

文章编号: 1005-1538(2022)04-0030-09
DOI: 10.16334/j.cnki.cn31-1652/k.20210302054

三星堆一号青铜神树的三维数字建模与静力学分析

谢振斌¹ 李 颀² 杨文涛² 牛康民² 郭建波¹ 余 健³ 陈坤龙²

(1. 四川省文物考古研究院, 四川成都 610000; 2. 北京科技大学, 北京 100083; 3. 三星堆博物馆, 四川德阳 618300)

摘要: 结构稳定性是评估文物安全的重要方面。三星堆二号坑出土1号青铜树体量庞大、结构复杂,且存在腐蚀、裂纹等危险因素,为了充分记录、评估其保存状况,本研究在原始几何形状和内部构造的基础上,利用三维数字建模技术,建立其几何模型和数值模型,并估算出青铜神树的质量分布和质心位置等无法实地测量的数据,并使用有限元方法,从应力和位移的角度分析青铜树的静置状态下的安全性。经过有限元模拟和材料力学简化计算,发现龙身和树干连接处、树枝根部应力较大,是易受损区域。

关键词: 三星堆青铜器; 青铜神树结构分析; 文物数字建模; 青铜器安全性评估

中图分类号: K876.41 **文献标识码:** A

0 引言

三星堆1号青铜神树1986年出土于二号祭祀坑,出土时树干断裂为3节,枝干残断为18节,树座破残为4大块,树底盘能拼对的残片为30多块,神树上的鸟、果实、挂饰架散布于坑内的残碎片中。经过修复后残高3.96 m,九枝分三层展开,枝上挂坠花果造型,其上分别站立一只神鸟,造型各异,栩栩如生;一条长龙延树干旁侧游动而下,威风灵动^[1]。三星堆1号青铜神树采用分铸、套铸等方法制造而成,体量庞大、结构复杂。由于地理位置的原因,青铜神树经历过汶川8级地震,虽然没有发生肉眼可见的破坏,但仍然对文物保护人员敲响警钟:文物(尤其是大型文物)保护需要定量分析和科学评估。

一直以来青铜器的保护修复研究多集中于锈蚀机理、清洗缓释等方面,对其结构安全性的研究起步较晚,在此之前,对建筑、桥梁等大型结构的结构分析较多且成熟。国内最早将结构安全分析用于文物的是郑敏华等^[2],采用有限元方法计算永乐大钟的固有频率和振型。徐永君等^[3]采用ANSYS软件对永乐大钟及其悬挂支撑系统建立了有限元模型,并进行了撞钟过程有限元瞬态分析及动力强度校核,为大钟的保护和加固提供参考和指导。此外,王晓

东等^[4-5]使用三维激光扫描技术建立沧州铁狮模型,并分析了其在罕见地震下的抗震性能。Li等^[6]研究了敦煌莫高窟彩绘雕塑的抗震安全性。国外同样具有类似案例,比如阿波罗神庙石柱^[7]和米开朗基罗的大卫雕像^[8],通过有限元方法计算出相对薄弱部位,并评估地震活动下的稳定性。

本研究利用三维数字复原方法构建青铜神树数字模型,使用有限元方法对三星堆1号青铜神树的质量分布和静态力学等进行了分析,以期为其结构安全性评估提供科学依据。

1 三维建模方法

1.1 三维数字复原

三维激光扫描是目前使用最广泛的三维数据收集方式,可以快速、大量地采集空间点位信息。主要通过对文物自身的扫描与分析,将文物的形状、纹理以及颜色按实际比例生成计算机模型,为文物修复提供参考模型^[9-10]。图1为青铜神树上一个圆盘装饰物的实体建模过程,主要流程包括点云数据处理、点云封装和实体模型建立,具体流程如下:

1) 三维数据采集。使用Geomagic Studio软件处理青铜神树点云数据。将各机位的测量结果进行合并整理,可得出青铜神树整体轮廓、外表面等测量数据。图1为青铜神树整体点云图。

收稿日期: 2021-03-13; 修回日期: 2021-12-17

作者简介: 谢振斌(1971—),男,1995年毕业于四川大学化学系化学专业,研究馆员, E-mail: 492087302@qq.com

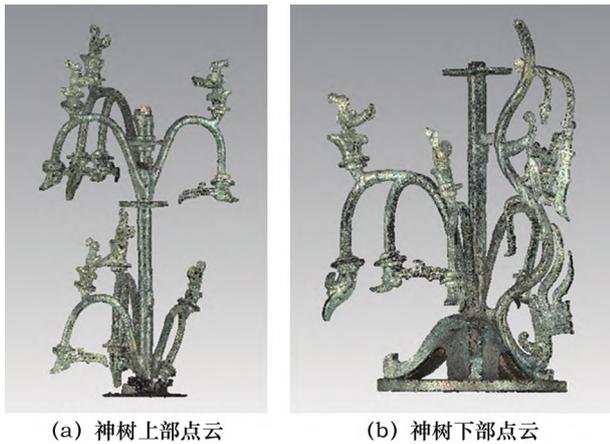


图1 青铜神树整体点云图

Fig.1 Point cloud of the bronze sacred tree

2) 点云数据处理。在数据采集完成后,对点云数据进行优化处理。扫描过程中可能会受到外部环境或者设备扰动等干扰,导致原始点云中存在偏离表面的点数据,删除无效点和质量较差的数据点,对点云数据进行降噪处理和优化。图2a所示为青铜神树上一圆盘造型的点云数据,可以看到圆盘表面由细密坐标点标定。由于树枝树干呈细长空心管状,通过外部设备无法获得内部形貌,因此只能通过后期X射线拍照获得各部位壁厚数据。

