

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.037

基于分叉结构的穹顶温室试验与仿真优化

于海业 关姝杰 刘爽 隋媛媛

(吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022)

摘要: 基于最优穹顶温室缩尺模型承力面面积比例分配计算得上3层横梁及竖梁相应荷载,在ANSYS中进行逐级静力仿真,与雪载模拟应变试验对比,结果表明,微应变与加载质量呈线性相关,试验相关系数为0.993 2~0.999 9,仿真相关系数为0.994 8~1,仿真与试验微应变相对误差为1.840%~8.386%,仿真方法可靠。对1层横梁和竖梁在网格尺寸为10、12、16、18、20 mm时进行静力仿真,结果表明,模型半径在0.24 m时,适宜的网格尺寸为16~18 mm。在ANSYS中,采用同样方法计算仿真加载值,对半径6 m的穹顶温室12组方案进行初选、线性屈曲、力学校验(刚度、强度、稳定性)等逐步分析,得到共4层、第1层梁数为8、混合分叉结构为最优方案;对半径12、18 m的穹顶温室最优结构进行屈曲仿真,结果表明,在水平荷载作用下1阶初始模态缺陷明显,在竖直、水平荷载作用下,非线性屈曲荷载平均为线性屈曲荷载的0.37、0.57倍,说明有必要对大跨度穹顶温室进行非线性屈曲分析,以保证其结构足够稳定;力学校验皆合格,且半径为6、12、18 m温室的稳定性校验值在组合2作用下分别为组合1作用下的1.89、2.26、2.33倍,强度在2种组合作用下差别不大;与1 152 m² Venlo型连栋玻璃温室相比,3种尺寸温室单位体积用钢量可节约40.11%~59.34%。

关键词: 穹顶温室; 分叉结构; 有限元分析; 屈曲分析; 力学校验

中图分类号: S625.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)11-0331-10

Test and Simulation Optimization of Dome Greenhouse Based on Branching Structure

YU Haiye GUAN Shujie LIU Shuang SUI Yuanyuan

(College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Upper three layers load values of the horizontal and vertical beams were based on the proportional distribution of bearing surface area from scaled model of optimal dome greenhouse, which were stage-by-step static simulated in ANSYS software and compared with snow-loaded simulated strain test. The results showed that micro-strain was linearly related to the loading mass, correlation coefficients in tests was in the range of 0.993 2~0.999 9 and in simulation was in the range of 0.994 8~1, relative errors of micro-strain between simulation and test were in the range of 1.840%~8.386%, which indicated that the simulation method was reliable. Static simulations on one layer with the mesh size of 10 mm, 12 mm, 16 mm, 18 mm and 20 mm were carried out, the results showed when radius was 0.24 m, most appropriate mesh size was 16~18 mm. In ANSYS, 12 schemes of 6 m greenhouse were analyzed step by step through primary selection, linear buckling and mechanical verification (stiffness, strength and stability) by using the same simulation loading calculation method, and optimal scheme was obtained, that was four layers, the first layer had eight beams and mixed bifurcation structure. Buckling simulations on optimal structure of dome greenhouse with radius of 12 m and 18 m was carried out, which obtained the first-order initial modal defects were obvious under horizontal loads, and under vertical and horizontal loads, non-linear buckling loads were 0.37 and 0.57 times of linear buckling loads on average, which was necessary to carry out nonlinear buckling analysis for long-span dome greenhouse in order to ensure sufficient structural stability. Mechanical verifications were all qualified, stability values of 6 m, 12 m and 18 m greenhouses under combination 2 are 1.89, 2.26 and 2.33 times of that under combination 1, respectively, and there was little difference in strength under two combinations. Compared

收稿日期: 2019-05-08 修回日期: 2019-08-30

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA103005-04)

作者简介: 于海业(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事农业设施环境调控与节能技术研究,E-mail: haiye@jlu.edu.cn

with 1 152 m² Venlo multi-span glass greenhouse, steel consumptions per unit volume of three size greenhouses can be saved by 40.11% ~ 59.34% .

Key words: dome greenhouse; branching structure; finite element analysis; buckling analysis; mechanical verification

0 引言

有限元仿真中,荷载施加、网格划分等前处理设置方法直接影响求解和后处理阶段。针对曲面不均匀及离散荷载,文献[1-2]将曲面离散为小单元的网格面或采用曲面分区拟合法,得出节点荷载,提高了计算效率。强风天气导致大跨度建筑屋顶积雪分布不规则、不固定,适宜的雪载模拟颗粒及融雪模型对结构设计至关重要^[3-4]。对于温室及网壳建筑仿真,通常将风、雪等不固定荷载作用于节点或单元上^[5-6],不同网格尺寸对稳定性和强度有显著影响^[7]。大型连栋玻璃温室单体面积可达 30 hm²,单体面积的增加使得对建造设计要求更高,对风、雨、雪载等因素更加敏感,设计时需留出机械设备、智能化系统的进入端口,且须保证温室生产区域面积的合理最大化^[8-12]。

穹顶温室整体为半球结构,内部配合螺旋栽培架可充分利用高度优势^[13]。为了满足跨度、高度等可变要求,需寻求精确的仿真荷载施加方法及适宜大跨度结构的设计方法,在满足力学要求下尽量减少结构耗材。本文将最大雪载量按模型承力面面积比例进行分配施加,结合不同网格尺寸进行静力仿真,并与试验结果对比,得出仿真的准确度、跨度与网格尺寸的最佳匹配关系;对半径 6 m 的穹顶温室不同设计方案进行优化筛选,得出最优方案,以期为更大尺寸穹顶温室提供设计依据。

1 雪载试验与仿真

1.1 试验

1.1.1 试验方法

穹顶温室缩尺模型(缩尺比例为 1:25^[14])由上至下共 4 层,呈三角形逐级分叉结构,跨度为 0.48 m,高度为 0.24 m,下部 2 层屋顶坡度大于 50°,理论上无雪载作用,为了得到更准确的试验数据,对上部 3 层进行试验与仿真(图 1a),取最大雪载量 540 Pa^[15],已知模型总面积(上部 3 层全部三角形及梁的表面积之和)0.216 m²,可得试验中覆盖物(黏土,图 1)总质量 11.903 kg,根据每层总面积所占比例,可得每层覆盖物质量:第 1 层 1.239 kg、第 2 层 3.894 kg、第 3 层 6.770 kg。将覆盖物均匀涂抹于模型上,由上层至下层逐一进行应变试验,第 1 层加载(图 1b),测试位置为第 1 层横梁和竖梁;第 1、2 层加载(图 1c),测试位置为第 2 层横梁和竖梁;第 1、2、3 层加载(图 1d),测试位置为第 3 层横梁和竖梁。采用 BFH120-3AA 型应变片作传感元件进行单桥式连接,应变片电阻为 $R = (119 \pm 1) \Omega$,敏感栅尺寸 3.0 mm×2.3 mm,灵敏系数 K 为 1%~3%。试验中设置一块温度补偿片,并将电桥桥盒接地,利用 DH3817 型动静态应变测试仪进行数据采集^[14]。应变片粘贴方式见图 2,试验中采用逐级加载方式,将每层覆盖物均分成 4 份,分 4 次加载,每组试验重复 3 次,采集频率为 50 Hz,待数据趋于稳定时,持续 30 s,提取稳定微应变均值作为试验结果。

