

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.12.006

高速高精度电子齿轮箱自抗扰控制研究

田晓青, 芦振文, 黄晓勇, 韩江, 夏链

(合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:针对展成法加工齿轮切削力呈周期性变化引起刀具与工件的相对位姿偏差,导致工件齿轮加工误差的问题,文章提出一种基于自抗扰控制(active disturbance rejection control,ADRC)的主从式电子齿轮箱(electronic gearbox,EGB)控制方法。首先,分析滚齿加工过程中机床各运动轴之间的联动关系,建立斜齿轮加工运动控制数学模型,确立主从式EGB结构模型;其次,建立EGB中各轴跟踪误差与工件齿轮齿廓偏差、齿距偏差和螺旋线偏差之间的数学关系,采用交叉耦合控制(cross-coupling control,CCC)补偿方式求解出各运动轴的补偿量,对从动轴进行补偿;然后,构建基于传统比例积分微分(proportional integral derivative,PID)控制和扩张状态观测器(extended state observer,ESO)的ADRC-EGB,评估EGB从动轴所受的干扰并进行补偿,提高其同步精度和鲁棒性。最后,在开放式实时半实物仿真平台开展滚齿加工运动模拟实验。结果表明该EGB控制结构相较于传统EGB具有更高的同步控制精度和抗干扰能力。

关键词:电子齿轮箱(EGB);自抗扰控制(ADRC);交叉耦合控制(CCC);轮廓误差;齿轮展成加工
中图分类号:TP273.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)12-1622-08

Research on active disturbance rejection control of high-speed and high-precision electronic gearbox

TIAN Xiaoqing, LU Zhenwen, HUANG Xiaoyong, HAN Jiang, XIA Lian

(School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: To reduce machining errors caused by the relative pose deviation between the tool and the gear due to the time-varying cutting force in gear generating machining, this paper proposes a master-slave electronic gearbox(EGB) control method based on active disturbance rejection control(ADRC). Firstly, the mathematical model of helical gear machining motion control was established based on the motion relationship of the gear hobbing machine axes, and thus the master-slave EGB structure was determined. Then, the mathematical relationship between the tracking deviation of motion axes and the gear profile deviation, pitch deviation and helix deviation in EGB was established, and the compensation amount of each motion axis was solved. The compensation was performed on the slave axis by using the cross-coupling control(CCC) method. Secondly, ADRC-EGB based on proportional integral derivative(PID) control and extended state observer(ESO) was constructed. The disturbance on the slave axis of EGB was predicted and compensated to improve its synchronization accuracy and robustness. Finally, a simulation experiment of gear hobbing motion was carried out on a real-time hardware-in-loop platform. The experimental results showed that compared with the traditional EGB control methods, the proposed EGB control method had higher synchronization control accuracy and anti-disturbance ability.

Key words: electronic gearbox(EGB); active disturbance rejection control(ADRC); cross coupling control(CCC); contour error; gear generating

收稿日期:2022-05-13;修回日期:2022-06-07

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFE0201000);国家自然科学基金资助项目(51875161;52075142)

作者简介:田晓青(1987—),女,河北石家庄人,博士,合肥工业大学副教授,博士生导师;

韩江(1963—),男,河南洛阳人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师;

夏链(1964—),女,四川乐山人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

滚齿加工是一种展成法加工齿轮的工艺,广泛用于生产高质量的外圆柱齿轮。滚齿加工要求滚刀与工件及其他进给轴按照严格的展成关系运动^[1]。在现代数控滚齿机中,运动轴的同步运动是由电子齿轮箱(electronic gearbox, EGB)控制的,因此提高 EGB 的控制性能是提高滚齿加工精度的关键。

对于多轴控制系统,其控制性能包括单轴跟踪精度和整体轮廓精度^[2]。文献[3-6]针对单运动轴跟踪精度进行研究,然而提升每个运动轴的跟踪精度并无法保证轮廓精度的提升,因此必须考虑多轴之间的协调性;文献[7]提出交叉耦合控制(cross-coupling control, CCC)的概念,通过对轮廓误差的实时估计并对每个运动轴进行误差反馈来提高轮廓精度;文献[8]将交叉耦合控制思想与电子齿轮箱结合,提出一种电子齿轮箱交叉耦合控制器,可实时计算齿轮轮廓偏差的预测值,并计算出各运动轴的补偿量,通过滚齿加工实验表明,该方法可以提高齿轮加工精度。

