

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.03.042

低地板有轨电车动态限界连续测量试验研究

贾楠¹, 贾尚帅¹, 仇实¹, 卢波¹, 宋彦君¹, 尹昱淞¹, 陈建政², 池茂儒²

(1. 中车唐山机车车辆有限公司 河北省轨道车辆高能级技术创新中心, 河北 唐山 063035)

(2. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要:低地板有轨电车结构紧凑且离地间隙小, 这导致运行时存在与站台或其他轨道周围建筑发生碰撞的风险, 需要进行严格的动态限界校核。而目前还无法对低地板有轨电车在整条线路运行过程中的动态限界进行实时监控。为此, 提出并搭建基于2D结构光测试系统的低地板有轨电车动态限界连续监测方法, 并对其以最高速度运行通过不同半径曲线时的动态包络线进行求解, 进而开展车辆动态限界校核。试验结果表明: 提出的方法可以有效地对低地板有轨电车在运行过程中的动态包络线进行实时测量, 其动态限界满足设计要求。

关键词:低地板有轨电车; 动态限界; 2D结构光系统; 连续测量

中图分类号:U260.2 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2026)03-0214-06

Experimental Study on Continuous Measurement of Dynamic Clearance for Low-Floor Trams

JIA Nan¹, JIA Shangshuai¹, QIU Shi¹, LU Bo¹, SONG Yanjun¹, YIN Yusong¹, CHEN Jianzheng², CHI Maoru²

(1. CRRC Tangshan Locomotive and Rolling Stock Co., Ltd., Hebei High-level Technology Innovation

Center of Rail Vehicles, Tangshan 063035, China;

2. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The compact structure and low ground clearance of low-floor trams pose a risk of collision with platforms or other trackside structures during operation, necessitating strict dynamic clearance verification. However, real-time monitoring of the dynamic clearance of low-floor trams throughout entire line operations is currently unavailable. To address this issue, this paper proposes and develops a continuous monitoring method for the dynamic clearance of low-floor trams based on a 2D structured light measurement system. The dynamic envelope lines of the vehicle when passing through curves of different radii at maximum speed are calculated, enabling dynamic clearance verification. Experimental results demonstrate that the proposed method can effectively measure the dynamic envelope lines of low-floor trams in real-time during operation, and the dynamic clearance meets design requirements.

Keywords: low-floor tram; dynamic clearance; 2D structured light system; continuous measurement

0 引言

随着城市轨道交通的发展, 低地板有轨电车因具有运维成本低、外形美观、建设周期短等特点, 逐渐成为了中小城市和旅游观光系统中的主要交通运输工具。然而, 由于低地板有轨电车结构更加紧密, 且离地间隙更小, 这导致其和站台或其他轨道周围建筑发生碰撞的风险。因此, 为保证列车的运行安全, 需要对车辆限界进行校核^[1-5]。

车辆限界校核的核心工作是获取车辆在运行过程中的动态轮廓, 即车辆轮廓线在垂直方向和水平方向上的位移。目前, 通常采用仿真计算的方法来获取车辆的动态轮廓。1913年, 欧洲铁路联盟提出了UIC限界计算方法。UIC中的车辆运动

轮廓是指车辆运动极限位置, 没有考虑运行时的轨道缺陷、振荡的影响^[6-8]。CEN发布EN15273系列欧洲铁路限界标准, 其原理基本和UIC类似。为了使我国地铁车辆限界统一标准, 我国颁布了CJJ96—2018《地铁限界标准》, 其标准考虑的因素比较全面, 计算得到的是比较可靠的动态包络线, 而不是很多计算标准中采用的运动轮廓或者静态轮廓。运动轮廓或者静态轮廓限界校核方法往往需要很多经验因素, 针对不同的列车参数, 可能浪费空间或者存在干涉的风险。目前针对有轨电车动态限界校核则常采用德国的BOStrab限界暂行规范^[9], 此规范首次考虑了车辆各个部件的振动行为。

