

日光温室前屋面支撑位置对实腹式骨架安全性的影响

齐 飞, 闫冬梅, 魏晓明

(1. 农业农村部规划设计研究院, 北京 100125; 2. 农业农村部农业设施结构工程重点实验室, 北京 100125)

摘 要: 为掌握日光温室前屋面支撑点设置位置对骨架结构安全性的影响规律, 获得最佳支撑点位置设置区域, 该研究以北京地区为例, 选取 8、9、10 m 三种常见跨度的日光温室为研究对象, 依据相关设计规范提出了 3 种跨度日光温室的建筑剖面并确定了荷载作用形式。假定在日光温室前屋面骨架设置一个支撑点, 并且支撑点位置可以沿着前屋面骨架以每隔一段相对固定的距离 (约为 50 cm) 进行变化, 运用 MIDAS-Gen 软件分别计算对应的 49 种支撑工况、255 种荷载组合下温室前屋面骨架的宽厚比、挠度和应力比系数等强度及稳定性指标。计算发现, 在不同支撑工况和荷载组合下, 分别选取 70mm×50mm×2.0 mm、80 mm×60 mm×2.0 mm、90 mm×60 mm×2.0 mm 作为 8、9、10 m 跨日光温室的实腹式主拱架截面, 对应的拱杆宽厚比为 33、38、43, 挠度值最大为 15.13、14.69、18.5mm, 均满足规范要求。温室前屋面支撑点位置变化对骨架安全性产生显著的影响, 挠度变形、应力比系数随支撑点位置的变化规律均呈现出“孤峰型”曲线特征, 且 3 种跨度温室的曲线规律基本一致, 在峰值附近是最佳的支撑设置区域, 其中 8、9、10 m 跨日光温室相对于前屋面投影的最佳相对支撑位置分别为 51%、72%和 71%, 在此位置区域内增加支撑可降低日光温室拱杆应力, 减小挠度值。研究结果可为指导日光温室应急防灾、实腹式骨架系统研发等提供参考。

关键词: 温室; 设计; 农业; 实腹式骨架; 前屋面支撑

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.022

中图分类号: S26; TU261

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-16-0174-08

齐飞, 闫冬梅, 魏晓明. 日光温室前屋面支撑位置对实腹式骨架安全性的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(16): 174-181. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.022 http://www.tcsae.org

Qi Fei, Yan Dongmei, Wei Xiaoming. Influences of south roof support position change on the skeleton structure safety in solid belly solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(16): 174-181. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.022 http://www.tcsae.org

0 引 言

前屋面骨架是影响日光温室安全性、经济性和采光特性的重要构件。薄壁圆管、方管、几字型钢、椭圆型钢、C 型钢等日光温室前屋面骨架常见截面形式均属实腹式承力结构, 具有造型简洁、加工方便、防腐便利、安装快速等优点。与桁架式结构相比, 单拱实腹式结构存在截面刚度和强度较低的不足, 加之综合骨架遮光和成本的双重限制, 多应用于≤10 m 中小跨度的日光温室。实际生产中, 通常采用跨间增加支撑的措施提高单拱实腹式骨架的承载力和安全性。但增加支撑会影响温室有效空间的使用, 给栽培管理、机械化作业等带来不利影响, 近年来在生产实践中逐渐减少使用^[1]。此外, 虽然种植者普遍喜爱结构简洁的单拱实腹式骨架, 但这种结构形式在跨度适应性、防灾安全性方面的缺陷限制了被采用的比例, 因此需要探索一种创新的临时加固方式, 能够在不影响日光温室操作空间的前提下, 在出现偶然性大载荷、气象灾害等不利工况条件下通过设置临时支撑的方式来保证结构安全性, 再通过智能化管理的手段将结构应力应变反应、气象变化和

支撑机构运行进行实时统筹, 这种思路在温室防灾抗灾过程中经常以手工的方式实现^[2], “适合西北非耕地园艺作物栽培的温室结构与建造技术研究与产业化示范”项目中, 采取了前端临时支撑的方式作为轻简型防灾措施^[3], 取得了较好效果。为实现上述构想, 需要研究骨架在前屋面不同支撑点位上结构强度、稳定性及挠度^[4-5]的变化, 明确影响规律, 为支撑设置的适宜范围提供科学参考。这是一种不改变原有结构体系、甚至减少骨架截面情况下主动防御荷载作用的新思路, 目前国内还没有相关研究报道。为此, 本研究针对典型地区的常用日光温室结构型式, 分析不同支撑点位置变化对前屋面骨架结构安全性的影响, 优化确定最佳支撑范围, 从而为指导日光温室的防灾减灾和开发新型结构系统提供理论参考。

1 日光温室结构方案

1.1 区域选择

中国日光温室的分布范围较广, 从 30°N 到 48°N 均有分布^[6], 但区域地理纬度、年辐射量、年积温量、种植习惯等自然气候、社会经济因素决定了日光温室技术推广的适宜性, 一般来说日光温室发展的核心区在 34°N~43°N 地区^[7-8], 并且这种发展态势呈现较稳定的状况。因此, 本研究选取 40°N 华北区域的北京作为典型地区进行研究。

收稿日期: 2019-02-11 修订日期: 2020-07-07

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0701500)

作者简介: 齐飞, 研究员、总工程师, 主要从事温室结构、设备、材料和产业发展方面的研究。Email: qf2008@188.com

1.2 剖面设计

日光温室剖面设计对结构强度、稳定性、室内环境影响很大。在剖面的建筑形式上，虽然部分地区采取了无后坡的形式^[9-12]，但有后坡的形式依然是主流^[13-15]，因此本研究采用有后坡的建筑形式，结合典型区域内日光温室的实际建筑形式和最新的行业标准、优化方法确定主要建筑参数，主要包含：

