

果园双摆弥雾施药系统设计*

刘继展¹ 王芹¹ 詹国祥² 冯上海¹

(1. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013;

2. 镇江市农业机械技术推广站, 镇江 212013)

摘要: 针对现有果园施药装备体积与功耗过大、药液浪费严重等问题, 设计了果园双摆弥雾施药系统。通过驱动布置方案和自由度分析, 设计了由直流电动机驱动的对称双曲柄机构和驱动点与支点万向节-滑轨多级运动副所构成的平面-空间混合型机构, 实现了双摆雾机的摆动扩幅。为方便操纵并避免药液反流等现象的发生, 设计了单片机自动控制系统, 实现了双摆弥雾施药系统复杂启停动作流程的一键控制。根据果园规格, 分别以车身尺寸最小为目标, 以弥雾施药对树冠的有效覆盖为约束条件, 通过非线性规划确定了曲柄长度、曲柄转动中心高度、支点高度、曲柄中心距、支点中心距等结构参数。进而根据果树施药量和弥雾均匀度要求, 以施药作业效率最高为目标, 确定了系统行进速度和曲柄转速。该施药系统可实现弥雾半径仅 400 mm 小型弥雾机对高度 1 500 ~ 4 300 mm 和横向 5 500 mm 的树冠范围的有效覆盖, 并有效保证果树双侧弥雾喷施的均匀度和药量条件, 作业效率可达 2.33 ~ 2.67 hm²/h, 实现了果园机载施药系统的节能节药和小型化, 为果园植保提供了新型的施药装备。

关键词: 果园 双摆弥雾 施药 设计 优化

中图分类号: S491 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)12-0109-08

引言

目前我国水果种植面积已达 1 200 万 hm², 果树每年要喷施农药 8 ~ 15 次^[1-2], 每公顷果园的年施药(商品药)量达 52.5 ~ 82.5 kg^[3]。目前, 国内多数果园仍然依靠手动喷雾植保作业, 落后的施药技术和药械导致农药利用率和作业效率极低, 并造成严重的农业面源污染^[4-10]。发达国家早已实现了果园施药作业的机械化, 但多为大型机具, 作业空间要求较高, 适用于稀疏果园, 难以满足我国低矮型果园的作业需求^[10-13]。当前水果主产区对高效果园施药装备的需求日渐迫切, 国内研制的大型侧向风送式喷雾机^[2-5,7,10,14-18], 大多采用拖拉机悬挂或牵引配套作业, 药液耗量高达 20 ~ 120 L/min, 需配备庞大药箱和高达数十千瓦的配套动力, 能耗与药液耗量过高且整机质量和尺寸过大。而车载大型轴向风送喷雾机则主要面向高大林木的高射程施药作业, 亦难以满足果园植保的需要^[19]。

手持式小型轴流弥雾机具有体积小、质量小、功率小、雾滴细小且分布均匀、射程远等突出优点, 广泛应用于果园与田园的病虫害防治中。但是其喷幅

过小, 果农需通过手持摇动来实现对树冠的喷施, 且需手动完成压油、按键打火、开启油阀与药阀等一系列动作才能完成弥雾机的启动作业, 因而无法满足车载机械化喷施作业的需求。本文设计一键启动的果园双摆弥雾式施药系统, 以期实现果园机载施药系统的节能节药和小型化。

1 双摆弥雾施药系统设计

1.1 整机结构及工作原理

该双摆弥雾施药系统由双弥雾机、药箱、电动机、摆动扩幅装置和自动控制系统组成(图 1)。底盘沿果树行间行进过程中, 通过自动控制系统启动双弥雾机发动机并供给药液, 同时驱动摆动扩幅装置使两弥雾机的喷管出口做圆周摆动, 从而扩大弥雾喷幅, 使药液有效扩散弥漫于树冠间, 实现对两侧大范围树冠的弥雾施药。

1.2 摆动扩幅装置的设计

1.2.1 驱动布置方案选择

弥雾机的摆动扩幅可由筒口驱动、中部驱动和尾部驱动 3 种驱动点与支点布置方案来实现。其中, 筒口驱动的驱动机构和摆动支点 B 的布置占用

收稿日期: 2014-08-21 修回日期: 2014-09-23

* 中国博士后科学基金资助项目(2012M521013)、江苏省农机三新工程资助项目(NJ2012-08)、镇江市农业科技支撑计划资助项目(NY2012029)和江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介: 刘继展, 副研究员, 博士, 主要从事智能农业装备研究, E-mail: liujizhan@163.com

