

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*

应之丁 樊嘉慧 吴晓倩

(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 长期以来,列车制动系统在实验室内只能进行制动阀和制动系统静置试验,难以直接测试列车实际动态制动性能,因而对于长大货物列车制动性能及引起的纵向动力学效果难以判断。为此提出了基于滚动制动试验台进行车辆动态制动试验,即将虚拟列车制动系统模型与实际车辆制动系统组合,应用虚拟列车制动系统模型,通过计算机控制模拟不同编组列车的不同位置车辆的制动管路气压曲线,控制滚动制动试验台上单车做各种制动试验,以得出比较准确的列车各个车辆的实际动态制动效果。滚动制动试验台上车辆实际制动减速度和车辆前后拉杆承受的纵向力,为进一步评估各种编组列车制动纵向动力学性能提供了准确的依据,为长大货物列车运行安全提供了可靠的评估试验仿真装置。

关键词 铁路货物列车;滚动制动试验台;动态制动试验;模拟

中图分类号 U271.1⁺1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.01.006

Experimental Study on Dynamic Braking Performance of Rail Transit Train Based on Vehicle Rolling Brake Test Bench

YING Zhiding, FAN Jiahui, WU Xiaoqian

Abstract For a long time, the brake valve and airway static test of train braking system can only be performed in the laboratory, having difficulty in directly testing the actual dynamic braking performance of the train. Therefore, it is difficult to judge the braking performance of the long freight train and the induced longitudinal dynamics. In response, dynamic braking test based on the rolling brake test bench is proposed. That is to say, the test combines the virtual train braking system model with the actual vehicle braking system, then applies the virtual train braking system model, and controls the single vehicle on the rolling brake test bench to perform various braking tests, to obtain the actual dynamic braking effect of each vehicle of the train accurately. The actual braking deceleration of the vehicle

on the rolling brake test bench and the longitudinal force of the front and rear levers of the vehicle offer an accurate reference for further evaluation of the longitudinal dynamics of various trains, providing a reliable evaluation test simulation equipment for the safe operation of long freight trains.

Key words railway freight train; rolling brake test bench; dynamic braking test; simulation

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

由于长大货物列车编组辆数增多,导致列车制动和缓解时纵向冲动力加大,严重影响列车在运行时的安全性和平稳性^[1]。针对长大货物列车存在的制动难点,需对不同编组列车及不同位置的车辆制动过程进行分析,通过对比各车辆制动力的差异分析制动过程的纵向冲击力,以得出列车制动控制优选方案,避免车辆发生挤撞甚至脱轨事故,保证行车安全。然而,对于长大货物列车制动在室内只能做静置试验,而在线路上做列车制动试验成本太高,因此,列车纵向动力学性能只能进行规律性的评估。

目前,国内研制了滚动制动试验台,即在车辆滚动试验台基础上,在轨道轮轴上另加装模拟可调节的各种制动惯性轮,设置单端两轴转向架制动试验装置,可以进行单辆车模拟动态制动试验。但是,由于不同位置车辆的制动状态并不完全一致,这种方法所取得列车制动性能数据有限,无法对列车中不同位置的车辆进行动态制动模拟。因此,本文提出了基于滚动制动试验台搭建货物列车动态制动试验仿真装置,以提高对列车制动性能分析的准确性。

1 动态制动试验仿真装置

利用滚动制动试验台进行动态制动试验的仿真

* 国家重点研发计划项目(2017YFB1201302-12B);上海市自然科学基金项目(17ZR1432000)

