doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.10.014

大型平移式喷灌机分布式级联协同导航控制方法

孟令刚[1,2]　范松涛[1,2]　周　燕[1,3]

(1.中国科学院半导体研究所光电系统实验室,北京 100083;
2.中国科学院大学材料科学与光电技术学院,北京 100049;
3.中国科学院大学电子电器与通信工程学院,北京 100049)

摘要:针对大型平移式喷灌机协同导航控制系统中存在的易偏离导航路径、跨间行走协同性差、喷灌均匀性不高等问题,提出了一种分布式级联协同导航控制方法。该方法在建立大型喷灌机多塔车运动学模型的基础上,结合状态反馈和 PID 控制,设计了主塔车为主机的路径导航控制算法以及子塔车为从机的级联同步跟随控制算法。并设计了基于该方法的协同导航控制系统,通过双天线 RTK 定位模块获得各塔车的实时姿态,通过变频调速技术实现各塔车运动姿态的控制。完成了变频控制的大型喷灌机设计,在河南省许昌市试验基地进行了协同导航试验。试验结果表明,喷灌机以不同速度协同导航行走时,主塔车最大横向偏差不大于 3.26 cm,最大航向偏差不大于 1.65°;子塔车最大同步偏差不大于 13.07 cm,满足田间自主作业要求。

关键词:喷灌机;平移式;分布式级联;协同导航;RTK;变频调速

中图分类号:TP273　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2021)10-0137-09　　**OSID**:

Distributed Cascading Cooperative Navigation Control Method of Large-scale Lateral Moving Sprinkler Irrigation Machine

MENG Linggang[1,2]　FAN Songtao[1,2]　ZHOU Yan[1,3]

(1. *Optoelectronic System Laboratory*, *Institute of Semiconductors*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100083, *China*
2. *College of Materials Science and Opto-Electronics Technology*, *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*
3. *School of Electronic*, *Electrical and Communication Engineering*, *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*)

Abstract: The following problems exist in the cooperative navigation control system of traditional large-scale lateral moving sprinkler irrigation machine, such as easy deviation from the navigation path, poor inter-span walking coordination, and low sprinkler irrigation uniformity. In order to solve the above problems, a distributed cascade cooperative navigation control method was proposed. Based on the establishment of the multi-tower kinematic model of the large-scale sprinkler irrigation machine, combined with the state feedback and PID control, the path navigation control algorithm was designed with the main tower as the master and the cascaded synchronous following control algorithm with the node-tower as the slave. And a collaborative navigation control system was designed and developed based on this method. The real-time attitude of each tower car was obtained through the dual-antenna RTK positioning module, and the control of the movement attitude of each tower car was realized through frequency control technology. Based on the above control methods, a cooperative navigation control system was designed and it was deployed on the developed sprinkler irrigation machine. The navigation control system was installed on the sprinkler irrigation machine, and the sprinkler irrigation machine was modified. A coordinated navigation control test was carried out in Xuchang, Henan. The test results showed that at different navigation speeds, the maximum lateral deviation of the main tower vehicle was within ± 3.26 cm, and the maximum heading deviation was within ± 1.65°; the maximum synchronization deviation of the sub-tower vehicle was within ±13.07 cm, which met the requirements of autonomous field operations.

Key words: sprinkler irrigation machine; lateral moving; distributed cascade control; collaborative navigation; RTK; frequency control

收稿日期:2021-05-20　修回日期:2021-07-02

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0700504-3)

作者简介:孟令刚(1992—),男,博士生,主要从事农业机械自主导航研究,E-mail:mlg1992@semi.ac.cn

通信作者:周燕(1972—),女,研究员,博士生导师,主要从事微弱信号探测与成像技术研究,E-mail:zhouyan@semi.ac.cn

0 引言

中国农业存在水资源短缺和利用效率不高的双重问题,变量灌溉技术是现代农业发展的必然选择。大型平移式喷灌机(以下简称喷灌机)具有单机控制面积大、自动化程度高、灌溉效率高等优点,是实现变量灌溉的有效载体[1-3]。目前喷灌机主要通过在行走方向调节运动速度以及在桁架方向改变喷头流量实现变量灌溉[4-5],为了实现更精准的变量灌溉,协同导航控制系统不仅要控制喷灌机按导航路径行走,还要保证各塔车协同运动的同步性。

传统大型平移式喷灌机主要通过在导航路径上预设犁沟、钢丝绳、地磁线等装置,控制主塔车的航向实现喷灌机路径导航;通过跨角传感器或同步控制杆等采用摆角归零的"走-停-走"间歇控制方法,实现各子塔车随主塔车协同同步行走。在该导航控制方式下,喷灌机只能沿固定的导航路径行走、各塔车运动不连续、同步性差,且不能实时获取各塔车的位置,无法满足更精准变量灌溉下喷灌机自动导航协同行走的作业要求[6]。

近些年,卫星定位技术快速发展,尤其是采用载波相位差分的 RTK 定位已达到厘米级定位精度,被广泛应用于包括喷灌机在内的农机导航控制领域[7-13]。国外关于喷灌机导航控制方面的研究较早[14-17],目前美国的 Reinke、Valmont、T-L 等公司已有成熟的基于 GPS 的导航控制产品,这些产品在喷灌机的两侧/单侧节点放置 GPS 定位模块,通过调节驱动电机的占空比或变速电机(如 X-Tec 直流电机、可调液压驱动电机、变频调速电机等)转速调节驱动塔车的运动姿态,实现喷灌机主塔车或末端塔车路径导航。在国内,张小超等[18]基于 GPS 技术对大型喷灌机变量控制进行了研究,验证了利用高精度 GPS 定位信号作为大型喷灌机控制反馈信号的可行性;张银桥等[19]进一步提出了基于 GPS 变频调速的喷灌机自动作业控制技术,根据处方图实现了自动作业;吴普特团队[20-21]研制了一种基于 GPS 导航的太阳能驱动平移式喷灌机,并设计了基于 PID 和模糊控制的单塔车导航控制系统,其在速度 0.8 m/min 下最大横向误差为 18.4 cm。以上研究大都基于喷灌机单塔车导航控制,有关喷灌机多塔车导航控制的研究鲜有报道。