文献[9]研究发现,滚齿过程存在的时变切削力会使机床运动轴产生周期性位姿偏移,不稳定的切削条件会在齿轮表面产生划痕,从而降低齿轮齿廓精度;文献[10]采用齐次坐标变换,文献[11]采用粒子群算法,文献[12]采用神经网络的方式,分别建立了滚齿误差预测模型,获得了不错的预测精度。但这些方式都是通过提前建立误差模型的方式改进工艺参数,对加工误差进行离线补偿,不能对实际加工过程中可能出现的受力突变或其他干扰情况进行实时在线补偿。

文献[13-14]最早提出自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)的概念,相较于传统的比例积分微分(proportional integral derivative, PID)控制,ADRC 具有更好的控制性能和鲁棒性,主要将被控模型中不确定部分和外部扰动简化为总扰动,使用扩张状态观测器(extended state observer, ESO)估计总扰动,设计相应的反馈对扰动进行补偿,从而提升被控系统的抗干扰性能。文献[15-16]证实了在负载变化的多运动轴平台,ADRC 相较于传统 PID 控制方式具有更好的控制性能。

为了降低滚齿加工过程中突变切削力以及其他干扰对加工精度的影响,本文提出一种基于 ADRC 的主从式 EGB 控制方法,以提高 EGB 从动轴的抗干扰性能;同时,采用 CCC 的方式保证多运动轴之间的同步性;最后在开放式实时半实物

仿真平台上进行滚齿加工模拟运动实验。结果表明,相较于传统 PID 控制结构的电子齿轮箱,该方法可以有效降低突变干扰的影响,提升电子齿轮箱的同步控制精度。

1 斜齿轮加工及误差分析

1.1 滚齿电子齿轮箱

本文使用的六轴数控滚齿机结构,如图 1 所示。图 1 中: X 轴为滚刀径向进给轴; Y 轴为切向进给轴; Z 轴为轴向进给轴; A 轴为滚刀安装角度调整轴; B 轴为滚刀回转轴; C 轴为工件回转轴。

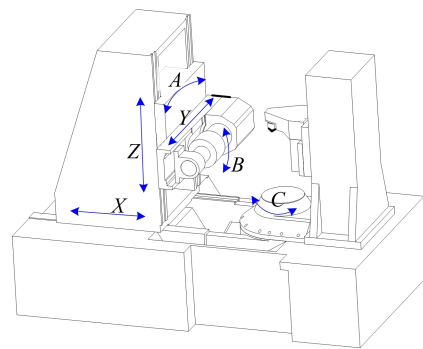


图 1 数控滚齿机结构

数控滚齿机加工齿轮时包含的基本运动有:切削运动为滚刀(B 轴)的回转运动,展成运动为工件齿轮(C 轴)按照啮合关系转动,滚刀沿工件齿轮轴向(Z 轴)作进给运动,滚刀沿滚刀轴向(Y 轴)作窜刀运动。当加工斜齿轮时,滚刀沿轴向(Z 轴)或对角(Y 轴和 Z 轴联动)方向进给时,工件回转轴上会叠加一个附加转动。滚齿加工机床各运动轴之间的联动关系如下:

$$n_C = K_B n_B \frac{Z_B}{Z_C} + K_Z v_Z \frac{360 \sin \beta}{\pi m_n Z_C} + K_Y v_Y \frac{360 \cos \lambda}{\pi m_n Z_C} \quad (1)$$

其中: n_C 、 n_B 、 v_Z 、 v_Y 分别为工件轴转速、滚刀轴转速、滚刀轴向进给速度和切向进给速度; Z_B 、 Z_C 分别为滚刀头数和工件齿轮齿数; m_n 为工件法向模数; β 为工件螺旋角,螺旋角右旋时 $\beta > 0$,螺旋角左旋时 $\beta < 0$; λ 为滚刀安装角; K_B 为第 1 项系数,当滚刀螺旋角与工件螺旋角旋向相同时取 +1,相反时取 -1; K_Z 为第 2 项系数,当右旋逆滚加工或左旋顺滚加工时取 +1,当左旋逆滚加工或右旋顺滚加工时取 -1; K_Y 为第 3 项系数,当 $v_Y > 0$ 时取 +1, $v_Y < 0$ 时取 -1。式中各参数以标量的形式代入。

1.2 斜齿轮加工误差分析

滚齿过程中,几何误差、热变形误差、力变形误差等因素存在,导致刀具与工件产生位置和姿态的偏离,从而产生齿轮加工误差^[9]。通常采用齿廓偏差 F_a 、齿距偏差 f_p 和螺旋线偏差 F_β 来综合评定齿轮加工精度。它们共同决定了齿轮系统的传动精度、承载能力和寿命。

