



许晶, 胡昊楠, 廖政铭, 底绍涵, 赵淑梅. 柔性保温后墙日光温室骨架静力分析及其优化[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(07): 210-217.

XU Jing, HU Haonan, LIAO Zhengming, DI Shaohan, ZHAO Shumei. Static analysis and structure optimization of the skeleton in the solar greenhouse with flexible insulation rear wall[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(07): 210-217.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.07.18

柔性保温后墙日光温室骨架静力分析及其优化

许晶¹ 胡昊楠¹ 廖政铭¹ 底绍涵² 赵淑梅¹

(1. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083;

2. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要 针对新型柔性保温后墙日光温室安全性和经济性问题, 采用ANSYS WORKBENCH对16 m跨度的柔性保温后墙温室的力学性能和骨架优化进行研究。基于北京市密云区现有柔性保温后墙温室的结构尺寸, 采用有限元软件建立了温室骨架模型, 并分析该温室在使用过程中可能承受的各种荷载, 确定了8种典型荷载工况。模拟不同工况下温室骨架的内力和变形情况, 得到温室骨架的应力和变形云图。为进一步优化温室结构, 在保证结构安全性前提下, 改变弦杆截面尺寸和调整腹杆布局对温室骨架进行静力特性分析。结果表明: 1) 8种荷载组合中, 恒荷载+180°风荷载+前屋面保温被收起荷载组合引起的温室的应力和变形最大, 最大应力和最大总变形分别为175.3 MPa和25.46 mm, 但均在规范规定的限值范围内。2) 采用2种优化方案后, 柔性保温后墙温室或钢桁架用钢量节省率为12.3%或腹杆钢筋节省率为18.23%, 单根钢管对作物的采光率增加6.25%, 这不仅降低了温室的建造成本, 而且提高了作物采光率。

关键词 日光温室; 桁架结构; 荷载组合; 结构优化; 有限元分析

中图分类号 S26; TU261

文章编号 1007-4333(2025)07-0210-08

文献标志码 A

Static analysis and structure optimization of the skeleton in the solar greenhouse with flexible insulation rear wall

XU Jing¹, HU Haonan¹, LIAO Zhengming¹, DI Shaohan², ZHAO Shumei¹

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract Aiming at the safety and economic issues of a new type of solar greenhouse with flexible thermal insulation rear wall, the mechanical performance and optimization of a 16 m-span greenhouse with flexible thermal insulation rear wall are studied by utilizing ANSYS WORKBENCH. The finite element model of the greenhouse framework is established based on the existing structural dimensions of the greenhouse in Miyun District, Beijing. Various loads acted on the greenhouse are analyzed and calculated, and 8 kinds of load conditions are identified. The internal forces and deformations of the greenhouse framework under 8 kinds of load conditions were simulated stress and deformation nephogram of greenhouse skeleton. To further optimize the greenhouse framework while ensuring its safety, the static characteristics of greenhouse framework are analyzed by modifying the chord cross-section or adjusting the layout of the belly bar. The results show that: 1) Among the 8 kinds of load conditions, the load condition “dead load+180° wind load + front roof insulation is put away” induced the highest stress and deformation in the greenhouse framework. And the maximum stress was 175.3 MPa and the maximum total deformation was 25.46 mm, which were

收稿日期: 2024-11-18

基金项目: 北京现代农业产业技术体系(BAIC01-2024); 国家自然科学基金项目(U20A2020); 高水效智慧农业关键技术与装备(00114332)

第一作者: 许晶(ORCID: 0000000228753675), 副教授, 主要从事温室结构和建筑结构力学性能研究, E-mail: xujing@cau.edu.cn

both within the limits specified in the specification. 2) Based on the two optimization schemes, the steel usage for the trusses of the greenhouse was reduced by 12.3%, or the rebar usage for the belly bar was reduced by 18.23%. Additionally, the light transmission rate for crops through a single steel pipe increased by 6.25%. The two optimization schemes reduce the construction cost of the greenhouse and improve the lighting transmission for crops.

