

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2022.04.004

粘贴应变式车载称质量系统

温辉,李磅礴

(上海理工大学机械工程学院,上海 200093)

摘要:为提高车载称质量系统的效率及可靠性,课题组设计了一种方便安装和便于应用的粘贴应变式车载称质量系统。基于应变片原理和惠斯顿电桥理论,课题组选定合适的应变片并设计了应变片贴片工艺;借助粘贴在汽车钢板弹簧上的应变片,通过钢板弹簧悬架系统的变形获得承受的载荷。此外还提出一种多次标定方案,该方案将各板簧采集到的应变(电信号)与货车的总载质量联系起来。结果表明:该系统不仅具有可靠、便捷等特点,还能有效提高交通称质量的效率。该系统能改善车载称质量效率低的情况,优化交通称质量系统。

关键词:车载称质量;应变片;粘贴;惠斯顿电桥理论;多次标定

中图分类号:TH715.1 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2022)04-0018-08

Paste Strain Type Vehicle Weighing System

WEN Hui, LI Bangbang

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to improve the efficiency and reliability of the vehicle-mounted weighing system, a paste strain-type vehicle-mounted weighing system that is easy to install and apply was designed. Based on the strain gauge principle and the Wheatstone bridge theory, the appropriate strain gauge was selected and the strain gauge patch process was designed. With the help of the strain gauge sticking on the automobile leaf spring, the load received was obtained by the deformation of the leaf spring suspension system. In addition, a multiple calibration scheme was proposed, which linked the strain (electrical signal) collected by each leaf spring with the total load of the truck. The results show that the system not only has the characteristics of reliability and convenience, but also can effectively improve the efficiency of traffic weighing. This system can improve the low efficiency of vehicle weighing and optimize the traffic weighing system.

Keywords: vehicle weighing; strain gauge; paste; Wheatstone bridge theory; multiple calibrations

车载称质量系统是车辆安全治理和管理中重要的一环,该系统具有高效性、实时性和便捷性的优点。在车辆的行驶过程中,整车的受力及载荷的变化是不规律的,因此车载称质量系统的设计具有一定的复杂性。

从我国的公路、水路、铁路和航空运输来看,公路货运占有主导地位。为了追求经济效益,有些货车公司和车主安全意识不强,存在“病”车上路,违规驾驶和超载的情况。在全国范围内,每年仅汽车超载造成的交通事故和道路破坏,经济损失就高达数十亿元人民币,因此要引起重视并加强监管^[1-3]。

车载称质量系统大致可分为2种:静态车载称质量和动态车载称质量。静态车载称质量是通过安装定点称量台(站),将车辆停靠在称量台(站)进行称量的一种方法。车辆动态称质量是在非停车状态下的一种称质量,具有省时、高效等一些特点^[4-5]。正因为如此,全球在一些经济发达地区非常重视动态车载称质量技术,并推广应用。目前的动态车载称质量的方法大致可以分为^[6-10]:①补偿法;②ADV法、DV法和V法;③位移积分法;④专家系统;⑤神经网络法;⑥参数估计法。

收稿日期:2022-01-16;修回日期:2022-05-20

第一作者简介:温辉(1997),男,江西赣州人,硕士研究生,主要研究方向为振动可靠性、机床振动模态等。E-mail:1146866171@qq.com

汽车悬架系统是每辆车必不可少的装置,传递作用在车轮和车架之间的力,缓冲由不平路面传给车架或车身的冲击力以减少振动。基于此,课题组采用有限元方法,考虑汽车悬架结构并结合惠斯顿电桥理论,设计了一种粘贴应变式车载称质量系统。而钢板弹簧是国内载货汽车的主要悬架系统,所以只要测得钢板弹簧的受力便可得出被测载荷。钢板弹簧的变形量很微小,并且安装于货车的不同部位,因此课题组提出了通过电阻应变片来测量板簧变形,并且采用多个含电阻应变片测量装置进行共同测量,从而实现数据的准确性。这样,车辆载荷与汽车悬架以及称质量传感器之间联系起来,构成了一个动态车载称质量系统。在设计完成粘贴应变式车载称质量系统整体结构之后还对对称质量的标定方案进行分析,并提出一种多次车载称质量标定方案。

1 钢板弹簧的分析

粘贴应变式车载称质量系统是在对汽车悬架中钢板弹簧变形量的测量基础上建立的。因此,在对粘贴应变式车载称质量系统进行设计以及称质量标定之前,必须考虑钢板弹簧悬架系统的结构、钢板弹簧的接触受力以及钢板弹簧变形量与应力之间的关系。

