

应用在线整定广义最小方差多项式权值的测头控制方法

邵伟, 郭俊杰, 周阿维

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 在曲面工件的高精度、高效率自动扫描测量过程中, 为了提高测头自动跟踪扫描控制的精度和平稳性, 提出了基于在线整定多项式权值的广义最小方差(OSPW_GMV)控制方法. 该方法的主要思想是根据在线估计的被控对象参数及 OSPW_GMV 的输出, 在线调整多项式的权值, 实现测头自动跟踪扫描的控制. 实验结果证明, 使用具有高跟踪精度和强鲁棒性的 OSPW_GMV 控制器, 可使测头跟踪过程的误差小于 0.1 mm 的跟踪要求, 且每次运算时间与广义最小方差控制器相差不多, 因此该控制方法在一些实时性及控制精度要求较高的精密检测场合, 有较好的应用价值.

关键词: 扫描测量; 广义最小方差控制; 在线整定; 多项式权值

中图分类号: TH86 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)04-0100-04

Control Strategy Based on Online Setting Polynomial Weights of Generalized Minimum Variance for Measuring Probe

SHAO Wei, GUO Junjie, ZHOU Awei

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In the process of rapid, precise scanning measurement of curved surface parts, for improving accuracy and stability in the automatic tracking controlling of probe, a generalized minimum variance strategy with online setting polynomial weights (OSPW_GMV) is introduced, where the polynomial weights can be obtained to fulfill the automatic tracking controlling of probe according to the real-time identification of plant parameters with the output of OSPW_GMV controller. The experimental results confirm the high tracking accuracy and robustness of OSPW_GMV controller, the tracking accuracy gets up to 0.1 mm during the automatic tracking process of probe, and the consuming time of each execution step approaches to that of the GMV controller.

Keywords: scanning measurement; generalized minimum variance control; online setting; polynomial weights

对曲面工件测量时, 由于曲面幅度的变化往往超过了测头的测量范围, 因此对于曲面工件测量控制主要包括 x 、 y 方向测量路径的精确控制和 z 方向的测头自动跟踪扫描控制. 其中 x 、 y 方向测量路径的精确控制可以直接利用现有的数控系统来实现, 而测头自动跟踪扫描控制的精度和平稳性直接

决定了系统的测量精度和测量效率. 因此, 如何实现测头自动跟踪扫描的控制精度和运行速度至关重要. 测头扫描运动由于其自身状态、任务目标的在线变化以及运行环境的不确定性, 故测头扫描运动系统呈现非线性、时变特性, 使得常规的定参数控制律^[1-4]不能满足设计要求. 本文采用自适应控制策略

对测头进行精密控制,以最大限度地抵消非线性因素的影响,提高系统的跟踪精度与鲁棒性能.如果控制系统不能实时地改变自身参数以适应这些变化,则有可能造成系统不稳定或跟踪误差增大,导致系统跟踪精度及鲁棒性降低.因此,为了提高控制精度和平稳性,就需要设计适应能力强、鲁棒性好的运动控制器.

在工程实际中,由于比例-积分-微分(PID)控制方法^[5]具有简单及可靠性高等优点,被广泛应用,但其本身并没有自适应能力,当被控对象模型参数发生改变或者系统出现扰动时,系统的性能可能会变差,甚至不稳定.在测头自动跟踪扫描测量过程中,由于环境变化的影响,使得系统各个环节呈现非线性、时变特性,这就要求PID控制器参数能根据实际状况进行相应的调整.运用模糊控制方法^[6-7],通过经验来建立模糊规则,根据已知条件,得到所需的输出值.但是,如果规则较多,推理时间较长,就有可能影响实时性.结合自适应控制中广义最小方差(GMV)^[8]与模糊PID控制原理,形成的GMV-Fuzzy PID控制方法具有较好的性能,但运算量大,效率低,并且在起始阶段,由于控制器所获信息量少,自适应控制器还无法平稳工作.因此,本文提出了一种基于在线整定多项式权值的广义最小方差(OSPW_GMV)控制方法来实现测头自动跟踪扫描的控制.