Keywords solar greenhouse; truss structure; load condition; structural optimization; finite element analysis

近年来柔性保温后墙日光温室因为具有不破坏原有耕作层土壤、无砖混基础、无后墙、装配式骨架、建设周期短、冬季升温快、节约成本等特点在北方地区得到发展^[1]。为更好地促进柔性保温后墙温室建造和发展,对柔性保温后墙温室进行结构力学性能分析,以便提出更合理更优化的结构形式是很有必要的。

已有研究对传统温室结构的力学性能及结构优化进行分析^[2-10]。采用有限元数值模拟方法对不同类型温室结构进行力学性能分析^[2-4]。采用优化法对日光温室结构进行优化^[5];研究不同拉杆位置对椭圆管桁架结构力学性能影响^[6]。基于温室通风和保温原理对大跨度温室进行优化设计^[9];对如何降低温室用钢量进行研究^[10]。以上研究都是基于传统的塑料大棚或日光温室性能进行研究,对柔性保温后墙温室结构力学性能方面研究很少,仅少量研究对椭圆管单管结构形式的柔性保温后墙温室内力及结构优化进行研究^[11]。

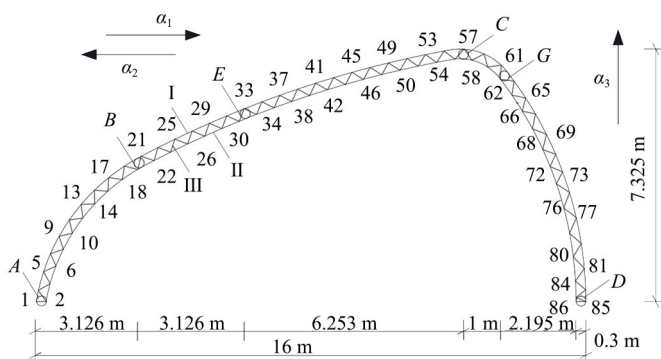
本研究拟采用ANSYS软件对16 m跨度的双

桁架式柔性保温后墙温室进行数值模拟分析,讨论不同荷载组合下柔性保温后墙温室的力学性能。采用改变温室骨架截面尺寸和调整腹杆布局2种方法对温室结构优化,以期降低柔性保温后墙日光温室建造成本提供计算依据。

1 柔性保温后墙温室结构尺寸与荷载计算

1.1 柔性保温后墙温室结构尺寸及有限元模型

选定位于北京市密云区已建好的16 m跨柔性保温后墙日光温室为研究对象,主体结构尺寸为:脊高7.325 m,前屋面和后屋面水平投影宽度分别为12.505 m和3.495 m,沿柔性保温后墙温室纵向长度方向布置间距为1.0 m,拱架前后柱脚均采用固定约束。该温室主体结构为上下弦桁架结构形式。已建柔性保温后墙温室的骨架截面参数如下:上下弦桁架均采用DN25圆钢管;钢管外侧和内侧直径分别为 $D_{\text{外}}=32\text{ mm}$ 和 $D_{\text{内}}=25\text{ mm}$;中间腹杆采用 $\Phi 12\text{ mm}$ 的钢筋,所有杆件均为Q235钢。该温室的结构图及杆件编号见图1。



I. 上弦圆管; II. 下弦圆管; III. 腹杆。

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 分别代表 $0^\circ, 180^\circ, 90^\circ$ 风向角。

A 和 D 为温室结构左右柱脚点, B 为前屋面 1/4 跨度点, E 为前屋面 1/2 跨度点, C 为屋面顶点, G 为后屋面卡槽位置点, 距离屋顶顶点水平距离 1 m。

I. Upper chord with circular tube; II. Lower chord with circular tube; III. Web member with rebar.

α_1, α_2 and α_3 represent $0^\circ, 180^\circ$ and 90° wind directions.

A and D are the foot points of the left and right columns of the greenhouse structure. B is the 1/4-span point of the front roof. E is the 1/2-span point of the front roof. C is the point of the roof apex. G is the position point of the rear roof slot, and its horizontal distance from the roof apex is 1 m.