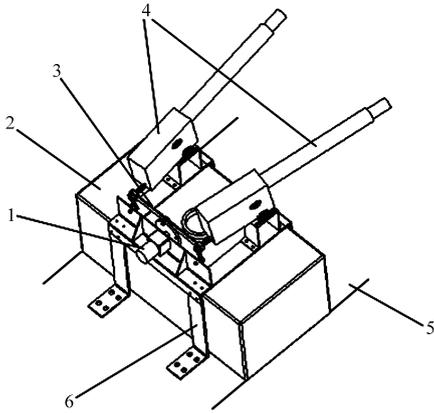


图1 果园双摆弥雾施药系统

Fig.1 Orchard symmetric swing mist spraying system

- 1. 电动机 2. 药箱 3. 摆动扩幅装置 4. 轴流弥雾机 5. 底盘
- 6. 支架

过大空间(图2a),同时喷管强度和喷管上的运动副安装问题突出;而中部驱动则由于摆动支点B位于尾部而存在弥雾机的不平衡问题(图2b),同时为避免驱动机构与弥雾机的干涉,弥雾机机身需沿轴向翻转,将造成供油与供药管路在弥雾机身上的缠绕。

与上述2类方式相比,尾部驱动方式将摆动支点B布置于弥雾机质心位置(图2c),具有良好的平衡性,同时避免了中部驱动的机身翻转问题,具有摆动支点与驱动安装方便,空间紧凑的优势。

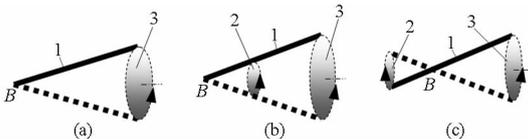


图2 弥雾机驱动布置方案

Fig.2 Configuration of driving point of mist sprayer

- (a) 筒口驱动 (b) 中部驱动 (c) 尾部驱动

- 1. 弥雾机 2. 驱动圆 3. 筒口轨迹圆

1.2.2 自由度分析与型设计

(1) 弥雾机自由度分析

在尾部驱动方式下,通过绕质心支点的空间摆动将尾部的圆周运动扩大为喷管出口的圆周运动。弥雾机空间摆动应具有 \hat{x} 、 \hat{z} 共2个自由度,同时应限制弥雾机轴向转动 \hat{y} 以避免管路缠绕。

如图3所示,安装于底盘的弥雾机上倾向树冠喷射施药,筒口初始位置与水平面夹角为 α 。采用最通用的曲柄方式实现竖直平面(xOz 面)内尾部驱动点A的驱动圆,而筒口C轨迹圆则相应与竖直方向平面夹角为 α 。为满足驱动圆与轨迹圆的变换需要,弥雾机需具备 \vec{y} 自由度。

(2) 关键运动副自由度分析

弥雾机由尾部驱动点A和摆动支点B两处提

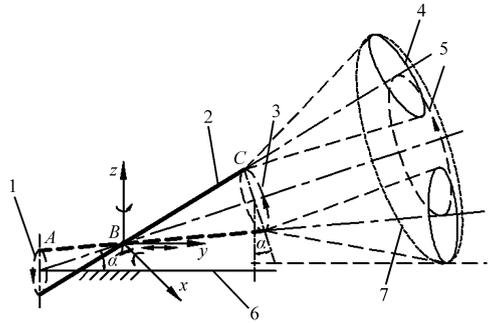


图3 摆动扩幅的弥雾机自由度分析

Fig.3 Analysis of degree of freedom of mist sprayer of swing and expanding diameter

- 1. 驱动圆 2. 弥雾机 3. 筒口轨迹圆 4. 弥雾圆 5. 扩幅轨迹圆
- 6. 水平面 7. 扩幅弥雾圆

供所需自由度并对多余自由度进行约束。

尾部驱动点A由曲柄驱动时,曲柄末端与弥雾机尾部间应实现 \hat{x} 、 \hat{y} 、 \hat{z} 的相对运动,曲柄应通过Ⅲ级副与弥雾机连接。

在支点B处,弥雾机相对基座应实现 \hat{x} 、 \hat{z} 的相对运动。同时由于尾部曲柄驱动缺乏 \hat{y} 自由度,支点B处需通过Ⅲ级副提供 \hat{x} 、 \hat{z} 、 \vec{y} 等3个自由度。

(3) 机构定型与自由度核算

摆动扩幅装置的平面-空间混合型机构运动简图如图4所示,其中平面双曲柄机构实现对称传动,曲柄-空间摆杆机构的自由度^[20]为

$$F = 6n - \sum_{i=1}^5 ip_i \quad (1)$$

式中 n ——活动构件数目

p_i ——第*i*级运动副的数目

该曲柄-空间摆杆机构中, $n = 2$ (构件3、5), $p_3 = 2$ (Ⅲ级副A、B)、 $p_5 = 1$ (Ⅴ级副N),依式(1),机构自由度为1,满足确定运动条件,达到了型设计要求。

