

塑料大棚结构风振响应规律研究

姜迎春^{1,2} 白义奎² 王永刚³ 王毅² 周东升³

1. 沈阳农业大学工程学院, 沈阳 110866; 2. 沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866;
3. 沈阳农业大学信息与电气工程学院, 沈阳 110866

摘要 为研究塑料大棚结构的风振响应规律, 提出了塑料大棚结构风振响应分析的被研究块体方法, 推导了塑料大棚骨架结构单元段的段间内力计算公式, 设计了被研究块体构成方式, 构建骨架结构中被研究块体的力学模型, 给出了被研究块体方法实现过程; 采用等截面圆柱杆的波动传播算例, 验证了方法的有效性。在同时考虑平均风和脉动风作用、仅考虑脉动风作用、仅考虑平均风作用的 3 种工况下, 针对不同跨度塑料大棚骨架结构的风振响应进行时程分析, 得到骨架结构的节点位移和截面应力空间最大值的出现位置。结果表明: 节点位移和截面应力均为脉动风荷载作用的计算结果明显大于平均风荷载作用的计算结果。因此, 塑料大棚结构的风振响应分析需要考虑脉动风荷载的作用。

关键词 塑料大棚结构; 风振响应; 波动方法; 被研究块体; 脉动风压

中图分类号 TU 261; S 26⁺1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2018)05-0123-08

大风可以导致塑料大棚结构倒塌, 并造成严重的经济损失^[1-2], 2014 年 5 月 11 日我国辽宁省营口盖州地区出现 10 级大风, 蔬菜基地 66.7 hm² 大棚受损^[3]。塑料大棚属轻型结构, 跨度较大、骨架柔长细薄, 结构外侧覆盖着柔性的塑料薄膜, 使得这种结构对风荷载较为敏感。

温室结构的安全问题及其承载能力问题逐渐被关注。对塑料大棚结构在风荷载作用下的时程分析可以精确地掌握塑料大棚结构的受力特点。针对温室结构的风荷载及其承载力问题研究主要有试验和数值模拟方法。通过试验获得数据是研究温室结构承载力和风压系数的重要方法^[4-6]。Morcou^[4] 采用不同的静力载荷模拟最大风荷载, 对全尺寸温室模型进行承载力试验研究, 并获得加载、卸载阶段的荷载与横向侧移关系; Kwon 等^[6] 研究沿海区域风对大棚的结构安全影响, 并在风洞中测量了 4 种典型单跨温室的风压系数。由于试验费用高周期长且不能对每个结构都进行试验研究, 因此, 难以获得抗风性能优化的结构。随着计算机的出现和数值计算方法的发展, 针对温室结构的数值模拟研究也得到快速发展。国内外学者对温室结构的风压系数^[7-9]、

温室结构承载力和受力特点^[4,10-12] 等方面进行了大量的研究工作。Kim 等^[8] 考虑了风向、跨度数和温室设计因素, 模拟了结构表面的风压系数; Briasoulis 等^[10] 建立了多跨度钢温室的二维框架和三维结构模型, 分析风雪共同作用下温室结构的失效问题; 丁敏等^[11] 模拟了风雪灾害下温室结构的破坏过程。在研究温室结构承载力和受力特点时, 目前通常以准静态荷载组合的形式进行温室结构承载力研究。

结构振动是结构中波动传播的外在表现形式, 本研究从塑料大棚结构的波动传播角度, 提出塑料大棚结构风振响应分析的被研究块体方法, 并验证方法的有效性, 分别针对平均风和脉动风共同作用、仅考虑脉动风作用、仅考虑平均风作用 3 种工况, 分析 6 m 跨度和 10 m 跨度塑料大棚结构的不同空间点的位移、截面内力的响应规律, 以为塑料大棚结构的抗风设计提供科学依据。

1 塑料大棚骨架结构风振响应分析方法

为模拟塑料大棚骨架结构中弯曲波的传播过

收稿日期: 2018-02-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(61673281); 中国博士后科学基金项目(2014M561250); 辽宁省博士启动基金项目(201601112)

