

北斗卫星导航系统在大型喷灌机行走中的应用

薛 雁, 黄 乾, 孙文浩

(山东省水利科学研究院, 山东 济南 250014)

【摘 要】北斗卫星导航系统凭借高精度定位与强抗干扰能力,为解决大型喷灌机作业效率与定位精度的矛盾提供了新的解决方案。文章阐述了北斗卫星导航系统的技术优势及定位方法,对比了多种定位技术的优缺点与适用场景。研究表明,北斗系统应用于大型喷灌机作业具有可行性与有效性,但是在实际应用中仍面临复杂地形与极端天气的挑战,存在覆盖不足、成本高昂、漂移明显等局限性。未来,应致力于解决当前技术中的瓶颈问题,进一步优化算法,使北斗卫星定位在智慧农业领域得到更多的应用。

【关键词】北斗卫星导航系统;大型喷灌机;卫星定位;农业灌溉;智慧农业

【中图分类号】S274

【文献标志码】A

【文章编号】1009-6159(2026)-07-0064-04

Application of BeiDou Navigation Satellite System in the Travel Control of Large Center Pivot Irrigators

XUE Yan, HUANG Qian, SUN Wenhao

(Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract: Featuring high-precision positioning and strong anti-interference capability, the BeiDou Navigation Satellite System (BDS) offers a new solution to resolve the conflict between operation efficiency and positioning accuracy of large center pivot irrigators. This paper introduces the technical advantages and positioning methods of BDS, and compares the merits, demerits and applicable scenarios of various positioning technologies. The research verifies the feasibility and effectiveness of applying BDS to large center pivot irrigators. Nevertheless, practical application still faces challenges brought by complex terrain and extreme weather, along with limitations such as insufficient signal coverage, high costs and obvious positioning drift. In the future, efforts should be made to tackle existing technical bottlenecks, further optimize algorithms, facilitate BeiDou satellite positioning's, wider application in smart agriculture.

Key words: BeiDou Navigation Satellite System; Large center pivot irrigator; Satellite positioning; Agricultural irrigation; Smart agriculture

当前,精准灌溉技术已成为提升农业水资源利用效率的关键突破口。应用北斗卫星导航系统的高精度定位技术,赋能大型喷灌机自动化控制,有利于推动精准灌溉技术发展。大型喷灌机的传统定位方式主要包括沟渠导向、钢索导向、地磁导向、角钢导向系统、手动标定配合机械制动和同步控制系统(塔盒控制),在高速作业时,定位偏差将导致灌溉不均。而北斗卫星导航系统特有的抗多路径干扰能力,可有效解决农田复杂环境下的信号漂移。通过融合北斗高精度定位与喷灌机控制系统,能够有效提高农业生产效率和

资源利用率。

1 北斗卫星导航系统概述

2020年,北斗卫星导航系统实现了全球定位服务,打破了GPS定位在全球范围内的垄断地位,推动了我国信息技术革新。目前,北斗卫星导航系统的主要定位方法有单点定位法、伪距定位、载波相位差分定位、广域差分定位、局域差分定位及惯性导航融合定位。

收稿日期:2026-04-23

作者简介:薛雁(1981—),女,高级工程师

1.1 单点定位

单点定位是北斗导航系统中最基础的定位模式,独立性强、设备成本低,但是定位精度受环境影响大,无法消除系统误差。适合手机导航、车载导航等普通消费级定位,以及在偏远无网络覆盖的地方使用。

1.2 伪距定位

伪距定位法是通过测量用户接收机到北斗卫星的伪距来解算三维坐标,单颗卫星即可生成伪距值,不直接输出位置,观测简单。伪距定位不能消除卫星时钟误差、电离层延迟等系统性误差,精度低,可用于辅助定位或误差分析的基础数据采集。

1.3 载波相位差分定位

载波相位差分定位是基准站发送载波相位观测值及坐标,用户终端通过“模糊度解算”后获取位置信息,定位精度远高于伪距定位。未修正时精度约为米级,通过差分技术可实现厘米级甚至毫米级定位。适用于高精度测绘、工程施工和农业精准作业等。