此外,为解决喷灌机同步行走问题,MOELLER 等[16]提出了一种塔车逐级对准的喷灌机同步行走控制方法,即从最外侧塔车到最内侧塔车依次对准校正。严海军[3]提出了基于变频调速的平移式喷灌机连续运行策略。YUAN 等[22]在开发的大型平移式喷灌机虚拟仿真系统上,通过对相关控制参数的优化以及田间试验,验证了基于角度传感器的连续变频调速控制系统能实现大型喷灌机的同步行走,在控制速度 7.5 Hz 下其最大跨间夹角误差为 0.6°,最大累积同步误差为 0.12°。以上研究都基于塔间夹角进行同步行走控制,然而在实际田间作业时,由于塔架变形和晃动等外界因素容易改变塔间夹角,且塔间夹角误差存在传递累积,这极大影响了喷灌机同步行走的控制精度。

基于以上研究,为了实现大型平移式喷灌机多塔车协同导航,本文基于 RTK 定位及变频调速技术,提出分布式级联协同导航控制方法。并以自研大型喷灌机为试验平台,设计大型平移式喷灌机协同导航控制系统,通过试验验证该控制系统的有效性,以期实现复杂田间环境下,大型平移式喷灌机多塔车的路径导航和同步行走。

1 大型平移式喷灌机多塔车运动学模型

以自研大型喷灌机为研究对象,其三维结构如图 1 所示,该喷灌机整机由 1 个主塔车、4 个子塔车(子塔车 1~4)以及桁架等组成。其中,子塔车与靠近主塔车一侧的桁架组成一组跨体,且由子塔车驱动;主塔车与跨体间以带集电环的转环连接,以满足跨体绕主塔车旋转的作业需求;跨体间以球铰及挠性软管连接,使喷灌机跨体与跨体间有一定的旋转运动空间。

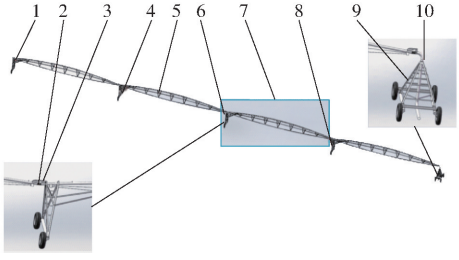


图 1 大型喷灌机三维结构图

Fig. 1 Three-dimensional structure drawing of self-developed large-scale sprinkler irrigation machine

1. 子塔车 4 2. 挠性软管 3. 球铰 4. 子塔车 3 5. 桁架 6. 子塔车 2 7. 跨体 8. 子塔车 1 9. 主塔车 10. 转环

喷灌机主塔车行走部分采用四轮驱动,子塔车行走部分采用二轮驱动,其单侧前后两个车轮由同一电机提供动力。为便于对喷灌机运动学模型进行分析,喷灌机行走过程中,主塔车模型被简化为二轮差速模型,其通过控制两侧驱动轮速度实现转向;子塔车模型被简化为 DOF(动态节点),桁架结构被简化为刚性连接杆,跨体通过绕相对旋转中心旋转实现转向,其相对旋转中心位于主塔车转环及子塔车球铰处。假设不考虑喷灌机行走时各塔车驱动轮侧

向滑动、次级塔车的拖拽作用等因素的影响，喷灌机多塔车运动学模型可用主塔车运动学模型和子塔车级联运动学模型共同表示，如图 2 所示，图中 θ_s 为喷灌机航向角，W_s 为主塔车左右两侧轮距，L 为塔车间距。

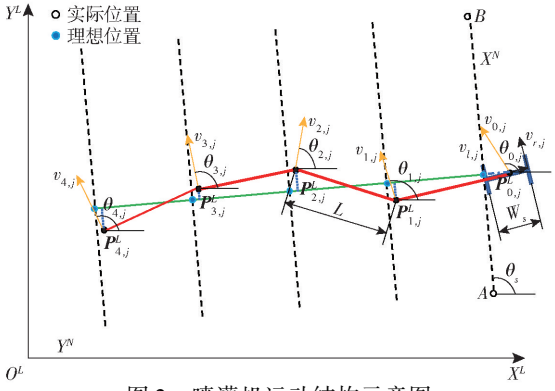


图 2　喷灌机运动结构示意图

Fig. 2　Schematic of sprinkler irrigation machine movement structure

在本地局部坐标系（$X^LO^LY^L$）下，喷灌机塔车 i 在 j 时刻的位姿 $\boldsymbol{P}_{i,j}^L$ 由塔车 i 的位置（$x_{i,j}$，$y_{i,j}$）以及它的航向角 $\theta_{i,j}$ 组成（其中 i 为塔车编号，当 $i=0$ 时，表示主塔车；i 为 1、2、3、4 时，表示子塔车 1、2、3、4）。

$$\boldsymbol{P}_{i,j}^L=\begin{bmatrix}x_{i,j}\\y_{i,j}\\\theta_{i,j}\end{bmatrix} \tag{1}$$

由于主塔车运动学模型简化为二轮差速模型，其通过改变两侧驱动轮的速度来改变主塔车的航向角速度 $\dot{\theta}_{0,c}$ 实现转向。在全局坐标系下，主塔车在 j 时刻的速度 $v_{0,j}$ 和航向角速度 $\dot{\theta}_{0,j}$ 与主塔车左右两轮速度 $v_{l,j}$、$v_{r,j}$ 满足

$$\begin{bmatrix}v_{0,j}\\\dot{\theta}_{0,j}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dfrac{1}{2}&\dfrac{1}{2}\\\dfrac{1}{W_s}&-\dfrac{1}{W_s}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v_{r,j}\\v_{l,j}\end{bmatrix} \tag{2}$$

在子塔车级联运动学模型中，子塔车 1 以主塔车中心（转环结构处）为相对旋转中心做相对旋转运动。由于主塔车与子塔车 1 存在航向夹角 $\gamma_{0,1,j}$，主塔车沿桁架垂向方向的速度分量为

$$v_{0,j}^{\perp}=v_{0,j}\cos\gamma_{0,1,j} \tag{3}$$

子塔车 1 的航向始终与桁架方向垂直，此时，子塔车 1 的航向角速度 $\dot{\theta}_{1,j}$ 即为其绕相对旋转中心的旋转角速度

$$\dot{\theta}_{1,j}=\frac{v_{0,j}^{\perp}-v_{1,j}}{L}=\frac{v_{0,j}\cos\gamma_{0,1,j}-v_{1,j}}{L} \tag{4}$$

