

异形单层网壳结构的整体稳定性研究及关键节点分析

马宏伟¹, 徐健聪¹, 吴文斌¹, 莫振忠²

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641; 2. 广东廷旭建筑工程有限公司, 广东 广州 510641)

摘要: 单层网壳结构属于缺陷敏感结构, 整体稳定问题是结构设计的关键。单层网壳结构可以采用空间相贯节点, 有必要对节点进行三维实体有限元分析, 在此基础上研究节点的力学性能。本文总结了单层网壳结构整体稳定分析的方法, 归纳了空间相贯节点三维实体有限元分析方法; 针对异形单层网壳结构, 研究了结构的静力性能、结构网格与建筑形状对结构承载能力的影响, 确定了结构的弹性稳定承载力和弹塑性稳定承载力; 对空间相贯节点进行了有限元分析, 得到节点处应力的分布情况, 并研究了节点隐蔽部位有无焊缝对节点力学性能的影响。结果表明: 异形单层网壳的曲率变化和结构网格对关键部位处杆件受力影响较大; 稳定承载力对单层网壳结构起控制作用, 对此异形单层网壳进行弹塑性稳定分析, 结构安全系数达到 24; 隐蔽部位焊缝对节点承载力的影响较大, 设置隐蔽部位焊缝后, 节点处各杆件的最大应力可减小 20% 以上。

关键词: 单层网壳结构; 整体稳定; 相贯节点; 有限元分析

中图分类号: TU392.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)01-0047-10

Study on overall stability of special-shaped single-layer reticulated shell structure and its tubular joint analysis

MA Hongwei¹, XU Jiancong¹, WU Wenbin¹, MO Zhenzhong²

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. Guangdong Tingxu Construction Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510641, China)

Abstract: The single-layer reticulated shell structure is a defect-sensitive structure, and the overall stability is the key to structural design. Multiplanar tubular joints can be used in single-layer reticulated shell structures, so it is necessary to carry out three-dimensional solid finite element analysis of the joints, and study the mechanical properties of the joints on this basis. In this paper, the overall stability analysis method of single-layer reticulated shell structure and the three-dimensional solid finite element analysis method of multiplanar tubular joints are summarized. For the special-shaped single-layer reticulated shell structure, the static performance of the structure, the influence of structural grid and building shape on the structural bearing capacity are studied, and the elastic stability bearing capacity and the elasto-plastic stability bearing capacity of the structure are determined. The finite element analysis of multiplanar tubular joints is carried out to obtain the stress distribution of the joints, and the influence of the hidden part of the joints with or without welds on the mechanical properties of the joints is studied. The results show that the curvature change and structure mesh of the special-shaped single-layer reticulated shell have a great influence on the stress of key members, and the stability bearing capacity plays a controlling role in the single-layer reticulated shell structure. The elasto-plastic stability analysis of the special-shaped single-layer reticulated shell shows that the structural safety factor reaches 24. The weld in the hidden part has a great influence on the bearing capacity of the joint, so after setting the weld in the hidden part, the maximum stress of each member of one joint can be reduced by more than 20%.

Key words: single layer reticulated shell structure; overall stability; tubular joint; finite element analysis

单层网壳结构可实现特殊的建筑曲面造型, 并形成跨度很大的空间, 近年来在公共建筑中得

到了广泛应用。从受力角度分析, 单层网壳结构的杆件以受压为主, 同时, 单层网壳结构对初始

缺陷敏感,很小的初始缺陷也可能使结构的稳定承载力下降较多,因此,稳定性问题在单层网壳结构设计中起控制作用^[1-2]。国内外学者对单层网壳的稳定性能进行了研究,Bruno等^[3]采用特征缺陷模态法对单层网壳进行了整体和局部稳定性分析,研究了节点缺陷幅值、分布模式对结构稳定性能的影响,提出了模拟节点缺陷的方法.Yu等^[4]对超过15 000个单层球面网壳进行了弹塑性稳定分析,结果表明:单层球面网壳对初始几何缺陷较为敏感,不同的几何缺陷分布模式可能导致不同的结构失稳模式,并提出了稳定极限承载力的计算公式.蔡健等^[5]对1 200例单层网壳进行了非线性稳定分析,研究了初始几何缺陷、结构受力状态对结构整体稳定性能的影响.薛雪^[6]对某马蹄莲形单层网壳结构进行了整体稳定分析,结果表明:同时考虑几何、材料非线性后结构的弹塑性稳定承载力相比弹性稳定承载力下降明显。

单层网壳结构可以采用空间相贯节点^[7],节点的强度和刚度直接影响整体结构的稳定性和安全性.Nádia等^[8]对54种空间KK型相贯节点进行了有限元分析,提出了评估节点破坏模式的准则,给出了KK型相贯节点刚度的计算公式.Gho等^[9]对1 296组管桁架相贯搭接节点进行了有限元分析,总结了腹杆轴压下的四种节点破坏模式.由于现场施工和预拼装的限制,在相贯节点的制作过程中可能不会对隐蔽部位进行焊接.王鹏等^[10]对空间隔板焊接X形圆钢管相贯节点的受力性能进行了试验研究和有限元分析,分析了隐蔽部位有无设置焊缝对节点性能的影响.杨文伟等^[11]对4个K形搭接节点足尺试件进行了拟静力试验,研究了K形搭接节点内有无设置隐藏焊缝时的试件变形、破坏模式等.规范^[12]仅给出了几种典型的相贯节点处杆件承载力的计算公式,不能考虑节点处应力大小与分布情况.对于复杂的空间相贯节点,有必要对其进行三维实体有限元分析,得到节点处应力的分布情况,同时研究隐蔽部位焊缝对节点性能的影响。

针对某异形单层网壳结构,本文利用3D3S软件进行了强度分析和线性稳定分析,利用ANSYS软件进行了弹性稳定分析、以及同时考虑几何、材料非线性的弹塑性稳定分析,研究了初始缺陷、几何非线性、材料非线性对其整体稳定性能的影响.选取该单层网壳中的典型空间三杆相交的相

