

日光温室前屋面覆盖物协调铺卷装置设计与试验

张国祥¹ 张璐¹ 李鑫星¹ 龚志文² 董玉红¹ 马云飞³

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 中国科学院合肥物质科学研究院, 合肥 230031;
3. 中国农业大学烟台研究院, 烟台 264670)

摘要: 前屋面是实现日光温室内外环境沟通的重要构建部分,通过控制前屋面覆盖物状态即可达到控制日光温室内部环境的目的。保温卷帘、通风卷膜以及遮阳网布作为日光温室常见的3种主要覆盖功能材料,在依靠共同前屋面构造面实现铺卷动作时,存在作业机械结构难以协调、自动化程度低等问题。结合3种覆盖物铺卷的功能需求,设计其彼此相协调的铺卷装置,包括外侧铺卷结构和内侧铺卷结构两个主要部分以及相配套的覆盖物协调铺卷控制方法。通过比例缩放的实体模型和实地试验相结合的方法验证了所设计日光温室前屋面覆盖物协调铺卷装置可以有效实现卷帘、卷膜和遮阳网布3种覆盖物的协调铺卷,且具有较好的控制精度和稳定性。模型试验结果表明:覆盖物开度控制的平均相对误差均小于3.5%,均方根误差均小于2.0%。覆盖物铺卷控制在各个开度下的变异系数均小于3.0%。而卷帘铺卷控制装置在实地试验中,其开度控制试验结果的平均相对误差均小于2.5%,均方根误差小于1.26%,测试数据的变异系数小于1.0%,也表现出较好的作业控制精度和稳定性。实地试验和模型试验结果中的测量数据整体变化趋势相同,进一步验证了装置模型试验结果的合理性和整体装置的实施可行性。

关键词: 日光温室前屋面; 覆盖物; 协调铺卷; 位置检测

中图分类号: S625.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)05-0348-11 **OSID:** 

Design and Experiment of Coordinative Operation Device of
Covers on Front Roof of Chinese Solar Greenhouse

ZHANG Guoxiang¹ ZHANG Lu¹ LI Xinxing¹ GONG Zhiwen² DONG Yuhong¹ MA Yunfei³

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China
3. Yantai Institute, China Agricultural University, Yantai 264670, China)

Abstract: The front roof is an important part of realizing the communication between the internal and external environment of the Chinese solar greenhouse (CSG). The internal environment of CSGs is controlled by the state of the front roof covers in actual production. Three important covers (insulation quilt, transparent film and colored mesh) are laid on the arc-shaped front roof to control the internal environment factor of CSGs, such as the light, temperature and humidity. The rolling and laying of three covers usually rely on the common front roof structure surface. Due to the coincidence of action trajectory range and operation methods, there are problems that interfere with each other and lead to the low degree of automation in the actual production. It is also not conducive to the systematic and intelligent control of CSGs. According to the functional requirements of the three covers, a coordinative operation device was designed. The main research content included two hardware parts (the outer operation structure and the inner operation structure) and their coordinated control method. The specific corresponding transmission structure and the position detection method of covers were emphasized. The key points of this research were verified by experiments of the scaled model and field CSG. The experiments result of the scaled model showed that the mean relative error (MRE) of different opening values of three covers was less

收稿日期: 2022-08-19 修回日期: 2022-12-19
基金项目: 博士后创新人才支持计划项目(BX20200366)
作者简介: 张国祥(1994—),男,博士后,主要从事设施农业装备与机械化工程研究,E-mail: zhangguoxiang@cau.edu.cn
通信作者: 马云飞(1976—),男,教授,主要从事设施园艺工程研究,E-mail: pony521ff@163.com

than 3.5% , the root mean square error (RMSE) was less than 2.0% . The value of coefficient of variation (CV) of the device was less than 3.0% at each opening point. The outer operation structure also showed good control accuracy and stability in the field experiments, the MRE was less than 2.5% , RMSE was less than 1.26% , and the CV was less than 1.0% . The overall measured experiment results of the scaled model and field CSG showed similar changing trends, which verified the model experiment results and the implementation feasibility of the overall designed device. The research provided a theoretical basis and systematic technical support for the operation of three covers, which was of great practical significance to the automation and intelligent development of the CSG.

Key words: front roof of Chinese solar greenhouse; covers; coordinative operation device; position detection

0 引言

20 世纪 90 年代以来,以日光温室为代表的设施农业在我国北方地区得到了迅速普及,为解决农产品周年生产和周年均衡供应问题提供了有效途径^[1-4]。前屋面作为日光温室的重要构建部分,生产者通过在其上铺卷覆盖物实现对日光温室内部环境的有效控制^[5-6]。当前日光温室的前屋面覆盖物主要包括保温卷帘、通风卷膜以及遮阳网布 3 种功能材料^[7-8]。其中保温卷帘多为人造纤维材料的复合保温被,用于冬季保温^[9];通风卷膜按合成材料可分为聚乙烯(PE)膜、聚氯乙烯(PVC)膜和乙烯醋酸乙烯(EVA)膜等,其作为前屋面必要覆盖材料,在保证光照透入的同时形成相对封闭的日光温室内部空气环境,而控制其铺卷动作即可调控温室内外环境的自然通风情况,达到控温、除湿、换气等目的^[10-11];遮阳网布材质主要包括 PE、高密度 PE 以及 PVC 等,其依据丝线截面形式、编织方式、颜色及网格尺寸等不同具有很多分类方式,主要用于降低棚室温度以及部分种植作物的夏季遮阳防晒^[12]。此外,前屋面覆盖物可以在暴雪、冰雹等极端天气时为室内种植作物提供必要的保护,为保障正常作物生产发挥重要作用^[13]。

保温卷帘、通风卷膜以及遮阳网布 3 种覆盖物常需要依赖共同的前屋面构造面实现铺卷动作,因此其对应铺卷机械结构的工作原理相类似^[14]。例如侧卷式卷帘机与当前市场上常见的自动卷膜机具有相同铺卷结构原理,仅会因负载不同在杆件结构强度、电机动力输出强度等方面存在差异;此外,常见的绳索牵引铺卷方式在保温卷帘和遮阳网布上均有成熟的应用案例^[12, 15]。因此 3 种覆盖物在铺卷作业时会出现相互干涉、难以协调的问题,例如铺卷遮阳网布遮盖通风口影响通风效率,因无系统化管理出现自动化卷帘、半自动化卷膜、人力拉线遮阳等情况,给实际生产带来诸多不便^[16-17]。而当前关于日光温室覆盖物铺卷方法的相关研究,多集中于对

于保温卷帘或是通风卷膜等独立单体覆盖物,极少关注到多种覆盖物控制铺卷作业及其硬件结构之间的相互联系^[18-20]。

本文结合 3 种覆盖物铺卷的功能需求,开展其前屋面覆盖物协调铺卷装置研究,并通过建立实体比例模型和真实温室试验,进行模型原理验证和性能试验,进一步验证装置的实施可行性。

1 总体结构与工作原理

以我国当前北方地区常见的单体半拱型结构日光温室为例,结合相关建筑参数的测绘,完成日光温室前屋面结构简化,如图 1 所示^[14]。为方便工作开展,普遍具备圆弧状特征的前屋面结构被简化成单段圆弧。通过测定整体棚高 H 、整体棚宽 L 、前屋面水平宽度 L_1 等相关建筑参数,即可确定对应棚面圆弧圆心 o 的位置和相应圆弧半径 R 。如图 1 所示,

