

文章编号:1671-8879(2014)03-0145-06

光纤高速汽车动态称重系统

王 强^{1,3}, 刘仰韶¹, 张文忠¹, 许肇峰¹, 任伟新², 苏 成³

(1. 广东华路交通科技有限公司, 广东 广州 510800; 2. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075

3. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641)

摘 要:以电学测量为基础的动态称重系统多存在抗干扰能力弱和稳定性差等不足,采用稳定性好的光学测量技术可以弥补电学测量的不足。利用弯板式称重板进行移动车辆轮轴荷载称量和高速光纤光栅解调仪进行称重板应变测量的方法,结合汽车车辆的轮轴特性,从材料选用、结构设计、数据采集分析系统的软件设计等方面进行深入分析,研制了一套利用光纤 Bragg 光栅和高速动态解调仪实现弯板式高速动态汽车称重系统(WIM)。经与已知轴重和总重的车辆进行现场实测对比检验了系统的精度,满足 ASTM E1318 标准的要求,与商用称重系统进行实测结果的统计对比验证了系统的实用性。实际验证结果表明:该高速动态称重系统可用于对桥上自由运行车辆轮轴重、总重、车辆速度和轮轴间距等参数的采集,为公路桥梁车辆荷载研究提供必要手段。

关键词:汽车工程;光纤 Bragg 光栅传感器;弯板;动态称重;汽车荷载

中图分类号:U495

文献标志码:A

High speed WIM based on FBG for vehicles

WANG Qiang^{1,3}, LIU Yang-shao¹, ZHANG Wen-zhong¹,
XU Zhao-feng¹, REN Wei-xin², SU Cheng³

(1. Guangdong Hualu Transport Technology Co Ltd, Guangzhou 510800, Guangdong, China; 2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China; 3. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, Guangdong, China.)

Abstract: Till now weigh-in-motion systems for vehicles based on electrical measurement have some shortages such as low capacity of resisting disturbance and lack of stability, while optical measurement based on laser can cover the shortages. Based on the principle of bending plate to weigh the weight of vehicle axis rolling on it and of optical Bragg grating fiber sensors to get strains of bending plate, combined with the axis characteristics of vehicles on highway, a set of high speed WIM(weigh-in-motion) based on optical Bragg grating fiber sensors with high speed interrogator and bending plate was developed, in which material selection, structural design and the software for data acquisition and interpretation were discussed. The accuracy of the developed WIM was verified by comparing the weight of axis and the total weight of vehicle tested on-site and weighed by weigh bridge, which satisfied the American standard ASTM E1318. The practicability of the developed WIM was verified by test with a commercial one. The results show that such a high speed WIM can be used to collect information of running vehicles on bridges, such as the axis weight, the total weight, the speed and the wheelbases of vehicles, which is essential for

收稿日期:2013-05-16

基金项目:广东省科技厅科技计划项目(2007B030802002);广东省交通运输厅科技项目(2007-23)

作者简介:王 强(1973-),男,福建仙游人,广东华路交通科技有限公司高级工程师,华南理工大学博士后,E-mail:wq2351@163.com。

further study on the vehicle load on highway bridges. 3 tabs, 7 figs, 16 refs.

Key words: automotive engineering; optical Bragg grating fiber sensor; bending plate; weigh-in-motion; load of vehicle

0 引言

汽车荷载标准是进行公路桥梁设计、承载能力检测评估的重要依据,而实际公路桥梁上的汽车荷载状况与现行规范标准的差异较大,由此引发桥梁的各种病害十分多见^[1-2]。过去由于技术和手段的限制,对汽车荷载的调查主要以人工调查的方式进行,这在样本的代表性和容量等方面均存在不足,制约着对实际公路上汽车荷载的研究。由于实际汽车荷载的观测资料较少,进行桥梁的各种工作基本上采用规范给定的汽车荷载标准,其结果往往与实际不符合。随着电子技术的发展,利用动态汽车称重系统(WIM)对汽车荷载等信息进行自动化、大容量的调查采集成为可能,且在实际中的应用也日益广泛,这为汽车荷载等的研究工作提供了有利条件。

