

轨道车辆嵌入式主动径向执行单元设计及控制指令优化研究

罗湘萍 张远航 田师娇 肖春昱

(同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 201804, 上海//第一作者, 副教授)

摘要 为进一步推广主动径向转向架的工程应用,提出一种嵌入式主动径向执行单元设计方案。该方案将嵌入式主动径向执行单元内嵌于轴箱,简化了主动径向控制和纵向悬挂机构的结构布置,便于用户运维。同时,基于主动径向系统各轮对间的空间同步要求,提出了一种控制指令优化模式,并针对设计方案中液压齿轮泵流量死区特性对执行单元控制精度的影响,提出了该优化模式中控制步长这一关键参数的边界条件。最后通过试验验证了该优化模式的有效性。

关键词 轨道车辆; 主动径向转向架; 流量死区; 执行单元设计; 控制指令优化

中图分类号 U270.331

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.03.027

Optimization of Design and Control Instruction of Railway Vehicle Embedded Active Radial Actuator

LUO Xiangping, ZHANG Yuanhang, TIAN Shiqiao, XIAO Chunyu

Abstract In order to further promote the engineering application of active radial bogie, an embedded active radial actuator scheme is proposed. In this scheme, the actuator is embedded in the axle box, which simplifies the structural arrangement of the system of active radial control and longitudinal suspension, making operation and maintenance easy for users. Meanwhile, a control instruction optimization mode is proposed based on the synchronization requirement of space between the wheelsets of the active radial system. In view of how the flow-dead-zone characteristics of the hydraulic gear pump in the design scheme influences the actuator control accuracy, the boundary condition of the key parameter of control step-size in the mode is proposed. Finally, the effectiveness of the proposed mode is verified through experiments.

Key words railway vehicle; active radial bogie; flow-dead-zone; actuator design; control instruction optimization

Author's address Institute of Rail Transit, Tongji University, 201804, Shanghai, China

就传统轨道车辆而言,提高车辆运行速度与降低轨道线路曲线半径间的矛盾一直存在^[1]。为解决此矛盾,业界提出径向转向架的概念,并研发了各类径向转向架。其中,主动径向转向架因其相对简单的结构及良好的径向效果受到越来越多的关注。

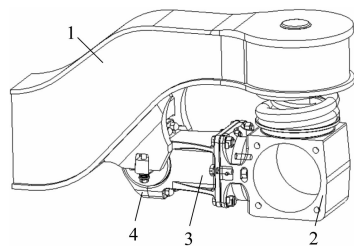
在主动径向转向架中,执行单元是实现轮对和转向架构架间纵向位移调整功能的核心机构。为保证主动径向系统的控制精度,执行单元在进行纵向位移调整时,其实际纵向位移调整值与理论纵向位移调整值的差值不应超过 0.1 mm。现有的技术方案^[2]采用电液作动器作为执行单元,电液作动器集成了电机、液压齿轮泵、液压缸等元件,有效解决了传统液压系统占用空间大、噪声大的问题。但是,电液作动器的现有技术仍存在以下不足:① 拆装维护繁琐,不便于用户运维;② 液压齿轮泵作为执行单元的动力源,具有结构尺寸较小、成本低的优势,但其在高压环境中存在明显流量死区^[3-4],该特性会降低主动径向系统执行单元的控制精度。

为此,本文首先提出了一种嵌入式主动径向执行单元设计方案,以便于用户运维,并进一步提出了一种适用于主动径向系统的控制指令优化模式,以有效避开流量死区特性。

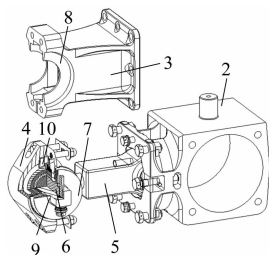
1 嵌入式主动径向执行单元的方案设计

主动径向系统中,执行单元是实现轮对和转向架构架间的纵向位移调整功能的核心机构,其与既有转向架结构的匹配性及用户运维的方便程度都会影响主动径向系统在既有转向架上的应用。因此,为推广主动径向转向架的工程应用,需要一种与既有转向架结构匹配性高且便于用户运维的执行单元设计方案。基于此需求,本文提出了一种具有上述优势的嵌入式主动径向执行单元设计方案。

