

广义预测控制：理论、算法与应用*

王 伟 杨建军

(东北大学自动化研究中心·沈阳, 110006)

摘要：本文简要介绍了广义预测控制基本方法及其近年来提出的改进广义预测控制算法，并对非线性系统广义预测控制、多变量系统广义预测控制、广义预测控制的稳定性与鲁棒性分析作了进一步讨论。最后，概述了广义预测控制在工业中的应用和广义预测控制的进一步研究方向。

关键词：广义预测控制；非线性系统；多变量系统；稳定性

1 引 言

预测控制思想主要是在 70 年代形成的，进入 80 年代后，随着模型算法控制(MAC)的问世，相继出现了动态矩阵控制(DMC)、扩展时域预测自适应控制(EPAC)等结构各异的预测控制算法。这些算法分别基于有限脉冲响应和有限阶跃响应模型，算法简单，容易实现。1984 年，Clarke 及其合作者在上述算法的基础上，提出了广义预测控制(GPC)思想及基本方法^[1]，GPC 基于参数模型，引入了不相等的预测水平和控制水平，使系统设计更灵活。由于广义预测控制具有预测模型、滚动优化和反馈校正三个基本特征，因而具有优良的控制性能和鲁棒性，被认为是具有代表性的预测控制算法之一并被广泛应用于过程工业中。近年来，广义预测控制吸引了众多学者对其进行研究。国际上，各大控制会议和杂志对它也非常关注，近 10 年来的美国控制会议(ACC)、IEEE 决策与控制会议(CDC)和国际自动控制联合会(IFAC)世界大会几乎每年都有关于预测控制的专题分组及以预测控制为主题的工作讨论会，1995 年在韩国又召开了关于预测控制的国际讨论会。在广义预测控制方面也发表了不少综述文献和著作^[2~7]。

本文的目的是从已发表的关于广义预测控制的文献中抽取其重要的结果，并以系统的方式加以归纳总结，与此同时对其在工业中的应用情况及可能的发展方向作了简短的说明。本文介绍的理论与结果是以离散时间系统为基础的，文中主要提及关于离散时间系统的广义预测控制的文献，这是因为计算机技术的发展使离散时间系统更容易实现和应用。

2 广义预测控制的基本算法

GPC 采用如下 CARIMA 模型来描述系统

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})u(t-1) + C(z^{-1})\xi(t)/\Delta. \quad (1)$$

其中 $A(z^{-1}), B(z^{-1}), C(z^{-1})$ 分别是阶数为 n_a, n_b, n_c 的 z^{-1} 的多项式， $A(z^{-1})$ 和 $C(z^{-1})$ 是首一多项式。 $\{u(t)\}, \{y(t)\}$ 和 $\{\xi(t)\}$ 分别表示系统的输入、输出和白噪声序列， $\Delta = 1 - z^{-1}$ 。广义预测控制使用如下的二次目标函数

$$J = E \left\{ \sum_{k=N_1}^{N_2} [y(t+k) - \omega(t+k)]^2 + \sum_{k=1}^{N_u} \lambda [\Delta u(t+k-1)]^2 \right\}. \quad (2)$$

其中， N_1, N_2 分别为最小、最大预测长度， N_u 为控制长度，满足关系 $1 \leq N_1 < N_2, N_u \leq N_2$ ，且当 $k > N_2$ 时，假定 $\Delta u(t+k-1) = 0$ ， λ 为控制加权序列， $\omega(t+k)$ 是经柔化后的参考值。在 GPC 中，不要求对象输出直接跟踪设定值 ω ，只要求 $y(t)$ 沿着参考轨迹到达设定值 ω 。

* 国家自然科学基金和辽宁省优秀青年科研人才培养基金资助项目。
本文于 1996 年 11 月 4 日收到，1997 年 5 月 26 日收到修改稿。

极小化目标函数 J , 并根据滚动优化的原则, 得控制律为

$$u(t) = u(t-1) + \bar{g}^T(\hat{\omega} - \hat{f}). \quad (3)$$

其中 \bar{g}^T 为一行向量, $\hat{\omega}$ 为参考序列向量, \hat{f} 为由已知输入和输出组成的数据向量.

GPC 控制方法的具体推导参见文[1]. 合理选择 GPC 中的 N_1, N_2, N_u 以及 λ , 可使 GPC 取得较好的控制性能, 其它的一些预测控制的方法可以认为是 GPC 的特殊情况, 例如: 当 $N_1 = 1, N_2 = N_u = N, \lambda = 0$ 时相当于 Richalet 提出的 IDCOM^[8]. 当 $N_1 = N_2, N_u = 1$ 时相当于性能指标中不加权的 GMV 控制算法^[9].