国外在 20 世纪 90 年代基本形成了成熟的 WIM 产品及相应的技术标准^[3]。中国对此研究起步晚且时间短,其测试精度不高、车辆通过速度低且耐用性也不能满足实际工作的需要,关键元件仍然以进口为主^[4-5]。WIM 主要有压电式、电容式和弯板应变式 3 种,从称重系统精度、年平均使用费、可靠性、使用寿命等技术经济指标进行对比发现,弯板应变式 WIM 具有较大优势^[6-8]。目前弯板应变式 WIM 主要以电阻应变片式作为敏感元,易受电磁干扰影响,且电绝缘性差,在现场潮湿的工作环境中容易出现异常。而光纤光栅传感器具有抗电磁干扰强、电绝缘性好、耐腐蚀能力强、性能稳定、安全性能好等优点,可以弥补电阻应变测量的不足,近年来在土木工程中的应用逐渐增多^[9]。而利用光纤光栅传感技术进行汽车动态称重系统的研究,由于受到解调仪解调速度等的制约,目前以室内研究为主,且要求通过车辆的速度较低,不能满足现场高速测试需要,尚未有现场实际应用报道或产品出现。为此,本文以光纤光栅传感技术和无限长板理论为基础,研制一套具有一定精度和可靠性的光纤光栅高速动态称重系统,可用于公路桥梁车辆荷载轮轴特征的采集。

1 基本原理

1.1 光纤光栅传感原理

光纤光栅传感技术是 20 世纪 70 年代伴随着光纤通信技术和智能感知材料的发展而产生的一门新学科、新技术,近年来在各种传感测量上的应用日益广泛。

光纤 Bragg 光栅利用光材料的光敏特性,用紫外激光直接写入法,在纤芯内形成具有一定空间周期的光栅。这种光栅属于反射型工作器件,相当于一个窄带滤光器或反射镜,当连续宽带光通过刻有光栅的纤芯时,它与光栅发生耦合作用,纤芯对该宽带光有选择地反射回相应的有一定中心波长的窄带光,并沿原传输纤芯返回,其余光则直接透射过去。当光栅的栅距周期发生变化时,其对应的中心波长亦发生变化。这样,检测被反射回来窄带光的中心波长,并以中心波长的变化来反映光栅栅距周期的变化,从而实现应变测量,光纤光栅传感原理如图 1 所示。

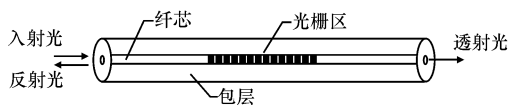


图 1 光纤光栅传感原理

Fig. 1 Principle of optical Bragg grating fiber sensor

由耦合模理论知,被光纤 Bragg 光栅反射回窄带光的中心波长为^[10]

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中: λ_B 为光纤光栅的中心反射波波长; n_{eff} 为纤芯的有效折射率; Λ 为光栅的栅距周期。

由式(1)可知,任何改变 n_{eff} 和 Λ 的因素都将改变光纤光栅的中心反射波波长,应变和温度是最直接因素。

由于激光光源相当稳定,且对光纤 Bragg 光栅传感器的反射光波长测试为数字式测量,它不受连接损耗、光缆缺陷、光缆位置的波动因素影响,测试结果十分稳定,因而这种传感器具有能够实现准分布式测量、精度高、实时性好、零点漂移小等优点,但需要高精度的解调仪设备才能组网。

1.2 弯板式称重板原理

下页图 2 为弯板式称重板的构造,图中 L 、 B 分别为板的长和宽。下页图 3 为移动轮载作用下某时刻板中心线上 Y 向应变分布曲线,曲线所围成的面积 A 称为应变输出。显然,在这远离板端的弯板长度范围内,面积 A 是固定的,也就是说不管轮载横向的作用位置如何,均能得到 1 个恒定的轮载,这种弯板称为“无限长板”。

文献[11]给出了该“无限长板”在车轮荷载作用下,弯板中心线上的应变输出与外加荷载的大小及其移动速度的关系,称重公式为

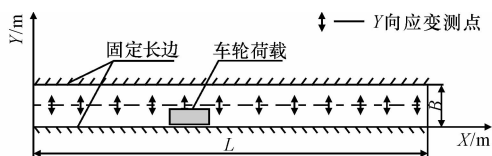


图2 弯板式称重板原理

Fig. 2 Principle of bending plate

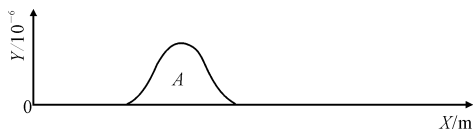


图3 轮载作用下板中心线上的应变分布

Fig. 3 Distribution of strains on center of bending plate under axis load

$$P = vS/S_0 \quad (2)$$

式中: v 为车轮荷载在 Y 方向的移动速度,车轮在板宽 B 内移动过程中其速度可视为均匀的; S_0 为单位荷载作用下,板中心线上 Y 方向上的应变积分输出; S 为移动车轮荷载作用下,板中心线上 Y 方向上的应变积分输出。