1) 跨度 L 。日光温室跨度是指后墙内侧至前屋面骨架底部外侧的距离^[16]，包含保温后屋面投影和采光前屋面投影 2 部分。本研究选取的典型温室，采用 8、9、10m 3 种常见温室跨度。

2) 前屋面角 θ 。指屋脊与温室前脚的连线与水平面的夹角，是影响日光温室采光的最重要的设计参数^[17]，主要受温室建设地的地理纬度影响。目前，主要是以保证冬至日正午前后 4h 内（10:00-14:00）太阳光对温室前屋面透过后的辐射照度衰减不超过 2%（即入射角不超过 43°）为依据来确定日光温室的前屋面角^[18-19]。

3) 后屋面角 α 。指后坡与水平面的夹角。

4) 前屋面跨度 l 。指前坡在水平面的投影。

5) 后屋面水平投影 l_1 。指后坡在水平面的投影。

6) 后墙高度 H_1 。指后墙内侧与后屋面交线到室内地坪标高之间的距离。

7) 脊高 H 。屋脊到温室内地坪的垂直距离。

1.3 剖面尺寸

利用农业行业标准《日光温室设计规范》^[20]及魏晓明等^[21]提出的日光温室总体尺寸确定方法，确定北京地区日光温室剖面参数取值如表 1 所示。图 1 为日光温室剖面尺寸示意图。

表 1 北京地区日光温室剖面参数取值

Table 1 Parameter selection of solar greenhouse profile in Beijing

跨度 Span L/m	前屋面角 South roof angle $\theta/(^\circ)$	后屋面角 North roof angle $\alpha/(^\circ)$	前屋面 跨度 Span of South roof l/m	后屋面 水平投影 North roof horizontal projection l_1/m	后墙高 North wall height H_1/m	脊高 Height H/m
8			6.8	1.2	2.8	4.0
9	30.6	45	7.6	1.4	3.1	4.5
10			8.5	1.5	3.5	5.0

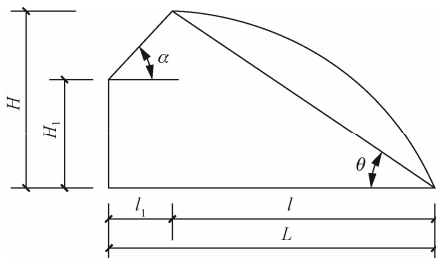


图 1 日光温室剖面示意图

Fig.1 The sectional diagram of solar greenhouse

1.4 屋面结构

日光温室屋面体系按照传力方式分为无檩体系和有檩体系，无檩体系是指屋面荷载直接以线荷载的形式由覆盖材料传递到主拱架的结构体系，横向构件只作为支撑，而非传力构件；有檩体系是指屋面荷载先传递给檩

条、再由檩条以集中荷载的形式传递给主拱架的结构体系。本研究采用最常见的无檩体系作为屋面结构^[22-23]。在日光温室中，前屋面主拱架间距通常为 0.8~1.2 m，以 0.1 m 为模数，本研究中取最常见的 1.0 m。

本研究主要为了获得日光温室前屋面骨架支撑点位置变化对主拱架安全性的影响规律。在保证日光温室骨架截面不破坏的前提下，骨架截面形状和尺寸变化对这一规律的影响很小。因此，为便于计算，采用平面内刚度较大的矩形管作为主拱架，纵向支撑采用圆管。在满足结构设计要求的前提下，8、9、10 m 跨度分别选取 70mm×50mm ×2.0mm、80mm×60mm×2.0mm、90mm × 60mm×2.0mm 的截面作为主拱架，纵向支撑均采用圆管 25mm×1.5mm，间距 2.0 m。构件材料选取普通碳素结构钢 Q235B，设计强度 205 N/mm²^[24]。

2 日光温室荷载取值与组合方式

荷载取值采用国家标准《农业温室结构荷载规范》GB/T51183—2016^[24]，设计使用年限按照 10a 考虑。永久荷载主要包括骨架和永久性设备产生的永久荷载。可变荷载主要包括作物荷载、雪荷载、风荷载、屋面活荷载，由于日光温室使用年限较短、内部装备较少、跨度小，相对连栋温室等高安装精度的结构形式，日光温室对变形的要求较低，因此不考虑温度、地震和安装荷载。

2.1 永久荷载

日光温室永久荷载主要包括主拱架、水平系杆自重，前屋面薄膜自重和后坡屋面自重。在跨度变化的情况下是个变数，通常需要经过多次试算迭代取得结果。本研究前文中设定了截面，其质量通过设计软件自动计算。纵向支撑单位质量 0.87 kg/m，固定设备其自重应根据设计尺寸或咨询设备供应商确定，温室内固定设备荷载尚未确定时，可取 0.07 kN/m² 的竖向均布荷载^[24]。后屋面采用 100 mm 厚金属夹芯板，恒载取 0.30 kN/m²。

