

# 列车交会空气压力波测量的影响因素

梁习锋, 陈燕荣

(中南大学 高速列车研究中心, 湖南 长沙, 410075)

**摘要:** 研究了连接动态压力传感器的信号线长度、放大器的滤波频率和数据采集系统的采样频率对空气压力波测量的影响。研究表明, 当传感器信号线长度小于 100 m 时, 对传感器输出的动态信号影响不大于 1%, 满足列车交会空气压力波实车测量要求; 放大器的滤波频率和数采系统采样频率对空气压力波的测试结果均有较大影响, 应采用带低通的应变放大器, 滤波频率以 100 Hz 为宜; 随着采样频率的增加, 测量得到的空气压力波幅值增大, 采样频率增加到 1 kHz 后, 测量结果趋于稳定。在列车交会空气压力波实车测试中, 为保证测试的准确性, 节省设备内存空间, 采样频率取 1 kHz 较合适。

**关键词:** 实车试验; 空气压力测量; 交会空气压力波

中图分类号: U 270.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2004)05-0810-05

## Influential Factors of Measuring Air Pressure Pulse Produced by Passing Trains

LIANG Xi-feng, CHEN Yan-rong

(High Speed Train Research Centre, Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** The effects of the signal line length, the filter and the sampling frequencies on measuring air pressure pulse were studied in this paper. The results show that when the signal line length of sensor is less than 100 m, its influence on sensor dynamic signal will be less than 1%. It meets the real train test requirement of measuring crossing air pressure pulse. The filter and the sampling frequencies have evident influence on the results of measuring air pressure pulse, so the strain gauge magnifier with the low-pass, and whose filter frequency 100 Hz is supposed to be adopted for measuring crossing air pressure pulse of real train test. It also shows that the measured magnitude of air pressure pulse increases with increasing the sampling frequency until the sampling frequency reaches 1 kHz. In order to reach the factuality of the wave shape and save memory the sampling frequency should be set at 1 kHz.

**Key words:** real train test; air pressure measurement; crossing air pressure pulse

列车交会空气压力波对列车运行安全及旅客舒适度有重要影响, 国外发达国家采用实车试验<sup>[1-3]</sup>、模拟试验<sup>[4]</sup>和数值计算<sup>[5-7]</sup>的方法对高速列车进行研究, 提出了一系列减缓列车交会空气压力波的措施<sup>[8-11]</sup>。在线实车空气动力学性能试验是研究列车空气动力学的重要手段, 其结果能真实反映列车运行

时的空气动力性能, 可为检验其他模拟试验及数值模拟计算的准确性提供依据。实车测量列车交会空气压力波过程中, 除对动态压力传感器的动、静态性能有较高要求外, 信号线长度、信号滤波频率及采样频率对测量结果有重要影响。为此, 作者对连接动态压力传感器的信号线长度、放大器的滤波频率、

收稿日期: 2003-12-16

基金项目: 铁道部科技发展计划项目(2000G49-B)

作者简介: 梁习锋(1963-), 男, 湖南长沙人, 教授, 从事列车空气动力学研究

论文联系人: 梁习锋, 男, 教授; 电话: 0731-2656675(O); E-mail: gszx@mail.csu.edu.cn

数据采集系统的采样频率对传感器输出信号的影响进行了试验和分析。在此基础上, 得出了信号线不同长度(1, 30, 50, 70 和 100 m)对测量结果的定量影响, 并提出了列车交会压力波实车测量中推荐使用的滤波频率和采样频率。

## 1 信号线长度对动态压力传感器输出信号的影响

用传统方法测量物体表面空气压力时, 须在物体表面测压部位的法线方向开测压孔, 孔内安装测压管, 测压管外端与物体表面平齐, 内端通过塑料管与压力传感器相连。这种方法不适用于非试验专用车辆。为解决这一问题, 在列车交会空气压力波实车测量中, 采用在试验列车车体表面安装压力传感器的方法, 由于试验列车车体均为密封结构, 因此, 连接传感器的信号线一般较长。微小的动态压力信号在线路中传输时, 极易受到干扰, 造成信号的衰减或延时<sup>[12]</sup>。在此, 采用静态和动态 2 种方法研究了信号线长度对传感器输出信号的影响。

