

1 : 5 滚动实验台轮轨力连续测量系统

任利惠, 黄磊, 周劲松, 潘建壮

(同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804)

摘要: 轮轨作用力是评价铁道车辆安全性的主要指标. 针对 1 : 5 小比例滚动实验台, 开发了轮轨力连续测量系统. 首先使用有限元分析和应变实验, 得到小比例轮对的最佳测点位置. 根据测点的应变输出特性, 提出小比例滚动台的轮轨力连续测量方案: 轮轨横向力采用轮测法测量, 再结合轴测法测量轮轨垂向力. 在横向力测量中, 一侧车轮采用简易余弦桥, 另一侧车轮采用直流桥. 研制了小比例测力轮对, 静态试验结果说明简易余弦桥的测试精度较高. 论文最后给出了 1 : 5 滚动实验台轮轨力的测量结果.

关键词: 滚动台; 轮轨力; 测量; 测力轮对

中图分类号: U 232

文献标识码: A

Wheel/Rail Interaction Forces Continuously Measuring System for 1 : 5th Scale Roller Rig

REN Lihui, HUANG Lei, ZHOU Jinsong, PAN Jianzhuang

(Institute of Railway & Urban Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The safety of the railway vehicle is mainly evaluated by the wheel/rail interaction forces. A wheel/rail interaction forces continuously measuring system for a 1 : 5th scale roller rig in Tongji University is developed. The finite element method analysis and experiment studies are carried out to find the desirable positions of strain gauge on 1 : 5th scale wheelset. Then an instrumented wheelset for continuously measuring wheel/rail interaction forces of 1 : 5th scale roller rig is developed. The lateral forces are measured directly from the strain gauges on the wheel plate. A simple cosine strain gauges bridge and a direct current strain gauges bridge are practised on left and right wheel respectively. The wheel/rail interaction vertical forces are indirectly calculated according to the axle bend moments and lateral forces on wheels. The output characteristics of all strain gauge bridges are obtained through static calibration and

the precision of cosine gauges bridges is better than that of direct current gauges bridge. Finally the wheel/rail interaction forces of 1 : 5th roller rig are given by this measuring system.

Key words: roller rig; wheel/rail interaction force; measure; instrumented wheelset

轮轨作用力是评价铁道车辆运行安全性的主要指标. 实现轮轨力的精确、连续测量是评价车辆安全性的关键技术. 测力轮对是目前最直接、最准确的轮轨力测量技术, 它以轮对作为轮轨力的检测传感器, 通过测量轮对上有限点处的应变实现轮轨作用力的连续检测.

实物轮对的轮轨力连续测量技术主要有以下几种: ①轴测法^[1]——通过测量车轴轴身、轴肩几个断面上弯矩间接计算出轮轨力; ②辐条轮法——采用特殊的辐条车轮来制作测力轮对; ③幅板车轮法——通过在车轮几个半径上的合理组桥来尽量消除车轮转动的影响, 然后求解多个非线性方程组而得到横向力、垂向力以及轮轨作用点位置^[2-4]. 最近还出现了根据车轮横向变形测量轮轨横向力的方法^[5].

上述轮轨力的测量方法都是针对 1 : 1 的实物车轮开发的. 与实物车轮相比, 小比例轮对的应变输出很小, 应变片的粘帖位置和数量受到很大限制, 因此无法直接套用上述方法. 本文根据我校 1 : 5 铁道车辆滚动实验台的特点, 研制了小比例测力轮对, 开发了小比例滚动台的轮轨力连续测量系统.

1 1 : 5 铁道车辆滚动实验台

我校的 1 : 5 铁道车辆滚动实验台(图 1)是针对

收稿日期: 2010-02-25

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2009BAG11B02)

第一作者: 任利惠(1970—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为轨道车辆动力学. E-mail: renlihui@tongji.edu.cn

车辆工程专业教学而开发的实验装置. 实验台由4个轨道轮、驱动电机和传动系统组成. 电机通过传动系统带动轨道轮转动, 轨道轮再带动车辆轮对转动, 以模拟车辆在直线轨道的运动, 轨距 287 mm. 车辆为 1:5 小比例整车模型, 由一个钢结构车体和两台两轴转向架组成, 转向架采用两级弹性悬挂, 轴距 500 mm, 车轮直径 168 mm.



