第 35 卷第 9 期
2018 年 9 月

控 制 理 论 与 应 用
Control Theory & Applications

Vol. 35 No. 9
Sep. 2018

DOI: 10.7641/CTA.2018.70516

比例–积分控制加广义预测控制算法及其应用

薛生辉[1†], 曲俊海[1,2], 王永宏[1], 张红梅[1], 师永平[1], 薛美盛[3]

(1. 北方自动控制技术研究所, 山西 太原 030006;

2. 北京理工大学 自动化学院, 北京 100081;

3. 中国科学技术大学 自动化系, 安徽 合肥 230026)

摘要: 针对比例–积分(proportional-integral, PI)控制因不能预测未来输出而提前改变控制量使其用于光电稳定伺服系统时往往响应剧烈的问题, 研究了光电稳定伺服系统的广义预测控制(generalized predictive control, GPC). 首先通过证明受控自回归积分滑动平均(controlled auto-regressive integral moving-average, CARIMA)模型的直接递推预测与Diophantine方程预测等价, 提出了预测较快的模型等价预测GPC算法, 其预测复杂度比原GPC降低了一个阶次. 其次通过对PI和GPC的特点进行分析, 综合考虑两者的优缺点, 提出了一种新型的基于PI增量和GPC增量加权的比例积分控制加广义预测控制(proportional-integral control plus generalized predictive control, PI+GPC)算法, 实现了基于历史、当前和未来偏差计算控制量, 并给出了算法设计流程和参数选取规则. 最后通过仿真并在某光电稳定伺服平台上验证后得出, PI+GPC和PI相比稳定精度有所提高, 且平稳性和快速性大为改善.

关键词: PI控制; 广义预测控制; Diophantine方程; CARIMA模型; 伺服系统

引用格式: 薛生辉, 曲俊海, 王永宏, 等. 比例积分控制加广义预测控制算法及其应用. 控制理论与应用, 2018, 35(9): 1320 – 1330

中图分类号: TP273　　**文献标识码**: A

Proportional-integral control plus generalized predictive control algorithm and its application

XUE Sheng-hui[1†], QU Jun-hai[1,2], WANG Yong-hong[1], ZHANG Hong-mei[1], SHI Yong-ping[1], XUE Mei-sheng[3]

(1. North Automatic Control Technology Institute, Taiyuan Shanxi 030006, China;

2. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

3. Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei Anhui 230026, China)

Abstract: The PI control of the photoelectric stabilized servo system tends to respond violently, for it cannot predict the future output of the controlled plant and change the control variable earlier. So generalized predictive control (GPC) of the photoelectric stabilized servo system is studied as well as the controlled auto-regressive integral moving-average (CARIMA) model prediction. The prediction by direct recursion of CARIMA model is proved mathematically equivalent to the prediction obtained by Diophantine equation, its prediction complexity is reduced by one order. And then the characteristics of PI and GPC are analyzed in the paper. Comprehensively considered the advantages and disadvantages of PI and GPC, an increment proportional-integral control plus generalized predictive control (PI+GPC) algorithm with its parameter selection rule is put forward. Based on the weighted sum of PI increment and GPC increment, it is realized that the control variable is calculated by historical, current and future deviations. When used on a photoelectric stabilized servo platform, PI+GPC get better steady precision than PI, and shows higher rapidity and stability.

Key words: PI control; generalized predictive control; Diophantine equation; CARIMA model; servo system

Citation: XUE Shenghui, QU Junhai, WANG Yonghong, et al. Proportional-integral control plus generalized predictive control algorithm and its application. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(9): 1320 – 1330

收稿日期: 2017−07−27; 录用日期: 2018−03−28.

†通信作者. E-mail: abrahamxue@sina.com; Tel.: +86 351-8725324.

本文责任编委: 陈增强.

“十三五”中国国防科技预研项目资助.

Supported by the National Defense Advance Research Program of Science and Technology of China during “the 13th Five-Year Plan”.

1 引言(Introduction)

光电稳定伺服系统不仅要求系统稳定, 还要求系统具有足够的带宽来满足其快速的动态响应特性. 比例–积分–微分(proportional-integral-derivative, PID)控制结构简单, 响应迅速, 只要参数调的足够好, 往往能够满足这种要求. 因此, 目前仍然是光电稳定伺服系统的主流控制算法. PID的微分作用与偏差的变化率成正比, 能够预测偏差的变化, 产生超前控制作用, 从而改善系统动态性能. 但是微分作用对偏差的噪声干扰比较敏感, 会将偏差的噪声放大, 使PID控制的信噪比大大降低, 最终影响控制精度[1]. 因而实际中很少使用, 实际中常采用PI控制. 这使得在保证系统带宽的前提下, 控制结果往往响应剧烈, 产生很大超调, 给系统带来不稳定的隐患. 这是由于PI是依据历史和当前运行状况的控制算法, 本身不具有预测功能, 它不能预知系统下一个控制周期及以后的输出而提前改变控制量. 因此, 有必要对光电稳定伺服系统进行有预测功能控制算法的研究.

与PI控制相比, 预测控制最突出的特点是具有预测功能. 它能够预测未来的运行状况, 并依据历史, 当前和未来的运行状况来决定当前的控制量. 其源于工程实践, 有很强的工程背景, 甚至被认为是最有前途解决PID难以取得很好控制效果的那部分工业回路的控制算法.

广义预测控制(generalized predictive control, GPC)由Clarke于1987年提出[2–3]. 与一般的预测控制方法不同, GPC是一种具有自适应功能的预测控制技术, 它更强调在线适应被控对象特性的变化. 对于变参数、变时延、变阶次的系统, 只要输入输出数据足够丰富, 能够进行适当的系统辨识, 运用GPC都能获得稳定的控制效果. 自问世以来便受到人们的广泛关注, 并被迅速运用于工业过程控制领域[4], 同时也被很多学者应用于其它领域的研究. 文献[5]将GPC应用于船舶运动控制, 研究了船舶在航向偏差和转首角速度约束条件下的航向保持和航迹保持问题, 保证了系统的状态始终满足给定的约束条件. 文献[6]用GPC原理针对亚微米超精密车床振动控制系统设计了电磁作动器, 能够有效地抑制空气弹簧固有非线性和电磁线圈反电势所引起的涡流干扰. 文献[7]运用GPC设计了具有多步预测功能的网络控制器, 实现了网络控制系统前向通道的延时补偿, 并在一定条件下保持系统的稳定性. 文献[8]利用GPC控制器产生冗余的控制信息, 实现了当数据发生丢包时对网络遥操作机器人的实时控制. 文献[9]以输出量的变化为优化目标, 利用GPC算法抑制了水下机器人的艏向速度波动并减少了能量消耗. 文献[10]针对近空间飞行器运用模糊自适应GPC算法设计飞/推一体化控制律, 实现了良好的跟踪性能和鲁棒性. 文献[11]将GPC用于六自由度液压并联遥操纵手力反馈伺服控制, 克服了系统参数不确定性、建模误差等的影响, 获得了良好的动、静态响应特性. 文献[12]将非线性GPC和非线性干扰观测器相结合, 实现了无人驾驶飞行器存在复合扰动的情况下其姿态能够有效的跟踪期望值. 文献[13]将GPC和扩张状态观测器相结合用于永磁同步电机的控制, 实现了快速的动态响应和强鲁棒性以及良好的转速跟踪性能. 但是GPC在光电稳定伺服系统上的应用并不多见, 因此有必要对光电稳定伺服系统的GPC进行探索.

2 广义预测控制(Generalized predictive control)

2.1 模型(Model)

预测控制需要一个被控对象的数学模型, 有了这个数学模型和实时数据就可以预测未来的运行状况. GPC采用CARIMA模型, 如下所示:

$$A(q^{-1})y(t)=B(q^{-1})u(t-k)+\frac{C(q^{-1})}{\Delta}\xi(t), \tag{1}$$

其中:

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \cdots + a_{n_a}q^{-n_a},$$
$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \cdots + b_{n_b}q^{-n_b},$$
$$C(q^{-1}) = 1 + c_1q^{-1} + c_2q^{-2} + \cdots + c_{n_c}q^{-n_c},$$

q^{-1}为后移算子, Δ为后向差分算子并且$\Delta=1-q^{-1}$; k为离散时间系统最小的纯滞后步数, 包括对象的纯滞后步数和采样系统的纯滞后步数等, 由于采样系统至少存在一步纯滞后, 因此k的最小值为1; $\xi(t)$为噪声干扰, 假设$\{\xi(t)\}$为零均值、方差相同且有界、不相关的平稳随机序列.

特别地, 取$C(q^{-1}) = 1$时, 有

$$A(q^{-1})\Delta y(t) = B(q^{-1})\Delta u(t-k) + \xi(t), \tag{2}$$

将式(2)作为GPC的模型.