式中　$v_{1,j}$——子塔车 1 在 j 时刻的速度

喷灌机协同导航行走时，主塔车和子塔车 1 之间航向夹角 $\gamma_{0,1,j}$ 一般都比较小，此时 $\cos\gamma_{0,1,j}\approx1$。则子塔车 1 的航向角速度 $\dot{\theta}_{1,j}$ 近似等效为

$$\dot{\theta}_{1,j}=\frac{v_{0,j}-v_{1,j}}{L} \tag{5}$$

同理，由于子塔车 i 与子塔车 $i-1$ 协同运动时，子塔车 i 以子塔车 $i-1$ 球铰结构处为相对旋转中心做相对旋转运动，此时子塔车 i 的航向角速度 $\dot{\theta}_{i,j}$ 为

$$\dot{\theta}_{i,j}=\frac{v_{i-1,j}-v_{i,j}}{L} \tag{6}$$

式中　$v_{i-1,j}$、$v_{i,j}$——子塔车 $i-1$ 和子塔车 i 在 j 时刻的速度

喷灌机塔车 i 的运动学方程满足[24]

$$\dot{\boldsymbol{P}}_{i,j}^L=\begin{bmatrix}\dot{x}_{i,j}\\\dot{y}_{i,j}\\\dot{\theta}_{i,j}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\theta_{i,j}&0\\\sin\theta_{i,j}&0\\0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v_{i,j}\\\dot{\theta}_{i,j}\end{bmatrix} \tag{7}$$

联立式（2）、（6）、（7），喷灌机多塔车运动学模型可表示为

$$\dot{\boldsymbol{P}}_j^L=[\dot{\boldsymbol{P}}_{0,j}^L\quad\dot{\boldsymbol{P}}_{1,j}^L\quad\dot{\boldsymbol{P}}_{2,j}^L\quad\dot{\boldsymbol{P}}_{3,j}^L\quad\dot{\boldsymbol{P}}_{4,j}^L]=$$
$$\begin{bmatrix}\cos\theta_{0,j}&\cos\theta_{1,j}&\cos\theta_{2,j}&\cos\theta_{3,j}&\cos\theta_{4,j}&0\\\sin\theta_{0,j}&\sin\theta_{1,j}&\sin\theta_{2,j}&\sin\theta_{3,j}&\sin\theta_{4,j}&0\\0&0&0&0&0&1\end{bmatrix}\cdot$$
$$\begin{bmatrix}\dfrac{v_{r,j}+v_{l,j}}{2}&0&0&0&0\\0&v_{1,j}&0&0&0\\0&0&v_{2,j}&0&0\\0&0&0&v_{3,j}&0\\0&0&0&0&v_{4,j}\\\dfrac{v_{r,j}-v_{l,j}}{W_s}&\dfrac{v_{1,j}-v_{0,j}}{L}&\dfrac{v_{2,j}-v_{1,j}}{L}&\dfrac{v_{3,j}-v_{2,j}}{L}&\dfrac{v_{4,j}-v_{3,j}}{L}\end{bmatrix} \tag{8}$$

式中　$v_{2,j}$、$v_{3,j}$、$v_{4,j}$——子塔车 2、3、4 在 j 时刻的速度

在多塔车运动学模型中，主塔车位姿变化主要受作业两轮的驱动速度影响；子塔车位姿变化除受自身驱动速度影响外，还受上级塔车（主塔车一侧）驱动速度的影响。

2　分布式级联的协同导航控制方法

受农田地表起伏、行走阻力[23]等外界因素影响，喷灌机各塔车无法沿预设导航路径行走且存在行走不同步现象。为了提高喷灌机的协同导航控制精度，必须获得塔车高精度定位数据且实现各塔车运动姿态的实时调整。本文通过前文所述的喷灌机多塔车运动学模型，基于 RTK 定位技术及电机变频

调速技术,提出了一种分布式级联的协同导航控制方法,该方法在每个塔车建立分布式塔车节点[25],以主塔车为主机进行路径导航,子塔车为从机进行级联同步跟随,来实现协同导航控制。控制过程中,分布式塔车节点将采集到的位姿 $\boldsymbol{P}_{i,j}^{W}$ 发送至协同导航控制器,协同导航控制器经协同导航偏差求解、协同导航控制、速度频率转换后,得到控制各塔车驱动车轮速度的变频电机工作频率 f_c,并发送至喷灌机分布式塔车节点,调节各塔车姿态,如图 3 所示。图中 $\boldsymbol{P}_{i,j}^{W}$ 为塔车 i 经纬高坐标系(简称 LLA 坐标系)下的位姿,$\boldsymbol{P}_{i,j}^{L}$ 为塔车 i 本地局部坐标系($X^LO^LY^L$)下的位姿,$\boldsymbol{P}_{i,j}^{N}$ 为塔车 i 喷灌机导航坐标系($X^NO^NY^N$)下的位姿,$e_{l,0,j}$ 为主塔车横向偏差,$e_{\theta,0,j}$ 为主塔车航向角偏差,$e_{s,i,j}$($i=1,2,3,4$)为子塔车 i 的同步偏差,$f_{c,l}$、$f_{c,r}$ 和 $f_{c,1}$ ~ $f_{c,4}$ 分别为控制主塔车左右两轮及子塔车 1 ~ 4 变频电机工作频率,$v_{c,0}$ 为主塔车控制速度,$v_{c,l}$、$v_{c,r}$ 为主塔车左、右轮控制速度,$v_{c,1}$ ~ $v_{c,4}$ 为子塔车 1 ~ 4 控制速度。

