

文章编号: 1000-5692(2001)04-0433-05

复杂系统的自适应预测控制模型及其仿真

高峰

(浙江林学院 现代教育技术中心, 浙江 临安 311300)

摘要: 针对贫信息、不确定性系统存在的不确定性、随机干扰以及系统特征参数随工作环境的变化而变化的特点, 将具有广阔发展前景的灰色系统理论和广义预测控制理论结合起来, 提出了一种新型的计算机控制策略: 灰色广义预测控制算法 (GGPC)。所做的工作主要有: 提出单变量单步 GGPC 算法, 并在 Matlab 环境下对其进行了仿真研究。仿真结果表明, 该 GGPC 算法适用于线性系统以及非线性系统, 具有较强的抗干扰能力, 有较好的鲁棒性以及自适应能力, 通过调整参数, 可以获得非常满意的动态和静态性能。图 2 参 9

关键词: 灰色系统; 单输入单输出系统; 灰色广义预测控制; Matlab 环境; 仿真

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

1 问题的背景

因为工农业生产的特殊需要, 复杂系统的自适应预测控制研究已经并将长久地成为自动化学科及其相关学科的研究热点和前沿。各国科学家和学者为其投入了大量的精力, 并获得了一些非常好的成果。广义预测控制 (GPC) 便是其中最具有代表性的一种算法。它一经提出, 就在实际复杂工业过程控制中得到了成功应用^[1, 2]。

广义预测控制是在保持最小方差自校正控制的模型预测、最小方差控制和在线辨识等原理的基础上, 吸取了 DMC 和 MAC 中多步预测优化策略发展起来的一类预测控制算法。其优点是: 抗干扰能力显著提高, 有较强的鲁棒性^[3]。

但是, GPC 算法也有其局限性^[3]: ①它主要集中在线性系统的研究, 对非线性系统的关注却比较少; ②对于非线性系统的稳定性和鲁棒性, 主要是通过增加优化时段和预测步数来保证。这势必导致计算工作量的增大, 实时性能降低。为了解决 GPC 算法计算量大的问题, 不少专家学者做过一些工作, 先后给出了多种 GPC 算法。如: 控制器采用原模型参数的广义预测控制, 直接辨识控制器参数的隐式广义预测控制, 采用 2 个辨识器的隐式广义预测控制等等。然而, 现有的各类 GPC 算法, 或者在控制律计算时仍需对高阶控制矩阵进行求逆运算; 或者由于采用 CARIMA 模型作为对象模型, 使得需要辨识的参数较多, 用于建模的数据一般在 30 个以上, 所以, 对于解决 GPC 算法计算量大的问题, 已做的工作都不是令人十分满意^[4, 5]。因此, 继续寻求计算量小, 实时性高, 且稳定性鲁棒性好的 GPC 算法, 就成为具有重要意义的课题。

灰色系统理论是 20 世纪 80 年代初期由我国学者邓聚龙教授创立的一门系统科学新学科。该理论

收稿日期: 2001-06-22; 修回日期: 2001-09-28

作者简介: 高峰(1969—), 男, 江西万载人, 讲师, 硕士, 从事控制理论及其应用和计算机仿真与辅助设计等研究。

以“部分信息已知, 部分信息未知”的“小样本”“贫信息”不确定性系统为研究对象^[6,7], 主要通过“部分”已知信息的生成和开发, 提取有价值的信息, 实现对系统运行规律的正确描述和有效控制。贫信息不确定性系统的普遍存在, 决定了这一新理论具有十分广阔的发展前景。在本文中, 我们将灰色系统理论和广义预测控制理论结合起来, 提出了一种新型的计算机控制策略: 灰色广义预测控制算法(GGPC)。

2 模型的建立及算法步骤

在本文中, 我们考虑单输入单输出系统, 如图1所示。其中: $G(z)$ 表示被控对象, $u^{(0)}(k)$ 表示 k 时刻系统的输入量; $x^{(0)}(k)$ 表示 k 时刻控制对象的输出量。



