

# 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

王朝栋<sup>1</sup>, 史为民<sup>1</sup>, 裴先文<sup>2</sup>

(1 石河子大学 农学院 园艺系,新疆 石河子 832003;2 新疆巴音郭楞职业技术学院 科技处,新疆 库尔勒 841000)

**[摘要]** 【目的】研究不同曲线形日光温室前屋面的采光及其拱架力学性能,为日光温室的设计提供参考。  
**【方法】**利用日光温室采光模型,模拟三次样条函数、圆弧、椭圆、抛物线4种曲线形日光温室前屋面的进光量,采用有限元方法计算3种荷载组合下各曲线形拱架的截面应力。**【结果】**三次样条函数、圆弧、椭圆、抛物线形前屋面的进光量分别为40 467, 39 451, 39 306和35 845 kJ。在荷载组合1作用下,椭圆形拱架的截面应力最大,为3 514 MPa; 抛物线形拱架次之,为3 466 MPa; 三次样条函数形拱架为2 906 MPa; 圆弧形拱架最小,为1 479 MPa。**【结论】**综合前屋面进光量和拱架力学性能指标,4种曲线形日光温室前屋面中,以三次样条函数形日光温室前屋面更具实用性。

**[关键词]** 日光温室;采光性能;拱架应力分析;有限元分析

[中图分类号] S625.1

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2010)08-0143-08

## Comparing the front roof permeated sunlight performances and the arch mechanical performances of four curvilinear roofs of solar greenhouse

WANG Chao-dong<sup>1</sup>, SHI Wei-min<sup>1</sup>, PEI Xian-wen<sup>2</sup>

(1 Department of Horticulture, Agriculture College, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China;

2 Technological Section of Xinjiang Bayin Guoleng Technical College, Korla, Xinjiang 841000, China)

**Abstract:** 【Objective】In order to advance the design of solar greenhouse, the front roof permeated sunlight and the arch mechanical performances of different curvilinear roofs of solar greenhouse were compared. 【Method】The simulation of sum sunlight transmitting the thrice spline, circular arc, ellipse and parabola curvilinear roofs of solar greenhouse and the finite element analysis calculating sectional stress of the arch under the three loads combination were applied. 【Result】The result indicates that the sum permeation sunlight of the thrice spline, circular arc, ellipse, parabola roof is 40 467, 39 451, 39 306 and 35 845 kJ, respectively. Under the first combination loads, the ellipse the arch sectional stress is 3 514 MPa, the second parabola 3 466 MPa, and next the thrice spline 2 906 MPa, and finally the circular 1 479 MPa. 【Conclusion】Synthesizing the index of the front roof permeated sunlight and the arch mechanical performances, the thrice spline roof of solar greenhouse has more definite practicability than the other roofs.

**Key words:** solar greenhouse; sunlight permeation; arch stress analysis; finite element analysis

对日光温室前(采光)屋面的优化设计,一方面 是确定前屋面曲线形状,增加温室内总进光量和平

\* [收稿日期] 2009-11-13

[基金项目] 国家科技部星火重点项目“温室大棚蔬菜高效生产技术培训”(2006EA891004)

[作者简介] 王朝栋(1982—),男,山东邹城人,在读硕士,主要从事设施园艺研究。E-mail:wcdong2010@sohu.com

[通信作者] 史为民(1970—),男,新疆石河子人,副教授,博士,主要从事设施园艺研究。E-mail:shi-wei-min@sohu.com

均透光率;另一方面是优化前屋面拱架曲线,使其在外部荷载作用下整条曲线上的最大应力最小,从而使日光温室骨架用材最省。关于不同日光温室前屋面曲线对温室进光量的影响,国内学者做了许多研究,如陈端生等<sup>[1]</sup>、孙忠富等<sup>[2]</sup>、李晓豁<sup>[3]</sup>对椭圆、圆弧、抛物线和圆抛物线组合曲线屋面进行了进光量的计算和比较,并开发了日光温室采光设计辅助软件用于前屋面曲线的优化设计,但是此类研究中并未考虑对前屋面拱架曲线的力学特性加以优化。目前对不同曲线形日光温室前屋面拱架的力学性能已有很多研究报道<sup>[4-5]</sup>,如周长吉<sup>[4]</sup>对幂函数、抛物线、圆、椭圆、双曲线、三角函数和变形摆线等7类曲线,在均匀荷载作用下进行了曲线寻优,结果认为抛物线和圆的受力较为合理。另外,侯丽薇等<sup>[6]</sup>、卢旭珍等<sup>[7]</sup>使用有限元法分别对抛物线形、椭圆形、圆形、一面坡形、双曲线形和幂函数形无柱式日光温室拱架进行了受力分析,结论仍然是抛物线形的最大应力值最小,力学性能最好。

日光温室发展到现在,生产中对前屋面的要求除了以上两点外,还有他方面考虑,如屋面形状对农艺操作的影响、前屋面南沿不能太矮、距前底脚水平距离1 m处的屋面高度以1.2~1.5 m为宜;又如为放草帘方便,同时为利于积雪(雨)滑落,前屋面最高处应有一定倾角。而抛物线形屋面不能满足要求,这就限制了其的实际应用。为解决以上问题,周长吉等<sup>[8]</sup>提出采用人工输入控制点的方法,对优化曲线进行修正,并采用第一种边界条件的三次样条插值函数来生成日光温室的前屋面曲线,并计算其在均匀荷载作用下骨架结构的受力状况,但该研究的不足是没有兼顾三次样条函数形拱架的采光性能及其力学特性。为此,本研究对三次样条函数形拱架日光温室的采光性及其在荷载作用下的内力大小进行模拟计算,并与抛物线、椭圆、圆弧形拱架进行比较,分析了该曲线形日光温室屋面拱架的实用价值,以期为其的实际应用提供参考依据。