装置包含如图 1 所示的两大 部分,即制动试验执行部分与制动试验控制部分。制动试验控制部分主要用于根据制动不同阶段的控制模型对制动试验执行部分加以控制。

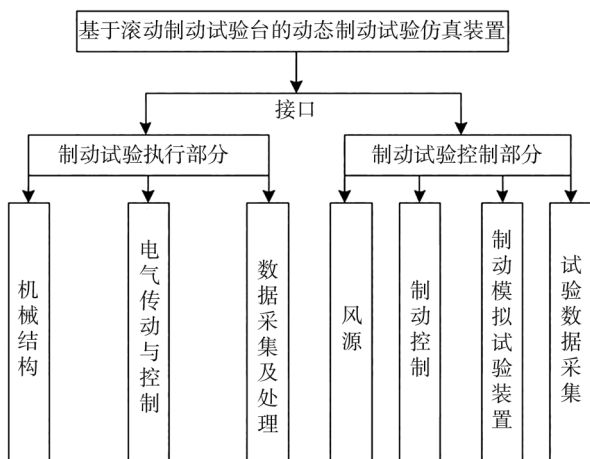


图 1 基于滚动试验台的动态制动试验仿真装置结构图

第一部分为滚动制动试验台的制动试验执行部分,车辆在滚动台上的制动试验实景如图 2 所示。其主要包括机械结构、电气传动及控制、数据采集及处理等设备所组成。

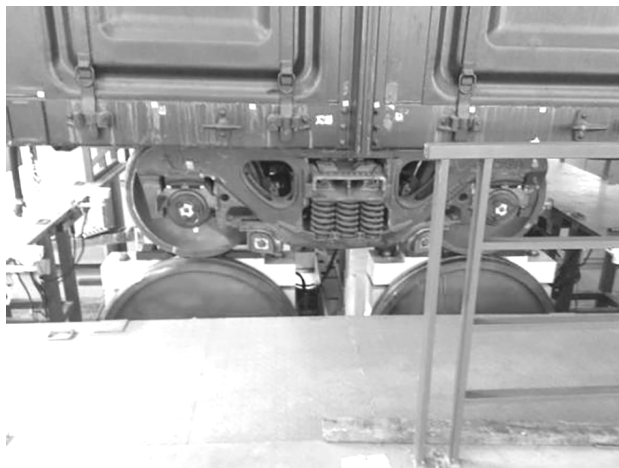


图 2 车辆在滚动台上试验实景图

1) 机械结构用于放置被测试车辆,同时可以调整轨距,适应各类型货车的基础结构。其主要包括纵向基础平台、轨道轮对支撑平台、接轴式可变轨距轮对、车轮支撑及称重装置、制动惯性轮结构组成、联接惯性轮的球笼式万向联轴器和车体纵向牵引装置等。对于各型货车轴重加载状况,主要依据称重装置测量所得的被测试车辆的轮重和轴重来确定,从而为实施货车制动动态性能试验创造条件。

2) 电气传动及控制设备通过控制轨道轮对速

度,模拟各种试验工况。

3) 数据采集及处理设备的主要作用是通过传感器采集的数据,获取测试车辆加速度、转速、位移、压力和温度等信息,同时还可以进行基本的数据处理。

第二部分为制动试验控制部分,主要由风源、制动控制、车辆制动模拟试验装置和试验数据采集 4 部分设备组成。

1) 风源设备主要由空气压缩机与储风缸组成。

2) 车辆制动模拟试验装置主要用于模拟 150 辆编组列车中任意一辆车的初充气、减压制动及再充气缓解等单车制动功能。

3) 制动控制设备控制车辆制动。

4) 试验数据采集设备主要采用压力与流量传感器对试验过程中被试件的工作状态进行实时检测,并将采集到试验数据反馈到制动控制设备。

通过控制、测试接口将滚动制动试验台与制动试验控制两部分相连接组合而成的动态制动试验仿真装置(如图 3 所示),可以研究不同编组货物列车中的任意一辆车的制动性能,将静止试验转变升级为模拟实际动态列车的制动试验。