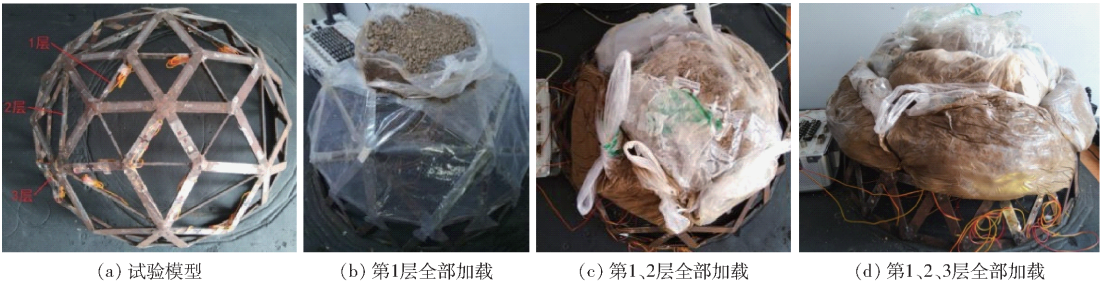


图 1 雪载试验模型及方法
Fig. 1 Model and method of snow-loaded test

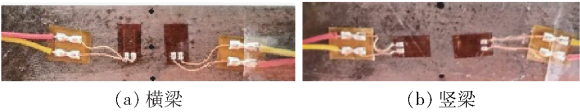


图 2 应变片粘贴方式
Fig. 2 Strain gauge pasted types

1.1.2 试验结果与分析

预试验得出第 3 层横梁及短竖梁的微应变很小,因此只考察第 3 层长竖梁微应变变化情况(表 1)。上部 3 层微应变绝对值(表 1 负号表示应变方向)随加载质量增加而增加,回归分析结果表

明微应变与加载质量呈线性相关,相关系数为 0.993 2 ~ 0.999 9。上部 3 层微应变,横梁大于竖梁,是由于横梁承力面宽度为 3 mm,竖梁承力面宽

度为 15 mm,对于承力面面积,横梁小于竖梁;第 2 层竖梁及横梁微应变皆最大,说明第 2 层对雪载响应最显著,与文献[14]研究结果相同。

表 1 微应变与试验加载质量回归分析
Tab.1 Regression analysis of micro-strain and loading quality in tests

参数	加载步骤												
	第 1 层				第 2 层				第 3 层				
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
试验加载质量/kg	0.310	0.619	0.929	1.239	0.974	1.947	2.921	3.894	1.693	3.385	5.078	6.770	
微应变	竖梁	-21.034 0	-40.715 9	-63.389 1	-73.129 4	-27.124 6	-63.096 9	-94.718 8	-122.699 4	-29.690 0	-62.130 3	-75.239 7	-107.415 2
	横梁	-26.533 4	-53.861 6	-77.424 5	-108.822 3	-164.879 6	-317.257 1	-479.964 5	-646.413 4				
竖梁分析	回归方程	$y = -60.894x - 1.930\ 9$				$y = -32.147x + 1.070\ 7$				$y = -15.383x - 2.819\ 0$			
	相关系数	0.993 5				0.999 0				0.993 2			
横梁分析	回归方程	$y = -86.696x + 0.378\ 8$				$y = -165.150x - 0.120\ 6$							
	相关系数	0.999 2				0.999 9							

1.2 仿真

利用 ANSYS 15.0 Mechanical 界面对最优穹顶温室上部 3 层进行雪载仿真静力分析,提取每层横梁和竖梁的变形量,计算相应微应变,与试验结果对比,得出穹顶温室半径与仿真网格尺寸的最佳配合关系及仿真加载最优方法的准确度。

1.2.1 加载方法

仿真加载值为雪载模拟试验中黏土的水平投影重量,图 3(以竖梁为例)为试验与仿真荷载施加方向。仿真荷载采用两种计算方法:①将每层面积最大三角形区域按中心点分成 3 小块,按横梁和竖梁所在小块三角形面积与相应层总面积的比值计算相应重量作为横梁和竖梁仿真加载值。②按每层横梁和竖梁所占相应层总面积的比值计算每根梁承载数值。选择两种结果中较大值作为仿真加载值,与试验值进行对比分析,此部分选择第 2 种,见表 2。有限元计算中,网格尺寸过大会影响计算精度,过小

会增加计算难度和时间,因此,合适的网格尺寸设置对仿真分析结果有重要影响^[16-18],本文将网格单元长度分别设置为 10、12、16、18、20 mm,对第 1 层横梁 ($F = 0.146\ 0\ \text{N}$) 和竖梁 ($F = 0.744\ 5\ \text{N}$) 加载(表 2),提取不同网格尺寸下变形量,计算微应变,以仿真值与试验值的相对误差为指标,优选出穹顶温室模型最适宜网格尺寸。

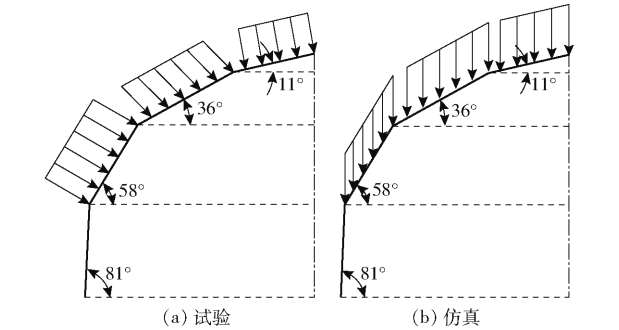


图 3 荷载施加方向

Fig.3 Directions of applied loads

表 2 仿真加载值
Tab.2 Simulated loading values

参数	加载步骤											
	1 层				2 层				3 层			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
试验加载质量/kg	0.310	0.619	0.929	1.239	0.974	1.947	2.921	3.894	1.693	3.385	5.078	6.770
仿真加载质量/kg	0.304	0.608	0.912	1.216	0.788	1.575	2.363	3.151	0.897	1.794	2.691	3.588
横梁荷载/N	0.036 5	0.073 0	0.109 5	0.146 0	0.056 9	0.113 9	0.170 8	0.227 8	0.016 7	0.033 5	0.050 2	0.067 0
长竖梁荷载/N	0.186 1	0.372 3	0.558 4	0.744 5	0.191 8	0.383 7	0.575 5	0.767 3	0.148 3	0.296 6	0.444 8	0.593 1
短竖梁荷载/N									0.106 3	0.212 6	0.319 0	0.425 3