可见,称重板的输出仅与总荷载和速度有关,而与荷载沿垂直于速度方向的分布宽度无关。只要测得轮载在这个“无限长板”内作用过程中板中心线上的应变输出,便可获得车轮荷载,不必考虑轮载的分布形式及其位置。

当荷载作用在板短边的边缘附近时,文献[6]采用“补全阴影面积”的办法,采用补全公式予以修正。

2 动态称重系统的分析与设计

2.1 称重板的材料

称重板作为称重系统的传感装置,直接承载车轮荷载并产生应变,要求弹性性能好,均匀稳定性好,具有一定的强度和刚度,并在反复轮载作用下不会产生过大的塑性变形。

经过比选,采用一种经过热处理工艺加工后的65 Mn钢板作为弹性元件材料,经检验其极限抗拉强度达到783 MPa,屈服强度626 MPa,其冲击韧性和耐磨性能均良好。

2.2 称重系统的结构设计

由于称重板的原理及其测试需要,称重板的宽度大小要求车辆轮载在其上滚动过程中车轮有全部作用在其上面的瞬间,过窄的板会使得车轮滚动过程中不能将全部荷载作用在板上而导致误差。根据对轮胎着地几何特征的研究结果^[12],结合公路上的路幅宽度,选定2块尺寸为1 875 mm×320 mm×8 mm的称重板作为称重传感器,分别安装在行车道的左右两侧。

由于称重板工作时需要与周围的路桥结构物隔离,独立承载车轮荷载,并要求称重板的两长边固定,这样为称重板设计一个具有足够刚度的底座(下垫板),如图4所示,将称重板的长边采用双排螺栓固定在底座上。此外,为防止称重板过载产生过大变形,在称重板底座中间设置限位柱,限位柱与称重板之间的间隙以满足最大轮载作用的变形为宜。

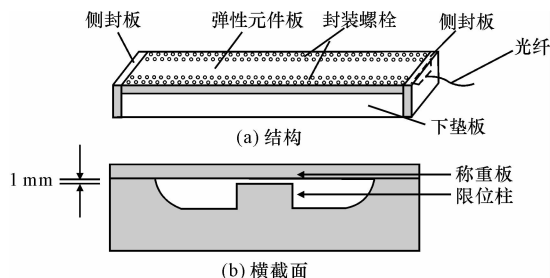


图4 弯板式动态称重系统结构

Fig. 4 Structure of WIM of bending plate

2.3 称重板的验算

考虑实际调查所得的最大轮载情况^[13],选择75 kN的单轮和150 kN的双轮作用于称重板上,考虑轮胎的接触面积,分析得板的最大主应力分别为560 MPa和535 MPa,最大下挠分别为1.0 mm和0.9 mm。称重板的一阶固有振动频率为1 099 Hz,远高于车辆的竖向振动频率,不会与通过的车辆发生共振,称重板的竖向抗弯刚度较高,在车辆通过后能迅速回归平衡位置。

2.4 称重板中心线上应变的测试

由称重板原理可知,动态称重系统设计的核心是实现轮载在称重板上移动过程对板中心线上 Y 方向应变的测量,该应变采用光纤Bragg光栅应变传感器进行测量,其光栅中心波长为1 525~1 565 nm,分辨率为 0.5×10^{-6} 。

图3所示的应变积分图面积 A ,可将其离散为若干测点的应变,按数值分析理论进行数值逼近,为此在每块称重板中心线上共布置12个光纤光栅应变传感器,见图2。

采用动态性能优良的SM130解调仪对反射光波进行解调,解调波长范围为1 510~1 590 nm,稳定性2 pm(1 pm=10⁻³ nm),重复性0.5 pmF.S.(F.S.为满量程),且具有自动校准功能,最高解调频率达1 000 Hz,以实现高速动态称重。

