

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.033

基于芡实叶脉分叉结构的穹顶温室设计与试验

于海业 关姝杰 隋媛媛

(吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022)

摘要: 基于芡实叶脉的分叉结构及三角形的稳固特性设计了一分二-原、不分叉、一分二-全三角形和一分三4种穹顶温室。利用ANSYS有限元分析软件对4种温室进行了静力及线性屈曲分析,静力分析结果表明,4种温室在组合2(风载组合)作用下差别显著,即随着分叉级数增多,位移与强度分别降低了98.92%和86.46%,一分二-全三角形和一分三满足强度要求,且两者力学特性相近,耗材量相比不分叉结构分别增加了11.88%和30.18%;屈曲分析结果表明,竖直和水平荷载作用下,屈曲荷载分别是许用荷载的63.52~26737.22倍与26.86~11300.97倍(以单元长度为限),4种温室稳定性皆满足要求,且对竖直荷载响应显著,即分叉结构使屈曲荷载平均增加了334.02%;综合得出一分二-全三角形为最优结构。基于第二相似理论,以1:25制作的缩尺模型在12组应变试验中,与仿真结果无显著差异的组数占75%,25%略有偏差,试验相对误差为0.18%~0.69%,仿真过程准确可靠;模型横梁对组合1(雪载组合)响应明显,即各组应变均值在组合1作用是组合2作用下的5.6倍,竖梁对组合2响应明显,即各组应变均值在组合2作用是组合1作用下的6.2倍。

关键词: 穹顶温室; 仿生设计; 有限元分析; 相似模型; 应变试验

中图分类号: S625.1; S625.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)03-0300-09

Design and Test of Dome Greenhouse Based on *Euryale* (*Euryale ferox Salisb.*) Venation Branching Structure

YU Haiye GUAN Shujie SUI Yuanyuan

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

Abstract: Four kinds of skeletons (no branching, two “one divided two” and “one divided three” structures) were designed based on the branching structure of *Euryale* veins and the stability characteristics of the triangle. Static and linear buckling analysis were carried out by ANSYS finite element analysis software, the static analysis showed that there were significant differences among the four greenhouses under the load combination two (wind load combination), the values of displacement and strength were reduced by 98.92% and 86.46% with the increase of bifurcate series, respectively, and “one divided two-all triangle” and “one divided three” met the strength requirement and their mechanical properties were similar, but “one divided two-all triangle” saved more material; buckling analysis showed that under vertical and horizontal loads, the buckling loads were 63.52 ~ 26737.22 times and 26.86 ~ 11300.97 times of the allowable loads (limits based on the element lengths), which illustrated the four greenhouses all satisfied the stability requirement and significant response to vertical loads (the buckling load was increased by nearly three times due to bifurcation structure). Therefore, the one divided two-all triangle was the optimal structure. The number of groups which had no significant difference with simulation results accounted for 75% and 25% existed slightly deviations among the 12 groups of strain tests in scale model that was made according to 1:25, and the test relative errors were 0.18% ~ 0.69%, which showed the simulation process was accurate and reliable. The response of horizontal beams to combination one (snow load combination) was obvious, and the strain mean of each group under combination one was 5.6 times of that under combination two, and the combination two had significant effect on vertical beams, which was characterized by the strain mean of each group under combination two, and it was 6.2 times of that under combination one.

Key words: dome greenhouse; bionics design; finite element analysis; similar model; strain test

收稿日期: 2018-09-29 修回日期: 2018-11-29

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

0 引言

穹顶温室大多采用鸟类筑巢的三角交叉式或结合六角加固式复合成的异形结构^[1],其空间利用率高,可维持适宜的生长环境^[2-3],适合智能化管理。异型温室可适应各种复杂地形,成本低^[4]。异形网壳温室能适用于更大跨度,风荷载是决定其安全性的主要因素^[5]。对于温室网壳的研究主要在于其具有良好的受力性能^[6],王军林等^[7]仿真分析了大跨轻质单层柱面网壳在遭受强风天气下的动力倒塌模型,指出了薄弱结构,分析了倒塌机理。张中昊等^[8]考察了双向网格型单层柱面网壳极限承载力的影响因素,揭示了结构的失稳机理;为了提高温室的稳定性,开发了拉索与网壳相结合的结构体系^[9]。马明等^[10]研究了由中心筒支撑的大跨度温室屋盖结构,对其采用的支撑结构及屋面用材进行了优选。李成志等^[11]对异形温室

的空间索杆单元杂交结构进行了静力仿真分析,得到3种荷载工况下应力和最大挠度,均满足设计要求。

大跨度网壳结构承载力好,但是网格结构较密,矢跨比0.15~0.25^[5,8-9,11],不适宜立体栽培等高效栽培模式。考虑到耗材、透光、空间利用、施工难度等因素,在保证足够强度和稳定性的基础上,本文采用穹顶温室的半球结构,基于仿生学原理,仿真对比4种温室的力学特性,并对其中最优化结构的缩尺模型进行验证试验,旨在为大跨度穹顶温室优化设计提供仿真基础。

1 结构设计

基于芡实叶脉的分叉结构(图1a)所设计的穹顶温室^[12],轴心受压力学验证结果可行^[13],但整体结构稳定性和强度还有待研究。本文又设计3种穹顶温室,用以对比分析。