姜迎春, 博士, 讲师. 研究方向: 结构动力分析与数值模拟. E-mail: jyicg-72@163.com

通信作者: 白义奎, 博士, 教授. 研究方向: 设施环境工程. E-mail: baiyikui@163.com

程,首先给出塑料大棚骨架结构的控制方程,包括推导骨架结构单元段的段间内力计算公式、设计被研究块体的构成方式、构建骨架结构中被研究

块体的力学模型,然后给出算法的递推过程。塑料大棚结构风振响应分析方法的策略结构图如 1 所示。

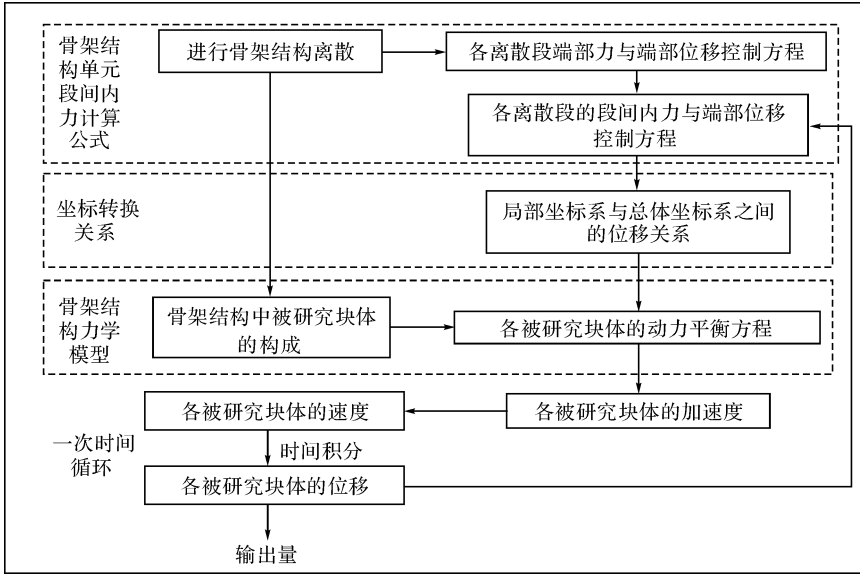


图 1 塑料大棚结构风振响应分析策略结构图

Fig.1 The wind-induced response analysis of plastic greenhouse structure

1.1 塑料大棚骨架结构的控制方程

1) 骨架结构单元段的段间内力计算公式。单元 l 的端部力和段间内力如图 2 所示。沿构件轴向方向(即 x' 轴)左端设为 i ,右端设为 j 。取左半段中间截面上的段间轴力 N_l 拉为正,段间剪力 V_l 向上为正,段间弯矩 M_l 顺时针为正。根据梁理论^[13-14],考虑构件弯曲和剪切变形时,可得到单元 l 的两端内力与位移关系如下:

$$N_j = -N_i = \frac{E_l A_l}{L_l} (u'_j - u'_i) \quad (1)$$

$$V_j = -V_i = K_{1l} (\omega'_j - \omega'_i) + K_{2l} (\theta'_i + \theta'_j) \quad (2)$$

$$M_i = K_{2l} (\omega'_j - \omega'_i) + K_{3l} \theta'_i + K_{4l} \theta'_j \quad (3)$$

$$M_j = K_{2l} (\omega'_j - \omega'_i) + K_{4l} \theta'_i + K_{3l} \theta'_j \quad (4)$$

式中: N_i, V_i, M_i 为单元 l 的 i 端轴力、剪力和弯矩; N_j, V_j, M_j 为单元 l 的 j 端轴力、剪力和弯矩;

$K_{1l} = \frac{12E_l I_l}{L_l^3} \frac{1}{1+2\eta_l}, K_{2l} = \frac{6E_l I_l}{L_l^2} \frac{1}{1+2\eta_l}, K_{3l} =$

$\frac{4E_l I_l}{L_l} \frac{1+0.5\eta_l}{1+2\eta_l}, K_{4l} = \frac{2E_l I_l}{L_l} \frac{1-\eta_l}{1+2\eta_l}; \eta_l = 6E_l I_l /$

$(L_l^2 G_l A_l)$ 是剪切变形修正系数; L_l 是单元 l 的长度; E_l 为单元 l 的弹性模量、 A_l 为单元 l 的横截面的面积、 I_l 为单元 l 的截面惯性矩、 G_l 为单元 l 的剪切弹性模量; $u'_i, \omega'_i, \theta'_i$ 分别是单元 l 的 i 端轴向

位移、横向侧移和转角; $u'_j, \omega'_j, \theta'_j$ 分别是单元 l 的 j 端轴向位移、横向侧移和转角。

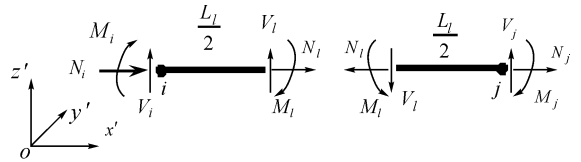


图 2 单元 l 的端部和段间的受力图

Fig.2 Free-body diagrams of element l by an imaginary plane cutting at the median cross section

由单元 l 左半段的平衡方程,可得

$$N_l = -N_i, V_l = -V_i, M_i + M_l - V_l \frac{L_l}{2} = 0 \quad (5)$$

由单元 l 右半段弯矩平衡方程,可得

$$M_j - M_l - V_l \frac{L_l}{2} = 0 \quad (6)$$

则由式(1)~(6),可得单元 l 的段间轴力 N_l 、段间剪力 V_l 和段间弯矩 M_l 分别为

$$N_l = \frac{E_l A_l}{L_l} (u'_j - u'_i) \quad (7)$$

$$V_l = K_{1l} (\omega'_j - \omega'_i) + K_{2l} (\theta'_i + \theta'_j) \quad (8)$$

$$M_l = \frac{E_l I_l}{L_l} (\theta'_j - \theta'_i) \quad (9)$$

2) 骨架结构中被研究块体的力学模型。在塑

料大棚结构中, 给出骨架结构中被研究块体的构成, 以实现波在骨架结构中的传播, 如图 3 所示。骨架中的被研究块体是由与节点相关联的离散段的一半构成, 被研究块体 A 是由与节点相连的相邻上弦杆和腹杆的一半构成, 即左侧虚线椭圆所围区域, 可用单元 l 的端点编号 i 来表示该被研究块体, 其受力来自相应薄膜的压力以及离散构件的中间截面内力。被研究块体 B 是由与节点相连的相邻下弦杆和腹杆的一半构成, 即右侧虚线椭圆所围区域, 其受力来自离散构件的中间截面内力。

