



齐飞,何芬,赵云云,侯永,丁小明.日光温室骨架合理曲线的一种数值化表达方法[J].中国农业大学学报,2024,29(07):161-169.

QI Fei, HE Fen, ZHAO Yunyun, HOU Yong, DING Xiaoming. A numerical expression method of solar greenhouse skeleton reasonable curve[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(07): 161-169.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.07.15

日光温室骨架合理曲线的一种数值化表达方法

齐飞^{1,2} 何芬^{1,2*} 赵云云^{1,2} 侯永^{1,2} 丁小明^{1,2}

(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与智能建造重点实验室,北京 100125)

摘要 日光温室骨架曲线形式直接影响前屋面采光和力学承载性能,为研究设计出合理骨架曲线形式,基于现有骨架的设计特点、应用情况等,对日光温室骨架合理曲线的数值化构建和表达方法进行研究。当屋脊点位置、最低作业高度、前屋面屋脊处的坡度以及底脚部位的坡度确定时,该方法可直接给出骨架曲线的数值化表达式,通过规范要求可筛选出合格的骨架曲线形式。提出了双抛物线骨架曲线,选取北京、沈阳、银川3个城市,对抛物线、椭圆面、双抛物线、幂函数、双圆5种骨架曲线形式的日光温室进行采光性能模拟。结果表明:1)5种骨架曲线形式下冬至日日累计太阳辐射量之间的最大差值为6.31%,双抛物线作为骨架曲线形式在采光性能上是可靠的;2)当前屋面水平投影为6~14 m、最低作业高度为1~1.8 m时,均可构造出既符合规范要求又符合工程实际的双抛物线曲线。

关键词 日光温室;骨架曲线;数值化表达;设计方法

中图分类号 S625.3

文章编号 1007-4333(2024)07-0161-09

文献标志码 A

A numerical expression method of solar greenhouse skeleton reasonable curve

QI Fei^{1,2}, HE Fen^{1,2*}, ZHAO Yunyun^{1,2}, HOU Yong^{1,2}, DING Xiaoming^{1,2}

(1. Academy of Agricultural Planning and Engineering, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China;

2. Key Laboratory of Farm Building in Structure and Intelligent Construction of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China)

Abstract The skeleton curve form of solar greenhouse directly affects the front roof lighting and mechanical bearing performance. In order to study and design a reasonable skeleton curve form of solar greenhouse, based on the design characteristics and application situation of the existing skeleton, the numerical construction and expression methods of the reasonable curve of the solar greenhouse skeleton were studied. When the position of the ridge point, the lowest working height, the slope at the front roof ridge, and the slope at the foot are determined, this method can directly provide a numerical expression for the skeleton curve, and qualified skeleton curve forms can be screened out through regulatory requirements. A double parabolic skeleton curve was proposed in this study, and three cities, Beijing, Shenyang and Yinchuan, were selected to simulate the lighting performance of solar greenhouses with five skeleton curve forms, which were parabolic, elliptical, double parabolic, power function and double circle. The results showed that: 1) The maximum difference between the cumulative solar radiation on the winter solstice day under five different skeleton curve forms was 6.31%, and the double parabola as the skeleton curve form was reliable in terms of lighting performance; 2) When the current

收稿日期: 2023-11-21

基金项目: 河北省重点研发计划资助项目(22327214D);农业农村部规划设计研究院自主研发项目(SP202101)

第一作者: 齐飞(ORCID:0000-0001-5831-2451),研究员,主要从事设施园艺工程研究,E-mail:qf2008@188.com

通讯作者: 何芬(ORCID:0000-0001-6033-3374),正高级工程师,主要从事设施园艺环境工程研究,E-mail:hafen_2005@163.com

horizontal projection of the roof is 6 to 14 m and the minimum working height is 1 to 1.8 m, a double parabolic curve that meets both the regulatory requirements and the actual engineering situation can be constructed.

Keywords solar greenhouse; skeleton curve; numerical expression; design method

日光温室骨架曲线是日光温室剖面设计的重要内容,曲线形式直接影响日光温室前屋面采光和力学承载能力等方面性能。对骨架合理曲线的数学描述,有利于提高日光温室研究中数值模拟、力学分析等的精确性、可比较性。目前,日光温室骨架曲线形式有圆弧^[1-6]、椭圆^[1-6]、抛物线^[1-6]、样条曲线^[2,7]、幂函数^[8-11]等单曲线或圆弧-抛物线^[1]、双圆曲线^[7,12]、圆弧-幂函数^[7]、直线-圆弧^[12]等2种曲线的组合,通过光环境模拟^[3-4]、网格优化^[13]、动态规划^[14-15]等方法,以进入日光温室内的太阳辐射量为评价指标,可筛选优化出最佳骨架曲线形式。但在实际日光温室工程设计中,设计和建设者多从设计的方便性与制造加工难易程度方面考虑,采用与工程经验结合的方法选择和确定骨架曲线形式。目前尚未形成一套相对科学、符合行业规范要求、具有可操作性的骨架合理曲线数值化的表达方法,给日光温室标准化设计及产业应用带来困难。