图1 柔性保温后墙温室结构图及杆件编号

Fig. 1 Structure drawing of solar greenhouse with flexible thermal insulation wall and the labeled members

1.2 温室有限元模型

利用 Ansys Workbench 中 Spaceclaim 建立该温室模型。模型中以杆件编号 1(图 1)的位置为坐标原点, X 和 Y 分别为水平坐标和竖向坐标, 将整个柔性温室划分为 4 段圆弧, 每段圆弧的圆心坐标及半径见表 1。每段圆弧选取相切位置进行截断即可生成柔性后墙保温温室骨架的外弧段模型。

表 1 柔性后墙保温温室各弧段坐标及半径

Table 1 Coordinates and radii of each arc of greenhouse with flexible thermal insulation wall

弧段 Segmental arc	半径/m Radius	圆心坐标 Center coordinates	
		X/m	Y/m
前屋面上圆弧 Lower arc of front roof	5.800	5.712	-1.007
前屋面上圆弧 Upper arc of front roof	32.000	17.916	-24.191
屋顶圆弧 Arc of roof	1.500	12.505	5.825
后屋面圆弧 Arc of rear roof	11.000	5.000	0.000

该模型中, 所有杆件采用 BEAM188 单元, 该单元适用于细长杆分析。杆件单元材料属性为: Q235 钢, 密度为 7 850 kg/m³, 屈服强度值为 235 MPa, 极限抗拉强度为 370 MPa, 弹性模量为 2.0×10⁵ MPa。结构分析中考虑了几何非线性和材料非线性影响, 钢管应力-应变关系采用双折线本构关系。同时, 温室骨架的柱脚均按固定连接, 腹杆与上下弦拱杆也采用固定连接。温室骨架采用自适应网格划分, 对精度要求高的区域手动调整网格密度^[12]。

1.3 温室荷载计算

调研发现, 目前很多在建温室使用年限超过 10 a, 故本研究在荷载计算中按照重现期 20 a 考虑。

1.3.1 卷起保温被的钢管荷载计算

钢管规格为 DN89, 采用 Q195 钢, 外径 88.9 mm、密度 7 850 kg/m³、壁厚 3 mm。该钢管每延米荷载为 0.0623 kN, 荷载方向竖直向下。

1.3.2 风荷载计算

根据 GB/T 51183—2016《农业温室结构荷载规范》^[13] 规定, 温室表面上的风荷载标准值计算公

式为:

$$w_k=\mu_z\mu_s w_0$$
(1)

式中: w_k 为风荷载标准值, kN/m²; μ_z 为风压高度系数; μ_s 为风荷载体型系数; w_0 为当地基本风压, kN/m², 查阅北京市密云区 20 年一遇的最大基本风压值 $w_0=0.58$ kN/m²。风荷载具体计算过程见文献^[14]。在有限元软件分析时, 风荷载方向为温室骨架圆弧的法向方向。

1.3.3 雪荷载计算

根据文献^[13] 规定: 温室结构整体计算或考虑屋面覆盖材料时应按不均布雪荷载计算。因本研究只对温室骨架进行分析, 故模拟中只考虑均布雪荷载, 计算公式为:

$$S=\mu S_0$$
(2)

式中: S 为雪荷载标准值, kN/m²; μ 为屋面积雪分布系数; S_0 为当地基本雪压, kN/m², 查阅北京市密云区 20 年一遇的最大基本雪压值 $S_0=0.31$ kN/m²; 雪荷载方向为竖直向下。

