

半闭环伺服系统间隙补偿方法研究

The study of backlash compensation in semi-closed loop servo system

宁立群, 史耀耀, 赵盼

NING Li-qun, SHI Yao-yao, ZHAO Pan

(西北工业大学 现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 西安 710072)

摘 要: 本文针对数控机床半闭环直线进给伺服系统存在传动间隙, 严重影响机床精度的问题, 提出基于速度前馈控制的间隙补偿方法, 控制伺服电机通过先加速后减速的运动过程补偿传动间隙。建立传动间隙模型, 测量传动间隙, 计算间隙补偿运动过程的参数, 并以之作为间隙补偿值; 采用反推法, 根据伺服系统前向传递函数推导出速度前馈控制函数, 保证间隙补偿值无延时、无差别复现到伺服系统输出端, 补偿传动间隙。最后通过仿真分析, 验证了基于速度前馈控制的间隙补偿方法的有效性。

关键词: 半闭环; 前馈控制; 间隙补偿; 加减速运动; 反推法

中图分类号: V242.5; TP215

文献标识码: A

文章编号: 1009-0134(2013)02(下)-0059-06

Doi: 10.3969/j.issn.1009-0134.2013.02(下).16

0 引言

伺服系统的机械传动环节常不可避免的存在传动间隙, 严重影响伺服系统的性能, 导致伺服系统迟滞、震荡以及精度差。因此, 提高数控机床的性能, 就需要消除传动间隙的不利影响。目前消除传动间隙不利影响的方式除提高传动部件的制造、安装精度, 以及施加预紧力或合理设计结构等机械消除方法^[1,2]外, 也可以对传动间隙进行软件补偿。国内外研究人员在传动间隙补偿方法上进行了大量的研究。

文献[3]设计神经网络控制器, 文献[4]设计基于状态反馈自适应控制器通过在线评估对间隙进行补偿, 可应用于变间隙、参数不确定系统, 提高系统的精度, 但是控制算法相对复杂, 导致系统响应速度慢。文献[5~8]在测量伺服系统传动间隙值的基础上, 通过直接施加位置补偿来补偿间隙, 位置补偿可直接保证间隙补偿值等于实际值, 但是间隙补偿值作用在伺服系统的最外环-位置环上, 间隙补偿过程用时较长。其中, 文献[5]提出在施加恒定间隙补偿值的同时再施加一个快速变化的动态补偿值, 加快间隙补偿的过程, 但是最终间隙补偿值会超过实际值, 导致伺服系统产生新的误差, 而且间隙补偿值的参数计算较复杂。文献[9-11]验证了基于速度控制的间隙补偿方法, 从速度环节考虑间隙补偿, 可直接保证间隙

补偿用时最短, 但是需要准确计算间隙补偿值, 避免间隙补偿值超过或小于实际值而干扰位置指令。其中文献[9~10]研究开环系统, 补偿信号可直接施加于系统输入端; 文献[11]研究半闭环数控机床进给系统, 但是其补偿信号最终是通过位置环施加。因此, 实现快速间隙补偿的有效方法是直接控制伺服电机转速。数控机床直线进给伺服系统多为半闭环结构, 对于半闭环伺服系统还存在系统响应时间快慢的问题, 文献[12]在控制理论上, 文献[13]在直线伺服电机的位置控制实践中, 论述了在伺服系统中应用前馈控制可很好的提高系统的响应速度, 并且实现输出完全复现输入。

本文重点研究数控机床上半闭环直线进给伺服系统的间隙补偿策略, 以数控抛光机为例, 在深入分析传动环节的传动间隙如何影响机床运动的基础上, 提出一种控制伺服电机进行加减速运动来补偿传动间隙的方法, 设计了最优间隙补偿值; 根据半闭环伺服系统的前向传递函数反推补偿值的前馈控制函数, 采用速度前馈控制方法, 提高伺服系统对间隙补偿值的响应速度; 最终实现半闭环伺服系统的快速间隙补偿。通过仿真分析, 对比施加间隙补偿前后, 伺服系统的精度以及速度响应的差别, 验证了基于速度前馈控制的间隙补偿策略的有效性。

