

大型自走式喷雾机喷杆研究现状及发展趋势分析

庄腾飞¹ 杨学军^{1,2} 董祥³ 张铁³ 严荷荣¹ 孙星³

(1. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083; 2. 南方粮油作物协同创新中心, 长沙 410128;
3. 现代农装科技股份有限公司, 北京 100083)

摘要: 高地隙自走式喷杆喷雾机是田间施药机械的主要机型,而喷杆是实现喷雾稳定作业的关键机构。近年来,为提高高地隙自走式喷雾机喷杆的精准施药水平,喷杆结构不断得到优化,喷杆减振、平衡技术日趋成熟。本文阐述了喷杆的平面、三角形立体和梯形立体等3种桁架结构,分析国内外自走式喷雾机喷杆的主要结构参数以及减振装置和智能控制系统的技术现状,概述了喷杆在减振、平衡和位姿检测方面的主要研究成果。据统计20 m以上喷幅的喷雾机仅占比6.79%,10~14.9 m喷幅占比73.30%,表明国内以小型喷杆为主,大型喷雾机占比小。分析了国内喷杆存在的主要问题,指出我国喷杆的发展趋势,即优化喷杆结构、加强喷杆系列产品开发、设置多级多点减振机构、提高自平衡控制水平、实现位姿智能监测调整,为我国喷杆进一步的结构优化和性能提升提供了参考。

关键词: 自走式喷雾机; 喷杆结构; 减振; 平衡

中图分类号: S224.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)S0-0189-10

Research Status and Development Trend of Large Self-propelled Sprayer Booms

ZHUANG Tengfei¹ YANG Xuejun^{1,2} DONG Xiang³ ZHANG Tie³ YAN Herong¹ SUN Xing³

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China

2. Southern Regional Collaborative Innovation Center for Grain and Oil Crops in China, Changsha 410128, China

3. Modern Agricultural Equipment Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: High clearance self-propelled boom sprayer (HCSBS) is a major type of field spraying machine, and spray boom is a key mechanism to realize the stability of spraying work. In recent years, in order to improve the precise spraying level of HCSBS, the structure of spraying boom has been optimized continuously, and the technology of vibration reduction and balance of spraying boom has become more and more mature. Three kinds of truss structures, including plane, triangular space and trapezoid space types of the sprayer were discussed. Main structure parameters of self-propelled sprayer booms at home and abroad were analyzed. Technical status of vibration damping device and intelligent control system were described. Main research results of spray booms on vibration damping, balance and post measurement were summed up. According to statistics, it was concluded that the proportion of sprayers with sprayer span above 20 m was only 6.79%, and spray span between 10 m and 14.9 m accounted for 73.30%, which indicated that Chinese sprayers were mainly small type with shorter and smaller spray boom compared with foreign sprayers, and its large spray machines only accounted for a small proportion. Based on the above researches, main problems of domestic spray booms were analyzed, and development trend of Chinese spray boom was also pointed out, which included structure optimization of spray boom, development of spray boom series products, settlement of multi-stage and multi-point vibration damping mechanism, improvement of self-balance control and monitoring level, and intelligent adjustment of position and posture. The research would provide references for further structure optimization and performance improvement of spray boom in China.

Key words: self-propelled sprayer; boom structure; vibration damping; balance

收稿日期: 2018-07-10 修回日期: 2018-08-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700903、2016YFD0200705)、农机装备智能制造创新方法在现代农装的应用示范项目(2016IM030200-4-1)和国家马铃薯产业技术体系建设项目

作者简介: 庄腾飞(1987—),男,博士生,主要从事农业机械装备与关键技术研究,E-mail: ztf07003@163.com

通信作者: 杨学军(1961—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业机械装备研究,E-mail: camms@263.net

0 引言

高地隙喷杆喷雾机是实现农作物生长全程喷药作业的主要植保机型,而喷杆是保障高地隙喷雾机进行低喷量、精喷洒、高效施药作业的关键机构^[1-5]。由于大型高地隙自走式喷雾机的喷杆具有臂展长、柔性大等特点,即使是很小的振动幅度都可能导致喷杆末端大幅抖动,影响机构平衡,发生喷杆接触或拍打作物甚至末端触地的状况^[6-16]。同时,喷杆的摆动还会导致喷雾均匀性差,重喷和漏喷情况交替出现^[17]。田间试验^[18]和模型仿真试验^[19]表明,喷杆振动是喷雾量分布不均的主要因素,会造成喷雾量不足或过量,过量时可达理想喷雾量的 8 倍^[20-22]。因此,为满足喷杆的作业要求,必须保证喷杆具有可靠的结构、稳定的作业性能和智能化的位姿调整能力^[23]。为此,国内外对喷杆的结构、减振方法、平衡控制等进行大量研究,本文阐述国内外的研究进展和技术现状,并展望国内喷杆的发展趋势。

1 喷杆结构

大型高地隙喷雾机喷杆采用中间固定,左右对称多段折叠结构布局的桁架结构设计^[24]。桁架结构分为:平面和空间两种形式,空间桁架结构按截面形状不同,可分为三角形立体桁架和梯形立体桁架。

凯斯 Patriot3230 型和泰克诺玛 Laser5240 型高地隙自走式喷雾机喷杆分别如图 1、2 所示。此类喷杆为平面桁架结构,通过焊接斜腹杆或竖腹杆来提高喷杆结构强度,减少喷杆末端变形,该桁架结构简单,对材料性能要求较高。波尔图 Raptor4240 型喷雾机喷杆三角形立体桁架结构如图 3 所示;海吉 STS16 型喷雾机喷杆梯形立体桁架结构如图 4 所示。立体桁架结构可保证喷杆足够的强度和耐用性,保持喷雾机在启动、停止和转弯时尾部足够的稳定性,是大型高地隙喷雾机中应用较多的喷杆结构。