贯节点,在ANSYS软件中进行了三维实体有限元分析,研究了节点处的应力大小与分布情况,并与规范验算结果进行了对比,并分析隐蔽部位焊缝对其承载力的影响。

1 理论方法

1.1 单层网壳结构整体稳定分析方法

单层网壳结构的稳定性能研究方法从初期的“拟壳法”发展成了如今的离散化有限元分析方法,有限元法可求出结构的整体刚度矩阵,引入边界条件后求得各节点位移,然后推出结构的稳定承载力.相比“拟壳法”,有限元法的计算结果更加精确,可对网壳结构进行荷载-位移全过程曲线的跟踪,得到结构的稳定承载力、刚度、强度等性能的变化过程。

单层网壳结构属于缺陷敏感结构,在进行稳定分析时应考虑初始缺陷的影响.关于缺陷的模拟,一般采用随机缺陷模态法或一致缺陷模态法^[13].随机缺陷模态法认为网壳中各节点的缺陷是随机分布的,可以近似认为节点的安装误差呈正态分布,此方法较为真实地反映了结构的实际缺陷,但程序编制繁琐、计算量非常大、实际工程设计中难以应用.一致缺陷模态法认为按照最低阶稳定模态确定的各节点初始位移分布,对结构的承载力有最不利的影响,一致缺陷模态法争取一次性求得结构的稳定极限承载力,极大减小了计算量,且可靠程度足够高,规程^[14]也建议采用此方法确定结构的初始缺陷.因此,本文采用一致缺陷模态法来确定初始缺陷的分布模式.对于缺陷的最大值,按照规程^[14]建议取为网壳跨度的1/300。

结构的线性稳定分析忽略了几何、材料非线性的影响,用于求解结构发生第一类失稳的临界荷载,分析结构的线性稳定模态,为非线性稳定分析提供临界荷载参考值和初始缺陷分布模式.网壳结构的非线性包括几何非线性和材料非线性.由于单层网壳跨度大、柔性高的特点,在进行整体稳定分析时,结构往往会产生很大的变形,几何非线性的影响尤为突出.另外,当网壳结构的跨度较小、杆件截面较大时,结构的整体刚度较大,材料非线性对结构稳定承载力的影响也相当明显.因此,几何非线性和材料非线性在单层网壳结构的整体稳定分析中都不容忽视。

当利用ANSYS进行单层网壳结构整体稳定

分析时, 可用软件自带的 Beam188 单元对杆件进行模拟, Beam188 单元是基于 Timoshenko 理论的二节点三维线性梁单元, 适用于分析细长的梁结构。单层网壳结构是一种空间梁系结构, 计算时可把连接节点设置为刚接, 不考虑节点刚度的影响。

进行单层网壳结构整体稳定分析可按以下步骤进行: 建立好结构的有限元分析模型, 对结构施加恒载与活载的标准值组合, 进行线性整体稳定分析, 求得结构的稳定模态和稳定系数; 对结构施加初始缺陷, 缺陷的分布模式取为第 1 阶线性稳定模态的位移分布模式, 缺陷的最大值取为结构跨度的 1/300; 根据线性稳定分析结果将荷载放大相应倍数, 设置合理的荷载子步, 激活大变形效应, 定义材料的本构关系; 选取位移控制点, 进行非线性整体稳定分析, 得到其荷载-位移全过程曲线, 位移控制点建议选取结构跨中节点或线性稳定分析中位移最大节点。

1.2 空间相贯节点分析方法

空间 KK 型相贯节点中连续的管为主管, 另外有 4 根支管与主管相贯焊接, 构造如图 1 所示。在主管的一侧, 被搭接支管 B1 与主管连接, 同时, 搭接支管 C1 分别与主管 A、被搭接支管 B1 连接, 就位后在相贯部位施焊, 在主管的另一侧做法相同。搭接支管内被搭接支管与主管相交位置为隐蔽部位。在实际施工中, 各个杆件通过胎架进行就位, 再进行焊接, 因此, 隐蔽部位焊接较为困难, 一般不进行焊接。

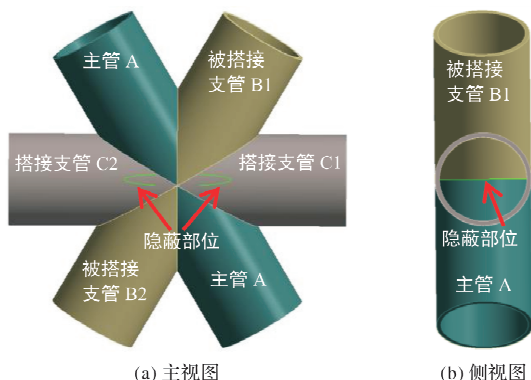


图 1 相贯节点构造示意图

Fig. 1 Structural diagram of tubular joint

1.2.1 节点承载力的规范计算方法

对于直接焊接的空间 KK 型节点, 当支管以承受轴力为主时, 节点处支管的承载力设计值可按规范^[12]进行计算, 支管所受轴力不应超过节点处支管的承载力设计值。对于空间 KK 型搭接节点,

节点处受拉、受压支管的承载力设计值 N_{tKK} 、 N_{cKK} 可按以下公式计算。

$$N_{tKK} = \mu_{KK} \times N_{tK} \quad (1)$$

$$N_{cKK} = \mu_{KK} \times N_{cK} \quad (2)$$

$$N_{tK} = \left(\frac{20}{\phi_q + 25.2} - 0.074 \right) A_t f \quad (3)$$

$$N_{cK} = \left(\frac{20}{\phi_q + 25.2} - 0.074 \right) A_c f \quad (4)$$

式中: N_{tK} 、 N_{cK} 分别为平面 K 型节点受拉、受压支管承载力设计值; μ_{KK} 为空间调整系数, 对于非全搭接节点, μ_{KK} 取 0.9; ϕ_q 为系数, $\phi_q = \beta^{\rho_v} \times \gamma \times \tau^{0.8 - O_v}$; β 为支管与主管外径之比; τ 为支管与主管壁厚之比; γ 为系数, $\gamma = D/2t$; O_v 为搭接率, $O_v = q/p \times 100\%$; q 为焊缝长度; p 为相贯线长度。

1.2.2 节点有限元分析方法

对于复杂的空间相贯节点, 可建立三维实体有限元模型进行力学性能分析。对于网格划分, 靠近节点区域的网格需进行加密, 保证计算精度, 远离节点区域的网格不加密。焊缝通过定义管与管之间的接触关系进行模拟, 对于隐蔽部位有焊缝与无焊缝两种节点, 前者定义隐蔽部位主支管接触关系为绑定接触 (bonded contact), 后者定义为粗糙接触 (rough contact)。绑定接触使接触面之间不存在切向和法向的相对位移, 可以传递不同方向的力。粗糙接触使接触面之间不存在切向的相对位移, 只能传递压力不能传递拉力。然后, 定义材料的本构关系, 并施加边界条件, 杆件荷载取不利工况、采用面荷载形式进行加载, 并进行受力分析。

