

弯板式轴重秤的结构设计与理论计算

中国运载火箭技术研究院第 702 研究所 刘九卿

[摘要] 公路车辆轴载质量超重已成为世界难题，对此世界各国都是通过限定车辆轴载质量来控制。国内外监督车辆轴载质量超重用的集成化剪切式或弯曲式称重板（Weighpad）就是诸多静、动态公路车辆轴重秤的一种。为此本文介绍了应用较多的集成化弯板式轴重秤的结构、特点与力学原理；通过建立数学模型对全桥、半桥弯板弹性元件进行受力分析，推导出理论计算公式；分析了横向灵敏度和偏载误差，介绍了偏载误差补偿方法。并以最大承载能力为 15t 的弯板弹性元件为例进行结构设计及计算。

[关键词] 集成化；弯板式轴重秤；弯板弹性元件；结构设计；受力分析；理论计算

一、概述

公路车辆轴载质量超重已成为世界难题，当公路车辆轴载质量超过经济平衡点后，公路的建设和养护费用急剧增加。美国各州公路工作者协会（AAHSA）经试验研究提出车辆轴载质量对公路路面破坏的“4 次方法则”即

$$D = \left(\frac{W}{W_0} \right)^4$$

式中：D—相对于标准轴载质量，车辆实际轴载质量对公路的破坏作用系数；

W—车辆的实际轴载质量；

W_0 —车辆的标准轴载质量。

如果公路车辆设计轴载质量 $W_0 = 10t$ ，当行驶车辆的实际轴载质量 $W = 20t$ 时，对公路破坏作用系数 $D = 16$ ，其破坏作用是非常严重的，将使公路的路面出现龟裂、车辙、塌陷，较大幅度的增加建设、养护、维修费用。对此世界各国都是通过限制公路车辆的轴载质量来控制。英国、德国、荷兰、巴西等国限定轴载质量为 10t，法国、西班牙、伊朗等国限定轴载质量为 13t，我国限定轴载质量为 10t。公路车辆轴载质量限制研究已成为一项倍受世界各国和地区以及一些国际组织普遍关注的技术性和政策性问题。规定车辆轴载质量的大小，检测监督轴载质量限制水平的高低，将对一个国家的交通运输乃至整个国民经济产生重大影响。

我国是公路和高速公路里程均居世界第一的国家，由于公路和高速公路行驶的一些车辆轴载质量超重，特别是私自改装车辆严重超重，每年用于公路和高速公路的维修费用高达数亿元，因此必须有效的监督和控制行驶在公路和高速公路上车辆的轴载质量。与世界各国相同，我国也是采用轴计

量方式检测监督公路车辆的轴载质量。

在公路车辆轴载质量检测监督装备的研制过程中，国内外工程技术人员一致认为传统的零部件组装式承载器结构，已满足不了动态轴重秤的要求，必须寻求另外一种发展方向，走出一条新路，这就是变零部件组装式承载器结构为集成化整体式承载器结构。近年来，我国许多电子衡器制造企业投入大量人力、物力研究设计出高度低、重量轻、刚度大、响应快的集成化剪切式或弯曲式轴重秤。关于集成化剪切式轴重秤，笔者在“集成化电子衡器的结构设计与理论计算”（“衡器”杂志 2002 年增刊）中，对剪切板弹性元件的结构、特点、力学模型、应变区最大剪应力与最大弯曲应力、应变截面上拉应力与压应力的合力等都进行了分析与计算。本文重点介绍集成化弯板式轴重秤的结构、特点与力学原理，在受力分析的基础上确立数学模型，推导弯板弹性元件的理论计算公式。

二、全桥弯板式轴重秤

集成化全桥弯板式轴重秤是由弯板弹性元件、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缘处，对称的加工出四条应变槽，从纵向形成两端固支中心承受集中载荷的弯曲梁。单轴型电阻应变计以每四片为一组，沿纵向分别粘贴在四个槽内的多个截面上。每个粘贴电阻应变计的截面都形成一个两端固支中心承受集中载荷的弯曲梁，即整个弯板弹性元件可看作是 n 根平行排列的弯曲梁。公路车辆行驶在弯板弹性元件测量区域内任意弯曲截面，检测的轮载质量不变，其力学原理是每个弯曲梁上的四片电阻应变计的总应变值 ($\sum \varepsilon_i$) 在测量区域内保持不变。弯板式弹性元件结构如图 1 所示。