本研究拟对日光温室骨架合理曲线的数值化构建方法进行研究,当确定日光温室的屋脊点位置、最低作业高度、前屋面屋脊处坡度及前屋面底

脚部位坡度时,可直接给出骨架曲线的数值化表达式,为日光温室建筑设计、加工制造提供一个标准化的数学方法;同时通过数值模拟方法对不同骨架曲线形式的日光温室采光性能进行分析,以期获得既符合工程实际、采光性能又好的骨架曲线形式。

1 骨架曲线的数值化构建

1.1 工程实际应用

日光温室骨架曲线在使用时,要求透光率高,室内光照分布均匀,具有足够的承载能力且保证使用安全。骨架在制作加工时,要求外形简单,易于弯曲加工成型。从弯曲成型设备方面考虑,要求骨架曲线最好具有一致的曲率半径,且半径不宜过小。本研究对北京、天津、河北等多个日光温室园区和骨架加工厂进行调研,目前骨架曲线形式多样,单曲线形式的骨架较少,多采用2种曲线的组合,骨架的主要区别在于曲线的前部,前部曲线多为抛物线、圆弧、直线等(图1),考虑日光温室内的作业空间,要求前部不宜过低。

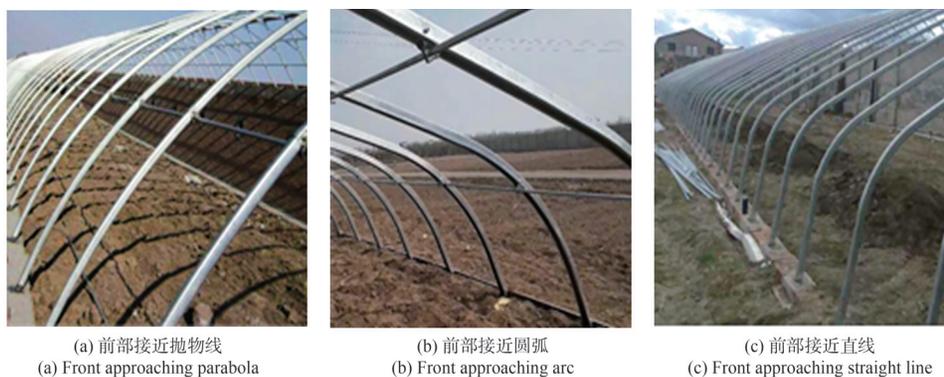


图1 骨架曲线形式

Fig. 1 Skeleton curve form

1.2 曲线设计要求

日光温室骨架曲线在设计时主要依据相关的日光温室设计建造、技术条件等国家、行业及地方标准,标准条目主要集中在对最低作业高度、前屋面底脚及屋脊处的坡度的规定。其中,GB/T 19165—2003《日光温室和塑料大棚结构与性能要求》^[16]规

定日光温室作业最低高度不宜小于0.8 m,前屋面底脚处屋面角宜为 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$,距前屋面底脚水平距离1 m处屋面角度为 40° 左右,距前屋面底脚水平距离2 m处屋面角宜为 25° 左右。NY/T 3223—2018《日光温室设计规范》^[17]规定最低作业高度不宜低于1 m,屋脊处的坡度不应小于 8° ,前屋面底脚部位

的坡度不宜小于 60°。

1.3 数值化构建方法

构建日光温室前屋面骨架曲线计算坐标系见图 2: AC 为骨架曲线, 已知曲线上 A、B、C 3 点坐标分别为 A(0,0), B(x₁,y₁), C(x₂,y₂)。B 点坐标以日光温室最低作业高度为约束条件, 即距前屋面底脚 500 mm 处最低作业高度 ≥ 1 m。C 点为日光温室屋脊点, 横坐标为日光温室前屋面水平投影长度, 纵坐标为温室脊高。同时整个曲线还要满足前屋面屋脊处的坡度 θ₁ ≥ 8°, 前屋面底脚部位的坡度 θ₂ ≥ 60°。

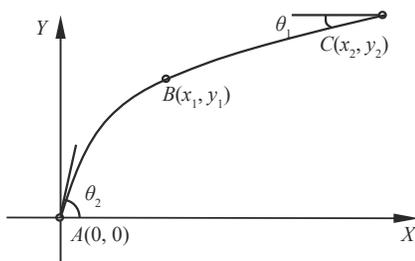


图 2 骨架曲线计算坐标系

Fig. 2 Coordinate calculation of skeleton curve

AB 和 BC 两段曲线的方程分别为:

$$y = S_{AB}(x) \tag{1}$$

$$y = S_{BC}(x) \tag{2}$$

将 A(0,0), B(x₁,y₁) 代入式(1), 得:

$$0 = S_{AB}(0) \tag{3}$$

$$y_1 = S_{AB}(x_1) \tag{4}$$

将 B(x₁,y₁), C(x₂,y₂) 代入式(2), 得:

$$y_1 = S_{BC}(x_1) \tag{5}$$

$$y_2 = S_{BC}(x_2) \tag{6}$$

曲线 AC 在 B 点光滑, 即需要符合两段曲线 AB、BC 在 B 点一阶导相等:

$$S'_{AB}(x_1) = S'_{BC}(x_1) \tag{7}$$

已知屋脊处坡度 θ₁ 和前屋面底脚部位的坡度 θ₂, 则:

$$\tan \theta_1 = S_{BC}'(x_2) \tag{8}$$

$$\tan \theta_2 = S_{AB}'(0) \tag{9}$$

联立式(3)~(9):

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = S_{AB}(0) \\ y_1 = S_{AB}(x_1) \\ y_1 = S_{BC}(x_1) \\ y_2 = S_{BC}(x_2) \\ S'_{AB}(x_1) = S'_{BC}(x_1) \\ \tan \theta_1 = S_{BC}'(x_2) \\ \tan \theta_2 = S_{AB}'(0) \end{array} \right. \tag{10}$$

求解方程组(10), 即可求出 AB、BC 两段曲线方程中的未知数, 并给出曲线具体的数值表达式。

1.4 骨架曲线构造

选取圆弧、抛物线、椭圆、样条曲线、圆弧-抛物线、幂函数、双圆曲线、双抛物线作为骨架曲线形式, 曲线方程及需要确定的已知条件见表 1。设定曲线上 A、B、C 的坐标分别为 A(0,0), B(500 mm, 1 200 mm), C(10 000 mm, 5 500 mm), 按数值化构建方法可给出每条曲线的具体方程, 根据求解出的方程采用 Matlab 软件绘制出的骨架曲线图形见图 3。

表 1 曲线方程及需要确定的已知条件

Table 1 Curve equation and required known conditions

曲线形式 Curve form	曲线方程 Curve equation	已知条件 Required known conditions
圆弧 Circle	$(x - a_1)^2 + (y - b_1)^2 = R^2$	A、B、C 坐标
抛物线 Parabolic	$x = a_1 y^2 + b_1 y + c$	A、B、C 坐标
椭圆 Elliptical	$\frac{(x - x_0)^2}{a_1^2} + \frac{y^2}{b_1^2} = 1$	A、B、C 坐标
样条曲线 Spline	$y = a_1 + b_1 x + c_1 x^2 + d_1 x^3$	A、B、C 坐标, 屋脊处坡度 θ ₁ = 8°
圆弧-抛物线 Circle-parabolic	圆弧 AB: $(x - a_1)^2 + (y - b_1)^2 = R^2$ 抛物线 BC: $y = a_2 x^2 + b_2 x + c$	A、B、C 坐标, B 点光滑, 前屋面底脚部位的坡度 θ ₂ = 88.8°
幂函数 Power function	$y = ax^b$	A、B、C 坐标
双圆曲线 Double circle	AB: $(x - a_1)^2 + (y - b_1)^2 = R_1^2$ BC: $(x - a_2)^2 + (y - b_2)^2 = R_2^2$	A、B、C 坐标, B 点光滑, 前屋面底脚部位的坡度 θ ₂ = 88.8°
双抛物线 Double parabolic	AB: $y = a_1 + b_1 x + c_1 x^2$ BC: $y = a_2 + b_2(x - x_1) + c_2(x - x_1)^2$	A、B、C 坐标, B 点光滑, 屋脊处坡度 θ ₁ = 8°

