

# 基于全球定位系统测速的城市轨道交通 列车运行阻力研究

张 皓 刘 杰 周和超

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

**摘 要** 为了测定城市轨道交通列车的运行阻力特性,利用 GPS(全球定位系统)测速测距方法,对列车进行运行阻力试验,得出该列车的单位基本运行阻力公式及运行阻力大小。通过能耗计算,验证了利用 GPS 信号进行列车运行阻力特性测试方法的有效性。与近年国内其他同类型列车的单位基本运行阻力对比,该列车具有较好的运行特性。

**关键词** 城市轨道交通列车;运行阻力;全球定位系统;能耗计算

**中图分类号** U284.48+1

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2019.05.032

## Running Resistance of Urban Rail Transit Train Based on GPS Velocity Measurement

ZHANG Hao, LIU Jie, ZHOU Hechao

**Abstract** Urban rail transit section in a city is normally a 6 marshalling vehicles in total, consisting of 4 trailers and 2 motor cars. GPS (global positioning system) velocity and ranging method is used to measure the train running resistance characteristics, the unit base train running resistance formula and the resistance data are obtained. Through energy consumption calculation, the availability of rail transit adopts GPS signal for running resistance measurement is verified. Compared with the base train running resistance of the same type vehicles in other Chinese cities, the rail transit vehicle adopts GPS system has better operational performance.

**Key words** urban rail transit train; running resistance; global positioning system(GPS); energy consumption calculation

**Author's address** Institute of Railway and Urban Rail Transit, Tongji University, 201804, Shanghai, China

城市轨道交通列车的运行阻力特性直接关系到运行能耗以及列车自身进一步的优化和设备改进,对于运行图的制定也具有参考意义。文献[1]利用目前运行阻力试验的主要方法——测算惰行时的车轮转速,计算出车辆惰行的速度,从而得到相关的数据进行单位基本运行阻力的求取。这种

方法存在较大的误差:在车轮上安装的传感器与车轮圆心不能完全重合会带来误差,轮径不一致也会产生误差,且设备安装较复杂。与上述方法相比,利用 GPS(全球定位系统)测试方法获取相关数据,误差小且设备易于安装。GPS 测速方法虽然具有较高的准确性,但仍然存在一些可能的误差。为此,本文对列车进行基于 GPS 测速的运行阻力试验,并与同类型列车对比分析,以评价该列车的运行阻力特性。

## 1 试验概况

### 1.1 试验条件

试验在指定的线路上进行。试验线路平直且无坡道,总长为 1.6 km,并在试验前已完成线路的安全检查。试验在气候干燥且天气状况良好的条件下进行<sup>[2-3]</sup>。试验列车为 4 拖 2 动 6 节编组的地铁车辆,试验时的载荷为 AW0(空载)工况。按照测试标准要求,该列车的运行速度范围为 0~79 km/h。列车相关参数见表 1。

表 1 试验列车相关参数

参数	参数值	参数	参数值
拖车长度/m	19.50	拖车质量/kg	≤32 500
动车长度/m	19.44	动车质量/kg	≤35 000
列车长度/m	116.76	列车空载质量/t	≤232.92
轨顶至车顶高度/mm	≤3 800	设计结构速度/(km/h)	≥100
计算黏着系数	≤0.165	平均起动加速度/(m/s <sup>2</sup> )	1

### 1.2 试验过程

#### 1.2.1 试验方法

按照速度表的要求,试验列车速度提高至大于等于规定的惰行开始速度  $v_0$ ,第一次试验的惰行开始速度为 10 km/h,下一次试验的惰行开始速度在上一次试验的基础上提高 5 km/h,以此类推,直至达到最高的惰行开始速度 79 km/h。在提速过程开

始时记录数据,速度达到要求后,车辆开始惰行,惰行区间总长 400 m;驶出惰行区间之后,以常用制动的方式使列车制动到速度为 0,此时停止记录数据。司机室换钥匙,原先的车尾成为车头,按照上述反向重复操作 2 次并记录数据,即每个不同的惰行开始速度需要按照要求进行 3 次完整的试验,记录 3 组数据。

利用基于 LABVIEW 软件编写的测试软件实时记录 GPS 测速装置获得的初始速度数据,并用软件拓展的计算功能通过积分导出位移曲线。用采样分析的方法(采样频率为 10 Hz)和回归算法对数据进行计算:利用采样点回归计算出速度变化曲线,得出曲线变化率特征,从而计算出该点处加速度及阻力的大小;利用回归算法数字特征评价计算结果。在计算时主要以 MATLAB 软件为计算工具。

