

称重板式轴重秤的偏载误差及其补偿方法

中国运载火箭技术研究院第 702 研究所 刘九卿

【摘要】公路车辆轴载质量限制研究，已成为一项倍受世界各国普遍关注的技术性和政策性问题。检测监督轴载质量超限用轴重秤研制水平的高低，将对一个国家的交通运输产生重大影响。本文在介绍国内外应用较多的测量弯曲应力的弯板式、测量剪切应力的剪板式轴重秤结构、工作原理的基础上，分析了两种板式弹性元件的横向灵敏度和偏载误差，并以剪切板式轴重秤为例介绍了偏载误差的补偿原理和补偿工艺。

【关键词】轴重秤；弯板弹性元件；剪板弹性元件；轴载质量；偏载误差；偏载误差补偿

一、称重板式轴重秤的结构与工作原理

称重板式轴重秤有两种结构形式。其一是弯板式轴重秤，它由弯板弹性元件、承载框架、端部压板、紧固螺钉等构成。其核心部件弯板弹性元件是在一块长条形合金钢板上，靠近两个长边的一定宽度（实为端部支撑）处对称的加工出两条长槽，从纵向形成两端固支中心承受集中载荷的弯曲梁。沿纵向在两个槽内的多个截面上，粘贴单轴电阻应变计，经串联后与固定电阻组成惠斯通半桥电路。每个粘贴电阻应变计的截面都形成一个承受集中载荷的弯曲梁，即整个弯板弹性元件可看作是由 n 根平行排列的弯曲梁构成，弯板弹性元件结构如图 1 所示。

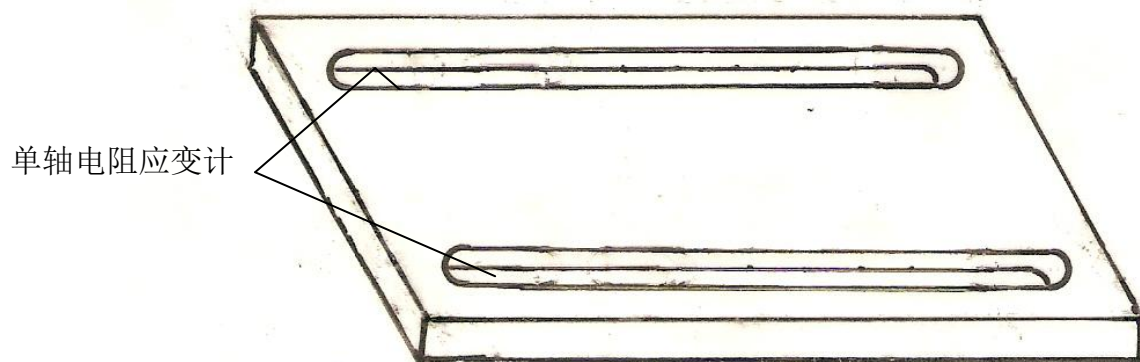


图 1 弯板弹性元件结构简图

其二是剪板式轴重秤，其核心部件是剪板弹性元件，它的毛坯为冷拉加工固熔热处理人工时效状态的 2A12 硬铝合金板，在板的底面沿长度方向加工出中间

凹陷区，则在长度方向的两边自然形成了有足够面积的承力支撑区，使硬铝合金板成为板桥形秤体。再在靠近两个支撑的凹陷区域内，平行于支撑对称的加工出一定长度的若干个长槽，使其在纵向形成若干根与支撑相垂直的剪切梁，共同承受车轮停在或驶过测量区产生的静态或动态载荷，整个剪板弹性元件的力学模型就可以看作是由 n 根平行排列的剪切梁构成。在剪切梁的两个侧面（即槽的边缘）粘贴两组单剪切型电阻应变计，分别测量正、负主应变。将各剪切梁两边应变方向相同的电阻应变计串联在一起，按相对桥臂应变方向相同、相邻桥臂应变方向相反的原则组成惠斯通全桥电路，即可完成车辆轴轴质量检测任务。其剪板弹性元件结构与单剪切电阻应变计粘贴位置如图 2 所示。