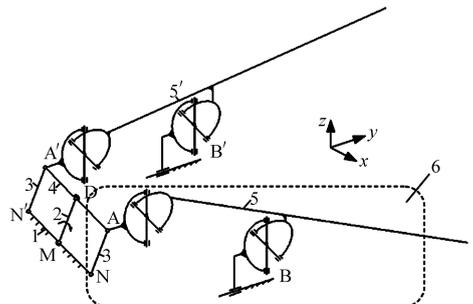


图4 摆动扩幅装置机构运动简图

Fig.4 Diagram of planar-spatial hybrid mechanism

- 1. 基座 2. 主动曲柄 3. 从动曲柄 4. 连杆 5. 弥雾机 6. 曲柄-空间摆杆机构

1.2.3 摆动扩幅装置的结构设计

采用对称双曲柄机构实现平面圆周运动,弥雾

机尾部采用轴承和十字万向联轴器与从动曲柄末端连接,保证 \hat{x} 、 \hat{y} 、 \hat{z} 3 自由度(图 5)。

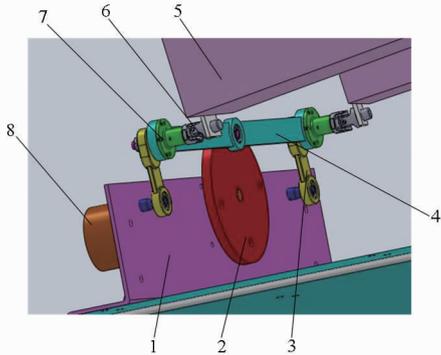


图 5 尾部驱动机构与多自由度连接结构

Fig.5 Driving mechanism of tail and connecting structure of multiple degree of freedom

- 1. 电动机支架 2. 主动曲柄 3. 从动曲柄 4. 连杆 5. 弥雾机机身 6. 十字万向联轴器 7. 轴承 8. 电动机

每一弥雾机支点采用对称双点支撑以保证其稳定性。由轴向移动副与十字万向联轴器组合,保证弥雾机 y 轴移动自由度 \hat{y} 与 \hat{x} 、 \hat{z} 。各滑轨两端均设计了限位装置(图 6)。

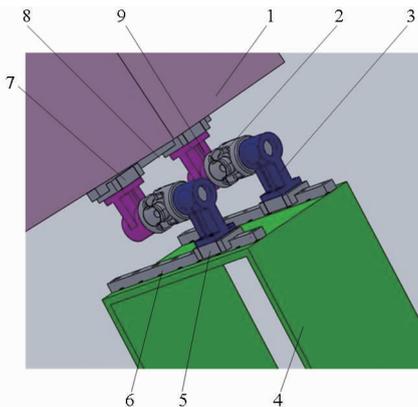


图 6 多自由度摆动支点结构

Fig.6 Configuration of fulcrum of multiple degree of freedom

- 1. 弥雾机机身 2. 十字万向联轴器 3. 滑块连接件 4. 支架 5、7. 滑块 6、8. 滑轨 9. 万向联轴器安装件

1.3 控制系统设计

手持式弥雾机依赖手动实现启动和停机,其启动通常包括“打开油箱开关→按压油泡→按键打火→打开药阀”等若干动作,才能实现启动轴流发动机和雾化喷出药液的目的;其停机也包括“关闭药液开关→关闭油箱开关”等动作。动作环节多,操作复杂。在机载作业中,实现弥雾机启停和摆动动作的一键便捷操作是方便果农使用和促进推广应用的必然要求。

由图 7,双摆弥雾自动控制分别由微型隔膜泵将手动加压供油变为可控泵油、变压力供药为

可控泵药、变手动按键电子打火为可控触点吸合打火、变手动阀门启闭为可控电磁阀启闭,并由直流电动机实现弥雾机摆动的可控启停。控制系统通过一次按键顺序执行启动与关闭的全部动作流程,从而实现一键启动和一键停机。

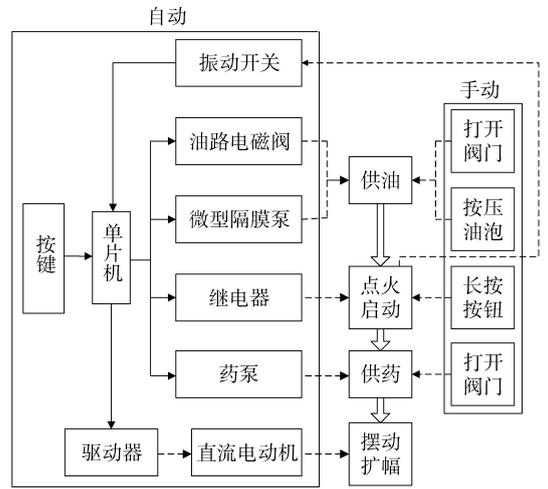


图 7 双摆弥雾自动控制结构及功能目标示意图

Fig.7 Diagram of automatic control structure and functional objective of symmetric swing mist sprayer

在一键启动操作中,控制系统将自动顺序执行“供油→点火启动→供药→摆动扩幅”的动作流程(图 8),如果发动机没有正常打火启动,不仅弥雾作业失败,同时药液将反流至发动机内腔,将严重影响发动机的寿命及下次启动。为此,通过振动开关检测发动机是否成功启动,控制系统根据其反馈信号做出判断,从而有效避免启动失败和药液反流现象的发生。