2.2 预测(Prediction)

为推导j步最优输出预测, 考虑Diophantine方程:

$$1 = E_j(q^{-1})A(q^{-1})\Delta + q^{-j}F_j(q^{-1}), \tag{3}$$

其中:

$$E_j(q^{-1}) = 1 + e_j^1q^{-1} + \cdots + e_j^{j-1}q^{-(j-1)},$$
$$F_j(q^{-1}) = f_j^0 + f_j^1q^{-1} + \cdots + f_j^{n_a}q^{-n_a}.$$

可以看出, $E_j(q^{-1})$, $F_j(q^{-1})$由j和$A(q^{-1})$唯一确定.

令$G_j(q^{-1}) = E_j(q^{-1})B(q^{-1}) = g_j^0 + g_j^1q^{-1} + \cdots + g_j^{n_b+j-1}q^{-(n_b+j-1)}$, 前$j$项为式(2)的单位阶跃响应序列. 由式(2)–(3)可以得到式(3) 的递推求解以及系统j步最优输出预测.

系统j步最优输出预测为

$$y(t+k+i) =$$

$$\hat{y}^t(t+k+i|t)+g_i\Delta u(t)+g_{i-1}\Delta u(t+1)+\cdots+g_0\Delta u(t+i)+E_{k+i}(q^{-1})\xi(t+k+i),$$

其中: $i=0,1,\cdots,j-1$; $\hat{y}^t(t+k+i|t)$是由t时刻已知信息组成的部分:

$$\hat{y}^t(t+k+i|t)=F_{k+i}(q^{-1})y(t)+[G_{k+i}(q^{-1})-g_0-g_1q^{-1}-\cdots-g_iq^{-i}]\Delta u(t+i).$$

一般用p表示预测步长, 则$j=p$, 最优输出预测的矩阵表达式为

$$Y=Y^t+G\Delta U+E. \tag{4}$$

2.3 设定值轨迹规划(Trajectory planning of set-point)

按下式对系统未来的设定值轨迹进行规划:

$$\begin{cases} w(t+k-1)=y(t+k-1|t),\\ w(t+k+i)=\alpha w(t+k+i-1)+\\ \qquad\qquad (1-\alpha)SP(t),\end{cases} \tag{5}$$

其中: $SP(t)$为t时刻系统的设定值, $w(t+j)$是未来$t+j$时刻系统的规划设定值(柔化设定值), α为柔化因子, 且$0\leqslant\alpha<1$.

2.4 目标函数与优化控制(Objective function and optimal control)

记$W=[w(t+k)\ \ w(t+k+1)\ \ \cdots\ \ w(t+k+p-1)]^{\mathrm{T}}$, 取目标函数为

$$\min_{\Delta U} Z=\min_{\Delta U}\mathrm{E}\{\sum_{i=0}^{p-1}\{[y(t+k+i)-w(t+k+i)]^2+\lambda[\Delta u(t+i)]^2\}\}=\min_{\Delta U}\mathrm{E}\{(Y-W)^{\mathrm{T}}(Y-W)+\lambda\Delta U^{\mathrm{T}}\Delta U\}, \tag{6}$$

其中λ是控制量变化量的权重. 对式(6)进行凸函数求极小值, 可得$\Delta U=(G^{\mathrm{T}}G+\lambda I)^{-1}G^{\mathrm{T}}(W-Y^t)$.

实际应用中, 只需要计算当前时刻的控制量$u(t)$, 即

$$u(t)=u(t-1)+\bar{G}^{\mathrm{T}}(W-Y^t), \tag{7}$$

其中$\bar{G}^{\mathrm{T}}$是$(G^{\mathrm{T}}G+\lambda I)^{-1}G^{\mathrm{T}}$的第1行.

其实GPC还可以用CARIMA模型直接进行递推预测, 它与Diophantine方程预测是完全两种不同的预测机制. 用CARIMA模型直接递推预测是利用了差分方程的递推求解原理, 保持预测器参数不变, 利用$y(t)$和$u(t)$的递推求解进行预测. Diophantine方程预测是保持$y(t)$和$u(t)$不变, 利用预测器参数的递推求解进行预测. 可以证明, 两种预测器的预测结果是等价的. 因此, 提出一种基于CARIMA模型直接递推预测的模型等价预测GPC算法.

3 模型等价预测GPC算法(GPC algorithm with model equivalent predictor)

从直观上看, 有了CARIMA模型和历史数据便可以直接递推预测未来的输出. 这样从算法实现上就可以用对已知信息简单的移位和填充操作代替Diophantine方程的递推求解, 复杂度大大降低. 文献[14–20]中都用CARIMA模型直接进行预测以避免求解Diophantine方程, 但文献[14–18]最终都归结为求解输出预测表达式的系数, 与求解Diophantine方程类似, 文献[19–20]是本文所述的CARIMA模型直接递推预测. 文献[14–20]中均未对CARIMA模型直接预测与Diophantine方程预测的预测精度进行比较, 也未对两者的预测复杂度进行分析, 这显然是不可或缺的理论支撑. 本文从数学上证明了CARIMA模型直接递推预测与Diophantine方程预测完全等价, 说明两者具有相同的预测精度, 并从预测复杂度上分析出CARIMA模型直接递推预测比Diophantine方程预测降低了一个阶次.

3.1 预测器等价证明 (Proof of equivalence of the two predictors)

式(2)可转换为

$$y(t+k)=\bar{A}_1(q^{-1})y(t+k-1)+B(q^{-1})\Delta u(t)+\xi(t+k), \tag{8}$$

其中

$$\bar{A}_1(q^{-1})=(1-a_1)+(a_1-a_2)q^{-1}+\cdots+(a_{n_{\mathrm{a}}-1}-a_{n_{\mathrm{a}}})q^{-(n_{\mathrm{a}}-1)}+a_{n_{\mathrm{a}}}q^{-n_{\mathrm{a}}}.$$

显然, 这对应于Diophantine方程$j=1$时的情形, $y(t+k-1)$的左端项对应$F_1(q^{-1})$, $\Delta u(t)$的左端项对应$G_1(q^{-1})$, $\xi(t+k)$的左端项对应$E_1(q^{-1})$. 因此, 不妨记

$$y(t+k)=F_1(q^{-1})y(t+k-1)+G_1(q^{-1})\Delta u(t)+E_1(q^{-1})\xi(t+k).$$

将其代入式(8)递推求解$y(t+k+1)$, 有

$$\begin{aligned}&y(t+k+1)=\\&[(1-a_1)F_1(q^{-1})+\bar{A}_2(q^{-1})]y(t+k-1)+\\&[q^{-1}(1-a_1)G_1(q^{-1})+B(q^{-1})]\Delta u(t+1)+\\&[q^{-1}(1-a_1)E_1(q^{-1})+1]\xi(t+k+1),\end{aligned} \tag{9}$$

其中

$$\bar{A}_2(q^{-1})=(a_1-a_2)+(a_2-a_3)q^{-1}\cdots+(a_{n_{\mathrm{a}}-1}-a_{n_{\mathrm{a}}})q^{-(n_{\mathrm{a}}-2)}+a_{n_{\mathrm{a}}}q^{-(n_{\mathrm{a}}-1)}.$$

将式(9)中第1项系数展开有

$$(1-a_1)F_1(q^{-1})+\bar{A}_2(q^{-1})=$$

$$[(1-a_1)f_1^0+(a_1-a_2)]+[(1-a_1)f_1^1+(a_2-a_3)]q^{-1}+\cdots+[(1-a_1)f_1^{n_a-2}+(a_{n_a-1}-a_{n_a})]q^{-(n_a-2)}+[(1-a_1)f_1^{n_a-1}+a_{n_a}]q^{-(n_a-1)}+(1-a_1)f_1^{n_a}q^{-n_a}.$$

将上式$F_1(q^{-1})$的各项系数代入并另作还原可变为

$$(1-a_1)F_1(q^{-1})+\bar{A}_2(q^{-1})=[f_1^0(1-a_1)+f_1^1]+[f_1^0(a_1-a_2)+f_1^2]q^{-1}+\cdots+[f_1^0(a_{n_a-2}-a_{n_a-1})+f_1^{n_a-1}]q^{-(n_a-2)}+[f_1^0(a_{n_a-1}-a_{n_a})+f_1^{n_a}]q^{-(n_a-1)}+f_1^0a_{n_a}q^{-n_a}. \quad (10)$$

将式(9)中第2项系数展开有

$$q^{-1}(1-a_1)G_1(q^{-1})+B(q^{-1})=b_0+[b_1+(1-a_1)g_1^0]q^{-1}+[b_2+(1-a_1)g_1^1]q^{-2}+\cdots+[b_{n_b}+(1-a_1)g_1^{n_b-1}]\times q^{-n_b}+(1-a_1)g_1^{n_b}q^{-(n_b+1)}.$$

将上式$G_1(q^{-1})$的各项系数代入并另作还原可变为

$$q^{-1}(1-a_1)G_1(q^{-1})+B(q^{-1})=b_0+[g_1^1+f_1^0b_0]q^{-1}+[g_1^2+f_1^0b_1]q^{-2}+\cdots+[g_1^{n_b}+f_1^0b_{n_b-1}]q^{-n_b}+f_1^0b_{n_b}q^{-(n_b+1)}. \quad (11)$$

将式(9)中第3项系数展开有

$$q^{-1}(1-a_1)E_1(q^{-1})+1=1+(1-a_1)q^{-1}=1+f_1^0q^{-1}. \quad (12)$$

显然, 式(10)–(12)对应于Diophantine方程$j=2$时的情形, 式(9)中$y(t+k-1)$的左端项对应$F_2(q^{-1})$, $\Delta u(t)$的左端项对应$G_2(q^{-1})$, $\xi(t+k)$的左端项对应$E_2(q^{-1})$.