2.2 可变荷载

1) 作物荷载。因暂未确定吊挂方式，可按单位面积荷载计算^[24]，取 0.15 kN/m²。

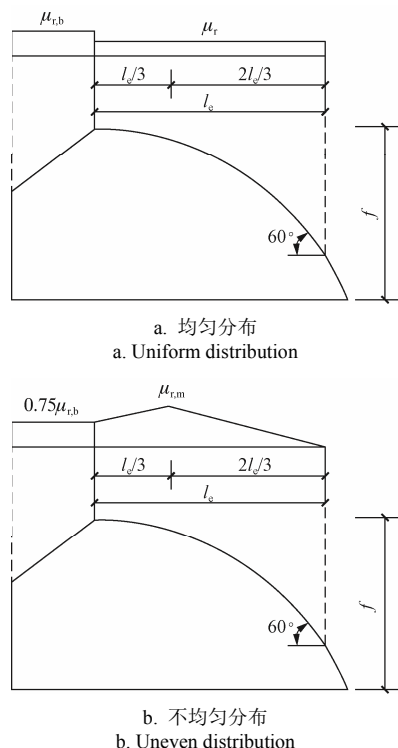
2) 雪荷载。日光温室是典型中国特色的设施类型，其雪荷载特点与传统加温温室不同，这方面的研究也仅限于国内^[25-28]。本文选取北京地区 10 a 雪荷载^[24]，基本雪压为 0.25 kN/m²。屋面水平投影上的雪荷载标准值按照式（1）计算。

$$S_k = \mu_r C_t S_0 \quad (1)$$

式中， S_k 为雪荷载标准值，kN/m²； μ_r 为屋面积雪分布系数，取值参见图 2，其中均匀分布工况下， $\mu_{r,b}$ 为后屋面积雪分布系数，按照式（2）计算，经计算，取值为 0.48； μ_r 为前屋面积雪分布系数，按照式（3）计算，经计算取值为 0.43；不均匀分布工况下， $\mu_{r,m}$ 为按照覆盖保温工况下前屋面积雪分布系数，取最大值 2.0； C_t 为加热影响系数，针对日光温室取 1.0； S_0 为基本雪压，kN/m²。

$$\mu_{r,b} = 0.8 (60^\circ - \alpha) / 30^\circ \quad (2)$$

$$\mu_r = 2l / (8f) \quad (3)$$



注: 图中 l_e 为前屋面与水平方向夹角为 60° 时, 至屋脊位置的水平跨度, mm; f 为前屋面矢高, mm; 均匀分布工况下, $\mu_{r,b}$ 为后屋面积雪分布系数, μ_r 为前屋面积雪分布系数; 不均匀分布工况下, $\mu_{r,m}$ 为按照覆盖保温工况下前屋面积雪分布系数。

Note: In the figure, l_e is the horizontal span from the front roof to the ridge when the included angle between the front roof and the horizontal direction is 60° , unit is mm; f is the rise height of the front roof, unit is mm; under the condition of uniform distribution, $\mu_{r,b}$ is the distribution coefficient of snow in the rear roof area, and μ_r is the distribution coefficient of snow in the front roof area; Under the condition of non-uniform distribution, $\mu_{r,m}$ is the snow distribution coefficient of the front roof area under the condition of covering and insulation.

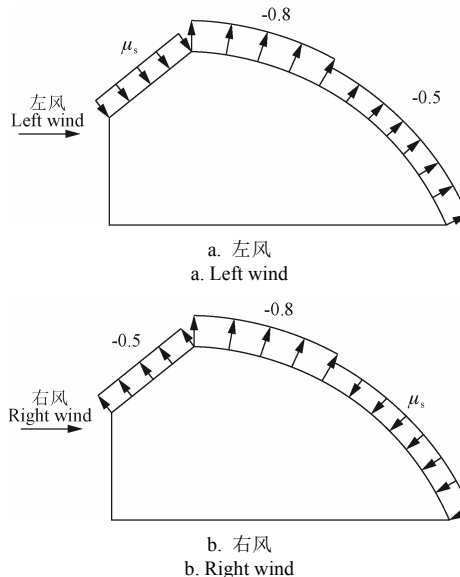
图2 日光温室雪荷载分布系数图

Fig.2 The diagram of snow load shape coefficient of solar greenhouse

3) 风荷载。风荷载也是造成日光温室失效的主要作用之一。由于日光温室外覆盖材料和骨架是非机械性连接, 而是通过压膜线将薄膜敷设在骨架上, 因此实际传力特征较为复杂^[29], 表面可能出现零压区^[30]和风压曲线分布。目前包括日光温室在内的薄膜类温室风荷载研究主要集中在体型系数^[31]、风压标准值计算方法^[32-37]等, 而在屋面负压工况下, 薄膜与骨架分离后的传力规律还没有工程应用层面的研究成果, 因此综合考虑世界各国在塑料大棚、塑料连栋温室设计的实践经验, 不考虑日光温室薄膜张拉刚化效应对温室结构整体抗风承载力提高影响^[38], 直接采用国家标准 GB/T51183—2016 的方法, 选取北京地区 10a 风荷载, 基本风压为 0.37 kN/m^2 。风荷载标准值按照式 (4) 计算。

$$w_k = \mu_s \mu_z w_0 \quad (4)$$

式中 w_k 为风荷载标准值, kN/m^2 ; μ_s 为风荷载体型系数; μ_z 为风压高度变化系数; w_0 为基本风压, kN/m^2 。其中, 风压高度变化系数 μ_z 按规范中地面粗糙度 B 类取值, 3 种跨度取值依次为 0.76、0.79、0.81; μ_s 为风荷载体型系数, 0° 风方向左风与右风的风荷载体型系数参见图 3, 左风的 μ_s 取值 0.4, 右风的 μ_s 取值为 0.33; 90° 风方向所有受载表面的体型系数 μ_s 均取 -0.3。



注: 图中 μ_s 为风荷载体型系数; -0.8、-0.5 为图中标注区域的风荷载体型系数。
Note: In the figure, μ_s is the shape coefficient of wind load; -0.8 and -0.5 is the wind load shape factor in the area marked in the figure.