图1 同济大学的 1:5 铁道车辆滚动实验台

Fig.1 1:5th scale railway roller rig in Tongji University

为了提高测量精度, 对原设计的整体幅板式车轮进行了部分改造, 减少幅板厚度, 增加了幅板长度, 用来增大车轮上的应力. 为了安装集流环, 在车轴开通孔, 同时轮对内侧的轴身上钻孔, 以便于导线穿过.

2 测点位置选择

用测力轮对测量轮轨力, 就是根据车轮上的应变还原出轮对所受的轮轨力, 车轮的应变一般靠粘贴应变片来获得, 因此应变的测量位置对测试结果有着直接影响.

应变测点位置的选择应遵循两个原则: ①测点应有足够大的应变输出; ②车轮旋转一周时, 测点的输出波形要接近余弦波或三角波, 以便于组桥. 如果测点的输出对横向力和垂向力能够解耦, 则便于方程求解.

2.1 有限元分析

测点位置的选择先借助于有限元法分析, 得到轮对在垂向力和横向力作用下的应力分布. 计算结果显示, 车轮幅板在横向力作用下的应变远大于在垂向力下的应变, 且靠近轮毂处幅板的应变最大; 车轴在横向、垂向载荷的应变均较大, 且在两轮之间的车轴应力最大, 并呈等应变分布.

2.2 实验分析

为了进一步确定测点位置, 测试了车轴和车轮幅板在垂向力、横向力作用下的应力. 应变片粘贴位

置和测点编号见图2, 其中测点3~5反映车轮辐板上的径向应变, 而测点2反映了车轴上的轴向应变.

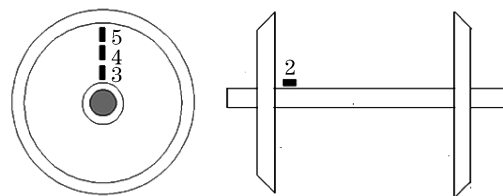


图2 小比例轮对的应力测试位置

Fig.2 Stress measuring positions on 1:5th scale wheelset

将贴好应变片的轮对分别放在垂向标定台和横向标定台上进行加载, 每隔 15° 加载一点. 数据处理时, 将应力换算成 1 kN 的轮轨垂向或横向作用下的输出. 应力测试结果见图3和图4. 垂向加载时, 车轮测点的应力都很小, 测点3处的应力最大只有 11.4 MPa. 车轴上测点2的最大应力为 28.8 MPa. 考虑到小比例车辆的实际质量很小(空车约 180 kg), 可以推断车轮上各测点的实际应力输出很小, 而车轴上测点的应力输出适合垂向力测试.

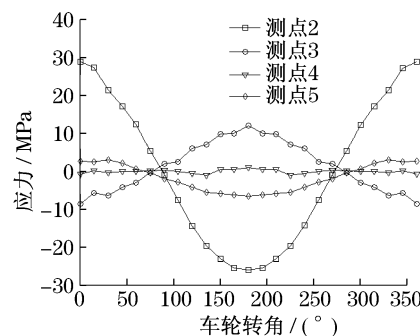


图3 垂向载荷下各测点的应力

Fig.3 Stresses of 1:5th scale wheelset under vertical load

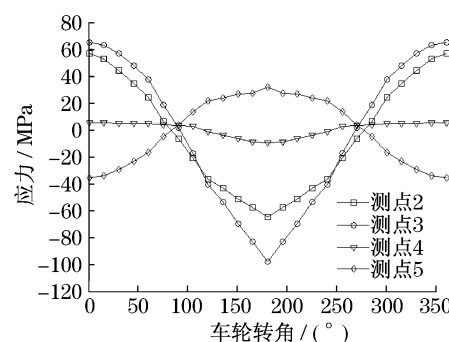


图4 横向载荷下各测点的应力

Fig.4 Stresses of 1:5th scale wheelset under lateral load

横向加载时, 车轴测点的应力幅值为 64.7 MPa, 车轮上测点3应力幅值最大, 为 81.4 MPa, 均

满足横向力的测量要求. 测点3在横向载荷作用下的应力远远大于垂向载荷下的应力,在同值载荷作用下,前者是后者7.2倍.

对测点应力波形进行谐波分析. 测点2在垂向力下应力波形的一阶谐波成分占90.9%,接近余弦波. 测点3在横向力下应力波形的一阶谐波占86.3%,接近三角波.

综上所述,车轴上各处均可根据需要作为应变测点,而车轮上的测点3可作为轮轨横向力测点.

3 轮轨力测量方案

小比例滚动台的轮轨力测量综合采用了车轮力和车轴力法:轮轨横向力采用轮测法测量,再结合轴测法测量轮轨垂向力.

