

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2024.07.010

王宝梁, 王政, 孟为国, 等. 基于大豆玉米带状复合种植下的分带式喷杆喷药机设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(7): 60-67

Wang Baoliang, Wang Zheng, Meng Weiguo, et al. Design and experiment of striped spray rod sprayer based on soybean and corn strip composite planting [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(7): 60-67

# 基于大豆玉米带状复合种植下的分带式 喷杆喷药机设计与试验\*

王宝梁<sup>1</sup>, 王政<sup>2</sup>, 孟为国<sup>2</sup>, 陆凯<sup>3</sup>, 贾寿良<sup>4</sup>, 薛金林<sup>2</sup>

(1. 江苏电子信息职业学院, 江苏淮安, 223003; 2. 南京农业大学工学院, 南京市, 210031;  
3. 江苏省农机化服务站, 南京市, 210017; 4. 南京农业大学实验室与基地处, 南京市, 210095)

**摘要:**针对大豆玉米带状复合种植模式下的现有喷药机无法分带定向喷施、适用性差的问题,设计一款适应于该模式、具有药物分带定向喷施、喷施高度分带可调节、防止药物发生带间飘移功能的自走式喷杆喷药机。根据4+2大豆玉米带状复合种植模式的农艺要求,确定整机机构方案;确定喷药机的喷杆高度调节装置、喷杆折叠装置和防飘移装置三个关键装置方案并进行结构设计。在灌云县大豆农场种植基地,对样机的高度调节性、可折叠性及防飘移性进行试验验证。结果表明,高度调节、折叠装置可以有效满足作业需求,防飘装置能够减少92.52%的液滴飘移,能够满足对玉米大豆的化学除草阶段及化学控旺阶段作业要求。

**关键词:**大豆;玉米;带状复合种植;喷药机;防飘移

**中图分类号:**S513; S565.1 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-5553(2024)07-0060-08

## Design and experiment of striped spray rod sprayer based on soybean and corn strip composite planting

Wang Baoliang<sup>1</sup>, Wang Zheng<sup>2</sup>, Meng Weiguo<sup>2</sup>, Lu Kai<sup>3</sup>, Jia Shouliang<sup>4</sup>, Xue Jinlin<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Vocational College of Electronics and Information, Huai'an, 223003, China; 2. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing, 210031, China; 3. Agricultural Mechanization Service Station of Jiangsu Province, Nanjing, 210017, China; 4. Department of Laboratory and Base, Nanjing Agricultural University, Nanjing, 210095, China)

**Abstract:** In order to solve the challenges of unable to perform targeted spraying and poor applicability in the strip intercropping of soybean and corn, A self-propelled spray boom sprayer designed for this planting mode has been developed. This spray machine is capable of directional and height-adjustable spraying, preventing drift between rows. Firstly, based on the agricultural requirements of the new planting mode, the spraying plan is determined. Then, the specific parameters of the 4+2 planting mode in Jiangsu Province are used to determine the design of key devices for the spray machine, including the height adjustment device for the spray boom, the folding device for the spray boom, and the drift prevention device. Finally, soybean-corn strip intercropping spraying experiments are conducted at the soybean farm in Guanyun County. The prototype's height adjustment, folding device, and drift prevention performance are tested and verified. The results show that the height adjustment and folding devices can effectively carry out chemical weed control and chemical growth regulation for corn and soybean. The drift prevention device reduces liquid droplet drift by 92.52%.

**Keywords:** soybean; corn; band compound planting; sprayer; anti-drift

收稿日期:2024年2月27日 修回日期:2024年4月10日

\* 基金项目:江苏高校“青蓝工程”资助;江苏省现代农机装备与技术示范推广项目(NJ2022-33)

第一作者:王宝梁,男,1986年生,江苏新沂人,硕士,讲师;研究方向为农业装备设计与智能化测控。E-mail: wbaoliang1860@126.com

通讯作者:薛金林,男,1974年生,江苏淮安人,博士,教授,博导;研究方向为农业装备设计与智能化测控。E-mail: xuejinlin@njau.edu.cn

## 0 引言

为保证国家粮食安全,减少对于大豆进口的依赖,国家出台了“大豆振兴计划实施方案”,扩大黄淮海和西南地区大豆种植面积。为响应国家政策,江苏省在2022年大豆种植规模需要达到40 km<sup>2</sup>,同时为解决粮食争地的矛盾,全国多地包括江苏省都在积极探索大豆玉米复合种植模式<sup>[1]</sup>,即大豆玉米带状复合种植,该种植模式是适当缩紧玉米行间距,利用玉米行间隙种植大豆,在保证不减少玉米产量的同时能够多收一季大豆,目前对于该种植模式的农艺探索已比较成熟,但是大豆玉米带状复合种植机械化面临的问题主要有缺少除草剂喷施专用机具<sup>[2]</sup>,现在市面上没有专门针对大豆玉米带状复合种植的喷药机械,导致该模式种植机械化程度低,农户种植意愿不高,大大制约了该种植模式的推广应用。