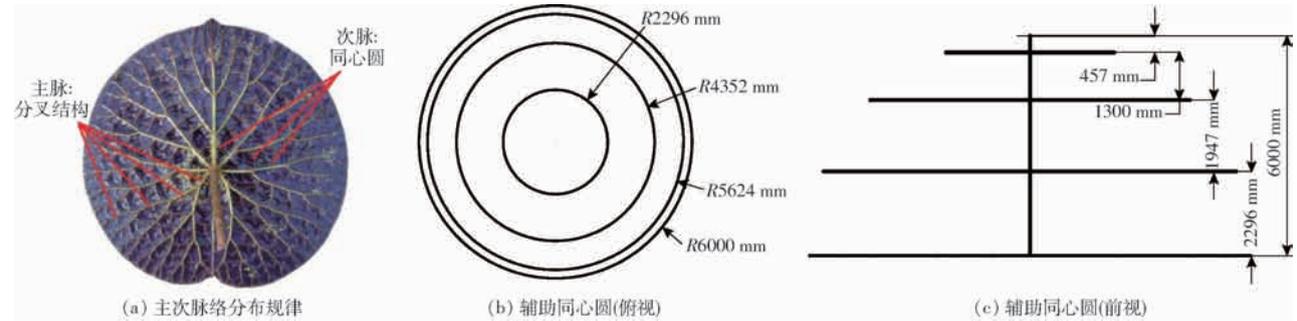


图1 芡实叶脉分布及仿生温室设计基础

Fig. 1 Euryale veins venation and design basis of bionic greenhouses

1.1 4种穹顶温室设计原理

芡实叶脉的分叉规律是按 2^x 指数形式一分二、二分四、四分八逐级延伸分布的,主脉之间由次脉逐一相连(图1a),次脉由内向外呈近似同心圆分布。以图1b为基础,设计了4种温室结构(图2),其中图2a与芡实叶脉形态最相似。

4种温室结构总体共4层,由4层同心圆(图1b)作辅助,第4层的半径(图1b)与高度(图1c)相等。仿生温室原型(记为“一分二-原”,图2a)的第1层是等边八边形(仿芡实叶脉主脉形式),第2、3、4

层逐级分叉(图2a加粗部位),整体采用三角形和四边形相结合形式。不分叉结构(图2b)是将图1b每层同心圆皆做16等分,将等分点顺次相连所得。一分二-全三角形温室(图2c)是芡实叶脉的分叉结构与三角形相结合形式,辅助同心圆每层等分个数为8-8-24-24,等分点顺次相连为横梁,竖梁则按 2^x 指数规律逐级分叉。为了研究对于穹顶温室,是否叉数越多结构越稳定,本文设计了一分三结构(图2d),其辅助同心圆每层等分个数为6-12-24-48,等分点顺次相连为横梁,竖梁按 3^x 指数逐级分

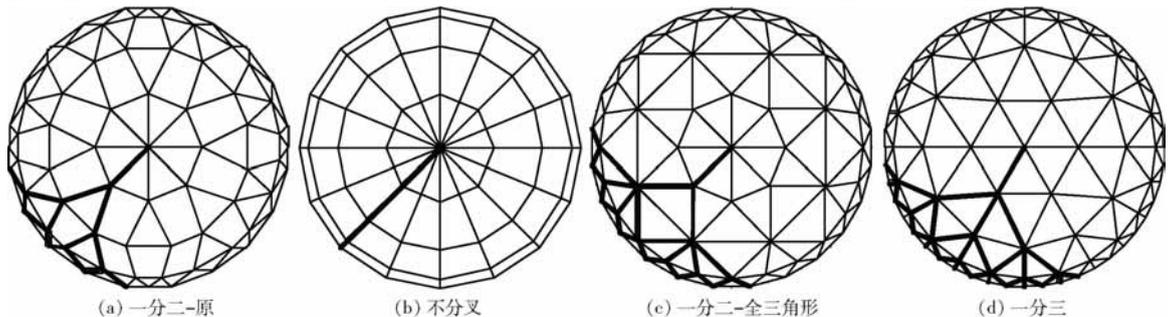


图2 4种穹顶温室结构示意图

Fig. 2 Four kinds of dome greenhouse structures

布。

1.2 参数设定

1.2.1 结构参数

温室采用中空矩形钢管,尺寸为外壁宽 $b = 53.2$ mm,高 $h = 63.4$ mm,壁厚 $d = 5.4$ mm^[13],材料为 Q235 薄壁型钢,弹性模量 $E = 2 \times 10^5$ MPa,泊松比 $\mu = 0.3$ 。

1.2.2 力学参数

仿真中温室受力形式为荷载组合方式:恒载 + 雪载或风载 + 作物荷载^[14]。恒载为自重和覆盖材料(10 mm 厚双层中空 PC 板,面密度 $\rho = 1.7$ kg/m²)重量之和,作用在投影面积上;雪载取最大雪载量,竖直方向,计算式为^[14]

$$S_k = S_0 \mu_r C_e I_e C_{ig} \quad (1)$$

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^[15],取 1.8

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

由于穹顶温室为东西和南北对称结构,不同于普通温室的不同风向有不同作用效果,因此本文风向只取水平方向,数值取最大值,计算式为^[14]

$$W_k = W_0 \mu_z \mu_s - W_0 K_0 \quad (2)$$

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,取 1.0

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

对番茄和黄瓜等,作物荷载取 0.15 kPa^[14]。4 种温室结构荷载组合^[15]与总耗材(用总梁长表示)见表 1。

表 1 4 种温室总梁长与荷载组合

Tab.1 Total beam lengths of four kinds of greenhouses and load combinations

温室结构	总梁长/m	荷载组合/Pa	
		组合 1(恒载 + 雪载 + 作物荷载)	组合 2(恒载 + 风载 + 作物荷载)
		竖直	水平
不分叉	340.0	1 291.11	951.11
一分二-原	360.4	1 361.95	1 021.95
一分二-全三角形	380.1	1 369.76	1 029.76
一分三	442.6	1 365.87	1 025.87

根据第四强度理论,仿真分析后查看等效应力,以检验温室强度^[16],Q235 薄壁型钢强度设计值为 205 MPa^[14]。整体结构稳定性检验采用线性屈曲分

析方法,得出失稳临界载荷及屈曲模态。

2 仿真

利用软件 ANSYS 15.0 Mechanical APDL 界面对 4 种温室结构进行静力及线性屈曲分析,对仿真后的变形量、强度及稳定性进行分析校验,并结合耗材量得出最优结构。

