DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.01.052

速度波动补偿下协作机器人关节波动抑制方法设计

贺海涛[1],吴松松[2]

(1. 国能神东煤炭集团有限责任公司,内蒙古 鄂尔多斯 017209;
2. 北京智能开诚特种机器人科技有限公司,北京 100176)

摘　要:因协作机器人柔性动态特性会导致控制速度波动,致使关节位置控制偏差增大。提出环速度波动补偿下协作机器人关节波动抑制方法。分析关节运动状态,设计全维状态内外环观测器,搭建控制速度反馈渠道,引入 PI 控制器,搭建协作机器人关节速度控制架构,通过向内、外定子分配不同的力矩进行前馈补偿,初步抑制关节控制的波动,引入自适应算法准确估算传递误差,根据具体情况给出对应的前馈补偿值,借助内、外定子力矩分配器的辅助作用,进一步提高关节波动的有效抑制。实验结果表明:在低速和高速运动条件下应用所提方法的机器人关节最大波动幅值分别为 0.05 rad/s、0.07 rad/s,RMS 值在 0.5 以下,从而有效解决了关节波动问题。

关键词:冗余自由度;协作机器人;关节速度波动抑制;状态观测器;干扰估测器
中图分类号:TP242　　**文献标志码**:B　　**文章编号**:1671-5276(2025)01-0256-05

Design of Joint Fluctuation Suppression Method for Collaborative Robots under Velocity Fluctuation Compensation

HE Haitao[1], WU Songsong[2]

(1. Guoneng Shendong Coal Group Co., Ltd., Ordos 017209, China;
2. Beijing Intelligent Kaicheng Special Robot Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: To avoid the increased joint position control deviation of collaborative robots caused by control speed fluctuations due to the flexible dynamic characteristics of the robots, a joint fluctuation suppression method for collaborative robots under loop velocity fluctuation compensation is proposed. The joint motion state is analyzed, a full dimensional state inner and outer loop observer is designed, and a control speed feedback channel is established. A PI controller is introduced, a collaborative robot joint speed control architecture is built, different force moments to the inner and outer stators are allocated for feedforward compensation. Joint control fluctuations are reliminarily suppressed, and adaptive algorithms are introduced to accurately estimate transmission errors. Based on specific situation, corresponding feedforward compensation values are provided and further improvement on the effective suppression of joint fluctuations is made with the assistance of internal and external stator torque distributors. The experimental results show that the maximum fluctuation amplitudes of robot joints using the proposed method under low-speed and high-speed motion conditions are 0.05 rad/s and 0.07 rad/s respectively, with RMS values below 0.5, which effectively solves the problem of joint fluctuation.

Keywords: redundant degrees of freedom; collaborative robots; inhibition of joint velocity fluctuations; state observer; interference estimator

0　引言

协作机器人[1]是一种具备超过任务所需自由度数量的机器人系统。相比于刚好满足任务要求自由度数量的机器人,冗余自由度机器人可以通过调整多余的自由度,实现更灵活、更高效的运动和操作,从而满足多自由度机器人的运动需求。然而,正是因为协作机器人的关节模块具备过高的自由度,在关节负载较大的情况下,关节速度可能会出现极大波动,影响到机器人的稳定作业[2]。因此,有必要研究一种针对机器人关节波动的抑制方法。相关方法一直是研究的重点。

文献[3]搭建一种超扭曲滑模转矩观测器,通过实时跟踪机器人关节负载和关节速度变化,再结合滑模速度控制器和改进趋近律,得到新型滑模速度控制结构。根据观测器输出结果确定合理的控制参数,将其输入到控制结构中以实现速度补偿,但该方法计算复杂度较高。文献[4]采

第一作者简介:贺海涛(1975—),男,陕西神木人,高工,博士,研究方向为煤矿机电及其自动化,zzyn147258369@163.com。

集谐波减速器运动数据,并提取负载端角速率波动情况下的速度波动周期特性。基于位置域迭代学习控制原理,搭建前馈补偿速度波动抑制框架,通过迭代学习设置合理的补偿力矩,达到抑制关节速度波动的目的,但该方法的波动抑制效果还有提升的空间。文献[5]针对机器人关节速度进行跟踪,并采用伪逆算法解析速度冗余度,考虑关节执行器的跟踪任务,设计关节速度约束条件。基于此设计误差补偿函数,以满足关节速度稳态波动误差为目标,实现速度波动抑制。但该方法容易受到干扰因素影响。