西方发达国家和亚洲发达国家喷药机械的研发完全符合各国的农业发展模式<sup>[3]</sup>。例如美国、德国的喷杆式喷药机,其喷药机喷幅达到了39 m<sup>[4]</sup>,因为欧美国家施行的是农场主种植模式,种植规模大且耕地平整集中,特别适合大型机械的作业,由于作业器具大,药液的浪费也比较严重,因此西方国家也越来越注重精准精量喷施作业。我国对于喷杆式喷药机械的研究起步较晚。曹鹏鹏等<sup>[5]</sup>采用了风幕式防飘移技术,设计一款高地隙大型的喷杆式喷药机,解决了因为药物飘移对自然环境造成的破坏问题,但该款喷药机主要解决的是玉米生长中后期的问题,由于加装了风幕系统导致喷药机整体结构更大,内部系统也更复杂。周瑞琼等<sup>[6]</sup>在不同的喷药参数下对喷药机药物飘移的情况进行风洞试验研究<sup>[7]</sup>,但是必须在合适的风速下作业、选用合理的喷药压力、合适的喷头从多方面减少药物的飘移,而对于防飘移要求更严格的大豆玉米带状复合种植的新模式,这些防飘移手段是远远不够的。

因此本文针对大豆玉米带状复合种植机械化水平不高、现有喷药机难以分带喷施、适应作物生长过程中不同的高度等问题,设计自走式大豆玉米带状复合种植喷药机,适应于该模式、具有药物分带定向喷施、喷施高度分带可调节、防止药物发生带间飘移功能。为积极响应国家关于大力发展大豆玉米带状复合种植技术,扩大大豆种植面积,促进农民减本增效,助力乡村振兴,提供了适宜的装备支持。

## 1 整机机构与工作原理

### 1.1 设计要求

对于玉米大豆复合种植的植保作业,除了要考虑

到作物的用药区别、喷施高度不同、作物生长用药阶段等问题,防飘移对于该种植模式也是十分重要的;除此之外,在除草或防病虫害作业时,药物喷施高度通常是高出作物25 cm左右,但是在带状复合种植模式下,大豆玉米在生长过程中其高度并不一致,甚至高度差距很大,这就需要喷药机的喷杆能够同时满足不同高度的作物喷施需求。在大豆玉米带状复合种植模式中的化学除草阶段,喷施大豆和喷施玉米的药物不能混合使用,需要分作物带单独喷施,必须设计出两套喷药管路。综上,喷药机整机机构设计要求如下。

1) 针对大豆带玉米带植株高度不一致问题,所设计的喷药机应该能够实现分带喷施。

2) 针对药物飘移产生药害问题,所设计的喷药机应该有防飘移装置。

3) 针对玉米生长过程中高度变化大特点,所设计的喷药机应具有高度调节功能,最大调节高度应能够达到1.8 m高度。

4) 所设计的喷药机工作效率要高,至少应与单种作物喷药机的喷药效率相当。

### 1.2 整机结构

所设计的玉米大豆复合种植喷药机主要有发动机及底盘总成、喷杆高度调节装置、防飘移装置、喷杆折叠装置、玉米药箱、大豆药箱,另外选择合适的防飘移喷头,增加电液控制系统控制喷杆高度调节以及折叠装置,完成对上述种植模式的喷药作业。本文设计的喷药机整机结构如图1所示。

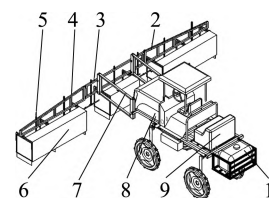


图1 喷药机整机结构

Fig. 1 Whole structure of the sprayer

1. 玉米药箱 2. 右段喷杆架 3. 中段喷杆架 4. 左段喷杆架 5. 喷杆  
6. 防飘移装置 7. 高度调节装置 8. 发动机及底盘总成 9. 大豆药箱

考虑到江苏地区复合种植模式的特点,玉米大豆复合种植喷药机的喷杆架主体为左、中、右三段式,玉米带喷药管路和喷头将固定在其上。通过分别调整喷杆主体以及大豆喷杆的离地高度,以实现喷施高度分带调整的功能。由于两种作物的药物相克,不能混合喷洒,因此设计两个独立药箱和两条喷施管路。防飘移装置主要由高度分带调节杆、防风架、遮帘布等组成,由于玉米大豆不同时期生长高度不同,防飘移装置也要设计有高度可调功能。在作物生长初期,为避免在地上拖行造成损伤,进而影响防飘移效果,因此设计了自动收放隔离布功能。

### 1.3 工作原理

玉米大豆复合种植喷药整机具有高度调节、喷杆折叠、分带定向喷施、防药物飘移的功能。喷药机的具体工作原理和工作过程如下:首先由人工将喷杆安装在牵引机上,将喷药管路固定在喷杆上,根据作物生长情况,分别调整喷杆主体的离地高度和大豆带喷杆的离地高度,即电液控制系统将喷杆主体调整到离玉米最高高度的 25 cm 以上的位置,然后调节大豆带喷杆位置;防飘移装置固定在喷杆主体上,通过高度分带调节杆调整隔离布的隔离长度。喷药机在作业结束后,将喷杆折叠,减小喷药机所占空间。所设计的喷药机的主要技术指标如表 1 所示。