2.1 仿真过程

2.1.1 静力分析

在 ANSYS 软件中,选择结构分析模块,单元类型选择 beam188^[17];结构用材为 Q235 薄壁型钢,属于线弹性材料,泊松比 0.3,弹性模量 2×10^5 MPa;梁截面尺寸为 53.2 mm × 63.4 mm × 5.4 mm;单元长度设为 400 mm(每根梁大约 6~8 个节点),划分网格 Mesh→Lines;约束条件为第 4 层横梁 3 个方向全部约束,加载步骤为 Force/Moment→On Nodes→Pick All→方向及数值,其他梁与节点无约束。得到加载方向位移及等效应力,用于力学分析及校验。

2.1.2 线性屈曲分析

首先进行静力分析,单元长度分别设为 10、20、40、80、100、200 mm,用以得出线性屈曲特征值随网格单元长度改变的变化规律,施加单位荷载 1N,打开预应力效果,求解;设置分析类型为“Eigen Buckling”(线性屈曲),指定分析选项,“NMODE”文本框输入 1,指定扩展解,“NMODE”文本框输入 1,Elcalc 为 Yes(计算单元结果),求解,完成。得到屈曲荷载系数和位移。

2.2 仿真结果与分析

2.2.1 4 种温室结构变形及强度

4 种温室在两种荷载组合作用下整体变形效果一致,如图 3 所示。图 3a 为竖直荷载作用效果,在只有底梁固定的情况下,结构垂直下压,横梁防止了结构的偏移,整体没有扭转变形。组合 2 是水平荷载,结构变形如图 3b 所示,底梁固定,结构随加载方向向右上方偏移。表 2 中,组合 1 作用,4 种温室加载方向上的最大位移差别不大,组合 2 作用,不分叉结构位移远远大于 3 种分叉结构,且随着分叉数目增加,最大位移逐渐减小,一分三位移最小,与不分叉结构相比,降低了 98.92%,除一分二-全三角形结构在 2 种组合加载下的位移相近之外,其他 3 组都表现为组合 2 对变形影响大于组合 1,在不分叉结构中表现极为显著。表 3 中,最大位移区域主要集中在 1、2 层(结构上层),一分二-全三角形和一分三由三角形结构组成,此种设计降低了第 1 层位移,在一分二-全三角形中,最大位移主要在横梁上,一分三最大位移主要在竖梁上,说明分叉与三

角形联合结构能避免横梁和竖梁同时出现大变形, 并且使顶层结构更稳定, 因此顶层不需要复杂

的结构, 即可保证足够的采光又为日后检修维护提供了方便。

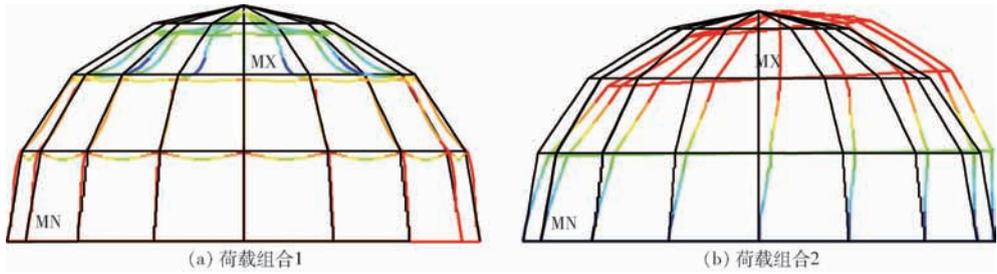


图 3 2 种荷载组合作用下结构变形

Fig. 3 Deformation under two load combinations

表 2 4 种温室在两种荷载组合作用下最大位移及最大等效应力

Tab. 2 Max displacement and equivalent stress of four greenhouses under two load combinations

参数	不分叉		一分二-原		一分二-全三角形		一分三	
	组合 1	组合 2	组合 1	组合 2	组合 1	组合 2	组合 1	组合 2
最大位移/mm	5.776	912.164	9.188	36.235	11.300	14.454	5.749	9.818
最大等效应力/MPa	85.148	1196.700	78.226	298.490	94.440	162.000	100.450	170.960

表 3 4 种温室最大位移区域

Tab. 3 The largest displacement zones in four kinds of greenhouses

温室结构	荷载组合	最大位移区域
不分叉	组合 1	1, 2 层竖梁
	组合 2	1, 2 层
一分二-原	组合 1	1, 2 层竖梁
	组合 2	1, 2 层
一分二-全三角形	组合 1	2 层横梁
	组合 2	2 层垂直于荷载的横梁
一分三	组合 1	2 层竖梁
	组合 2	2 层竖梁

表 2 中, 4 种温室在组合 1 作用下最大等效应力差别不大, 组合 2 作用, 随着分叉级数增加, 最大等效应力显著降低, 不分叉和一分二-原结构数值大于设计值 205 MPa, 不符合强度设计要求, 一分二-全三角形和一分三数值相近, 一分二-全三角形略小, 与不分叉结构相比, 降低了 86.46%, 强度最优。

2.2.2 4 种温室结构线性屈曲

4 种温室中最长梁来自一分二-全三角形结构,

长度为 3 331 mm, 梁宽度为 53.2 mm, 单元面积为 0.177 209 2 m², 得到最大单元长度为 421 mm, 最小单元长度按 1 mm 计算。4 种温室在竖直和水平力作用下, 单元长度与线性屈曲临界荷载近似呈正比, 与变形量近似呈反比, 表 4 为一分二-全三角形结构的线性屈曲结果, 由于单元长度为 1 mm, 超过计算机运算能力, 因此按表 4 规律, 推导得单元长度在 1 mm 和 421 mm 时线性屈曲结果, 如表 4 所示。若以组合 1 和组合 2 为边界条件, 一分二-全三角形组合 1 为 1 369.76 Pa (竖直向下, 表 1), 组合 2 为 1 029.76 Pa (水平向右), 两者分别乘以最大、最小单元面积, 得到最大单元竖直和水平许用荷载分别为 242.778、182.516 N, 线性屈曲荷载分别为 15 420.05、4 902.50 N (表 4), 屈曲荷载是许用荷载的 26.86 ~ 63.52 倍; 最小单元竖直和水平许用荷载分别为 0.001 370、0.001 030 N, 线性屈曲荷载分别为 36.63、11.64 N (表 4), 屈曲荷载是许用荷载的 11 300.97 ~ 26 737.22 倍。屈曲荷载远大于允许的极限荷载, 说明结构稳定性可靠, 但仍有较大的优化空间。

