3	基于矢量控制的滑模变结构设计	94
5.4.4	抖振问题	99
5.4.5	混合滑模变结构控制器的设计	100
5.4.6	仿真结果	101
5.5	基于定子磁链定向的三相异步电动机位置伺服控制	102
5.5.1	三相异步电动机伺服系统的模型描述	103
5.5.2	基于递归型神经网络的自适应控制	103
5.5.3	仿真实验结果	107
5.5.4	本章小结	108
6	三相异步电动机定子磁链的状态估计	109
6.1	定子磁链矢量定向原理	109
6.2	定子磁链估计器数学模型	110
6.2.1	定子磁链的 U-I 模型	110
6.2.2	定子磁链的 I-N 模型	111
6.2.3	定子磁链的 U-N 模型	112
6.3	低通滤波器对定子磁链估计的影响	113

6.4	可编程级联低通滤波器补偿	114
6.4.1	补偿原理	114
6.4.2	非线性跟踪-微分器	115
6.4.3	基于可编程级联低通滤波器的定子磁链估计补偿方案	117
6.5	仿真结果	117
6.6	本章小结	118
7	三相异步电动机参数辨识	119
7.1	定子电阻参数的变化对定子磁链估计的影响	119
7.2	定子电阻参数离线辨识方法	123
7.2.1	基于直流实验法的定子电阻辨识	124
7.2.2	新型定子电阻辨识方法	128
7.2.3	仿真研究	129
7.3	基于 MRAS 的电机参数辨识	133
7.3.1	观测器模型的建立	133
7.3.2	基于 MRAS 的辨识系统设计	134
7.3.3	三相异步电动机参数辨识的仿真	138
8	泵机组的状态估计理论	142
8.1	泵机组运行工况的估计方法	143
8.1.1	背景技术	143
8.1.2	泵机组运行工况的估计原理	143
8.1.3	技术方案	145
8.1.4	实施效果	146
8.2	轴流泵供水系统状态估计与控制	147
8.2.1	轴流泵供水系统整体模型	148
8.2.2	泵的扬程-流量特性	149
8.2.3	基于聚类法的学习算法	150
8.2.4	管路系统特性	152
8.2.5	异步电动机电磁转矩特性	152
8.2.6	泵的负载转矩特性	153
8.2.7	仿真研究	153
8.3	基于双神经网络的离心式水泵供水系统状态估计	158
8.3.1	泵的特性方程	158
8.3.2	泵系统的数学模型描述	160
8.3.3	基于双神经网络的泵系统建模	161

8.3.4 仿真验证	162
参考文献	166
附录 A 电压空间矢量调制的法则	178
附录 B 定子电压与定子电流计算	182
附录 C 基于 M/T 法的测速原理	183
附录 D 空间矢量理论	185
D.1 定子、转子磁通势空间矢量	185
D.2 定子、转子电流空间矢量	187
D.3 定子、转子电压空间矢量	188
D.4 定子、转子磁链空间矢量	189
D.5 定子、转子磁链空间矢量方程	190
D.6 定子、转子电压空间矢量方程	191
D.7 电磁转矩矢量方程	193
附录 E 定子、转子电感与稳态 T 型等效电路中各电抗关系	194
附录 F 基于李雅普诺夫的稳定性定理	195
附录 G 连续线性定常系统的正实性	198
G.1 复变量的正实函数（矩阵）	198
G.1.1 复变量函数的正实性定义	198
G.1.2 复变量函数矩阵的正实性定义	199
G.2 连续线性定常系统正性基本定理	200
附录 H 超稳定性理论	202
H.1 超稳定性问题的提出	202
H.2 超稳定性的定义	203
H.3 超稳定性的基本定理	203
附录 I 逆系统理论基础	205