对模型分 4 次逐级加载,每层每级横梁和竖梁加载值见表 2,根据应变片粘贴位置及方向(图 2),微应变计算中,横梁原长度取梁宽度,竖梁原长度取 1/2 梁长度,计算式为^[19]

$$\mu_{\varepsilon} = \frac{10^6 \Delta L}{L}$$

(1)

式中 μ_{ε} ——微应变
 ΔL ——变形量,mm

L ——原长度,横梁取 15 mm,第 1 层竖梁取 46.82 mm,第 2 层竖梁取 58.64 mm,第 3 层竖梁取 69.19 mm

1.2.2 仿真与试验结果对比

由表 3 可知,变形量与微应变的绝对值随网格长度的增加而减小,在网格长度为 16、18、20 mm 时趋于稳定,说明网格尺寸为 16~20 mm 较适宜;已知

第 1 层全部加载试验中,横梁微应变为 -108.822 3,竖梁微应变为 -73.129 4(表 1),结合仿真值与试验值的相对误差,横梁在 16、18、20 mm 时较小且相近,竖梁在 16、18 mm 时较小且相近,得出穹顶温室半径在 0.24 m 时,适宜的仿真网格单元长度为 16~18 mm,本文静力仿真中网格单元长度设置为 16 mm。

表 3 不同网格单元长度第 1 层横梁和竖梁加载仿真结果
Tab.3 Simulation results of the first layer loading at different mesh sizes

参数		网格单元长度/mm				
		10	12	16	18	20
变形量/mm	横梁	-0.002 68	-0.002 10	-0.001 52	-0.001 52	-0.001 51
	竖梁	-0.006 36	-0.005 00	-0.003 63	-0.003 63	-0.002 82
微应变	横梁	-178.466 7	-140.200 0	-101.333 3	-101.533 3	-100.333 3
	竖梁	-135.796 7	-106.834 7	-77.445 5	-77.424 2	-60.209 3
仿真与试验相对误差/%	横梁	63.998	28.837	6.882	6.698	7.801
	竖梁	85.694	46.091	5.902	5.873	17.667

由图 4 可知,仿真与试验微应变与加载质量皆呈线性相关,试验相关系数见表 1,仿真相关系数:第 1 层横梁和竖梁为 1,第 2 层横梁为 0.999 9、竖梁为 0.999 5,第 3 层竖梁为 0.994 8。试验与仿真微应变绝对值相近,皆随加载质量增加而增加,试验绝

对值多略大于仿真值,是由于外部环境干扰及测量误差导致。微应变在仿真与试验中的相对误差为 1.840%~8.386%(表 4),表明网格单元长度为 16 mm,按横梁及竖梁面积所占比例计算加载值的仿真方法能够反映穹顶温室真实承载特性。

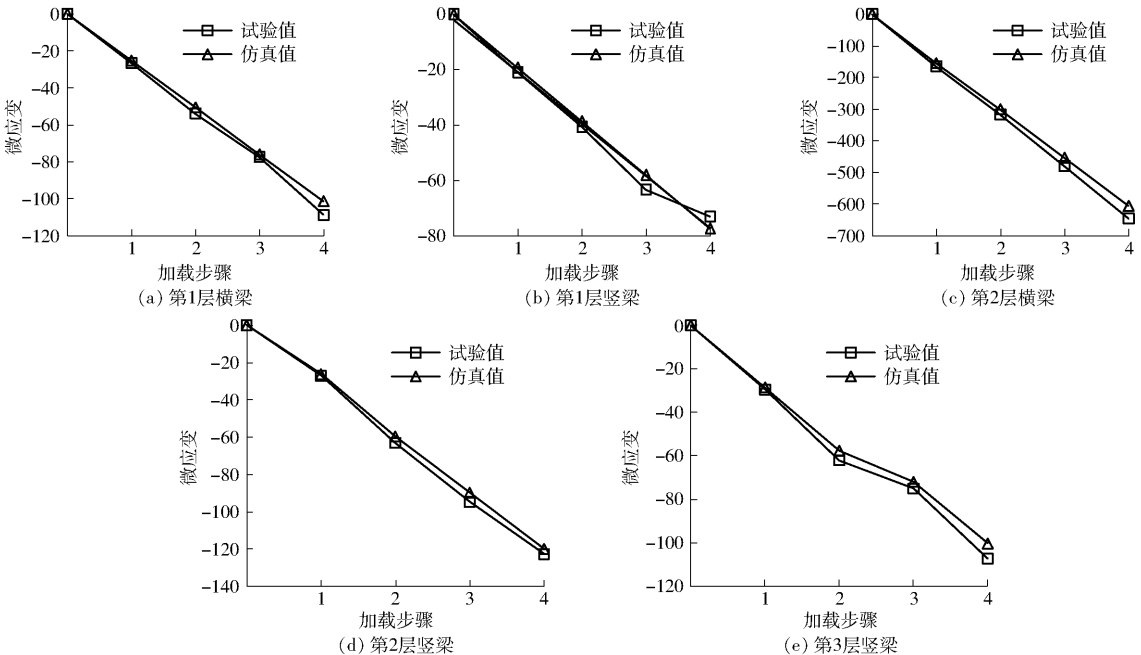


图 4 仿真与试验微应变对比
Fig.4 Comparison of micro-strain between simulation and test

2 结构优化设计与仿真

2.1 半径 6 m 穹顶温室结构优化

采用试验优化设计方法,给出主要因素及相应水平,确定评价指标,将所有结构设计方案(以 Auto CAD 2010 为设计软件)进行逐步优选,最终得出半

径为 6 m 穹顶温室最优结构方案,为穹顶温室尺寸扩展提供设计依据。

2.1.1 结构初选

所有方案中,同一层呈对称结构,不同层采用不同分叉模式,表 5 中按层数逐级分叉主要结构为“1-2-4”,混合分叉主要结构为“1-3-2”。共 12

表 4 仿真与试验中微应变相对误差

Tab.4 Relative errors of micro-strain between simulation and test

加载 步骤	simulation and test					%
	第 1 层 横梁	第 1 层 竖梁	第 2 层 横梁	第 2 层 竖梁	第 3 层 竖梁	
1	4. 535	8. 003	5. 749	3. 055	3. 608	
2	5. 931	4. 895	5. 040	5. 514	7. 014	
3	1. 840	8. 386	5. 396	5. 191	4. 197	
4	6. 882	5. 902	6. 128	2. 225	6. 439	