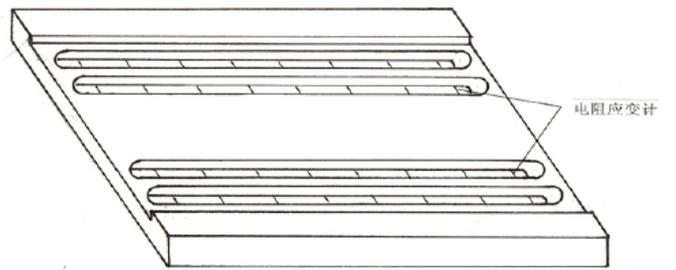


图 1 全桥弯板弹性元件结构简图

1. 力学模型

由于弯板弹性元件的两个端部支撑通过压板用螺钉紧固在框架上，当框架放入公路基础坑内时，要求严格调整框架的位置和水平度（保证框架上表面与车道路面在同一水平面上），再用水泥堵好框架内侧的缝隙，接着将按一定比例调好的环氧树脂填充料灌满框架底部的缝隙。因此可将弯板弹性元件看成是由 n 根平行排列的中心承受集中载荷、两端固支的弯曲梁组成。为便于分析和简化计算，取出其中一根弯曲梁进行分析，它的受力形式为中间受一集中载荷 $P_1 = P/n$ 的双端固支梁。其力学模型如图 2 所示。

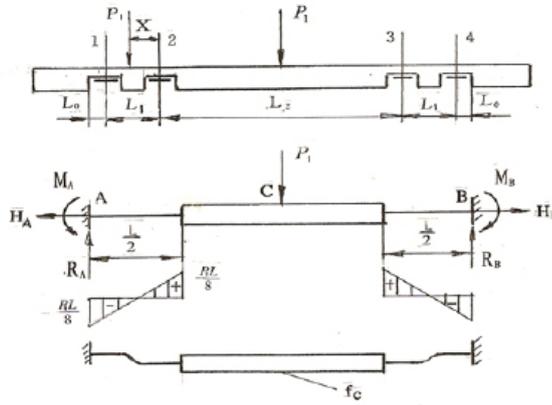


图 2 弯板弹性元件的力学模型

2. 支反力计算

双端固支梁共有 6 个未知反力，即水平反力 H_A 、 H_B ，支反力 R_A 、 R_B 和弯矩 M_A 、 M_B 。因为弯曲梁无水平方向（ X 方向）载荷作用，在小变形条件下，可忽略水平反力，即

$$\sum X = 0 \quad H_A = H_B = 0$$

由弯曲梁及载荷的对称性，可知

$$R_A = R_B \quad M_A = M_B$$

列弯曲梁垂直方向（ Y 方向）静力平衡方程，即

$$\sum Y = 0 \quad R_A + R_B - P_1 = 0$$

所以

$$R_A = R_B = \frac{P_1}{2}$$

还剩下一个未知反力 M_A 、 M_B ，因静力平衡方程已用尽，故为一次静不定。为方便计算，将其看作是中间受集中载荷 P_1 作用，双端分别受弯矩 M_A 、 M_B 作用的简支梁基本系统，其力学模型如图 3 所示。

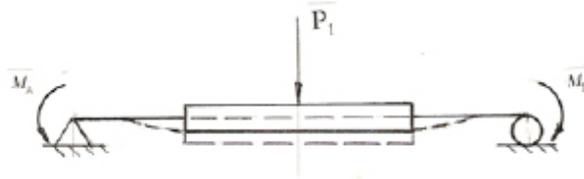


图 3 简支梁基本系统的力学模型

由变形相容条件 $\theta_A = 0$ $\theta_B = 0$

列补充方程

$$\frac{P_1 L^2}{16EJ} - \frac{M_A L}{3EJ} - \frac{M_B L}{6EJ} = 0$$

所以

$$M_A = M_B = \frac{P_1 L}{8}$$

梁的挠度为

$$f_c = \frac{P_1 L^3}{48EJ} - 2 \frac{M_A L^2}{16EJ} = \frac{P_1 L^3}{48EJ} - \frac{P_1 L}{8} \cdot \frac{L^2}{8EJ} = \frac{P_1 L^3}{48EJ} - \frac{P_1 L^3}{64EJ} = \frac{4P_1 L^3 - 3P_1 L^3}{192EJ} = \frac{P_1 L^3}{192EJ}$$

