

参 考 文 献

- 1 李德葆等 动态应变/应力场分析的模态法 振动与冲击, 1992, (4): 15~ 21
- 2 李德葆等 实验应变模态分析原理和方法 清华大学学报 (自然科学版), 1990, 11 (4): 105~ 112
- 3 涂小岳 汽车零部件疲劳耐久性试验室内动态模拟研究 [硕士论文] 西安公路交通大学, 1995
- 4 Steve Bogert Integration of Fatigue Technology with Modal Analysis SA E paper 933068
(1996年7月23日收到第1稿
1996年12月23日收到修改稿)

塔桅起重机桅杆的应力测试分析

冯 垣

(天津理工学院北辰院区机械系, 天津 300400)

摘要 本文对 40 t 塔式起重机改装成 400 t 塔起重机的桅杆进行应力测试及分析。

关键词 塔桅起重机, 桅杆, 应力

引 言

塔桅起重机是安装大型超限设备的实用设备之一, 由塔式起重机与桅杆组成, 它的优点是提高塔式起重机的起重量。如原 40 t 塔式起重机改装后起重量可达 400 t, 用以吊装大型超限设备且吊装后移动就位方便, 减轻了劳动强度。

现就以 40 t 塔式起重机改造成 400 t 塔桅起重机 (如图 1) 的桅杆应力测试做一分析。加载实验现场布置如图 2 所示。加载方法根据大件设备起吊时, 桅杆俯仰绳与水平面间的夹角 θ 值的变化情况分为 $\theta = 20^\circ$; $\theta = 40^\circ$; $\theta = 50^\circ$ 三种加载状态, 如图 3 所示。各加载状态下的加载值见表 1 所示。

表 1

| 项 目 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 加荷状态 | 20° | | 40° | | | 50° | |
| 设计起重能力 (t) | 157 | | 294 | | | 350 | |
| 加荷值 (t) | 120 | 160 | 175 | 220 | 295 | 350 | 406 |
| 加荷值与起重能力比 (%) | 75 | 100 | 110 | 75 | 100 | 100 | 115 |

1 测点布置

测试截面共取 I- I, II- II, III- III, 3 个截面, 各截面的位置及测点编号如图 4 所示。

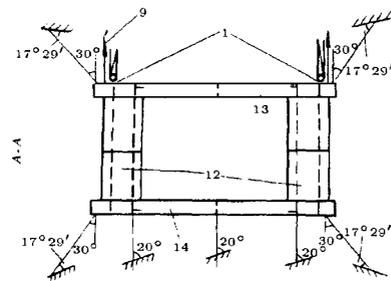
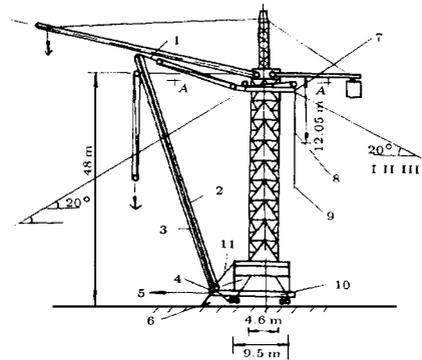


图 1 40 t 塔吊改装示意图

- 1 俯仰索; 2 机杆; 3 起重索; 4 平台; 5 水平拉紧钢丝绳; 6 基础箱; 7 箱形梁; 8 加固节; 9 引出索; 10 台车; 11 拉杆; 12 Π形梁; 13 前箱形梁; 14 后箱形梁;
I II III IV 缆风绳