表 5 试验因素水平及设计方案

Tab.5 Test factor levels and design schemes

水平	层数	1 层	分叉	设计方案		
	A	梁数 B	模式 C			
1	3	6	混合	$A_1B_1C_1$	$A_2B_1C_1$	$A_3B_1C_1$
2	4	8	逐级	$A_1B_1C_2$	$A_2B_1C_2$	$A_3B_1C_2$
3	5			$A_1B_2C_1$	$A_2B_2C_1$	$A_3B_2C_1$
				$A_1B_2C_2$	$A_2B_2C_2$	$A_3B_2C_2$

组设计方案(表 5),采用简单比较法,设置 3 个边界条件:

表 6 钢材尺寸及整体最小用钢量

Tab.6 Steel dimensions and minimum steel consumption quantities

设计方案	每层分叉结构	最长梁位置	长度/mm	最小外径/mm	最大长细比	最小总质量/kg
$A_1B_2C_1$	1-3-2	第 2 层竖梁竖直投影	2 493. 62	33	193. 8	443. 31
$A_2B_1C_1$	1-3-3-2	第 1 层横梁	2 296. 10	30	197. 1	515. 99
$A_2B_1C_2$	1-2-4-2	第 2 层横梁	4 242. 64	55	194. 6	812. 13
$A_2B_2C_1$	1-3-2-2	第 3 层横梁	2 162. 88	29	192. 4	461. 51
$A_2B_2C_2$	1-2-4-2	第 2 层横梁	3 247. 18	42	196. 3	721. 55
$A_3B_1C_1$	1-3-3-2-2	第 2 层竖梁水平投影	1 926. 30	26	192. 3	524. 66
$A_3B_1C_2$	1-2-4-2-2	第 2 层横梁	3 526. 71	46	194. 1	807. 09

2.1.2 线性屈曲分析

结构整体初始缺陷模式可按最低阶整体屈曲模态采用^[20],在 ANSYS 15.0 Mechanical 界面对所剩 5 组方案进行线性屈曲仿真分析,得出屈曲荷载及初始缺陷模式,排除初始缺陷较大设计方案。由雪

(1)层数为 3 时,结合结构稳定性和强度要求,第 1 层梁数设计为 8;层数为 5 时,为避免用钢量过大,第 1 层梁数设计为 6。因此排除 $A_1B_1C_1$ 、 $A_1B_1C_2$ 、 $A_3B_2C_1$ 、 $A_3B_2C_2$ 。

(2)由文献[14]可知,4 层逐级三角形分叉结构在不同荷载组合作用下,最大位移区域在第 2 层,第 3 层为主要承载区域,结构最复杂,底层位移皆最小,采用一分二结构即可,因此逐级分叉结构只适用于中间层数的设计,不适宜 3 层结构,排除 $A_1B_2C_2$ 。

(3)为减小结构质量,钢材为 Q235 薄壁型方钢管,壁厚设置为 1.5 mm,根据不同设计方案采用不同外径,最大长细比小于 200^[20],可得所剩 7 组方案最小外径尺寸及理论最小用钢量,见表 6。可知,逐级分叉结构由于第 2 层横梁尺寸较大,需要较大外径钢管,因此用钢量较大,排除两组用钢量最大的设计方案,即 $A_2B_1C_2$ 及 $A_3B_1C_2$,只留 $A_2B_2C_2$ 用于后续力学校验对比分析。

载试验可得,在半径为 6 m 的穹顶温室仿真中,适宜的网格单元长度为 20 mm×20 mm,材料为 Q235 薄壁型钢管,弹性模量 E 为 2×10^{11} MPa,泊松比 μ 为 0.3。线性屈曲分析中,加载 1 N 的力,得到屈曲系数即为屈曲荷载,见表 7。

表 7 5 种结构线性屈曲结果

Tab.7 Linear buckling results of five structures

设计方案	竖直力			水平力		
	屈曲系数	屈曲荷载/N	最大位移/mm	屈曲系数	屈曲荷载/N	最大位移/mm
$A_1B_2C_1$	640. 965	640. 965	0. 144 1	254. 537	254. 537	0. 228 5
$A_2B_1C_1$	767. 739	767. 739	0. 101 3	313. 911	313. 911	0. 135 5
$A_2B_2C_1$	561. 908	561. 908	0. 086 9	228. 680	228. 680	0. 127 0
$A_2B_2C_2$	2 511. 030	2 511. 030	0. 051 2	900. 856	900. 856	0. 068 9
$A_3B_1C_1$	668. 056	668. 056	0. 067 8	- 270. 557	- 270. 557	0. 097 2

由表 7 可知,5 种结构的线性屈曲荷载在竖直方向大于水平方向,说明穹顶温室分叉结构对水平荷载响应明显。屈曲荷载在 $A_3B_1C_1$ 水平力作用下为负值,表面失稳状态与作用力方向相反,初始缺陷

较大,其他 4 组在两方向的荷载由大到小为 $A_2B_2C_2$ 、 $A_2B_1C_1$ 、 $A_1B_2C_1$ 、 $A_2B_2C_1$,表明逐级分叉结构承载力最优。结合图 5,在 Z 轴负方向施加竖直力,蓝色线条为最大位移区域,在 X 轴正向施加水平力,红

色线条为最大位移区域,5组中的最大位移(表7), $A_2B_2C_2$ 在两方向力作用下皆最小,大变形区域最少在第2层横梁(图5d、5i);其次是 $A_3B_1C_1$,大变形区域在竖直方向主要在第2层竖梁(图5e),在水平力作用下分布不均,在第2、3、4层皆有出现(图5j); $A_2B_1C_1$ 与 $A_2B_2C_1$ 相近,大变形区域主要

在第2层长竖梁(图5b、5c、5g、5h); $A_1B_2C_1$ 在两方向力作用下皆最大,大变形区域在第2层长竖梁(图5a、5f)。综合屈曲荷载与变形, $A_2B_2C_2$ 初始缺陷最小,安全性最好,其次是 $A_2B_1C_1$ 、 $A_1B_2C_1$ 、 $A_2B_2C_1$ 、 $A_3B_1C_1$ 几何缺陷明显,大变形区域分散,故排除。

