

基于积分鲁棒控制策略的气动柔性驱动器轨迹跟踪研究

李沛彦,孙中圣

(南京理工大学 机械工程学院,江苏 南京 210094)

摘 要:软体机器人由于其固有的轻量性和柔顺性,在各个领域受到越来越多的关注,具有广阔的应用前景。另一方面,它具有复杂的结构和非线性特性,给系统建模和控制器设计带来了困难。综合比例阀模型和柔性驱动器的辨识模型,得出总体系统控制模型,设计可实现高精度跟踪的积分鲁棒控制器。通过对柔性驱动器进行轨迹跟踪的对比实验,验证了模型和控制策略的有效性。

关键词:柔性驱动器;气动技术;基于积分鲁棒控制;系统辨识

中图分类号:TH138 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)03-0193-04

Research on Pneumatic Soft Actuator Motion Tracking with RISE-based Control Strategy

LI Peiyan, SUN Zhongsheng

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Soft robot, although having increasingly received attention in various fields for its wide application prospect due to its inherent high flexibility and compliance, is featured with complex structure and nonlinear dynamics which causes difficulty in system modelling and controller designing. Therefore, a general system control model is proposed by synthesizing the proportional valve model and the soft actuator identification model, and a RISE-based controller is designed to achieve high-precision tracking performance. Comparative experimental results from the motion tracking of the soft actuator verify the effectiveness of the model and the control strategy.

Keywords: soft actuator; pneumatic; RISE-based control; system identification

0 引言

近年来,与刚性驱动器相比,柔性驱动器具有更好的柔顺性以及更轻的质量^[1],能够适应复杂环境,而刚性驱动器则会给用户带来有害的刚性冲击和沉重的负担^[2]。因此,柔性驱动器的发展非常迅速。然而,由于制造误差和柔性材料的特性,柔性驱动器具有很强的非线性和迟滞性^[3],增加了系统控制难度^[4]。因此,使用传统的控制策略很难实现柔性驱动器的精确角度跟踪^[5]。

尽管这些问题给柔性驱动器的广泛应用带来一定的影响,但在过去的十年中,许多有意义的研究和想法被提出。一些研究试图采用无模型控制以避免使用模型,如PID控制、无模型自适应控制^[6-7]。为了提高控制精度,更多的研究致力于模型的控制。在准静态分析模型的基础上,提出了一种带有角度滤波器的反馈控制回路,以验证柔性驱动器的可控性^[8]。JUNG J等^[9]采用高斯过程回归的方法来获得模型,采用带扩展卡尔曼滤波器的滑模控制,以达到预期的跟踪性能。CHEN Y H等^[10]提出了神经网络自适应控制方法来处理系统的非线性、不确定性和时变性等不确定因素。为了避免不可预测的干扰而导致运动轨迹的突然波动和不可忽略的跟踪误差,CAO Y等^[11]提出了一种新的基于自适应代理的鲁棒控制器(APRC),以提高系统的控制精度和鲁棒性。

本文采用动态经验模型方法来描述柔性驱动器的非

线性特性,并引入基于多频正弦激励的系统辨识理论来辨识柔性驱动器的动态模型。此外,基于气体质量流量方程,引入比例方向控制阀的动态模型;设计一种积分鲁棒控制器来处理系统的非线性并保证其动态性能;最后通过设计驱动器角度轨迹跟踪实验,验证所提出的建模方法和控制策略的有效性。

1 问题描述与数学模型

气动控制系统的总体结构如图1所示。比例方向控制阀通过接收控制信号调节气体的质量流量,进而控制柔性驱动器的内腔气压,达到控制其角度变化的效果。压力传感器和姿态传感器用于测量内腔压力、驱动器末端角度和角速度信号。控制算法基于Matlab/Simulink开发,并在工控机中执行。