### 1.1 静态试验

静态试验仪器由补偿式微压计和应变放大器组成。同一传感器在相同压力下, 分别与 1, 30, 50, 70 和 100 m 信号线相连, 测量传感器的输出信号。传感器与应变放大器相连, 由补偿式微压计提供稳定压力, 由应变放大器提供传感器所需桥压并通过放大器读取测量数据。补偿式微压计提供的输出压力为 1 470 Pa 时, 信号线长度对静态试验结果的影响如表 1 所示。实车试验使用的数据为其中 1 个 2.5 kPa 传感器的静态实验数据。

表 1 信号线长度对静态试验结果的影响

Table 1 Effect of signal line length on static test result

	信号线长度/m				
	1	30	50	70	100
$p/\text{Pa}$	1 470.24	1 468.02	1 467.26	1 466.64	1 465.45
相对误差/%	0	-1.51	-2.03	-2.45	-3.26

从表 1 可以看出, 随着信号线长度的增加, 传感器感受到的信号相对误差均在 4% 以内, 因此, 对于静态压力信号, 信号线长度小于 100 m 时对传感器的输出信号影响很小。

### 1.2 动态试验

典型列车交会压力波曲线如图 1 所示。其中: 第 1 个脉冲为交会列车头部通过测点时引起的压力

变化, 称为头波; 第 2 个脉冲为交会列车尾部通过测点时引起的压力变化, 称为尾波。头波幅值一般大于尾波幅值。列车运行速度不同, 交会压力头波、尾波周期(将头波或尾波近似看成单一正弦波)不同, 当列车速度为 120~300 km/h 时, 头波和尾波的周期为 20~50 ms, 其频率为 20~50 Hz。

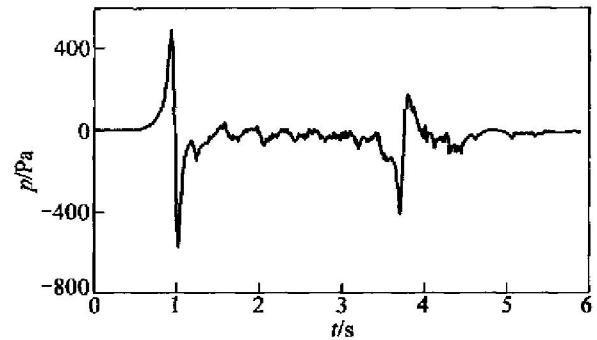


图 1 典型列车交会压力波形

Fig. 1 Typical air pressure pulse produced by passing trains

为了模拟列车交会时产生的空气压力变化, 研制了 1 台频率可调的动态压力发生器, 该发生器可以产生 5 种频率的正弦波交变空气压力, 分别为: 20, 30, 40, 50 和 70 Hz。

压力传感器测压孔与动态压力发生器相连, 分别用 1, 30, 50, 70 和 100 m 信号线通过多通路接头与同一压力传感器输出信号相连, 用数据采集仪记录各输出信号。