3) 曲面封装。通过算法将相邻三点连接成三角形面,并把小三角形面拼接成一体,再进行光滑处理。图2b为经过拼接得到的圆盘表面,可以看到依旧存在孔洞,这时需要填补空缺,直到形成这一圆盘构件封闭表面。为方便处理和提高计算速度,将青铜树点云划分为树枝、树干、盘龙、花果和底座等不同构件,分别得到这些部分的三维表面模型。

4) 实体模型建立。使用“表面填充”功能,形成各部分实体构件,输出三维实体模型,圆盘的三维实体模型如图2c。由于青铜神树具有空心树干和树枝,但通过表面填充的方法只能得到实心树干和树枝,因此需要“抽壳”,即根据壁厚挖去树内多余部分。依据青铜神树X射线探伤图谱,树枝壁厚在2.5~4 mm之间,树干壁厚呈下厚上薄的分布,在3~5 mm;已发表的修复报告提到,青铜树的龙身壁厚在2~4 mm,树干厚度在0.1~4 mm之间,树枝壁厚在0.8~3 mm之间,底座圈则较厚,约为4 mm。由于存在不同程度的氧化腐蚀,青铜神树存在极薄的部位,厚度小于1 mm,但是薄弱部位仅发生在局部,树干和树枝厚度为均匀厚度,对整体结构

影响较小;另外,由于过去对青铜神树数据采集不充分,X射线探伤仅从固定方向采集截面,目前缺乏有效方法获得详细的内壁厚度。因此,综合青铜神树X射线探伤图谱和修复记录,把树干和底座厚度设置为4 mm,龙身和树枝为3 mm,后文讨论了树枝在不同平均厚度时的受力情况。图3为渲染后的青铜树整体模型。



图2 三维重建过程

Fig.2 3D reconstruction process



图3 青铜神树实体化装配总体图

Fig.3 Overall drawing of the materialized assembly of the bronze sacred tree

1.2 有限元模型建立

在完成青铜神树实体建模后,使用HyperMesh软件建立数值模型,模拟青铜神树加固后的状态。为方便后文对青铜神树的描述,对树上九枝编号:下层三枝中,龙身左右两支为①号和②号,龙身背侧大树枝为③号;中层和上层树枝按照相应位置分别为④号至⑥号、⑦号至⑨号,如下图4a。

1.2.1 单元网格划分 青铜树存在程度不等的锈蚀和破损,锈层脱落更是造成树座边缘厚度不到

1 mm,甚至直接缺失。厚度过小会造成有限元单元过度变形,影响计算结果,而采用过小单元会造成计算成本增大,并且这些过薄的部位对整体结构的影响甚微。因此,选择将过薄的部位切除省略。

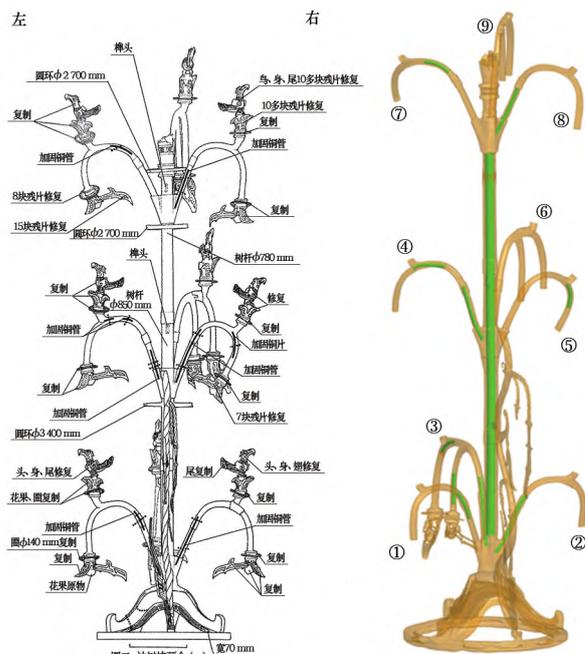
青铜神树本身材料为铅锡青铜,树枝、树干、龙身以及底座圈都是空心管状结构,因此在仿真过程中该部位采用八节点六面体 SC8R 单元和六节点三角形 SC6R 单元。这两种连续壳单元适用于较薄的结构,并且比传统壳单元更加准确,可以模拟单元在受拉、压、弯、扭不同情况下的强度。三脚底座和龙头等部位为实心结构,几何形状复杂,很难使用六面体单元,因此采用四面体单元(C3D4),通过细化网格提高精确度。在六面体单元和四面体单元之间,采用金字塔单元(C3D8R)过渡,保证单元之间良好的连接。

将青铜树本体模型建好后,为了贴合实际青铜树状态,需构建青铜内部铜管和环氧树脂的有限元单元。

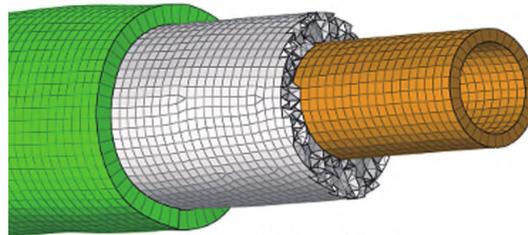
树枝的铜管加固的过程中,采用的方式是先在枝干断裂处内放置铜管,并随枝干的弯曲弧度加工成弧形;在枝干断茬口两端攻丝,通过螺丝紧固铜管;在断茬口对接的空隙中,用环氧树脂配适量的填充料及颜料补缝;往枝干内灌注环氧树脂,灌注口选在枝干弯曲的上端,裂缝处或是神鸟底部孔洞;待环氧树脂固化后,除去灌注口,打磨固定新铜管的螺丝。而树干被分为上下两部分,在两部分拼合起来之前,在树干内加新铜管,对接好后从树顶端往下灌注环氧树脂。