相较于仿真计算, 目前通过试验测试车辆动

第一作者简介:贾楠(1986—), 女, 高级工程师, 硕士, 研究方向为轨道交通车辆共性技术, jianan.ts@crrecg.cc。

态限界的手段并不丰富。工程上常采用包裹法来进行动态限界校核。包裹法是指按照车辆限界的最大值在车体关键危险点粘贴泡沫板,让车辆以特定速度运行在线路上运行。在结束运行返回车辆段之后,观察泡沫板发生剐蹭的情况。如果泡沫板未发生剐蹭,则证明车辆运行过程中动态限界满足要求。如果泡沫板发生剐蹭,则说明车辆动态限界存在超限的情况。对于目前采用的包裹法校核动态限界,存在以下缺点:1)当粘贴泡沫发生剐蹭时,无法确定具体车辆动态限界超限的位置;2)无法定量确定车辆的动态限界情况。尤其当车辆动态限界超限时,无法知道具体超限数值。3)在高速条件下,泡沫板无法粘贴牢固,会导致其被风吹掉。这样会对测试结果产生干扰,无法确定是因为风吹掉还是发生了剐蹭。除此之外,还可以通过激光测量原理^[10-14],在特定线路区间安装测量系统,测试车辆通过时的轮廓。然而,此方法无法测试车辆在整个运行过程中的动态轮廓线。

因此,为实现低地板有轨电车动态限界的连续监测。本文提出并搭建基于2D结构光测试系统的低地板有轨电车动态限界连续监测方法,并对其以最高速度运行通过不同半径曲线时的动态包络线进行求解,进而开展车辆动态限界校核工作。

1 动态限界概述

车辆在实际运行过程中,受到运行速度、悬挂系统、间隙、轨道几何偏差、轮轨冲击、超高等因素的影响,其轮廓相对于轨道基准坐标系存在一定的偏移。动态限界是指车辆轮廓上任意一点的偏移量组成的动态包络线。

轨道基准坐标系如图1所示,其垂直于轨道平面。横坐标和左右两侧钢轨轨顶相切,纵坐标为左右两侧钢轨轨顶连线的中垂线,轨道基准坐标系的坐标原点可以认为是左右两侧钢轨的轨距中心点。

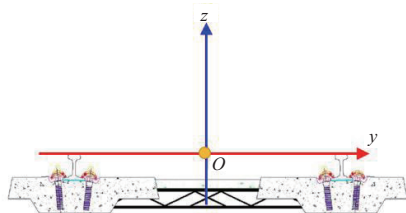


图1 基准坐标系示意图

车辆的某一个断面,在任一时刻相对于轨道基准坐标系均存在一定程度的偏移。在某段时间

内,例如车辆通过某个曲线这一过程,所有时刻下相对于轨道基准坐标系发生偏移后的轮廓中,所组成的最大轮廓线为这段时间内车辆的动态包络线。

动态包络线主要和车辆的运行姿态有关,发生最大偏移的时刻具有不确定性,因此需要采集系统具有较高的频率分辨率,尽可能采集到更多的“瞬时”截面轮廓^[15]。

2 动态限界连续测量原理

车辆动态限界测试的核心内容是对车辆的动态包络线进行测试。通过2D结构光测试系统,测得车辆在运行过程中,钢轨特征点在车体坐标系下的坐标位置,进而计算得到轨道基准坐标系。由车体坐标系相对于轨道基准坐标的旋转角度和平移量生成旋转矩阵和平移矩阵,最终可以计算车体各个轮廓点在轨道坐标系中的位置。测量原理如图2所示。

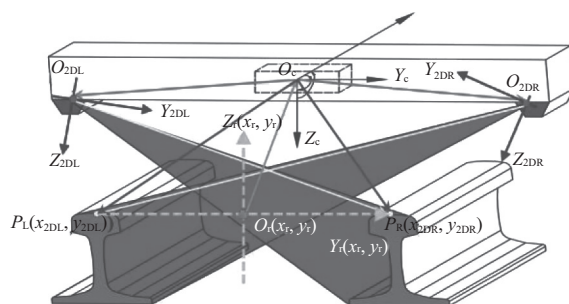


图2 车体动态轮廓测量原理图

主要计算步骤如下。

1) 标定:通过标定的方法,获取左右两侧2D结构光测试系统的坐标系 $O_{2DL}-Y_{2DL}-Z_{2DL}$ 和 $O_{2DR}-Y_{2DR}-Z_{2DR}$ 与车体坐标系之间的变换关系,得到坐标变换矩阵。假设左右两侧2D结构光测试系统,相对于车体水平方向的安装角度为 θ_L 和 θ_R ,安装位置在车体坐标系中分别为 $O_{2DL}(x_{cL}, y_{cL})$ 和 $O_{2DR}(x_{cR}, y_{cR})$,那么2D结构光系统坐标和车体坐标系之间的坐标变换矩阵可以表示为

