

基于试验数据驱动的列车制动管压力预测模型

应之丁, 范琳, 周和超

(同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804)

摘要: 为解决长大组合列车安全操作问题,有效利用现有 150 辆编组智能化制动试验平台,预测超长列车的制动性能,建立精准且适用于不同编组位置车辆的长大组合列车管压力变化预测模型。提出列车管压力差模型这一概念,采用曲线拟合法与理论推导的方式,建立仿真数学模型,并提出理论列车管压力差模型的改进方法。列车管压力差模型与首车列车管压力变化模型叠加后得到列车管压力变化预测模型,与利用智能化制动试验平台得到的多组试验数据进行对比验证,结果表明:误差保持在 10% 以内。最后,利用该预测模型得到 200 辆编组组合列车制动作用时的列车管压力变化曲线。

关键词: 制动试验;列车管压力;列车管压力差;曲线拟合;仿真数学模型

中图分类号: U270.2

文献标志码: A

Train Brake Pipe Pressure Prediction Model Based on Test Data

YING Zhiding, FAN Lin, ZHOU Hechao

(Institute of Railway and Urban Mass Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: To address the issue of the safe operation of long combined trains, the existing intelligent braking test platform of 150 marshaling vehicles were effectively utilized to predict the braking performance of ultra-long trains. An accurate predictive model was established for changes in train tube pressure in large combinations of vehicles with different grouping positions. A pressure difference model of the train pipe was proposed, a simulation mathematical model was developed using the curve fitting method and theoretical deduction, and an improvement method was suggested for the theoretical pressure difference model of the train pipe. Additionally, a train tube pressure change prediction model was obtained by superimposing the train tube pressure

difference model and the first train tube pressure change model. The results indicate that the error is maintained within 10%. Finally, the change curve of train pipe pressure was obtained under the braking action of 200 assembled trains using this prediction model.

Keywords: brake test; train pipe pressure; train pipe pressure difference; curve fitting; simulation mathematical model

随着列车编组辆数的不断增加,长大组合列车在缓解和制动过程中伴随着较大的纵向冲动,极大地影响了列车的运行安全。为适应列车不断扩编的发展需求,急需对列车制动系统性能进行深入研究。但由于试验成本及列车运行线路环境等因素影响,难以在列车线路上进行大量的运行试验。而现有的制动系统静置试验台,无法满足 200 编组及以上制动系统性能研究。如何进行超长组合列车制动系统性能的研究,已成为迫切需要解决的难题。

国内外多个专业团队针对列车制动系统模型做出了相关研究,并取得了一定成果。文献[1]提出一种适用于长编组列车空气制动过程的制动力求解方法;文献[2]建立了适用于单车制动系统的制动和缓解模型;文献[3]在理论分析基础上搭建了单车制动系统仿真模型;文献[4]建立了列车制动系统再充气过程的数学模型;文献[5]基于气体动力学模型建立了长大列车管道系统的偏微分方程;文献[6]建立了制动器测试试验台的通风进气管气流模型。曲线拟合方法也在很多领域得到了成功应用。文献[7-9]利用曲线拟合的方法得到了目标函数,较好地指导了实际生产生活。

基于现有研究可以得到较为准确的首车列车管压力变化模型,因此本文将列车管压力预测模型分

收稿日期: 2023-08-11

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3703801)

第一作者: 应之丁,副教授,硕士生导师,工学博士,主要研究方向为机车车辆、城市轨道交通制动。

E-mail: yingzhiding@tongji.edu.cn

通信作者: 范琳,硕士生,主要研究方向为机车车辆制动。E-mail: fanlin@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

为首车列车管压力模型和列车管压差模型两部分,综合考虑列车管总长度、所求车辆位置等因素确定列车管压力差模型的变量,按照列车制动试验台试验标准,利用智能化制动试验平台得到150辆编组及以内各编组制动工况下的列车管压力变化数据曲线,再结合制动减压时列车管压力的变化速率函数,利用曲线拟合法建立准确的列车管压力差模型,然后根据本文提出的列车管压力差模型概念,利用质量守恒定律及作用与反作用定律等从理论方面推导列车管压力差模型,并对曲线拟合法建立的列车管压力差模型与理论推导建立的列车管压力差模型进行了精度验证。最后,得到的列车管压力差模型与首车列车管压力模型相加,得到列车管压力预测模型。所建立的列车管压力预测模型以期对超长组合列车制动系统性能的研究提供理论参考。

1 基于智能化制动试验平台的列车管压力差模型

1.1 列车管压力差模型的提出

因为首车列车管直接连接制动阀,且首车列车管中的气体未经过长大组合列车管传递,所以由于管壁摩擦及列车主管、集尘器与支管连接等引起的气体损耗较小,可以忽略。因此可以得到与首车实际气压数据较为吻合的首车列车管压力模型,但编

组位置越靠后的车辆,其列车管内的气体传递要经过的列车管越长,各种因素所引起的气体流动损失越不能忽略,但若考虑这一流动损失引入空气黏性等参数来进行管内气压计算,会使计算变得相当复杂,很难建立准确的理论模型。

