

# 后屋面水平投影长度对日光温室性能的研究

郭艳玲<sup>1</sup>, 李石<sup>1\*</sup>, 陈国辉<sup>1,2</sup>

(1. 东北林业大学机电工程学院, 黑龙江哈尔滨 150040; 2. 黑龙江科技大学机械工程学院, 黑龙江哈尔滨 150080)

**摘要** 为了研究后屋面水平投影长度对节能型日光温室性能的影响, 以北方高纬度日光温室为研究对象, 分析了哈尔滨日光温室合理的前屋面角。在确保日光温室采光性能的基础上, 应用 ANSYS 有限元软件对温室结构进行了三维分析, 讨论了后屋面水平投影长度对日光温室结构安全性能的影响。结果表明, 对于北方高纬度地区常用的脊跨比为 1:2 的日光温室, 当后屋面水平投影长与脊高之比为 24%~25% 时, 日光温室结构比较合理。前屋面角大于哈尔滨最小前屋面角 29.2°, 有利于日光温室的采光和积雪的滑落, 钢结构承载能力比较好, 是适合课题组即将建设的北方高纬度地区的日光温室结构。

**关键词** 后屋面水平投影; 日光温室; ANSYS; 高纬度地区

**中图分类号** S625 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2014)05-01555-03

## Different Roof Horizontal Projection Length on the Performance of Greenhouse

GUO Yan-ling, LI Shi et al (College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040)

**Abstract** In order to study the effects of the horizontal projection length of the roof on the energy-saving solar greenhouse performance, with the greenhouse in the northern high latitudes as the study, based on the analysis of the former Harbin reasonable greenhouse roof angle to ensure that greenhouse lighting performance, the three-dimensional analysis was conducted on greenhouse structure with application of ANSYS software, the influence to the structural safety performance of greenhouse were studied. The results show that: for the northern high latitudes common ridge span ratio of 1:2 greenhouse, when the rear horizontal projection of the roof ridge length and height ratio of 24% to 25%, the greenhouse structure is more reasonable. Front roof angle relatively large is conducive to greenhouse lighting and snow fall, while steel has better carrying capacity that is suitable for the construction of a greenhouse in northern high latitudes area.

**Key words** Roof horizontal projection; Solar greenhouse; ANSYS finite element; High latitude region

目前已建造的日光温室, 主要还是凭借以往的建造经验来确定后屋面水平投影的长度。传统的温室设计, 后屋面水平投影一般取其跨度长的 20%~30%<sup>[1]</sup>。由于缺少这方面的科学研究, 各地区在建设日光温室时, 对该值的取值一直都有争议。日光温室后屋面水平投影的长短, 直接影响日光温室的采光性能和内部的保温性能<sup>[2]</sup>。在一定条件下, 日光温室后屋面水平投影越长, 日光温室的保温性能越好, 但当太阳高度角较大时, 就会导致日光温室后屋面遮光, 使日光温室后部出现大面积阴影, 影响栽培作物的生长和发育, 而且日光温室后屋面越长, 日光温室前屋面的采光面将越短, 从而造成内部部分采光不足。当日光温室后屋面短时, 日光温室内部采光非常好, 但是保温性能却大大降低, 造成日光温室白天升温快, 夜间降温也快的问题<sup>[3-4]</sup>。为此, 研究后屋面水平投影长度对日光温室性能的影响, 对日光温室结构参数的标准化有着重要的现实意义。课题组特针对即将在高纬度地区哈尔滨市建造的节能型日光温室进行了前期模拟与分析, 考虑了哈尔滨地区独特的地理气候等条件, 研究了后屋面水平投影长度对日光温室内部采光性能的影响, 并利用 ANSYS 计算并分析了其对日光温室结构安全的影响, 提出了合理的后屋面水平投影长度模型。