齿轮精度分析如图 2 所示,齿廓偏差是指在齿轮端截面上,包含实际齿廓的 2 条设计齿廓的距离。齿距偏差是指在齿轮节圆上,实际齿距与设计齿距的代数差。螺旋线偏差是在斜齿轮端面基圆切线方向上,包含实际螺旋线的 2 条设计螺旋线之间的距离。

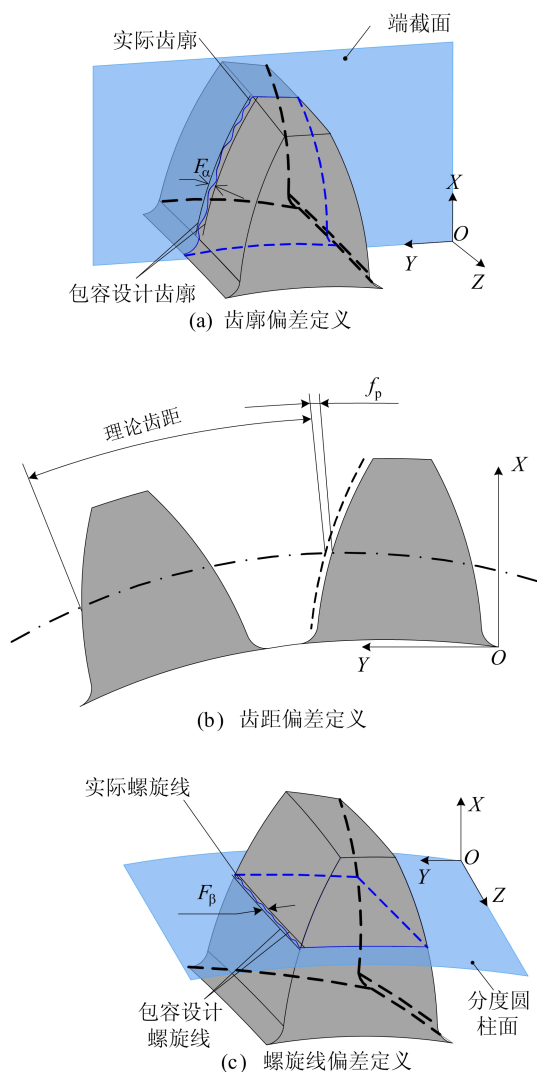


图 2 齿轮精度分析

为了更清楚地分析各运动轴跟踪误差对齿轮精度的影响,将各轴跟踪误差在轮齿上进行分解。首先对齿轮齿廓偏差进行分析,从图 2a

可以看出,滚齿机床 X 轴、Y 轴、C 轴方向上的跟踪误差会对齿轮的齿廓精度产生影响。根据齿轮啮合关系,X 轴跟踪误差 E_X 在齿廓偏差方向上的分量可以表示为 $E_X^a = E_X \sin \alpha$; Y 轴跟踪误差 E_Y 在齿廓偏差方向上的分量可以表示为 $E_Y^a = E_Y \cos \alpha$ 。C 轴作为 EGB 的从动轴,其跟踪误差 E_C 在齿廓偏差方向上的分量可以表示为 $E_C^a = E_C \frac{\pi m_n Z_C \cos \alpha}{360 \cos \beta}$ 。因此,工件齿轮齿廓偏差 F_a 与机床各运动轴之间的关系可以表示为:

$$F_a = E_X \sin \alpha + E_Y \cos \alpha + E_C \frac{\pi m_n Z_C \cos \alpha}{360 \cos \beta} \quad (2)$$

其中: m_n 为工件齿轮法向模数; Z_C 为工件齿轮齿数; α 为齿轮压力角; β 为工件齿轮螺旋角。各运动轴跟踪误差均可在数控系统中实时得到,因此工件齿轮的齿廓偏差可实时计算得到。

接下来对齿轮单节齿距偏差 f_p 进行分析,从图 2b 可以看出,滚齿机床 X 轴、Y 轴、C 轴方向上的跟踪误差会对齿轮的齿距精度产生影响。根据齿轮啮合关系,X 轴跟踪误差 E_X 在齿距偏差方向上的分量可以表示为 $E_X^p = E_X \tan \alpha$; Y 轴跟踪误差 E_Y 在齿距偏差方向上的分量可以表示为 $E_Y^p = E_Y$; C 轴的跟踪误差在齿距偏差方向上的分量可以表示为 $E_C^p = E_C \frac{\pi m_n Z_C}{360 \cos \beta}$ 。因此,工件齿轮齿距偏差 f_p 与机床各运动轴之间的关系可表示为:

$$f_p = E_X \tan \alpha + E_Y + E_C \frac{\pi m_n Z_C}{360 \cos \beta} \quad (3)$$