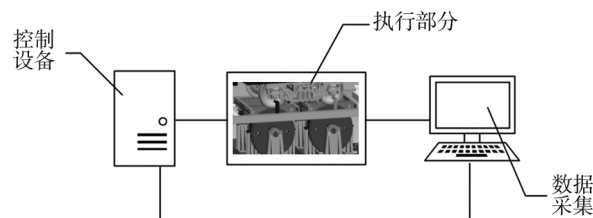


图 3 动态制动试验仿真装置

2 建立虚拟列车制动控制模型

2.1 货物列车车辆制动系统分析

为实现模拟列车制动设备对任一车辆的精确控制,研究包括车辆制动模拟试验装置、制动控制执行器、微机控制及数据采集设备的动态制动试验仿真平台(见图 4)。

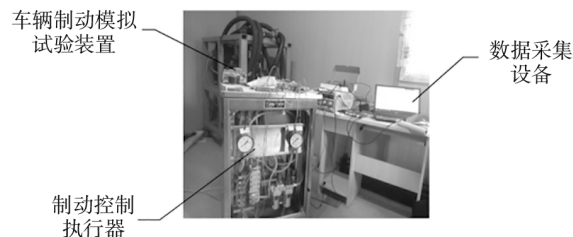


图 4 制动试验仿真平台

为控制滚动制动试验台上车辆制动,模拟列车编组内任意一辆车在列车制动过程中气压的变化,

在动态制动试验仿真平台上,研究建立适应不同位置车辆的制动控制模型,进一步建立虚实结合的动态制动试验仿真装置。

铁路货车常用的制动机为120型空气制动机,主要有充气缓解、减压制动及制动保压3个基本作用。图5为其充气缓冲原理图^[4]。

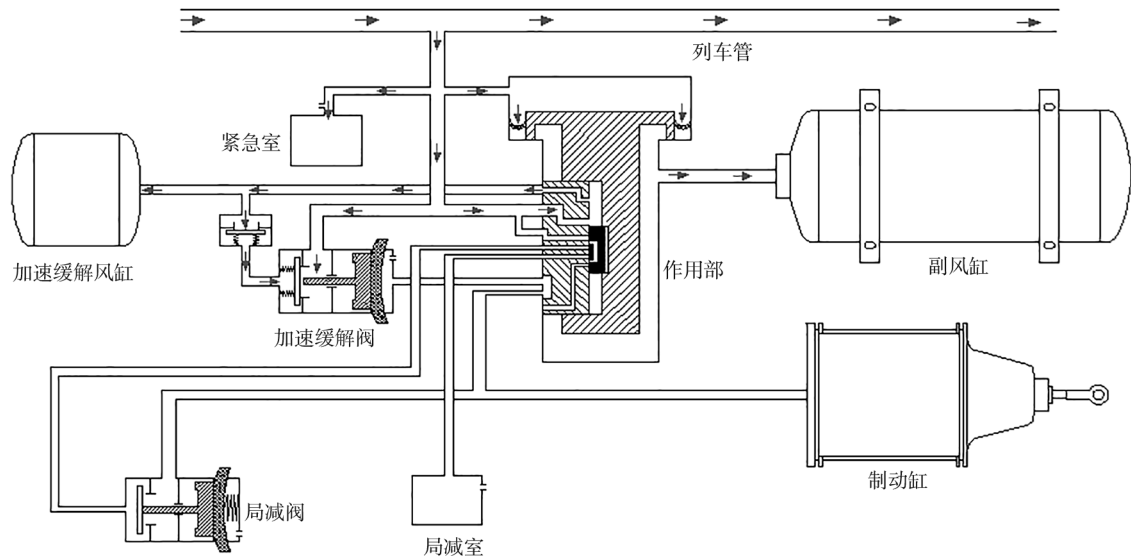


图5 120型空气制动机充气缓冲原理图

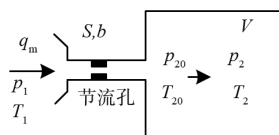
列车制动典型特征是,每辆车位置的列车制动风管气压有所不同,而每辆车的制动机及气管路结构相同,这为建立虚拟列车制动控制模型打下基础。