为了解决上述方法中存在的问题,重点研究协作机器人关节波动抑制方法。在自适应算法和干扰估测器的共同作用下,抑制速度波动,完成关节波动的有效抑制。

1　机器人关节波动抑制方法设计

1.1　协作机器人关节速度内外环观测器设计

为了更好地实现机器人关节波动抑制,将协作机器人关节内的驱动电机,替换为双定子永磁无刷力矩电机,并对内、外定子所在的电机磁路分别安装隔磁圈,形成两套完全隔离的电路结构[6],分别进行内外环速度波动抑制处理。但是,首先要获取速度相关信息,设计内外环观测器可解决这一问题,需要的参数计算如下。

可以将协作机器人关节驱动电机的运动方程表示为

$$Y=\frac{t(\eta-A\alpha-\beta)}{\alpha J} \tag{1}$$

式中:t 表示运动时间;J、α 分别表示转子转动惯量和角速度;η、β 分别表示电磁转矩和关节负载转矩;A 表示摩擦因数。其中,电磁转矩计算公式为

$$\eta=1.5p[\chi i_q+(\phi_d-\phi_q)i_d i_q] \tag{2}$$

式中:p 表示极对数;χ 表示等效磁链;i_d、i_q 分别表示转子坐标系中 d 轴、q 轴的电流;ϕ_d、ϕ_q 分别表示转子坐标系中 d 轴、q 轴的定子电感。

从式(1)可以看出,冗余自由度协作机器人关节驱动电机的运动特性,会受到负载转矩和输出转矩的共同影响,而磁场、电流又是决定转矩的关键因素。因此,针对机器人关节速度波动进行抑制,可以看做对磁场和电流的控制。将 d 轴电流、q 轴电流、转子角速度作为状态变量,结合电机的电流和电压方程,可以生成最终的关节运动驱动电机状态方程,即

$$\begin{bmatrix}\dot{\bar{i}}_d\\ \dot{\bar{i}}_q\\ \dot{\bar{\alpha}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\frac{R}{L} & p\alpha & 0\\ -p\alpha & \frac{R}{L} & -\frac{p\chi}{L}\\ 0 & 1.5\frac{p\chi}{L} & 0\end{bmatrix}Y+\begin{bmatrix}\frac{u_d}{L}\\ \frac{u_q}{L}\\ -\frac{\beta}{J}\end{bmatrix} \tag{3}$$

式中:$\dot{\bar{i}}_d$、$\dot{\bar{i}}_q$、$\dot{\bar{\alpha}}$ 分别表示输出的状态变量;R 表示绕组等效电阻;L 表示等效电感;u_d、u_q 分别表示 d 轴、q 轴电压。根据其实时输出的状态变量,可以了解协作机器人当前运行状态,作为关节速度检测和波动抑制的基础。协作机器人关节运动状态分析与搭建机器人关节控制速度补偿回路之间存在密切的联系。机器人关节运动状态分析,包括运动时间、角速度、转矩等参数的测量和监测。通过对关节运动状态的分析,可以了解机器人在执行任务过程中的实际运动状态。

在得到以上参数后,对正常运行状态下的协作机器人关节速度进行检测和跟踪[7],观察速度波动情况,应用上述参数,建立速度反馈结构如图 1所示。

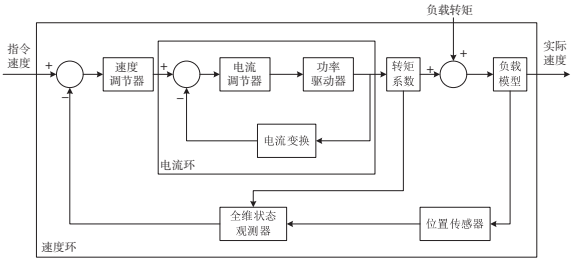


图 1　关节速度状态反馈内外环观测器

如图 1 所示,关节速度反馈观测器结构中的核心模块是全维状态观测器,关节驱动电机的状态向量是状态观测器的输入变量,通过电流环和速度环的同步作用,输出贴合真实关节速度变化状态的反馈速度波形。在全维状态观测器搭建过程中,先定义一个特征多项式。

$$f(s)=d[s\boldsymbol{I}-(\boldsymbol{\delta}-\boldsymbol{QC})] \tag{4}$$

式中:s 表示观测点;d 表示求一个方阵的行列式的数学函数;$\boldsymbol{I}$ 表示电流矩阵;$\boldsymbol{\delta}$ 表示系统矩阵;$\boldsymbol{Q}$ 表示反馈增益矩阵;$\boldsymbol{C}$ 表示输出矩阵。