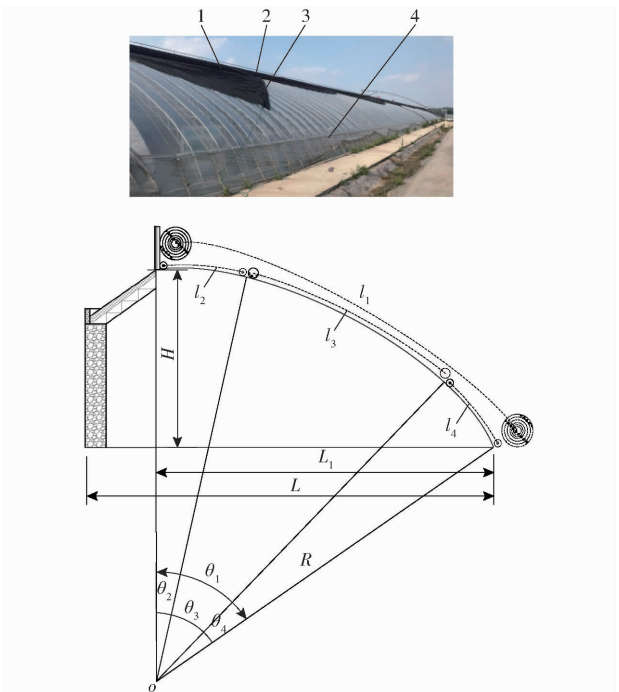


图 1 日光温室前屋面结构简化示意图

Fig. 1 Simplified scheme of front roof of solar greenhouse

1. 保温卷帘 2. 上通风卷膜 3. 遮阳网布 4. 下通风卷膜

依据 3 种覆盖物的功能属性,对其铺卷范围进行划分,保温卷帘铺卷范围为整体棚面;上通风卷膜铺卷范围从棚室顶部沿棚面延伸一段距离;下通风卷膜铺卷范围则是从棚室底部沿棚面延伸一段距离;而上、下通风卷膜之间的范围则是遮阳网布铺卷活动范围。由此可以得到确定日光温室覆盖物位置的铺卷开度计算公式为

$$K_x = \frac{\Delta l_x}{l_x} \times 100\% = \frac{\Delta \theta_x}{\theta_x} \times 100\% \quad (1)$$

式中 K_x ——覆盖物铺卷开度,%
 l_x ——覆盖物铺卷范围对应棚面圆弧弧长,m
 θ_x ——覆盖物铺卷范围对应的棚面圆弧圆心角,rad
 Δl_x ——相应覆盖物铺卷揭开时其末端移动的弧度距离,m
 $\Delta \theta_x$ ——相应覆盖物铺卷揭开时其末端移动对应圆心角变化值,rad

下标 x 表示对应的覆盖物编号,取值 1、2、3、4 分别表示保温卷帘、上通风卷膜、遮阳网布、下通风卷膜。在此基础上设计的日光温室前屋面协调铺卷装置的整体机械结构如图 2 所示。

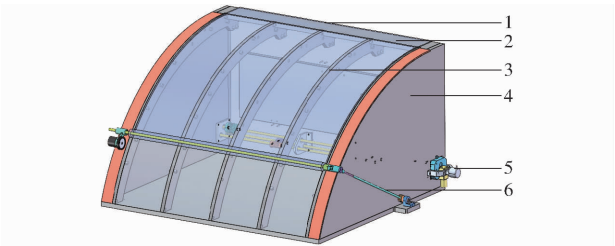


图 2 协调铺卷装置整体机械结构三维示意图
Fig.2 3-D structure principle diagram of overall coordinative operation device

1. 温室后墙 2. 温室后屋面 3. 温室结构骨架 4. 温室侧墙
5. 内侧铺卷结构 6. 外侧铺卷结构

采用无坡度后屋面板简化结构,整体机械结构可以分成外侧铺卷机构和内侧铺卷结构两个主要部分。所提出的设计方案主要包括:在现有卷帘铺卷装置基础上增加铺卷位置检测结构;设计内侧铺卷结构实现上、下通风卷膜和遮阳网布的一体化铺卷及其铺卷位置检测;设计相应的覆盖物协调铺卷控制方法,便于系统化调控覆盖物铺卷作业。

2 协调铺卷装置设计

2.1 外侧铺卷结构

外侧铺卷结构在现有侧卷式卷帘结构基础上,通过在卷帘轴无动力端增加安装有编码器的铺卷位置反馈检测结构,实时获取卷帘位置反馈信息,如图 3 所示^[21]。

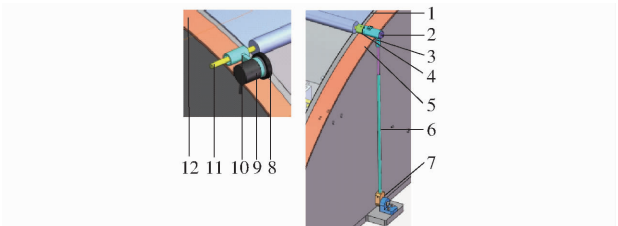


图 3 外侧铺卷机构三维示意图
Fig.3 3D structure principle diagram of outside operation structure

1. 保温卷帘 2. 驱动电机 3. 电机安装座 4. 联轴器 5、12. 山墙坡面 6. 伸缩摆杆 7. 摆杆旋转座 8. 防滑橡胶滚轮 9. 编码器 10. 摆臂 11. 卷帘轴

卷帘铺卷过程中,卷帘轴通过摆臂带动安装有编码器的防滑橡胶滚轮沿着圆弧棚面运动,由此即可获取卷帘运动位置变化和具体的卷帘开度数值。滚轮仅沿着圆弧棚面做竖直平面范围内的运动,在结构简化基础上进行受力及其运动学分析,结果如图 4 所示。

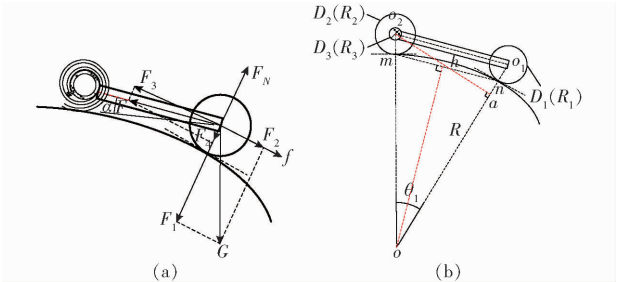


图 4 外侧铺卷检测结构分析图
Fig.4 Structure analysis diagram of detection structure of outside operation structure

图 4a 为卷帘铺卷作业时的静态受力状态,用于检测卷帘位置的滚轮沿着圆弧棚面向上滚动,其主要受到自身重力 G 、摆臂牵引力 F 、棚面支撑力 F_N 以及摩擦力 f 的共同作用,达到受力平衡状态。其中 G 和 F 可以沿着棚面圆弧切线方向及垂直切线方向分解为 F_1 、 F_2 、 F_3 和 F_4 。

假定卷帘作为不可压缩变形对象,即叠加后厚度保持均匀不变,且卷起过程中与贴合的圆弧棚面不发生相对移动。卷帘以卷帘轴为中心按照阿基米德螺旋规律运动,其所形成的理想圆柱体直径不断增加,而滚轮的尺寸直径是固定的,因此摆臂和水平方向的倾角 α 不断变化,使得卷帘铺卷距离和滚轮的实际滚动距离存在偏差,因此需要根据得到的滚轮转动圈数 j ,进一步运算得到卷帘的移动行走路程 Δl_1 及其对应的实时开度 K_1 。