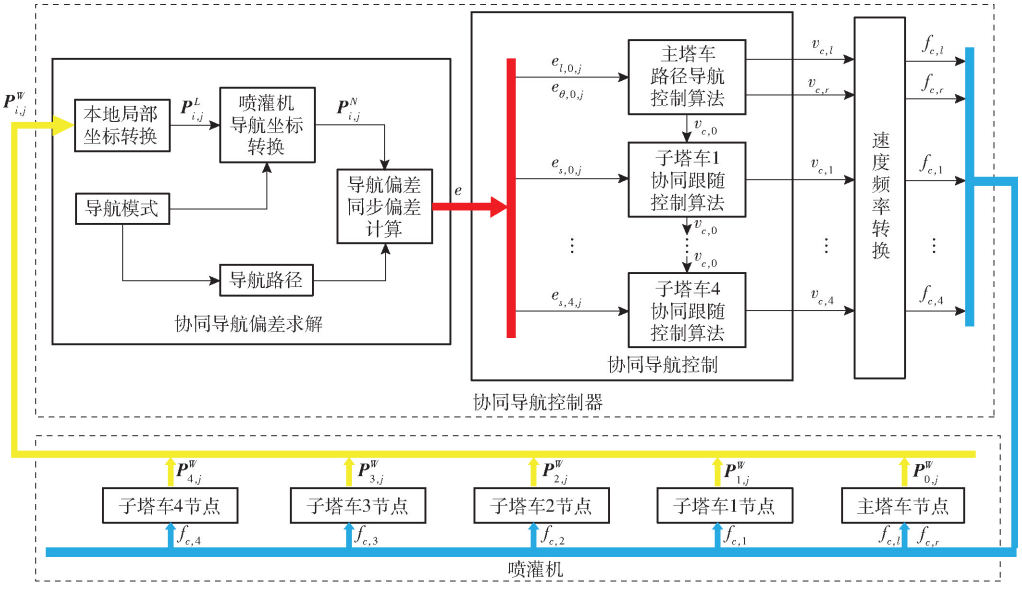


图 3 协同导航控制流程图

Fig. 3 Cooperative navigation control flow chart

2.1 协同导航偏差求解

在协同导航控制器中,喷灌机导航偏差和同步偏差的精度直接影响协同导航的控制精度,而协同导航偏差和同步偏差的精度与喷灌机各塔车的定位精度及航向精度相关。为获得高精度定位信号和航向信号,选用基于双天线 RTK 定位模块实时获取各塔车的位姿(位置和航向)。由于常见的 RTK 定位模块输出的喷灌机各塔车的位置为经纬度和高度数据,为了便于导航控制,在导航控制过程中通常将经纬高坐标转换为本地局部东北天坐标。

如图 4 所示,ENU 坐标系下,喷灌机导航路径由主塔车起始点 $A(x_A,y_A)$ 和终点 $B(x_B,y_B)$ 确定,导航航向角 θ_s 为直线 AB 的方向角,为

$$\theta_s=\arctan\frac{y_B-y_A}{x_B-x_A} \tag{9}$$

以点 A 为坐标原点,导航航向角所在的方向为 X 轴,与导航航向垂直的喷灌机桁架方向为 Y 轴,建立喷灌机导航坐标系($X^NO^NY^N$),从导航坐标系变换到 ENU 坐标系的矩阵 $\boldsymbol{T}$ 满足

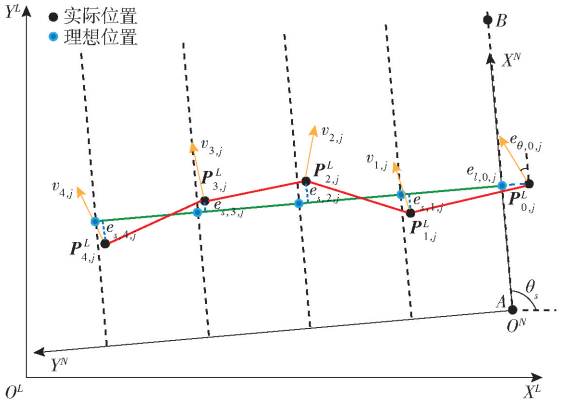


图 4 喷灌机导航偏差和同步偏差

Fig. 4 Navigation deviation and synchronization deviation of sprinkler irrigation machine

$$\boldsymbol{T}=\boldsymbol{R}_{\mathrm{rot}}(\theta_s)\boldsymbol{T}_{\mathrm{trans}}(x_A,y_A)=\begin{bmatrix}\cos\theta_s & -\sin\theta_s & x_A\\ \sin\theta_s & \cos\theta_s & y_A\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{10}$$

喷灌机导航坐标系下,塔车 i 的位姿 $\boldsymbol{P}_{i,j}^{N}$ 由导航坐标系下坐标($x_{i,j}^N,y_{i,j}^N$)以及航向角偏差 $e_{\theta,i,j}=\theta_{i,j}^L-\theta_s$ 组成。其中

$$\begin{bmatrix} x_{i,j}^N \\ y_{i,j}^N \\ 1 \end{bmatrix} = \boldsymbol{T}^{-1} \begin{bmatrix} x_{i,j}^L \\ y_{i,j}^L \\ 1 \end{bmatrix} \tag{11}$$

理想情况下，喷灌机在导航控制过程中各塔车沿导航路径平移同步行走，各塔车 Y 轴坐标保持不变，X 轴坐标与主塔车保持一致，则任意时刻 j，塔车 i 的理想导航位姿 $\boldsymbol{P}'_{i,j}$ 为

$$\boldsymbol{P}'_{i,j} = [x'_{i,j} \quad y'_{i,j} \quad \theta'_{i,j}]^{\mathrm{T}} = [x_{0,j}^N \quad iL \quad 0]^{\mathrm{T}} \tag{12}$$

此时，主塔车沿导航路径的横向偏差 $e_{l,0,j}$、航向偏差 $e_{\theta,0,j}$ 以及各子塔车 i 的同步偏差 $e_{s,i,j}$ 为

$$\begin{bmatrix} e_{l,0,j} \\ e_{\theta,0,j} \\ e_{s,i,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{0,j}^N \\ \theta_{0,j}^L - \theta_s \\ x_{i,j}^N - x_{0,j}^N \end{bmatrix} \tag{13}$$

由此，基于上述协同导航偏差求解运算获得了喷灌机主塔车导航偏差以及各塔车的同步偏差。

2.2　协同导航控制

2.2.1　主塔车路径导航控制算法

主塔车在田间行走作业时，通常用导航偏差（横向偏差 $e_{l,0,j}$ 和航向偏差 $e_{\theta,0,j}$）表示主塔车偏离导航路径的程度。当主塔车偏离导航路径时，主塔车只能通过改变左右两轮驱动速度来改变航向角速度，进而改变航向角进行路径跟踪。

为了消除横向偏差和航向偏差，本文基于状态反馈控制设计主塔车路径导航控制器，主塔车航向控制角速度 $\dot{\theta}_{0,c}$ 满足

$$\dot{\theta}_{0,c} = K_l e_{l,0,j} + K_\theta e_{\theta,0,j} \quad ((K_\theta, K_l) \in \mathbf{R}^{+2}) \tag{14}$$

式中　K_l——横向偏差反馈系数

K_θ——航向偏差反馈系数

主塔车沿导航路径的速度 v_s 保持不变，则

$$v_{0,c} = \frac{v_s}{\cos e_{\theta,0,j}} \tag{15}$$

联立式（2）、（14）、（15），主塔车左右两侧轮的控制速度与航向控制角速度 $\dot{\theta}_{0,c}$ 的关系为

$$\begin{cases} v_{r,c} = v_{0,c} + \dfrac{\dot{\theta}_{0,c} W_s}{2} \\ v_{l,c} = v_{0,c} - \dfrac{\dot{\theta}_{0,c} W_s}{2} \end{cases} \tag{16}$$