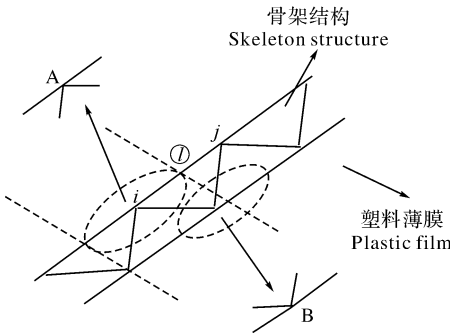


图 3 骨架结构中被研究块体的构成

Fig.3 The investigated lump of the skeleton structure

设与被研究块体 i 相关联的构件数为 n , 由图 2 中第 l 单元的段间内力向相应的被研究块体分配, 则针对被研究块体 i 建立的动力平衡方程组为:

$$m_i \ddot{u}_i = \sum_{l=1}^n (N_l \cos \varphi_l - V_l \sin \varphi_l) + P_{ix} \quad (10)$$

$$m_i \ddot{w}_i = \sum_{l=1}^n (N_l \sin \varphi_l + V_l \cos \varphi_l) + P_{iz} \quad (11)$$

$$J_i \ddot{\theta}_i = \sum_{l=1}^n \left(M_l - V_l \frac{L_l}{2} \right) \quad (12)$$

式中: m_i 、 J_i 分别为被研究块体 i 的质量和绕端点轴的转动惯量; φ_l 是第 l 单元的局部坐标系的 x' 轴与总体坐标系 x 轴的夹角; \ddot{u}_i 、 \ddot{w}_i 、 $\ddot{\theta}_i$ 分别为被研究块体 i 沿 x 轴、 z 轴方向的加速度、绕端点轴的角加速度。 N_l 、 V_l 、 M_l 分别为第 l 单元的段中轴力、剪力和弯矩; P_{ix} 、 P_{iz} 分别为被研究块体 i 沿 x 轴、 z 轴方向的外荷载。

3) 坐标转换关系。被研究块体 i 的动力平衡方程是在总体坐标下建立的, 而求段间内力时需要使用局部坐标系下的位移, 因而需要建立局部坐标系与总体坐标系之间的位移关系式, 即:

$$\begin{Bmatrix} u_i \\ w_i \\ \theta_i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_l & \sin \varphi_l & 0 \\ -\sin \varphi_l & \cos \varphi_l & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_l \\ w_l \\ \theta_l \end{Bmatrix} \quad (13)$$

1.2 算法实现

通过已知风速, 计算得到每个时刻风向沿高度变化的脉动风压力, 将脉动风压力与平均风压力之和施加到骨架结构节点上, 进行时间积分, 给出各时间离散步上的水平和竖向位移。在时间域递归计算的过程如下。

步骤 1: 在被研究块体上施加脉动风压力, 利用式(10)~(12), 分别计算 \ddot{u}_i^t 、 \ddot{w}_i^t 和 $\ddot{\theta}_i^t$;

步骤 2: 时间积分给出 $\dot{u}_i^{t+\Delta t/2}$ 、 $\dot{w}_i^{t+\Delta t/2}$ 和 $\dot{\theta}_i^{t+\Delta t/2}$;

步骤 3: 时间积分给出 $u_i^{t+\Delta t}$ 、 $w_i^{t+\Delta t}$ 和 $\theta_i^{t+\Delta t}$, 由式(13)给出 $u_l^{t+\Delta t}$ 、 $w_l^{t+\Delta t}$ 和 $\theta_l^{t+\Delta t}$;

步骤 4: 利用式(7)、式(8)和式(9), 分别计算 $N_l^{t+\Delta t}$ 、 $V_l^{t+\Delta t}$ 和 $M_l^{t+\Delta t}$;

步骤 5: 回到步骤 1 进行递推运算。

应用上述算法进行递推运算可获得塑料大棚结构的风振响应。

1.3 方法有效性验证

以圆柱杆(半径为 a)的弯曲波波速问题为例。当材料泊松比 $\nu=0.29$ 时, 采用本研究提出的方法得到无量纲 a/Λ 与相速 C/C_0 的关系曲线如图 4 所示。其中 Λ 为波长, C 为弯曲波波速, C_0 为纵向弹性波波速。计算结果与文献[15]中的精确理论结果基本一致, 因此, 本研究建立的方法可用于分析塑料大棚骨架结构的风振响应。