1 传动间隙

1.1 传动间隙建模

收稿日期: 2012-09-24

作者简介: 宁立群(1988-), 男, 陕西兴平人, 硕士研究生, 主要从事数控装备设计制造及系统控制研究。

传动间隙普遍存在于机械传动系统中, 数控机床半闭环直线进给系统通常采用滚珠丝杠螺母副作为传动环节, 如图1所示。滚珠丝杠与螺母之间同样存在传动间隙, 如图2所示。

由图2可知, 由于存在间隙 $D(D>0)$, 机床进给运动在反向时, 伺服电机会有空走的行程 D 。在伺服电机的行程小于 D 时, 滚珠丝杠与螺母处于

由测量结果可知, 抛光机半闭环直线进给伺服系统的反向间隙为 $D=0.016\text{mm}$ 。

2 速度前馈控制间隙补偿策略

2.1 速度间隙补偿原理

由1.1的分析知, 当机床进给运动反向时, 间隙 D 的存在使工作台的输出没有及时准确地跟随伺

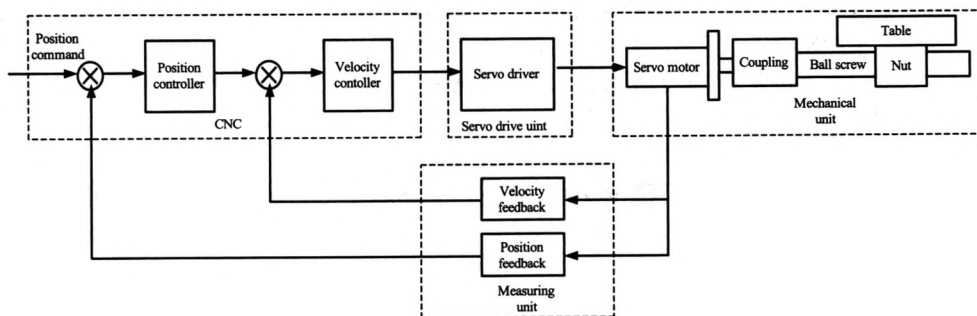


图1 半闭环直线进给伺服系统图

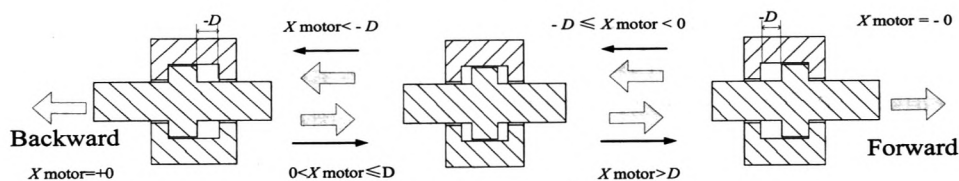


图2 滚珠丝杠螺母副传动间隙

脱离状态, 伺服电机没有驱动作用, 工作台保持静止; 只有在伺服电机的行程跨过间隙 D 时, 滚珠丝杠与螺母重新进入接触状态, 伺服电机才开始驱动工作台做进给运动, 但是此时二者已经产生位移误差 D , 工作台实际位移偏离了系统指令位移, 导致机床精度差。因此需要对间隙 D 进行补偿。

1.2 传动间隙测量

根据VDI 3441机床定位精度评定方法, 采用激光干涉仪测量3次某叶片抛光机的半闭环直线进给伺服系统的双向位置精度^[14], 测量数据实时反馈到计算机中, 机床精度曲线如图3所示。