树枝填充铜管厚度为 2 mm,直径为 2 cm,长度在 20~40 cm 不等,而树干内铜管厚度为 5 mm,直径为 5 cm,总长度为 254 cm。

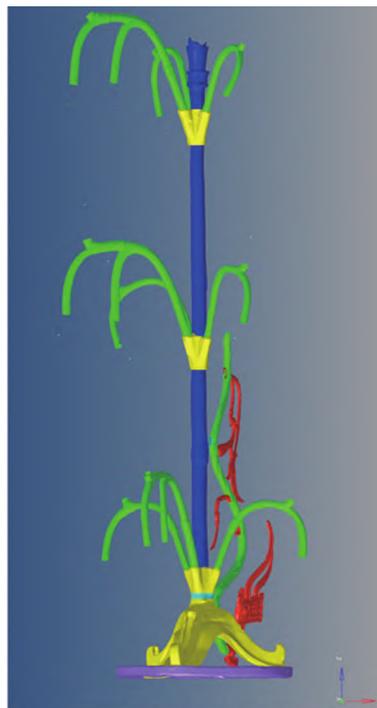
按照修复报告和 X 射线照片中铜管的位置和尺寸,在原有模型上添加铜管,如图 4a。与树干和树枝相同,采用连续壳单元建立铜管模型,此时铜管和树体不接触。修复过程中使用环氧树脂填充在树干内壁和铜管之间,使用四面体单元构建树脂,界面之间单元节点完全耦合,树干、环氧树脂和铜管的关系如图 4b。青铜树有限元模型局部如图 4c,划分网格后的节点数为 602 618,单元数为 1 108 547,其中连续壳单元(SC8R 和 SC6R)数量为 248 032,C3D4 单元数量为 830 319,金字塔单元数量为 30 196。四面体单元(C3D4)占比较高,造成节点数少、单元数多的现象。



(a) 局部铜管位置



(b) 树枝、环氧树脂和铜管单元



(c) 青铜树局部

图 4 青铜树网格划分细节

Fig. 4 Details of the mesh division of the bronze sacred tree

1.2.2 材料属性的确定 为计算质量分布,须获得青铜神树各部分材料密度,由于文物受保护,对其研究手段受限,目前仅通过前人的文献资料和工程材料手册,由材料成分反推材料性能参数。

曾中懋^[11]、马江波等^[12]对底座中心金相观察,可以发现其与红铜高度相似,且硬度也相似,故本研究将底座处材料参数取纯铜值。取弹性模量为 117 GPa,泊松比为 0.326,密度取 8.9 g/cm³。

而对于树干、树枝和龙身,参考 GB/T 1176—2013《铸造铜及铜合金》,ZCuPb25Sn5 是成分最为接近的工业用铜合金牌号。对应材料成分见表 1。抗拉强度为 185 MPa,载荷下延伸 0.5% 时的屈服强度为 90 MPa,抗压强度为 75 MPa,弹性模量为 72.4 GPa,泊松比为 0.33,密度为 9.29 g/cm³。

表 1 青铜神树各个部分成分及其密度

Table 1 Composition and density of each part of the bronze sacred tree

取样部位	铜/%	锡/%	铅/%	密度/(g·cm ⁻³)
座子	79.20	2.30	18.50	9.22
底座	96.90	0.70	1.70	8.98
树干	78.90	1.20	19.90	9.27
盘龙	79.70	0.10	20.30	9.29
树枝	73.90	0.40	25.70	9.41
花着	64.50	1.40	32.70	9.69

花果因处于树枝末端,不承受很大的载荷,故不考虑其性能,除去微量元素,不考虑在成型过程中形成固溶体等情况,根据材料密度公式(1),可以计算其密度,为 9.69 g/cm³。

$$\rho = \frac{100}{\frac{\omega_{\%Cu}}{\rho_{Cu}} + \frac{\omega_{\%Sn}}{\rho_{Sn}} + \frac{\omega_{\%Pb}}{\rho_{Pb}}} \quad (1)$$

式中, ρ 为密度; ρ_{Cu} 、 ρ_{Sn} 、 ρ_{Pb} 依次为纯铜、纯锡、纯铅的密度,取值为 8.9 g/cm³、7.29 g/cm³、11.34 g/cm³, $\omega_{\%Cu}$ 、 $\omega_{\%Sn}$ 、 $\omega_{\%Pb}$ 为铜、锡、铅的质量分数。

花鸟配饰复杂精致,并且对整体模型的影响有限,故将花鸟和树干上三个圆盘状装饰物简化为质心点。图 5 与表 2 为各装饰物的质心位置和质量。

此外,还需要确定铜管和环氧树脂的材料参数。由于修复所用铜管和树脂材料参数等数据已无从求证,故都采用常用数值:铜管弹性模量为 117 GPa,泊松比为 0.3;环氧树脂的密度按 1.1 g/cm³ 计算,弹性模量和泊松比分别为 1 GPa 和 0.38。