2.5 称重系统软件设计

利用Labview图形化编程语言,在解调仪采集程序接口的基础上,实现了动态称重系统的功能。下页图5为软件的流程图,下页图6为数据采集的界面。软件实现了以下功能。

(1)采用首波判读原理,由各传感器的应变增量

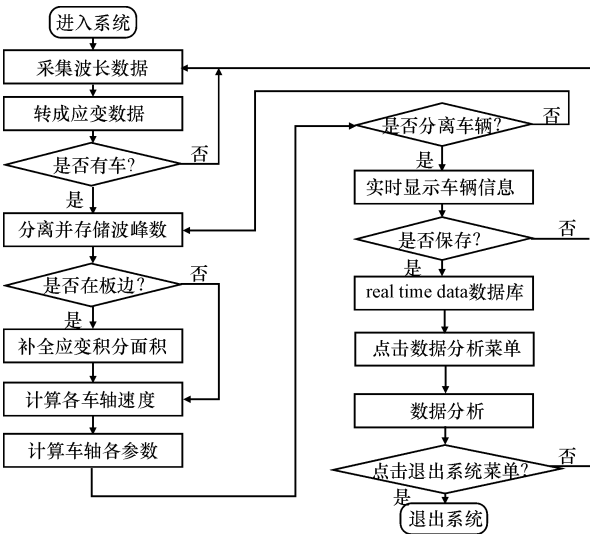


图 5 称重系统的软件算法流程
Fig. 5 Flow of software of WIM

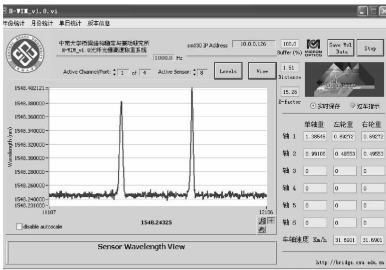


图 6 称重系统的软件数据采集界面
Fig. 6 Interface of data collection and interpretation
of software of WIM

信息判断车轮通过与否,毋需设地感线圈对通过车辆进行触发。首波的起跳点为车轮载踏上称重板的开始时刻,并通过前后两车轮轴出现的时间间隔、速度差等信息进行前后车辆分割。

表 1 小客车的实测结果对比
Tab. 1 Comparison of loads of cars

车速/ (km·h ⁻¹)	前轴重			后轴重			整车重		
	测量值/kN	真实值/kN	误差/%	测量值/kN	真实值/kN	误差/%	测量值/kN	真实值/kN	误差/%
5	9.679	9.8	1.23	8.537	8.3	2.86	18.216	18.1	0.64
18	9.255		5.56	7.827		5.70	17.082		5.62
29	9.750		0.51	8.418		1.42	18.168		0.37
34	9.281		5.30	7.921		4.56	17.202		4.96
44	9.677		1.26	8.263		0.44	17.940		0.88
57	10.617		8.34	8.750		5.43	19.368		7.00
75	9.687		1.15	7.905		4.76	17.592		2.81
90	10.462		6.76	9.608		15.75	20.069		10.80
108	11.022		12.47	8.011		3.46	19.032		5.15
123	9.523		2.83	8.088		2.55	17.611		2.70

3 动态称重系统的现场实测及对比

3.1 现场实测情况

为进一步验证所研发的动态称重系统的实测效

(2)采集各传感器首波到达之前一定时间的应变信号,其平均值作为对该车轮称重的基准应变,认为称重板在车轮载通过期间其温度不变,消除了温度对应变测量的影响。

(3)实时处理通过车辆的时间、车速、轮重、轴重、轴间距等信息。

(4)自纠错功能,当某个传感器出现故障时,自动报警,并利用插值技术重新计算应变输出。

2.6 车辆速度和前后轴间距的测量

称重式(2)表明,车辆的行驶速度也参与轮载的计算,对其准确测量十分必要。系统将 2 块称重板分别安装在行车道上的左右两侧,行车方向间距为 1 m。由左右侧车轮分别通过称重板的时间差计算得车辆速度,为提高计算精度,对解调仪系统时间按微秒级读取。

由测得的车辆速度和车辆前后轮轴通过称重板的时间差,可计算得出车辆前后轮轴的间距。

2.7 称重系统的验证与标定

分别对称重板和光纤光栅传感器组成的组装件进行静力性能和疲劳性能的试验,验证了系统的线性度、稳定性和可靠性^[14]。

将安装在现场的称重系统,分别利用经过地磅称量得轴重的小客车和货车进行现场实测对比,以检验系统的精度。表 1 和下页表 2 分别为小客车和货车进行现场实测结果,下页表 3 为美国 ASTM 标准委员会所制定的称重系统误差标准^[3]。对比结果表明,实测结果的误差均满足 ASTM E1318 标准的要求,且称量误差与车辆速度不存在相关性,所研制的称重系统可满足现场实测要求。