3.1 横向力

由于车轮幅板测点3在横向力下的输出是垂向力下输出的7.2倍,因此可以忽略垂向力对测点3的应力影响,认为测点3的输出全部是横向力作用的结果,通过组桥,能够进一步放大横向力的输出和减小垂向力的输出.

由测点3的波形特点,可以在车轮上粘贴应变片,组成余弦桥测量轮轨横向力. 作为对比,在另一侧车轮贴片组成直流桥,也用来测量横向轮轨力.

3.1.1 余弦桥

如果车轮上同一半径上的两个电桥输出 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 仅与轮轨横向力 Q 相关时,有:

$$\begin{bmatrix} k_1 f_1(\theta) \\ k_1 f_1(\theta) \end{bmatrix} \cdot Q = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: k_1 为电桥的标定系数; $f_1(\theta)$ 和 $f_2(\theta)$ 为归一化的车轮转角函数.

当车轮上应变输出接近三角波时,可以通过合理组桥使整个桥路的输出充分接近于余弦波,即使 $f_1(\theta) = f_2(\theta) = \cos \theta$. 在角度相隔 90° 的相同位置布置两组一样的测点,则方程(1)可方便地求解:

$$\text{ABS}(Q) = \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} / k_1 \quad (2)$$

对于余弦桥法测得的横向力,可以在数据处理中得到其方向信息. 其原则如下:

(1) 由于车轮只可能受压不可能受拉,所以测量的垂向力 P 不可能为负, P 为负时说明测量的横向力 Q 方向反向.

(2) 小比例轮对与轨道轮只能产生轮缘接触而没有轮背接触,因此 Q 的突变只可能向内侧突变而不可能向外侧突变.

余弦桥法的关键是如何在车轮上布置应变片和组桥,使得桥路具有余弦函数的输出特性. 当车轮径向应变的反对称分量使用 $0^\circ, 60^\circ$ 的简易桥时,能够消除三阶谐波分量,使得电桥的输出足够接近函数;当使用 $0^\circ, 36^\circ, 60^\circ, 96^\circ$ 的优选桥时,可消除三次谐波和五次谐波的影响,使电桥的输出非常接近余弦函数^[2]. 由于小比例轮对幅板很小,无法布置下优选桥,只能选择 $0^\circ, 60^\circ$ 的简易桥. 简易余弦桥的贴片位置和组桥方法如图5所示.

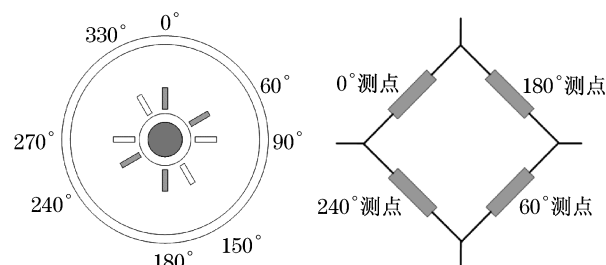


图5 简易余弦桥的贴片位置和组桥方法

Fig.5 Simple cosine bridge arrangement and its strain gauges distribution on wheel plate

3.1.2 直流桥

作为对比,在另一侧车轮组成直流桥. 这时,在车轮上每隔 45° 贴片, $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 位于电桥的一个边,其对边则为 $180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$,组桥方法见图6. 直流桥可以直接得到横向力的大小和方向,但直流桥是一种相对测量法,由于电桥预平衡的缘故,不能获得静态的横向力. 通常采用低速运行时测得的横向力作为静态值.

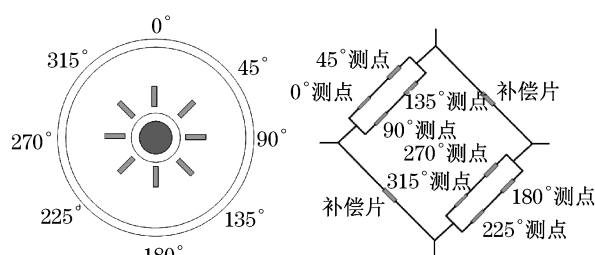


图6 直流桥的贴片组桥方法

Fig.6 Direct current bridge arrangement and its strain gauges distribution on wheel plate

3.2 垂向力

轴测法通常需要测出车轴轴身、轴肩处6个断面的弯矩,从而计算出作用在车轮上的轮轨力. 如果在测得车轮上的横向力,则只需要通过测量车轴 A, B, C, D 断面的弯矩(图7),即可解得轮轨垂向力. 图7中: P_1, Q_1 分别为左轮轨的垂向力和横向力(余弦桥); P_2, Q_2 分别为右轮轨的垂向力和横向力(直

流桥); P'_1, P'_2 分别为来自左、右一系悬挂的垂直方向作用力; H_1, H_2 分别为来自左、右悬挂的水平方向作用力; $b_2 \sim b_5$ 为车轴上测点断面至轮对中心的距离; b_{A1}, b_{A2} 分别为轮轨接触点至轮对中心距离; r_1, r_2 分别为左、右车轮半径.

