

沧州铁狮子结构现状数值模拟分析

王晓东^{1,2}, 王伟¹, 王林安³, 永昕群³

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 哈尔滨理工大学 建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 中国文化遗产研究院, 北京 100029)

摘要: 应用逆向工程 CAD 建模技术建立了沧州铁狮子结构的力学仿真模型; 对铁狮子在风荷载作用下的流场分布进行了研究; 通过施加自重、风荷载以及温度作用对铁狮子结构的应力、应变以及位移进行了分析, 初步得出铁狮子目前处于安全状态的结论。

关键词: 沧州铁狮子; 静力性能; 力学仿真

中图分类号: TU 311.41

文献标识码: A

Numerical Simulation Analysis on Existing Situation of Cangzhou Iron Lion

WANG Xiaodong^{1,2}, WANG Wei¹, WANG Lin'an³, YONG Xinqun³

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150090, China; 3. Chinese Academy of Culture Heritage, Beijing 100029, China)

Abstract: Reverse engineering CAD technique was used to establish the mechanical simulation model of Cangzhou Iron Lion. The flow field of Cangzhou iron lion was studied under the load of wind. An analysis was made of the stress, strain and displacement of iron lion by the load of gravity, wind and temperature, the results show that iron lion is safe at present.

Key words: Cangzhou Iron Lion; static performance; mechanical simulation

沧州铁狮子铸造于后周广顺三年(公元 953 年), 位于河北省沧州市沧县旧州镇, 高一丈七尺(约 5.48 m), 长一丈六尺(约 6.30 m), 背负巨盆。狮头、躯干及四肢均为空腔体, 最厚部位约为 35 cm, 最薄

处约 3 cm。民间传说其质量 40 t, 1984 年吊装移位时测得实际质量 31.5 t^[1]。铁狮子采用泥范法造型、顶注式和明浇式的浇注系统, 自下而上铸成^[2]。铁狮子身披障泥, 背负莲盆, 前胸及臀部饰束带, 鬃作波浪状披垂项上, 巨口大张, 昂首怒目, 四肢岔开, 作行走状, 气势阳刚雄伟, 造型生动逼真, 堪称我国历史上年代最久远、体积最大、形态最精美的铸造工艺珍品, 1961 年 3 月 4 日被国务院公布为第一批全国重点文物。历经一千多年的沧桑, 铁狮子已经遍体鳞伤, 口、唇、腹、尾俱残, 目前已经不能自行站立, 全靠内外支架的支撑。铁狮四足破损严重, 除左前足仍余狮爪的大概形状外, 其余三足全部不存在。如图 1 所示。北京科技大学^[3]曾经在 2001 年对铁狮子进行过力学仿真, 限于当时技术条件限制, 分析时没有考虑现有支架的主要受力作用, 主要计算了原始状态下自重作用下的应力和变形以及考虑 1 条腿处支座沉降对狮身应力和变形的影响。笔者所建立的模型中考虑了支架对铁狮子的支撑作用, 能够更加真实地反应铁狮子的受力情况, 采用数值模拟的方法将风作为流体计算出作用在狮身的水平荷载, 并且计算了 20 °C 温差对铁狮子应力分布的影响。

1 铁狮子力学仿真

1.1 铁狮子几何模型的建立

从图 1 可以看出, 铁狮子气势阳刚雄伟, 造型生动逼真, 形体极为“不规则”, 采用传统的建模方法已不适用。近年来广泛应用于机械加工、汽车制造以及医疗等领域的逆向工程 CAD 建模技术^[4]为铁狮子几何模型的建立提供了新的思路。逆向工程指在没有原始图纸、文档或 CAD 模型的情况下, 对已有实

收稿日期: 2010-01-07

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAK20B00)

作者简介: 王晓东(1977—), 男, 讲师, 博士生, 主要研究方向为钢结构及特种结构. E-mail: xdwang@hrbust.edu.cn

王伟(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为能源结构的分析设计、抗震抗风、振动控制.

