

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.05.007

面向滚珠丝杠进给系统位移波动特性的 自适应滤波方法研究*

权 力, 杨晓君, 赵万华*

(西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要:针对数控机床进给系统位移波动对加工精度、加工质量的影响等问题,将自适应滤波技术应用到了滚珠丝杠进给系统运动控制领域。采用了最小均方误差准则,根据误差源选取了参考信号矢量,确定了自适应滤波器的阶数;通过参考信号矢量各权值系数迭代求解,从而自适应调节滤波器输出,提出了一种基于多维参考信号的自适应滤波算法;在开放式伺服实验平台上对该算法进行了实验验证。研究表明:自适应滤波算法可以有效地抑制多频位移波动,算法作用下谐波幅值被抑制了50%~70%;在不同进给速度和不同负载力矩下,自适应滤波算法均有较好的谐波抑制效果,且可以有效地改善滚珠丝杠进给系统运动的平稳性。

关键词:滚珠丝杠;伺服系统;位移波动;自适应滤波

中图分类号:TH161.21;TM341

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)05-0502-05

Adaptive filtering method for displacement fluctuation characteristics of ball screw feed system

QUAN Li, YANG Xiao-jun, ZHAO Wan-hua

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

Abstract: Aiming at the problems of the displacement fluctuation of the feed system on the machining accuracy and machining quality, the adaptive filtering technology was applied to the motion control field of the ball screw feed system. The minimum mean square error criterion was adopted, and the reference signal vector was selected according to the error source, the order of the adaptive filter was determined. The weight coefficients of the reference signal vector were iterated solving to adaptively adjust the filter output, an adaptive filtering algorithm was established based on multi-dimensional reference signals. The algorithm was verified by an open servo experimental platform. The results indicate that the adaptive filtering algorithm can effectively suppress multi-frequency displacement fluctuations. The harmonic amplitude is suppressed by 50% - 70% under the action of the algorithm. The adaptive filtering algorithm has good harmonics suppression effect under different feed speeds and different load moments. The adaptive filtering algorithm can effectively improve the smoothness of the ball screw feed system.

Key words: ball screw; servo system; displacement fluctuation; adaptive filter

0 引 言

目前,随着航空航天、高速铁路、深海装备等高端装备制造业的发展,对数控机床的加工精度提出了更

高的要求^[1]。数控机床作为一个典型的复杂机电系统,主要由机械系统、控制系统和伺服驱动系统等组成。其中,伺服驱动系统输出的力矩波动最终将导致刀具、工件等执行元件的位移波动,刀具、工件的位移波动影响数控机床加工过程,致使加工零件出现表面

收稿日期:2019-07-25

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX04013001);中国博士后科学基金面上项目(2018M633498);陕西省自然科学基金青年项目(2019JQ-394)

作者简介:权力(1996-),男,山西太原人,博士研究生,主要从事伺服电机进给系统控制方面的研究。E-mail:quanlixijiao@stu.xjtu.edu.cn

通信联系人:赵万华,男,教授,博士生导师。E-mail:whzhao@xjtu.edu.cn

质量问题,加工零件出现表面暗纹,暗纹线条垂直于进给方向,暗纹频率与电流基频六次谐波对应。因此,有必要分析滚珠丝杠进给系统位移波动特性及其谐波抑制策略。

国内外众多学者对永磁同步电机力矩波动的产生机理、影响因素进行了大量分析研究:Plotkin、Zhang、Chung、Islam 等人^[2-5]对电机力矩波动的影响因素进行了分析,但未曾对伺服进给系统位移波动的影响因素进行过综合考虑。