## 1 日光温室场地情况

节能型日光温室的场地进行实地测量, 场地总长 60 m,

宽 10 m, 有一段能利用的 2.5 m 后墙。在北方高纬度地区, 采光保温和结构安全是日光温室面临的主要问题。因此采用无立柱圆弧形前屋面节能日光温室较为适宜<sup>[5-6]</sup>, 无立柱是为了方便大型设备的工作及管理人员的活动, 圆弧形前屋面是为了日光温室内部的采光和冬天积雪的滑落, 后屋面是为了提高日光温室保温、承重和防水的性能<sup>[7-8]</sup>。准备用 40 mm×60 mm 实心方钢管搭建日光温室钢骨架, 材料杨氏模量为  $2.0 \times 10^{11}$  Pa, 泊松比为 0.3, 密度为 7 800 kg/m<sup>3</sup>, 准备用 10 mm 厚聚碳酸酯中空板(PC板)为覆盖材料。

## 2 理论分析

**2.1 采光研究** 日光温室的采光主要取决于其前屋面角, 这个角度的大小直接影响太阳照射光线的透光率。为了更好的保证日光温室的内部采光情况, 即减少日光温室覆盖材料由于反射而造成的太阳光损失, 从而最大限度地使太阳直射光进入日光温室, 最理想的情况是日光温室前屋面角与太阳直射光线的夹角为 90°, 即太阳直射光线入射角等于零, 但这在设计上几乎是不可能得, 因为太阳直射光线入射角同时受太阳高度角和日光温室前屋面角两个方面的因素影响。根据太阳直射光线反光率与太阳直射光线入射角的关系, 只要太阳直射光线入射角在 40°~60°, 太阳直射光反射损失较少的原理, 一般采用入射角 40°作为日光温室的采光设计参数<sup>[9-10]</sup>。建造日光温室时, 前屋面角应满足:

$$\alpha \geq \phi - \delta - 40^\circ$$

式中:  $\alpha$  为日光温室前屋面角;  $\phi$  为当地纬度,  $\delta$  为冬至日时当地的太阳赤纬。

哈尔滨的中心纬度为北纬 45.7°, 冬至日哈尔滨的太阳赤纬为 -23.5°, 所以哈尔滨地区建造日光温室的前屋面角度应为  $\alpha \geq 29.2^\circ$ , 即哈尔滨地区合理的日光温室应保证其前

**基金项目** 哈尔滨市科技创新人才研究专项基金(2011RFXXN044)。  
**作者简介** 郭艳玲(1962-), 女, 黑龙江双鸭山人, 教授, 博士生导师, 从事机电一体化, 特种加工技术, 机械人技术及农业机械研究。\*通讯作者: 李石(1989-), 男, 湖南益阳人, 在读硕士研究生, 研究方向: 日光温室建模及软件设计。

**收稿日期** 2013-12-07

屋面角不小于  $29.2^\circ$ 。

**2.2 荷载研究** 日光温室的结构安全主要取决于其在危险荷载组合情况下的受力情况,主要荷载有以下几种<sup>[11-12]</sup>:

恒载( $G$ )是指日光温室永久性结构的质量,主要考虑日光温室质量荷载。根据目标温室实际情况,将建筑材料质量和温室内部悬挂或支撑设备的质量,简化为  $0.20 \text{ kN/m}^2$  以方便计算。

雪荷载( $S$ )计算公式为:

$$S = \mu S_0$$

式中: $S$ 为雪荷载计算标准值( $\text{kN/m}^2$ ); $\mu$ 为屋面积雪分布系数,随屋面形状的不同而不同; $S_0$ 为基本雪压( $\text{kN/m}^2$ )。

根据参考文献<sup>[13]</sup>,哈尔滨50年一遇雪压为  $0.45 \text{ kN/m}^2$ 。根据《建筑结构荷载规范 GBJ9-87》,当前屋面角为  $30^\circ$ 左右时,屋面积雪分布系数取值  $0.8$ ,计算得哈尔滨50年一遇雪荷载为  $0.36 \text{ kN/m}^2$ 。

风荷载( $W$ )计算公式为:

$$W = \mu_z \mu_s W_0$$

式中: $\mu_z$ 为风压高度变化系数,取  $0.8$ ;  $\mu_s$ 为风荷载体型系数,取  $0.8$ ;  $W_0$ 为基本风压,哈尔滨50年一遇风压为  $0.55 \text{ kN/m}^2$ ,计算得哈尔滨50年一遇风荷载为  $0.35 \text{ kN/m}^2$ 。