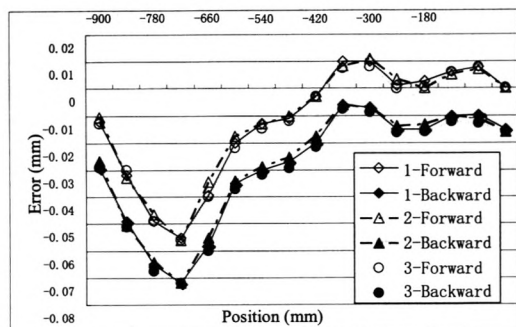


图3 机床位置精度曲线

服系统的指令输入。为消除间隙的不利影响, 需要施加一个补偿信号, 使伺服电机快速跨过这段空转距离 D , 进而驱动工作台反向进给。

根据物理学定律, 在加速度恒定的情况下, 当伺服电机经过恒加速、恒减速运动走过一段固定距离时, 所需时间最短, 据此设定伺服电机间隙补偿过程为一个加减速运动的过程, 即伺服电机在 $0 \sim t_1$ 时刻的加速度为 α_1 , 在 $t_1 \sim 2t_1$ 时刻的加速度为 $-\alpha_1$, 伺服电机在 t_1 时刻达到最大速度 ω_0 。

为了保证准确补偿间隙, 伺服电机运动过程的参数需要满足:

$$\frac{D}{P/2\pi} = \frac{1}{2}\alpha_1 t_1^2 + \alpha_1 t_1^2 - \frac{1}{2}\alpha_1 t_1^2 = \alpha_1 t_1^2 \quad (1)$$

$$t_1 = \sqrt{\frac{2\pi D}{P\alpha}} \quad (2)$$

$$\omega_0 = \alpha_1 t_1 \quad (3)$$

式(1)、(2)中, P 为滚珠丝杠导程。由式(2)知, 保证伺服电机快速间隙补偿需要伺服电机输出最大加速度, 在工程实践中, 通常给伺服电机施加一个速度阶跃信号, 观察伺服电机的响应时间来获取伺服电机的最大控制加速度。

速度间隙补偿就是要施加一个间隙补偿值，控制伺服电机执行完成加速减速过程。

半闭环伺服系统的结构如图4所示。

图4中， θ^* 为系统给定位移信号， e_θ 为位移误差， ω^* 为给定的转速信号， e_ω 为伺服电机转速误差， K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} 为伺服系统位置环PID控制器参数， K_p 、 K_i 为伺服系统速度环PI控制器参数， u 为伺服电机的控制指令， L_a 为伺服电机的电枢电感， R_m 为

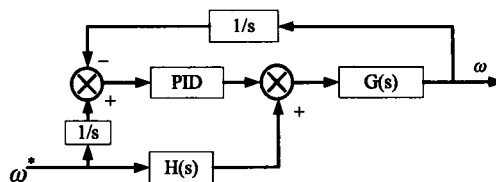


图6 速度前馈控制系统结构简图

图6中， $H(s)$ 为速度前馈控制函数，令 $H(s)=1/$

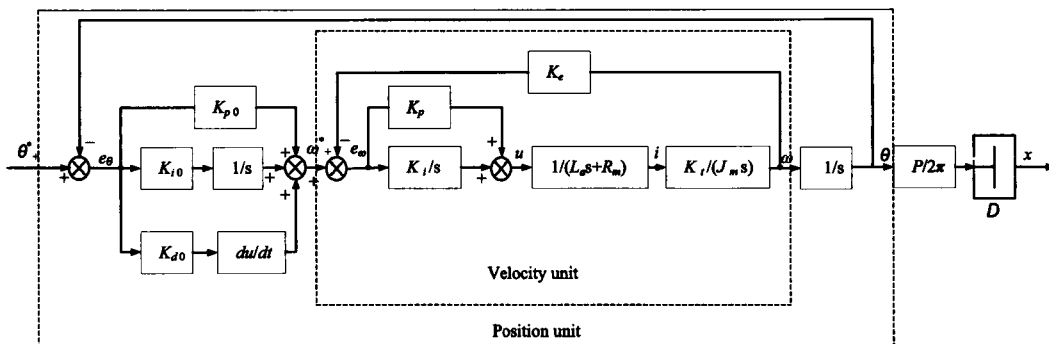


图4 伺服系统控制结构图

伺服电机的电枢电阻， i 为伺服电机的电枢电流， K_t 为伺服电机的力矩常数， J_m 为伺服电机轴端的等效转动惯量， K_e 为伺服电机电动势系数， ω 为伺服电机输出转速， θ 为伺服电机输出位移， x 为工作台的位移。