针对电机谐波抑制的控制策略,国内外学者也进行了大量研究:Choi 等^[6]研究开发了一个可进行全维状态监测的观测器,使用该算法可以有效地提升低速领域中参数的抗干扰能力,但该算法的实现过程较为复杂;高扬等^[7]设计了一种扰动观测器,用于对负载扰动进行辨识,还提出了在扰动观测器前馈补偿和有限时间反馈控制基础上的复合控制方法,可以有效地提高系统的抗扰动性能,但该方法对硬件系统要求高、实现困难;杨明等^[8]使用自适应陷波滤波器,对伺服驱动系统速度环输出的指令电流进行了滤波处理,但存在辨识的实时性要求高、运算量较大、对硬件的要求也很高的缺陷;饶莹等^[9]基于最速下降算法的基波分量,提取了自适应滤波器,但需要根据系统设定6个参数,参数的设置较为繁琐。以上研究中,各方法均存在实现复杂、对硬件要求较高、参数设置繁琐等问题,制约了其在实际伺服系统中的应用。

本文综合考虑滚珠丝杠进给系统位移波动谐波特性,提出一种可靠、有效、易于实现、鲁棒性好的自适应谐波抑制策略;搭建伺服驱动系统实验台,将自适应滤波算法嵌入到开放伺服实验台,以验证自适应滤波算法对谐波抑制的有效性,以及不同工况下自适应滤波算法对于谐波抑制的鲁棒性。

1 滚珠丝杠进给系统位移波动特性分析

整体系统由机械系统、电机磁场、电机电路、驱动电路、反馈电路和控制器组成。滚珠丝杠进给系统的主要组成部分如图1所示^[10]。

考虑伺服驱动系统中死区效应、齿槽效应、电流检测误差,笔者采用一般相变量模型描述电机电路;

死区效应产生由定子电流谐波和永磁体磁场共同决定的频率为电流基频的6倍频力矩谐波;

齿槽效应产生齿槽基频的整数倍频力矩谐波;

电流检测过程中的零漂误差使三相交流电中产生

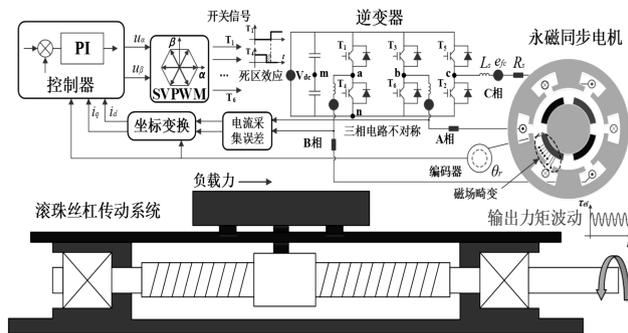


图1 滚柱丝杠进给系统组成示意图

直流量,从而产生频率为电流基频的力矩谐波;

电流检测过程中的增益误差使三相交流电幅值发生改变,从而产生频率为电流基频的2倍频力矩谐波。

在设计、制造或使用阶段产生的谐波成分,会导致进给系统位移波动。

滚珠丝杠进给系统机械部分主要包括电机、联轴器、轴承、丝杠螺母副、工作台、导轨等部分。

滚珠丝杠进给系统机械模型参数如表1所示。

表1 滚珠丝杠进给系统模型参数

参数名称	数值
电机转子转动惯量/kg·m ²	0.030 4
传动刚度/N·m ⁻¹	5 × 10 ⁷
传动阻尼/N·s·m ⁻¹	4 × 10 ⁴
工作台质量/kg	1 000
摩擦阻尼/N·s·m ⁻¹	2 000
丝杠导程/mm	12