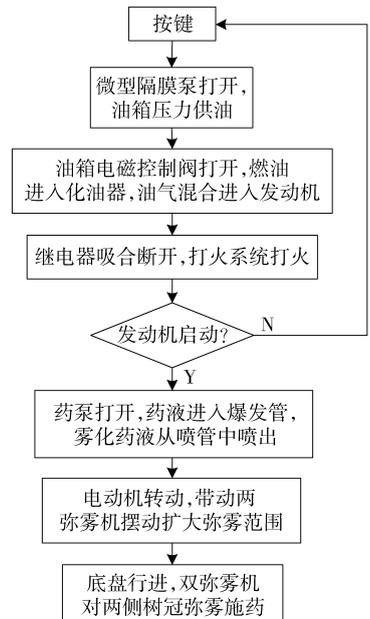


图 8 弥雾开启动作流程

Fig.8 Open action process of mist

2 结构与控制参数优化

2.1 结构参数的确定

结构参数包括摆动扩幅装置的平面-空间混合型机构的各尺寸参数与相对位置参数。

2.1.1 弥雾幅度分析

如图9a所示,摆动扩幅后的弥雾幅度由弥雾机弥雾范围大小及其摆动幅度所决定

$$R_1 = R + d \cos \theta / 2 \quad (2)$$

$$\text{其中 } \theta = \arcsin(e/m) \quad (3)$$

$$R = (l + r - m) \sin \theta \quad (4)$$

式中 R_1 ——扩幅后的弥雾范围半径,mm

R ——扩幅轨迹圆半径,mm

θ ——弥雾机摆角,rad

d ——弥雾机喷幅,mm e ——曲柄长度,mm

m ——弥雾机尾部到支点的距离,通过质心法确定支点,距离270mm

l ——弥雾机机长,1150mm

r ——弥雾机锥形射程,mm

选用金亮6HYC-80D型脉冲动力轴流弥雾机,测得其喷幅 d 约为800mm,锥形射程 r 约为

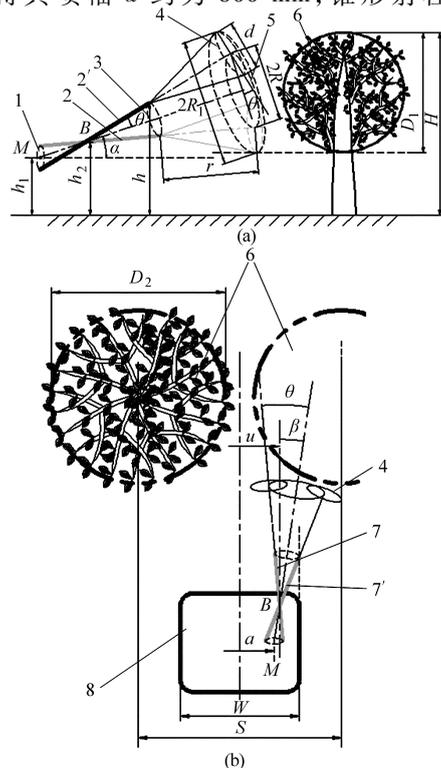


图9 摆动扩幅装置参数关系示意图

Fig.9 Calculation diagram of parameters of symmetric swing mist spraying system

(a) 侧视图 (b) 俯视图

1. 驱动圆 2. 弥雾机摆动下极限位置 2'. 弥雾机摆动上极限位置 3. 筒口轨迹圆 4. 弥雾圆 5. 扩幅轨迹圆 6. 树冠 7. 弥雾机摆动左极限位置 7'. 弥雾机摆动右极限位置 8. 车身

