

现代控制理论在交流传动中的应用*

吴捷 杨金明 薛锋

(华南理工大学电力学院·广州, 510640)

摘要: 本文综述了近几年来线性最优控制、自适应控制、变结构控制、微分几何控制、神经网络控制、模糊控制等控制在交流传动方面应用研究的主要方法与成果, 并提出若干需要解决的问题。

关键词: 交流传动; 最优控制; 自适应控制; 滑动模控制; 非线性控制; 智能控制

The Applications of Modern Control Techniques in AC Drives

Wu Jie Yang Jinming Xue Feng

(Electric Power College, South China University of Technology · Guangzhou, 510640, P. R. China)

Abstract: The main achievements and methods of linear optimal control, adaptive control, variable structure control, deferential geometric control, neural network control and fuzzy logic control used in the control of AC drives are surveyed in this paper, and certain problems to be solved are proposed simultaneously.

Key words: AC motor; optimal control; adaptive control; sliding mode control; nonlinear control; intelligent control

1 引言

感应电动机较直流电动机有许多优良的品质, 如结构简单、运行可靠、惯量小、适用性强、维护简单等, 但由于是一个非线性、多变量、强耦合的控制对象, 使得在相当长的时期内, 调速系统中一直采用直流电动机调速。早期发展的交流调速系统, 如电压频率控制、滑差频率控制等, 都因转矩和磁链耦合, 使得对感应电动机的速度控制变得不精确和迟缓。矢量控制技术的引入是交流传动控制领域的一次革命。矢量控制系统中, 在与转子磁链同步旋转的二轴参考坐标系中, 实现了转子磁链和转矩的解耦控制, 使得交流传动系统在高精度、快响应等技术指标上也赶上了直传动系统。但矢量控制方法需要精确知道转子磁链的幅值和方向, 且转子磁链的动态特性影响对转子转速的控制。且该方法对电动机参数变化比较敏感, 参数的变化将导致解耦条件的破坏。

交流电动机是一个典型的多输入多输出非线性系统, 国内外学者运用现代控制理论中几乎所有的方法, 对其进行了大量的研究, 为交流电动机的高精度控制提供了多种方法。

近年来智能控制的研究与应用取得了很大的发

展, 由于其不依赖或不完全依赖于控制对象的数学模型, 并可以在处理有不精确性和不确定性的问题中获得可处理性和鲁棒性, 已应用于很多领域, 也为电气传动系统的控制策略带来了新的思想和方法。

2 线性最优控制在交流传动系统中的应用

线性最优控制是目前现代控制理论中应用最多, 最成熟的一个分支。其原理如下^[1]: 对系统

$$\dot{X}(t) = A(t)X(t) + B(t)U(t),$$

$$X \in R^n, \quad U \in R^r.$$

$A(t)$: $n \times n$ 阶矩阵, $B(t)$: $n \times r$ 阶矩阵。取性能指标: $J = K[X(t_f), t_f] + \int_{t_0}^{t_f} [L(x(t)), u(t), t] dt$ 求一允许控制 $U(t)$ 使系统由初始状态 $X(t_0)$ 出发在时间间隔 $[t_0, t_f]$ 内, 到达目标集 $\Phi[X(t_f), t_f] = 0$, 并使性能指标 J 为最小。

最优控制理论由于是基于被控系统的线性状态空间模型, 在直传动系统中应用较多。计算机和解耦控制的发展, 也使最优控制在交流传动中得到应用。在交流传动的最优控制中, 首先对交流传动非线性系统进行解耦及线性化处理 (如采用矢量控制、滑动模控制等), 再对系统进行最优控制, 使系

* 国家自然科学基金 (69674025) 和广东省自然科学基金 (940025) 资助项目。

统得到某种意义下的最优品质^[2,3]。文[2]通过矢量控制,使系统简化为仅含转子磁通、速度和位置三个状态变量的方程,在此基础上进行以系统机械效率为优化指标的最优控制,该文以最大定子电流和转速为限制条件,以转子磁通幅值为约束条件。文[4]在交流伺服系统中,根据确定的位置和速度控制轨迹,应用最优控制调节磁通,使损耗最小。

由于最优控制是从精确的数学模型计算出来的,当模型存在偏差将严重影响系统的性能,使品质恶化,因此有必要解决鲁棒闭环算法问题。另外,权阵的不同选取也会直接影响系统性能^[5]。

3 自适应控制在交流传动中的应用

自适应控制的目标是使控制系统对过程参数的变化、干扰及对未建模动态特性不敏感。自适应控制系统主要有两大类:模型参考自适应(MRAC)和自校正控制(STR)。

模型参考自适应控制是利用一个生成所期待响应的模型作为参考模型并将其包括在控制策略中。利用实际系统与参考模型响应间的误差来修正控制器参数以便使实际系统的响应收敛于所期待的响应。自校正控制需要对参数进行实时辨识,并用估计参数代替真实的参数来设计控制器。

自适应控制在交流传动中主要应用于系统因参数变化对性能,尤其是对解耦控制的影响,以及系统的参数辨识,从而提高系统的鲁棒性。

采用矢量控制和转差频率控制可使交流电动机解耦成线性解耦的磁通和转速子系统,但这些方法存在着对参数的敏感性,对这些解耦方法采用自适应控制可补偿参数变化带来的影响,保证解耦可靠并使系统具有优良的品质^[6~11]。在矢量控制解耦基础上,文[6]研究了采用模型参考自适应控制的模型匹配方法,文[7,12,13]提出了应用自适应模型跟随技术,使系统即使在负载和参数变化的情况下仍能具有满意的特性和宽的调速范围;文[8,9]采用离散型模型参考自适应控制对转子电阻进行在线辨识,保证二次磁通恒定及磁通器的正确跟踪;文[11]采用极点配置的自适应速度控制器,控制器由速度控制和前馈力矩补偿组成。文[10]研究了应用滑动模控制方法以使转矩与磁链解耦,而在速度控制环采用自校正控制方法,使系统在输入信号形式和机械参数(如转动惯量)变化时,仍能保持良好的跟踪性能。