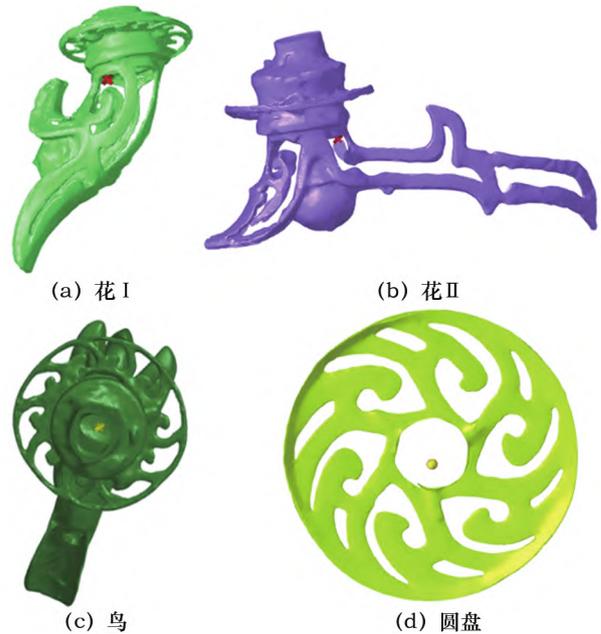


图 5 青铜树装饰物质心位置

Fig. 5 Mass center positions of bronze tree decorations

表 2 青铜树装饰物质量

Table 2 Bronze tree decoration mass (kg)

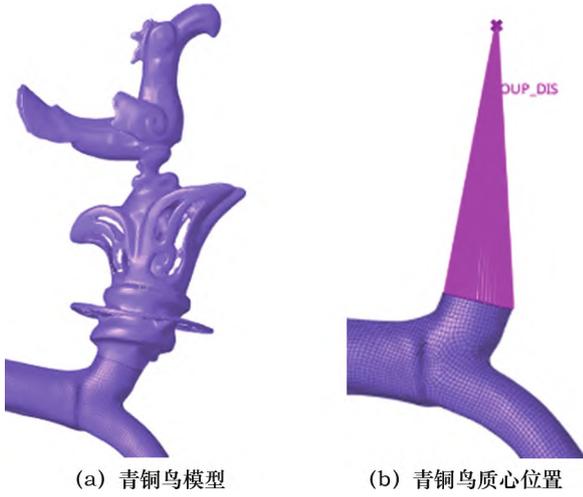
装饰物	质量
圆盘(上)	1.26
圆盘(中)	1.48
圆盘(下)	2.31
花 I	3.35
花 II	4.05
鸟	4.82

1.2.3 边界条件和加载方式 花鸟等装饰物可简化成质点与数值末端采用运动耦合的形式相连接,质点作为参考点与树枝上节点建立约束,以达到相同位移,如图 6 所示。青铜神树静置于博物馆玻璃防护罩内,树身只受到自重影响。图 7a 为博物馆中青铜神树实貌,青铜神树底座圈的底面有 10 mm 的孔三个,与大理石座铆接固定,上有三根钢丝绳呈 120° 夹角与青铜神树上部固定,增加稳定性。

在建立有限元模型时,在底座圈底部选择三孔位置采取全约束,以添加竖直向下的重力加速度的方式来模拟青铜神树受重力情况,如图 7b。

1.2.4 质量分布计算 通过计算,青铜神树的总质量为 332.92 kg,以底座圆的圆心为坐标原点,建立坐标系,所得到三维质心为(-82.38 mm, -79.17 mm, 1387.49 mm)如图 8 所示。可以看出青铜神树的质心在坐标原点附近,完全落在底盘的圆环范围内。这说明青铜神树具有很好的稳定性,由于盘龙

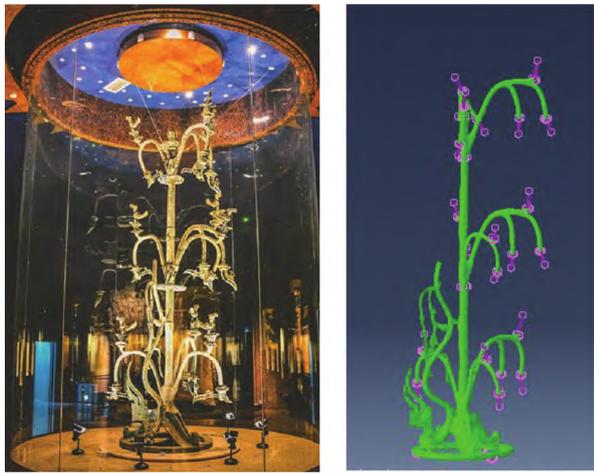
比较轻,配重作用减弱,另一侧的树枝和花鸟装饰都比较重,导致了质心偏向龙身背侧。



(a) 青铜鸟模型 (b) 青铜鸟质心位置

图 6 青铜鸟质心与树枝的连接

Fig. 6 Connection of the mass center of a bronze bird to a branch



(a) 青铜神树实拍图 (b) 青铜神树模型图

图 7 青铜树实体与有限元模型

Fig. 7 Bronze sacred tree and its finite element model

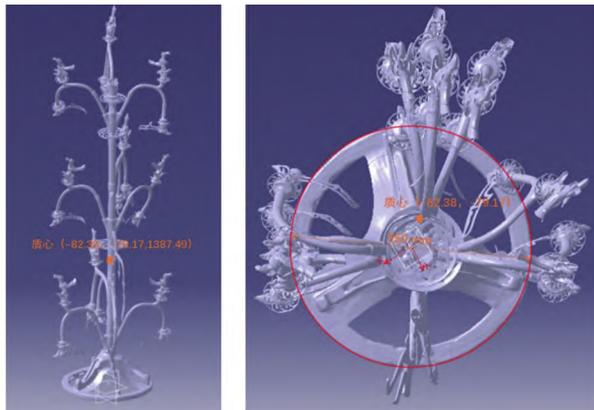


图 8 青铜神树质心分布

Fig. 8 Mass center distribution of the bronze sacred tree

按照底座、枝干、主干、花鸟、盘龙等五个部分划分青铜神树,这五部分的质量分布如表 3 所示,从中可以看出青铜神树的质量分别集中在树座和花鸟两个方面,分别占到了总质量的 35.22% 和 27.00%。