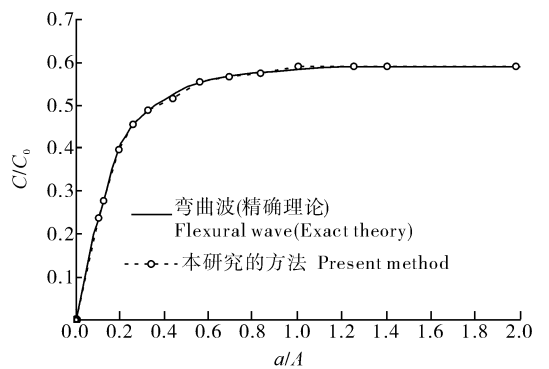


图 4 圆柱杆弯曲波相速度 ($\nu=0.29$)

Fig.4 Phase velocity of flexural waves in cylindrical bars ($\nu=0.29$)

2 塑料大棚骨架结构风振响应分析

2.1 塑料大棚的计算模型与参数

1) 计算模型 1: 6 m 跨度。6 m 跨度的塑料大棚骨架结构如图 5A 所示。脊高 2.5 m。上弦杆: 钢管直径为 22 mm, 钢管壁厚为 2.0 mm。下弦杆: 钢筋

直径为 12 mm,腹杆直径为 8 mm。钢筋强度等级为 HRB300。骨架结构共有 55 个节点,即有 55 个被研究块体,节点编号由左向右,设上弦杆为 1~28,如图 5A 灰色圆点位置分别为节点 4、节点 13 和节点 23;下弦杆为 29~55,图中黑色圆点位置分别为节点 29、节点 50 和节点 55。以节点相间的各段为一个离散段,共 107 个离散段。离散段编号由左向右,设上弦杆为①~⑲,下弦杆为㉘~㉚,腹杆为㉛~㉞。计算时间步长取 0.25 ms。

2)计算模型 2:10 m 跨度。10 m 跨度的塑料大棚骨架结构如图 5B 所示。脊高 2.8 m。上弦杆:钢管直径为 33 mm,钢管壁厚为 3.3 mm。下弦杆:钢筋直径为 12 mm,腹杆直径为 8 mm。骨架结构的节点与离散段编号与图 5A 相同。

2.2 风荷载输入参数

由文献[16]计算得到本试验的输入风荷载参数:离地 10 m 处平均风速 29.67 m/s。由文献[17]可得到塑料大棚结构的地面粗糙度指数为 0.16,地面粗糙度系数为 0.03。采用 Davenport 谱,模拟塑料大棚结构表面不同空间点的脉动风压时程。图 6 仅给出模拟得到的塑料大棚结构表面点 4 和点 13 的脉动风压时程曲线。通过模拟得到的脉动风压时程可以得到每个节点脉动风力时程。脉动风力时程与平均风力时程相叠加,最终获得塑料大棚骨架结构的输入荷载,塑料大棚左侧为迎风面,如图 5 中所示的方向。由于篇幅所限,风荷载时程模拟方法略。

