

# 一种新型的十字梁传感器和三球模块

浙江南洋传感器制造有限公司 邓林祯，黄光明，孙亮

【摘要】 目前国内地磅所使用传感器的结构大多是从日本引进的带大球的桥式传感器，虽然结构相当的科学和经典，但体积较大，重量较重，为了方便安装与运输，同时也响应国家节能号召，南洋公司开发了一种全新的十字梁传感器和配套模块，通过大量的试验，在数据稳定速度，提高秤体分辨率，免四角修正等方面经受住了多个厂家的验证。

【关键词】 十字梁；三球模块；模锻

作为一个专业开发和生产传感器的厂家，我公司在和客户的交流中得知传统桥式传感器比较笨重，携带不方便，同时在使用中大球容易脱落等等问题，为了克服这些缺点，公司从2007年开始就进行了十字形传感器的试制和试验，经过多年的研究和努力，在结构、生产、工艺等方面都取得了显著进步。

本文主要从传感器的结构，配件的结构，传感器的各种试验数据来说明十字形传感器的特性。

十字梁传感器主要由弹性体，底板，连接螺丝等构成，因其俯视图像个“十”字，因而得名为十字梁传感器，如图1所示。

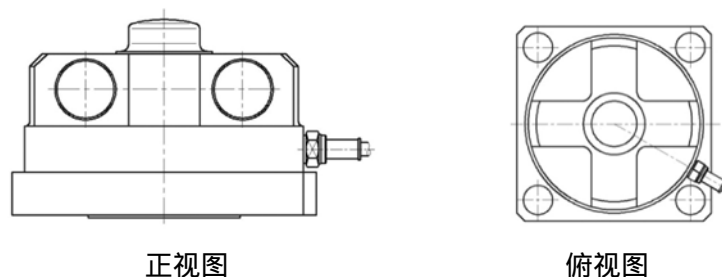


图1

## 一、灵敏度的计算

为了简化计算，十字梁传感器可看成由4组工字悬臂梁组成，如图2所示。

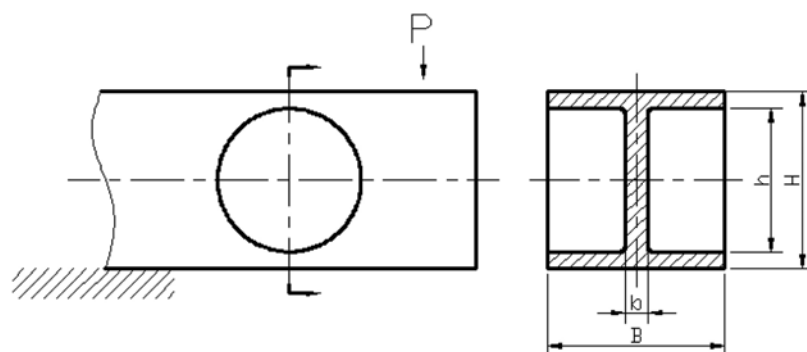


图2

工字截面剪切应力可用如拉夫斯基公示计算：

$$\tau = \frac{QS_y^*}{I_z b} \quad (1)$$

其中：

剪力

$Q=P/4$

$S_y^*$  剪切截面对中性轴的静矩

$S_y^*$  的计算

对图工字截面梁，可看成由三个矩形截面合成

对翼缘部分：

$$S_{y1}^* = A_1 \bar{y} = B \left( \frac{H-h}{2} \right) \frac{H+h}{4} = \frac{B(H^2 - h^2)}{8} \quad (2)$$

对腹板部分：

$$S_{y2}^* = A_2 \bar{y}_2 = b \left( \frac{h}{2} \right) \frac{h}{4} = \frac{bh^2}{8} \quad (3)$$