表 1 喷药机主要设计参数  
Tab. 1 Main design parameters of sprayer

项目	参数	项目	参数
整机功率/kW	36.9	大豆药箱容积/L	350
离地间隙/mm	1 000	玉米药箱容积/L	350
轮距/mm	1 450	行走速度/(km·h <sup>-1</sup> )	0~7
喷幅/m	8.8	工作效率/(hm <sup>2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	3.33
喷施高度/m	0.5~1.8	整机质量/kg	满载 2 000
药箱数量/个	2		

## 2 喷药机构关键装置设计

### 2.1 高度调节装置

高度调节装置能够让喷药机对应不同时期的玉米进行喷药作业,该装置由上横杆、下横杆、牵引机固定端、喷杆架固定端构成、调节油缸组成,其原理为平行四边形机构,在该机构中不存在虚约束、复合铰链和局部自由度,结构简图如图 2 所示。根据自由度计算公式(1)可以求出该平面机构的自由度  $F_n$ 。

$$F_n = 3n - 2f_1 - f_h \quad (1)$$

式中:  $n$  —— 零件数;

$f_1$  —— 平面低副数;

$f_h$  —— 平面高副数。

将参数代入式(1)计算可得,该平面机构的自由度为 1。

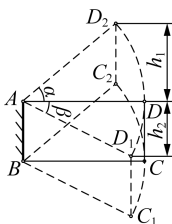


图 2 高度调节装置机构简图

Fig. 2 Schematic diagram of height adjustment device mechanism

对于玉米大豆复合种植的苗前除草作业,其作业

高度为 50 cm,在化学控旺阶段,玉米生长高度约为 1.1~1.3 m,据此可以确定喷杆架的高度调节范围为 50~150 cm,牵引机最小地隙高度为 1.0 m;当喷杆架高度调节装置与地面平行时,其最下端与牵引机最下端平齐。

用解析法对各个部件进行计算分析,四边形 ABCD 为高度调节装置的初始状态,该状态下 AD 边、BC 边均与地面平行,喷杆最底端离地高度为 1.2 m,  $ABC_2D_2$  为喷杆最底端的上极限高度,  $ABC_1D_1$  为喷杆最底端的上极限高度。上升角  $\alpha$  和下降角  $\beta$  计算如式(2)和式(3)所示。

$$\alpha = \arcsin \frac{h_1}{l_{AD}} \quad (2)$$

$$\beta = \arcsin \frac{h_2}{l_{AD}} \quad (3)$$

式中:  $l_{AD}$  —— AD 边的长度, mm;

$h_1$  —— D 点从初始位置运动到上极限位置的垂直距离, mm;

$h_2$  —— D 点从初始位置运动到下极限位置的垂直距离, mm。

经计算,AD 边为 1 200 mm,  $h_1$  为 600 mm,  $h_2$  为 550 mm,将数据分别代入式(2)、式(3),计算可得:  $\alpha = 36.87^\circ$ ,  $\beta = 27.82^\circ$ 。

### 2.2 喷杆折叠装置

折叠装置是喷杆中的重要装置,喷杆长度要超过喷幅要求,即 8 m 以上,为了减小喷药机的横向占地面积,设计了折叠装置。喷杆的折叠力量较小,为减小喷药机成本、方便实现控制,采用电动推杆来实现折展动作。

折叠电动推杆的装置简图如图 3 所示,其中 ab 杆表示中间段喷杆架, ac 杆表示右段喷杆架,通过销钉 a 将两段喷杆销接, ab 杆固定在高度调节机构上, de 为折叠电动推杆,通过电动推杆的伸缩使 ac 杆展开或折叠, d、e 为电动推杆安装点。

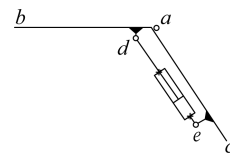


图 3 折叠装置简图

Fig. 3 Simplified diagram of folding device

用图解法确定喷杆在展开和折叠位置时电动推杆安装位置及安装孔的中心距离,如图 4 所示。并经计算喷杆折展时所需推力、结合控制功能需求等,选择了合适的执行部件、驱动部件、动力部件及控制部件,确定电动推杆的参数。