1.4 广域差分定位

广域差分是为了解决大范围、高精度定位需求而设计的核心技术,通过多个覆盖数百至数千公里的广域基准站,计算卫星轨道误差、时钟误差,获得电离层模型,通过地球同步卫星播发差分信息,适用于航空、航海等大范围移动导航。

1.5 局域差分定位

局域差分是一种通过在局部区域内部署多个基准站,综合生成误差修正信息以提高用户定位精度的增强技术。精度达到亚米级至厘米级,适用于局部区域的高精度定位。

1.6 惯性导航融合定位

惯性导航融合定位将北斗定位与惯性导航系统结合,利用北斗卫星的绝对位置信息修正惯性导航的累积误差,同时通过惯性导航在卫星信号丢失时维持定位连续性,形成“动态互补”。这种定位方式硬件成本高、算法复杂,适用于军事、航空航天等对定位可靠性要求极高的场景。

2 大型喷灌机导航需求与挑战

2.1 核心导航需求

一是路径跟踪精度要求高,避免灌溉重叠或

遗漏;二是要控制多塔架行走速度差,防止机身扭曲;三是要具有动态适应性,能够应对地面坡度、风速等环境变化,确保定位连续稳定。

2.2 主要导航挑战

一是地形适配度高。大型喷灌机在坡度大于 10° 的丘陵地块易出现偏航、打滑,且卫星信号易受山体遮挡,可视卫星数可能不足4颗,导致定位精度骤降。二是动态干扰影响大。农田阵风、农机振动会干扰定位设备稳定性,传统算法难以实时修正动态误差,路径偏移量易随作业时间累积。三是效率精度平衡难度大。喷灌机行走速度提升虽能提高作业效率,但传统定位技术在高速行驶(速度高于 0.5 m/s)时精度会下降 $30\%\sim 50\%$,两者难以兼顾。

2.3 与传统导向方式对比

传统导向方式存在明显不足:沟渠导向会破坏土壤结构,坡度适配性差且需频繁维护;钢索导向的建设与维护成本高,且易因张力变化导致定位误差;地磁导向易受周边环境干扰,误差达 $0.3\sim 0.8\text{ m}$;手动标定依赖人工,成本高且漏灌、过灌率超 15% ,难以满足精准灌溉需求。这些传统方式的应用局限,凸显了北斗卫星导航技术在高精度定位、高可靠性、强适应性等方面与大型喷灌机的作业需求高度匹配,能够有效解决传统喷灌机作业中定位不准、自动化程度低、作业效率差等问题。

3 应用模式与案例

笔者所在的大型喷灌装备关键技术研发与应用课题组在位于华泰保尔水务农业装备工程有限公司(下简称华泰保尔公司)生产厂区北侧的试验场地进行了基于北斗卫星导航系统的大型喷灌机灌溉定位精度、灌溉均匀度和节水率的试验。

3.1 试验场地简介

项目试验场地呈长方形,如图1所示,为东西走向,长 250 m ,宽 100 m ,占地面积约 2.5 hm^2 ,种植作物为小麦、玉米。目前现场配备有指针式喷灌机1台(型号为DYP-191,由3跨组成,具体配置为 $54\text{ m}+2\times 59.8\text{ m}+17.6\text{ m}$)、平移式喷灌机1台(型号为DPP-84,由2跨组成,具体配置为 $2\times 42.3\text{ m}$)。



