

城市轨道交通车辆基本阻力试验研究

吴安伟

(郑州地铁集团有限公司运营分公司, 450000, 郑州//高级工程师)

摘要 对目前城市轨道交通列车单位基本阻力计算公式的应用现状进行了分析,提出了一种在运营线路上不增加设备即可进行列车单位基本阻力试验的方法。该方法可为城市轨道交通运营部门测定列车单位基本阻力提供参考,也为规范国内城市轨道交通列车单位基本阻力计算公式的使用提供了可能。

关键词 城市轨道交通车辆; 单位基本阻力; 最小二乘法

中图分类号 U260.13⁺1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.09.032

Research on the Basic Resistance Test of Urban Rail Transit Vehicle

WU Anwei

Abstract The current application situation of urban rail transit train unit basic resistance calculation formula is analyzed, a new method for carrying out unit basic resistance test of train unit on operation routes without additional instruments is put forward. The method can provide reference for measuring and determining the vehicle unit basic resistance for urban rail transit operation departments, and the possibility of standardizing the utilization of urban rail transit vehicle unit basic resistance formula in China.

Key words surban rail transit vehicle; unit basic resistance; least squares method

Author's address Operating Branch of Zhengzhou Metro Group Co., Ltd., 450000, Zhengzhou, China

轨道交通车辆的运行,在牵引工况下,本质是动力车提供的牵引力平衡列车阻力,并提供一定剩余牵引力确保列车获得期望的加速能力。在制动工况下,列车运行的本质是列车提供制动力和列车阻力共同提供减速力,确保列车获得期望的减速能力。因此,列车阻力在列车运行过程中具有重要作用。列车阻力分为基本阻力和附加阻力。基本阻力是由列车零部件运动中的阻力、列车运行空气阻力、轮轨间相互作用产生的阻力等构成;附加阻力主要包括坡道附加阻力、曲线附加阻力和隧道附加

阻力等。

由于基本阻力非常重要,因此,我国干线铁路机车车辆动车组每种新车型都会进行阻力试验,测定机车车辆的基本阻力,供设计院、铁路局等单位在进行牵引计算时使用。

在城市轨道交通(以下简称“城轨”)领域,虽然列车的阻力非常重要,但是城轨车辆速度一般较低,基本阻力相对于附加阻力、列车牵引力较小,基本阻力带来的计算误差不会影响计算结果。因此,对于列车阻力没有引起足够的重视,没有试验标准,也没有归口管理部门。

1 列车基本阻力公式

目前在国内城市轨道交通领域,列车基本阻力公式主要有如下3个来源:来自牵引供应商的经验公式,当新项目选中牵引供应商时,按照牵引供应商的经验公式进行计算^[1];来自机车车辆检验站在环行试验线的试验结果,由于城轨领域新车型不强求委托第三方进行全套型式试验,因此,这个来源较少;来自一些大学和研究机构进行的试验研究,如西南交通大学在广州和杭州进行的试验研究^[2]。

一些典型的列车单位基本阻力计算公式如下:

$$\omega_0 = 1.73 + 0.0071v + 0.000405v^2 \quad (1)$$

$$\omega_0 = 2.09 + 0.0393v + 0.000675v^2 \quad (2)$$

$$\omega_0 = 0.95 + 0.00473v + 0.000744v^2 \quad (3)$$

$$\omega_0 = 0.74 + 0.00139v + 0.00086v^2 \quad (4)$$

式中:

ω_0 ——列车单位基本阻力, N/kN;

v ——列车运行速度, km/h。

式(1)为庞巴迪公司的单位基本阻力公式,式(2)为三菱公司的单位基本阻力公式,式(3)为广州地铁5号线单位基本阻力公式,式(4)为杭州地铁1号线单位基本阻力公式。用以上4个单位基本阻力公式计算各速度下列车单位基本阻力如图1所示。