$$R_{2DL} = \begin{bmatrix} \cos\theta_L & \sin\theta_L \\ -\sin\theta_L & \cos\theta_L \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$M_{2DL} = \begin{bmatrix} x_{cL} \\ y_{cL} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R_{2DR} = \begin{bmatrix} \cos\theta_R & \sin\theta_R \\ -\sin\theta_R & \cos\theta_R \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$M_{2DR} = \begin{bmatrix} x_{cR} \\ y_{cR} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:矩阵 $\mathbf{R}_{2DL}$ 和 $\mathbf{R}_{2DR}$ 分别为左右两侧2D结构光测试系统坐标相对于车体坐标系的旋转矩阵;矩阵 $\mathbf{M}_{2DL}$ 和 $\mathbf{M}_{2DR}$ 分别为左右两侧2D结构光测试系统坐标相对于车体坐标系的平移矩阵。

2) 测量及坐标变换:采用2D结构光测试系统,测试左右侧钢轨特征点在2D坐标系下的数值 $P_L(x_{PL}, y_{PL})$ 和 $P_R(x_{PR}, y_{PR})$ 。采用坐标变换矩阵,将2D结构光测试系统测得的特征点坐标转换为车体坐标系 $P_{cL}(x_{cL}, y_{cL})$ 和 $P_{cR}(x_{cR}, y_{cR})$ 。具体方法为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x_{cL} \\ y_{cL} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{2DL} \cdot \begin{bmatrix} x_{PL} \\ y_{PL} \end{bmatrix} + \mathbf{M}_{2DL} \\ \begin{bmatrix} x_{cR} \\ y_{cR} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{2DR} \cdot \begin{bmatrix} x_{PR} \\ y_{PR} \end{bmatrix} + \mathbf{M}_{2DR} \end{cases} \quad (5)$$

3) 轨道基准坐标系求解:通过左右特征点的坐标 $P_{cL}(x_{cL}, y_{cL})$ 和 $P_{cR}(x_{cR}, y_{cR})$,计算得到轨道基准坐标系的原点在车体坐标系的位置 $O_r(x_r, y_r)$

$$\begin{cases} x_r = (x_{cL} + x_{cR}) / 2 \\ y_r = (y_{cL} + y_{cR}) / 2 \end{cases} \quad (6)$$

4) 坐标系相对位置关系求解:通过求解车体坐标系和轨道基准坐标系的相对位置关系,得到坐标变换矩阵

$$\phi = \arctan\left(\frac{y_{cL} - y_{cR}}{x_{cL} - x_{cR}}\right) \quad (7)$$

$$\mathbf{R}_{rc} = \begin{bmatrix} \cos\phi & \sin\phi \\ -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{M}_{rc} = \begin{bmatrix} -x_r \\ -y_r \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: ϕ 为轨道基准坐标系和车体坐标系之间的夹角; $\mathbf{R}_{rc}$ 为旋转矩阵; $\mathbf{M}_{rc}$ 为平移矩阵。

5) 轮廓点求解:通过变换矩阵,计算车体各个轮廓点 $P_{ci}(x_{pci}, y_{pci})$ 在轨道坐标系中的位置 $P_{ri}(x_{pri}, y_{pri})$ 。最终得到任意时刻的车体轮廓线

$$\begin{bmatrix} x_{pri} \\ y_{pri} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{rc} \cdot \begin{bmatrix} x_{pci} \\ y_{pci} \end{bmatrix} + \mathbf{M}_{rc} \quad (10)$$

3 低地板有轨电车动态限界试验研究

3.1 测点安装简介

选取某低地板有轨电车的头车为试验车辆,在车体前后两个测试断面处的底部安装2D结构光测试系统。两个测试断面距车体中心均为2 550 mm。如表1和图3所示,测试系统主要由工装梁和传感器组成,安装于车体底部。两个2D激光传感器分别扫描左右两侧的钢轨顶面,对钢