如图 4b 所示, o_1 和 o_2 分别为滚轮和卷帘包裹卷帘轴形成理想圆柱体的圆心,而 m 和 n 则分别是其与棚面弧线的切点。首先作辅助线 o_2a 垂直于 oo_1 ,假定其长度为 h ,同样作辅助线垂直于棚面圆弧两

处切点连线。由此可得

$$h^2 = l_{oo2}^2 - l_{oa}^2 = l_{o_1o_2}^2 - l_{o_1a}^2 \tag{2}$$

其中
$$l_{o_1a} = l_{oo1} - l_{oa} \tag{3}$$

式中 $l_{o_1o_2}$ ——位置检测结构中的摆臂长度,mm

由此可以得到

$$l_{oa} = \frac{l_{oo1}^2 + l_{oo2}^2 - l_{o_1o_2}^2}{2l_{oo1}} \tag{4}$$

又由图 4b 和半角的正弦公式可知

$$\sin \frac{\theta_1}{2} = \sqrt{\frac{1 - \cos \theta_1}{2}} = \frac{\frac{1}{2}l_{mn}}{R} = \frac{l_{mn}}{2R} \tag{5}$$

其中
$$\cos \theta_1 = \frac{l_{oa}}{l_{oo2}} = \frac{l_{oo1}^2 + l_{oo2}^2 - l_{o_1o_2}^2}{2l_{oo1}l_{oo2}} \tag{6}$$

式中 l_{mn} ——卷帘和滚轮两者在圆弧棚面落点距离,mm

将式(6)代入式(5)可知

$$l_{mn} = \sqrt{\frac{R^2[l_{o_1o_2}^2 - (l_{oo1} - l_{oo2})^2]}{l_{oo1}l_{oo2}}} \tag{7}$$

其中
$$l_{oo1} = R + R_1 \tag{8}$$

$$l_{oo2} = R + R_2 \tag{9}$$

式中 R_1 ——滚轮半径,mm

R_2 ——卷帘包裹卷帘轴形成的理想圆柱体实时半径,mm

卷帘会围绕卷帘轴中心作阿基米德螺旋线规律运动,将其近似等同为卷帘同心圆环绕包裹卷帘轴,即卷帘轴每转一周所形成的理想圆柱体半径增加一层卷帘的厚度,而实际计算卷帘转动圈数需要进行取整和取余运算,即

$$j = b - c \tag{10}$$

式中 b ——大于 j 的最小正整数

c ——运算得到小于 1 的差值

由此可以得到

$$R_2 = R_3 + bt \tag{11}$$

式中 R_3 ——卷帘轴半径,mm

t ——保温卷帘卷起叠加后的单层厚度,mm

由此可得卷帘铺卷过程中,卷帘和滚轮两者在圆弧棚面落点的实时距离为

$$l_{mn} = \sqrt{\frac{R^2L_2^2 - R^2(R_1 - R_3 - bt)^2}{(R + R_1)(R + R_3 + bt)}} \tag{12}$$

由式(12)可知卷帘和滚轮两者在圆弧棚面落点距离取决于卷帘在卷帘轴上的包裹叠加层数(b 值)。卷帘实时开度 K_1 的计算公式为

$$K_1 = \frac{\Delta l_1}{l_1} \times 100\% =$$

$$\frac{\sum_{b=1} \pi(D_3 + 2bt) - c\pi(D_3 + 2bt)}{l_1} \times 100\% \tag{13}$$

式中 D_3 ——卷帘轴直径,mm

通过式(13)可以由开度确定卷帘轴的转动圈数。通过编码器检测获取滚轮圈数 Q 确定卷帘在棚面落点位置时,需要考虑卷帘和滚轮两者在圆弧棚面的落点距离从初始位置移动至当前位置的变化量 l'_{mn} ,因此卷帘实时开度 K_1 的计算公式为

$$K_1 = \frac{\Delta l_1}{l_1} \times 100\% = \frac{\pi D_1 Q + l'_{mn}}{l_1} \times 100\% \tag{14}$$

式中 D_1 ——滚轮直径,mm

在进行卷帘铺卷作业时,输入的卷帘目标开度 K_1 会先换算得到卷帘轴的转动圈数 j ,再计算确定影响参数 l'_{mn} ,最后计算得到编码器检测防滑橡胶滚轮转动圈数 Q 而再进行具体的卷帘铺卷位置控制。

2.2 内侧铺卷结构

日光温室上、下通风卷膜和遮阳网布通常采用彼此独立的铺卷结构,自动化程度也远低于保温卷帘。由图 1 可知,遮阳网布与上、下通风卷膜具有互补属性的铺卷活动范围,又均属于轻质材料,因此采用绳索滑轮牵引的方式实现其一体化控制。其中上、下通风卷膜垂直方向上的绳索滑轮牵引铺卷作业方案如图 5 所示。

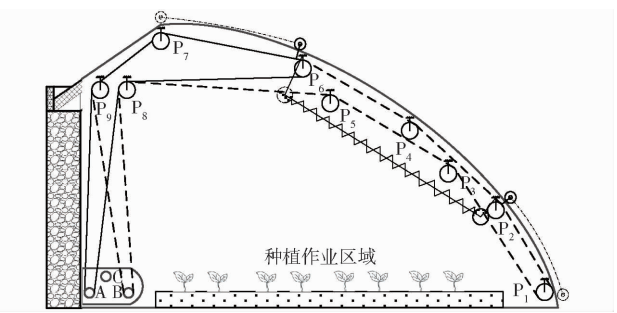


图 5 上、下通风卷膜垂直方向上的绳索牵引结构示意图
Fig.5 Schematic of rope traction structure in vertical direction

而铺卷遮阳网布也采用类似的滑轮和绳索牵引的方式完成。对图 5 中不同位置的滑轮依次从底部进行数字编号,用 A、B、C 分别表示上通风卷膜、下通风卷膜和遮阳网布所属的不同绳索牵引组,由此可以得到相应覆盖物铺卷作业时,需要经过的滑轮编号,结果如表 1 所示。

表 1 通风卷膜和遮阳网布铺卷作业牵引绳索的滑轮编号
Tab.1 Number of pulleys for traction ropes for ventilation rolls and shading mesh rolls

覆盖物	绳索牵引滑轮组编号
上通风卷膜	绕杆 A - P _{A9} - P _{A7} - P _{A6} - P _{A8} - 绕杆 A
下通风卷膜	绕杆 B - P _{B9} - P _{B7} - P _{B6} - P _{B4} - P _{B2} - P _{B1} - P _{B3} -
	P _{B5} - P _{B8} - 绕杆 B
遮阳网布	绕杆 C - P _{C9} - P _{C7} - P _{C6} - P _{C4} - P _{C2} - P _{C3} - P _{C5} -
	P _{C8} - 绕杆 C

由表 1 可知,部分滑轮位置会有多个绳组经过,需要采用单体多轮的滑轮结构。垂直方向上滑轮具体布设数量和位置需要结合实际棚室情况进行调整;水平方向上的绳组布设则是在考虑绳索受力强度的同时,应避免绳索之间相互干涉^[22]。

由图 5 可知,内侧铺卷结构中牵引绳索最终会汇合于 3 根绕杆上,为避免产生绳索缠绕混乱的情况,在绕杆均安装有固定绕线模块,并借助传动结构实现绳索的统一管理驱动。动力源采用双轴驱动电机,一端用于输出动力,另一端则安装编码器采集绕杆的转动圈数。内侧铺卷结构的具体传动方案和三维结构如图 6、7 所示。