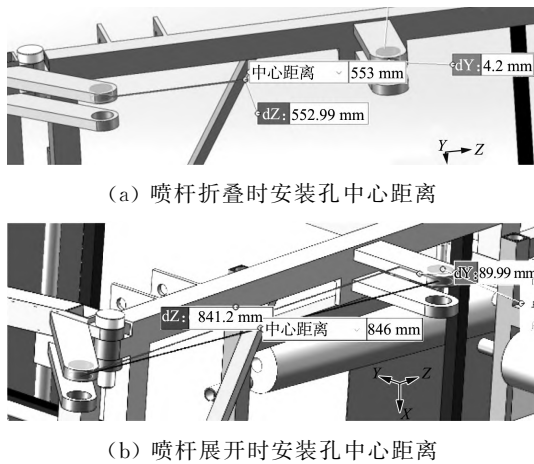


图 4 电动推杆安装距离

Fig. 4 Installation distance of electric push rod

### 2.3 喷药系统及防飘移装置设计

#### 2.3.1 喷药系统设计

喷药系统是喷药机的核心<sup>[7]</sup>,在大豆玉米带状复合种植的植保过程中,由于大豆作物和玉米作物在施药过程中存在不同步的问题,例如两种作物的控旺时期不同,因此控旺药物在喷施时可能会需要间隔一段时间,此外,在农户施液态肥料时会根据大豆和玉米的长势选择施肥的时期;对于玉米大豆带状复合种植模式除草作业而言,两种作物分属不同子叶的植物,因此会产生用药冲突,不能将药物装在一个药箱内同时喷施,在喷药管路中药物也不能混合;而大豆玉米的用药量也不相同,因此需要设计出两条互相独立的喷药管路,并且要求这两条管路的喷施压力、流量可以独立调节,所设计喷药系统如图 5 所示。

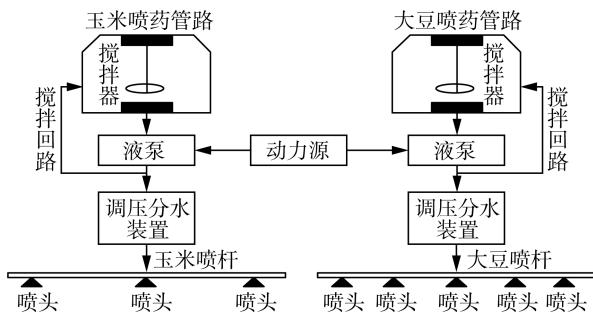


图 5 喷药系统简图

Fig. 5 Spraying system diagram

根据玉米和大豆作物的常见的病虫害及除草施药量情况<sup>[8, 9]</sup>,经计算得到,复合种植中病虫害防治作业时,大豆施药 350~520 L/hm<sup>2</sup>;玉米施药量 800~1 000 L/hm<sup>2</sup>。对于除草作业,施药在 700~1 000 L/hm<sup>2</sup>,具体施药量根据病虫害情况和草量而定。喷药机工作速度在 3~5 km/h,喷幅为 8.8 m,根据玉米大豆的每公顷用药量可以得出喷大豆管路喷出流量不低于 30 L/min,玉米管路喷出流量不低于 450 L/min,单个药箱体积为

300 L,搅拌流量不低于 15 L/min,因此单管路总的流量应当不低于 45 L/min,进而进行液泵、分水调压阀和搅拌器的选型,此处不再赘述。

#### 2.3.2 防飘移装置设计

近年来许多学者对雾滴飘移的影响因素进行了分析<sup>[10-13]</sup>,在喷施器具以及操作人员相同的情况下,自然风速越大,雾滴飘移量越多,自然风还会影响液滴的蒸发,风速越大,液滴蒸发越快。为更好地实现喷雾防飘,喷头选用 ID3 系列、防飘移 AD 系列及 IS 系列的三种防飘喷头。在 Lechler 农用喷头计算平台输入相关参数可计算出喷头所需尺寸以及工作压力,农药的喷施速度根据计算结果以及作业实际合理输入,喷药机工作时的速度取平均行驶速度,根据工作压力选择喷头喷孔尺寸并且可得到喷雾粒径,该数据是喷雾飘失仿真的重要数据。

1) 基于 Viscous 模型液滴出口速度的仿真。在 0.25 MPa、0.3 MPa、0.35 MPa 下对上述各喷头进行仿真分析。在 0.3 MPa 压力下进行仿真分析,得到各系列喷头速度矢量图和压力云图如图 6 所示。

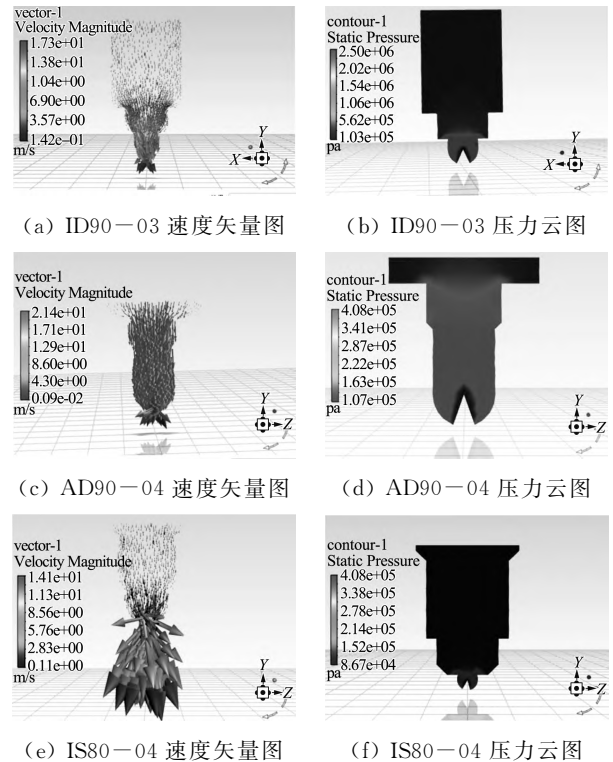


图 6 0.3 MPa 下各喷头的速度矢量图和压力云图

Fig. 6 Velocity vector diagram and pressure nephogram of each nozzle under 0.3 MPa