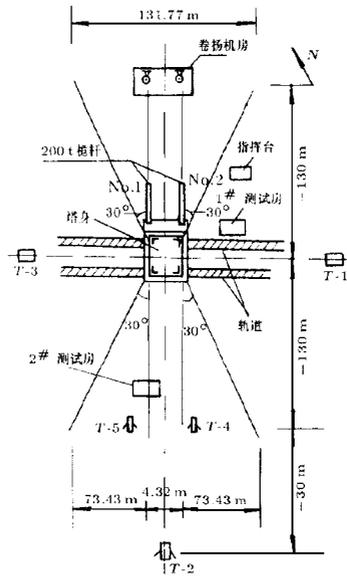


图2 加荷试验现场布置简图
T-1, 2, 3, 4, 5为经纬仪

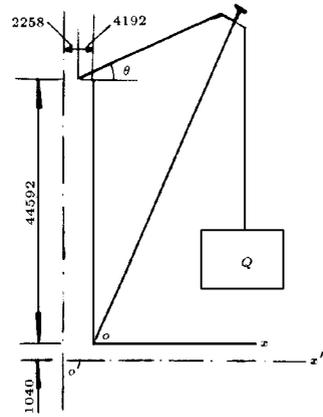


图3 3种加载状态示意图

2 试验结果

2.1 应力

桅杆各截面测点应力实测值列于表2内。实测值 σ 按下式求得

$$\sigma_c = E_A \mu (1 + c)$$

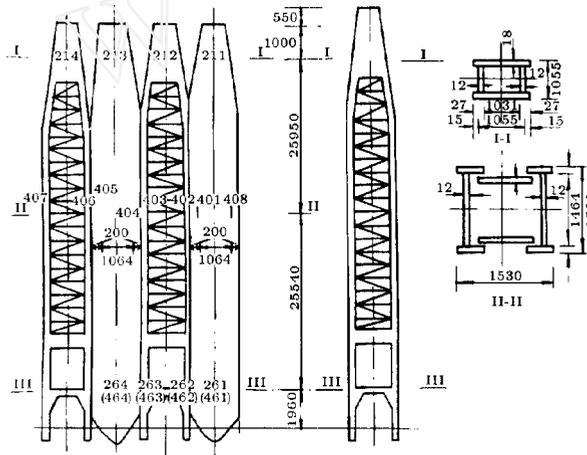


图4 测试截面位置及测定编号示意图

式中, E_A 为钢材弹性模量, μ 为电测读数, c 为导线电阻值的修正率, $c = \frac{2r}{R}$, r 为一根导线的阻值, 其值随导线长度而异, 对于 I- I 截面 $r = 3.5\Omega$, 对于 II- II 截面 $r = 2.45\Omega$, 对于 III- III 截面 $r = 1.75\Omega$, R 为电阻片阻值, 其值为 120Ω

表2中所列计算值是各测点在加载状态下根据桅杆受力如图5所示的情况, 由几何特征分别计算 I- I, II- II, III- III 截面的截面积、惯性矩、抗弯截面模

量、轴向力及桅杆在轴向载荷、横向载荷(自重)作用下产生的弯矩和桅杆顶受弯矩作用而产生的附加弯矩进行迭加, 计算出弯矩 M_{I-I} , M_{II-II} , $M_{III-III}$, 再根据公式 $\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_x}{I_x}$ 计算各测点应力值