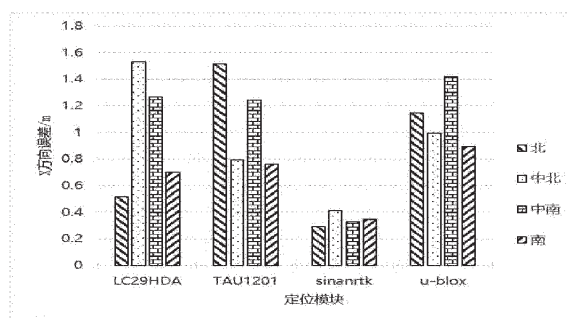
图1 试验场地鸟瞰图

3.2 定位精度对比试验

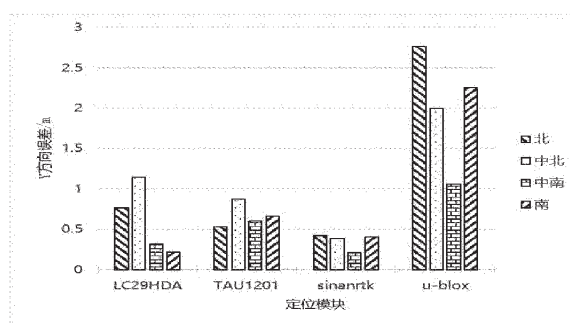
课题组选择多模双频(LC29HDA)、多模单频(U-blox)、多模双频(TAU1201)和司南北斗导航系统差分定位模式(sinanrtk)4个定位模块开展了定位精度对比试验。其中北斗卫星导航系统的基准站固定在试验区西北角,负责接收北斗卫星信号并提供差分修正数据;指针式喷灌机将移动站放在第三跨末端,平移式喷灌机移动站放在第一跨首端,用于实时采集对应部位的位置、航向信息,为整机定位和姿态判断提供数据支撑。

在相同喷灌机平台和相同作业环境下进行同步测试。受试验场地限制,指针机行走角度为 45° ,将定位模块放在第三跨末端进行对比试验。行走过程中,在 15° 和 30° 时各暂停5 min。平移机将定位模块放在第一跨首端进行对比试验,平移机行走距离为42 m。行走过程中,在14 m和28 m时各暂停5 min。连同开始前和结束后共4个静止状态,相应位置命名为北、中北、中南、南,分别记录定位结果(包括X、Y方向的数据)。同时,在4个点位处使用RTK进行测量,并将该测量结果作为真值,进行误差计算。得出的误差计算结果如图2所示。

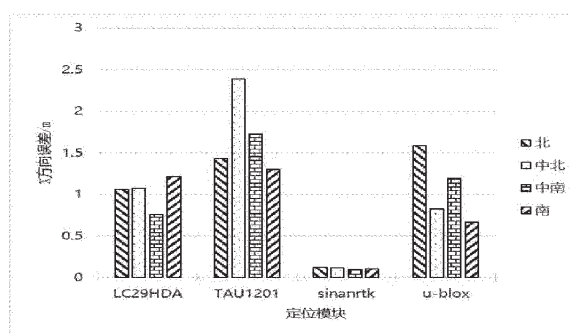
分析图2可知,指针式喷灌机中4种定位模块中误差最小的是sinanrtk,X、Y方向的误差从大到小排序均为U-blox、TAU1201、LC29HDA、sinanrtk。北斗卫星导航系统差分定位模式的定位精度较其它3种模块能够提升88.41%~98.73%。平移式喷灌机中4种定位模块误差最小的是sinanrtk,X方向的误差从大到小排序依次为TAU1201、U-blox、LC29HDA、sinanrtk,Y方向的误差从大到小排序依次为U-blox、LC29HDA、TAU1201、sinanrtk。北斗卫星导航系统差分定位模式的定位精度