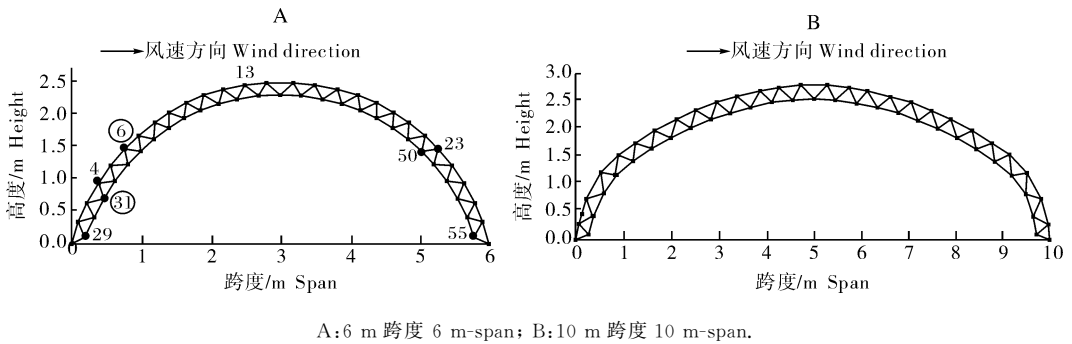


图 5 塑料大棚骨架结构示意图

Fig.5 The skeleton structure of plastic greenhouses

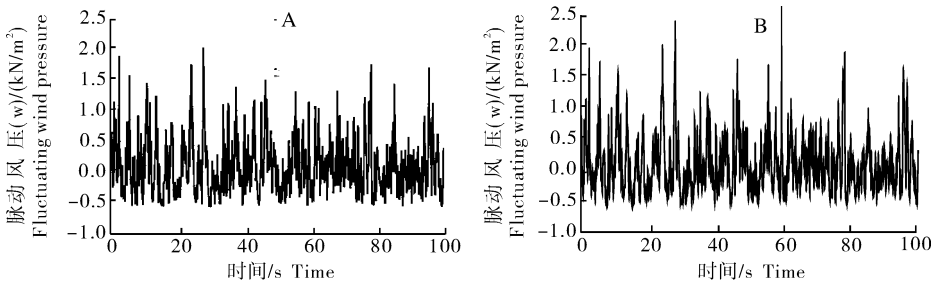


图 6 塑料大棚骨架结构不同点的脉动风压时程曲线

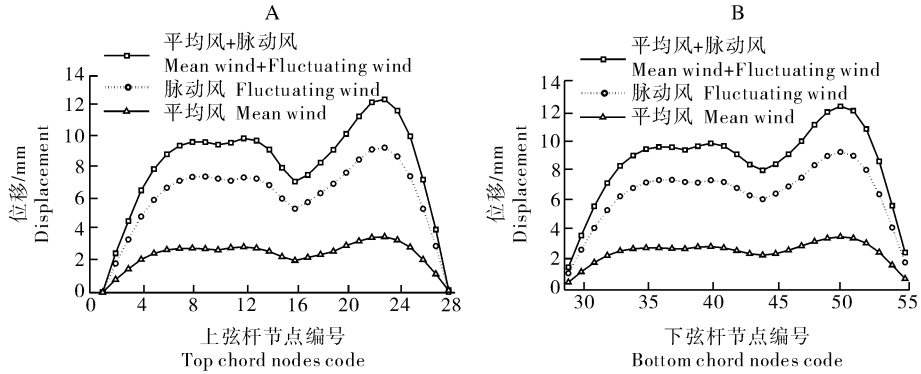
Fig.6 The time history curve of fluctuating wind pressure at different space points of the plastic greenhouses structure

2.3 计算结果分析

1)节点位移最大值比较曲线。图 7、图 8 分别为 6 m 跨度和 10 m 跨度的骨架结构各节点位移最大值的空间分布曲线。位移最大值是指选取各节点时程记录中的最大值。图 7、图 8 中“平均风+脉动风”表示同时考虑平均风和脉动风荷载作用的计算结果,“脉动风”表示只考虑脉动风荷载作用的计算结果,

“平均风”表示只考虑平均风荷载作用的计算结果。

由图 7 可知,上弦杆位移在空间上的最大值为 12.5 mm,出现在节点 23 位置处,下弦杆位移在空间上的最大值为 12.54 mm,出现在节点 50 位置处。与这 2 个节点相近位置,是位移最大值在空间上达到较大的范围。由图 5A 可知,该范围为背风面约 1.5 m 高度处。



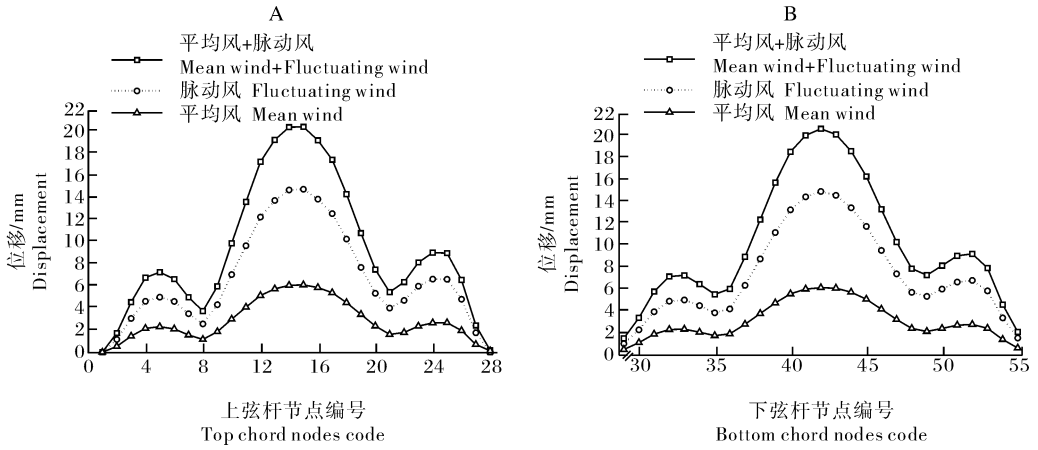
A: 上弦杆 Top chord; B: 下弦杆 Bottom chord.

图 7 6 m 跨度塑料大棚节点位移最大值空间分布曲线

Fig.7 Distribution curves of the maximum displacement at nodes of 6 m-span plastic greenhouse

由图 8 可知,上弦杆位移在空间上的最大值为 20.5 mm,出现在节点 15 位置处,下弦杆位移在空

间上的最大值为 20.8 mm,出现在节点 42 位置处。由图 5B 可知,节点 15 和 42 处于塑料大棚顶部。



A: 上弦杆 Top chord; B: 下弦杆 Bottom chord.