图1 单输入单输出系统

Figure 1 Single-input Single-output System

2.1 预测模型

依据GM模型建模理论^[6,7], 对于图1所示的系统, 其模型确定为 $M_G(1, 2)$ 为

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = bu^{(1)}. \quad (1)$$

将式(1)离散化得:

$$x^{(1)}(k+1) = (1-Ta)x^{(1)}(k) + Tbu^{(1)}(k). \quad (2)$$

式(2)两边同时乘以差分算子 $\Delta = 1 - z^{-1}$, 得:

$$x^{(0)}(k+1) = (1-Ta)x^{(0)}(k) + Tbu^{(0)}(k). \quad (3)$$

式(3)中, T 为采样周期, a, b 为模型参数, 由最小二乘法计算求取。另外,

$$x^{(0)}(k+1) = x^{(1)}(k+1) - x^{(1)}(k) = \Delta x^{(1)}(k+1);$$

$$x^{(0)}(k) = x^{(1)}(k) - x^{(1)}(k-1) = \Delta x^{(1)}(k);$$

$$u^{(0)}(k) = u^{(1)}(k) - u^{(1)}(k-1) = \Delta u^{(1)}(k).$$

这里, $x^{(1)}, u^{(1)}$ 分别称为原始数据 $x^{(0)}, u^{(0)}$ 的累加量。

当考虑时变、非线性以及随机干扰等诸多因素的影响时, 记为

$$x^{(0)}(k+1) = (1-Ta)x^{(0)}(k) + Tbu^{(0)}(k) + \xi(k+1)/\Delta, \quad (4)$$

即:

$$x^{(0)}(k+1) = Tb\Delta b^{(0)}(k) + (2-Ta)x^{(0)}(k) - (1-Ta)x^{(0)}(k-1) + \xi(k+1). \quad (5)$$

显然, 式(5)右边前面3项与第4项不相关, 如将前面3项看成最优预测, 则第4项即为预测误差, 即:

$$x^{(0)}(k+1) = x_p^{(0)}(k+1) + \xi(k+1). \quad (6)$$

因此, 1步最优预测可记为

$$x_p^{(0)}(k+1) = Tb\Delta b^{(0)}(k) + (2-Ta)x^{(0)}(k) - (1-Ta)x^{(0)}(k-1). \quad (7)$$

2.2 参考轨迹

在GGPC中, 控制的目的是使系统的输出 $x^{(0)}(k)$ 沿着一条事先规定的曲线逐渐达到设定值 w 。这条指定的曲线称为参考轨迹 $x_r^{(0)}(k)$ 。对于GGPC系统, 参考轨迹取为

$$x_r^{(0)}(k+1) = \frac{1-a}{1-az^{-1}}w. \quad (8)$$

式(8)中: w 为系统设定值, a 为输入滤波器参数 ($0 < a < 1$)。

2.3 最优控制律计算

最优控制规律由所选用的性能指标来确定。单变量GGPC系统采用对输出误差和控制增量加权的二次型性能指标:

$$J = E\{q[x^{(0)}(k+1) - x_r^{(0)}(k+1)]^2 + \lambda[\Delta u^{(0)}(k)]^2\}. \quad (9)$$

式中: q, λ 分别为输出预测误差与控制增量加权系数, 一般取为常值。将式 (5) 代入式 (9), 得:

$$J = E\{q[Tb\Delta^{(0)}(k) + (2 - Ta)x^{(0)}(k) - (1 - Ta)x^{(0)}(k-1) + \xi(k+1) - x_r^{(0)}(k+1)]^2 + \lambda[\Delta u^{(0)}(k)]^2\}. \quad (10)$$

式 (10) 对未来控制增量 $\Delta u^{(0)}(k)$ 求导, 并令 $\frac{\partial J}{\partial \Delta u^{(0)}(k)} = 0$, 即得最优控制规律:

$$\Delta u^{(0)}(k) = \frac{qTb}{qT^2b^2 + \lambda} [x_r^{(0)}(k+1) - (2 - Ta)x^{(0)}(k) + (1 - Ta)x^{(0)}(k-1)], \quad (11)$$

或者记为

$$u^{(0)}(k) = \frac{qTb}{qT^2b^2 + \lambda} [x_r^{(0)}(k+1) - (2 - Ta)x^{(0)}(k) + (1 - Ta)x^{(0)}(k-1)] + u^{(0)}(k-1). \quad (12)$$

2.4 在线辨识与校正

为了克服随机扰动、模型误差以及慢时变的影响, GGPC 算法通过不断测量实际输入输出信息, 在线估计预测模型参数, 并以此修正控制规律, 实现反馈校正。

2.4.1 采样数据 设采样得到的最新的输入和输出序列为

$$\begin{aligned} &u^{(0)}(1), u^{(0)}(2), \dots, u^{(0)}(n); \\ &x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n). \end{aligned}$$