将(2)(3)代入下列公式得到：

$$S_y^* = S_{y1}^* + S_{y2}^* = \frac{B(H^2 - h^2) + bh^2}{8} \quad (4)$$

$I_z$  剪切截面对中性轴的惯性矩

对图工字截面梁，可看成由三个矩形截面合成

对翼缘部分：

$$I_{z1} = I_{z2} = \int_{\frac{h}{2}}^{\frac{H}{2}} B y^2 d_y = \frac{2}{3} B \left( \frac{H}{2} \right)^3 - \frac{2}{3} B \left( \frac{h}{2} \right)^3 = \frac{BH^3 - Bh^3}{24} \quad (5)$$

对腹板部分：

$$I_{z3} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} b y^2 d_y = \frac{bh^3}{12} \quad (6)$$

将(5)(6)代入下列公式得到：

$$I_z = I_{z1} + I_{z2} + I_{z3} = \frac{BH^3 - Bh^3 + bh^3}{12} \quad (7)$$

沿中性轴 45° 方向产生的变化符合纯剪切状态，所以有：

将(4)(7)代入(1)得到

$$\tau_{\max} = \frac{3P}{8b} \cdot \frac{B(H^2 - h^2) + bh^2}{B(H^3 - h^3) + bh^3} \quad (8)$$

$$\left. \begin{matrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{matrix} \right\} = \sigma_{45^\circ} = \tau_{\max} = \frac{3P}{8b} \cdot \frac{B(H^2 - h^2) + bh^2}{B(H^3 - h^3) + bh^3} \quad (9)$$

在剪切比例极限内，剪应力和剪应变服从剪切胡克定律：

$$\gamma_{\max} = \frac{\tau_{\max}}{G} \quad (10)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (11)$$

$$\left. \begin{matrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{matrix} \right\} = \varepsilon_{45^\circ} = \frac{\gamma_{\max}}{2} = \frac{\tau_{\max}}{2G} \quad (15)$$

将(9)(14)代入(15)后得到

$$\varepsilon_{45^\circ} = \frac{3(1+\mu)P}{8Eb} \cdot \frac{B(H^2 - h^2) + bh^2}{B(H^3 - h^3) + bh^3} \quad (16)$$

$$\text{传感器输出 } S = KU\varepsilon_{45^\circ} i = \frac{3(1+\mu)PKU}{8Eb} \cdot \frac{B(H^2 - h^2) + bh^2}{B(H^3 - h^3) + bh^3} \times 1000 \times i \quad (17)$$

其中 i 为经验系数，针对十字梁传感器，i=0.85

以一 30t 十字梁为例，预留灵敏度温度补偿量，分别取 B=36 (mm，如无特别说明，以下长度单位都为 mm)；b=10；H=44；h=28，将数据代入(17)得出 S=2.25mV/V。

## 二、弹性体的加工

由于十字梁传感器的结构相对比较复杂，如果采用传统加工方法则费工费料，缺乏经济性和批量加工实用性，为解决这个难题，浙江南洋传感器制造有限公司大胆启用新工艺，将模锻方法引入到传感器的加工，通过模具将棒料锻打出十字梁的毛胚（如图 3 所示）。



图 3

## 三、性能测试情况

地磅安装好后调试的关键过程就是角差的调整，引起角差的其中一个主要原因是各传感器的灵敏度不一致，而传感器灵敏度不一致的原因一般有两种，一是传感器出厂时的灵敏度不一致，二是安装时传感器不垂直，受力点不在中心位置等因素。

对于第一点，由于传感器测试设备精度的提高，作为传感器厂家在传感器出厂时达到一致的灵敏度是比较容易控制的，然而通过图一我们可以发现，十字梁传感器是由弹性体和底板通过螺栓连接组成，传感器厂家都知道，连接螺栓预紧力的大小会影响传感器的灵敏度，当安装时如果螺栓直接作用在底板上，会引起底板的变形，从而改变连接螺栓的预紧力，引