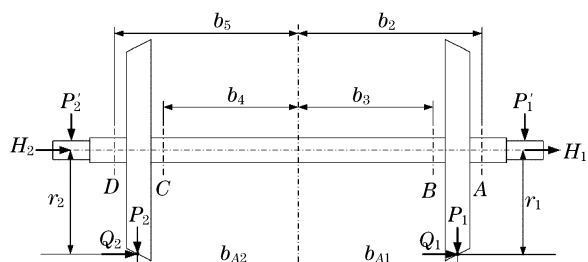


图 7 轮轨垂向力的测量原理

Fig.7 Measuring method for vertical wheel/rail force

根据轮对的受力分析可得轮轨垂向力:

$$P_1 = -\frac{1}{b_2 - b_{A1}} M_A - \frac{b_2 + b_4}{(b_2 - b_{A1})(b_3 + b_4)} M_B + \frac{b_2 - b_3}{(b_2 - b_{A1})(b_3 + b_4)} M_C - \frac{r_1}{b_2 - b_{A1}} Q_1 \quad (3)$$

$$P_2 = \frac{1}{b_5 - b_{A2}} M_D - \frac{b_5 + b_3}{(b_5 - b_{A2})(b_4 + b_5)} M_C + \frac{b_5 - b_4}{(b_5 - b_{A2})(b_4 + b_5)} M_B - \frac{r_2}{b_5 - b_{A2}} Q_2 \quad (4)$$

式(3)~(4)中, M_i 为车轴 i 断面的弯矩, $i = A, B, C, D$.

4 轮轨力测试系统

4.1 测力轮对

按第 3 节所述的组桥方案,在一侧车轮辐板内侧粘贴应变片,组成余弦简易桥(简称余弦桥),在另一侧车轮辐板内侧粘贴应变片组成直流桥.在车轴的 A, B, C, D 断面沿轴向粘贴应变片,分别布置两组半桥,两半桥相隔 90° . 组桥后的测力轮对实物如图 8 所示.

将组好桥的轮对分别放在垂向标定台和横向标定台进行标定,得到各测量电桥的垂向和横向标定曲线,图 9 给出了余弦桥和直流桥的横向力标定曲线. 标定结果显示:车轴上所有断面的电桥输出数值基本相同,各电桥波形都呈余弦波;横向力作用下,余弦 0° 桥和 90° 桥的一阶谐波分量分别达到 93.1% 和 94.0%,很接近余弦波;直流桥的输出基本呈直流特性,但直流桥的输出很小,在相同的激励电压下,直流桥的输出仅有余弦桥的 1/10 左右,这说明

余弦桥的测量精度远高于直流桥.

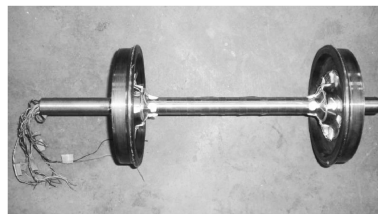


图 8 小比例测力轮对

Fig.8 Prototype of 1 : 5th scale instrumented wheelset

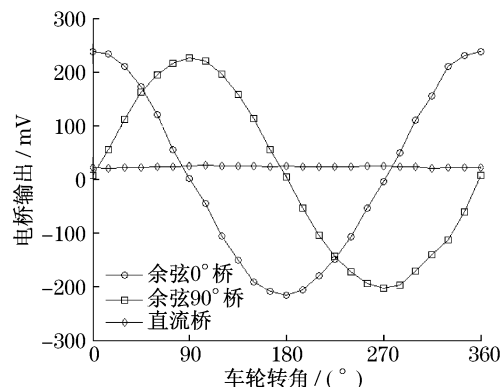


图 9 余弦桥和直流桥的标定曲线

Fig.9 Calibration curves of simple cosine and direct current measuring bridge

图 10 给出了两个余弦桥分别在等值垂向、横向载荷作用下按式(2)的合成输出. 可见,横向载荷作用下的输出远远大于垂向载荷的输出,前者是后者的 12.5 倍之多,完全可以忽略垂向力的影响,认为其输出完全是横向力的作用. 通过组桥,使得电桥对横向力的输出与对垂向力的输出之比变大了.