假定前$j-1$步成立, $j>2$, 即前$j-1$步预测均与Diophantine方程等价, 现推导第j步是否成立. 记第$j-1$步预测为

$$y(t+k+j-2)=F_{j-1}(q^{-1})y(t+k-1)+G_{j-1}(q^{-1})\Delta u(t)+E_{j-1}(q^{-1})\xi(t+k), \quad (13)$$

则$F_{j-1}(q^{-1})$, $G_{j-1}(q^{-1})$和$E_{j-1}(q^{-1})$满足Diophantine方程的递推求解. 根据上面的推导, 第$j-1$步的$F_{j-1}(q^{-1})$, $G_{j-1}(q^{-1})$和$E_{j-1}(q^{-1})$应分别为n_a阶, n_b+j-2阶和$j-2$阶多项式.

将式(13)代入式(8)递推求解$y(t+k+j-1)$, 有

$$y(t+k+j-1)=[(1-a_1)F_{j-1}(q^{-1})+(a_1-a_2)F_{j-2}(q^{-1})+(a_2-a_3)F_{j-3}(q^{-1})+\cdots+(a_{j-3}-a_{j-2})\times F_2(q^{-1})+(a_{j-2}-a_{j-1})F_1(q^{-1})+\bar{A}_j(q^{-1})]\times y(t+k-1)+[B(q^{-1})+q^{-1}(1-a_1)\times G_{j-1}(q^{-1})+q^{-2}(a_1-a_2)G_{j-2}(q^{-1})+q^{-3}(a_2-a_3)G_{j-3}(q^{-1})+\cdots+q^{-(j-2)}(a_{j-3}-a_{j-2})G_2(q^{-1})+q^{-(j-1)}(a_{j-2}-a_{j-1})G_1(q^{-1})]\times\Delta u(t+j-1)+[1+q^{-1}(1-a_1)E_{j-1}(q^{-1})+q^{-2}(a_1-a_2)E_{j-2}(q^{-1})+q^{-3}(a_2-a_3)E_{j-3}(q^{-1})+\cdots+q^{-(j-2)}(a_{j-3}-a_{j-2})E_2(q^{-1})+q^{-(j-1)}(a_{j-2}-a_{j-1})E_1(q^{-1})]\xi(t+k+j-1),$$

其中

$$\bar{A}_j(q^{-1})=(a_{j-1}-a_j)+(a_j-a_{j+1})q^{-1}+\cdots+(a_{n_a-1}-a_{n_a})q^{-(n_a-j)}+a_{n_a}q^{-(n_a-j+1)}.$$

记$y(t+k+j-1)=F_j(q^{-1})y(t+k-1)+G_j(q^{-1})\Delta u(t)+E_j(q^{-1})\xi(t+k)$, 先证$F_j(q^{-1})$等价.

$$F_j(q^{-1})=[(1-a_1)f_{j-1}^0+(a_1-a_2)f_{j-2}^0+(a_2-a_3)f_{j-3}^0+\cdots+(a_{j-3}-a_{j-2})f_2^0+(a_{j-2}-a_{j-1})f_1^0+(a_{j-1}-a_j)]+[(1-a_1)f_{j-1}^1+(a_1-a_2)f_{j-2}^1+(a_2-a_3)f_{j-3}^1+\cdots+(a_{j-3}-a_{j-2})\times f_2^1+(a_{j-2}-a_{j-1})f_1^1+(a_j-a_{j+1})]q^{-1}+\cdots+[(1-a_1)f_{j-1}^{n_a-j}+(a_1-a_2)f_{j-2}^{n_a-j}+(a_2-a_3)f_{j-3}^{n_a-j}+\cdots+(a_{j-3}-a_{j-2})\times f_2^{n_a-j}+(a_{j-2}-a_{j-1})f_1^{n_a-j}+(a_{n_a-1}-a_{n_a})]q^{-(n_a-j)}+[(1-a_1)f_{j-1}^{n_a-j+1}+(a_1-a_2)f_{j-2}^{n_a-j+1}+(a_2-a_3)f_{j-3}^{n_a-j+1}+\cdots+(a_{j-3}-a_{j-2})f_2^{n_a-j+1}+(a_{j-2}-a_{j-1})f_1^{n_a-j+1}+a_{n_a})]q^{-(n_a-j+1)}+\cdots+[(1-a_1)f_{j-1}^{n_a}+(a_1-a_2)f_{j-2}^{n_a}+(a_2-a_3)f_{j-3}^{n_a}+\cdots+(a_{j-3}-a_{j-2})f_2^{n_a}+(a_{j-2}-a_{j-1})f_1^{n_a}]q^{-n_a}.$$

对前$j-1$步利用Diophantine方程的递推求解公式有

$$f_j^0=(1-a_1)f_{j-1}^0+(f_{j-1}^1-f_{j-2}^2)+(f_{j-2}^2-f_{j-3}^3)+\cdots+(f_3^{j-3}-f_2^{j-2})+(f_2^{j-2}-f_1^{j-1})+f_1^{j-1}=(1-a_1)f_{j-1}^0+f_{j-1}^1.$$

假定第j步前$i+1$项成立, $0\leqslant i\leqslant n_a-2$, 现求解第$i+2$项, 由$F_j(q^{-1})$的表达式可知

$$f_j^{i+1}=(1-a_1)f_{j-1}^{i+1}+(a_1-a_2)f_{j-2}^{i+1}+(a_2-a_3)f_{j-3}^{i+1}+\cdots+(a_{j-3}-a_{j-2})f_2^{i+1}+(a_{j-2}-a_{j-1})f_1^{i+1}+(a_{j+i}-a_{j+i+1}),$$

$$f_{j-1}^{i+2}=(1-a_1)f_{j-2}^{i+2}+(a_1-a_2)f_{j-3}^{i+2}+(a_2-a_3)f_{j-4}^{i+2}+$$

$$\cdots+(a_{j-3}-a_{j-2})f_1^{i+2}+(a_{j+i}-a_{j+i+1}).$$

两式相减得

$$\begin{aligned}&f_j^{i+1}-f_{j-1}^{i+2}=\\&(1-a_1)(f_{j-1}^{i+1}-f_{j-2}^{i+2})+(a_1-a_2)(f_{j-2}^{i+1}-f_{j-3}^{i+2})+\\&\cdots+(a_{j-3}-a_{j-2})(f_2^{i+1}-f_1^{i+2})+\\&(a_{j-2}-a_{j-1})f_1^{i+1}=\\&(1-a_1)(a_{i+1}-a_{i+2})f_{j-2}^0+(a_1-a_2)(a_{i+1}-\\&a_{i+2})f_{j-3}^0+\cdots+(a_{j-4}-a_{j-3})(a_{i+1}-a_{i+2})f_2^0+\\&(a_{j-3}-a_{j-2})(a_{i+1}-a_{i+2})f_1^0+(a_{j-2}-a_{j-1})f_1^{i+1}=\\&(a_{i+1}-a_{i+2})[(f_{j-1}^0-f_{j-2}^1)+\\&(f_{j-2}^1-f_{j-3}^2)+\cdots+(f_3^{j-4}-f_2^{j-3})+(f_2^{j-3}-\\&f_1^{j-2})]+(a_{j-2}-a_{j-1})f_1^{i+1}=\\&(a_{i+1}-a_{i+2})f_{j-1}^0-f_1^{i+1}f_1^{j-2}+f_1^{j-2}f_1^{i+1}=\\&(a_{i+1}-a_{i+2})f_{j-1}^0.\end{aligned}$$