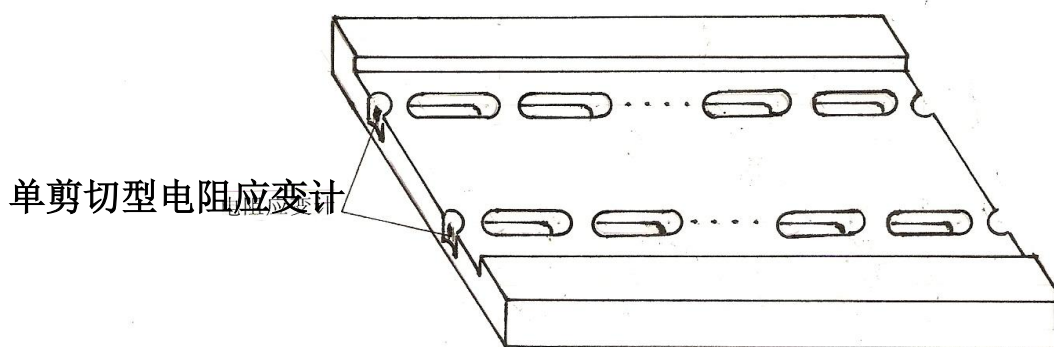


图 2 剪板弹性元件结构与电阻应变计位置图

弯板弹性元件测量的是车轮压在各弯曲梁上的弯曲应力，从对一根弯曲梁 2 片电阻应变计到多根梁同一长槽内 n 片电阻应变计的分析，均得出在弯板弹性元件测量区间内任何位置加载，总输出基本保持不变，即加载点变化对输出灵敏度无影响。当载重车辆的车轮移动到弯板弹性元件测量区的任何截面（例如 X_1 截面）时，弯曲梁的弯矩 M_{x1} 达到最大值，其截面系数、弯曲应力、弯曲应变为：

$$W = \frac{bh^2}{6} \quad \sigma_{x1} = \frac{M_{x1}}{W} = \frac{6M_{x1}}{bh^2} \quad \varepsilon_{x1} = \frac{\sigma_{x1}}{E} = \frac{6M_{x1}}{bh^2 E}$$

剪板弹性元件测量的是车轮压在应变区时，板体顶部与底部之间当时的剪应力引起的拉、压成双的主应力，不对同一时刻产生的弯曲应力作出反应，与弯板弹性元件相同，其加载点变化对输出灵敏度也无影响。由材料力学知在纯剪切应力状态下，与中性轴成 45° 方向的拉压成双的主应力等于最大剪应力，主应变等于最大剪应变的一半，只有中性轴处的应力单元是纯剪切状态才有此关系，即

$$\sigma_{45^{\circ}} = \pm \tau_{\max} \quad \varepsilon_{45^{\circ}} = \pm \frac{\gamma_{\max}}{2}$$

由于结构与制造工艺水平的提高，使弯板和剪板式轴重秤的计量准确度、允许车辆行驶速度和工作寿命都有较大提高，因此能在公路车辆轴载质量超限检测监督系统中独领风骚，得到较普遍的应用。

二、剪板式轴重秤的偏载误差与补偿方法

剪板弹性元件测量的是车轮压在应变区时，板体顶部与底部之间当时的剪应力，不对同一时刻产生的弯曲应力作出反应，保证了应变区应力的单一性和均匀性，是较理想的弹性元件受载状态。众所周知，剪应力是不能测量的，但它能产生与中性轴成 45° 方向的拉、压成双的主应力，这正是组成惠斯通电桥电路所需要的。

理想的剪板式轴重秤，要求在较长范围内的任何位置加载时，电桥的总输出无变化，即要求在公路车辆轴载质量计量中，为保证多次计量的重复性，要求剪板弹性元件在有限的长度范围内，必须具有良好的横向灵敏度一致性。由于剪板弹性元件的横向尺寸不可能无限长，当车轮压在称重板两端的剪切应变梁上时，由于两端相对中心承载区刚度较小，剪切梁的变形较大，应变值超比例的增加，必然产生偏载误差，达不到横向灵敏度一致性的要求。为保证剪板弹性元件具有较好的横向灵敏度一致性，必须进行偏载误差补偿。

称重板式轴重秤的偏载误差补偿，主要有软件补偿、机械补偿和电路补偿三种方法。

软件补偿法：因为各加载点位置的变化是总输出变化的直接原因，只要能够识别每次车辆通过的加载位置，就可以通过软件修正的方法调整输出值，使其满足偏载误差要求。补偿的关键问题是必须正确识别车辆每次加载的位置，并针对多个加载位置进行标定修正，最后根据对各标定位置点之间的数据，插值计算出整个长度方向上的修正系数。此方法在车辆位置识别、试验测试、修正系数计算等比较繁琐，费时费力应用较少。

机械补偿法：剪板弹性元件横向两端部的边界效应，是两端剪切应变梁电阻应变计应变值急剧增加的根本原因。只要在剪板弹性元件设计时提高两端边界部分承载剪切梁的刚度，即增加剪切应变梁的剪切截面系数，就可以降低应变值，

克服边界效应影响，减少偏载误差。如果两端边界过度的刚硬，会降低剪板弹性元件的综合性能。为得到较好的偏载误差补偿效果，必须通过有限元计算分析和实际测量，才能确定合理的边界刚度，不仅计算分析工作量大，而且容易受机械加工精度影响，很难保证一次就使偏载误差满足补偿精度要求，也很少采用。

电路补偿法：剪板弹性元件，实际上就是一个整体结构的剪切式称重传感器，制造过程与称重传感器制造工艺完全相同。称重传感器的零点温度误差、零点输出偏差、灵敏度温度误差、灵敏度一致性偏差，都是通过对电桥电路的补偿与调整使其达到准确度等级要求。同样剪板弹性元件的偏载误差，也可以通过电桥电路的补偿与调整来实现，即在剪板弹性元件端部各剪切应变梁的电阻应变计上，并联一个偏载误差补偿电阻 R_c 来调整电桥电路的总输出。