各运动轴跟踪误差均可在数控系统中实时得到,因此单节齿距偏差可实时计算得到。

最后对齿轮螺旋线偏差 F_β 进行分析。从图 2c 可以看出,滚齿机床 Z 轴、Y 轴、C 轴方向上的跟踪误差会对齿轮的齿距精度产生影响。根据齿轮啮合关系,Z 轴跟踪误差 E_Z 在螺旋线偏差方向上的分量可以表示为 $E_Z^\beta = E_Z \sin \beta$; Y 轴跟踪误差 E_Y 对螺旋线偏差的影响表示为 $E_Y^\beta = E_Y \cos \beta$; C 轴的跟踪误差对螺旋线偏差的影响表示为 $E_C^\beta = E_C \frac{\pi m_n Z_C}{360 \cos \beta}$ 。因此,工件齿轮螺旋线偏差 F_β 与机床各运动轴之间的关系表示为:

$$F_\beta = E_Z \sin \beta + E_Y \cos \beta + E_C \frac{\pi m_n Z_C}{360 \cos \beta} \quad (4)$$

各运动轴跟踪误差均可在数控系统中实时得到,因此工件齿轮螺旋线偏差可实时计算得到。C 轴作为 EGB 从动轴,其运动状态稳定且容易控制,因此

将系统所受干扰作为新的状态量,利用系统中可测量到的数据来估计外部扰动,设计相应的补偿规律,以提高系统的抗干扰性能和鲁棒性。

假设 EGB 从动轴的运动状态可以描述为:

$$\ddot{\theta}(t) = g(\theta, \dot{\theta}, t) + \omega(t) + bu(t) \quad (11)$$

其中: $u(t)$ 为 EGB 从动轴的控制信号; $\theta(t)$ 为从动轴转动位置; $g(\theta, \dot{\theta}, t)$ 为系统非线性函数; $\omega(t)$ 为从动轴所受时变干扰。

将 $g(\theta, \dot{\theta}, t)$ 未知部分与 $\omega(t)$ 视为系统的总扰动,把两者之和扩展为新的状态变量,记作 $f(t)$,即 $f(t) = g(\theta, \dot{\theta}, t) + \omega(t)$,则式(11)可写作:

$$\ddot{\theta}(t) = bu_0(t) + f(t) \quad (12)$$

设置状态变量为 $x_1(t) = \theta(t), x_2(t) = \dot{\theta}(t), x_3(t) = f(t)$,则式(12)的状态方程可写作:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t), \\ \dot{x}_2(t) = x_3(t) + bu_0(t), \\ \dot{x}_3(t) = \dot{f}(t), \\ y(t) = x_1(t) \end{cases} \quad (13)$$

根据式(13)建立如下扩张状态观测器:

$$\begin{cases} e = \hat{x}_1 - y, \\ \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 - \beta_1 e, \\ \dot{\hat{x}}_2 = \hat{x}_3 - \beta_2 \text{fal}(e, \alpha_1, \delta), \\ \dot{\hat{x}}_3 = -\beta_3 \text{fal}(e, \alpha_2, \delta) \end{cases} \quad (14)$$

其中: $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3$ 分别为对 EGB 从动轴转动位置、转速和所受扰动的估计。 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 为扩张状态观测器的增益参数, fal 函数表达式为:

$$\text{fal}(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^{\alpha} \text{sgn}(e), & |e| > \delta; \\ e/\delta^{1-\alpha}, & |e| \leq \delta \end{cases} \quad (15)$$

利用估计值 \hat{x}_3 对系统所受扰动进行补偿,使控制量为:

$$u(t) = \frac{u(t) - \hat{x}_3(t)}{b} \quad (16)$$

将式(16)代入式(11)中,原控制系统为:

$$\ddot{\theta}(t) = u(t) - \hat{x}_3(t) + f(t) \quad (17)$$

由图 3 可知,将 ESO 与 PID 控制相结合,利用 ESO 对 EGB 从动轴所受干扰进行估计并补偿,降低干扰对控制精度的影响。

2.2 交叉耦合控制器设计

交叉耦合控制方法基于已建立的加工误差模型实时计算轮廓偏差,根据计算结果和补偿规则计算出各运动轴所需的补偿量,通过调节不同的补偿系数完成对运动轴的补偿,从而减少轮廓偏差。