2.2.2　子塔车协同跟随控制算法

理想情况下，多塔车协同行走时，喷灌机各塔车沿桁架方向呈一条直线，且各塔车航向与喷灌机设定航向保持一致。然而，由于多种因素的干扰，在多塔车实际田间协同行走作业时，各子塔车实际行走速度与理论速度并不一致，各子塔车沿桁架垂向方向出现超前或者滞后现象，即子塔车 i 存在与设定航向之间的航向偏差 $e_{\theta,i,j}$，或子塔车 i 所在的跨体与喷灌机整机桁架方向存在跨间夹角，两者大小相等。

如图 5 所示，子塔车 1 的航向偏差为 $e_{\theta,1,j}$。由多塔车运动学模型，子塔车 1 通过改变与主塔车的相对速度调节自身运动姿态。为实现子塔车 1 随主塔车协同行走，消除子塔车 1 的航向偏差，本文利用 PI 控制理论的线性负反馈比例控制策略获取期望的子塔车 1 相对主塔车的速度 Δv_1

$$\Delta v_1 = K'_p e_{\theta,1,j} + K'_i \sum_{m=0}^{k} e_{\theta,1,j-m} \tag{17}$$

式中　K'_p——航向偏差角度比例增益

K'_i——航向偏差角度积分增益

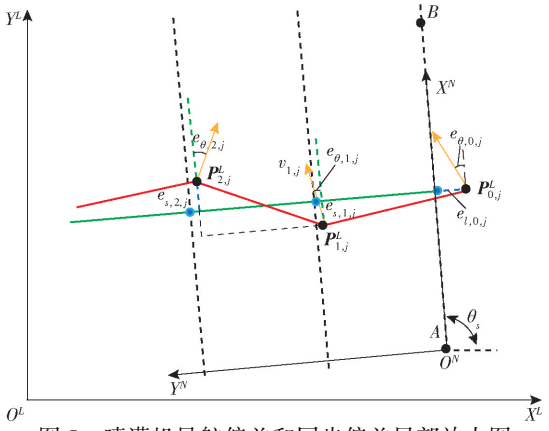


图 5　喷灌机导航偏差和同步偏差局部放大图

Fig. 5　Partial enlarged view of sprinkler irrigation machine navigation deviation and synchronization deviation

子塔车 1 航向偏差 $e_{\theta,1,j}$ 与同步偏差 $e_{s,1,j}$ 满足 $\sin e_{\theta,1,j} = \dfrac{e_{s,1,j}}{L}$。协同作业精度一般在 ±30 cm 范围内，即 $e_{\theta,1,j} < 0.012\mathrm{rad}(0.687\,6°)$，此时 $e_{\theta,1,j}$ 可近似等效为 $\dfrac{e_{s,1,j}}{L}$。由于双天线 RTK 定位模块的定位精度比航向精度更高，且受外界影响因素更小，本文选用同步偏差表示子塔车的同步程度，此时，式（17）可表示为

$$\Delta v_1 = K'_p L e_{\theta,1,j} + K'_i L \sum_{m=0}^{k} e_{\theta,1,j-m} = K_p e_{s,1,j} + K_i \sum_{m=0}^{k} e_{s,1,j-m} \tag{18}$$

式中　K_p——同步偏差比例增益

K_i——同步偏差积分增益

$e_{s,1,j-m}$——子塔车 1 在 $j-m$ 时刻同步偏差

此时，子塔车 1 的控制速度由主塔车控制速度和相对速度 Δv_1 共同组成，即

$$v_{c,1} = v_{c,0} - \Delta v_1 = v_{c,0} - \left(K_p e_{s,1,j} + K_i \sum_{m=0}^{k} e_{s,1,j-m} \right) \tag{19}$$

由于子塔车 2 航向偏差 $e_{\theta,2,j}$ 与同步偏差 $e_{s,2,j}$、子塔车 1 同步偏差 $e_{s,1,j}$ 满足 $\sin e_{\theta,2,j}=\dfrac{e_{s,2,j}-e_{s,1,j}}{L}$，此时，子塔车 2 的相对速度 Δv_2 满足

$$\Delta v_2=K_p(e_{s,2,j}-e_{s,1,j})+K_i\sum_{m=0}^{k}(e_{s,2,j}-e_{s,1,j})=$$

$$K_p e_{s,2,j}+K_i\sum_{m=0}^{k}e_{s,2,j-m}-\left(K_p e_{s,1,j}+K_i\sum_{m=0}^{k}e_{s,1,j-m}\right)=$$

$$K_p e_{s,2,j}+K_i\sum_{m=0}^{k}e_{s,2,j-m}-\Delta v_1 \tag{20}$$

子塔车 2 的控制速度满足 $v_{c,2}=v_{c,1}-\Delta v_2$，联立式(19)、(20)可得

$$v_{c,2}=v_{c,0}-\left(K_p e_{s,2,j}+K_i\sum_{m=0}^{k}e_{s,2,j-m}\right) \tag{21}$$

依次，子塔车 i 随上级塔车协同行走时，其控制速度满足

$$v_{c,i}=v_{c,0}-\left(K_p e_{s,i,j}+K_i\sum_{m=0}^{k}e_{s,i,j-m}\right) \tag{22}$$

2.3 速度频率转换算法

由于喷灌机采用 380V 1.1kW 的 UMC 变频电机为驱动轮提供动力，变频电机包含减速比 $i=60$ 的行星齿轮减速器，其输出扭矩经传动比 i_{rat} 为 1∶50 的蜗轮蜗杆车轮减速器传送给车轮。轮胎为普通的人字形农用轮胎，轮胎直径 D 为 1.2 m。为实现每组驱动轮速度的独立调节，每组变频电机均配有控制电机工作频率的变频器，通过调节变频电机的工作频率控制电机的转速，表 1 为 UMC 变频电机的性能参数。

由于变频电机的输出转速与工作频率并不严格线性相关，本文基于分段拟合建立了驱动轮速度与频率的函数表达式

$$f=g(f,i,i_{rat},D) \tag{23}$$

表 1 UMC 变频电机的性能参数

Tab. 1 Performance parameters of UMC variable frequency motor

频率/Hz	功率/kW	转速/(r·min^{-1})	转矩/(N·m)
6～60	0.08～0.97	2.5～29	1 362
60～90	0.97～1.12	29～43	1 035～1 362
90～120	1.12～1.19	43～58	832～1 035