### 1.2.2 数据采集

数据来自 GPS 测速仪。选用的 GPS 测速仪型号为 HR-GPS-10(RL)GPS,经过专用的信号调制器和测试软件实时地记录于计算机中。文件以函数图像的形式保存,并可以转换成数据表格的形式。

## 2 试验数据分析

### 2.1 试验数据处理方法

根据试验方法计算出试验列车惰行时的加速度  $a_i$ ,再将加速度数据转化为单位基本运行阻力  $\omega_{0i}$ <sup>[4]</sup>。每一组  $a_i, \omega_{0i}$  所对应的横坐标  $v_i$  为该组速度值的中位数。

$$\omega_{0i} = \frac{1\,000(1 + \gamma)}{9.81} \times a_i - (\omega_i - \omega_r) \quad (1)$$

$$\omega_i = i \quad (2)$$

$$\omega_r = 600/R \quad (3)$$

式中:

$\gamma$ ——回转质量系数,取为 0.11;

$\omega_i$ ——单位坡道附加阻力, N/kN;

$\omega_r$ ——单位曲线附加阻力, N/kN;

$i$ ——坡道坡度,上坡时取正值,下坡时取负值;

$R$ ——线路圆曲线半径, m。

在平直无坡道线路的试验条件下,  $i$  和  $R$  均为 0,故  $\omega_i$  和  $\omega_r$  也为 0。

利用这一系列的数据绘制出以速度为自变量、单位基本运行阻力为因变量的函数图像;再次利用最小二乘法归纳出单位基本运行阻力随速度变化的阻力公式。

### 2.2 试验数据分析

按照上述方法对试验所得的数据进行分析,先后得到各速度值对应的惰行加速度和单位运行阻力,其部分结果如表 2 所示。

表 2 列车试验数据分析

速度/ (km/h)	惰行加 速度/ ( $10^{-3}\text{m/s}^2$ )	单位运行 阻力/ (N/kN)	速度/ (km/h)	惰行加 速度/ ( $10^{-3}\text{m/s}^2$ )	单位运行 阻力/ (N/kN)
5.56	6.19	0.694 6	47.78	20.03	2.245 7
7.22	6.83	0.766 2	47.78	24.89	2.790 8
8.15	7.94	0.890 8	47.97	25.64	2.874 9
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
45.37	22.25	2.494 9	76.78	42.42	4.756 2
46.11	22.00	2.466 9	77.97	42.33	4.746 9
46.67	21.50	2.410 8	78.52	44.53	4.992 9

根据求得的全部数据,绘出对应的散点图。基于该散点图,利用最小二乘法拟合出所对应的单位基本运行阻力曲线,并归纳出对应的单位基本运行阻力公式,见式(4)。散点图与基本运行阻力曲线如图 1 所示。

$$\omega_0 = 0.570\,4 + 0.022\,66\,v + 0.000\,412\,v^2 \quad (4)$$

式中:

$v$ ——列车运行速度, km/h。

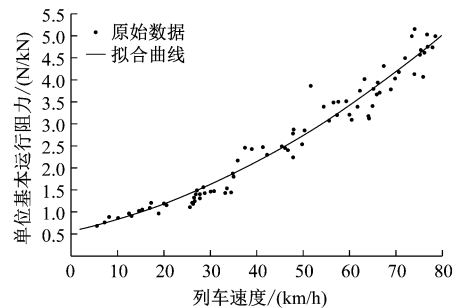


图 1 列车速度-运行阻力曲线

### 2.3 有效性验证

为了验证式(4)的有效性,利用该式和列车相关参数计算出某工况列车的理论能耗值,然后将计算结果与实际能耗值相对比,从而对式(4)的有效性进行初步验证。

根据能耗测试,该列车从 30 km/h 加速到 79 km/h 共消耗 14.90 kW · h 的能量。地铁列车电气功率可用下式来计算:

$$P = Fv/\eta = (f_1 + ma)v/\eta \quad (5)$$

式中:

$P$ ——需要求取的电气功率;

$F$ ——轮周牵引力;

$v$ ——列车运行速度;

$\eta$ ——列车牵引系统总效率;

$f_1$ ——列车的合成阻力(包括基本运行阻力 $f_0$ 、曲线、坡道等附加阻力);

$m$ ——列车总质量(包括回转质量);