当采用有限元软件 ANSYS 进行分析时, 杆件可采用 SOLID185 单元进行模拟, SOLID185 单元用于构造三维实体结构, 单元通过 8 个节点来定义, 每个节点具有 3 个沿着 x 、 y 、 z 方向平移自由度。

2 单层网壳结构算例分析

2.1 工程概况

本设计工程为清远市某花篮形单层网壳, 建筑效果如图 2 所示。花篮形单层网壳总高度为 54.2 m, 花篮下部是直径为 40 m 的圆柱面, 花篮上部为提手的造型, 提手连接了花篮主体两边的侧壁, 提手的宽度从结构下部往上部逐渐收缩, 从 8.3 m 宽收缩到结构最高处的 2.4 m 宽。网壳

结构底标高为 9.950 m, 顶标高为 64.150 m, 花篮内部的主体结构为地上 4 层, 采用现浇钢筋混凝土框架结构, 环绕花篮底边设置了钢筋混凝土柱与环梁, 用于支撑网壳结构。

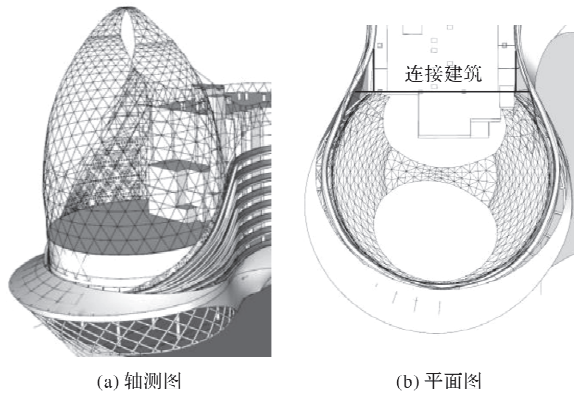


图 2 建筑效果图

Fig. 2 Architectural renderings

花篮采用三角形单层网壳结构, 主要网格尺寸为 2.5~3.6 m, 杆件夹角在 60°左右, 杆件均采用热轧无缝钢管。花篮最下层的边界点设为固定铰支座节点; 花篮开口处的边界点设为弹性支座节点, 弹性支座节点仅约束其水平方向, 弹簧刚度由楼层的抗侧刚度确定, 释放竖直方向的约束。

2.2 结构静力性能分析

2.2.1 计算模型

采用 3D3S 软件建立了花篮形单层网壳的有限元模型, 如图 3 所示。花篮形单层网壳的杆件均采用梁单元。花篮支撑于下部的钢筋混凝土柱或环梁上, 下部支座的形式为铰接; 在花篮的开口处设置弹性支座用于模拟与钢筋混凝土柱的侧接, 弹性支座仅约束其水平方向, 释放竖直方向的约束, 弹性支座的弹簧刚度由连接的钢筋混凝土柱确定, 每个弹性支座的弹簧刚度如表 1 所示。

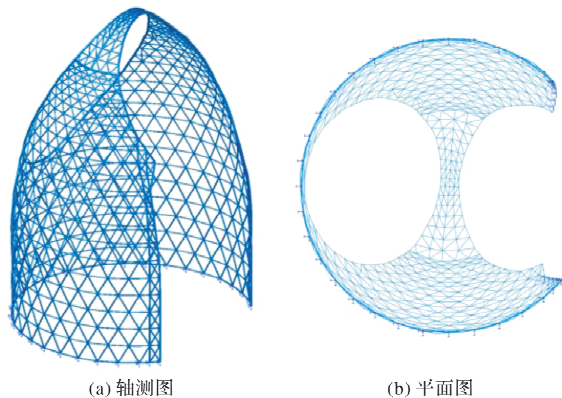


图 3 结构分析模型

Fig. 3 Structural analysis model

表 1 各弹性支座的弹簧刚度

Tab. 1 Spring stiffness of each elastic support

支座标高/m	x 向刚度 $K_x /$ $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$	y 向刚度 $K_y /$ $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$
13.039	293.36	158.24
15.534	173.50	93.59
18.024	111.08	59.92
20.519	7.17	33.32
23.008	5.08	23.63
25.503	3.73	17.35
27.995	2.82	13.12
30.486	2.19	10.16
32.978	1.73	8.02
35.470	1.39	6.45

2.2.2 荷载信息

进行静力分析时, 花篮形单层网壳需考虑的荷载包括: (1) 结构自重, 由软件自动计算; (2) 结构附加恒荷载: 0.3 kN/m²; (3) 活荷载: 0.5 kN/m², 考虑满跨布置和半跨布置两种工况; (4) 风荷载: 基本风压 0.45 kN/m², 地面粗糙度为 C 类, 风振系数与杆件所在高度有关, 由软件自动计算, 体型系数根据荷载规范^[15]按塔架类型确定, 风荷载考虑了 + x 向、- x 向、+ y 向、- y 向四种工况; (5) 地震作用: 采用振型分解反应谱法, 取前 100 阶振型按 CQC 方法进行组合, 考虑水平和竖向地震作用, 本工程所在地区为 6 度区, 设计基本地震加速度为 0.05 g, 设计地震分组为一组, 场地类别为 II 类。

根据荷载规范^[15]和可靠性标准^[16]的要求, 进行单层网壳结构设计时考虑的荷载组合如表 2 所示。

表 2 荷载组合类别

Tab. 2 Load combination category

序号	组合描述
1	1.3 恒载+1.5 活载
2	1.3 恒载+1.5 风载
3	1.3 恒载+1.5 活载+1.5×0.6 风载
4	1.3 恒载+1.5×0.7 活载+1.5 风载
5	1.2 恒载+1.2×0.5 活载+1.3 水平地震
6	1.2 恒载+1.2×0.5 活载+1.3 竖向地震
7	1.2 恒载+1.2×0.5 活载+1.3 水平地震+0.5 竖向地震
8	1.2 恒载+1.2×0.5 活载+0.5 水平地震+1.3 竖向地震
9	1.2 恒载+1.2×0.5 活载+1.4×0.2 风载+1.3 水平地震
10	1.2 恒载+1.2×0.5 活载+1.4×0.2 风载+1.3 竖向地震