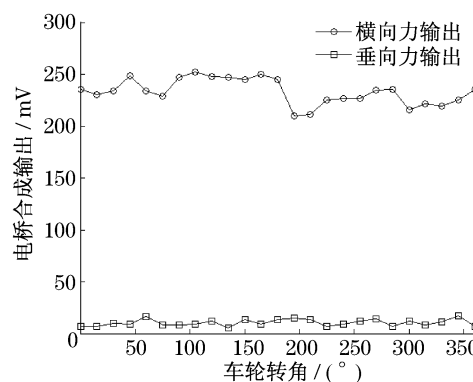


图 10 余弦桥在垂向、横向载荷下的输出对比

Fig.10 Output comparison of simple cosine measuring bridge under vertical or lateral load

4.2 系统误差

静态加载条件下,测试系统的测量误差如图 11 所示. 可见,余弦桥的误差在 $\pm 8\%$ 之内,其测量精度是可以接受的;而直流桥的误差波动最大达到了

$\pm 20\%$ 左右,显然直流桥的测量精度较低,这是由于应变输出中的直流成份太小造成的.

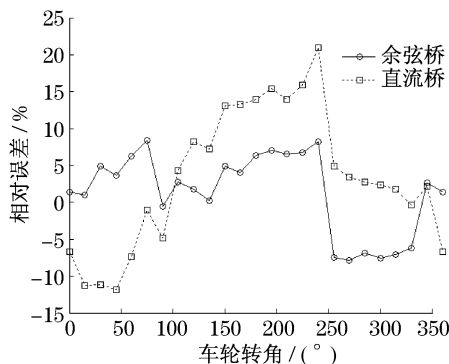


图 11 余弦桥和直流桥的误差

Fig.11 Error curves of simple cosine and direct current measuring bridge

4.3 测试系统

测试系统采用虚拟仪器概念构建,主要由信号调理设备 SCXI-1532 和数据采集卡 PCI-6024E 组成,如图 12 所示.数据采集和处理程序使用 LabVIEW7.0 编制.

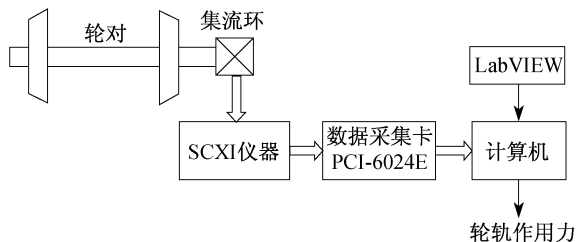


图 12 1:5 滚动台轮轨力测试系统示意图

Fig.12 Diagram of wheel/rail forces continuously measuring system for 1:5th scale roller rig

5 1:5 滚动实验台轮轨力测试

5.1 实验结果

将测力轮对装在 1:5 滚动实验台上.在静态下调平仪器,滚动台开始滚动后记录实验数据,每次实验先让小车平稳运行一小段时间,这时得到的轮轨作用力可作为静态值.

实验数据的处理过程如下.

①首先对数据进行低通滤波.低通滤波截止频率取决于轮对的最低阶模态频率,这里取为 95 Hz; ②静态数据补偿.由于仪器在调平时,不仅消除电路的初值,同时也减掉了静态轮轨力,因此需要对测量数据进行补偿; ③由交流桥和直流桥的输出得到车轮上的横向力; ④求车轴各断面弯矩,它是车轴各断

面 0° 和 90° 电桥输出的平方根; ⑤根据式(3),(4)求得轮轨垂向力.

图 13 给出了重车状态下测得的轮轨作用力,图 14 给出了左、右车轮的脱轨系数.余弦桥侧车轮的脱轨系数变化较为缓慢,直流桥侧车轮的脱轨系数变化幅值较大,这是由于直流桥的输出误差较大造成的.