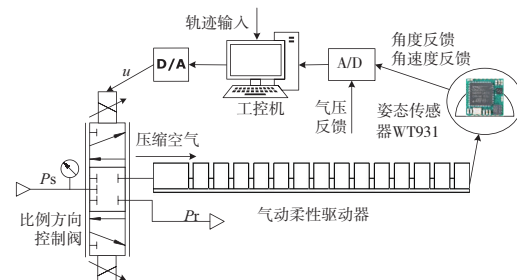


图1 气动柔性驱动器控制系统结构

1.1 气动柔性驱动器的动态模型

由于柔性驱动器很强的非线性以及参数复杂性,很难通过理论计算出精确的数学模型。因此,引入一个动态经验模型来描述气动柔性驱动器的动态特性。系统辨识的前提是需要选择一个合适的输入激励信号,而输入信号的最低要求是控制系统必须在整个辨识期间内被持续激励。此外,还需要考虑输入信号的类型、幅值、带宽等。为了更好地进行参数辨识,设计的多频正弦输入信号如下:

$$U_t = \sum_{k=1}^n A_k \cdot \sin(2\pi f_k t + \phi_k) + C \quad (1)$$

$$k = 1, 2, \dots, n$$

式中: A_k 是每个频率分量的振幅; ϕ_k 是相应分量的初相位; n 是正弦激励频率的数量; C 是使得整个激励信号恒为正值补偿量^[12]。

对于每一个谐波的幅值 A_k , 要保证能量在辨识频率范围内均匀分布^[13], 因此谐波幅值被设计为

$$A_k = A \sqrt{1/n} \quad \forall k \quad (2)$$

式中 A 是多频正弦激励信号 U_t 的幅值。

为了有效地激励整个系统, 可以通过调整初相位 ϕ_k 来使得波峰因数最小化^[14], 波峰因数定义为

$$R_{PF}(U_t) = \frac{\max(U_t) - \min(U_t)}{2\sqrt{2}\text{rms}(U_t)} \quad (3)$$

本文采用 Schroeder 公式^[15]来设计每个谐波分量的初相位, 如式(4)所示。

$$\phi_k = \phi_1 - 2\pi \sum_{l=1}^{k-1} (n-l)p_l \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

式中 p_l 为第 l 个谐波分量的功率谱。

在设计了多频正弦输入信号之后, 需要进行系统辨识回路的设计并对辨识结果进行数据分析。考虑到气动柔性驱动器的气压力不能简单地通过电信号进行控制, 因此设计了一个闭环控制回路来使驱动器内腔气压 P 尽可能地跟随给定电压信号 U_t 。在实验过程中, 记录每个时刻的气压值和弯曲角度值, 分别作为系统的输入和输出。图 2(a)、图 2(c) 为实际模型角度输出和辨识模型角度输出, 频率为 $[0, 1.5]$ Hz 和 $[0, 1]$ Hz。图 2(b)、图 2(d) 为驱动器内腔气压跟踪曲线(本刊为黑白印刷, 如有疑问请咨询作者)。

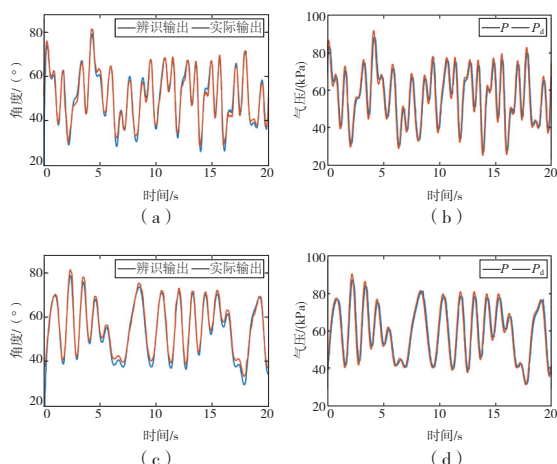


图2 实际与辨识模型输出曲线和对应内腔气压跟踪曲线图

考虑模型的复杂度以及输出拟合精度, 采用二阶线性模型^[16]作为辨识模型从而描述柔性驱动器的动态特性。模型表示为如下状态空间的形式。

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (5)$$

$$\dot{x}_2 = a_0 u - a_1 x_1 - a_2 x_2 + d(x, t) \quad (6)$$

式中 $\mathbf{x} = [x_1, x_2]^T$, 表示角度与角速度的状态向量。

通过取前 $50\text{s}[0, 1.5]$ Hz 的多频正弦信号, 使用最小二乘法对所设计的非线性经验模型进行系统辨识。在辨识之后的模型被用于进行柔性驱动器的轨迹控制之前, 通过取另外 $50\text{s}[0, 1.5]$ Hz 以及 $[0, 1]$ Hz 的驱动器实际轨迹与辨识模型预测的驱动器轨迹数据进行对比验证, 结果如表 1 所示。辨识参数: $a_0 = 184.9$; $a_1 = 814.1$; $a_2 = 46.05$ 。可以看出, 辨识指标 NRMSE 和 NMSE 值均低于 0.2。因此, 辨识模型能够描述柔性驱动器的动态特性。