3 广义预测控制算法的改进

3.1 广义极点配置控制方法

GPC 和其它预测控制方法一样, 不能预先指定闭环系统的极点, 因此不能保证系统的闭环稳定性. 1986 年, Lelic 和 Zarrop 在 Clarke 提出的 GPC 的基础上, 结合经典的极点配置算法提出了一种新型的极点配置广义预测控制方法即 GPP^[10]. 其最大的优点是能够预先配置合适的极点而得到较好的控制性能. 文[10]采用了 CARMA 模型, 在目标函数中对输出、设定值以及过去和将来输入量分别加入 P, R, Q, Q_i 加权项其中 P, R 为 z^{-1} 的多项式, $Q_1 = Q_2 = \dots = Q_{N_u} = 1, Q$ 为分式传递函数 $Q = Q_n/Q_d (Q_d(0) = 1)$. 通过文[10]的推导, 得闭环系统的特征多项式

$$A_1 Q_d + B_1 Q_n = T. \quad (4)$$

其中 T 为预先指定的闭环系统极点, A_1, B_1 是关于系统参数的多项式. 可见 GPP 通过选择 P, R, Q_i, Q_d, Q_n 来配置预先指定的闭环极点, 并能消除稳态误差.

GPP 控制器具有多个设计参数, 可以较方便地设计控制器, 从而使系统得到满意的控制性能. 算法一方面可以用于系统输出预先设定的情况, 例如机器人领域^[11]. 另一方面又能把闭环极点配置到理想的位置, 处理由于开环零点所造成的不良影响.

3.2 带输入受限或加权的控制方法

广义预测控制的控制律都是在假定控制信号不受任何约束的情况下得到的, 而在实际过程中, 由于输入量和输出量常常受到物理条件的制约, 例如: 阀门的满开和关闭、电机的最大功率和速度等. 因此, 研究输入受限的 GPC 是具有实际意义的. 由于要考虑约束条件, 使控制问题变得较为复杂. 文[12]采用了拉格朗日因子法, 在求控制律时, 把控制幅值和变化率约束分开考虑, 当控制输入量超出限制边界时, 就当边界值处理, 即把不等式约束变为等式约束, 但在幅值约束时, 采用了所谓的“软变化率限制”, 也就是把幅值约束转化为变化率约束. 文[13]提出一种通过加权多项式的选取来解决输入约束问题. 文[14]对具有输入输出受限的系统利用修正的二次规划方法进行了控制算法的简化, 目的在于减少计算量. 文[15]对具有输入和输出受限的系统利用混合加权最小二乘法提出了广义预测控制方法并证明了闭环系统的稳定性, 但该方法使用了求解可行性的假设. 文[16]利用几何方法对输入受限的情况提出了一种简化的控制算法, 但只针对控制水平为 2 时的特殊情况. 对受限系统的广义预测控制算法的研究目前大多局限于参数确定的线性系统, 对参数未知或非线性系统的研究则甚少.

广义预测控制的基本算法采用实时计算出的当前时刻的控制律加以实施, 没有充分利用已计算出的其它时刻控制信号的作用, 而且一旦控制信号发生错误, 系统性能就变坏. 针对这个缺点, 文[17]提出了加权输入广义预测控制方法, 它把一定时间段内所得的控制信号通过加权求和作为当前的控制量, 充分利用已知信息, 避免由于其中某些控制信号的错误而造成控制

性能变坏,提高了控制器的鲁棒性、容错控制能力和控制品质。

3.3 GPC 在线运算法的改进

在设计 GPC 时,前提条件是假设系统的参数已知,即系统的模型能够精确得到,而实际应用中,由于系统的非线性、时变性以及噪声干扰等因素,系统的参数一般都是未知的,此时需要采用自适应的控制算法,即先估计被控系统参数,再用估计值来设计控制器,这使得 GPC 控制算法的在线计算量大大提高。为此,一些学者对 GPC 控制算法进行改进,以节省在线计算时间。首先 Clarke 等在提出 GPC 的同时也提出了递推求解丢番图方程的方法^[1],该方法既简单又直接,也便于实施。文[18]提出递推广义预测自校正控制器,在递推求解丢番图方程的基础上,用递推的方法对矩阵求逆,这对于控制水平较大的情况是非常省时的。文中还采用递推平方根法代替最小二乘法估计参数,改善了计算精度。文[19]和[20]提出的递推算法不需要求解丢番图方程和矩阵求逆,只需要按固定的递推公式,由模型参数递推计算控制律中的各项参数。该算法运算简练,计算量小。上述这些方法均属于间接自适应控制方法,只是从节省在线计算时间来改进算法。

3.4 广义预测控制的直接算法

为了更有效地减少在线计算时间,文[21]和[22]分别对离散时间确定性系统和具有随机扰动的系统提出 GPC 直接算法,它不需要估计被控系统参数,而直接估计控制器参数,省去了间接算法中的估计系统参数和求解控制器的过程,使得在线计算量减小。但文[21]中使用了被控系统阶跃响应 g_i 前 N 项值已知的假设。由于在工业环境中,很难得到 g_i 的准确值,只能使用其估计值或测量值。对此文[22]采用了正则化技术,用带死区的参数估计方法来估计控制器参数。采用上述直接算法,可大大减小 GPC 自适应控制算法的在线计算量。上述 GPC 控制直接算法的另一个优点是参数估计的个数 ($\hat{\theta}(t)$ 的维数) 不受预测水平和控制水平的影响。文[23]讨论了一种采用两个辨识器直接辨识控制器参数的 GPC 算法,该算法选用最小二乘法辨识参数,得到广义输出,然后用改进型最小二乘法估计控制器参数,结合所得广义输出求得控制律。该算法无需矩阵求逆,使 GPC 的在线计算量减小。