4000mm。

2.1.2 目标函数的建立

为实现施药系统的小型化,从而提高果园行间冠层封闭空间的通过性,以车身尺寸最小化建立目标函数。

(1) 高度目标

双摆弥雾系统中弥雾机筒口上极限位置决定了整机的高度,由图9a可得

$$\min h = h_2 + (l - m) \sin(\theta + \alpha) \quad (5)$$

式中 h ——喷筒口的离地高度上极限位置,mm

h_2 ——摆动支点 B 的离地高度,mm

α ——弥雾机初始水平倾角,rad

其中弥雾机初始水平倾角 α 由摆动支点 B 及曲柄转轴中心 M 的相对高度决定,即

$$\alpha = \arcsin \frac{h_2 - h_1}{m} \quad (6)$$

式中 h_1 ——曲柄转轴中心 M 的离地高度,mm,由底盘、药箱高度限制, $h_1 \geq 1200$ mm

(2) 宽度目标

双摆弥雾系统中两弥雾机的筒口摆动外极限位置决定了整机的宽度,由图9b可得

$$\min W = u + 2(l - m) \sin(\theta + \beta) \quad (7)$$

式中 W ——两喷筒口间极限宽度,mm

u ——两弥雾机摆动支点的距离,mm

β ——弥雾机的纵向初始倾角,rad

其中,弥雾机纵向初始倾角 β 由两支点相对距离及两从动曲柄转轴中心相对距离决定,即

$$\beta = \arcsin \frac{u - a}{2m} \quad (8)$$

式中 a ——两从动曲柄转轴中心距离,mm

2.1.3 约束条件

(1) 冠层纵向覆盖

如图9a所示,为保证高度方向雾滴对果树冠层的覆盖,扩幅弥雾圆中心应与冠层中心重合,同时扩幅弥雾直径不小于冠层竖直范围。

$$H - D_1/2 = h_2 + (l + r - m) \cos \theta \sin \alpha \quad (9)$$

$$2R_1 \cos \alpha \geq k_1 D_1 \quad (10)$$

式中 H ——果树高度,mm

D_1 ——冠层竖直范围,mm

k_1 ——保证弥雾对冠层纵向覆盖的安全系数,取1.2

以沙梨果树为例,根据对镇江市句容龙山果园基地的调研,平均果树高度 H 为3500~4200mm,平均冠层竖直范围 D_1 为2000~2500mm。

(2) 冠层横向覆盖

如图9b所示,为使果树冠层在宽度方向全部被

雾滴覆盖且使雾滴获得最大利用率,果树冠层左侧与扩幅弥雾圆左侧重合,果树冠层中心应保证在扩幅弥雾圆之内,且需要保证两弥雾机不发生相互干涉,保证四杆机构转动不发生互相干涉

$$\frac{u}{2} + (l + r - m) \cos\theta \sin\beta - R_1 \cos\beta = \frac{S - D_2}{2} \quad (11)$$

$$\frac{u}{2} + (l + r - m) \cos\theta \sin\beta + R_1 \cos\beta \geq k_2 \frac{S}{2} \quad (12)$$

$$a \geq b + c_1 \quad (13)$$

$$a \geq 4e + c_2 \quad (14)$$

式中 S ——果园行距,根据调研沙梨果园平均行距为 3 800 ~ 4 200 mm

D_2 ——果树冠层宽度,根据调研沙梨果树平均冠层宽度范围为 3 500 ~ 4 000 mm

b ——弥雾机机身宽度,240 mm

c_1 ——为防止两弥雾机摆动互相干涉预留的安全空间,取 10 mm

c_2 ——为防止四杆机构摆动互相干涉预留的安全空间,取 20 mm

k_2 ——保证弥雾对冠层横向覆盖的安全系数,取 1.2

2.1.4 规划结果

根据式(2)~(14)并代入已知参数,进行该多目标非线性规划问题的求解,得到优化的双摆弥雾系统结构参数范围如表 1 所示。

表 1 优化结果

Tab.1 Optimization results

参数	数值
曲柄长度 e /mm	46.7 ~ 66.8
曲柄转动中心高度 h_1 /mm	1 250
支点高度 h_2 /mm	1 316.5 ~ 1 341.8
支点距 u /mm	304.1 ~ 407.3
曲柄中心距 a /mm	206.8 ~ 287.2
喷筒极限高度 h /mm	1 677.4 ~ 1 836.6
喷筒口间极限宽度 W /mm	915 ~ 1 211

