

高速铁路动车组升力翼结构运动的主动控制技术*

朱彦¹ 王成强¹ 向超群² 范子寅² 高世卿³ 王蕾¹

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司国家轨道客车工程研究中心, 130062, 长春; 2. 中南大学交通运输工程学院, 410083, 长沙; 3. 济南中车四方所智能装备科技有限公司, 250109, 青岛)

摘要 [目的] 高速铁路动车组升力翼结构可以降低车辆轮轨间的摩擦阻力, 减少车轮磨损。但由于高速铁路动车组的运行工况复杂多变, 升力翼所承受的动态载荷在不断变化, 为确保动车组安全、高效运行, 同时充分发挥升力翼结构的节能减阻效能, 需为升力翼设计合适的控制方案。[方法] 介绍了升力翼的整体结构组成, 提出了升力翼结构运动的主动控制方案。其中, 为底部旋转装置设计了基于位置跟踪的多变量耦合系统解耦控制算法; 为攻角变换装置设计了基于 LADRC (线性自抗扰控制) 的交叉耦合协同控制算法; 为翼尾伸缩装置设计了控制流程和到位停车电路方案。搭建仿真模型, 验证了所提底部旋转控制方案、攻角变换控制方案的控制效果。[结果及结论] 升力翼结构运动的主动控制方案可以满足升力翼的功能需求, 包括底部旋转装置的到位精度要求、攻角变换装置的同步控制要求及翼尾伸缩装置的匀速运动和到位停车要求。该方案弥补了既有控制方案的不足, 提高了升力翼的安全性、稳定性及可靠性。

关键词 高速铁路动车组; 升力翼; 解耦控制; 线性自抗扰控制算法

中图分类号 U266

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2025.02.020

Active Control Technology for Lift Wing Structure Motion in High-speed Railway EMU

ZHU Yan¹, WANG Chengqiang¹, XIANG Chaoqun², FAN Ziyin², GAO Shiqing³, WANG Lei¹

(1. National Engineering Research Center of Railway Vehicles, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China; 2. School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, 410083, Changsha, China; 3. Jinan CRRC SRI Intelligent Equipment Technology Co., Ltd., 250109, Qingdao, China)

Abstract [Objective] The lift wing structure of high-speed railway EMU (electric multiple units) can reduce the wheel-rail frictional resistance, thereby decreasing wheel wear. However, due to the complex and variable operating conditions of high-speed railway EMU, the dynamic loads on the lift wing

constantly fluctuate. To ensure the safe and efficient operation of EMU while maximizing the energy-saving and drag-reduction performance of the lift wing structure, a suitable control scheme for the lift wing is required. [Method] The overall structural composition of the lift wing is introduced, and an active control scheme for its motion is proposed. A decoupling control algorithm for a multi-variable coupled system based on position tracking is designed for the bottom rotation mechanism. For the angle-of-attack transformation mechanism, a cross-coupled collaborative control algorithm based on LADRC (linear active disturbance rejection control) is developed. A control process and in-place parking circuit scheme is designed for the wing-tail extension mechanism. Simulation models are constructed to validate the control performance of the proposed bottom rotation and angle-of-attack transformation control schemes. [Result & Conclusion] The active control scheme for lift wing structure motion can meet the functional requirements of the lift wing, including the positioning accuracy of the bottom rotation mechanism, the synchronization control requirements of the angle-of-attack transformation mechanism, and the uniform motion and in-place parking requirements of the wing-tail extension mechanism. This scheme addresses deficiencies in existing control methods, enhancing the safety, stability, and reliability of the lift wing.

Key words high-speed railway EMU; lift wing; decoupling control; linear active disturbance rejection control algorithm

0 引言

随着高速铁路动车组运行速度的持续提高, 车辆与轮轨间摩擦加剧, 牵引损耗显著增加, 进而造成列车运行安全性及经济性下降。针对上述问题, 文献[1]提出了串列升力翼的气动升力协同方案, 该方案降低了高速铁路动车组运行时的净质量, 减小了摩擦阻力和车轮磨损。文献[2]研究了升力翼

* 国家重点研发计划项目(2020YFA0710904)

飞高、来流速度、迎角等设计参数对气动特性的影响规律。文献[3]设计了升力翼攻角转换机构,通过变换翼片迎风面与水平面的夹角产生不同的升力,可以应对不同的运行工况。文献[4]提出了一种适用于 shell-infill(壳体填充物)结构的应力约束拓扑优化方法,该方法提高了结构可承受的最大静态应力和瞬态应力。