4 非线性系统广义预测控制

GPC 目前取得的主要结果都是以线性系统为被控对象,且在理论和应用上都有较好的研究成果。大部分带少量非线性的系统也可以通过线性化技术再用线性控制方法而得到较好的控制。但对于某些强非线性的系统,用这种方法就很难得到好的控制效果。因为 GPC 对线性系统有着很好的控制效果,因此很自然的想法是把 GPC 推广到非线性系统。对于非线性广义预测控制的研究,最近几年已逐渐开始重视,但这方面的研究结果较少。

4.1 基于 Hammerstein 模型的非线性系统广义预测控制

Hammerstein 模型描述的系统是一类可将其线性和非线性部分分开的系统。文[24]首先对 Hammerstein 模型描述的系统提出了 GPC 控制算法,用 ARMA 模型表示线性部分,高次多项式表示非线性部分。先用线性 GPC 求出中间变量 $x(t)$,然后找出非线性方程 $x(t) = \Phi\{u(t)\}$ 的反函数 $u(t) = \Phi^{-1}\{x(t)\}$,即必须找到 Hammerstein 多项式的一个实根,以产生输入信号 $u(t)$,这也是该方法是否可行的关键。文中对函数 $u(t) = \Phi^{-1}\{x(t)\}$ 采用 Neuton-Raphson 递推方法求解。在采用该方法的同时,带来了根是否存在以及 $\Phi\{u_n(t)\}$ 是否为零等问题,这有可能造成算法的失败,为克服这些缺点,文[24]中提出了一种改进的求根方法,该方法只适用于表示非线性的多项式次数较低的系统。文[25]在前文的基础上,假设非线性部分的多项式次数 p 为奇数,并在目标函数中引入控制增量的 p 次幂,用这种方法有利于系

统的动态分析.[26]提出的 NLGPC 在众多假设条件下,用递推方法从预测方程中直接求得控制律,尽管如此,计算还是相当复杂,而且采用的模型所需辨识的参数较多,影响参数估计的收敛性,不适于实时使用.

4.2 基于 LMOPDP 模型的非线性系统广义预测控制

Z. Lakhdari 等对一种特殊的非线性系统提出了非线性广义预测控制(LMOPDP)^[27],该模型把系统的非线性隐含于模型的参数里,其参数随工作点变化而呈非线性变化.在某一时刻参数确定,则模型就类似于线性系统.该算法对于慢时变的非线性系统比较适合,当非线性较强时,该算法就受到一定的局限性.该算法的关键在于模型的参数估计,即要求参数能够迅速而准确地得到.

4.3 基于神经网络的非线性系统广义预测控制

对于非线性系统,由于很难得到精确的模型,并进行多步预测,这对于研究非线性 GPC 是非常不利的.80 年代中期以来,用神经网络来描述非线性系统,从而对其进行控制已成为国际上的研究热点之一.用神经网络来描述系统,可以利用实际系统的原始数据,通过学习和训练来逼近非线性系统.因此可以结合神经网络来研究非线性 GPC.

把神经网络用于广义预测控制的研究目前还只是一个开始.文[4]简单介绍了神经网络在预测控制中的应用.文[28,29]把基于神经网络的 MPC 控制算法应用于中和塔的 pH 控制和工业机器人的控制,其控制效果要明显优于一般的 PI 控制器.但把神经网络引入非线性 GPC,还存在不少问题.首先最主要的是对多步预测还没有直观而有效的方法.文[30]用两个预测网进行多步预测,但其结构复杂,很难应用于实际.文[31]的 LRPC 只适用于一步超前的预测.其次是控制速度,由于需要进行网络的训练,因此在训练和修正时,需要消耗较多的时间,不利于它的在线实施.用神经网络的另一个缺点是很难用经典的稳定性分析方法来分析系统,这给闭环系统的理论分析带来很大的困难.因此用神经网络虽然简化了系统的数学模型描述,但在网络结构和训练方法的选择上,以及保证收敛性和稳定性等动态特性方面还需要作进一步的研究.

4.4 其它非线性系统的广义预测控制

除了上述提到的将神经网络引入到非线性系统的广义预测控制以外,还有一些其它的非线性系统的广义预测控制方法,例如:文[32]提出了一个非线性预测控制方法,它完全从理论上进行分析,由于非线性系统结构的复杂性,其算法相当复杂,很难在实际中使用,也不便对其作进一步的理论分析.文[33]中利用一般非线性模型设计了实时的自适应非线性预测控制器,它利用正交化方法构造系统的参数模型,然后用 RLS 辨识模型参数,该方法能在未知系统具体模型的情况下设计预测控制器.文[34]用最优化方法设计控制器等,它们的成果可以作为我们进一步进行非线性系统广义预测控制研究的理论基础.对非线性系统预测控制的研究还有基于双线性模型^[35],多模型^[36]等多种方法,但都带有很大的局限性.