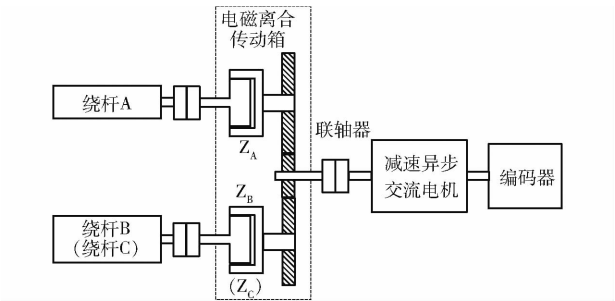


图 6 内侧铺卷结构的传动方案图

Fig. 6 Schematic of inside transmission structure

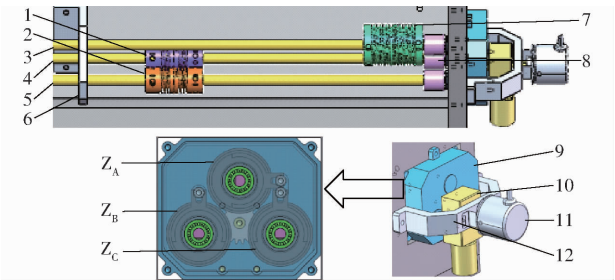


图 7 内侧铺卷结构三维图

Fig. 7 3D structure principle diagram of inside operation structure

1. 上通风绕线器 2. 下通风绕线器 3. 绕杆 A 4. 绕杆 B 5. 绕杆 C 6. 中间支架 7. 遮阳绕线器 8. 联轴器 9. 电磁离合传动箱 10. 减速电机 11. 编码器 12. 安装架

如图 7 所示,牵引绳索在绕线模块上的螺纹沟槽中循环往复运动带动覆盖物进行铺卷作业。绕线模块中的螺纹沟槽尺寸参数计算公式为

$$\begin{cases} \pi(p_{x'} + \Phi_s)Q_{x'} \geq \Delta l_{x'} \\ S_{x'} \geq \Phi_s \end{cases} \quad (15)$$

式中 $p_{x'}$ ——绕线模块螺纹沟槽的底径(下标 x' 表示对应的覆盖物类型,取值 2、3、4 分别表示上通风卷膜、遮阳网布、下通风卷膜,下同),mm

$Q_{x'}$ ——螺纹沟槽圈数

$\Delta l_{x'}$ ——覆盖物铺卷移动弧度距离,mm

$S_{x'}$ ——绕线模块螺纹沟槽的底部沟宽,mm

Φ_s ——牵引绳索线径,mm

进行实际作业前,需要调整绳索张紧和限位校正,并需要根据作业实际负载需求选择适宜型号的驱动电机^[22]。进行上、下通风卷膜和遮阳网布铺卷作业时,通过单个电机一拖三转动 3 个平行绕杆结构,电磁离合传动箱内置 3 个独立电磁离合器固结的 3 个直齿轮环绕啮合电机的输出轴单直齿轮实现传动,可实现 3 种覆盖物独立控制或同步控制。具体作业时,根据需要调控的覆盖物对象控制 3 个电磁离合器 Z_A 、 Z_B 和 Z_C 的通断,驱动电机通过齿轮传动的方式转动绕杆牵引绳索带动覆盖物到达预定位置,具体开度控制计算公式为

$$K_{x'} = \frac{qi_{x'}\sqrt{p_{x'}^2 + (\pi d_{x'})^2}}{l_{x'}} \times 100\% \quad (16)$$

式中 $d_{x'}$ ——绕线模块的螺纹中径,mm

q ——驱动电机转动圈数,由同轴安装的编码器测量获取

$i_{x'}$ ——相应齿轮传动比

2.3 覆盖物协调铺卷控制方法

为研究 3 种覆盖物的协调铺卷控制策略方法和衍生更多覆盖物控制组合模式,构建日光温室覆盖物系统控制模型

$$f(T) = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \quad (17)$$

式中 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 ——保温卷帘、上通风卷膜、下通风卷膜、遮阳网布的工作状态

3 种覆盖物的工作状态按照是否需要铺卷控制分为作业状态和非作业状态两种。具体操作时则是需要进行赋值处理,且为避免数值重合造成含意发生歧异,需要分别从低到高进行递增式赋值处理。在此理论基础上,利用 3 种前屋面覆盖物使用频次在不同时间季节的间隔和互补特性制定了 3 种工作模式,其中 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 按照作业和非作业两种工作状态的赋值结果依次为:1 和 0,4 和 2,7 和 6,14 和 13。如表 2 所示,依据不同的模型结果 $f(T)$,确定 3 种覆盖物工作状态,实现相互协调控制。

表 2 3 种覆盖物协调控制模式

Tab.2 Coordinated control mode of three coverings			
时间季节	春、秋	夏	冬
工作模式	模式	模式	模式
$f(T)$	26	22	24
保温卷帘	正常	极少	频繁
通风	上通风口	极少	正常
		(保持常开)	
卷膜	下通风口	极少	极少
		(保持常开)	(保持常闭)
遮阳网布	正常	频繁	极少

3 装置实现和试验

采用实体比例模型和实地试验相结合的方法验证装置的实际应用效果。通过搭建同比例缩放的试验模型进行装置基础功能和性能试验,而对于控制精度要求较高的保温卷帘控制进行了现场实际应用验证。

3.1 试验模型搭建

日光温室模型的主体建筑结构由 15 mm PVC 板搭建而成,模型温室棚长 1 000 mm,棚宽 900 mm,后墙高度 560 mm,后屋面板宽度 100 mm。棚面安装 5 根 15 mm PVC 板切割完成的单段圆弧形状骨架,其两端镶嵌安装固定在底板和后屋面板上。模型两侧墙板和相邻的骨架之间用 5 mm PVC 板铺设驱动电机和位置检测结构所需的运动轨道面。模型建筑参数与真实日光温室棚室的尺寸比例约为

1:14。所设计的硬件装置同样在模型上进行复原,如图 8 所示。



图 8 铺卷装置的比例模型实体图

Fig.8 Scale model of overall coordinative operation device

1. 外侧铺卷检测机构 2. 上通风口 3. 遮阳网布 4. 内侧铺卷动力结构 5. 温室建筑模型主体 6. 下通风口 7. 外侧铺卷动力结构 8. 离合传动箱 9. 内侧铺卷检测机构 10. 继电器模块 11. 主控制板模块 12. PC 端