起传感器灵敏度的变化，通过大量的试验和反复的思考，引入过渡套，如图 4，顺利地解决了这一问题。

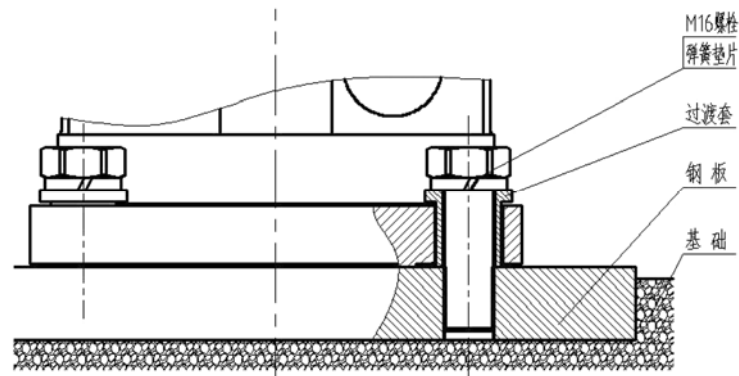


图 4

而对于第二点，跟基础、承载器、现场安装等一系列因素有关，并不太容易控制，为了能够得到比较理想的角差，这就要求传感器有较好的抗偏载能力和抗侧向能力。

十字梁传感器因其特殊的十字结构，偏载力和侧向力能够得到很好的消除，试验数据如下表格：

加载值(t)	正常测试			
	加载一	加载二	加载三	平均值
0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
5	0.34185	0.34179	0.34180	0.34181
10	0.68364	0.68357	0.68355	0.68359
15	1.02546	1.02539	1.02537	1.02541
20	1.36724	1.36716	1.36716	1.36719
25	1.70905	1.70898	1.70900	1.70901
30	2.05092	2.05083	2.05083	2.05086
25	1.70930	1.70922	1.70922	1.70925
20	1.36773	1.36766	1.36767	1.36769
15	1.02555	1.02548	1.02555	1.02553
10	0.68373	0.68365	0.68367	0.68368
5	0.34188	0.34181	0.34183	0.34184
0	0.00005	0.00002	-0.00003	0.00001

加载值(t)	偏心 4mm 测试			
	加载一	加载二	加载三	平均值
0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
5	0.34174	0.34189	0.34183	0.34182
10	0.68355	0.68368	0.68364	0.68362
15	1.02538	1.02540	1.02542	1.02540
20	1.36718	1.36721	1.36721	1.36720
25	1.70905	1.70906	1.70906	1.70906
30	2.05097	2.05098	2.05095	2.05097
25	1.70922	1.70926	1.70921	1.70923
20	1.36759	1.36761	1.36755	1.36758
15	1.02547	1.02553	1.02549	1.02550
10	0.68369	0.68375	0.68367	0.68370
5	0.34186	0.34191	0.34185	0.34187
0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

加载值(t)	倾斜 2 度测试			
	加载一	加载二	加载三	平均值
0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
5	0.34192	0.34188	0.34197	0.34192
10	0.68376	0.68374	0.68379	0.68376
15	1.02558	1.02558	1.02561	1.02559
20	1.36744	1.36734	1.36741	1.36740
25	1.70926	1.70918	1.70922	1.70922
30	2.05112	2.05106	2.05108	2.05109

25	1.70945	1.70936	1.70940	1.70940
20	1.36785	1.36780	1.36777	1.36781
15	1.02571	1.02564	1.02562	1.02566
10	0.68393	0.68386	0.68385	0.68388
5	0.34200	0.34194	0.34196	0.34197
0	0.00002	0.00000	0.00000	0.00001

以河北某衡器公司为例

承载器规格为 150t，3m\*16m，分别由 6m，5m，5m 三段组成，采用 8 只 30t 十字梁传感器，地面严重不平整并且倾斜厉害，单地面落差就达到 3cm，在如此恶劣条件下组秤后进行角差试验。