2.2 建立制动控制模型

基于120型空气制动机的工作原理,结合气动力学相关理论,建立了列车初充气、制动和缓解等过程的基本控制模型。

在制动的过程中,车辆制动系统的管路和缸室均可以与外界进行良好的散热,由气体流动速度变化引起的制动系统温度变化较小可忽略不计,并且在制动系统稳定后,气体流速等于零,此时制动系统内的温度大致与外界温度相等。因此,制动系统中管路与风缸气压与体积变化可简化为等温变化。

充气过程主要是由一个恒定的气源,经某气动元件或气动回路,向另一容器充气,并且在充气过程中容器内温度保持不变,充气过程如图6所示。



注: q_m 为 dt 时间内通过进气回路流入的质量流量; P_1 为气动元件上游管道内的静气压; P_2 为气动元件下游管道内的静气压; P_{20} 为气动元件下游管道内的初始气压; T_1 为气动元件上游管道内的热力学温度; T_2 为气动元件下游管道内的热力学温度; T_{20} 为气动元件下游管道内的初始热力学温度; V 为气体的体积; S 为节流孔有效截面积; b 为临界压力比。

图6 等温充气过程简化模型

由完全气体状态方程 $pV = mRT$ 以及质量流量方程 $dm = q_m dt$ 可得

$$q_m = \frac{dm}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{p_2 V}{RT_2} \right) = \frac{V}{RT_1} \frac{dp_2}{dt} \quad (1)$$

式中:

t ——时间;

m ——气体质量;

R ——气体常数。

q_m 的大小与气动回路中的流动状态有关。当回路处于亚声速流动时,回路中通过的气体 q_m ^[6]的计算公式为

$$q_m = q_{m,0} \sqrt{-\left(\frac{p_2/p_1 - b}{1-b}\right)^2}, \quad 1 \geq \frac{p_2}{p_1} > b \quad (2)$$

式中:

$q_{m,0}$ ——临界状态下,通过节流孔的 q_m 达到最

大值, $q_{m,0} = 0.04 \frac{p_1}{\sqrt{T_1}} S$;

b ——临界压力比,即元件内刚达到声速时,元件下游管道内静气压与上游管道内静气压之比。

当 $\frac{p_2}{p_1} \leq b$ 即为声速充气时,由 p_{20} 充至 p_2 所需的充气时间为

$$t = \frac{1.4603V}{S\sqrt{RT_1}} \left(\frac{p_2}{p_1} - \frac{p_{20}}{p_1} \right) \quad (3)$$

当 $1 \geq \frac{p_2}{p_1} > b$ 为亚声速充气,由 p_{20} 充至 p_2 所

需的充气时间为

$$t = \frac{1.460\ 3\ V(1-b)}{S\sqrt{RT_1}} \cdot \left[\sin^{-1}\left(\frac{p_2/p_1-b}{1-b}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{p_{20}/p_1-b}{1-b}\right) \right] \quad (4)$$

由此可以得出容器内的气压随时间变化的关系 式^[5]为

$$p_2 = \begin{cases} \frac{p_1 S \sqrt{RT_1}}{1.460\ 3\ V} t + p_{20} & \text{当 } \frac{p_2}{p_1} \leq b \text{ 时} \\ p_1 \cdot \left\{ (1-b) \arcsin \left[\frac{1.460\ 3\ V(1-b)}{S\sqrt{RT_1} \cdot t - 1.460\ 3\ V(1-b) \sin^{-1}\left(\frac{p_{20}/p_1-b}{1-b}\right)} \right] + b \right\} & \text{当 } 1 \geq \frac{p_2}{p_1} > b \text{ 时} \end{cases} \quad (5)$$

由上述公式可以推导得到列车的初充气基本模型。列车的初充气,是指列车总风源向列车制动风管充气,并通过列车制动风管向副风缸等充气并达到制动的定压值。

列车制动风管充气模型简化如图 7, 其中风源的气压为 p_s , 制动管中的气压则在这一过程中由初始气压 p_{10} 变为 p_1 , $T = T_1$ 在这一充气过程中, 模型中使用等效风缸来近似模拟制动管路, 存在的误差通过修改 S 进行修正。