作物荷载( $V$ )是指一些植物常被悬挂在钢骨架上形成作物荷载,它的大小与所栽培的作物品种以及悬挂方式有关,一般按水平投影荷载考虑,取  $0.15 \text{ kN/m}^2$ 。

操作荷载( $Q$ )是根据《建筑结构荷载规范 GBJ9-87》规定,取  $800 \text{ N}$ 的集中力作用在骨架背部考虑。

均布荷载( $K$ )是指日光温室冬季运行时保温覆盖物重量,如保温被或草苫,考虑到实际含水量,取  $50 \text{ N/m}^2$  计算。

地震荷载( $E$ )根据各国温室设计的经验<sup>[14]</sup>,以及哈尔滨地区的实际状况,温室设计中暂不考虑地震作用,因此,温室危险荷载暂不考虑地震力。

考虑到哈尔滨实际情况,哈尔滨风向以偏南风为主,故最危险荷载组合为雪后刮南风时人站屋顶卷草苫,即  $G + S + W + V + Q + K$ 。

### 3 建立模型

综合分析场地情况,整体日光温室坐北朝南,可建日光温室东西方向截面角度和尺寸如图1所示。

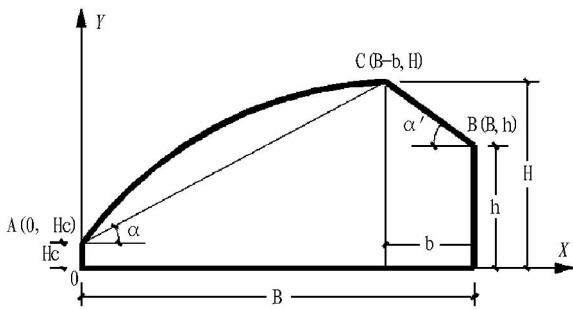


图1 节能型日光温室东西方向截面模型

图中: $B$ 为日光温室跨度, $H$ 为脊高, $H_c$ 为前窗高, $h$ 为后墙高, $b$ 为后屋面水平投影长度, $\alpha$ 为前屋面角, $\alpha'$ 为后屋

面角。

在案例中,可建日光温室总长度为  $50 \text{ m}$ ,跨长为  $8 \text{ m}$ ,脊跨比按一般标准  $1:2$  建造,即脊高  $4 \text{ m}$ ,可利用  $2.5 \text{ m}$  后墙,为方便大型设备的工作及管理活动的建造  $0.5 \text{ m}$  高前窗,后屋面水平投影长为待定值,取跨长的  $20\% \sim 30\%$ 。

$$\text{根据数学模型,可得 } \tan \alpha = \frac{H-h}{B-b}$$

$$\text{所以,日光温室前屋面角 } \alpha = \arctan \frac{H-h}{B-b}$$

通过计算机计算,得到不同后屋面水平投影的前屋面角如表1所示。

表1 不同后屋面水平投影的前屋面角

后屋面投影长/跨度比//%	前屋面角度	后屋面投影长/跨度比//%	前屋面角度
20	27.67	26	30.79
21	28.18	27	31.33
22	28.69	28	31.88
23	29.20	29	32.44
24	29.73	30	33.01
25	30.26	-	-

前屋面角每增加  $1^\circ$ 时,会使室内接收太阳能增加  $5.47 \text{ KJ/d} \cdot \text{m}$  ( $3\,648.4 \text{ KJ/d} \cdot \text{亩}$ )<sup>[15]</sup>。所以,前屋面角在一定范围内越大,冬季接受的辐射越多,蓄热就越多。从表1中可以看出, $20\% \sim 22\%$ 后屋面投影所产生的前屋面角小于哈尔滨地区建造日光温室的最小前屋面角度  $29.2^\circ$ ,所以不予考虑。