1 绪 论

随着 20 世纪 70 年代的石油危机接连不断地席卷全球，能源短缺一直是经济和社会发展的瓶颈。电机是风机、泵、压缩机、机床、传输带等各种设备的驱动装置，广泛应用于冶金、石化、化工、煤炭、建材、公用设施等多个行业和领域，是用电量最大的耗电机械。电机耗电占全社会总用电量的 64%，其中工业领域电机总用电量占工业用电量的 75%。工业领域电机能效每提高 1 个百分点，可年节约用电 260 亿 kW·h 左右。目前我国电动机的装机容量在 12 亿 kW 左右，预计到 2020 年，发电机装机容量达到人均 1kW（美国目前人均 3kW），而我国电动机的装机容量将达到 45 亿 kW 左右。我国经济的高速增长很大程度上依赖于能源的高消耗，就以单位产值的电耗来说，我国的单位产值电耗是美国的 3 倍、日本的 5 倍。在 20 世纪的大部分时间里，直流电机的励磁回路与电枢回路各自独立且具有优越的调速性能，高性能可调速传动一般采用直流电动机；而交流电机的定子回路与转子回路之间强耦合且具有多变量、非线性的特点，调速难度大，长期以来仅被限制在恒速传动领域，这种按调速的分工在当时已经为人们所公认。直到 20 世纪 70~80 年代，电力电子技术、计算机技术、变频调速技术迅速发展，开辟了交流电气传动的新纪元。由于交流电机具有直流电机所无法媲美的优点，如结构简单、成本低、安全可靠、维修方便等，交流电气传动逐步取代直流电气传动已是不争的事实。美国已经通过变频调速技术，使电机系统节电 606 亿 kW·h/a，占全年电机能耗的 10.5%。变频调速技术无疑是运动控制系统节能措施的有力手段，欧美、日本等工业发达地区和国家早已投入了大量人力、财力研究高性能的变频调速技术。因此，大力研究和开发交流变频调速技术必将是我国制定“电机系统节能计划”的主要方向。另外，从提高生产工艺技术、现代化装备的自动化水平、劳动生产率、产品质量、降低成本等方面来说，研制一种经济实用的高性能交流变频调速系统作为生产设备的动力源具有重要现实意义。

目前，矢量控制和直接转矩控制在交流电机高性能变频调速领域得到了广泛应用。这两种控制方案都是基于动态模型的控制策略，是已经被人们所公认的高性能交流变频调速技术。矢量控制（vector control, VC）技术由德国西门子的工程师 Blaschke 于 20 世纪 70 年代首次提出^[1]，其基本思想是通过坐标变换，将定子电流按照转子磁链定向的坐标系分解成磁链分量和转矩分量，从而实现两者之间的解耦，得到类似于直流电机的转矩和磁链模型，并仿照直流电机的控制方式进行控制。矢量控制使得交流调速技术有了突破性的进展，之后，由

Blaschke 的博士生导师 Leonhard 教授指导他的博士生 Gabriel 和 Geinemann 等人继续研究和开发矢量控制系统, 于 1985 年出版了 *Control of Electrical Drives*, 标志着矢量控制理论趋于完善^[2]。然而, 由于磁链定向难题一直没能得到很好的解决, 矢量控制技术在实际应用中很难得到理论效果。

直接转矩控制 (direct torque control, DTC) 技术是由德国鲁尔大学的 Depenbrock 于 20 世纪 80 年代提出的^[3], 其基本思想是利用转矩和磁链的误差极性通过优化开关表来直接选择逆变器的开关状态, 避开了坐标旋转变换, 简化了控制结构, 获得了良好的转矩动态响应。直接转矩控制系统更适合于高动态性能要求的领域, 具有相当大的发展潜力。ABB 公司于 1995 年首先推出的 ACS600 直接转矩控制系列, 转矩响应速度已经小于 2ms, 在带速度传感器 (pulse generator, PG) 条件下, 速度控制精度可达 $\pm 0.01\%$, 在不带速度传感器条件下, 速度控制精度可以达到 $\pm 0.1\%$ 。在我国, 2001 年由株洲电力机车研究所、株洲电力机车厂等单位联合研制了直接转矩控制的电力机车——中原之星已经在郑武线上可靠地运行, 标志着直接转矩控制技术在我国的功率电力机车领域得到了成功应用。然而传统直接转矩控制的 Bang-Bang 控制方式所固有的磁链与转矩的脉动、低速性能变差、调速范围受到限制等问题仍未很好地解决^[4-7]。

2004 年 2 月, 第三届电力电子论坛“矢量控制与直接转矩控制研讨会”在北京举行, 专家学者针对两种控制原理从理论上进行了深入对比分析, 得出了技术本身并无本质差别而是各有优缺点的结论。针对未来的研究, 人们已经达成了“取长补短, 借鉴两者的优点而融合成统一的新型控制理论”的共识。