列车制动典型特征是:车辆不同位置的制动风管气压有所不同,而各车辆的制动机及列车管路结构相同^[10],所以若把制动过程看作一个整体,每辆车在这个过程中完成的动作是相同的,即列车管都是由某压力降到某压力值从而引起各阀、制动缸工作。则后部车辆与首车列车管的压力差可大致认为是将各种阀、制动缸对列车管压力变化的影响忽略去,即认为后部车辆与首车列车管压力差仅为没有任何支管的一根列车管从管道一端排气时管内不同位置处与首车列车管处的压力差值,如图1所示。基于此建立列车管压力差模型,即列车管压力差模型为描述编组列车后部车辆与首车列车管压力差值变化规律的函数。由于任意时刻列车管内不同位置处与首车列车管处的压力差数值都较小,只要首车列车管压力模型十分准确,即使列车管压力差模型在某些时刻点存在较小误差,与列车管定压500 kPa或600 kPa相比,误差是微不足道的,可以忽略不计。所以,由首车列车管压力模型加列车管压力差模型,得到整列车的列车管压力预测模型也是准确的。本文从曲线拟合法与理论推导法入手,分别建立列车管压力差模型。

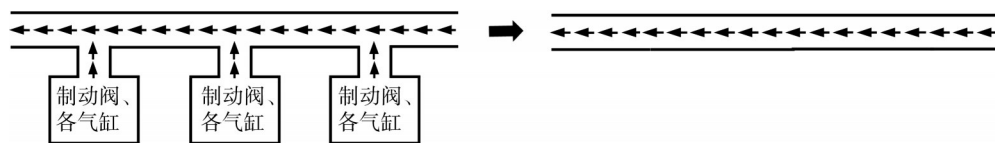


图1 列车管压力差模型

Fig. 1 Train tube pressure difference model

1.2 不同编组列车管路压差规律测试

智能化制动试验平台主要由150辆车的制动系统及管路、压力传感器、A/D与D/A转换、I/O板卡、电源板卡、CPU、数据采集和排气电磁阀以及带2台制动执行器的半实物制动仿真测控系统组成,试验台实物及总体结构如图2所示,主要组成部分如图3所示。由于后部车辆与首车列车管的压力差,可大致认为是将单车制动系统中的各种阀、制动缸对列车管压力变化的影响忽略去,所以将压力传感器设置于单车制动系统与列车管连接处。测控系统得到不同编组列车制动时各位置车辆的列车管压力数

据,与首车列车管压力数据相减即得到列车管压力差数据。由于制动减压量越高所引起的组合列车纵向冲动越大,所以以最典型的七级制动为例展开研究。利用智能化列车制动试验平台对20、50、75、150这4个编组七级制动工况下分别进行了3组试验,其中一组试验数据用于列车管压力差模型的拟合建立,另外2组试验用于验证模型的适用性。对100辆编组七级制动工况进行了一组试验,用于验证管路压差模型的准确性。由于每次试验时外界激励不是完全相同的,若列车管压力差模型与4个编组另外2组试验的误差都保持在一定范围内,则说明该列车

管压力差模型的适用性较好。其中一组试验的压差数据图像如图4所示。

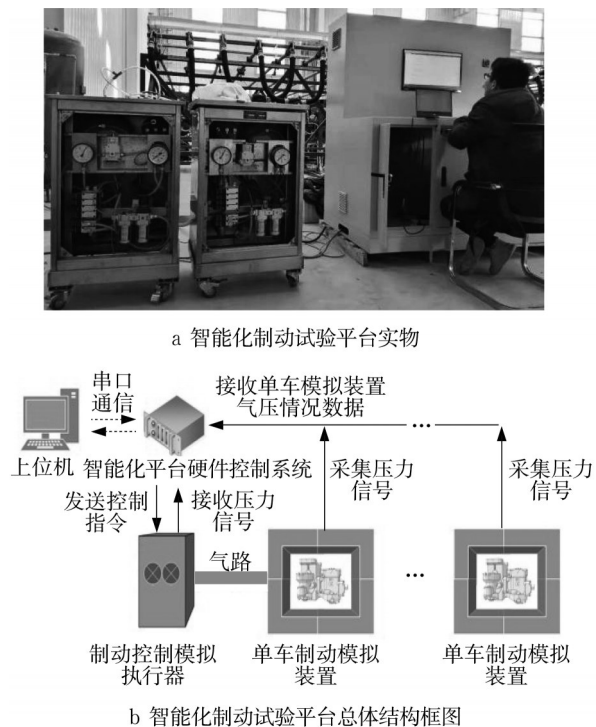


图2 智能化制动试验平台

Fig. 2 Intelligent brake test platform

2 建立适用于不同编组不同位置车辆的列车管压力差模型

2.1 曲线拟合法建立列车管压力差模型

2.1.1 列车管压力差曲线规律分析

由图4可知,由于压差值随时间变化关系的复杂性,用一个函数拟合列车管压差模型很困难,观察150-7级制动与首车压差曲线走势将自变量区间划分成3段,如图5所示,在各个小区间内建立不同的拟合公式。通过分析试验数据发现,第1段为首车开始发生制动减压而后其余车辆则按照前后顺序依次制动减压或还未发生制动减压的阶段,大致呈斜线上升的趋势,且该段曲线的开始点均为首车开始制动的时刻;第3段为首车后部车辆制动减压速率增大而首车制动减压速率开始变缓的阶段,大致呈幂函数或者指数下降的趋势;这两段之间的第2段为波动段,为了拟合的准确性,取波动段最高点这一一定值作为该段的拟合值。