利用上述数学公式反向推理出反馈增益矩阵[8],基于此即可构造出式(5)所示的闭环观测系统。

$$\begin{cases}x'=\boldsymbol{\delta}x+\boldsymbol{E}\varepsilon+\boldsymbol{Q}(y-y')\\ y'=f(s)\boldsymbol{C}x'\end{cases} \tag{5}$$

式中:x、y 和 x'、y'分别表示状态变量、输出变量的估计值和真实观测值;$\boldsymbol{E}$ 表示控制矩阵;ε 表示输入变量。再结合经典运动学方程,即可生成闭环全维速度状态观测器,如式(6)所示。

$$\begin{bmatrix}\theta'\\ \gamma'\\ \beta'\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & 1 & -\beta/2J\\ 0 & 0 & -1/J\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\theta\\ \gamma\\ \beta\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\bar{i}_{\mathrm{d}}\\ \bar{i}_{\mathrm{q}}\\ \bar{\alpha}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}k\beta/2J\\ k/J\\ 0\end{bmatrix}+x'y' \tag{6}$$

式中:θ 表示电机转子位置角度;γ 表示电机机械角速度;θ'、γ'、β'分别表示状态观测器给出的状态变量反馈值。

1.2　搭建机器人控制速度波动内环补偿回路

通过以状态观测器为核心的反馈结构,获取冗余自由度协作机器人关节控制速度波动情况,并考虑非线性因素[9],如电机转矩脉动、转矩波动等,通过给内、外定子分配不同的力矩实现前馈补偿,来初步抑制速度的波动。实际操作过程中,引入 PI 控制器,搭建协作机器人关节速度控制架构,如图 2 所示。

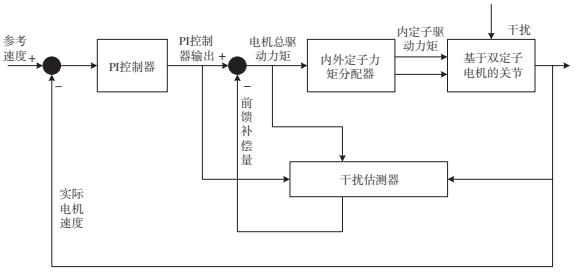


图 2　协作机器人关节速度波动控制系统框图

由图 2 所示,该控制系统在输入时需考虑参考速度和实际电机速度,由 PI 控制器统一输出至干扰估测器和内外定子力矩分配器,根据干扰情况通过分配器的参数调节机器人关节,实现速度波动控制。按照图 2 所示的控制框图实现关节速度波动前馈补偿时,总结多种干扰因素的影响,得出周期性干扰参数和非线性干扰参数。快速傅里叶变换是一种用于将信号从时间域转换到频率域的数学算法,其基本原理是将输入的一段离散时间域信号进行频谱分解,得到该信号在不同频率下的振幅和相位信息。为此,结合快速傅里叶变换频谱分析算法,分析不同频率下的关节速度稳态波动情况,并将其表示为周期函数形式,得到周期性干扰数学表达式,进行进一步波动补偿:

$$\lambda=\sum_{i=1}^{5}(\theta' a_i\sin\omega t+\gamma' b_i\cos\omega t)\beta' \tag{7}$$

式中:a_i、b_i 分别表示电流 i 下的控制参数;ω 表示实际关节驱动电机运行速度。

通过式(7)确定周期性干扰的幅度和相位,将其与非线性干扰结合起来,推算出合适的前馈补偿量,从而实现机器人关节速度波动补偿。

通过以上步骤,构建了一个补偿回路,包括全维状态观测器、前馈补偿、PI 控制器和频谱分析补偿等关键组件,以抑制协作机器人关节控制速度的波动。补偿回路能够根据实时的运动状态,进行准确的补偿操作,提高机器人关节速度的精确性和稳定性。