表 3 青铜神树各部分质量及质量分数

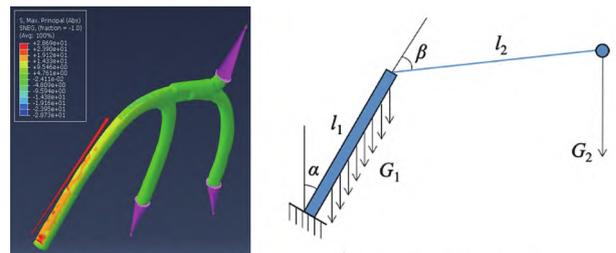
Table 3 Mass and mass fraction of each part of the bronze sacred tree

部分	质量/kg	质量分数/%
底座	117.26	35.22
主干	58.36	17.53
枝干	41.58	12.49
花鸟	89.88	27.00
盘龙	25.84	7.76

2 有限元方法核验

使用 ABAQUS 软件进行有限元计算,在此之前,应先验证计算方法合理性。通过对有限元计算结果和简化模型的理论计算对比,验证模型可靠性。截取完整青铜树中③号树枝作为计算基础,应力分析结果如图 9a,黄框部分在检验计算时简化为质量点,仅验算红色箭头覆盖的部位,简化后模型应力图如图 9b,图中树枝空心杆质量 G_1 为 1.1 kg,长度 l_1 为 441 mm,简化质心质量 G_2 为 16.6 kg,与树枝端距离 l_2 为 362 mm,两个夹角 α 和 β 分别为 24° 和 55° 。

图 8a 中红色箭头覆盖部位的有限元计算结果与材料力学计算结果对比如图 10,与利用材料力学方法计算相比,有限元结果有一定的波动性。图 10a 对比两者弯矩,可以看到,有限元结果偏大,最大误差出现在树枝根部 190 mm 处,约为 5.7%。图 10b 对比树枝截面上剪力与压力情况,整体上有限元计算出的压力值偏大,剪力值偏小,误差最大约为 12.6%。



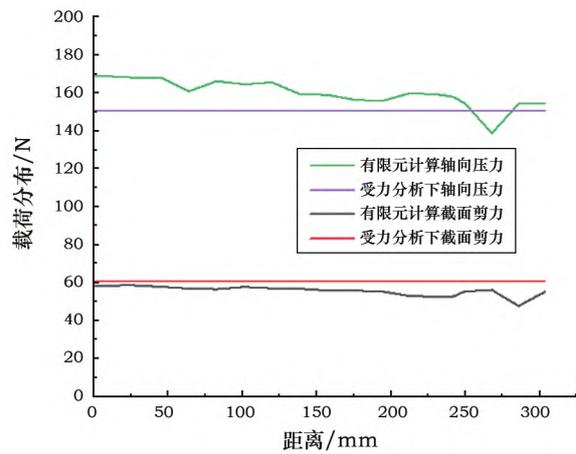
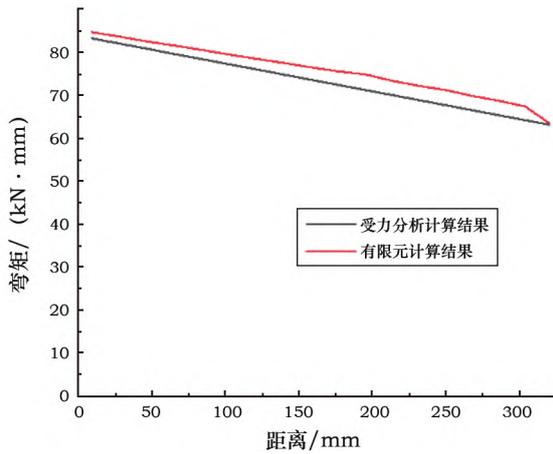
(a) ③号树枝有限元模型 (b) ③号树枝简化模型

图 9 ③号树枝有限元模型与简化模型

Fig. 9 Finite element model and simplified model of the No. 3 branch

上述误差产生的原因,一方面是树枝根部套铸在树干上,且树枝表面不光滑,有一些凸起和凹陷,造成应力集中现象,使结果产生波动。另一方面,树

枝存在轻微弯曲,简化成直杆势必产生一定误差。但从整体趋势上看,有限元计算结果与手算结果基本符合。



横坐标为树枝上位置到树枝根部的距离

图 10 有限元计算结果与材料力学计算结果对比

Fig. 10 Comparison of the finite element calculation results and material mechanics calculation results

3 静力学分析

由于树枝分布不对称,树干轻微向龙身背侧偏斜,在填充铜管和环氧树脂前,上下两装饰物对于树枝来说相对重,树枝端位移较大,为 21.4 mm,神树质心(-82.38 mm, -79.17 mm, 1387.49 mm)投影仍处于底座圈中心,结构稳定。填充铜管和环氧树脂增大树枝承载能力,最上部鸟饰物的位移量从 21.4 mm 降低至 18.3 mm,减少 14.5%。

青铜神树静力下应力分布如图 11,整体应力分布均匀。应力最大值发生在底座圈底部的固定点,约为 100 MPa。在实际修复青铜神树时,除了修复原有的树座之外,还在树座底部浇筑了 4 cm 厚的加固件,然后将树座的加固件与树座圈的固件焊接成一体,最后将青铜神树底座圈三处通过铆钉固定于底部大理石板上。底部经过这些加固处理后已经具有足够的刚度,所以底部较大的应力不会影响整体结构安全。除去底座圈,青铜神树最大应力发生在龙尾和树干连接处(图 12),为 52.27 MPa。