### 4 有限元分析

**4.1 有限元的单元划分** 取该节能型日光温室其中一个重复单元,以钢骨架、覆盖PC板组成的整体为研究对象。其中,骨架选用 beam4(空间梁单元),覆盖PC板选用 shell63(弹性壳单元)。所有材料均考虑为线弹性,各向同性,在骨架底部施加约束条件,将各方向自由度约束,各杆件链接视为刚接。对日光温室几何模型进行 smart size 网格划分,结果为单元数  $83$  个,节点数  $104$  个,如图2所示。

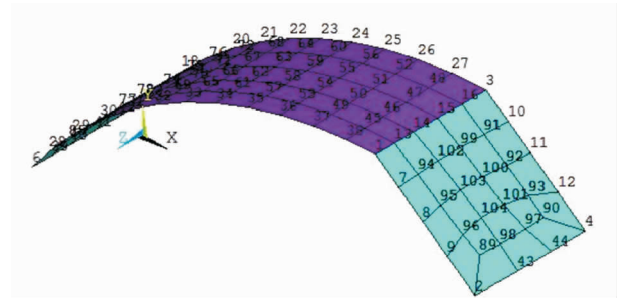


图2 节能型日光温室有限元单元划分

**4.2 计算** 在日光温室总长度、跨距、脊高、前窗高度、后墙高度保持不变的前提下,以后屋面水平投影长度为变量,计算范围为跨度长的  $23\% \sim 30\%$ ,以  $1\%$  为跨度,对得到的日光温室模型施加最危险荷载组合,进行有限元分析,分别得到不同后屋面水平投影对应的新日光温室一个重复单元模型的合位移等值线图和等效应力场等值线图,统计数据如表2所示。

表 2 不同后屋面水平投影得到的有限元结果

后屋面投影 长/跨度比//%	最大形 变//m	最大应 力//MPa
23	0.060 862	247
24	0.066 242	204
25	0.066 989	222
26	0.078 084	405
27	0.064 237	253
28	0.066 433	252
29	0.063 541	279
30	0.063 689	314

**4.3 有限元结果分析** 日光温室结构中采用的钢材主要是 Q235 沸腾钢,这种钢材是按照机械性能供应,即保证钢材的抗拉强度和伸长率满足国家规定的标准。这种钢材在使用、加工和焊接等方面性能都比较好,生产量大,取材容易,非常适合温室对结构钢的要求,这种钢材也大量应用于工业建筑的结构中。由于计算时参考的是 50 年一遇的极端天气情况,所以计算出的变形和受力会比较大。根据机械设计手册,选取安全系数为 1.25,许用应力为 235 MPa,温室工程设计的刚度要求是最大相对位移控制在跨度的 1.6% 之内。

从表 2 中可以看出,当后屋面投影长与跨度之比为 23%、26%、27%、28%、29%、30% 时,节点中最大应力均超出钢的许用应力 235 MPa,此日光温室结构在 50 年一遇的极端天气情况下存在安全隐患。当后屋面投影长与跨度之比为 24% 与 25% 时,节点中最大应力分别为 204 MPa 与 222 MPa,均小于钢的许用应力。

因此,当后屋面投影长与跨度之比为 24% ~ 25% 时,日光温室结构最合理。此时,日光温室在最危险荷载组合下的总体变形图和等效应力场等值线图,分别如图 3、4 所示,其中等效应力场等值线图是弯曲应力图和轴向应力图的叠加。