在 1.2 节中已经详细推导了齿廓偏差,齿距偏差和螺旋线偏差的瞬时计算公式。本节设计的电子齿轮箱交叉耦合控制结构如图 3 所示。根据式(9)可以得到 C 轴的补偿信号为:

$$\Delta E_C^p = K_c E_C + K_x E_X + K_y E_Y \quad (18)$$

其中

$$\begin{cases} K_c = 1, \\ K_x = \frac{360 \tan \alpha \cos \beta}{\pi m_n Z_C}, \\ K_y = \frac{360 \cos \beta}{\pi m_n Z_C} \end{cases} \quad (19)$$

3 实验验证

基于 dSPACE 实时半实物仿真平台,开展对角滚切法运动仿真实验,对比主从式电子齿轮箱、自抗扰电子齿轮箱以及交叉耦合控制器的控制性能。运动仿真实验平台如图 4 所示,上位机为装有 MATLAB/Simulink 和 ControlDesk 软件的计算机,在 Simulink 环境中建立 EGB 控制模型,通过 ControlDesk 软件对伺服电机运动状态进行监控;下位机为 dSPACE/MicroLabBox 和松下 A5、A6 系列伺服电机以及伺服电机, MicroLabBox 作为虚拟控制器实现对伺服电机的控制以及对编码器信号的采集,伺服电机模拟滚齿加工时各运动轴的运动状态。上位机与下位机之间通过网线实时通信。

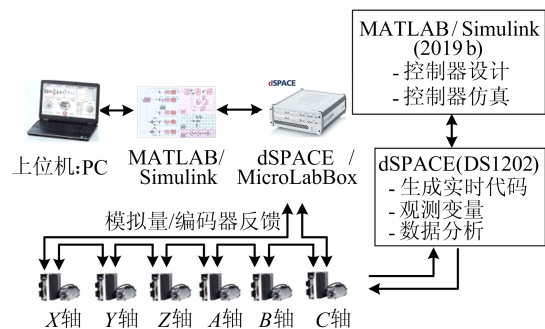


图 4 运动仿真实验平台

采用对角滚切法加工齿轮时,滚刀在 1 个加工周期的运动轨迹如图 5 所示。

其中:位置 1—2 为滚刀快速定位过程;位置 2—3 为滚刀沿 X 轴径向进给;位置 3—4 滚刀沿 Y、Z 合成方向运动,切出全齿宽;位置 4—5—2 为快速退刀过程,1 个切削周期完成。上述过程不断重复,直至毛坯加工出完整的齿形。在整个加工过程中电子齿轮箱功能保持打开。模拟实验 1 个加工周期为 25 s,实验数据采样周期为 1 ms。滚齿运动模拟实验所使用的工件和滚刀的基本参数见表 1 所列。

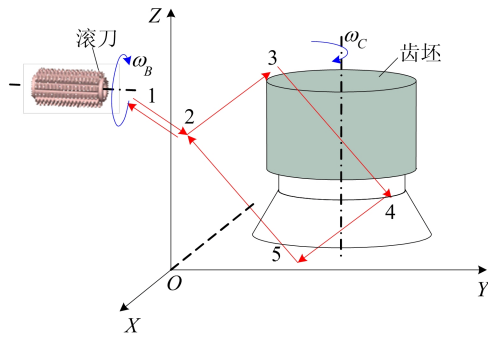


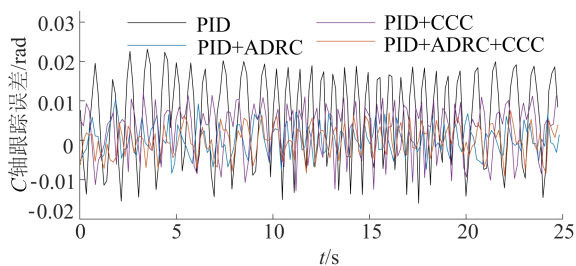
图 5 运动轨迹

表 1 仿真实验基本参数

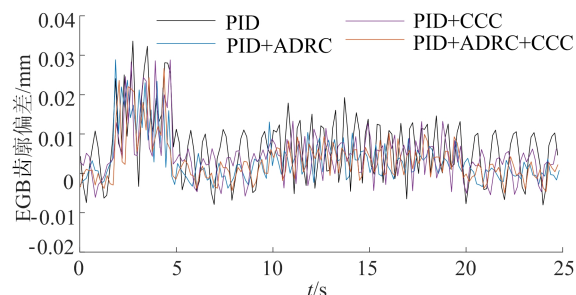
| 基本参数 | 数值 |
|---------------|------|
| 工件齿数 | 65 |
| 工件右旋螺旋角 / (°) | 15 |
| 工件法向模数 / mm | 1 |
| 工件法向压力角 / (°) | 20 |
| 工件齿宽 / mm | 15 |
| 滚刀头数 | 1 |
| 滚刀压力角 / (°) | 20 |
| 滚刀右旋螺旋角 / (°) | 1.97 |

