

## 现代无轨电车车端转角液压装置设计研究\*

李化明<sup>1</sup> 王 利<sup>2</sup> 高 珊<sup>1</sup> 吕运科<sup>1</sup> 李承陈<sup>1</sup>

(1. 中车唐山机车车辆有限公司, 063035, 唐山; 2. 石家庄铁路职业技术学院, 050041, 石家庄)

**摘 要** [目的] 现代无轨电车采用多车厢铰接编组方式运行, 其铰接位置具有较多自由度, 会对车辆的平稳运行造成影响。因此, 有必要对车端转角液压装置的设计进行深入研究。[方法] 为了减小车辆铰接位置的自由度, 增强车辆的抗失稳能力, 并辅助车辆转弯, 设计了车端转角液压装置, 并开展了仿真研究。依据车辆铰接编组的结构特点, 遵循车辆对铰接结构的具体要求, 制定了车端转角液压装置的总体方案和原理, 对关键部件的参数进行了精确计算和合理选型, 进而完成了该装置整体结构的设计。通过在 Simulink 软件中构建仿真模型, 对车辆转弯运行过程中车端转角液压装置的动态特性和车辆铰接位置的动态变化进行了模拟分析。[结果及结论] 仿真结果表明: 所设计的车端转角液压装置在动态运动参数方面满足设计输入的要求, 各车辆展现出较高的动态一致性, 横摆幅值较小。该装置在提高车辆转向性能和控制车辆失稳方面发挥了关键作用。

**关键词** 现代无轨电车; 车端转角液压装置; 设计; 仿真分析; 动态特性

**中图分类号** U482.2

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2025.03.037

## Design and Research of Vehicle-end Turning Hydraulic Device for Modern ART Tram

LI Huaming<sup>1</sup>, WANG Li<sup>2</sup>, GAO Shan<sup>1</sup>, LYU Yunke<sup>1</sup>, LI Chengchen<sup>1</sup>

(1. CRRC Tangshan Co., Ltd., 063035, Tangshan, China; 2. Sijiazhuang Institute of Railway Technology, 050041, Shijiazhuang, China)

**Abstract** [Objective] Modern ART (autonomous rail transit) trams often adopt multi-car articulated configurations in operation, because articulation joints possess significant degrees of freedom, relating the smooth operation of the vehicles. Therefore, it is essential to conduct in-depth research of the design of vehicle-end turning hydraulic devices. [Method] To reduce the vehicle articulation joint freedom degree, enhance vehicle anti-instability capability, and assist in vehicle turning, a vehicle-end turning hydraulic device is designed, accompanied by simulation researches. Based on the structural

characteristics of articulated vehicle configurations and specific requirements for articulation structures, the overall scheme and principles of the vehicle-end turning hydraulic device are formulated. Precise calculations and rational selection of key component parameters are performed to complete the design of the overall structure. A simulation model is built using Simulink software to analyze the dynamic characteristics of the vehicle-end turning hydraulic device and the dynamic changes at articulation points during vehicle turning operation. [Result & Conclusion] Simulation results show that the designed vehicle-end turning hydraulic device meet the input requirements for dynamic motion parameters, with all vehicles showing high dynamic consistency and minimal yaw amplitude. This device plays a critical role in enhancing vehicle steering performance and controlling instability.

**Key words** modern ART tram; vehicle-end turning hydraulic device; design; simulation analysis; dynamic characteristics

现代无轨电车(以下简称“电车”),作为一种集成了有轨电车与公路汽车优势的新型交通工具,近年来发展迅速。此类电车采用虚线路标作为虚拟轨道,实现全自动驾驶,其形式为多节轮胎式列车<sup>[1]</sup>。该电车结构包含2节驾驶舱、2节客室舱及3个连接模块(见图1)。

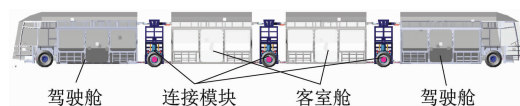


图1 现代无轨电车结构

Fig.1 Structure of modern ART tram

电车行驶由轮毂电机驱动,转向功能则通过方向盘操控与轮毂电机的差速转动共同实现。当车厢与连接模块仅依赖车钩连接时,车厢间具有较高的自由度。在转弯过程中,尽管前车厢能有效遵循转弯轨迹,但后车厢因自由度过大及车身过长,难以维持理想的行驶轨迹。此外,由于车辆缺乏轨道

\* 2025 年度河北省高等学校科学研究计划项目(ZC2025327)