式中 f——变频电机工作频率

根据式(23)，理想情况下驱动轮速度与频率的关系如图 6 所示，在实际田间控制过程中，受行进阻力及车轮滑动等影响，变频电机与实际速度并不完全呈现这种关系，而是存在波动。

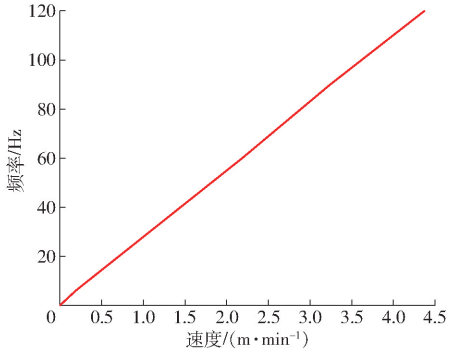


图 6 驱动轮速度与频率拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve of driving wheel speed and frequency

3 协同导航控制系统设计

协同导航控制系统由控制主机、塔车节点控制器和塔车驱动器等组成，如图 7 所示。控制主机是协同导航控制系统的核心，由协同导航控制软件、RTK 基站模块、RTCM 广播电台、4G 数传电台服务器等组成；塔车节点控制器是协同导航控制系统的数据采集及控制终端，由 STM32 微控制器、RTK 移动站模块、RTCM 接收电台、4G 数传电台终端等组

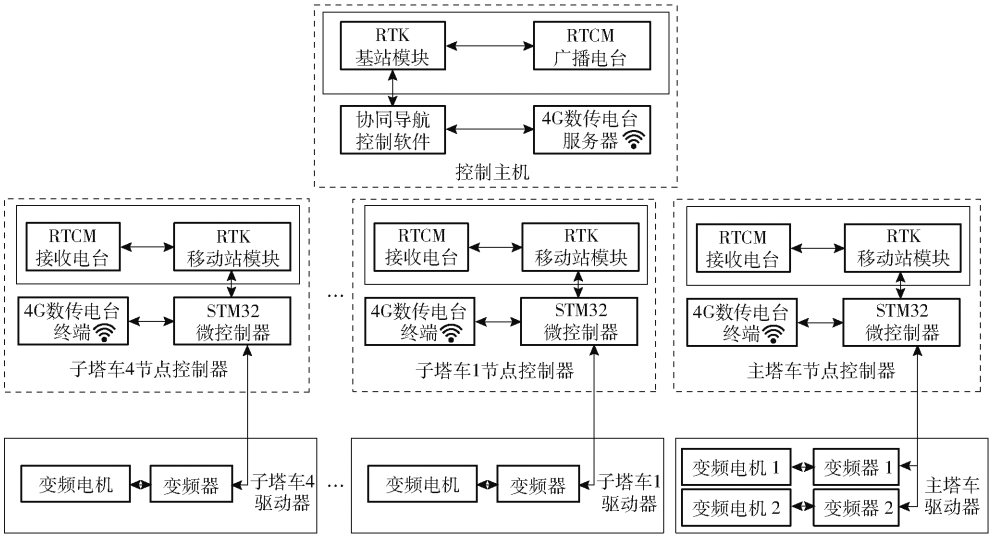


图 7 协同导航控制系统组成图

Fig. 7 Cooperative navigation control system composition diagram

成；塔车驱动是塔车控制系统的运动执行单元，由变频器、变频电机组成；控制主机及塔车节点控制器之间通过 4G 数传电台进行通信，其中，RTK 基站模块和 RTK 移动站模块均采用和芯星通科技北京有限公司的双天线 RTK 定位模块（UB482 型），定位精度 1 cm，定向精度 0.2（°）/m，速度精度 0.03 m/s。协同导航控制过程中，RTK 基站将采集的载波相位传输至移动站，移动站求解相位差获得厘米级精度位姿（位置和航向）数据。基站卫星天线就近安装在实验基地，移动站卫星天线安装在各塔车顶部，基站载波相位数据传输通过 RTCM 广播电台发送。4G 无线数传采用成都亿佰特电子科技有限公司 E840 - DTU 型 4G 数传终端，用来实现主机与分布式塔车节点控制器双向数据传输。由于 RTK 定位模块的田间实际工作中定位精度为 2 cm，喷灌机最大行走速度一般不大于 1.5 m/min（2.5 cm/s），根据奈奎斯特采样定理，RTK 定位的采样频率不大于 2.25 Hz，对网络的延时应小于 440 ms。经实际测试，该 4G 数传终端平均网络延迟小于 400 ms，4G 数传终端产生的网络延时对协同导航控制系统的实时性影响在允许范围内。变频器采用杭州三科频技术有限公司的 SKI600 型矢量变频器，该变频器可通过 485 通信接口控制变频电机的工作频率。STM32 微控制器选用 STM32F103 芯片作为下位机主控芯片，且集成 232、485 等通信接口，满足导航控制终端数据采集及变频器控制的需求。

如图 8 所示，喷灌机协同导航作业前，首先设定导航路径，并发送给协同导航控制器。作业过程中，塔车节点控制器通过 RTK 移动站模块实时采集塔车的位姿（位置和航向）信息，并将采集的位姿信息发送给控制主机内的协同导航控制器；协同导航控制器对各塔车位姿信息经坐标转换处理后，通过与导航路径对比获得主塔车导航偏差和子塔车同步偏差；经内部主塔车路径导航控制器和子塔车协同行走控制器处理后得到各塔车驱动轮的控制速度；经速度频率转换器转为变频电机的控制工作频率，并以控制指令形式发送给塔车节点控制器。塔车节点控制器通过控制变频器的输出频率调节电机的转速，进而调节驱动轮的运动速度，实现多塔车协同导航控制。

4　试验验证

4.1　试验样机研制

本文研制了多塔车协同导航控制大型平移式喷灌机试验样机，如图 9 所示，主要包含喷灌机本体及分布式级联协同导航控制系统（控制主机、塔车节点控制器和塔车驱动器等）。喷灌机样机参数见表 2。与市场上销售的 DPP 系列喷灌机不同，试验样机由变频电机驱动，每个塔车均安装有 RTK 定位模块、含变频驱动的分布式节点控制器，可实时获得塔车位姿数据并对变频电机工作频率进行调节。