研究中采用实体比例模型所涉及的机械硬件结构参数如表 3 所示。

表 3 实体模型结构数据

Tab.3 Construction data of entity model

建筑框架结构	主体架构包括底板、后墙板、后屋面板和两侧墙板以及 5 根支撑骨架。棚面形状为半径 1 000 mm 的单段圆弧,保温卷帘的覆盖弧长为 1 040 mm,上、下通风口的覆盖弧长均为 160 mm,遮阳网布的覆盖弧长为 720 mm,实际架设的辅助支架长度为 610 mm
遮阳网布	左右两侧安装由 1.5 mm 铜丝制成的简易牵引轨道穿透折叠的黑色遮阳网布,后端固定不动,前端和牵引绳索(线径为 1 mm 的白色棉线)固结实现遮阳网布打开和关闭
上、下通风卷膜	中间透明薄膜固定不动,上通风口薄膜后端固定不动,前端和外径 3 mm、内径 1.5 mm 的空心钢轴固结;下通风口薄膜前端固定不动,后端和相同的另一空心钢轴固结;绳索固结钢轴牵引带动上、下通风薄膜打开和关闭
内侧铺卷结构	绳索牵引结构 在 5 根支撑骨架上安装固定滑轮用于牵引绳索,3 根绕杆均选用长度 90 cm、外径 10 mm 的黑色碳纤维空心管,一套绳组配合收、放线的两个绕线模块,用于通风的绕线模块尺寸参数为:螺纹段长度 12.5 mm,大径 25 mm,小径 17 mm,螺距 3 mm;用于遮阳的绕线模块的尺寸参数为:螺纹段长度 22.5 mm,大径 40 mm,小径 32 mm,螺距 3 mm
	离合传动箱 电机轴过盈配合安装单个直齿轮(20 齿 1 模),再采用齿轮啮合传动的方式将驱动力传递到对应的 3 个相同型号的电离离合器,再通过联轴器将动力传递到 3 个绕杆上。采用日本 Sinfonia 微型大扭矩离合器,型号 MAC50TL,其参数为:DC24V,0.125 A,额定功率 3 W(±10%),24 齿 1 模,刹车轴孔连接 D 型轴 6 mm
	动力输出和位置检测 采用双头出轴的微型直流蜗轮蜗杆减速电动机,型号 CHW-GW4632-370,其参数为:6 mm D 型转轴,电压 6~24 V,转速 45~65 r/min,一端连接离合传动箱,另外一端连接机械齿轮多圈绝对值编码器,型号 OID-R3810M01624S,其参数为:电压 5~24 V,IP54 防护等级,RS485-10 位接口,16 圈,机械端口为 6 mm 盲孔,波特率范围:9 600~115 200 b/s
外侧铺卷结构	保温卷帘 采用 0.5 mm 厚度的麻布布料,后端通过自攻钉固定于后屋面板,前端与 10 mm 的实心不锈钢卷帘轴粘接
	动力输出和位置检测 采用典型的侧卷式结构,碳纤维杆件组成的伸缩支架一端与底板的旋转支座连接,另一端固结电机支座,安装的直流减速电机型号 24GP-370,其参数为:输出轴直径 8 mm,减速比 1:151,额定电压 24 V,额定转速 40 r/min,额定电流 0.2 A,额定输入功率 4 W,电机通过联轴器和卷帘轴一端固结,卷帘轴另一端通过联轴器连接位置检测机构,安装的编码器型号 OID-R5010M01624S,具体参数与上类似,其机械端口采用直径 8 mm 实心轴,摆臂长度为 48.5 mm,滚轮直径为 50 mm

在装置的控制电路部分,采用 STM32F103 主控制板和继电器模块直接驱动电机,内侧铺卷结构的电磁离合器由继电器模块直接控制,主控制板和 PC 端连接,用于接收系统控制指令,RS485 型编码器通

过 USB 转 485 模块和 PC 端连接,用于接收覆盖物铺卷的位置信息^[23]。整体控制电路系统框图如图 9 所示。

在硬件结构基础上,可得到日光温室覆盖物整

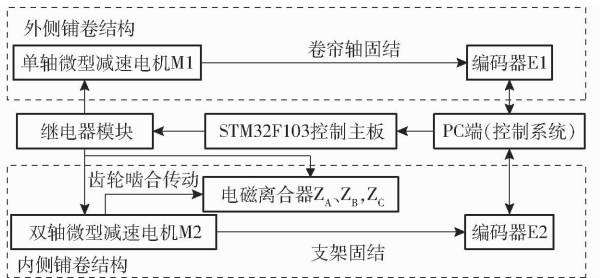


图 9 铺卷装置控制电路系统框图

Fig. 9 Control circuit diagram of coordinative operation device

体协调铺卷装置的系统工作流程,如图 10 所示。

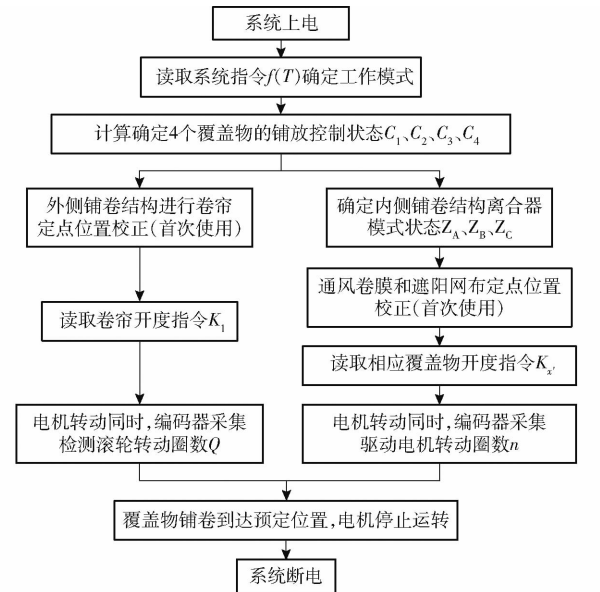


图 10 控制系统工作流程图

Fig. 10 Workflow diagram of control system

作业时,通过在 PC 端控制系统界面上,完成参数设置和装置系统校正,再向主控制板发送覆盖物铺卷动作控制指令,两个编码器实时采集其铺卷位置信息,并在 PC 端控制系统界面上实时显示结果,所设计的控制系统界面如图 11 所示。

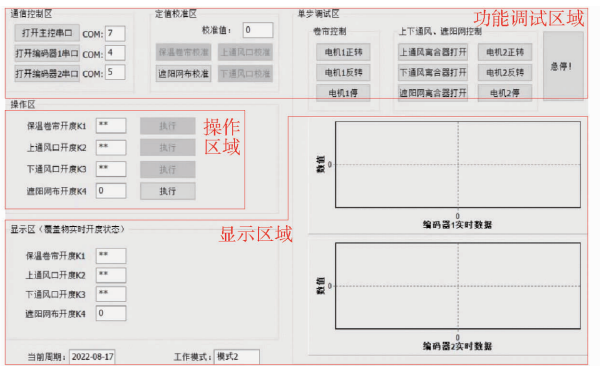


图 11 铺卷装置的控制界面

Fig. 11 Control system interface of coordinative operation device

整体的控制系统界面包括功能调试区域、操作区域和显示区域 3 个主要模块。其中,作业时

首先需要在功能调试区域的通信区打开 PC 端与主控制板、编码器的串口通信,在单步调试区调整覆盖物铺卷到固定位置,在定值校准区实现覆盖物位置的校准。在操作区输入目标开度指令后即可在显示区观察覆盖物的实时开度和编码器的实时数据。

3.2 实地试验

在以上实体模型试验研究基础上,为进一步验证研究方案的实施可行性,对外侧铺卷机构即卷帘铺卷控制装置进行了实地验证试验。实地试验选址在北京市昌平区的上河农业生态园内(地理坐标为北纬 40°13'、东经 116°32')。园区温室类型为北方地区典型的单体半拱型结构日光温室,单栋温室整体棚长 55 m,棚宽 4.5 m,涉及到屋面覆盖物铺卷作业的温室结构主要是加厚砖墙结构东侧和西侧山墙,而温室前屋面则是由每隔 1 m 安装的圆弧状支撑钢架结构组成。温室覆盖的卷帘材质为复合棉,厚度为 15 mm。卷帘轴的材质为 45 号优质碳素结构钢,管径参数为:外径 48 mm,内径 43 mm。试验温室配备侧卷式卷帘机,动力端的三相异步电动机型号为 YE2 90S-4,相关参数为:1.1 kW,2.9 A,1 400 r/min,电动机输出转矩通过传送带传递至配置的减速机上,再通过法兰盘连接实现卷帘轴转动,带动卷帘完成铺卷动作。试验环节中,根据实际的棚室结构,在不改变工作原理的前提下,对所设计的卷帘位置检测结构的关键部件进行同比例放大和修改。整体的检测结构采用钢质结构,摆臂长度为 500 mm,一端通过钢架套筒连接在卷帘轴的无动力端,另一端连接包裹有防滑橡胶圈的滚轮和与模型试验相同型号的编码器,滚轮直径为 160 mm。卷帘铺卷控制装置的现场示意图如图 12 所示。