实验分别对比了采用传统 PID 控制、PID + ADRC 控制、PID + CCC 控制和 PID + ADRC + CCC 控制的 4 种方式下主从式 EGB 的控制性能,性能对比情况如图 6 所示。

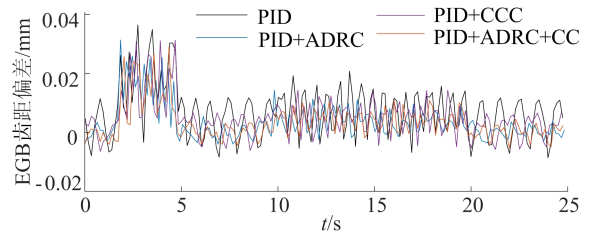
通过硬件在环平台进行模拟滚齿加工运动实验,测得 4 种控制方式下 EGB 从动轴(C 轴)的跟踪误差如图 6a 所示,并分别计算出 4 种控制方式下 C 轴跟踪误差的最大值、平均值以及标准差,结果见表 2 所列。



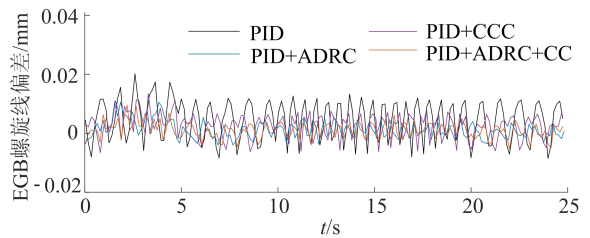
(a) C轴跟踪误差



(b) EGB齿廓偏差



(c) EGB齿距偏差



(d) EGB螺旋线偏差

图 6 4 种控制方式下 EGB 性能对比

从表 2 可以看出,相较于传统 PID 控制,本文所提出的自抗扰控制方式明显提升了 EGB 从动轴的跟踪精度。

表 2 C 轴跟踪误差对比 单位:10⁻³ rad

| 控制方式 | C 轴跟踪误差 | | |
|------------------|---------|------|-------|
| | 最大值 | 平均值 | 标准差 |
| PID | 23.12 | 5.65 | 11.58 |
| PID + ADRC | 10.35 | 0.09 | 3.66 |
| PID + CCC | 12.52 | 2.84 | 6.63 |
| PID + ADRC + CCC | 9.13 | 0.03 | 4.00 |

根据上文推导的齿轮精度计算公式(2) ~ 式(4),本次实验 EGB 齿廓偏差 F_α 、单节齿距偏差 f_p 和螺旋线偏差 F_β 的具体计算公式为:

$$F_\alpha = 0.3421E_X + 0.9397E_Y + 0.5518E_C \quad (20)$$

$$f_p = 0.3640E_X + E_Y + 0.5518E_C \quad (21)$$

$$F_\beta = 0.2679E_Z + 0.5872E_C \quad (22)$$

根据计算结果,4 种控制方式下 EGB 轮廓控制精度对比如图 6b、图 6c、图 6d 所示。

统计 4 种控制方式下 EGB 齿廓偏差、齿距偏差和螺旋线偏差的最大值、平均值以及标准差值,见表 3 所列。

从表 3 可以看出,相较于 PID 控制方式的电子齿轮箱,本文所提出的控制结构拥有更好的控制精度及更强的鲁棒性。

为验证本文所提出的 EGB 控制结构的抗干扰能力,在滚齿运动仿真实验的 15 ~ 18 s 时段内,在电子齿轮箱从动轴电流环施加一个随机方波干扰,利用扩张状态观测器进行观测,外加干扰以及 ESO 观测曲线如图 7 所示。由图 7 可知,通

过 ESO 可以实现对电子齿轮箱所受扰动进行快速准确的辨别。

表 3 EGB 轮廓偏差对比

单位: μm

| 控制方式 | 齿廓偏差 | | | 齿距偏差 | | | 螺旋线偏差 | | |
|--------------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|
| | 最大值 | 平均值 | 标准差 | 最大值 | 平均值 | 标准差 | 最大值 | 平均值 | 标准差 |
| PID | 38.68 | 6.25 | 8.27 | 41.91 | 6.74 | 8.89 | 21.47 | 4.43 | 7.03 |
| PID+ADRC | 28.87 | 3.41 | 5.91 | 31.37 | 3.73 | 6.44 | 12.69 | 1.14 | 2.78 |
| PID+CCC | 31.55 | 4.70 | 6.38 | 34.31 | 5.09 | 6.91 | 14.16 | 2.75 | 4.31 |
| PID+ADRC+CCC | 26.64 | 3.10 | 5.58 | 29.04 | 3.39 | 6.07 | 11.27 | 1.04 | 2.87 |