1.1 钢板弹簧的结构分析

汽车上使用多片钢板弹簧悬架系统通常由宽度相等、长度渐变的多片钢板弹簧组合而成。钢板弹簧叶片数量可以根据不同的汽车、不同运载量以及不同的用途而定,本研究以含7片叶片的钢板弹簧为例进行分析。多叶片钢板弹簧的总成如图1所示。

图1中多叶片钢板弹簧的模型是在非受力状态下的位置,当钢板弹簧受到纵向载荷时将发生挠曲变

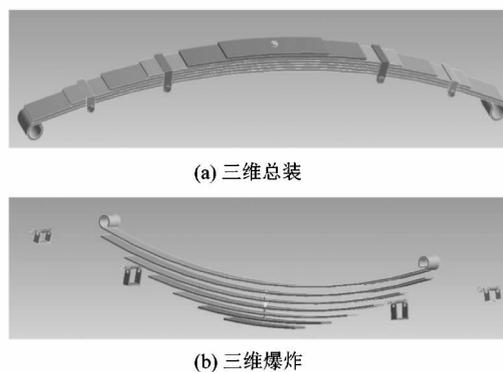


图1 多叶片钢板弹簧的总成

Figure 1 Multi-leaf leaf spring assembly

形。完整分析钢板弹簧的变形所需的边界条件是不同的力、压力、速度、支承和约束的条件集合。常态下钢板弹簧施加适量等效的纵向载荷,当弯曲变形达到水平位置则为最大挠度位置^[11-12],即为承载的极限状态。下文均在板簧极限状态范围内进行有限元分析。

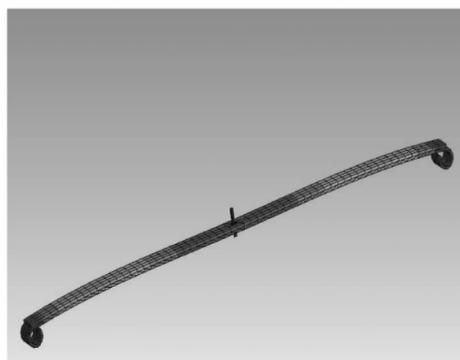
1.2 钢板弹簧载荷-形变分析

利用 ANSYS Workbench 对 2 片及 7 片的钢板弹簧进行载荷-形变静力分析,以及对 7 片的钢板弹簧进行载荷-形变 LS-DYNA 动力分析。

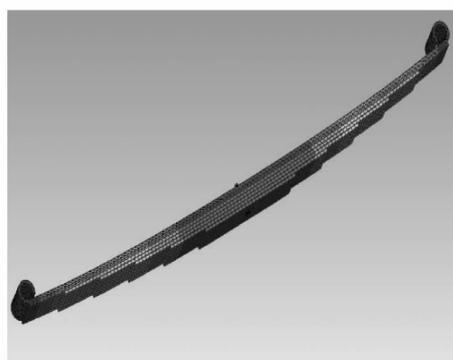
如图2所示,通过对2片及7片的钢板弹簧进行了 ANSYS 静力学分析,以及对钢板弹簧进行 LS-DYNA 动力学验证,实验结果均说明:钢板弹簧的纵向形变和钢板弹簧受力始终呈线性关系^{[13]87}。

1.3 整车中钢板弹簧载荷-形变分析

在实际情况下,货物在货车上的位置是随机的,并且有时装载的货物可能集中放在某个部位,这都将导致受力的不同。利用 ANSYS Workbench 对在整车中钢板弹簧进行载荷-形变分析,分别对车辆货箱前端部