试验前,将卷帘的运行距离范围均分为 0 ~ 100% 等分的 11 个开度,并在温室西侧山墙上标记相应位置点便于测量。如图 12 所示,为便于实际作业,将位置检测结构摆放在卷帘轴上面,由于涉及到的 l_{mn} 是卷帘和滚轮相对位置的变化量,因此并不会对试验结果产生影响。作业时,在温室西侧斗室内,断路器控制三相电源输入,通过变频调速器将位于侧卷式卷帘机的单次铺卷作业时间控制在 3 ~ 8 min 内,使卷帘铺卷硬件结构符合现行的技术要求规范^[24]。实地试验的装置和比例模型的控制策略相一致,只是对驱动元件和控制程序中涉及的卷轴、卷帘和位置检测结构部件关键参数进行了替换。PC 机和变频调速器以及编码器均通过 485 线通讯,通过在 PC 机上控制系统界面上给出开度指令通过变频调速器控制卷帘机动作,而卷帘的实时位置信息

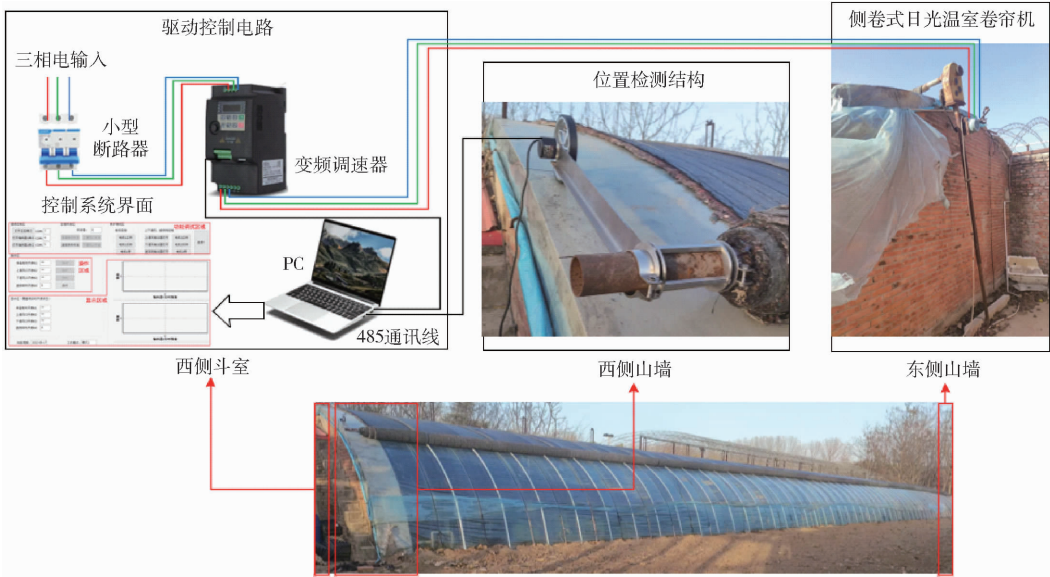


图 12 卷帘铺卷控制装置的试验现场示意图

Fig. 12 Field schematic of rolling control device for insulation quilts

则是通过位置检测结构中的编码器采集传回控制系统界面显示。

3.3 试验结果

所设计的日光温室前屋面覆盖材料协调铺卷装置试验包括模型试验和实地试验两部分,通过两种结果比对综合反映整体装置功能和具体性能。

(1) 模型测试结果

模型试验的功能性试验主要是对装置整体功能进行结构装置原理验证试验,并对依据季节差异设定的 3 种工作模式下的实际覆盖物铺卷效果进行观测和分析。模型性能试验则是对 3 种覆盖物铺卷的具体铺卷位置的检测精度和稳定性的测试和结果分析。

在模型搭建完成后进行铺卷装置及其关键部件的原理验证试验,就其具体试验测试内容用优、良、差 3 个等级予以评价,其测试结果如表 4 所示。

表 4 协调铺卷装置的功能性试验结果
Tab.4 Functional experimental results of coordinative operation device

主要结构和控制方法		测试内容	评价等级
外侧铺卷结构	绳索牵引结构	整齐程度;过程流畅	优
		整齐程度;过程流畅; 绳索排列整齐	良
内侧铺卷结构	离合传动箱	控制通断;传动效果	优
协调控制方法		不同作业模式切换效果	优

由表 4 可知,所设计的协调铺卷装置的相应功能在比例模型上整体均有很好的实现,其中采用的棉绳会产生一定程度的弹性变形,造成绳索牵引结构出现绳索松散的情况,影响最终效果评价结果。而在实际生产中通常会采用弹性变形较小的钢丝绳

或纤维绳,可以有效减少此类影响。

本文所设计的覆盖物铺卷装置属于现有铺卷装置的加装优化方案,相关的基础硬件结构性能符合现行的技术要求规范,研究的性能测试重点在于提高铺卷装置的作业精度和稳定性^[24]。通过实体比例模型完成 3 次重复性平行试验。试验内容是对每个覆盖物均完成开度 0 ~ 100% 等分的 11 个位置开度的覆盖物运动末端移动距离的测量,并将其换算为试验的实际开度,并通过分析得到装置作业精度和稳定性测试结果。

在模型测试试验过程中,通过计算覆盖物铺卷实际开度和理论开度的平均相对误差和均方根误差验证整体卷帘调控系统的控制精度。再通过重复 3 次试验数据结果的变异系数验证其作业控制稳定性。

其中整体装置的作业精度测试结果如图 13 所示。由图 13 可知,3 种覆盖物的铺卷作业精度较好,其开度控制的平均相对误差均小于 3.5%,均方根误差均小于 2.0%,其中卷帘的铺卷精度测试时

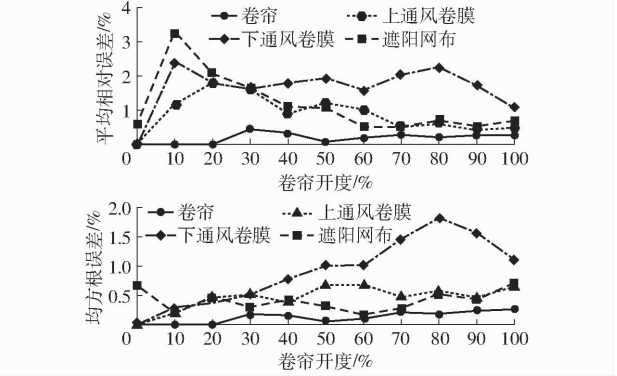


图 13 整体装置的作业精度测试结果

Fig. 13 Accuracy test results of coordinative operation device

的平均相对误差小于 0.5%,均方根误差的最大值仅为 0.3%,表现出较好的作业控制精度。其中,外侧铺卷结构产生的误差主要来源于采用的卷帘材质较薄且在试验中易出现褶皱变形情况,其影响较小。而内侧铺卷结构的误差则是由于采用绳索牵引和简易支架结构的方式实现卷膜和遮阳网布铺卷,绳索和覆盖物存在弹性变形松塌现象,尤其是上通风卷膜由于重力作用不明显,在较大开度时易产生卷膜轴倾斜的现象,造成作业精度明显下降。而在实际生产中则可通过收束整理绳索有效减小该现象引起的此类误差。