因此有$f_j^{i+1}=f_{j-1}^{i+2}+(a_{i+1}-a_{i+2})f_{j-1}^0$, 与Diophantine方程一致. 再求解$f_j^{n_\mathrm{a}}$:

$$\begin{aligned}&f_j^{n_\mathrm{a}}=\\&(1-a_1)f_{j-1}^{n_\mathrm{a}}+(a_1-a_2)f_{j-2}^{n_\mathrm{a}}+(a_2-a_3)f_{j-3}^{n_\mathrm{a}}+\\&\cdots+(a_{j-3}-a_{j-2})f_2^{n_\mathrm{a}}+(a_{j-2}-a_{j-1})f_1^{n_\mathrm{a}}=\\&(1-a_1)f_{j-2}^0a_{n_\mathrm{a}}+(a_1-a_2)f_{j-3}^0a_{n_\mathrm{a}}+\\&(a_2-a_3)f_{j-4}^0a_{n_\mathrm{a}}+\cdots+(a_{j-3}-a_{j-2})f_1^0a_{n_\mathrm{a}}+\\&(a_{j-2}-a_{j-1})a_{n_\mathrm{a}}=\\&a_{n_\mathrm{a}}[(f_{j-1}^0-f_{j-2}^1)+(f_{j-2}^1-f_{j-3}^2)+\\&(f_{j-3}^2-f_{j-4}^3)+\cdots+(f_2^{j-3}-f_1^{j-2})+f_1^{j-2}]=\\&a_{n_\mathrm{a}}f_{j-1}^0.\end{aligned}$$

至此, $F_j(q^{-1})$等价证明完毕. 同理, 可以证明$G_j(q^{-1})$和$E_j(q^{-1})$与Diophantine方程也是等价的. 因此, CARIMA模型直接递推预测与Diophantine方程预测是完全等价的, 因而两者预测精度相同.

3.2 模型等价预测GPC算法(GPC algorithm with model equivalent predictor)

3.2.1 模型(Model)

将式(8)中的$B(q^{-1})\Delta$展开可得

$$\begin{aligned}B(q^{-1})\Delta=&\,b_0+(b_1-b_0)q^{-1}+(b_2-b_1)q^{-2}+\\&\cdots+(b_{n_\mathrm{b}}-b_{n_\mathrm{b}-1})q^{-n_\mathrm{b}}-b_{n_\mathrm{b}}q^{-(n_\mathrm{b}+1)}.\end{aligned}$$

记$\bar{B}(q^{-1})=B(q^{-1})\Delta$, 式(8)变为

$$y(t)=\bar{A}_1(q^{-1})y(t-1)+\bar{B}(q^{-1})u(t-k)+\xi(t).$$

对于每一个当前时刻t, $\xi(t)$为未知信息, 故用于预测的模型为

$$y(t)=\bar{A}_1(q^{-1})y(t-1)+\bar{B}(q^{-1})u(t-k).\quad(14)$$

3.2.2 预测(Prediction)

用式(14)首先递推预测$k-1$步, 然后在$k-1$步预测的基础上递推预测p步. 对于前$k-1$步预测, 预测到$\hat{y}^t(t+k-1|t)$, 用到的都是已知信息, 控制量移位到$u(t-1)$. 之后的p步预测中, 即$t+k$到$t+k+p-1$的预测时刻中, 控制量保持$u(t-1)$的值不变而逐步移位递推. 预测完成后, 用后p步的预测值构造Y^t.

3.2.3 G矩阵(G matrix)

在式(14)中令$t-1$时刻及以前的被控量为0, $t-k$时刻之前的控制量为0, $t-k$时刻及以后的控制量恒等于1, 往后递推p步, 得到的$y(t), y(t+1), \cdots, y(t+p-1)$ 即为p步单位阶跃响应序列, 用其构造出G矩阵. 显然, 用预测模型直接递推预测G矩阵比用预测模型系数递推计算[19]要简便的多. 设定值规划与原GPC保持一致, 按照式(7)计算控制量.

3.2.4 算法复杂度分析(Complexity analysis of the algorithm)

模型等价预测GPC与原GPC的区别仅在于预测值Y^t和G矩阵的来源不同. 因此, 仅从这两方面分析算法的复杂度.

原GPC复杂度主要由Diophantine方程递推求解和输出预测的复杂度构成:

$$\begin{aligned}&\mathrm{O}(n_\mathrm{a},n_\mathrm{b},k,p)=\\&[(k+p-1)(n_\mathrm{a}+1)+\sum_{j=1}^{k+p-1}(n_\mathrm{b}+j-1)]+p=\\&(k+p-1)(n_\mathrm{a}+n_\mathrm{b})+\frac{(k+p)(k+p-1)}{2}+p.\end{aligned}$$

模型等价预测GPC复杂度主要由生成预测模型、输出预测、被控量移位、控制量移位和填充的复杂度构成:

$$\begin{aligned}&\mathrm{O}(n_\mathrm{a},n_\mathrm{b},k,p)=\\&[(n_\mathrm{a}+1)+(n_\mathrm{b}+2)]+\\&[(k-1)+p]+n_\mathrm{a}+(n_\mathrm{b}+k)+p=\\&2(n_\mathrm{a}+n_\mathrm{b}+k+p+1).\end{aligned}$$

在复杂度函数中n_a, n_b和k都比较小, 一般为个位数, 而p则比较大, 能高达数十. 因此, 对复杂度的影响p占主要因素. 从两种算法的复杂度函数中可以看出, Diophantine方程预测为p的二阶函数, 模型等价预测为p的一阶函数, 复杂度降低了一个阶次. 从通常的取值来看, 复杂度降低了10倍左右.

模型等价预测GPC与原GPC具有相同的设定值规划, 相同的预测值和G矩阵, 因此两者的控制效果相同. 由于模型等价预测GPC的预测复杂度大大降低, 因而更为实用. 基于模型等价预测GPC与原GPC在预测值和控制效果上的完全等价性, 为表述方便, 后文

中亦将其称之为GPC. 文献[19, 21]的研究进一步简化了计算控制量时逆矩阵的求解, 使得GPC的实现愈加简便.

4 比例积分控制加广义预测控制(Proportional-integral control plus generalized predictive control, PI+GPC)

4.1 PID控制(PID control)

作为工业控制中的主干力量, 工业三项PID控制器已经使用了一个多世纪[22]. 它具有原理简单、直观易懂、易于工程实现、鲁棒性强, 适用面广等一系列优点. 数字PID 控制器的输出递推表达式为

$$u(t)=u(t-1)+K_{\rm p}[e(t)-e(t-1)]+K_{\rm i}e(t)+K_{\rm d}[e(t)-2e(t-1)+e(t-2)], \tag{15}$$

其中: $u(t)$和$e(t)$分别是t时刻的控制量和偏差量, $K_{\rm p}$, $K_{\rm i}$和$K_{\rm d}$分别为比例、积分和微分系数.

4.2 基于PI补偿的GPC(GPC with PI compensation)

GPC的任务是使系统未来的输出尽可能地靠近参考轨迹[11]. 由于GPC是依据预测的未来偏差计算控制量的, 并不考虑当前时刻及以前的偏差对控制系统的影响. 从这种意义上说, GPC只向前看, 虽然其也考虑了历史输出, 但仅用于预测未来输出. 它以自己的预测机制不断预测未来的输出, 并不断给出预测控制作用, 而没有考虑当前甚至之前的系统输出是否达到相应的规划值. 显然, 这些都是需要考虑的. 实际上, 每一步的预测控制作用首先用来克服当前时刻的偏差, 然后跟踪下一步的规划值, 加之预测误差的存在[20]和被控对象的惯性作用等因素, 使得系统的实际输出难以达到预期的规划值. 这样每一步的控制都会产生累计偏差, 使得系统输出收敛到设定值的速度缓慢. 如果考虑了当前和历史偏差的影响, GPC的控制速率有望提高. 文献[20]对预测误差进行了补偿, 本文基于PI是依据历史和当前偏差的控制算法, 考虑再用PI对GPC的历史和当前偏差进行控制量的补偿. 其控制结构框图如图1所示.

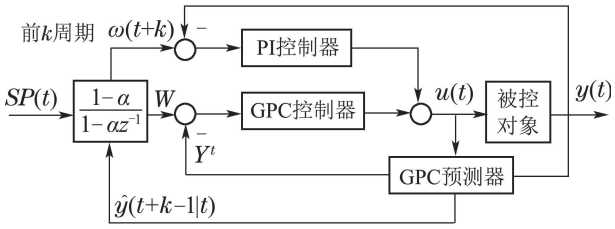

图 1 基于PI补偿的GPC控制结构框图

Fig. 1 Block diagram of GPC with PI compensation

基于PI补偿的GPC控制效果见第5节.