图3 日光温室 0° 风方向体型系数分布图

Fig.3 The diagram of shape coefficient of 0° of solar greenhouse

4) 屋面活荷载。

由于日光温室内部悬挂式作业装备很少, 灯具和植保设备分布较分散并且质量较小, 因此屋面活荷载主要考虑保温被的荷载作用, 按照展开时前屋面均布荷载和收起时后屋脊处集中荷载考虑。根据国家标准 GB/T51183—2016 要求, 荷载按照针刺毡保温被、潮湿状态下的重力 0.03 kN/m^2 考虑。

2.3 荷载组合

结合前文分析, 日光温室荷载主要包括均布永久荷载 (简称 G , 余同), 均布作物荷载 ($C1$)、均布屋面活载 ($LR1$)、集中屋面活载 ($LR2$)、投影方向雪荷载 (S)、 0° 左风荷载 ($W1$)、 0° 右风荷载 ($W2$)、 90° 风荷载 ($W3$)。依据日光温室荷载情况, 主要荷载工况参见表 2, 各组合系数荷载组合采用国家标准《农业温室结构荷载规范》GB/T51183—2016^[24], 经过荷载系数的组合, 基本组合共计约 165 个, 标准组合共计约 90 个。

表2 荷载工况表

Table 2 Load combination table

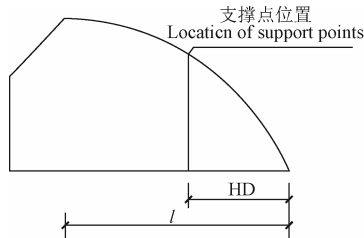
编号 No.	荷载工况 Load combination	编号 No.	荷载工况 Load combination
1	$G+C1+LR1$	9	$G+C1+LR1+W3$
2	$G+C1+LR2$	10	$G+C1+LR2+W1$
3	$G+C1+LR1+S$	11	$G+C1+LR2+W2$
4	$G+W1$	12	$G+C1+LR2+W3$
5	$G+W2$	13	$G+C1+LR1+S+W1$
6	$G+W3$	14	$G+C1+LR1+S+W2$
7	$G+C1+LR1+W1$	15	$G+C1+LR1+S+W3$
8	$G+C1+LR1+W2$		

3 计算模型及分析方法

3.1 总体思路

在日光温室前屋面骨架设置支撑点, 并且支撑点从

前屋面底脚处开始，沿着前屋面骨架向屋脊处滑动设置，如图 4 所示。水平距离 HD (Horizontal distance) 为支撑设置位置，水平距离 HD 按照每次滑动距离 $\leq 50\text{ cm}$ 进行支撑位置变动，直到移动到屋脊处结束。支撑与拱架连接形式为铰接，仅约束竖向位移，可水平移动。铰接构造方式可根据支撑构件的特性采用多种方式，本文不做具体研究。RD (Relative Distance) 表示支撑点的相对距离，即 HD 与前屋面跨度 l 的比值 (%)。



注：图中 HD 为支撑位置与前屋面底部的水平距离。
Note: In the figure, HD is the horizontal distance between the supporting position and the bottom of the front roof.

图 4 日光温室支撑点位置示意图

Fig.4 The diagram of support points setting for solar greenhouse

结合 8、9、10 m 跨日光温室前屋面长度，设置不同位置的支撑点，每个位置的支撑点为一种工况。8 m 跨度中设置 15 个支撑点位置，9 m 跨度中设置 16 个支撑点位置，10 m 跨度中设置 18 个支撑点位置，如表 3 所示。对各位置支撑工况下的日光温室骨架进行结构分析，计算日光温室骨架的宽厚比、挠度、强度及稳定性，在满足结构安全的前提下，分析支撑点变化对骨架安全性的影响规律。

表 3 8、9、10 m 跨日光温室设置支撑点位置

Table 3 Location of supporting points for 8 m, 9 m and 10 m span solar greenhouse

序号 No.	8 m		9 m		10 m	
	水平距离 Horizontal Distance (HD)/mm	相对距离 Relative Distance (RD)/ %	水平距离 Horizontal Distance (HD)/mm	相对距离 Relative Distance (RD)/ %	水平距离 Horizontal Distance (HD)/mm	相对距离 Relative Distance (RD)/ %
1	0.00	0	0.00	0	0.00	0
2	0.50	7	0.50	7	0.50	6
3	1.00	15	1.00	13	1.00	12
4	1.50	22	1.50	20	1.50	18
5	2.00	29	2.00	26	2.00	24
6	2.50	37	2.50	33	2.50	29
7	3.00	44	3.00	39	3.00	35
8	3.50	51	3.50	46	3.50	41
9	4.00	59	4.00	53	4.00	47
10	4.50	66	4.50	59	4.50	53
11	5.00	74	5.00	66	5.00	59
12	5.50	81	5.50	72	5.50	65
13	6.00	88	6.00	79	6.00	71
14	6.50	96	6.50	86	6.50	76
15	6.80	100	7.00	92	7.00	82
16			7.60	100	7.50	88
17					8.00	94
18					8.50	100

3.2 计算软件

目前针对日光温室的专用结构计算软件主要有 PKPM 软件中针对温室结构设计的 GSCAD 模块、盈建科软件空间结构的温室设计模块，但在实际应用中均存在诸多不足。如 PKPM 软件中日光温室的开间、跨度等为固定尺寸，不能根据实际进行更改，且对日光温室的模型分析为二维结构模型建模，无法实际模拟纵向系杆等对日光温室的作用，造成分析结果与实际不符。盈建科软件空间结构中日光温室可按照三维结构模型进行建模，但不能较好的模拟支撑位置的变化等。

本文计算采用 MIDAS-Gen 有限元分析设计软件，此软件适用范围广泛，应用于工业建筑、民用建筑、地下工程以及大跨度钢结构等方面的分析与设计^[38-42]。MIDAS-Gen 软件与上面两个软件相比，可以进行三维建模分析，充分考虑纵向系杆等对日光温室结构的实际作用，对日光温室的开间、跨度、高度等可灵活设计，可以使建立的模型与实际相符，使分析结果更加真实可靠。