1982年K.Ohnishi等人提出基于转差频率控制

解决二次磁通和二次电流的解耦问题,并采用自适应辨识估计转子电阻的值,以补偿电阻受温度的影响^[14,15]。文[16,17]采用了转差频率控制解耦基础上的模型参考自适应控制方案,在速度环采用模型参考自适应控制使系统具有理想的调速性能。为了避免参数变化对解耦控制的影响,在电流环也采用了自适应控制以避免参数变化对解耦控制的影响。在方案实现上,从线性模型跟随和自适应控制信号中取消了转矩状态变量,使自适应律更易以实现。这种控制方案适用于高性能的鲁棒速度控制,尤其是应用于恶劣的环境时。

自适应控制技术更多的是与其他的控制方法结合使用,如滑动模控制、微分几何线性化控制,或用模糊控制以及神经网络控制来实现。文[18]提出了在转差频率控制基础上引入变结构模型参考自适应控制的方法,与传统的PI型模型参考自适应控制相比,该方法控制算法简单,且模型跟踪误差的动态响应具有期望的特性。文[19,20]提出了对感应电动机应用滑动模解耦控制,在解耦基础上采用锁相控制以实现高精度的速度控制,为提高系统的鲁棒性,文[19]对影响速度锁相系统稳态精度和带载能力的环路增益采用模型参考自适应控制,兼顾了系统稳态精度和带载能力;文[20]中为了补偿负载转动惯量变化带来的影响,设计了基于内模原理和零极点配置的自校正控制器,保证系统具有高的稳态精度的同时又具有一定的鲁棒性。

自适应控制虽然对参数扰动具有一定的鲁棒性,但仍然是基于系统数学模型的控制方法。虽然在辨识算法上作了一些改进,如采用基于 δ 算子的控制方法^[20],自适应控制仍受辨识算法的制约,一般应用于模型参数缓变、外界干扰不强的系统。另外对未建模高频动态系统的自适应控制也有待进一步研究。

4 鲁棒控制在交流传动中的应用

无论是矢量控制,还是后面提到的反馈线性化控制,都因对象参数的不确定性而影响了解耦控制效果,甚至稳定性。在转子电阻确知、负载恒定的情况下,采用电流跟随型逆变器,间接磁场定向控制是全局渐近稳定的^[21,22]。但在参数变化的情况下,如何保证其稳定性的鲁棒性却是一个问题。鲁棒控制器作为一种处理对消不确定性,尤其是非结构不确定性的方法,在交流电机调速中有很好的应用前景^[23]。

文 [22] 运用非线性坐标变换和 Lyapunov 稳定理论, 提出了一种控制方案, 只要转子电阻估计值足够接近设计值, 就能保证系统全局渐近稳定, 即使估计值有 100% 的误差, 仍能保证所有信号一致有界。

文 [23] 运用时域方法处理感应电机控制中的干扰抑制问题。首先运用微分几何方法使对象线性化, 再用 H_∞ 干扰抑制方法达到预定的鲁棒性能指标和闭环系统的稳定。

5 滑动模变结构控制在交流传动中的应用

近年来采用滑动模的变结构控制系统因其兼具快速响应、对系统参数变化不敏感、设计简单和易于实现等优良特性, 而在电力传动领域得到广泛应用。其原理如下 [24]:

考虑一般的不连续非线性控制系统:

$$\dot{x} = f(x, u, t), \quad x \in \mathbb{R}^n, \quad u \in \mathbb{R}^m, \quad t \in \mathbb{R}^l.$$

确定状态空间的一个曲面——切换面或滑动面: $s(x), s \in \mathbb{R}^m, s(x)$ 直接影响滑模运动的动态性能, 它类似于一个参考模型。

设计思想是利用高速开关将系统的相轨迹引导到一个由设计者所选择的可达到的曲面 $S(x) = 0$ 上。采取切换控制律为:

$$u_i(x) = \begin{cases} u_i^+(x), & s_i(x) > 0, \\ u_i^-(x), & s_i(x) < 0, \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, m.$$

选取 $u_i^+(x) \neq u_i^-(x)$, 使得系统在满足到达条件 ($s_i, \dot{s}_i < 0$) 时, 于有限的时间内到达切换面 $s_i(x) = 0$ 。在满足匹配条件下 [25], 一旦系统的状态向量进入切换面后, 就被约束在 $S(x) = 0$ 的子空间中作小幅度、高频率的滑动运动, 既产生“滑模”运动。此时, 系统的动态品质由切换面的参数决定, 而与系统参数的摄动、扰动的影响无关, 即: 变结构控制具有对滑模摄动的不变性。变结构控制理论提供了一套完整的大系统降阶处理方法, 它将大的系统分为若干小系统, 各小系统的切换面只取局部小系统的状态变量, 进而实现局部分散、协调和多层控制。

对于矢量控制交流调速系统, 用滑动模变结构控制理论设计速度调节器, 有助于提高系统抗负载扰动能力和系统参数变化的能力 [26~28]。在这种控制策略中, 矢量控制器作为转矩和磁通控制器, 而滑动模控制器作为速度或位置控制器。但由于矢量控制解耦不具有鲁棒性, 参数变化会影响滑动模控制

器的性能, 且滑动模处于速度环, 机械抖动不可避免。吴捷、陈清泉等提出了滑动模解耦控制 [16,29~31], 在内环采用滑动模控制以控制转矩和磁通, 保证转矩与磁通解耦的鲁棒性, 在外环采用自适应控制以提高调速系统的稳、动态性能, 由于滑动模控制处在内环, 滑动模变结构控制所固有的抖动因被大惯量的感应电动机吸收而被大大的缓解。