④号树枝是一个较小的树枝,以此为例对比加固前后应力情况(图 13)。可以看出,填充铜管和树脂对树枝根部应力集中情况没有影响,而在树枝上能有 2.5 MPa 的降低,加固 50~200 mm 处的应力曲线几乎互相平行。这是因为青铜材料和环氧树脂的弹性模量分别为 72.4 GPa 和 1 GPa,相差巨大,导致环氧树脂的刚度远小于铜管的刚度,同时环氧树脂填充在

内部,受到弯曲时变形量比外部树枝小,所以树脂对应力重新分配的作用小得多。因此填充树脂后,虽然重量稍有增加,但整体上应力水平没有太大变化。

图 14 是经过树脂填充的神树九枝在重力作用下的应力分布,可以看出其应力远小于对应材料的抗拉强度。虽然计算所得结果小于材料的抗拉强度,但考虑到材料属性赋值时按照现在铅青铜的力学性能,而古代青铜受到腐蚀的影响,力学性能应比现代水平低。所以说,即使计算结果低于对应成分青铜材料的抗拉强度,龙身、树干连接处和树枝根部仍然是危险、易受损部位。

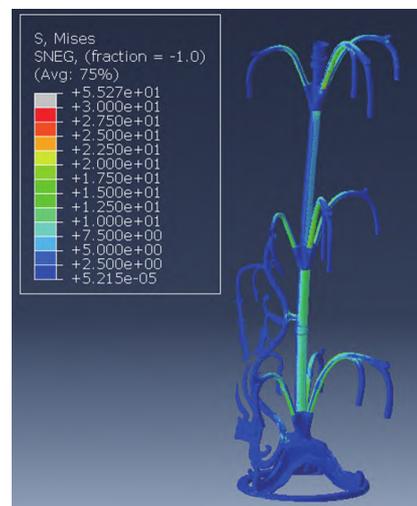


图 11 青铜树静力分析云图

Fig. 11 Cloud image of static analysis of the bronze tree

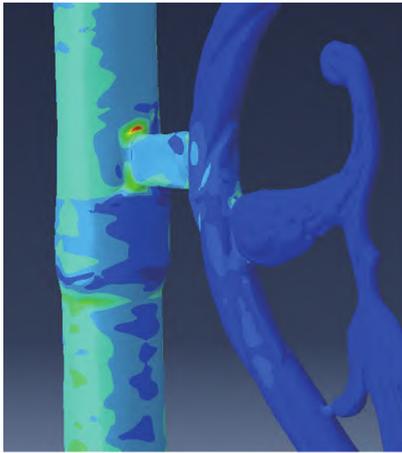


图 12 青铜神树静应力最大处
 Fig. 12 Maximum static stress of the bronze tree

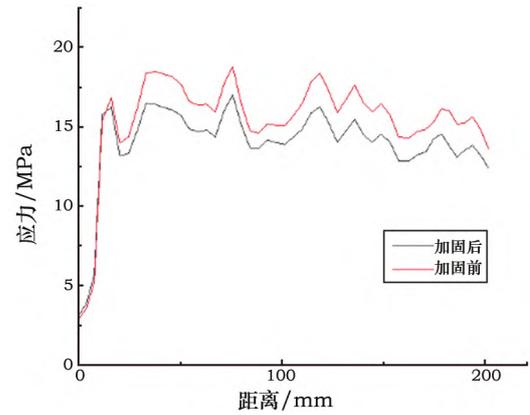


图 13 ④号树枝加固前后应力分布
 Stress distributions of the No. 4 branch before and after reinforcement