果,在广东虎门渡口东引道上埋设了该动态称重系统,系统的现场实测工作照如下页图 7 所示,同时在该称重系统的前方 30 m 处安装了一套 HI-TDX 商用动态称重系统,以作对比。

表 2 货车的实测结果对比
Tab. 2 Comparison of loads of trucks

车速/ (km·h ⁻¹)	前轴重			后轴重			整车重		
	测量值/kN	真实值/kN	误差/%	测量值/kN	真实值/kN	误差/%	测量值/kN	真实值/kN	误差/%
15	46.966	45.9	2.32	112.07	111.8	0.25	159.04	157.7	0.85
38	44.696		2.62	106.30		4.84	151.08		4.20
56	44.954		2.06	109.61		1.91	154.62		1.95
75	45.233		1.45	113.34		1.38	158.58		0.56
88	51.283		1.00	110.78		0.91	162.06		2.77
97	46.576		1.47	102.33		8.43	148.95		5.55
110	46.054		0.34	99.88		10.60	145.94		7.46

表 3 WIM 系统性能的 ASTM E1318 标准
Tab. 3 Specifications of WIM in ASTM E1318

类别	精度(置信度 95%)			
	I 类/%	II 类/%	III 类/%	IV 类/kg
				荷载值≥
轮载荷	±25		±20	2 300±100
轴载荷	±20	±30	±15	5 400±200
轴组荷载	±15	±20	±10	11 300±500
总量	±10	±15	±6	27 200±1 100
备注	固定式系统,用于交通数据 采集,适用车速 16~113 km/h	移动式系统,用于交通数据 采集,适用车速 16~113 km/h	用于测重站,用以识别可能的超重车辆,辅助实施限重法规,适用车速 24~80 km/h	用于测重站,用以识别超重车辆实施限重法规,适用车速 0~16 km/h

利用该两称重系统在现场连续 7 d 进行车辆的动态称重,共得到约 6×10⁴ 部车辆的相关信息。



图 7 动态称重系统的现场测试实景
Fig. 7 Site view of WIM testing on-site

3.2 实测结果对比

由于上述 2 套动态称重系统的现场测试结果均存在一定的误差,不存在一个真实值来进行误差评价。事实上,分析单个轮荷载或车辆重的意义不大,对汽车荷载的研究都是在大量的观测的基础上,采取概率统计技术进行处理的。因此,对这 2 套系统的观测值的对比,主要从测试结果的概率统计的角度进行。

由数理统计理论知,2 个样本之间的统计对比可分为正态分布与非正态分布 2 个不同情形。对于正态分布的情形可对 2 个样本的均值和方差的相等

性进行检验。对于非正态分布,由于其概率分布函数未知,可从总体相等性角度检验样本的一致性。

对 2 个样本分别采用偏峰检验法由样本的偏度和峰度统计量进行检验,结果表明均不服从正态分布。于是采用秩和检验法对两称重系统的实测结果进行总体相等性检验。

所谓的秩就是实测值由小到大排列成序后某个观测值的次序号数。将 2 个样本混合在一起后,寻找任意 1 个样本各观测值在混合样本中的秩,这些秩的累加起来得到 1 个量 T ,称之为秩和。当样本足够大时,有统计量^[15-16]

$$T^* = \frac{T - n(2n + 1)/2}{\sqrt{n^2(2n + 1)}} \rightarrow N(0, 1)$$

(3)

式中: n 为样本容量; T^* 为统计量; T 为秩的累加量; $N(0, 1)$ 为标准正态分布。

式(3)表明,当样本量足够大时,统计量 T^* 服从正态分布。按照假设检验理论,假定两样本的分布是相等的,在显著性水平 $\alpha=0.01$ 下,得到统计量 T^* 拒绝域的临界值 $u_{1-\alpha/2}=2.576$ 。

秩和检验法结果表明,2 套系统实测结果的统计量 T^* 为 2.089,小于拒绝域临界值,可以接受检验的假设条件,认为这 2 套系统实测结果的总体分

布是相等的。本文所研制的光纤动态称重系统与商用的动态称重系统对汽车荷载的称量效果一样。

4 结 语

(1)利用光纤 Bragg 光栅传感器研制一套能够满足实测、具有一定精度的弯板式高速动态称重系统。能够在不停车的条件下实时测试得公路上自由行驶车辆的轴重、总重、轴间距和行驶速度等参数,为桥梁车辆荷载研究提供必要手段,同时为光纤光栅传感技术在桥梁工程中的应用,提供了新思路。