## 1 日光温室前屋面曲线函数的确定

### 1.1 日光温室前屋面曲线的函数形式及其参数

如图1建立坐标系,ac即为前屋面。其满足以下条件:为单调增凸函数,其一阶导数值大于零。起点a、终点c坐标已知,其中 $L_1$ 是日光温室前屋面水平投影长度,H是日光温室的脊高。b点为ac曲线上的控制点,其坐标为(1,1.5)。其中A,B分别是过点a,c的切线与x轴所形成的夹角。

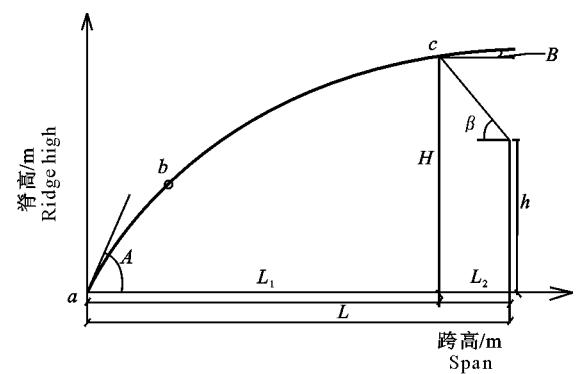


图1 日光温室前屋面曲线模型

Fig. 1 Curved shape model of the solar Greenhouse front roof

4种日光温室前屋面的曲线函数形式及其参数分别如下:

(1)三次样条函数形式。有:

$$y(x) = \frac{(x_{i+1}-x)^3}{6h_i}M_i + \frac{(x-x_i)^3}{6h_i}M_{i+1} + \frac{x_{i+1}-x}{h_i} \cdot \\ \left(y_i - \frac{h_i^2}{6}M_i\right) + \frac{x-x_i}{h_i} \left(y_{i+1} - \frac{h_i^2}{6}M_{i+1}\right) \quad (1)$$

式中:( $x_i, y_i$ )为通过点坐标; $h_i = x_i - x_{i-1}$ ;  $M_i$ 为待定参数。

(2)椭圆形式。有:

$$\frac{(x-x_0)^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (2)$$

式中:( $x_0, 0$ )为椭圆圆心坐标; $a, b$ 分别为椭圆短、长轴长度。

(3)圆弧形式。有:

$$(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 = R^2 \quad (3)$$

式中:( $x_0, y_0$ )为圆弧圆心坐标; $R$ 为圆弧半径。

(4)抛物线形式。有:

$$x = ay^2 + by + c \quad (4)$$

式中: $a, b, c$ 为待定参数。

其中三次样条函数曲线 $y(x)$ 符合已知两端的一阶导数值的第一种边界条件,可按求解三次样条插值函数的三弯矩方程方法<sup>[9]</sup>确定插值函数 $y(x)$ 。对于其他曲线方程,只需知道曲线上3个点的坐标,代入原函数即可求出待定参数。为使抛物线形屋面满足上述条件,设定其起点坐标为(0,0.5)。

### 1.2 温室不同跨度高度组合条件下各曲线的几何特性及其函数表达式

以新疆北部 $44^{\circ}\sim45^{\circ}$ 地区有代表性的3种日光温室尺寸(表1)进行前屋面曲线方程求解,得到3种代表性日光温室尺寸时的4种曲线函数表达式如表2所示。

表 1 日光温室主要尺寸

Table 1 Main sizes of solar greenhouse

温室尺寸组合 Size of greenhouse	脊高( $H$ )/m Ridge high	跨高( $L$ )/m Span	前屋面水平投影长( $L_1$ )/m Level length of front roof projection	后屋面水平投影长( $L_2$ )/m Level length of back roof projection	后坡仰角( $\beta$ )/(°) Elevation of back slope
I	3	6	5	1	45
II	3	7	6	1	45
III	3.4	7	6	1	45

表 2 3 种日光温室尺寸的前屋面曲线函数表达式

Table 2 Curves equations of the three sizes of solar greenhouse front roofs

曲线类型 Type of curve	温室尺寸组合 Sizes of greenhouse		
	I	II	III
三次样条 Thrce spline	$y_1 = 0.558x^3 - 1.83x^2 + 2.747$ ( $0 \leq x \leq 1$ ), $y_2 = 0.00277x^3 - 0.0795x^2 + 0.767x + 0.81$ ( $1 < x \leq 5$ ), $y'_1(0) = \tan 70^\circ$ , $y'_2(5) = \tan 10^\circ$	$y_1 = 0.5381x^3 - 1.7856x^2 + 2.7476$ ( $0 \leq x \leq 1$ ), $y_2 = 0.0146x^3 - 0.2148x^2 + 1.1739x + 0.5303$ ( $1 < x \leq 6$ ), $y'_1(0) = \tan 70^\circ$ , $y'_2(6) = \tan 10^\circ$	$y_1 = 0.589x^3 - 1.84x^2 + 2.74698$ ( $0 \leq x \leq 1$ ), $y_2 = 0.00315x^3 - 0.0832x^2 + 0.8345x + 0.71$ ( $1 < x \leq 6$ ), $y'_1(0) = \tan 70^\circ$ , $y'_2(6) = \tan 10^\circ$
圆弧 Circle arc	$(x - 4.58)^2 + (y + 1.97)^2 = 4.99^2$	$(x - 4.813)^2 + (y + 2.152)^2 = 5.26^2$	$(x - 5.38)^2 + (y + 2.5)^2 = 5.94^2$
椭圆 Ellipse	$\frac{(x - 10.5)^2}{110.25} + \frac{y^2}{12.4} = 1$	$\frac{(x - 8)^2}{64} + \frac{y^2}{9.6} = 1$	$\frac{(x - 17.9)^2}{320.3} + \frac{y^2}{20.7} = 1$
抛物线 Parabola	$x = 0.6667y^2 - 0.3333y$	$x = 0.9333y^2 - 0.8667y + 0.2$	$x = 0.5626y^2 - 0.1252y - 0.078$