实车试验时, 使用其中 1 个 2.5 kPa 压力传感器的动态试验数据, 如表 2 所示。

表 2 信号线长度对动态试验结果的影响

Table 2 Effect of signal line length on result

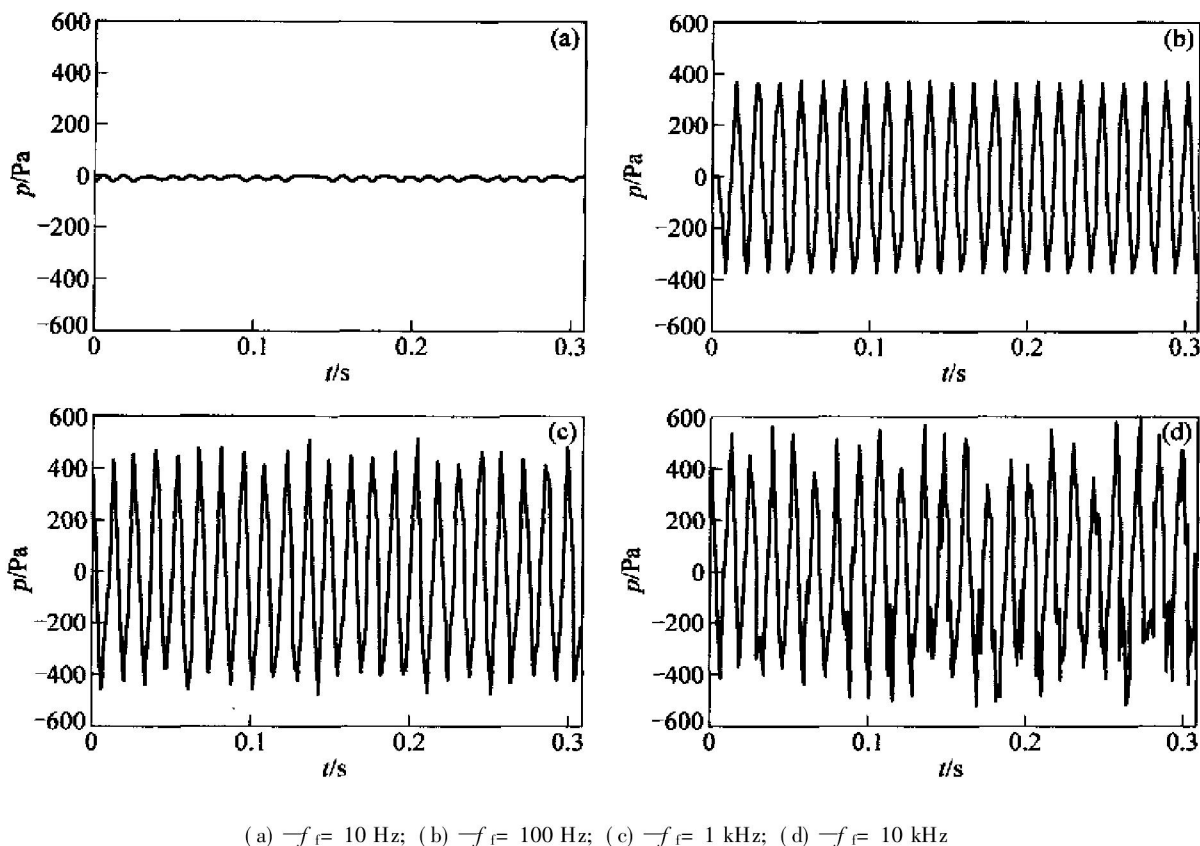
	信号线长/m				
	1	30	50	70	100
$p/\text{Pa}$	816.14	814.3	813.01	811.76	809.06
相对误差/%	0	-2.25	-3.84	-5.37	-8.67

从表 2 可以看出, 随着信号线长度增加, 对传感器输出信号的影响均不超过 1%。

从静态和动态试验结果可以得出, 信号线长度小于 100 m 时对传感器输出信号影响很小。

## 2 放大器滤波频率对传感器信号波形的影响

由于实车试验现场环境较差, 虽然采取了屏蔽、



(a)  $f_c = 10 \text{ Hz}$ ; (b)  $f_c = 100 \text{ Hz}$ ; (c)  $f_c = 1 \text{ kHz}$ ; (d)  $f_c = 10 \text{ kHz}$

图 2 不同滤波频率的测试波形比较

Fig. 2 Comparison of measured pressure wave at different filter frequency

接地、隔振等措施,却无法避免干扰信号。当信噪比较小时,会严重影响信号特征参数的判读。因而需采取滤波方法抑制信号中的高频干扰成分,提高信噪比和测量精度。在列车交会实车试验中,交会压力波幅值是一个重要的安全指标,需要及时快速地进行数据处理并提报试验结果,根据试验结果决定后续试验安排。列车交会时间非常短,为能真实直观地捕捉交会压力信号,及时进行数据处理,必须对放大器的滤波频率进行合理选择。为此,利用动态压力发生器、数据采集仪就放大器低通滤波频率对测试结果的影响进行研究。