续表 2

序号	组合描述
11	1.2 恒载+1.2×0.5 活载+1.4×0.2 风载+1.3 水平地震+0.5 竖向地震
12	1.2 恒载+1.2×0.5 活载+1.4×0.2 风载+0.5 水平地震+1.3 竖向地震
13	1.0 恒载+1.0 活载

注: 活荷载有满跨布置和半跨布置两种工况, 风荷载有 +x 向、-x 向、+y 向、-y 向四种工况, 共有 130 种荷载组合。

2.2.3 杆件及节点设计

花篮形单层网壳的杆件均采用热轧无缝钢管, 杆件截面采用 $\phi 219 \times 10$ 、 $\phi 245 \times 14$ 、 $\phi 325 \times 16$ 、 $\phi 377 \times 16$ 四种规格, 杆件均采用 Q355B 钢材, 杆件的面内计算长度系数取 0.9, 面外长度系数取 1.6。

经多次分析模型后得到结果: 1.3 恒载+1.5×0.7 满跨活载+1.5×+y 向风载的荷载组合是结构的控制荷载组合, 在此组合下, 杆件的最大应力为 66.5 MPa, 出现在花篮下部的斜压杆上, 杆件的最大轴压力为 482 kN, 出现在花篮开口处的竖向杆件上, 最大弯矩为 85.8 kN·m, 出现在提手边缘处的杆件上。地震工况下杆件的最大轴压力为 13.1 kN, 对杆件的受力影响较小, 说明地震工况不起控制作用。

2.2.4 提手优化分析

花篮上部的提手是设计的难点, 提手连接了花篮主体两边的侧壁, 提手的宽度从下往上逐渐收缩, 宽度从 8.3 m 收缩到结构最高处的 2.4 m, 提手位于结构的最上部分, 最高点处的标高为 64.150 m, 而提手的宽度为 2.4 m, 刚度较弱, 在风荷载作用下会产生较大位移, 杆件容易因受力较大发生破坏。

优化前的提手将其长度方向的通长主管设计为 3 根, 网格最大尺寸为 2.3 m, 通过优化分析发现, 提手长度方向的通长主管数量对其受力影响很大, 将主管数量由 3 根增加为 5 根, 并将提手处网格进行优化, 调整了网格形状和斜腹杆的布置方式, 使其网格形状左右对称、网格最大尺寸减小为 1.9 m、杆件传力更加合理, 优化后提手主管的直径可控制在 $\phi 377$ 以内; 另外, 优化前的提手在高度方向上的曲率变化不连续, 在提手高度方向的中部杆件的走势接近直线, 且提手的左右稍有不对称, 出现左侧杆件比右侧杆件凸起的现象, 结构分析时发现提手的部分杆件轴力和弯矩较大, 出现了明显的应力集中现象, 对结构受力有很不

利的影响。对提手的曲率进行了优化, 使提手高度方向和水平方向的曲率变化保持连续。结果表明, 提手处杆件的应力有明显的减小, 说明单层网壳的曲率变化与对称性对其受力性能有很大影响。

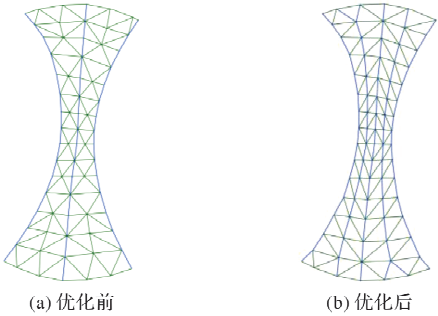


图 4 提手网格示意图
Fig. 4 Schematic diagram of handle grid

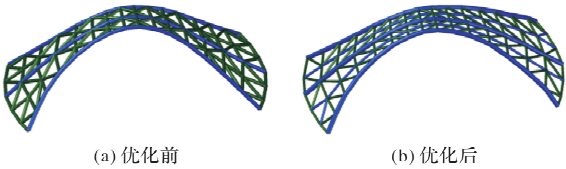


图 5 提手曲率示意图
Fig. 5 Schematic diagram of handle curvature

2.2.5 变形计算

根据规程^[14]的要求, 单层网壳结构在恒载与活载标准值组合作用下的最大位移计算值不应超过结构短向跨度的 1/400, 本结构跨度为 40 m, 因此本结构的位移限值为 $40\,000/400=100\text{ mm}$ 。经计算, 结构在恒载与活载标准值组合作用下的变形见图 6。由图可知, 位移最大的节点位于花篮左侧环处的中间区域, 位移最大值为 12.2 mm, 因此结构静力分析的位移值满足要求。

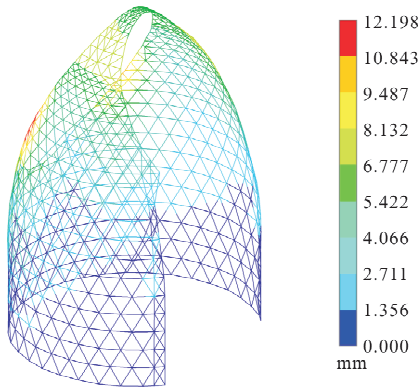


图 6 结构变形云图
Fig. 6 Deformation cloud diagram of the structure

2.2.6 结构自振特性分析

通过动力特性分析得到了结构前 40 阶振型的

频率分布如图7所示,整体来说,花篮形单层网壳结构的自振频率分布较为均匀,说明结构的刚度分配比较合理。由图8结构前4阶振型图可知,第1阶振型为单层网壳 y 轴向的水平振动,第2阶振型为单层网壳 x 轴向的水平振动,第3阶振型是单层网壳的竖向振动,第4阶振型是单层网壳的扭转振动。从振型分布来说,振型多为结构上部的水平振动,这是因为结构的宽度从中部往上部逐渐收缩,刚度逐渐减小,优化提手的网格布置和曲率变化,有利于改善结构的自振特性。