按温室尺寸 II 绘制出的 4 种前屋面曲线如图 2 所示, 尺寸 II 中 4 种日光温室前屋面曲线上各部位

的倾角大小如图 3 所示。由图 2 可知, 圆弧形前屋面最高点高于温室脊高 c 点, 对屋面排水性能不利。

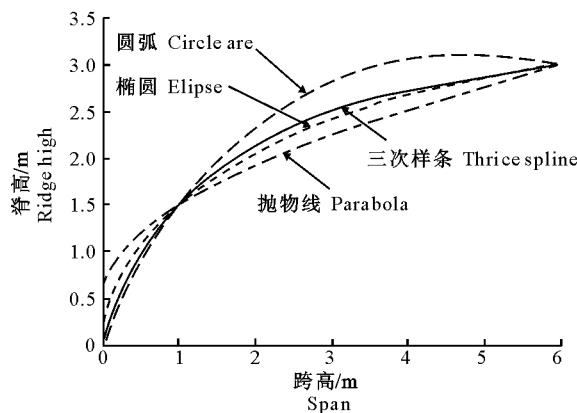


图 2 日光温室尺寸 II 的 4 种前屋面曲线的比较

Fig. 2 Comparison of the four curves of size II solar greenhouse front roof

## 2 日光温室不同曲线形前屋面的采光性能分析

### 2.1 不同曲线形前屋面各部位倾角的比较

太阳直接辐射进光量与各曲线形屋面各部位的倾角有关, 倾角越大, 太阳直接辐射的进光量越大<sup>[10]</sup>。由图 3 可知, 当  $0.4 \text{ m} \leq x$  (跨高)  $\leq 2.7 \text{ m}$  时, 各曲线形屋面倾角的大小表现为圆弧形  $>$  三次样条形  $>$  椭圆形  $>$  抛物线形。当  $3.4 \text{ m} \leq x \leq 5.4 \text{ m}$  时, 屋面倾角大小表现为抛物线形  $>$  椭圆形  $>$  三次

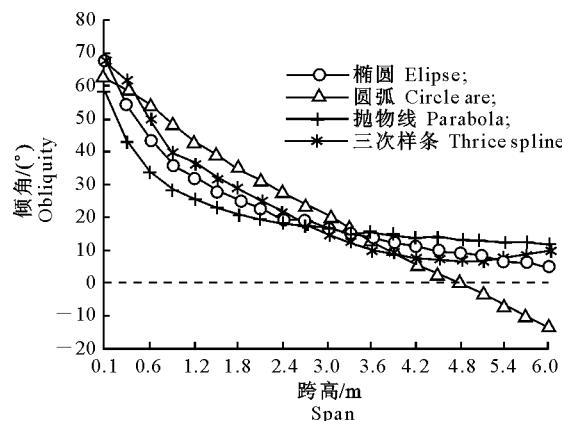


图 3 日光温室尺寸 II 的 4 种前屋面曲线倾角的比较

Fig. 3 Comparison of obliquity of four front roofs of size II solar greenhouse

样条形  $>$  圆弧形。

### 2.2 不同曲线形前屋面的进光量分析

不同曲线形拱架的进光量以进入室内的太阳直接辐射能的累积值大小来表示。本研究参考陈端生等<sup>[1]</sup>的方法, 即将前屋面划分为  $n$  ( $n$  在本研究中取值为 100) 个微面积, 将每个微面积看作 1 个小平面, 通过计算该微面积上的直射辐射瞬时进光量, 再对整个前屋面和 1 d 日照时间分别进行积分。

本研究中, 取地理纬度  $\Phi = 44^\circ 19'$  的新疆北部地区; 模拟日期为 12-22; 模拟时间从当地时间的 08:00

至12:00。设置温室方位角为偏西 $0^{\circ}$ ;大气透明度值取0.75。在此条件下,不同日光温度尺寸及不同形状前屋面的太阳直接辐射能的累计值如图4所示。

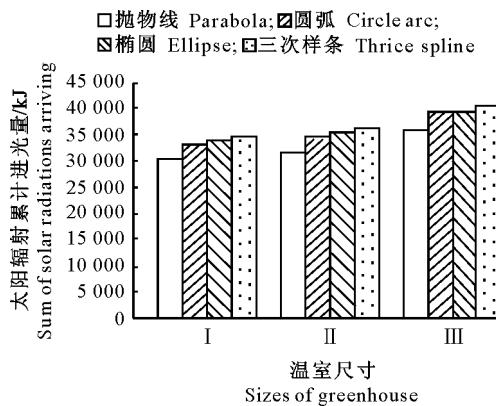


图4 3种日光温室尺寸时各曲线形前屋面太阳直射辐射累积进光量的比较

Fig. 4 Comparison of sum of sunlight permeation of different curves front roofs of the three sizes greenhouse