在升力翼设计方案日益完善的同时,其结构的复杂度亦有显著增加。升力翼结构包含底部旋转装置、攻角变换装置及翼尾伸缩装置。对于底部旋转装置,要求直流伺服电机具有较高的到位精度。文献[5]在“速度-位置”双闭环控制器的基础上,提出了一种变结构的 ADRC(自抗扰控制)策略,以提高伺服电机在突变干扰下的位置跟踪精度。文献[6]引入了二阶扩张状态观测器,减小了随机扰动对电机控制系统的影响。文献[7]提出了控制参数的在线智能整定方法,提高了控制系统的响应速度,有效提升了伺服电机的到位精度,但也增加了控制系统的复杂度。对于攻角调整装置,要求电动推杆运动过程严格反向同步,并具备一定的抗干扰能力。文献[8]将速度补偿器引入交叉耦合控制结构中,有效提升了控制系统的精度。文献[9]采用了模型参考自适应算法,对 ADRC 参数进行在线修正,降低了环境参数变化对同步控制的影响。文献[10]提出了基于积分滑模控制的 ADRC 控制器,显著提高了控制器的鲁棒性。文献[5-7]提出的方法同样适用于翼尾伸缩装置。

上述研究均在同步控制的自抗扰及自适应方面实现了突破,但在同步精度方面仍有提升空间。对于底部旋转装置,要求电动推杆在运动过程中保持恒定的移动速度,并在到位后及时停车。文献[11]设计了一种电动推杆限位检测电路,以有效防止电动推杆运动超限,但该电路较为复杂,难以直接集成到电动推杆中。

基于升力翼底部旋转装置、攻角变换装置和翼尾伸缩装置的功能需求,针对现有控制方案的不足,本文提出了升力翼结构运动的主动控制技术方案,以有效提高升力翼的安全性、稳定性及可靠性。

1 高速铁路动车组升力翼结构

1.1 升力翼整体结构

图1为升力翼的整体结构。升力翼结构主要由翼片和翼下结构组成,其中:翼片包括中间段及翼

尾伸缩装置;翼下结构包括攻角变换装置及底部旋转装置。翼尾伸缩装置、攻角变换装置和底部旋转装置是升力翼结构的3个可活动部分。

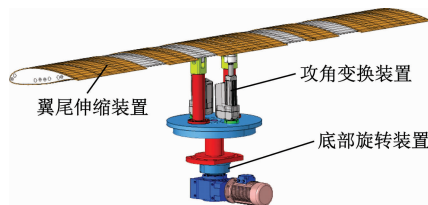


图1 升力翼整体结构

Fig. 1 Overall structure of lift wing

1.2 底部旋转装置

在高速铁路动车组改变运行方向时,升力翼的方向也要随着高速铁路动车组的换向而发生改变。图2为升力翼的底部旋转装置,该装置主要由驱动电机、减速器、限位开关及回转驱动等组成。

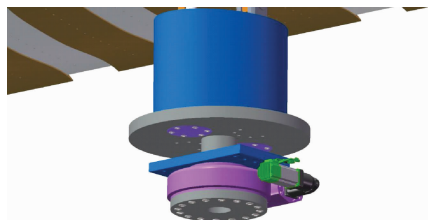


图2 升力翼底部旋转装置

Fig. 2 Lift wing bottom rotation mechanism

1.3 攻角变换装置

图3为升力翼的攻角变换装置。该装置通过电动推杆的反向同步运动形成角度差,从而调整升力翼的攻角。由于升力翼系统对于攻角控制的精度要求较高,所以电动推杆由高精度的伺服电机和减速器共同驱动。

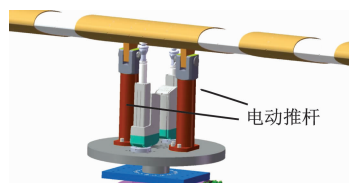


图3 升力翼攻角变换装置

Fig. 3 Lift wing attack-of-angle transformation mechanism

1.4 翼尾伸缩装置

图4为升力翼的翼尾伸缩装置。该装置主要由安装在翼片内部的剪叉机构、导杆及内置了行程开关的电动推杆组成。其中,电动推杆用于驱动翼尾收缩或伸出,行程开关用于接收翼尾的到位信号。翼尾在遭遇横风或列车交会工况时需要收缩,并在