2.2 内力

II- II 截面的内力值列于表3内, 其中实测内力用图象法求得

表 2

| θ | 测点编号 | I-I | | | | II-II | | | | | | | | III-III | | | |
|----------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|--------|-------|-------|
| | | 211 | 212 | 213 | 214 | 401 | 402 | 403 | 404 | 405 | 406 | 407 | 408 | 261 | 262 | 461 | 462 |
| 120 (t) | 计算值 (MPa) | -8.5 | -17.3 | -8.5 | +3.0 | -15.5 | -16.5 | -16.5 | -15.5 | -10.0 | -9.0 | -9.0 | -10.0 | -12.3 | -12.0 | -12.3 | -12.0 |
| | 实测值 (MPa) | -7.6 | -22.9 | -5.5 | +2.2 | -19.4 | -17.2 | -18.3 | -20.5 | -5.4 | -5.4 | -5.4 | -6.5 | -13.5 | -50.2 | -20.4 | -33.3 |
| | 计算值为实测值 % | 111.8 | 75.6 | 154.5 | 136.4 | 79.9 | 95.9 | 90.2 | 75.6 | 185.2 | 166.7 | 166.7 | 153.8 | 91.0 | 23.9 | 60.3 | 36.0 |
| 160 (t) | 计算值 (MPa) | -11.4 | -23.1 | -11.4 | +0.4 | -20.6 | -25.0 | -25.0 | -20.6 | -13.5 | -12.1 | -12.1 | -13.5 | -15.2 | -14.7 | -15.2 | -14.7 |
| | 实测值 (MPa) | | | | | | | | | | | | | -8.5 | -36.6 | -10.6 | -25.3 |
| | 计算值为实测值 % | | | | | | | | | | | | | 178.7 | 40.2 | 143.4 | 58.1 |
| 175 (t) | 计算值 (MPa) | -12.3 | -25.3 | -12.3 | +0.6 | -22.5 | -24.1 | -24.1 | -23.1 | -14.7 | -13.1 | -13.1 | -14.7 | -16.6 | -16.2 | -16.6 | -16.2 |
| | 实测值 (MPa) | -7.6 | -20.7 | -6.6 | +4.4 | -26.3 | -21.6 | -27.0 | -25.5 | -7.5 | -5.4 | -7.4 | -8.1 | -15.3 | -50.0 | -20.8 | -41.0 |
| | 计算值为实测值 % | 161.8 | 122.1 | 187.0 | 13.6 | 85.7 | 111.6 | 89.3 | 90.6 | 196.0 | 243.2 | 177.0 | 181.5 | 108.2 | 32.3 | 79.8 | 39.5 |
| 220 (t) | 计算值 (MPa) | -15.0 | -34.8 | -15.0 | +4.8 | -35.1 | -38.5 | -38.5 | -35.1 | -17.1 | -13.8 | -13.8 | -17.1 | -20.1 | -20.9 | -20.1 | -20.9 |
| | 实测值 (MPa) | -8.7 | -25.2 | -9.9 | +8.7 | -45.3 | -24.2 | -44.2 | -27.0 | -4.3 | -2.8 | -4.3 | -7.5 | -26.8 | -97.9 | -28.2 | -54.7 |
| | 计算值为实测值 % | 171.9 | 138.1 | 151.5 | 55.2 | 77.4 | 159.1 | 87.1 | 129.9 | 396.5 | 628.1 | 320.9 | 228.0 | 75.0 | 21.3 | 71.3 | 38.2 |
| 285 (t) | 计算值 (MPa) | -20.1 | -43.8 | -20.1 | +6.6 | -47.4 | -52.1 | -52.1 | -47.4 | -22.0 | -17.2 | -17.2 | -22.0 | -25.0 | -28.0 | -25.0 | -28.3 |
| | 实测值 (MPa) | -14.9 | -47.6 | -15.1 | +5.1 | -61.5 | -53.9 | -45.5 | -26.2 | +5.4 | -6.1 | -12.5 | -12.5 | -34.0 | -108.8 | -15.9 | -61.7 |
| | 计算值为实测值 % | 34.9 | 92.0 | 133.1 | 107.6 | 77.1 | 96.7 | 114.5 | 180.9 | | 281.9 | 137.6 | 176 | 73.5 | 25.7 | 157.2 | 54.9 |
| 350 (t) | 计算值 (MPa) | -23.4 | -58.0 | -23.4 | +11.2 | -58.7 | -65.8 | -65.8 | -58.7 | -20.9 | -13.8 | -13.8 | -20.9 | -31.4 | 34.5 | 34.5 | 31.4 |
| | 实测值 (MPa) | -16.4 | -54.5 | -9.9 | +18.5 | -71.2 | -64.7 | -72.3 | -60.2 | 0 | -1.1 | -5.4 | -10.8 | -48.0 | -118.6 | -26.6 | -73.5 |
| | 计算值为实测值 % | 142.8 | 106.5 | 236.6 | 60.4 | 82.4 | 101.6 | 91.0 | 99.5 | | 126.5 | 255.6 | 193.5 | 65.3 | 29.0 | 118.0 | 46.9 |
| 406 (t) | 计算值 (MPa) | -27.1 | -67.1 | -27.1 | +12.8 | -66.4 | -74.0 | -74.0 | -66.4 | -25.2 | -17.5 | -17.5 | -25.2 | -36.4 | -40.7 | -36.4 | -40.7 |
| | 实测值 (MPa) | -19.6 | -65.4 | -16.4 | +17.4 | -90.7 | -75.0 | -90.7 | -77.6 | -3.9 | +3.3 | 4.3 | -8.6 | -45.6 | -138.2 | +70.0 | -77.9 |
| | 计算值为实测值 % | 138.5 | 102.6 | 165.5 | 73.8 | 73.3 | 98.7 | 81.6 | 85.6 | 345.3 | | | | 292.9 | 79.7 | 29.4 | 52.2 |