2.1.2 建立列车管压力差模型

由于列车管压力差模型表示气体在列车管内流动时不同位置处列车管与首车位置处列车管压差,

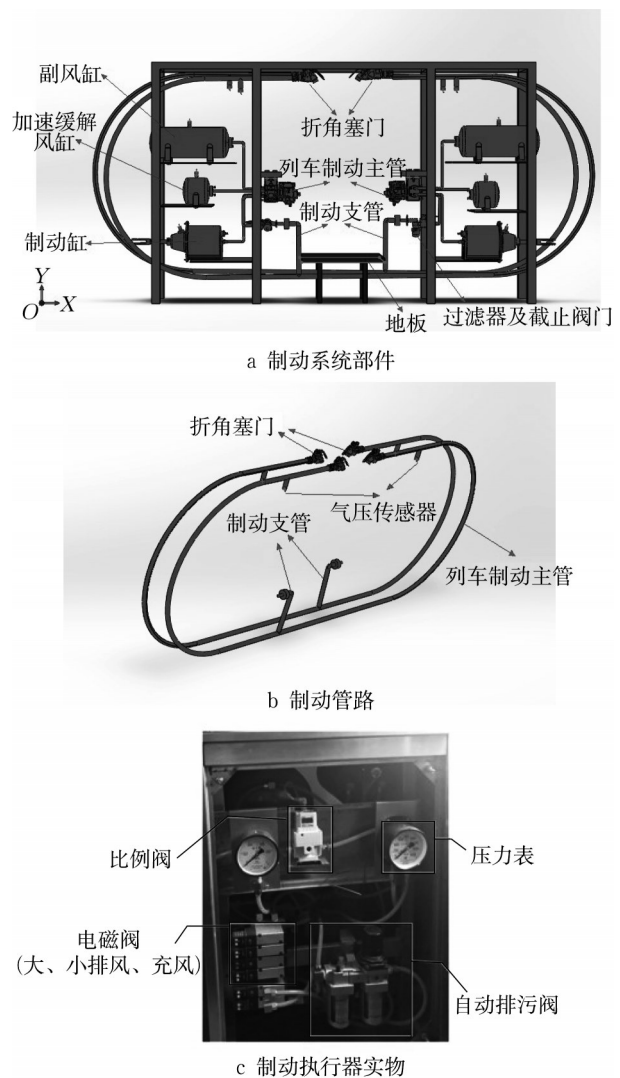


图3 智能化制动试验平台主要组成部分

Fig. 3 Main component of intelligent brake test platform

同一时刻不同编组列车、管内不同位置处压差应是不同的,所以确定压力差模型为关于车辆编组数 n 、车辆位置数 m 以及时间 t 的函数。由于制动减压时列车管压力的变化速率可用指数函数和一元多次函数表示^[1],且结合2.1中对压差试验数据曲线的变化趋势分析,确定压力差模型的第1段函数形式为一次函数,压力差模型第3段函数形式为指数函数,为

$$P_o = p_1 \times t - p_2 \quad (1)$$

$$P_s = p_3 e^{Q_1} \quad (2)$$

式中: P_o 为第1段压差; P_s 为第3段压差; p_i ($i=1, 2, 3$)为关于 m, n 的函数。分析试验数据可知 Q_1 的值随车辆位置数 m 的变化不大且不具有规律性,所以将 Q_1 设为仅关于车辆编组数 n 的函数。