运行环境回归正常后重新伸出,以保证升力翼功能正常且结构不受损害。

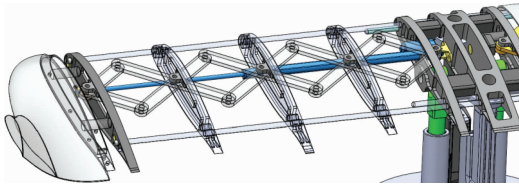


图4 升力翼翼尾伸缩装置

Fig. 4 Lift wing wing-tail telescopic mechanism

2 升力翼结构运动的主动控制方案

2.1 底部旋转控制方案

为保证较高的直流伺服电机控制精度,同时避免控制算法复杂度过高,本文提出了基于位置跟踪的多变量耦合系统解耦控制算法。首先,建立直流伺服电机的数学模型,设计解耦控制策略;然后,搭建PID(比例-积分-微分)位置跟踪环节;最后,根据PID环节输出解耦控制策略,将控制律函数输入直流伺服电机的数学模型中,求解伺服电机脉冲电压的给定值。

解耦控制采用的控制律为:

$$\dot{X} = AX + BV \quad (1)$$

式中:

X ——伺服电机系统的状态向量;

\dot{X} ——伺服电机系统的状态向量的导数;

A ——状态矩阵;

B ——输入矩阵;

V ——输入向量。

PID环节采用的控制律函数为:

$$\mu = K_1 e + K_2 de/dt + K_3 \int_0^t e dt \quad (2)$$

式中:

μ ——控制器的输出;

K_1 ——比例系数;

K_2 ——微分系数;

K_3 ——积分系数;

e ——目标转角与实际转角的偏差值;

t ——时间。

脉冲电压的给定计算式为:

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_a \\ \bar{U}_b \\ \bar{U}_c \end{bmatrix} = C^T \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{cases} u_a = \frac{u_s}{2} \operatorname{sgn} \bar{U}_a \\ u_b = \frac{u_s}{2} \operatorname{sgn} \bar{U}_b \\ u_c = \frac{u_s}{2} \operatorname{sgn} \bar{U}_c \end{cases} \quad (4)$$

式中:

C —— d (直轴)、 q (交轴)脉冲电压的矩阵;

u_d ——直轴电压;

u_q ——交轴电压;

u_s ——直流电源电压;

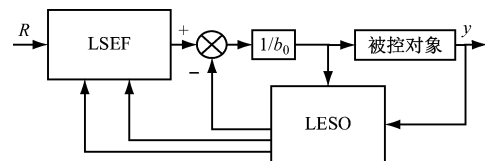
\bar{U}_a ——三相中 a 相脉冲电压的平均值;

\bar{U}_b ——三相中 b 相脉冲电压的平均值;

\bar{U}_c ——三相中 c 相脉冲电压的平均值。

2.2 攻角变换控制方案

传统的ADRC控制在参数整定方面比较困难,需要整定的参数较多,且参数整定方法缺乏系统性。本文提出了基于LADRC(线性自抗扰控制)的交叉耦合协同控制算法。该算法的鲁棒性较好,对线性系统和非线性系统的适应性均较高,且参数整定较为简单。LADRC结构如图5所示,主要包括LSEF(线性状态误差反馈控制器)和LESO(线性扩张状态观测器)2个部分。



注: R —控制系统输入值; y —控制系统输出值; b_0 —系统控制增益。

图5 LADRC结构示意图

Fig. 5 Diagram of LADRC structure

2.3 翼尾伸缩控制方案

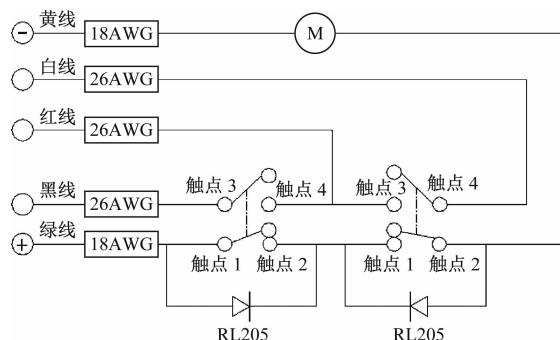
翼尾收缩装置的控制流程主要包括伸出和收缩2个方面。

1) 伸出:分控制器接收到伸出指令后,驱动电动推杆开始伸出;电动推杆伸出到位后,行程开关产生伸出到位信号,并将信号反馈至分控制器,伸出动作完成。

2) 收缩:分控制器接收到收缩指令后,驱动电动推杆开始收缩;电动推杆收缩到位后,行程开关产生收缩到位信号,并将信号反馈至分控制器,收缩动作完成。

翼尾伸缩电动推杆到位停车设计方案如图6所

示。图6中:红线为信号供电线,绿线和黄线分别为电动推杆的正负极供电线,白线和黑线分别是两端的限位信号输出线。当电动推杆运动到行程的某一端头时,对应位置的行程开关被按下,常开触点闭合,电机电流被二极管切断,电动推杆立即停车;信号供电线经由常开触点与限位信号输出线连通,从而输出高电平限位信号,该信号用来表示电动推杆已伸缩到位。