2.2 控制参数的确定

针对特定的弥雾机型,果园双摆弥雾施药的均匀性和施药量由其行进速度和曲柄转速所决定。

2.2.1 施药均匀度分析

弥雾机摆动扩幅动作与车身行进同时进行,使扩幅轨迹圆延伸为圆柱螺旋线,如图 10a 所示。

如图 10b 所示,在喷雾过程中,扩散后的柱形雾柱通过行进与摆动的动作耦合,形成对螺旋体内部空间的覆盖,由行进速度和摆动速度共同决定弥雾施药的均匀度

$$\rho = r_0/p \quad (15)$$

$$\rho = vT = 60\,000v/n \quad (16)$$

式中 ρ ——轴向弥雾均匀度

r_0 ——弥雾机圆柱形雾柱长度,测量得约 5 000 mm

p ——圆柱螺旋线的螺距,mm

v ——底盘行进速度,m/s

T ——摆动扩幅装置的动作周期,s

n ——摆动扩幅装置的电动机转速,r/min

2.2.2 目标函数的建立

在满足树冠弥雾施药的均匀度与施药量的前提下,以其作业效率最大化,工作寿命最高为目标。

$$\text{行进速度最大} \quad \max(v) = v \quad (17)$$

$$\text{曲柄转动速度最小} \quad \min(n) = n \quad (18)$$

2.2.3 约束条件

(1) 均匀度约束

为施药过程具有良好的均匀度,应使雾柱的圆柱部分长度不小于弥雾螺距(图 10b)。

$$\rho \geq 1 \quad (19)$$

(2) 药量约束

为使每株果树全面喷洒,对每株果树喷洒时曲柄应不少于一周

$$Z/p \geq 1 \quad (20)$$

式中 Z ——果园株距,根据调研沙梨果树平均株距为 3 500 ~ 3 800 mm

参照手动弥雾施药的技术要求,每株果树喷药时间为 1 ~ 2 s,即

$$1 \leq Z/v \leq 2 \quad (21)$$

(3) 运动约束

$$v \leq v_0 \quad (22)$$

$$n \leq n_0 \quad (23)$$

式中 v_0 ——车身行进额定速度,取 2 m/s

n_0 ——曲柄转动额定速度,取 100 r/min

2.2.4 规划结果

根据式(15)~(23)并代入已知参数,进行多目标线性规划求解,得到优化的双摆弥雾施药曲柄转速和行进速度分别为 32 ~ 34 r/min、1.9 ~ 2.0 m/s。

3 样机开发与调试

根据优化结果完成了双摆弥雾施药系统的样机开发(图 11)。双弥雾机由 90 W 直流电动机驱动,并配置 350 L 卧式药箱,整机质量和最大药液耗量分别为 95 kg(无药液)和 2.7 L/min,仅为现有果园机载施药装备的 1/20 ~ 1/5。该施药系统无需底盘配套动力,独立成机并可在底盘上方便地安装拆卸。

将该双摆弥雾施药系统安装在液压无极变速底

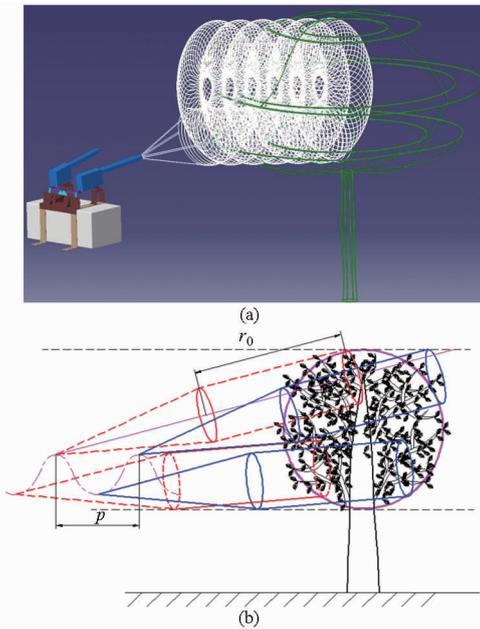


图 10 摆动扩幅弥雾的行进施药效果

Fig. 10 Traveling spray effect of symmetric swing mist spraying system

(a) 空间图 (b) 平面图

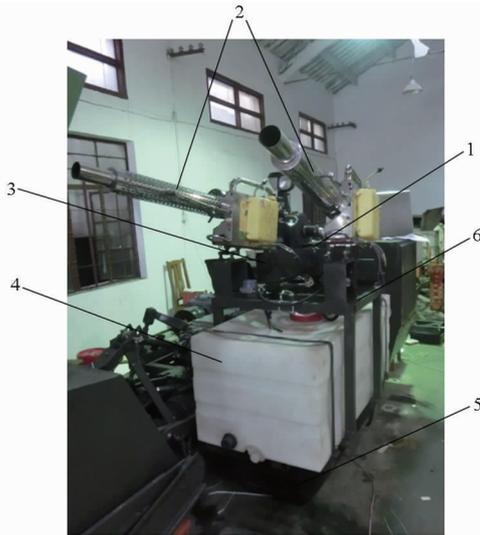


图 11 双摆弥雾施药系统样机

Fig. 11 Prototype of orchard symmetric swing mist spraying system

1. 电动机 2. 轴流弥雾机 3. 摆动扩幅装置 4. 药箱 5. 底盘
6. 支架

盘上,在镇江蔬菜研究所果园基地进行了试验验证,试验结果表明,该机实现了人工操作中复杂启停和摇动机身动作的自动化,同时由于摆动与行进复合动作对雾滴的附加速度和空气阻力影响,使弥雾喷幅比静态计算进一步扩大,可将原小型弥雾机静态弥雾喷幅半径由 400 mm 扩大至 1 500 mm,并有效覆盖 1 500 ~ 4 300 mm 高度范围和 5 500 mm 横向范围,能够有效覆盖和弥漫树冠,且雾滴分布更加均匀。该系统连续弥雾作业时间达到 2 h,作业效率可达 2.33 ~ 2.67 hm^2/h 。

4 结论

(1) 设计了双摆弥雾施药系统,通过自由度分析,由对称双曲柄机构和驱动点、支点的万向节-滑轨复合配置所构成的平面-空间混合型机构实现了双弥雾机的摆动扩幅。

(2) 设计了单片机自动控制系统,实现了双摆弥雾施药系统复杂启停动作的一键控制,从而大大方便操纵并有效避免了启动失败和药液反流现象的发生。

(3) 为保证弥雾施药对树冠的有效覆盖和整机在果园行间的通过性,通过多目标非线性规划得到双摆弥雾施药系统的优化结构参数为曲柄长度 46.7 ~ 66.8 mm,曲柄转动中心高度 1 250 mm,支点高度 1 316.5 ~ 1 341.8 mm,曲柄中心距 206.8 ~ 287.2 mm,支点中心距 304.1 ~ 407.3 mm,喷筒极限高度 1 677.4 ~ 1 836.6 mm,喷筒口间极限宽度 915 ~ 1 211 mm。