3.3 计算参数

1) 结构杆件

日光温室拱架在 MIDAS-Gen 采用梁单元形式进行设计，采用直线单元拟合成圆弧线段。

2) 支座形式

单拱实腹式拱架与前柱脚的联接通常有铰接和固接 2 种形式；与后墙连接则大多采用固接形式，如通过浇筑圈梁将拱架与支座锚固。为便于计算，本研究采用“上下固接”支座条件进行计算。

3.4 指标分析

在上述不同位置的支撑情况下，采用 MIDAS-Gen 软件计算 8、9、10 m 跨度日光温室在表 3 中所列荷载工况条件下拱杆的宽厚比、挠度及应力比系数等强度及稳定性指标。

1) 宽厚比

日光温室钢结构构件宽厚比应符合国家标准^[4]中 4.3 构造要求的规定，方钢管的宽厚比限值为 45。

2) 挠度

结构构件计算还应按正常使用极限状态设计时，采用荷载效应的标准组合计算挠度变形，按照文献^[5]变形的规定，受弯构件竖向挠度 δ 限值为 $[L/250, 30\text{ mm}]$ ，两者取较小值。

3) 应力比系数

按照现行国家标准《农业温室结构荷载规范》GB/T51183—2016^[24]的规定，采用荷载效应基本组合，计算荷载效应组合的下温室钢骨架的最大应力值 S_d ，温室钢骨架未设置支撑时结构构件的最大应力值 S_{dm} 与设置支撑时的 S_{dn} 比较，分别获得各个位置的支撑的应力比系数 SF，按式 (5) 计算。

$$SF = S_{dm}/S_{dn} \quad (5)$$

式中 S_{dm} 为未设置支撑时结构构件的最大应力值， N/mm^2 ； S_{dn} 为设置支撑时结构构件的最大应力值， N/mm^2 。

4 结果与分析

4.1 整体结构安全性

通过计算, 3 种跨度日光温室的宽厚比、长细比和挠度最大值如表 4 所示。可以看出, 在不同支撑工况和荷载组合下, 选取 70mm×50mm×2.0mm、80mm×60mm×2.0mm、90mm×60mm×2.0mm 作为 8、9、10 m 跨日光温室的实腹式主拱架截面尺寸, 拱架结构的宽厚比和挠度最大值指标均满足规范要求。

4.2 支撑位置变化对挠度的影响

日光温室前屋面支撑设置的相对距离与挠度的变化关系如图 5 所示, 可以看出 3 种跨度下的变化曲线基本相似, 即针对不同跨度的日光温室, 支撑相对距离 RD 对挠度的影响规律相对一致。当支撑点由前屋面底脚处移动到 RD 约 30% 位置, 拱架挠度变化幅度较细微; 当 RD 由 30% 移动到屋脊位置这段过程, 拱架挠度变化幅度较大, 呈先

降低后增加的趋势, 针对 8、9、10 m 3 种跨度情况, 最小挠度值分别出现在 RD 为 51%、66% 和 59% 的位置, 即当支撑点设置在上述位置, 对应前屋面拱架挠度变形最小。最小挠度值依次为 6.08、5.33 和 7.33mm, 与 3 种跨度未设置支撑时的挠度值相比, 挠度值可减少约 59%、63% 和 60%, 即设置支撑时可有效减小挠度值。

表 4 前屋面拱架结构宽厚比、长细比、挠度最大值计算结果
Table 4 Result of width-to-thickness ratio, slenderness ratio and maximum deflection for solar greenhouse south roof structure

跨度 Span L/m	宽厚比 Width-to-thickness ratios		挠度 Deflection/mm	
	计算值 Calculated	规范要求 Specification requirements	计算最大值 Maximum calculation	规范要求 Specification requirements
8	33		15.13	
9	38	<45	14.69	≤30
10	43		18.5	

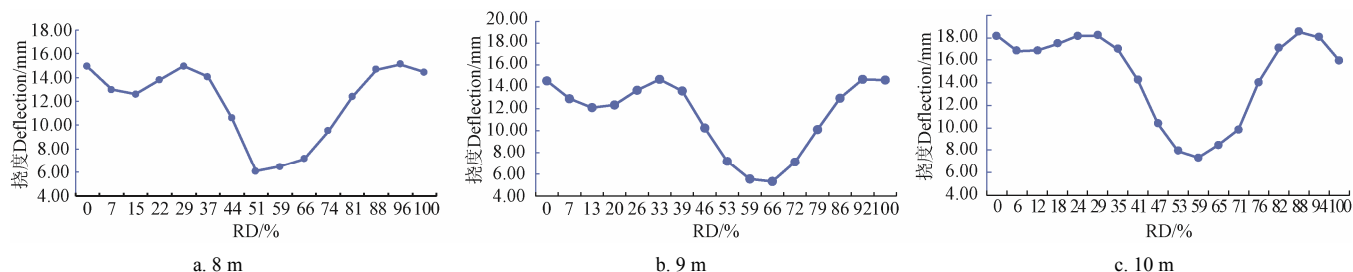


图 5 8、9、10 m 跨日光温室支撑相对距离 (RD) 与挠度关系图

Fig.5 Diagram of relative support distance (RD) and deflection of 8、9、10 m span solar greenhouse

4.3 支撑位置变化对应力比系数的影响

3 种跨度日光温室的支撑相对距离与应力比系数的变化关系如图 6 所示。与挠度变化相似, 3 种跨度下的变化曲线基本一致。支撑点位置变化对骨架安全性产生显著影响, 在应力比系数分布上, 随着支撑点

与前屋面距离的增加, 呈现明显的由低到高、由高到低的“孤峰”型分布特征, 针对 8、9、10 m 3 种跨度情况, 最大应力比系数分别出现在 RD 为 51%、72% 和 71% 的位置, 即上述位置范围是支撑点设置的最佳区域。