1 OSPW_GMV 控制器的设计

本文结合自适应控制中广义最小方差原理与多项式权值对系统稳定性、柔化特性的影响因素,形成的OSPW_GMV控制器具有较好的实时性、控制精度及鲁棒性.

由图1可知,本文设计的OSPW_GMV控制器主要由GMV控制器、OSPW整定器以及测头控制系统等3个模块构成,以下将对各个主要部分进行详细介绍.

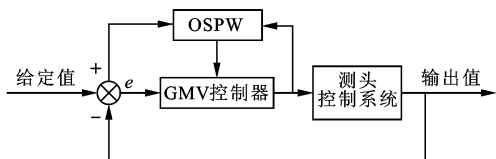


图1 测头自适应控制系统框图

1.1 GMV 控制器

GMV控制原理的基本思想是在求解控制率的

性能指标中引入对控制量的加权项,从而限制控制作用过于剧烈变化,保证系统在干扰方差比较大的时候不出现剧烈调整,增强了控制的稳定性.

设被控对象模型为

$$A(z^{-1})y(k) = z^{-d}B(z^{-1})u(k) + C(z^{-1})\xi(k) \quad (1)$$

式中: $A(z^{-1})$ 、 $B(z^{-1})$ 、 $C(z^{-1})$ 均为Hurwitz多项式; $u(k)$ 和 $y(k)$ 表示系统的输入和输出, k 为循环次数; $\xi(k)$ 为白噪声; $d \geq 1$ 为纯延时,且

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{n_a} z^{-n_a} \quad (2)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_{n_b} z^{-n_b}, b_0 \neq 0 \quad (3)$$

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1 z^{-1} + \dots + c_{n_c} z^{-n_c} \quad (4)$$

选择性能指标函数为

$$J = E\{[Y(z) - Y_r(z)]^2 + [Q(z^{-1})u(k)]^2\} \quad (5)$$

$$Y(z) = P(z^{-1})y(k+d) \quad (6)$$

$$Y_r(z) = R(z^{-1})y_r(k+d) \quad (7)$$

式中: $y(k+d)$ 、 $y_r(k+d)$ 分别为 $(k+d)$ 时的系统实际输出和期望输出; $P(z^{-1})$ 、 $R(z^{-1})$ 、 $Q(z^{-1})$ 分别为实际输出、期望输出和控制量的加权多项式,它们分别具有改善闭环系统性能、柔化期望输出和约束控制量的作用^[9],且

$$P(z^{-1}) = 1 + p_1 z^{-1} + \dots + p_{n_p} z^{-n_p} \quad (8)$$

$$R(z^{-1}) = r_0 + r_1 z^{-1} + \dots + r_{n_r} z^{-n_r} \quad (9)$$

$$Q(z^{-1}) = q_0 + q_1 z^{-1} + \dots + q_{n_q} z^{-n_q} \quad (10)$$

其中,阶次和参数根据实际系统确定.由此可得广义最小方差控制律为

$$u(k) = \frac{Y_r(z) - Y^*(z)}{(q_0/b_0)Q(z^{-1})} \quad (11)$$

$$Y^*(z) = P(z^{-1})y^*(k+d|k) \quad (12)$$

1.2 OSPW 整定器

由GMV的控制策略可知,多项式的权值分别具有改善闭环系统性能、柔化期望输出和约束控制量的作用,而系统各个环节呈现非线性、时变特性都会影响到系统模型的稳定,这就要求多项式的权值能够在线实时调整.然而,从广义最小方差控制的原理可以得到, $u(k)$ 与 $Q(z^{-1})$ 的系数成反比,实际输出与期望输出的偏差 $e(k)$ 与 $R(z^{-1})$ 的系数成反比.因此,根据此规律可设计一个多项式权值整定器来实现在线实时整定系统.

(1)首先根据大型曲面的测头自动跟踪扫描测量系统特性及实际控制经验,确定系统的阶次和初值, $P(z^{-1})=1$, $R(z^{-1})=R_0$, $Q(z^{-1})=Q_0$.