对于速度闭环电机控制系统来说, 无速度传感器技术取代速度传感器可以带来系统体积更小、成本更低、无机械鲁棒性问题等诸多优点, 尤其, 该技术更适合于不允许安装传感器或者工况较恶劣场合应用。尽管在无速度传感器技术方面已经取得了一些研究成果, 并且有了相应的产品问世, 但是无速度传感器技术完全取代速度传感器技术的地位, 仍有很长的路要走。

在上述的背景下, 本书以“三相异步电动机无速度传感器解耦控制”为出发点, 借鉴矢量控制与直接转矩控制策略的优点, 融合逆系统理论与方法, 对磁链与转矩控制进行了深入研究。同时, 对与之相关的磁链观测器、电机参数辨识及无速度传感器等技术也一并进行了广泛的探讨。

1.1 磁链与转矩控制

传统的直接转矩控制技术是通过设计好的优化开关表直接选择逆变器开关状态, 这种控制方式简单、易实现, 很容易被工程技术人员所接受, 因此, 自产生以来就受到了许多变频器厂商的高度重视, 如瑞士 ABB 公司开发了 ACS600 系列

及 ACS1000 系列的变频器产品。我国深圳飞明佳电气科技有限公司采用直接转矩控制方式也生产出了风机、水泵、注塑机等相应的专业变频器产品，在实际应用中都得到良好的运行效果。

由直接转矩控制理论可知，直接转矩控制技术的核心就是通过逆变器输出电压矢量来进行磁链与转矩的控制。因此，直接转矩控制理论研究工作主要集中在磁链与转矩控制技术上。最初的磁链与转矩控制研究工作主要是基于开关表的离散电压空间矢量控制基础上进行的，主要工作包括：两位式滞环比较器用三位式滞环比较器来取代，进一步优化开关表；研究新型的脉宽调制（pulse width modulation, PWM）技术；研究新型的逆变器拓扑结构，将电压空间矢量进行细分，提高逆变器的供电能力。这些研究工作对于直接转矩控制理论的完善起到了一定的作用，使得控制系统性能有了很大的改善。然而，这种从“硬件”上完善控制系统性能还是很有限的，并且又带来了控制系统成本昂贵、结构复杂等问题。

传统的直接转矩控制技术采用容差形式的 Bang-Bang 控制方式，没有结合先进的控制理论，这正是改善其控制性能的一个瓶颈。借鉴矢量控制技术的优点，在基于空间矢量调制的直接转矩控制理论体系内，结合先进的控制理论进行磁链与转矩控制，是解决传统直接转矩控制固有缺陷的最好出路。

1.1.1 基于 Bang-Bang 控制的改善方法

文献[8]提出了一个在普通逆变器的基础上增加 Boost 电路组合成的三电平逆变器方案。这样，由普通逆变器只能提供 8 个电压空间矢量（6 个工作电压矢量和 2 个零电压矢量）变成 15 个电压空间矢量（12 个工作电压矢量和 3 个零电压矢量），其中 12 个工作电压矢量将平面空间划分成 12 个区域，这样就可以控制磁链轨迹为正十二边形或圆形，从而减少磁链脉动。在 12 个工作电压矢量中，每两个相邻的电压矢量切换时，每一相电压的变化量比 6 个工作电压矢量的小，这样就可以减少电流、转矩脉动。在实现圆形磁链轨迹控制时，在同样磁链容差的条件下，采用 12 个电压矢量控制时，逆变器的开关频率要远远低于采用 6 个电压矢量控制时逆变器的开关频率。

在直接转矩控制系统中，逆变器的开关频率受滞环比较器容差大小、传感器的灵敏度、A/D 转换时间及数字系统的滞后等诸多因素影响。针对逆变器开关频率不固定问题，文献[9]提出了一种空间矢量细分的直接转矩控制方案：利用空间矢量调制（space vector pulse width modulation, SVPWM）技术将 6 个基本空间矢量细分为 12 个空间矢量，再对 12 个空间矢量重新优化组合，得到直接转矩控制优化开关表；通过磁链偏差和转矩偏差得到电压矢量，采用空间矢量调制的方法得到固定频率的开关信号。这样不仅改善了电流、转矩脉动，而且得到了恒定的逆变器开关频率。