图1为以转臂式轴箱为例的嵌入式主动径向执行单元的设计方案。该方案中,轴箱由轴箱体、轴箱连接臂、轴箱端盖3部分对接而成,并在内部形成空腔,以安装作动器。作动器两端分别与转向架构架、轴箱相连。当车辆位于直线时,作动器可视为二力杆,通过其两端橡胶关节实现轮对与转向架构架间的纵向定位;当车辆位于曲线时,作动器动作,以实现轮对与转向架构架间的纵向位移主动调整。轴箱与转向架构架间的横向刚度由横向定位橡胶堆提供,横向定位橡胶堆由橡胶层和钢板硫化而成,一端安装于轴箱连接臂和轴箱端盖形成的锥形安装座上,另一端通过定位铁环卡接于橡胶关节的芯轴,以连接转向架构架。轴箱端盖和轴箱连接臂对接时,可经锥形安装座产生横向分力,以实现横向定位橡胶堆的预紧。相比于既有的设计方案^[2],嵌入式主动径向执行单元设计方案显著提高了用户运维的便利性。



a) 整体结构图



b) 局部剖视图

注:1——转向架构架;2——轴箱体;3——轴箱连接臂;4——轴箱端盖;5——作动器;6——橡胶关节;7——横向定位橡胶堆;8——锥形安装座;9——定位铁环;10——垂直辅助定位橡胶堆。

图1 轨道车辆嵌入式主动径向执行单元设计方案示意图

Fig. 1 Schematic diagram of railway vehicle embedded active radial actuator design

为满足轮对与转向架构架间纵向位移主动调整需求,横向定位橡胶堆的纵向刚度较小。此外,横向定位橡胶堆具有各向同性,由此其垂向刚度也较小,这将导致轴箱绕车轴中心线的偏转刚度不足。因此,当轴箱受到外载荷及自身惯性力时易发

生绕车轴中心线的偏转,在轴箱端盖与作动器间设计垂向辅助定位橡胶堆,能有效避免上述问题。

该方案采用电液作动器作为执行单元,电液作动器集成了电机、液压齿轮泵、液压缸等元件。其中,液压缸的行程为 $\pm 7.5\text{ mm}$,额定压力为 16 MPa ,可满足主动径向系统的工作需求。

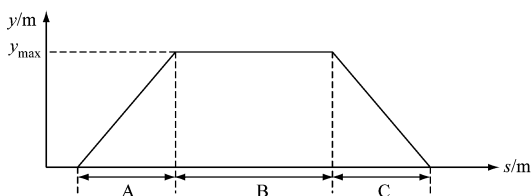
综上所述,该方案将作动器内嵌于对接式轴箱中,可在轴箱对外机械接口保持不变的基础上实现轮对与转向架构架间纵向位移的主动调整及轴箱定位,有效提高主动径向系统与既有转向架的匹配性。该方案结构简单、布局合理,便于用户拆装维护。

2 控制指令优化研究

主动径向系统可视为一种多轴联动控制系统^[5],各轴的运动应满足空间同步要求,即前后各轮对应同时接受各自的控制指令,并同步执行既定的控制指令。但上述设计方案中采用液压齿轮泵,其在高压环境下的流量死区特性会明显降低电液作动器控制精度,从而影响主动径向系统各轮对间的空间同步要求。因此,需优化控制指令模式,以满足主动径向系统各轮对间的空间同步要求,且能避开流量死区特性。

2.1 纵向位移调整值与车辆运行里程的关系

文献[1]表明,主动径向系统纵向位移调整值 y 与车辆运行里程 s 之间呈如图2所示的梯形关系。



注: y_{\max} ——纵向位移调整的最大值;A——缓和曲线长度;B——圆曲线长度;C——缓和曲线长度。

图2 纵向位移调整值-车辆运行里程关系图

Fig. 2 Relationship diagram of longitudinal displacement adjustment value-vehicle mileage

y_{\max} 的计算式为:

$$y_{\max} = \frac{ab}{R} \quad (1)$$

式中:

a ——一系横向跨距之半;

b ——轴距之半;

R ——圆曲线半径。

2.2 控制步长的取值

为满足主动径向系统各轮对间空间同步要求,执行单元应在一定的车辆行驶里程 Δs 内实现对控制步长 Δy 的有效响应。 Δy 的物理含义为控制器在 Δs 的曲线内发送的指令值, Δy 和 Δs 之间应满足:

$$\Delta y = \frac{ab}{RL} \Delta s \quad (2)$$

$$e \leq \Delta y \quad (3)$$

式中:

L ——缓和曲线长度;

e ——理论指令曲线与实际指令曲线的差值。

因此,可将理论指令曲线按车辆行驶里程离散为如图 3 a) 所示的若干个控制步长为 Δy 的阶跃指令。在每 1 个 Δy 内,伺服系统判别各轮对能否有效响应位移指令的方法如图 3 b) 所示。设 e_s 为伺服系统控制误差,用 1 个长为 Δs 、宽为 $2e_s$ 的矩形区域表征误差带,当指令曲线如图 3 b) 中所示实际指令曲线时,若实际响应曲线能在 Δs 区间内进入误差带内,视为有效响应,反之,则视为无效响应。

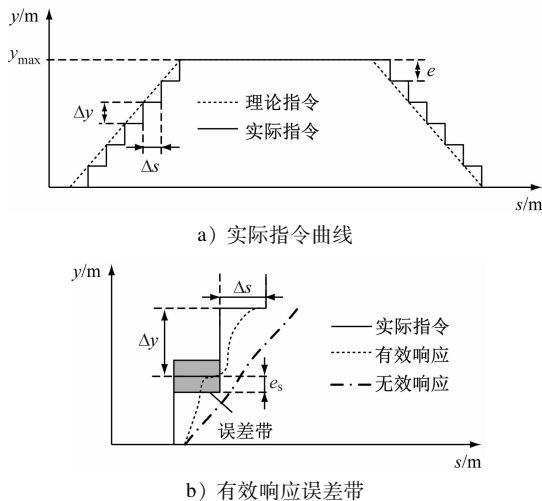


图3 实际指令曲线及有效响应误差带

Fig.3 Actual instruction curve and effective response error band

由式(3)可知,控制步长 Δy 取较小值时可有效降低 e ,使得实际指令曲线近似于理论指令曲线,因此,为保证主动径向系统控制精度, Δy 的取值不应超过 0.1 mm。

当主动径向系统各轴同步完成前一时刻的控制指令后,可认为前一时刻控制指令与当前时刻反馈值相同。当前时刻上位机向伺服驱动器发送新的控制指令,指令值与反馈值之间的距离差即为

Δy 。 Δy 经过驱动器的 PID (比例-积分-微分) 环节后产生驱动电流以控制伺服电机转动,进而驱动齿轮泵产生有效流量以完成纵向位移指令。其中, Δy 与伺服电机转速 n 的关系可近似表示为式(4),式中的 k_p 、 k_i 、 k_d 分别为 PID 中的比例项、积分项及微分项。

$$n = k_p \Delta y + k_i \int \Delta y dt + k_d \frac{d\Delta y}{dt} \quad (4)$$

由式(4)可知: Δy 与 n 呈正相关,即 Δy 取较小值会导致 n 相对较小。本文所述的执行单元方案中,采用齿轮泵作为电液作动器动力源,其有效流量 Q 与 n 之间的关系为:

$$Q = \begin{cases} nD, & n \geq n_0 \\ 0, & n < n_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中:

D ——齿轮泵有效排量;

n_0 ——齿轮泵有效流量为 0 时所对应的伺服电机转速,其值由负载压力等参数^[4]决定。

当 $n < n_0$ 时,伺服电机无法驱动齿轮泵提供足够的有效流量,此时无法完成纵向位移调整。因此, Δy 还应受以下边界条件限制: Δy 的取值必须使 $n > n_0$ 。

综上所述,为获得尽量小的 Δy 值,使得实际指令曲线尽可能近似于理论指令曲线,应采取措施,令伺服电机的转速在 Δy 值较小时仍能维持较高值,以驱动齿轮泵产生足够的有效流量。

2.3 提高伺服电机转速的方法

2.3.1 选用小排量齿轮泵

如式(6)所示,降低齿轮泵排量可减小 Δy 值,即可提高伺服电机转速,因此可选用小排量齿轮泵以提高电机转速。

$$\Delta y = \int \frac{nD}{S} dt \quad (6)$$

式中:

D ——齿轮泵有效排量;

S ——活塞工作面积;

t ——时间。

2.3.2 增大驱动器位置闭环增益

由式(4)可知,提高 PID 控制参数能有效提高控制步长 Δy 取值较小时伺服电机的转速,可通过增大驱动器 k_p 的措施来提高伺服电机的转速。

由于更换硬件成本较高,操作复杂,且齿轮泵排量越小其 n_0 越大^[4],因此优先通过增大驱动器位

置闭环增益,以提高伺服电机转速。为验证该措施的有效性,并在此基础上进一步确定合理的 Δy 值,本文搭建了由上位机、伺服驱动器、电液作动器等组成的实物试验平台。上位机模拟实际线路情况,发送控制指令至伺服驱动器,进而驱动电液作动器完成指令。