3. 载荷 P_1 位于不同位置各电阻应变计所在截面的弯矩计算

(1) 当载荷 P_1 位于应变截面 2、3 之间时，各电阻应变计所在截面的弯矩为

$$M_1 = R_A L_0 - M_A$$

$$M_2 = R_A (L_0 + L_1)$$

$$M_3 = R_B (L_0 + L_1) - M_B$$

$$M_4 = R_B L_0 - M_B$$

$$\text{则 } \sum M = M_2 - M_1 + M_3 - M_4$$

$$= R_A L_1 + R_B L_1 = \frac{P_1 L_1}{2} + \frac{P_1 L_1}{2} = P_1 L_1$$

(2) 当载荷 P_1 位于应变截面 1、4 之外时，例如在应变截面 4 之外，各电阻应变计所在截面上的弯矩为

$$M_1 = R_A L_0 - M_A$$

$$M_2 = R_A (L_0 + L_1) - M_A$$

$$M_3 = R_A (L_0 + L_1 + L_2) - M_A$$

$$M_4 = R_A (L_0 + L_1 + L_2) - M_A$$

$$\text{则 } \sum M = M_2 - M_1 + M_3 - M_4$$

$$= R_A L_1 - R_A L_1 = 0$$

(3) 当载荷 P_1 位于应变截面 1、2 或 3、4 之间时，例如在应变截面 1、2 之间，各电阻应变计所在截面上的弯矩为

$$M_1 = R_A L_0 - M_A$$

$$M_2 = R_A (L_0 + L_1) - M_A - P_1 X$$

$$M_3 = R_B (L_0 + L_1) - M_B$$

$$M_4 = R_B L_0 - M_B$$

$$\text{则 } \sum M = M_2 - M_1 + M_3 - M_4$$

$$\begin{aligned}
 &= R_A L_1 - P_1 X + R_B L_1 \\
 &= \frac{P_1 L_1}{2} - P_1 X + \frac{P_1 L_1}{2} = P_1 (L_1 - X)
 \end{aligned}$$

设各电阻应变计测得的应变分别为 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 、 ε_4

$$\text{则 } \varepsilon_i = \frac{M_i Y_1}{EJ} \quad (i = 1, 2, 3, 4)$$

$$\begin{aligned}
 \sum \varepsilon_i &= \varepsilon_2 - \varepsilon_1 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4 \\
 &= \frac{Y_1}{EJ} (M_2 - M_1 + M_3 - M_4) = \frac{Y_1}{EJ} \sum M
 \end{aligned}$$

式中 Y_1 为粘贴电阻应变计表面至中性轴的距离。

根据以上分析与计算结果，利用上式可以判断出：

当载荷 P_1 位于应变截面 1、4 之外时

$$\sum \varepsilon_i = 0$$

当载荷 P_1 位于应变截面 2、3 之间时

$$\sum \varepsilon_i = \frac{Y_1}{EJ} P_1 L_1$$

当载荷 P_1 位于应变截面 1、2 或 3、4 之间时

$$\sum \varepsilon_i = \frac{Y_1}{EJ} P_1 (L_1 - X)$$

由以上三式可以看出，当载荷 P_1 从弯板弹性元件的 A 处移动至 B 处时，

$\sum \varepsilon_i$ 的变化规律如图 4 所示。

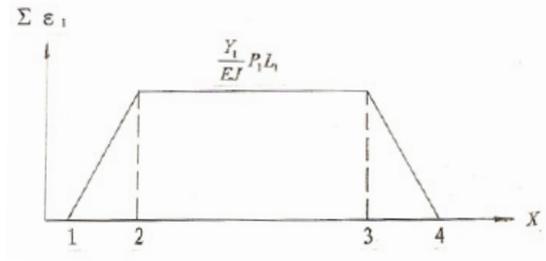


图 4 弯板弹性元件总应变的变化规律图

从对弯板弹性元件的受力和理论计算不难得出：

①当载荷 P_1 通过弯板弹性元件时，弯曲梁上 4 片电阻应变计输出的总应变值恒等于两个内侧电阻应变计的输出与两个外侧电阻应变计输出之差，即

$$\sum \varepsilon_i = (\varepsilon_2 + \varepsilon_3) - (\varepsilon_1 + \varepsilon_4)$$