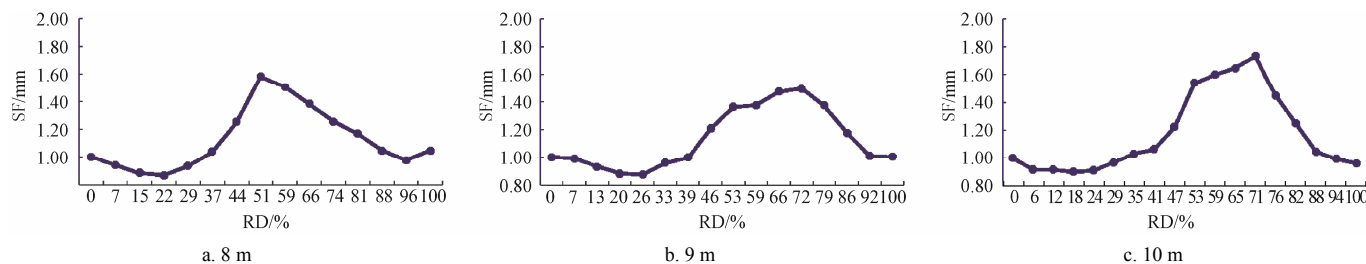


图 6 8、9、10 m 跨日光温室支撑相对距离 (RD) 与应力比系数 (SF) 关系图

Fig.6 The relationship between relative distance and safety factor of 8、9、10 m span solar greenhouse

5 结论

以实腹式日光温室骨架为研究对象, 针对北京地区, 跨度为 8、9、10 m 的 3 种常见日光温室剖面型式, 分别计算出 255 种荷载组合下, 在日光温室前屋面不同位置处设置支撑点对骨架强度及稳定性的影响, 形成如下结论:

1) 通过在日光温室前屋面适宜位置设置永久性支撑或临时支撑, 可有效减少拱架挠度变形量, 最大可减少约 63%, 显著提高骨架的结构安全性;

2) 针对 8、9、10 m 跨度的日光温室, 最小挠度值

及最大应力比系数均在相对距离 (RD) 为 51%、66% 和 59% 的位置, 支撑相对距离对挠度变形及应力比系数的影响规律基本一致;

3) 提高骨架结构安全性影响最大的支撑点设置最佳相对前屋面距离为 51%~72%。

受日光温室内部空间功能布局影响, 研究结果在实际应用中还存在支撑点设置偏离最佳范围的可能。另外, 在支撑构件的截面选择、支撑构件与上部骨架和地面的铰接构造方式等方面还需另题研究。在 1 个以上支撑点情况下骨架安全性的变化规律也有待研究深化。

[参 考 文 献]

- [1] 张纪涛, 林琚, 闫万丽, 等. 山西省日光温室结构问题的调查研究[J]. 中国蔬菜, 2013, 1(4): 90-94.
Zhang Jitao, Lin Lu, Yan Wanli, et al. Investigation and studies on structure of solar greenhouse in Shanxi province[J]. China Vegetables, 2013, 1(4): 90-94. (in Chinese with English abstract)
- [2] 刘蕾. 异常灾害天气日光温室防灾减灾技术[J]. 现代农业, 2014(9): 23-24.
- [3] 齐飞, 蔡峰, 潘守江. 一种日光温室用轻简化钢骨架结构: CN106034838A[P]. 2016-10-26.
- [4] 中华人民共和国建设部. 冷弯薄壁型钢结构技术规范: GB 50018—2002[S]. 北京, 中国建筑工业出版社, 2002.
- [5] 欧洲标准学会. 暖房. 设计和建造. 第 1 部分: 商用生产暖房: EN 13031-1-2001[S]. 2003.
- [6] 张纪增. 日光温室栽培区的划分[J]. 农业工程技术: 温室园艺, 1991(3): 12.
- [7] 张明洁, 赵艳霞. 北方地区日光温室气候适宜性区划方法[J]. 应用气象学报, 2013, 24(3): 278-286.
Zhang Mingjie, Zhao Yanxia. The climate suitability zoning method of the solar greenhouse in the northern of China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2013, 24(3): 278-286. (in Chinese with English abstract)
- [8] 农业部种植业管理司. 日光温室发展的适宜地区及优型结构参数[J]. 农业工程技术 (温室园艺), 2014(9): 18-19.
- [9] 胡永军, 潘子龙, 赵志伟, 等. 寿光下挖式日光温室建造中的误区与对策[J]. 中国蔬菜, 2013(7): 41-43.
- [10] 韩太利, 魏家鹏. 寿光新型日光温室的结构特点与推广应用[J]. 中国蔬菜, 2010(13): 7-9.
- [11] 火玉洁, 张成荣, 李桃, 等. 日光温室优化设计原理及标准建立研究[J]. 山西农业科学, 2014, 42(1): 69-73.
Huo Yujie, Zhang Chengrong, Li Tao, et al. Principle of solar greenhouse optimization design and standard establishment[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2014, 42(1): 69-73. (in Chinese with English abstract)
- [12] 罗建华, 吴慧, 高杰. 后屋面对日光温室温度变化的影响[J]. 新疆农业科学, 2012(10): 1852-1858.
Luo Jianhua, Wu Hui, Gao Jie, et al. The influence of back roof on greenhouse temperature[J]. Xinjiang Agricultural Science, 2012(10): 1852-1858. (in Chinese with English abstract)
- [13] 佟国红, 李宝筏. 日光温室建筑参数的多目标模糊优选[J]. 农业机械学报, 2005, 36(7): 108-110.
Tong Guohong, Li Baofa. Multi-objective fuzzy optimization of building parameters of solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(7): 108-110. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王军伟, 王健, 孙锦, 等. 苏北日光温室构型及其结构参数[J]. 中国蔬菜, 2012(18): 89-98.
Wang Junwei, Wang Jian, Sun Jin, et al. Structure configuration and parameters of solar greenhouse in Northern Jiangsu province[J]. China Vegetables, 2012(18): 89-98. (in Chinese with English abstract)
- [15] 史慧锋, 王晓冬, 邹平, 等. 西北抗寒冷生产型日光温室结构参数的优化设计—以新疆吐鲁番市日光温室建造为例[J]. 农机化研究, 2009(5): 122-124.
Shi Huifeng, Wang Xiaodong, Zou Ping, et al. Optimization design of northwest Anti-cold production in sunlight greenhouse structural parameters[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009(5): 122-124. (in Chinese with English abstract)
- [16] 中华人民共和国农业部. NY/T 3024-2016 日光温室建设标准[S]. 北京, 中国农业出版社, 2016.
- [17] 刘志杰, 郑文刚, 胡清华, 等. 中国日光温室结构优化研究现状及发展趋势[J]. 中国农学通报, 2007, 23(2): 449-453.
Liu Zhijie, Zheng Wengang, Hu Qinghua, et al. Current situation and development on structure optimization of solar greenhouse in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(2): 449-453. (in Chinese with English abstract)
- [18] 齐飞, 魏晓明, 金新文. 南疆生产建设兵团日光温室建造中的主要技术问题调查分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(23): 199-206.
Qi Fei, Wei Xiaoming, Jin Xinwen. Investigation and analysis of main technical problems during construction of solar greenhouse in South Xinjiang by Xinjiang production and construction corps[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(23): 199-206. (in Chinese with English abstract)
- [19] 白青华, 马红勇, 殷雪莲, 等. 低温期不同结构日光温室温度变化及其对樱桃番茄生长的影响[J]. 北方园艺, 2013(22): 59-62.
Bai Qinghua, Ma Hongyong, Yin Xuelian, et al. Temperature changes in solar greenhouse with different structures in the low temperature period and its effect on growth of cherry tomatoes[J]. Northern Horticulture, 2013(22): 59-62. (in Chinese with English abstract)
- [20] 中华人民共和国农业部. NY/T 3223-2018 日光温室设计规范[S]. 中国农业出版社, 2018.
- [21] 魏晓明, 周长吉, 曹楠, 等. 基于光照的日光温室总体尺寸确定方法研究[J]. 北方园艺, 2010(15): 1-5.
Wei Xiaoming, Zhou Changji, Cao Nan, et al. Design method for solar greenhouse outlines based on illumination conditions[J]. Northern Horticulture, 2010(15): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [22] 白义奎, 王鸿, 王铁良, 等. 新型钢骨架结构日光温室设计与测试[J]. 沈阳农业大学学报, 2013(5): 542-547.
Bai Yikui, Wang Hong, Wang Tieliang, et al. Design and test of new steel frame solar greenhouse[J]. Journal of Shenyang