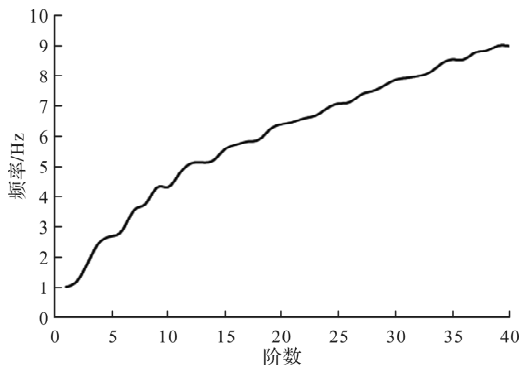


图7 自振频率分布图

Fig. 7 Natural frequency distribution

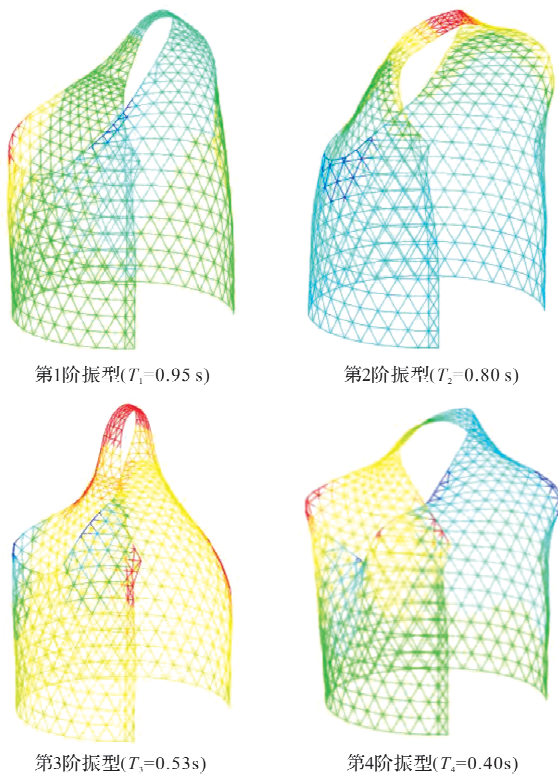


图8 结构前4阶振型

Fig. 8 The first 4 modes of the structure

2.3 整体稳定性研究

2.3.1 分析模型

在 ANSYS 软件建立花篮形单层网壳的有限元

模型,选用 Beam188 梁单元模拟网壳的杆件,杆件均采用 Q355B 钢材,屈服强度为 355 MPa,弹性模量为 2.06×10^5 MPa。

荷载条件:(1)恒荷载:结构自重+ 0.3 kN/m^2 的均布恒荷载;(2)活荷载: 0.5 kN/m^2 的均布活荷载,活荷载为满跨布置;荷载组合为 1.0 恒+1.0 活,将均布荷载导算为节点荷载施加在相应的节点上。

2.3.2 线性稳定分析

线性稳定分析得到的结构前 8 阶线性稳定系数如表 3 所示,图 9 为结构前 4 阶线性稳定模态。

表3 前7阶模态的线性稳定系数

Tab. 3 Linear stability factor of the first 7 modes

模态	1	2	3	4	5	6	7	8
稳定系数	47.1	52.9	64.2	69.1	75.7	78.3	78.6	80.6

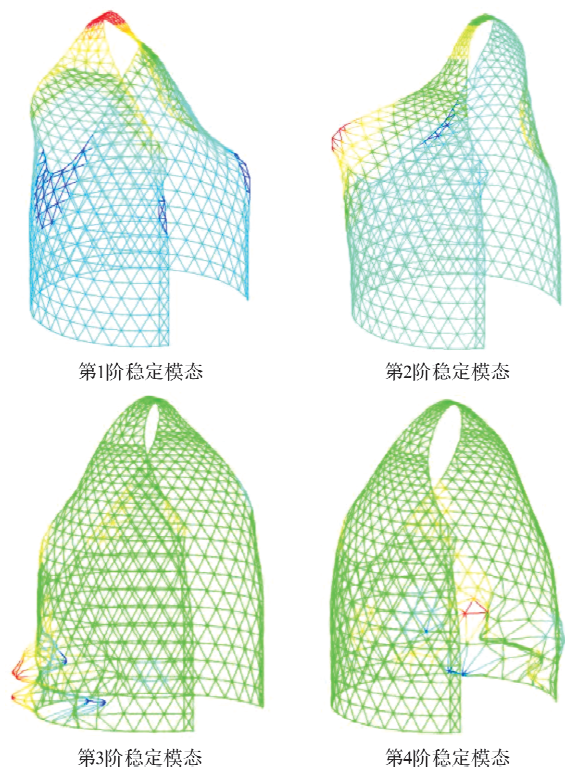


图9 结构前4阶线性稳定模态

Fig. 9 The first 4 linear stable modes of the structure

由表3可知,结构的线性稳定模态分布比较密集,相邻稳定模态的稳定系数相差较小,说明结构杆件布置较为合理。由图9可知,第1阶模态为提手处杆件的失稳破坏,第2阶模态为花篮左侧环处杆件的失稳破坏,第3、4阶模态为花篮下部杆件的失稳破坏。

2.3.3 弹性稳定分析与弹塑性稳定分析

利用 ANSYS 软件对花篮形单层网壳进行荷

载-位移全过程分析, 激活大变形效应, 位移控制点选取为提手的中点, 当控制点的位移达到 1.5 m 时, 迭代停止. 对于非线性平衡方程的求解, ANSYS 软件采用的是改进的 Newton-Raphson 迭代法和 Forde 和 Stierner 于 1987 年提出的改进球面弧长法^[17]. 在加载前期采用 Newton-Raphson 迭代法, 求解快捷、准确; 当加载接近临界点时采用球面弧长法, 通过自动调整荷载步长使计算易于收敛, 最终得到结构的荷载-位移全过程曲线.

对完善结构和缺陷结构进行弹性稳定分析, 按照一致缺陷模态法, 取结构第一稳定模态的位移分布作为各节点的初始缺陷分布; 根据规程^[14], 缺陷的最大值取为结构跨度的 1/300, 本结构跨度为 40 m, 故取缺陷最大值取为 133.3 mm, 将第一稳定模态的节点位移放大相应倍数, 得到各节点的初始缺陷位移.

对完善结构和缺陷结构进行考虑材料、几何双非线性的弹塑性稳定分析, 激活大变形效应, 缺陷的施加方式与弹性稳定分析一致, 采用随动强化模型对材料本构进行模拟, 弹性模量为 2.06×10^5 MPa, 切线模量取弹性模量的 0.02 倍, 为 4.12×10^3 MPa.