在喷杆结构中,桁架由中央支撑机构和展臂机构两部分组成。中央支撑装置既带动喷头进行喷药

作业,同时又对左右两边喷杆提供支撑,保持两边喷杆平衡,通过液压缸或电推杆实现喷杆的展开和折叠,作业时控制喷杆位姿实现仿形喷雾^[11]。展臂机构由多节喷杆组成,是主要的喷药支撑机构。展臂折叠时便于运输和存放,展开时可增大作业喷幅,提高施药效率。桁架的中央支撑机构与喷杆节数和一般为奇数,杆长和节数成正比^[25]。



图 2 泰克诺玛 Laser5240 型喷雾机喷杆结构
Fig. 2 Spray boom structure of Tecnomas Laser5240 sprayer



图 3 波尔图 Raptor4240 型喷雾机三角形立体桁架喷杆结构

Fig. 3 Spray boom structure of Berthoud Raptor4240 sprayer in type of triangular space truss



图 4 海吉 STS16 型喷雾机梯形立体桁架喷杆结构
Fig. 4 Spray boom structure of Hagie STS16 sprayer in type of trapezoid space truss

1. 中央支撑机构 2. 挂接机构 3. 展臂机构

2 国外研究现状

2.1 研究进展

国外对喷杆的运动形式、减振装置、喷杆平衡控制技术等都进行了深入研究,积累了大量的仿真和试验数据,为喷杆产品的更新升级提供了理论支撑^[20,26-45]。

ANTHONIS 等^[32]研究了喷杆作业时的主要运动形式,作业中喷杆具有垂直方向的转动,水平方向的偏转和震荡 3 种运动,如图 5 所示。ANTHONIS



图 1 凯斯 Patriot3230 型喷雾机喷杆结构
Fig. 1 Spray boom structure of Case Patriot3230 sprayer

等^[36]为减小喷杆在水平方向上的偏转和震荡,设计了一种喷杆水平主动悬挂机构并建立了系统控制模型。试验表明该主动悬挂机构能很好地减小喷杆的偏转和震荡。

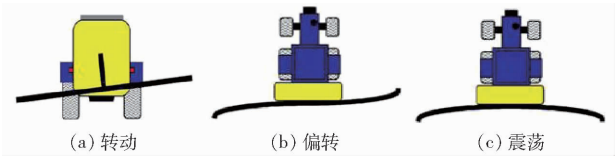


图 5 喷杆运动形式

Fig.5 Motion forms of spray boom

KENNES 等^[15]对喷杆被动垂直悬架建模仿真,得出固定喷杆、摆动悬架喷杆和梯形悬架喷杆末端相对于平衡位置位移的标准偏差分别是 0.44、0.25、0.27 m。RAMON 等^[46]采用串联补偿器控制柔性喷杆的水平振动,得出电液控制悬架可以降低喷杆振幅 69% 以上。

JEON 等^[20]利用三轴加速度传感器、超声波测距传感器和光电位置传感器等检测装置(图 6),分别测量了喷杆的振动、喷杆末端与地面的距离和喷雾机位置,通过信息整合获得喷杆的运动轨迹。

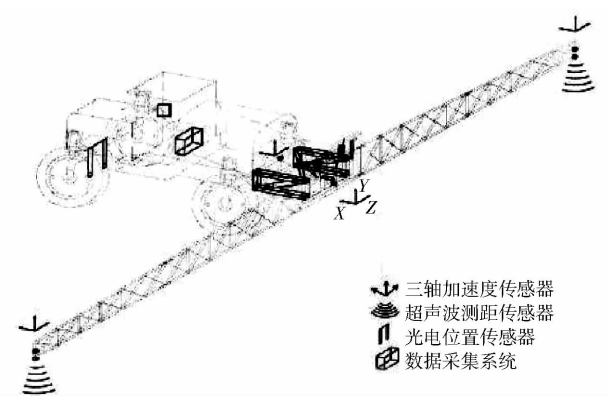


图 6 喷杆运动测量示意图

Fig.6 Schematic diagram of spray boom's motion measurement

2.2 技术现状

欧美等国家生产的高地隙自走式喷雾机喷杆有不同系列,多种喷幅可供选装,喷杆采用轻合金、铝合金、成型框架、涂有环形树脂的多孔玻璃纤维等轻质材料制成,主要生产公司有约翰迪尔、海吉、凯斯和阿玛松等。各公司的高地隙自走式喷雾机喷杆参数如表 1 所示。

表 1 国外高地隙自走式喷雾机喷杆参数

Tab.1 Spray boom parameters of high clearance self-propelled sprayer in foreign countries

厂家	机型	喷杆长度/m	喷杆离地高度/m	喷杆节数
约翰迪尔	R4023	18、24、27	0.38 ~ 1.93	5、5、7
	R4038、4045	27、30、36、40	0.50 ~ 2.45	7、9、11、13
	R4730	24、27、30	0.686 ~ 2.200	7
海吉	DTS10	24、27	0.58 ~ 2.57	5
	STS12、14、16	27、30、36、40	0.46 ~ 2.64	9
凯斯	Patriot3230	18.3、27.4、30.5	0.48 ~ 2.13	7
	Patriot3330、4430	18.7、27.4、30.5、36.5	0.48 ~ 2.13	7
阿玛松	Pantera4502	21 ~ 40	0.50 ~ 2.50	7、9
	Pantera4502 - W	21 ~ 40	0.50 ~ 2.50	7、9
	Pantera4502 - H	21 ~ 40	0.50 ~ 3.00	7、9