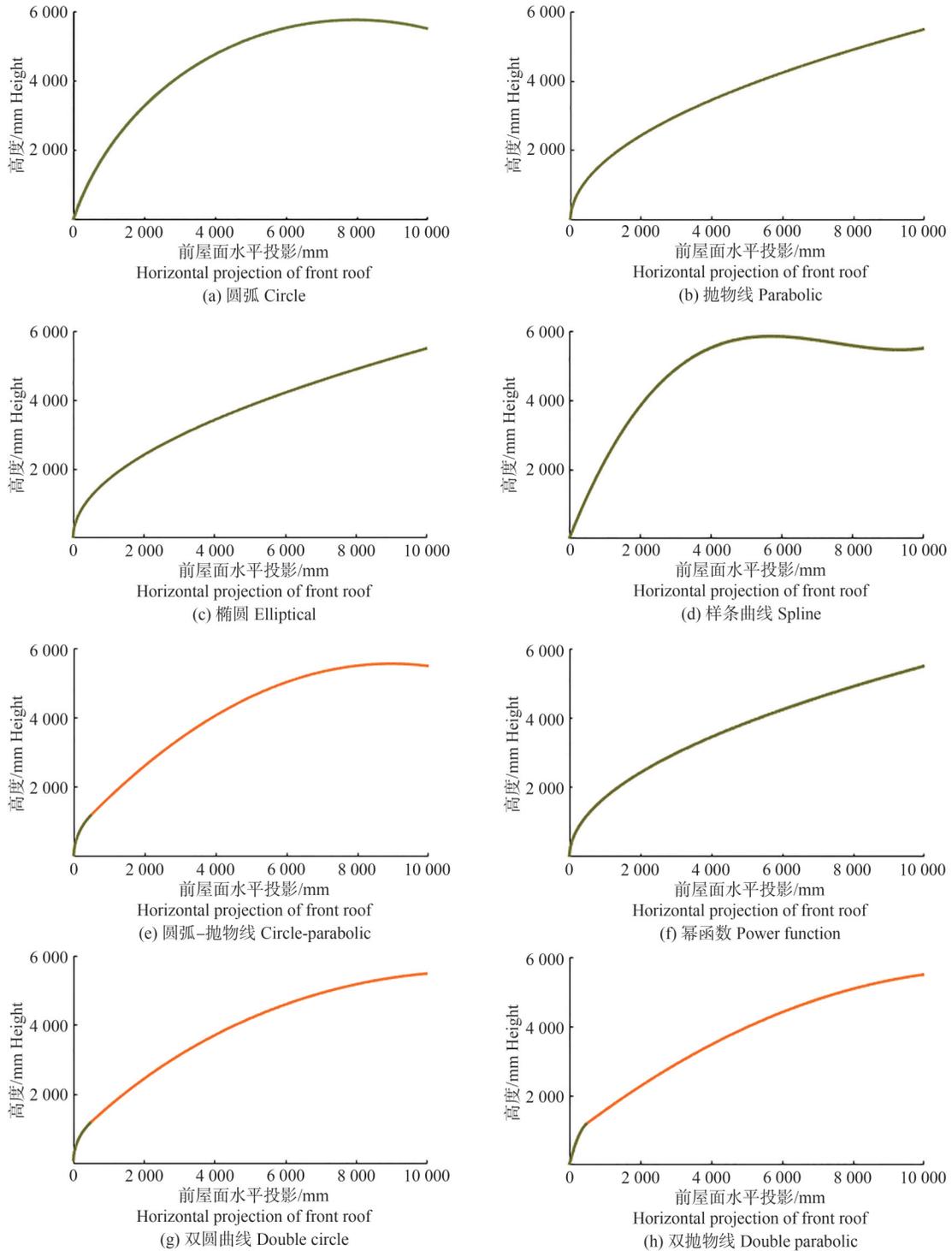


图3 骨架曲线图形

Fig. 3 Skeleton curve graphics

2 结果与分析

2.1 曲线选择分析

依据规范要求对构造好的8种骨架曲线进行分

析,其中屋脊处和前屋面底部部位的坡度,可通过求解骨架曲线方程一阶导,再依据计算曲线在两端的斜率获得,具体计算分析结果见表2。绘制的骨架曲线效果与分析表中的结果基本一致,最终筛选

得到满足规范要求和工程实际的 5 种骨架曲线,分别为抛物线、椭圆、幂函数、双圆曲线、双抛物线,其中双抛物线是根据实际工程应用首次提出的曲线形式。

表 2 骨架曲线满足规范要求分析

Table 2 Analysis of skeleton curves meeting regulatory requirements

曲线形式 Curve form	最低作业高度 ≥ 1 m Minimum operating height ≥ 1 m	$\theta_1 \geq 8^\circ$, $\theta_2 \geq 60^\circ$	结果 Result
圆弧 Circle	满足	不满足	不满足
抛物线 Parabolic	满足	满足	满足
椭圆 Elliptical	满足	满足	满足
样条曲线 Spline	满足	满足	满足
圆弧-抛物线 Circle-parabolic	满足	不满足	不满足
幂函数 Power function	满足	满足	满足
双圆曲线 Double circle	满足	满足	满足
双抛物线 Double parabolic	满足	满足	满足

注： θ_1 为前屋面屋脊处坡度； θ_2 为前屋面底部脚部位坡度。

Note: θ_1 is the slope at the ridge of the front roof; θ_2 is the slope at the foot of the front roof.

2.2 曲线采光性能分析

考虑到不同地理位置的影响,分别选取北京(华北地区,北纬 39.9°)、沈阳(东北地区,北纬 41.8°)、银川(西北地区,北纬 38.5°)3 个代表性城

市,设计不同的日光温室建筑参数组合方案(表 3),对满足规范要求和工程实际的 5 种骨架曲线形式的冬至日日累计太阳辐射进行模拟,探究骨架曲线形式对采光性能的影响。

表 3 建筑参数组合方案

Table 3 Building parameter combination scheme

方案 Scheme	前屋面水平投影/mm Horizontal projection of front roof	脊高/mm Ridge height	最低作业高度/mm Minimum operating height
A	8 000	3 500	1 000
B	9 000	4 500	1 200
C	10 000	5 500	1 200
D	12 000	6 500	1 200