5 多变量广义预测控制

上述 GPC 算法都是针对单输入单输出(SISO)系统,然而实际工业过程通常由许多互相作用的变量组成,表现为多输入多输出(MIMO)系统,因此 GPC 很自然地被推广到多变量系统.近十年来,对于线性多变量广义预测控制已开展了研究,并取得了一些重要的结果^[37,38,39].从原理上说,GPC 的设计可以平行推广到 MIMO 系统,即 MGPC^[40],文[41]采用非常简单的方法把 SGPC 推广到 MSGPC.文[42,43,44]也把自适应广义预测控制推广到多变量系统,它们把 SISO 中的输入输出变成向量的形式,把参数变成矩阵形式,套用单变量的控制算法直接

推广到多变量系统.但是在实际工业过程中,系统的多个环节之间有着较强的耦合,只简单套用 SISO 控制算法,很难使每一个回路的输出都得到满意的控制效果,并且计算过程也相当复杂,因此有必要对 GPC 控制器进行解耦设计.对 GPC 的解耦,虽然可以通过合适选择二次目标函数中的加权项来实现,但这样各个变量跟踪设定值的性能变坏.文[45]和[46]分别采用增益/相位分解法和单值分解法,对 MIMO 系统的 GPC 解耦问题进行了研究.当系统为最小相位和开环稳定的系统时,这两种方法能够对输入/输出不等的多变量系统实施解耦,并能有效抑制干扰和建模误差的影响.文[47]用 Nyquist 方法对多变量 GPC 进行解耦,由于该方法不需要对矩阵 $B(z^{-1})$ 进行求逆,所以适用于非最小相位系统,而且适用于矩阵 $B(z^{-1})$ 的对角线上元素的时滞大于非对角线上元素的时滞时的情况.文[48]通过修改二次性能指标,引入前环节实现 GPC 的解耦,但是由于存在过参数化问题,只能做到近似解耦.另外在自适应控制时,要求系统的时滞关联矩阵是已知的,这对多变量系统也是一个苛刻的要求.

6 广义预测控制的稳定性与鲁棒性

虽然计算机仿真和工业过程控制表明广义预测控制具有较好的控制性能,但仍然缺乏完整的稳定性理论.从 Clarke 提出 GPC 至现在,对 GPC 的稳定性分析一直是该研究领域的难点.现有的稳定性研究结果也都局限在严格的条件下,对某种特定的算法进行分析.

当模型与系统之间无建模误差时,Clarke 曾在文[1,49]中对被控系统的稳定性作过深入的分析.在系统不受限的情况下,且开环系统是能稳能检测时,选择适当的参数一般都能保证闭环系统稳定.特别是当预测长度为无限大时,更能保证系统的稳定性.但在实际的应用中要求预测水平不宜太大,这就给保证 GPC 的稳定性带来困难.针对这个问题,众多学者对 GPC 的稳定性问题进行了大量研究.文[50,51,52]引入了限制终点状态为零的广义预测控制方法,分别提出输出受限的 GPC 控制方法(CRHPC),即考虑在预测范围 N 之外的一段时间 m 内,让预测输出等于参考信号.为保证系统闭环稳定性和鲁棒性,除了对输出受限外,还可以采用更一般的方法即终点状态加权的预测控制方法(GPCW)^[53,54].把 GPC 认为是输入/输出的 RHLQ(Receding Horizon Linear Quadratic)控制,则有一些状态空间表示的稳定性结果可以应用于该控制方法^[55,56].然而以前的 GPC 都不包含终点状态,而该方法的目标函数的右边第一项为终点状态加权项,这有利于稳定性的分析,并通过加权参数 Q 的调整来改变控制性能.GPCW, GPC 和 CRHPC 之间有着一定的内在联系,当 Q 选取为 0(或无穷大)时,则 GPCW 就成为 GPC(或 CRHPC).除了输出受限和终点状态加权方法以外,为保证 GPC 的稳定性,还可以采用一些其它的方法.文[57]给出了稳定 GPC 的简单形式,由目标函数的单调性来保证系统的稳定性.文[58]中通过加入反馈环节的方法保证有限预测水平的闭环系统稳定.特别是对无噪声干扰的系统,避开系统不稳这一难处理的问题,用回归时域控制策略,提出稳定的广义预测控制算法.上述这些都是在不受限的条件下讨论系统的稳定性,而实际系统的输入输出受一定条件的限制,因此其稳定性更难于保证.文[59]对输入输出受限的预测控制稳定性作了相应的分析,并导出了闭环系统稳定的条件.文[60]给出了受限预测控制的稳定可行性结论.一旦可行性结论存在,则可以通过目标函数的单调性来证明稳定性.文[61]使用终点受限的方法保证短期可行性,从而证明闭环系统的稳定性.文[62]在前文的基础上,又使用松弛变终点受限的方法,进一步讨论了闭环系统的稳定性.