2.3.4 分析结果

根据上述有限元分析, 得到了完善结构和缺陷结构的弹性稳定承载力、弹塑性稳定承载力. 稳定分析的荷载-位移曲线如图 10 所示, 结构的变形云图如图 11 所示, 结构的应力云图如图 12 所示.

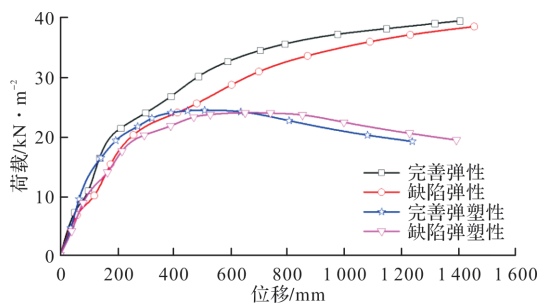


图 10 结构荷载-位移曲线对比

Fig. 10 Comparison of structural load-displacement curves

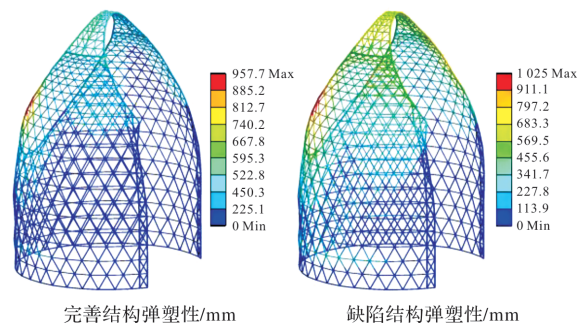
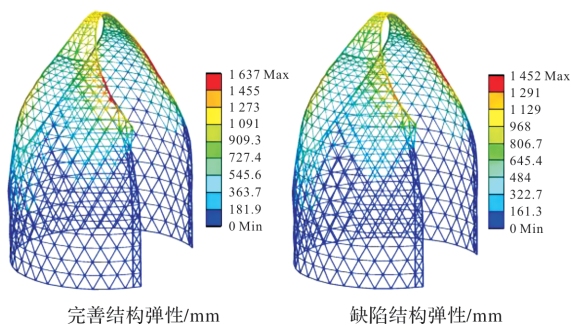


图 11 结构变形云图

Fig. 11 Deformation cloud diagram of the structure

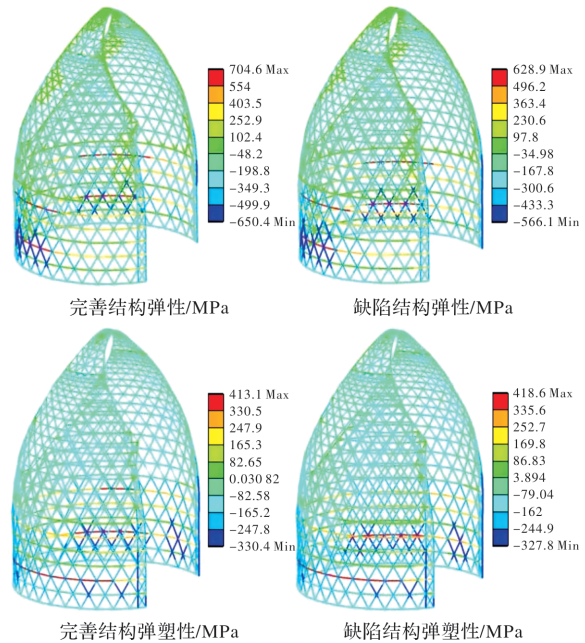


图 12 结构应力云图

Fig. 12 Stress cloud diagram of the structure

由图 10、图 11 和图 12 可知, 进行弹性整体稳定分析时, 结构的整体变形在加载后期时已经相当大, 但由于侧向支座和底部支座的约束作用, 结构能继续变形且承载力仍在增加. 读应力云图可知, 杆件的最大应力达到了 704.6 MPa, 且较多杆件的应力超过了材料的屈服强度 355 MPa, 已不具有实际工程意义. 因此, 可认为控制点位移达到 1.0 m 时, 结构发生失稳, 此时的承载力为结构的弹性稳定承载力.

由图 10 可知, 仅考虑几何非线性时, 完善结构的稳定承载力为 $q_1 = 29.8$ kN/m², 结构安全系数为 $K_1 = 37.3$; 缺陷结构的稳定承载力为 $q_2 = 28.0$ kN/m², 结构安全系数为 $K_2 = 35.1$, 满足规程^[14]中规定的安全系数 4.2 的限值. 考虑几何和材料双重非线性时, 完善结构的稳定承载力为 $q_3 = 19.5$ kN/m², 结构安全系数为 $K_3 = 24.4$; 缺陷结构的稳定承载力为 $q_4 = 19.2$ kN/m², 结构安全系数为 $K_4 = 24.0$, 满足规程^[14]中规定的安全系数

2.0 的限值。

考虑缺陷后,结构的整体稳定承载力有所下降,缺陷结构的弹性稳定承载力比完善结构的弹性稳定承载力降低了 6%;缺陷结构的弹塑性稳定承载力比完善结构的弹塑性稳定承载力降低了 1.5%,但是缺陷结构的位移幅值明显比完善结构大,在位移幅值相同的情况下,完善结构表现出更优秀的受力性能。考虑几何和材料双重非线性后,结构的整体稳定承载力下降明显,完善结构的弹塑性稳定承载力比弹性稳定承载力降低了 34.6%,缺陷结构的弹塑性稳定承载力比弹性稳定承载力降低了 31.4%,材料非线性对结构稳定承载力的影响尤为突出,说明弹塑性稳定承载力对单层网壳结构起控制作用。

由图 11 可知,弹性稳定分析的失稳模式与弹塑性稳定分析的失稳模式不同。进行弹性整体稳定分析时,花篮的上部整体变形明显,花篮开口处上部变形最大,出现了大幅度凹陷,凹陷范围内的杆件发生大变形使得结构刚度退化,失去承载力;进行弹塑性稳定分析时,花篮左侧环处和上部变形明显,其中环处的中部变形最大,此处杆件受压屈服,使结构失去承载能力。