表1 辨识和验证结果

频率范围/Hz	N_{RMSE}	R_{MSE}
$[0, 1]$	0.187 3	0.035 1
$[0, 1.5]$	0.186 1	0.034 6
$[0, 2]$	0.156 1	0.024 4

1.2 比例方向控制阀的动态模型

为了降低复杂性, 可将柔性驱动器的内腔系统视为等温系统。因此, 由理想气体定律可以得到内腔气压 P 的导数。

$$\dot{P} = \frac{RT}{V} q \quad (7)$$

式中: R 为普适气体常数; T 为内腔气体的热力学温度; V 为驱动器内腔体积; q 为气体质量流量。

气体通过比例阀是一个复杂的过程, 将流经阀口的气体视为理想气体, 流动过程视为等熵绝热过程, 可用 Sanville 公式表示为

$$q = \begin{cases} \frac{C_1 C_v p_u X_v d}{\sqrt{T}} \left(\frac{p_d}{p_u} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \sqrt{1 - \left(\frac{p_d}{p_u} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} & \frac{p_d}{p_u} > 0.528 \\ \frac{C_2 C_v p_u X_v d}{\sqrt{T}} & \frac{p_d}{p_u} \leq 0.528 \end{cases} \quad (8)$$

式中: C_v 为流量系数; X_v 为阀芯位移; d 为阀芯有效面积梯度; p_u 和 p_d 表征了上游和下游的绝对压力; T 表征了上游的

温度; κ 为等熵指数; $C_1 = \sqrt{\frac{2\kappa}{R(\kappa-1)}}$, $C_2 = \sqrt{\frac{\kappa}{R} \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}$, 为常数。

考虑到阀芯位移 X_v 与输入电压 U 成正比, X_v 可写为 $X_v = k_e U$, 其中 k_e 为位移系数。

定义

$$\psi(p_u, p_d) = \begin{cases} \frac{C_1 C_v p_u d k_e}{\sqrt{T}} \left(\frac{p_d}{p_u} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \sqrt{1 - \left(\frac{p_d}{p_u} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} & \frac{p_d}{p_u} > 0.528 \\ \frac{C_2 C_v p_u d k_e}{\sqrt{T}} & \frac{p_d}{p_u} \leq 0.528 \end{cases} \quad (9)$$

那么上式可以简化为:

$$q_{in} = U \psi_{in}(p_u, p_d) \quad (10)$$

$$q_{out} = -U \psi_{out}(p_u, p_d) \quad (11)$$

1.3 问题描述

根据式(5)一式(7)、式(10)一式(11),且将内腔气压 P 作为状态 x_3 , 系统总体控制模型以状态空间形式表示如下:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (12)$$

$$\dot{x}_2 = a_0 x_3 - a_1 x_1 - a_2 x_2 + d(\mathbf{x}, t) \quad (13)$$

$$\dot{x}_3 = g(p_u, p_d) U \quad (14)$$

式中: $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3]^T$ 表示角度、角速度、内腔气压的状态向量; $g(p_u, p_d)$ 表示如下:

$$g(p_u, p_d) = \begin{cases} \frac{RT}{V} \psi_{in}(p_u, p_d) \\ -\frac{RT}{V} \psi_{out}(p_u, p_d) \end{cases} \quad (15)$$

假设 1: 不匹配干扰 $d(\mathbf{x}, t)$ 足够光滑, 其一阶和二阶导数都存在并且有界, 即

$$|\dot{d}(\mathbf{x}, t)| \leq \delta_1, |\ddot{d}(\mathbf{x}, t)| \leq \delta_2 \quad (16)$$