(4) 为保证果树弥雾药量及均匀度要求,通过单目标线性规划确定车身行进速度和曲柄转速分别为 1.9 ~ 2.0 m/s 和 32 ~ 34 r/min。

(5) 完成了双摆弥雾施药系统的样机开发与测试试验,可有效覆盖高度 1 500 ~ 4 300 mm 和横向 5 500 mm 的树冠范围,整机质量和药液耗量仅为现有果园机载施药装备的 1/20 ~ 1/5,作业效率达到 2.33 ~ 2.67 hm^2/h 。

参 考 文 献

- 1 张海峰,许林云. 果园喷雾机发展现状及展望[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(3): 112 - 116.
Zhang Haifeng, Xu Linyun. Summary of research status on orchard sprayer[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(3): 112 - 116. (in Chinese)
- 2 何雄奎,严荷荣,储金字. 果园自动对靶静电喷雾机设计与试验研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 78 - 80.
He Xiongkui, Yan Herong, Chu Jinyu. Design and testing of the automatic target detecting, electrostatic, air assisted, orchard sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(6): 78 - 80. (in Chinese)
- 3 冯晓静,杨欣,李建平,等. 3WFG-350型风送式果园喷雾机的研制[C]//中国农业工程学会2009年学术年会,太谷, 2009.

- 4 刘洪杰, 冯晓静, 刘俊峰, 等. 果园风送式喷雾机设计[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(33): 20911-20913.
Liu Hongjie, Feng Xiaojing, Liu Junfeng, et al. Design and experiment of orchard air-blast sprayer[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(33): 20911-20913. (in Chinese)
- 5 郭辉, 崔海民. 果园植保机械现状与发展研究[J]. 农业技术与装备, 2009(5): 30-31.
- 6 傅锡敏, 吕晓兰, 丁为民, 等. 我国果园植保机械现状与技术需求[J]. 中国农机化, 2009(6): 10-13.
- 7 邱威, 丁为民, 汪小昆, 等. 3WZ-700型自走式果园风送定向喷雾机[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 26-30.
Qiu Wei, Ding Weimin, Wang Xiaochan, et al. 3WZ-700 self-propelled air-blowing orchard sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 26-30. (in Chinese)
- 8 傅锡敏, 薛新宇. 基于我国施药技术与装备现状的发展思路[J]. 中国农机化, 2008(6): 72-76.
Fu Ximin, Xue Xinyu. Consideration on the technology and equipment of plant[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2008(6): 72-76. (in Chinese)
- 9 施鹏, 薛新宇, 王振龙, 等. 果园动力底盘喷雾机的发展现状[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(6): 27-31.
Shi Peng, Xue Xinyu, Wang Zhenlong, et al. Present situation of development on the dynamic chassis orchard sprayer [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(6): 27-31. (in Chinese)
- 10 丁素明, 傅锡敏, 薛新宇, 等. 低矮果园自走式风送喷雾机研制与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 18-25.
Ding Suming, Fu Ximin, Xue Xinyu, et al. Design and experiment of self-propelled air-assisted sprayer in orchard with dwarf culture[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(15): 18-25. (in Chinese)
- 11 Pezzi F, Rondelli V. The performance of an air-assisted sprayer operating in vineyard[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2000, 76(4): 331-340.
- 12 Jones K M, Bound S A, Oakford M J. Spray application technology[J]. Plant Growth Regulation, 2000, 31(3): 73-181.
- 13 常有宏, 吕晓兰, 蔺经, 等. 我国果园机械化现状与发展思路[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(6): 21-26.
Chang Youhong, Lü Xiaolan, Lin Jing, et al. Present state and thinking about development of orchard mechanization in China [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(6): 21-26. (in Chinese)
- 14 李超, 张晓辉, 姜建辉, 等. 葡萄园立管风送式喷雾机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4): 71-78.
Li Chao, Zhang Xiaohui, Jiang Jianhui, et al. Development and experiment of riser air-blowing sprayer in vineyard [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(4): 71-78. (in Chinese)
- 15 张晓辛, 吕晓兰, 丁素明, 等. 果园风送式喷雾机仿形喷雾试验研究[J]. 中国农机化, 2011(3): 68-72.
Zhang Xiaoxin, Lü Xiaolan, Ding Suming, et al. Experimental research on profiling spray of air-assisted orchard sprayer [J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2011(3): 68-72. (in Chinese)
- 16 徐莎, 翟长远, 朱瑞祥, 等. 喷雾高度可调的果园风送喷雾机的设计[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(11): 230-233.
Xu Sha, Zhai Changyuan, Zhu Ruixiang, et al. Design of an orchard air-assisted sprayer with adjustable spray height[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2013, 41(11): 230-233. (in Chinese)
- 17 丁素明, 傅锡敏, 薛新宇, 等. 低矮型自走式果园喷雾机动力底盘设计[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊1): 100-101.
Ding Suming, Fu Ximin, Xue Xinyu, et al. Design of power chassis for low self-propelled orchard sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 1): 100-101. (in Chinese)
- 18 张晓辉, 姜宗月, 范国强, 等. 履带自走式果园定向风送喷雾机[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 117-119.
Zhang Xiaohui, Jiang Zongyue, Fan Guoqiang, et al. Self-propelled crawler directional air-blowing orchard sprayer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 117-119. (in Chinese)
- 19 李羊林, 吴春笃, 储金宇, 等. 高射远程风送式喷雾车性能试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(11): 182-184.
- 20 孙桓, 陈作模, 葛文杰. 机械原理[M]. 7版. 北京: 高等教育出版社, 2006.