由图 12 可知,压应力较大区域出现在花篮下部区域的斜向杆件、开口处的竖向杆件和提手与花篮主体连接处的杆件,拉应力较大区域出现在花篮下部的环向杆件。

3 空间相贯节点算例分析

选取花篮形单层网壳中位于底部的空间 KK 型节点进行三维实体有限元分析,节点的力学简图如图 13 所示, A 为主管, B1、B2 为被搭接支管, C1、C2 为搭接支管。节点杆件截面均为 $\phi 219 \times 10$, 支管与主管径厚比 $\gamma = D/2t = 10.95$, 杆件间的夹角均为 60° 。采用 E50 焊条进行全焊透的坡口焊接,焊缝要求与母材等强,质量达到一级焊缝质量标准。荷载取最不利工况进行加载。

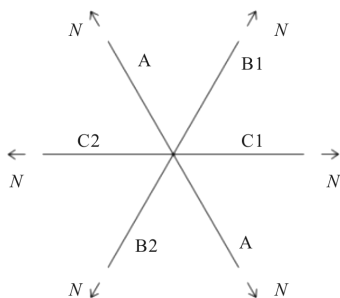


图 13 节点力学简图

Fig. 13 Mechanical diagram of the joint

3.1 节点的承载力计算

此空间 KK 型相贯节点的承载力计算如下:

对于受压支管 B2: 截面面积 $A = 6565.9 \text{ mm}^2$; 支管钢材强度设计值: $f = 305 \text{ N/mm}^2$; $\beta = 1$; $\tau = 1$; $\gamma = D/2t = 10.95$; $O_v = 0.5 \in [0.25, 1.0]$; 满足构造要求。

$$\phi_q = \beta^{O_v} \times \gamma \times \tau^{0.8-O_v} = 10.95$$

$$N_{cK} = \left(\frac{20}{\phi_q + 25.2} - 0.074 \right) A_c f = 959.7 \text{ kN}$$

$$N_{cKK} = \mu_{KK} \times N_{cK} = 863.7 \text{ kN}$$

对于受拉支管 C2: 截面面积 $A = 6565.9 \text{ mm}^2$; 支管钢材强度设计值: $f = 305 \text{ N/mm}^2$; $\beta = 1$; $\tau = 1$; $\gamma = D/2t = 10.95$; $O_v = 0.5 \in [0.25, 1.0]$; 满足构造要求。

$$\phi_q = \beta^{O_v} \times \gamma \times \tau^{0.8-O_v} = 10.95$$

$$N_{tK} = \left(\frac{20}{\phi_q + 25.2} - 0.074 \right) A_t f = 959.7 \text{ kN}$$

$$N_{tKK} = \mu_{KK} \times N_{tK} = 863.7 \text{ kN}$$

支管节点处的承载力设计值如表 4 所示,承载力设计值均满足规范要求,且有较大富余。

表 4 各杆件承载力、所受轴力及承载比

Tab. 4 Bearing capacity, axial force and bearing ratio of each member

管名称	A	B1	B2	C1	C2
承载力/kN	-863.7	-863.7	-863.7	863.7	863.7
所受轴力/kN	-274.2	-351.6	-368.9	32.4	44.2
承载比	0.317	0.407	0.427	0.038	0.051

3.2 有限元模型建立

建立隐蔽部位有焊缝和无焊缝的空间 KK 型相贯节点的有限元模型,节点由一根主管与四根支管组成,各管截面尺寸均为 $\phi 219 \times 10$,主管 A 一端设为支承,约束类型为固定约束,四根支管依次相贯焊接在主管上, C1 管搭接在 B1 管上, C2 管搭接在 B2 管上。隐蔽部位有焊缝节点定义隐蔽部位的主支管接触关系为绑定接触,隐蔽部位无焊缝节点定义为粗糙接触。

3.3 节点分析结果

相贯节点有限元分析结果如图 14、15 所示。隐蔽部位无焊缝节点的最大应力为 209.5 MPa,出现在主管与支管 B2 相贯的焊缝处。应力集中区域为主支管相贯处和两支管相贯处,局部峰值应力都出现在相贯焊缝处,整体应力分布趋势为越靠近焊缝处,杆件的应力越大。

隐蔽部位有焊缝节点的最大应力为 155.7 MPa,出现在主管与支管 B2 相贯的隐蔽部位焊缝处。应

力集中区域为、整体应力分布趋势与隐蔽部位无焊缝节点相似, 但隐蔽部位有焊缝节点的应力分布更加均匀, 且峰值应力减小.

3.4 隐蔽部位焊缝对节点受力性能的影响

隐蔽部位有焊缝节点和隐蔽部位无焊缝节点的最大应力对比如表 5 所示.