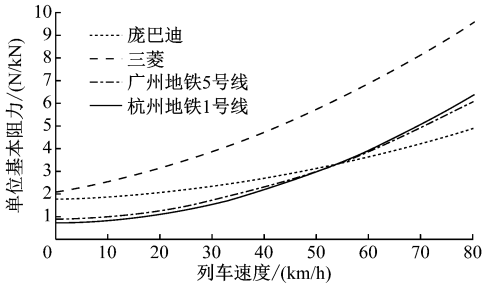


图1 不同运行速度下的列车单位基本阻力

通过式(1)~(4)和图1可以看出,各个公式求出的单位基本阻力差别较大,尤其是每个公式的二次项系数差别较大,这意味着速度越高,同一速度下用不同公式计算出的列车单位基本阻力差别就越大。将以上4个公式的列车运行速度分别外延至100 km/h和120 km/h,列车单位基本阻力见表1。

表1 不同高速段列车单位基本阻力

公式	单位基本阻力/(N/kN)		
	80 km/h	100 km/h	120 km/h
庞巴迪	4.89	6.49	8.41
三菱	9.55	12.77	16.53
广州地铁5号线	6.09	8.86	12.23
杭州地铁1号线	6.36	9.48	13.29

通过表1可以看出,采用不同的单位基本阻力公式,计算出的阻力值差别较大,如果阻力公式选用不当,直接会影响列车的各项控制性能。随着城轨车辆的速度等级越来越高,控制精度要求越来越高,因此,选择相对准确的列车基本阻力计算公式显得尤为重要。

通过试验确定城市轨道交通车辆基本阻力是解决目前基本阻力应用混乱的有效方法。但由于受到各种条件的限制,现阶段不可能将每种新车都拉到环形试验基地进行阻力测试。可行的方案是在实际运营线路上通过车载设备进行列车单位基本阻力试验。本文介绍的列车单位基本阻力试验方法基于溜放法,并根据运营现场条件进行了改进。

2 试验原理

构成列车基本阻力的因素有很多,而且很多因素不能用定量的理论公式来计算。但是,根据阻力产生的机理并结合大量试验表明,对于固定编组的列车,可以通过关于速度的一元二次多项式来近似描述列车的基本阻力^[3-4]:

$$\omega_0 = a + bv + cv^2 \tag{5}$$

式中:
 $a、b、c$ ——与列车相关的经验常数。
试验的任务主要是通过大量的试验数据,求出每个速度下的列车单位基本阻力,通过最小二乘法确定 $a、b、c$ 3个系数。

列车单位基本阻力一般通过溜放法来实现,溜放法基于以下假设:列车运动可以看作单质点运动;列车运行在平直道上;平直道的长度足够满足列车从最高速度惰行到停车;采样时间足够短,可以用单位时间内的速度差替代减速度;试验在无风的条件下进行。

在此假设条件下,列车牵引到最高试验速度,进入惰行状态,列车基本阻力提供了列车减速度,运动方程如下:

$$\omega = \frac{1\,000(1 + \gamma)}{3.6 \times 9.81} \times \frac{dv}{dt} \tag{6}$$

式中:
 γ ——回转质量系数,取0.08;
 ω ——单位惰行基本阻力,N/kN;
 dv/dt ——列车减速度,km/(h·s)。
根据式(6),只需要测量每个速度下的列车减速度,即可得到每个速度下的列车单位基本阻力。进而对每个速度下的列车单位基本阻力利用最小二乘法进行拟合,确定式(5)中的系数 $a、b、c$ 即可得到列车的单位基本阻力计算公式。

3 试验方法

铁路动车组的基本阻力试验一般在环形试验线上进行,或者在正线的长大平直道上进行。但是,在城市轨道交通线路上很难找到长大平直道,因此,必须对溜放法进行调整,具体方法如下:

确定采样速度点。为确保试验精度,2个采样点之间的间隔应小于5 km/h,比如可以选择5、10、15、…、75、80 km/h。

确定试验区间。试验区间最好选择在隧道内长大平直道,如果实在没有平直道,也可以选择坡度不大于5‰的单一坡度坡道,在车辆段的试车线上进行。郑州地铁1号线车辆段试车线有总长1 300 m平直道,非常适合进行列车单位基本阻力试验。试验区间确定好之后,在试验区间的两端树立标志杆。

列车以高于试验速度2 km/h的速度进入试验

区间后,司机控制器手柄回零位,列车开始惰行,记录列车惰行时间和速度,列车通过试验区段后停止记录。

每次试验得到一个时间和速度系列,截取试验速度前后 0.5 km/h 的数据序列。例如,如果测量 75 km/h 时列车基本阻力,所取数据的速度区间为 75.5 ~ 74.5 km/h,对速度值进行线性回归,得到该速度下的减速度值,从而得到该速度下的列车单位基本阻力。