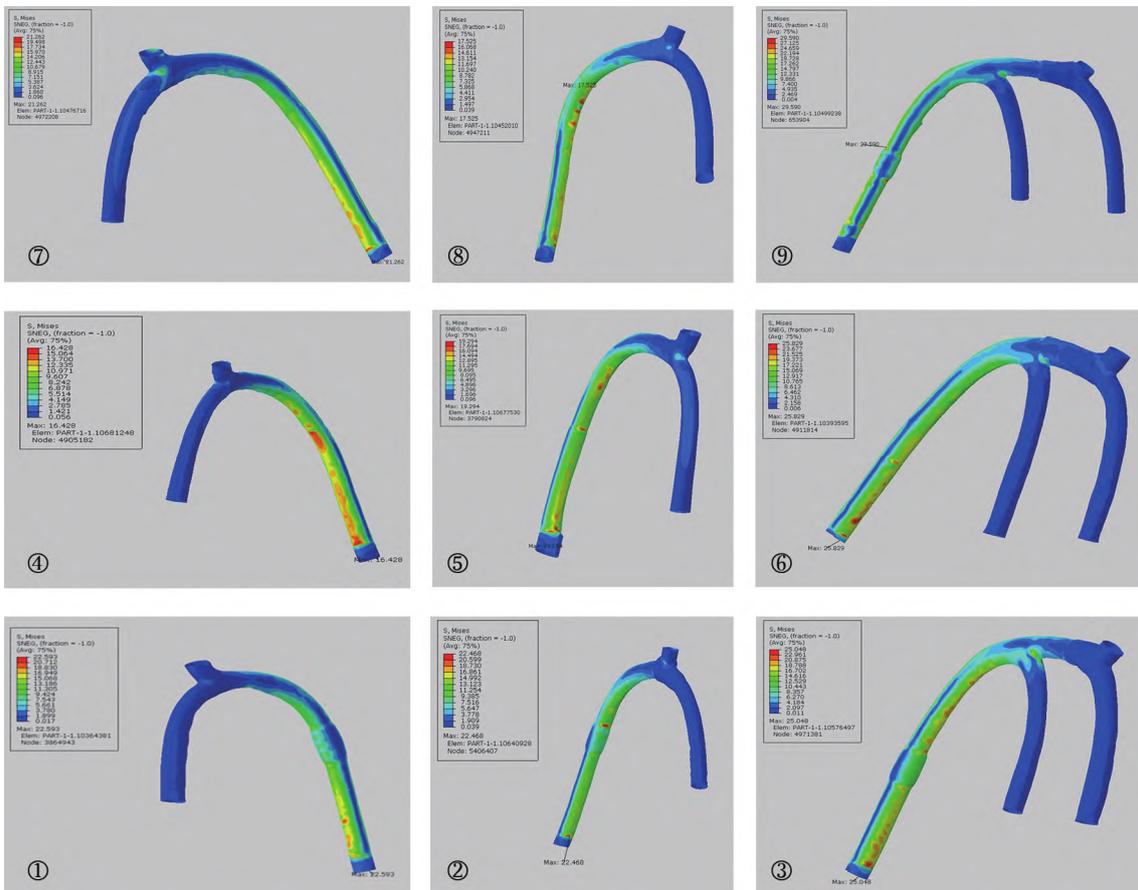


图 14 青铜神树九枝应力分布
 Fig. 14 Stress distributions of the nine branches of the bronze sacred tree

4 多种厚度下的受力情况分析

考虑到树枝存在锈蚀造成厚度变薄的可能,采用材料力学计算的方法对⑨号树枝进行不同厚度条件下的应力计算。

在上文中,考虑了最具代表性的情况:树干壁厚 4 mm 树枝平均壁厚 3 mm,验证龙身、树干连接处和树枝根部是最薄弱的部位。然而,由于青铜神树存在腐蚀变薄的情况,仅建立单一厚度下的青铜神树有限元模型存在局限性。因此,为了进一步评价

青铜神树在较薄厚度下的安全性,模拟了不同壁厚条件下青铜神树枝根的受力情况。

假设⑨号树枝平均壁厚为1、1.5、2、2.5和3 mm,计算在相应情况下树枝根部的受力情况,如图15所示。随着壁厚的降低,树枝配重线性减小,根部所受轴向压力和截面剪力线性降低。以此为基础计算出截面弯曲应力,结果如图16中树枝根部和上部厚度一致的情况,应力范围在16~20 MPa之间,整体变化不大。在对青铜神树进行安全评估时,最危险的状态是树枝根部薄,因此,计算了树枝上部平均厚度为1~3 mm,树枝根部厚度为1 mm的情况,即图15中红色曲线。可以看到,即使是在树枝上部平均厚度为树枝根部厚度的3倍时,应力仅为46 MPa左右,低于对应成分青铜材料的抗拉强度,具有一定的安全性。

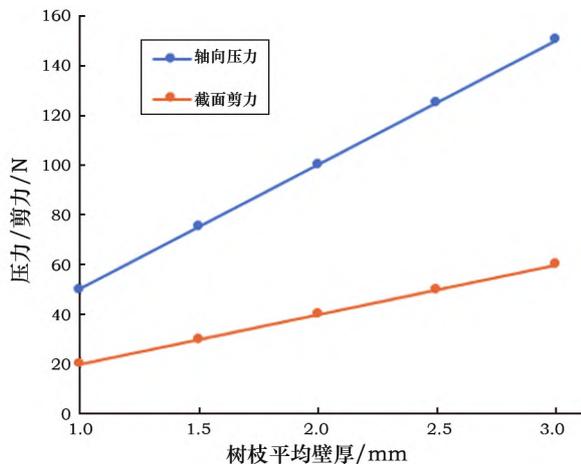


图15 不同壁厚的青铜树枝根部受力情况

Fig. 15 Force conditions of branch roots with different thickness

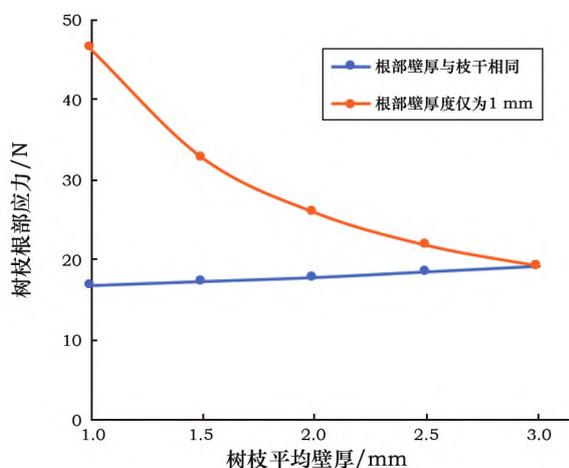


图16 不同壁厚的青铜树枝根部应力变化

Fig. 16 Stress conditions of branch roots with different thickness

5 结论

1) 计算结果显示,青铜神树的总质量在300 kg以上,质心分布于底盘的圆环范围内,抗倾覆稳定性满足展陈要求。

2) 神树的树枝分布不对称,树干轻微向龙身背侧偏斜,在填充铜管和环氧树脂前,上下两装饰物对于树枝来说相对重,树枝端位移较大,为21.4 mm;填充铜管和环氧树脂有效增大了树枝承载能力,最上部鸟饰物的位移量从21.4 mm降低至18.3 mm,减少14.5%。