当系统与模型不匹配(即存在建模误差)时的系统稳定性即鲁棒性.由于 GPC 中引入了多步预测以及算法本身的特殊性,使得其鲁棒性分析难度更大,因此在这方面的研究成果相对较少,并且大多依赖于仿真结果.文[63]给出了鲁棒性的定义,并用定量分析的方法给出了鲁棒

性分析,认为 GPC 具有强鲁棒性的原因是由于对建模误差具有预测功能,同时对输出受限的自适应预测控制的鲁棒性进行了分析,认为采用合适的参数辨识方法,可以得到鲁棒性较强的预测控制. Clarke 曾在[1]中简单讨论了当预测水平为无穷大时的鲁棒性,但还无法分析任意水平时的鲁棒性情况.对末端状态加权或限制为零也是增强 GPC 鲁棒性的有效方法.文[64]指出 RHPC 作为一改进的 GPC 方法,能够稳定控制带建模误差的系统,文中采用了带死区的参数估计方法,给出 RHPC 在非自适应和自适应情况下都具有较强鲁棒性时,系统的建模误差和参数必须满足的条件.用状态空间描述时,RHPC 的结构和 LQG 控制的结构相似,系统为连续时间时,RHPC 的鲁棒性要强于 LQ 的鲁棒性^[65].当被控系统用输入输出模型描述时,文[66]给出了为保证 GPC 鲁棒性 $C(z^{-1})$ 必须满足的条件,当其它参数确定时,参数 $C(z^{-1})$ 是提高鲁棒性的重要因素.

7 广义预测控制的应用

广义预测控制在工业中的应用已取得较多的成果.文[67]介绍了 GPC 在电站的锅炉-透平机上的应用,并把它和传统的 PID 控制器进行比较.在相同的条件下,GPC 的响应要比 PID 迅速,GPC 只需要比 PID 小的控制作用就可以得到和 PID 相同的响应.文[39]把 GPC 方法应用于环境检测室的控制.环境检测包括两个温度调节环,GPC 能够对双环实现解耦控制,而且效果明显优于 PID 的控制效果.文[68,69]分别叙述了 GPC 在工业漂白过程和热处理器方面的应用.文[70]介绍了 GPC 在水泥厂、机器人手臂等方面的应用.目前,包含有广义预测控制的多变量控制方法已在外国许多大公司得到应用,推出了广义预测控制软件包.随着算法的改进和计算机技术的发展,GPC 的适用范围也不断增大,已被应用于化工^[72]、机械电子^[73,74,75]、航天技术^[76]、机器人手臂^[11,77]、医学^[71,78]、太阳能电厂^[79]等领域.

8 结束语

广义预测控制作为一种新颖的控制算法,尽管在工业生产中获得成功的应用,但还有许多问题需要进一步研究.

1) 继续加强对输入或输出受约束的广义预测控制的研究,特别是研究系统参数未知且具有输入输出受约束系统的广义预测控制方法及算法,研究如何将自适应控制算法同受约束时优化求解算法相结合,减少在线计算量,提供适合工业应用的新算法.

2) 继续对 GPC 方法进行理论分析,完善其理论体系.目前只能对各种 GPC 算法的某一些特性进行分析,因此具有一定的片面性,而且采用的分析方法也都局限于传统的理论分析方法,GPC 是一种新型的控制算法,具有自己独特的控制机理,应该寻找一种适合该算法本身的分析方法,并同已有的分析结果相结合,形成一套较完整的理论体系.

3) 加强非线性系统 GPC 的算法研究,结合先进的控制理论和方法来研究 GPC,例如:人工神经网络,寻找适合 GPC 多步预测及收敛速度较快的网络,得到有效的算法,分析算法的多方面特性,得出可行性结论.

4) 在广义预测控制方法的理论不断发展的同时,也必须加强对其的应用研究.把一些理论研究成果,例如各种改进的广义预测控制方法应用于实际过程,真正解决一些实际的工业控制问题,并从中发现新问题,找到推动理论发展的新思路.