PI是依据历史和当前运行状况的控制算法, 本身不具有预测功能, 它不能预知系统下一个控制周期及以后的输出而提前改变控制量. 在满足系统带宽的前提下, 往往响应剧烈, 产生很大超调. 如果考虑了未来偏差, PI的控制作用将会趋于缓和.

综合考虑PI和GPC的优缺点, 将两者结合起来将会是一种很好的控制算法. 目前文献中已有的PID型GPC算法, 或是串联积分型的GPC[23], 或是PID性能指标型的GPC[24–28], 或是用GPC进行PID参数整定的控制[29–30], 或是GPC–PID的串级控制[31–32]. 这些都是基于预测输出的控制算法, 且都是以参考轨迹为跟踪输入的控制算法, 而实际中更希望输出能直接跟踪参考输入, 因此本文第 4.3 节提出了一种新型的PI+GPC算法.

4.3 比例积分控制加广义预测控制 (proportional-integral control plus generalized predictive control, PI+GPC)

将式(7)中的控制量增量和式(15)中的PI控制量增量相结合, 写成控制器输出的递推表达式为

$$u(t)=u(t-1)+K_{\rm p}[e(t)-e(t-1)]+K_{\rm i}e(t)+\bar{G}^{\rm T}(W-Y^t). \tag{16}$$

考虑到实际应用时根据对象特性和系统设计要求的不同可能会对PI或GPC有所侧重, 因此其一般表达式为

$$u(t)=u(t-1)+\beta\{K_{\rm p}[e(t)-e(t-1)]+K_{\rm i}e(t)\}+\gamma\bar{G}^{\rm T}(W-Y^t), \tag{17}$$

式中: β为PI控制的权重, $\beta\geqslant 0$, β越大, PI控制作用越强; γ为GPC的权重, $\gamma\geqslant 0$, $\beta^2+\gamma^2\neq 0$, γ越大, GPC作用越强.

将式(17)称为PI+GPC控制器, 显然, PI+GPC是PI和GPC的有机统一, 其真正意义上实现了依据历史, 当前和未来偏差计算控制量, 是一种通用增量式控制器. 它既能更好地解决PI和GPC单独能够解决的控制回路, 也有可能解决PI和GPC单独不能解决的控制回路. 特别地, 当$\beta=1$, $\gamma=0$时退化为PI控制器; 当$\beta=0$, $\gamma=1$时退化为GPC控制器; 当$\beta=0$, $\gamma\neq 0$时退化为β增量型GPC控制器[4, 33]. β和γ的具体影响和选取见第5节. PI+GPC的控制结构框图如图2所示.

PI+GPC的算法设计流程为:

1) 建立被控对象的离散数学模型;

2) 分别设计一个数字PI控制器(满足带宽且稍高于带宽, 快速的动态响应和零稳态偏差)和一个GPC控制器(具有一定带宽, 尽量满足带宽, 快速平滑的动态响应和零稳态偏差)并选定β和γ的值, 这步通过仿真完成;

3) 系统初始化, 包括$u(t-1)$, $e(t-1)$, $y(t-1)$, $\cdots$的初始化等;

4) 按式(14)构造预测模型;

5) 采样, 得到$y(t)$, 计算$e(t)$, 用预测模型直接递推计算Y^t和G, 再计算W和$\bar{G}^{\mathrm{T}}$等, 模型在线辨识;

6) 用式(17)计算$u(t)$, 输出限幅, 返回4); 如果没有模型在线辨识直接返回5).

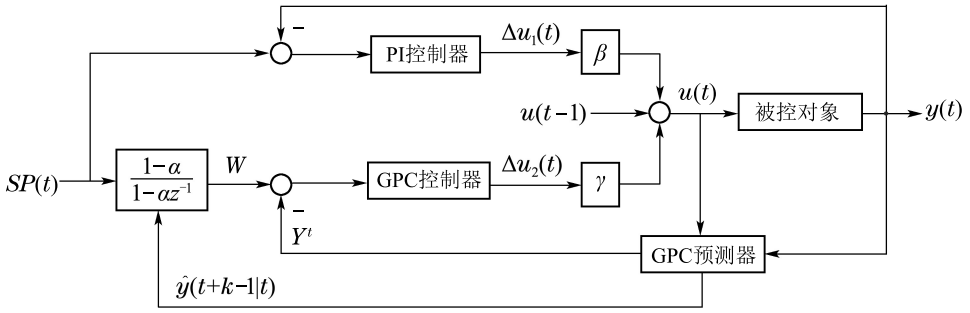

图 2 PI+GPC控制结构框图

Fig. 2 Block diagram of PI+GPC

5 应用(Applications)

5.1 仿真研究和实物验证(Simulation research and platform authentication)

某光电稳定伺服系统采用60 V三相无刷直流力矩电机作为执行机构, 以DSP为控制器, FPGA为驱动器. DSP计算出的控制量以数字编码的形式输出给FPGA, FPGA计算出码值并用锯齿波对其进行脉宽调制, 输出具有一定占空比的PWM波, 控制三相电枢绕组与60 V直流电源的通断状态, 从而实现一定的转向和转速控制. 整个控制回路中暂无电流反馈, 速率环采样周期为1 ms, 电机带载离散传递函数为

$$G(z)=10^{-6}\frac{6.545+13.09z^{-1}+6.545z^{-2}}{1-1.629z^{-1}+0.6292z^{-2}}.$$

根据系统要求, 闭环带宽不低于20 Hz. 分别对其设计数字PI控制器和GPC控制器, PI控制器参数为$K_{\mathrm{p}}=1519.12$, $K_{\mathrm{i}}=158.3$; GPC控制器参数为$\alpha=0.89$, $p=30$, $\lambda=0.00001$; PI补偿GPC的补偿PI参数为$K_{\mathrm{p}}=350$, $K_{\mathrm{i}}=0.01$; 保持单独PI和GPC的控制参数不变, 取$\beta=1$, $\gamma=0.55$确定PI+GPC. 控制器输出的限幅为12000, 对应75%的PWM波占空比. 以10°/s的阶跃信号为输入, PI, GPC, PI补偿GPC和PI+GPC作用下的性能指标与控制效果分别见表1和图3.

从表1和图3中可以看出, PI响应速度很快, 无稳态偏差, 但响应剧烈, 有25.5%的超调量和3次波动. GPC则响应很慢, 但能比PI及早进入稳态, 无稳态偏差. 显然, PI补偿GPC比GPC的速度更快了, 这正说明了考虑当前和历史偏差的重要性. 更进一步, PI+GPC则表现出了明显的优势, 与PI作用相比说明了考虑未来偏差的重要性. 几种控制算法的快速性比较: PI>PI+GPC>PI补偿GPC>GPC; 稳态性能比较: PI+GPC>PI补偿GPC>GPC>PI. PI+GPC综合考虑了历史, 当前和未来时刻的偏差, 做到了以很快的速度上升, 在很短的时间稳定, 控制性能最好.

表 1 PI, GPC, PI补偿GPC和PI+GPC作用的性能指标

Table 1 Control performance index of PI, GPC, GPC with PI compensation, and PI+GPC

控制算法	PI	GPC	PI补偿GPC	PI+GPC
上升时间/ms	13	25	23	16
超调量/%	25.5	0	0	0
调节时间/ms	72	40	36	27
稳态偏差/((°) · s^{-1})	0	0	0	0
系统带宽/Hz	22.6	13.6	15.6	21.9

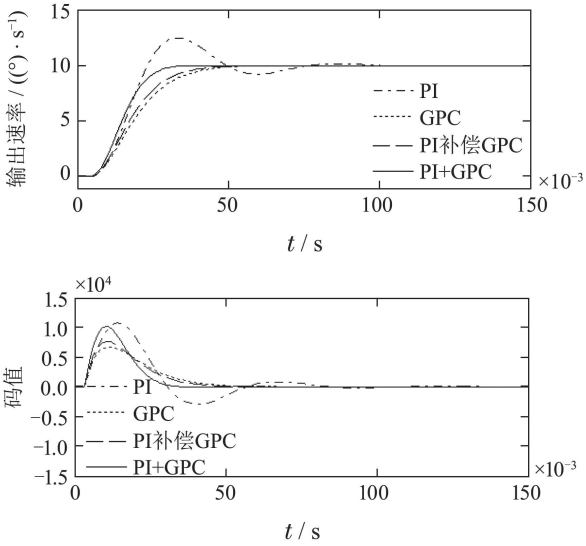

图 3 PI, GPC, PI补偿GPC和PI+GPC作用下的控制效果

Fig. 3 Control effects of PI, GPC, GPC with PI compensation, and PI+GPC

为进一步考察PI+GPC的频域响应特性, PI+GPC

和PI对幅值为10(°)/s, 频率为5 Hz, 占空比为50%的方波信号输入的响应结果如图4所示, 对幅值为10(°)/s, 频率为5 Hz的正弦信号输入的响应结果如图5所示.

