

地铁车辆车门传动系统退化补偿控制策略^{*}

仓 恒 高文科^{**} 王状状

(兰州理工大学能源与动力工程学院, 730030, 兰州//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 目的:地铁车辆车门在运营过程中需要频繁开启、关闭,随着累计运行时间的增加,地铁车辆车门传动元件磨损等会引起传动系统退化,从而影响车门开闭性能和运行安全。为消除退化影响,提高车辆运营的可靠性,需要研究补偿控制策略来纠正系统退化后产生的偏差。**方法**:通过介绍地铁车辆车门传动系统的基本结构、开关动作原理,分析车门动作时各主要传动元件的受力状态;构建车门传动系统动力学模型,并将传动系统等效动力学模型转换为对应形式的传递函数;分析传递函数的变化并增加自动补偿控制策略,使车门开关性能维持在健康状态。对采用自动补偿控制策略前后的车门位移及速度进行仿真分析与对比。**结果及结论**:验证了该补偿控制策略的有效性。采用该自动补偿控制策略能消减传动系统元件退化引起的车门开闭速度波动,提升车门开关性能。

关键词 地铁车辆; 门传动系统; 传动元件退化; 补偿控制策略; 动力学模型

中图分类号 U270.38⁺6

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.08.024

system equivalent dynamics model is transformed into corresponding transfer function. The variations in the transfer function are analyzed, and an automatic compensation control strategy is implemented to maintain the door open/close performance in a healthy state. Simulation analysis and comparison are conducted on the door displacement and velocity before and after applying the automatic compensation control strategy. **Result & Conclusion**: The effectiveness of the proposed strategy is verified. Implementing the strategy reduces fluctuations in the door opening and closing speed caused by degradation of the transmission system components, thereby enhancing the performance of door operation.

Key words metro vehicle; door transmission system; transmission component degradation; compensation control strategy; dynamics model

Author's address School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, 730030, Lanzhou, China

Degradation Compensation Control Strategy for Metro Vehicle Door Transmission System

CANG Heng, GAO Wenke, WANG Zhuangzhuang

Abstract Objective: Metro vehicle doors frequently open and close during operation. With accumulated operating time, the wear of the metro vehicle door transmission components can lead to degradation of transmission system, thereby affecting the door open/close performance and operational safety. To eliminate the degradation effects and improve the vehicle operation reliability, it is necessary to study compensation control strategies to correct deviations caused by system degradation. **Method**: By introducing the basic structure and open/close action principles of the metro vehicle door transmission system, the stress states of the main transmission components during door actions are analyzed. A dynamics model of the door transmission system is constructed, and the transmission

地铁车辆车门传动系统因承载车门开闭动力传递的作用,长期运行后传动元件如丝杆、传动螺母等发生磨损,严重影响地铁车辆车门的开闭性能。因此,分析传动元件磨损对车门开闭性能的影响,消减因磨损退化引起的开闭过程速度波动,对提高地铁车辆车门的安全性、延长车门传动系统使用寿命具有重要的工程意义和参考价值。

鉴于地铁车辆车门在地铁列车安全运营中的重要性,众多学者针对地铁车辆车门传动系统的可靠性做了大量的研究。例如,采用理论分析与ADAMS软件仿真相结合的方法对可能影响地铁车辆车门开关性能的因素如摩擦力等进行分析^[1],或采用贝叶斯网络^[2]、有限元模型^[3]、RF(随机森林)算法^[4]等方法对车门系统的可靠性进行分析。为降低地铁车辆车门系统故障,从分析车门结构与运行

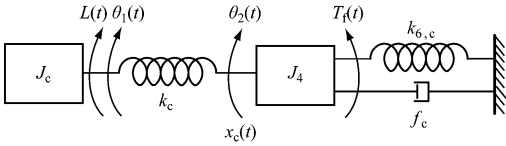
^{*} 国家自然科学基金项目(71561016)

^{**} 通信作者

器2的当量扭转刚度为:

$$k_c = \left(\frac{1}{k_5} + \frac{1}{k_4} + \frac{1}{k_3 N^2} + \frac{1}{k_2 N^2} + \frac{1}{k_1 N^2} \right)^{-1} \quad (2)$$