约翰迪尔 R4030XN 型喷雾机喷杆如图 7a 所示,喷杆使用高强度方形钢管的三角形立体桁架结构,7 节,幅宽 36 m。喷雾机采用气囊减振、四连杆系统和气囊结合的多级防振设计,配备包括喷杆高度传感器、喷杆自动保持水平系统、喷杆喷药单独自动控制系统智能化精准农业管理系统,该系统可精准控制喷雾效果和喷杆离地高度,监视障碍物情况,方便夜间作业。喷杆安装 3 或 5 个位姿自动调整的高度传感器,选装空气清扫装置,约翰迪尔 R4030XN 高度传感器如图 7b 所示,图中喷杆通过 3 个超声波传感器和 1 个倾角传感器实现喷杆的位姿自动仿形控制。约翰迪尔 R4030 系列的 R4630、R4730、R4830、R4930 机型的喷杆参数如表 2 所示,

喷杆的垂直、水平和偏转运动可分别由单独的液压悬架控制系统控制,外喷杆组可以折叠,以适应多种地形的喷药作业。

海吉公司有 DTS 和 STS 2 个系列机型,喷杆为不锈钢的梯形立体桁架结构。DTS10 型喷雾机喷杆为 5 节,喷幅 24、27 m 两种可选。STS 系列喷雾机喷杆为 9 节,最大幅宽 40 m。DTS 和 STS 系列喷雾机安装 AWR 液压系统,该系统能实现喷杆的减振、调平和仿形。

凯斯生产 Patriot3230、3330、4430 等多种型号的高地隙自走式喷雾机机型,已形成 18.3、27.4、30.5、36.5 m 等多种喷幅喷杆。凯斯 Patriot4430 型喷雾机喷杆如图 8 所示,该机型喷杆采用矩形钢管



(a) 喷杆



(b) 喷杆高度传感器

图 7 约翰迪尔 R4030XN 型喷雾机

Fig. 7 John Deere R4030XN sprayer

1、3、4. 超声波传感器 2. 倾角传感器

表 2 约翰迪尔 R4030 系列机型喷杆参数

Tab. 2 Spray boom parameters of John Deere R4030 series sprayer				
机型	喷杆长度/m	喷杆控制段数	喷杆高度升降范围/m	喷杆末端防撞杆长度/m
R4630	18. 2	5	0. 69 ~ 2. 20	3. 04
	24. 4			1. 98
R4730	24. 4	7	0. 69 ~ 2. 20	1. 98
	27. 4			3. 05
	30. 5			1. 98
R4830	24. 4	7	0. 69 ~ 2. 20	1. 98
	27. 4			3. 05
	30. 5			27. 4
R4930	30. 5	7	0. 61 ~ 2. 13	4. 0
	36. 5			



图 8 凯斯 Patriot4430 型喷雾机喷杆

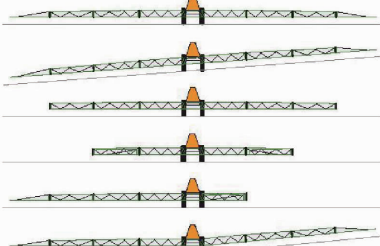
Fig. 8 Spray boom of Case Patriot4430 sprayer

焊接的三角形立体桁架结构,通过带弹簧减震器的独立拖曳连杆式底盘悬挂系统、双摆杆悬架和柔性连接关节等结构实现喷杆多级减振,超声波传感器及调整轮调控喷杆平衡,安装的 AutoBoom 系统实现喷杆仿形喷雾,能满足不同田间地面的作业要求。

德国阿玛松公司生产的 Pantera4502 型喷雾机喷杆为 7、9 节,喷幅 24 ~ 40 m 的梯形立体桁架结构喷杆,末端喷杆采用轻质铝合金结构,如图 9a 所示。Pantera4502 型喷雾机喷杆自主控制原理图如图 9b 所示,喷杆通过倾角传感器和超声波传感器进行喷杆高度自主控制, GPS 输入的信息进行喷杆自动区段控制和距离控制,实现喷杆的位姿自主控制和智能调节。



(a) 喷杆



(b) 喷杆自主控制原理图

图 9 阿玛松 Pantera4502 型喷杆喷雾机

Fig. 9 Amazone Pantera4502 sprayer

国外高地隙自走式喷雾机喷杆以大型为主,形成的系列产品结构刚度大、振动小、喷幅宽、智能化程度高,能够实现喷杆多节分段喷雾、地面仿形喷雾的作业需求^[5,47]。

3 国内研究现状

3.1 国内研究进展

国内大型喷杆的作业稳定性和智能控制技术研究还处在试验阶段,通过近几年的研究,取得了一定的研究成果^[13-14,48-59]。

崔龙飞等^[49]建立了双钟摆主动悬架的仿真模型,分析 28 m 大型喷杆悬架系统的瞬态响应,得到试验点与数学模型预测值的均方根误差为 0.087。针对前悬架上摆臂多次作业后易出现疲劳失效问题,段建等^[60]建立了 YTK850 型喷杆喷雾机上摆臂的有限元模型,分析了上摆臂 3 种典型工况应力并利用试验数据对上摆臂进行了结构优化,得到 33 mm 的圆管外径,优化后模型的最大应力和最大变形量分别减至 94.17 MPa 和 0.098 mm,安全系数提高到 2.50。

王佳文等^[61]以 3WP-1200 型喷杆喷雾机为平台,设计了平衡油缸、弹簧和空气阻尼器等构成的喷

杆自动调平装置,进行调平装置场地和田间试验,试验结果如表 3 所示,该装置实现了在允许范围内可根据不同农作物的高度自主调节喷药及起伏路面喷杆的快速平衡。

表 3 喷杆调平机构场地和田间试验结果
Tab.3 Field and farm test results of spray boom leveling mechanisms