首先,为验证提高伺服驱动器的 k_p 对提高伺服电机转速的有效性,并获取合理的 k_p ,需研究在不同 k_p 下的伺服电机转速及作动器响应特性。本文选取了 3 个试验工况(分别命名为工况 A₁、工况 B₁、工况 C₁),各工况的参数如表 1 所示。

图 4 为不同伺服驱动器的 k_p 下电液作动器的执行结果,图中实际反馈的波动源于试验平台中位移传感器自身波动。由图 4 可知,当 k_p 取 950 r/min 时, n 仅为 150 r/min,出现明显的流量死区现象,

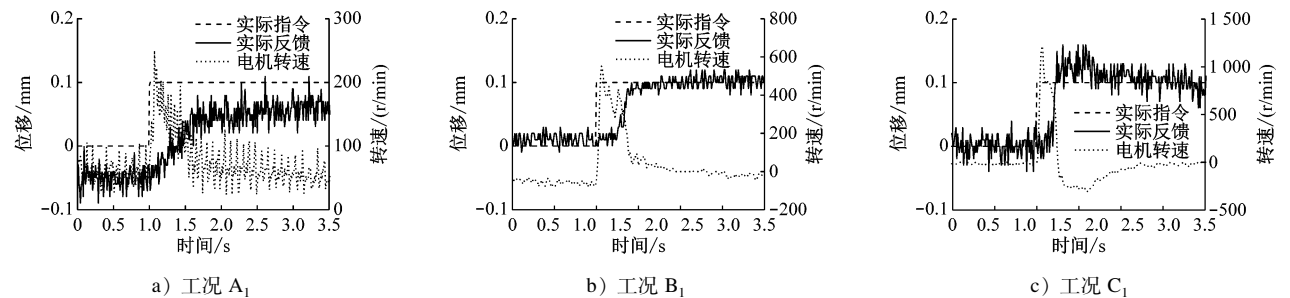


图 4 3 个不同 k_p 试验工况下电液作动器的执行结果

Fig. 4 Execution results of electro-hydraulic actuator under three different k_p test conditions

综上所述,确定 k_p 取值为 3 800 r/min,此参数下当 Δy 取 0.1 mm 时, $n > n_0$,已有效避开流量死区。因此,可进一步明确当 Δy 取 0.1 mm 时是否能满足主动径向系统各轮对间的空间同步要求,即图 3 a)所示实际指令曲线下作动器的响应特性。参照 $R=300$ m、缓和曲线长度 $L=55$ m 的线路,选取 $a=1.015$ m、 $b=1.25$ m,得到 y_{\max} 为 4.2 mm, Δs 为 1.3 m。此时的试验工况如表 2 所示,试验中以等效周期与等效车速的乘积模拟控制 Δs 。工况 A₂、B₂ 通过给定不同的等效车速,研究不同等效周期下作动

表 2 $k_p=3\ 800\ \text{r/min}$ 、 $\Delta y=0.1\ \text{mm}$ 下选取的 2 个试验工况参数

Tab. 2 Two test condition parameters selected when $k_p=3\ 800\ \text{r/min}$ and $\Delta y=0.1\ \text{mm}$		
工况	等效周期/s	等效车速/(m/s)
A ₂	0.072	18
B ₂	0.118	11

表 1 伺服驱动器位置闭环试验工况的参数表
Tab. 1 Parameters of closed-loop test condition at servo drive position

工况	液压缸工作压力/MPa	上位机指令位移/mm	$k_p/(r/min)$
A ₁	16	0.1	950
B ₁	16	0.1	3 800
C ₁	16	0.1	7 600

即:伺服电机仍有一定转速,但实际反馈与实际指令间存在稳定差值;当 k_p 取 3 800 r/min 时, n 提高至 600 r/min,作动器可有效响应实际指令值;当 k_p 取 7 600 r/min 时, n 提高至 1 200 r/min,此时作动器响应更为迅速,但存在明显超调。试验结果表明:通过增大伺服驱动器 k_p 的措施能够有效提高 n ,且位移指令大小相同时, n 与 k_p 呈正比例关系。