分别绘制出同一编组内参数 p_i 关于车辆位置数

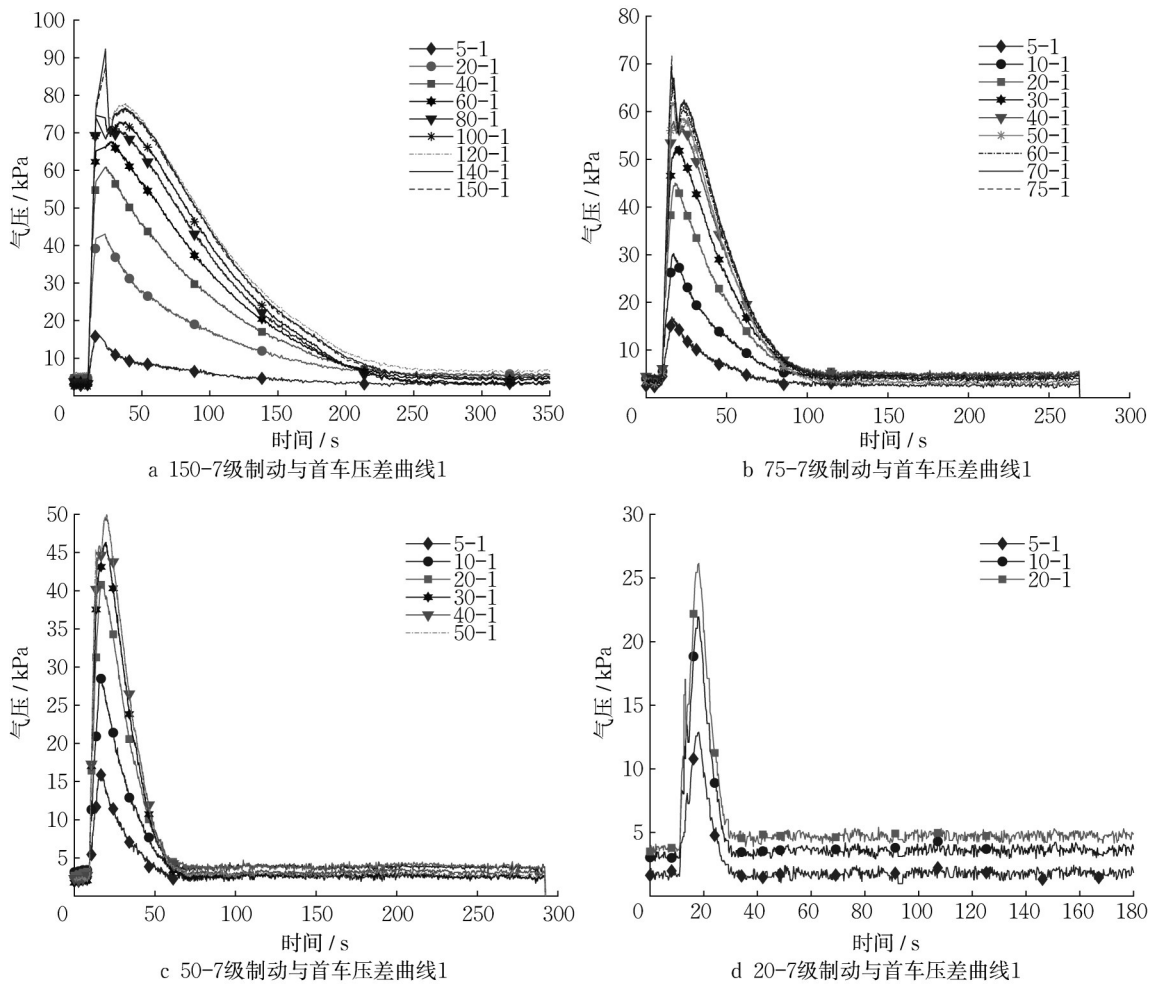


图4 列车管压差试验数据

Fig. 4 Train tube pressure differential test data

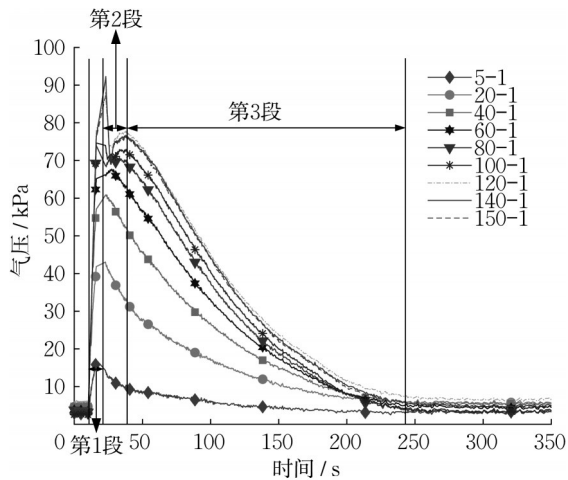


图5 列车管压力差模型分段

Fig. 5 Train tube pressure difference model segment

m 的曲线,同样根据制动减压时列车管压力的变化速率可用指数函数和一元多次函数表示并结合参数

p_i 随车辆位置数 m 的曲线变化趋势,将系数 p_1, p_3 关于车辆位置数 m 的曲线形式设定为一元二次函数, p_2 关于车辆位置数 m 的曲线形式设定为指数函数。

分析试验数据可知各编组不同车辆位置处波动段最高点的值相差很小,所以根据150编组不同车辆位置处最高点的试验数据拟合得到第2段的函数表达式为

$$P_b = -0.002998m^2 + 0.9392m + 21.53 \quad (3)$$

式中: P_b 为第2段压差。综上可知,同一编组不同位置车辆与首车的列车管压力差模型为

$$P = \begin{cases} P_o = (Q_2 \times m^2 + Q_3 \times m + Q_4)t + Q_5 e^{-\frac{m-Q_6}{Q_7}} \\ P_b = -0.002998m^2 + 0.9392m + 21.53 \\ P_s = (Q_8 m^2 + Q_9 m + Q_{10})e^{tQ_{10}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: P 为同一编组不同位置车辆与首车的列车管压力差; $Q_i (i=1, 2, \dots, 10)$ 为关于 n 的函数; t 为时