表 4 一分二-全三角形结构在不同单元长度下线性屈曲结果

Tab. 4 Linear buckling results of one divided two-all triangle structure at different unit lengths

参数	单元长度/mm								
	10	20	40	80	100	200	1	421	
竖直荷载	屈曲系数	366.27	732.74	1 468.49	2 943.17	3 677.16	7 565.32	36.63	15 420.05
	屈曲荷载/N	366.27	732.74	1 468.49	2 943.17	3 677.16	7 565.32	36.63	15 420.05
	最大位移/mm	0.329 1	0.164 6	0.082 7	0.041 4	0.033 4	0.016 5	3.290 8	0.007 8
水平荷载	屈曲系数	116.45	233.08	466.71	936.22	1 167.48	2 389.38	11.64	4 902.50
	屈曲荷载/N	116.45	233.08	466.71	936.22	1 167.48	2 389.38	11.64	4 902.50
	最大位移/mm	0.611 6	0.305 8	0.153 5	0.076 7	0.061 8	0.030 5	6.115 7	0.014 5

水平力作用下,不分叉、一分二-全三角形和一分三结构的屈曲荷载相近,皆大于一分二-原结构,但不分叉结构屈曲变形高于其他3种结构(表5)。如图4a所示整体结构变形不规则,存在明显的几何缺陷,屈曲特征值为负,表明失稳状态与荷载方向相反,如图4b所示结构上两层皆为大变形区域,如图4d所示结构大变形区域较分散,不利于力学特性

分析,如图4c所示结构初始大变形区域最小且规律,最稳定;竖直力作用下,带有分叉结构的温室线性屈曲荷载明显增加,相比不分叉结构平均增加了334.02%,一分二和一分三结构差别不大(表5),如图4e~4h所示4种温室大变形区域皆在上两层,不分叉结构稳定性最差。因此,综合表5和图4可知,一分二-全三角形结构稳定性最优。

表5 4种温室在单元长度为10 mm时的线性屈曲结果

Tab.5 Linear buckling results of four kinds of greenhouses when unit length was 10 mm

温室结构	水平荷载			竖直荷载		
	绝对屈曲系数	屈曲荷载/N	最大绝对位移/mm	绝对屈曲系数	屈曲荷载/N	最大绝对位移/mm
不分叉	131.384	131.384	38.5273	83.643	83.643	0.160444
一分二-原	82.467	82.467	1.45063	352.247	352.247	0.258557
一分二-全三角形	116.449	116.449	0.611567	366.272	366.272	0.329076
一分三	141.999	141.999	0.428615	370.516	370.516	0.201017

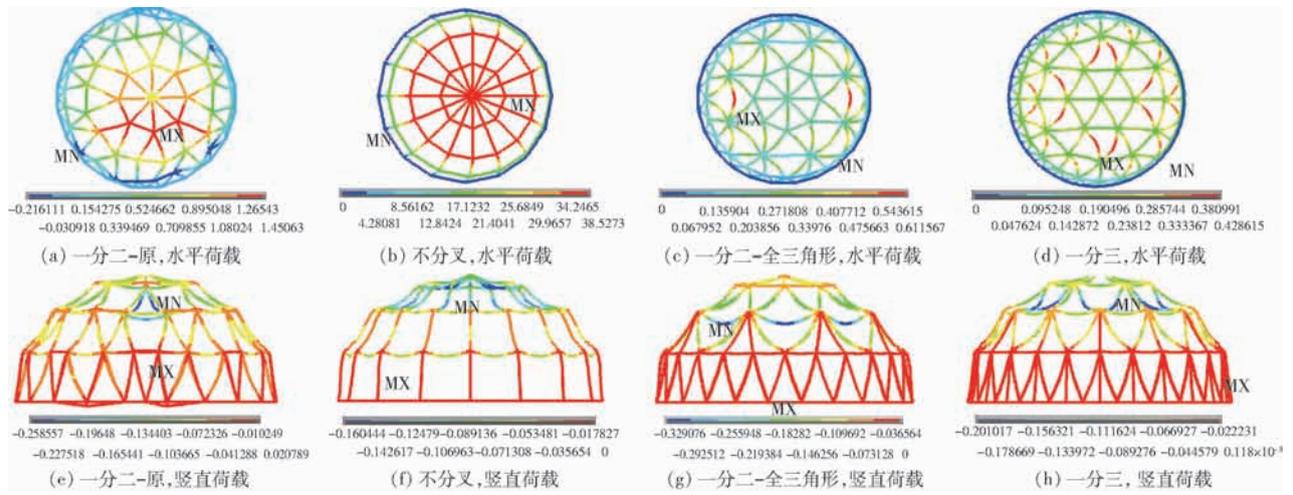


图4 4种温室在两种均布荷载作用下线性屈曲模式

Fig.4 Linear buckling modes of four kinds of greenhouses under two uniform loads

结果表明,不分叉和一分二-原结构不具备足够强度以抵御风载,因此并不适合穹顶温室;一分二-全三角形及一分三结构皆满足设计要求,两者力学特性相近,说明分叉与三角形结合形式是理想的穹顶温室结构形态,但一分三耗材较多(表1中,相比不分叉结构,一分二-全三角形耗材增加11.79%,一分三耗材增加30.18%),结构较复杂,不利于采光及加工。综合分析,一分二-全三角形为最优结构。