约束,高速行驶时易发生失稳晃动,构成显著的安全隐患。

为解决上述问题,于车钩两侧增设了车端转角液压装置。该装置旨在车辆转向时提供必要的转向力及车厢间的缓冲力,同时辅助校正车辆位置偏差,并为各车厢间提供缓冲阻尼力。

1 车端转角液压装置介绍

车端转角液压装置的液压缸单元被设计并安装于车钩的两侧,其两端分别与车厢和连接模块相连。连接模块中共配置了 4 个液压缸单元。液压控制器通过精确调控液压缸杆的伸缩速度和长度,实现对车厢间相对运动的控制。液压缸单元的具体安装位置如图 2 所示。

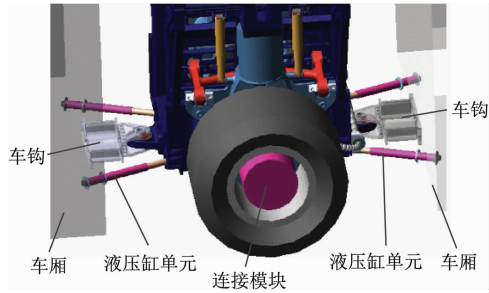


图 2 液压缸单元安装位置  
Fig. 2 Installation position of hydraulic cylinder unit

系统的主要参数(见表 1)要求根据电车的运行工况确定。

表 1 系统主要参数

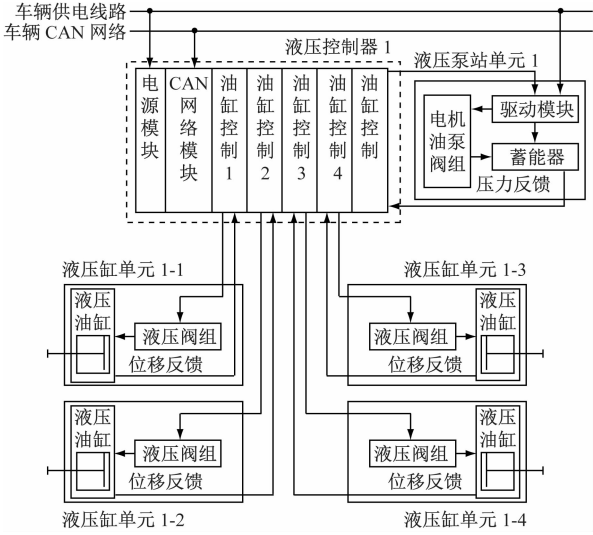
Tab. 1 Main parameters of system

技术指标	参数
液压缸单元安装长度/mm	695
液压缸单元行程/mm	± 130
液压缸单元最大线速度/(mm/s)	150
液压缸单元最大静载荷/kN	30
系统工作压力/MPa	< 12
刚性系数/(N/mm)	100 ~ 500
阻尼系数/(N · s/mm)	5 ~ 100(可调)

2 车端转角液压装置设计

2.1 方案原理设计

依据输入要求,车端转角液压装置的原理设计被制定,主要包括液压控制器、液压泵站单元及液压缸单元等组件。车端转角液压装置的系统如图 3 所示。



注:CAN—控制器局域网总线。

图 3 车端转角液压装置系统图

Fig. 3 Diagram of tram-end turning hydraulic device system

当车辆驶入曲线段时,车载线路探测系统捕获线路曲线参数。车辆控制系统根据车辆位置、方向盘转角、车速及转角液压装置的几何参数,计算出每个液压缸单元的运动参数。这些运动参数通过车辆网络作为指令发送给各个液压控制器。液压控制器根据指令操控液压阀组动作,以实现液压油缸的位移控制,并实时接收液压油缸的位移信息以调整指令,形成位移闭环控制,从而调整车辆的转角。

在车辆直线运行时,液压控制器控制液压阀组内的比例伺服阀断开油路,同时阻尼阀内的开关阀断电,使液压油缸的前腔和后腔连通。液压油缸随车辆运动被动伸缩,通过节流孔的阻尼作用来抑制车辆的蛇形运动。若车辆偏离预定的直线运行轨迹,液压控制器则控制液压油缸进行主动伸缩调整。

2.2 主要部件参数计算与选型

基于车端转角液压装置的设计原理,并结合车辆的安装要求,利用输入参数进行主要部件的参数计算,以选择合适的部件。

2.2.1 液压缸基本参数计算

2.2.1.1 液压缸内径计算

液压缸活塞杆承受被动负载时内应力计算式为:

$$\sigma = F_a / [\pi (D_n / 2)^2] \quad (1)$$

式中:

$\sigma$ ——缸筒材料的许用应力,单位 MPa,小于常规无缝钢管 120 MPa;