1.3　速度波动抑制干扰抑制器的外环补偿策略

搭建机器人关节速度波动补偿回路是一种具体的控制策略,用于实现关节速度波动的抑制。但上述基于补偿控制回路进行速度波动抑制时,并未考虑到传递误差干扰,使得最终速度波动抑制效果较差,为此在内回路干扰观测器过程中引入自适应算法。基于自适应外环干扰估测器的速度波动抑制结构如图 3 所示。

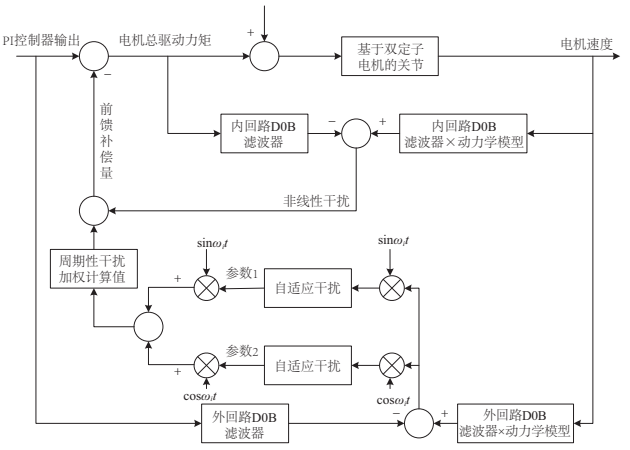


图 3　外环干扰估测器的速度波动抑制结构

对于关节速度波动抑制外回路,利用外环干扰观测器和自适应算法获取周期性干扰估计值,具体计算形式为

$$\lambda_i=\frac{r\varpi^{-1}\Phi\tau_i\nu}{\nu^2+r\varpi^{-1}\Phi\tau_i\nu+\omega_i^2}+\lambda(\varpi^{-1}\Phi-1)\zeta \tag{8}$$

式中:τ 表示自适应率;e 表示估测干扰误差;r 表示限制滤波器;ϖ表示名义传递函数;Φ 表示实际系统传递函数;ν 表示传递函数中的变量;ζ 表示速度闭环 PI 控制器的输出。

随后,将外回路干扰估测器给出的非线性干扰估算值引入其中,与周期性干扰估计值进行加

权计算,确定关节速度波动抑制涉及的总干扰,确定精确的前馈补偿值[10]。在内、外定子力矩分配器的辅助下,向双定子电机中的外定子和内定子分配具体的力矩,在内外定子的共同作用下,实现机器人关节速度波动抑制,过程为:

$$\psi = \min \sum_{i=1}^{5} \sqrt{a_i^2 + b_i^2} + \sigma_2' \tag{9}$$

$$\begin{cases} \sigma_1' = \sum_{i=5}^{\Psi} \lambda_i \\ \sigma_2' = \hat{\sigma} - \sigma_1' \end{cases} \tag{10}$$

式中:σ_1 表示内定子的额定输出力矩;σ_1' 表示内定子的分配力矩;σ_2' 表示外定子的分配力矩;$\hat{\sigma}$表示总力矩。通过上述计算完成力矩合理分配,确保内定子电流处于不饱和状态的前提下,实现协作机器人关节速度波动的有效抑制。

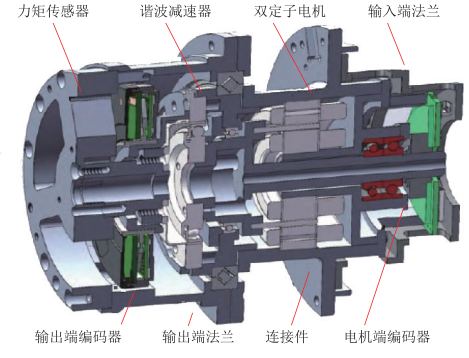
2　实验与分析

2.1　实验准备

在新型冗余自由度协作机器人关节速度波动抑制方法设计完成后,需要通过实验测试观察该方法应用效果,从而确定新方法是否能推广应用。本次实验过程中,参考冗余自由度协作机器人结构,搭建包含7个自由度的冗余自由度机械臂,其整体结构如图4(a)所示。每个关节包括控制器、双定子永磁同步电机、谐波减速器等子结构,安装现场如图4(b)所示,具体的安装结构示意图如图4(c)所示。