1.3.4 作物荷载计算

作物荷载与温室种植作物种类相关^[13], 实地考察知该温室采用 5 点式吊挂方式, 依据文献^[13] 计算作物荷载分布结果见图 2。

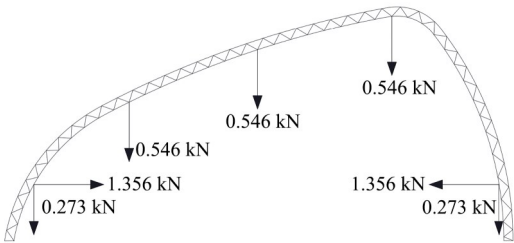


图 2 作物荷载分布

Fig. 2 Crop load distribution

1.4 温室荷载及荷载组合

对该柔性后墙保温温室荷载进行汇总见表 2^[14], 温室荷载组合见表 3。文献^[13] 规定可变荷载的组合值系数与分项系数之积一般小于 1.0, 故除工况 8 外以偏于安全的方式规定其他荷载组合的恒荷载和可变荷载组合系数均取为 1.0。对于雪荷载, 文献^[13] 规定温室结构整体计算或考虑屋面覆盖材料时应按不均布雪荷载计算, 因本研究只对温室骨架进行分析, 故只考虑了均布雪荷载(表 3)。

表 2 柔性保温后墙温室荷载值^[14]

Table 2 Load value of greenhouse with flexible thermal insulation wall

荷载类别 Load classification	荷载类型 Load type	荷载取值 Characteristic value of load	荷载方向 Load direction		
恒荷载 Dead load	骨架荷载	软件自动计算	竖直向下		
	薄膜荷载	0.0014 kN/m ²	竖直向下		
	前屋面保温被铺开	0.0174 kN/m ²	竖直向下		
	前屋面保温被收起	0.262 5 kN	竖直向下		
	卷起保温被钢管荷载	0.0623 kN	竖直向下		
	后屋面保温被荷载	0.0348 kN/m ²	竖直向下		
可变荷载 Live load	作物吊挂荷载(中间竖向)		0.546 kN 竖直向下		
	作物吊挂荷载(水平向)		1.356 kN 水平方向		
	作物吊挂荷载(两端竖向)		0.273 kN 竖直向下		
	雪荷载		0.124 kN/m ² 竖直向下		
	0°风荷载	AE段均布力	0.172 kN/m ²	径向向内	
		C点集中力	2.387 8 kN	径向向外	
		G点集中力	0.339 2 kN	径向向外	
		D点集中力	0.100 3 kN	径向向外	
	90°风荷载	A点集中力	0.449 8 kN	径向向外	
		B点集中力	1.255 7 kN	径向向外	
		C点集中力	0.949 2 kN	径向向外	
		G点集中力	0.745 5 kN	径向向外	
		D点集中力	0.602 2 kN	径向向外	
		180°风荷载	A点集中力	0.749 7 kN	径向向外
			B点集中力	2.898 6 kN	径向向外
			C点集中力	1.343 1 kN	径向向外
	CG段均布力		0.311 kN/m ²	径向向内	
		GD段均布力	0.424 kN/m ²	径向向内	

注:A、B、C、D、E和G点具体位置见图1。
Note: The positions of points A, B, C, D, E and G are shown in Fig. 1.

表 3 不同工况对应的温室结构荷载组合

Table 3 Load combination of greenhouse structure corresponding to different load conditions

工况 Load condition	荷载组合 Load combination
工况 1 Load condition 1	恒荷载+0°风荷载+前屋面保温被收起+作物吊挂荷载
工况 2 Load condition 2	恒荷载+0°风荷载+前屋面保温被铺开+作物吊挂荷载
工况 3 Load condition 3	恒荷载+90°风荷载+前屋面保温被收起+作物吊挂荷载
工况 4 Load condition 4	恒荷载+90°风荷载+前屋面保温被铺开+作物吊挂荷载
工况 5 Load condition 5	恒荷载+180°风荷载+前屋面保温被收起+作物吊挂荷载
工况 6 Load condition 6	恒荷载+180°风荷载+前屋面保温被铺开+作物吊挂荷载
工况 7 Load condition 7	恒荷载+180°风荷载+前屋面保温被收起
工况 8 Load condition 8	恒荷载+前屋面保温被铺开+0.7×1.2(屋面雪荷载+作物吊挂荷载)