位置	作业高度 1 000 mm		作业高度 1 100 mm		作业高度 1 200 mm	
	场地	田间	场地	田间	场地	田间
左	1 010	1 012	1 117	1 120	1 222	1 225
右	995	993	1 090	1 087	1 189	1 185

陈达^[62]基于 SolidWorks 软件建立了 24 m 幅宽柔性桁架式喷杆三维模型,喷杆展臂结构如图 10 所示,针对柔性桁架式喷杆系统,开发单自由度喷杆动态特性测试平台和数据采集、调节系统以及后期数据处理软件,完成了喷杆动态特性测试系统。通过 ADMAS 软件对喷杆大臂、中臂和小臂进行静力分析,各部位最大应力分别为 104.8、20.5、25.9 MPa;位移分别为 8、0.017、0.8 mm;应变分别为 0.000 7、0.000 07、0.000 07,有效地验证了桁架式喷杆的机构稳定性。

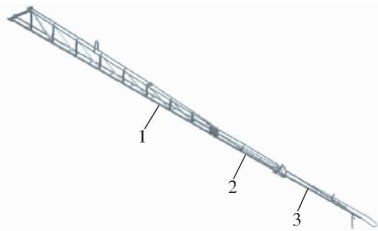


图 10 喷杆展臂结构

Fig. 10 Deployable structure of spray boom

1. 大臂 2. 中臂 3. 小臂

周海涯^[63]设计了一套基于多楔带传动的喷杆平衡控制系统,建立了相应的动力学模型并进行了影响因素的试验研究,通过试验得到喷杆平衡控制系统的最佳启动阈值 δ 为 5 cm,在最佳因素组合下,喷杆转角可控制在 $[-0.630^{\circ}, 0.630^{\circ}]$ 范围内。魏新华等^[64]采用 UC2000 型超声波测距传感器、S7-200 CPU 224 CN 型 PLC 控制器、S7-200 EM231 模拟量输入模块等设计了一套喷杆高度及平衡在线调控系统,实现了阶跃激励路面,喷杆高度误差控制在 ± 3 cm 以内。王松林^[65]采用西门子 S7-200 CPU 222 CN 型 PLC 为主控制器,设计“三段式”喷杆自动调节系统,如图 11 所示。该调节系统实现了喷杆高度的检测、反馈、自动调节,试验中控制系统延时 1 s 时,喷杆能平稳地保持 45~53.3 cm 的高度。

3.2 国内技术现状

由于地形地貌和经济条件的限制,国内自走式



图 11 喷杆自动调节试验平台

Fig. 11 Test platform of spray boom for automatic regulation

喷杆喷雾机以 3 节,3WP、3WPZ 及其改进型的中小型机器为主^[66],在 2017 年 10 月武汉国际农机展上,对国内 77 家自走式喷杆喷雾机参展厂商的 242 台参展机器进行了统计,其喷杆喷幅参数如表 4 所示,从表 4 可以看出,中小型的喷杆喷雾机喷幅在 10~14.9 m 的占比为 73%,20 m 以上的占比 6.76%,宽喷幅的喷雾机占比较小。目前国内大型高地隙自走式喷雾机的生产厂家主要有现代农装科技股份有限公司、中农丰茂植保机械有限公司、山东华盛中天机械集团股份有限公司等,其产品的喷杆相关参数如表 5 所示。

表 4 国内参展自走式喷雾机喷幅参数
Tab.4 Spray boom parameters of self-propelled sprayer in domestic exhibition

喷幅/m	数量(占比/%)
0~10	20(9.05)
10~14.9	162(73.30)
15~19.9	24(10.86)
>20	15(6.79)

现代农装科技股份有限公司生产的大型喷杆喷雾机如图 12 所示,喷杆采用平面桁架结构,7 节,喷幅范围 18~27 m。喷杆采用弹簧阻尼和液压减振,安装自动平衡装置,能依据前进速度的变化实时变量喷药。

中农丰茂植保机械有限公司生产的高地隙自走式喷雾机喷幅为 18~38 m,喷杆采用平面或三角形立体桁架结构并配有电子液压控制系统,能控制喷杆的左右平衡和喷雾作业。该公司在自主研发的基础上,通过引进消化吸收,已把国外部分机型国产化。生产的 3WX-2000HS 型喷雾机如图 13 所示,该机型喷杆为三角形立体桁架结构,喷幅 18、24 m 可选,并配有农业专用 GPS 技术,有效防止了喷雾作业中漏喷和重喷现象的发生,作业效率高。

山东华盛中天机械集团股份有限公司生产华盛泰山 3WP-1300G 喷雾机如图 14 所示。喷杆采用钢管焊接三角形立体桁架结构,具有自动液压调平功能,喷臂设有防碰撞自动保护装置。喷杆离地间

表 5 国内主要高地隙自走式喷雾机喷杆参数

Tab.5 Spray boom parameters of domestic high clearance self-propelled sprayer

厂家	机型	喷杆长度/m	喷杆离地高度范围/m	喷杆节数
现代农装科技股份有限公司	3WZG-3000	18~24	0.65~1.8	7
	3WZG-3000A	20~24	0.6~2.2	7
	3WZC-2000	25,27	0.6~2.8	7
中农丰茂植保机械有限公司	东方红 3WX-2000HS	18	0.7~2.6	7
	东方红 3WX-3000HS	24	0.7~2.6	7
	3WX-3000	21,24	0.5~1.8	7
	3WX-5000	24,28,32,38	0.5~1.8	7
山东华盛中天机械集团股份有限公司	华盛泰山 3WP-1300G	15	0.5~3.0	5
	华盛泰山 3WP-2600G	24,27	2.8	7