在车门传动系统中,电机-丝杆部分属于机械转动系统,而车门部分属于机械平移系统。两者性质不同,须分别建立系统等效动力学模型,如图3及图4所示。



注: $k_{6,c}$ —LS型锁闭装置与丝杆间的轴向刚度系数 k_6 折算成的丝杆轴扭转刚度系数; f_c — f 折算成相应的丝杆转动时黏性阻尼系数。

图3 电机-丝杆部分的等效动力学模型

Fig.3 Equivalent dynamics model of the motor-rod part

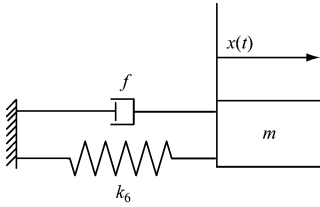


图4 车门部分的等效动力学模型

Fig.4 Equivalent dynamics model of the vehicle door part

根据建立的动力学模型,得出车门传动系统动力学微分方程为:

$$\begin{cases} J_c \frac{d^2 \theta_1(t)}{dt^2} = L(t) - k_c (\theta_1(t) - \theta_2(t)) \\ J_4 \frac{d^2 \theta_2(t)}{dt^2} = k_c (\theta_1(t) - \theta_2(t)) - \frac{2\pi}{h} (x_c(t) - x(t)) k_{6,c} - \frac{2\pi}{h} f_c (\dot{x}_c(t) - \dot{x}(t)) - T_f(t) \\ m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = f_c (\dot{x}_c(t) - \dot{x}(t)) + k_6 (x_c(t) - x(t)) \\ \theta_2(t) = \frac{2\pi}{h} x_c(t) \\ \theta_3(t) = \frac{2\pi}{h} x(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中:

h ——导程。

由式(3)可知,所建车门传动系统动力学模型为6阶微分方程。由于高阶微分方程难以直接求解。为便于分析,现将该高阶微分方程转换为传递函数的形式。

2.2 传动系统传递函数

先对 k_6 进行分析。传动系统抵抗轴向变形的轴向刚度可折算为轴的扭转刚度。针对车门系统丝杆传动情况,设丝杆轴向变形为 Δl ,丝杆扭转变形为 $\Delta \theta$,则有:

$$\frac{\Delta l}{\Delta \theta} = \frac{h}{2\pi} \quad (4)$$

即:

$$\Delta l = \frac{h}{2\pi} \Delta \theta \quad (5)$$

依据能量守恒定律,有:

$$L_1(t) 2\pi = k_6 \Delta l h \quad (6)$$

整理得:

$$L_1(t) = k_6 \left(\frac{h}{2\pi} \right)^2 \Delta \theta = k_{6,c} \Delta \theta \quad (7)$$

系统阻尼系数 f 的折算类同,此处不再赘述。整理可得:

$$\begin{aligned} k_{6,c} &= k_6 \left(\frac{h}{2\pi} \right)^2 \\ f_c &= f \left(\frac{h}{2\pi} \right)^2 \end{aligned} \quad (8)$$

对于 $T_f(t)$,设 $x(t)$ 按 h 折算的车门实际角位移为 $\theta_3(t)$,则有:

$$\frac{\theta_3(t)}{x(t)} = \frac{2\pi}{h} \quad (9)$$

按 h 折算的车门实际角速度 $\dot{\theta}_3(t)$ 与车门的实际直线移动速度 $\dot{x}(t)$ 也有相同的关系:

$$\frac{\dot{\theta}_3(t)}{\dot{x}(t)} = \frac{2\pi}{h} \quad (10)$$

按导程 h 折算的车门实际角加速度 $\ddot{\theta}_3(t)$ 与车门的实际直线移动加速度 $\ddot{x}(t)$ 也有相同的关系:

$$\frac{\ddot{\theta}_3(t)}{\ddot{x}(t)} = \frac{2\pi}{h} \quad (11)$$

根据能量守恒原理,有:

$$T_f(t) 2\pi = m \ddot{x}(t) h = m \ddot{\theta}_3(t) \frac{h}{2\pi} h \quad (12)$$

即:

$$T_f(t) = m \left(\frac{h}{2\pi} \right)^2 \ddot{\theta}_3(t) \quad (13)$$

整理得:

$$T_f(t) = m \left(\frac{h}{2\pi} \right)^2 \ddot{\theta}_3(t) = m \frac{h}{2\pi} \ddot{x}(t) \quad (14)$$