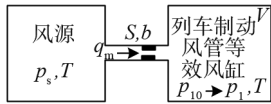


图 7 列车制动风管充气简化模型

$$p_1 = \begin{cases} \frac{p_s S \sqrt{T}}{2.155\ 0 \times 10^{-2} \pi D_1^2 N L_1} t + p_{10} & \text{当 } p_1 \leq 0.2 p_s \text{ 时} \\ p_s \cdot \left\{ 0.8 \arcsin \left[\frac{\pi D_1^2 N L_1}{58.005\ 5 S \sqrt{T} \cdot t - \pi D_1^2 N L_1 \sin^{-1}\left(\frac{p_{10}}{0.8 p_s} - 0.25\right)} \right] + 0.2 \right\} & \text{当 } p_s \geq p_1 > 0.2 p_s \text{ 时} \end{cases} \quad (7)$$

3 虚拟列车制动控制模型在动态制动试验仿真装置上的验证

3.1 试验方法

利用列车制动系统的单车制动机结构相同、制动系统管路气压传递连续性等特点, 研究在动态制动试验仿真装置, 通过建模和试验研究, 将各种编组车辆的制动气压曲线模型储存在计算机里; 模拟不同编组车辆的制动系统列车管气压曲线, 控制车辆制动模拟试验装置进行多次循环试验, 从而连续模拟出列车各个位置的车辆制动全过程。

试验的方法主要包括两部分, 首先应确定整个装置可以能够连续且完整地实现列车的初充气、制动以及缓解等功能; 然后通过仿真得到的以 150 辆车编组列车为主的不同位置的气压曲线, 与现场试验的制动气压曲线进行对比, 发现 500 kPa 制动气

而列车制动风管的等效容积为

$$V = \frac{\pi D_1^2}{4} N L_1 + \frac{\pi D_2^2}{4} N L_2 \quad (6)$$

式中:

D_1 ——制动风管主管的直径;

D_2 ——制动风管支管的直径;

N ——车辆编组数;

L_1 ——制动风管主管的长度;

L_2 ——制动风管支管的长度。

制动风管的气压从 0 kPa 充气到定压的过程中, 气体的流速主要包含 2 个阶段, 因此制动风管的充气气压也包含 2 个阶段, 从而得出制动风管的充气基本控制模型为

压时间曲线偏差范围在 $-5 \sim 5$ kPa, 满足制动试验控制精度要求。

3.2 试验验证

本文主要针对基于车辆滚动制动试验台的动态制动试验仿真装置对列车中的第 1 辆车进行了仿真测试, 并将所得数据与实际试验数据进行对比, 得出的试验结果如图 8、图 9 所示。

从图 8、图 9 这两组曲线可以看出, 动态制动试验仿真装置对列车制动的仿真控制曲线与试验曲线几乎是重合的, 曲线的浮动在规定范围内, 说明仿真控制曲线是符合要求的。

由此可以看出, 动态制动仿真试验装置可以实现对列车的头车在制动时进行控制, 同时通过接口将这一装置与车辆制动模拟试验装置相连接, 便可以实现对第 1 辆车和连续第 2 辆车以及后续各辆车制动控制的全过程, 同时第 1 辆车列车制动风管尾