由图4可知,4种前屋面曲线形式中,在温室尺寸Ⅲ时三次样条形日光温室前屋面的进光量最大,为40 467 kJ;圆弧形次之,为39 451 kJ;椭圆形为39 306 kJ;抛物线形最小,为35 845 kJ。由图4还可以看出,当脊高不变(3 m),跨度增加时(即由尺寸Ⅰ的6 m增加位尺寸Ⅱ的7 m),透过三次样条函数形、圆弧形、椭圆形、抛物线形前屋面进入室内的太阳直射辐射能,较相同曲线形前屋面的进光量分别增加137.70,201.63,139.22和106.22 kJ,可见相同曲线形前屋面进光量的增加较为有限,且不同曲线形前屋面的进光量大小次序不变。

当跨度不变(7 m)而脊高增加时(由尺寸Ⅱ的3.0 m增加到尺寸Ⅲ的3.4 m),相同曲线形前屋面的进光量也有所增加。脊高3.4 m时透过三次样条形、圆弧形、椭圆形、抛物线形前屋面进入室内的太阳直射辐射能,较脊高3.0 m时相同曲线形前屋面分别增加420.12,453.28,395.92和423.34 kJ,且不同曲线形前屋面的进光量大小次序不变。

### 3 日光温室不同曲线形屋面拱架的力学性能分析

#### 3.1 日光温室屋面拱架结构的荷载取值及荷载组合

如表3所示,以新疆北部 $44^{\circ}\sim45^{\circ}$ 地区有代表性的温室荷载工况进行取值。前、后屋面拱架均为单薄壁圆管 $\Phi30\text{ mm}\times2\text{ mm}$ 。前屋面质量荷载<sup>[11]</sup>( $G_1$ )以每 $667\text{ m}^2$ 用钢量约为3 400 kg计算,则单位水平投影面积用钢量为 $34\text{ kN}/667\text{ m}^2=0.051\text{ kN/m}^2$ 。后屋面质量荷载<sup>[11]</sup>( $G_2$ )包括:后屋面钢架质量荷载( $G_1$ )、20 mm厚松木板质量荷载( $5\text{ kN/m}^3\times0.02\text{ m}=0.1\text{ kN/m}^2$ )、120 mm厚苯板质量荷载( $0.08\text{ kN/m}^3\times0.12\text{ m}=0.0096\text{ kN/m}^2$ )、80 mm厚白灰炉渣质量荷载( $10\text{ kN/m}^3\times0.08\text{ m}=0.8\text{ kN/m}^2$ )、25 mm厚水泥砂浆质量荷载( $20\text{ kN/m}^3\times0.025\text{ m}=0.5\text{ kN/m}^2$ )、一毡二油防水层质量荷载( $0.3\text{ kN/m}^2$ ,合计 $3.408\text{ kN/m}^2$ )。雪荷载(S)中,基本雪压按《建筑结构荷载规范 GBJ 9—87》取值<sup>[12]</sup>。风荷载(W)中,风压标准值参考文献[13—14]确定,南风时日光温室前屋面的风荷载体型系数 $\mu_s=+0.6$ ,后屋面为 $\mu_s=-0.5$ ,北风时日光温室前、后屋面的风荷载体型系数 $\mu_s$ 均取 $-0.5$ 。

表3 日光温室拱架的荷载及其取值与分布

Table 3 Load value and distributing of the solar greenhouse roof arch

荷载项目 Load item	数值(×分项系数) Numerical value (×subentry coefficient)		分布 Distribution
恒荷载 Static load	前屋面质量荷载 $G_1/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$ Mass load of front roof	0.051(×1.2)	竖直均匀 Vertical equality
	后屋面质量荷载 $G_2/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$ Mass load of back roof	3.408(×1.2)	竖直均匀 Vertical equality
	草毡质量荷载 $K/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$ Grass felt load(equality)	0.058(×1.2)	竖直均匀 Vertical equality
	作物荷载 $V/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$ Crop load	0.15(×1.2)	竖直均匀 Vertical equality
	雪荷载 $S/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$ Snow load	0.75(×1.4)	竖直均匀 Vertical equality
	脊顶处人质量荷载 $Q_1/\text{kN}$	0.8(×1.4)	竖直集中 Vertical convergence
动荷载 Dynamic load	People's mass load in the ridge of soar greenhouse		
	前屋面南风荷载 $W_1/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	0.15(×1.4)	垂直于屋面均匀 Be symmetrical perpendicular to roof
	Snow load in front roof of soar greenhouse		
	后屋面南风荷载 $W_1/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	-0.125(×1.4)	垂直于屋面均匀 Be symmetrical perpendicular to roof
	South wind load in back roof of soar greenhouse		
	前屋面北风荷载 $W_2/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	-0.125(×1.4)	垂直于屋面均匀 Be symmetrical perpendicular to roof
	North wind load in front roof of soar greenhouse		
	后屋面北风荷载 $W_2/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	-0.125(×1.4)	垂直于屋面均匀 Be symmetrical perpendicular to roof
	North wind load in back roof of soar greenhouse		

根据日光温室使用中可能发生的情况,确定了3种荷载组合<sup>[15]</sup>,其中荷载组合1: $G_1+G_2+K+V+S+Q_1$ ,即雪后人上屋顶操作;荷载组合2: $G_1+G_2+K+V+Q_1+W_1$ ,即刮南风,人站屋顶卷草毡;荷载组合3: $G_1+G_2+K+V+Q_1+W_2$ ,即刮北风,人站屋顶放草毡。