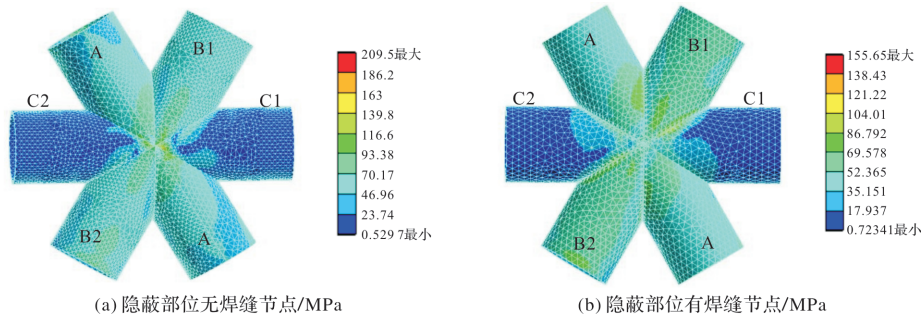


图 14 节点应力云图

Fig. 14 Stress cloud diagram of the joint

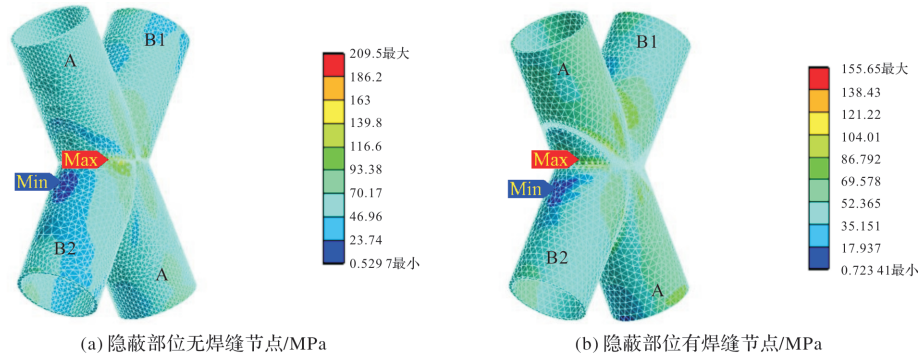


图 15 主管与最大应力支管应力云图

Fig. 15 Stress cloud diagram of the main pipe and the max stress branch pipe

表 5 各杆件最大应力及节点应力比

Tab. 5 The max stress and joint stress ratio of each member

		A	B1	B2	C1	C2
节点 a	最大应力/MPa	209.5	173.0	177.3	186.3	197.4
	应力比 α_1	0.590	0.487	0.499	0.525	0.556
节点 b	最大应力/MPa	155.7	142.1	137.2	120.1	140.2
	应力比 α_1	0.438	0.401	0.386	0.338	0.394
节点应力比 α_2		0.74	0.82	0.77	0.64	0.71

其中: α_1 为管最大应力与屈服强度之比, α_2 为隐蔽部位有焊缝节点应力与隐蔽部位无焊缝节点应力之比.

隐蔽部位有焊缝节点在传力方面明显优于隐蔽部位无焊缝节点. 在隐蔽部位无焊缝的情况下, 支管的荷载只能通过外露处焊缝传递到主管, 传力路径狭窄使得杆件局部内力过大, 未能充分发挥其他部分材料特性. 施加隐蔽部位焊缝后节点的传力途径更加清晰合理, 其承载力相比隐蔽部位无焊缝节点有所提高. 在相同轴力作用下, 节点处各杆件的最大应力减小了 20% 以上.

4 结论

本文总结了单层网壳结构整体稳定分析方法和相贯节点分析方法, 对某花篮形单层网壳进行了静力性能分析、整体稳定分析, 对某空间 KK 型相贯节点进行了承载力计算和三维实体有限元分析. 得出以下结论:

- (1) 对花篮的提手进行了优化分析, 发现单层网壳的曲率变化和网格形状对结构承载能力的影响很大, 当曲率变化连续且结构网格具有良好的对称性时, 单层网壳的承载能力能有很大的提高;
- (2) 对花篮形单层网壳结构进行了弹性和弹塑

性整体稳定分析,其弹性和弹塑性安全系数分别为35.1、24.0,结构有较大的安全储备;

(3)隐蔽部位有焊缝的空间相贯节点有更清晰、合理的传力路径,节点处各杆件的最大应力相比隐蔽部位无焊缝的节点减小了20%以上,在工程中的关键节点可以考虑施加隐蔽部位焊缝,提高节点承载力;

(4)本文有限元分析与按规范计算得到的节点处杆件承载力相差较大,有限元分析得出的承载力较低。

参考文献 References

- [1] MORRIS N F. Effect of imperfections on lattice shells [J]. Journal of Structural Engineering, 1991, 118(6): 1722-1723.
- [2] 曹正罡,孙瑛,范峰,等.单层柱面网壳弹塑性稳定性能研究[J].土木工程学报,2009,42(3):55-59.
CAO Zhenggang, SUN Ying, FAN Feng, et al. Elastoplastic stability of single-layer cylindrical reticulated shells [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(3): 55-59.
- [3] BRUNO L, SASSONE M, VENUTI F. Effects of the equivalent geometric nodal imperfections on the stability of single layer grid shells [J]. Engineering Structures, 2016, 112: 184-199.
- [4] YU P, YUN W J, Stéphane B, et al. Static stability analysis of single-layer reticulated spherical shell with kiewitt-sunflower type [J]. International Journal of Steel Structures, 2021, 21(5): 1859-1877.
- [5] 蔡健,贺盛,姜正荣,等.单层网壳结构稳定分析中初始几何缺陷最大值的研究[J].建筑结构学报,2015,36(6):86-92.
CAI Jian, HE Sheng, JIANG Zhengrong, et al. Investigation on maximum value of initial geometric imperfection in stability analysis of single layer reticulated shells [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(6): 86-92.
- [6] 薛雪.某马蹄莲形单层网壳结构稳定性分析[D].武汉:武汉大学,2018.
XUE Xue. Stability analysis of single layer reticulated shell with calla lily appearance [D]. Wuhan: Wuhan University, 2018.
- [7] PAUL J C, MAKINO Y, KUROBANE Y. Ultimate resistance of unstiffened multiplanar tubular TT - and KK-joints [J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(10): 2853-2870.
- [8] FORTIN C S, REQUENA J A V, FORTI T L D. Parametric study of tubular KK multiplanar steel connections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 114: 188-195.
- [9] GHO W M, YANG Y, GAO F. Failure mechanisms of tubular CHS joints with complete overlap of braces [J]. Thin-Walled Structures, 2006, 44(6): 655-666.
- [10] 王鹏,王湛,潘建荣,等.空间隔板焊接X形圆钢管相贯节点受力性能试验研究[J].建筑结构学报,2019,40(3):221-229.
WANG Peng, WANG Zhan, PAN Jianrong, et al. Investigation on mechanical behavior of X-shaped welded spatial partition plate tubular joints [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(3): 221-229.
- [11] 杨文伟,王秀丽.钢管桁架结构K形搭接节点抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2013,34(1):85-92.
YANG Wenwei, WANG Xiuli. Experimental research on seismic behavior of unstiffened overlapped CHS K-joints [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(1): 85-92.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部.钢结构设计标准:GB 50017—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of steel structures: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [13] 陈昕,沈世钊.单层穹顶网壳的荷载-位移全过程及缺陷分析[J].建筑结构学报,1992(3):11-18.
CHEN Xin, SHEN Shizhao. Complete load-deflection response and imperfection analysis of single-layer lattice dome [J]. Journal of Building Structures, 1992(3): 11-18.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部.空间网格结构技术规程:JGJ 7—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for space frame structures: JGJ 7—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Load code for the design of building structures: GB 50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑结构可靠性设计统一标准:GB 50068—2018[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Unified standard for reliability design of building structures: GB 50068—2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [17] FORDEB W R, STIEMER S F. Improved arc length orthogonality methods for nonlinear finite element analysis [J]. Computers & Structures, 1987, 27(5): 625-630.

(编辑 郑晓龙 沈波)