透过日光温室前屋面的日累计太阳辐射量 q 与太阳辐射常数 I_0 、大气质量 m 、大气透明度 p 等参数相关,计算公式^[18-22]如下:

$$q = \sum_{t=t_1}^{t_2} \tau \left\{ I_0 p^m [\cos \theta \sin h + \sin \theta \cos h \cos \alpha] + \frac{(1 - p^m) I_0}{2(1 - 1.4 \ln p)} \sin h \cos^2 \frac{\theta}{2} \right\} F \quad (11)$$

其中:

$$I_0 = 0.001 5x^6 - 0.060 8x^5 + 0.883 9x^4 - 5.284x^3 + 11.58x^2 - 20.099x + 1 418 \quad (12)$$

$$\begin{cases} m = \frac{1}{\sin h} & (h \geq 30^\circ) \\ m = \sqrt{122.9 + (614 \sin h)^2} - 614 \sin h & (h < 30^\circ) \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} p = 0.002 1x^2 - 0.025 4x + 0.700 5 & (\text{北纬 } 25^\circ) \\ p = 0.003 8x^2 - 0.047 1x + 0.770 7 & (\text{北纬 } 30^\circ) \\ p = 0.003 8x^2 - 0.045 9x + 0.769 1 & (\text{北纬 } 35^\circ) \\ p = 0.003 3x^2 - 0.040 9x + 0.772 & (\text{北纬 } 40^\circ) \\ p = 0.003 9x^2 - 0.048 1x + 0.787 & (\text{北纬 } 45^\circ) \end{cases} \quad (14)$$

式中： t_1 、 t_2 分别为保温被卷起和放下时刻， t_1 为9:00， t_2 为16:00； τ 为薄膜透过率，取值0.8； θ 为入射点处屋面切平面与水平面的夹角，(°)； h 为太阳高度角，(°)； α 为太阳方位角，(°)； F 为前屋面可截获太阳辐射的面积， F =前屋面曲线长度×温室长度，温室长度按100 m计算； x 为一年中的月份，取值1, 2, …, 12, 冬至日取12。

太阳高度角以及太阳方位角的计算公式^[19]如下：

$$\sin h = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta \quad (15)$$

$$\delta = 23.45 \cos \left(360 \frac{n - 172}{365} \right) \quad (16)$$

$$\omega = 15 \left[\left(T_0 - \frac{120 - \lambda}{15} \right) - 12 \right] \quad (17)$$

$$\sin \alpha = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos h} \quad (18)$$

式中： φ 为所在地纬度，(°)； δ 为赤纬角，(°)； ω 为太阳时角，(°)； n 为从1月1日开始计算的天数，冬至日取值355； T_0 为北京时刻，取值0, 1, 2, …, 24； λ 为所在地经度，(°)。

采用Matlab软件作为求解计算器，对前屋面曲线沿跨度方向以0.1 m为步长划分，以每个步长2个端点的光照强度平均值作为该步长的平均光照强度，乘以温室长度并进行求和计算，得到该时刻前屋面进光量，再对时间进行累加求和计算，从而得到日累计太阳辐射量。冬至日日累计太阳辐射量模拟结果见表4。

表4 冬至日日累计太阳辐射量

Table 4 The cumulative solar radiation in winter solstice

10¹⁰ J

曲线形式 Curve form	方案A Scheme A			方案B Scheme B			方案C Scheme C			方案D Scheme D		
	沈阳 Shenyang	北京 Beijing	银川 Yinchuan									
抛物线 Parabolic	1.130	1.150	1.190	1.310	1.370	1.420	1.410	1.460	1.520	1.710	1.800	1.860
椭圆 Elliptical	1.075	1.099	1.150	1.258	1.307	1.352	1.380	1.450	1.532	1.660	1.785	1.850
双抛物线 Double parabolic	1.074	1.098	1.161	1.204	1.287	1.350	1.384	1.488	1.560	1.664	1.788	1.871
幂函数 Power function	1.090	1.130	1.180	1.250	1.300	1.350	1.390	1.460	1.510	1.680	1.760	1.820
双圆曲线 Double circle	1.085	1.120	1.165	1.277	1.323	1.375	1.395	1.466	1.546	1.685	1.765	1.832

注：方案A、B、C、D的具体设置见表3。

Note: The specific settings for scheme A, scheme B, scheme C and scheme D are shown in Table 3.