$F_a$ ——液压缸单元最大静载荷,单位 kN;

$D_n$ ——活塞杆直径,单位 mm,按 GB/T 2348—1993《液压气动系统及元件 缸内径及活塞杆外径》尺寸系列。

液压缸单元最大静载荷  $F_a$  计算式为:

$$F_a = \eta \psi_{dr} P_{smin} \pi [(D_p/2)^2 - (D_n/2)^2] \quad (2)$$

式中:

$\eta$ ——液压缸效率,取 0.95;

$\psi_{dr}$ ——负载率,取 0.7;

$P_{smin}$ ——液压系统工作压力,单位 MPa;

$D_p$ ——活塞直径,单位 mm。

计算得到作动器活塞  $D_p$  计算直径为 76.2 mm,依据文献[2]按缸筒内径尺寸系列选取 80 mm。

### 2.2.1.2 液压缸壁厚和外径计算

中、高压液压缸一般用无缝钢管做钢筒,大多属于薄壁圆筒结构,其壁厚计算公式参见文献[3]。根据计算结果圆整液压缸最薄处壁厚取 10 mm。

液压缸壁厚算出来后,即可求出缸体的外径:

$$D \geq D_p + 2T \quad (3)$$

式中:

$D$ ——液压缸缸体外径,单位 mm;

$T$ ——液压缸壁厚,单位 mm。

### 2.2.1.3 伺服阀计算选型

假设作动缸无内泄漏,单个液压缸需求的最大流量计算:

$$Q_{\max} = 60 \times 10^{-6} v_{\max} \pi [(D_p/2)^2 - (D_n/2)^2] \quad (4)$$

式中:

$Q_{\max}$ ——液压缸最大需求流量,单位 L/min;

$v_{\max}$ ——液压缸单元最大线速度,单位 mm/s。

伺服阀空载流量计算式为:

$$Q_0 = \sqrt{3} Q_{\max} \quad (5)$$

式中:

$Q_0$ ——伺服阀空载流量,单位 L/min,初步选用额定流量 70 L/min。

伺服阀采用射流管伺服阀,选用 FF-130/40 型 4 位 4 口力矩马达型电液伺服阀。

### 2.2.1.4 液压泵站流量和电机功率计算

设定系统连续工作,齿轮泵连续供油,关断阀、比例伺服阀等存在内漏。泵站最大需求流量  $Q_{\text{total}}$  为:

$$Q_{\text{total}} = (Q_{\max} + Q_{\text{in}})n \quad (6)$$

式中:

$Q_{\text{in}}$ ——系统内漏,取 1 L/min;

$n$ ——液压缸单元数量。

电机功率计算式为:

$$p = P_{smin} \frac{Q_{\text{total}}}{60 \eta_d} \quad (7)$$

式中:

$p$ ——电机功率,单位 kW;

$\eta_d$ ——电机效率,取 0.90。

### 2.2.1.5 节流阀开口量计算

系统采用了可调节的节流阀,用以控制阻尼油路的通断,这一过程通过开关阀来实现。可调阻尼孔的设计基于锥阀结构,其阀芯台肩直径的计算参见文献[4]。阀芯台肩直径的尺寸只与节流阀流量有关,经过计算圆整后取台肩直径为 3 mm。

根据压力流量方程求节流阀最大开口量计算式为:

$$\delta_{\max} \geq \frac{16.67 \sqrt{v_{\max} \pi D_n/4}}{C \pi d_0 \sqrt{g \zeta v_{\max}^2 \sin a}} \quad (8)$$

式中:

$\delta_{\max}$ ——节流阀最大开口量,单位 mm;

$a$ ——阀芯节流口处锥面的锥角半角,取  $30^\circ$ ;

$g$ ——重力加速度,单位  $\text{m/s}^2$ ;

$C$ ——阀口流量系数,可按锥阀口取 0.77;

$d_0$ ——阀芯台肩直径,单位 mm;

$\zeta$ ——局部阻力系数,取 0.5。

## 3 仿真分析

### 3.1 仿真模型和参数

在 Simulink 软件的仿真平台内,构建了驾驶员-车辆系统的仿真模型,如图 4 所示。该模型中,驾驶员模块的输入为方向盘转角指令,该指令经由控制模型的处理后,转化为液压杆的运动指令,进而体现车辆的动态响应特性。

