

用三段法设计计算轴销剪切式称重传感器

□徐国欣

【摘要】本文介绍了把轴销式称重传感器圆截面工字形剪切截面转换成普通的工字形截面，用三段法计算其腹板中最大剪应力的方法。

【关键词】三段法；轴销式传感器；最大剪应力

文献标识码：A

文章编号：1003-1870（2024）11-0031-04

引言

在未对原机械结构做任何改动的情况下，仅对承力轴内部进行改动，使其同时具有称重或超载报警的功能，这时该承力轴就变成了轴销式称重传感器。由于该方法既简单又实用，因此，轴销式传感器的应用日益广泛。

由于结构上的特殊性，目前对于在设计轴销剪切式传感器时最重要的参数——腹板中的最大剪应力的理论计算，只能采用转换成工字截面后用普通剪切式传感器的最大剪应力计算公式进行。本文介绍转换方法，并采用本人所建立的三段法计算腹板中的最大剪应力。

1 轴销式传感器简介

下面以实例对轴销式传感器进行简单介绍（见图1）。

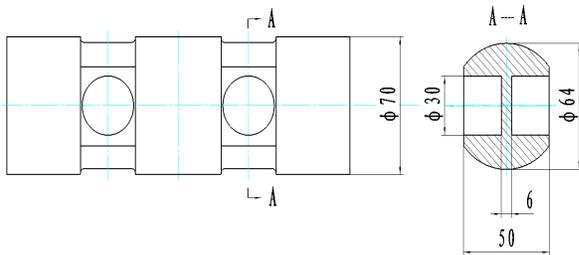


图1 一款轴销式传感器示意图

图1是一款由直径为70mm的承力轴改制而成的量程为10t的轴销式传感器的示意图，原为直径70mm的圆轴，左右为支承端，中间为承力段。对轴的改

动仅在从承力段到二支承端间加工出直径64mm宽32mm的圆柱段作力检测段。为保证测量准确度和轴的刚度，一般都设计成剪切式传感器^[1]，为此把直径64mm段前后铣扁至50mm再在平面中心分别向内加工直径30mm的盲孔，中间留下6mm厚的腹板，其剖面图如图1右所示。在腹板中心粘贴双轴剪切应变片，检测由外力产生的剪应变，组成惠斯登电桥后转换成电信号输出。

2 将弓形翼板截面转换成普通工字形截面

由图1右剖面图可知，该传感器承力截面的上下有弓形，由于弓形有圆弧半径和弓高等参数而形态各异，为便于计算剪应力必须把此有弓形的截面转换成工字形截面。

下面根据参考文献^{[2][3]}，介绍转换的方法。

另作传感器承力截面图如图2所示。把截面中的翼板看成矩形和弓形的组合，计算可得弓形的弓高为12mm，该弓形所对圆心角 α 为102.76°。

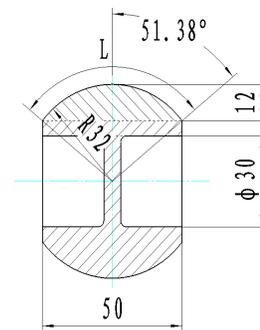


图2 承力截面图

$$\text{弧长 } L = 64\pi \times \frac{102.76^\circ}{360^\circ} = 57.36\text{mm}$$

弓形对形心轴的惯矩

$$I_g = \frac{L \times r^3}{8} - \frac{r^4}{16} \sin 2\alpha$$

$$= \frac{57.36 \times 32^3}{8} - \frac{32^4}{16} \times \sin (2 \times 102.76) = 263181$$

设该弓形转换成宽50mm 高2X 的矩形，矩形中心到形心轴的距离为20+X，则该矩形对形心轴的惯矩。

$$I_j = \frac{50 \times (2x)^3}{12} + 2x \times 50 \times (20 + x)^2$$

令 $I_g = I_j$ 得 $X = 4.38\text{mm}$ 即弓形转换后的矩形高为 8.76mm，弓形等效转换后的矩形与图2 原弓形下面的矩形合成后的半截面图见图3。转换后的工字形截面的翼板高 13.76mm。

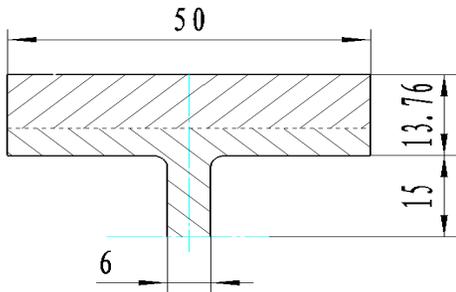


图3 转换后的半截面图

3 用三段法计算腹板中的最大剪应力

对工字形截面腹板中最大剪应力的计算，目前都套用工字梁腹板剪应力计算公式。但该公式要求工字梁上下翼板仅承受极小的剪力，即要求翼板面积小腹板高度大，而剪切传感器为提高传感器的刚度（在轴销式传感器中尤为重要）通常把翼板面积设计得较大（图3 中翼板面积竟为腹板面积的 7.6 倍！），受空间的限制，腹板的高度又不可能较大，使由工字梁腹板剪应力计算公式计算出来的剪应力理论值会与实际值达到数倍的误差，失去设计参考价值。