②当载荷 P_1 从应变截面 2 移至应变截面 3 时， $\sum \varepsilon_i$ 为一常数，只要测得各电阻应变计在此段的输出值，就可准确的转换为所测量的载荷值。

尽管以上只是对一根弯曲梁的受力和理论计算，所得出的不变弯矩原理完全适用于整个弯板弹性元件。若弯板弹性元件沿长度方向由 n 根弯曲梁承受总载荷，则应变区每个长槽内均有 n 片电阻应变计，串联后构成惠斯通恒压电桥电路。假设弯板弹性元件为无限长，根据弹性体的连续性可推导出同一载荷作用在弯板弹性元件长度方向不同的加载点时，电桥的输出不变，可以认为弯板弹性元件的横向灵敏度一致，即

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

从对一根弯曲梁 4 片电阻应变计的分析到对多根梁同一长槽内 n 片电阻应变计的分析，均得出在弯板弹性元件内任何位置上加载，总输出基本保持不变，即弯板弹性元件的灵敏度对加载点的变化不敏感。但弯板弹性元件不可能无限长，因此存在端部效应，当载荷施加在端部时产生偏载误差，可以通过结构设计或电路补偿与调整加以修正。

全桥弯板弹性元件由于是通过四个应变槽形成弯曲梁的应变区，必然增加纵向长度，使其刚度减小，造成固有频率低，动态响应速度慢。克服这一缺点的有效方法是尽量减小弯板弹性元件的宽度，这样即可以增大弯板弹性元件的刚度提高动态响应速度，又使弯板弹性元件结构紧凑，同时改善了制造工艺性。在实际应用中多在弯板弹性元件上加工两条长槽，利用组合式电阻应变计或固定电阻，组成半桥测量电路，进行轮载、轴载质量计量。

三、半桥弯板式轴重秤

1. 半桥弯板式轴重秤结构特点

半桥弯板式轴重秤与全桥一样，其核心部件依然是弯板弹性元件，配以定位及固定框架、上部两侧压板和紧固螺钉。半桥弯板弹性元件结构与全桥弯板弹性元件结构基本相同，只是减少了两个应变槽。其特点是结构简单紧凑，高度低、重量轻；弯曲应变梁的宽度小，弯板的整体刚度大，固有频率高，动态响应快；抗冲击耐疲劳性能好，使用寿命长；无机械传动和相互摩擦部件，工作可靠性高、稳定性好；多层密封，除在长盲槽内用聚氨酯灌密封胶密封外，还将整个弯板弹性元件进行硫化橡胶密封，具有极高的防潮、防水、防盐雾、防腐蚀、防冻能力；路面基础浅，施工简便、快捷、成本较低，安装时只需在原有的路面上挖 10 ~ 12cm 深槽即可。

2. 半桥弯板弹性元件的设计与计算

半桥弯板弹性元件是在全桥弯板弹性元件的基础上，在两个支撑处各减少一个应变槽而形成的。其目的是减少弯曲应变梁的长度，增大弯板弹性元件的整体刚度，以提高固有频率和动态响应速度。其半桥弯板弹性元件结构简图和电阻应变计粘贴位置如图 5 所示。

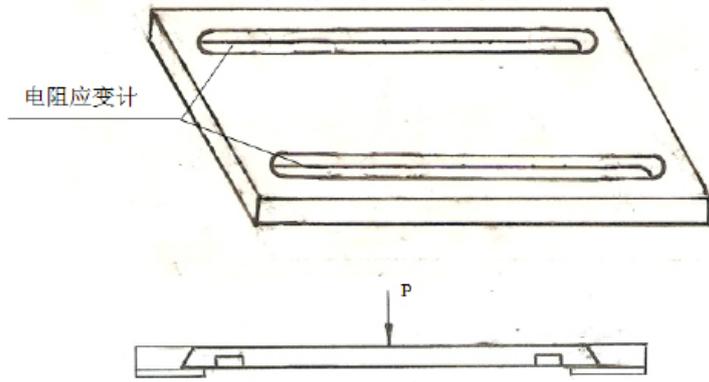


图 5 半桥弯板弹性元件结构简图

(1) 力学模型与理论计算

由于半桥弯板弹性元件的安装固定没有全桥弯板弹性元件要求严格，为便于分析，其力学模型可近似为两端简支，中间受一滚动载荷 P 作用的弯曲梁，测量车辆轴载质量引起的横向弯曲应变，其力学模型如图 6 所示。