将 Fluent 分析结果记录在表 2 中。根据结果可知,对三种不同喷头,当喷施压力变大时,液滴的出口速度变大。

根据 ISO 25358—2018《Crop protection equipment Droplet-size spectra from atomizers Measurement and

classification》,将农业喷雾大小分成8个等级,根据Lechler农业计算平台,计算喷施压力分别为0.25 MPa、0.3 MPa、0.35 MPa时,各喷头喷出雾滴的容量中径VMD,将计算得到的颜色码对比ISO的分级如表3所示。

表2 不同压力下各喷头的喷速

Tab. 2 Spray speed of each nozzle under different pressures

喷头型号	喷速/(m·s <sup>-1</sup> )		
	0.25 MPa	0.3 MPa	0.35 MPa
ID90-03	10.2~14	13.1~17.1	16.3~20.0
AD90-04	8.7~15.1	15.6~20.1	18.9~26.1
IS80-04	6.9~9.8	9.2~14.1	15.1~23.1

表3 各喷头喷出的液滴的VMD

Tab. 3 VMD of droplets ejected by each nozzle

喷头型号	VMD/μm		
	0.25 MPa	0.3 MPa	0.35 MPa
ID90-03	428~622	349~428	219~349
AD90-04	219~349	219~349	178~219
IS80-04	>622	428~622	219~349

2) 基于DPM的飘移仿真与试验。分别对三种喷头在3 m/s和6 m/s两种风速下进行前处理,最后求解得到6种工况的液滴轨迹图,根据防飘移仿真结果,在三种防飘喷头中,防飘效果最好的喷头是AD90-04喷头,在不同的喷施压力下液滴的飘移距离比其他喷头小;喷头的喷施压力越小,喷头的防飘性能越好,但是不能低于0.3 MPa,否则将影响药物喷施均匀性。图7为AD90-04喷头在3 m/s风速时,不同压力下喷出液滴的飘移云图。

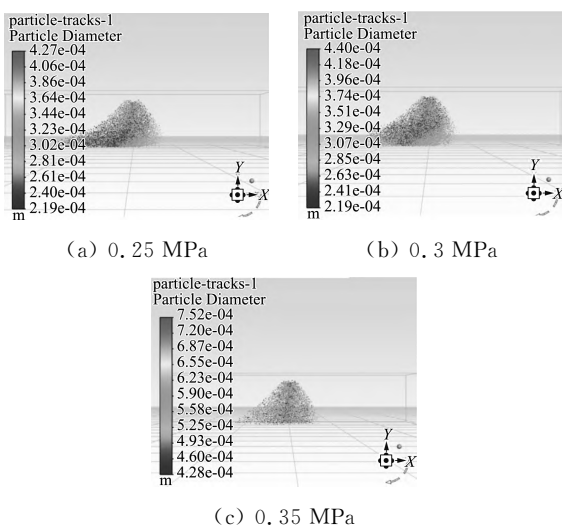


图7 AD90-04喷出液滴不同压力下的飘移云图

Fig. 7 AD90-04 drifting nephogram of ejected droplets under different pressures

为检验仿真结果的正确性,需要进行喷头防飘效果

对比试验,试验过程如下:采用3种不同喷头,在同一喷药系统中进行喷药试验;用风扇模拟自然风速,调整风扇的与喷头的距离,调整不同的喷施压力测量地面上药液飘移的最远距离,作为防风遮挡装置设计依据。

3) 基于飘移仿真试验结果的防飘移装置设计。在对防飘移要求严格的化学除草阶段,作物高度在20 cm左右,为了不损伤幼苗,喷施高度应该距作物15~30 cm,在作物的行间喷施,AD90-04喷头在工作压力为0.35 MPa、喷雾下落高度50 cm时,飘移距离约为0.7 m,在设计防风遮挡装置时,应当适当的将该距离放长。

防飘移装置由高度分带调节杆、防风架、遮挡布、遮挡布卷杆、喷头安装杆及加强条等组成,高度分带调节杆主要功能是适应作物生长过程的变化;遮挡布主要是防止液滴直接飘向相邻作物带,后挡布是为了弥补侧挡布的不足,同时还能减少喷药机在行走时产生的湍流涡旋对液滴的影响;防风架的宽度能够满足将作物带隔开的要求,在设计防风架作物带向长度时,应当考虑喷头喷出的液滴在受自然风影响飘移后能够落到作物带上,保证只有飘移的雾滴被遮挡布收集后聚集滴落,因此遮挡布的纵向长度设计为1.0 m。结构如图8所示。