E-mail: wwang@hit.edu.cn

物通过三维数字化测量手段建立几何模型.笔者运用逆向工程建模技术采用三维激光扫描设备获取点云并通过曲面拟合的方式建立铁狮子的几何模型.经过处理后的模型见图 2.

1.2 铁狮子有限元模型的建立

三维几何模型由 216 084 个空间曲面组成,为了得到有限元模型还需要进行进一步的处理.首先将空间曲面封闭,然后形成空间实体,最后在空间实体上划分网格.铁狮子模型的建立基于通用的商业有限元分析软件 ANSYS10.0 进行的.

铁狮子本身材料为铸铁,采用三维四面体 8 节点 SOLID185 单元,它可以模拟单元在受拉和受压 2 种情况下不同的强度.支架部分为钢管,采用三维 4 节点 SHELL181 单元模拟.支架与狮身以及裂缝之间的内力传递采用三维 4 节点接触单元 CONTA173 和三维目标单元 TARGE170 模拟.台座部分采用三

维 8 节点 SOLID45 单元模拟.

根据文献[3]研究报告,铁狮子材质主要为麻口铁、白口铁和灰口铁,含碳质量分数大于 4.0%,属于铸铁,密度为 $7\ 200\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$,弹性模量为 60 GPa,泊松比为 0.3,抗拉强度为 $120\ \text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$,抗压强度为 $390\ \text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$.

支架包括无缝钢管、槽钢以及角钢支架.弹性模量为 206 GPa,泊松比为 0.3,屈服强度为 $235\ \text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$,采用双线性随动强化模型,斜率为 0.5%.接触单元的法向接触刚度定义为 1.0,浸入度系数取 0.1.台座采用 C15 混凝土,弹性模量为 $2.20\times 10^4\ \text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$,泊松比为 0.3,密度取 $2\ 500\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

最终建立的模型共有 145 298 个单元,其中 SOLID185 单元 144 486 个,SHELL181 单元 812 个,共有 45 587 个节点.见图 3 所示.



图 1 铁狮子现状照片

Fig.1 Photo of iron lion at present



图 2 铁狮子几何模型

Fig.2 Geography model of iron lion

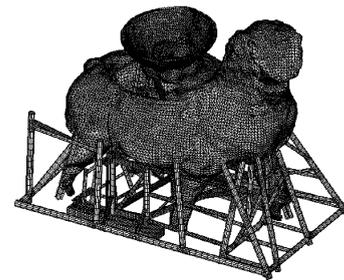


图 3 铁狮子有限元模型

Fig.3 Finite element model of iron lion

1.3 铁狮子有限元模型的验证

铁狮子作为我国乃至世界上体积最大的室外铁质文物,具有重要的历史、艺术、科学的研究价值.工程应用领域传统的加卸载的方法不能应用到铁狮子身上,因而给模型的验证带来了一定的难题.文献[1]中王世杰记载的铁狮子在 1984 年吊装移位时的

实际测量质量以及文献[3]计算结果 2 个方面作为模型验证的主要内容.

通过对铁狮子施加重力荷载后,得到铁狮子整体质重和狮身、狮头以及莲花盆质量.本次计算质量与 1984 年铁狮子移位吊装过程中各部分的测量质量以及文献[3]计算结果三者的对比列于表 1.

表 1 计算质量与测量质量以及文献[3]结果的对比

Tab.1 Mass comparison of the calculated measured and the reference results[3]

部位	计算质量/t	测量质量/t	文献[3]质量/t	计算质量与测量质量差值/t	计算质量与测量质量误差率/%	计算质量与文献[3]质量差值/t	计算质量与文献[3]质量误差率/%
整体	31.06	31.50	31.53	0.44	1.4	0.47	1.5
狮身	24.78	25.00	25.02	0.22	0.9	0.24	1.0
狮头	3.39	3.50	3.72	0.11	3.1	0.33	8.9
莲花盆	2.89	3.00	2.79	0.11	3.7	0.10	3.6

从表 1 数据可以看出,计算得到的铁狮子总质量为 31.06 t,测量质量为 31.50 t,两者仅差 0.44 t,

误差率为 1.4%.而其余狮身质量仅差 0.22 t,头部、莲花盆以及狮身质量相差更少,仅为 0.11 t.本次所

建模型与文献[3]所建模型从质量上来看基本吻合,总质量仅差0.47 t.狮身和莲花盆质量相差极小,只有狮头质量相差大一点,为0.33 t,属于完全可以接受的范围.