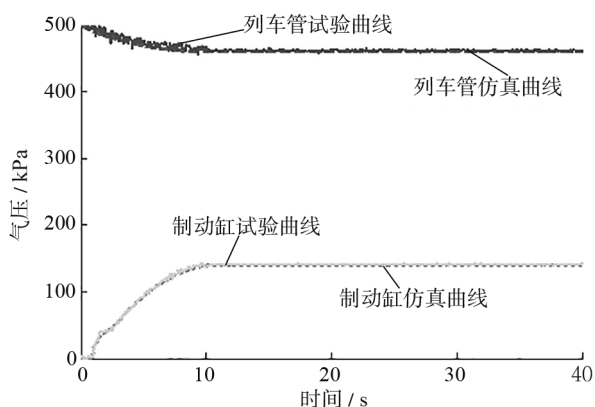


图8 150辆编组列车第1辆车制动过程的气压-时间曲线

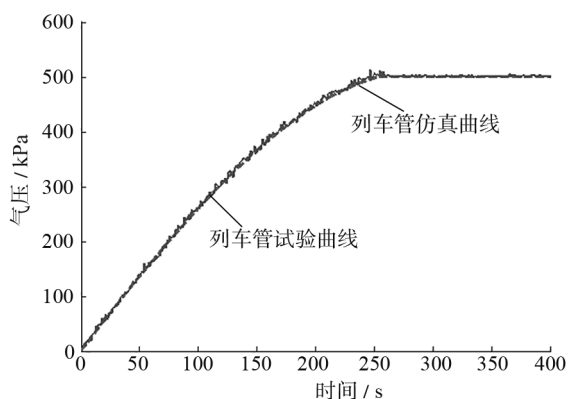


图9 150辆编组列车第1辆车缓解过程的气压-时间曲线

端的气压作为下一辆车列车制动风管初始充气的初气压,由此可以循环试验,得出不同编组的列车在不同位置车辆的制动控制全过程。

4 结语

为保证长大货物列车制动时的安全性与稳定

性,需要对不同车辆编组列车的制动过程进行试验,并对所得各种性能曲线进行推导,从而得出各个车辆较为准确的实际制动动态效果,为评估不同编组列车制动时的纵向动力学性能提供依据。因此,本文提出了基于车辆滚动制动试验台的货物列车动态制动试验仿真装置,其主要作用有:①可以在滚动制动试验台上实现任意编组中任意辆车的实际制动,通过模型和制动试验得出不同车辆的制动变化曲线;②通过滚动台和模拟制动惯量,将原来静止制动转化为动态制动过程,以真实考察不同编组车辆在不同制动条件下的制动过程,为分析长大编组货物列车各个车辆相互之间的纵向动力作用,提供了试验手段。

通过仿真与试验手段,对二者的结果进行比较,可得出该仿真试验装置使用的可行性,可以用于测试长大货物列车的制动性能,从而确保列车在制动过程中的安全性与稳定性。

参考文献

- [1] 王凤洲,李培署,李国平.长大货物列车制动控制方案探讨[J].铁道车辆,2014(10):31.
- [2] 刘新,曹志礼,李立东,等.铁路货车滚动制动试验台的研制[J].铁道车辆,2017(11):17.
- [3] 张波.重载组合列车牵引及制动系统的试验与仿真研究[D].北京:中国铁道科学研究院,2009.
- [4] 张旺狮.车辆制动装置[M].北京:中国铁道出版社,2007:152.
- [5] 应之丁,高伟航,顾灵燕.基于气动系统流体方程的货车制动性能分析[J].铁道学报,2017(11):59.
- [6] 杨丽红.容器放气过程的数值模拟及热力学模型研究[D].上海:上海交通大学,2007:6.

(收稿日期:2019-05-08)

(上接第25页)

参考文献

- [1] 彭丰.半独立路权条件下现代有轨电车交叉口信号控制仿真优化研究[D].北京:北京交通大学,2015.
- [2] 王舒祺.现代有轨电车交叉路口优先控制管理方法研究综述[J].城市轨道交通研究,2014(6):17.
- [3] ALEXANDER Skabardonis. Control Strategies for Transit Priority[DB/CD]. Washington DC:TRB,National Research Council, 2000.

- [4] 李凯,毛励良,张会,等.现代有轨电车交叉口信号配时方案研究[J].都市轨道交通,2013(2):104.
- [5] 马万经.公交专用道信号优先控制理论研究[D].上海:同济大学,2007.
- [6] 宁乐然.道路交通安全通论[M].北京:中国人民公安大学出版社,2006.
- [7] 上海市规划和国土资源管理局.上海市街道设计导则[M].上海:同济大学出版社,2016:54-55.

(收稿日期:2020-02-12)