综合上述内容,建立考虑机械特性、伺服驱动多维谐波特性的滚珠丝杠进给系统机电集成模型,笔者在 Matlab/Simulink 中完成仿真模型的搭建。

滚珠丝杠进给系统运动过程中工作台位移波动主要有1、2、6次位移谐波,仿真结果反映了电机驱动系统力矩谐波对工作台运动平稳性的影响。

力矩谐波对滚珠丝杠进给系统运动平稳性的影响如图2所示。

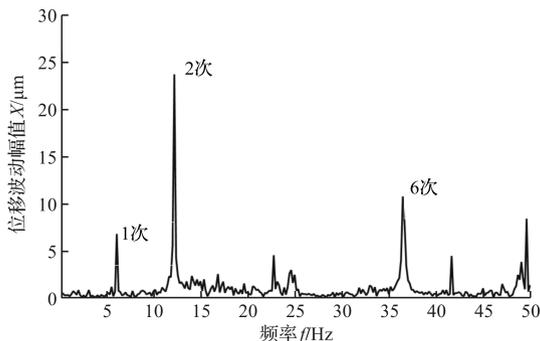


图2 工作台位移波动频谱图

2 考虑位移波动谐波特性的自适应滤波算法

2.1 自适应滤波算法原理及实现

自适应滤波器的滤波频率根据输入信号而变化,其适用范围更大。自适应滤波器算法常用的判据有最小均方误差和最小二乘法^[11],最小均方误差算法实现简单、性能稳健。本文采用最小均方误差准则来调节滤波器权值系数 $\mathbf{w}(k)$,从而自适应调节滤波器输出 $y(k)$ 。

自适应滤波器实现算法为:

$$\begin{cases} y(k) = \mathbf{X}^T \mathbf{w}(k) \\ e(k) = d - y(k) \\ \mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) + 2\mu e(k) \mathbf{X} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $y(k)$ —滤波器输出; \mathbf{X} —参考信号; $\mathbf{w}(k)$ —参考信号的权值; $e(k)$ —滤波后信号; d —输入信号; μ —迭代步长。

笔者应用自适应滤波算法原理,通过对电流环 $d-q$ 轴反馈电流进行自适应谐波抑制,抑制伺服系统输出力矩波动,从而抑制工作台、刀具的位移波动,改善滚柱丝杠进给系统位移平稳性。

式(1)可改写为如下形式:

$$\begin{cases} i_{q, \text{lms}}(k) = \mathbf{X}^T \mathbf{w}(k) \\ e(k) = i_{q, \text{fb}} - i_{q, \text{lms}}(k) \\ \mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) + 2\mu e(k) \mathbf{X} \end{cases} \quad (2)$$

式中: \mathbf{X} —参考信号; $i_{q, \text{fb}}(k)$ —输入信号; $i_{q, \text{lms}}$ —滤波器的输出信号; $e(k)$ —滤波后信号; $\mathbf{w}(k)$ —参考信号 \mathbf{X} 的权值; μ —迭代步长。

自适应滤波算法实现位移谐波抑制的具体步骤为:

- (1) 根据误差源选取参考信号矢量,确定自适应滤波器的阶数;
- (2) 参考信号矢量各权值迭代求解;
- (3) 求解滤波器输出信号;
- (4) 对输入信号进行滤波处理;
- (5) 滤波后的信号进入电流闭环控制。

在分析不同参考信号矢量自适应滤波算法对谐波的抑制效果时,为了减少自适应滤波器的计算量,参考信号选取为与输入信号部分频率成分相同的正余弦信号组成。参考信号根据输入信号,通常优先选择低频成分以及信号的主要成分。设参考信号为 $\mathbf{X} = [\sin(2\pi \cdot 10t) \cos(2\pi \cdot 10t)]^T$,则滤波器输出信号为 $y(k) = \mathbf{w}^T(k) \mathbf{X}$, $\mathbf{w}(k)$ 将不再收敛于一个零频稳态值,将收敛

于多谐波组合,权值系数收敛于零频、1 频和 3 频。

当参考信号选取为与输入信号部分频率成分相同的正余弦信号组成时,自适应滤波算法也能够较好地跟踪多频输入信号,实现对多频输入信号的滤波。

笔者将位移谐波抑制算法集成到滚柱丝杠进给系统机电集成模型,对滚珠丝杠进给系统机电集成模型进行仿真分析。

仿真参数如表 2 所示。

表 2 仿真参数

参数名称	数值
迭代步长	0.01
参考矢量	$\sin(t) \cos(t)$
电流基频/Hz	10
极对数	4
转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	150
误差谐波/次	1/2/6