经过与测量质量以及北京科技大学计算质量的结果对比可以得出本次所建模型从质量这个角度来说是合理的,也是准确的.

通过上述验证结果对比可以看出本次所建立的模型准确,可以进行进一步的计算.

2 铁狮子结构在静力作用下的性能

2.1 荷载选取

目前状态下铁狮子本身所受到的外荷载主要有自重、风荷载以及环境温度变化所引起的作用.

2.1.1 自重

铁狮子本身质量超过30 t,因而自重下所产生的应力、应变以及变形是不容忽视的.在本次计算中考虑了狮身自重和支撑钢管的自重2部分内容.限于篇幅仅列出在自重作用下狮身第1主应力云图,见图4所示.

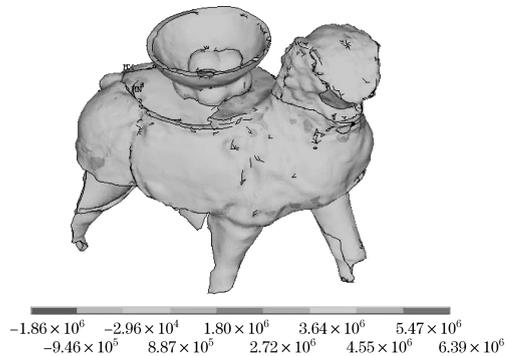


图4 自重下狮身第1主应力云图

Fig.4 The first principal stress contour of lion by gravity

2.1.2 温度作用

沧州属暖温带大陆性季风气候,年均温度12.5℃,1月份平均温度3.9℃,7月份平均温度26.4℃.昼夜温差相对较小,采用-20℃作为计算温差.20℃温差下的狮身第1主应力云图见图5所示.

2.1.3 平均风荷载

常规的荷载计算一般根据《建筑结构荷载规范》中给出的公式 $w_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0$ 来进行计算,其中, β_z 为风振系数, μ_s 为风荷载体型系数,铁狮子属于不规则形体,规范中没有给出相应的内容, μ_z 为风荷载体型系数, w_0 为基本风压.因而采用数值模拟的

方法将风力作为流体、铁狮子本身作为流体的边界来进行计算.根据几何模型创建铁狮子的计算流体空气域见图6所示.计算中考虑了前、后、左、右以及正前方45°方向在风速为 $32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (12级风)、 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (9级风)、 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (6级风)的作用下风阻力大小及铁狮子周围流场分布情况等.其中从右向左作用在铁狮子上(右风)风速为 $32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时所产生的阻力最大,其值为9.964 5 kN,接近10 kN.其风荷载流线图见图7所示.狮身节点数目共为40 556个,平均分配到每个节点荷载0.25 N.自左向右作用下(左风)阻力值为9 847.3 N,与自右向左作用结果相差很少,因而最后选取2个方向相同的节点荷载分别进行计算.在左风作用下狮身第1主应力云图见图8所示.需要说明的是风荷载作用实际是自重及风两者共同作用的结果.