将所得结果代换并对微分方程组进行拉普拉

斯变换,得复域表达式:

$$\begin{cases} (J_c s^2 + k_c) \theta_1(s) = L(s) + k_c \theta_2(s) \\ \left[J_4 s^2 + k_c + (k_6 + fs) \left(\frac{h}{2\pi} \right)^2 \right] \theta_2(s) = \\ k_c \theta_1(s) + \frac{h}{2\pi} (k_6 + fs - ms^2) x(s) \\ (ms^2 + fs + k_6) x(s) = \frac{h}{2\pi} (fs + k_6) \theta_2(s) \end{cases} \quad (15)$$

式中:

s ——拉普拉斯变换后的复频率。

整理计算可得以电机输出扭矩 L 为输入,以车门直线位移 x 和车门开关速度 \dot{x} 为输出的车门传动系统传递函数。车门传动系统传递函数框图如图 5

所示。

由图 5 可知,当 L 不变,而传动系统退化引起 f 变化时,车门的位移或开关速度输出将会随之发生变化。为消除传动系统退化对车门开关性能的影响,本文提出一种补偿控制策略用于纠正传动系统偏差,使车门的位移或速度输出始终处于理想状态。

3 自动补偿控制策略

传动系统的自动补偿控制策略框图如图 6 所示。 $G_0(s)$ 为系统刚开始工作时的传递函数,此时车门开关性能处于理想状态; $G_i(s)$ 为系统长期运行时,传动元件退化磨损引起系统阻尼变化后的传递函数。

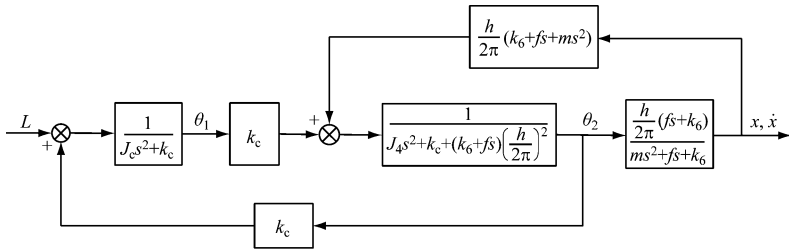


图 5 车门传动系统传递函数框图

Fig. 5 Block diagram of vehicle door transmission system transfer function

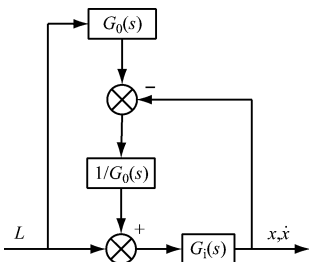


图 6 传动系统的自动补偿控制策略框图

Fig. 6 Block diagram of automatic compensation control strategy for transmission system

加入自动补偿控制策略后,传动系统传递函数 $G(s)$ 变化为:

$$G(s) = \frac{2G_0(s)G_i(s)}{G_0(s) + G_i(s)} \quad (16)$$

4 自动补偿控制策略的效果

为观察该补偿控制策略在传动系统退化时的补偿效果,以图 1 所示结构的某车门传动系统作为研究对象,以不采用补偿控制策略的情况为对比,在 f 分别取 0.6、0.7、0.8 时,分析传动系统阻尼变化对车门开关性能的影响。参数取值如表 1 所示。

取仿真时间为 5 s,仿真得到采用补偿控制策略前后的车门线性位移与速度输出情况分别如图 7 及图 8 所示。

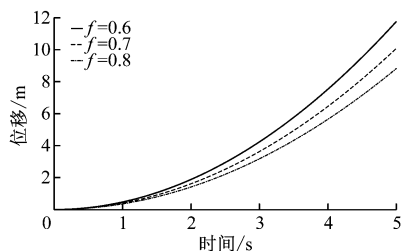
由图 7 可看出: f 不同时,对车门开关性能差异较大;若 f 逐步增大,则车门开关速度相应逐渐缓慢,相同时间内的车门位移量也会逐渐减小;反之,若 f 逐步减小,则车门开关速度相应逐渐加快,相同时间内的车门位移量也逐渐变大。