2.2 前馈控制间隙补偿方法

由图4可知，伺服系统速度环传递函数 $G(s)$ 为：

$$G(s) = \frac{K_t(K_p s + K_i)}{J_m L_a s^3 + J_m R_m s^2 + K_t K_e K_p s + K_t K_e K_i} \quad (4)$$

由2.1的分析可知，间隙补偿的过程就是控制伺服电机进行加减速运动的过程，因此只研究图4所示伺服系统中与速度有关的环节，设定伺服系统位置环输入 θ^* 为0，在速度环输入 ω^* 处施加补偿值 ω^* ， ω^* 在伺服系统速度输出端产生响应 ω ，化简图4所示伺服系统速度环结构图，如图5所示。

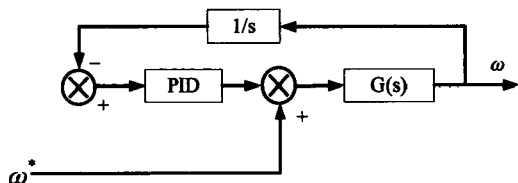


图5 加入速度补偿后系统结构简图

由图5可知， $\omega(s)=G(s) \omega^*(s)$ ，作为一个补偿值，期望其可以无延时、无误差地完全复现到输出端，也就是要求 $\omega(s)=\omega^*(s)$ ，为此，设计了一种基于速度前馈控制的间隙补偿策略，如图6所示。

$G(s)$ 则： $\omega(s)=H(s)G(s) \omega^*(s)=\omega^*(s)$ ，因此，可以将伺服电机间隙补偿运动过程的速度曲线直接作为间隙补偿值，即： $\omega^*=\omega_0$ 。

由式(4)知， $H(s)$ 为：

$$H(s) = \frac{1}{G(s)} = \frac{J_m L_a s^3 + J_m R_m s^2 + K_t K_e K_p s + K_t K_e K_i}{K_t(K_p s + K_i)} = \frac{J_m L_a s^3 + J_m R_m s^2 + K_t K_e K_p s + K_t K_e K_i}{K_t(K_p s + K_i)} = as^2 + bs + c + d \frac{1}{Ts + 1} \quad (5)$$

由式(5)知， $H(s)$ 可分解为双微分DD环节、比例微分PD环节及滤波环节等典型环节，其中， a 为双微分DD环节的比例系数， b 为比例微分PD环节的微分比例系数， c 为比例微分PD环节的比例项系数， d 为滤波环节的比例系数， T 为滤波环节时间常数， a 、 b 、 c 、 d 、 T 可由伺服系统的结构参数计算得到。

伺服电机在间隙补偿运动过程中，速度为三角波信号而加速度为方波信号，形式简单，因此，以加速度曲线作为间隙补偿值，对图6所示的系统结构加以改进后如图7所示。

图7中， a^* 为间隙补偿初值，通过一个积分环节转化为间隙补偿要求值 ω^* 。

加入速度前馈控制间隙补偿的伺服系统结构，如图8所示。

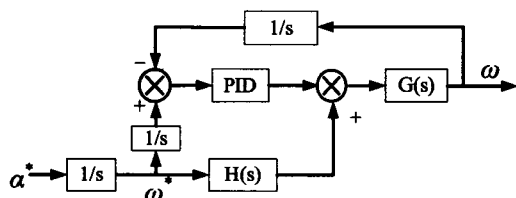


图7 改进后系统结构图

3 仿真分析

3.1 间隙补偿参数计算

采用仿真软件对半闭环伺服系统进行仿真，验证速度前馈控制间隙补偿作用下伺服系统的性能，伺服系统结构参数如表1所示。

单独研究图4伺服系统的速度环，在阶跃信号 ω^* 作用下，阶跃响应 ω 如图9所示。

由图9知，在阶跃信号作用下，经过0.15s伺服电机输出最大速度，为了保留一定裕度，避免加速度过大导致机床抖动，取伺服电机的阶跃响应时间为0.2秒，因此，伺服电机加速度计算的最短时间取为 $t=0.2s$ ，伺服电机的额定转速为 $n=2000r/min$ ，则伺服电机的最大加速度为：

$$\alpha_1 = \frac{n}{t} = \frac{2000 \times \frac{2\pi}{60}}{0.2} = 1047 \text{ rad/s}^2$$