图 12 现代农装 3WZG-3000A 型喷杆喷雾机喷杆
Fig.12 Spray boom of MAEC 3WZG-3000A sprayer



图 13 中农丰茂 3WX-2000HS 型喷雾机喷杆
Fig.13 Spray boom of Zhongnong Fengmao 3WX-2000HS sprayer



图 14 华盛泰山 3WP-1300G 型喷雾机喷杆
Fig.14 Spray boom of Huasheng Taishan 3WP-1300G sprayer

隙高,作业效率高。

综上所述,我国大型喷雾机与国外机型相比仍存在喷杆结构刚度小,减振方式单一,减振效果差,喷杆末端晃动大等缺陷,同时喷杆缺少位姿检测及控制装置,喷雾仿形效果差,喷杆智能化程度低^[6,67-76]。

4 发展趋势

为改善喷杆作业性能,提高喷杆作业稳定性,需

要对目前喷杆结构、减振装置和智能控制系统等深入研究。

(1)优化喷杆结构,改进材料性能。分析、优化和改进现有喷杆的结构,选用如高强度钢板、铝合金、生物纤维材料、复合材料等高强度、轻质地的新材料,采用新工艺,减轻喷杆自重,增强喷杆强度。保证宽喷幅喷杆的轻质、直挺。

(2)加强喷杆系列产品开发。结合喷杆的喷幅和材料强度,研制不同喷幅、不同结构的喷杆,统一不同系列喷杆连接标准,提高喷杆在不同机型上的通用性。

(3)设置喷杆多级减振机构。国外大型喷雾机多级减振系统已得到广泛使用。我国应在平衡油缸、弹簧、阻尼器等减振装置的基础上,改进和优化悬挂减振结构,研究气囊缓冲装置、底盘减振机构,实现多点多级别多系统减振。

(4)设计喷杆自平衡系统。参照国外电液控制悬架、电液补偿器、电子平衡调节机构的研究,结合国内多楔带传动、超声波测距等喷杆自平衡技术,进一步研究和优化喷杆的自主平衡调节系统。

(5)提高位姿智能控制技术。通过超声波传感器或倾角传感器实现喷杆姿态监测,提高喷杆姿态控制技术和高度调节精度,实现喷杆姿态在线智能控制和管理。

5 结束语

喷杆结构强度、减振装置性能、智能控制精度是影响喷雾效果的重要因素,通过国内外的研究和技术现状分析可知,国内在这些方面与国外相比还有一定差距。为此,国内正在加快喷杆结构性能、多级减振机构、智能位姿控制系统等方面研究,缩小与发达国家的技术差距,通过技术升级,逐步实现喷杆精准化作业要求。

参 考 文 献

- 1 杨学军,严荷荣,徐赛章,等. 植保机械的研究现状及发展趋势[J]. 农业机械学报, 2002, 33(6): 129–137.
YANG Xuejun, YAN Herong, XU Saizhang, et al. Current situation and development trend of equipment for crop protection[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(6): 129–137. (in Chinese)
- 2 何雄奎. 改变我国植保机械和施药技术严重落后的现状[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 13–15.
HE Xiongkui. Improving severe dragging actuality of plant protection machinery and its application techniques[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 13–15. (in Chinese)
- 3 贾卫东,张磊江,燕明德,等. 喷杆喷雾机研究现状及发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(4): 19–22.
JIA Weidong, ZHANG Leijiang, YAN Mingde, et al. Current situation and development trend of boom sprayer[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(4): 19–22. (in Chinese)
- 4 周海燕,杨炳南,严荷荣,等. 我国高效植保机械应用现状及发展展望[J]. 农业工程, 2014, 4(6): 4–6.
ZHOU Haiyan, YANG Bingnan, YAN Herong, et al. Application status and development prospects of effective plant protection machinery[J]. Agricultural Engineering, 2014, 4(6): 4–6. (in Chinese)
- 5 刘金锁,王进华,贾晶霞. 国外自走式喷雾机发展概况[J]. 农业工程, 2015, 5(4): 29–31.
LIU Jinsuo, WANG Jinhua, JIA Jingxia. Development situation of foreign self-propelled sprayer[J]. Agricultural Engineering, 2015, 5(4): 29–31. (in Chinese)
- 6 何耀杰,邱白晶,杨亚飞,等. 基于有限元模型的喷雾机喷杆弹性变形分析与控制[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 28–36.
HE Yaojie, QIU Baijing, YANG Yafei, et al. Deformation analysis and control of elastic deformation for spray boom based on finite element model[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(6): 28–36. (in Chinese)
- 7 LEBEAU F, BAHIR L E, DESTAIN M F, et al. Improvement of spray deposit homogeneity using a PWM spray controller to compensate horizontal boom speed variations[J]. Computers and Electronic in Agriculture, 2004, 43(2): 149–161.
- 8 OOMS D, RUTER R, LEBEAU F, et al. Impact of the horizontal movements of a sprayer boom on the longitudinal spray distribution in field conditions[J]. Crop Protection, 2003, 22(6): 813–820.
- 9 CLIJMANS L, SWEVERS J, De BAERDEMAEKER J, et al. Sprayer boom motion part 1: derivation of the mathematical model using experimental system identification theory[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2000, 76(1): 61–69.
- 10 RAMON H, De BAERDEMAEKER J. Design of a multivariable electro-hydraulic compensator for active vibration control of a flexible spray boom[J]. Acta Horticulturae, 1996, 406: 267–280.
- 11 乔白羽,丁素明,薛新宇,等. 喷雾机喷杆结构的研究现状及展望[J]. 农机化研究, 2017, 39(11): 246–250.
QIAO Baiyu, DING Suming, XUE Xinyu, et al. The research status and prospects on the structure of spray boom[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(11): 246–250. (in Chinese)
- 12 邱白晶,杨宁,徐溪超,等. 喷雾机前后轮相继激励下喷杆理想运动响应提取[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 55–60. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120212&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.012.
QIU Baijing, YANG Ning, XU Xichao, et al. Ideal spray boom response extraction with front and rear tires excited by step track [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 55–60. (in Chinese)
- 13 邱白晶,何耀杰,盛云辉,等. 喷雾机喷杆有限元模态分析与结构优化[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 112–116, 105. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140818&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.018.
QIU Baijing, HE Yaojie, SHENG Yunhui, et al. Finite element modal analysis and structure optimization of spray boom[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 112–116, 105. (in Chinese)
- 14 陈树人,韩红阳,陈刚,等. 喷杆喷雾机机架动态特性分析与减振设计[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 50–53, 20. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130409&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.04.009.
CHEN Shuren, HAN Hongyang, CHEN Gang, et al. Dynamic characteristic analysis and vibration reduction design for sprayer frame[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 50–53, 20. (in Chinese)
- 15 KENNES P, RAMON H, De BAERDEMAEKER J. Modelling the effect of passive vertical suspensions on the dynamic behaviour of sprayer booms[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999, 72(3): 217–229.
- 16 JEON H Y, WOMAC A R, WILKERSON J B, et al. Sprayer boom instrumentation for field use[J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(3): 659–666.
- 17 RAMON H, De BAERDEMAEKER J. Spray boom motions and spray distribution: part 1, derivation of a mathematical relation [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1997, 66(1): 23–29.
- 18 SPEELMAN L, JANSEN J W. The effect of spray boom movement on the liquid distribution of field crop sprayers[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1974, 19(2): 117–129.
- 19 LANGENAKENS J J, RAMON H, De BAERDEMAEKER J. A model for measuring the effect of tire pressure and driving speed