从地域看，冬至日日累计辐射量银川>北京>沈阳，银川较北京高3.2%~5.7%，较沈阳高5.3%~12.7%，北京较沈阳高1.7%~7.5%。从前屋面水平投影长度看，前屋面水平投影长度越大，冬至日日累计太阳辐射量越大。以北京为例，前屋面水平投影长度为10 m时，日累计太阳辐射量较8 m的高29.2%~35.4%，较9 m的高6.5%~15.5%。前屋面水平投影为12 m时，日累计太阳辐射量较8 m的高55.7%~62.7%，较9 m的高

31.3%~38.8%；较10 m的高20.1%~23.1%。从前屋面骨架曲线形式看，以北京为例，当前屋面水平投影长度为8 m时，冬至日日累计太阳辐射量为抛物线>幂函数>双圆曲线>椭圆>双抛物线；抛物线较幂函数、双圆曲线、椭圆、双抛物线分别高1.7%、2.7%、4.4%、4.5%。当前屋面水平投影长度为9 m时，冬至日日累计太阳辐射量为抛物线>双圆曲线>椭圆>幂函数>双抛物线；抛物线比双圆曲线、椭圆、幂函数、双抛物线分别高3.4%、

4.5%、5.1%、6%。当前屋面水平投影长度为 10 m 时,冬至日日累计太阳辐射量为双抛物线>双圆曲线>幂函数>抛物线>椭圆;双抛物线比双圆曲线、幂函数、抛物线、椭圆分别高 1.4%、1.8%、1.85%、2.5%。当前屋面水平投影长度为 12 m 时,冬至日日累计太阳辐射量为抛物线>双抛物线>椭圆>双圆曲线>幂函数;抛物线比双抛物线、椭圆、双圆曲线、幂函数分别高 0.68%、0.83%、1.9%、2.2%。对不同曲线形式下的日累计太阳辐射量进行统计分析,双抛物线与其他 4 种曲线形式下日累计太阳辐射量之间的差异在 0.56%~6.31%。由此可见,采用本研究提出的数值方法构造出的双抛物线形式的骨架曲线在采光性能方面是可靠的。

2.3 曲线适用性分析

依据本研究提出的曲线数值化构造方法,通过确

定屋脊点位置、最低作业高度、前屋面屋脊处坡度以及前屋面底脚部位坡度时,基本上能确定出合理的骨架曲线,减少了设计中的随意性。在实际设计时,这些参数均可在一定范围内调整。但采用本研究提出的方法构造圆弧、圆弧-抛物线、样条曲线(图 3 和表 2)时,构造的曲线不符合规范要求 and 工程实际。当曲线为抛物线、椭圆、幂函数时,构造这些曲线只需要确定屋脊点位置和最低作业高度 2 个条件,屋脊处和底脚部位坡度这两个参数需要根据构造好的曲线进行反算,从而确定该曲线是否满足规范要求。对于双圆曲线,当最低作业高度>1.4 m 时,构造的骨架曲线不满足规范要求和工程实际(图 4(a)和(b))。对于双抛物线来说,前屋面水平投影为 6~14 m、最低作业高度为 1~1.8 m 时,均可以构造出既符合规范要求又符合工程实际的曲线(图 4(c)和(d))。