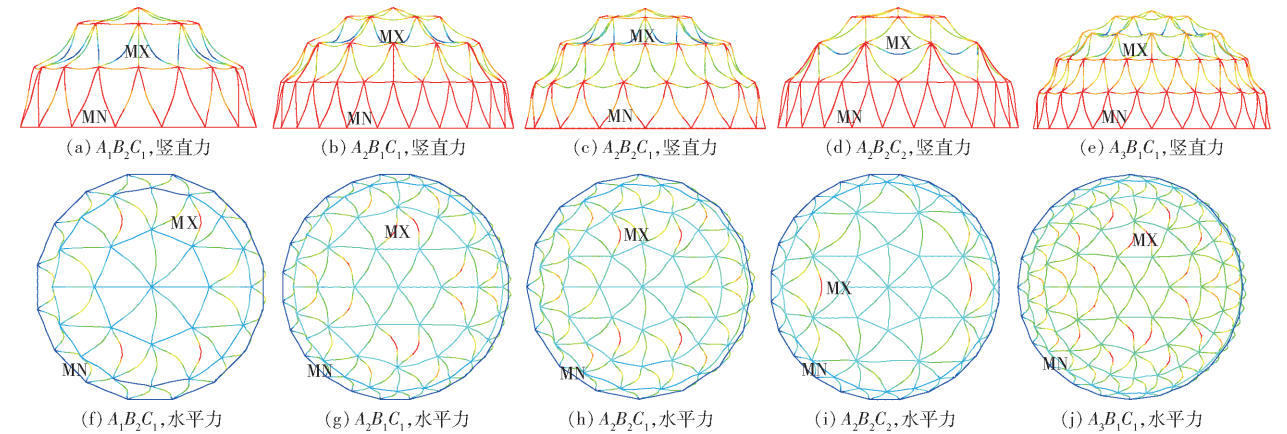


图 5 5 种结构线性屈曲模式

Fig. 5 Linear buckling modes of five structures

2.1.3 力学校验

对所剩 4 组方案进行刚度、强度及稳定性校验,以得出最合理的设计方案。在 ANSYS 15.0 Mechanical 界面,对 4 种结构进行静力仿真,网格单元长度为 400 mm,底部横梁全部约束,加载方式为力,将每层最大三角形面积的 1/3 与相应层总面积的比值乘以相应层荷载组合总值,计算所得为相应横梁和竖梁的荷载组合值,除以节点数(梁长除以 400 mm,同一层对于不同长度的竖梁,取短梁长度进行计算),得出每根横梁与竖梁的仿真加载值(半径为 0.24 m,此种横竖梁加载方式与本文 1.2.1 节所述加载方法数值相近,1.2.1 节所用方法数值略高,仿真结果更清晰;而半径为 6 m 时,两种方法数值相差较大,故采用上述方法更接近实际情况)。

受力形式为荷载组合方式:组合 1(恒载+雪载),竖直向下;组合 2(恒载+风载),水平向右(只考虑垂直屋脊方向,且结构呈对称分布)。荷载组合按每层分开计算,恒载为梁及覆盖材料(双层中空玻璃,面密度 ρ 为 25 kg/m²)重量之和,作用在水平投影上;雪载取最大值,作用在水平投影上,计算式为^[15]

$$S_k = S_0 \mu_r C_e I_e C_{ig} \tag{2}$$

式中 S_k ——雪载标准值,kPa
 S_0 ——基本雪压标准值,取 0.3 kPa
 μ_r ——屋面积雪分布系数,第 1 层层顶坡度小于 25°,取 1.0;第 2 层 $A_1B_2C_1$ 屋顶

坡度平均值为 45°,取 0.2,其他 3 组屋顶坡度平均值为 35°,取 0.6,第 3、4 层屋顶坡度皆大于 50°,取 0

C_e ——场区暴露系数,取 1.0
 I_e ——结构重要性系数,取 1.0
 C_{ig} ——采暖系数,取 1.0

风载取最大值,作用在竖直投影上,计算式为^[15]

$$W_k = W_0 \mu_z \mu_s - W_0 K_0 \tag{3}$$

式中 W_k ——风载标准值,kPa
 W_0 ——基本计算风压,取 0.5 kPa
 μ_z ——风压高度变化系数,第 1、2 层取 1.0,第 3、4 层取 0.8
 μ_s ——温室风荷载体形系数,取 0.6
 K_0 ——温室附加风荷载系数,取 0.2

梁的刚度可用梁的最大挠度来衡量,受弯主梁的最大挠度(本文用最大位移表示)允许值为^[21]

$$w = l/400 \tag{4}$$

式中 w ——梁最大挠度允许值,mm
 l ——梁跨度(按水平和投影方向折算长度,取最大值),mm

$A_1B_2C_1$ 、 $A_2B_1C_1$ 理论最小外径(表 6)经仿真验算,不符合刚度要求,将其分别调整为 40、32 mm。

考虑内力和弯矩作用,平面外稳定性计算式为^[22]

$$\frac{N}{\varphi A} + \frac{M}{\varphi_b W} \leq f \tag{5}$$

式中 N ——最大轴力, N
 φ ——轴心受压构件稳定性系数^[23]
 A ——构件截面面积, mm^2
 M ——最大弯矩, $N \cdot \text{mm}$
 φ_b ——梁的整体稳定性系数, 对于闭口截面
取 1.4

W ——截面抵抗矩, mm^3
 f ——钢材强度设计值, 取 205 MPa^[15]
根据第四强度理论, 最大等效应力应小于钢材
强度设计值 (205 MPa), 以此检验温室强度^[14]。
力学校验相关参数及仿真中所有节点加载值见
表 8。

表 8 结构参数及仿真加载值

Tab.8 Structural parameters and simulation loading values

设计方案	结构参数						层数	节点加载值/N			
	截面尺寸(调整后)					总质量/ kg		组合 1		组合 2	
	外径/mm	面积/mm ²	长细比	φ	W/mm ³			竖梁	横梁	竖梁	横梁
$A_1B_2C_1$	40	231	158.8	0.214	38 102.17	541.72	1	78.502	106.191	45.351	61.346
							2	37.837	57.955	53.838	82.463
							3	10.754	15.127	30.274	42.585
$A_2B_1C_1$	32	183	185.2	0.161	18 960.83	552.20	1	74.586	76.045	41.566	42.380
							2	62.867	67.043	56.829	60.603
							3	23.381	37.845	40.926	66.244
							4	5.576	8.746	19.245	30.188
$A_2B_2C_1$	29	165	192.4	0.195	13 905.83	461.51	1	60.870	81.087	33.498	44.623
							2	46.068	65.148	41.858	59.194
							3	19.385	22.656	34.694	40.548
							4	4.022	4.462	14.544	16.135
$A_2B_2C_2$	42	243	196.3	0.144	44 347.50	721.55	1	62.257	82.935	34.885	46.471
							2	62.644	50.925	58.061	47.200
							3	37.028	60.831	62.671	105.094
							4	5.977	9.376	19.580	30.714