### 3.2 日光温室屋面拱架结构的计算

本研究采用有限元方法通过ANSYS9.0软件进行日光温室屋面拱架结构的静力分析<sup>[16]</sup>。设置材料单元类型为Beam188,材料截面形状数据为钢

管横截面内半径14 mm,外半径15 mm,钢管横截面网格划分控制为36(即截面上分成36个单元),材料弹性模量为 $209 \times 10^9$  Pa,泊松比为0.3,屋面拱架单元长度为0.3 m。温室屋面拱架节点编号及其在3种荷载组合工况下的受力计算简图如图5所示。对温室尺寸I,抛物线形屋面拱架划分为25个节点,24个单元,其他曲线形屋面拱架均划分为27个节点,26个单元;对温室尺寸II、III,抛物线形屋面拱架划分为29个节点,28个单元,其他曲线形屋面拱架划分为30个节点,29个单元。

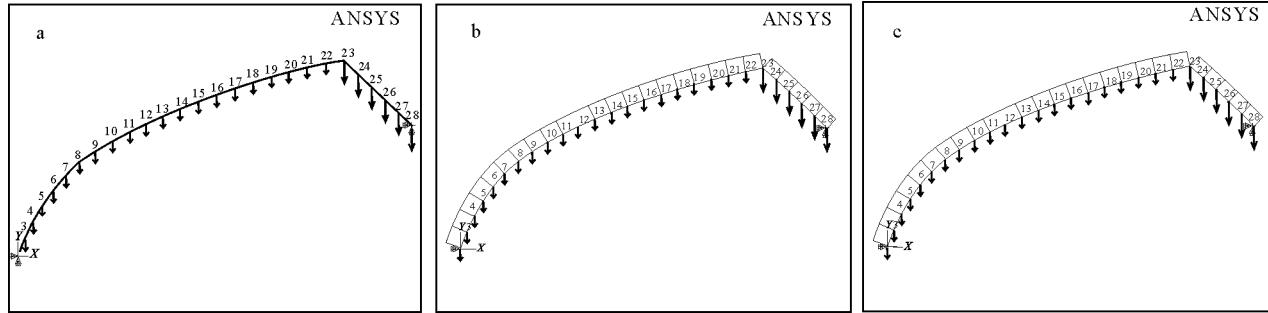


图5 温室尺寸I 3种荷载组合工况下的曲线形屋面拱架节点编号及其计算简图

a. 荷载组合1;b. 荷载组合2;c. 荷载组合3

Fig. 5 Node numbers and the calculated diagram of the curved roof arch under the three combination loads of size I greenhouse

a. The first combination loads;b. The second combination loads;c. The third combination loads

### 3.3 日光温室屋面拱架结构的计算与分析

不同日光温室尺寸时,不同曲线形屋面拱架的截面应力见表4(由于数据较多,表中只给出了部分单元截面应力较大值)。由表4可知,在荷载组合1

工况下,日光温室各曲线形屋面拱架的截面应力最大值大于荷载组合2,3工况,因此荷载组合1工况为最不利的荷载组合。

表4 日光温室尺寸为I、II、III时各曲线形屋面拱架截面应力值的比较

Table 4 Comparison of the roof arch sectional stress of the I, II, III sizes of solar greenhouse

MPa

荷载组合 Combination load	曲线类型 Type of curve	I			II			III		
		1	21(19)	26(24)	1	24(23)	29(28)	1	24(23)	29(28)
1	三次样条 Thrice spline	-1 962	1 179	171.8	-2 906	1 249	532.5	-2 586	1 918	-621.6
	圆弧 Circle arc	-1 086	198.5	763.2	-1 479	87.88	994.5	-1 269	554.9	448.3
	椭圆 Ellipse	-2 505	1 244	134.4	-3 514	1 624	-19.24	-3 271	2 170	-624.8
	抛物线 Parabola	-380	2 046	-972.1	-1 180	3 466	-1 936	-309	3 434	-2 087
2	三次样条 Thrice spline	-1 112	-108.6	1 041.7	-1 358	-210.4	1 421	-1 312	49.3	896.1
	圆弧 Circle arc	-737.8	-515.6	1 367	-829.2	-644.4	1 653	-751	-467.9	1 427
	椭圆 Ellipse	-1 303	-86.52	1 025	-1 591	-72.8	1 173	-1 554	143.6	884.3
	抛物线 Parabola	-673.4	31.76	386.7	-973	664.3	249.8	-663	666.8	171.7
3	三次样条 Thrice spline	-1 182	-344.5	1 292	-1 345	-462.9	1 698	-1 366	-273	1 264
	圆弧 Circle arc	-860	-679	1 585	-933	-800	1 894	-891	-672	1 727
	椭圆 Ellipse	-1 341	-328	1 279	-1 551	-353	1 483	-1 560	-200	1 255
	抛物线 Parabola	-832	-577.6	631.9	-1 088	285	599	-857	271	548.6

注:1.带下划线的数值表示该曲线形屋面拱架的最大截面应力值;2.表中应力值为负值时表明该单元受压应力;3.表中21(19)表示屋面拱架相同位置处三次样条、圆弧、椭圆的单元编号为21,抛物线的单元编号为19。余同。

Note:1.The underlined value denote the most section stress of this curvilinear roof arch;2.The negative denote the press stress on the element;3.The number 21(19) denote the same position for thrice spline and circle arc and ellipse is the element 21 and for parabola is the element 19. The other are the same.