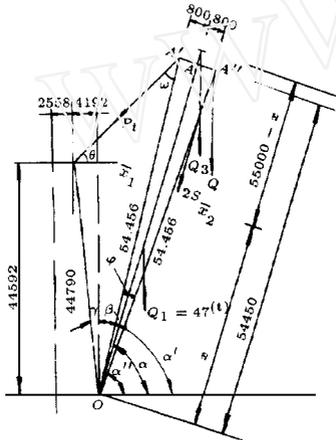


图 5 桅杆受力图

缆风拉力; 2S: 卷扬机拉力; Q: 吊重; Q₁: 每根桅杆自重; Q₂: A-A 桅杆顶板自重

表 3

| θ | 内力 N(t) | M _{x-x} (t m) | M _{y-y} (t m) | σ_w (MPa) | $\frac{\sigma_w}{\sigma_{cp}}$ (%) |
|----------|---------|------------------------|------------------------|------------------|------------------------------------|
| 120 | 计算值 | 78.48 | 9.53 | 0 | |
| | 实测值 | 77.40 | 19.9 | 0.796 | 0.69 |
| | % | 101 | 48 | | 3.40 |
| 160 | 计算值 | 114.48 | 13.86 | 0 | |
| | 实测值 | 101.50 | 27.0 | 1.194 | 1.32 |
| | % | 113 | 51.5 | | 4.95 |
| 175 | 计算值 | 138.84 | 31.12 | 0 | |
| | 实测值 | 125 | 45.9 | 0.796 | 0.44 |
| | % | 111 | 68 | | 1.16 |
| 220 | 计算值 | 186.17 | 44.12 | 0 | |
| | 实测值 | 195 | 65.1 | 1.919 | 6.27 |
| | % | 95.8 | 68 | | 11.1 |
| 285 | 计算值 | 216.56 | 64.46 | 0 | |
| | 实测值 | 219 | 94 | 9.154 | 0.44 |
| | % | 99 | 68.5 | | 0.61 |
| 350 | 计算值 | 251.17 | 70.31 | 0 | |
| | 实测值 | 264 | 120.5 | 1.393 | 0.10 |
| | % | 95.5 | 58.5 | | 0.11 |

3 试验结果分析

(1) 轴向力 N 的实测值与计算值基本接近, 两者相差在 4.5% ~ 13% 的范围内

(2) 在弯矩作用平面内, 主弯矩的实测值普遍大于计算值, 这是由于桅杆在制作和安装上存在较大的初偏心, 表 3 中加荷状态下 M_x 的计算值未考虑初偏心, 由下式可大体求得 II-II 截面上由制作安装产生的初偏心的大小

$$e = \frac{(M_{x-x})_{测} - (M_{x-x})_{计}}{N_{测}} \quad (1)$$

各加载状态下 e 值的计算列于表 4 内, 将其中误差较大的 e 值删去, 取其 5 个值的平均值

表 4

| 加荷状态 | 20° | 40° | 50° | | | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 120(t) | 160(t) | 175(t) | 220(t) | 295(t) | 350(t) | 406(t) |
| e(cm) | 13.4 | 13.0 | 11.9 | 10.8 | 13.5 | 19.0 | |

$$e_{均} = \frac{13.4 + 13 + 11.9 + 10.8 + 13.5}{5} = 12.5 \text{ cm}$$

所以桅杆初偏心率^[1]

$$\epsilon = \frac{M}{N} \cdot \frac{A_u}{W_x} = 12.5 \times \frac{615}{2.48 \times 10^4} = 0.31$$