式中 δ_1, δ_2 为未知正常量。

2 控制策略设计

2.1 积分鲁棒控制策略设计

定义误差变量集如下:

$$\begin{aligned} z_1 &= \dot{x}_1 + k_1 z_1 = x_2 - \alpha_1, \alpha_1 \triangleq \dot{x}_{1d} - k_1 z_1, \\ z_2 &= x_3 - \alpha_2 \end{aligned} \quad (17)$$

式中: $z_1 = x_1 - x_{1d}$ 为系统跟踪误差; $k_1 > 0$, 为可调反馈增益; α_1, α_2 分别是 x_2, x_3 的虚拟控制; z_2, z_3 为它们之间的输入差异。

对 z_2 求导可得

$$\dot{z}_2 = a_0 x_3 - a_1 x_1 - a_2 x_2 - \dot{\alpha}_1 + d(\mathbf{x}, t) \quad (18)$$

定义辅助误差信号 $r(t)$ 从而获得控制器的额外设计自由度。

$$r = z_2 + k_2 z_2 \quad (19)$$

将式(18)带入式(19), x_3 可以看作虚拟控制输入, 并且可以为其设计虚拟控制律 α_2 , 因此 α_2 可以设计为:

$$\alpha_2 = \frac{a_{2a} + a_{2s}}{a_0} \quad (20)$$

$$\alpha_{2a} = a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dot{\alpha}_1, \alpha_{2s1} = -(k_2 + k_r) z_2 \quad (21)$$

根据误差符号积分鲁棒 (RISE) 控制器的设计方法, 为了抑制不确定干扰 $d(\mathbf{x}, t)$, 积分鲁棒项 α_{2s2} 可以设计为

$$\alpha_{2s2} = -\int_0^t k_r k_2 z_2 + \beta \operatorname{sgn}(z_2) d\nu \quad (22)$$

式中 $k_r, k_2 > 0$, 为可调反馈增益。

在设计了鲁棒虚拟 α_2 之后, 需要确定实际的控制律 u , 对 $r(t)$ 求导可得

$$\dot{r} = a_0 \dot{z}_3 - k_r \dot{z}_2 + \dot{\alpha}_{2s2} + \dot{d} \quad (23)$$

根据 z_3 的定义, 将其导数带入可得

$$\dot{r} = a_0 (\dot{x}_3 - \dot{\alpha}_2) - k_r r + \beta \operatorname{sgn}(z_2) + \dot{d} \quad (24)$$

将式(14)带入式(24), 可得

$$\dot{r} = a_0 (gU - \dot{\alpha}_2) - k_r r + \beta \operatorname{sgn}(z_2) + \dot{d} \quad (25)$$

因此实际控制输入可以设计为

$$u = u_a + u_s, u_a = \dot{\alpha}_2 / g a_0 \quad (26)$$

$$u_s = -k_3 z_3 / g$$

式中 $k_3 > 0$, 为可调反馈增益。

将式(26)代入式(25)可得

$$\dot{r} = -a_0 k_3 z_3 - k_r r - \beta \operatorname{sgn}(z_2) + \dot{d} \quad (27)$$

且 z_3 的导数为

$$\dot{z}_3 = -k_3 z_3 \quad (28)$$

2.2 控制策略稳定性证明

定义辅助函数 $P(t)$ 如下:

$$P(t) = \beta |z_2(0)| - z_2(0) \dot{d}(0) - \int_0^t L(\nu) d\nu \quad (29)$$

定理 1^[17]: 定义辅助函数 $L(t)$ 如下:

$$L(t) = r[\dot{d} - \beta \operatorname{sgn}(z_2)] \quad (30)$$

如果设计增益系数 β 满足以下充分条件:

$$\beta \geq \delta_1 + \frac{1}{k_2} \delta_2 \quad (31)$$

则已定义函数 $P(t) \geq 0$ 。

定义如下的李雅普诺夫函数:

$$V = \frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2} z_2^2 + \frac{1}{2} r^2 + \frac{1}{2} z_3^2 + P(t) \quad (32)$$

对其求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= z_1(\dot{z}_2 - k_1 z_1) + z_2(\dot{r} - k_2 z_2) + z_3(-k_3 z_3) + \\ & r \dot{r} + \dot{P} = -\mathbf{Z}^T \mathbf{A} \mathbf{Z} \end{aligned} \quad (33)$$

式中: $\mathbf{Z} = [z_1, z_2, r, z_3]^T$;