神经网络具有自学习、自适应及泛化能力，尤其具有近似任意复杂的非线性函数能力。传统直接转矩控制中的逆变器开关状态选择过程本质上就是模式识别过程，理论上已经证明，人工神经网络对解决模式识别问题具有超凡的能力。随着神经网络作为控制器在许多工业应用领域得到广泛的关注，文献[10]~文献[15]分别提出了利用神经网络模仿优化开关表状态选择过程的方法。文献[10]中对输入、输出信号进行如下编码：电磁转矩误差信号有 3 种状态，可以用 2 位二进制进行编码；定子磁链有 2 种状态，可以用 1 位二进制进行编码；磁链矢量所在的位置共有 6 个区域，定子磁链角位置可以用 3 位二进制编码；开关表的输出为逆变器开关状态，输出用 3 位二进制编码。由于开关表仅依赖于电磁转矩误差、磁链误差信号与定子磁链所在的区域，而不依赖于电机的参数，因此，文中设计了 6-6-5-3 结构的神经网络，并根据开关表进行离线训练。文献[11]采用相似的神经网络结构，并设计了 BP 算法、自适应神经元、卡尔曼滤波法及并行预测误差回归学习算法对神经网络进行训练。仿真实验结果验证了由 4 种学习算法训练的神经网络来代替传统直接转矩控制的状态选择器都具有有效性，尤其扩展卡尔曼滤波算法和并行预测误差回归算法在电机控制领域应用与其他算法比较具有更好的性能。文献[12]提出了模糊神经网络结构，输入是转矩与磁链的误差，这样可以使神经网络更能模拟人的推理功能，在训练算法引入遗传算法加快神经网络收敛速度。文献[13]提出了高斯混合回归（Gaussian mixture regression, GMR）神经网络方法，并通过实验平台验证了其可行性。上述方法仅是利用神经网络来实现传统直接转矩控制中的优化开关表功能，其原理仍然是利用磁链与转矩误差信号的极性并根据定子磁链所在的位置来输出逆变器的开关状态。在 Bang-Bang 控制模式的框架内研究神经网络，对于研究神经网络结构及训练算法具有一定的理论意义，然而对于改善传统直接转矩控制系统的性能是没有实际意义的。

1.1.2 基于空间矢量调制控制的改善方法

基于 Bang-Bang 控制的直接转矩控制方式只是利用了磁链误差信号与转矩信号的极性，没有考虑到误差信号的大小，因此，无法准确地得到电机所需要的电压空间矢量。SVPWM 引用到直接转矩控制领域，三相异步电动机所期望的定子电压矢量由空间矢量调制（space vector modulation, SVM）模块来实现，这样，就可以省掉优化开关表及滞环比较器。借鉴矢量控制技术的优点，使得利用磁链与转矩误差结合先进控制技术成为可能。基于 SVPWM 的直接转矩控制方法具有广阔的发展空间，并且可以突破传统直接转矩控制所固有的局限性。目前，许多国内外专家在此方面都投入了大量的研究工作，并取得了显著成果。下面仅对与直接转矩控制技术结合的 3 种典型先进控制方法进行归类。

1.1.2.1 无差拍控制

无差拍控制应用于基于 SVM 的直接转矩控制,最早是由美国学者 Habetler 提出^[16]。这种方法针对数字化直接转矩控制系统,其主要思想是在本次采样周期就计算出下一个采样周期内使转矩误差和磁链误差为零的定子电压合成矢量,然后通过矢量调制模块来调制出所期望的电压矢量,达到转矩与磁链无差拍的目的^[17-19]。文献[19]开发、分析及实验验证了一种基于无差拍的三相异步电动机直接转矩控制方法,并采用图形化的方法解决了实际电压与电流的限制问题。然而,这种方法需要大量的计算,特别依赖于电机模型,电机参数的变化使之很难得到理想的性能。