滑动模控制存在的主要问题是边界层抖动以及切换面的选取。因惯性引起的切换滞后而产生的自振会对某些未建模动态起激励作用, 对稳定性和稳态精度产生影响, 加速了设备的损耗, 这些都限制了滑动模控制的应用。针对边界层抖动, 采用加入积分补偿的方法可有效地削弱转矩的抖动 [31,32], 但这种方法同时也削弱了系统的鲁棒性。近年来, 模糊控制被引入到滑动模变结构控制中 [33,34], 模糊控制与滑动模变结构控制的结合, 有效地补偿了滑动模控制因边界层抖动而造成的稳态误差。采用离散滑动模控制 [35,36], 由于控制器输出量的切换次数减少, 也有利于减弱系统抖动。

尽管 Utkin [37] 等人在理论上对切换面的选取作了许多极有意义的工作, 但在实用上, 切换面的选择尤其是对非线性系统仍有不少困难。

随着变结构理论的不深入, 各种控制技术的相互补充及上述问题的逐步解决, 交流传动系统变结构控制特别是变结构分散控制终将走向实用。

6 反馈线性化解耦在交流传动中的应用

微分几何理论引入非线性系统研究, 使非线性系统的控制取得突破性进展, 并提供了系统的、结构化的设计方法。对于耦合的多变量非线性系统, 在实现线性化的同时, 还能实现解耦, 为交流传动系统提供了一个新的、有效的控制方法。

微分几何控制的核心问题是反馈精确线性化, 通过局部微分同胚变换 (非线性坐标变换) 和非线性状态反馈, 使仿射非线性系统得以在大范围甚至全局范围内线性化。其原理如下 [38]:

设仿射非线性系统由下列方程描述

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x) + g(x)u(t) \\ \quad \quad \quad = f(x) + \sum_{i=1}^m g_i(x)u_i(t), \\ y(t) = h(x). \end{cases} \quad (1)$$

$X \in \mathbb{R}^n, u_1, u_2 \in \mathbb{R}, h_1, h_2: X$, 的标量函数, $f(X), g_1(X), g_2(X)$ 均为光滑向量场。设:

$$r_i = \min \left\{ k_i \left| (L_{g_1} L_f^{k_i-1} h_i(x), \dots, L_{g_m} L_f^{k_i-1} h_i(x)) \neq 0 \right. \right\}, \quad (i = 1, \dots, l), \quad x \in M \quad (2)$$

设系统(1)的输出通道数等于控制变量数($l = m$)。构造下列矩阵

$$D(x) \triangleq \begin{bmatrix} L_{g_1} L_f^{r_1-1} h_1(x) & \cdots & L_{g_m} L_f^{r_1-1} h_1(x) \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ L_{g_1} L_f^{r_m-1} h_m(x) & \cdots & L_{g_m} L_f^{r_m-1} h_m(x) \end{bmatrix},$$

$$E(x) \triangleq \begin{bmatrix} L_f^{r_1} h_1(x) \\ M \\ L_f^{r_m} h_m(x) \end{bmatrix}.$$

对系统(1)作适当的微分同胚变换： $Z = \Phi(X)$ 。如 $D(x)$ 是非奇异的，取状态反馈控制律

$$u = -[D(x)]^{-1} E(x) + [D(x)]^{-1} v.$$

则系统： $z = Az + bv$ 是一个线性且为分块解耦的系统。从而可采用线性系统理论对系统进行设计。

包含机械特性的感应电动机的数学模型可用一个仿射非线性系统来描述，Luca, Ulivi 和 Krzeminski 等人用反馈线性化方法将交流调速系统线性化解耦成两个线性单变量子系统——转子转速子系统和转子磁通子系统^[39~45]，且并不需要保持磁通恒定，显示了较矢量控制更为优良的品质^[39]，可以在不影响调速动态特性的条件下，连续调节磁通以实现最大功率。

文[41]对包含电动机机械特性的五阶模型应用反馈线性化方法，使调速系统被解耦成两个二阶线性子系统——转子速度子系统和转子磁通子系统，以及一个不可观的子系统——零动态子系统（磁链相角动态），在保证零动态子系统稳定的条件下，实现了转子转速与转子磁通的精确解耦。文[42,43]假定电磁部分的参数是慢时变的，采用了简化模型。文[44]对考虑了电流滞环控制 PWM 逆变器的滞后效应和机械特性而构成的五阶非线性状态方程，实现了转子磁链与转速控制系统的线性化和动态解耦。

微分几何方法成功地解决了一些工程控制问题，但有可处理的非线性系统类比较局限和计算复杂等缺陷。反馈线性化是建立在非线性项的精确对消基础上，要求精确知道系统模型的结构和参数，并要求系统全部状态可测。而实际模型的物理参数常常是不能精确知道的，且是经常变化的（如转子电阻和负载力矩）。另外磁通观测器的渐近收敛性对转子电阻的变化也非常敏感。另外控制律的计算中包含了奇异点。

7 非线性自适应控制在交流传动中的应用

非线性自适应控制是80年代开始研究的课题，它是沿着“参数最优化型”和“Lyapunov型”两条主线发展起来的。最初是解决反馈线性化控制中的精确对消问题，以提高反馈线性化的鲁棒性，随着研究的深入，转向了研究非线性系统本身。非线性自适应控制器的设计有两种方法：一为反馈线性化方法^[46~50]，这类系统可通过以微分几何理论设计方法来综合反馈控制器；一为 Backstepping 方法^[51,52]。