$a$ ——列车运行时的加速度。

对式(5)积分,得出某区间内列车消耗的总能量表达式:

$$E = (f_0 S + mg\Delta h + 0.5m_0 v^2)/\eta \quad (6)$$

式中:

$E$ ——需要求取的总能耗, kW · h;

$S$ ——列车行驶距离, m;

$\Delta h$ ——列车高度增量(此处为0);

$m_0$ ——列车静态质量, kg。

对于同类型的4拖2动上海轨道交通11号线列车,文献[5]通过仿真和试验发现,当列车速度 > 30 km/h 时  $\eta$  保持在 80% ~ 90% 之间。为了方便  $\eta$  的取值,选择该列车从 30 km/h 加速到 79 km/h 的工况进行计算,此处  $\eta$  取 0.85。由 1.1 试验条件可知,该列车牵引加速度为  $1 \text{ m/s}^2$ , 则  $v = t + 8.33$ ,  $S = 0.5t^2$ ,  $f_0 = m_0\omega_0$ , 而  $t$  的变化范围为  $[0, 13.61]$ , 故可用下式计算总能耗:

$$E = \left( \int_0^{13.61} 0.5m_0\omega_0 t^2 dt + 0.5m_0 v_{\max}^2 - 0.5m_0 v_{\min}^2 \right) / \eta \quad (7)$$

式中:

$\omega_0$ ——列车单位基本运行阻力;

$t$ ——列车加速过程的时间, s;

$v_{\max}$ ——列车加速过程中的最大速度, m/s;

$v_{\min}$ ——列车加速过程中的最小速度, m/s。

将式(7)代入数值,求得总能耗为 14.47 kW · h, 与实际消耗的能量相当,故可知利用该单位基本运行阻力公式推算列车能耗的结果正确,因而从能耗角度验证了 GPS 测试方法的有效性。

## 2.4 误差分析

试验结果的误差来源主要有两个:一是数据处理方法产生的误差,二是试验数据测量误差。

首先对回归分析的结果进行评价,列出归纳公式(4)的拟合优度(Goodness of fit)<sup>[7]</sup>。相关参数如下:离差平方和(SSE)为 6.623;确定系数(R-square)为 0.9525;均方根误差(RMSE)为 0.2933;置信度  $R^2 = 0.9741$ 。可以认为,以最小二乘法为基础的数据处理方法所产生的误差小,拟合优度高。

综上可知,试验推导出的单位运行基本阻力公式准确。

相比于通过测量车轮转速来推算记录列车速度的传统方法,利用 GPS 测速方法有效克服了传感器无法准确定位车轮正中心所产生的误差,以及轮径不一致带来的误差。尽管所选用的 GPS 测速仪器在精度上可靠<sup>[6]</sup>,但误差依然存在,误差来源可以概括为以下3个:

(1)GPS 测速仪受到卫星信号强度变化的影响,少量数据失真,影响结果准确性;

(2)尽管在列车各节车厢中多处布点取均值,但列车的纵向振动仍会带来误差;

(3)在试验前对于 GPS 设备进行了时间调零,但随着试验推移,设备间可能存在较小的不同步现象。

## 3 试验结果对比

为了方便进一步评价该列车的运行阻力特性,将试验结果与近几年同类型列车的运行阻力特性进行对比。选取的比较对象为同类型的广州地铁5号线列车<sup>[1]</sup>和杭州地铁1号线列车<sup>[8]</sup>。

广州地铁5号线列车的单位基本运行阻力计算公式为<sup>[1]</sup>:

$$\omega_{0\alpha} = 0.9542 + 0.004734v + 0.0007436v^2 \quad (8)$$

杭州地铁1号线列车的单位基本运行阻力计算公式为<sup>[8]</sup>:

$$\omega_{0\beta} = 0.7377 + 0.02266v + 0.0008599v^2 \quad (9)$$

从图2可以看出,无论是车辆运行在低速还是高速,本试验列车的单位基本运行阻力在数值上都要比另外两个小,在高速运行的情况下,差距更为

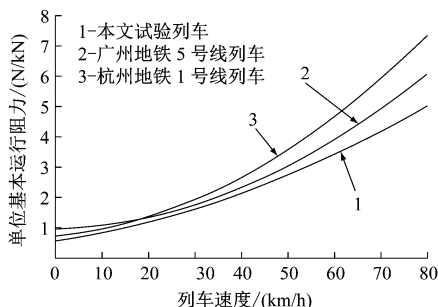


图2 三城市列车的单位基本运行阻力比较图

(下转第154页)