间。根据拟合得到的函数中参数 Q_i 的值绘制 Q_i 关于车辆编组数 n 的函数曲线,拟合得到 Q_i 与 n 的函数关系式并代入式(4),可得不同编组不同位置车辆的列车管压力差模型为

$$P = \begin{cases} P_o = (-0.05226 e^{-0.05954n} \times m^2 + \\ 1.463 n^{-0.4146} \times m - 0.0001093 n^2 + \\ 0.03066 n - 0.6928)t + \\ 2.062 n^{0.406} e^{-\left(\frac{m-3.241n^{0.5137}}{-0.0148n^2+1.871n-24.03}\right)^2} \\ P_b = -0.002998 m^2 + 0.9392 m + 21.53 \\ P_s = (-57.36 n^{-1.814} \times m^2 + \\ 128.9 n^{-0.8852} \times m - 0.0008655 n^2 + \\ 0.3473 n - 10.17)e^{-5.822 n^{-1.218t}} \end{cases} \quad (5)$$

2.2 理论推导建立列车管压力差模型

理论推导得到的列车管压力差模型可为制动系统进一步改进提供思路,故根据本文提出的列车管压力差模型概念,尝试根据质量守恒定律及作用与反作用定律等推导理论压差模型。

一定质量的空气在单位时间内经过管的各横截面流动时,有

$$q_m = \frac{S\omega_0}{C} \quad (6)$$

式中: q_m 为质量流量, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$; S 为管的有效断面积, m^2 ; C 为空气比容, $\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$; ω_0 为空气的流动速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。所以,在横截面积不变的管道内,有

$$\frac{\omega_1}{\omega} = \frac{C_1}{C} \quad (7)$$

式中: ω 为管内任意截面上的空气速度; ω_1 为管内已知截面上的空气速度; C_1 为管内已知截面上1 kg空气的比容; C 为管内任意截面上1 kg空气的比容。由于在长大列车管中,管壁与空气的接触面积很大,所以可认为管内空气发生等温流动,根据完全气体状态方程并结合式(7),有

$$\omega = \frac{P_1\omega_1}{P} \quad (8)$$

式中: P_1 为管内已知截面上的压力,kPa; P 为管内任意截面上的压力,kPa。设无限小的管长为 dL , F 为气体前进时所受到的阻力; dP 为由于运动阻力而产生的损失压降,根据作用与反作用定律,有

$$C_1 dP = -FdL \quad (9)$$

当1 kg空气通过长度为 L 、直径为 D 的列车管时,设列车管与空气的接触面积为 A ,有

$$A = \frac{4C_1}{D} \quad (10)$$

由于管内空气运动阻力 F 是由于空气与管壁的

摩擦造成的,与固体摩擦求法不同,须用阻力系数 β 乘摩擦面积计算得到即式(11),并代入式(9),可得式(12):

$$F = \frac{4C_1}{D}\beta \quad (11)$$

$$dP = -\frac{4\beta dL}{D} \quad (12)$$

式中: β 为空气流过 1m^2 管道内壁的运动阻力,称作气体摩擦系数,其大小与气体的速度 ω 及比重 ϵ 有关。利用 β 的计算公式即式(13)联立式(12)可得式(14):

$$\beta = k\omega^2\epsilon \quad (13)$$

$$dP = -\frac{4k\omega^2 dL}{CD} \quad (14)$$

式中: k 为比例系数。将式(7)与式(8)相乘并代入式(14)经积分可得式(15):

$$\frac{1}{2}(P_2^2 - P_1^2) = \frac{4kP_1\omega_1^2}{DC_1}(m-1)L \quad (15)$$

式中: P_2 指编组列车后部任意车辆位置处列车管的气压; P_1 为首车列车管气压; m 为编组车辆的位置数。由式(15)与式(7)、(8)联立并结合气体状态方程可得理论管路压差模型,其中 R 为气体常数, T_1 为热力学温度, ΔP 为编组列车后部任意车辆位置处与首车列车管的压力差,有

$$\Delta P = P_2 - P_1 = P_1 \left(\sqrt{\frac{4k\omega_1^2}{DRT_1}(m-1)L + 1} - 1 \right) \quad (16)$$

3 列车管压力差模型验证

3.1 曲线拟合法建立的列车管压力差模型

由于曲线拟合法建立的列车管压力差模型是利用4个编组3次试验数据中的一组试验数据得到,在此利用这4个编组的其余2组试验数据以及100辆编组列车的试验数据进行验证。利用Matlab软件绘制不同编组不同位置处的列车管压力差模型曲线,与试验数据曲线进行对比,部分对比图如图6,除20辆编组列车第20辆车误差较大为20%外,其余编组列车误差均在15%以内。将该列车管压力差模型与首车列车管压力模型^[2]相加得到整列车的列车管压力预测模型,绘制出模型曲线与试验曲线如图7,经计算所有编组列车误差均在10%以内,故该列车管压力差模型较准确。预测得到200辆编组列车的