压力发生器产生一交变空气压力,传感器将此压力信号转变成电信号后经多通路接头,分别接入放大器滤波频率设置不同的 4 个通道,由数据采集仪记录数据和波形。放大器桥压为 10 V,放大倍数为 250 倍,滤波频率( $f_c$ )分别为 10 Hz, 100 Hz, 1 kHz 和 10 kHz,数采设置采样范围为  $-10 \sim 10 \text{ V}$ ,采样频率为 1 kHz 时的测试结果如图 2 所示。

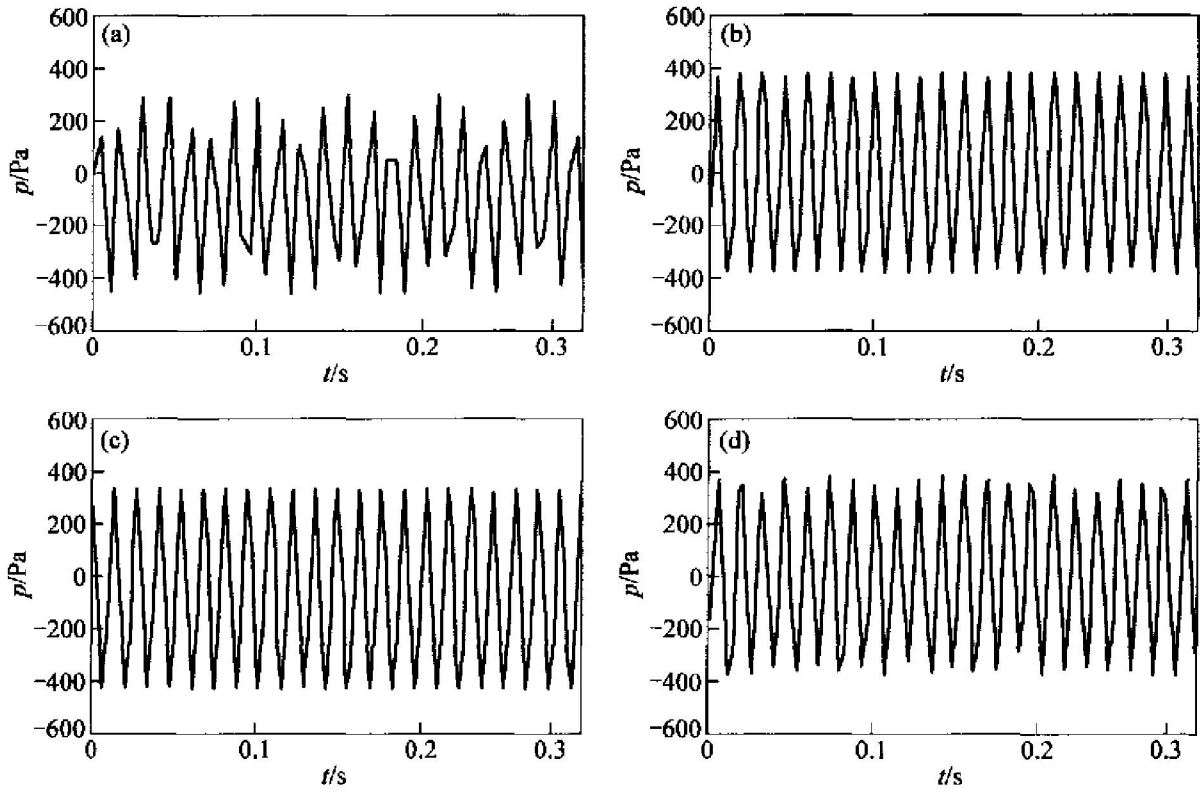
从图 2 可以看出,滤波频率为 10 Hz 时,波形近似为直线,有效压力信号基本被屏蔽;而滤波频率超过 1 kHz 时,由于滤波频率远大于有效信号频率,干扰信号不能得到有效抑制,波形出现明显毛刺;当滤波频率为 100 Hz 时,其波形光滑,能真实反应动态压力发生器发出的压力变化信号。