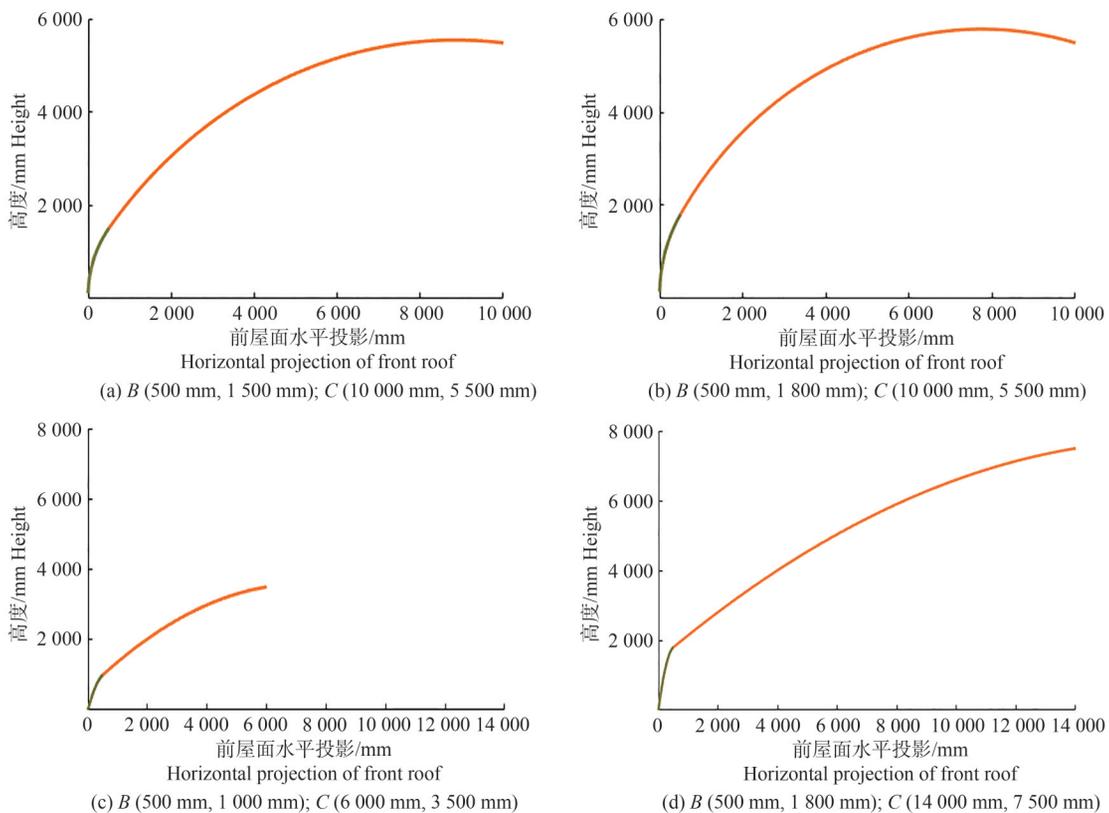


图 4 不同 B、C 点坐标构造出的双圆曲线和双抛物线

Fig.4 Double circular curves and double parabolas constructed with different coordinates of points B and C

对于设计出的骨架曲线,是否具有良好采光和力学承载能力,需要进行一定的模拟和实际校核验证。本研究在对曲线进行数值化构造时,对屋脊处坡度、前屋面底脚部位坡度的要求,就是针对采光

性能方面提出的。在曲线构造之后,提出采用冬至日的日累计太阳辐射作为采光性能评价指标,对不同城市不同曲线形式下的日累计太阳辐射进行了模拟计算,也是验证构造好的曲线是否具备良好的

采光性能。但在力学承载能力方面,还需要进一步计算不同荷载组合下曲线拱架受力情况。

3 结论

本研究提出了一种日光温室骨架合理曲线的数值化构建方法,当确定屋脊点位置、最低作业高度、前屋面屋脊处坡度以及前屋面底部部位坡度时,可直接给出骨架曲线的数值化表达式。结合工程实际应用,提出双抛物线骨架曲线形式,对抛物线、椭圆、双抛物线、幂函数、双圆曲线5种骨架曲线形式的日光温室进行采光性能模拟,5种骨架曲线形式下冬至日日累计太阳辐射量之间的最大差值为6.31%,双抛物线作为骨架曲线在采光性和适用性能上是可靠的。当前屋面水平投影为6~14 m、最低作业高度为1~1.8 m时,均可构造出既符合规范要求又符合工程实际的双抛物线曲线。

参考文献 References

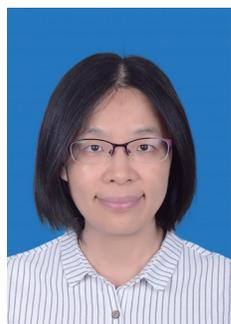
- [1] 陈端生,郑海山,张建国,邱建军.日光温室气象环境综合研究(三):几种弧型采光屋面温室内直射光量的比较研究[J].农业工程学报,1992,8(4):78-82
Chen D S, Zheng H S, Zhang J G, Qiu J J. A comprehensive research on the meteorological environment in sun light greenhouse (III): A comprehensive research on the total amount of direct radiation in the greenhouse with different arc lighting surface [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1992, 8(4):78-82 (in Chinese)
- [2] 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
Wang C D, Shi W M, Pei X W. Comparing the front roof permeated sunlight performances and the arch mechanical performances of four curvilinear roofs of solar greenhouse [J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2010, 38(8):143-150(in Chinese)
- [3] 孙忠富,吴毅明,曹永华,李佑祥.日光温室中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):36-42
Sun Z F, Wu Y M, Cao Y H, Li Y X. A method of computer simulation of direct solar radiation within greenhouses: The third part of serial studies on simulation of light environment of farming under structure [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1993, 9(1): 36-42 (in Chinese)
- [4] 曹永华,孙忠富,吴毅明,李佑祥.温室采光辅助设计软件(GRLT)的研制:设施农业光环境模拟分析研究之二[J].农业工程学报,1992,8(4):69-77
Cao Y H, Sun Z F, Wu Y M, Li Y X. Research of auxiliary designing software GRLT in light transmissivity of greenhouse: The second part of serial studies in simulation of light environment in protected cultivation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1992, 8(4):69-77 (in Chinese)
- [5] 刘俊杰,邹志荣.无柱式日光温室的骨架结构优化研究[J].宁夏工学院学报,1996(S1):254-257
Liu J J, Zou Z R. Frame optimization of solar greenhouse without an inner post [J]. *Journal of Ningxia Institute of Technology*, 1996(S1): 254-257 (in Chinese)
- [6] 高志奎,魏兰阁,王梅,刘保云,任士福.日光温室采光性能的实用型优化研究[J].河北农业大学学报,2006,29(1):1-5
Gao Z K, Wei L G, Wang M, Liu B Y, Ren S F. Studies on practical optimization of lighting performance in solar greenhouse [J]. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2006, 29(1): 1-5 (in Chinese)
- [7] 赵显权.关中地区日光温室前屋面曲线标准化设计[J].农业开发与装备,2022(1):135-138
Zhao Y Q. Standardized design of front roof curve of solar greenhouse in Guanzhong area [J]. *Agricultural Development & Equipments*, 2022(1): 135-138 (in Chinese)
- [8] 张锁峰,白文斌,潘天任,武志明,王玉顺.我国北方日光温室前屋面采光曲线最优化设计[J].山西农业大学学报:自然科学版,2013,33(4):336-341
Zhang S F, Bai W B, Pan T R, Wu Z M, Wang Y S. Study on the optimized parameters of lighting curve of front roof of solar greenhouse in the north of China [J]. *Journal of Shanxi Agricultural University: Natural Science Edition*, 2013, 33(4): 336-341 (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 马坤.四种屋面曲线日光温室采光性能的试验分析[D].太谷:山西农业大学,2016
Ma K. Experimental analysis of the lighting performance of several roof curve sunlight greenhouse [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2016 (in Chinese)
- [11] 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(1):157-160
Zhou C J. Frame optimization of solar greenhouse with an inner post [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1994(1): 157-160 (in Chinese)
- [12] 程杰宇,赵淑梅,马承伟,夏楠,王平智.外形基本条件约束下的日光温室屋面曲线设计与解析[J].新疆农业科学,2014,51(6):981-989
Cheng J Y, Zhao S M, Ma C W, Xia N, Wang P Z. Designing and analysis of solar greenhouse roof curve under the constraint of the basic condition for shape [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2014, 51(6): 981-989 (in Chinese)
- [13] 周长吉,孙山,吴德让.日光温室前屋面采光性能的优化[J].农业工程学报,1993,9(4):58-61
Zhou C J, Sun S, Wu D R. Optimal curve shape of energy-saving sunlight greenhouse with respect to light transmissivity [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1993, 9(4): 58-61 (in Chinese)
- [14] 佟国红.日光温室前屋面优化及结构分析[J].农业工程学报,1999,15(2):240-241
Tong G H. Optimization and structural analysis of front roof of solar greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1999, 15(2): 240-241 (in Chinese)
- [15] 佟国红,李永奎,孟少春,毕翠玉.利用动态规划设计温室前屋面最佳形状的研究[J].沈阳农业大学学报,1998,29(4):340-342