2 柔性保温后墙温室骨架力学性能分析

2.1 温室骨架内力及变形分析

采用有限元方法对不同工况下温室骨架静力特性进行分析,各工况下温室的应力、内力及变形最大值及对应位置分别见表4和表5。工况7荷载组合中温室结构骨架的应力变形最大,最大应力为

175.3 MPa,最大总变形,水平变形和竖向变形分别为 25.460, 18.075 和 17.974 mm。根据 GB/T 51424—2022《农业温室结构设计标准》^[15],对于跨度 16 m 的温室,竖向变形不应超过 64 mm,水平变形不应超过 53 mm,各工况下计算的温室变形均未超过该标准值(表5),从设计角度考虑,该结构安全,但造价较高。

表4 各种工况下温室的内力最大值及其发生位置

Table 4 Maximum load values and the corresponding positions of greenhouses under different load conditions								
工况 Load condition	最大应力 Maximum stress		最大轴力 Maximum axial force		最大弯矩 Maximum bending moment		最大剪力 Maximum shear force	
	应力值/ MPa	位置 Position	轴力值/ kN	位置 Position	弯矩值/ (kN·m)	位置 Position	剪力值/ kN	位置 Position
工况1 Load condition 1	115.45	上弦 53-55	17.155	上弦 1-3	0.187 3	上弦 53-55	1.526 7	上弦 55-57
工况2 Load condition 2	129.31	上弦 53-55	17.933	上弦 1-3	0.210 3	上弦 55-57	1.671 5	上弦 55-57
工况3 Load condition 3	77.741	下弦 8-10	5.014	下弦 84-86	0.134	下弦 8-10	0.826 8	下弦 8-10
工况4 Load condition 4	75.888	下弦 8-10	4.891	下弦 84-86	0.132 8	下弦 8-10	0.807 7	下弦 8-10
工况5 Load condition 5	173.03	上弦 19-21	23.919	下弦 84-86	0.265	上弦 19-21	1.579 2	上弦 19-21
工况6 Load condition 6	172.13	上弦 19-21	23.775	下弦 84-86	0.265	上弦 19-21	1.578 5	上弦 19-21
工况7 Load condition 7	175.3	上弦 19-21	24.507	上弦 1-3	0.263	上弦 19-21	1.931 7	上弦 57-59
工况8 Load condition 8	77.649	上弦 57	7.163	下弦 2-4	0.0857	上弦 57	0.737 9	下弦 58-60

表5 各工况下温室的最大变形值

Table 5 Maximum deformations of greenhouses under different load conditions				mm
工况 Load condition	总变形 Total deformation	水平变形 Horizontal deformation	竖直变形 Vertical deformation	
工况1 Load condition 1	11.345	8.470	7.563	
工况2 Load condition 2	12.248	9.904	8.220	
工况3 Load condition 3	1.408	0.894	1.179	
工况4 Load condition 4	1.394	0.847	1.230	
工况5 Load condition 5	19.333	13.990	13.397	
工况6 Load condition 6	18.431	13.360	12.742	
工况7 Load condition 7	25.460	18.075	17.974	
工况8 Load condition 8	7.254	4.130	5.969	

2.2 温室骨架稳定性验算

工况 7 下温室骨架的相关参数见表 6,温室的最大应力均小于 Q235 的屈服强度,结构安全。

根据 GB 50018—2002《冷弯薄壁型钢结构技术规范》^[16]对工况 7 下温室的稳定性进行验算,计算结果见表 7:上弦 19-21 杆应力最大,最大应力为

184.014 MPa,小于 Q235 钢屈服强度 235 MPa。综上所述,工况 7 下,温室的应力和变形最大,但是该工况下对应的应力、变形和稳定性均满足结构设计要求。从温室经济效益考虑,该温室设计会增大温室造价,因此可尝试对结构进行优化,既保证温室安全又降低结构造价。

表 6 工况 7 下温室最不利杆的内力值^[14]
Table 6 The strength value of the most unfavorable bar in greenhouse under load condition 7