图 8 表明,采用该自动补偿控制策略后,当 f 分

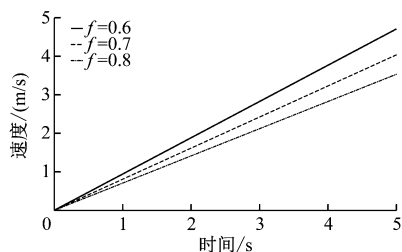
表 1 车门传动系统动力学模型参数取值

Tab. 1 Parameter values of vehicle door transmission system dynamics model

参数	取值
h/mm	10
m/kg	100
$J_c/(\text{kgm}^2)$	1.1×10^{-4}
$J_4/(\text{kgm}^2)$	2.2×10^{-3}
$k_{6,c}/(\text{N/m})$	1.114×10^4
$k_6/(\text{N/m})$	4.4×10^6
$k_c/(\text{N/m})$	1.100×10^4



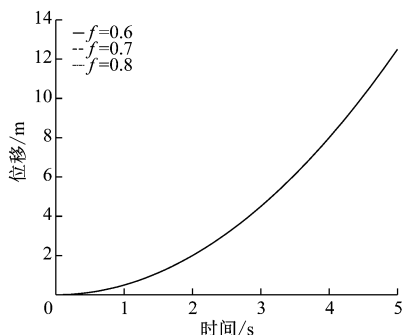
a) 位移变化



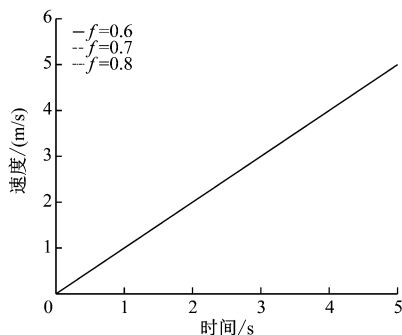
b) 速度变化

图7 采用补偿控制策略前不同 f 时的位移与速度随时间变化仿真曲线

Fig.7 Simulation curves of displacement and speed changing over time with different f values before adopting compensation control strategy



a) 位移变化



b) 速度变化

图8 采用补偿控制策略后不同 f 时的位移与速度随时间变化仿真曲线

Fig.8 Simulation curves of displacement and speed changing over time with different f values after adopting compensation control strategy

别取0.6、0.7、0.8时,车门位移量及运行速度变化很小,其加速度始终稳定在 1 m/s^2 左右。可见,自

动补偿控制策略能使车门开关性能始终处于较佳状态,具有显著效果。

图7与图8对比结果表明,自动补偿控制策略在消除传动系统退化的影响上具有良好的应用效果。

5 结语

地铁车辆长期运营后,车门传动元件易发生老化磨损,从而引起车门系统的退化。为消除系统退化带来的负面影响,本文提出了一种自动补偿控制策略。通过将车门传动系统简化为弹簧-质量-阻尼系统,建立相应的动力学模型,并对该自动补偿控制策略进行仿真。

仿真结果表明采用该自动补偿控制策略后,传动系统阻尼变化时的车门开闭性能始终较为稳定。实例分析证明,该补偿控制策略能有效地消减传动元件退化对车门开关性能的影响。然而该补偿策略中 $1/G_0(s)$ 单元的设计较为复杂,建议控制器的设计应视车门传动系统的具体情况而定。

参考文献

- [1] 王伯铭,陈婧,李智泽,等. 地铁车辆客室塞拉门动力学性能仿真分析[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(4): 14.
WANG Boming, CHEN Jing, LI Zhize, et al. Simulation analysis of metro passenger compartment door dynamic performance[J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(4): 14.
- [2] 朱斌,陈茹雯,许有熊,等. 基于贝叶斯网络的轨道车辆门故障诊断研究[J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2017, 15(2): 40.
ZHU Bin, CHEN Ruwen, XU Youxiong, et al. Research on fault diagnosis of railway vehicle doors based on Bayesian network[J]. Journal of Nanjing Institute of Technology (Natural Science Edition), 2017, 15(2): 40.
- [3] 徐泉军,朱松青,王骏. 地铁车辆门扇变形仿真与模态分析[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(10): 130.
XU Quanjun, ZHU Songqing, WANG Jun. Simulation and modal analysis of metro vehicle door leaf deformation[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(10): 130.
- [4] 付国平,秦征,杨明辉,等. 随机森林算法在地铁车辆门系统润滑退化状态预测中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(7): 173.
FU Guoping, QIN Zheng, YANG Minghui, et al. Application of random forest algorithm in lubrication degradation prediction for rail transit vehicle door system[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(7): 173.
- [5] 李万成. CRH5型动车组塞拉门运用故障分析及日常保养防范措施[J]. 甘肃科技纵横, 2016, 45(1): 14.
LI Wancheng. Fault analysis and preventive measures for routine maintenance of plug door of CRH5 EMU[J]. Scientific & Technical Information of Gansu, 2016, 45(1): 14.