1.1.2.2 人工智能控制

人工智能控制就是仿照人的知识、思维进行控制的方法,包括专家控制、神经网络控制及模糊控制等。与经典控制方法、现代控制方法相比,人工智能控制具有一系列的优点^[20]:首先,人工智能控制突破了传统控制理论中必须基于数学模型的框架,它按实际效果进行控制,不依赖于或不完全依赖于控制对象的数学模型。而且,人工智能控制继承了人脑思维的非线性,人工智能控制器也往往具有非线性特性。再者,某些人工智能控制方法还具有在线辨识、决策或总体自寻优的能力。人工智能控制的研究与应用已经深入到各个领域,同样,它给交流调速系统的控制策略也带来了新的思想和方法。对于模型基本确定的电气传动系统,在模型控制的基础上,增加一定的人工智能控制手段,以消除参数变化和扰动的影响,这才是在电气传动系统中引入智能控制的合理途径。

对于参数时变的电机来说,人工智能的方法是解决鲁棒性问题的较好方法。文献[21]为电压空间矢量的产生提出了一个神经网络模糊推理系统,构建了神经网络模糊逻辑控制器实现对磁链与转矩的控制。人工智能方法在改善电机控制性能的方面具有很大的潜力,其理论与应用研究正方兴未艾。

1.1.2.3 滑模变结构控制

滑模变结构控制是一种自适应的非线性控制策略,其主要特点是,根据被调量的偏差及其导数有目的地使系统状态趋近于设计好的“滑动模态”的轨迹运动,一旦系统进入滑动模态,并沿着切换曲面运动,则与被控对象的参数和扰动无关,从而使系统在滑模面上运动时具有比鲁棒性更加优越的不变性。滑模变结构控制所适宜的被控对象特别广泛,包括线性的或者非线性的、时不变的或者时变的、带时滞的或者不带时滞的、确定的或者不确定的系统。滑模变结构控制理论的不断成熟与完善为其在实践中应用提供了重要的保证。目前,滑模变结构控制已经被公认为解决非线性复杂系统鲁棒性问题的最好方法。

滑模变结构控制不仅具有响应快、对系统参数和外部扰动呈不变性的特点,

而且还具有算法简单、易于工程实现等特点。因此，滑模变结构控制理论自产生以来就受到了各领域专家的高度重视，并在交流电机高性能控制领域得到了很多应用研究成果^[22-28]。

在电机控制领域，滑模变结构控制方法主要应用于转速的外环控制以解决负载扰动的问题。对于调速系统来说，作为内环的转矩与磁链控制器的性能是至关重要的。然而由于抖振问题，针对滑模变结构控制方法对转矩与磁链进行控制的研究工作并不多。罗马尼亚的 Lascu 教授在这个方面对基于空间矢量调制的直接转矩控制（SVM-DTC）系统进行了有益的尝试^[28]。其基本思想就是把滑模变结构控制方法引入到线性 PI 控制框架内，主要通过 PI 控制器来得到期望的定子电压矢量，变结构控制只起到辅助作用，因此，未能充分发挥滑模变结构控制的优越性，同时，无法通过 Lyapunov 稳定理论对滑模变结构控制进行设计来保证全局渐近稳定性。文献[22]利用滑模变结构控制方法对转矩与转子磁链进行控制，因为转子磁链观测依赖的电机参数较多，所以这种方法又会带来了新的鲁棒性问题，同时，转子磁链含有一阶惯性环节又会导致转子磁链响应变慢。

1.2 磁链与转矩状态观测器

磁链与转矩控制的性能很大程度上依赖于磁链与转矩检测或状态观测器的稳态及动态性能。转矩状态变量虽然可以通过动态扭矩仪测量得到，但应用的传感器价格昂贵；定子磁链或转子磁链状态信号微弱，在测量点易混入噪声，使得这些很难应用到实际实用中。为了得到系统的状态变量以便实现状态反馈控制，可以根据系统的输入量、输出量和系统的结构、参数来实现系统状态重构，实现状态重构的系统称为状态观测器。自从高性能交流电机控制技术提出以来，关于磁链与转矩状态观测器的研究工作一直受到广泛的关注与重视，并已取得了丰富的研究成果^[29-43]。对于以定子磁链进行磁场定向的直接转矩控制系统而言，估计的定子磁链准确与否直接影响到控制性能的好坏。定子磁链很难利用传感器检测，通常是通过数学模型进行估计。而磁链估计的精度直接影响到电动机的稳定运行和动态性能。对于传统的直接转矩控制来说，定子磁链的幅值和空间位置是决定电压矢量选择的关键因素。当实际定子磁链低于设定值（一般是额定值）时，选择使定子磁链增加的电压空间矢量；相反，选择使定子磁链减少的电压空间矢量，使定子磁链维持在额定磁链附近。但由于磁链观测幅值误差，电动机的实际定子处于磁链过饱和或者欠磁状态，这样会导致电机的运行效率大大降低。磁链观测的相位误差直接影响电压矢量的正确选择，甚至导致控制失败。对于基于 SVM 的直接转矩控制来说，磁链观测器的性能同样非常重要，它决定了能否得到期望的电压矢量。磁链估计对于高性能交流调速系统来说是一项重要的任务。通常情