3 试验

基于第二相似原理,采用量纲分析方法求出相似准数,根据试验条件,确定相似常数^[18],根据试验材料与试验能力确定缩尺比例,制作模型,对模型指定位置施加荷载,测量微应变与仿真结果对比,并对模型结构进行了力学分析。

3.1 模型设计制作与试验方法

3.1.1 相似条件推导

量纲分析^[19]中采用绝对系统,根据有限元分析可知,影响4种温室结构力学特性的物理量分别为应力 σ 、挠度 f 、梁的跨度 l 、截面抵抗矩 W 、截面惯性矩 I 、荷载 P 、弹性模量 E 和泊松比 μ 。物理量个数为8个,基本量纲2个,零量纲1个,相似准则 π 共6个,由量纲和谐原理得^[18]

$$\pi_1 = \frac{P}{\sigma l^2} \quad \pi_2 = \frac{l}{f} \quad \pi_3 = \frac{l^3}{W}$$

$$\pi_4 = \frac{l^4}{W} \quad \pi_5 = \frac{P}{l^2 E} \quad \pi_6 = \mu$$

试验模型与原型材料一致,故相似常数 C_E 、 C_μ 为1,缩尺比例为1/25,故 $C_l = 1/25$,确定其他相似常数作为相似条件^[18],表达式为

$$C_P = \left(\frac{1}{25}\right)^2 \quad C_\sigma = 1 \quad C_f = \frac{1}{25}$$

$$C_w = \left(\frac{1}{25}\right)^3 \quad C_l = \left(\frac{1}{25}\right)^4$$

3.1.2 模型设计与制作

原型仿真分析中,雪载计算得 0.54 kPa,最大水平风载 0.2 kPa^[14],换算到缩尺模型,单元长度按原型 400 mm/25 为 16 mm,每个节点所受荷载为雪载 $540 \times 10^{-6} \times 15 \times 16 = 0.13 \text{ N}$,最大风载 $200 \times 10^{-6} \times 15 \times 16 = 0.048 \text{ N}$,则组合 1 为 1.123 N,组合 2 为 1.035 N。模型与原型几何相似,按缩尺比例,模型辅助圆半径(模型上层至下层)依次缩小为 91.84 - 174.08 - 224.96 - 240 mm。原型第 1 层设计成等边八边形,若将此结构应用到缩尺模型,结构过密影响

采光,耗材较多,加工难度大,因此,将缩尺模型结构第 1 层设计成等边六边形,辅助同心圆每层等分个数为 6-6-18-18,与第 1 层八边形在缩小尺寸中进行了仿真对比,结果见表 6。两者最大位移和等效应力在组合 1 作用下数值相近,组合 2 作用,最大位移八边形是六边形的 2.1 倍,最大等效应力八边形为六边形的 2.4 倍,说明在此缩尺比例下,第 1 层被设计成等边六边形更合理,两结构强度皆远小于许用值 205 MPa,因此选择第 1 层为等边六边形结构进行加工,做成实物模型。模型材料与原型相同,由于模型尺寸很小,梁采用钢板,截面为矩形,尺寸为宽 15 mm,厚 3 mm,连接点采用焊接方式,如图 5a 所示。

表 6 缩尺模型第 1 层不同形状力学特性对比

Tab.6 Mechanical characteristics comparison between two shapes in the first level of scale model

荷载组合	第 1 层形状	最大位移/mm	最大等效应力/MPa	变形量最大区域
组合 1	等边六边形	0.026 0	5.964 3	2 层横梁
	等边八边形	0.016 8	5.829 1	2 层横梁
组合 2	等边六边形	0.006 1	3.171 9	2 层垂直于荷载的横梁 3 层垂直于荷载的竖梁
	等边八边形	0.012 7	7.706 4	3 层垂直于荷载的竖梁



图 5 缩尺模型及应变测试系统

Fig.5 Scale model and strain testing system

3.1.3 试验方法

采用 BFH120-3AA 型应变片做传感元件进行单桥式连接^[20],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%^[21]。为了减小试验误差,设置一块温度补偿片,并将电桥桥盒接地^[22]。利用 DH3817 型动静态应变测试仪(图 5c,共有 8 个通道(可多通道同时测量))搭建测试系统(图 5d)进行数据采集,采集频率为 50、100 Hz 各采集两组数据,待数据趋于稳定时,持续 1 min,停止采集,各从 4 组稳定数据中提取 500 个试验值,求得均值作为试验结果,并与仿真结果作对比分析^[23]。

在穹顶温室最优结构的仿真分析中,荷载施加在全部节点上,反映整体结构的力学特性。在模型试验中,由于试验条件有限,只对特定位置施加荷

载,以研究不同结构的不同作用与性能。由原型和模型仿真分析可知,第 4 层横竖梁位移改变皆为最小,近似为 0,因此,模型试验主要集中在上 3 层。综合表 3 和表 6,组合 1 加载试验,测试位置为 1、2 层横梁和竖梁;组合 2 加载试验,测试位置见图 5b,横梁测试为 1 层①,2 层②,竖梁测试为 2 层③、④,3 层⑤、⑥、⑦、⑧。模型加载方式为集中力,方向为竖直(组合 1)和水平(组合 2),加载位置为梁中点,组合 1 为 1.12 N,加载砝码质量为 0.112 kg(砝码组合为 100 g + 10 g + 1 g + 1 g = 0.112 kg),由预试验结果得知,模型 1 层和 2 层横梁在组合 21.035 N 作用下微应变极小,影响结果读取,因此将荷载设置为 10.35 N,砝码质量为 1.035 kg(砝码组合为 1 000 g + 20 g + 10 g + 5 g = 1.035 kg),在试验梁中点划线,在中线两边对称各粘贴一片应变片,见图 6。