杆件编号 Member number	惯性矩/ 10 ³ mm ⁴ Inertia moment	截面 面积矩/mm ³ First moment of area	面积/ mm ² Area	截面塑性 发展系数 Plastic adaption coefficient of cross-section	轴力/kN Axial force	弯矩 M_x / (N·m) Bending moment	弯矩 M_y / (N·mm) Bending moment	应力/ MPa Stress
腹杆 83-84 Web member 83-84	1.018	169.70	113.100	1.20	4.997 5	954.150	1.508	48.873
上弦 1-3 Upper chord 1-3	3.230	2018.56	313.374	1.15	2.450 3	98 459	14.540	120.606
上弦 19-21 Lower chord 19-21	3.230	2018.56	313.374	1.15	1.404 6	2.630×10^5	21.950	158.118

表 7 工况 7 下最不利杆的稳定性计算
Table 7 Stability calculation of the most unfavorable bar under load condition 7

计算参数 Calculating parameter	上弦 1-3 Upper chord 1-3	腹杆 83-84 Web member 83-84	上弦 19-21 Lower chord 19-21
回转半径/mm Radius of gyration	10.089	3.000	10.089
计算长度/m Effective length	0.349	0.330	0.578
长细比 Slenderness ratio	34.592	110.000	57.290
稳定系数 Stability coefficient	0.922	0.493	0.823
端弯矩 M_1 /(N·m) End bending moment	98 437	948.05	95 921
端弯矩 M_2 /(N·m) End bending moment	48 489	80.373	74 049
等效弯矩系数 β Equivalent moment factor	0.797	0.634	0.908
欧拉临界力 N_E /kN Euler's critical load	443.723	15.837	161.773
轴力/kN Axial force	24.503	4.931	14.046
应力/MPa Stress	125.946	74.160	184.014

3 柔性保温后墙温室骨架优化分析

3.1 优化骨架截面尺寸

本研究通过采用上弦 DN25+下弦 DN20、上弦 DN20+下弦 DN20、上弦 DN23+下弦 DN20 这 3 种方案分析了温室的内力和变形^[14]。首先对上弦 DN25+下弦 DN20 的尺寸形式进行内力和变形分析得知改变下弦尺寸对内力影响不大,对温室变形影响较大,但是该计算结果均在安全限值内,方案还是不太经济。因此,采用上弦 DN20+下弦 DN20 的尺寸形式进行内力和变形分析,此时温室的最大等效应力超出材料的屈服强度,方案不可行。因此,将温室骨架尺寸调整为上弦 DN23+下弦 DN20 情况进行了内力和变形分析,经模拟得知该情况下等效应力,变形和稳定性分析均符合规范要求,遂采用此优化方案。

经分析,工况 7 下采用上弦 DN23+下弦 DN20 截面优化的温室骨架的最大应力为 197.89 MPa,最大总变形,最大水平变形和最大竖直变形分别为 29.082, 20.670(向左)和 20.506 mm,均小于规范给定的限值;该结构骨架的稳定性验算满足规范要求。该优化方案中,温室骨架优化前上下弦杆均采用 DN25 型钢管,优化后采用 DN23 上弦杆+DN20 下弦杆钢管。相较于优化前,钢材节省量为 0.605 kg/m,节省率为 12.3%。上弦杆截面尺寸由 DN25 改为 DN23,单根钢管对作物的采光率增加 6.25%(按照钢管直径与温室横向跨度乘积对比),间接导致作物产量相应增加。

3.2 优化腹杆尺寸

现有温室结构的腹杆与下弦拱杆的夹角为 45°(弦杆弯曲处可能存在变化),腹杆数量为 82 根,其中 81 根腹杆长度为 0.413 5 m,1 根腹杆长度为 0.325 4 m,长度合计 34.232 4 m。在优化结构中将腹杆与下弦杆夹角减小到 30°,则腹杆数量变为 50 根,其中 49 根腹杆长度为 0.559 m,1 根腹杆长度为 0.228 m,长度合计 27.391 m。温室结构优化图及杆件编号见图 3,其他结构参数及模型参数与原结构相同。