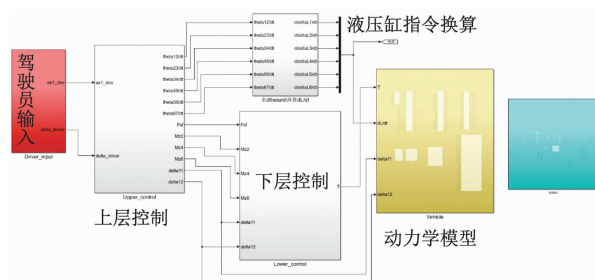


图4 驾驶员-车辆系统仿真模型

Fig.4 Driver-vehicle system simulation model

仿真中涉及的无轨列车主要参数如表2所示。

表2 模型计算参数

Tab.2 Model calculation parameters

名称	取值
驾驶舱质量/t	12.8
驾驶舱横摆转动惯量/( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )	30 000
驾驶舱质心到转向轴距/m	1.75
驾驶舱质心到铰接点距离/m	4.35
车轮转动惯量/( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )	150
车轮滚动半径/m	0.525
驾驶舱质心到地面高度/m	1.5
连接模块质量/t	4.1
连接模块横摆转动惯量/( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )	15 000
连接模块前后铰接点距离/m	1.4
质心到地面高度/m	1.1
乘客舱质量/t	8.4
乘客舱横摆转动惯量/( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )	30 000
乘客舱前后铰接点距离/m	5.7
铰接点到地面高度/m	0.31

### 3.2 仿真结果分析

由于直线行驶状态下无横向速度变化,难以区分性能差异,故直接聚焦于车辆转弯时的动态特性进行分析。转弯仿真条件设定为地面摩擦因数 $\mu = 1$ ,初始车速 30 km/h,方向盘转角在约 2 s 时于 1 s 内迅速增加至  $540^\circ$  并随后回正。

图5所示结果表明,在车辆转弯过程中,驾驶舱首先达到转弯稳态,随后其他车厢依次跟进。液压杆的伸缩速率达到最大值,但过量较小,且得益于转角控制的冗余量充足,未对其他车厢的横摆角速度跟踪造成干扰,确保了车身的稳定性。随着方向盘的回正,各车厢最终恢复至稳态直线行驶状态。驾驶舱1与连接模块2之间的夹角峰值约为  $15^\circ$ ,而其他车厢间的夹角峰值均未超过  $12^\circ$ 。两个驾驶舱的横摆角速度相较于其他车厢较小,最大值低于  $0.4 \text{ r/s}$ ,而其他车厢的峰值横摆角速度约为  $0.6 \text{ r/s}$ 。相应的液压杆力峰值分别为 10 kN 和 8 kN,远低于 30 kN 的极限值。