砝码：5400kg；分度值：10kg；状态：未进行角差调整；测试结果：±10kg

5400	5390	5400	5400
5390	5400	5410	
5400	5390	5400	5390

换到较平整的基础上

砝码：5400kg；分度值：10kg；状态：未进行角差调整；测试结果：+10kg

5410	5410	5410	5410
5410	5400	5400	
5410	5410	5400	5400

“段差”的测试

“段差”是一个新提出的概念，国标中并没有提出，具体含义可理解为车轴在承载器上不同位置上重量的差值，为做此试验，我们联系了山东某衡器企业。

承载器（秤台）规格：3m\*21m，分成四段，分别为 6m，5m，5m，5m，如图 5：采用 10 只 40t 十字梁传感器。

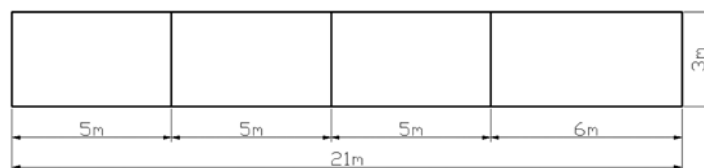


图 5

加载情况：砝码 54t，货车约 20t，后轴重量约 54.8t（见图 6），单个方向测试 6 个点

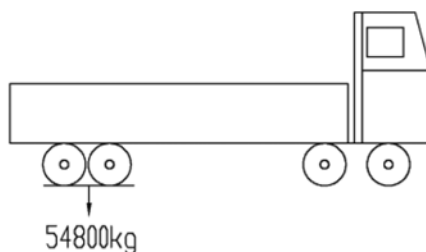
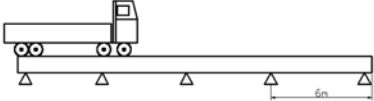
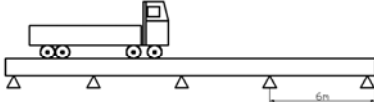
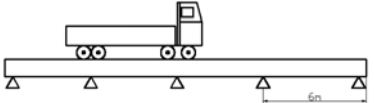
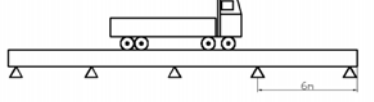
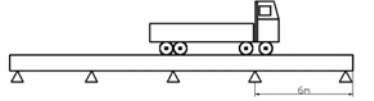
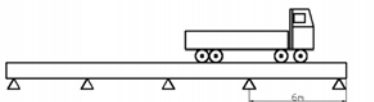
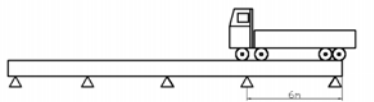
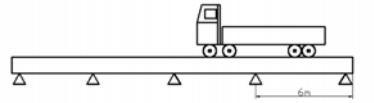
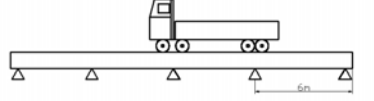
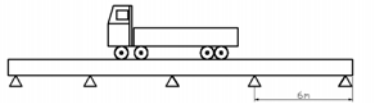
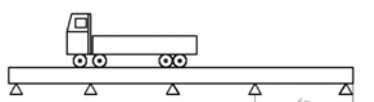



图 6

分度值：10kg；状态：未进行角差调整，实际测试数据：

		仪表显示值	
		第一次	第二次
	74130	(74130)	
	74130	(74140)	
	74140	(74140)	
	74160	(74160)	
	74160	(74160)	
	74150	(74140)	
	74170	(74180)	
	74160	(74170)	
	74140	(74150)	
	74170	(74170)	
	74170	(74170)	
	74150	(74150)	