轨特征点进行测量。传感器的采样频率为300 Hz,即测试系统每秒储存300帧钢轨廓形图片。图4(a)给出了测试系统的实拍图,图4(b)给出了测量数据处理流程。检测算法主要步骤分为结构光传感器标定、轨道廓形点云快速跟踪、钢轨特征点检测、轨道坐标系反演及车辆轮廓点姿态求解。测试系统具有实时测试和计算的能力。

表1 测试系统组成

序号	名称	数量	量程	精度
1	2D激光传感器	4	500 mm	10 μm
2	数据采集器	1	10 v	0.01%
3	工装量	1	—	—
4	采集电脑	1	—	—
5	数据传输线缆	4	—	—
6	标定梁	1	—	—

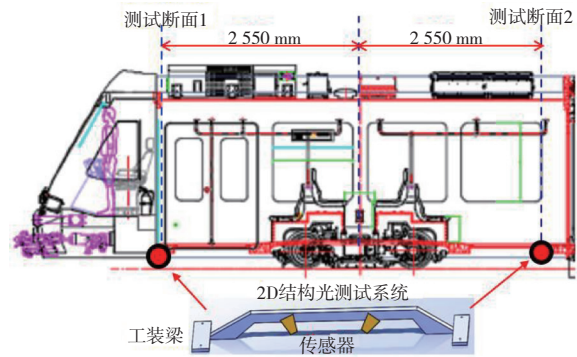
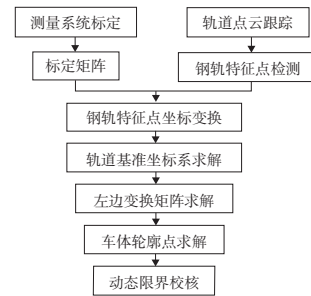


图3 测点安装示意图



(a) 测试系统实拍图



(b) 数据处理流程

图4 测试系统及处理流程

3.2 测试车辆轮廓

图5给出了此测试列车的车体静态轮廓图以

及各个控制点,共计 24 个车轮轮廓控制点,控制点在车体坐标系中的位置如表 2 所示。通过测量列车运行条件下,各个控制点相对于轨道基准坐标系的位移,就可以得到车辆的动态轮廓图。对得到的车辆动态轮廓图求最大值,即得到车辆运行时的动态包络线。

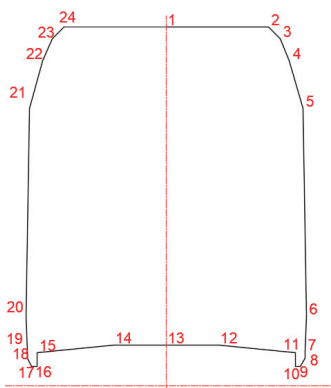


图5 车辆轮廓控制点选取位置

表 2 车体轮廓控制点 单位:mm

控制点	横坐标	垂坐标
1	0	3 337.00
2	905.95	3 337.00
3	1 032.68	3 207.97
4	1 116.00	3 014.94
5	1 240.00	2 574.63
6	1 270.00	650.00
7	1 260.49	320.00
8	1 259.00	268.25
9	1 212.34	185.00
10	1 197.00	185.00
11	1 197.00	313.47
12	487.94	378.50
13	0	378.50
14	-487.94	378.50
15	-1 197.00	313.47
16	-1 197.00	185.00
17	-1 212.34	185.00
18	-1 259.00	268.25
19	-1 260.49	320.00
20	-1 270.00	650.00
21	-1 240.00	2 574.63
22	-1 116.00	3 014.94
23	-1 032.68	3 207.97
24	-905.95	3 337.00

3.3 试验工况及限值

测试列车在某实际运营线路上以线路最高限速运行时的动态限界情况。测试区间主要存在直线和 $R25\text{ m}$ 、 $R35\text{ m}$ 、 $R50\text{ m}$ 、 $R200\text{ m}$ 这几种不同半径的轨道曲线,各工况列车运行通过各个半径轨道曲线的速度也不同,详见表 3。

表 3 测试工况

工况	曲线半径/m	超高/mm	速度/kmh ⁻¹
工况 1	直线	/	80
工况 2	25	0	15
工况 3	35	0	20
工况 4	50	0	20
工况 5	50	100	25
工况 6	200	140	70