从图4中可以看出, PI+GPC能够很好的跟踪方波输入, 而PI存在超调, 甚至没有达到稳态. 从图5中可以看出, PI+GPC能够较好的跟踪正弦波输入, 幅值没有衰减, 存在6 ms的相角时延, 这对控制系统来说属正常现象. PI作用幅值很大, 没有相角时延, 这是由于PI作用下的闭环幅频特性具有一个谐振点, 显然PI+GPC将这个谐振点消除了. 总之, PI+GPC具有良好的频域特性, 其带宽也达到了20 Hz的设计要求.

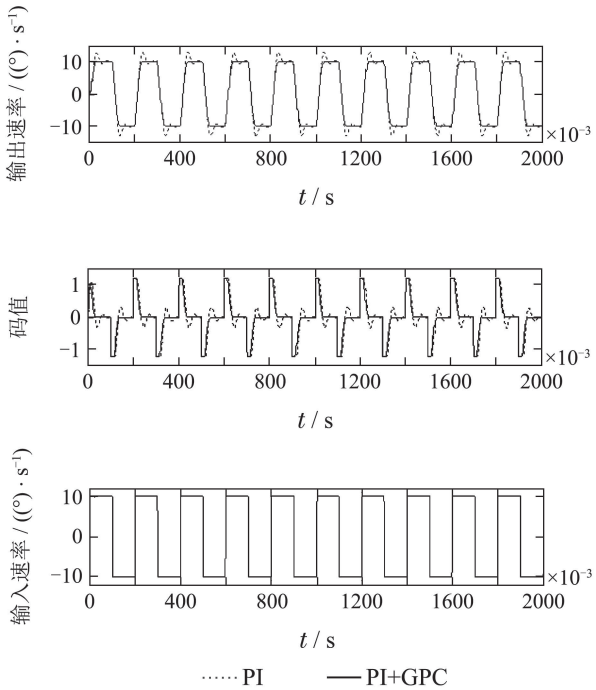

图 4 PI+GPC和PI的方波响应特性

Fig. 4 Square-wave responses of PI and PI+GPC

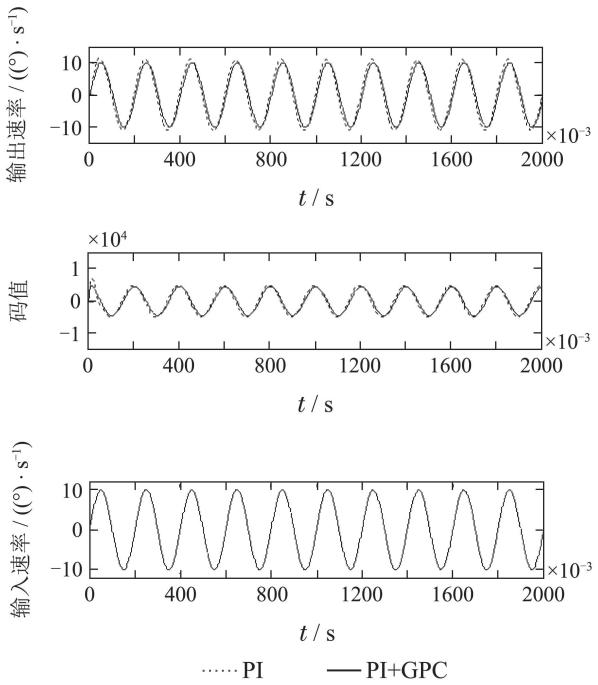

图 5 PI+GPC和PI的正弦响应特性

Fig. 5 Sine-wave responses of PI and PI+GPC

将上述PI和PI+GPC保持参数不变, 分别作用于该光电稳定伺服系统的实物上. 以幅值为10(°)/s, 周期为4 s, 占空比为50%的方波信号为输入, 控制效果分别如图6(a) 和图6(b) 所示. 将转台输入置为0(°)/s, 以幅值为2°, 频率为1 Hz的正弦位置扰动信号进行摇摆试验, PI和PI+GPC作用下的稳定效果分别如图7(a)和图7(b)所示. 图6–7中转台相对空间位置的单位为mil, 1 mil = 360°/6000 = 0.06°. 由于试验时转台所处位置不同, 数据存取的时间也不同, 因此图与图之间不存在时间上的对应关系, 而同一幅图里的速率曲线和位置变化曲线具有时间对应关系.