长期的困惑激励了笔者用了数年的时间，在完成对数百例剪切式传感器进行有限元分析，从大量数据和剪应力分布图中找到剪应力分布的特点和规律，提出了用三条线段来模拟剪应力分布曲线（故简称三段法）从而产生了腹板中最大剪应力的理论

计算公式^{[4][5]}。

下面介绍对本例的三段法计算过程。

图3 的参数如下：翼板高 13.76mm，形成腹板的圆孔直径 30mm，腹板厚度 6mm，翼板宽度 50mm。由于附表中腹板孔径 30mm 的翼板高最大只有 10mm，本例翼板高 13.76mm，为此必须从翼板高 5mm 到 10mm 向外扩展，为直观起见，把查表和计算列于表 1、表 2 中：

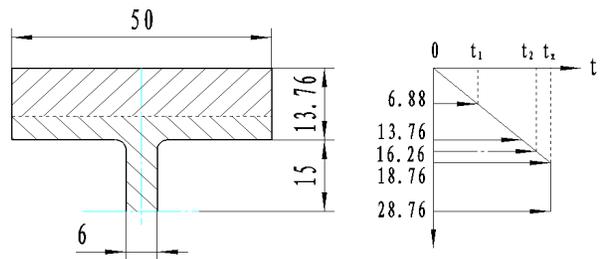


图4 半个承力截面中的剪应力分布图

表1 计算腹板厚4 时翼板高13.76的K值

翼板高	腹板孔径	腹板厚	翼板宽50
5	30	4	62.7
10			70.8
13.76			76.89

表2 计算腹板厚10时翼板高13.76的K值

翼板高	腹板孔径	腹板厚	翼板宽50
5	30	10	57.9
10			60.2
13.76			61.93

由 61.93 和 76.89 插入计算得腹板厚 6mm 时 $K = 66.92$ ，即在距腹板圆心 $15 \times 66.92\% = 10\text{mm}$ 处开始进入最大剪应力区，做半个承力截面的剪应力图，如图 4 所示。

$$\text{图中 } \tau_1 = \frac{6.88}{18.76} \tau_{\max} = 0.3667 \tau_{\max}$$

$$\tau_2 = \frac{16.26}{18.76} \tau_{\max} = 0.8667 \tau_{\max}$$

半个翼板所受剪力为：

$$50 \times 13.76 \times 0.3667 \tau_{\max} = 252.3 \tau_{\max}$$

图 4 中 13.76~18.76 的腹板所受剪力为：

$5 \times 6 \times 0.8667 \tau_{\max} = 26 \tau_{\max}$
 18.76~28.76 的腹板中心所受剪力为:

$$10 \times 6 \times \tau_{\max} = 60 \tau_{\max}$$

$$\text{由 } 252.3 \tau_{\max} + 26 \tau_{\max} + 60 \tau_{\max} = \frac{100k}{4} \text{ 得 } \tau_{\max} = 73.89 \text{ N/mm}^2$$

而按工字梁腹板剪应力计算公式计算出来的剪应力理论值为188.9N/mm²，是三线段法计算值的2.6倍!