注:M为电动推杆;RL205为二极管型号;18AWG为电源线电芯型号;26AWG为信号线电芯型号。

图6 翼尾伸缩电动推杆到位停车设计方案示意图

Fig. 6 Diagram of wing-tail telescopic electric push rod in-place parking design scheme

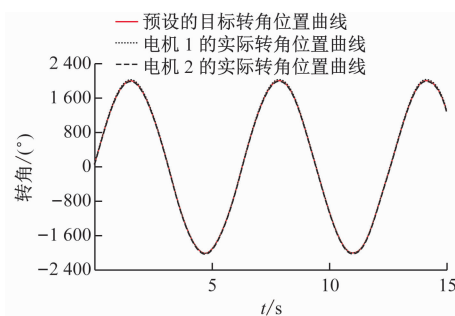
3 仿真验证

在MATLAB/Simulink软件的仿真平台中搭建仿真模型,检验本文提出的底部旋转控制方案、攻角变换控制方案的控制效果。选取2台采用了解耦控制算法的伺服电机(电机1、电机2),检验它们对目标转角的跟踪性能。在理想情况下,电机在任何时刻的实际转角位置均应与目标转角的给定位置重合。但在现实中,由于信号延迟、采样误差、外界干扰等因素的影响,电机的实际转角位置与给定值之间总会有一定的偏差。二者的偏差越小,说明电机的跟踪性能越好。

图7为底部旋转电机位置跟踪性能验证结果。由图7可知:2台电机的实际转角位置曲线与预设的目标转角位置曲线基本重合,偏差非常小,这说明电机具备良好的位置跟踪性能;2台电机的实际转角位置曲线几乎无差别,也表明本文所提解耦算法控制效果的一致性。

图8为电动推杆伸出长度跟踪性能验证结果,展示了2台采用了交叉耦合协同控制算法的电动推杆的位置跟踪效果及同步控制效果。由图8可知:

2台电机的推杆对预设伸出长度的跟踪响应迅速,且跟踪精度高;2台电机的推杆在反向运动时也展现出了较高的同步精度,可以满足电动推杆的反向同步要求。图7、图8的仿真结果验证了本文所提控制算法的稳定性。



注:转角数据为电机旋转角度的累计值。

图7 底部旋转电机位置跟踪性能验证结果

Fig. 7 Verification results of position tracking performance of bottom rotating motor

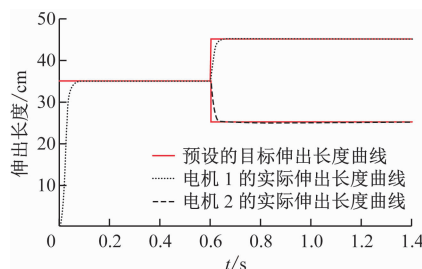


图8 电动推杆伸出长度跟踪性能验证结果

Fig. 8 Verification results of tracking performance of electric push rod extension length

4 结语

本文着眼于高速铁路动车组升力翼的功能需求及现阶段控制方案的不足,设计了升力翼结构运动的主动控制方案。该方案在以下3个方面实现了升力翼功能的有效提升:

1) 对于底部旋转装置,设计了基于位置跟踪的多变量耦合系统解耦控制算法。该算法结构与传统算法相比较为简单,提高了直流伺服电机的控制精度,有效避免出现限位点过冲或早停等现象。

2) 对于攻角变换装置,设计了基于LADRC的交叉耦合协同控制算法。该算法仅需通过简单的参数整定,即可具有较强的鲁棒性及对各类系统良好的适应性,实现了高精度的同步控制。