所有梁的最大位移皆小于相应最大挠度允许值,符合刚度要求。由图 6 可知,加载前结构为黑色线条,加载后变形为彩色线条,组合 1,蓝色线条为最大位移区域;组合 2,红色线条为最大位移区域。水平荷载对 4 种结构最大位移影响更大,整体变形随加载方向垂直下压及向右偏移,没有扭转变形。组合 1 作用,最大位移由大到小为 $A_2B_1C_1$ 、 $A_1B_2C_1$ 、 $A_2B_2C_1$ 、 $A_2B_2C_2$,组合 2 作用,最大位移由大到小为 $A_1B_2C_1$ 、 $A_2B_1C_1$ 、 $A_2B_2C_1$ 、 $A_2B_2C_2$,对于刚度, $A_2B_2C_1$ 及 $A_2B_2C_2$ 相对较优; $A_2B_2C_1$ 最大位移区域在 2 种组合作用下皆为第 2 层长竖梁, $A_2B_2C_2$ 最大位移在组

合 1 作用下为第 2 层横梁,组合 2 作用为第 3 层长竖梁, $A_2B_2C_1$ 最大位移区域范围小,更利于结构优化加固。

在 ANSYS 结果中提取每组最大轴力、弯矩及最大等效应力,以检验结构在弯矩作用下局部极限稳定性及强度,结果见表 9,4 种方案稳定性和强度皆小于 205 MPa,符合设计要求。2 种荷载作用下,稳定性最优方案皆为 $A_1B_2C_1$,强度最优为 $A_2B_2C_2$,是由于此 2 种方案钢材外径较大,4 组相比,校验结果差别不大,在满足长细比及刚度要求时,稳定性及强度皆远小于钢材设计值,说明穹顶温室分叉结构刚

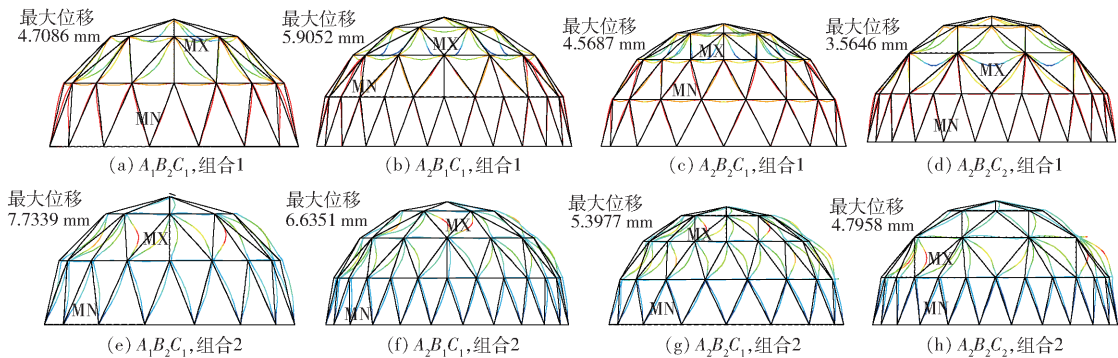


图 6 4 种结构最大位移

Fig.6 Maximum displacement of four structures

度变化值为首要设计条件。

表 9 4 种结构稳定性、强度

Tab.9 Stability and strength values of four structures				
设计方案	组合 1		组合 2	
	稳定性	强度	稳定性	强度
$A_1B_2C_1$	31.948	42.835	62.512	47.026
$A_2B_1C_1$	38.649	41.007	82.554	49.153
$A_2B_2C_1$	46.902	39.291	88.705	43.857
$A_2B_2C_2$	37.275	27.368	85.355	38.272

刚度、强度及稳定性满足设计条件时,钢材质量越小越好,因此在半径大于等于 6 m 时,最优方案为 $A_2B_2C_1$ (表 8),即共 4 层、第 1 层梁数为 8、混合分叉结构。穹顶温室体积按半球近似计算,可得半径

表 10 半径为 12、18 m 穹顶温室结构参数

Tab.10 Structural parameters of dome greenhouse with radius of 12 m and 18 m							
半径/m	层数	第 1 层梁数	每层分叉结构	钢材外径/mm	壁厚/mm	总质量/kg	用钢量/(kg·m ⁻³)
12	8	8	1-3-2-3-2-2-2-2	43	1.5	2 676.54	0.74
18	12	8	1-2-3-2-2-3-2-2-2-2-2-2	71	2.5	13 271.12	1.09

由于 12、18 m 结构存在较多长细比大的薄壁构件,因此对两结构在竖直和水平荷载下进行非线性屈曲分析,首先进行线性屈曲仿真,加载值为 1 N,得到线性屈曲系数即为线性屈曲临界荷载,打开大变形开关,采用弧长法,引入线性屈曲模态作为初始缺陷模型^[24],加载值为线性屈曲系数 1.2 倍的近似值,提取最大位移区域所在节点荷载-位移曲线读取初始直线段部分荷载最大值,即为结构失稳的实际临界荷载^[25]。

2.2.2 力学分析结果

图 7 中荷载为支座反力,与加载值反向,位移与加载值同向,两者采用绝对值进行分析。在不同荷

6 m 穹顶温室用钢量为 1.02 kg/m³。
2.2 半径 12、18 m 穹顶温室结构的设计

2.2.1 结构设计与仿真方法

采用混合分叉结构,分别对半径为 12、18 m 的穹顶温室进行优化设计,以用钢量、刚度、强度及稳定性作为指标对两尺寸最优结构进行校验,在 ANSYS 中,网格单元长度设置为 400 mm (与半径为 6 m 结构相比,梁长度相差不大),采用相同仿真加载值计算方法,结构相关参数见表 10。现有 1 152 m² Venlo 型连栋玻璃温室用钢量约为 1.82 kg/m³^[10],半径为 12 m 穹顶温室用钢量为 0.74 kg/m³,半径为 18 m 穹顶温室用钢量为 1.09 kg/m³ (表 10),结合半径 6 m 结构,穹顶温室用钢量可节约 40.11% ~ 59.34%。