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} k_1 & -\frac{1}{2} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} & k_2 & -\frac{1}{2} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2} & k_r & \frac{a_0 k_3}{2} \\ 0 & 0 & \frac{a_0 k_3}{2} & k_3 \end{bmatrix}$$

由于矩阵 $\mathbf{A}$ 可以通过调整参数的方式为正定矩阵, 因此式(33)可以进一步被写成

$$\dot{V} = -\mathbf{Z}^T \mathbf{A} \mathbf{Z} \leq -\lambda_{\min}(\mathbf{A}) (z_1^2 + z_2^2 + r^2 + z_3^2) = -W \leq 0 \quad (34)$$

式中 $\lambda_{\min}(\mathbf{A})$ 为矩阵 $\mathbf{A}$ 的最小特征值。

对式(34)求导可以得到

$$\int_0^t W(\nu) d\nu \leq -\int_0^t \dot{V}(\nu) d\nu = V(0) - V(t) \leq V(0) \quad (35)$$

因此 $V \in L_\infty, W \in L_2$, 从而意味着 z_1, z_2, r, z_3 都是有界的, 故所有的状态 $\mathbf{x}$ 以及控制输入 U 也都有界。根据假设 1, 可以得出 W 导数的有界性, 因此 W 是一致连续的, 根据 Barbalat 定理可知, 当 t 趋向于无穷时, W 趋向于 0。所以当 t 趋向于无穷时, z_1 趋向于 0。

3 气动柔性驱动器轨迹跟踪实验

为了更好地评估所提出控制器的跟踪效果,引入3个指标来对控制器的性能进行定量分析。

1) 误差最大绝对值,用来衡量控制系统瞬态性能的测量指标。

$$M_e = \max_i \{ |e(i)| \} \quad (36)$$

2) 平均跟踪误差,用来衡量平均跟踪性能的客观数值测量指标。

$$\mu = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |e(i)|^2} \quad (37)$$

3) 误差标准差,用来描述跟踪误差的偏差水平。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [|e(i)| - \mu]^2} \quad (38)$$

气动柔性驱动器角度控制系统结构如图1所示。整个平台由带姿态传感器 WT931(精度 0.1°)的气动柔性驱动器、带研华 PCI-1716(A/D),研华 PCI-1723(D/A)的工控机、压力传感器(RSCM17100KP 201,精度为1 kPa)、比例方向控制阀(MPYE-5-M5-010-B)组成。采样频率为1 kHz。

为了更好地证明所设计控制器的有效性,设计以下3

个控制器进行对比分析。

1) 传统 PID 控制器,参数设置为: $k_p = 0.016$, $k_i = 0.014$, $k_d = 0.0008$ 。

2) FLC 控制器,为反馈线性化控制器,该控制器仅具有线性反馈项,参数设置为: $k_1 = 48$, $k_2 = 48$, $k_3 = 51$ 。

3) RISE 控制器,为本文所设计的积分鲁棒控制器,参数设置为: $k_1 = 48$, $k_2 = 48$, $k_3 = 51$, $k_r = 12$, $\beta = 30$ 。

在本实验中,采用0.5 Hz正弦信号作为3个对比控制器的跟踪轨迹,得到的实验结果如图3所示,对应性能指标如表2所示。对于气动柔性驱动器的位置控制系统,影响其跟踪性能的主要原因在于柔性驱动器参数辨识具有一定偏差。分析3种控制器的跟踪结果以及相应指标。PID控制器的误差较大,这是因为PID是不基于模型的控制器,鲁棒性较差,不能够完全处理控制系统中的干扰。相比之下,FLC控制器的跟踪效果有了很大改善,然而最大跟踪误差依然是RISE控制器的两倍,原因是FLC控制器仅具有线性补偿项,无法从根本上消除干扰。RISE控制器的性能指标最优,最大误差仅为 5.281° 。这是因为RISE控制器中的非线性积分鲁棒项可以有效地针对干扰进行抑制。实验证明所设计的RISE控制器具有很好的跟踪精度以及抗干扰性。