将 α_0 值代入式(2)可得伺服电机间隙补偿运动过程中加速时间 t_1 为：

$$t_1 = \sqrt{\frac{2\pi D}{P\alpha}} = 3.5 \times 10^{-3} s$$

由式(3)知，伺服电机最大速度为：

$$\omega_0 = 1047 \times 3.5 \times 10^{-3} = 3.66 \text{ rad/s}$$

则间隙补偿信号如图10所示。

将伺服系统各参数值代入式(5)得：

$$H(s) = \frac{1}{G(s)} = \frac{2.13 \times 10^{-3} s^3 + 0.32 s^2 + 10.8 s + 0.9}{12s + 1} = 1.775 \times 10^{-4} s^2 + 0.027 s + 0.8975 + 2.2 \times 10^{-3} \times \frac{1}{12s + 1} \quad (6)$$

由式(5)、式(6)可知，前馈控制函数中各典型环节系数如表2所示。

表1 伺服系统参数

Parameters of servo system	value
Motor inductance L_e/mH	6
Motor resistance R_m/Ω	0.9
Equivalent moment of inertia of motor $J_m/Kg \cdot m^2$	0.016
Torque sensitivity $K_t/N \cdot m/A$	0.9
Back-EMF constant $K_b/V/rad \cdot s^{-1}$	0.9
Proportional gain of velocity controller K_p	0.6
Integration gain of velocity controller K_i	0.05
Nominal speed of motor $n/r \cdot min^{-1}$	2000
Proportional gain of position controller K_{p0}	10
Integration gain of position controller K_{i0}	0.02
Differential gain of position controller K_{d0}	0.5
Ball screw lead P/mm	8

表2 前馈控制函数系数值

a	b	c	d	T
1.775×10^{-4}	0.027	0.8975	2.2×10^{-3}	12

3.2 速度前馈控制方法验证

对图7所示的改进后的速度前馈控制系统进行

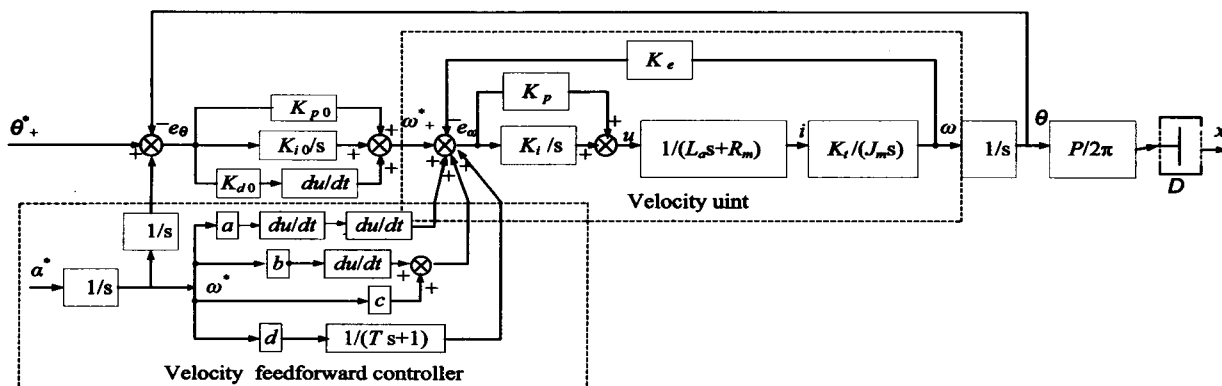


图8 速度前馈控制间隙补偿伺服系统结构图

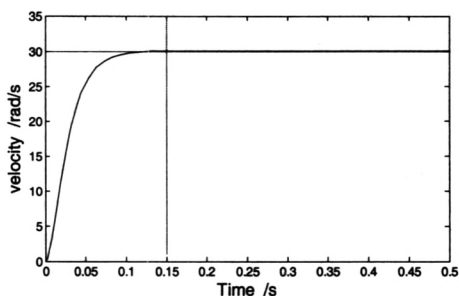
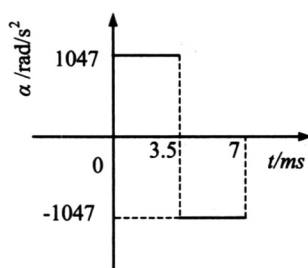
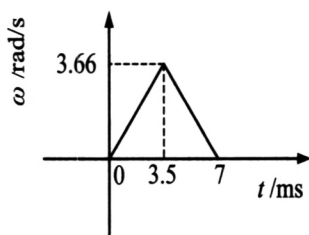