参 考 文 献

-160

- 2 徐立鸿,冯纯伯.论广义预测控制.控制与决策,1992,7(4):241-246
- 3 徐立鸿.预测控制的研究现状及问题.控制理论及应用,1994,11(1):121-125
- 4 舒迪前.预测控制系统及应用.北京:机械工业出版社,1996
- 5 席裕庚.预测控制.北京:国防工业出版社,1993
- 6 席裕庚,许晓鸣,张钟俊.预测控制的研究现状和多层智能预测控制.控制理论与应用,1989,6(2):1-7
- 7 Kwon, W. H.. Advances in predictive control: theory and application. Proc. of Int. Workshop on Predictive and Receding Horizon Control, Korea, 1995
- 8 Richalet, J., Rault, A., Testud, J. L. and Papon, J.. Model predictive heuristic control: applications to industrial processes. Automatica, 1978,14(5):413-428
- 9 Clarke, D. W. and Gawthrop, P. J.. Self-tuning controller. IEE Proc.-D, 1975,122(6):929-934
- 10 Lelic, M. A. and Zarrop, M. B.. Generalized pole-placement self-tuning controller part 1: basic algorithm. Int. J. Control, 1987,46(2):547-568
- 11 Lelic, M. A. and Wellstead, P. E.. Generalized pole-placement self-tuning controller part 2: application to robot manipulator control. Int. J. Control, 1987,46(2):569-601
- 12 Tsang, T. T. C. et al.. Generalized predictive control with input-constraints. IEE Proc.-D, 1988, 135(6):451-460
- 13 毛志忠,杨琳.一种解决预测控制输入受约束问题的方法.控制与决策,1994,9(3):230-233
- 14 Camacho, E. F.. Constrained generalized predictive control. IEEE Trans. Automat. Contr., 1993,AC-38(2):327-332
- 15 Rossiter, J. A. and Louvaritakis, B.. Constrained stable generalised predictive control. IEE Proc.-D, 1993,140(4):243-254
- 16 张峻,席裕庚.基于几何分析的约束预测控制直接算法.控制与决策,1997,12(2):184-187
- 17 Warwick, K. and Clarke, D. W.. Weighted input predictive controller. IEE Proc.-D, 1988,135(1):16-20
- 18 袁著祉.递推广义预测自校正控制器.自动化学报,1989,15(4):348-351
- 19 徐立鸿.预测控制的研究.东南大学博士论文,南京,1991
- 20 金元郁.预测控制算法研究.东北大学博士论文,沈阳,1990
- 21 王伟.广义预测自适应控制的直接算法及全局收敛性分析.自动化学报,1995,21(1):57-62
- 22 王伟.一种广义预测自适应控制的直接方法.自动化学报,1996,22(3):270-277
- 23 舒迪前,石中锁.隐式广义预测自校正控制器及其收敛性.自动化学报,1995,21(5):545-554
- 24 Zhu, Q. M., Warwick, K. and Douce, J. L.. Adaptive general predictive controller for nonlinear systems. IEE Proc.-D, 1991,138(1):33-40
- 25 王伟. Generalized predictive control of nonlinear systems of the Hammerstein form. 控制理论与应用,1994,11(6):672-680
- 26 Yonsef, A. A.. Long range non-linear predictive control. Proc. of ACC, San Francisco, 1993,813-816
- 27 Lakhdari, Z., Mokhtari, M., Lecbuse, Y. and Provost, J.. Adaptive predictive control of a class of nonlinear systems. IFAC Symp. on Adaptive Syst. in Contr. and Sig. Proc., Hungary, June, 1995,14-16
- 28 Andreas, D., Horst, R. and Sebastian, E.. Neural network based model predictive control of a continuous neutralization reactor. IEEE Int. Conf. on Control Applications, 1994,427-432
- 29 Neumerkel, D., Franz, J., Kruger, L. and Hidiroglu, A.. Real-time application of neural model predictive control for an induction servo drive. IEEE Int. Conf. on Control Applications, 1994,433-438
- 30 Schenker, B. and Agarwal, M.. Long-range predictive control for poorly known systems. Int. J. Control, 1990,62(1):227-238
- 31 Zhang, J. and Morris, A. J.. Long range predictive models based on locally recurrent neural networks. Preprints of IFAC, YAC'95, Beijing, 1995,708-712
- 32 Henson, M. A. and Seborg, D. E.. Theoretical analysis of unconstrained nonlinear model predictive control. Int. J.