2.4.2 数据生成 我们得到的 $M_G(1, 2)$ 模型, 不是原始数据的, 而是累加数据的, 于是需要将 $u^{(0)}(i)$ 转化为 $u^{(1)}(i)$ 以及将 $x^{(0)}(i)$ 转化为 $x^{(1)}(i)$:

$$u^{(1)}(i) = \sum_{j=1}^i u^{(0)}(j); \quad (13)$$

$$x^{(1)}(i) = \sum_{j=1}^i x^{(0)}(j). \quad (14)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, n$ 。

2.4.3 构造数据矩阵与数据向量

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)), u^{(1)}(2) \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)), u^{(1)}(3) \\ \dots \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(n-1) + x^{(1)}(n)), u^{(1)}(n) \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$y_N = [x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n)]^T. \quad (16)$$

2.4.4 作最小二乘计算, 估计 $M_G(1, 2)$ 模型参数 a 与 b

$$\hat{a} = [a, b]^T = (B^T B)^{-1} B^T y_N \quad (17)$$

2.5 灰色广义预测控制的算法步骤

依据上面的讨论, 现在给出 GGPC 算法步骤如下:

- ①置初值;
- ②读取被控对象输出数据: $x^{(0)}(k)$;
- ③数据生成: 由式 (13), (14) 求取 $u^{(1)}(k)$ 以及 $x^{(1)}(k)$ ($k = 1, 2, \dots, n$);
- ④参数估计: 由式 (15), (16), (17) 估计模型参数 $\hat{a} = [a, b]^T$;
- ⑤计算参考轨迹: 由式 (8) 计算 $x_r^{(0)}(k+1)$;
- ⑥计算最优控制规律: 由式 (11) 计算 $\Delta u^{(0)}(k)$;
- ⑦返回计算步骤 (2)。

3 仿真实验与结果

设非线性的被控对象如下所示:

$$x^{(0)}(k) = 0.705x^{(0)}(k-1) - 0.124x^{(0)}(k-2) + u^{(0)}(k-1) + 0.264u^{(0)}(k-1)^2 + \omega(k) - 0.141\omega(k-1) + 0.0248\omega(k-2).$$

仿真中使用的设定值序列 $w(t)$ 是幅值为 19 的矩形波, 随机扰动均值为 0, 方差为 0.01 的白噪声, 采样周期 $T = 0.1$ s, 其余参数的设置如图 2 所示。在 Matlab 环境下进行仿真^[8,9], 结果如图 2。在 Matlab 环境下, $x^{(0)}(k)$ 使用红线表示, $x_r^{(0)}(k)$ 使用蓝线表示。

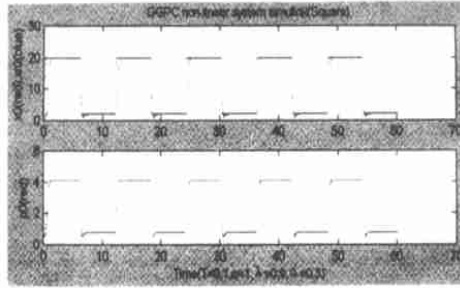


图 2 系统实际输出 $x^{(0)}(k)$ 与设定值 $x_r^{(0)}(k)$ 的比较以及对应时刻的控制规律 $u^{(0)}(k)$

Figure 2 Comparison the real output of non-linear system $x^{(0)}(k)$ with reference value $x_r^{(0)}(k)$ and the corresponding control law $u^{(0)}(k)$

图 2 的仿真结果表明, 本文提出的单变量单步 GGPC 算法, 对非线性系统具有良好的控制效果, 具有较强的抗干扰能力, 有较好的鲁棒性以及自适应能力, 通过调整参数, 可以获得非常满意的动、静态性能。