图 8 10 m 跨度塑料大棚节点位移最大值空间分布曲线

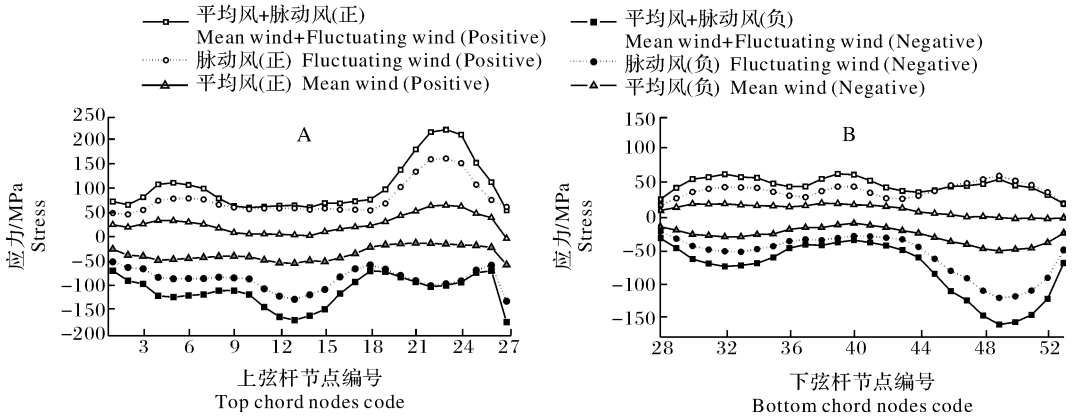
Fig.8 Distribution curves of the maximum displacement at nodes of 10 m-span plastic greenhouse

间上的最大值为 20.5 mm,出现在节点 15 位置处,下弦杆位移在空... 由图 7、图 8 可知:不同跨度的塑料大棚各节点位移最大值均为“平均风+脉动风”的最大,“脉动风”的次之,“平均风”的最小。仅考虑脉动风荷载作用时的节点位移最大值约为仅考虑平均风荷载作用时的 2.5 倍。

间上的最大值为 20.8 mm,出现在节点 42 位置处。由图 5B 可知,节点 15 和 42 处于塑料大棚顶部。

2) 各离散段截面总应力最大值比较曲线。图 9、图 10 分别表示 6 m 跨度和 10 m 跨度的塑料大棚骨架结构各离散段截面总应力最大值的空间分布比较曲线。总应力是轴向应力与弯曲应力之和。图 9、图 10 中“平均风+脉动风”、“脉动风”、“平均风”与图 7 所表示的工况相同;“正”表示拉应力的最

大值、“负”表示压应力的最大值。由图 9 可知:在同时考虑平均风和脉动风作用下,上弦杆各杆中,拉应力在迎风面 2 m 以下各段中有所增加;在 2 m 以上基本相同;在背风面 1.5 m 高度处达到空间的最大值 224 MPa;压应力在骨架顶部附近和背风面最底端的离散段截面中较大。下弦杆各杆中,拉应力最大值略有波动,但相差不大;压应力在迎风面 2 m 以下各段中有所增加;在 2 m 以上趋于平缓;在背风面 1.3 m 高度处达到空间的最大值 156 MPa。



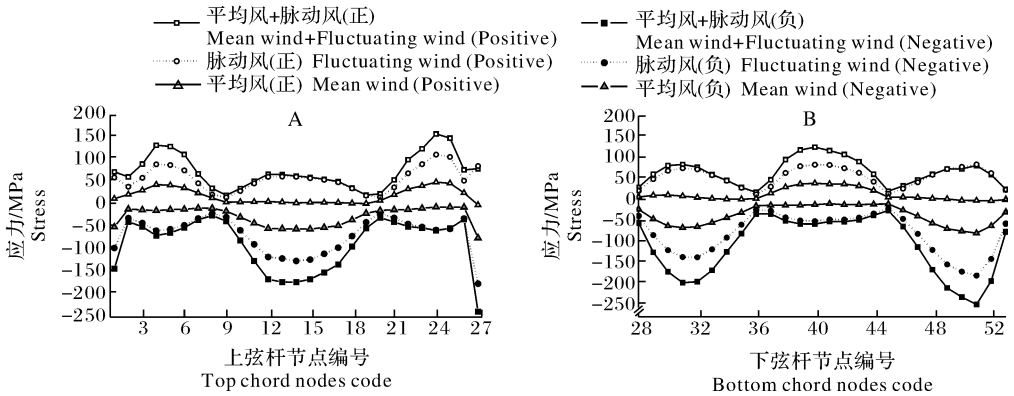
A: 上弦杆 Top chord; B: 下弦杆 bottom chord.

图 9 6 m 跨度塑料大棚各离散段截面总应力最大值空间分布曲线

Fig.9 Distribution curve of maximum stress at cross-sections of 6 m-span plastic greenhouse

由图 10 可知:在同时考虑平均风和脉动风作用下,上弦杆各杆中,拉应力在迎风面 2 m 以下各段中有所增加,在 2 m 以上略有差别;在背风面 1.5 m 高度处达到空间的最大值 158 MPa;压应力在骨架

顶部为 172 MPa,背风面最底端为 238 MPa。下弦杆各杆中,拉、压应力在迎风面 1.2 m、骨架顶部、背风面 1.5 m 附近各段均有所增加;压应力在背风面 1.4 m 高度处达到空间的最大值 246 MPa。



A: 上弦杆 Top chord; B: 下弦杆 Bottom chord.