因此,列车交会试验中,通常选择带前置低通滤波器的应变放大器,低通滤波频率选择 100 Hz。

### 3 采样频率对传感器输出信号的影响

动态信号分析处理中的主要误差来源之一是采样<sup>[13]</sup>,必须按照受控对象的物理特性与扰动的强弱来选择采样频率,若采样点过多,离散值密集,则因扩大数据序列长度而增加了数据采集的工作量,并降低了处理速度;反之,采样点过疏,就无法准确反映时域函数的原状而产生误差。

列车交会压力波测量中,采用信号恢复逼近的方法很困难。采样频率的高低不仅关系到测量的准确度和灵敏度,而且对系统的采样速度、数据的存储和数据的处理有很大的影响。为既能准确捕捉有效信号,又能节省内存空间,采用 Nicolet 数据采集仪研究了采样频率对传感器输出信号的影响。利用动态压力发生器,对同一个传感器输出的信号,采样频率设为 2 kHz, 1 kHz, 500 Hz 和 200 Hz,设定采样输入范围  $-10 \sim 10 \text{ V}$ ;放大器放大倍数为 250 倍,桥压为 10 V,滤波频率为 100 Hz,不同采样频率( $f_s$ )下测试波形,结果如图 3 所示。



(a)  $f_s = 200$  Hz; (b)  $f_s = 500$  Hz; (c)  $f_s = 1$  kHz; (d)  $f_s = 2$  kHz

图 3 不同采样频率的测试波形比较

Fig. 3 Comparison of measured pressure wave at different sampling frequency

从图 3 可以看出, 采样频率为 1 kHz 和 2 kHz 时, 正弦波形稳定, 曲线光滑; 在采样频率为 500 Hz 时, 波形有尖点出现; 而采用频率为 200 Hz 时, 其测试结果不再具有正弦波的性质, 出现明显不规则尖角, 波形严重失真。不同采样频率下测得的波形平均幅值 ( $\Delta p$ ) 如表 3 所示。

表 3 采样频率对测量结果的影响

Table 3 Influence of sampling frequency on result

	采样频率 $f_s$ / Hz			
	200	500	1 000	2 000
平均压力波幅值 $\Delta p$ / Pa	546.1	723.7	783.9	791.0
相对误差 / %	- 30.33	- 7.68	0.00	0.91

表 3 中相对误差是以采样频率为 1 kHz 测量结果为基准的比较值。从表 3 可见, 采样频率为 1 kHz 和 2 kHz 时, 空气压力波幅值测量结果只相差 0.91%。采样频率与压力波幅值测量结果关系如图 4 所示, 采样频率低于 1 kHz 时, 随采样频率的增加, 压力波幅值增加; 采样频率高于 1 kHz 时, 随采样频率的增加, 压力波幅值测量结果变化不大。因此, 在列车交会空气压力波实车测试中, 为保证测试波形的完整性, 又节省设备内存空间, 采样频率可选用 1 kHz。

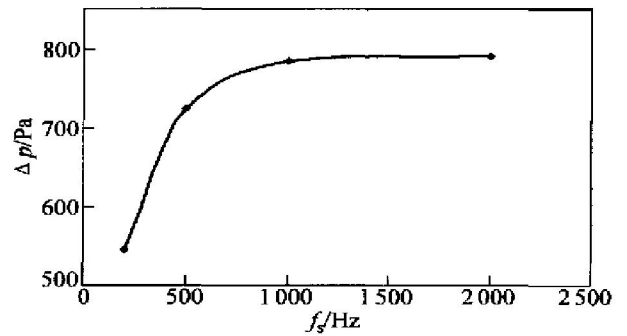


图 4 采样频率与压力波幅值测量结果关系曲线

Fig. 4 Relationship of sampling frequency and magnitude of pressure pulse

## 4 结 论

a. 连接传感器与二次仪表的信号线在 100 m 范围内, 对传感器输出信号影响小于 1%, 满足列车交会空气压力波实车测量要求。

b. 放大器的滤波频率对测量结果有较大影响, 滤波频率过小, 有效压力信号将被屏蔽; 滤波频率过大, 干扰信号对测试结果的影响加大。在列车交会压力波实车测量中可选用 100 Hz 作为滤波频率。