载方式作用下,两结构荷载皆随位移增加而增大,初始阶段,荷载与位移呈线性关系,结构处于线弹性变形阶段,随后进入塑性变形阶段,直至失效。结合表 11 屈曲分析结果,水平荷载作用、线性屈曲荷载与加载力反向,有明显初始缺陷,有必要对大跨度穹顶温室进行非线性分析。图 7 辅助线标记部位为非线性屈曲荷载,见表 11,可知两结构竖直加载,非线性屈曲荷载平均为线性屈曲荷载的 0.37 倍,水平加载,非线性屈曲荷载平均为线性屈曲荷载的 0.57 倍,说明非线性屈曲结果是接近实际和保守的,且非线性屈曲荷载皆大于相应组合 1、2 的加载值,说明结构安全。

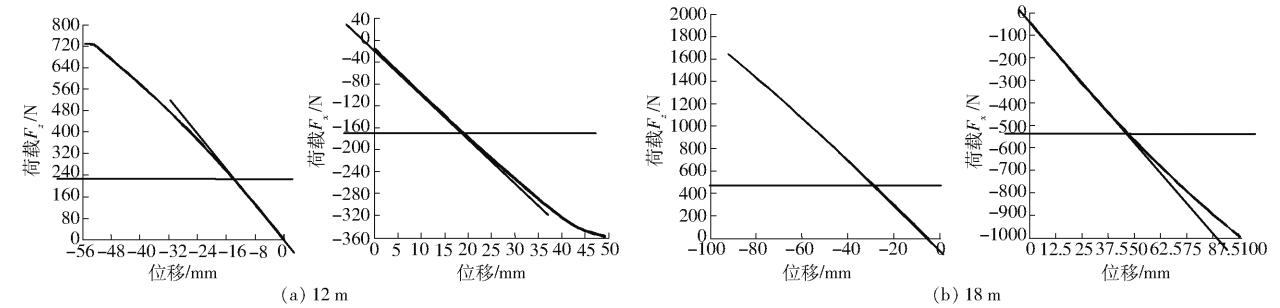


图 7 半径为 12、18 m 穹顶温室非线性屈曲荷载-位移曲线

Fig.7 Nonlinear buckling load – displacement curves of dome greenhouse with radius of 12 m and 18 m

对两结构进行力学校验,最大位移区域(图 8),组合 1 为蓝色线条,组合 2 为红色线条,组合 1 作用,12 m 结构位于第 2 层长竖梁,18 m 结构位于第 3 层长竖梁,两者分叉模式皆为一分三;组合 2 作用,

12 m 集中在上部 4 层长竖梁,18 m 位于第 3、6 层长竖梁(此两层分叉模式为一分三),以及第 2、4、5 层横梁(此 3 层横梁长度较大)。经验算,所有梁的最大位移皆小于相应最大挠度允许值,符合刚度要求,

表 11 半径为 12、18 m 穹顶温室力学分析结果

Tab. 11 Mechanical analysis of dome greenhouse with radius of 12 m and 18 m

半径/ m	荷载方向	屈曲分析							力学校验			
		线性		非线性				最大加载 值/N	组合 1		组合 2	
		加载 值/N	屈曲 荷载/N	加载 值/N	最大位移 区域	屈曲荷 载/N	位移/ mm		稳定性/ MPa	强度/ MPa	稳定性/ MPa	强度/ MPa
12	F_z 负向	-1	-611.32	-730	第 2 层长竖梁	233.46	-14.42	-91.03	43.956	32.507	99.402	42.036
	F_x 正向	1	-300.73	360	第 3 层横梁	-161.67	19.20	88.32				
18	F_z 负向	-1	-1 401.70	-1 680	第 2 层横梁	502.32	-25.98	-309.49	44.320	24.068	103.288	35.881
	F_x 正向	1	-826.69	990	第 5 层横梁	-494.65	45.06	246.32				

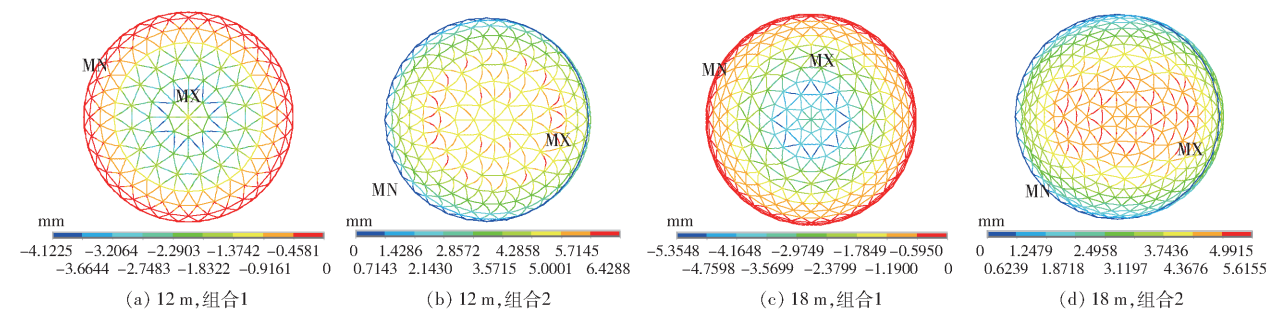


图 8 半径为 12、18 m 穹顶温室最大位移

Fig. 8 Maximum displacements of dome greenhouse with radius of 12 m and 18 m

稳定性和强度皆小于 205 MPa, 符合设计要求 (表 11), 结合表 9 $A_2B_2C_1$ 方案, 6、12、18 m 的稳定性皆在组合 2 作用下响应明显, 表现为在组合 2 作用分别为组合 1 作用的 1.89、2.26、2.33 倍, 强度在 2 种组合作用下差别不大, 3 种结构力学校验数值差别不大, 表明此种设计方法在满足刚度条件下, 稳定性和强度皆可符合要求且近似稳定。

3 结论

(1) 对最优穹顶温室缩尺模型进行逐级雪载模拟应变试验, 按模型承力面面积比例计算模型上 3 层横梁及竖梁相应荷载, 在 ANSYS 中进行仿真对比, 得出微应变在仿真和试验中的相对误差为 1.840% ~ 8.386%, 且微应变与加载质量呈线性相关关系, 相关系数为 0.994 8 ~ 1, 第 2 层竖梁及横梁微应变皆最大, 说明第 2 层对雪载响应最显著; 对 1 层横梁和竖梁加载, 提取不同网格尺寸模型微应变,