在此基础上,通过数据分析得到装置的作业稳定性结果如图 14 所示。

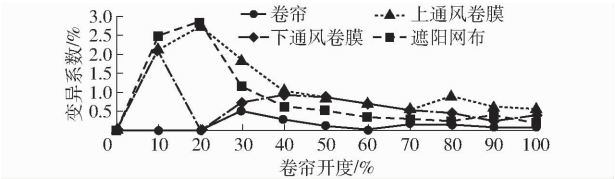


图 14 整体装置作业稳定性测试结果

Fig. 14 Stability test results of coordinative operation device

由图 14 可知,铺卷装置控制覆盖物在各个开度下的变异系数均小于 3.0%,其中卷帘稳定性测试时的变异系数小于 1.0%,展现出较好的稳定性。在开度较小时出现数据不稳定的原因在于覆盖物运动末端的实际运动距离较小,造成测量不便,使得测量误差增大。

(2) 实地试验结果

实地试验主要对冬季工作模式下的卷帘铺卷作业进行测试。其中,功能性测试的观测结果显示铺卷效果良好和控制过程流畅,与模型试验结果相一致。

在此基础上,依据相类似的测试过程检测卷帘铺卷装置的作业精度和稳定性,完成 3 次重复性平行试验。其中卷帘铺卷控制装置的实地作业测试结果如图 15 所示。由图 15a 可知,所设计协调铺卷装置中的外侧铺卷结构即卷帘铺卷装置在实地试验中,其开度控制的平均相对误差均小于 2.5%,均方根误差小于 1.26%,表现出较好的作业控制精度。对比模型试验结果可知,装置的实地试验的测试作业控制精度有所降低,但其测量数据整体变化趋势相同,平均相对误差同样随着开度增加而不断降低的趋势,而均方根误差则也呈现随着开度的增加而不断增大的趋势。而由图 15b 可知,相比较模型试验结果,装置实地试验测试数据的变异系数同样小于 1.0%,且随着开度增加而不断降低的整体趋势,展现出较好的稳定性。

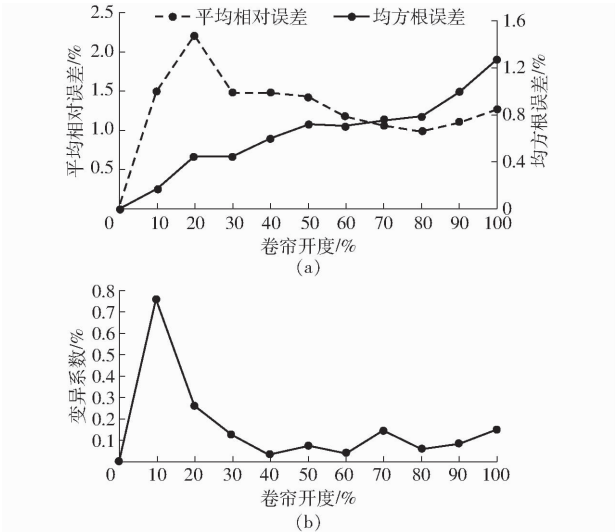


图 15 卷帘铺卷控制装置的作业测试结果

Fig. 15 Field test results of rolling control device for insulation quilts

综上所述,在实地试验中,测试装置由于受到卷帘机载荷复杂多变、外界自然环境变化等因素的影响,其作业精度和稳定性整体上相比模型试验有所较低,但结合实地试验结果,模型试验结果的合理性得到进一步验证,说明实体比例模型中测量数据相关误差同样也会在实际生产实践中出现,分析逻辑同样也可以为实际生产提供参考。由此可知,所设计的日光温室前屋面覆盖物协调铺卷装置整体上表现出较好的作业精度和稳定性,整体的试验结果也进一步验证了装置的实施可行性。

4 结论

(1) 所设计的日光温室前屋面覆盖物协调铺卷装置包括的外侧铺卷结构、内侧铺卷结构和覆盖物协调铺卷控制在实体比例模型上整体均有较好的功能实现,其中的覆盖物铺卷位置检测结构、离合传动箱等关键结构部件均能实现预期的功能效果,能够有效保障日光温室前屋面覆盖物的共同协调作业。

(2) 通过实体比例模型试验及其测试结果数据分析,所设计协调铺卷装置卷具有较好的作业控制精度和稳定性。3 种覆盖物开度控制的平均相对误差均小于 3.5%,均方根误差均小于 2.0%,其中卷帘的平均相对误差小于 0.5%,均方根误差的最大值仅为 0.3%。稳定性测试方面则是显示铺卷装置控制覆盖物在各个开度下的变异系数均小于 3.0%,其中卷帘稳定性测试时的变异系数小于 1.0%,展现出较好的运行稳定性。

(3) 卷帘铺卷控制装置在实地试验中,其开度

控制试验结果的平均相对误差均小于 2.5%,均方根误差小于 1.26%,测试数据的变异系数小于 1.0%,也表现出较好的作业控制精度和稳定性,其与模型试验结果中的测量数据整体呈现相同变化趋势,进一步验证了装置模型试验结果的合理性和整体装置的实施可行性。

参 考 文 献

[1] CAO Kai, XU Hongjun, ZHANG Rong, et al. Renewable and sustainable strategies for improving the thermal environment of Chinese solar greenhouses[J]. Energy and Buildings, 2019, 202: 109414.

[2] AHAMED M S, GUO H Q, TANINO K. Modeling heating demands in a Chinese-style solar greenhouse using the transient building energy simulation model TRNSYS[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 29: 101 – 114.

[3] 方虹. 国内外日光温室技术装备的研究与应用分析[J]. 农业科技与装备, 2014(5): 40 – 41.
FANG Hong. Analysis of research and application of solar greenhouse technology and equipment at home and abroad[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2014(5): 40 – 41. (in Chinese)

[4] HOMA E, RAMIN R. Optimal design for solar greenhouses based on climate conditions[J]. Renewable Energy, 2020, 145(31): 1255 – 1265.

[5] 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.
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 CSAE, 2020, 36(16): 174 – 181. (in Chinese)

[6] 吕欢欢, 牛源艺, 张漫, 等. 日光温室光照强度与空气温湿度变化趋势分析[J]. 农业机械学报, 2021, 52(增刊): 410 – 417.
LÜ Huanhuan, NIU Yuanyi, ZHANG Man, et al. Analysis of variation trend of light intensity and air temperature and humidity in solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.): 410 – 417. (in Chinese)

[7] 曹瑞红, 李晋蒲, 赵建贵, 等. 日光温室卷帘及通风口控制系统研制[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(5): 219 – 226.
CAO Ruihong, LI Jinpu, ZHAO Jiangui, et al. Design of roller shutter and vent control system for solar greenhouse[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(5): 219 – 226. (in Chinese)

[8] 袁丁, 秦占军, 武占会, 等. 日光温室遮阳与喷雾降温对越夏快菜生长及品质的影响[J]. 中国蔬菜, 2019(7): 62 – 66.
YUAN Ding, QIN Zhanjun, WU Zhanhui, et al. Effect of estival screen-shading and spray cooling on growth and quality of over summer Chinese cabbage in solar greenhouse[J]. China Vegetables, 2019(7): 62 – 66. (in Chinese)

[9] 张国祥, 刘星星, 张领先, 等. 基于 CFD 的日光温室温度与卷帘开度关系研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 279 – 286.
ZHANG Guoxiang, LIU Xingxing, ZHANG Lingxian, et al. Relationship between indoor temperature and rolling shutter opening of solar greenhouse based on CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 279 – 286. (in Chinese)

[10] ZHANG Guoxiang, FU Zetian, YANG Mingsong, et al. Nonlinear simulation for coupling modeling of air humidity and vent opening in Chinese solar greenhouse based on CFD[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162(2): 337 – 347.