(a) 2片钢板弹簧静力分析



(b) 7片钢板弹簧静力分析

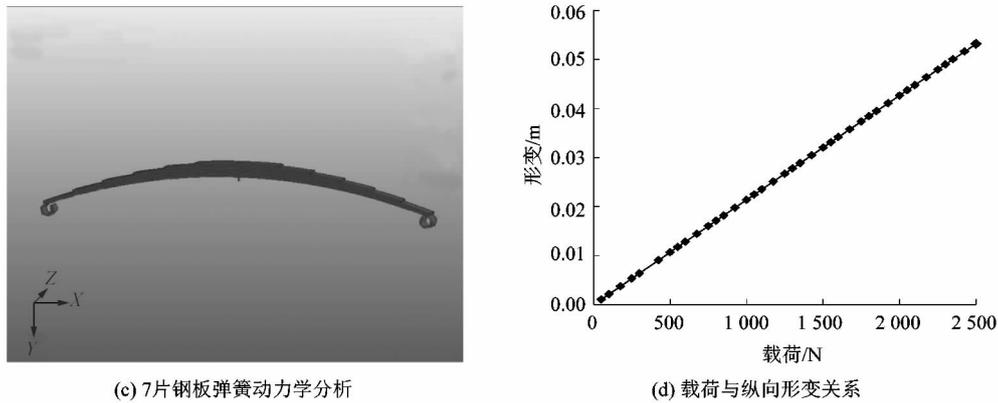


图2 钢板弹簧载荷-形变分析

Figure 2 Load-deformation analysis of leaf springs

位、中间部位和后端部位施加局部载荷以及对货箱整体施加均布载荷、随机载荷,对钢板弹簧纵向形变和受力进行仿真分析。

如图3所示,对整车在不同部位以及随机局部受载情况下的钢板弹簧载荷与形变的关系进行了分析。实验结果均说明:在整车中钢板弹簧的钢板弹簧纵向形变和钢板弹簧受力始终呈线性关系,与受力的位置无关。

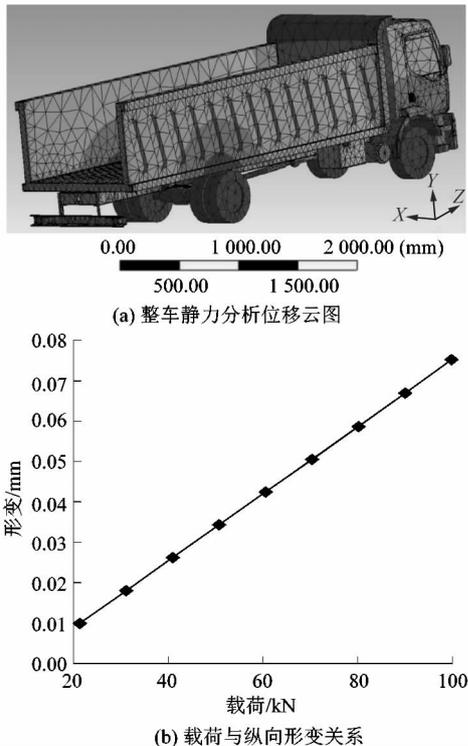


图3 整车中钢板弹簧载荷-形变分析

Figure 3 Load-deformation analysis of leaf springs in vehicle

2 粘贴应变片测量方案

由于钢板弹簧载荷与形变成线性关系,因此只需测量出钢板弹簧的形变量便可对汽车载荷与钢板弹簧形变之间的关系进行标定,从而得出货车的载荷。在测量形变的诸多方法之中,通过电阻应变片测量物体的形变以及应力是在实验中运用最多和最广泛的一种方法。通过电阻应变片测量形变的原理如下:首先选定合适的应变片;然后将选定的电阻应变片通过一定的方法进行安装,根据设计好的电路(常用惠斯顿电桥电路)使其粘贴在被测物体的表面;由于电阻应变片粘贴在被测物体表面,被测物体发生形变时,电阻应变片也随之发生形变,从而导致电阻应变片的阻值发生改变;因为电阻阻值的改变,电路中的电流电压也随之发生变化,测量出电流电压的变化从而转换求出被测物体形变^[14-16]。通过这种方法可以将被测物体的形变量转化为桥式电路中的电流改变量,并且当形变量很小时,电路中电量变化也很小,这时可以采用放大电路对电量进行放大,从而对输出的数据进行处理得出所需要的测量值。

2.1 应变片测量电路设计

设计采用直流恒压电桥电路(即惠斯顿恒压电桥)。但在实际测量中,为克服零点漂移的问题,可在电路中串接零点漂移补偿电阻 R_s 来进行补偿;同理,对于电路中应变电阻阻值不同的问题则可以采用在电路中串联一个温度系数极低的平衡电阻 R_t 来进行补偿。直流恒压电桥电路中各桥臂的电阻阻值分别为