(a) 整体外观

(b) 机械臂关节安装



(c) 关节整体结构

图4　协作机器人关节装置

双定子力矩电机作为关节速度波动抑制的核心,其具体运行参数如表1所示。

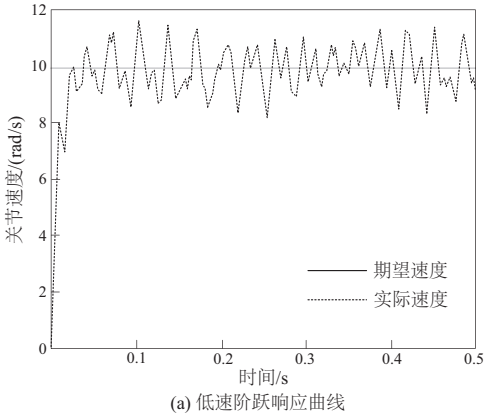
表1　双定子永磁同步电机参数

参数	内定子	外定子
绕组相电阻/Ω	0.09	0.17
绕组相电感/mH	0.008	0.079
额定转速/(r/min)	1 000	2 000
额定转矩/Nm	0.09	0.27
电流转矩常数/(Nm/A)	0.013	0.045
额定电流/A	6.5	6.0
额定电压/V	48	48
额定输出功率/W	9.45	56.55

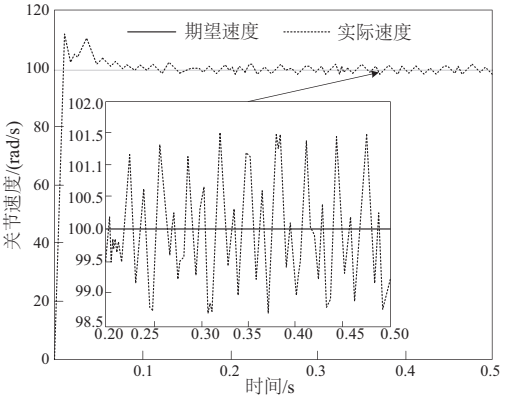
在上述实验环境下,分别采用所提方法、文献[3]方法、文献[4]方法进行机器人关节速度波动抑制,观察不同方法抑制处理后速度波动幅值。

2.2　关节速度波动检测

在低速和高速条件下,分别通过状态观测器对实验装置进行观察,获取协作机器人关节速度响应曲线如图5所示。



(a) 低速阶跃响应曲线



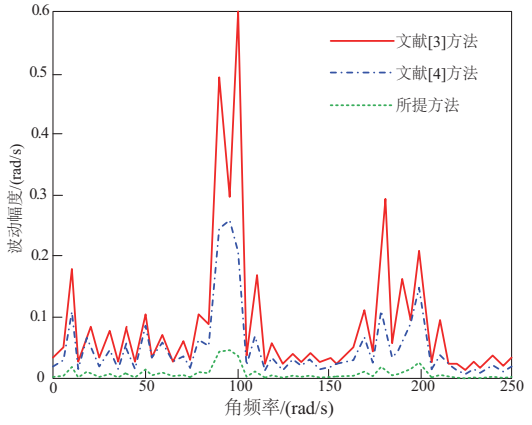
(b) 高速阶跃响应曲线

图5　协作机器人关节速度响应曲线

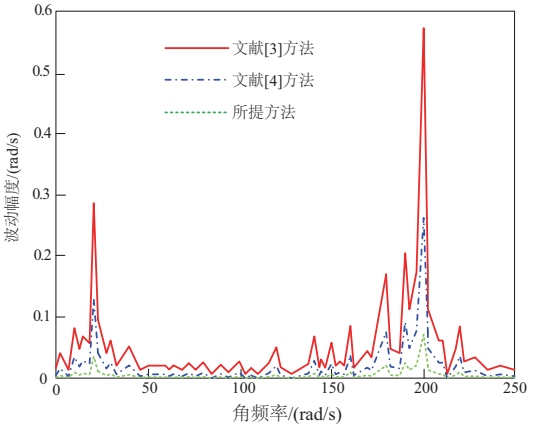
如图 5 所示,无论双定子电机处于低速还是高速运行条件,协作机器人关节速度都存在很大的波动,且波动频率会随着转速的提高而提高,需要进行关节速度波动抑制。