- on horizontal sprayer boom movements and spray pattern[J]. Transactions of the ASAE, 1995, 38(1): 65–72.
- 20 JEON H Y, WOMAC AR, GUNN J. Sprayer boom dynamic effects on application uniformity[J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(3): 647–658.
- 21 SINFORT C, MIRALLES A, SEVILA F, et al. Study and development of a test method for spray boom suspensions[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1994, 59(4): 245–252.
- 22 NATION H J. The dynamic behaviour of field sprayer booms[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1982, 27(1): 61–70.
- 23 耿爱军, 李法德, 李陆星. 国内外植保机械及植保技术研究现状[J]. 农机化研究, 2007, 29(4): 189–191.
- GENG Aijun, LI Fade, LI Luxing. The plant protection machinery and technology at home and abroad[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(4): 189–191. (in Chinese)
- 24 黄聪会, 马洪亮, 江光华, 等. 高地隙自走式植保机械喷杆系统结构优化与研究[J]. 农机化研究, 2016, 38(2): 49–53.
- HUANG Conghui, MA Hongliang, JIANG Guanghua, et al. The structure optimization and research of the spray bar system mounted on the highland clearance self-propelled plant protection machinery[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(2): 49–53. (in Chinese)
- 25 余大庆. 我国植物保护机械现状及发展战略研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- YU Daqing. Study on the status quo and development strategy for plant protection machines [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2009. (in Chinese)
- 26 WANG Tao, WANG Qingfeng, LIN Tianliang. Improvement of boom control performance for hybrid hydraulic excavator with potential energy recovery[J]. Automation in Construction, 2013, 30: 161–169.
- 27 KOOHESTANI K, KAVEH A. Efficient buckling and free vibration analysis of cyclically repeated space truss structures[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2010, 46(10): 943–948.
- 28 SARTORI J S, BALTHAZAR J, PONTES J B. Non-linear dynamics of a tower orchard sprayer based on an inverted pendulum model[J]. Biosystems Engineering, 2009, 103(4): 417–426.
- 29 BAETENS K, HO Q T, NUYTTENS D, et al. A validated 2-D diffusion-advection model for prediction of drift from ground boom sprayers[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(9): 1674–1682.
- 30 LARDOUX Y, SINFORT C, ENFÄLT P, et al. Test method for boom suspension influence on spray distribution, part ii: validation and use of a spray distribution model[J]. Biosystems Engineering, 2007, 96(2): 161–168.
- 31 BATTE M, EHSANI M. The economics of precision guidance with auto-boom control for farmer-owned agricultural sprayers[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2006, 53(1): 28–44.
- 32 ANTHONIS J, AUDENAERT J, RAMON H. Design optimisation for the vertical suspension of a crop sprayer boom [J]. Biosystems Engineering, 2005, 90(2): 153–160.
- 33 PARLOO E, GUILLAUME P, ANTHONIS J, et al. Modelling of sprayer boom dynamics by means of maximum likelihood identification techniques, part 2: sensitivity-based mode shape normalisation[J]. Biosystems Engineering, 2003, 85(3): 291–298.
- 34 ANTHONIS J, RAMON H. Comparison between the discrete and finite element methods for modelling an agricultural spray boom-part 1: theoretical derivation[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 266(3): 515–534.
- 35 PARLOO E, GUILLAUME P, ANTHONIS J, et al. Modelling of sprayer boom dynamics by means of maximum likelihood identification techniques, part 1: a comparison of input-output and output-only modal testing[J]. Biosystems Engineering, 2003, 85(2): 163–171.
- 36 ANTHONIS J, RAMON H. Design of an active suspension to suppress the horizontal vibrations of a spray boom[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 266(3): 573–583.
- 37 ANTHONIS J, RAMON H. Comparison between the discrete and finite element methods for modelling an agricultural spray boom-part 2: automatic procedure for transforming the equations of motion from force to displacement input and validation[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 266(3): 535–552.
- 38 CLIJMANS L, RAMON H, SAS P, et al. Sprayer boom motion, part 2: validation of the model and effect of boom vibration on spray liquid deposition[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2000, 76(2): 121–128.
- 39 GONZALEZ-DE-SOTO M, EMMI L, PEREZ-RUIZ M, et al. Autonomous systems for precise spraying-evaluation of a robotised patch sprayer[J]. Biosystems Engineering, 2016, 46: 165–182.
- 40 SHARDA A, FULTON J P, MCDONALD T P. Impact of response characteristics of an agricultural sprayer control system on nozzle flow stabilization under simulated field scenarios[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 112: 139–148.
- 41 YUKI S, YASUDA H, MATSUBAYASHI T, et al. Development of tractor automatic controlled boom sprayer using CAN – BUS [J]. Agricontrol, 2013, 46(18): 264–269.
- 42 LEONHARDT K. Interferometry for ellipso-height-topometry part 2: measurement of the ellipsometric data, material identification, and correction of the measured height [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2010, 121(7): 623–632.
- 43 OOMS D, LEBEAU F, RUTER R, et al. Measurements of the horizontal sprayer boom movements by sensor data fusion[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 33(2): 139–162.
- 44 TAHMASEBI M, RAHMAN R A, MAILAH M, et al. Sprayer boom active suspension using intelligent active force control[J].