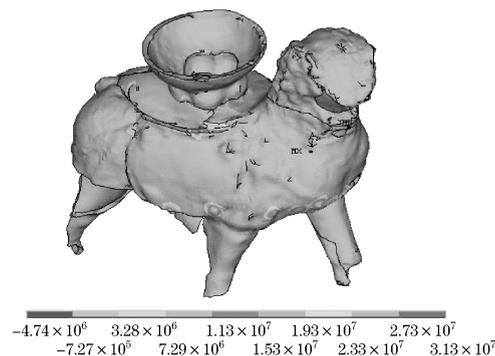


图5 20℃温差下狮身第1主应力云图

Fig.5 The first principal stress contour of lion by the 20℃ in temperature

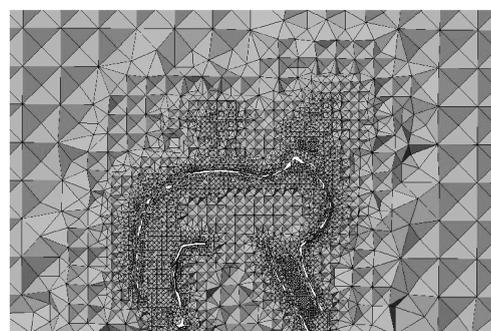


图6 流场计算时铁狮子空气域网格

Fig.6 Air-shed grid of lion

2.2 结果对比分析

将上述3种荷载作用下结构的最大应力、最大应变和最大位移分别提取出来,为了能够更清晰地表达,将整个结构区分成铁狮子本身、内部支架和外部支架3部分,具体结果列于表2~4.其中铁狮子本

身为铸铁材质,拉压性能不同,因而采用第 1 主应力和第 3 主应力来分析,支架为钢管,采用米泽斯屈服应力来进行表达.

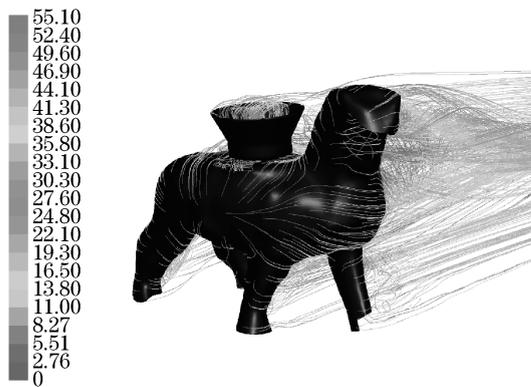


图 7 右风下狮身风载荷流线图(风速 $32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig.7 Flow pattern of lion under wind load from right to left(wind speed $32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

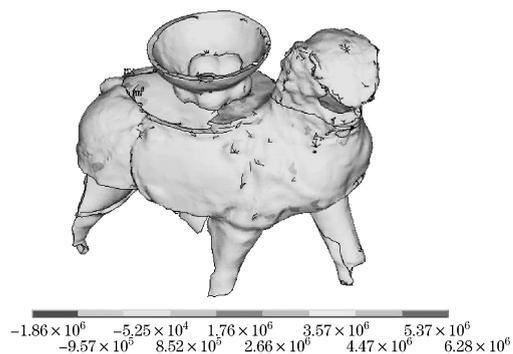


图 8 左风下狮身第 1 主应力云图

Fig.8 The first principal stress contour of lion under wind load from left to right

表 2 结构最大应力情况

Tab.2 Maximal stress of the structure

影响因素	(N · mm ⁻²)			
	狮身第 1 主应力	狮身第 3 主应力	内部支架米泽斯应力	外部支架米泽斯应力
自重	6.39	15.90	18.10	33.50
左风荷载	6.28	15.80	18.30	33.40
右风荷载	6.50	15.90	17.90	33.70
温度	31.30	15.30	55.40	71.30

表 3 结构最大应变情况

Tab.3 Maximal strain of the structure

影响因素	米泽斯应力			
	狮身第 1 主应力 / 10 ⁻⁴	狮身第 3 主应力 / 10 ⁻⁴	内部支架米泽斯应力 / 10 ⁻⁵	外部支架米泽斯应力 / 10 ⁻⁴
自重	1.14	2.59	8.80	1.74
左风荷载	1.06	2.58	8.92	1.74
右风荷载	1.22	2.60	8.69	1.76
温度	3.82	2.98	7.91	3.47