(2)所研制的高速动态车辆称重系统需要进一步实测研究,考察系统的长期耐久性和稳定性,以及多车道多系统车辆荷载的识别等复杂情形。

参考文献:

References:

- [1] 陈荫三. 运用经济杆杆长效治理超载超限运输[J]. 中国公路学报, 2004, 17(2): 94-99.
CHEN Yin-san. Long-term effective solution to the overload transportation with economic lever[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(2): 94-99. (in Chinese)
- [2] 李忠奎, 荣朝和. 治理公路超载超限运输的长效机制和对策研究[J]. 中国公路学报, 2005, 18(4): 96-99.
LI Zhong-kui, RONG Chao-he. Research on long-term solution mechanism and counter-measure to overload and oversize transportation of highway[J]. 中国公路学报, 2005, 18(4): 96-99. (in Chinese)
- [3] ASTM Committee. Standard specification for highway weight-in-motion(WIM) systems with user requirements and Test Method[S].
- [4] 陈琦. 车辆动态称重系统研究现状[J]. 筑路机械与施工机械化, 2009, 26(3): 77-80.
CHEN Qi. Study on current situation of dynamic weighing system of vehicle[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2009, 26(3): 77-80. (in Chinese)
- [5] 贺曙新. 车辆动态称重技术的历史、现状与展望[J]. 中外公路, 2004, 24(6): 104-108.
HE Shu-xin. History, present situation and perspective of WIM[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2004, 24(6): 104-108. (in Chinese)
- [6] 罗晓光. 光纤光栅高速动态称重系统的研发[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
LUO Xiao-guang. Development of high speed WIM based on FBG[D]. Changsha: Central South University, 2009. (in Chinese)
- [7] Wang K. A fiber-optic weigh-in-motion system based on fiber Bragg grating technologies[D]. Hudson; Stevens Institute of Technology, 2005.
- [8] 张静. 动态称重的技术经济分析[J]. 中国交通信息产业, 2003(5): 45-48.
ZHANG Jing. Technical and economic analysis on WIM[J]. China ITS Journal, 2003(5): 45-48.
- [9] 解建光, 王秋桐, 刘树龙, 等. 光纤 Bragg 光栅监测沥青混凝土应变试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2011, 31(3): 17-20, 50.
XIE Jian-guang, WANG Qiu-tong, LIU Shu-long, et al. Experimental study on strain monitoring of asphalt concrete using FBG: Fiber Bragg Grating[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(3): 17-20, 50. (in Chinese)
- [10] Kersey A D. Multiplexed interferometric fiber sensors [C]//IEEE. Proceedings of the Seventh International Conference on Optical Fiber sensors, Sydney: IEEE, 1990: 313-319.
- [11] 周道武. 动态称重技术若干问题研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2001.
ZHOU Dao-wu. Study on some problems of WIM[D]. Xi'an: Northwest Polytechnical University, 2001. (in Chinese)
- [12] 梁晨, 王国林, 伍建军, 等. 载重子午线轮胎接地几何特征研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 2007, 37(1): 55-56.
LIANG Chen, WANG Guo-lin, WU Jian-jun, et al. Study on tire-ground geometry-character of TBR tire [J]. Tractor & Farm Transporter, 2007, 37(1): 55-56. (in Chinese)
- [13] 广东交通集团检测中心. 广东省主要高速公路交通流量及轴载抽样调查报告[R]. 广州: 广东交通集团检测中心, 2007.
Testing center of guangdong provincial communication group. Sampling investigation report on vehicle flow and axis load of main Freeway of Guangdong[R]. Guangzhou: Testing Center of Guangdong Provincial Communication Group, 2007. (in Chinese)
- [14] 郭双全. 光纤 Bragg 光栅传感技术在动态称重中的应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
GUO Shuang-quan. Application of WIM based on FBG[D]. Changsha: Chentral South University, 2009. (in Chinese)
- [15] 庄楚强, 吴亚森. 应用数理统计基础[M]. 2 版. 广州: 华南理工大学出版社, 2002.
ZHUANG Chu-qiang, WU Ya-sen. Foundation of applied mathematical statistics[M]. 2nd ed, Guangzhou: South China University of Technology Press, 2004. (in Chinese)
- [16] 王强. 基于轮轴特征的公路桥梁荷载模型研究[D]. 福州: 福州大学, 2010.
WANG Qiang. Study on live load model for highway bridges based on the characters of wheel axles[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2010. (in Chinese)