International Scholarly and Scientific Research& Innovation, 2012, 6(8): 1051 – 1055.

45 BRAUNHOLTZ J T, WALL C, CREMLYN R J. Crop protection: the role of the chemical industry in an uncertain future[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1981, 295(1076): 19 – 34.

46 RAMON H, ANTHONIS J, MOSHOU D, et al. Evaluation of a cascade compensator for horizontal vibrations of a flexible spray boom[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1998, 71(1): 81 – 92.

47 刘丰乐, 张晓辉, 马伟伟, 等. 国外大型植保机械及施药技术发展现状[J]. 农机化研究, 2010, 32(3): 246 – 248.

LIU Fengle, ZHANG Xiaohui, MA Weiwei, et al. Current development status of foreign big-scale protection machinery and application technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(3): 246 – 248. (in Chinese)

48 王腾, 孙培灵, 刘行风, 等. 喷杆式喷雾机关键部件设计与研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(11): 99 – 102.

WANG Teng, SUN Peiling, LIU Xingfeng, et al. The design and study of the key components of boom sprayer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(11): 99 – 102. (in Chinese)

49 崔龙飞, 薛新宇, 丁素明, 等. 双钟摆主被动悬架式大型喷雾机喷杆动力学仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 82 – 90. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170211&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.011.

CUI Longfei, XUE Xinyu, DING Suming, et al. Modeling and simulation of dynamic behavior of large spray boom with active and passive pendulum suspension[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 82 – 90. (in Chinese)

50 袁世杰, 陈树人, 邵景世, 等. 水田高地隙喷杆喷雾机传动齿轮箱的参数化设计[J]. 农机化研究, 2014, 36(10): 115 – 119.

YUAN Shijie, CHEN Shuren, SHAO Jingshi, et al. Gear-box parametric design of paddy high-clearance boom sprayer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(10): 115 – 119. (in Chinese)

51 陈达, 陈志, 周丽萍, 等. 喷杆喷雾机等腰梯形悬架改进与验证[J]. 农机化研究, 2014, 36(4): 171 – 174.

CHEN Da, CHEN Zhi, ZHOU Liping, et al. Improvement and verification of isosceles trapezoid boom sprayer suspension[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(4): 171 – 174. (in Chinese)

52 吴吉麟, 苗玉彬. 不同激励源下宽幅喷雾机喷杆的动态特性分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 39 – 44.

WU Jilin, MIAO Yubin. Dynamic characteristic analysis of boom for wide sprayer with different exciting sources[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(4): 39 – 44. (in Chinese)

53 张铁, 杨学军, 董祥, 等. 超高地隙风幕式喷杆喷雾机施药性能试验[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(10): 66 – 71. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20121012&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.10.012.

ZHANG Tie, YANG Xuejun, DONG Xiang, et al. Experiment on spraying performance of super-high clearance boom sprayer with air-assisted system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 66 – 71. (in Chinese)

54 刘雪美, 张晓辉, 侯存良. 喷杆喷雾机风助风筒流场分析与结构优化[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4): 70 – 75.

LIU Xuemei, ZHANG Xiaohui, HOU Cunliang. Air flow simulation and flow field optimization for airduct of air-assisted boom sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 70 – 75. (in Chinese)

55 许超, 陈永成, 李瑞敏, 等. 高地隙自走式喷杆喷雾机的设计与研究[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(1): 51 – 54.

XU Chao, CHEN Yongcheng, LI Ruimin, et al. Design and research on highland gap self-propelled lance spray[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(1): 51 – 54. (in Chinese)

56 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/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 182 – 188. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2016s028&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.028.

ZHANG Tie, DONG Xiang, YIN Suzhen, et al. Spraying performance of lightweight high clearance boom sprayer in soybean field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 182 – 188. (in Chinese)

57 刘雪美, 李扬, 李明, 等. 喷杆喷雾机精确对靶施药系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 37 – 44. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160306&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.006.