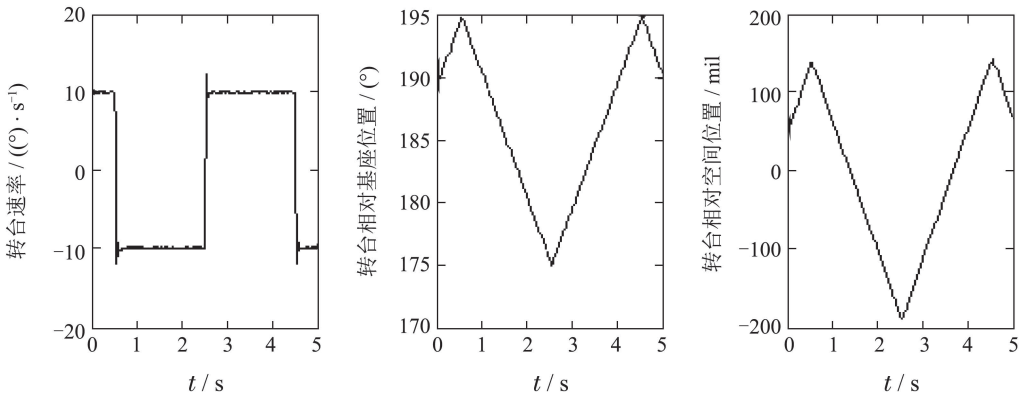

图 6(a) PI作用下的方波响应

Fig. 6(a) Square-wave response of PI

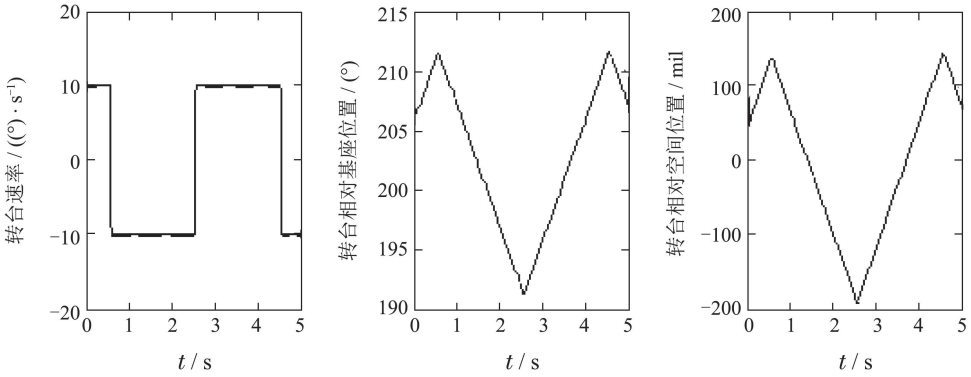

图 6(b) PI+GPC作用下的方波响应

Fig. 6(b) Square-wave response of PI+GPC

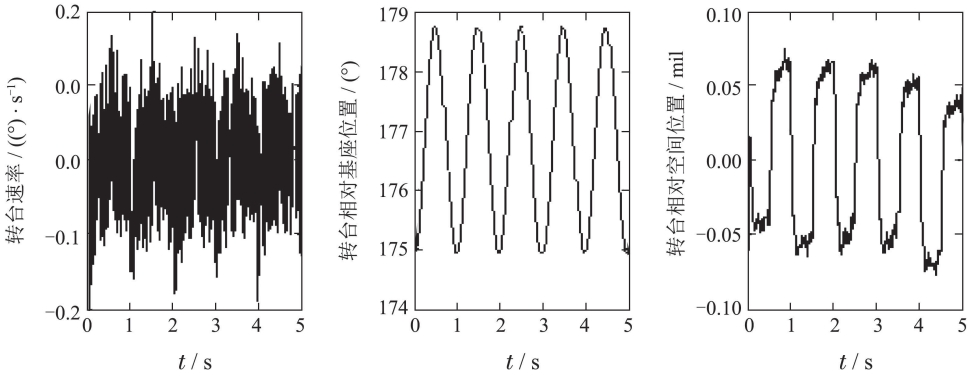

图 7(a) 正弦摇摆下的PI稳定控制效果

Fig. 7(a) Stability control effect of PI in sine swing test

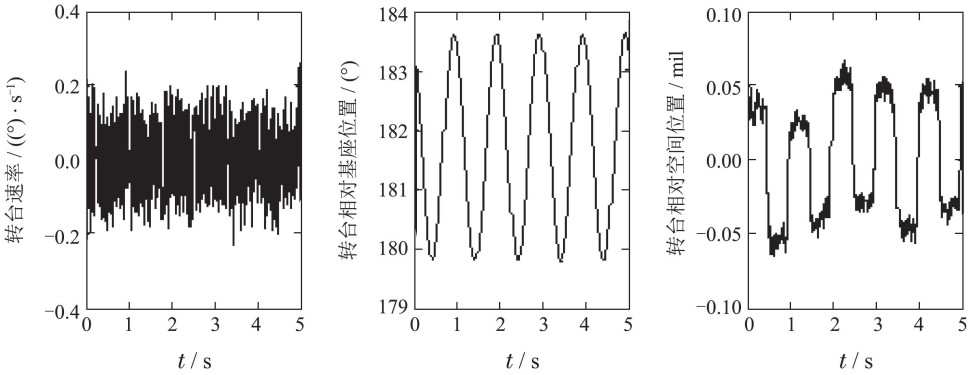

图 7(b) 正弦摇摆下的PI+GPC稳定控制效果

Fig. 7(b) Stability control effect of PI+GPC in sine swing test

从图6–7中可以看出, 在PI+GPC作用下, 转台对方波信号具有很好的跟踪效果, 而PI作用下有约25%的超调量. 在稳定控制效果上, PI+GPC作用下转台的空间相对位置变化约为±0.065 mil, PI 作用下的空间相对位置变化约为±0.075 mil. 用最小二乘法对转台的空间相对位置变化求标准差得到转台的稳定控制精度, PI+GPC作用下为0.0395 mil, PI 作用下为0.0502 mil, PI+GPC 比PI提高了0.0107 mil.

5.2 β和γ的选取规则(Selection rules of β and γ)

β和γ的选取对控制效果的影响如图8所示.

β和γ的取值与图8中曲线的对应关系见表2.

对照图7和表2, 由①②③可知, GPC改善了PI的平稳性, 随着GPC作用的增强, 超调量逐渐减小, 带宽逐渐降低. 由③④⑤可知, PI改善了GPC的快速性, 随着PI作用的增强, 响应速度逐渐加快, 带宽逐渐升高. 由③⑥⑦可知, 当PI和GPC取相同的权重时, 若权重小于1则动态响应加快; 若权重大于1, 则动态响应变慢, 调节时间延长. 研究中取相同的权重时, 权重从1逐渐降低的过程中本研究对象的带宽先升后降, 权重从1逐渐增加的过程中带宽则逐

渐降低, 当权重为0.76时系统取得最高带宽20.5 Hz, 这个带宽低于曲线②和曲线①的带宽.

β和γ的选取根据控制系统设计的侧重而有所不同. 若控制系统更注重快速性, 则应以PI为主, 取$\beta = 1$,并适当增加GPC的权重$\gamma \leqslant 1$来改善平稳性. 若控制系统更强调平稳性, 则应以GPC为主, 取$\gamma = 1$, 并适当增加PI的权重来改善快速性. 特别的, 当算法中$K_{\rm p} = 0$时, 适当调整β, $K_{\rm i}$和γ的值也能获得本试验中类似的控制效果. 此时, 只需设计一个GPC控制器, 并在此基础上通过调整β, $K_{\rm i}$和γ来进行进一步的设计, 由于算法中的可调参数减少了一个, 算法得以简化.

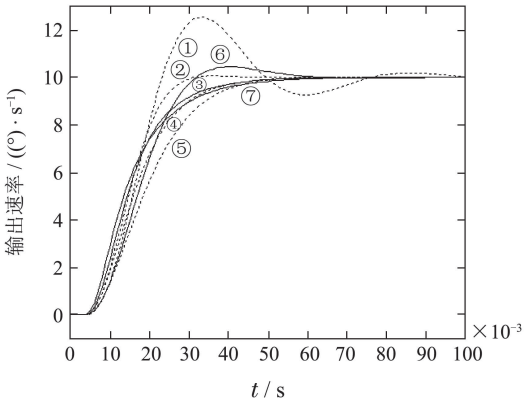

图 8 选取不同β和γ的控制效果

Fig. 8 Control effects with different values of β and γ

表 2 图8中曲线与β和γ取值的对应关系

Table 2 Corresponding relation of curves in Fig.8 and values of β and γ

曲线	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
线型	虚	虚	实	虚	虚	实	实
β	1	1	1	0.5	0	0.5	1.5
γ	0	0.5	1	1	1	0.5	1.5
上升时间/ms	13	15	22	22	25	18	24
超调量/%	25.5	0.7	0	0	0	4.5	0
调节时间/ms	72	26	35	36	40	29	38
稳态偏差/$((^\circ)\cdot s^{-1})$	0	0	0	0	0	0	0
系统带宽/Hz	22.6	22	20.4	17.4	13.6	20.2	19.4

6 结论(Conclusions)

由于PI不具有预测功能, 它不能预知系统未来的输出而提前改变控制量, 用于光电稳定伺服系统时往往响应剧烈, 产生很大超调, 因而针对光电稳定伺服系统研究了基于未来偏差进行控制的GPC. 首先对CARIMA模型直接递推预测进行了研究, 从数学上证明了其与Diophantine方程预测等价, 并分析出预测复杂度降低了一个阶次. 由于GPC控制器只考虑了未来偏差, 而没有考虑当前和历史偏差的影响, 因而提出了基于PI补偿的GPC算法, 比GPC的响应速度有所提高. 综合考虑PI和GPC的优缺点, 将两者结合起来提出了一种新型基于PI增量和GPC增量加权的PI+GPC控制算法, 实现了基于历史, 当前和未来偏差计算控制量, 并给出了算法设计流程和参数选取规则. 在某光电稳定伺服系统上进行验证, 达到了对方波信号快速平稳跟踪的效果, 且在正弦位置摇摆试验下稳定控制精度比PI提高了0.0107 mil.

参考文献(References):

[1] LI Sifu. *Fundamental of Computer Control* [M]. Second Edition. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2006.
(李嗣福. 计算机控制基础 [M]. 第2版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2006.)

[2] CLARKE D W, MOHTADI C, TUFFS P S. Generalized predictive control—part I. The basic algorithm [J]. *Automatica*, 1987, 23(2): 137 – 148.

[3] CLARKE D W, MOHTADI C, TUFFS P S. Generalized predictive control—part II. Extensions and interpretations [J]. *Automatica*, 1987, 23(2): 149 – 160.

[4] SUN Mingwei, CHEN Zengqiang, YUAN Zhuzhi. B-type incremental generalized predictive control [J]. *Control Theory & Applications*, 2000, 17(2): 165 – 168, 174.
(孙明玮, 陈增强, 袁著祉. β增量型广义预测控制 [J]. 控制理论与应用, 2000, 17(2): 165 – 168, 174.)

[5] HU Yaohua, JIA Xinle. Generalized predictive control of ships subject to state constraints [J]. *Control Theory & Applications*, 2000, 17(4): 542 – 547.
(胡耀华, 贾欣乐. 具有约束条件的船舶运动预测控制 [J]. 控制理论与应用, 2000, 17(4): 542 – 547.)

[6] SHI Xiaoping, ZHANG Weiping. Simulation study of generalized predictive control of vibration for the sub-micro ultra-precision turning machine [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38(2): 148 – 151.
(史小平, 张为平. 亚微米超精密车床隔振的广义预测控制仿真研究 [J]. 机械工程学报, 2002, 38(2): 148 – 151.)

[7] NIE Xueyuan, WANG Heng. Compensator design and stability analysis for networked control systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(2): 217 – 222.
(聂雪媛, 王恒. 网络控制系统补偿器设计及稳定性分析 [J]. 控制理论与应用, 2008, 25(2): 217 – 222.)

[8] CHEN Dan, XI Ning, WANG Chaoyue, et al. Generalized predictive control scheme for the internet-based telerobot control system [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(3): 191 – 196.
(陈丹, 席宁, 王超越, 等. 广义预测控制方法在网络遥操作机器人系统中的应用 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 191 – 196.)

[9] XU Jian'an, REN Liguo, YANG Liping, et al. Generalized predictive control and energy consumption analysis of autonomous underwater vehicle [J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(10): 1148 – 1150.
(徐建安, 任立国, 杨立平, 等. 水下机器人广义预测控制算法及能耗问题研究 [J]. 控制理论与应用, 2009, 26(10): 1148 – 1150.)

[10] CHENG Lu, JIANG Changsheng, WEN Jie, et al. Integrated flight/propulsion fuzzy adaptive generalized predictive control for near-space vehicle [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(1): 127 – 133.
(程路, 姜长生, 文杰, 等. 近空间飞行器飞/推一体化模糊自适应控制 [J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(1): 127 – 133.)

