

无心通磨加工的自校正控制器设计

徐素莉, 郑国强

(河南科技大学 电子信息工程学院, 河南 洛阳 471003)

摘 要: 为了改变传统的人工检测和调整磨床的加工现状, 稳定和提高无心磨床的工件加工质量和精度, 提出了无心通磨加工控制的自适应算法. 结合无心通磨加工的特点, 基于工件误差序列, 构造了包含非平稳干扰的无心通磨加工误差的差分方程数学模型; 以系统稳定性为极点配置准则, 并把参数估计和极点配置算法相结合, 设计了控制无心磨削加工精度的极点配置自校正控制器. 实验结果表明: 同模糊 PID 算法相比, 采用极点配置自校正控制算法的系统性能优于模糊 PID 算法, 使系统加工精度和稳定性得到了明显的提高.

关键词: 无心通磨; 极点配置; 递推参数估计; 自校正控制器

中图分类号: TP273.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)02-0091-04

Design of Self-tuning Controller for the Centreless Pass-grinding System

XU Su-li, ZHENG Guo-qiang

(Electronic and Information Engineering College, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: An adaptive control algorithm is proposed in centreless pass-grinding system, in order to change the centreless pass-grinding situation of manual detection and adjustment, stabilize and improve work-piece's machining quality and accuracy. It constructs the mathematics' model of difference equation including nonstationary interference according to the features of centreless pass-grinding system and work-piece-error sequences. The self-tuning controller of pole-placement is designed used for machining accuracy in the centreless pass-grinding system, which is combined the estimating parameters algorithm with the pole-placement algorithm. The principle of pole-placement is to ensure the system's stability. The experiment and simulation results show that the pole-placement algorithm has advantages of improving the system's performance of machining accuracy and stability compared with Fuzzy-PID algorithm.

Key words: centreless pass-grinding; pole placement; recursive estimating parameters; self-tuning controller

1 引言

零件的加工精度直接影响其使用性能, 它是机械加工中的一个重要指标. 无心磨床按磨削方式一般可分通过式磨削(简称通磨)和切入式磨削(简称切入磨). 前者主要针对圆柱类工件, 后者主要针对带台阶、锥度等回转体类工件. 无心磨床的通磨加工广泛应用于零件的外园批量精加工, 但是传统的加

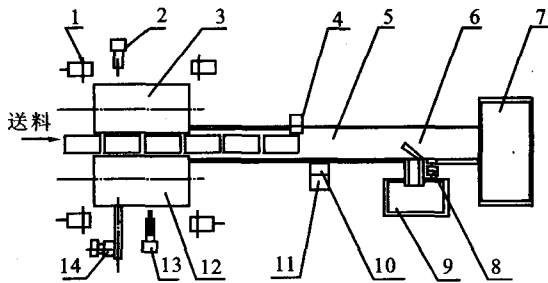
工方法是, 为了满足工件公差范围, 操作者必须频繁地停机检测并调整磨床, 如导轮架进给量、砂轮和导轮等^[1]. 因此加工精度不高, 尺寸分散大, 生产效率低, 实际加工工件的合格率较低. 文中提出无心通磨加工的自校正控制系统设计, 通过分析磨削加工过程, 建立相应的数学模型, 给出极点配置自校正控制算法, 并与模糊 PID 控制算法进行了比较, 实验结果表明, 控制效果良好.

收稿日期: 2009-01-09; 修回日期: 2009-03-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(50875076); 国家“八六三”计划项目(2004AA41140); 河南省杰出人才创新基金项目(0621000800)

2 无心通磨加工系统结构

无心通磨加工自动检测系统如图 1 所示。



1. 无触点开关 2. 砂轮修整器 3. 砂轮 4. 计数器 5. 输送带 6. 料斗门 7. 料斗 8. 气缸 9. 料斗 2 10. 机械手 11. 检测装置 12. 导轮 13. 导轮修整器 14. 进给电机

图 1 无心通磨加工自动检测系统图

其控制加工过程是：首先起动无心磨床使其处于待磨削加工。当磨削好的工件通过输送带上的计数器 6 时，若是第一个通过的工件，将关闭门 1 使其沿输送带继续运行，待该工件通过之后马上将门 1 打开，使其后工件经门 1 送入储料斗（合格工件）；当经门 1 沿输送带前行的工件运行至使无触点开关 10 动作的位置时，推动气缸 9 动作，将工件推向检测台，对工件实施检测，控制系统将根据检测信号进行控制，如控制调整导轮架进给量、修整砂轮、修整导轮，判断所加工工件是否合格，如不合格，将控制气缸 8、7 打开门 2、关闭门 1，使后续工件经门 2 进入储料斗 2（不合格工件），经适当的时间之后，再关闭门 2 仅让通过一件工件的时间，重复上述过程对该工件进行检测，只有当检测工件满足其公差要求时，打开门 1，关闭门 2 使工件进入合格储料斗 1，之后每当通过计数器 6 一定数量的工件，就关闭门 1 适当时间以通过一件工件，按上述过程进行检测、不断地对工件的误差进行补偿，使工件的精度趋于稳定和提高。