LIU Xuemei, LI Yang, LI Ming, et al. Design and test of smart-targeting spraying system on boom sprayer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 37 – 44. (in Chinese)

58 沈景新, 孙永佳, 孙宜田, 等. 3WP-650 型智能变量喷杆喷雾机的设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(6): 238 – 242.

SHEN Jingxin, SUN Yongjia, SUN Yitian, et al. Design and test of 3WP-650 type intelligent variable spray rod spray machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(6): 238 – 242. (in Chinese)

59 何万宝, 赵峰, 全永统, 等. 3WPZ-2000 型自走式喷杆喷雾机的设计研究[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(12): 68 – 72.

HE Wanbao, ZHAO Feng, QUAN Yongtong, et al. Design and research of 3WPZ-2000 self-propelled boom sprayer[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(12): 68 – 72. (in Chinese)

60 段建, 刘秋, 桑娜, 等. 喷杆喷雾机前悬架上摆臂有限元及疲劳寿命分析[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(18): 236 – 239.

61 王佳文, 杨自栋. 自动调平喷杆式喷药机设计与试验研究[J]. 农机化研究, 2016, 38(7): 162 – 166.

- WANG Jiawen, YANG Zidong. Design and experimental research on automatic levelling boom sprayer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(7): 162 – 166. (in Chinese)
- 62 陈达. 柔性桁架式喷杆系统设计与动态仿真研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2011.
CHEN Da. Study on flexible truss boom system design and dynamic simulation[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2011. (in Chinese)
- 63 周海涯. 基于多楔带传动的喷杆平衡控制研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
ZHOU Haiya. Research of spray boom's balance control based on v-ribbed belt drives[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016. (in Chinese)
- 64 魏新华, 邵菁, 缪丹丹, 等. 喷杆式喷雾机喷杆高度及平衡在线调控系统[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 66 – 71.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150811&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.011.
WEI Xinhua, SHAO Jing, MIAO Dandan, et al. Online control system of spray boom height and balance[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 66 – 71. (in Chinese)
- 65 王松林. 喷杆高度自动调节系统设计与试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
WANG Songlin. Design and experiments on boom height automatic adjusting system[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. (in Chinese)
- 66 宋仁龙. 从植保机械 CCC 认证看我国植保机械行业发展现状[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(4): 141 – 144.
SONG Renlong. Analysis on development status of plant protection machinery industry in China with CCC certification[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(4): 141 – 144. (in Chinese)
- 67 弋晓康. 我国植保机械的现状与发展趋势探讨[J]. 农机化研究, 2007, 29(3): 218 – 220.
YI Xiaokang. Discussion on the present situation and development trends of plant protection equipment in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(3): 218 – 220. (in Chinese)
- 68 樊荣, 师帅兵, 杨福增, 等. 我国植保机械常用喷头的研究现状及发展趋势[J]. 农机化研究, 2014, 36(6): 6 – 9.
FAN Rong, SHI Shuaibing, YANG Fuzeng, et al. Research status and development trends on nozzles used in plant protection machinery[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(6): 6 – 9. (in Chinese)
- 69 韩树明. 静电喷雾技术在植保领域的应用[J]. 农机化研究, 2011, 33(12): 249 – 252.
HAN Shuming. Application of electrostatic spray technology in the field of plant protection[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(12): 249 – 252. (in Chinese)
- 70 郑文钟, 应霞芳. 我国植保机械和施药技术的现状、问题及对策[J]. 农机化研究, 2008, 30(5): 219 – 221.
ZHENG Wenzhong, YING Xiafang. Study on actuality and problems with measure of plant protection machinery and spray techniques of agricultural chemicals in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008, 30(5): 219 – 221. (in Chinese)
- 71 杨莹, 弋晓康. 新疆兵团植保机械和施药技术现状及对策[J]. 农机化研究, 2005, 27(5): 52 – 53.
YANG Ying, YI Xiaokang. Actuality and countermeasures about equipment for crop protection and the spray technique of agricultural chemicals in Xinjiang production corps[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2005, 27(5): 52 – 53. (in Chinese)
- 72 陈晨, 薛新宇, 顾伟, 等. 喷雾机喷杆悬架系统的研究现状及发展[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(3): 98 – 101.
CHEN Chen, XUE Xinyu, GU Wei, et al. Current situation and development trend of spray boom suspension system for sprayer[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(3): 98 – 101. (in Chinese)
- 73 袁守利, 陈昌, 董柯. 3WPZ-500 自走式喷杆喷雾机液压系统设计[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2015, 37(6): 855 – 859.
YUAN Shouli, CHEN Chang, DONG Ke. Hydraulic system design of 3WPZ-500 self-propelled boom sprayer[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering), 2015, 37(6): 855 – 859. (in Chinese)
- 74 王立军, 孙文峰, 陈宝昌, 等. 喷杆式喷雾机的研究[J]. 农机化研究, 2008, 30(7): 63 – 65.
WANG Lijun, SUN Wenfeng, CHEN Baochang, et al. Research on the type of boom sprayer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008, 30(7): 63 – 65. (in Chinese)
- 75 陈晨, 薛新宇, 顾伟, 等. 喷雾机喷杆结构形状及截面尺寸优化与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 50 – 56.
CHEN Chen, XUE Xinyu, GU Wei, et al. Experiment and structure shape and section size optimization of spray boom[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9): 50 – 56. (in Chinese)
- 76 王俊, 祁力钧. 喷雾机喷杆压力损失及对喷雾质量的影响[J]. 农业机械学报, 2006, 37(3): 42 – 45.
WANG Jun, QI Lijun. Pressure drop on the boom sprayer and its effect on spraying[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(3): 42 – 45. (in Chinese)