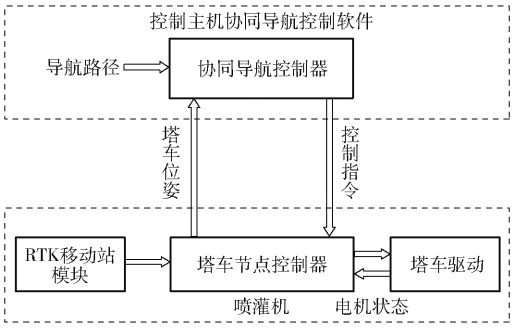


图 8　系统结构示意图

Fig. 8　Schematic of system structure

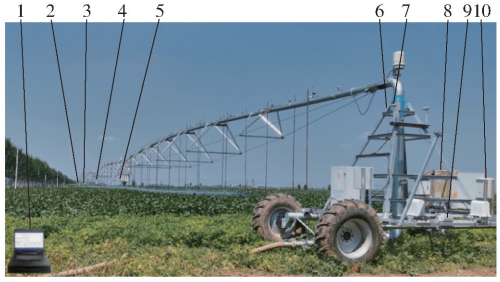


图 9　大型喷灌机试验样机

Fig. 9　Test prototype of large sprinkler irrigation machine

1. 控制主机　2. 子塔车 4 节点控制器　3. 子塔车 3 节点控制器　4. 子塔车 2 节点控制器　5. 子塔车 1 节点控制器　6. 卫星天线　7. 4G 天线　8. 主塔车节点控制器　9. 变频电机　10. 变频器

表 2　大型平移式喷灌机样机参数

Tab. 2　Prototype parameters of large translational sprinkler irrigation machine

参数	数值
整机长度/m	200
塔车数量	1（主塔车）、4（子塔车）
塔车间距/m	50
塔车前后轮距/m	4.1
主塔车左右轮距/m	2.9
轮胎直径/m	1.2

4.2　试验结果分析

协同导航控制试验于 2020 年 10 月 19—24 日在河南省许昌市试验田中进行，试验地块为正常的旱地地块，未对机行道进行平整和硬化处理，如图 10 所示。

导航过程中，系统的导航路径通过设定点 A、B 的 GPS 经纬度坐标获得；初始状态时，喷灌机桁架方向调整到近似与行驶方向垂直的位置，启动导航控制系统，大型喷灌机各塔车沿预定路径进行协同导航行走，各塔车的真实行走轨迹由安装在各塔车



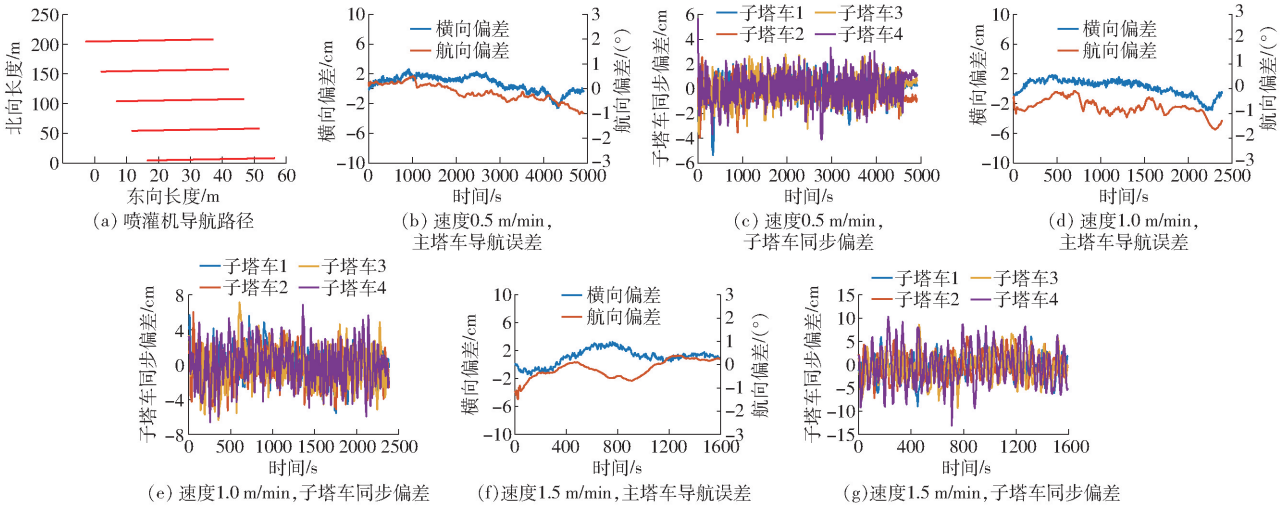
图 10 试验现场

Fig. 10 Test site

节点控制器中的 RTK 移动站模块采集。经过多次试验调试,设定 $K_l=0.48$,$K_\theta=0.86$,$K_p=15$,$K_i=2.5$。

喷灌机以低速(0.5 m/min)、中速(1.0 m/min)、高速(1.5 m/min)在 AB 之间定速行驶 40 m 进行多塔车协同导航试验,试验结果如图 11 所示。

对试验结果进行统计分析,主塔车横向偏差、航向偏差以及各子塔车的同步偏差的平均绝对偏差、最大偏差、标准差表示协同导航控制效果,统计分析结果如表 3 所示。



(a) 喷灌机导航路径 (b) 速度0.5 m/min,主塔车导航误差 (c) 速度0.5 m/min,子塔车同步偏差 (d) 速度1.0 m/min,主塔车导航误差

(e) 速度1.0 m/min,子塔车同步偏差 (f) 速度1.5 m/min,主塔车导航误差 (g) 速度1.5 m/min,子塔车同步偏差

图 11 不同速度下的试验结果

Fig. 11 Test results at different speeds

表 3 试验结果

Tab. 3 Test results

参数	0.5 m/min			1.0 m/min			1.5 m/min		
	平均绝对值	最大值	标准差	平均绝对值	最大值	标准差	平均绝对值	最大值	标准差
主塔车横向偏差/cm	1.09	2.65	1.07	0.91	2.92	1.06	1.40	3.26	1.14
主塔车航向偏差/(°)	0.32	1.03	0.35	0.74	1.65	0.33	0.35	1.49	0.39
子塔车 1 同步偏差/cm	0.69	5.37	0.94	1.40	5.69	1.81	1.93	8.95	2.46
子塔车 2 同步偏差/cm	0.65	3.97	0.84	1.49	6.02	1.84	2.04	7.15	2.48
子塔车 3 同步偏差/cm	0.79	3.67	0.99	1.71	7.15	2.15	2.54	9.3	3.13
子塔车 4 同步偏差/cm	0.95	5.66	1.20	1.91	6.87	2.37	3.47	13.07	4.20