[11] FENG Shizhu, XU Ming, ZHAO Dingxuan, et al. Research on a novel parallel hydraulic haptic master servo control system [J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33(10): 1237 – 1242.
(冯石柱, 徐鸣, 赵丁选, 等. 新型液压并联遥操纵手力反馈伺服控制研究 [J]. 兵工学报, 2012, 33(10): 1237 – 1242.)

[12] HUANG Tingguo, WANG Lu, SU Jianbo. Nonlinear disturbance rejection control of unmanned aerial vehicle attitude [J]. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(4): 456 – 463.
(黄廷国, 王璐, 苏建波. 无人驾驶飞行器姿态的非线性扰动抑制控制 [J]. 控制理论与应用, 2015, 32(4): 456 – 463.)

[13] LIU Xudong, LI Ke, SUN Jing, et al. Generalized predictive control based on extended state observer for permanent magnet synchronous motor system [J]. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(12): 1613 – 1619.
(刘旭东, 李珂, 孙静, 等. 基于广义预测控制和扩展状态观测器的永磁同步电机控制 [J]. 控制理论与应用, 2015, 32(12): 1613 – 1619.)

[14] JIN Yuanyu, GU Xingyuan. Modified generalized predictive control algorithm [J]. *Information and Control*, 1990, 19(3): 8 – 14.
(金元郁, 顾兴源. 改进的广义预测控制算法 [J]. 信息与控制, 1990, 19(3): 8 – 14.)

[15] JIN Yuanyu, GU Xingyuan. Modified multivariable generalized predictive control algorithm [J]. *Information and Control*, 1990, 19(6): 20 – 23.
(金元郁, 顾兴源. 改进的多变量广义预测控制算法 [J]. 信息与控制, 1990, 19(6): 20 – 23.)

[16] LI Qi'an, WANG Shuqing, CHU Jian. Direct algorithm for coefficients of generalized predictive control [J]. *Information and Control*, 2006, 35(3): 319 – 324.
(李奇安, 王树青, 褚健. 广义预测控制器系数直接算法 [J]. 信息与控制, 2006, 35(3): 319 – 324.)

[17] LI Qi'an, CHU Jian. Direct algorithm for multivariable generalized predictive controller's coefficients of diagonal CARIMA model [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, 33(1): 59 – 65.
(李奇安, 褚健. 对角CARIMA模型多变量广义预测控制器系数直接算法 [J]. 自动化学报, 2007, 33(1): 59 – 65.)

[18] SHI Wuxi. Explicit solution of Diophantine matrix polynomial equations in generalized predictive control [J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(2): 261 – 263.
(师五喜. 广义预测控制中Diophantine矩阵多项式方程的显式解 [J]. 控制理论与应用, 2007, 24(2): 261 – 263.)

[19] JIN Yuanyu. A new type of adaptive generalized predictive control [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1992, 18(3): 353 – 357.
(金元郁. 一种新型的自适应广义预测控制 [J]. 自动化学报, 1992, 18(3): 353 – 357.)

[20] SHU Diqian, SHI Zhongsuo. Global convergence of implicit self-tunig generalized predictive controller [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1995, 21(5): 545 – 554.
(舒迪前, 石中锁. 隐式自校正广义预测控制器及其全局收敛性分析 [J]. 自动化学报, 1995, 21(5): 545 – 554.)

[21] YUAN Zhuzhi. Recursive generalized predictive STC [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1989, 15(4): 348 – 351.
(袁著祉. 递推广义预测自校正控制器 [J]. 自动化学报, 1989, 15(4): 348 – 351.)

[22] ZHANG Peng. *Advanced Industrial Control Technology* [M]. First Edition. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier Inc., 2010.

[23] LÜ Jianhong, XU Zhigao, CHEN Laijiu. Continuous-time generalized predictive control with inherent integral action (CIGPC) [J]. *Control Theory & Applications*, 1993, 10(4): 361 – 366.
(吕剑虹, 徐治皋, 陈来九. 连续时间域内具有积分作用的广义预测控制(CIGPC) [J]. 控制理论与应用, 1993, 10(4): 361 – 366.)

[24] CHEN Zengqiang, CHE Haiping, YUAN Zhuzhi. A generalized predictive self-tuning controller with proportion and integration structure [J]. *Control and Decision*, 1994, 9(2): 105 – 110.
(陈增强, 车海平, 袁著祉. 具有比例积分结构的广义预测自校正控制器 [J]. 控制与决策, 1994, 9(2): 105 – 110.)

[25] WANG Qunxian, CHEN Zengqiang, YUAN Zhuzhi. PID structure predictive self-tuning controller based on BP neural network [J]. *Control and Decision*, 1998, 13(2): 185 – 188.
(王群仙, 陈增强, 袁著祉. 基于BP网络的PID型预测自校正控制器 [J]. 控制与决策, 1998, 13(2): 185 – 188.)

[26] LI Tao, CHEN Zengqiang, ZHANG Jifeng. Stability analysis of systems with proportional-integral generalized predictive control [J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(1): 19 – 24.
(李韬, 陈增强, 张纪峰. 比例积分型广义预测控制系统的稳定性分析 [J]. 控制理论与应用, 2007, 24(1): 19 – 24.)

[27] ZHANG Jun, LUO Dayong. The application of GPC control and PID control to coagulant dosing [J]. *Information and Control*, 2012, 41(1): 89 – 94.
(张俊, 罗大庸. 广义预测控制和PID控制在混凝投药中的应用 [J]. 信息与控制, 2012, 41(1): 89 – 94.)

[28] GUO Wei, CHEN Chen, WANG Hanjie, et al. Applications of an improved multivariable generalized predictive control in ball mill pulverizing system [J]. *Control Engineering of China*, 2016, 23(1): 48 – 53.
(郭伟, 陈琛, 王汉杰, 等. 一种改进的多变量广义预测控制在球磨机制粉系统中的应用 [J]. 控制工程, 2016, 23(1): 48 – 53.)

[29] DONG Xiaokun, FANG Yongchun, ZHANG Xuebo. Generalized predictive control and imaging for atomic force microscope systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(8): 1058 – 1063.
(董晓坤, 方勇纯, 张雪波. 原子力显微镜系统广义预测控制与成像 [J]. 控制理论与应用, 2015, 32(8): 1058 – 1063.)

[30] WANG Jianguo, GOU Xiaowei. GPC–PID control for boiler intermediate point temperature based on online identification [J]. *Control Engineering of China*, 2013, 20(4): 631 – 634.
(王建国, 苟晓卫. 基于在线辨识的锅炉中间点温度GPC–PID控制 [J]. 控制工程, 2013, 20(4): 631 – 634.)

[31] PENG Yan, WU Weiqing, LIU Mei, et al. USV tracking control based on cascade GPC–PID [J]. *Control Engineering of China*, 2014, 21(2): 245 – 248.
(彭艳, 吴伟清, 刘梅, 等. 无人艇航迹跟踪GPC–PID串级控制 [J]. 控制工程, 2014, 21(2): 245 – 248.)

[32] LU Dandan, YUAN Fenglin, DING Shuai, et al. Research on adaptive generalized predictive control of batch reactor [J]. *Control Engineering of China*, 2015, 22(5): 891 – 895.
(卢丹丹, 袁枫林, 丁帅, 等. 间歇反应器自适应广义预测控制研究 [J]. 控制工程, 2015, 22(5): 891 – 895.)

[33] ZHANG Xinghui, CHEN Zengqiang, YUAN Zhuzhi. Analysis on the closed-loop properties of β–GPC [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2003, 25(2): 198 – 201, 253.
(张兴会, 陈增强, 袁著祉. β–GPC闭环特性分析 [J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(2): 198 – 201, 253.)

作者简介:

薛生辉 (1989–), 男, 工程师, 硕士, 目前研究方向为稳定伺服控制及系统总体技术, E-mail: abrahamxue@sina.com;

曲俊海 (1979–), 男, 研究员级高级工程师, 博士研究生, 目前研究方向为稳定伺服系统总体技术, E-mail: 2403500515@qq.com;

王永宏 (1977–), 男, 研究员级高级工程师, 硕士, 目前研究方向为稳定伺服控制及系统总体技术, E-mail: 77518434@qq.com;

张红梅 (1987–), 女, 工程师, 硕士, 目前研究方向为稳定伺服控制技术, E-mail: 123862169@qq.com;

师永平 (1985–), 男, 工程师, 硕士, 目前研究方向为稳定伺服控制及系统总体技术, E-mail: yongping.s@163.com;

薛美盛 (1969–), 男, 副教授, 博士, 目前研究方向为工业过程先进控制与优化, E-mail: xuems@ustc.edu.cn.