经有限元分析并验算可知,结构内力及变形符合规范限值^[15],因此进一步对骨架进行优化确定最优尺寸:上下弦纵杆均采用 DN23 圆管,桁架顶部 33—37 节点间加 1 根 DN20 加固支撑,在桁架底部 1—5 节点间加 2 根加固支撑。优化后,温室骨架的最大应力为

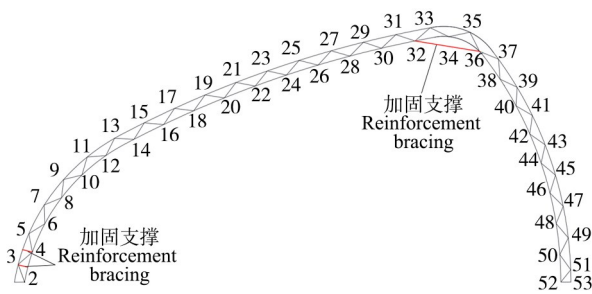


图3 优化后的温室结构及杆件编号

Fig. 3 The optimized greenhouse structure and its rod number

174.95 MPa,最大水平变形和竖向变形分别为 24.105 和 24.646 mm,均小于规范限制;骨架的稳定性验算也满足规范要求。该优化方案中,温室骨架优化前上下弦杆均采用 DN25 型钢管+45°腹杆形式,优化后上下弦均采用 DN23 型钢管+30°腹杆+斜撑。优化后每榀骨架纵杆节省用钢量 0.345 kg/m,节省率为 7.01%,腹杆钢筋(包含 2 根加固腹杆)节省量 5.541 kg,节省率为 18.23%。优化后上弦杆采用 DN23 钢管,同样提高了作物采光率。

对比上述 2 种优化方法可知,在保证结构安全性条件下,当桁架上下拱杆弧度总长度 > 21.31 m 时,采用第一种优化方法更经济,反之第二种优化方法更经济。

4 结束语

本研究以跨度为 16 m 的柔性保温后墙日光温室骨架为研究对象,对 8 种荷载组合工况下温室骨架的力学性能进行分析并采用优化温室骨架截面尺寸和腹杆尺寸 2 种方法对温室结构进行优化,主要研究内容及结果如下:

1) 计算了该日光温室在使用过程中所受的各类荷载取值,对荷载进行组合确定了该温室可能承受的 8 种荷载组合工况,为温室结构内力分析提供计算数据。

2) 对 8 种工况下温室的内力和变形进行分析,得知恒荷载+180°风荷载+前屋面保温被收起荷载组合下温室的内力和变形最大,但是均在规范给定限值范围内,因此可以对该结构进行优化设计。

3) 从截面优化角度,温室骨架钢管可从采用 DN25 型钢管改为采用 DN23 上弦杆+DN20 下弦杆钢管,相较于优化前,每榀骨架钢材节省率为

12.3%, 作物的采光率增加6.25%。

4) 从腹杆优化角度, 通过加固方式将温室骨架与下弦杆角度可从 45° 变为 30° 并将钢管改为DN23, 相较于优化前, 每榀骨架腹杆钢筋节省率为18.23%, 作物采光率增加6.25%。