7.1 反馈线性化自适应控制方法

结合反馈线性化的非线性自适应控制在交流调速系统中已有许多应用，并有多种设计方案^[49]。主要是针对交流调速系统中的未知或变化的参数和状态，使系统的线性化解耦特性具有鲁棒性。文[50]提出了针对转子电阻未知的自适应控制方法，该方法对电阻变化率有限制，且电阻值的估计和系统的输出都有一个与电阻变化率有关的稳态误差。文[39,42,45]对于交流电动机数学模型中的未知参数引入转子电阻及负载力矩与它们的额定值之差作为参数误差向量，采用扩展直接自适应控制方法。文献[39]以转子转速、定子两相电流和转子两相磁通为状态变量，建立起一个包含机械特性和参数误差向量的五阶模型；文[45]在磁场定向的 $d-q$ 坐标系下，建立一个包含机械特性和参数误差的四阶模型；通过实时辨识转子电阻和负载力矩，实现了转速和磁链的线性化解耦，提高了非线性系统解耦的鲁棒性。

7.2 基于 Lyapunov 函数的控制方法——Backstepping 型控制器

Backstepping 型控制器是与 Lyapunov 型自适应律结合使用的，即综合考虑控制律和自适应律，使闭环系统满足期望的动静态性能。其原理是从一个高阶系统（对于线性系统指相对阶，对于仿射非线性系统指不确定性）的内核（通常是系统输出量满足的动态方程）开始，设计“虚拟控制律”，保证内核系统的性能（如稳定性、无源性），然后加入一个积分环节，对得到的虚拟控制律进行修正，仍要保证既定性能，如此进行下去，直至设计出真正的控制律，使系统达到期望性能指标^[51~53]。

8 基于无源性控制方法在交流传动中的应用

目前设计的非线性控制器都比较复杂，鲁棒性

问题突出. 近年来有人提出了一种基于无源性控制 (PBC) 的非线性方法^[54~57]. 源于机器人控制的 PBC 方法, 无需解耦, 从能量的角度分析系统的特性, 提出了“无功功率”的概念. 因“无功功率”不影响系统的稳定性, 故无需抵消这部分非线性, 使控制简化, 并提高了鲁棒性. 其原理如下^[54,55]: 在 d - q 坐标系下, 以 Euler-Lagrange 方程形式描述感应电动机特性

$$D'\dot{x} + C(\omega, \omega_s)x + Rx = u.$$

式中:

$$D' = \begin{bmatrix} L_s I & MI \\ MI & L_r I \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} R_s I & 0 \\ 0 & R_r I \end{bmatrix},$$

$$C(\omega, \omega_s) = \begin{bmatrix} \omega_1 L_s J' & \omega_1 M J' \\ \omega_s M J' & \omega_1 L_r J' \end{bmatrix},$$

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad J' = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

$\omega_s = \omega_1 - \omega$, T 为电磁转矩, 其余符号意义同前.

$$u = [u_s, u_r]^T, \quad x = [i_{sd}, i_{sq}, i_{rd}, i_{rq}]^T,$$

$$J\dot{\omega} = T - D\omega - T_L,$$

$$T = M(i_{rd}i_{sq} - i_{rq}i_{sd}).$$

取系统能量函数为: $V = \frac{1}{2}x^T D x$.

PBC 方法先将 $C(\omega, \omega_s)$ 分为两部分, 使 C_1 反对称, 加入适当的状态反馈或输出反馈 kx , 使 $\bar{R} = C_2 + R + K$ 正定, 则根据无源性定义, 系统渐近稳定, 因 $x^T C_1 x = 0$, 对系统能量平衡不起作用, 即为“无功功率”.

文 [55] 根据 PBC 原理导出了保证全局稳定的非线性动态反馈控制, 通过适当选取非线性反馈, 达到了矢量控制-解耦的效果, 针对参数变化对稳定点的影响, 采用积分参数自适应律, 使电磁转矩能够正确跟踪. 该方法在无需测量或观测转子状态的情况下仍能保证电磁转矩的正确跟踪^[56,57].

9 交流传动系统的智能控制

随着自动化程度的提高和普及, 受控对象日益复杂, 对于许多难以获得数学模型或模型复杂的过程, 应用常规控制方法往往不能取得令人满意的控制效果, 而借助于智能控制却能取得明显的效果.

在建立感应电动机的数学模型时, 采取了一些假设, 如忽略异步电动机的铁损、认为气隙磁通不变、忽略漏磁等, 另外矢量控制理论首先是认为电

动机中只有基波正序磁势, 这 and 实际差别不小, 此外, 一般不考虑 PWM 逆变器的惯性特性、死区及功率器件的开关时延等因素, 因此感应电动机的数学模型并不精确, 另外电动机参数 (如转子电阻) 和负载参数 (如转动惯量、负载力矩) 会随实际工况发生变化. 对基于数学模型的传统控制方法一味追求精确解耦并不一定能找到满意的结果. 因此为感应电动机非线性系统设计一种切实可行的, 并且不完全依赖于对象数学模型的控制方法, 是目前控制理论的主要研究目标之一.

智能控制是自动控制学科发展里程中的一个新阶段. 由于许多研究实现人脑思维功能的学术领域, 如人工智能、专家系统、神经网络、模糊逻辑等研究取得了很大的进展, 加之计算机控制技术的发展, 使得将智能控制应用于实际系统成为可能. 智能控制可以充分利用其非线性、变结构、自寻优等各种功能来克服电气传动系统中的变参数与非线性因素, 从而提高系统的鲁棒性. 而将模糊、神经网络与自适应控制加以综合, 可望取得更好的控制效果.