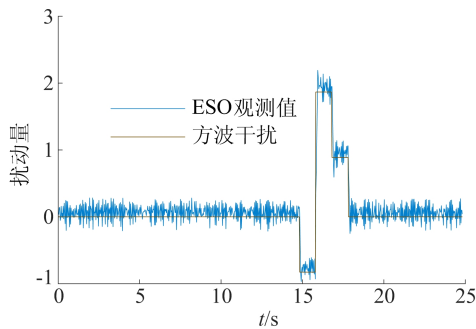
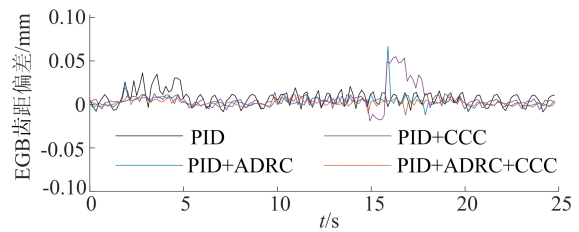


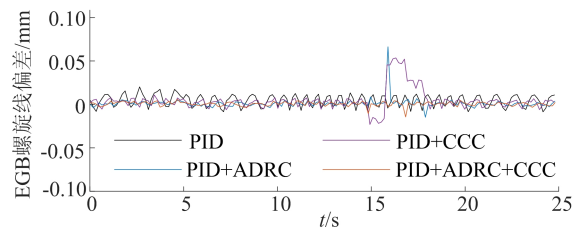
图 7 外加干扰以及 ESO 观测曲线

当存在外界干扰时,分别采用传统 PID 控制、PID + ADRC 控制、PID + CCC 控制和 PID + ADRC + CCC 控制情况下,EGB 的控制性能对比情况如图 8 所示。

由图 8 可知,采用 ADRC 控制方式可以明显提升 EGB 的抗干扰性能。当同时采用 ADRC 和 CCC 控制方式时,在提升电子齿轮箱鲁棒性的同时,多运动轴之间的协调性和同步精度也得到保证。

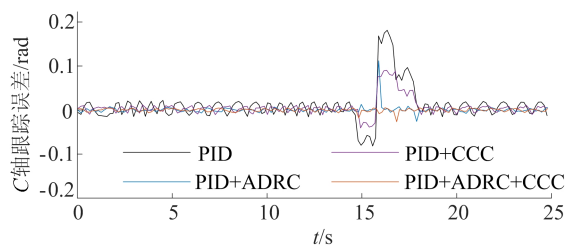


(c) EGB 齿距偏差

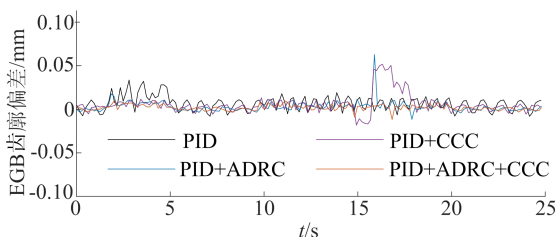


(d) EGB 螺旋线偏差

图 8 存在扰动时 4 种控制方式下 EGB 性能对比



(a) C 轴跟踪误差



(b) EGB 齿廓偏差

4 结 论

本文提出了一种基于 ESO 和 CCC 控制的自抗扰 EGB 控制方法,通过在实时半实物运动仿真平台进行验证,与传统 PID 控制下的主从式电子齿轮箱相比,得到如下结论:

- 1) 建立瞬时齿廓偏差、齿距偏差和螺旋线偏差计算公式,可以有效估计加工误差。
- 2) 结合 PID 控制与 ESO,有效提高了 EGB 跟随轴的跟踪精度,并且可以在线补偿外界扰动,提升 EGB 的鲁棒性。
- 3) 通过交叉耦合控制的方式,保证了 EGB 多运动轴间的协调性和同步精度。

后续会进行滚齿加工实验研究,对所提出的控制结构进行验证。通过参数调节,设计智能算法等使本文提出的 EGB 控制结构可以应用于其他展成法齿轮加工数控系统。

(下转第 1684 页)

[参 考 文 献]