SXY

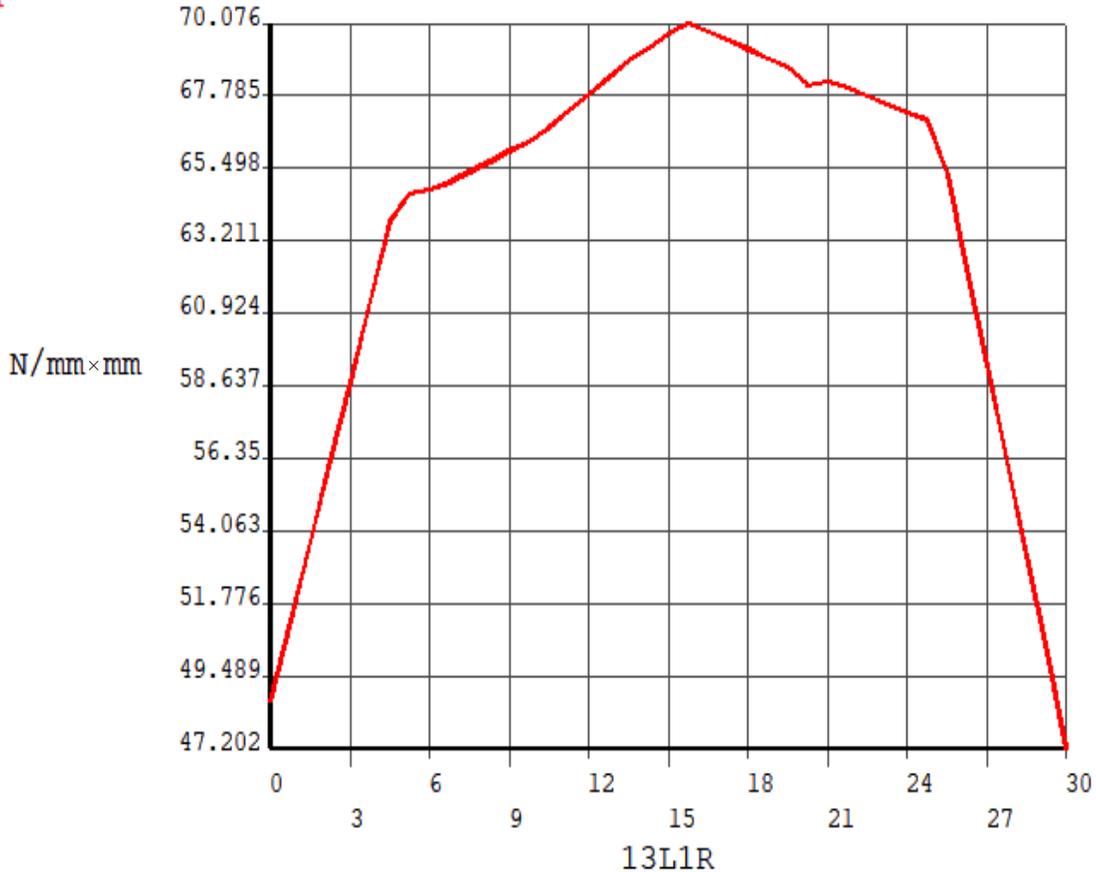


图5 路径L——剪应力分布图

4 本例传感器的有限元分析结果

对本例传感器进行有限元分析后取腹板中自下向上的直径为路径L，得到路径L——剪应力分布图，如图5所示。可知其腹板中心最大剪应力为70.076N/mm²，查腹板中心上下1.5mm范围内的平均剪应力69.56N/mm²，本文介绍的计算方法误差仅6%FS，足够满足灵敏度设计要求。

5 结语

本文通过实例介绍了把轴销式传感器中的弓形

截面转换成工字形截面的方法，进一步用三线段法较准确地计算出了轴销式传感器腹板最大剪应力，其计算结果完全符合作为传感器输出灵敏度的设计依据，解决了轴销式传感器设计中所计算的腹板中最大剪应力误差很大的困难。本例也证明了三线段法在宽厚翼板的工字形截面的腹板最大剪应力计算中同样具有较高的计算精度，很具有推广的价值。

附表 单台阶圆孔形工字截面K值表 (%)

序号	翼高 (mm)	孔径 (mm)	腹板厚 (mm)	不同翼宽 (mm) 下的K 值			
				翼宽L1=25	翼宽L2=50	翼宽L3=75	翼宽L4=100
1	5	φ 26	4	56.7	59	64.2	66.5
2			10	61.2	64.7	69.7	73.7
3		φ 30	4	54.8	57.9	60.6	62.8
4			10	56.1	62.7	68.7	72.3
5		φ 35	4	53.2	56.8	59.3	61.0
6			10	54.1	58.8	59.9	66.7
7		φ 40	4	54.2	56.1	57.3	60.4
8			10	54.7	58.7	62.5	66.7
9	10	φ 30	4	57.6	60.2	62.3	64.6
10			10	68.8	70.8	74.8	79.6
11		φ 35	4	53.3	55.9	57.9	60.1
12			10	63.7	65.0	68.1	72.1
13		φ 40	10	60.0	62.2	64.1	70.1
14			20	62.8	63.5	69.2	74.0
15	20	φ 35	10	83.4	80.0	85.4	86.9
16			20	99.5	91.5	93.8	99.3
17		φ 40	10	79.1	75.8	78.4	82.3
18			20	92.4	84.9	88.2	91.0
19		φ 50	10	68.2	66.1	67.2	68.9
20			20	82.2	74.8	75.4	76.9
21	25	φ 35	10	93.5	88.2	93.6	97.6
22			20	124.6	109.2	110.1	113.1
23		φ 40	10	86.1	81.1	85.3	89.4
24			20	112.6	96.6	98.6	101.9
25		φ 50	10	76.9	69.9	72.2	75.4
26			20	92.4	82.3	82.1	89.2
27	30	φ 35	10	106.3	98.9	102.4	104.5
28			20	150.1	124.9	122.6	125.5
29		φ 40	10	96.1	86.6	91.3	94.3
30			20	132.5	109.2	107.1	111.9
31		φ 50	10	83.6	75.4	77.8	79.5
32			20	107.3	92.7	93.7	96.4

参考文献

- [1] 刘九卿. 剪切式力与称重传感器的力学基础[J]. 衡器, 1997年第2期.
- [2] 闻邦椿. 机械设计手册 第一卷2017.12 机械工业出版社. ISBN-978-7-111-58341-7.
- [3] 成大先. 机械设计手册 第一卷2007.11 化学工业出版社. ISBN-978-7-122-01408-5.
- [4] 徐国欣. 圆孔形工字截面腹板最大剪应力的计

算方法. 衡器, 2017年第11期.

- [5] 徐国欣. 用三线段法计算宽厚翼剪切式桥式传感器腹板中最大剪应力. 衡器, 2021年第9期.

作者简介

徐国欣, 男, 浙江余姚, 工程师。机械专业毕业, 长期从事电阻应变式传感器和智能仪表的设计制造工作。