9.1 模糊控制器在电动机速度控制中的应用

模糊控制主要包括模糊化、模糊推理与模糊判决三部分, 其最大的特点是将专家的经验 and 知识表示成语言控制规则, 然后用这些规则去控制系统, 模糊控制器实际上是某种插值器^[58]. 通常的模糊判决所采用的方法有最大隶属度方法、中位数判决方法和加权平均法等. 其中用到的知识库由数据库和规则库两部分组成, 数据库包括了用于设计模糊控制器所需的各种原始数据, 规则库综合了实际工作中的运行操作经验.

模糊控制在交流传动系统的应用主要是速度控制^[56], 模糊控制器处于最外环, 而内环仍保留矢量控制、滑动模解耦控制等传统控制方法. 在一定条件下, 即使在调节时间上模糊控制也可与自适应控制相媲美^[60]. 用模糊控制器取代常规的 PI 控制器^[53], 在参数变化、负载扰动的情況下仍能得到快速、鲁棒性强的控制. 为使系统能与机械负载匹配, 文 [61] 提出了将系统响应模式分级, 采用模糊控制自动调整 PI 控制器参数的方法. 文 [62] 应用模糊推理合成规则, 建立电动机模糊模型, 采用参数自调整方案, 以满足过程响应在不同运行状态下对参数的不同要求. 模糊控制在转矩环的应用有感应电动机的转差增益调节控制^[63], 当转差增益失调时, 用模糊逻辑来修改其中的参数以维持解耦条件成立.

在模糊控制系统中, 量化因子和比例因子的选

取对系统影响很大,采用固化的量化因子和比例因子,当对象参数和扰动过大时,控制效果会变差.一种改进方法是采用带自学习、自适应和自组织功能的模糊控制器.文[64]将自组织模糊控制器用于电动机调速系统中,提出了直接修改模糊控制表算法.文[65]讨论了参数自适应模糊调节器在变频调速中的应用,在一定程度上解决了快的响应速度和高的稳态精度的矛盾.文[66]提出了利用一个修正因子自调整量化因子的方法,通过寻求最优的量化因子来适应不同的工况,以解决快速性和稳态精度问题.

将模糊控制与其它控制手段结合起来的复合模糊控制比传统控制有更快的动态特性和小的超调量,比单纯模糊控制具有更高的稳态精度.模糊PID控制器^[67,68]用模糊控制的方法在线调节PID参数.此外还有一种Fuzzy-PI控制器^[69,70]采用模糊与PI并存的控制方法,以在负载模型参数大范围变化和非线性因素存在时仍能保持良好的动态性能.文[26,71]在一种高精度的交流调速系统—锁相环速度控制系统中应用双模控制,即在大误差时采用模糊控制,而在小误差时采用锁相控制,弥补了锁相环捕捉范围有限的缺陷,提高了系统的调速范围.将模糊控制与滑动模变结构控制相结合^[71~73],补偿了滑动模控制因边界层抖动而造成的稳态误差.模糊控制与自适应控制结合^[74],一定程度上解决了常规模糊控制器参数在控制过程中不变而满足不了变频调速系统响应速度快且稳态精度要求高的问题.

除速度控制之外,模糊逻辑在交流传动中还有多方面的应用.如系统参数辨识^[75],效率优化^[76],非线性摩擦补偿^[77]和转差功率再生控制^[78]等.

模糊控制技术具有快速响应、强鲁棒性的优点,本质上是非线性和自适应控制的,适合处理一些不确定性问题.在智能控制的三大分支中,模糊控制在电气传动系统的应用最广,也相对成熟些,而且已经取得了一些较好的实验结果.但它也存在着自学习能力差,模糊建模困难等不足,使其在高性能电机调速系统中的应用还存在一些问题,如没有系统的分析和设计方法,隶属函数和模糊规则必须依靠人的经验,大量的可调参数(量化因子及比例系数等)的选取等,都需要经过反复精心整定才能投入使用.

9.2 人工神经网络在交流传动系统中的应用

80年代以来人工神经网络在模型结构、学习算

法等方面取得了大量的研究成果.先后提出了误差反向传播(BP)模型, Hopfield离散和连续模型,小脑模型连接控制器(CMAC)模型,径向基函数网络(RBF)模型, Kohonen自组织特征映射模型,自适应谐振理论(ART)模型, Boltzmann机,递归神经网络(RNN)模型等很多各具特色的神经网络模型及其计算理论.

神经网络的飞跃发展,其可逼近任何线性和非线性模型的非线性映射的能力^[79],以及可实现并行实时和冗余容错计算的能力,为非线性控制的研究提供了新的手段.可以通过对网络的训练,掌握控制对象的非线性函数关系;利用自学习、自收敛性神经网络可作为自适应控制器.将神经网络用于非线性动态系统辨识以及构成自适应控制是目前大量研究的一个课题,已成为非线性自适应控制的一个很有希望的分支^[80].

由于电动机重复性较好,为神经网络的学习带来便利,利用BP算法训练神经网络,可实现非线性系统的状态反馈控制^[81,82].文[83]讨论了利用神经网络实现非线性系统的局部镇定问题,一定程度上解决了非线性系统的神经网络控制的理论问题.,与模糊控制比较,神经网络控制最大的优点是综合定量知识的能力强,提高了精度,缺点是学习过程的自动实现不易解决.

目前在交流传动中应用神经网络进行非线性自适应控制的方案有: a) 前馈直接式^[84,85],用神经网络直接取代传统控制器,相当于一个自适应系数的PID调节器. b) 纯估计型^[86,87],这种控制方法中神经网络只用于参数辨识,控制仍由传统控制器完成. c) 估计器—控制器型^[74,88],由两个神经网络—辨识模型和控制器组成.用前向网络辨识电气环节的模型,在辨识结果的基础上,用另一个神经网络控制器实现反馈线性化控制^[88]和自适应控制^[74]. d) 神经网络—模糊控制型^[89,90].神经—模糊控制器,将模糊控制器的输入—输出传递特性用于训练一个前向神经网络,再用神经网络代替模糊控制器进行控制,既保持了模糊控制的控制变量的自适应步长、收敛快的优点,又可增加神经网络的快速计算的优点.