3 无心通磨加工系统数学模型

假设图 1 所示磨削加工过程的磨削加工系统是线性系统^[2]，则系统方程：

$$A(q^{-1})Y(k) = B(q^{-1})U(k-d) + V(k) \quad (1)$$

其中， $A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_nq^{-n_a}$ ，

$B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_{n_b}q^{-n_b}$ ， $V(k)$ 为系统的干扰， d 为系统的时滞。

$V(k)$ 主要包括：系统误差，测量误差，磨损等。文中对 $V(k)$ 是什么形式的噪声作了如下分析：在磨削加工中，若 $U(k) \equiv 0$ ，系统方程为：

$$A(q^{-1})Y(k) = V(k) \quad (2)$$

$U(k) = 0$ 相当于磨削中不施加控制的一次磨削过程，从实际磨削加工测得在此情况下的两组数据。对规格为 $\phi 10_{+0.019}^{+0.007}$ 的工件分别每间隔十件和二十件测量的两组工件误差变化情况如表 1 所示。其共同特点是：两者都有明显的增长趋势。显然此时 $Y(k)$ 序列已经不是平稳随机序列了，而是逐渐增加的非平稳序列，因为 $Y(k)$ 序列是干扰 $V(k)$ 的作用结果，所以 $V(k)$ 必然也是非平稳随机序列。

根据对磨削加工的分析，砂轮磨损这个不可测的干扰引起了工件误差序列的非平稳性，从表 1 的误差增量变化可看出：砂轮的磨损相对于磨削过程是比较缓慢的，为此，根据 Kawashima 等人对处理具有非平稳数据过程所作的分析^[3]，文中假设过程的干扰具有稳态增量，即干扰的增量是平稳的。则：

$$\Delta V(k) = C(q^{-1})\xi(k) \quad (3)$$

其中， $C(q^{-1}) = 1 + C_1q^{-1} + C_2q^{-2} + \dots + C_nq^{-n_c}$ ， Δ 表示差分算子 $(1 - q^{-1})$ ， $\xi(k)$ 表示随机扰动信号，并假设 $\xi(k)$ 是均值为零，方差为时间的函数，且独立不相关的随机干扰。按照此假设，将式(3)代入式(1)得：

$$A(q^{-1})Y(k) = B(q^{-1})U(k-d) + \frac{C(q^{-1})}{\Delta}\xi(k)$$

为了分析方便，假设 $C(q^{-1}) = 1$ ，则上式为：

$$A(q^{-1})Y(k) = B(q^{-1})U(k-d) + \frac{\xi(k)}{\Delta} \quad (4)$$

这就是文中所提出的模型结构形式。

关于系统模型结构的参数可以利用文献[2]阐述的离线辨识的方法经实验来确定模型的阶次，然后再根据一定的准则来检验其正确性。考虑到一般加工系统为了减少计算量，实现实时控制的性能，通常采用二阶系统对实际过程进行控制的普遍性，对

表 1 磨削加工工件误差变化趋势检测表

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
第 1 组检测值(mm)	10.012	10.012	10.013	10.014	10.014	10.015	10.016	10.016
第 2 组检测值(mm)	10.010	10.012	10.014	10.015	10.016	10.016	10.017	10.018

磨削加工也以二阶系统作为控制分析的基础. 系统模型中的时滞 d 是指当前的控制作用在经过时间 d 之后才对系统的输出产生影响. 磨削加工中的时滞 d 通过选取适当的单位时间可以将其调整为一个单位时间.

根据以上分析,本系统的数学模型简化为如下形式:

$$(1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2})Y(K) = (b_0 + b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2})U(K-1) + \frac{\xi(K)}{\Delta} \quad (5)$$

4 无心通磨加工系统的自校正控制器设计

4.1 无心通磨加工系统的自校正控制器结构

无心通磨加工系统的自校正控制器结构如图2所示. 首先对无心通磨加工过程进行在线辨识(递推参数估计),然后用过程参数估计值和事先规定的性能指标,在线地综合出控制器的控制参数,使无心通磨加工系统的性能指标渐近地趋于最优.