R_1, R_2, R_3 和 R_4 , 各桥臂分别接入的是电阻应变片^{[13]84}。补偿电路如图4所示。

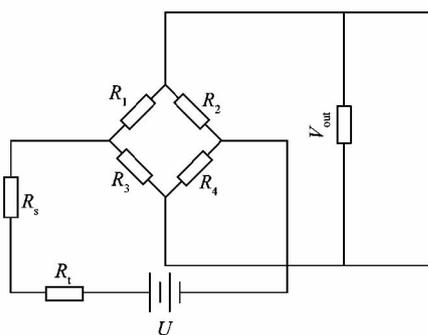


图4 带补偿的惠斯顿电桥电路

Figure 4 Wheatstone bridge circuit with compensation

2.2 粘贴应变片选型与粘贴

课题组设计的车载称质量系统粘贴于汽车悬架上,因此其工作温度为常温,所以选用的电阻应变片为常温应变片,其工作温度范围为: $-30 \sim +80 \text{ }^\circ\text{C}$ 。因为是动态车载称质量系统,对钢板弹簧应变的动态测量需要有快速的响应频率;又因为钢板弹簧受载波动频率高,因此所选的电阻应变片应具有较高的疲劳寿命。综上,疲劳寿命高和频率响应快的金属箔式应变片符合设计要求。如图5所示为车载称质量系统中使用的箔式全桥电阻应变片。

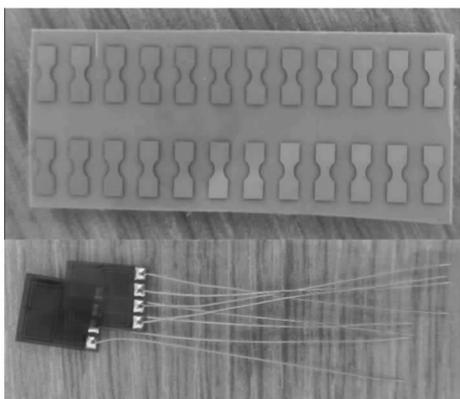


图5 箔式全桥电阻应变片

Figure 5 Foil full bridge resistance strain gauge

所选应变片型号参数:类型为箔式全桥电阻应变片;电阻值为 $(350.0 \pm 17.5) \Omega$;灵敏系数为 2.110 ± 0.021 ;温度范围为 $-30 \sim +80 \text{ }^\circ\text{C}$;应变极限为2%。

2.2.1 电阻应变片粘贴位置的确定

为了对钢板弹簧形变进行精确的测量,电阻应变片的贴片位置应选择钢板弹簧形变较大的区域。因此,选择将电阻应变片粘贴在带有卷耳的全长钢板弹簧叶片上^[17]。

在确定了电阻应变片粘贴位置后,我们通过对如图6所示的钢板弹簧纵向形变与贴片位置的变化曲线分析可知,钢板弹簧中部位置的形变量最大,电阻应变片应该贴在中部。实际上在钢板弹簧中心处有盖板而无法贴片,因此贴片时在避开盖板后应尽量靠近钢板弹簧中部。

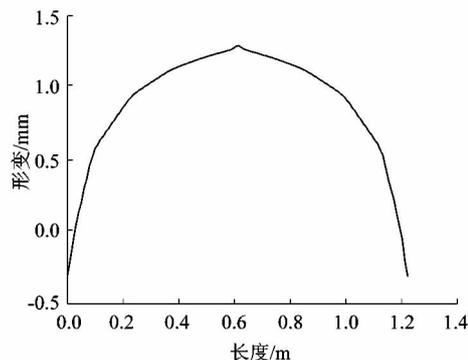


图6 钢板弹簧纵向形变随贴片位置变化曲线

Figure 6 Variation curve of longitudinal deformation with patch position of leaf spring

2.2.2 电阻应变片交叉贴片

在一些大型货车之中,汽车悬架系统非常庞大,且拥有多个钢板弹簧结构,可以采用交叉贴片的方法减少电阻应变片贴片的数量。

根据如图7所示的交叉贴片方案,当只贴1,3,6和8这四个位置时,车辆总载质量等于这四个位置读数的2倍。通过该方法可以减少应变片贴片的数量,达到提高经济效益的目的。

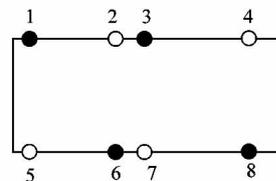


图7 交叉贴片示意图

Figure 7 Cross-paste schematic

2.2.3 电阻应变片贴片工艺

课题组选用粘贴法对应变片进行贴片。应变片贴片工艺详细操作如下^[18-19]：

1) 应变片的预处理。将选定好的应变片进行初步检查,主要是对阻值进行检测;再对应变片表面进行清洁处理,即采用无水乙醇对应变片表面进行擦拭,擦拭完后烘干备用。

2) 钢板弹簧贴片处的表面处理。为了使应变片粘贴更加牢固,须对试件贴片处表面进行预处理,且处理面积要大于应变片面积的3~5倍。首先,用砂纸打磨试件表面,打磨方向与贴片的方向成45°角;然后再用蘸有无水乙醇的脱脂棉球对其擦拭,并且擦拭时最好沿单一方向进行擦拭,多次擦拭直至脱脂棉球表面再无污渍;最后烘干即可。