流泄漏量计算范围从传统的局部区域扩大到列车整个运行区间,为评价列车运行区间内总体的杂散电流腐蚀危险性提供了一种参考。

(2) 该计算方法不依赖于回流系统复杂的实时电压、电流参数,容易实现杂散电流泄漏量的计算。并且,在地铁系统现有配置的条件下,无需额外的检测传输等设备就可实现对列车运行区间内杂散电流泄漏量的检测。

(3) 仿真结果表明,当采样周期小于 0.5 s 时,  $I_s$  的计算结果稳定,能够较好地反映出运行区间内杂散电流泄漏情况。

## 参考文献

- [1] BERTOLININ L, CARSANA M, PEDEFERRI P. Corrosion behaviour of steel in concrete in the presence of stray current [J]. Corrosion Science. 2007, 49:1056.
- [2] Railway applications-fixed installations - electrical safety, earthing and the return circuit - Part 2: provisions against the effects of stray currents caused by d. c. traction systems BS EN 50122-2:2010[S].

- [3] 李威. 应用于地铁杂散电流腐蚀测量的硫酸铜电极实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(1):61.
- [4] KEITH Griffiths. Stray Current Control-An Application of Ohm's Law[J]. EMC in Railways, 2006:83.
- [5] 李威,王爱兵,王禹桥. 地铁杂散电流腐蚀的模糊综合评价方法研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2007, 03:221.
- [6] DAROWICKI K, ZAKOWSKI K. A New Time-Frequency Detection Method of Stray Current Field Interference on Metal Structures[J]. Corrosion Science, 2004, 46:1061.
- [7] 石红国,彭其渊,郭寒英. 城市轨道交通牵引计算模型[J]. 交通运输工程学报, 2005, 04:20.
- [8] CUI G, LI Z L, YANG C, et al. The influence of DC stray current on pipeline corrosion[J]. Petroleum Science, 2015, 13(1):1.
- [9] 韦莉,张逸成,达世鹏,等. 城市轨道交通牵引系统仿真技术研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, v. 3908:1161.
- [10] XU S Y, LI W, XING F F, et al. Novel predictive model for metallic structure corrosion status in presence of stray current in DC mass transit systems[J]. Journal of Central South University, 2014(3).

(收稿日期:2017-10-27)

(上接第 149 页)

明显。从变化率的角度来看,本试验列车阻力值的变化更为平缓,对列车牵引系统的冲击更小。综合以上两点,本试验列车表现出良好的运行特性。

## 4 结论

(1) 通过误差分析与能耗计算,验证了 GPS 测速方法用于列车运行阻力测定的有效性。利用成熟的统计学方法,更为精确地得出了列车的单位基本运行阻力公式;同时,利用多个测速装置同时测速、取均值的做法,有效减小了列车运行时纵向振动所带来的测量误差。但该误差并未完全消除。如何方便有效地消除该误差仍然需要作进一步探索。总体上,利用 GPS 测速方法使得测算准确,同时也减小了试验的工作量。

(2) 通过对比分析某城市轨道交通列车与同类型其他列车的运行阻力特性,发现被测列车的单位基本运行阻力较同类列车小,运行阻力随速度的变化也较为平缓,故该列车表现出良好的运行特性,能够有效降低能耗,便于牵引动力基本参数的选择

与配置。

## 参考文献

- [1] 袁修法,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.
- [2] 国际电气协会. 车辆组装和运行前的整车试验: IEC 61133-2006[S]. 北京:中国标准出版社, 2006:46.
- [3] 中国国家标准化管理委员会. 城市轨道交通车辆组装后的检查与试验规则: GB/T 14894—2005[S]. 北京:建设部标准定额研究所, 2005.
- [4] 中华人民共和国铁道部. 列车牵引计算规程: TB/T 1407—1998[S]. 北京:中国标准出版社, 1998.
- [5] 李济棋. 上海地铁 11 号线列车牵引能耗分析[J]. 机电一体化, 2013(6): 32.
- [6] 杨龙. GPS 测速研究及应用[D]. 青岛:国家海洋局第一海洋研究所, 2007.
- [7] SAMPRIT S A S H, BERTRAM P. 例解回归分析[M]. 郑明等,译. 北京:中国统计出版社, 2004.
- [8] 谢振国. 杭州地铁 1 号线车辆编组的探讨[J]. 机车电传动, 2004(3):13.

(收稿日期:2017-09-01)