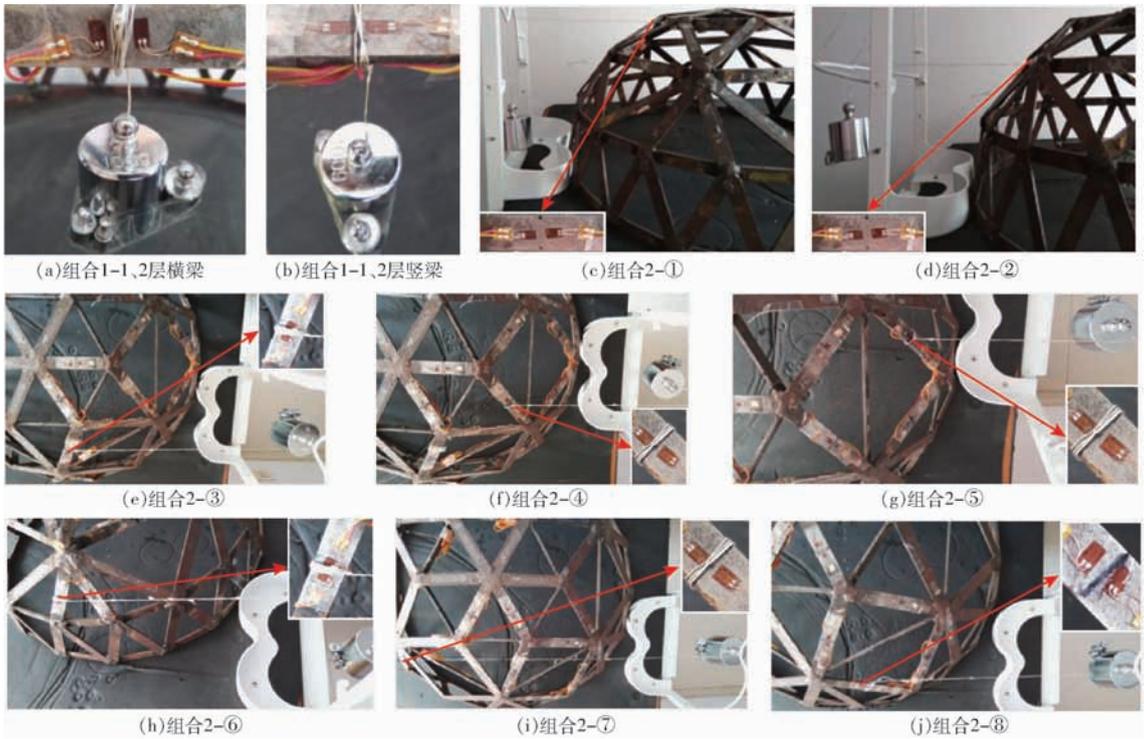


图6 缩尺模型加载及应变片粘贴方法

Fig.6 Loading and strain gauge sticking method of scale model

3.2 试验结果与分析

3.2.1 试验与仿真结果对比

采用 PASW Statistics 数据分析软件中“单样本 t 检验”^[24] 对试验值与仿真值进行对比, 检验试验值的准确程度^[25]。在模型试验中, 所采集的数据并非为绝对梁中点微应变, 而是中心偏移 3 ~ 5 mm (由应变片尺寸及实际粘贴位置决定, 见图 6) 位置微应变, 因此, 从仿真结果中提取梁中点及最近节点 (节点长度为 16 mm) 微应变, 得出线性关系式, 对试验数据进行单样

本 t 检验, 先将检验值设置为 0, 得出置信区间, 将上限和下限代入仿真结果得出的线性关系式, 从而得到与试验相对应位置的仿真结果, 再将此仿真数据作为检验值进行单样本 t 检验, 结果表明试验与仿真数据无显著差异, 此试验结果对应的仿真位置见表 7。

表 7 中 12 组数据经单样本 K-S 检验^[24], 结果皆为正态分布。 $P > 0.05$ (表 7), 表示试验值与校验值无显著差异, 单样本 t 检验所用校验值对应位置距梁中点在 1 ~ 12.5 mm 内, 试验共 12 组, 其中 9 组

表 7 试验与仿真单样本 t 检验Tab.7 Single sample t test for test and simulation

组合及加载位置	试验		仿真		单样本 t 检验				
	微应变均值	微应变置信区间		线性关系式	试验均值对应位置及微应变		微应变检验值	Sig. (双侧)	显著性水平
		上限	下限		距中点距离/mm	微应变			
组合 1-1 层横梁	-58.186	-58.000	-58.400	$y = 0.4752x - 60.470$	4.5	-58.332	-58.332	0.295	无显著差异
组合 1-2 层横梁	-296.157	-297.594	-294.720	$y = 2.1831x - 308.000$	5.0	-297.085	-297.085	0.205	无显著差异
组合 1-1 层竖梁	-27.269	-27.107	-27.430	$y = 0.2296x - 29.539$	9.5	-27.358	-27.358	0.278	无显著差异
组合 1-2 层竖梁	-33.315	-33.170	-33.460	$y = 0.2675x - 34.499$	4.0	-33.429	-33.429	0.123	无显著差异
组合 2-1 层横梁①	32.754	32.531	32.530	$y = -0.2477x + 35.627$	12.5	32.531	32.531	0.050	无显著差异
组合 2-2 层横梁②	30.088	30.327	29.849	$y = -0.2212x + 30.733$	2.0	30.291	30.291	0.097	无显著差异
组合 2-2 层竖梁③	193.938	195.402	192.474	$y = -1.4041x + 194.930$	1.5	192.824	192.824	0.136	无显著差异
组合 2-2 层竖梁④	62.498	62.870	62.126	$y = -0.5041x + 67.019$	8.5	62.734	62.734	0.212	无显著差异
组合 2-3 层竖梁⑤	103.989	104.517	103.461	$y = -0.7850x + 109.130$	6.0	104.420	104.420	0.110	无显著差异
组合 2-3 层竖梁⑥	299.457	300.717	298.197	$y = -2.4619x + 301.000$	1.0	298.538	298.538	0.152	无显著差异
组合 2-3 层竖梁⑦	110.442	111.190	109.694	$y = -0.8353x + 116.050$	5.0	111.038	111.038	0.118	无显著差异
组合 2-3 层竖梁⑧	514.991	516.897	513.086	$y = -4.075x + 532.200$	4.0	515.900	515.900	0.349	无显著差异