列车管压力曲线图8,可进一步研究通过控制智能化制动试验平台进行小编组级联得到200辆编组

列车的列车管压力曲线,与该模型压力曲线进行对比验证。

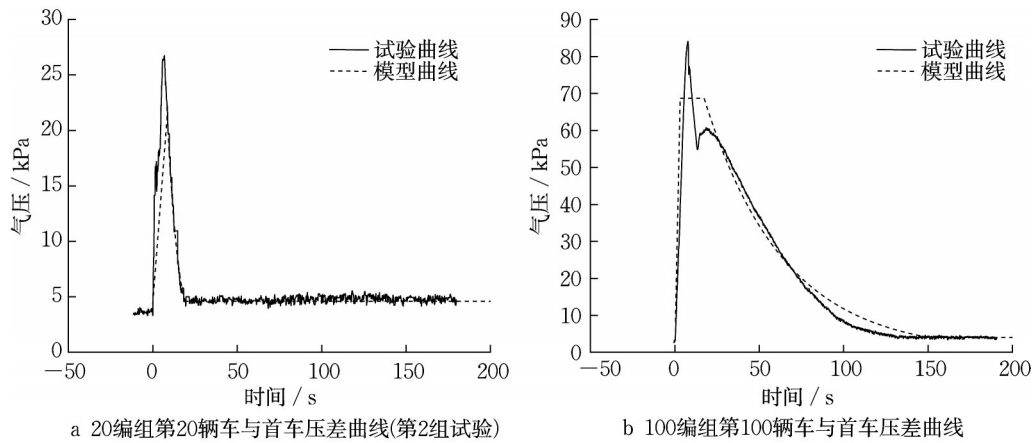


图6 列车管压差数据对比曲线

Fig. 6 Comparison of train pipeline pressure difference data

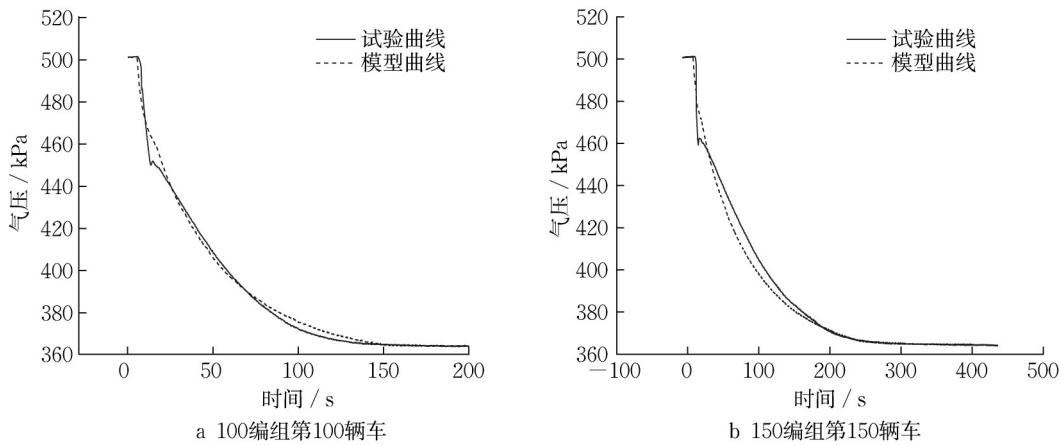


图7 列车管压力数据对比曲线

Fig. 7 Comparison of train pipeline pressure data

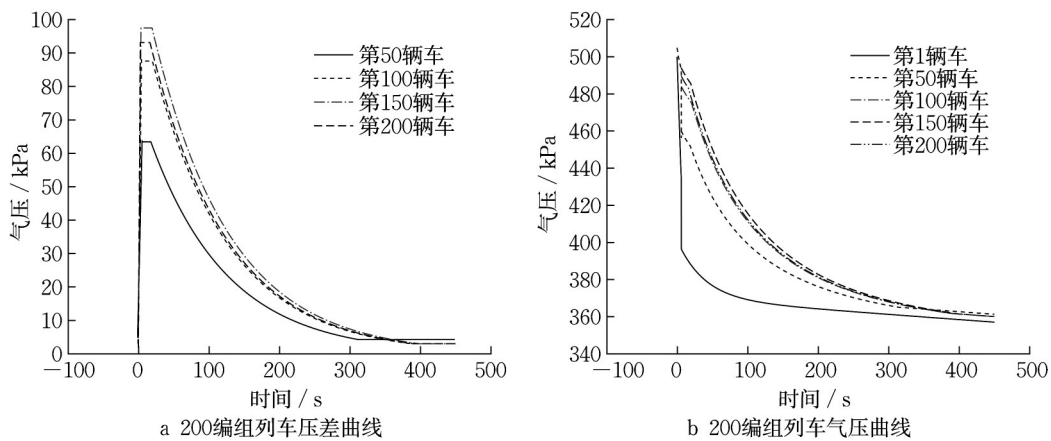


图8 200编组列车管压力预测

Fig. 8 Forecast of 200 train tube pressure

3.2 理论推导建立的列车管压力差模型

对理论列车管压力差模型即式(16)来说,仅有

kw_1^2 这一项未知量, kw_1^2 的值当列车管理论气压预测模型与试验数据误差最小时取到。将理论列车管

压力差模型与首车列车管压力模型^[2]相加得到整列车的列车管理论压力预测模型,利用理论气压预测模型绘制各位置车辆处列车管压力变化曲线与试验数据对比图9,由图9可以看出,车辆位置数越大,模型曲线与试验曲线的误差就越大。这是由于常用制动波速沿列车长度方向有所提高,且管子断面的空