自适应滤波器能够有效地抑制 1、2、6 次位移谐波。自适应滤波器对系统位移波动频域的影响如图 3 所示。

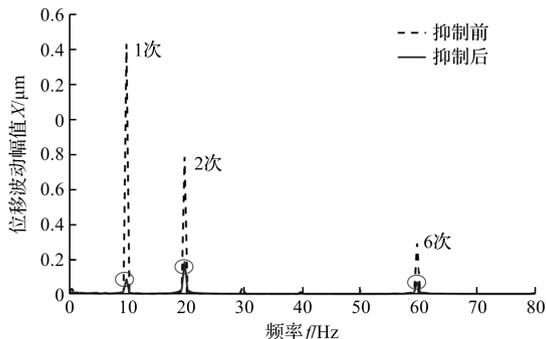


图 3 谐波抑制前后位移波动频域图

2.2 自适应滤波算法的收敛性与稳态误差分析

自适应滤波算法的收敛性和稳态误差是算法性能的关键,收敛性是实现谐波抑制的基础,稳态误差影响算法的最优结果,减小稳态误差是谐波抑制的更高目标^[12-13]。因此,有必要对自适应滤波算法的收敛性、稳态误差进行分析。

由式(2)可得,误差的迭代公式为:

$$\begin{aligned} e(k+1) &= d - y(k+1) = \\ &= d - \mathbf{X}^T \mathbf{w}(k) - \mathbf{X}^T 2\mu e(k) \mathbf{X} = e(k) (1 - \mathbf{X}^T 2\mu \mathbf{X}) \end{aligned} \quad (3)$$

定义下一时刻的误差与前一时刻的误差的比值 k 为收敛速度因子。因此,自适应滤波算法满足收敛性的条件为:

$$k = \left| \frac{e(k+1)}{e(k)} \right| = |1 - \mathbf{X}^T 2\mu \mathbf{X}| \leq 1 \quad (4)$$

由收敛速度因子定义可知,收敛速度因子 k 越小,收敛速度越快。已知, $\mathbf{X}^T \mathbf{X} = 1$,因此,自适应滤波算法

收敛性条件为 $0 \leq \mu \leq 1$, 迭代步长在收敛范围内, 分析迭代步长对收敛速度的影响, 迭代步长越接近 $1/2$, 收敛速度因子 k 越小, 收敛速度越快; $0 \leq \mu \leq 0.5$ 时, 随着迭代步长增大, 收敛速度因子 k 减小, 收敛速度加快; $0.5 \leq \mu \leq 1$ 时, 随着迭代步长增大, 收敛速度因子 k 增大, 收敛速度减慢。

由式(3)可得:

$$e(k+1) = e(k) - 2\mu X^T X e(k) \quad (5)$$

$$e(k+1) = (1 - 2\mu X^T X) \cdot e(k) \quad (6)$$

则自适应滤波算法的稳态误差为:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} e(k+1) = (1 - 2\mu X^T X)^{k+1} \cdot e(0) = 0 \quad (7)$$

由式(6)可得: 只要迭代次数足够大, 自适应滤波算法的稳态误差为零。

2.3 自适应滤波算法的抑制性能分析

电机输出力矩谐波频率与电流基频有关, 数控机床在零件加工过程中, 尤其是在复杂曲面加工时, 工作台的进给速度为时变量, 进给速度不同, 电流基频不同, 从而影响伺服驱动系统力矩谐波频率。

不同进给速度下一次位移波动幅值抑制前后的变化如图4所示。

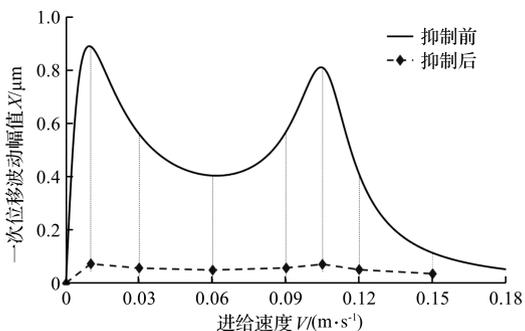


图4 谐波频率对算法谐波抑制性能的影响

由图4可以看出: 不同进给速度下, 针对一次位移谐波, 自适应滤波器可以实现较好的谐波抑制效果。

在数控机床使用过程中, 负载力矩随加工零件的材料、进给速度等发生改变, 负载力矩的变化会影响电流检测增益误差引起的力矩波动, 从而影响滚珠丝杠进给系统的位移波动。