3) 底层处理。在应变片粘贴之前,在钢板弹簧试件表面涂抹一层约为1.5倍应变片面积大小的底胶;底胶一般采用相同的粘贴剂,涂抹时胶水薄且均匀;最后再进行热固化处理。

4) 应变片的粘贴。首先在处理好的试件表面和应变片的底层涂上粘贴剂,晾干至粘贴剂开始略微发黏;然后将应变片准确地贴于试件表面,用手指轻轻按压,将里面的气泡以及多余的粘贴剂排出,使应变片和被测件完全粘合。

5) 固化处理。采用502快干胶对粘贴好的应变片进行固化,虽然使用502快干胶固化后粘贴疲劳寿命会有所下降,但是可以有效地减少零点漂移的现象,使测量结果更加稳定。

6) 粘贴质量的检查。在完成固化之后,应对应变片粘贴质量进行检查。为了测量结果的准确性,应变片粘贴后阻值变化不能超过0.5Ω。

7) 连接导线-组桥。在完成应变片的粘贴之后可以通过锡焊的方式将应变片的引线与导线焊接在一起,组成测量需要的桥式电路;然后再用胶布将导线等固定。

在安装好应变片之后,为了使工作更加可靠,在保证高精度情况下长时间运行,可以在应变片上涂一层保护层来进行防护,如石蜡、松香和黄油的混合剂。

3 车载称质量标定方案

3.1 标定的理论分析

在完成贴片后,要实现从应变片形变导致电阻值变化引发电信号的输出到钢板弹簧载荷的过程,必须建立一个准确合理的标定方案对系统测量输出值进行标定,从而达到精确测量的效果。

应变片标定的目的是建立应变读数 ε (电信号)与板簧载荷 F 的线性关系,建立线性关系至少需要2个坐标点,有2种做法。

1) 称质量1次。空载时读取应变读数 ε^0 ,给定载荷 F^1 获得应变读数 ε^1 ,然后采集器内部通过编程可获得式(1):

$$F = \varepsilon \frac{F^1}{\varepsilon^1 - \varepsilon^0} - \frac{\varepsilon^0 F^1}{\varepsilon^1 - \varepsilon^0} \quad (1)$$

2) 称质量2次。给定2个载荷 F^1 和 F^2 、获得2个应变读数 ε^1 和 ε^2 ,然后采集器内部通过编程可获得式(2):

$$F = \varepsilon \frac{F^2 - F^1}{\varepsilon^2 - \varepsilon^1} - \frac{\varepsilon^1 F^2 + \varepsilon^2 F^1}{\varepsilon^2 - \varepsilon^1} \quad (2)$$

由式(1)、(2)可知,不论哪种做法,标定时必须知道各板簧的载荷。标定过程中若不考虑各板簧载荷,而仅考虑总载荷,那么一旦货物重心位置与标定时重心位置不同,则测得结果必然有误。

3.1.1 2轴货车标定理论分析

图8所示为2轴货车力学模型。其中2轴是指汽车的承重轴,可以根据轴距以及载荷的位置直接计算得到前后钢板弹簧载荷如下:

$$\left. \begin{aligned} F_A &= \frac{G}{2} \left(1 - \frac{l}{a}\right); \\ F_B &= \frac{Gl}{2a}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

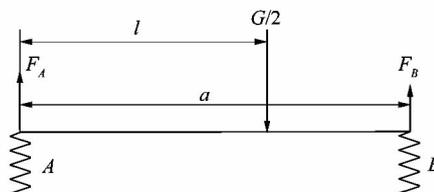


图8 2轴货车力学模型

Figure 8 Two-axle truck mechanical model

3.1.2 3轴货车标定理论分析

图9所示为3轴货车受力示意。货物重力为 G , 重心到 A 轴的距离为 l , 重力载荷在车厢宽度方向上分布均匀, A, B 和 C 轴板簧刚度分别为 k_A, k_B 和 k_C , 计算 A, B 和 C 轴上的载荷。