在荷载组合1工况下,屋面拱架单元截面应力最大时,椭圆形屋面拱架的最大截面应力最大,为3 514 MPa;抛物线形屋面拱架次之,为3 466 MPa;三次样条形屋面拱架的最大截面应力为2 906 MPa;圆弧形屋面拱架最小,为1 479 MPa。

对不同尺寸的日光温室,在荷载组合1工况下,三次样条形、椭圆形、圆弧形屋面拱架所受截面总应力最大值均出现在屋面拱架单元1处,而抛物线形屋面拱架在日光温室脊顶单元处的截面应力最大。比较4种曲线形屋面拱架的最大截面应力,对于日光温室尺寸I、II表现为椭圆形>抛物线形>三次样条形>圆弧形屋面拱架;对日光温室尺寸III则表

表5 荷载组合1工况下不同尺寸日光温室各曲线形屋面拱架支座处水平推力值的比较

Table 5 Comparison of the level pushed force of the pivot in different sizes of solar greenhouses under the first combination loads

曲线类型 Type of curve	后屋面支座处 Pivot of the back roof			南前脚底处 Pivot of the front roof			N
	I	II	III	I	II	III	
三次样条 Thrice spline	-5 940.6	-6 782.7	-7 395.7	5 940.6	6 782.7	7 395.7	
圆弧 Circle arc	-4 933.9	-5 540.9	-7 673.8	4 933.9	5 540.9	7 673.8	
椭圆 Ellipse	-6 101.2	-7 292.5	-5 848.1	6 101.2	7 292.5	5 848.1	
抛物线 Parabola	-7 422.4	-9 703.2	-9 264.8	7 422.4	9 703.2	9 264.8	

由表5可以看出,在日光温室尺寸I、II中,4种曲线形屋面拱架对后墙支座处、南前脚底处水平推力的大小顺序均表现为抛物线形>椭圆形>三次样条函数形>圆弧形;在日光温室尺寸III中,4种曲线形屋面拱架对后墙支座处、南前脚底处水平推力的大小顺序为抛物线形>圆弧形>三次样条函数形>椭圆形。随温室脊高增加,4种曲线形屋面拱架对后墙支座处、南前脚底处的水平推力顺序亦发生改变,三次样条函数形、圆弧形屋面拱架对后墙支

现为抛物线形>椭圆形>三次样条形>圆弧形屋面拱架。随温室高度增加,4种曲线形屋面拱架单元截面最大应力的顺序亦发生变化。

当脊高不变(3 m),跨度增加(由尺寸I的6 m增加到尺寸II的7 m)时,三次样条形、圆弧形、椭圆形、抛物线形屋面拱架单元最大应力值均有所增大。当跨度不变(7 m),脊高增加(由尺寸II的3.0 m增加到尺寸III的3.4 m)时,三次样条形、圆弧形、椭圆形、抛物线形屋面拱架单元的最大应力值均有所减小。

在荷载组合1工况下,不同日光温室尺寸、不同曲线形屋面拱架对后墙支座处、南脚底处的水平推力值见表5。

表5 荷载组合1工况下不同尺寸日光温室各曲线形屋面拱架支座处水平推力值的比较

Table 5 Comparison of the level pushed force of the pivot in different sizes of solar greenhouses under

the first combination loads

座处、南前脚底处的水平推力递增,椭圆形、抛物线形屋面拱架对后墙支座处、南前脚底处的水平推力减小。当脊高不变跨度增加时,4种曲线形屋面拱架对后墙支座处、南前脚底处的水平推力有递增趋势。

以温室尺寸III为例,分析三次样条函数形屋面拱架在最不利荷载组合1工况下的轴向应力及弯曲应力,其结果如图6所示。

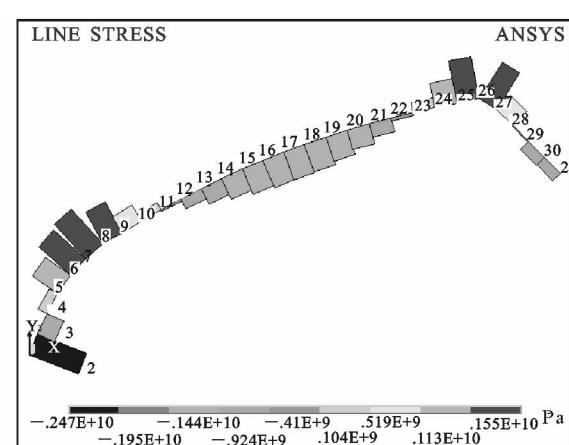
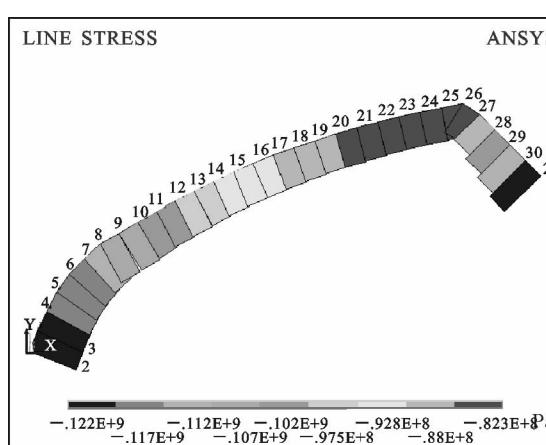


图6 尺寸III日光温室在荷载组合1下屋面拱架的轴向应力(左)、弯曲应力(右)分布云图

Fig. 6 Distributing nephogram of the axial stress (left) and bending stress(right) of roof arch in the size III solar greenhouse under the first combination loads