- [1] 刘国彬,王洪新. 上海浅层粉砂地层承压水对基坑的危害及治理[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(6): 790-792.
- [2] 蔡来炳,周红波. 城市轨道交通深基坑工程承压水风险与控制研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(5): 617-623.
- [3] 曾超峰,薛秀丽,宋伟伟,等. 开挖前降水引发基坑变形机制模型试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(9): 2963-2972, 2983.
- [4] ZHOU N Q, VERMEER P A, LUO R X, et al. Numerical simulation of deep foundation pit dewatering and optimization of controlling land subsidence[J]. Engineering Geology, 2010, 114(3): 251-260.
- [5] ZHU L, GONG H L, CHEN Y, et al. Effects of water diversion project on groundwater system and land subsidence in Beijing[J]. Engineering Geology, 2020, 276: 105763.
- [6] 骆冠勇,潘泓,曹洪,等. 承压水减压引起的沉降分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊 2): 196-200.
- [7] 王春波,丁文其,刘文军,等. 非稳定承压水降水引起土层沉降分布规律分析[J]. 同济大学学报, 2013, 41(3): 361-367.
- [8] 龚晓南,张杰. 承压水降压引起的上覆土层沉降分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(1): 145-149.
- [9] 狄胜同. 地下水开采导致地面沉降全过程宏观演化机理及趋势预测研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [10] 杨建民,隋颜阳,纪森林. 抽水引起的土层与地面沉降规律[J]. 铁道建筑, 2018, 58(2): 92-99.
- [11] 杨建民,张辉. 承压层抽水试验中地面沉降曲线斜率的确定[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(增刊 2): 925-933.
- [12] 杨建民,纪森林. 抽水导致区域性地面沉降中的 $s-\ln r$ 线性关系[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(9): 1606-1614.
- [13] 杨建民,霍王文. 线状和面状群井抽水导致场外地面沉降呈 $s-\ln r$ 线性关系[J]. 岩土力学, 2018, 39(10): 3565-3572.
- [14] 李瑛,陈东,刘兴旺,等. 悬挂式止水帷幕深基坑减压降水的简化计算方法[J]. 岩土力学, 2021, 42(3): 826-832, 862.
- [15] 沙金焯. 不完整井渗流的近似计算[J]. 岩土工程学报, 1985, 17(5): 36-48.

(责任编辑 闫杏丽)

(上接第 1628 页)

[参 考 文 献]

- [1] BOUZAKIS K D, LILI E, MICHAELIDIS N, et al. Manufacturing of cylindrical gears by generating cutting processes; a critical synthesis of analysis methods[J]. CIRP Annals Manufacturing Technology, 2008, 57(2): 676-696.
- [2] 田晓青. 柔性电子齿轮箱设计及精度控制方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.
- [3] SUN D, TONG M C A. Synchronization approach for the minimization of contouring errors of CNC machine tools[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2009, 6(4): 720-729.
- [4] TSAO T C, TOMIZUKA M. Zero phase error tracking algorithm for digital control[J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1987, 109(4): 349-354.
- [5] YEH S S, HSU P L. An optimal and adaptive design of the feedforward motion controller[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 1999, 4(4): 428-439.
- [6] TORFS D, SCHUTTER J D, SWEVERERS J. Extended bandwidth zero phase error tracking control of nonminimal phase systems[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 1992, 114(3): 347-351.
- [7] KOREN Y. Cross-coupled biaxial computer control for manufacturing systems[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1980, 102(4): 265-272.
- [8] 韩江,吴路路,田晓青,等. 电子齿轮箱同步耦合控制方法[J]. 中国机械工程, 2016, 27(7): 877-881, 887.
- [9] HAN J, JIANG H, TIAN X Q, et al. Online gear hobbing error estimation based on shaft vibration signal analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 167: 108559.
- [10] DENG F, TANG Q, LI X, et al. Study on mapping rules and compensation methods of cutting-force-induced errors and process machining precision in gear hobbing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 9: 3859-3871.
- [11] SUN S L, WANG S L, WANG Y W, et al. Prediction and optimization of hobbing gear geometric deviations[J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 120: 288-301.
- [12] HOU Y H, YAN C P, CHEN J L, et al. Research on geometric error prediction of high speed dry cutting gear hobbing based on MPGA and BPNN[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1939(1): 012110.
- [13] 韩京清. 一类不确定对象的扩张状态观测器[J]. 控制与决策, 1995, 10(1): 85-88.
- [14] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23.
- [15] YAO J Y, DENG W X. Active disturbance rejection adaptive control of hydraulic servo systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(10): 8023-8032.
- [16] STANKOVIC M R, MANOJLOVIC S M, SIMIC S M, et al. FPGA system-level based design of multi-axis ADRC controller[J]. Mechatronics, 2016, 40: 146-155.

(责任编辑 胡亚敏)