- Control, 1993, 58(5):1053-1080
- 33 Proll, T. and Karim, M. N. . Real-time design of an adaptive nonlinear predictive controller. *Int. J. Control*, 1994, 59(3):863-889
- 34 Keerthi, S. S. and Gilbeat, E. G. . Moving horizon approximations for a general class of optimal nonlinear infinite horizon discrete-time systems. *Proc. 20th Annual Conf. Inform. Sci. Syst.*, Princeton, NJ, 1986, 301-306
- 35 Feng, E. B. , Yu, J. S. and Jiang, W. S. . New method for predictive controller design for bilinear systems. *Int. J. Control*, 1991, 53(1):97-112
- 36 Chow, C. M. , Kuznetsov, A. G. and Clarke, D. W. . Using multiple models in predictive control. *Proc. of 3rd ECC*, 1995, 1732-1737
- 37 Hogg, G. W. and El, R. N. N. . Multivariable generalized predictive control of a boiler system. *IEEE Trans. Energy Conversion*, 1991, 6(2):282-287
- 38 San, C. G. . Multivariable generalized predictive control. LAG Internal Report, May Ensieg, Grenoble, France, 1986
- 39 Dion, J. M. , Dugard, L. , Franco, A. , Nhuyen, M. T. and Rey, D. . MIMO adaptive constrained predictive control case study: an environmental test chamber. *Automatica*, 1991, 27(4):611-626
- 40 Chang, A. O. T. . Multivariable generalized predictive control. First Year Report, Department of Engineering Science, Oxford University, 1990
- 41 Kouvaritakis, B. and Rossiter, J. A. . Multivariable stable generalised predictive control. *IEE Proc. -D*, 1993, 140(5):364-372
- 42 Kinnaert, M. . Adaptive generalized predictive controller for MIMO systems. *Int. J. Control*, 1989, 50(1):161-172
- 43 Shan, S. L. , Mohtadi, C. and Clarke, D. W. . Multivariable adaptive control without prior knowledge of the delay matrix. *Syst. Control Lett.* , 1987, 9(2):295-360
- 44 Wang, W. . A direct adaptive generalized predictive control algorithm for MIMO systems. *Int. J. Control*, 1994, 60(6):1371-1381
- 45 Kouvaritakis, B. , Rossiter, J. A. and Chang, A. O. T. . Singular-value-decomposition approach to multivariable generalised predictive control. *IEE Proc. -D*, 1993, 140(3):145-154
- 46 Kouvaritakis, B. , Rossiter, J. A. and Chang, A. O. T. . Gain/phase decomposition and generalised predictive control of scalar systems. *IEE Proc. -D*, 1993, 139(1):97-105
- 47 Kouvaritakis, B. and Rossiter, J. A. . Multivariable Nyquist self-tuning: a general approach. *IEE Proc. -D*, 1989, 136(5):189-202
- 48 Chai, T. , Mao, K. and Qin, X. . Decoupling design of multivariable generalised predictive control. *IEE Proc. Contr. Theory Appl.* , 1994, 141(3):197-201
- 49 Clarke, D. W. and Mohtadi, C. . Properties of generalized predictive control. *Automatica*, 1989, 25(6):859-875
- 50 Clarke, D. W. and Scattolini, R. . Constrained receding horizon predictive control. *IEE Proc. -D*, 1991, 138(4):347-354
- 51 Kwon, W. H. , Noh, S. and Lee, Y. I. . Stability guaranteed generalized predictive control and its equivalence to receding horizon tracking control. *Proc. ACC*, Chicago. IL, 1992, 2037-2041
- 52 Mosca, E. and Zhang, J. . Stable redesign of predictive control. *Automatica*, 1992, 28(6):1229-1233
- 53 Kim, Y. H. , Lee, Y. I. , Noh, S. B. and Kwon, W. H. . A robust generalized predictive control with terminal output weightings. *Proc. of the 5th Int. Symp. on Process Systems Engineering*, Kyongju, Korea, 1994, 1247-1252
- 54 Clarke, D. W. and Demircioglu, H. . Generalized predictive control with end-point state weighting. *IEE Proc. -D*, 1993, 140(4):275-282
- 55 Bitmead, R. R. , Gevers, M. and Wertz, V. . Optimal control redesign of generalized predictive control. *Preprints of I-FAC Symposium on Adaptive Systems in Control and Signal Processing*, Glasgow, UK, April, 1989, 129-134
- 56 Kwon, W. H. and Pearson, A. E. . On feedback stabilization of time-varying discrete linear systems. *IEEE Trans. Automat. Contr.* , 1978, AC-23(3):479-481