参考文献 References

- [1] 王艳芳, 雷喜红, 李蔚, 牛曼丽, 王冰华, 王福东. 北京市柔性保温墙温室应用现状及发展建议[J]. 中国蔬菜, 2023(10): 11-16
Wang Y F, Lei X H, Li W, Niu M L, Wang B H, Wang F D. Application status and development suggestions for greenhouse with flexible thermal insulation wall in Beijing[J]. *China Vegetables*, 2023(10): 11-16 (in Chinese)
- [2] Wang C, Jiang Y C, Bai Y K, Wang T L. Numerical study on static properties and failure mechanisms of landing assembled Chinese solar greenhouses[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 188: 106347
- [3] Wang C, Wu H S, Jiang Y C, Bai Y K, Wang T L. Stability analysis of landing assembled Chinese solar greenhouses with discrete lateral braces under snow loads[J]. *Biosystems Engineering*, 2023, 233: 168-180
- [4] Ren J, Wang J, Guo S R, Li X, Zheng K P, Zhao Z. Finite element analysis of the static properties and stability of a large-span plastic greenhouse[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 165: 104957
- [5] 李笑天. 基于ANSYS的日光温室桁架结构优化研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020
Li X T. Research on optimization of solar greenhouse truss structure based on ANSYS[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020 (in Chinese)
- [6] 闫冬梅, 胡林, 周长吉, 闫俊月. 椭圆管单管拱架日光温室结构性能分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(5): 217-224
Yan D M, Hu L, Zhou C J, Yan J Y. Analysis of the performance of the oval tube arch of single-tube solar greenhouses[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(5): 217-224 (in Chinese)
- [7] 郝丽娟, 赵献辉, 许广义, 赵付江, 韩晓倩, 尹庆珍, 韩建会. 三连栋日光温室拱式桁架结构静力分析与结构优化[J]. 中国农学通报, 2014, 30(35): 242-247
Qie L J, Zhao X H, Xu G Y, Zhao F J, Han X Q, Yin Q Z, Han J H. Static analysis of truss type steel structure for three-span sunlight greenhouse[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(35): 242-247 (in Chinese)
- [8] Wang C, Xu Z Y, Jiang Y C, Wang T L. Numerical analysis of static and dynamic characteristics of large-span pipe-framed plastic greenhouses[J]. *Biosystems Engineering*, 2023, 232: 67-80
- [9] 杨焱, 李治国, 赵景文, 闫子双, 李宗煦, 李凯, 李传友, 高大辛. 宜机化大跨度新型日光温室结构优化设计和保温性能实践[J]. 蔬菜, 2023(11): 41-45
Yang Y, Li Z G, Zhao J W, Yan Z S, Li Z X, Li K, Li C Y, Gao D X. Optimization design and thermal insulation performance[J]. *Vegetables*, 2023(11): 41-45 (in Chinese)
- [10] Venturi A, Ventur A. Designing light weight structures for use as commercial greenhouses[J]. *Culture Protette*, 1982, 11(2): 31-37
- [11] 闫冬梅, 徐开亮, 周长吉, 张秋生. 柔性保温墙椭圆管单管拱架日光温室内力分析及结构优化[J]. 农业工程学报, 2023, 39(14): 215-222
Yan D M, Xu K L, Zhou C J, Zhang Q S. Internal force analysis and structure optimization of single oval tube arch solar greenhouse with flexible insulation wall[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(14): 215-222 (in Chinese)
- [12] 许晶, 胡治康, 史志清, 赵淑梅. 拱形塑料大棚风振动力响应分析[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(11): 188-195
Xu J, Hu Z K, Shi Z Q, Zhao S M. Dynamic response analysis of wind load of arched plastic greenhouse[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(11): 188-195 (in Chinese)
- [13] GB/T 51183—2016 农业温室结构荷载规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017
GB/T 51183—2016 Code for the design load of horticultural greenhouse structures[S]. Beijing: China Planning Press, 2017 (in Chinese)
- [14] 胡昊楠. 柔性后墙温室力学性能研究及其优化[D]. 北京: 中国农业大学, 2024
Hu H N. Research on mechanical properties and optimization of solar greenhouse with flexible rear wall[D]. Beijing: China Agricultural University, 2024 (in Chinese)
- [15] GB/T 51424—2022 农业温室结构设计标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2022
GB/T 51424—2022 Standard for the design of greenhouse structure[S]. Beijing: China Planning Press, 2022 (in Chinese)
- [16] GB 50018—2002 冷弯薄壁型钢结构技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003
GB 50018—2002 Technical code of cold-formed thin-wall steel structures[S]. Beijing: China Planning Press, 2003 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春



第一作者简介: 许晶, 博士, 副教授。主要从事农业工程结构和建筑结构力学性能研究, 农业工程结构风压特性研究等。主持北京市自然科学基金1项, 参与国家自然科学基金4项, 北京市体系设施蔬菜创新团队成员。以第一作者或通讯作者发表论文20余篇。