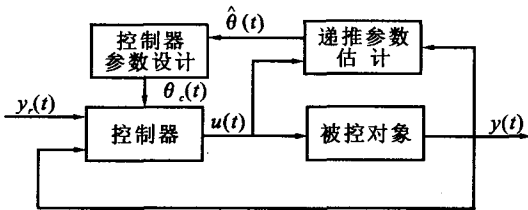


图2 无心通磨加工系统的自校正控制器结构

4.2 极点配置的自校正控制器的设计

自校正控制的设计思想是将未知参数的估计^[4]和控制器的设计分开独立进行,过程的未知参数用在线方法递推估计,估计出的参数就看成是真参数而不考虑估计误差的方差. 将递推参数估计算法和极点配置的控制算法结合起来,就得到了极点配置的自校正控制器^[5].

根据系统的数学模型式(4),定义如下的控制律:

$$GU(K) + FY(K) - HW(K) + D(K) = 0 \quad (6)$$

其中, G 、 H 、 F 是关于 q^{-1} 的多项式, $W(K)$ 是测量值 $Y(K)$ 的参考值(设定值), $D(K)$ 是根据已知数据对不可测干扰负载 $\frac{\xi(K)}{\Delta}$ 的最新估计值. 将控制律式(6)代入系统的开环表达式(4)得到系统的闭环表达式为:

$$(AG + q^{-d}BF)Y(K) = BHW(K-d) + G\frac{\xi(K)}{\Delta} - BD(K-d) \quad (7)$$

令: $AG + q^{-d}BF$ (这里 P 是理想的闭环极点多

项式), G 和 F 多项式的阶次^[6]为:

$\delta G = \delta B + K - 1$, $\delta F = \delta A - 1$ (δ 是指关于 q^{-1} 的多项式的最高阶), 这样能保证等式 $P = AG + q^{-d}BF$ 右边阶数不超过左边的阶数, 那么闭环表达式就可表示为:

$$PY(K) = BHW(K-d) + G\frac{\xi(K)}{\Delta} - BD(K-d) \quad (8)$$

对于实际的磨削加工系统, 根据前述分析, 其系统的数学模型为:

$$Y(K) + a_1 Y(K-1) + a_2 Y(K-2) = b_0 U(K-1) + b_1 U(K-2) + b_2 U(K-3) + \frac{\xi(K)}{\Delta} \quad (9)$$

令: $A = 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2}$, $B = b_0 + b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2}$, 则上式可简写为:

$$AY(K) = q^{-1}BU(K) + \frac{\xi(K)}{\Delta} \quad (10)$$

定义控制律为:

$$GU(K) + FY(K) + D(K) = 0 \quad (11)$$

因为磨削加工中希望加工工件的误差越小越好, 其理想值应为零, 所以在上式中已经将系统输出的参考值 $W(K)$ 设置为零, 将控制律代入系统方程式中得到下式的系统闭环表达式:

$$(AG + q^{-1}BF)Y(K) = G\frac{\xi(K)}{\Delta} - BD(K-1) \quad (12)$$

令: $P = AG + q^{-1}BF$, 这里: $\delta G = 2$, $\delta F = 1$, 代入上式有:

$$PY(K) = G\frac{\xi(K)}{\Delta} - BD(K-1) \quad (13)$$

若在磨削加工中引入控制量之后, 能够消除磨削过程中确定性干扰及随机扰动对加工工件误差的影响, 则闭环系统应成为最小扰动的系统, 根据文献[1]对闭环系统稳态性能的分析, 令上式中的 $P = 1$, 闭环系统就配置成为受扰动最小的稳定系统. 这样通过极点配置, 闭环系统的方程就成为:

$$Y(K) = G\frac{\xi(K)}{\Delta} - BD(K-1) \quad (14)$$

根据上述对磨削加工系统数学模型采取极点配置自校正控制的分析, 其算法过程如下:

(1) 由已知数据递推估计 $\hat{A}$ 、 $\hat{B}$:

将系统模型式变换为:

$$\Delta Y(K+1) = b_0 \Delta U(K) + b_1 \Delta U(K-1) + b_2 \Delta U(K-2) - a_1 \Delta Y(K) - a_2 \Delta Y(K-1) + \xi(K-1) \quad (15)$$

由上式可以根据已知数据对未知参数进行估计.

由于磨削过程中参数的慢时变性,而参数时变的信息显然更多地蕴藏在新的测量数据中,而与先前测量数据的关系将逐渐减弱,为了反映参数的时变性,显然应当强化当前测量数据对参数估计的作用^[7],削弱先前测量数据的影响.对于慢时变参数,简单的方法是采用渐消记忆法,在指标函数里引入具有遗忘因子 ρ 的加权矩阵,强化当前测量数据的作用,使估计参数能反映系统的变化情况.