为简化计算，可以不考虑挠度影响和沿纵向各片电阻应变计的不均匀性。

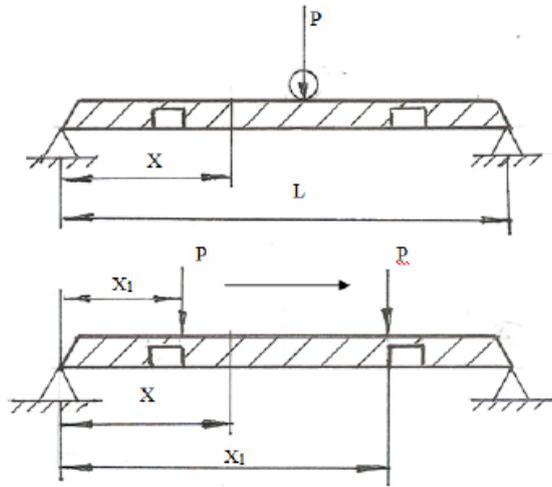


图 6 半桥弯板弹性元件力学模型

① 弯板弹性元件某一截面的剪力、弯矩方程

当载荷在截面以左 $x_1 \leq x$ 时

$$Q_x = P \frac{x_1}{L} \quad M_x = Px_1 \left(1 - \frac{x}{L} \right)$$

当载荷在截面以右 $x_1 \geq x$ 时

$$Q_x = P \left(1 - \frac{x_1}{L} \right) \quad M_x = Px \left(1 - \frac{x_1}{L} \right)$$

此时截面位置不变，载荷位置移动，即式中 x 为定值，剪力、弯矩为 x_1 的函数。

②长槽内应变区的弯矩计算

由上列弯矩方程可见，不论载荷是在截面以左 ($x_1 \leq x$)，还是在截面以右 ($x_1 \geq x$)，截面 x 的弯矩 M_x 均在载荷移动到 x 截面上达到最大值。其弯矩值为：

$$(M_x)_{\max} = Px \left(1 - \frac{x}{L}\right)$$

长槽内应变区 ($x=x_1$ 处) 的弯矩为：

$$M_{x_1} = Px_1 \left(1 - \frac{x_1}{L}\right)$$

③长槽内应变区的弯曲应力、应变计算

因为

$$W = \frac{bh^2}{6}$$

所以

$$\sigma_{x_1} = \frac{M_{x_1}}{W} = \frac{6M_{x_1}}{bh^2} \quad \varepsilon_{x_1} = \frac{\sigma_{x_1}}{E} = \frac{6M_{x_1}}{bh^2 E}$$

④最大弯矩

由

$$\frac{d(M_x)_{\max}}{dx} = P \left(1 - \frac{2x}{L}\right) = 0$$

所以

$$x = \frac{L}{2}$$

最大弯矩为：

$$M_{\max} = P \frac{L}{2} \left(1 - \frac{1}{2}\right) = \frac{PL}{4}$$

这时位置函数 x 既表示最大弯矩的截面位置，也表示载荷的作用位置。

⑤最大挠度

$$f = \frac{PL^3}{48EJ} = \frac{PL^3}{4Ebh^3}$$

⑥最大剪应力和最大正应力

最大剪应力发生在两边支撑与载荷间任一截面的中性层处

$$\tau_{\max} = \frac{3}{2} \cdot \frac{Q}{A} = \frac{3}{2} \cdot \frac{\frac{P}{n}}{bh} = \frac{3P}{2nbh}$$

最大正应力发生在梁中间截面的上、下边缘处：

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W} = \frac{\frac{PL}{4}}{\frac{bh^2}{6}} = \frac{3PL}{2bh^2}$$

两者比值：

$$\frac{\tau_{\max}}{\sigma_{\max}} = \frac{\frac{3P}{2nbh}}{\frac{3PL}{2bh^2}} = \frac{h}{nL}$$