由图 11 和表 3 可知,在不同行走速度条件下,主塔车最大横向偏差为 3.26 cm,平均绝对偏差不超过 1.40 cm;主塔车最大航向偏差为 1.65°,平均绝对偏差不超过 0.74°;各子塔车最大同步偏差为 13.07 cm,平均绝对偏差不超过 3.47 cm。由于变频器输出频率随时间线性改变,随着导航速度的增加,各塔车进行速度调节达到设定速度的时间增加;并且控制系统中,协同导航控制算法无与速度相适应的变量,因此喷灌机的导航偏差和同步偏差呈增大趋势。但总体上看,协同导航控制系统能够有效地消除导航偏差和同步偏差,保证喷灌机按导航路径协同同步行走,这表明导航控制系统能够满足大型喷灌机多塔车协同作业的要求。

5 结论

(1)在大型平移式喷灌机运动学模型的基础上,提出了一种分布式级联协同导航控制方法,该方法解决了大型平移式喷灌机路径导航以及多塔车同步行走问题。

(2)在不同导航速度下,通过田间试验验证了协同导航控制系统及控制方法的控制效果及稳定性。不同速度下,主塔车最大横向偏差为 3.26 cm,平均绝对偏差不超过 1.40 cm;主塔车最大航向偏差为 1.65°,平均绝对偏差不超过 0.74°;各子塔车最大同步偏差为 13.07 cm,平均绝对偏差不超过 3.47 cm。协同导航控制系统的控制精度和稳定性满足田间喷灌作业要求。

参 考 文 献

[1] 赵伟霞,李久生,栗岩峰. 大型喷灌机变量灌溉技术研究进展[J]. 农业工程学报,2016,32(13):1 - 7.
ZHAO Weixia,LI Jiusheng, LI Yanfeng. Review on variable rate irrigation with continuously moving sprinkler machines[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(13):1 - 7. (in Chinese)

[2] 何建强. 圆形和平移式喷灌机行走装置的力学性能研究[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院, 2003.
HE Jianqiang. Study on mechanical properties of walking device of center pivot and linear irrigation systems[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2003. (in Chinese)

[3] 严海军. 基于变量技术的圆形和平移式喷灌机水量分布特性的研究[D]. 北京:中国农业大学, 2005.
YAN Haijun. Study on water distribution uniformity of center pivot and lateral move irrigation systems based on variable rate technology[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)

[4] KING B A, WALL R W, KINCAID D C, et al. Field testing of a variable rate sprinkler and control system for site-specific water and nutrient application[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2005, 21(5): 847 - 853.

[5] EVETT S R, O'SHAUGHNESSY S A, ANDRADE M A, et al. Theory and development of a VRI decision dupport system: the USDA - ARS ISSCADA approach[J]. Transactions of the ASABE, 2020, 63(5):1507 - 1519.

[6] 张漫,季宇寒,李世超,等. 农业机械导航技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(4):1 - 18.
ZHANG Man, JI Yuhan, LI Shichao, et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 1 - 18. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20200401&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.001. (in Chinese)

[7] LENAIN R, THUILOT B, CARIOU C, et al. High accuracy path tracking for vehicle in presence of sliding: application to farm vehicles automatic guidance for agricultural task[J]. Autonomous Robots, 2006, 21(1):79 - 97.

[8] DEREMETZ M, LENAIN R, THUILOT B. Path tracking of a two-wheel steering mobile robot: an accurate and robust multi-model off-road steering strategy[C]// ICRA, 2018:3037 - 3044.

[9] LENAIN R, NIZARD A, DEREMETZ M,et al. Controlling off-road bi-steerable mobile robots: an adaptive multi-control laws strategy[C]//International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. Springer, Cham, 2018: 344 - 363.

[10] 魏爽,李世超,张漫,等. 基于 GNSS 的农机自动导航路径搜索及转向控制[J]. 农业工程学报,2017,33(增刊 1):70 - 77.
WEI Shuang, LI Shichao, ZHANG Man,et al. Automatic navigation path search and turning control of agricultural machinery based on GNSS[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(Supp.1):70 - 77. (in Chinese)

[11] 熊斌,张俊雄,曲峰,等. 基于 BDS 的果园施药机自动导航控制系统[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(2):45 - 50.
XIONG Bin, ZHANG Junxiong, QU Feng, et al. Navigation control system for orchard spraying machine based on Beidou navigation system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(2):45 - 50. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170206&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.006. (in Chinese)

[12] 刘兆朋,张智刚,罗锡文,等. 雷沃 ZP9500 高地隙喷雾机的 GNSS 自动导航作业系统设计[J]. 农业工程学报,2018,34(1):15 - 21.
LIU Zhaopeng,ZHANG Zhigang, LUO Xiwen,et al. Design of automatic navigation operation system for Lovol ZP9500 high clearance boom sprayer based on GNSS[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(1):15 - 21. (in Chinese)

[13] 孙意凡,孙建桐,赵然,等. 果实采摘机器人设计与导航系统性能分析[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(增刊):8 - 14.
SUN Yifan,SUN Jiantong,ZHAO Ran,et al. Design and system performance analysis of fruit picking robot[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(Supp.):8 - 14. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2019s002&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.002. (in Chinese)

[14] BARKER L J. GPS-based control system and method for controlling mechanized irrigation systems: U.S. Patent 6,928,339[P]. 2005 - 08 - 09.

[15] BARKER L J. GPS guidance system for linear move irrigation apparatus: US, US20070001035 A1[P]. 2007 - 01 - 04.

[16] MOELLER M, THATCHER T A. System and method for cascading alignment of independent drive systems: U.S. Patent 10,939,627[P]. 2021 - 03 - 09.

[17] SEGAL V G, Chapman J A. Corner irrigation system including a GPS guidance system: U.S. Patent 6,095,439[P]. 2000 - 08 - 01.

[18] 张小超, 王一鸣, 汪友祥,等. GPS 技术在大型喷灌机变量控制中的应用[J]. 农业机械学报, 2004, 35(6):102 - 105,123.
ZHANG Xiaochao,WANG Yiming,WANG Youxiang,et al. Application and study on GPS technology for irrigation system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(6):102 - 105,123. (in Chinese)

[19] 张银桥, 赵博, 张小超,等. 喷灌机自动作业控制系统[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6):27 - 31.
ZHANG Yinqiao, ZHAO Bo, ZHANG Xiaochao,et al. Irrigator automatic operation control system[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6):27 - 31. (in Chinese)

(下转第 174 页)