Development of Orchard Symmetric Swing Mist Spraying System

Liu Jizhan¹ Wang Qin¹ Zhan Guoxiang² Feng Shanghai¹

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. Zhenjiang Agricultural Machinery and Technology Extension Station, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Present orchard spray equipment is much larger, and both power and pesticide consumption are much higher. To overcome the above deficiency, an orchard symmetric swing mist spraying system was developed. To expand the diameter of mist spraying, a planar-spatial hybrid mechanism was designed firstly by analyzing the configuration of driving point and fulcrum, and degree of freedom. The planar-

spatial hybrid mechanism was driven by a DC motor, which consisted of a symmetrical double crank mechanism and different multi-degree joints at driving points and fulcrums to realize spatial swing motion of the two mist sprayers. To simplify the manipulation and avoid the backflow of pesticide, a MCU control system was designed to realize one-button start/stop operation of the complex action process of the symmetric swing mist spraying system. According to the orchard's specification, the structural parameters, including the length of the crank, the height of crank center, height of fulcrum, distance of crank center and distance of fulcrum, were determined by nonlinear programming that took the minimization of machine size and the effective covering of canopy by mist spray as objective and constraint conditions, respectively. And then to achieve the highest efficiency of mist spraying under the constraints of both rate and uniformity of mist spraying, the optimal traveling speed of the machine and rotation speed of the crank were determined. This spraying system can guarantee the effective coverage of crowns within height of 1 500 ~ 4 300 mm and 5 500 mm width with 400 mm radius mini mist sprayer, and guarantee the uniformity and quantity for spray of mist spraying on both sides of the trees, whose working efficiency can reach 2.33 ~ 2.67 hm²/h. It is an energy-saving, pesticide-saving and miniature mobile orchard spraying system and will be a better selection in the future for pest control in orchards.

Key words: Orchard Symmetric swing mist spray Spraying Design Optimization

(上接第 98 页)

- 13 张兰金, 纪兴英, 常近时. 水泵水轮机泵工况转轮流场分析[J]. 农业机械学报, 2008, 39(4): 69-72.
Zhang Lanjin, Ji Xingying, Chang Jinshi. Flow analysis of the pump-turbine runner in the pump mode[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(4): 69-72. (in Chinese)
- 14 Widmer C, Staubli T, Ledergerber N. Unstable characteristics and rotating stall in turbine brake operation of pump-turbines[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2011, 133(4): 041101
- 15 冉红娟, 张瑶, 罗先武, 等. 可逆式水轮机泵工况下驼峰现象的数值模拟[J]. 水力发电学报, 2011, 30(3): 175-179.
Ran Hongjuan, Zhang Yao, Luo Xianwu, et al. Numerical simulation of the positive-slope performance curve of a reversible hydro turbine in pumping mode[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(3): 175-179. (in Chinese)

3D Inverse Design and Performance Investigation of Pump-turbine Runner

Wang Xuhe¹ Zhu Baoshan¹ Fan Honggang¹ Tan Lei¹ Chen Yuanlin² Wang Huanmao²

(1. State Key Laboratory of Hydro Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2. Harbin Institute of Large Electrical Machinery, Harbin 150040, China)

Abstract: 3D inverse design method was applied to configure the runner geometry of a middle-high head pump-turbine, in which design parameters were given according to pump operation and iterative calculations conducted from turbine direction. Model tests were performed to measure performances of developed runner under different operating modes and points. Test results show that the highest efficiency under pump mode is 91.34%, and highest efficiency under turbine mode is 88.5%. Internal flow analyses based on viscous full passage computations show that water pass through the passage smoothly with smaller loss under pump mode, while rather serious incidence loss exists at runner inlet and large low pressure area exists at suction side under turbine mode.

Key words: Pump turbine 3D inverse design Model test Numerical simulation