c. 采样频率增加, 测量得到的空气压力波幅值

增大;当采样频率增加到 1 kHz 后,测量结果趋于稳定。在列车交会空气压力波实车测试中,为保证测试的准确性,又节省设备内存空间,采样频率可选用 1 kHz。

### 参考文献:

- [1] 梁习锋,田红旗. 200 km/h 动车组交会空气压力波试验[J]. 中南工业大学学报(自然科学版), 2002, 33(6): 621 - 624.  
LIANG Xi-feng, TIAN Hong-qi. Test Research on Crossing Air Pressure Pulse of 200 km/h Electric Multiple Unit[J]. Journal of Central South University of Technology(Natural Science), 2002, 33(6): 621 - 624.
- [2] HOLMES B, SCHROEDER M. High-Speed Passenger Train Aerodynamic Loading Effects on Passing Trains[R]. US DOT: Federal Railroad Administration Report, DOT/FRA/ORD01-xx, 2001.
- [3] MANCINI G, MALFATTI A. Full Scale Measurements on High Speed Train ETR500 Passing in Open Air and in Tunnels of Italian High Speed Line[A]. Notes on Numerical Fluid Mechanics 79 [C]. Berlin: Springer-Verlag, 2002.
- [4] JOHNSON T, DALLEY S. 1/25th scale moving model tests for the TRANSAERO project[C]. Notes on Numerical Fluid Mechanics 79, Berlin: Springer-Verlag, 2002.
- [5] HOLMES B, DIAS J, RAFAI S, *et al.* Solution of Train Tunnel Entry Flow Using Parallel Computing[J]. Computational Mechanics, 1999, 23: 124 - 129.
- [6] BERENGER T, KESSLER A, GREGOIRE R. Part 1 Panel Method Applied to the Prediction of Unsteady Effects Caused by High Speed Trains Passing in the Open Air and in Tunnels[A]. Notes on Numerical Fluid Mechanics 79[C]. Berlin: Springer-Verlag, 2002.
- [7] PAHLKE K. Application of the Standard Aeronautical CFD Method Flower to Trainpassing on Open Track[A]. Notes on Numerical Fluid Mechanics 79[C]. Berlin: Springer-Verlag, 2002.
- [8] 田红旗,卢执中. 列车交会压力波的影响因素分析[J]. 铁道学报, 2001, 23(4): 17 - 20.  
TIAN Hong-qi, LU Zhizhong. Influence of Various Factors on Air Pressure Pulse From Trains Passing by Each Other[J]. Journal of China Railway Society, 2001, 23(4): 17 - 20.
- [9] HARVEY Shu-Hong Lee. Assessment of Potential Aerodynamic Effects on Personnel and Equipment in Proximity to High Speed Train Operations[R]. Volpe National Transportation Systems Center, Report No. DOT/FRA/ORD-99/11, DOT-VNTSC-FRA-98-3, 1999.
- [10] GREGOIRE R. TRANSAERO Work Package 3 Train Passing Effects Summary and Conclusions[A]. Notes on Numerical Fluid Mechanics 79[C]. Berlin: Springer-Verlag, 2002.
- [11] KIKUCHI K, YAMAUCHI N, YOSHIDA Y, *et al.* Nakarishi M, Takahashi. Countermeasures for Reducing Pressure Variation Due to Train Passage in Open Sections[J]. Quarterly Journal of the RTRI, 2001, 42(2): 1015 - 1021.
- [12] 李永敏,罗麟经,林燕珊. 提高长线传输数字波形质量的技术措施[J]. 南京航空航天大学学报, 1998, 30(1): 106 - 110.  
LI Yong-min, LUO Lin-jing, LIN Yan-shan. Techniques of Improving Characters of Coded Wave Transmitting on Long Wire[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1998, 30(1): 106 - 110.
- [13] 屈玉池,魏海涛,赵述元. 动态信号数字处理中的问题及改进[J]. 飞行试验, 2001, 17(2): 5 - 11.  
QU Yu-chi, WEI Hai-tao, ZHAO Shu-yuan. The Problems and Improvement in Digital Treating With Dynamic Signals[J]. Test of Aviation, 2001, 17(2): 5 - 11.