对最大弯曲应力与最大剪切应力的分析比较可得出：

①由于弯板弹性元件的跨度比截面高度大得多，因此可以不考虑剪应力影响；

②在弯板弹性元件的两个应变槽内各粘贴多组单轴电阻应变计，只计算弯曲应变即可，多为双臂工作电桥，即半桥；

③公路车辆的轮胎作用在弯板弹性元件上，实际是一种不均匀的分布载荷。为了定性的分析弯板弹性元件的响应特性和简化计算，将弯板弹性元件的分布载荷简化为一个集中载荷 P 作用的简支梁，其中部挠度 f 最大。

3. 半桥弯板式轴重秤惠斯通电桥的灵敏度

惠斯通电桥的灵敏度，即为电桥的输出电压与被测应变在电桥一个桥臂上引起的电阻变化率之间的比值，称为电桥的灵敏度 S_u 。

$$S_u = \frac{\Delta U}{\frac{\Delta R}{R}} = \frac{\frac{U_0}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)}{\frac{\Delta R}{R}}$$

令

$$n = \frac{\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4}}{\frac{\Delta R}{R}}$$

则

$$S_u = n \frac{U_0}{4}$$

式中 n 为电桥的工作臂系数。

半桥弯板式弹性元件为双臂工作电桥（相邻桥臂或相对桥臂均可），以相对桥臂为例，电桥的 R_1 、 R_3 为工作桥臂，且有电阻增量 $\Delta R_1 = \Delta R$ 、 $\Delta R_3 = \Delta R$ ， R_2 、 R_4 桥臂为固定电阻 R ，其增量 $\Delta R_2 = \Delta R_4 = 0$ ，则电桥灵敏度为：

$$\Delta U_0 = \frac{U_0}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) = \frac{U_0}{4} \left(\frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta R}{R} \right) = 2 \left[\frac{U_0}{4} K \varepsilon \right]$$

半桥弯板式轴重秤的灵敏度是四臂工作电桥灵敏度 $4 \left[\frac{U_0}{4} K \varepsilon \right]$ 的 $1/2$ ，因此应变槽内的弯曲应变应控制在 1000×10^{-6} 以下。

4. 15t 半桥弯板弹性元件计算实例

载荷参数

设半桥弯板弹性元件承受集中载荷 $P=15000\text{kg}$

尺寸参数

弯板弹性元件长度 $b=1750\text{mm}$ 弯板弹性元件宽度 $L=508\text{mm}$

两个应变槽的跨度 $L_1=280\text{mm}$ 应变槽宽度 $L_2=20\text{mm}$

弯板弹性元件厚度 $H=20\text{mm}$ 应变槽处厚度 $h=15\text{mm}$

最大弯矩

$$M_{\max} = \frac{PL_1}{4} = \frac{15000 \times 280}{4} = 1050000 \text{kg} \cdot \text{mm}$$

断面系数

$$W = \frac{bh^2}{6} = \frac{1750 \times 15^2}{6} = 65625 \text{mm}^2$$

最大弯曲应力

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W} = \frac{1050000}{65625} = 16.000 \text{kg} / \text{mm}^2$$

最大弯曲应变

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\sigma_{\max}}{E} = \frac{16.000}{2.1 \times 10^4} = 761 \times 10^{-6}$$

弯板弹性元件灵敏度（相对臂工作电桥即半桥电路）

$$S = \frac{1}{2} K \varepsilon_{\max} \times 10^3 = \frac{1}{2} \times 2 \times 761 \times 10^{-6} \times 10^3 = 0.761 \text{mV} / \text{V}$$

最大挠度

$$f_{\max} = \frac{PL_1^3}{48EJ} = \frac{PL_1^3}{4Ebh^3} = \frac{15000 \times 280^3}{4 \times 2.1 \times 10^4 \times 1750 \times 15^3} = 0.66 \text{mm}$$

5. 半桥弯板式轴重秤电桥电路

为提高半桥弯板轴重秤的输出灵敏度，国外有的衡器制造企业研究试验采用高灵敏系数的半导体和镍箔电阻应变计。P型半导体电阻应变计的灵敏系数为 $67 \sim 177$ ，镍箔电阻应变计的灵敏系数为 $-20 \sim -12$ 。由于半导体电阻应变计灵敏系数的温度系数 $\rho = -0.33\% / ^\circ\text{C}$ ，电阻温度系数 $\phi = 0.2\% / ^\circ\text{C}$ ，给弯板弹性元件的补偿带来很大困难。负灵敏系数的镍箔电阻应变计，需要特殊定制，且温度系数也比较大，不但有一定的工艺难度，而且增加了成本，两个试验方案均被放弃。半桥弯板弹性元件应用较多的是单轴电阻应变计串联形成工作桥臂与固定的高精度金属膜电阻桥臂组成半桥电路，如图7所示。