参考此试验车辆的技术文件,给出了车辆动态限界尺寸,如图 6 所示。在不同曲线半径,其动态限界的尺寸也不同,主要差异体现在动态限界的加宽量上。表 4 给出了上述曲线半径下动态限界的加宽量。

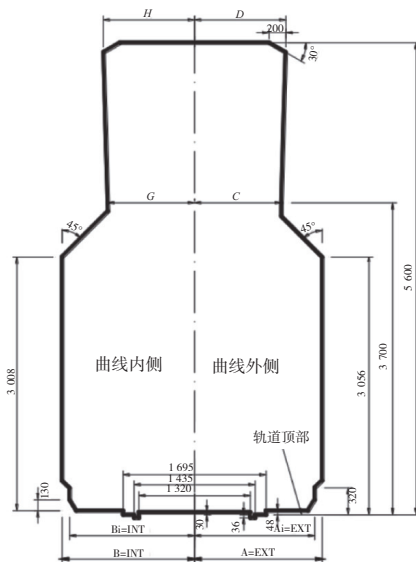


图 6 动态限界

表 4 不同半径下的限界尺寸

半径/m	站台以上部分/mm		站台以下部分/mm	
	曲线内侧	曲线外侧	曲线内侧	曲线外侧
25	1 690	1 701	1 690	1 701
35	1 616	1 623	1 616	1 623
50	1 550	1 559	1 550	1 559
200	1 501	1 502	1 400	1 400
直线	1 501	1 501	1 400	1 400

3.4 试验结果

图7—图12给出了测试列车在此线路上以线路最高限速运行时的动态限界测试结果。图中虚线是车辆的静态轮廓图,细实线是车辆运行过程中的最大动态轮廓图(动态包络线),粗实线是车辆在此测试区间的动态限界限值。由图7—图12可知,车辆在此线路上运行时,其动态限界满足设计文件要求,不会出现侵限的情况。为验证结果的正确性,在测试车辆车体包裹一层泡沫,泡沫宽度按照限界余量设置,车辆在运行上述曲线过程中,泡沫未发生刮蹭,故证明测试结果的正确性。(本刊为黑白印刷,相关疑问请咨询作者)

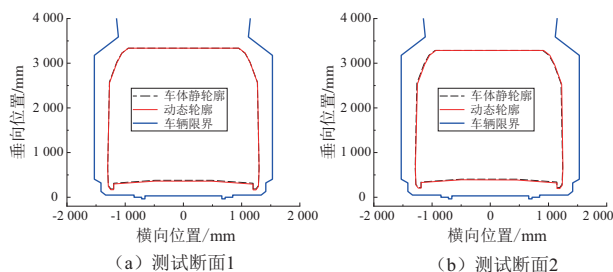


图7 动态限界测试结果——工况1
(直线、无超高、速度 80 km/h)

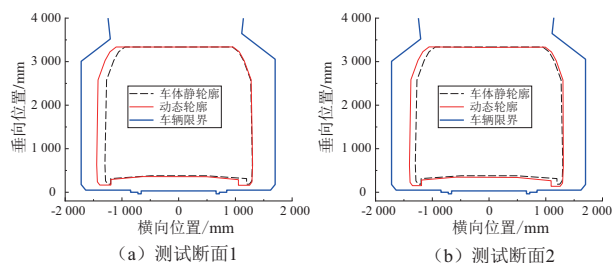


图8 动态限界测试结果——工况2
(R25 m 曲线、无超高、速度 15 km/h)

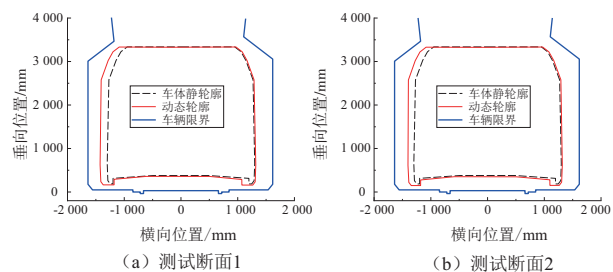


图9 动态限界测试结果——工况3
(R35 m 曲线、无超高、速度 20 km/h)