位置在 1~6 mm 内,3 组在 8.5~12.5 mm 内,应变片粘贴在距中心 3~5 mm 位置上,因此 9 组在 1~6 mm 内的数据可靠,其他 3 组略有偏差。以仿真校验值作为真值,12 组数据的试验均值与校验值的相对误差为 0.18%~0.69%,误差很小,结合单样本 *t* 检验结果,可知试验与仿真无系统误差,两者皆可用于穹顶温室结构分析。

3.2.2 横梁和竖梁力学特性

图 7 每组标注数值为梁中点仿真值,为基本参考值,与表 7 试验均值与仿真校验值不同。可以看出,每组试验值基本在仿真参考值的上下附近浮动,直观地反映了仿真的可靠度,正负值反映的是应变方向,以绝对值为参考进行对比分析。图 7a 组合 1 加载,2 层应变为 1 层的 5 倍,组合 2 加载,1、2 两层应变相近,说明组合 1 主要影响横梁应变,对第 2 层的影响最大,与原型结构的研究结果相同(表 3 中一分二-全三角形)。图 7b 组合 1 加载,1、2 两层应

变数值相近;组合 2 加载,2 层微应变③梁大于④梁,是由于③梁受力面宽度为 3 mm,④梁受力面宽度为 15 mm(模型用梁尺寸),3 层微应变由大到小依次为⑧梁、⑥梁、⑦梁、⑤梁,同理,是由于⑧梁和⑥梁受力面宽度为 3 mm,⑦梁和⑤梁受力面宽度为 15 mm,其中⑧梁和⑦梁长度更长,应变更大;整体应变 3 层大于 2 层,说明组合 2 主要影响竖梁应变,对第 3 层影响最大,与表 2 对原型结构的研究结果略有出入,是由于原型与模型的加载方式(原型为全部加载,模型试验与仿真为指定节点加载)及第 1 层结构不同,与表 6 仿真结果相同。通过模型试验,进一步证明了一分二-全三角形结构在不同组合加载下的主要应变区域为第 2 层和第 3 层,因此作为重点研究区域,结构第 1 层可进行简化分析,以保证充足的采光和便于加工维护,第 4 层被固定在地面,保证足够强度即可。

4 结论

(1) 基于芡实叶脉的分叉规律及三角形的稳固特性仿生设计了 4 种穹顶温室,利用 ANSYS 仿真软件,对 4 种结构进行了静力及线性屈曲分析。静力分析得出变形最大区域在 1、2 层(结构上层),随着分叉级数增多,在组合 1 作用下位移和强度差别不大,在组合 2 作用下显著减小;屈曲分析得出水平力作用 4 种温室屈曲荷载相近,竖直力作用,分叉结构使得结构屈曲荷载显著增加。一分二-全三角形与一分三结构皆符合设计要求,但一分二-全三角形更省料,初始缺陷小,因此为最优穹顶温室形态。

(2) 基于第二相似理论,采用量纲分析法得出相似条件,确定缩尺比例为 1/25,第 1 层结构由原型的等边八边形改为等边六边形,对两结构位移及强度进行仿真,得出在缩尺比例下,顶层为等边六边形更合理;对模型进行应变测试试验,采用单样本 *t* 检验和相对误差分析方法对比了试验与仿真数值,得出两者无系统误差,皆可用于穹顶温室力学分析。组合 1 对横梁影响较大,组合 2 对竖梁影响较大,应变显著区域主要集中在 2、3 层,与原型的仿真结果略有差别,这是由于原型和模型的加载方式及第 1 层形状的不同所导致,对结构的整体力学分析影响不大。

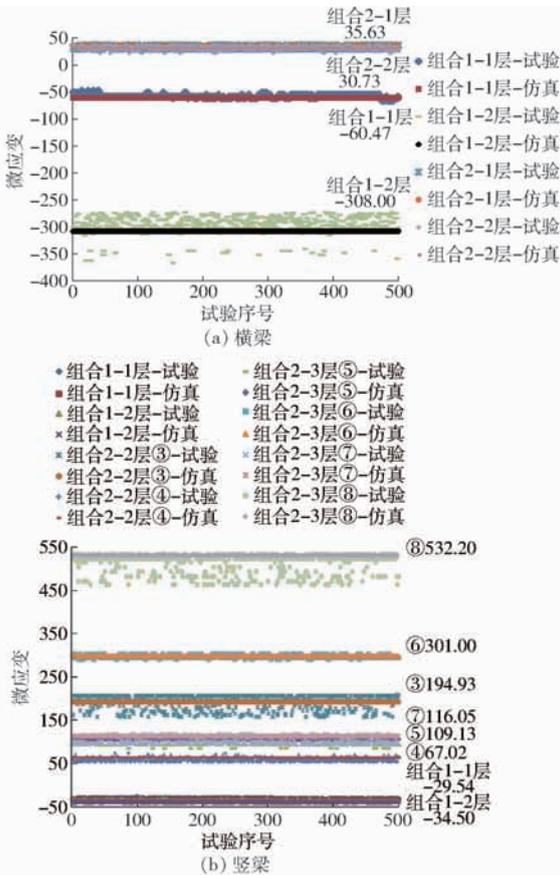


图 7 缩尺模型试验与仿真结果

Fig. 7 Test and simulation results in scale model

参 考 文 献

[1] 杨杰章. 农业观光温室景观规划设计初探[D]. 广州: 仲恺农业工程学院, 2017.
 YANG Jiezhang. Study on agricultural sightseeing greenhouse landscape [D]. Guangzhou: Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2017. (in Chinese)