3) 对于翼尾伸缩装置,设计了控制流程和到位停车电路方案。该设计方案可在装置伸缩到位时

自动切断电动推杆的供电电源,同时反馈伸缩到位信号。该方案提高了翼尾伸缩装置的安全性和可靠性,并为控制器预留了到位反馈,提高了控制方案的可扩展性。

参考文献

- [1] 王瑞东,倪章松,张军,等. 高速列车串列升力翼翼型优化设计[J]. 空气动力学学报, 2022, 40(2): 129.
WANG Ruidong, NI Zhangsong, ZHANG Jun, et al. Optimization design of tandem airfoils on high-speed train[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2022, 40(2): 129.
- [2] 高建勇,张军,倪章松,等. 高速列车车顶-升力翼组合气动特性[J]. 实验流体力学, 2023, 37(1): 29.
GAO Jianyong, ZHANG Jun, NI Zhangsong, et al. The aerodynamic characteristics of roof-wing combination of a high-speed train[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2023, 37(1): 29.
- [3] 成庶,刘翊,王成强,等. 基于自抗扰的高速列车升力翼攻角驱动系统同步控制[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(6): 1.
CHENG Shu, LIU Xuan, WANG Chengqiang, et al. Synchronous control of high-speed train lift wing angle of attack drive system based on active disturbance rejection[J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(6): 1.
- [4] WANG C, WU Y. Toward static and transient stress-constrained topology optimization for shell-infill structures[J]. Computers & Structures, 2024, 299: 107370.
- [5] 张臻,周扬忠. 永磁同步电机位置伺服系统改进变结构自抗扰控制[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(5): 263.
ZHANG Zhen, ZHOU Yangzhong. An improved variable structure active disturbance rejection control for the permanent magnet synchronous motor position servo system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(5): 263.
- [6] 匡萃璋,汪华章,陈昊. 基于非线性自抗扰控制的双闭环PMSM速度控制策略研究[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41

(8): 105.

- KUANG Cuizhang, WANG Huazhang, CHEN Hao. Research on double closed-loop PMSM speed control strategy based on nonlinear active disturbance rejection control[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(8): 105.
- [7] 邵雪卷,康鹏飞,张井冈,等. 直流电机位置伺服系统新型控制策略研究[J]. 控制工程, 2024, 31(9): 1537.
SHAO Xuejuan, KANG Pengfei, ZHANG Jinggang, et al. Research on new control strategy of DC motor position servo system[J]. Control Engineering of China, 2024, 31(9): 1537.
- [8] 杨赛东,张士雄,刘亚奇. 基于二阶LADRC的多电机同步控制系统研究[J]. 机床与液压, 2021, 49(17): 104.
YANG Saidong, ZHANG Shixiong, LIU Yaqi. Research on multi-motor synchronous control system based on second order LADRC[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(17): 104.
- [9] 张羽,关振宏,王涛,等. 基于自抗扰控制技术的多电机同步控制[J]. 电气自动化, 2017, 39(2): 9.
ZHANG Yu, GUAN Zhenhong, WANG Tao, et al. Multi-motor synchronous control based on active disturbance rejection control technique[J]. Electrical Automation, 2017, 39(2): 9.
- [10] CHEN Q, DONG F, TAO L, et al. Multiple motors synchronization based on active disturbance rejection control with improved adjacent coupling[C] // 2016 35th Chinese Control Conference (CCC). Chengdu: IEEE, 2016: 4510.
- [11] 李韵麒. 基于隔离解耦电路的多电动推杆限位检测电路[J]. 中国机械, 2024(11): 47.
LI Yunqi. Multi-electric push rod limit detection circuit based on isolation decoupling circuit[J]. Machine China, 2024(11): 47.

· 收稿日期:2024-08-05 修回日期:2024-09-05 出版日期:2025-02-10
Received:2024-08-05 Revised:2024-09-05 Published:2025-02-10
· 第一作者:朱彦,正高级工程师,zhuyan.ck@crrecg.cc
通信作者:王成强,正高级工程师,13756668375@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 95 页)

参考文献

- [1] HONDIUS H, 张建平. 德国西门子公司新开发的 Mireo 号铰接式电动车组[J]. 国外铁道机车与动车, 2020(3): 1.
HONDIUS H, ZHANG Jianping. Newly developed Mireo articulated EMU by Siemens Germany[J]. Foreign Railway Locomotive and Motor Car, 2020(3): 1.
- [2] 高祥. 100 km/h 轻轨车辆铰接式转向架研究[J]. 技术与市场, 2019, 26(2): 37.
GAO Xiang. Research on articulated bogie of 100 km/h light rail vehicle[J]. Technology and Market, 2019, 26(2): 37.
- [3] 胡鑫,黄运华,焦建英. 铰接式转向架及铰接装置的应用研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2020, 43(5): 19.
HU Xin, HUANG Yunhua, JIAO Jianying. Application of articu-

lated bogies and articulated devices[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2020, 43(5): 19.

- [4] 刘凯,朱戡,刘洋,等. 轻轨车辆铰接装置强度分析[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(11): 62.
LIU Kai, ZHU Kan, LIU Yang, et al. Strength analysis of articulated device for light rail vehicles[J]. Technology Innovation and Application, 2021, 11(11): 62.

· 收稿日期:2024-08-05 修回日期:2024-09-05 出版日期:2025-02-10
Received:2024-08-05 Revised:2024-09-05 Published:2025-02-10
· 通信作者:王文华,正高级工程师,whwang1981@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license