神经网络在交流传动应用中遇到的最大困难是实现问题.神经网络的在线训练周期受到系统各环节时间常数的限制.由于速度环具有较大的惯性,其ANN辨识器和ANN控制器允许以较慢速度训练;但电机的电气时间常数很小,这要求电流环的

ANN 辨识器的执行速度较快. 为了满足 10kHz 的电流采样频率, 电流环的 ANN 必须在 50us 内训练一次, 这是目前 VLSI 技术所无法满足的, 因而在实现时只能采用较低的采样频率 (500Hz). 为了改善这一现象, [91] 提出了“连续在线训练的随机变权重” (COT-RWC) 算法, 该算法基于随机搜索误差平面的梯度, 通过在线训练就可以对逆变器供电的感应电机进行模型辨识和电流控制. 它的优点是有利于硬件实现, 满足实时性要求.

神经网络的理论研究还不够, 目前的神经网络控制主要是凭经验设计, 对系统的性能缺少客观的理论预见性, 尤其是在系统的稳定性和鲁棒性方面. 在目前的理论水平下, 可将电气传动神经网络系统视为一类非线性系统来研究, 简单的神经元控制器可视为一个非线性环节, 而交流电动机经过内环改造后, 在不饱和情况下能够很好的近似为线性的被控对象, 从而可利用现有的非线性理论工具, 如李亚普诺夫或波波夫方法来研究系统的稳定性和鲁棒性 [92].

神经网络控制的提高有待于神经网络理论体系的完善、学习算法的改进以及相应的神经网络计算机硬件的支持.

10 结束语

现代控制理论的深入发展和应用, 使得交流电动机的控制越来越精确和方便, 即使在性能上也赶上了直流电动机. 但现代控制理论的艰深和复杂, 它的各个分支在应用方面的局限性等因素, 影响了这些理论在实际中的应用.

为交流电动机设计算法简单、鲁棒性强和便于实现的控制系统仍是今后应努力的方向. 人们希望寻求一种更为简单的非线性鲁棒控制或它与某种智能控制的集成, 或许是解决问题的最佳途径.

随着电力电子技术的发展及现代控制理论的应用, 尤其是微电子集成电路的发展, 以及各种现代控制理论的交叉集成运用, 交流传动系统会有更快的发展.

参考文献

- 1 解学书. 最优控制—理论与应用. 北京: 清华大学出版社
- 2 Robert D L and Sheng-Ming Yang. Efficiency-optimized flux trajectories for closed-cycle operation of field-orientation induction machine drive. IEEE Trans. Industry Applications, 1992, 28(3): 574-580
- 3 Kuan-Teck Chang. An optimal speed controller for permanent-magnet synchronous motor drive. IEEE Trans. Industrial Electronics, 1994, 41(5): 503-510
- 4 Robert D L and Sheng-Ming Yang. AC induction servo sizing for motion control applications via loss minimizing real-time flux control. IEEE Trans. Industry Applications, 1992, 28(3): 589-593
- 5 Avitam. Optimum setting for proportional controller. IEEE Trans. Industrial Electronics, 1982, 29(2): 165-175
- 6 Akira Kumamoto, Staoshi Taha and Yoshihisa Hitane. Optimal speed regulator of transvector-controlled induction motor drive system using a model reference adaptive control. IECON'85, San Francisco, 1985, 195-200
- 7 Silverio Bolognani, Giuseppe S B, Dorianio Ciscato and Dario Longo. Adaptive control of a voltage inverter induction motor drive. IECON'84, Tokyo, Japan, 1984, 83-88
- 8 Kouhei Ohnishi, Youzou Ueda and Kunio Miyachi. Model reference adaptive system against rotor resistance variation in induction motor drive. IEEE Trans. Industrial Electronics, 1986, 33(3): 217-223
- 9 Luis J G. Parameter adaption for the speed-controlled static AC drive with a squirrel-cage induction motor. IEEE Trans. Industry Applications, 1980, 16(2): 665-669
- 10 吴捷, 姜志坚, 钱来. 感应电动机调速系统新型滑动模解耦与自校正控制. 中国电机工程学报, 1999, 19(1): 1-5
- 11 刘云辉, 陈雪松. 交流伺服电动机的电流自适应控制. 中国交流电动机调速传动学术会议, 海南, 1997, 224-230
- 12 Schauder C. Adaptive speed identification for vector control of induction motor without rotational transducers. IEEE Trans. Industry Applications, 1992, 28(5)
- 13 Ohnishi K and Miyachi K. Principles of constant magnitude regulation of secondary flux based on slip frequency control in induction motor drive. Presented at The Int. Conf. on Electrical Machines, Budepest, 1982, 551-556
- 14 Ohnishi K and Miyachi K. Principles of constant magnitude regulation of secondary flux based on slip frequency control in induction motor drive. Presented at The Int. Conf. on Electrical Machines, Budepest, 1982, 557-561
- 15 Ohnishi K, Suzuki H and Miyachi K. Decoupling control of secondary flux and secondary current in induction motor drive with controlled voltage source and its comparison with Volt/Herz control. IEEE IAS 82, 1982, 28B
- 16 吴捷, 陈清泉等. 感应电动机的解耦-自适应控制. 控制理论与应用, 1988, 5(6): 162-172
- 17 Chan C C, Wu J, et al. Adaptive decoupling control of induction motor drive. IEEE Trans. Industrial Electronics, 1990, 37(1): 41-47
- 18 吴捷, 赵干. 变结构模型参考自适应控制在交流调速中的应用. 电脑应用技术, 1991, (2): 1-5
- 19 薛锋, 吴捷. 基于滑动模控制的感应电动机增益自适应锁相环速度控制. 投 IECON'99, 1999
- 20 徐静. 基于 δ 算子的感应电动机锁相自校正控制. [硕士学位论文]. 华南理工大学, 广州, 1999
- 21 Ortega R, Taoutaou D, Rabinovici R and Vilain J P. On