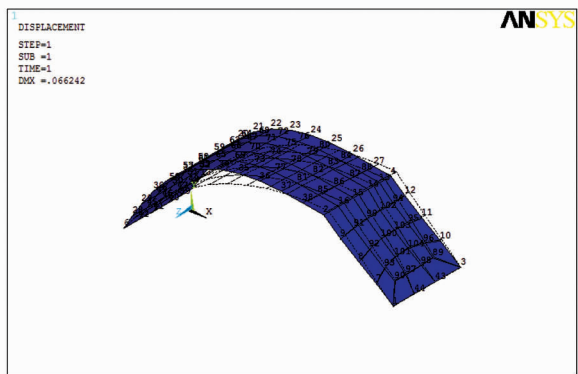


图 3 最危险荷载组合的总体变形图

## 5 结论

(1) 对于此类型脊跨比为 1:2 的无立柱圆弧形前屋面日光温室,当后屋面投影长与跨度之比为 24% ~ 25% 时,日光

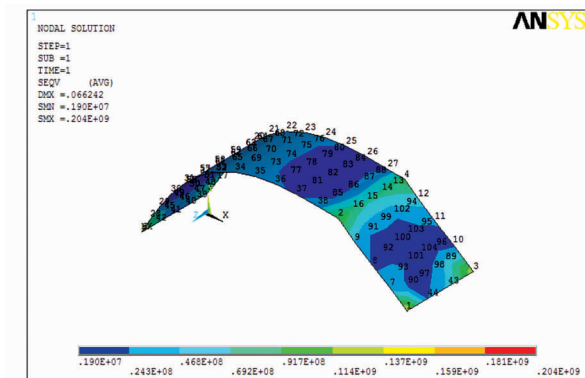


图 4 最危险荷载组合的等效应力场等值线图

温室结构比较合理,是适合北方高纬度地区地理气候条件的日光温室,课题组可按此比例进行建造。

(2) 此时日光温室的前屋面角  $30^\circ \pm 0.5^\circ$ ,满足哈尔滨地区建造日光温室的前屋面角度要求  $29.2^\circ$ ,对日光温室的内部采光较为有利,同时也有利于积雪从圆弧形前屋面上滑落。

(3) 此时的日光温室结构在在骨架承载能力、受载后的变形等指标上比较好,50 年一遇的危险荷载情况下也不会超标,保证了日光温室的整体安全性。

## 参考文献

- [1] 张东兵. 日光温室结构设计探讨[J]. 农业技术与装备, 2011(10): 45-47.
- [2] 明月. 日光温室结构优化设计研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2007.
- [3] 白义奎, 李天来, 王铁良, 等. 辽宁日光温室结构研究进展[J]. 北方园艺, 2011(1): 62-67.
- [4] 刘建, 周长吉. 日光温室结构优化的研究进展与发展方向[J]. 内蒙古农业大学学报, 2007, 9(28): 264-268.
- [5] 张京社, 柴文臣. 高寒区现代日光温室结构与建造[J]. 山西农业科学, 2012, 4(8): 870-873.
- [6] 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, 2(23): 449-453.
- [7] 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.
- [8] 孟力, 杨其长, BOT G P A, 等. 日光温室热环境模拟模型的构建[J]. 农业工程学报, 2009, 1: 164-170.
- [9] 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(5): 122-127.
- [10] 董吉林, 李亚灵, 温祥珍. 西北节能型日光温室采光设计中方位角和前屋面角的分析、探讨与应用[J]. 山西农业大学学报: 自然科学版, 2003(3): 105-108.
- [11] 王宇欣, 王宏丽. 现代农业建筑学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [12] 王朝栋, 史为民, 裴先文. 4 种曲线形日光温室前屋面采光性能及其拱架力学性能的比较[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(8): 143-150.
- [13] 周长吉. 现代温室工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [14] KENDIRLI B. Structural analysis of greenhouses: A case study in Turkey [J]. Building and Environment, 2006, 41: 864-871.
- [15] 兰星, 塔娜. 寒冷干旱地区日光温室结构的优化设计[J]. 内蒙古农业大学学报, 2012, 33(3): 216-221.

(上接第 1473 页)

- [6] 于延胜, 陈兴伟. R/S 和 Mann-Kendall 法综合分析水文时间序列未来的趋势特征[J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(3): 41-44.
- [7] 徐宗学, 李占玲, 史晓崑. 石羊河流域主要气象要素及径流变化趋势分析[J]. 资源科学, 2007, 29(5): 121-128.

- [8] 曹丽格. 辽河流域气候变化及其对径流量的影响研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2013.
- [9] 王孝礼, 夏军. 水文时序趋势与变异点的 R/S 分析法[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2002, 35(2): 10-12.
- [10] 崔锦泰, 程正兴. 小波分析导论[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1995.