得出模型半径在 0.24 m 时, 网格尺寸为 16 mm 最为适宜。

(2) 在 ANSYS 中, 按模型承力面面积比例计算仿真加载值, 对半径 6 m 穹顶温室不同设计方案进行初选、线性屈曲、力学校验 (刚度、强度、稳定性) 分析, 结合用钢量得最优方案为 4 层、第 1 层梁数为 8、混合分叉结构。在此基础设计了半径为 12、18 m 的穹顶温室最优结构, 由线性屈曲仿真可知, 在水平荷载作用下, 1 阶初始模态与加载方向相反, 有明显初始缺陷, 进而进行非线性屈曲仿真, 得到竖直和水平荷载作用下, 非线性屈曲荷载平均为线性屈曲荷载的 0.37 倍和 0.57 倍, 说明有必要对大跨度穹顶温室进行非线性屈曲仿真; 力学校验结果皆符合要求, 与 1 152 m² Venlo 型连栋玻璃温室相比, 3 种尺寸温室单位体积用钢量可节约 40.11% ~ 59.34%, 其中, 半径为 12 m 结构用钢量最小, 应用时可优先考虑。

参 考 文 献

[1] 林小夏, 张树有, 陈婧, 等. 产品仿真分析中曲面不均匀分布载荷施加方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(1): 122 - 127.
LIN Xiaoxia, ZHANG Shuyou, CHEN Jing, et al. Method for asymmetric distributed loads on curving areas in products simulation analysis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(1): 122 - 127. (in Chinese)

[2] 徐新栋, 李建辰, 曹小娟, 等. 曲面离散载荷在仿真分析中的施加方法[J]. 鱼雷技术, 2011, 19(4): 246 - 249, 254.
XU Xindong, LI Jianchen, CAO Xiaojuan, et al. Method for imposing discrete loads on curved surface in simulation analysis [J]. Torpedo Technology, 2011, 19(4): 246 - 249, 254. (in Chinese)

[3] ZHOU Xuanyi, ZHANG Yunqing, GU Ming, et al. Simulation method of sliding snow load on roofs and its application in some representative regions of China[J]. Natural Hazards, 2013, 67(2): 295 - 320.

[4] MAJOWIECKI M. Snow and wind experimental analysis in the design of long-span sub-horizontal structures[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74 - 76(1): 795 - 807.

- [5] 张中昊,范峰,付强,等. 拉杆式柱面温室网壳的稳定性能分析[J]. 应用基础与工程科学学报,2018,26(1):47-59.
ZHANG Zhonghao, FAN Feng, FU Qiang, et al. Stability of two-way grid cylindrical shell greenhouse with tension members [J]. Journal of Basic Science and Engineering,2018,26(1):47-59. (in Chinese)
- [6] 李晓豁. 日光温室载荷的模拟研究[J]. 农业机械学报,2005,36(9):86-88.
LI Xiaohuo. Simulation and study of loads of a sunlight greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005,36(9):86-88. (in Chinese)
- [7] 施明哲,吴明儿. 双向网格铝合金索支撑单层球面网壳结构的弹塑性稳定性分析[C]//第十五届全国现代结构工程学术研讨会,上海,2015.
- [8] 么秋月. 我国大型连栋玻璃温室建造要点与生产管理现状[J]. 农业工程技术,2017,37(34):10-19.
- [9] 徐丹. 荷兰大型玻璃连栋温室技术在中国的应用[J]. 农业工程技术,2017,37(34):28-30.
- [10] 于红燕. 新型大跨度温室结构体系及节点研究[D]. 天津:河北工业大学,2015.
YU Hongyan. Study on new-type large-span greenhouse structure systems and joints [D]. Tianjin: Hebei University of Technology,2015. (in Chinese)
- [11] ZHOU Changji, WANG Yingkuan. Modern greenhouses and their performances in China[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(1):16-21.
- [12] 宋卫堂,张树阁,黄之栋,等. 三连栋不对称屋面玻璃温室设计与光照性能分析[J]. 农业机械学报,2005,36(11):112-115.
SONG Weitang, ZHANG Shuge, HUANG Zhidong, et al. Structure design and illumination performance of 3-span asymmetrical roofing glass greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2005,36(11):112-115. (in Chinese)
- [13] 徐伟忠,陈银华,林伟洋,等. 鸟巢温室开发与利用[M]. 北京:台海出版社,2014.
- [14] 于海业,关姝杰,隋媛媛. 基于尖实叶脉分叉结构的穹顶温室设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(3):300-308.
YU Haiye, GUAN Shujie, SUI Yuanyuan. Design and test of dome greenhouse based on Euryale (*Euryale ferox* Salisb.) venation branching structure[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(3):300-308. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190333&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.033. (in Chinese)
- [15] 周长吉. 现代温室工程[M]. 北京:现代工业出版社,2003.
- [16] 陈俊梅,陆皓,汪建华,等. 网格尺寸对别克轿车副车架总成焊接变形预测精度的影响[J]. 焊接学报,2002,23(2):33-35,39.
CHEN Junmei, LU Hao, WANG Jianhua, et al. Effect of mesh sizes on welding deformation prediction precision of-Buicks underframe assembly[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2002,23(2):33-35,39. (in Chinese)
- [17] 李同春,陈会芳,章杭惠,等. 网格尺寸对拱坝等效应力分析的影响[J]. 水利学报,2004,35(9):83-87.
LI Tongchun, CHEN Huifang, ZHANG Hanghui, et al. Effect of mesh size on analysis of arch dam equivalent stress[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004,35(9):83-87. (in Chinese)
- [18] PARK S J, EARMME Y Y, SONG J H. Determination of the most appropriate mesh size for a 2-D finite element analysis of fatigue crack closure behaviour[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1997,20(4):533-545.
- [19] 孙裕晶,张强. 农业工程测试系统设计与应用[M]. 长春:吉林人民出版社,2011.
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50017—2017 钢结构设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [21] 李守巨. 钢结构设计、计算与实例[M]. 北京:机械工业出版社,2015.
- [22] 程勤阳. 温室结构设计的基本方法(三)——典型温室结构计算[J]. 农业工程技术(温室园艺),2006(11):15-18.
- [23] 《钢结构设计手册》编辑委员会. 轻型钢结构设计手册[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [24] 俞永华,王剑平,应义斌. 塑料温室拱结构雪载工况下极限承载力的非线性有限元分析[J]. 农业工程学报,2007,23(3):158-162.
YU Yonghua, WANG Jianping, YING Yibin. Nonlinear finite element analysis of the bearing capacity of arch structure in plastic greenhouse on snow load working condition[J]. Transactions of the CSAE, 2007,23(3):158-162. (in Chinese)
- [25] 王新忠,马兴超,孙菲. 雪载荷工况下连栋塑料温室结构稳定性的研究[J]. 农机化研究,2011,33(12):40-42,50.
WANG Xinzong, MA Xingchao, SUN Fei. Stability research of multi-span plastic greenhouse on snow load condition[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011,33(12):40-42,50. (in Chinese)