- field oriented and passivity-based control of induction motors: downward compatibility. In Proc. IFAC NOLCOS Conf., Tahoe, CA, 1995
- 22 Wit P A S D et al. Indirect field-oriented control of induction motors is robustly globally stable. *Automatica*, 1996, 32(10): 1393-1402
- 23 丁刚, 王勋先, 韩曾晋. 感应电机的抗干扰控制. *控制理论与应用*, 1999, 16(4): 483-486
- 24 高为炳. 变结构控制理论基础. 北京: 中国科学技术出版社, 1990
- 25 EL-Ghezawi O M E, et al. Analysis and design of variable structure system using geometric approach, *Int J. Contr.*, 1983, 38(3): 657-671
- 26 Sabanovic A and Izosimov B D. Application of sliding mode to induction motor control. *IEEE Trans. Industry Applications*, 1981, 37(1): 41-49
- 27 Bose B K. Sliding mode control of induction motor. Conference Record of the IEEE/IAS Annual Meeting, 1986, 479-486
- 28 Utkin V I. Sliding mode control design principles and application to electric drives. *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 1993, 40(1): 23-36
- 29 钱来. 基于滑动模解耦的感应电动机自校正、锁相环及模糊控制: [博士学位论文]. 华南理工大学, 广州, 1998
- 30 吴捷, 陈清泉, 王化谦. 感应电动机拖动装置的滑动模控制. 1996 自动控制研讨会论文集, 安徽, 1996, 659-664
- 31 Chen C C and Wang H Q. A robust decoupling control method using sliding mode for high performance induction motor drives. Submitted for Publication in *IEEE Trans. Power Electronics*,
- 32 马裕旭, 吴捷. LQG 自校正控制器. *信息与控制*, 1988, 17(2): 21-26
- 33 Chen T C and Hsu J U. A fuzzy sliding mode controller for induction motor position control. *IECON'94*, Bologna, Italy, 1994, 987-990
- 34 Won C Y, et al. New fuzzy-sliding mode controller for position control of induction motor. *Proc. APEC*, San Diego, 1993, 115-121
- 35 Furuta K. Sliding mode control of a discrete system. *Structure Control. Syst. Contr. Lett.*, 1990, 14(2): 254-260
- 36 Chan C Y. Servo system with discrete variable structure control. *Syst. Contr. Lett.*, 1990, 14(2): 265-268
- 37 Utkin V I and Yand K D. Methods for constructing of discontinuity planes in multidimensional variable structure systems. *Automation and Remote Control*, 1978, 1466-1470
- 38 Alberto Isidori. *Nonlinear control systems*. Third Edition, London: Spinger-Verlag London Limited, 1995
- 39 Riccardo Marino, Persada S and Valigi P. Adaptive input-output linearizing control of induction motors. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1993, 38(2): 208-221
- 40 曾岳南, 冯焱生, 陈伯时. 电压控制型 PWM 逆变器—异步电动机系统的矢量控制与非线性状态反馈控制的关系. 第五届中国交流电机调速传动学术会议, 海南, 1997, 60-63
- 41 Kreminski Z. Nonlinear control of induction motor. The 10th IFAC World Congress, Munich, 1987, 349-354
- 42 Marino R, Perrisada S, Tomei P. Output feedback control of induction motors with unknown rotor resistance. *IEEE Trans. on Control Syst. Tech.*, 1996, 4(4): 336-347
- 43 A De Luca and Ulivi G. Design of exact nonlinear controller for induction motors. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1989, 34(12): 1304-1307
- 44 陈伯时, 徐荫定. 电流滞环控制 PWM 逆变器异步电动机的非线性解耦控制系统. *自动化学报*, 1994, 20(1): 50-56
- 45 陈冲等. 非线性系统的微分几何方法在交流传动控制中的应用. *控制理论与应用*, 1992, 12(6): 639-645
- 46 孙振东, 夏小华. 感应电动机的精确控制器设计. 中国控制会议论文集, 黄山, 1995, 1623-1627
- 47 邓智泉, 彭兆行. 异步电动机的非线性自适应控制. *控制理论与应用*, 1997, 10(5): 727-732
- 48 周锐. 非线性自适应控制及其在感应电动机调速中的应用: [博士学位论文]. 清华大学, 北京, 1998
- 49 Marino R, Persada S, Valigi P. Adaptive input-output linearizing control of induction motors. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1993, 38: 208-221
- 50 Dong-Il, et al. Control of Induction Motors via feedback linearization with Input-Output Decouple. *Int. J. Control*, 1990, 51(4): 863-883
- 51 Tou Y Y. DSP-Based robust control of an AC induction servo drive for motion control. *IEEE Trans. on Control System Technology*, 1996, 4(6): 614-626
- 52 Kanellakopoulos I, Krein P and Dislvestro F. Nonlinear flux-observer-based control of induction motors. *Proc. ACC*, Chicago, IL, 1992, 657-670
- 53 Caudas C and Seleme S. Lyapunov-based torque control design for induction motors. *Proc. IFAC Workshop Motion Control*, Oerugia, IT, 554-559
- 54 Ortega R and Espinosa G. A controller design methodology for systems with physical structures: application to induction motors. *Proc. IEEE CDC*, Brighton, UK 1991, 771-775
- 55 Ortega R and Espinosa G. Torque regulation for induction motors. *Automatica*, 1993, 29(3): 621-633
- 56 Ortega R, Nicklasson P J and Espinosa. On speed control of induction motors. *Automatica*, 1996, 32(3): 455-460
- 57 Espinosa G and Ortega R. State observers are unnecessary for induction motor control. *Syst. Contr. Lett.*, 1994, 23(5): 315-323
- 58 李洪兴. Fuzzy 控制的本质与一类高精度 Fuzzy 控制器. *控制理论与应用*, 1997, 14(6): 868-872
- 59 De Azevedo H R, Wong K P. A Fuzzy Logic Controller for Permanent Magnet Synchronous Machine. *IEEE Proc. APEC'93*, San Diego, 1993, 589-592
- 60 李艳等. 模糊控制器在电气传动中的运用现状及前景. *电气传动*, 1997, (2): 3-9