在不同负载力矩下, 分析自适应滤波算法对位移谐波的抑制效果。不同负载力矩下的二次位移谐波, 自适应滤波算法都能对其实现很好的抑制效果, 抑制后的位移波动幅值低于 $0.2 \mu\text{m}$ 。

3 自适应谐波抑制算法实验

交流伺服驱动系统主要由控制板、驱动板、交流永磁同步电机及相关配件组成, 实物图如图5所示。

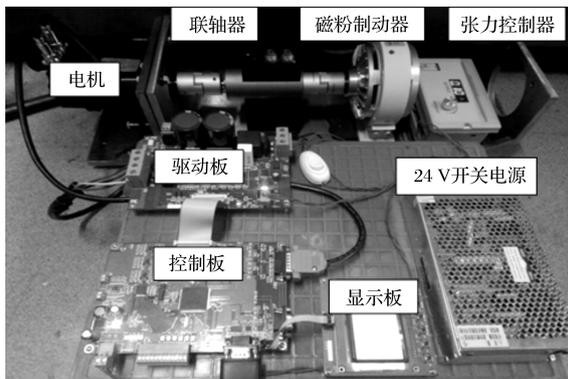


图5 交流伺服驱动系统实验台

系统控制板采用 TI F28335 芯片作为主控芯片, 实现矢量控制、反馈信号处理等功能; 驱动板最大驱动功率 3 kW , 控制电源采用 24 V 直流电源。

永磁同步电机采用 2500 pulse/r 的光电编码器, 其具体参数如表3所示。

表3 电机参数

参数名称	数值
额定电压/V	220
额定转矩/N·m	2.4
额定转速/r·min ⁻¹	3 000
转子惯量/kg·m ²	1.2×10^{-4}
极对数	4

伺服驱动系统的中断子程序通过电流环、速度环双环控制, 实现伺服系统控制和调节。中断程序是实现伺服系统控制的核心, 中断周期为 0.1 ms , 其主要实现的功能有: 速度环 PI, 电流环 PI, 坐标变换, 电流、电压采样, 位置信号的实时检测, 以及矢量控制等。

将自适应滤波算法嵌入到中断服务子程序中, 分别对 d, q 轴电流进行滤波处理, 永磁同步伺服系统的中断周期 T 为 0.1 ms , 设置自适应滤波算法的迭代周期为 0.1 ms , 迭代步长 0.1 , 迭代初值为 0 。

实验中, 负载力矩为 0.68 Nm , 转速 150 r/min , 电机转频为 2.5 Hz , 电机极对数 4 , 电流基频为 10 Hz 。自适应滤波算法可以有效改善力矩波动, 自适应滤波器能够对电机输出力矩的 $1, 2, 6$ 次谐波实现好的谐波抑制效果, 谐波幅值抑制了 $50\% \sim 70\%$, 力矩波动百分比从 $6\% \sim 12\%$ 抑制到 3% 。

谐波抑制前后电机输出力矩时域波形如图6所示。

笔者分析进给速度对自适应滤波算法抑制效果的影响, 不同进给速度下电机输出力矩的一次谐波频率依次为 $8 \text{ Hz}, 10 \text{ Hz}, 12 \text{ Hz}, 14 \text{ Hz}, 16 \text{ Hz}$; 分析自适应谐波抑制前后力矩谐波幅值变化。不同进给速度下,

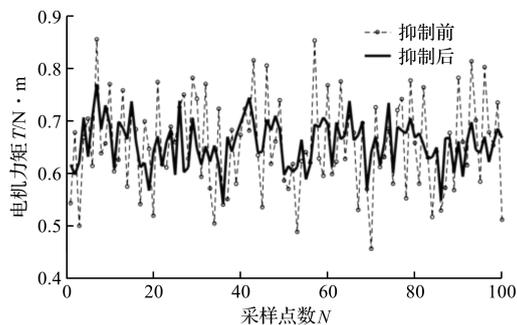


图 6 谐波抑制前后力矩波动时域图

自适应滤波算法能够实现好的谐波抑制效果。

不同进给速度下,电机输出力矩的一次谐波幅值抑制了 65% ~ 80%,力矩波动百分比从 6% ~ 10% 抑制到 2%,抑制后的一次谐波幅值小于 0.02 Nm。