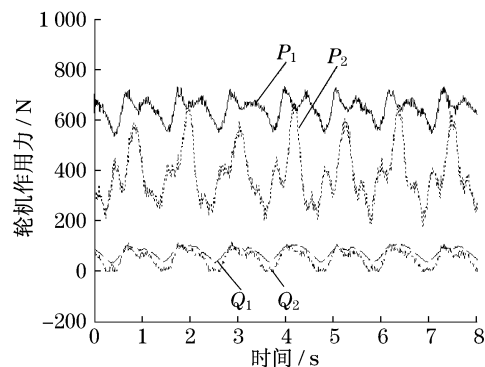


图 13 1:5 滚动实验台上测得的轮轨作用力

Fig.13 Measured wheel/rail forces on 1:5th scale roller rig with instrumented wheelset

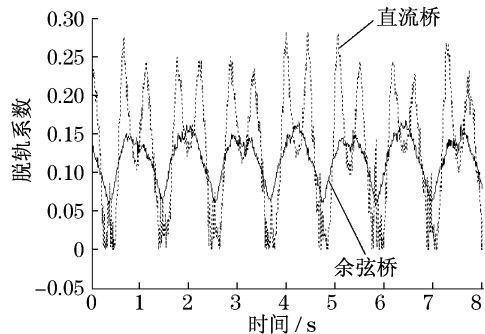


图 14 小比例车辆的脱轨系数

Fig.14 Derailment coefficients of 1:5th scale rolling stock

空车时,由轮轨力测量系统测得的余弦桥侧车轮静载荷为 251.9 N,直流桥侧车轮静载荷为 298.4 N.小比例货车空车时每个车轮的静载荷约为 225 N^[6].由此也证实,由余弦桥侧桥路测量的垂向力精度较高,直流桥侧的测量精度较低.

5.2 桥路的比较

余弦桥的优点是:测点输出大,测量精度高;余弦桥为绝对测量,可测量出静态轮轨力.余弦桥的缺点是:横向力的方向丢失,需其他方法确定横向力的方向.

直流桥的优点是:直接输出横向力,且带有方向信息.直流桥的缺点是:测点输出小,测量精度低;直流桥为相对测量,需要其他措施才能测量出静态横向力.

从实验结果上看,余弦桥更适合在小比例车轮上使用.

6 结束语

本文针对我校 1 : 5 小比例滚动实验台,开发了轮轨力连续测量系统.

通过有限元分析和实验确定了应变测点的位置. 车轮上的最佳贴片位置在辐板靠近轮毂处,此处对横向载荷的应变远大于对垂向载荷的应变. 车轴与车轮交汇处是车轴上的最佳贴片位置.

根据应变特点,提出车轮力法和轴测法相结合的轮轨力测量方案,即轮轨横向力使用轮测法进行测量,然后结合轴测法得到轮轨垂向力. 静态试验结果表明,余弦桥法测量轮轨横向力精度较高,比直流桥更适合测量小比例轮对的轮轨力. 最后使用上述测试系统测量了 1 : 5 滚动台的轮轨作用力. 实践证明,车轮力法和轴测法相结合测量轮轨力是可行的.

目前该测量系统应用于我校相关课程的实践教学.

参考文献:

[1] Hertber H. Determination of wheel/rail forces by means of

measuring wheelsets on Deutsche Bundesbahn [C]// International Conference of Wheel/rail Load and Displacement Measure Techniques. Cambridge: Transportation Systems Center, MIT, 1981(1): 19 - 21.

[2] 曾宇清,王卫东,甘敦文,等. 测力轮对连续测量的理论与实践 [J]. 铁道学报, 1998, 20(6): 28.

ZENG Yuqing, WANG Weidong, GAN Dunwen, et al. Theory of high accuracy load measuring wheelset [J]. Journal of the China Railway Society, 1998, 20(6): 28.

[3] Kanehara H, Fujioka T. Measuring rail/wheel contact points of running railway vehicles [J]. Wear, 2002, 253(2): 275.

[4] 陈建政,王志强. 轮轨接触点的在线连续测量 [J]. 中国铁道科学, 2007, 28(5): 15.

CHEN Jianzheng, WANG Zhiqiang. On-rail continuous measurement of wheel/rail contact point [J]. China Railway Science, 2007, 28(5): 15.

[5] Matsumot A, Sato Y, Ohno H, et al. A new measuring method of wheel-rail contact forces and related considerations [J]. Wear, 2008, 265(10): 1518.

[6] 黄磊. 1 : 5 滚动实验台轮轨力连续测量技术研究 [D]. 上海: 同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 2010.

HUANG Lei. Wheel/Rail interaction forces continuously measuring system for 1 : 5th scale roller rig [D]. Shanghai: Tongji University. Institute of Railway & Urban Rail Transit, 2010.