图9 速度阶跃响应曲线

仿真, 补偿信号 α 如图10(a)所示。伺服系统速度环输出 ω 响应如图11所示。



(a) 加速度值



(b) 速度值

图10 间隙补偿值

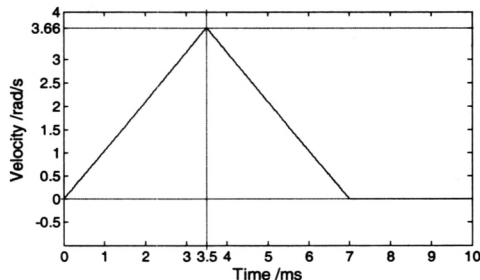


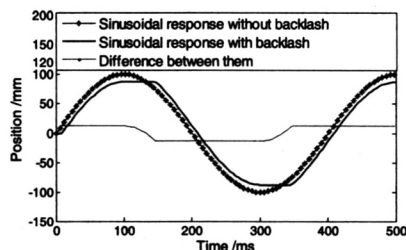
图11 间隙补偿值响应图

对比图10(b)与图11可知, 在速度前馈控制间隙补偿作用下, 间隙补偿值可无延时、无差别地复现到系统速度环的输出端。

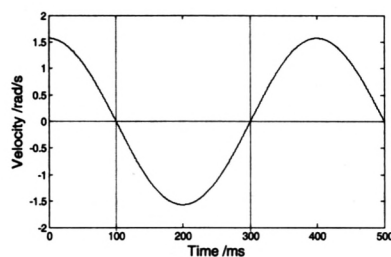
3.3 速度前馈控制间隙补偿方法验证

由1.1的分析知, 当机床进给运动反向时, 就需要施加间隙补偿, 当进给运动由正向变为反向

时, 补偿值应为负值, 当进给运动由负向变为正向时, 补偿值应为正值。对图4所示未施加速度前馈控制间隙补偿的伺服系统进行仿真分析, 输入 θ^* 为正弦曲线, 输出响应 x 如图12所示。



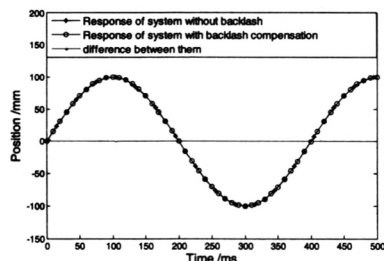
(a) 补偿前位置响应



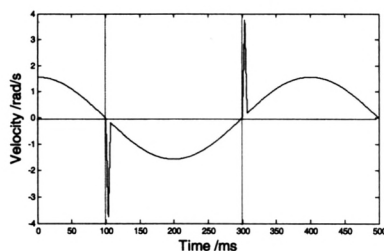
(b) 补偿前速度响应

图12 间隙补偿前伺服系统正弦响应

对图8所示施加速度前馈控制间隙补偿的伺服系统进行仿真, 输入 θ^* 为正弦曲线, 输出响应 x 如图13所示。



(a) 补偿后位置响应



(b) 补偿后速度响应

图13 间隙补偿后伺服系统正弦响应

对比图12(a)与图13(a)可知, 施加速度前馈控制间隙补偿可很好的抑制传动间隙对伺服系统的不利影响, 伺服系统的输出可很好的跟随输入,

提高了数控机床半闭环直线进给伺服系统的精度。

对比图12(b)与图13(b)可知,当数控机床进给运动反向时,在间隙补偿值作用下,伺服电机立即经历一个加速、减速的运动过程跨过传动间隙,充分说明速度前馈控制间隙补偿方法的有效性和实用性。