(下转第141页)

客室平均温度为 22.5℃,制热工况客室平均温度为 18℃,满足工程设计要求。

3 结论

1) 地铁列车空调通风系统整体技术方案满足工程设计要求,客室空间气流组织分布均匀,客室内微正压,温度分布均匀。

2) 送风道送风均匀,空调送风口下方弧形导流板结构对空调送风具有良好的导流以及流量分配作用。

3) 回风道内门机构、电器箱等部件的存在,致使气流流动相对比较混乱。回风口区域存在空调机组排水管、电缆等部件,减小了回风面积,致使局部风速增大。

4) 整个客室空间内的压力分布比较均匀,压力梯度较小,客室内为微正压。送风道内的正压分布较高,回风道内负压整体最高,废排风道内的负压次之。

5) 在制冷及制热工况下,整车客室空间内的温度分布整体较均匀,温差较小,满足制冷及制热温度要求。

参考文献

[1] 蒲栋. CFD 技术在动车组空调送风道设计中的应用[J]. 现代

(上接第 137 页)

[6] 黄兵, 华聪立, 沈敏杰. 地铁车门系统门页的仿真分析与试验验证[J]. 机械工程与自动化, 2019(6): 99.

HUANG Bing, HUA Congli, SHEN Minjie. Simulation analysis and test verification of door leaf in subway door system[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2019(6): 99.

[7] 周卫丰, 朱松青, 杨柳, 等. 地铁门系统承载传动机构健康状况测试系统研究[J]. 现代制造技术与装备, 2019(8): 89.

ZHOU Weifeng, ZHU Songqing, YANG Liu, et al. Research on health test system of load-bearing transmission mechanism of underground iron gate system[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2019(8): 89.

[8] 蒲晨亮, 武莹, 蒲天昊, 等. 地铁车辆门系统行程开关异常动作原因分析[J]. 铁道机车车辆, 2015, 35(3): 120.

制造技术与装备, 2018(2): 19.

PU Dong. The application of CFD technology in design of air duct for EMU air conditioning[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2018(2): 19.

[2] 刘杰, 李人宪, 陈琳, 等. 高速列车空调系统及车内流场分析[J]. 西南交通大学学报, 2012, 47(1): 127.

LIU Jie, LI Renxian, CHEN Lin, et al. Analysis of air flow field in air conditioning system and compartments of high-speed trains[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012, 47(1): 127.

[3] 孙术娟, 林鑫. 城际车辆整车空调通风系统的仿真与试验研究[J]. 机车电传动, 2020(1): 136.

SUN Shujuan, LIN Xin. Simulation and experimental research of air conditioning and ventilating system for intercity train[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(1): 136.

[4] 尤立伟, 郑学林, 赵义逢. 地铁列车空调系统送风风道气流组织模拟及优化[J]. 制冷, 2016, 37(3): 39.

YOU Liwei, ZHENG Xuelin, ZHAO Yifeng. Simulation and optimization of air flow organization in the air duct of air conditioning system of metro train[J]. Refrigeration, 2016, 37(3): 39.

[5] 王常宇, 单红娜. 某地铁车辆客室内气流组织仿真与试验对比分析[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(10): 84.

WANG Changyu, SHAN Hongna. Comparative analysis of airflow distribution simulation and experiment in a metro coach[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(10): 84.

(收稿日期: 2021-07-22)

PU Chenliang, WU Ying, PU Tianhao, et al. Cause analysis of travel switch abnormal action of metro vehicle door system[J]. Railway Locomotive & Car, 2015, 35(3): 120.

[9] 侯忠生, 董航瑞, 金尚泰. 基于坐标补偿的自动泊车系统无模型自适应控制[J]. 自动化学报, 2015, 41(4): 823.

HOU Zhongsheng, DONG Hangrui, JIN Shangtai. Model-free adaptive control with coordinates compensation for automatic car parking systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(4): 823.

[10] 李红利, 敖荟兰. 丝杠系统传动误差的测量与补偿[J]. 机械工程与自动化, 2020(6): 191.

LI Hongli, AO Huilan. Measurement and compensation for transmission error of screw system[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2020(6): 191.

(收稿日期: 2021-03-09)