三、剪板式轴重秤电路补偿原理及补偿工艺

假设剪板弹性元件为无限长，根据弹性体的连续性理论，可推导出同一载荷作用在长度方向上不同加载点时，电桥的输出不变，因此可以认为剪板弹性元件的横向灵敏度一致。即

$$U_0 = \frac{2U_i}{n} K \sum_{i=1}^n \varepsilon_i$$

式中： U_0 —电桥输出电压；

U_i —电桥输入电压；

ε_i —各个剪切应变梁粘贴的单剪切型电阻应变计；

K —单剪切型电阻应变计的灵敏系数；

n —剪板弹性元件的剪切梁数量。

由于剪板弹性元件纵向不可能无限长，因此存在端部效应影响，当载荷施加于端部时，必然产生偏载误差。利用电桥电路补偿偏载误差的原理是：当同一个载荷分别施加在剪切梁的中点和两端边界点时，电桥桥臂中 ΔR_{11} 、 ΔR_{1n} 、 ΔR_{21} 、 ΔR_{2n} 、 ΔR_{31} 、 ΔR_{3n} 、 ΔR_{41} 、 ΔR_{4n} 的绝对变化量由于 ε_1 、 ε_n 的急剧增加而大幅度变化，使输出 U_0 改变，而产生较大的偏载误差。如果在剪板弹性元件两个端部剪切梁上，应变值急剧变化的电阻应变计 R_{11} 、 R_{1n} 、 R_{21} 、 R_{2n} 、 R_{31} 、 R_{3n} 、 R_{41} 、 R_{4n} 上，分别并联一个高精度金属膜电阻 R_c ，就可以减小该电阻应变计对

整个电桥电路总输出的影响，从而减小了偏载误差，达到补偿剪板弹性元件横向灵敏度的目的。偏载误差补偿电阻 R_C 在电桥桥臂的位置如图 3 所示。

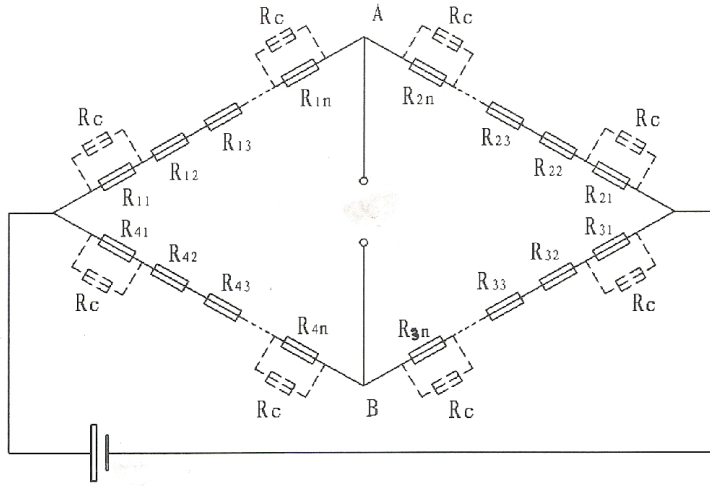


图 3 偏载误差补偿电阻 R_C 在电桥桥臂的位置图

剪板弹性元件偏载误差补偿工艺为：

1.将剪板弹性元件两个端部剪切应变梁上各 4 片电阻应变计 R_{11} 、 R_{1n} 、 R_{21} 、 R_{2n} 、 R_{31} 、 R_{3n} 、 R_{41} 、 R_{4n} 焊接上一组并联引线，并从剪板弹性元件的出线口引出备用；

2.把剪板弹性元件平置于专用的大台面叠加式力标准机承载平台上，将焊接有并联引线的 8 片电阻应变计，分别连接一个可变电阻箱；

3.预载试验，在剪板弹性元件横向长度的中点，施加额定载荷三次，每次加载后都返回零点；

4.加载测试，在中间点对 0~额定载荷 6 个级别进行加载，并记录各点输出示值。采用同样方法对剪板弹性元件的两个端点，进行 6 个级别的加载测试，对比中间与两端加载点的测试数据，判断偏载误差大小；

5.再对两个端点按上述程序逐级加载进行测试、补偿，对偏载误差较大的剪切应变梁上的电阻应变计，通过电阻箱改变并联电阻值，直到偏载误差符合要求为止，记录各并联补偿电阻值，并将相同电阻值的高精度金属膜电阻焊入对应的电阻应变计处，即完成了偏载误差补偿。

6.偏载误差验证测试，在剪板弹性元件中间点对0~额定载荷6个级别进行加载，并记录各点输出示值。再分别对两个端点，进行同样级别的加载测试，对比中间与两端加载点的测试数据，判断偏载误差补偿是否合格。如果偏载误差不符合要求，需重复上述补偿程序，进行再一次偏载误差补偿与调整。

试验证明，绝大多数剪板弹性元件的偏载误差都是一次补偿成功。此补偿方法完全适用于弯板弹性元件。

参考文献

【1】谷建斌. 板式称重传感器偏载的优化补偿及其应用[c], 全国称重技术研讨会论文集(第6集), 2007年4月。

【2】刘九卿. 集成化剪切、弯曲板式公路车辆静动态电子轴重秤, 2013年中国衡器协会东莞高级研修班PPT课件。