4 结论

1) 采用前馈控制方法,提高了伺服系统的响应速度,间隙补偿值可无延时、无差别复现到伺服系统的输出端,保证快速的补偿传动间隙,利于提高机床的响应速度。

2) 该间隙补偿方法同时施加了位置补偿与速度补偿,提高间隙补偿速度的同时又保证间隙补偿值完全等于实际值,提高了数控抛光机的精度,从而保证了叶片的抛光质量。

3) 采用前馈控制方法,可以将设计的伺服电机间隙补偿运动过程直接作为间隙补偿值,只需要简单的计算即可获得补偿值,而且补偿值形式简单,易于施加。

4) 设计前馈控制函数的过程中,没有针对某一具体系统,而且速度前馈控制函数可化简为典型环节的简单组合,因此可将前馈控制函数集成为一个处理模块,通过调整a、b、c、d、T参数的值即可将速度前馈控制函数应用到其他半闭环带间隙伺服系统中,具有通用性。

参考文献:

- [1] 吴为居.微型调隙螺母.中国,CN201772036U[P]. 2010-09-17.
- [2] 聂风明,吴庆堂,刘劲松,等.一种用于高刚度高精度螺母座驱动连接装置.中国,CN102069415A[P]. 2010-05-25.

- [3] Rastko R. Selmic, Frank L. Lewis. Neural Net Backlash Compensation with Hebbian Tuning Using Dynamic Inversion[J]. Automatica. 2001, 37: 1269-1277.
- [4] 马艳玲,黄进,张丹.基于反步自适应的伺服系统齿隙补偿[J].控制理论与应用,2008,25(6): 1090-1094.
- [5] Y. S. Tarn, J. Y. Kao, Y. S. Lin. Identification of and Compensation for Backlash on the Contouring Accuracy of CNC Machining Centres[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1997, 13: 77-85.
- [6] 郭亮,陶东升,陶涛,等.基于半闭环控制的数控系统反向间隙补偿[J].组合机床与自动化加工技术,2011,4: 47-50.
- [7] 游华云,叶佩青,汪劲松,等.轮回式双向螺距误差补偿方法[J].清华大学学报(自然科学版),2003,43(11): 1456-1459.
- [8] 张虎,周云飞,唐小琦,等.数控机床空间误差球杆仪识别和补偿[J].机械工程学报,2002,38(10): 108-103.
- [9] Mei Zhiqian, Yang Ruqing, Chen Liang, et al. The Study of Backlash Compensation and its Application in the Robot Checking the Filter[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2005, 25: 396-401.
- [10] Martin Warnecke, Musa Jouaneh. Backlash Compensation in Gear Trains by Means of Open-Loop Modification of the Input Trajectory[J]. Transactions of the ASME. 2003, 125: 620-624.
- [11] 张晶,王立松.基于加减速控制的半闭环数控机床反向间隙补偿[J].机床与液压,2006,10: 28-30.
- [12] 刘金琨.先进PID控制MATLAB仿真[M].第3版.北京:电子工业出版社,2011: 56-58.
- [13] Keisuke UMEZAWA, Yasuhiro KAKINUMA, Seiichiro KATSURA et al. Interaction Mode Control for the Machine Tool Table with Three Linear Servo Motors[J]. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing. 2008, 2(4): 482-492.
- [14] 张瑞凤.复合材料数控钻铣实验台研制及功能实验研究[D].大连:大连理工大学机械工程学院,2010.
- [15] 陈伯时.电力拖动自动控制系统——运动控制系统[M].3版.北京:机械工业出版社,2003: 30-40.

广告索引

上海思博机械电气有限公司.....刊花
柯马机器人.....封面
北京微达电子技术有限责任公司.....封二
施迈赛工业开关制造(上海)有限公司.....封三
厦门宇电自动化科技有限公司.....封底

施耐德电气.....前彩1
福建顺昌虹润精密仪器有限公司.....前彩2
正泰电器.....前彩3
中创国技(北京)科技发展有限公司.....前彩4