- Agricultural University, 2013(5): 542-547. (in Chinese with English abstract)
- [23] 翟莲, 刘东辉, 宋述尧, 等. 吉林省日光温室钢骨架的受力性能研究[J]. 农机化研究, 2011(8): 31-34.
- Zhai Lian, Liu Donghui, Song Shuyao, et al. The mechanic performance research on the steel frame of greenhouse in Jilin Province[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011(8): 31-34. (in Chinese with English abstract)
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 51183-2016 农业温室结构荷载规范[S]. 北京, 中国计划出版社, 2016.
- [25] 孙德发, 苗香雯, 崔绍荣. 连栋塑料温室雪荷载取值的分析[J]. 农机化研究, 2001(1): 41-42.
- [26] 罗新兰, 于红, 黎贞发, 等. 辽宁省日光温室雪荷载分布[J]. 中国农学通报, 2012, 28(5): 295-299.
- Luo Xinlan, Yu Hong, Li Zhenfa, et al. The distribution of snow load above solar energy greenhouse in Liaoning Province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(5): 295-299. (in Chinese with English abstract)
- [27] 马月虹, 刘霞, 马彩雯, 等. 新疆北疆日光温室风雪荷载的计算分析[J]. 新疆农业科学, 2014(6): 1044-1052.
- Ma Yuehong, Liu Xia, Ma Caiwen, et al. Numerical analysis of wind-snow load of sunlight greenhouse in Northern Xinjiang[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2014(6): 1044-1052. (in Chinese with English abstract)
- [28] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(3): 158-162. (in Chinese with English abstract)
- [29] 梁宗敏. 连栋温室结构抗风可靠度设计理论研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- Liang Zongmin. Design Theory on Wind-resistance Reliability of Structure for Multi-span Greenhouses[D]. Beijing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [30] 杨再强, 张波, 薛晓萍, 等. 设施塑料大棚风洞试验及风压分布规律[J]. 生态学报, 2012, 32(24): 7730-7737.
- Yang Zaiqiang, Zhang Bo, Xue Xiaoping, et al. The wind tunnel test of plastic greenhouse and its surface wind pressure patterns[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(24): 7730-7737. (in Chinese with English abstract)
- [31] 宫婉婷, 梁宗敏. 新型日光温室表面风压的数值模拟[C]. // 北京力学学会第 17 届学术年会: 北京, 2011.
- [32] 张淑杰, 孙立德, 马成芝, 等. 东北日光温室最大风荷载特征及风灾预警指标研究[J]. 资源科学, 2015, 37(1): 211-218.
- Zhang Shujie, Sun Lide, Ma Chengzhi, et al. Analysis of maximum wind load characteristics and gale disaster early warning index on greenhouse in Northeastern China[J]. Resources Science, 2015, 37(1): 211-218. (in Chinese with English abstract)
- [33] 王东霞, 蒋秀根, 杨洪良. 基于统一保证概率的温室结构风雪荷载标准值取值研究[C]. // 第二届全国土木工程研究生学术论坛论文集: 上海, 2004.
- [34] 王笃利, 陈青云, 曲梅. 温室基本风压取值方法探讨[J]. 农业工程学报, 2005, 21(11): 179-182.
- Wang Duli, Chen Qingyun, Qu Mei. Method for calculating basic wind pressure of greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(11): 179-182. (in Chinese with English abstract)
- [35] 孙德发. 连栋温室结构设计中风荷载取值方法初探[J]. 农机化研究, 2004(4): 78-80.
- Sun Defa. A preliminary study on calculating of wind load for multi-span greenhouse structural design[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2004(4): 78-80. (in Chinese with English abstract)
- [36] 王健, 丁为民, 武燕飞. 互插式连栋塑料温室屋面风压分布的风洞试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 230-234.
- Wang Jian, Ding Weimin, Wu Yanfei. Wind tunnel test of wind pressure distribution on mutual insert multi-greenhouse roof[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(1): 230-234. (in Chinese with English abstract)
- [37] 张连永, 李进京, 孙新年. 华东连栋塑料温室结构设计风荷载研究[J]. 农机化研究, 2008(1): 62-65.
- Zhang Lianying, Li Jinjing, Sun Xinnian. Research of multi span plastic greenhouse structure design loading of east China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008(1): 62-65. (in Chinese with English abstract)
- [38] 丁敏, 施旭栋, 李密密, 等. 薄膜承载力及其对日光温室结构稳定性性能的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12): 194-202.
- Ding Min, Shi Xudong, Li Mimi, et al. Load-bearing capacity of films and its effect on structure stability of Chinese solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(12): 194-202. (in Chinese with English abstract)
- [39] 钟远志. Midas Gen 和 ETABS 有限元软件在建筑结构整体分析中的应用[J]. 福建建材, 2018(8): 7-8, 64.
- [40] 张艳辉. 长细钢柱计算长度系数确定方法及应用[J]. 中国住宅设施, 2019(5): 30-31+43.
- [41] 姚正源. MIDAS/Gen 在空间钢结构设计中的应用[J]. 建筑结构, 2017, 47(S1): 741-743.
- [42] 姜玉挺, 陈志华, 刘红波, 等. 滨海文化中心图书馆大跨连体结构温度效应研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(11): 25-28.