说明由加工引起的初偏心对应力有影响

(3) 根据桅杆截面形式, 长细比, 偏心方向和偏心率, 由钢结构设计规范 TJ17-74 查得桅杆在弯矩作用平面内稳定系数 $\varphi = 0.41$, 于是桅杆(桅杆材料为 16 Mn 钢)稳定许用应力值为^[1]

$$\frac{\sigma}{K_y} = \varphi[\sigma] = 92.6 \text{ MPa}$$

而在主变形作用面内, 桅杆最大受压纤维处的应力^[1]为

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_x}{W_x} = -89.6 \text{ MPa}$$

则 $\sigma < 92.6 \text{ MPa}$, 说明桅杆是稳定安全的

(4) 桅杆截面在测试过程中出现平面外弯矩 M_y 和扇性正应力 σ_x , 主要原因可能与基础箱沉降不等有关, 其数值不大, 可概括在桅杆的总安全度内

(5) III-III 截面实测应力值与计算值相差较大桅杆接近底座部分应力状态可能较复杂, 有待进一步测试分析

参 考 文 献

- 1 西安冶金建筑学院, 重庆建筑工程学院, 哈尔滨建筑工程学院, 合肥工业大学 钢结构 北京: 中国建筑工业出版社, 1982 155~159

(1996 年 12 月 9 日收到第 1 稿

1997 年 2 月 16 日收到修改稿)

(上接第 50 页)

现将计算结果与这实验值进行对比 对文[5]中提供的 A lmen 做的 5 种碟簧实验曲线中的第 5 种, 在图 5 中补画了有限的计算值 由图可见, 图中有限元曲线与实验曲线非常接近, 几乎重合; 而 A-L 曲线则明显高于实验曲线 由此可见, 有限元计算结果不仅与精确解符合很好, 与实验情况亦符合很好.

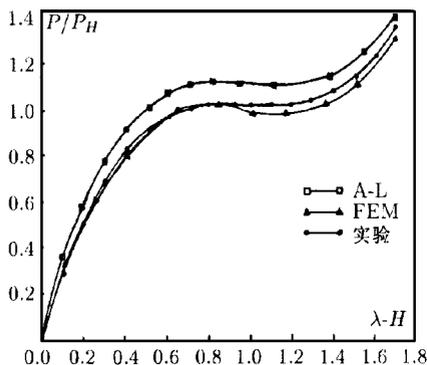


图 5 弱变化弹簧 $P_H = 562 \text{ kg}$

($D_i = 146$, $D_0 = 285.7$, $t = 4$, $H = 5.9$)

由上述计算结果可以看出, 在碟形弹簧的计算方法中, 传统的 A-L 公式是一种近似算法, 有一定的误差

差, 在要求不高时, 可以选用 A-L 公式计算 文[2]介绍的精确解, 由于计算过程复杂, 在实际设计中采用的很少 而有限元法的计算结果不仅与精确解符合很好, 而且与实验值也符合得很好, 具有很高的精度 除此之外, 再配以有限元网自动剖分与显示, 数据文件自动形成, 载荷-变形曲线及应力曲线图的自动计算与显示, 构成了碟簧的计算机辅助设计系统的完整的分析计算部分 使碟簧的设计准确、快速、简捷、方便

参 考 文 献

- 1 Almen J O, Laszlo A. The uniform-section disk spring Trans ASME, 1936, 58(5): 305 ~ 314
- 2 Hubner W. Deformationen und spannungen bei tellerfedern Konstruktion, 1982, 34(10): 387~ 392
- 3 Curti G, Appendino D. Vergleich von berechnungsverfahren fur tellerfeder Draht, 1982, 33(1): 38~ 40
- 4 Wagner W, Wetzel M. Berechnung von tellerfedern mit hilfer der methode der finiten elemente Konstruktion, 1987, 39(4): 147~ 150
- 5 Curti G, Orlando M 著 侯锡九译 碟形弹簧的新计算方法 弹簧工程, 1985, 3: 10 ~ 15

(1996 年 4 月 15 日收到第 1 稿,

1996 年 12 月 31 日收到修改稿)