利用 5、10、15、…、75、80 km/h 速度下的列车单位基本阻力,通过最小二乘法进行二次多项式拟合,即可得到列车的单位基本阻力计算公式。

4 试验区段选择和试验设备

在通过溜放法进行阻力试验时,最理想的试验线路是长大平直道,但是实际线路上长大平直道很难找到。考虑到列车坡道附加单位阻力基本就是坡度值,很容易处理。因此,实际的试验线路可以选择在坡度较小的单一坡度直线段进行。在试验区段长度的选择方面,考虑列车的长度和列车惰行 1 km/h 的距离,一般 6 节编组 B 型车的长度约为 120 m,按照式(4)计算出的各测点惰行 1 km/h 的惰行距离如表 2 所示。

表 2 各速度测试点的惰行距离

速度/(km/h)	惰行距离/m	速度/(km/h)	惰行距离/m
5	51	45	138
10	93	50	132
15	123	55	126
20	140	60	120
25	149	65	114
30	150	70	108
35	148	75	103
40	144	80	98

从表 2 可以看出,惰行有效距离超过 150 m,考虑列车长度,因此,试验区段的长度应该大于 390 m。在实际线路上,相对容易找到坡道低于 5‰、长度超过 390 m 的线路。

试验中所需要记录的数据只有时间和速度,列车上信号、牵引、制动等子系统都有相关的传感器和数据采集设备,也可以通过 PTU(测试维护终端)进行数据记录,而不用专门为试验增加设备。考虑到信号系统采用的速度传感器一般安装在拖车上,

而且测速精度一般要高于牵引系统和制动系统,因此,建议采用信号系统的数据。当然,也可以使用制动或牵引系统的数据,但是无论采用哪个系统的数据,试验之前一定要对安装速度传感器的车轮轮径进行标定。

5 试验数据处理

实验结束后,可以得到列车各个测试速度点在试验区段的惰行时间和惰行速度。以 75 km/h 测试速度为例,截取列车惰行过程中 75.5 ~ 74.5 km/h 的数据进行线性回归,如图 2 所示。

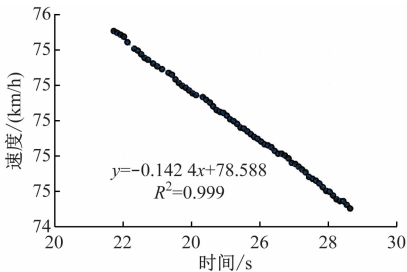


图 2 75 km/h 列车惰行减速度线性回归结果

由图 2 可以看出,75 km/h 下的惰行减速度为 0.142 4 km/(h · s),结果的置信度 R^2 达到 0.999,说明这种近似处理是合理的。根据式(6)可以得到该速度下的列车单位基本阻力为 4.35 N/kN。

用同样的方法得到 5、10、15、…、70 km/h 速度下的列车单位基本阻力,如表 3 所示。通过对表 3 的数据进行拟合,得到列车单位基本阻力公式,如

表 3 列车惰行减速度和单位基本阻力

速度/(km/h)	减速度/(km ² /(h · s))	单位基本阻力/(N/kN)
75	0.142 4	4.35
70	0.140 6	4.30
65	0.118 2	3.61
60	0.097 8	2.99
55	0.092 4	2.83
50	0.083 1	2.54
45	0.081 3	2.49
40	0.073 7	2.25
35	0.062 8	1.92
30	0.053 4	1.63
25	0.052 9	1.62
20	0.052 4	1.60
15	0.033 8	1.03
10	0.027 8	0.85

(下转第 174 页)