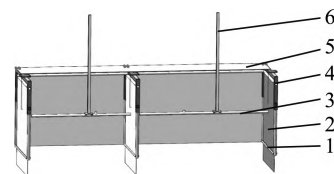


图8 防飘移装置结构布局

Fig. 8 Structure layout of anti-drift device

1. 加强条 2. 侧挡布 3. 喷头安装杆 4. 防风架  
5. 后挡布 6. 高度分带调节杆

### 3 样机性能试验

为了检验大豆玉米带状复合种植喷药机样机的工作性能、验证高度调节装置和折叠装置集成到整机后的正确性和合理性,对喷药机的高度调节装置、折叠装置、防飘移能力进行试验。试验方案及评价指标依据GB/T 24677.2-2009《喷杆喷雾机 试验方法》<sup>[14]</sup>和GB/T 24682.2-2015《植物保护机械喷雾机飘移量分级(第1部分)》<sup>[15]</sup>进行。

#### 3.1 高度调节试验

为验证高度调节装置集成到整机后的正确性和合理性,对喷杆高度调节装置进行试验。试验过程如下:将高度调节液压缸分别调整到完全伸出状态和完全收缩状态,用米尺测量喷杆架的下端到地面的垂直距离,采用三点法分别测量左侧喷杆架、右侧喷杆架及中段

喷杆架。

经测量,样机实际的高度调节装置其上极限位置最低能够调整到 157.7 cm,能够用于玉米生长中期化学控旺阶段的作业;喷杆架下极限位置最小离地高度为 47.4 cm,虽然中间段喷杆架的该数值略高于两侧喷杆架,但是该差距可以依靠分带调节功能消除,因此喷杆架高度调节装置是完全能够实现对玉米大豆的化学除草阶段及化学控旺阶段进行作业的。

### 3.2 喷杆折展试验

将喷杆两侧的折叠电动推杆分别运行到完全伸出和完全收缩状态,分别测量两侧喷杆架和中间段喷杆架铰接处的角度,展开角和折叠角即折叠电动推杆完全伸出和完全缩回时两侧喷杆架和中间喷杆架在铰接处形成的角度。

对于喷杆的展开必须计算喷杆的横向偏移量,偏移量应当在一个合理范围之内,这个合理范围是指能够保证各喷头在其指定的工作带内工作,如图 9 所示,其中 A1~A6 表示靠近作物带边的喷头,B1~B6 表示作物带内侧喷头,最大偏移距 X 指由折叠装置展开不到位导致实际工作时喷杆末端与理想状态下喷杆末端的距离,H 指两相邻带边喷头的距离,该距离的一半可作为喷杆允许的最大偏离距,根据 Lechler 官网公布的喷头的安装标准,H 应大于 30 cm。

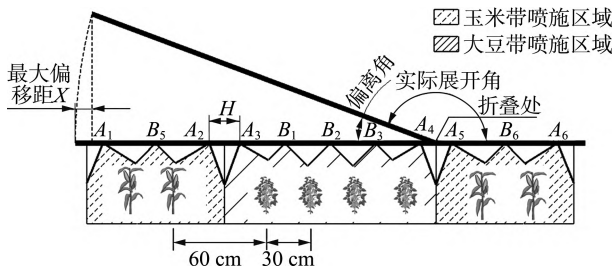


图 9 偏离距和偏离角示意图

Fig. 9 Deviation data and deviation angle schematic diagram

经计算,左、右两侧喷杆架最大偏移距分别为 1.57 cm、1.05 cm,均小于 H/2,因此喷杆架在展开时实际的最大偏移对喷药机的工作可靠性并不会产生影响。

### 3.3 正交试验

试验当日的风速为 3.4~5.4 m/s。为验证喷药机的行驶速度、喷施压力和喷施高度对喷药机跨带飘移的影响并找出最佳的工况组合,采用 L9(3<sup>4</sup>)的正交试验表设计正交试验方案进行飘移雾滴沉积试验,试验因素水平如表 4 所示,试验结果列于表 5 中,A、B、C 为各因素编码值。液滴沉积数量指与施药作物带相邻的作物带上试纸收集的药液沉积,该处收集的液滴数量越多,说明药物跨带飘移越多。

从正交试验来看,第 6 组试验组合时延喷药机运

动方向的飘移量最少,该组合为 A2B3C1,即喷施高度为 25 cm,喷施压力为 0.35 MPa,行驶速度为 3 km/h。

表 4 因素水平表

Tab. 4 Factor level table

水平	喷施高度 /cm	喷施压力 /MPa	行驶速度 /( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )
1	25	0.25	3
2	35	0.30	4
3	45	0.35	5

表 5 正交试验数据

Tab. 5 Test data of orthogonal experimental data

方案	A	B	C	D	液滴沉积数量/个
1	1	1	1	1	5
2	1	2	2	2	12
3	1	3	3	3	15
4	2	1	2	3	20
5	2	2	3	1	25
6	2	3	1	2	3
7	3	1	3	2	22
8	3	2	1	3	5
9	3	3	2	1	19