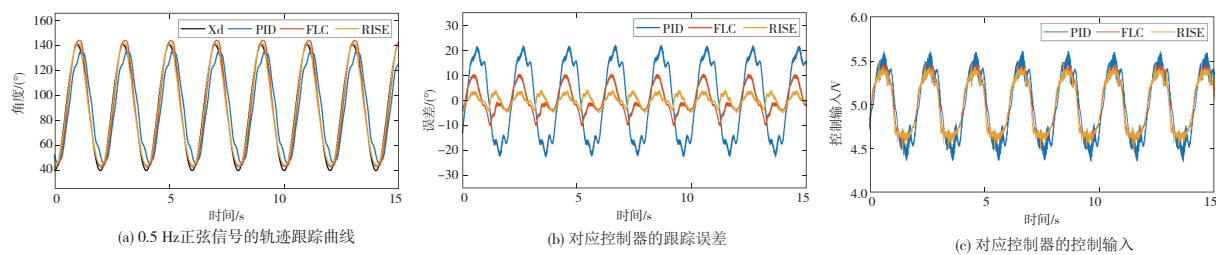


图3 0.5 Hz 正弦信号轨迹跟踪结果图

表2 控制器性能指标

控制器	M_e	μ	σ
PID	26.141	12.341	5.281
FLC	14.613	6.699	2.931
RISE	5.784	3.415	1.409

4 结语

本文设计了一种积分鲁棒(RISE)控制器,用于实现柔性驱动器的高精度轨迹跟踪。考虑到模型复杂度和辨识精度,柔性驱动器模型可视为具有参数不确定性的二阶线性模型,并且通过灰盒系统辨识具体参数。同时建立气动比例阀的动态模型,将内腔气压视为状态变量。为了抑制不确定性干扰,在所得系统模型基础上设计RISE控制器并通过基于李雅普诺夫的稳定分析从理论上证明其可以实现全局渐近稳定的跟踪性能。最后设计了柔性驱动器轨迹跟踪实验,实验结果表明了所提出的控制器的有效性和优越性。

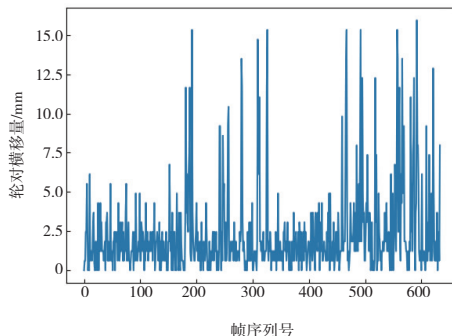
参考文献:

- [1] 李芳,吴阳,刘凯. 气动人工肌肉驱动的柔性仿生肩关节结构设计与优化[J]. 机械制造与自动化,2019,48(5):140-142,146.
- [2] 李满宏,马艳悦,张明路. 仿生柔性关节关键技术综述[J]. 机械设计,2018,35(11):1-9.
- [3] 谢胜龙,刘海涛,梅江平. 气动人工肌肉迟滞-蠕变特性研究现状与进展[J]. 系统仿真学报,2018,30(3):809-823.
- [4] IBRAHIM S, KRAUSE J C, RAATZ A. Linear and nonlinear low level control of a soft pneumatic actuator[C]//2019 2nd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft). Seoul, Korea (South): IEEE;434-440.
- [5] GEORGE THURUTHEL T, ANSARI Y, FALOTICO E, et al. Control strategies for soft robotic manipulators: a survey[J]. Soft Robotics,2018,5(2):149-163.
- [6] 冯文婷,苏东海,梁全. 气动人工肌肉智能控制系统研究[J]. 机械工程师,2016(4):45-46.
- [7] 鲍春雷,王斌锐,金英连,等. 气动肌肉关节的无模型自适应CMAC迟滞补偿控制[J]. 机器人,2015,37(3):298-303,309.
- [8] POLYGERINOS P, WANG Z, OVERVELDE J T B, et al. Modeling of soft fiber-reinforced bending actuators[J]. IEEE Transactions on Robotics,2015,31(3):778-789.