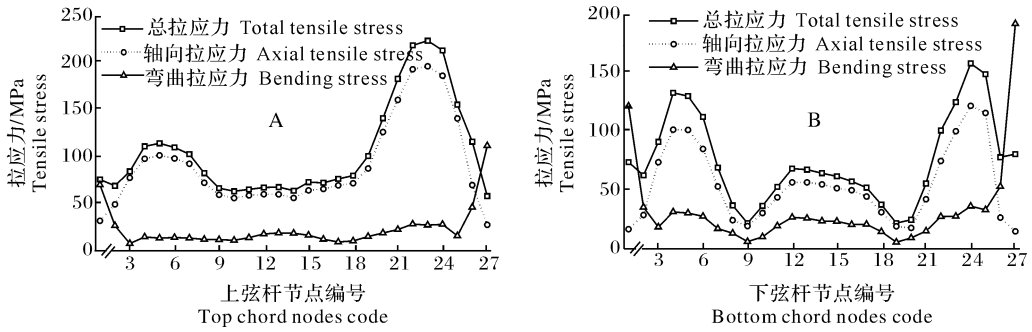
图 10 10 m 跨度塑料大棚各离散段截面总应力最大值空间分布曲线

Fig.10 Distribution curve of maximum stress at cross-sections of 10 m-span plastic greenhouse

由图 9、图 10 可知:对于不同跨度的塑料大棚,各离散段截面总应力最大值分布规律基本一致,拉、压应力空间分布的最大值均出现在背风面约 1.5 m 高度处。无论是上弦杆还是下弦杆,应力最大值从总体上看“平均风+脉动风”的最大,“脉动风”的次之,“平均风”的最小。但在某些位置,由于平均风荷载作用时的应力值很小,使得这些位置“平均风+脉动风”与“脉动风”的应力值基本相同(如图 9 上弦杆中离散段 9~14 的拉应力,离散段 19~25 的压应力;图 10 上弦杆中离散段 9~19 的拉应力,离散段 22~26 的压应力),甚至出现“脉动风”大于“平均

风+脉动风”的情况(如图 9 下弦杆中离散段 46~52 的拉应力)。可见脉动风荷载对塑料大棚结构截面应力影响是非常重要的。

3)各离散段截面拉应力分量的比较曲线。图 11 表示同时考虑平均风和脉动风作用下,上弦杆各离散段截面拉应力分量的比较曲线。无论是 6 m 跨度,还是 10 m 跨度的塑料大棚,总应力主要分量均为轴向应力,但在离散段 1、2、26 和 27 截面处,弯曲应力占主要分量。对于塑料大棚结构轴向力为主要内力,弯矩对骨架结构两端截面内力的影响不可忽略。



A: 6 m 跨度 6 m-span; B: 10 m 跨度 10 m-span.

图 11 各离散段拉应力分量的比较曲线

Fig.11 The comparison curve of tensile stress component

3 讨论

本研究提出了塑料大棚骨架结构风振响应的被研究块体方法,并通过等截面圆柱杆中波长与相速关系曲线^[15]对比验证所提方法的有效性。给出的被研究块体构成方式物理意义直观明确,为处理风荷载作用下塑料大棚结构动力问题提供新型的力学模型和分析方法,该方法无需对传统的动力学方程组进行求解。

采用所提方法分别针对 3 种工况下(同时考虑平均风和脉动风作用、仅考虑脉动风作用、仅考虑平均风作用)、6 m 和 10 m 跨度的塑料大棚结构的风振响应进行时程分析,获得骨架结构的节点位移及截面应力最大值空间分布规律。对于不同跨度的塑料大棚结构,同时考虑平均风和脉动风作用工况下的节点位移最大值均最大,仅考虑脉动风作用次之,仅考虑平均风作用最小;脉动风荷载作用的节点位移最大值约为平均风荷载作用的 2.5 倍。同时考虑平均风和脉动风作用工况下,拉、压应力的空间最大值均出现在背风面约 1.5 m 高度处;脉动风荷载作用工况下各截面应力也明显大于平均风作用的情况。因此,塑料大棚结构的风振响应分析需要考虑脉动风荷载的作用。文献[7]由于计算模型、输入荷载参数与本文不同,得到的计算结果具体数值也与本文不同,但是所得的规律是一致的,即脉动风作用下的位移值明显大于平均风作用情况,需要考虑脉动风对温室结构的影响。本研究在同时考虑平均风和脉动风作用工况下,截面轴向力为塑料大棚结构的主要内力,弯矩对骨架结构两端截面内力的影响不可忽略。该结果与单拱结构在拱中间截面弯曲应力为最大值不一致^[18],主要原因是计算模型不同以