[2] HYO G C, JAE H L, BYOUNG Y M, et al. Improved fruit quality and yield when melons and cherry tomatoes were grown in the air-dome greenhouse compared to the commonly used iron-frame polyethylene cover greenhouse[J]. Journal of Agriculture &

- Life Science, 2017, 51(4): 87-96.
- [3] PAULA A C. Experimental and modeling study of a geodesic dome solar greenhouse system in ottawa [D]. Hamilton: McMaster University, 2006.
- [4] 鲁词曲. 生产性异型温室的设计与应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
LU Ciqu. Study on design and application of heteromorphous structural greenhouses [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010. (in Chinese)
- [5] 乔克, 张其林. 大跨度双层球面网架温室动力特性研究[J]. 施工技术, 2014, 43(14): 110-114.
QIAO Ke, ZHANG Qilin. Dynamic characteristics investigations of large-span double-layer reticulated dome greenhouse [J]. Construction Technology, 2014, 43(14): 110-114. (in Chinese)
- [6] 宋剑波. 黑瞎子岛展览温室异型网壳结构设计[J]. 建筑结构, 2011, 41(增刊): 768-772.
SONG Jianbo. Design and analysis of the steel structure for Heixiazi Islands greenhouse [J]. Building Structure, 2011, 41(Supp.): 768-772. (in Chinese)
- [7] 王军林, 郭华, 任小强, 等. 灾害风荷载下温室单层柱面网壳整体动力倒塌分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 195-203.
WANG Junlin, GUO Hua, REN Xiaoqiang, et al. Global dynamic collapse analysis of single-layer cylindrical reticulated shell in greenhouse under disaster wind loads [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9): 195-203. (in Chinese)
- [8] 张中昊, 付强, 范峰. 斜拉杆增强温室双向网格型单层柱面网壳稳定性[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 172-179.
ZHANG Zhonghao, FU Qiang, FAN Feng. Tension members strengthening stability of two-way grid single-layer cylindrical shell in greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(10): 172-179. (in Chinese)
- [9] 张中昊, 付强, 范峰. 拉索加强式温室单层球面网壳稳定性分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 233-240.
ZHANG Zhonghao, FU Qiang, FAN Feng. Stability analysis of cable-stiffened single-layer two-way grid reticulated domes of greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(22): 233-240. (in Chinese)
- [10] 马明, 钱基宏, 孔慧, 等. 鄂尔多斯东胜区植物园温室屋盖结构设计研究[J]. 建筑结构, 2013, 43(6): 5-9.
MA Ming, QIAN Jihong, KONG Hui, et al. Design research on greenhouse roof structure of botanical garden in Erdos Dongsheng District [J]. Building Structure, 2013, 43(6): 5-9. (in Chinese)
- [11] 李成志, 梁宗敏, 剧锦三. 异形温室结构的有限元分析[J]. 中国农业大学学报, 2007, 12(2): 84-87.
LI Chengzhi, LIANG Zongmin, JU Jinsan. Spatial finite element analysis of heteromorphous greenhouse [J]. Journal of China Agricultural University, 2007, 12(2): 84-87. (in Chinese)
- [12] YU Haiye, GUAN Shujie, ZHANG Yuqing, et al. Design of dome greenhouse skeleton based on bionic study on venation distribution of *Euryale (Euryale ferox Salisb.)* leaf [J]. International Agricultural Engineering Journal, 2017, 26(2): 27-35.
- [13] GUAN Shujie, YU Haiye, ZHANG Yuqing, et al. Mechanical research on bionic greenhouse skeletons designed from *Euryale (Euryale ferox Salisb.)* venation distribution based on finite element method [J]. International Agricultural Engineering Journal, 2018, 27(2): 82-91.
- [14] 周长吉. 现代温室工程[M]. 北京: 现代工业出版社, 2003.
- [15] GB 50009—2001(2006) 建筑结构荷载规范(2006版)[S].
- [16] 刘鸿文. 材料力学 I [M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [17] 刘浩. ANSYS 15.0 有限元分析从入门到精通[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [18] 宋彧. 相似模型试验原理[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2016.
- [19] 王颖, 黄晗, 李建桥, 等. 基于相似理论的月球车坡面通过性能试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 406-412.
WANG Ying, HUANG Han, LI Jianqiao, et al. Experiment on lunar rover's trafficability on slope terrain based on similarity theory [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 406-412. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170454&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.054. (in Chinese)
- [20] 孙裕晶, 张强. 农业工程测试系统设计与应用[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2011.
- [21] 刘春香, 王金武, 周文琪, 等. 液肥深施双斜孔式喷肥针动力学分析与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 53-58.
LIU Chunxiang, WANG Jinwu, ZHOU Wenqi, et al. Dynamics analysis and experiment of double oblique hole spray fertilizer needle of liquid fertilizer deep fertilization [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 53-58. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160308&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.008. (in Chinese)
- [22] 毕玉华, 申立中, 杨永忠, 等. 柴油机气缸套应变的动态测量[J]. 农业机械学报, 2006, 37(5): 163-165.
BI Yuhua, SHEN Lizhong, YANG Yongzhong, et al. Dynamic measurement of cylinder liner strain in diesel engine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(5): 163-165. (in Chinese)
- [23] 马丽娜, 黄小毛, 宋正河, 等. 基于载荷特性的玉米收获机车架有限元分析与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 288-294.
MA Li'na, HUANG Xiaomao, SONG Zhenghe, et al. Finite element analysis and experiment on corn harvester frame based on load characteristics [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 288-294. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s038&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.038. (in Chinese)
- [24] 薛薇. SPSS 统计分析方法及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [25] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.