3) 神树在静力作用下整体应力分布均匀,最大值发生在底座与大理石底板的铆接处,为应力集中部位;上部结构最大应力发生在龙身和树干连接处;树枝、底座等部位壁厚赋值的变化对计算结合和评估结论未产生显著影响。

参考文献:

- [1] 杨晓鄂.三星堆出土一号青铜神树的修复[J].四川文物,2004(4):86-96.
YANG Xiaowu. Restoration of the No. 1 bronze sacred tree unearthed from Sanxingdui[J]. Sichuan Cultural Relics 2004(4): 86-96.
- [2] 郑敏华,蔡秀兰,陈通.永乐大钟振动的有限元分析[J].声学学报,1988,13(1):59-66.
ZHENG Minhua, CAI Xiulan, CHEN Tong. Finite element analysis of vibration of Yongle Bell[J]. Acta Acustica, 1988, 13(1): 59-66.
- [3] 徐永君,战颂,申仲翰,等.永乐大钟及悬挂支撑系统的撞钟过程瞬态分析[J].振动与冲击,2007,26(5):141-144,161.
XU Yongjun, ZHAN Song, SHEN Zhonghan, et al. Transient analysis of bell impact process of Yongle Bell and suspension support system[J]. Journal of Vibration and Shock 2007 26(5): 141-144, 161.
- [4] 王晓东,王伟,王林安,等.罕遇地震作用下沧州铁狮子结构现状研究[J].工程力学,2011,28(12):238-243.
WANG Xiaodong, WANG Wei, WANG Lin'an, et al. Study on the status quo of Cangzhou Iron Lion structure under rare earthquake [J]. Engineering Mechanics 2011 28(12): 238-243.
- [5] 王晓东,王伟,王林安,等.沧州铁狮子结构现状数值模拟分析[J].同济大学学报(自然科学版),2010,38(10):1434-1438,1443.
WANG Xiaodong, WANG Wei, WANG Lin'an. Numerical simulation analysis of the status quo of Cangzhou Iron Lion structure [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(10): 1434-1438, 1443.
- [6] LI L, DU J, LIU H, et al. Dynamic characteristics and seismic responses of painted sculptures of Dunhuang Mogao Grottoes [J]. Journal of Cultural Heritage 2016 22: 1040-1048.

- [7] GIACCONE D. The peristyle of the Temple of Apollo at Syracuse: historical hypotheses of reconstruction revisited through a finite element analysis [J]. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage* 2020 **16**(1): 1–14.
- [8] BORRI A, GRAZINI A. Diagnostic analysis of the lesions and stability of Michelangelo's David [J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2006 **7**(4): 273–285.
- [9] 刘小明. 信息技术在青铜器保护与展示中的作用探析 [J]. *大众文艺* 2016(7): 43.
LIU Xiaoming. Analysis of the role of information technology in bronze protection and display [J]. *Popular Arts: Academic Edition*, 2016(7): 43.
- [10] 吕文旭, 段奇三. 利用三维激光扫描测量数据与电脑绘图软件绘制敦煌彩塑 [J]. *敦煌研究* 2016(2): 55–59.
LYU Wenxu, DUAN Qisan. Drawing Dunhuang painted sculptures using 3D laser scanning measurement data and computer graphics software [J]. *Dunhuang Research* 2016(2): 55–59.
- [11] 曾中懋. 广汉三星堆二号祭祀坑出土铜器成分的分析 [J]. *四川文物* 1991(1): 72–74.
ZENG Zhongmao. Analysis of the composition of copper ware unearthed from Sanxingdui No. 2 sacrificial pit in Guanghan [J]. *Sichuan Cultural Relics* 1991(1): 72–74.
- [12] 马江波, 金正耀, 田建花, 等. 三星堆铜器的合金成分和金相研究 [J]. *四川文物* 2012(2): 90–96, 100.
MA Jiangbo, JIN Zhengyao, TIAN Jianhua, et al. Study on alloy composition and metallography of Sanxingdui copper ware [J]. *Sichuan Cultural Relics* 2012(2): 90–96, 100.

3D modeling and statics analysis of the No. 1 bronze sacred tree from Sanxingdui

XIE Zhenbin¹, LI Sa², YANG Wentao², NIU Kangmin², GUO Jianbo¹, YU Jian³, CHEN Kunlong²

(1. *Sichuan Provincial Cultural Relics and Archaeology Research Institute, Chengdu 610000, China;*

2. *University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;*

3. *Sanxingdui Museum, Deyang 618300, China)*

Abstract: The No. 1 bronze sacred tree discovered at the No. 2 pit of Sanxingdui site is large in size and complex in structure. Due to its various diseases, such as corrosion and cracks, the structural stability of the tree has always been the focus during its exhibition. In order to fully record and evaluate the preservation conditions of the tree and understand the stresses placed upon it, our study, based on the original geometric form and internal structure, applied the 3D digital modeling technology to establish geometric and numerical models of the bronze tree. This technology also helped to estimate some immeasurable data, such as the mass distribution and position of the mass center of the tree. In addition, the safety of the still bronze tree was analyzed in terms of stress and displacement using the finite element method. According to the results of the finite element method and simplified calculation of mechanics of materials, the connecting joints between the dragon body and the trunk, and the ends of branches are under high stress and vulnerable to damages. This study could provide scientific references for the installment of consolidation joints and other measures for the display of the No. 1 bronze sacred tree.

Key words: Sanxingdui bronze; Structural analysis of the No. 1 bronze sacred tree; Digital modeling of cultural relic; Safety assessment of bronze

(责任编辑 谢 燕; 校对 马江丽)