(2)根据 $u(k)$ 来调整 Q_0 ,如果 $\text{abs}(u(k)) > \gamma_1$,则 $Q_0 = Q_0 + \Delta Q$;如果 $\text{abs}(u(k)) < \gamma_1$,则 $Q_0 = Q_0 -$

ΔQ .

(3)根据 $e(k)$ 来调整 $R(z^{-1})$, 如果 $\text{abs}(e(k)) > \epsilon_1$, 则 $R_0 = R_0 + \Delta R$; 如果 $\text{abs}(e(k)) < \epsilon_1$, 则 $R_0 = R_0 - \Delta R$.

(4)输出 Q_0 和 R_0 , 然后进入下一个循环, 直到系统执行完成.

其中 R_0 和 Q_0 初值以及 ΔR 、 ΔQ 、 γ_1 和 ϵ_1 分别根据具体工程情况和经验值确定.

2 系统仿真

通过对自行研制的曲面在线检测系统中的测头进行实验, 并对测头传递函数进行系统辨识, 得到系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{124}{s^2 + 15s} e^{-0.2s} \quad (13)$$

式中: $Y(s)$ 为测头输出位移; $U(s)$ 为测头输入电压. 设 $\xi(k)$ 是均值为 0、方差为 0.1 的随机信号, 当采样时间 $T_s = 0.1 \text{ s}$ 时, 则测头自动跟踪扫描测量控制系统的被控对象由式(13)转化为

$$Y(k) = U(k) + \omega(k) \quad (14)$$

$$Y(k) = y(k) - 1.232y(k-1) + 0.2231y(k-2) \quad (15)$$

$$U(k) = 0.3985u(k-3) + 2.437u(k-4) \quad (16)$$

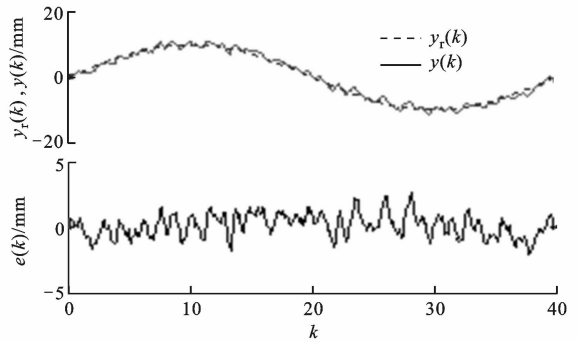
$$\omega(k) = \xi(k) + 0.2\xi(k-1) \quad (17)$$

本文基于 Matlab 仿真软件和 Pentium IV2.8 GHz 计算机系统, 对测头自动跟踪扫描控制, 并对采用不同控制方法时的控制效果进行了比较. 控制方法包括常规 PID 控制 (K_P 、 K_I 、 K_D 为恒定值)、GMV 控制以及本文的 OSPW_GMV 控制, 结果如图 2~图 4 所示. 分别加入具有不同方差的白噪声信号后, 常规 PID 控制、GMV 控制以及 OSPW_GMV 控制的跟踪均方误差结果如表 1 所示.

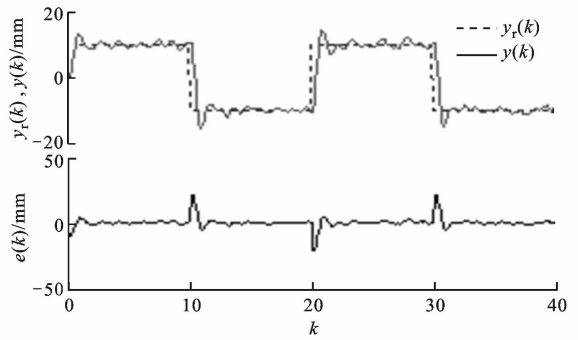
由图 2~图 4 可知, 本文算法在边界位置具有快速跟踪能力, 有利于边界信息的获取.

从表 1 可以看出, 在白噪声信号加入后, OSPW_GMV 的跟踪均方误差均小于常规 PID 控制器和 GMV 控制器的跟踪误差. 在跟踪的过程中, 本文提出的 OSPW_GMV 控制器具有跟踪误差分散程度较小、响应较快、运动较平稳的优点. 因此, 就控制精度而言, 本文算法比常规 PID 控制器和 GMV 控制器更适用于对精度要求较高的场合.