况下, 定子磁链有 3 种估计方法, 即 U-I 法、I-N 法及 U-N 法。U-I 法是利用检测到的定子电压及电流来进行定子磁链的估计; I-N 法是利用检测到的定子电流及转速来进行定子磁链的估计; U-N 法是利用检测到的定子电压及转速来进行定子磁链的估计。I-N 法与 U-N 法涉及的电机参数较多, 并且还要知道转速信息。U-I 法与其他两种方法有比较, 具有结构简单、涉及的参数少等优点, 所以, 在实际应用中更加广泛。然而 U-I 模型中含有纯积分器又会遇到积分饱和问题, 在实际应用中往往采用低通滤波器代替纯积分器, 这样又会带来估计定子磁链的幅值与相位误差。下面简单介绍定子磁链观测器相关研究成果。

1.2.1 低通滤波器的补偿方法

基于 U-I 法的定子磁链估计, 就是对电机定子侧反电动势进行积分。然而实际应用中遇到的初始条件与仪器直流偏置, 通过纯积分器(开环积分器)对反电动势的积分又会带来积分饱和问题。为解决这个问题, 纯积分器通常用低通滤波器来取代^[29]。然而, 低通滤波器代替纯积分器, 将导致估计的定子磁链在幅值和相位上产生误差。尤其, 当电机低速运行时, 其运行频率低于低通滤波器截止频率, 这种估计误差尤为严重。为了在全速范围内得到精确的定子磁链估计, 低通滤波器应该有一个很低的截止频率。然而, 由于很大的时间常数, 低通滤波器仍然有漂移问题。文献[30]提出了 3 种基于输出反馈补偿的积分算法, 都是在一阶低通滤波器的基础上引入反馈补偿环节, 建立了介于纯积分器与一阶低通滤波器之间的算法, 尤其, 带有自适应补偿的改进算法引入了定子磁链与反电动势正交控制器, 算法复杂, 增加了系统的计算负担。文献[33]得出了基于低通滤波器的定子磁链估计值与实际值在稳态情况下之间的关系式, 并通过状态标记(Flag)进行稳态情况下的定子磁链补偿。实际操作过程需要对运行状态进行判断, 暂态与稳态切换又会带来抖动问题; 同时, 这种方法只实现了幅值补偿, 而无法对相位进行补偿。文献[31]提出了通过转子旋转角频率来设计级联低通滤波器截止频率的一种方法, 定子磁链的幅值与相位误差得到了一定的补偿。另外, 在电机低速运行或者启动过程中, 转子旋转角频率不能反映电机定子侧反电动势的频率变化。因此, 用检测到的转速去调整级联低通滤波器截止频率带来启动过程的定子磁链误差较大, 往往导致电机无法启动。文献[39]提出了通过转子旋转角频率来设计低通滤波器截止频率的一种方法。该方法在一定程度上改善了低速运行时低通滤波器对定子磁链估计的影响, 然而定子磁链的幅值与相位误差没有得到彻底的补偿。文献[40]提出了限幅值可根据输入信号的频率和幅值自适应调整的补偿积分器, 解决了输入信号幅度发生变化时不能在一个宽的范围内保持输出信号良好波形的问题, 然而, 在实际应用中还存在着很大的差距。