-19 mm,解冻期间隧道沉降变形基本维持稳定,注浆结束2个月后隧道沉降趋于稳定,目前区间隧道地铁运营正常。快融注浆期间隧道沉降变化如图7所示。

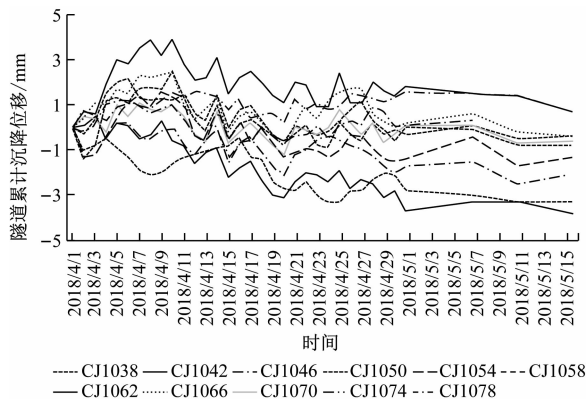


图7 隧道沉降曲线

5 结语

1) 快速解冻采用双盐水箱设置,先用低温盐水循环,并逐步加热到30℃的热盐水循环0.5 h后,再转换至加热到70℃的盐水箱进行循环解冻,可有效地控制断管风险,整个盐水加热解冻期间没有出现断管的现象。

2) 加强监测并及时注浆是有效控制隧道及地面沉降的保证,根据隧道、地面、管线以及建筑物的沉降和解冻温度场的监测,实时掌握解冻发展情况,调整注浆量和注浆时间间隔,保证冻土融化空间的及时填充,从而减小隧道和地面沉降。

3) 快速解冻不需要拔出冻结管安装注浆花管,可在拆除冻结站后组织实施,既减少了用电量,也避免了拔出冻结管的施工风险。

4) 合理分区,跳孔连接分组,适时循环热盐水快速解冻,并采取合理的注浆参数(注浆压力、注浆量、流量等)及时注浆,这是保证注浆质量控制隧道及地面沉降稳定的关键。

参考文献

- [1] 马俊,杨平.常州砂性地层联络通道解冻规律研究[J].地下空间与工程学报,2019(1):167.
- [2] 岳丰田,张水宾,仇培云.地铁联络通道冻结加固技术研究[J].地下空间与工程学报,2006(8):1341.
- [3] 肖朝昀,胡向东.人工地层冻结冻土自然解冻与强制解冻实测分析[J].长江大学学报(自然科学版),2009(3):93.
- [4] 周真云.冻结法施工强制解冻研究及施工实践[J].西部探矿工程,2003(10):84.
- [5] 陈成,杨平,张婷.高承压富含水层人工强制解冻温度场数值分析[J].郑州大学学报(工学版),2012(2):81.
- [6] 赵飞,胡向东.耦合效应下联络通道解冻规律[J].同济大学学报(自然科学版),2013(41):989.
- [7] 陈文豹,徐光济.建井工程手册[M].北京:煤炭工业出版社,1985:122-123.
- [8] 李增理,王伟.运营期地铁联络通道融沉注浆治理技术[J].隧道建设,2017(8):1032.
- [9] 刘计寒,齐家根.井筒强制解冻与冻结管射孔注浆施工技术[J].矿业工程,2012(3):62.
- [10] 吴繁,杨平,万朝栋.基于实测解冻温度的联络通道冻结法融沉注浆优化研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2017(4):167.

(收稿日期:2020-01-29)

(上接第143页)

图3所示。由于受到列车限速影响,本次试验最高速度为78 km/h。

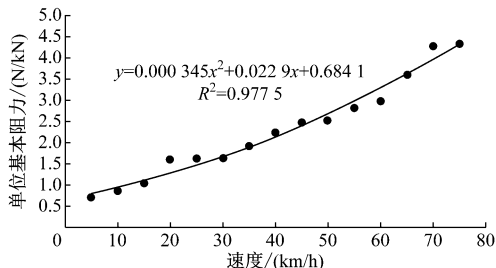


图3 列车单位基本阻力拟合结果

6 结语

列车基本阻力是列车的重要参数,但是在城轨领域长期得不到应有的重视。本文介绍在运营线

路上试验测定列车单位基本阻力公式的方法,不需要在列车安装额外试验设备,对试验线路要求较低,具有较高推广价值。

参考文献

- [1] 杨奇.城市轨道交通车辆起动牵引力选择研究[J].通信电源技术,2012(6):16.
- [2] 严修法,林建辉.直线电机驱动地铁车辆运行阻力试验研究[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2014(3):387.
- [3] 刘炜.城市轨道交通列车运行过程优化及牵引供电系统动态仿真[D].成都:西南交通大学,2009.
- [4] 徐纪康.城市轨道交通列车运行过程仿真研究[D].上海:同济大学,2008.

(收稿日期:2020-04-20)