2.3　关节速度波动抑制结果

采用 3 种方法分别进行协作机器人关节速度波动抑制,并在抑制处理后观察协作机器人关节速度稳态波动变化,得到关节速度波动幅度对比结果如图 6 所示。



(a) 波动抑制后低速条件下关节速度波动曲线



(b) 波动抑制后高速条件下关节速度波动曲线

图 6　不同方法抑制后关节速度波动幅度

根据图 6(a)所示,低速条件下应用新提出的方法完成波动抑制后,协作机器人的关节速度最大波动幅度为 0.05 rad/s,其他两种方法抑制后的最大波动幅度分别为 0.6 rad/s 和 0.27 rad/s。而高速条件下,3 种方法产生的关节速度最大波动幅度分别为 0.07 rad/s、0.58 rad/s、0.27 rad/s。整体来看,所提方法可以针对低频和中高频速度波动进行有效补偿,且补偿效果明显优于文献提出方法,具有稳定性和可靠性。这是因为所提方法根据机器人的运动状态,设计协作机器人关节速度内外环观测器,并将其作为核心反馈结构,有效抑制速度的波动情况。

2.4　关节波动抑制 RMS 对比结果

为了进一步测试所提方法的效果,在不同电机转速情况下应用 3 种方法进行机器人关节波动抑制,观察关节稳态误差并计算出 RMS 值,计算公式如下:

$$\Psi_{\mathrm{RMS}}=\sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{N}\Gamma_t^2}{N}} \tag{11}$$

式中:N 表示机器人运行关节工作总时间;Γ 表示速度稳态误差。由此,生成图 7 所示的对比结果。

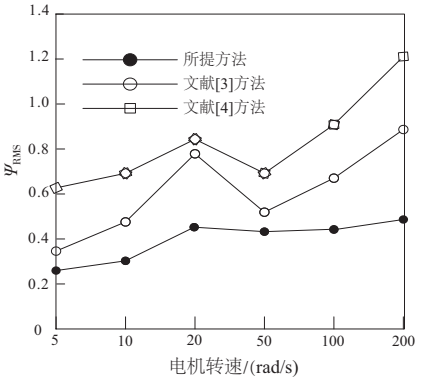


图 7　不同方法波动抑制后关节 RMS 值对比

从图 7 可以看出,利用所提方法进行速度波动抑制处理后,机器人关节稳态误差 RMS 值保持在 0.5 以下,相比另外两种方法其 RMS 值明显更低。整体来看,所提方法可以针对低频和中高频速度波动进行有效补偿,且补偿效果明显优于文献提出方法,使得机器人关节控制稳定。同时,抑制处理后关节稳态误差较小,这是因为所提方法已总结多种干扰因素的影响状况,采用快速傅里叶变换算法获取周期性干扰数学表达式,实现关节速度的波动补偿,可以更好地满足机器人工作要求。

3　结语

为了提高机器人的运动控制精度,提出一种结合状态观测器、干扰观测器、自适应算法的新型波动抑制方法。分析协作机器人关节运动状态后,搭建机器人关节速度波动补偿回路,引入自适应算法设计自适应干扰估测器,从而实现速度波动抑制。从实验测试结果也可以看出,在不同的应用环境下,该方法都表现出优越的速度波动抑制效果,后续可以广泛推广应用。

(下转第 275 页)

参考文献:

[1] 马建,刘晓东,陈轶嵩,等. 中国新能源汽车产业与技术发展现状及对策[J]. 中国公路学报,2018,31(8):1-19.

[2] LIU Y H,LU K F,PENG Z R,et al. Autonomous shuttle acceptance in an American suburban context:a revealed preference study in Lake Nona, Florida [J]. Travel Behaviour and Society,2024,37:100865.

[3] 唐葆君,王翔宇,王彬,等. 中国新能源汽车行业发展水平分析及展望[J]. 北京理工大学学报(社会科学版),2019,21(2):6-11.

[4] SUN R J,TIAN Y X,ZHANG H B,et al. Data-driven synthetic optimization method for driving cycle development[J]. IEEE Access,2019,7:162559-162570.