利用极差分析法研究各因素对跨带飘移的影响,极差分析如表 6 所示,表中  $K_1$ 、 $K_2$  和  $K_3$  分别表示每个因素下各个水平的平均值。由表 6 可以看出,对液滴沉积数量影响最大的是行驶速度,最合理的行驶速度是 3 km/h。

表 6 极差分析表

Tab. 6 Range analysis table

均值	A	B	C	D
$K_1$	10.67	15.67	4.33	16.33
$K_2$	16.0	14.0	17.0	12.33
$K_3$	15.33	12.33	20.67	13.33
极差	5.33	3.34	16.34	4

### 3.4 防飘移性能试验

根据正交试验的结果,在喷药机最佳的工况组合下进行防飘移性能试验,即喷药机的运行速度为 3 km/h,喷头距作物高度 25 cm,喷施压力 0.35 MPa 下进行该试验。试验过程如下:打开大豆带喷药管路的药泵进行喷施,在相邻的两个玉米带将水敏试纸(30 mm×80 mm)用回形针夹在玉米作物的叶片上,两条相邻的玉米带共四行玉米分别摆放 3 张试纸,纵向间隔 1.5 m,如图 10 所示。记录每张试纸上的液滴数量;采用普通喷头并撤去防风罩,更换水敏试纸,用同样的方法记录水敏试纸上液滴,将两次收集的试纸



进行对比,用式(4)计算防飘率,两次试验的结果记录在表7中,其中 $Y_1$ 表示在采用了防飘喷头并加装了防风罩的情况,以这种条件下的飘移沉积量作为被测喷药机飘移沉积量; $Y_2$ 表示将防风罩撤去并使用普通喷头的情况,以这种条件下的飘移沉积量作为基准喷药机飘移沉积量。

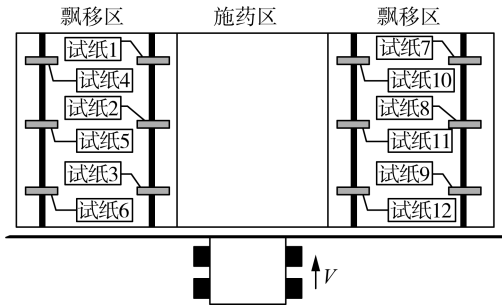


图10 试纸位置图

Fig. 10 Position map of test paper

$$d_{\text{red}} = \frac{d_{\text{RS}} - d_{\text{CS}}}{d_{\text{RS}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $d_{\text{red}}$ ——防飘率;

$d_{\text{RS}}$ ——基准喷药机飘移沉积量;

$d_{\text{CS}}$ ——被测喷药机飘移沉积量。

表7 防飘移试验结果

Tab. 7 Test result of anti-drift

试纸摆放 位置序号	液滴沉积数量		防飘率 /%
	$Y_1$	$Y_2$	
1	2	22	90.9
2	1	15	93.3
3	3	25	88.0
4	0	14	100
5	1	14	92.9
6	0	13	100
7	2	17	88.2
8	1	13	92.3
9	1	13	92.3
10	3	27	88.9
11	2	29	93.1
12	3	31	90.3

经计算,12个位置的平均防飘率为92.52%,防飘效果很好,经分析主要有三个原因,一是由于在防飘移试验前进行了科学合理的准备工作。在试验前进行正交试验,根据正交试验结果确定喷药机最佳的工况组合;二是所设计的防飘移装置起到了重要的遮挡作用。防飘移装置三面都有挡布,封闭性非常好;三是选择了适当的喷头,根据实际作业环境对不同类型喷头进行了仿真和试验,从而确定适合的喷头。有三个位置的防飘率低于90%,经查看分析有可能是由于大豆带幅度较宽

且植株高度偏低,使该区域雾滴更易受空间气流的胁迫扰动而产生漂移,同时经查看这三个位置处于侧挡布前边缘处,可能样机在行驶过程中由于车速带来的气流影响,后续将对该现象进行进一步研究优化,其余位置的防飘率均达到90%以上,根据GB/T 24682.2—2015中的防飘率分级标准,防飘效果达到了C级。

## 4 结论

1) 根据大豆、玉米两种作物的生长过程中的差别以及植保农艺要求,设计合理的分带调节机构。整体高度调节由液压驱动完成,分带调节则采用手动调节,兼顾自动化程度、调节的便利程度以及成本。

2) 为保证机器的通过性,因为喷杆尺寸过大设计喷杆的折叠装置,考虑到控制实现比较方便,喷杆折叠采用电动推杆驱动,除提高折叠装置的安全性能和工作效率外,还避免传统喷杆装置用于玉米大豆带状复合种植时喷施不够精准的情况。

3) 设计防飘移装置。用Viscous模型和DPM模型对三款防飘移喷头内部流体进行仿真分析,根据仿真结果选择防飘性能更好的喷头并设计出防风装置,解决玉米大豆带状复合种植在化学除草阶段药物的带间飘移导致的药害问题。