4 结束语

将灰色系统理论和广义预测控制系统理论结合起来, 提出的灰色广义预测控制模型 (GGPC), 可以有效地控制贫信息的不确定系统。这是由 GGPC 模型的特点所决定的: 首先, GGPC 算法采用滚动式的有限时域优化策略, 优化过程不是一次离线进行, 而是在线反复进行优化计算, 滚动实施, 从而使模型失配、时变、干扰和非线性等因素引起的不确定性及时得到弥补, 使 GGPC 模型具有较高的控制精度和较强的自适应能力, 具有较好的抗干扰的能力和较强的鲁棒性。其次, GGPC 算法在实现自校正和自适应功能的过程中, 采用的是有限时段记忆技术, 每次参与计算的数据可以取至少 5 个, 甚至更少, 仍然能够获得较好的控制效果, 因而计算量特别小, 具有较好的实时性。我们所做的大量仿真实验结果表明了 GGPC 模型的上述优点。

需要指出的是, 本文只是我们的序列研究中的初步成果, 关于 GGPC 模型, 还有许多研究工作需要深入下去: 首先, 本文对 GGPC 模型的性能研究只是通过仿真实验进行定性描述, 有必要对它的性能 (如稳定性和鲁棒性等) 进行定量分析; 其次, 在本文中我们提出的是单输入单输出系统的 GGPC 模型, 并且预测步长是单步的, 对于多变量系统以及多步预测的情形, 如何提出 GGPC 模型以及对它的稳定性、鲁棒性和其他动、静态特性进行分析, 也是一个值得深入研究的问题; 最后, 该模型结合了灰色系统理论以及广义预测控制理论各自的优点, 所以, GGPC 模型在工业、农林业、生态环境等领域应该具有良好的应用前景, 问题是如何建立应用的接口。所有这些都是我们进一步努力的方向。

参考文献:

- [1] 舒迪前. 预测控制系统及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996. 3.
- [2] 王伟. 广义预测控制理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 9.
- [3] 席裕庚. 关于预测控制的进一步思考[J]. 控制理论与应用, 1994, 11(2): 219-221.
- [4] 徐立鸿. 预测控制的现状及问题[J]. 控制理论与应用, 1994, 11(1): 121-125.
- [5] 席裕庚, 张峻. 广义预测控制系统性质的进一步研究[J]. 自动化学报, 1998, 24(3): 400-404.
- [6] 刘思峰, 郭天榜, 党耀国, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 10.
- [7] 邓聚龙. 灰色控制系统[M]. 武汉: 华中工学院出版社, 1985.

- [8] 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计—MATLAB 语言及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996. 7.
[9] 徐昕, 李涛, 伯晓晨, 等. MATLAB 工具箱应用指南—控制工程篇[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000. 5.

Adaptive prediction control of complex system model and its simulation

GAO Feng

(Center of Modern Educational Technology, Zhejiang Forestry College, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: To the poor information and uncertain system featured by significant uncertainties and random disturbances and to the system eigenparameters varying greatly with the working conditions and surroundings, a computer control method is firstly designed, which is named as grey generalized prediction control method (GGPC), by combining the research of grey system theory with generalized prediction control theory. Main work includes: a single-step GGPC method about single-input single-output system is put forward, and the simulation experiment is done under the Matlab environment. Effectiveness of the GGPC model and its power are demonstrated well. The simulation results show that this new control method has very strong robustness and adaptability as well as good resistant disturbances and satisfied performances. It is useful for the real-time control of the poor information and uncertain system.

Key words: gray systems; single input and single output system; grey generalized prediction control; Matlab environment; simulate

欢迎订阅 2002 年《林产化工通讯》

《林产化工通讯》(双月刊)是国家科委批准面向国内外发行的全国林产化工行业唯一的技术类刊物。于 1996 年 7 月入编《中国学术期刊(光盘版)》,是“中国学术期刊综合评价数据库”来源期刊。该刊一直坚持为经济建设服务和为基层服务的办刊宗旨。辟有研究报道、企业纵横、技改园地、开发探索、技术讲座、国外信息和国内简讯等固定栏目,以及专利快递、市场行情、开发指南等小栏目。适于松香、松节油、制浆造纸、木材热解、活性炭、木材水解、栲胶、紫胶、森林资源、香精香料、日用化工、环保、医药、土产、商业、外贸和商检等部门或从事科研、生产、教学和管理等相关人士阅读。邮发代号 28-205,单月 25 日出版。每册定价 4.50 元,全年 27.00 元。亦可直接向该刊编辑部订阅。地址:210042 南京市锁金五村 16 号,林产化工研究所内。电话:(025) 5412131-2205。传真:(025) 5413445。