表 4 结构最大位移情况

Tab.4 Maximal displacement of the structure

影响因素	mm					
	狮身		内部支架		外部支架	
	x 向	z 向	x 向	z 向	x 向	z 向
自重	0.393	0.323	0.163	0.294	0.061	0.202
左风荷载	0.358	0.325	0.132	0.297	0.061	0.202
右风荷载	0.428	0.320	0.366	0.292	0.076	0.202
温度	0.333	0.677	0.362	0.660	0.193	0.218

从表 2 中可以看出,在 3 种不同荷载作用下结构的应力都不大,均没有超过材料的容许应力.狮身容许的抗拉强度为 $120 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$,抗压强度为 $390 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$.支架容许的屈服强度为 $235 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$.除了第 3 主应力外温度作用的应力数值明显大于自重和风荷载作用的结果,而自重作用和风及自重作用引起的结构应力相差很小,最大差值为内部支架的米泽斯应力,相差 $0.40 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$.由于铁狮子身体上存在很多条裂缝,加上铸铁的抗拉强度较低,因而拉应力大小和位置是研究铁狮子结构的主要关注点之一.狮身第 1 主应力在右风作用下的最大应力出现狮尾根部上方,此处由于裂缝的存在所剩不多,具体位置见图 9 所示.温度作用下狮身第 1 主应力最大值出现在左前腿根部,此处存在较长的裂缝,具体位置见图 10 所示.相对外部支架($\Phi 133 \times 5$ 无缝钢管)而言,内部支架多数钢管采用 $\Phi 75 \times 5$ 因而刚度较低,受力也小,因而主要关注外部支架应力.外部支架在右风作用下最大应力出现在支撑左后腿前方的竖向支架根部,详见图 11 所示.自重单独作用下此处应力值仍然最大,限于篇幅这里没有列出.温度作用下最大应力出现在后腿前面槽钢横梁上,此处有多根支架相交,应力较大,具体位置见图 12 所示.

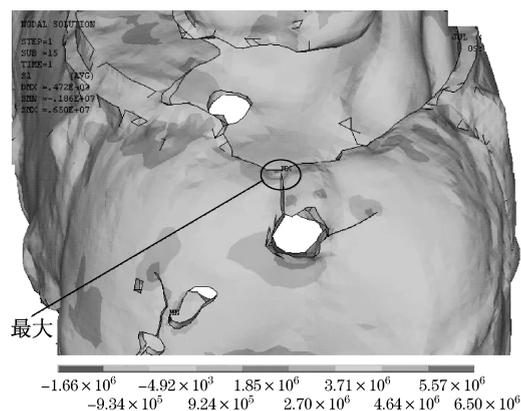


图 9 右风下狮身第 1 主应力最大值位置

Fig.9 Position of the first principal stress of lion

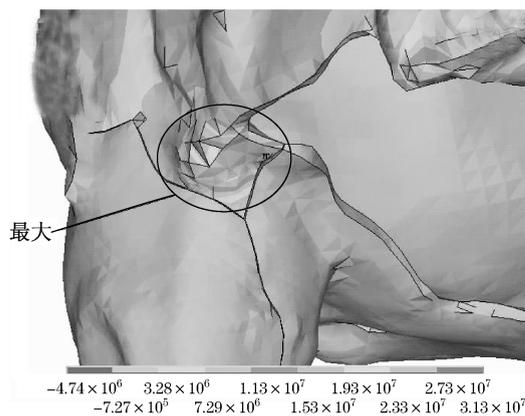


图10 温度作用下第1主应力最大值位置

Fig.10 Maximal stress position of lion under the effect of temperature

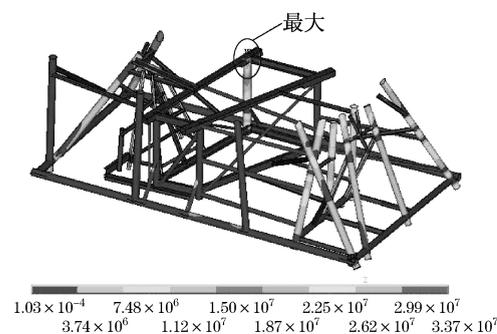


图11 右风下外部支架米泽斯应力最大值位置

Fig.11 Position of maximal von mises stress of lion under wind load from left to right