- 61 Yoichi Hori. Robust and adaptive control of a servomotor using low precision shaft encoder. IEEE IECON'93, Tokyo, Japan, 1993, 1301-1304
- 62 梁慧冰等. 基于模糊模型辨识的参数自调整模糊控制器在交流调速中的应用. 电气传动, 1994, (4):2-7
- 63 Sousa G C D, Bose B K and Kim K S. Fuzzy logic based on-line tuning of slip gain for an indirect vector controlled induction motor drive. IEEE IECON'93, Tokyo, Japan, 1993, 653-658
- 64 邵世煌. 自组织模糊控制器. 自动化学报, 1987, 13(2): 149-150
- 65 何峰. 参数自适应 Fuzzy 调节器在变频调速中的应用. 电气传动, 1990, (6): 43-48
- 66 程善美等. 基于自调整模糊控制器的笼型异步电动机鲁棒位置控制. 电气传动, 1997, 19(3): 39-41
- 67 舒怀林, 魏泽国. 交流串级调速双环模糊 PI 单片机控制系统. 电气传动, 1993, (6): 16-20
- 68 Zhao Zhenyu and Masayoshi Tomizuka. Fuzzy gain scheduling of PID controllers. IEEE Trans. Industry Applications, 1993, 23(5): 571-574
- 69 Kuik D P and Tamet P, et al. Linguistic PID controllers. Preprints of 11th IFAC World Congress, 1990
- 70 程善美等. 交流伺服系统中基于模糊控制的速度控制器. 电气传动, 1995, 17(4): 26-29
- 71 Lai Maofu, Michio Nakano and Guan-Chyun. Application of fuzzy logic in the phase-locked loop speed control of induction motor drive. IEEE Trans. Industrial Electronics, 1996, 43(6): 630-690
- 72 Chen T C and Hsu J U. A fuzzy sliding mode controller for induction motor position control. IECON'94, 1994, 1105-1108
- 73 Won C Y, et al. New fuzzy-sliding mode controller for position control of induction motor. Proc. APEC, San Diego, 1993, 115-121
- 74 Wishart M T and Harley R G. Identification and control of induction machines using artificial neural networks. IEEE Trans. Industry Applications, 1995, 31(3): 231-235
- 75 许越等. 直接转矩控制系统仿真及性能改善之方案. 第四届中国交流电机调速传动学术会议论文集, 大连, 1995, 153-158
- 76 Cleland J and Turner W. Fuzzy logic control of AC induction motros. IEEE Int. Conf. Rec. on Fuzzy System, 1992, 643-647
- 77 Teeter J T, Chow M and Brickley J J. A novel fuzzy friction compensation approach to improve the performance of a DC motor control system. IEEE Trans. Industrial Electronics, 1996, 43(1): 27-32
- 78 Tang Y and Xue L. Fuzzy logic application for intelligent control of a variable speed drive. IEEE Tran., 1994, 9(4)
- 79 Kunt K J, et al. Nrrual Networks for Control systems-A survey. Automatica, 1992, 2(6):1083-1112
- 80 陈卫田, 施颂椒, 张钟俊. 基于神经网络的非线性自适应控制. 控制理论与应用, 1996, 13(5): 545-552
- 81 倪先锋, 陈宗基等. 基于神经网络的非线性学习控制研究. 自动化学报, 1993, 5(3): 307-314
- 82 李银国, 张邦礼, 曹长修. 非线性控制系统线性化与极点配置的神经网络方法. 自动化学报, 1996, 11(6): 708-712
- 83 Levin A U and Narendra K S. Control of nonlinear dynamical systems using neural networks, controllability and stabilization. IEEE Neural Networks, 1993, 4(1): 192-205
- 84 王宁等. 使用单个自适应神经元的智能控制. 华中理工大学学报, 1993, 21(3):31-35
- 85 韩如成等. 神经网络在转差型矢量控制中的应用. 第五届中国交流电机调速传动学术会议, 海南, 1997, 60-63
- 86 Simoes M G and Bose B K. Neural network based estimation of feedback signals for a vector controlled induction motor drive. IEEE Trans. Industry Applications, 1995, 31(3)
- 87 Bruce Burton and Farrukh Kamran. Identification and control of induction motor stator currents using fast on-line random training of a neural network. IEEE Trans. Industry Applications, 1997, 33(3)
- 88 张智焕. 基于神经网络的非线性坐标变换. 中国控制会议论文集, 黄山, 1995, 1081-1084
- 89 管萍等. 神经-模糊在交流变频调速中的应用. 电气自动化, 1998, (1)
- 90 Bose B K. A neuro-fuzzy-based on-line efficiency optimization control of a stator flux-oriented direct vector controlled induction motor drive. IEEE Trans. Industrial Electronics, 1997, 44(2): 270-273
- 91 Burton B, et al. Identification and control of induction motor stator currents using fast on-line random training of a neural network. IEEE Trans. Industry Applications, 1997, 33(3)
- 92 陈卫田, 施颂椒, 张钟俊. 基于神经网络的非线性自适应控制. 控制理论与应用, 1996, 13(5): 545-552