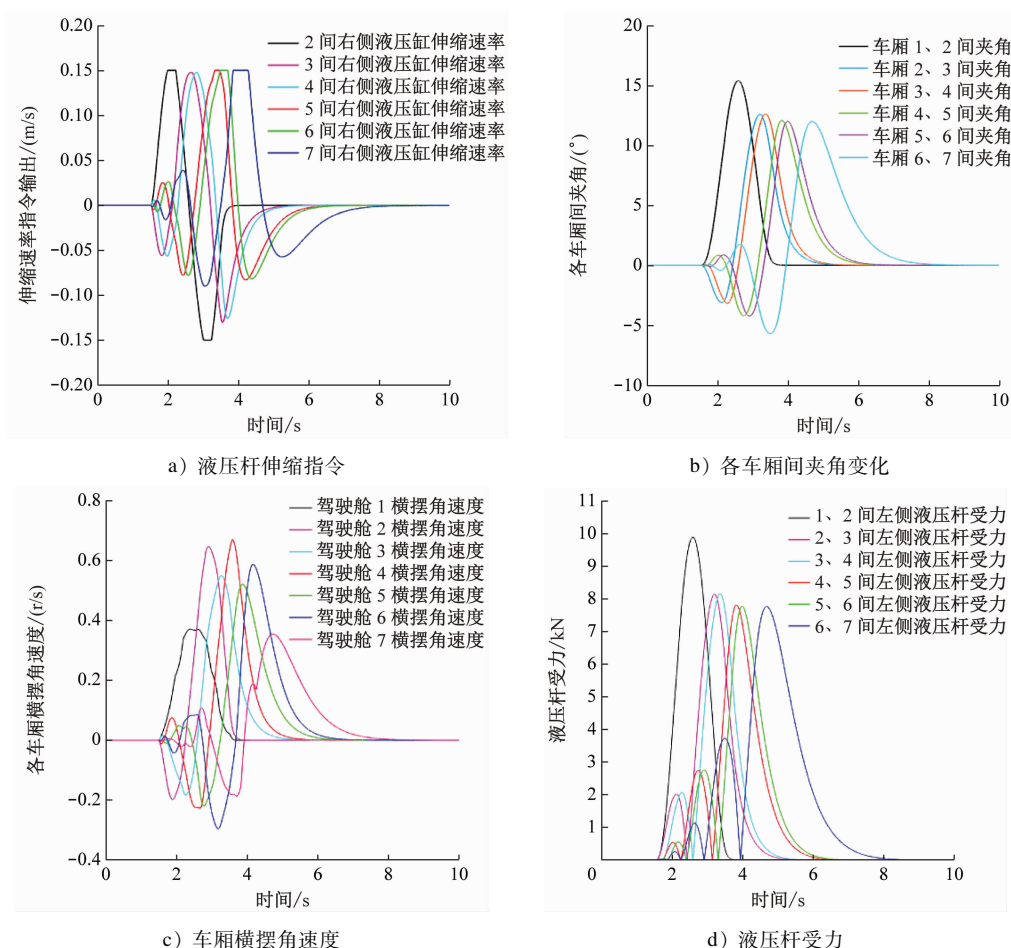


图5 方向盘转角  $540^\circ$  回正仿真结果

Fig.5 Simulation results of steering wheel returning to center after a  $540^\circ$  turn



## 4 结语

现代无轨电车采用多编组设计,通过铰接模块连接,显著降低了列车的转弯半径。为实现这一目标,设计了车端转角液压装置,以限制车辆不必要的自由度。在转弯过程中,该装置利用各车厢间夹角变化率的相互关联,通过液压杆的伸缩运动直接调控各车厢间的横摆加速度协调性,从而确保了车辆转弯时的稳态表现,提升了转向性能。在动力学控制层面,这一设计增强了无轨电车横摆运动控制的冗余度与精确度。

## 参考文献

- [1] 孙帮成,王文军,刘志明,等. 基于全轮差动转向的虚拟轨道汽车列车设计[J]. 北京交通大学学报, 2018, 42(6): 67.  
SUN Bangcheng, WANG Wenjun, LIU Zhiming, et al. Design of the virtual-rail train-like vehicle based on all-wheel differential steering[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2018, 42(6): 67.

- [2] 王益群,高殿荣. 液压工程师技术手册[M]. 北京: 化学工业

出版社, 2010.

WANG Yiqun, GAO Dianrong. Technical manual for hydraulic engineers[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.

- [3] 刘少君. 多轴车辆第三轴电控液压转向系统研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.

LIU Shaojun. Research on the third axle electronic control hydraulic steering system of multi-axle vehicle[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.

- [4] 王琦. 组合型液压阻尼元件的结构优化及特性仿真[D]. 贵阳: 贵州大学, 2018.

WANG Qi. Structure optimization and characteristic simulation of combined hydraulic damping element[D]. Guiyang: Guizhou University, 2018.

· 收稿日期:2022-12-04 修回日期:2023-01-11 出版日期:2025-03-10

Received:2022-12-04 Revised:2023-01-11 Published:2025-03-10

· 第一作者:李化明,高级工程师,huaming3655@126.com

通信作者:王利,讲师,249778207@99.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 195 页)

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. General technical specifications for low floor tramcar: CJ/T 417—2022[S]. Beijing: China Planning Press, 2022;5.

- [6] 李祥瑞,郝保磊. 电磁轨道制动器在低地板有轨电车上的应用[J]. 铁道车辆, 2017, 55(6): 16.

LI Xiangrui, HAO Baolei. Application of the electromagnetic track brake on tram car with low floor[J]. Rolling Stock, 2017, 55(6): 16.

- [7] 张晓杰. 100% 低地板有轨电车制动控制策略[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(增刊 2): 75.

ZHANG Xiaojie. Brake control strategy for 100% low-floor tram

[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(S2): 75.

- [8] 张龙飞. 低地板有轨电车制动系统性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.

ZHANG Longfei. Study on braking system performance of low-floor tram[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

· 收稿日期:2024-02-02 修回日期:2024-03-25 出版日期:2025-03-10

Received:2024-02-02 Revised:2024-03-25 Published:2025-03-10

· 通信作者:吴明赵,高级工程师,mzvu1984@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

## 敬请关注《城市轨道交通研究》微信视频号

《城市轨道交通研究》微信视频号聚焦轨道交通行业内的热点问题、焦点问题,以及新技术、新成果,邀请相关专业领域内的专家学者及高级管理人员以视频方式解读和评述,是您及时获知行业资讯、深度了解轨道交通各专业领域的最佳平台。您还可以通过该平台查阅往期论文、查询稿件进度、开具论文录用通知书。敬请关注。