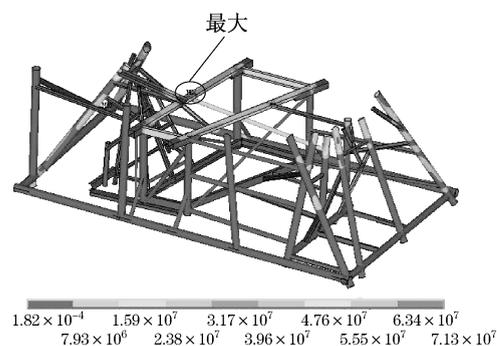


图12 温度作用下外部支架米泽斯应力最大值位置

Fig.12 Position of maximal von mises stress of lion under the effect of temperature

从表4可以看出,无论自重、风还是温度作用,结构的应变数值在数量级上完全相同,同样是温度作用引起的数值偏大.表4给出的是结构各个部分最大位移的数值.对于铁狮子这种特殊的结构来说最大位移限制大小的给出比较困难,鉴于目前其有很多钢管支架支撑,参照GB50017—2003《钢结构设

计规范》关于框架顶点最大位移限值为 $H/500$,这里偏于安全取 $H/1\ 000 = 6\ 000/1\ 000 = 6\ \text{mm}$,其中, H 为自基础顶面至柱顶的总高度.从表中数值可以看出所有的数值都远远小于上述限值,其中最大的为右风作用下狮身的位移(x 向),最大值位置出现在右后腿下方,见图13所示.同样是在右风作用下支架的位移最大,并且由于外部支架刚度大因而数值较小仅为 $0.076\ \text{mm}$,内部支架达到 $0.399\ \text{mm}$.狮身竖向位移最大值出现在自重单独作用下,其值为 $0.323\ \text{mm}$,位置在莲花盆顶右后方,主要原因是狮身背部右后方残缺,依靠1根方钢管支撑莲花盆,方钢管的刚度偏小.详见图14所示.

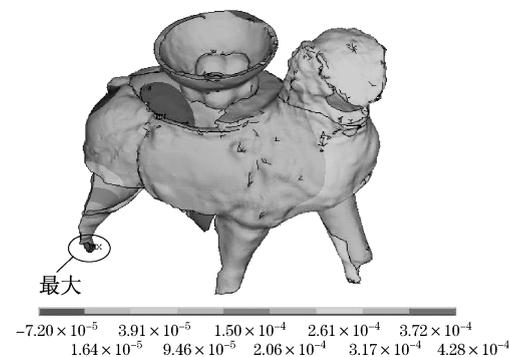


图13 右风下狮身位移最大值位置

Fig.13 Position of maximal displacement of lion under wind load from right to left

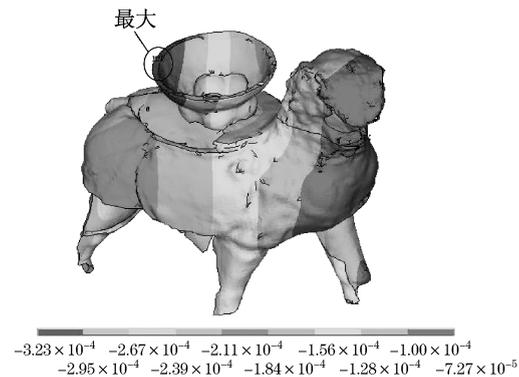


图14 自重下狮身位移最大值位置

Fig.14 Position of maximal displacement of lion by gravity

3 结论与建议

通过对铁狮子结构进行数值模拟,并对整个结构在自重、风荷载以及温度作用下的应力、应变及位移情况进行了研究,可以得出以下结论:

(下转第1443页)