[5] SALIHU F,DEMIR Y K. Driving cycle for passenger cars on urban roads in pristina, Kosovo [J]. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering,2023,18(1):69-93.

[6] BRADY J,O´MAHONY M. Development of a driving cycle to evaluate the energy economy of electric vehicles in urban areas[J]. Applied Energy,2016,177:165-178.

[7] SEERS P,NACHIN G,GLAUS M. Development of two driving cycles for utility vehicles [J]. Transportation Research Part D:Transport and Environment,2015,41:377-385.

[8] 王楠楠.城市道路行驶工况构建及油耗研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2012.

[9] 张宏,姚延钢,张露.呼和浩特市轻型汽车运行工况构建研究[J]. 公路交通科技,2019,36(11):104-110.

[10] 姜平,石琴,陈无畏.基于马尔科夫的城市道路行驶工况构建方法[J]. 农业机械学报,2009,40(11):26-30.

[11] 李耀华,任田园,邵攀登,等. 基于马尔可夫链的西安市城市公交工况构建[J]. 中国科技论文,2019,14(2):121-128.

[12] 徐婷,崔世超,刘明,等. 高原山区乘用车行驶工况构建方法研究[J]. 公路交通科技,2021,38(2):117-124.

[13] CHEN Z Y,FANG Z Y,ZHANG Q,et al. Constructing the real-world driving cycle for electric vehicle applications:a comparative study[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2022:014233122210943.

[14] CUI Y P,ZOU F M,XU H,et al. A novel optimization-based method to develop representative driving cycle in various driving conditions [J]. Energy, 2022, 247:123455.

[15] 胡志远,秦艳,谭丕强,等. 基于大样本的上海市乘用车行驶工况构建[J]. 同济大学学报(自然科学版),2015,43(10):1523-1527.

[16] 曾小荣,孔令文,杨学易,等. 主成分分析在车辆行驶工况中的应用[J]. 汽车实用技术,2014(5):5-9.

[17] 潘登.混合动力汽车城市循环工况构建及运行工况多尺度预测[D]. 北京:北京理工大学,2015.

[18] 王绪,李睿,黄英,等. 考虑不同路面特征的军用履带车辆循环工况构建[J]. 兵工学报,2024,45(3):907-915.

[19] 黄鼎友,曾文杰,曾发林.某纯电动汽车动力系统参数匹配与仿真分析[J]. 机械制造与自动化,2018,47(6):130-133.

收稿日期:2024-07-17

(上接第 260 页)

参考文献:

[1] 吕良和.液压驱动关节的自适应鲁棒速度控制研究[J]. 国防交通工程与技术,2023,21(3):8-12.

[2] 王耀武,张得礼,胡雪刚.基于自适应阻抗模型的双机器人协调搬运内力控制[J]. 机械制造与自动化,2021,50(6):162-165.

[3] 仲宇翔,林鹤云,王激尧,等. 基于滑模控制的记忆电机调磁转速波动抑制[J]. 中国电机工程学报,2023,43(7):2512-2521.

[4] 陈祥文,李海涛.带有谐波减速器的框架系统速度波动抑制[J]. 光学精密工程,2022,30(20):2457-2466.

[5] 李克讷,马玉如,王温鑫,等. 基于伪逆的冗余度机械臂关节速度约束方案[J]. 仪器仪表学报,2022,43(2):225-233.

[6] 卢浩,郭士杰,杨志强,等. 2R 耦合驱动关节动力学建模与参数辨识[J]. 机械工程学报,2022,58(23):51-64.

[7] 仇斌权,陈思鲁,古莹奎,等. 面向能耗最优的机器人关节梯形速度轨迹同步规划[J]. 机械设计与研究,2022,38(4):32-36,42.

[8] 王冲冲,杨桂林,陈庆盈,等. 基于自适应干扰估测器的协作机器人关节速度波动抑制方法[J]. 机器人,2023,45(1):48-57.

[9] 谢能斌,辛绍杰.基于 PSO-SA 的机器人关节空间轨迹规划[J]. 计算机应用与软件,2023,40(1):122-128.

[10] 王清清,奚琳.基于 SSD 的码垛机械臂关节速度纠偏运动规划[J]. 计算机仿真,2021,38(7):340-344.

收稿日期:2023-09-19