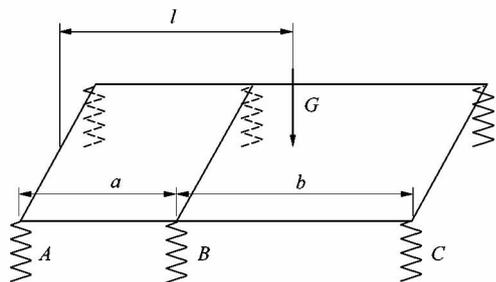


图9 3轴货车受力示意
Figure 9 Schematic diagram of force of three-axle truck

由于不考虑货物在车宽方向上的不均匀分布, 因而可将原问题简化为如图10所示的力学模型。

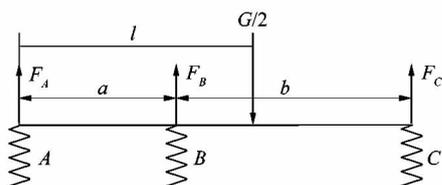


图10 3轴货车受力分析
Figure 10 Force analysis of three-axle truck

根据受力分析, 可得:

$$F_A + F_B + F_C - \frac{G}{2} = 0; \quad (4)$$

$$F_B a + F_C (a + b) - \frac{G}{2} l = 0. \quad (5)$$

由式(4)和(5)可知, 该问题有3个未知数, 但是只能列2个平衡方程, 因此需要补充几何方程。如图11所示, 在受力变形后, 车厢地板保持为直线(视车厢底板为刚体), 因此可得:

$$\frac{\Delta y_B - \Delta y_A}{a} = \frac{\Delta y_C - \Delta y_A}{a + b}. \quad (6)$$

已知 k_A, k_B 和 k_C , 则可得:

$$\frac{F_B/k_B - F_A/k_A}{a} = \frac{F_C/k_C - F_A/k_A}{a + b}. \quad (7)$$

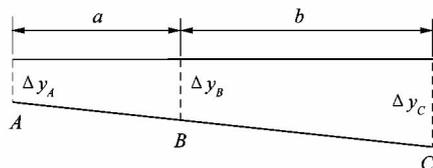


图11 几何协调条件

Figure 11 Geometric coordination condition

将式(4)~(7)联立求解, 可得:

$$\left. \begin{aligned} F_A &= \frac{G[(a^2 + b^2 + 2ab - al - bl)k_A k_C + (ab - bl)k_A k_B]}{2[(a^2 + b^2 + 2ab)k_A k_C + abk_A k_B + abk_B k_C]}; \\ F_B &= \frac{G[(a^2 + ab - al)k_B k_C + bl k_A k_B]}{2[(a^2 + b^2 + 2ab)k_A k_C + abk_A k_B + abk_B k_C]}; \\ F_C &= \frac{G[(al + bl)k_A k_C + (al - a^2)k_B k_C]}{2[(a^2 + b^2 + 2ab)k_A k_C + abk_A k_B + abk_B k_C]}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

若假设 $k_A = k_B = k_C$, 则可得:

$$\left. \begin{aligned} F_A &= \frac{G(a^2 + 3ab - al + b^2 - 2bl)}{2(a^2 + 4ab + b^2)}; \\ F_B &= \frac{G(a^2 - al + bl + ab)}{2(a^2 + 4ab + b^2)}; \\ F_C &= \frac{G(2al - a^2 + bl)}{2(a^2 + 4ab + b^2)}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

由式(8)~(9)可知: 货物放置的位置对各钢板弹簧的载荷有着显著的影响, 但无论货物如何放置, 各钢板弹簧载荷之和总是等于货物质量。若要计算各板簧荷载, 必须知道各种不同车型的轴距(可联系货车厂家或测量获得, 然后根据车型建立数据库)以及板簧刚度(可联系货车厂家获得, 或者根据车型做实验获得并建立数据库)。

3.1.3 标定方案

1) 对于双轴货车, 由式(3)可知不存在标定困难。定制容量为 500~1 000 L(具体所需容量需要通过实验确定)的可折叠的便携式塑料桶, 筒身印有注水刻度线, 桶底印有“十字”, 方便用户测量筒体重心至前轴或后轴间距。水桶放置于车辆宽度方向的对称轴线上, 注水后作为标定基准物。

2) 对于图9所示3轴货车, 其后部2轴距离(B 轴, C 轴)板簧若相同, 则 $k_B = k_C$ 。另外, 由于 B 轴和 C 轴距离较近, 可近似认为 B 轴载荷和 C 轴载荷相同,

即 $F_B = F_C$, 则可得:

$$\left. \begin{aligned} F_A &= \frac{2Ga + Gb - 2Gl}{4a + 2b}; \\ F_B &= \frac{Gl}{4a + 2b}; \\ F_C &= \frac{Gl}{4a + 2b} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