以上测试一次完成，未作任何调整，据了解，该结果达到了该企业以往“段差”测试时最佳的测试结果。

#### 四、三球模块配件介绍

为了配合十字梁传感器的使用，保证承载器有一定的活动性，减少对传感器的冲击，公司专门研发了三球模块作为承载压头，见图 7 所示。

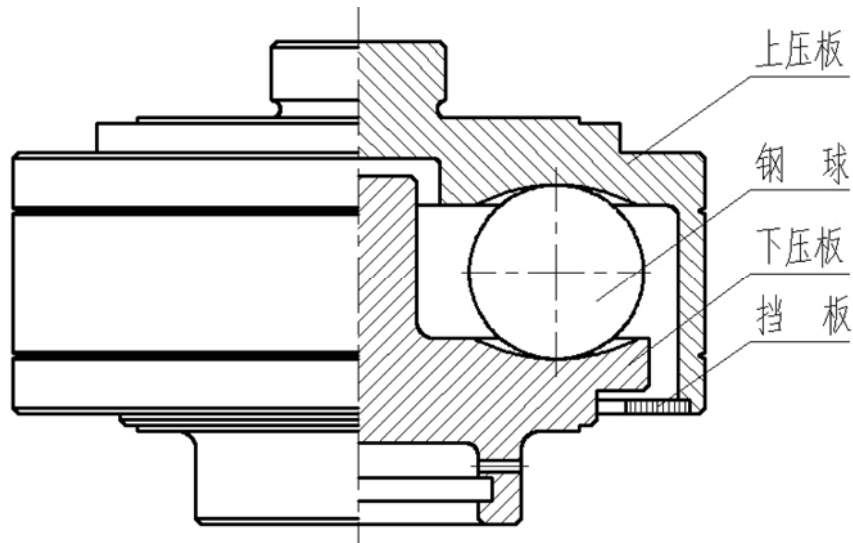


图 7

三球模块主要由上压板，下压板，三颗钢球和挡板组成，利用三点组成一个平面的原理，三受力点（钢球）呈 120 度均匀分布，承载点作用在三受力点构成的等边三角形内，确保了承载的稳定性与可靠性，见图 8 所示。

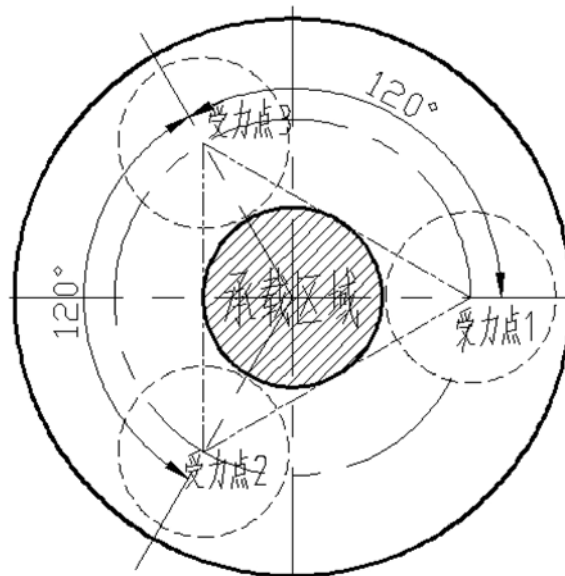


图 8

双层设计，采用钢球和球碗结构，当钢球偏离球碗最低处时，由于重力因素，迫使压头自动归正，达到自回正的目的。同时，模块的上层可以自由移动，但是跟传感器接触点不发生相对位移，保证了测量精度，见图 9 所示。