Influences of south roof support position change on the skeleton structure safety in solid belly solar greenhouse

Qi Fei, Yan Dongmei, Wei Xiaoming

(1. Academy of Agricultural Planning and Engineering, MARA, Beijing 100125, China; 2. Key Laboratory of Farm Building in Structure and Construction, MARA, Beijing 100125, China)

Abstract: Structure of solid-belly skeleton is commonly used for the solar greenhouses with light loading or narrow span due to the small section stiffness. Generally, a suitable support can be set at a certain position of south roof in a solar greenhouse, aiming to provide an economically feasible technical solution to the improvement on the safety of entire skeleton system. In this study, three types of solar greenhouse with a common span in Beijing were selected as research examples, and then to calculate the section parameter of greenhouses and the loading form, according to greenhouse design code. The main purpose of this study is to determine the impact of setting position for south roof support point on the framework safety, and thereby to obtain the optimal setting region of support point. Prior to the calculation, it needed to assume that a support point was set on the south roof skeleton of a solar greenhouse, and the position of support point can be changed along the south roof skeleton at a relatively fixed distance (about 50cm). A Midas Gen software was then used to calculate the width-to-thickness ratio, deflection, and safety factor of south roof skeleton in the solar greenhouse under 49 supporting conditions, and 255 load combinations. The results of south roof skeleton for the 8, 9, 10 m span solar greenhouse were the width-to-thickness ratios of 33, 38, 43, and the maximum deflection of 15.13mm, 14.69mm, 18.5mm, under different supporting conditions and load combinations, for the section size as 70×50×2.0, 80×60×2.0, 90×60×2.0, respectively. Compared with the greenhouse design codes, all obtained data demonstrated that the skeleton structure can meet the required level of safety and stability, as the support position of south roof changed in this case. Based on the above analysis of deflection deformation and safety factor on the south roof skeleton with different support positions, it was founded that the change of support positions can make a significant impact on the safety of a south roof skeleton in a greenhouse. A feature of *isolated peak* curve can be used to describe the variation of deflection deformation and safety factor with the position of support points. Furthermore, the curve laws were basically consistent for three kinds of span greenhouse. Specifically, the arch deflection changed slightly, when the support point shifted from the foot to about 30% span of south roof. When the support point moved from 30% span to the ridge position, the arch deflection changed greatly, showing a trend of first decreasing and then increasing. The minimum deflection occurred, when the position of support point were set at 51%, 66%, and 59% of south roof for the 8, 9, 10 m span solar greenhouse, respectively. In a safety factor, the maximum appeared, when the position of support point were set at 51%, 72% and 71% of south roof for the 8, 9, 10m span solar greenhouse, respectively. The main conclusions can be obtained as follow: (1) By setting permanent support or temporary support at appropriate position on the south roof of solar greenhouse, the deflection deformation of arch frame can be effectively reduced, and the structural safety of framework can be significantly improved; (2) In the 8, 9, 10 m span solar greenhouse, the influence of relative support distance on deflection deformation and safety factor can be basically consistent; (3) The optimal support setting region was on the 51%-72% of the south roof in a greenhouse. The findings can provide a sound theoretical guidance to develop a novel solid-belly skeleton system, and thereby to effectively prevent some damage to solar greenhouse.

Keywords: greenhouse; design; agriculture; solid belly skeleton; south roof support