当 $F_B = F_C$ 时, 车厢载力学模型如图 12 所示。

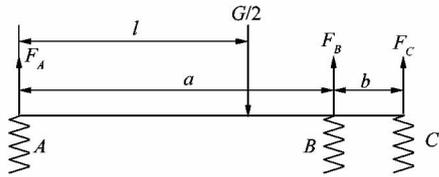


图 12 $F_B = F_C$ 时 3 轴货车力学模型

Figure 12 Three-axle truck mechanics model at $F_B = F_C$

3) 其他特殊类型货车, 可参照 2) 所述方法, 在一定假设的基础上, 得到板簧载荷近似计算公式。

4) 对于其他类型的多轴货车, 若无法获得板簧刚度信息且无法简化计算, 则可通过逐个标定的方法进行标定。例如, 对于 A 轴板簧, 将水桶放置于 A 轴上方, 此时 A 轴板簧承担主要荷载, 可近似认为 A 轴板簧载荷等于水桶重力的一半, 据此进行标定。A 轴板簧标定后进一步标定其他各轴板簧。

3.2 多次称质量标定方案

通过对车载称质量标定的理论分析, 为了能够精确地测量出汽车的载质量, 这里提出一种多次称质量标定的方案。

如图 13 所示, 板簧载荷 F 和采集器读数 D 关系如下:

$$F = k(D - D^0). \quad (11)$$

式中: D^0 表示空载时的采集器读数, k 为标定系数。

对于如图 14 所示的 3 轴货车力学模型, 由竖直方向力的平衡方程可知:

$$F_A + F_B + F_C - \frac{G}{2} = 0. \quad (12)$$

称质量 3 次, 货物重心位置任意, 重力分别记为 G_1, G_2 和 G_3 ; 3 板簧 A, B 和 C 标定系数分别记为 k_A, k_B 和 k_C 。可得线性方程组, 其中未知量为 k_A, k_B 和 k_C 。可解条件是 G_1, G_2 和 G_3 重心位置两两不重合。

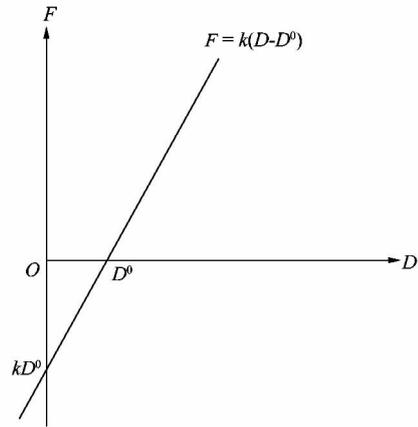


图 13 板簧载荷与采集器读数关系

Figure 13 Relationship between leaf spring load and collector reading

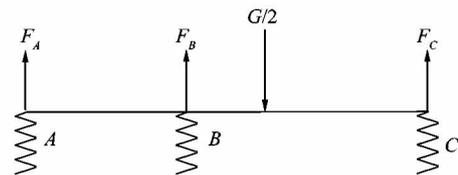


图 14 3 轴货车力学模型

Figure 14 Three-axle truck mechanical model

$$\begin{bmatrix} D_A^1 - D_A^0 & D_B^1 - D_B^0 & D_C^1 - D_C^0 \\ D_A^2 - D_A^0 & D_B^2 - D_B^0 & D_C^2 - D_C^0 \\ D_A^3 - D_A^0 & D_B^3 - D_B^0 & D_C^3 - D_C^0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_A \\ k_B \\ k_C \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{G_1}{2} \\ \frac{G_2}{2} \\ \frac{G_3}{2} \end{Bmatrix}. \quad (13)$$

对于轴数为 N 的货车, 其 N 元线性方程组的表达式为:

$$\begin{bmatrix} D_A^1 - D_A^0 & \cdots & D_N^1 - D_N^0 \\ \cdots & \ddots & \cdots \\ D_A^N - D_A^0 & \cdots & D_N^N - D_N^0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_A \\ \vdots \\ k_N \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{G_1}{2} \\ \vdots \\ \frac{G_N}{2} \end{Bmatrix}. \quad (14)$$

在实际测量之中, 为了减少应变片贴片数量简化操作, 可采用如图 7 所示的交叉贴片的方法, 此时多次称质量标定方案仍然可行。此时安装有 4 个应变采集器, 其对应读数分别为 D_1, D_2, D_3 和 D_4 , 对应的标定系数为 k_1, k_2, k_3 和 k_4 。对货车称质量 4 次, 则可列方程