及本研究考虑了脉动风荷载效应,结构的动力分析可以更精确地反映结构的受力特点。

因此,本研究下一步仍将探讨脉动风荷载对温室骨架结构的动力响应的影响。目前温室结构极限承载力作为设计值偏于保守^[19],今后要对脉动风荷载作用下温室结构进行弹塑性动力响应分析,并分别采用人工模拟风速时程、气象监测仪中的实测风速作为输入数据。

参 考 文 献

- [1] 森山英樹,佐瀬勘紀,小綿寿志.台風 0221 による千葉県・茨城県下の園芸施設構造の被災状況と考察[J].農業施設, 2003,34(3):199-212.
- [2] NIJS D B.Heavy storms causes Dutch greenhouse to collapse [EB/OL]. <http://www.hortidaily.com/article/5485/Heavy-storms-causes-Dutch-greenhouseto-collapse>.
- [3] 王勇.营口盖州现 10 级大风 1000 亩大棚受损[EB/OL].<http://liaoning.nen.com.cn/system/2014/05/13/012234527.shtml>.
- [4] MORCOUS G.Performance of conservatories under wind and snow loads[J].Journal of architectural engineering, 2009, 15 (3):102-109.
- [5] MORIYAMA H,SASE S,UEMATSU Y,et al.Influence of ridge height of pipe-framed greenhouses on wind pressure coefficients[J]. American society of agricultural and biological engineers, 2015,58 (3):763-769.
- [6] KWON K S,KIM D W,KIM R W, et al.Evaluation of wind pressure coefficients of single-span greenhouses built on reclaimed coastal land using a large-sized wind tunnel[J].Biosystems engineering, 2016, 141:58-81.
- [7] 雷隽卿,王东霞,等.温室结构风振效应的数值模拟[J].中国农业大学学报, 2007,12(4):85-89.
- [8] KIM R W,HONG S W,LEE I B, et al.Evaluation of wind pressure acting on multi-span greenhouses using CFD tech-

- nique, part 2: application of the CFD model[J]. *Biosystems engineering*, 2017, 164: 257-280.
- [9] KUROYANAGI T. Investigating air leakage and wind pressure coefficients of single-span plastic greenhouses using computational fluid dynamics[J]. *Biosystems engineering*, 2017, 163: 15-27.
- [10] BRIASSOULIS D, DOUGKA G, DIMAKOGIANNI D, et al. Analysis of the collapse of a greenhouse with vaulted roof[J]. *Biosystems engineering*, 2016, 151: 495-509.
- [11] 丁敏, 朱丹, 许晶, 等. 风雪荷载作用下 Venlo 型温室结构整体性能研究[J]. *中国农业大学学报*, 2017, 22(1): 120-128.
- [12] 金健, 童乐为, 周锋. Venlo 型温室结构空间作用的分析与应用研究[J]. *钢结构*, 2014(增刊): 132-135.
- [13] 鲁斯 C T F. 结构力学的有限元法[M]. 吴德心, 译. 北京: 人民交通出版社, 1991.
- [14] 孙焕纯, 曲乃泗, 林家浩. 高等计算结构动力学[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1992.
- [15] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范(GB50009-2012)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [17] 黄本才. 结构抗风分析原理及应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 2001.
- [18] 伍德林, 汤庆, 朱世东, 等. 新型双层塑料大棚外层棚结构设计及稳定性分析[J]. *上海农业学报*, 2012, 28(4): 100-105.
- [19] 王新忠, 马兴超, 毛罕平. 薄膜预应力对连栋塑料温室结构极限承载力的影响[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(10): 176-180, 216.

Wind-induced vibration response of plastic greenhouse structures

JIANG Yingchun^{1,2} BAI Yikui² WANG Yonggang³ WANG Yi² ZHOU Dongsheng³

1. College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China;

2. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China;

3. College of Information and Electrical Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China

Abstract In order to study the wind-induced vibration response of plastic greenhouses, the investigated lump method for analyzing the wind-induced vibration response of plastic greenhouses was proposed. The calculation formulas for the internal forces of the segments of the plastic frame structure were deduced, and the composition of the investigated lump was designed. The mechanical model of the investigated lump in the skeletal structure was constructed, the process of the studied block method was given, and the wave propagation example of the equal section cylindrical rod was used to verify the effectiveness of the method. At the same time considering the mean wind and the fluctuating wind action, considering only the pulsating wind action and considering only the average wind action, the time-history analysis of the wind-induced vibration response of plastic greenhouses with different spans was performed to obtain the nodal displacement of the skeletal structure. And the location of the maximum value of the stress space in the section. The results showed that the calculated results of both the nodal displacement and the section stress are fluctuating wind loads and are significantly larger than the average wind loads. Therefore, the wind-induced vibration response analysis of the plastic greenhouse structure needs to consider the role of pulsating wind loads.

Keywords plastic greenhouse structure; wind-induced vibration response; wave propagation method; investigated lump; fluctuating wind pressure

(责任编辑: 张志钰)