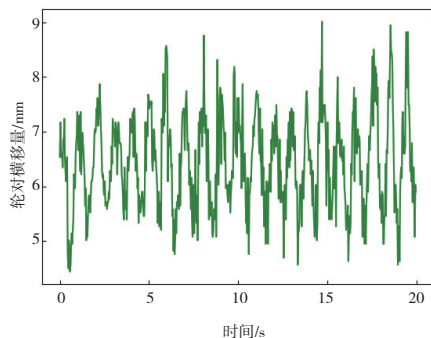
(下转第214页)



图 10 最终效果图像



(a) 图像处理仿真数据



(b) 根据采样定理复原横移量检测图

图 11 图像处理横移量识别结果

3 结语

本文提出了一种基于非接触式的图像处理技术对轮对横移量检测的新方法,将 Canny 边缘检测算法、Hough 变换直线检测算法和曲线拟合法相结合,对高速列车轮对横移量进行测量,测量精度可以达到 1 个像素差。

参考文献:

- [1] 孙丽霞. 高速列车横向运动稳定性和动态脱轨理论分析及评价方法研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2014.
- [2] 魏来. 高速列车相关运行安全性问题研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [3] 肖乾, 姜雄峰, 刘海涛, 等. 铁道车轮踏面损伤实时监测方法研究综述[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(4): 99-112, 126.
- [4] 祁明, 祝典, 邹武星. 图像处理技术综述[J]. 数字技术与应用, 2020, 38(2): 2.
- [5] 李晓航, 郭佳, 彭富伦, 等. 一种改进的基于 Hough 变换的道路图像检测方法[J]. 应用光学, 2016, 37(2): 229-234.
- [6] ZHAO D, YANG L, WU X, et al. An improved Roberts edge detection algorithm based on mean filter and wavelet denoising[M]// Advances in Information Technology and Industry Applications. Springer, Berlin, Heidelberg: 2012: 299-305.
- [7] KANOPOULOS N, VASANTHAVADA N, BAKER R L. Design of an image edge detection filter using the Sobel operator[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1988, 23(2): 358-367.
- [8] RAHMAWATI S, DEVITA R, ZAIN R H, et al. Prewitt and canny methods on inversion image edge detection; an evaluation[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1933(1): 012039.
- [9] 陈顺. 几种类型图像边缘检测的相关问题研究[D]. 武汉: 武汉纺织大学, 2021.
- [10] 徐超, 平雪良. 基于改进随机 Hough 变换的直线检测算法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(5): 66-73.
- [11] 高秋英, 王丽丽, 王荣忠. 最小二乘法曲线拟合及优化算法研究[J]. 工业控制计算机, 2021, 34(11): 100-101.
- [12] 叶肖伟, 董传智. 基于计算机视觉的结构位移监测综述[J]. 中国公路学报, 2019, 32(11): 21-39.

收稿日期: 2021-12-20

(上接第 196 页)

- [9] JUNG J, PARK M, KIM D, et al. Optically sensorized elastomer air chamber for proprioceptive sensing of soft pneumatic actuators[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(2): 2333-2340.
- [10] CHEN Y H, SUN N, LIANG D K, et al. A neuroadaptive control method for pneumatic artificial muscle systems with hardware experiments[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 146: 106976.
- [11] CAO Y, HUANG J, XIONG C H, et al. Adaptive proxy-based robust control integrated with nonlinear disturbance observer for pneumatic muscle actuators[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 25(4): 1756-1764.
- [12] CHEN C, TANG W, HU Y, et al. Fiber-reinforced soft bending actuator control utilizing on/off valves[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(4): 6732-6739.
- [13] MORELLI E A. Flight-test experiment design for characterizing stability and control of hypersonic vehicles[J]. Journal of

Guidance, Control, and Dynamics, 2009, 32(3): 949-959.

- [14] LICHOTA P, SZULCZYK J, AGUDELO NOREÑA D, et al. Power spectrum optimization in the design of multisine manoeuvre for identification purposes[J]. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2017: 1193.
- [15] SCHROEDER M. Synthesis of low-peak-factor signals and binary sequences with low autocorrelation (Corresp.) [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1970, 16(1): 85-89.
- [16] WANG T, ZHANG Y C, CHEN Z, et al. Parameter identification and model-based nonlinear robust control of fluidic soft bending actuators[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(3): 1346-1355.
- [17] MAKAR C, HU G, SAWYER W G, et al. Lyapunov-based tracking control in the presence of uncertain nonlinear parameterizable friction[C]//IEEE Transactions on Automatic Control. United States: IEEE: 1988-1994.

收稿日期: 2021-11-25