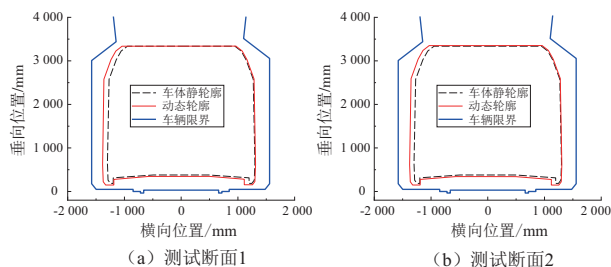


图10 动态限界测试结果——工况4
(R50 m 曲线、无超高、速度 20 km/h)

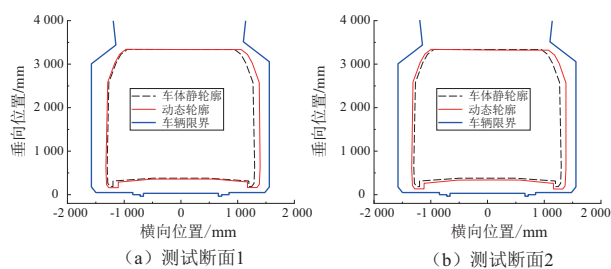


图11 动态限界测试结果——工况5
(R50 m 曲线、100 mm 超高、速度 25 km/h)

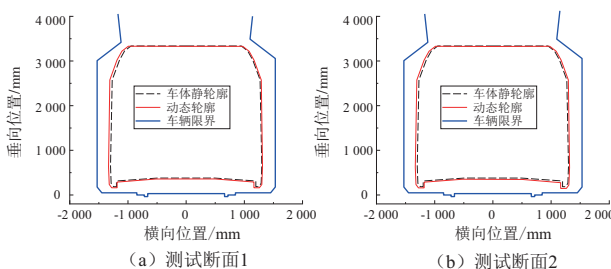


图12 动态限界测试结果——工况6
(R200 m 曲线、140 mm 超高、速度 70 km/h)

4 结语

本文提出并搭建基于2D结构光测试系统的低地板有轨电车动态限界连续监测方法,并对其以最高速度运行通过各工况不同半径曲线时的动态包络线进行求解,进而开展车辆动态限界校核。研究表明:

1) 本文提出的方法可以有效地对低地板有轨电车在运行过程中的动态包络线进行实时测量,进而实现对低地板有轨电车的动态限界进行连续测量和校核;

2) 本文所研究的某低地板有轨电车在线路上以限速运行时,其动态限界满足设计文件要求,不会出现侵限的情况。

[9] 倪昌. 我国与德国限界标准的异同和特点[J]. 都市快轨交通, 2005, 18(2): 15-20.

- [10] 李儒英,吴积钦,曾明. 基于激光测量的地铁限界检测系统[J]. 都市快轨交通,2007,20(5):70-73.

[11] 杨晓云,李丽,李吉彬. 应用于地铁限界的激光测量系统的工艺研究[J]. 新技术新工艺,2016(3):19-22.

[12] PINTO A M, ROCHA L F, PAULO MOREIRA A. Object recognition using laser range finder and machine learning techniques [J]. Robotics and Computer - Integrated Manufacturing, 2013, 29 (1) : 12-22.

[13] 李论,郭庆耀,王福雨. 轨道车辆静态限界三维视觉测量系统[J]. 制造业自动化,2015,37(8):69-72.

[14] 黄智超,李泷杲,李根,等. 一种视觉靶标标定与位姿解算方法[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(4): 206-208.

[15] 郭寅. 高速列车动态包络线测量方法研究[D]. 天津:天津大学,2013.

收稿日期:2024-02-20

1795-1798.

- [21] TAN B D,ZHAO J B. Data-driven adaptive unscented Kalman filter for time-varying inertia and damping estimation of utility-scale IBRs considering current limiter [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024,39(6):7331-7345.

[22] CHANG H, LU S W, ZHENG S Q, et al. Integration of predictive control and interconnected structure for autotuning velocity controller [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2023, 28 (6): 3250-3262.

[23] CHANG H, LU S W, ZHENG S Q, et al. Integrated thrust ripple identification and compensation for linear servo system using an MP algorithm [J]. ISA Transactions, 2023, 142: 594-605.

[24] ANDERSSON L E, IMSLAND L, BREKKE E F, et al. On Kalman filtering with linear state equality constraints[J]. Automatica, 2019, 101: 467-470.

收稿日期:2025-04-02