气速度随时间是变化的^[12],即 $k\omega_1^2$ 应是一个与 n 、 m 、 t 等变量有关的函数,所以需进一步探究管内不同位置处的空气流速随时间的变化关系,管内不同位置间的空气流速关系以及不同长度管同一位置处的空气流速关系,进而修正理论上的列车管压力差模型。

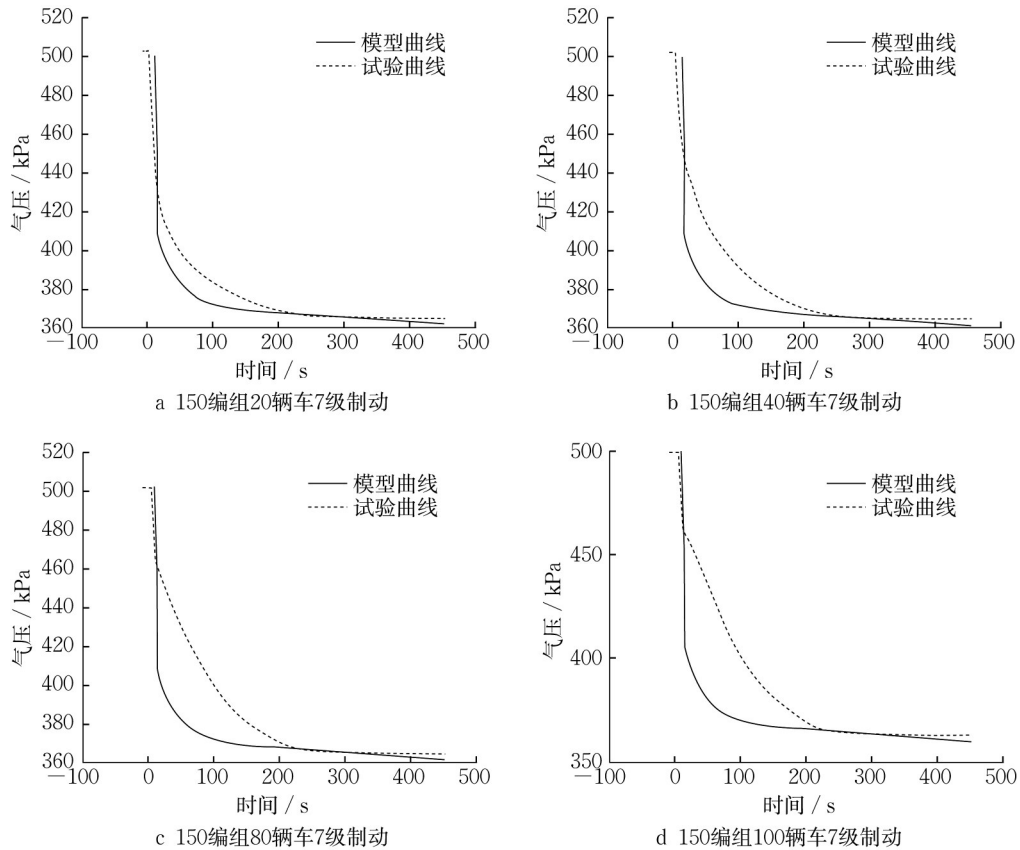


图9 理论列车管压力预测模型与试验对比曲线

Fig. 9 Comparison of theoretical train pipe pressure prediction model and experiment value

4 结语

提出了列车管压力差模型的概念,首先通过曲线拟合的方式得到了压力差模型。经对比除20辆编组第20辆车误差较大为20%外,其余编组车辆误差均在15%以内。将该列车管压力差模型与首车列车管压力模型相加得到整列车的列车管压力预测模型,经计算包括20辆编组第20辆车在内其误差均在10%以内,故该压力差模型较准确,可对长大列车管压力进行预测。根据列车管压力预测模型预测得到了整列200辆编组列车的列车管压力曲线。可进一步研究通过智能化制动试验平台进行小编组级联循环模拟大编组列车进行制动试验,将该列车管压力预测模型作为目标函数输入到每次级联时的小