由图6可知,三次样条形屋面拱架在荷载组合

1工况下的轴向应力均产生压应力;弯曲应力的较

大值多集中在屋面拱架的前端、中部、脊顶和后支座附近的几个单元上,但其应力方向不同。在前底脚处轴向应力与弯曲应力方向一致,导致单元截面总应力值最大;在屋面拱架中部轴向应力与弯曲应力方向一致,但弯曲应力值较小,产生的单元截面应力值相对前底脚处小;在脊顶处,屋面拱架的弯曲应力与轴向应力方向不同,弯曲应力起主要作用,截面应力值为正值,表明该部分有拉应力分布。

## 4 讨 论

本研究发现,三次样条函数形前屋面的进光量较其他曲线形前屋面大,原因是该曲线形屋面前半部分屋面倾角较椭圆形、抛物线形屋面大,在上午太阳高度角较低时,太阳直射光在该部分屋面上的入射角较小,透过前屋面进入室内的太阳直接辐射量多<sup>[10]</sup>;另外,抛物线形前屋面的曲线弧长较其他曲线小,采光面积少,其进光量最小;圆弧形屋面的进光量小于三次样条形屋面,是因为前者最高点高于温室脊高,从屋面最高点到脊高点处的一段屋面在太阳高度角较低时,太阳直射光入射角度大,导致屋面进光量减小。

当日光温室尺寸相同时,三次样条形屋面拱架的最大截面应力较椭圆形、抛物线形屋面拱架小,其原因是该拱架前部分屋面的倾角较大,水平反力在屋面拱架切线方向上的投影较小<sup>[8]</sup>。

本研究表明,抛物线形屋面拱架受力性能不是最好,与前人的研究结论<sup>[6]</sup>相矛盾。这是因为本研究中的抛物线形日光温室屋面拱架其实是由前屋面的直线和抛物线组合而成。有关在均布荷载作用下,拱架受力的合理轴线为抛物线的结论在此是否仍然成立,还有待于进一步研究。

## 5 结 论

对日光温室4种曲线形屋面采光性及屋面拱架力学性能的对比分析可知,透过三次样条函数形屋面进入室内的太阳直接辐照总量最大;三次样条形屋面拱架的最大截面应力小于椭圆、抛物线形屋面拱架,而大于圆弧形屋面拱架;三次样条形屋面拱架对后墙支座处的水平推力小于椭圆、抛物线形屋面拱架而大于圆弧形屋面拱架。通过以上分析可知,三次样条形日光温室屋面拱架在新疆北部温室设计中具有一定实用性。

## 〔参考文献〕

- [1] 陈端生,郑海山,张建国,等.日光温室气象环境综合研究(三):几种弧型采光屋面温室内直射光量的比较研究[J].农业工程学报,1992,8(4):78-82.  
Chen D S, Zheng H S, Zhang J G, et al. Comprehensive study of meteorologic environment of a sunlight greenhouse (III): Compare study of the direct solar energy input in the several arc roofs of greenhouse [J]. Transaction of the CSAE, 1992, 8(4): 78-82. (in Chinese)
- [2] 孙忠富,吴毅明,曹永华.日光温室内直射光的计算机模拟方法:设施农业光环境模拟分析研究之三[J].农业工程学报,1993,9(1):73-79.  
Sun Z F, Wu Y M, Cao Y H. Direct solar radiation analysis of solar greenhouse by using computer simulation techniques: A analysis study on simulating sun-light condition of agriculture facilities in third [J]. Transaction of the CSAE, 1993, 9(1): 73-79. (in Chinese)
- [3] 李晓豁.日光温室采光性能的模拟分析[J].黑龙江科技学院学报,2005,15(2):90-92.  
Li X H. Simulated analysis of the solar greenhouse's capability of lighting [J]. Transaction of Heilongjiang Technical College, 2005, 15(2): 90-92. (in Chinese)
- [4] 周长吉.有立柱钢管骨架日光温室的结构优化[J].农业工程学报,1994,10(1):157-160.  
Zhou C J. Frame optimization of solar greenhouse with an inner post [J]. Transaction of the CSAE, 1994, 10(1): 157-160. (in Chinese)
- [5] 刘俊杰,邹志荣.无柱式日光温室的骨架结构优化设计[J].农业工程学报,1998,9(5):254-257.  
Liu J J, Zou Z R. Frame optimization of solar greenhouse with no inner post [J]. Transaction of the CSAE, 1998, 9(5): 254-257. (in Chinese)
- [6] 侯丽薇,吴巍,卢锷.日光温室结构性能的计算机辅助分析[J].光学精密工程,1999,12(6):81-84.  
Hou L W, Wu W, Lu E. Computer aided analysis on structural performance of greenhouse [J]. Optics and Precision Engineering, 1999, 12(6): 81-84. (in Chinese)
- [7] 卢旭珍,邱凌.单面坡日光温室钢骨架有限元优化[J].农业机械学报,2005(3):150-154.  
Lu X Z, Qiu L. Steel framework finite element optimization on single slope soalr greenhous [J]. Transaction of the Agriculture Mechanics, 2005(3): 150-154. (in Chinese)
- [8] 周长吉,徐刚毅.日光温室的结构优化[J].农业工程学报,1996,12(增刊):23-29.  
Zou C J, Xu G Y. Structure optimization on soalr plastic greenhous [J]. Transaction of the CSAE, 1996, 12(Supplement): 23-29. (in Chinese)
- [9] 李庆扬.数值分析基础教程[M].北京:高等教育出版社,2001:76-80.  
Li Q Y. Numerical analysis of the basic textbook [M]. Beijing: Higher Education Publish, 2001: 76-80. (in Chinese)
- [10] 轩维艳.日光温室采光屋面曲线数学模型的建立与分析[J].