1.2.2 非线性闭环观测器

交流电机无速度传感器控制中经常使用的几种非线性闭环观测器有^[44]：全阶自适应状态观测器（full-order adaptive state observer, FOASO）、扩展 Kalman 滤波器（extended Kalman filter, EKF）、扩展 Luenberger 观测器（extended Luenberger observer, ELO）、滑模观测器（sliding-mode observer, SMO）等。用于磁链估计的非线性闭环观测器通常是 ELF、ELO 和 SMO。

文献[45]~文献[47]将电机转速作为一个状态变量，与电机模型合并成一个五阶非线性模型，采用扩展 Kalman 滤波器进行磁链与转速估计。扩展卡尔曼滤波法提供了迭代形式的递推估计方法，避免了对测量信号的微分。卡尔曼滤波辨识是在最小方差意义上求解状态或参数的最优估计值，特别适合于具有随机干扰和量测噪声的系统。然而，此种方法是建立在对噪声统计特性已知的基础上进行的，而且计算量很大，对于实时性要求很高的电机控制领域将是很大的挑战。

文献[48]~文献[51]采用了滑模观测器来进行定子磁链估计。文献[50]在转速可测的条件下，利用定子电流误差构建滑模平面，滑动模态过程迫使估计的定子磁链将以幂指数收敛于实际值，并证明了观测器的稳定性及鲁棒性。这种方案需要速度传感器来得到转速信息，传感器的精度对磁链观测器性能起到了决定性作用。文献[51]通过特殊处理使模型与电机转速不存在显示关系，并采用了估计定子电流与实际电流的偏差构成非线性 Bang-Bang 矫正控制器，最终使系统状态控制在所设计的滑模平面上，由于没有采用转速自适应机构，因此，该控制方式的明显优点是控制器实现简单、系统鲁棒性强、动态特性好。

文献[52]~文献[55]采用了扩展 Luenberger 观测器进行磁链与转速估计。ELO 与 EKF 相比，具有算法简单、收敛速度易于调节等优点，但不具有统计性质。这两种观测器所采用的数学模型都依赖于电机转速参数，因此，在无速度传感器控制系统中 ELO 与 EKF 磁链观测方法不能独立使用，通常把转速也作为一个电机状态，建立增广的状态模型，进而对磁链与转速同时计算。速度估计通常受到累积误差、噪声及延迟的影响，同时，不正确的速度估计又会反馈到磁链估计，导致磁链估计的精度下降。

虽然，非线性闭环观测器在定子磁链观测中得到了一定的应用，但是，往往难以兼顾误差收敛速度和参数敏感性两个方面，同时，还要面临计算开销大的问题。

1.3 电机参数辨识

对于常规控制系统来说，为了分析与设计一个控制系统，必须先知道被控对象的数学模型，这样才能进行定量分析或控制器设计。同样，对电机控制系统也

是如此。很多情况下,往往如定子电阻、转子电阻、定子漏感、转子漏感等电机参数是未知的,这样,电机参数辨识是非常必要的。在模型精度要求不高的情况下,可通过最小二乘法,利用三相异步电动机启动与稳态运行时简化电机模型来进行参数辨识。这种方法适合于参数不变的电机参数辨识,因其具有计算量小的优点,在工程上得到了广泛的应用。然而,这些电机参数都会随着电机运行条件的变化而变化,定子电阻、转子电阻及转子时间常数会随着温升而变化,定子漏感(σL_s)也会随着负载而变化。经典的电机参数辨识方法有:最小二乘法、极大似然法、相关分析法、卡尔曼滤波法等。这些方法建立在统计特性之上,针对有噪声的测量信号进行信息提取,计算量比较大,很难适用于实时性要求很高的电机控制领域。

文献[56]~文献[65]对交流电机参数的估计和辨识方法进行了研究。尽管直接转矩控制策略不依赖于电机模型,具有很强的鲁棒性,但是磁链观测器的估计精度是影响其控制系统动态、稳态性能的主要因素。定子电阻的参数变化对观测器估计精度有很大影响,尤其电机低速运行时,往往估计精度很差。电机运行过程中,绕组的温升及电流频率引起的集肤效应,必然会引起定子电阻的变化,在重载条件下变化量可以达到初始值的50%。研究表明,若定子电阻的估计误差达到15%,引起磁链的不合理观测误差将达到20%,这样必然恶化系统的控制性能,甚至导致无法实现磁链定向。定子电阻是决定速度估计模型依赖于电阻参数的最重要因素。因此,定子电阻在线估计是非常必要的。下面简单介绍电机的定子电阻参数在线辨识技术相关研究成果。