编组实物制动系统的首车中,从而得到虚拟模型与实物系统相结合下的大编组列车的列车管气压变化数据,将会大幅提高模型的适用性。

同时根据质量守恒定律及作用与反作用定律等推导得到了理论列车管压力差模型,与试验曲线对比发现该理论列车管压力差模型误差较大,经分析提出可以进一步推导管内任意位置处空气流速随时间、管长等因素的变化关系,进而对理论列车管压力差模型做出修正。此外,由曲线拟合法得到的列车管压力差模型其函数形式能符合任意编组不同位置处车辆制动时的列车管压力变化趋势,且该函数的系数与车辆位置数和编组数有一定的函数关系,可为理论列车管压力差模型的进一步优化提供指导。

作者贡献声明:

应之丁:提出研究思路,修订论文。

范琳:设计研究方案,试验,起草及修订论文。

周和超:修改研究方案、修订论文。

参考文献:

- [1] 王青元,赵紫宁,刘强强,等.两万吨重载列车空气制动过程建模[J].机车电传动,2022(4):70.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2022.04.010.
WANG Qingyuan, ZHAO Zining, LIU Qiangqiang, *et al.* Modeling of air braking process of 20 000t heavy duty train [J]. Electric Transmission of Locomotive, 2022 (4) : 70. DOI: 10.13890/j.issn.1000-128X.2022.04.010.
- [2] 何志浩,樊嘉慧,梁晖.半实物列车制动系统仿真平台结构设计及空气制动模型解析[J].城市轨道交通研究,2021,24(6):24.DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.06.006.
HE Zhihao, FAN Jiahui, LIANG Hui. Structure design and air brake model analysis of semi-physical train braking system simulation platform [J]. Urban Rail Transit Research, 2021, 24 (6) : 24. DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.06.006.
- [3] 曾军.货运列车空气制动系统特性试验及仿真研究[D].湘潭:湘潭大学,2019.
ZENG Jun. Freight train air brake system performance test and simulation study [D]. Xiangtan : Xiangtan university, 2019.
- [4] 应之丁,陈家敏.基于智能化仿真试验平台的货运列车再充气特性[J].同济大学学报(自然科学版),2019,47(10):1508. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2019.10.017.
YING Zhiding, CHEN Jiamin. Reinflation characteristics of freight train based on intelligent simulation test platform [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2019, 47 (10) : 1508. DOI:10.11908/j.issn.0253-374x.2019.10.017.
- [5] WU Qing, COLE Colin, SPIRYAGIN Maksym, *et al.* Railway air brake model and parallel computing scheme [J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2017, 12 (5) : 051017. DOI:10.1115/1.4036421.
- [6] VLADIMIR Pavelčík1. Design of an airflow model for railway brake components testing [J]. Transportation Research Procedia, 2021, 55: 790. DOI:10.1016/j.trpro.2021.07.046.
- [7] 宋国兵,常娜娜,侯俊杰,等.基于系统电压分布曲线拟合的后备保护方案[J].电力系统保护与控制,2022,50(16):95. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211394.
SONG Guobing, CHANG Nana, HOU Junjie, *et al.* The backup protection scheme is based on system voltage distribution curve fitting [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50 (16) : 95. DOI: 10.1783/j.cnki.pspc.211394.
- [8] 余文坤,吴佩达,张昊楠,等.基于多项式曲线拟合的海上地震勘探拖缆定位[J].测绘学报,2022,51(5):772. DOI: 10.11947/j. AGCS.2022.20200588.
YU Wenkun, WU Peida, ZHANG Haonan, *et al.* Towing cable location for offshore seismic exploration based on polynomial curve fitting [J]. Acta Geodesy et Cartographica Sinica, 2022, 51 (5) : 772. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2022. 20200588.
- [9] 马猛,王克华,曲亮,等.不同品种鸡生长曲线拟合及分析[J].中国畜牧杂志,2022,58(1):129. DOI:10.19556/j.0258-7033.20210322-01.
MA Meng, WANG Kehua, QU Liang, *et al.* Growth curve fitting and analysis of different breeds of chickens [J]. Chinese Journal of Animal Science, 2022, 58 (1) : 129. DOI:10.19556/j.0258-7033.20210322-01.
- [10] 应之丁,樊嘉慧,吴晓倩.基于车辆滚动制动试验台的轨道交通列车动态制动性能试验研究[J].城市轨道交通研究,2021,24(1):26. DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.01.006.
YING Zhiding, FAN Jiahui, Wu Xiaoqian. Research on dynamic braking performance of rail transit train based on rolling brake test bench [J]. Urban Rail Transit Research, 2021, 24 (1) : 26. DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.01.006.
- [11] 应之丁,樊嘉慧,吴晓倩.车辆动态制动试验仿真系统研究[J].铁道机车车辆,2021,41(5):187. DOI: 10.3969/j.issn.1008-7842.2021.05.32.
YING Zhiding, FAN Jiahui, WU Xiaoqian. Research on simulation system of vehicle dynamic braking test [J]. Railway Locomotive and Vehicle, 2021, 41 (5) : 187. DOI: 10.3969/j. issn.1008-7842.2021.05.32.
- [12] 冯征.重载货车空气制动系统建模及仿真[D].成都:西南交通大学,2016.
FENG Zheng. Modeling and simulation of air brake system for heavy-duty truck [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.