- 57 Kwon, W. H. , Lee, Y. I. and Kim, S. W. . Extended GPC and it's stability properties. 92 IECON, 1992,3(3):1135—1140
- 58 Kouvaritakis, B. , Rossicer, J. A. and Cheng, A. O. T. . Stable generalised predictive control: an algorithm with guaranteed stability. IEE Proc. -D 1992,139(4):349—362
- 59 Scokaert, P. O. M. and Clarke, D. W. . Stabilising properties of constrained predictive control. IEE Proc. -Contr. Theory Appl. , 1994,141(5):295—304
- 60 Rawlings, J. B. and Muske, K. B. . The stability of constrained receding horizon control. IEEE Trans. Automat. Contr. , 1993,AC-38(10):1512—1516
- 61 Rossiter, J. B. , Kouvweitakis, B. and Gossner, J. R. . Feasibility and stability results for constrained stable generalized predictive control. Automatica, 1995,31(6):863—877
- 62 Rossiter, J. B. , Kouvweitakis, B. and Gossner, J. R. . Guaranteeing feasibility in constrained stably generalised predictive control. IEE Proc. -D,1996,143(5):463—469
- 63 许晓鸣,席裕庚,张钟俊. 预测控制系统的鲁棒性分析. 控制理论与应用,1988,5(2):100—105
- 64 Clarke, D. W. , Mosca, E. and Scattolini, R. . Robustness of an adaptive predictive controller. IEEE Trans. Automat. Contr. , 1994,AC-39(5):1052—1056
- 65 Yoon, T. W. , Clarke, D. W. . Towards robust adaptive predictive control. Advances in Model-Based Predictive Control. Oxford: Oxford University Press, 1994,402—414
- 66 Robinson, B. D. and Clarke, D. W. . Robustness effects of a prefilter in generalised predictive control. IEE Proc. -D, 1991,138(1):2—8
- 67 Rossiter, J. A. , Kouvaritakis, B. and Dunnett, R. M. . Application of generalised predictive control to a boiler-turbine unit for electricity generation. IEE proc. -D, 1991,138(1):59—67
- 68 Dumant, G. A. and Martin, J. M. . Comparison of an auto-tuned PID regulator and an adaptive predictive control system on an industrial bleach plant. Automatica, 1989,25(1):33—40
- 69 Noness, M. . Long-range predictive control of a rapid thermal processor. Int. J. System Sciences, 1991,22(12):2377—2391
- 70 Clarke, D. W. . Application of generalized predictive control to industrial processes. IEEE Contr. Syst. Maga. , 1988, 8(2):49—55
- 71 Mahfouf, M. and Linkerns, D. A. . Generalized predictive control (GPC) in the operating theatre. IEE Proc. -D, 1992,139(4):404—420
- 72 Tham, M. T. , Vagi, F. , Morris, A. J. and Wood, R. K. . Multivariable and multirate self-tuning control: a distillon column case study. IEE Proc. -D, 1991,138(1):9—24
- 73 Neumann, R. , Dumur, D. and Boucher, P. . Application of delta-operator generalized predictive control. Proc. Conf. Decision Contr. , 1993,2499—2504
- 74 Boucher, P. , Dumur, D. and Rahmani, K. F. . Generalized predictive cascade control (GPCC). Proc. Euro. Contr. , 1991
- 75 Desbiens, A. , Pomerleau, A. and Najim, K. . Adaptive predictive control of a grinding circuit. Int. J. of Mineral Proc. , 1994,41(1—2)
- 76 Bendotti, P. and M'Saad, M. . A skid-to-turn missile autopilot design: the generalized predictive adaptive control approach. Int. J. Adaptive Contr. and Sig. Proc. , 1993,7(1):13—31
- 77 M'Saad, M. , Dugard, L. and Hammad, S. . A suitable generalized predictive adaptive controller case study: control of a flexibly arm. Automatica, 1993,29(3):585—608
- 78 Mahfouf, M. and Linkens, D. A. . Generalized predictive control with long-range predictive identification for multivariable anesthesia. Int. J. Control, 1994,60(5):885—904
- 79 Eduardo, F. C. and Berenguel, M. . Application of generalized predictive control to a solar power plant. Oxford Workshop94, 1994,483—490

Generalized Predictive Control: Theory, Algorithm and Application

WANG Wei and YANG Jianjun

(Automatic Research Center, Northeastern University · Shenyang, 110006, PRC)

Abstract: The basic method of generalized predictive control and some modified generalized predictive control algorithm are overviewed briefly in this paper. Nonlinear systems and multivariable systems generalized predictive control, stability and robustness of generalized predictive control are also deeply discussed. Finally the industrial application and the future tendency of generalized predictive control are reviewed briefly.

Key words: generalized predictive control; nonlinear systems; multivariable systems; stability

本文作者简介

王 伟 1955年生. 1988年获东北大学工学博士学位, 1990年至1992年在挪威工学院从事博士后研究, 现为东北大学教授, 博士生导师, 东北大学自动化中心副主任. 主要研究方向为自适应控制, 广义预测控制, 计算机控制及其工业应用.

杨建军 1972年生. 1994年东北大学本科毕业, 目前在东北大学自动化中心攻读博士学位. 主要研究方向为广义预测控制理论及应用.

'98《中国控制会议》 征文通知

'98《中国控制会议》拟定于一九九八年八月在浙江宁波举行。会议由中国自动化学会控制理论专业委员会主办, 由 IEEE 北京分部及中国自动化学会旅英分会协办。具体事宜如下:

一、**征文范围:** 控制理论及其应用未发表的论文, 内容包括下列领域的理论与应用:

线性系统	非线性系统	随机控制系统	计算机集成控制系统	专家系统
分布参数系统	离散事件系统	社会经济系统	大系统	H_∞ 控制
适应控制	生态环境系统	鲁棒控制	预测控制	智能控制
机器人控制	模糊控制	神经网络	容错控制	系统辨识与建模
模型降阶	稳定性分析	最优估计	工业控制	计算机辅助设计
通讯系统				

二、**截止日期:** 收稿截止日期为 1997 年 2 月 28 日。

三、**会议请奖:** 凡申请《中国控制会议》第五届《关肇直奖》的论文, 需在投稿时注明, 交论文一式九份, 并附工作证(或学生证)和身份证复印件, 及至少一份同行教授级专家推荐意见(《关肇直奖》条例)。

四、**说明:**

1. 投稿时请注明文章所属的研究方向(见上述征文范围)。
2. 会议录用的文章将于 3 月底通知作者。
3. 请作者自留底稿, 无论是否录取, 一律不退稿。

五、**联系人及地址:**

联系人: 刘智敏 通讯地址: 中国科学院系统科学研究所(北京中关村 100080)

电话: (010)62532161 传真: (010)62587343 电子信箱: lsc@iss03.iss.ac.cn