可见,不同负载力矩下,自适应滤波算法能够实现好的谐波抑制效果,抑制后的一次力矩谐波幅值约 0.02 Nm。

4 结束语

考虑滚珠丝杠进给系统位移波动特性及其对加工精度的影响,本文提出了一种基于多维参考信号的自适应谐波抑制策略,算法采用最小均方误差准则实现权值系数的迭代,能够自适应抑制多频力矩谐波;

此外,算法在不同进给速度、不同负载力矩情况下,对谐波抑制效果均有较好的鲁棒性;笔者搭建伺服驱动系统实验台,完成了伺服驱动系统控制、通信程序的设计;将自适应算法嵌入伺服系统控制回路,观察了不同工况下电机输出力矩谐波。

实验结果表明:自适应滤波算法能够有效抑制多频力矩谐波,改善电机输出力矩特性。谐波幅值抑制了 50% ~ 70%,力矩波动百分比从 6% ~ 12% 抑制到 3%。不同进给速度下,电机输出力矩的一次谐波幅值抑制了 65% ~ 80%。不同负载力矩下,抑制后的一次力矩谐波幅值约 0.02 Nm。

由此可见,自适应滤波算法在不同工况下均有较好的鲁棒性。

参考文献 (References):

- [1] 廖平. 高速数控车床进给系统切削运动平稳性分析[J]. 现代制造工程, 2011(9): 33-36.
- [2] CHUNG D, SUL S. Analysis and compensation of current measurement error in vector-controlled AC motor drives[J]. **IEEE Transactions on industry applications**, 1998, 34(2): 340-345.
- [3] ISLAM M S, MIR S, SEBASTIAN T. Issues in reducing the cogging torque of mass-produced permanent-magnet brushless DC motor[J]. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 2004, 40(3): 813-820.
- [4] PLOTKIN J, SCHAEFER U, HANITSCH R. Malfunction of a dead-time compensation in PWM-converters leading to a high DC current offset[C]: 2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, Orlando: IEEE, 2008.
- [5] ZHANG Z, XU L. Dead-time compensation of inverters considering snubber and parasitic capacitance [J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2013, 29(6): 3179-3187.
- [6] CHOI J, LEE S, KIM H. Inertia identification algorithm for high-performance speed control of electric motors[J]. **IEE Proceedings-Electric Power Applications**, 2006, 153(3): 379-386.
- [7] 高扬, 杨明, 于泳, 等. 基于扰动观测器的 PMSM 交流伺服系统低速控制[J]. 中国电机工程学报, 2005(22): 128-132.
- [8] 杨明, 郝亮, 徐殿国. 基于自适应陷波滤波器的在线机械谐振抑制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(4): 63-69.
- [9] 饶莹, 郑建勇. 一种基于最速下降算法的基波提取自适应滤波器[J]. 电力自动化设备, 2006(8): 19-22.
- [10] 梁涛. 滚珠丝杠进给系统位移波动机理及抑制方法研究[D]. 西安: 西安交通大学机械工程学院, 2018.
- [11] 赫金. 自适应滤波器原理[M]. 4版. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [12] 罗留祥, 邢彦锋. 基于改进粒子群算法的装配序列规划研究[J]. 轻工机械, 2018, 36(1): 27-31, 36.
- [13] 孟小猛. 自适应滤波算法研究及应用[D]. 北京: 北京邮电大学信息与通信工程学院, 2010.

[编辑: 方越婷]

本文引用格式:

权力, 杨晓君, 赵万华. 面向滚珠丝杠进给系统位移波动特性的自适应滤波方法研究[J]. 机电工程, 2020, 37(5): 502-506.

QUAN Li, YANG Xiao-jun, ZHAO Wan-hua. Adaptive filtering method for displacement fluctuation characteristics of ball screw feed system[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2020, 37(5): 502-506.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>