组式(15),同理,解线性方程组可得 k_1, k_2, k_3 和 k_4 ,由此可确定采集器读数与钢板弹簧载荷之间关系:

$$\left. \begin{aligned} k_1 D_1 + k_2 D_2 + k_3 D_3 + k_4 D_4 &= G_1; \\ k_1 D'_1 + k_2 D'_2 + k_3 D'_3 + k_4 D'_4 &= G_1; \\ k_1 D''_1 + k_2 D''_2 + k_3 D''_3 + k_4 D''_4 &= G_1; \\ k_1 D'''_1 + k_2 D'''_2 + k_3 D'''_3 + k_4 D'''_4 &= G_1. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

3.3 多次标定结果分析

通过对一辆常规半挂车实验可求解标定系数 k_1, k_2, k_3 和 k_4 ,根据采集器读数 D_1, D_2, D_3 和 D_4 便可求得货车的载质量。我们采用多次标定方案对其进行标定,标定次数与相对误差如图15所示。由图可知,标定最大误差仅2%左右,具有良好的标定效果。

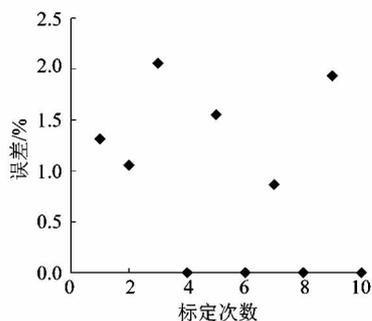


图15 标定次数-误差曲线图

Figure 15 Graph of number of calibrations and error

4 结语

针对常规车载称质量系统效率低、系统庞大的问题,课题组设计了一种粘贴应变式车载称质量系统,且提出了一套完整的多次车载称质量标定的方案。对实验结果多次标定分析表明:该车载称质量系统精度高且标定结果稳定,能有效改善目前车载称质量状况,在车载称质量方面有广泛应用前景。

参考文献:

[1] 王静. 加强大型货运车辆安全管理和治理的探究[J]. 发展, 2017(6): 85-86.

- [2] 宋广全, 宋梅英. 浅谈超限运输的危害和限制方法[J]. 河南交通科技, 1999, 19(5): 46-49.
- [3] 张雨, 袁明新, 吴文兵. 车辆动态称重仪使用现状及其轴重信号分析[J]. 交通科学与工程, 2003, 19(1): 16.
- [4] 樊丽辉. 车辆动态称重技术[J]. 公路与汽运, 1998(2): 5-7.
- [5] 李冰莹. 车辆动态称重技术现状及典型动态称重方法的探讨[J]. 衡器, 2011, 40(11): 27-28.
- [6] 白瑞林, 李军, 白瑞祥, 等. 基于神经网络技术的动态定量称重控制方法的研究[J]. 自动化仪表, 2000(7): 8-10.
- [7] 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.
- [8] 王班, 王欣杰, 叶国云, 等. 高位拣选叉车液压式自主称重系统及其应用[J]. 机电工程, 2021, 38(12): 1636-1640.
- [9] KENYON C H. Practical on-board weigh in-motion system for commercial vehicles[J]. Mobile Robots XI and Automated Vehicle Control Systems, 1997, 2903: 156-161.
- [10] 蒋婷. 电子分析天平动态称量算法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015: 10-16.
- [11] ARORA V K, AGGARWAL M L, BHUSHAN G. A comparative study of CAE and experimental results of leaf springs in automotive vehicles international [J]. Journal of Engineering Science and Technology, 2011, 3(9): 6856-6866.
- [12] KUMAR K, AGGARWAL M L. A finite element approach for analysis of a multi leaf spring using CAE tools[J]. Research Journal of Recent Science, 2012, 1(2): 92-96.
- [13] 兰青松, 任向龙, 李阳, 等. 货运车辆车载动态称重的同步采集系统[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2018(5): 83-87.
- [14] 付研字. 轨道车辆动态称重数据处理算法研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2009: 5-7.
- [15] 邓李斌. 动态车辆称重检定系统[D]. 天津: 天津大学, 2013: 1-4.
- [16] 雷浩, 袁强, 金晓, 等. 船舶主推进装置轴功率测试方法研究与分析[J]. 造船技术, 2016(4): 19-23.
- [17] 杨飞, 陈广华, 马应林, 等. 基于粘贴式应变称重传感器的设计[J]. 机械与电子, 2010(2): 13-16.
- [18] 颜重光. 电阻应变片的粘贴技术[J]. 自动化仪表, 1985(7): 13-18.
- [19] 董伟. 电阻应变片粘贴技巧[J]. 山西建筑, 2011, 37(28): 46-47.