表 1 还显示, 常规 PID 控制器用时最少, 应用 GMV 控制时, 平均每次运算所需的时间为 0.10 ms, 应用本文 OSPW_GMV 控制时, 平均每次

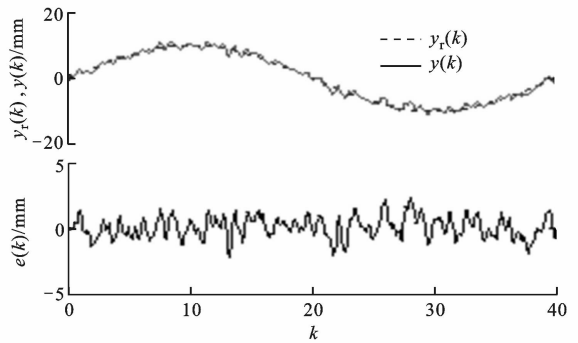


(a) 正弦信号跟踪及误差

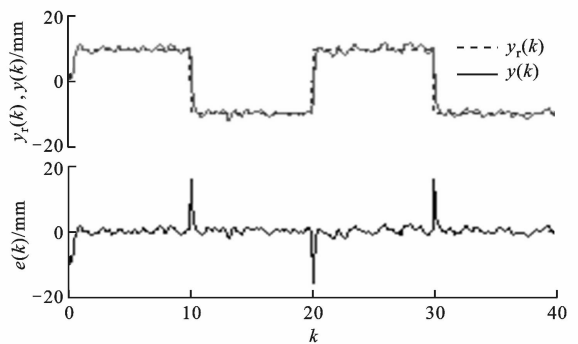


(b) 方波信号跟踪及误差

图 2 PID 跟踪及误差

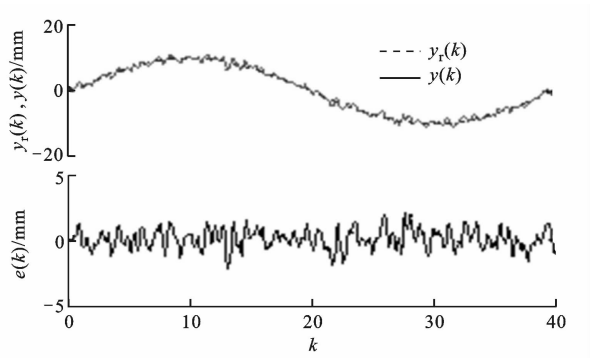


(a) 正弦信号跟踪及误差

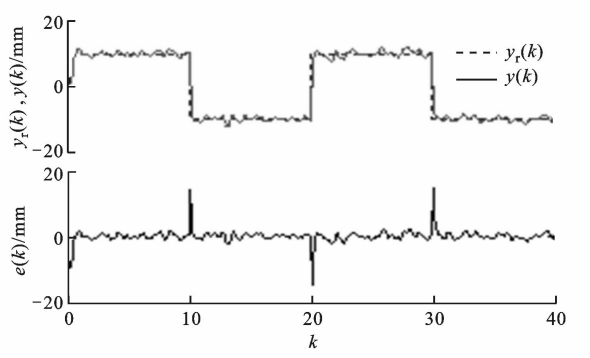


(b) 方波信号跟踪及误差

图 3 GMV 跟踪及误差



(a)正弦信号跟踪及误差



(b)方波信号跟踪及误差

图 4 OSPW_GMV 跟踪及误差

运算时间为 0.11 ms,运算时间与常规 PID 控制器和 GMV 控制器相差不大. 因此,就实时性而言,这 3 种控制器都适用于对实时性要求较高的场合.

表 1 控制性能比较

控制算法	输出信号均方误差				运算 时间/ms
	正弦		方波		
	$\sigma=0.01$	$\sigma=0.1$	$\sigma=0.01$	$\sigma=0.1$	
PID	0.247 3	0.765 0	14.848 7	15.835 7	0.05
GMV	0.176 3	0.661 2	3.379 0	4.035 5	0.10
OSPW_GMV	0.087 5	0.560 8	2.699 8	3.306 8	0.11

注: σ 为白噪声偏差.