[11] TONG Xuejiao, SUN Zhouping, NICK S, et al. Energy sustainability performance of a sliding cover solar greenhouse: solar energy capture aspects[J]. Biosystems Engineering, 2018, 176(10): 88 – 102.

[12] 周长吉. 周博士考察拾零(九十五)日光温室遮阳降温的形式与结构[J]. 农业工程技术, 2019, 39(22): 12 – 16.
ZHOU Changji. The form and structure of shading and cooling in solar greenhouse[J]. Agricultural Engineering Technology, 2019, 39(22): 12 – 16. (in Chinese)

[13] 丁敏, 李密密, 施旭栋, 等. 考虑覆盖材料蒙皮效应的温室结构稳定承载力计算[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊 1): 224 – 232.
DING Min, LI Mimi, SHI Xudong, et al. Stable bearing capacity coculation of greenhouse structures considering skin effect of covering material[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(Supp.1): 224 – 232. (in Chinese)

[14] ZHANG Guoxiang, LIU Xingxing, FU Zetian, et al. Precise measurements and control of the position of the rolling shutter and rolling film in a solar greenhouse[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 228(29): 645 – 657.

[15] 张国祥, 傅泽田, 张领先, 等. 中国日光温室机械卷帘技术发展现状与趋势[J]. 农业工程学报, 2017, 33(增刊 1): 1 – 10.
ZHANG Guoxiang, FU Zetian, ZHANG Lingxian, et al. Development status and prospect of mechanical rolling shutter technology in solar greenhouse in China[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp.1): 1 – 10. (in Chinese)

[16] 王广印, 王胜楠, 陈碧华, 等. 防虫网覆盖对大棚内小气候、秋番茄生长和病虫害的影响[J]. 河南农业科学, 2016, 45(7): 76 – 81, 92.
WANG Guangyin, WANG Shengnan, CHEN Bihua, et al. Effects of insect-proof screens on microclimate in greenhouse, growth and pests of autumn tomato[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2016, 45(7): 76 – 81, 92. (in Chinese)

[17] ISHII M, SASE S, MORIYAMA H, et al. The effect of evaporative fog cooling in a naturally ventilated greenhouse on air and leaf temperature, relative humidity and water use in a semiarid climate[J]. Acta Horticulturae, 2006, 719: 491 – 498.

[16] 孙维拓, 周波, 徐凡, 等. 日光温室正压湿帘冷风降温性能及冷负荷计算模型[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 214 – 224.

SUN Weituo, ZHOU Bo, XU Fan, et al. Performance of positive pressure fan-pad cooling system and cooling load model for Chinese solar greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(16): 214 – 224. (in Chinese)

[19] 孙昊, 滕光辉, 张晓飞, 等. 日光温室卷帘机荷载实时测量系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 138 – 145.

SUN Hao, TENG Guanghui, ZHANG Xiaofei, et al. Design and test on real-time measurement system of mat roller workload for sunlight greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(1): 138 – 145. (in Chinese)

[20] 曹晏飞, 季李一珂, 王庭庭, 等. 基于 GPRS 技术的日光温室多段式自动通风控制系统设计[J]. 北方园艺, 2020 (12): 70 – 75.

CAO Yanfei, JI Liyike, WANG Tingting, et al. Design of multisatge automatic ventilation control system for Chinese solar greenhouse based on GPRS technology[J]. Northern Horticulture, 2020(12): 70 – 75. (in Chinese)

[21] 赵树朋, 么永强, 张世芳, 等. 日光温室单轴牵引型卷帘机设计[J]. 河北农业大学学报, 2002, 25(4): 94 – 96, 101.

ZHAO Shupeng, YAO Yongqiang, ZHANG Shifang, et al. Design of rolling blinds machine of single axis traction type used in sunlight greenhouse[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2002, 25(4): 94 – 96, 101. (in Chinese)

[22] 张国祥, 傅泽田, 李鑫星, 等. 改进型日光温室后置固定式卷帘装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 299 – 308.

ZHANG Guoxiang, FU Zetian, LI Xinxing, et al. Design and experiment of rear fixed type rolling shutter device in solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 299 – 308. (in Chinese)

[23] 龚志文, 彭黔荣, 周明珠, 等. 微波法胶囊滤棒检测算法研究与装置设计[J]. 烟草科技, 2017, 50(10): 80 – 86.

GONG Zhiwen, PENG Qianrong, ZHOU Mingzhu, et al. Algorithm and device for detecting capsuled-filter rod by microwave [J]. Tobacco Science & Technology, 2017, 50(10): 80 – 86. (in Chinese)

[24] NY/T 2205—2012 大棚卷帘机 质量评价技术规范[S]. 2012.

(上接第 267 页)

[21] FUENTES A, YOON S, PARK J, et al. Deep learning-based hierarchical cattle behavior recognition with spatio-temporal information[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 177: 105627.

[22] 顾静秋, 王志海, 高荣华, 等. 基于融合图像与运动量的奶牛行为识别方法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 145 – 151.

GU Jingqiu, WANG Zhihai, GAO Ronghua, et al. Cow behavior recognition method based on fusion image and movement amount[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 145 – 151. (in Chinese)

[23] NISHIDE R, HOSOMI Y, OHKAWA T, et al. Detecting and tracking breeding cows from bird's eye video of pasture[C] // Proceedings of the 5th IIAE International Conference on Intelligent Systems and Image Processing, 2017: 239 – 246.

[24] WANG L, XIONG Y, WANG Z, et al. Temporal segment networks: towards good practices for deep action recognition[C] // European Conference on Computer Vision. Springer, Cham, 2016: 20 – 36.

[25] LIN J, GAN C, HAN S. TSM: temporal shift module for efficient video understanding[C] // 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. IEEE, 2019: 19410282.

[26] 石跃祥, 曾智超. 基于特征传播的时域分割网络行为识别[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2020, 32(4): 582 – 589.

SHI Yuexiang, ZENG Zhichao. Temporal segmented network behavior recognition based on feature propagation[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2020, 32(4): 582 – 589. (in Chinese)

[27] 张红颖, 安征. 基于改进双流时空网络的人体行为识别[J]. 光学精密工程, 2021, 29(2): 420 – 429.

ZHANG Hongying, AN Zheng. Human behavior recognition based on improved dual flow spatiotemporal network[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(2): 420 – 429. (in Chinese)

[28] 童安扬, 唐超, 王文剑. 基于双流网络与支持向量机融合的人体行为识别[J]. 模式识别与人工智能, 2021, 34(9): 863 – 870.

TONG Anyang, TANG Chao, WANG Wenjian. Human behavior recognition based on double flow network and support vector machine fusion[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2021, 34(9): 863 – 870. (in Chinese)

[29] WOO S, PARK J, LEE J Y, et al. CBAM: convolutional block attention module[C] // Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV), 2018: 3 – 19.

[30] JIANG B, YIN X, SONG H. Single-stream long-term optical flow convolution network for action recognition of lameness dairy cow[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 175: 105536.

[31] QIAO Y, GUO Y, YU K, et al. C3D – ConvLSTM based cow behaviour classification using video data for precision livestock farming[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 193: 106650.