- 天津农业科学,2006,12(4):44-46.
- Xuan W Y. Mathematical model establishment and analysis for greenhouse surface curve [J]. Tianjin Agricultural Sciences,2006,12(4):44-46. (in Chinese)
- [11] 王晓东.新疆新型高效节能日光温室的研制与性能分析 [D].北京:中国农业大学,2007.
- Wang X D. The development and property of the new type energy saving heliogreenhouses of Xinjiang were discussed [D]. Beijing:Chinese Agriculture University,2007. (in Chinese)
- [12] 中华人民共和国城乡建设环境保护部.建筑结构荷载规范 GBJ 9—87 [S].北京:中国计划出版社,1990.
- The City and Countryside Construction and Environmental Protection Ministry in the People's Republic of China. GBJ 9—87 Load standard of building structure [S]. Beijing:Chinese Scheme Publish,1990. (in Chinese)
- [13] 王铁良,孟少春.单坡温室设计与建造 [M].沈阳:辽宁科学技术出版社,2003:20-21.
- Wang T L,Meng S C. Design and building of the single-side greenhouse [M]. Shenyang: Liaoning Technology Press, 2003:20-21. (in Chinese)
- [14] 丛祥安,王志臣,杨晓波.日光温室设计受力载荷分析 [J].辽宁农业职业技术学院学报,2002,3(1):26-27.
- Cong X A,Wang Z C,Yang X B. Analysis of loads on solar greenhouses for structure design [J]. Journal of Liaoning Agricultural Vocational Technical College,2002,3(1):26-27. (in Chinese)
- [15] 周长吉.日光温室设计荷载探讨 [J].农业工程学报,1994,10(1):161-166.
- Zhou C J. Determination of loads on solar greenhouses for structure design [J]. Transaction of the CSAE,1994,10(1):161-166. (in Chinese)
- [16] 刘相新,孟宪颐. ANSYS 基础与应用教程 [M].北京:科学出版社,2006:202-212.
- Liu X X,Meng X Y. ANSYS of the basic and applied textbook [M]. Beijing:Science Press,2006:202-212. (in Chinese)

(上接第 142 页)

- [5] 张西平,赵胜利,张旭东,等.不同灌水处理对温室黄瓜形态及光合作用指标的影响 [J].中国农学通报,2007,23(6):622-625.
- Zhang X P,Zhao S L,Zhang X D,et al. Effect on morphology and photosynthesis index of cucumber under plastic mulch in solar greenhouse with different irrigation amount [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2007,23(6):622-625. (in Chinese)
- [6] 刘浩,孙景生,段爱旺,等.不同灌水水平对日光温室萝卜产量及水分利用效率的影响 [J].节水灌溉,2007(6):21-27.
- Liu H,Sun J S,Duan A W,et al. Influence of different irrigation quantity on radish yield and water use efficiency in sunlight greenhouse [J]. Water Saving Irrigation,2007(6):21-27. (in Chinese)
- [7] 虞娜,张玉龙,张玉玲,等.灌溉和施肥对温室番茄产量和品质影响效应的研究 [J].中国土壤与肥料,2009(4):31-35.
- Yu N,Zhang Y L,Zhang Y L,et al. Study on effect of irrigation and fertilization on yield and fruit quality of greenhouse tomato [J]. Soil and Fertilizers in China,2009(4):31-35. (in Chinese)
- [8] 霍晖,赵宏辉,李天来,等.灌水量对营养土土壤理化性质及番茄产量的影响 [J].土壤通报,2008,39(3):490-493.
- Xu H,Zhao H H,Li T L,et al. Effects of the irrigation water quantity on physical and chemical characteristic of artificially composed soil [J]. Chinese Journal of Soil Science,2008,39(3):490-493. (in Chinese)
- [9] 张恩慧,许忠民,程永安,等.甘蓝抗病优质品种秦甘 60 选育及其目标性状评价 [J].中国农学通报,2005,21(11):256-258.
- Zhang E H,Xu Z M,Cheng Y A,et al. Breeding of new variety Qingan 60 with high resistance diseases good qualities and evaluation of its goal characters [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2005,21(11):256-258. (in Chinese)
- [10] 许忠民,张恩慧,程永安,等.抗病优质甘蓝品种秦甘 60 [J].长江蔬菜,2007(1):15-16.
- Xu Z M,Zhang E H,Cheng Y A,et al. Variety Qingan 60 with high resistance diseases good qualities and evaluation [J]. Journal of Changjiang Vegetables,2007(1):15-16. (in Chinese)
- [11] 李树德.中国主要蔬菜抗病育种进展 [M].北京:科学出版社,1995.
- Li S D. Advances in main vegetable crops breeding for diseases resistance in China [M]. Beijing:Science Press,1995. (in Chinese)
- [12] 高俊风.植物生理学实验技术 [M].西安:世界图书出版社,2002.
- Gao J F. Experiment technology in plant physiology [M]. Xi'an:World Books Press,2002. (in Chinese)
- [13] 西南农业大学.蔬菜育种学 [M].北京:农业出版社,1998:240-241.
- Southwest Agricultural University. Science of vegetable breeding [M]. Beijing:Agriculture Press,1998:240-241. (in Chinese)