3 实验结果与分析

根据本文对于 OSPW_GMV 控制的描述,开发了相应的控制代码,将其在曲面在线检测系统中的开放式控制器上实际运行,实现测头自动跟踪扫描测量. 测量时设定最大扫描速度为 60 mm/s. 对工件某条曲线的跟踪结果如图 5 所示,可以看出,在测头自动跟踪扫描测量的过程中,测头的输出偏差变动平缓,范围为±0.1 mm,从而完全达到了在线测量

系统的控制性能要求.

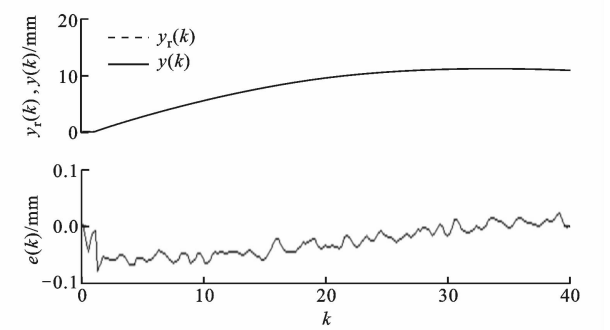


图 5 本文算法对工件某条曲线的跟踪结果

4 结 论

本文针对测头在曲面工件的高精度、高效率自动扫描测量过程中的控制性能要求,通过对控制策略的优化和改进,提出具有高跟踪精度和强鲁棒性的 OSPW_GMV 控制算法,并建立了相应的实验系统. 实验结果表明,采用 OSPW_GMV 控制器,跟踪误差达到了小于 0.1 mm 的扫描测量跟踪要求,且每次运算时间跟 GMV 控制器相差不大,达到了 0.1 ms. 因此,该控制方法在一些实时性及控制精度要求较高的精密检测场合,具有较好的应用价值.

参考文献:

[1] FAN K C. A non-contact automatic measurement for free-form surface profiles[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 1997, 10(4):277-285.

[2] 王平江,陈吉红,周济,等. 激光数字化仿形测量与加工系统[J]. 中国机械工程,1998,9(5):91-95.

WANG Pingjiang, CHEN Jihong, ZHOU Ji, et al. The measuring and machining system of laser digital profiling [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1998, 9(5): 91-95.

[3] 宋震,王平江,陈吉红,等. 数控仿形加工控制算法的研究[J]. 华中理工大学学报,1998,26(8):13-15.

SONG Zhen WANG Pingjiang, CHEN Jihong, et al. Research on the algorithm of CNC profiling processing [J]. Journal of Huazhong University of Sci and Tech, 1998, 26(8):13-15.

[4] 李维诗,李江雄,柯映林. 二维曲线自动跟踪测量的一种新算法[J]. 计量学报,2003,24(1):18-20.

LI Weishi, LI Jiangxiong, KE Yinglin. A new algorithm to implement two dimensional tracing and measurement[J]. Acta Metrologica Sinica, 2003, 24(1): 8-20.

[5] 陶永华,伊怡欣,葛芦生. 新型 PID 控制系统及应用

- [M]. 北京:机械工业出版社,2002:56-60.
- [6] KETATA R, GEEST D D, TITLI A. Fuzzy controllers: design evaluation, parallel and hierarchical combination with a PID controller[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1995, 71: 113-12.
- [7] 李竞,胡保生. 模糊 PID 增益调节器的算法、结构及硬件实现[J]. 西安交通大学学报,1998,32(5):9-13.
LI Jing, HU Baosheng. Algorithm, architecture and FPGA implementation for fuzzy PID gain conditioner [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1998, 32 (5):9-13.
- [8] 谢新民,丁锋. 自适应控制系统[M]. 北京:清华大学出版社,2002:126-130.
- [9] 杨承志,孙棣华,张长胜. 系统辨识与自适应控制[M]. 重庆:重庆大学出版社,2003:218-226.

(编辑 杜秀杰)