器的响应特性。

图 5 为不同等效周期下作动器的响应特性试验结果,试验中伺服系统的控制精度为 ± 0.05 mm,其在图中表征为误差带,用于伺服系统判断作动器是否有效响应。图 5 a)中,实际反馈曲线在 Δs 内未进入误差带,为无效响应;图 5 b)中,实际反馈曲线在 Δs 内进入误差带,为有效响应。通过分析可知:在确定 Δs 后,当等效周期较小时,伺服系统的响应能力无法满足当前 Δy 下的同步要求。因此,为保证当 Δy 取值不超过 0.1 mm 时主动径向系统各轮对间空间同步要求,应提高伺服系统的响应能力。

3 结语

为推广轨道车辆主动径向转向架的工程应用,本文提出了一种嵌入式主动径向执行单元设计方案,该方案可提高主动径向系统执行单元与既有转向架结构的匹配性,且具有拆装维护方便、便于用

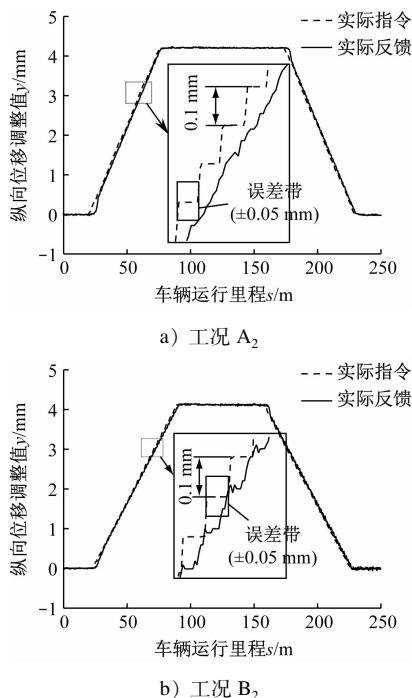


图5 2个不同等效周期试验工况下电液作动器的响应特性
Fig.5 Response characteristics of electro-hydraulic actuators under two different equivalent period test conditions

户运维的优点。同时,为满足主动径向系统各轮对间空间同步要求,本文提出了一种控制指令优化模式,并针对液压齿轮泵流量死区特性提出该模式中关键参数即控制步长的边界条件,最终通过实物试验确定了该模式的有效性,得出提高伺服系统的响应能力是保证主动径向各轮对间同步要求关键措

(上接第126页)

参考文献

- [1] 尹晓燕. 轨道交通车辆段综合开发新模式探讨[J]. 投资北京, 2015(8):86.
YIN Xiaoyan. Discussion on the new mode of development of rail transit vehicle depot[J]. Invest Beijing, 2015(8):86.

施的结论。本研究可为主动径向转向架的工程化提供一定参考。

参考文献

- [1] 田师屹,罗湘潭,任利惠,等. 基于地铁车辆二系回转角的主动径向研究[J]. 机械工程学报,2018(24):147.
TIAN Shiqiao, LUO Xiangping, REN Lihui, et al. Research on active radial of rail transit based on the yaw angle of second suspension[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018(24):147.
- [2] 罗湘潭. 一种用于径向转向架的一体式轮对定位装置:CN 105946889 A[P]. 2016-09-21.
LUO Xiangping. Integrated device for wheel-set positioning of radial bogie; CN 105946889 A[P]. 2016-09-21.
- [3] 罗保军,矫德强. 基于改进PID控制器的EHA液压系统建模和控制研究[J]. 科技通报,2016(5):157.
LUO Baojun, JIAO Deqiang. The modelling and control of EHA system based on modified PID controller[J]. Bulletin of Science and Technology, 2016(5):157.
- [4] 强彦,王亚强,赵春丽,等. 变转速泵控系统建压过程中流量死区特性分析[J]. 兰州理工大学学报,2021(1):54.
QIANG Yan, WANG Yaqiang, ZHAO Chunli, et al. Characteristic analysis of flow-dead-zone in pressure building of variable speed pump control system[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2021(1):54.
- [5] 杨亚辉. 多轴系统同步控制技术[D]. 西安:西安电子科技大学,2007.
YANG Yahui. Synchronization control for multiaxis systems[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and technology, 2007.

(收稿日期:2021-07-15)

- [2] 贺月元,周雷. 停车库上的城市公园——北京地铁16号线北安河车辆段上盖开发综合利用概述[J]. 建筑技艺, 2017(7):45.
HE Yueyuan, ZHOU Lei. Urban park above the parking garage: Bei'anhe Depot air-right development of Metro Line 16 in Beijing[J]. Architecture Technique, 2017(7):45.

(收稿日期:2020-02-12)

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。