- Tong G H, Li Y K, Meng S C, Bi C Y. Designing optimum shape of greenhouse south roof with dynamic programming [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 1998, 29(4): 340-342 (in Chinese)
- [16] GB/T 19165—2003 日光温室和塑料大棚结构与性能要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004
- GB/T 19165—2003 Structure and properties requirement for sunlight greenhouse and plastic tunnel. Beijing: Standards Press of China, 2004 (in Chinese)
- [17] NY/T 3223—2018 日光温室设计规范[S]. 北京: 中国农业出版社, 2018
- NY/T 3223—2018 Code for design of Chinese solar greenhouse [S]. Beijing: China Agriculture Press, 2018 (in Chinese)
- [18] 陈超. 现代日光温室建筑热工设计理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 63-64
- Chen C. *Theory and Method of Thermal Design of Modern Solar Greenhouse*[M]. Beijing: Science Press, 2017: 63-64 (in Chinese)
- [19] 彦启森, 赵庆珠. 建筑热过程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986: 9-16
- Yan Q S, Zhao Q Z. *Building Thermal Process*[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1986: 9-16 (in Chinese)
- [20] Chen J T, Ma Y W, Pang Z Z. A mathematical model of global solar radiation to select the optimal shape and orientation of the greenhouses in Southern China[J]. *Solar Energy*, 2020, 205: 380-389
- [21] 许红军, 曹晏飞, 李彦荣, 高杰, 蒋卫杰, 邹志荣. 日光温室太阳辐射模型构建及应用[J]. 农业工程学报, 2019, 35(7): 160-169
- Xu H J, Cao Y F, Li Y R, Gao J, Jiang W J, Zou Z R. Establishment and application of solar radiation model in solar greenhouse [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(7): 160-169 (in Chinese)
- [22] Huang L, Deng L H, Li A G, Gao R, Zhang L H, Lei W J. Analytical model for solar radiation transmitting the curved transparent surface of solar greenhouse[J]. *Journal of Building Engineering*, 2020, 32: 101785

责任编辑: 刘迎春



第一作者简介: 齐飞, 研究员。长期从事设施农业结构设计理论研究、新型设施装备与材料研发与推广、设施农业产业发展理论研究、农业工程设计咨询等工作, 主持或参与国家及地方科研项目40余项、设计咨询项目30余项, 发表论文40余篇、主编或参编著作11部, 制定国家和行业标准10余项, 获省部级奖7项。



通讯作者简介: 何芬, 博士, 正高级工程师。长期从事设施园艺环境调控技术、智能生产装备研究及相关设计研究工作, 主持或参加国家和省部级科研项目30余项, 发表论文50余篇、主编或参编著作5部, 制定行业、团体和企业标准10余项, 授权专利25件、软件著作权3项。