(2) 计算 G 和 F : 根据 $\delta G = 2, \delta F = 1$, 令: $G(q^{-1}) = g_0 + g_1 q^{-1} + g_2 q^{-2}, F(q^{-1}) = f_0 + f_1 q^{-1}$; $\hat{G}, \hat{F}$ 为由 $\hat{A}, \hat{B}$ 计算所得的 G, F 的值. 因 $P = AG + q^{-1}BF$, 而 $P = 1$, 将 $\hat{A}, \hat{B}, \hat{G}, \hat{F}$ 代入该式有:

$$1 = (1 + \hat{a}_1 q^{-1} + \hat{a}_2 q^{-2})(\hat{g}_0 + \hat{g}_1 q^{-1} + \hat{g}_2 q^{-2}) + q^{-1}(\hat{b}_0 + \hat{b}_1 q^{-1} + \hat{b}_2 q^{-2})(\hat{f}_0 + \hat{f}_1 q^{-1})$$

经整理得到求解 $\hat{G}, \hat{F}$ 多项式系数的矩阵形式如下:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hat{a}_1 & 1 & 0 & \hat{b}_0 & 0 \\ \hat{a}_2 & \hat{a}_1 & 1 & \hat{b}_1 & \hat{b}_0 \\ 0 & \hat{a}_2 & \hat{a}_1 & \hat{b}_2 & \hat{b}_1 \\ 0 & 0 & \hat{a}_2 & 0 & \hat{b}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{g}_0 \\ \hat{g}_1 \\ \hat{g}_2 \\ \hat{f}_0 \\ \hat{f}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

(3) 计算控制律: $GU(K) = -FY(K) - D(K)$, 而 $D(K) = \frac{G}{B(1)}(AY(K) - BU(K-1))$, 所以: $U(K) = -G FY(K) - \frac{A}{B(1)}Y(K) + \frac{B}{B(1)}U(K-1)$, 将已知数据 $Y(K), U(K-1)$ 及 A, B, G, F 的估计值代入上式, 就可得到当前控制律为:

$$U(K) = -\frac{\hat{F}Y(K)}{\hat{G}} - \frac{\hat{A}}{\hat{B}(1)}Y(K) + \frac{\hat{B}}{\hat{B}(1)}U(K-1) \quad (17)$$

上述算法过程必须在获得 N 组数据后方能启动, 为了在磨削加工一开始就能控制工件的误差, 文中提出如下的引导控制律:

$$U(K) = -Y(K) \quad K = 1, 2, \dots, N-1 \quad (18)$$

5 系统实验结果分析

将上述算法和模糊 PID 算法^[8]分别用于无心磨床加工的微机控制系统中, 在将 M1050A 无心磨

床的自动进给机构、砂轮修整、导轮修整、检测输送机构都调整好之后, 针对 $\phi 10 \pm 0.002$ 的工件进行了磨削加工, 每隔二十件工件检测一次. 实验证明: 采用极点配置算法的系统工件误差收敛速度快, 性能优于模糊 PID 控制.

6 结束语

文中研究了采用极点配置的自校正控制器的无心磨床通磨加工自动检测系统, 它改变了传统加工方法中零件加工精度不高、合格率低等问题. 经过同模糊 PID 控制算法进行比较, 证明文中提出的算法可以使加工精度得到改善, 加工质量趋于稳定, 大大提高了生产效率. 下一步研究的问题是将极点配置的自校正控制器和模糊 PID 控制算法进行结合, 使无心磨床通磨加工自动检测系统有更好的控制效果.

参考文献:

- [1] 郑国强. 无心磨加工精度的自适应控制系统[D]. 西安: 西安交通大学, 1996: 1-5.
- [2] 韩曾晋. 自适应控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [3] Liu Ming Yuan. Fuzzy-adaptive control for machining processes, advances application to machinery[M]. USA: International Academic Publishers, 1991.
- [4] 闫茂德, 贺显曜, 吴青云. 移动机器人全局轨迹跟踪的自适应滑模控制[J]. 微电子学与计算机, 2006, 23(4): 97-100.
- [5] 彭永红, 姚锡凡, 陈统坚, 等. 非最小相位加工过程的极点配置自校正控制[J]. 中国机械工程, 2002, 13(8): 706-709.
- [6] Kyoung Kwan Ahn, Ho Pham Huy Anh. System identification and selftuning pole placement control of the two-axes pneumatic artificial muscle manipulator optimized by genetic algorithm[C]// Mechatronics and Automation, ICMA 2007. Ulsan, 2007: 2604-2609.
- [7] Sysala T, Dostal P. Implementation of adaptive controller (δ -model) into PLC library[C]// 2004 5th Asian Control Conference. Taipei, 2004: 1125-1129.
- [8] 孙惠杰. 转阀式直接驱动伺服阀的参数自调整模糊 PID 控制[J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(9): 147-179.

作者简介:

徐素莉 女, (1973-), 硕士, 讲师. 研究方向为计算机测控技术和自适应控制.

郑国强 男, (1965-), 硕士, 副教授. 研究方向为机电系统与工业过程的计算机智能控制.