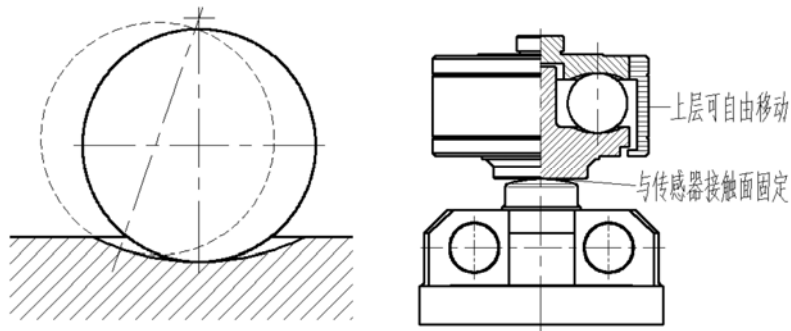


图 9

采用圆孔与圆柱限位，使得能够在 360 度方向都得到相同的限位，图 10 阴影部分面积为可活动的区域。

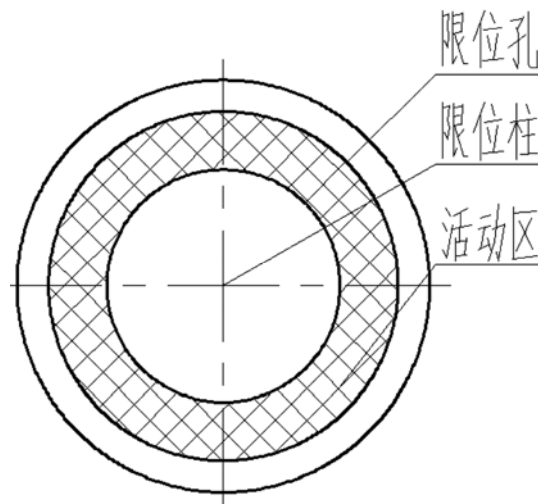


图 10

钢球处的接触应力计算

看成半径分别为  $R_1, R_2$  的两球内接触，在压力  $P$  作用下，形成一个半径为  $a$  的圆形接触面，由赫斯公式得到：

$$a = \sqrt{\frac{3P}{4} \cdot \frac{\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}}{\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}}}$$

$E_1, E_2$  分别为材料的弹性模量

$\mu_1, \mu_2$  分别为材料的泊松比

由于两种材料都是钢材，为了简化计算，我们认为  $E_1=E_2=E, \mu_1=\mu_2=0.3$

所以有接触应力公式：

$$\sigma_H = 0.3883 \sqrt{PE^2 \left( \frac{R_2 - R_1}{R_2 R_1} \right)^2}$$

制造材料采用 40Cr,  $E=190\text{GPa}, S=785\text{MPa}, b=980\text{MPa}$ , 以配 30t 传感器的三

球模块为例，尺寸见图 11 所示。

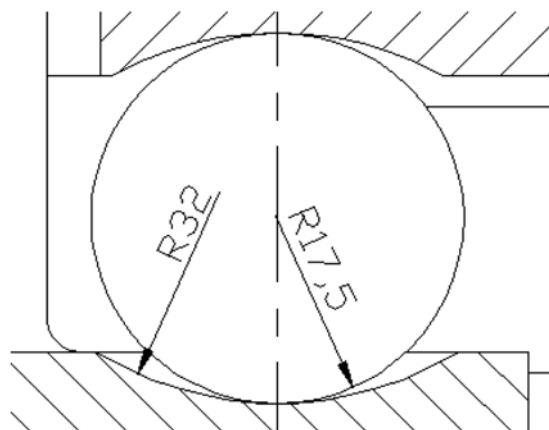


图 11

代入数据得到

$$\sigma_H = 0.3883 \sqrt{100000 \times 190^2 \times \left(\frac{32 - 17.5}{32 \times 17.5}\right)^2} = 52 \text{MPa}$$

#### 五、结语

十字梁传感器历经多年的完善，目前已被国内甚至国际上多家厂家认可，并广泛应用于汽车衡，轨道衡，轴重秤等领域，在此，衷心感谢这么多年来国内衡器厂家提出的宝贵意见和支持，同时也衷心地感谢衡器厂家提供那么多的测试机会。希望十字梁传感器能够为我们的衡器事业添砖加瓦，作出点滴微薄的贡献。

#### 作者简介

邓林祯，男，1980 年 4 月生，浙江人，毕业于浙江工业大学，2003 进入南洋后一直从事传感器的设计与开发工作。