4) 对样机的高度调节、折叠装置性能进行试验验证,结果表明高度调节、折叠装置可以有效实现对玉米大豆的化学除草阶段及化学控旺阶段进行作业;对样机的防飘移性能进行试验分析,结果显示喷药机能减少92.52%以上的液滴飘移。

## 参 考 文 献

- [1] 张良军. 黄淮海地区大豆—玉米带状复合种植技术[J]. 农业工程技术, 2022, 42(17): 64—65.
- [2] 刘燕, 陈彬, 于庆旭, 等. 大豆玉米带状复合种植机械化技术与装备研究进展[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(1): 39—47.
- [3] 徐峰, 张黎骅, 彭俊明, 等. 大豆玉米带状复合种植全程机械化专用机具研制现状与趋势[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(1): 1—8.
- [4] 蔡忠颖, 熊辉. 约翰迪尔4630型自走式喷药机[J]. 现代化农业, 2014(9): 48.

- [5] 曹鹏鹏, 田艺心, 高凤菊, 等. 玉米—大豆间作不同带距和行距对两作物生长及产量的影响[J]. 山东农业科学, 2018, 50(7): 78—81, 87.  
Cao Pengpeng, Tian Yixin, Gao Fengju, et al. Effects of different band and row spacing on growth and yield of intercropping maize and soybean [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2018, 50(7): 78—81, 87.
- [6] 周瑞琼, 张慧春, 郑加强, 等. 基于林木病虫害防治的移动喷雾参数对雾滴穿透性影响分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(7): 114—122.  
Zhou Ruiqiong, Zhang Huichun, Zheng Jiaqiang, et al. Study on parameters of mobile spraying to droplet penetration targeting forestry pest and disease control [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2019, 39(7): 114—122.
- [7] 张莉, 刘京蕊, 李震, 等. 温室草莓不同喷药方式作业质量研究[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(7): 63—68.  
Zhang Li, Liu Jingrui, Li Zhen, et al. Study on the quality of different spraying methods for strawberries in greenhouse [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(7): 63—68.
- [8] 唐子永. 不同生长时期夏玉米管理技术及病虫害防治策略[J]. 世界热带农业信息, 2021(8): 24—25.
- [9] 王德全, 毕一立. 花生、大豆田化学除草方法[J]. 新农业, 2012(4): 18.
- [10] 王潇, 张美娜, Zhou Jianfeng, 等. LiDAR 传感器及技术在农业场景的应用进展综述 [J]. 中国农机化学报, 2022, 43(11): 155—164.  
Wang Xiao, Zhang Meina, Zhou Jianfeng, et al. A review on the application of LiDAR sensors and technologies in agricultural scenarios [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(11): 155—164.
- [11] 张铁, 董祥, 尹素珍, 等. 轻便型高地隙喷杆喷雾机大豆田间施药试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(S1): 182—188.  
Zhang Tie, Dong Xiang, Yin Suzhen, et al. Spraying performance of lightweight high clearance boom sprayer in soybean field [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(S1): 182—188.
- [12] 谢英杰, 王国宾, 王宝聚, 等. 植保无人机喷施除草剂喷头选择及参数优化[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(4): 61—69.  
Xie Yingjie, Wang Guobin, Wang Baoju, et al. Selection of nozzle type and parameter optimization in herbicide spraying process of plant protection UAV [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(4): 61—69.
- [13] 王继环, 王秀, 邓巍, 等. 化学农药喷洒漂移主要影响因素分析[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(3): 78—86.  
Wang Jihuan, Wang Xiu, Deng Wei, et al. Analysis of key factors on potential chemical pesticide spray drift [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(3): 78—86.
- [14] GB/T 24677.2—2009, 喷杆喷雾机试验方法[S].
- [15] GB/T 24682.1—2009, 植物保护机械喷雾机飘移量分级第1部分: 分级[S].
- [20] 樊士冉, 张志勇, 任学明, 等. 猪舍内风速对猪只散热及有效环境温度的影响研究[J]. 中国猪业, 2022, 17(5): 90—93.  
Fan Shiran, Zhang Zhiyong, Ren Xueming, et al. Effect of wind speed in piggery on heat dissipation and effective ambient temperature of pigs [J]. China Swine Industry, 2022, 17(5): 90—93.
- [21] 向继文, 刘昕, 陈善荣. 基于DS18B20的数字温度计设计与仿真[J]. 电脑与信息技术, 2019, 27(1): 47—50.  
Xiang Jiwen, Liu Xin, Chen Shanrong. Digital thermometer design and simulation based on DS18B20 [J]. Computer and Information Technology, 2019, 27(1): 47—50.

(上接第59页)

Feng Jiang, Lin Shengfeng, Wang Pengyu, et al. Piggery temperature and humidity control system based on adaptive fuzzy PID control [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018, 49(2): 73—86.

- [19] 张矿伟, 张少杰, 曾德斌, 等. 一种基于双模糊控制理论的PID控制的温湿度系统及应用[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(4): 55—60.  
Zhang Kangwei, Zhang Shaojie, Zeng Debin, et al. Design and application of temperature and humidity system of a pigsty based on double fuzzy adaptive PID control [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(4): 55—60.