1.3.1 参考模型自适应系统

参考模型自适应系统(model reference adaptive system, MRAS)在三相异步电动机定子电阻估计中的应用,通常伴随着速度估计而发生。文献[57]采用电压模型与电流模型分别作为参考模型与可调模型进行定子电阻与转速分时估计,在定子电阻辨识过程中,两个模型互换角色,并且补偿转速估计中的定子电阻的波动。文献[66]~文献[68]在伪降阶磁链观测器的基础上采用参考模型自适应方法,通过Popov超稳定理论设计了定子电阻及转速的估计器。这两个估计器独立运行时是稳定的,然而同时运行时两者之间的相互作用很难保证整体估计方案的稳定性。文献[69]在电流估计的基础上提出了定子电阻及转速估计器,利用线性控制理论保证了两种估计器在单独使用与同时使用情况下的稳定。文献[70]在转子反电动势的基础上采用参考模型自适应方法设计了定子电阻及转速的估计器,通过改变设计增益系数保证整体估计方案在任何条件下都是稳定的,然而算法复杂,收敛速度慢。

参考模型自适应系统在定子电阻在线辨识中的应用,是一个新兴的研究领域,

尽管已经取得了很多成果，但仍存在未能解决的问题，尤其是全局稳定性理论需要进一步的完善。

1.3.2 人工智能技术

定子电阻的变化与绕组温升、定子电流及转速等诸多因素有关，其具有非线性、大惯性等特点。绕组端部温度及其变化率综合体现了各种因素的影响，可以作为定子电阻辨识器的输入量^[60,64,71-75]。文献[71]根据温度及其变化率与电阻之间的关系给出了基于小波神经网络的定子电阻辨识器，用于对定子电阻进行在线检测。由于输入变量包括电机绕组的温度，该方法很难得到实际应用。鉴于电机绕组温度检测困难，文献[74]把定子电流、转速及网络输出量作为辨识器的输入量，提出了基于动态神经网络的定子电阻辨识器。神经网络输入变量的选取受人为因素影响，若选取不当，不仅达不到期望的目的，甚至可能破坏系统的性能；同时，神经网络定子电阻辨识器易于陷入局部极小点。

1.3.3 其他定子电阻估计方法

文献[76]采用 U-I 与 I-N 两个磁链观测器交替工作，在 I-N 运行期间，通过电压模型的积分关系式整定定子电阻。然而，对于低速到高速加速很快的系统来说，运行期间很难实现积分运算，无法实现定子电阻估计。文献[77]分析了定子电阻的变化对转子电流与转子磁链矢量之间的内积影响，当定子电阻估计值与实际值一致时，在转子磁链幅值不变的情况下，转子电流矢量与转子磁链矢量的内积为零，也就是转子电流矢量与转子磁链矢量正交；当定子电阻估计值与实际值不一致时，其矢量内积不为零，在此基础上，提出了定子电阻修正律。该方法计算简单、易于实现，然而不适用于转子磁链暂态运行情况。文献[78]利用跟踪-微分器建立定子电流定向的坐标系，提出了一个新的定子电阻估计方法。该方法利用在定子电流坐标系下的转子磁链交轴分量及定子电压、电流直轴分量，直接计算定子电阻，可抑制量测噪声的积累，因此，能够适应系统中某些不确定性的扰动。然而，定子电流定向的误差会导致定子电阻估计的精度变差。文献[79]分析了电压模型与电流模型转子磁链直轴分量的误差是由定子电阻的变化引起的，在此基础上利用直轴磁链误差实现了对定子电阻的在线辨识方法。然而，转子磁链估计误差将会对定子电阻估计精度产生很大影响。文献[80]把负载转矩及定子电阻作为电机状态建立了一个七阶的系统，利用 EKF 法进行定子电阻及负载转矩的估计。然而这种方法的计算复杂性导致其不适合于实时性要求很高的电机控制领域。

1.4 无速度传感器技术

无论是磁场定向还是转速控制都需要转速信息。传统的方法采用速度传感器