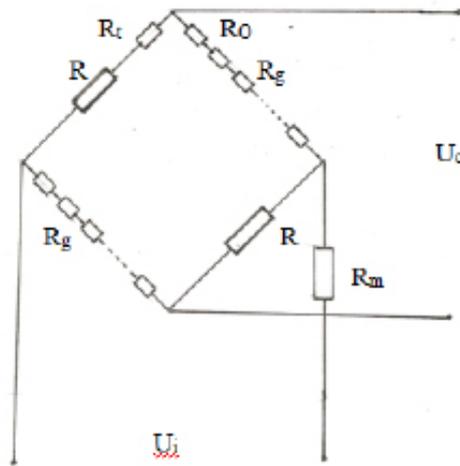


图7 双桥臂工作电桥图

R—桥臂工作电阻；

R_g —桥臂固定电阻；

R_0 —零点输出补偿电阻；

R_t —零点温度补偿电阻；

R_m —灵敏度温度补偿电阻。

6. 弯板式轴重秤的性能特点

①若弯板弹性元件沿长度方向由 n 根弯曲梁承受总的载荷，则应变区每个长槽内均有 n 片电阻应变计，串联后与固定金属膜电阻构成惠斯通恒压电桥电路，与应变式称重传感器相同，可通过电路补偿与调整提高计量性能。

②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，即灵敏度对加载点变化不敏感。

③假设弯板弹性元件为无限长，根据弹性体的连续性，可推导出同一载荷作用在弯板弹性元件长度方向上不同的加载点时，电桥的输出不变，因此可以认为弯板弹性元件的横向灵敏度一致，即

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

④由于弯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，可以通过结构设计、软件补偿或电桥电路补偿加以解决。

四、结束语

20世纪90年代初期，德国衡器专家认为在一些小型化、特种用途的电子衡器结构设计中，零部件组装式承载器结构已经走进了死胡同，几乎走到了尽头，必须创新设计理念才有出路。面对新的应用领域，要求设计人员在一些小型化、特种用途电子衡器的结构设计中，大胆寻求另外一种发展方向，即向着减小尺寸、减少零部件、节省空间、便于生产、降低成本的方向发展。

实现上述要求必须走出一条新路，即变零部件组装式承载器结构为集成化、整体式承载器结构。这种新的设计理念，首先在公路车辆静、动态电子轴重秤的研发与应用中得到充分体现。便携式静、动态公路车辆轴重秤结构改进与创新的发展历程，充分展示了这种新的设计理念：

20世纪60、70年代为零部件组装式承载器结构；

80年代为承载器与称重传感器一体化结构；

90年代为承载器、称重传感器、支撑集成为一块剪切或弯曲板的整体式结构；

21世纪将集成化剪切、弯曲型称重板用于公路车辆超限智能检测系统中。

其中，弯板式轴重秤虽然测量的是车轮压在弯板弹性元件上的弯曲应力，但在结构原理和组桥方法上保证了电阻应变计的总输出为一常数。由于结构设计技术的进步、制造工艺水平的提高，使弯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重超限高、低速检测监督系统中得到较普遍的应用。

【参考文献】

【1】德国 PAT 公司 . DAW100 型动态轮轴称重系统相关资料 ,1999 年。

【2】东莞市华兰海电子有限公司 . 弯板式静动态称重系统相关资料 ,2013 年。

【3】蔡德新、龙福密 . 弯板式称重传感器基本结构、性能及安装 [J], 《衡器》2010 年第 2 期。

【4】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。

【5】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。

作者简介：刘九卿（1937—），男、汉族，辽宁省海城市。中国运载火箭技术研究院第七〇二研究所研究员，享受国务院政府特殊津贴专家。现为中国衡器协会技术顾问，衡器技术专家委员会顾问，《衡器》杂志编委。编著《电阻应变式称重传感器》、《国家职业资格培训教程—称重传感器装配调试工》，在有关杂志上共发表学术论文 120 多篇。

（作者通讯地址：北京市丰台区桃源里小区 11 号楼 2 单元 6 号

邮政编码：100076）