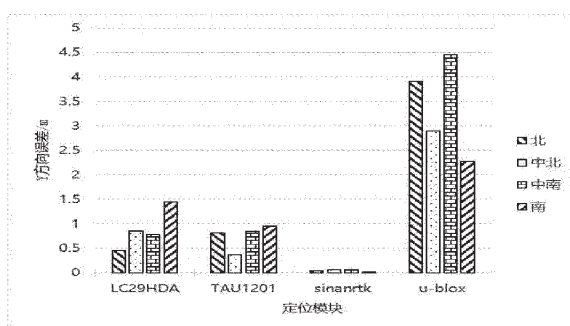
(a) 指针式喷灌机 X 方向误差柱状图



(b) 指针式喷灌机 Y 方向误差柱状图



(c) 平移式喷灌机 X 方向误差柱状图



(d) 平移式喷灌机 Y 方向误差柱状图

图2 各定位模块定位误差结果统计图

较其它3种模块提升40.78%~81.24%。

3.3 灌溉均匀度改善试验

2018年腾飞TM在北京市对半固定式喷灌设备和圆形喷灌机应用效果进行分析。结果表明,半固定式喷灌设备喷灌均匀度为86.8%,圆形喷灌

机喷灌均匀度为 92.3%。2018 年中国农业大学严海军^[2]与中农智冠(北京)科技有限公司联合开发了一套基于北斗技术的圆形喷灌机尾枪定位系统。从多次田间喷灌施肥均匀性试验结果来看,相比于一般圆形喷灌机灌溉系统,不仅有效扩大了地块四角的灌溉面积,而且实现了高均匀度的灌溉施肥。课题组为进一步解决指针式喷灌机灌溉方形田块出现四角漏喷的问题^[3],采用华泰保尔公司生产的指针式喷灌机,选用美国 XCAD 公司的 AXIS-II 型旋转阻尼式喷头和奥地利 Komet 公司的 Twin101 plus 型垂直摇臂式喷头,开展了指针式喷灌机两种尾枪在单独和组合工作时,不同喷嘴直径和工作压力组合工况下的尾枪灌溉区域径向及环向水量分布特性试验。结果表明,通过合理优化喷嘴直径和工作压力组合,尾枪组合工作时的径向均匀系数可提高至 79.4%,环向均匀系数最高可达 89.0%。对于整机长度相近的两跨加悬臂指针式喷灌机而言,两种尾枪组合工作的最优方案为 AXIS-II 型尾枪选用 15 mm 直径喷嘴和 200 kPa 工作压力,而 Twin101 plus 型尾枪则选用 20 mm 直径喷嘴和 300 kPa 工作压力。研究结果可为指针式喷灌机的尾枪优化选型和整机灌溉性能提升提供技术支撑。

3.4 节水率试验

课题组对华泰保尔公司试验区内配备了安装有北斗导航系统的指针式喷灌机或平移式喷灌机的地块与附近农户管道灌溉农田 3 种条件下,小麦、玉米的单位面积年灌溉水量进行了对比,其中指针式喷灌机灌溉面积 1.435 hm²,平移式喷灌机灌溉面积 0.846 hm²,得到的结果见表 1。

表 1 不同灌溉方式下年灌溉水量统计表

作物种类	灌溉方式	年灌溉水量/(m ³ ·(hm ²) ⁻¹)	节水率/%
小麦、玉米	管道灌溉	3 719.40	/
	指针式喷灌机灌溉	2 248.65	39.54%
	平移式喷灌机灌溉	1 402.40	35.41%

4 潜在问题

一是技术环境适配问题。大型喷灌机信号易受干扰与遮挡,大田作业产生的大量扬尘会堆积在喷灌机的测感仪器端,影响定位相关的测感效果,造成轨迹行走错误。二是成本与维护问题。单一北斗卫星信号接收机难以实现各桁架及喷头的

精准定位与姿态监测,若安装多个北斗设备虽能改善该问题,但会大幅增加设备成本,且多设备数据融合时易出现协同误差,进一步影响灌溉均匀性。三是喷灌机行走速度不均问题。北斗卫星导航虽能规划行走路径,但在喷灌机实际作业中可能出现行走速度不均的问题。北斗卫星定位的偏差会导致直接导致喷灌机漏灌或重灌,导致水资源浪费。

5 应用挑战与技术展望

5.1 复杂地形下的定位稳定性挑战

在复杂地形下,由于地形遮挡导致北斗可视卫星数不足,喷灌机的定位误差远超平原地区;在丘陵地区,山体反射造成多路径效应,测量结果易产生伪距测量误差,还会提高载波相位观测值的噪声水平,加剧定位漂移。当前技术方案大多针对平整大田设计,针对不规则地块、零散农田、山地梯田等非标准化作业场景的适配算法较少。

5.2 设备部署成本高,后期维护难度大

想要实现喷灌机全桁架、喷头组的精准定位与姿态监测,需加装多组定位模块。这样虽能提升定位监测的全面性,但会显著增加硬件采购成本。同时,多终端同步工作时,数据融合、时间同步难度较高,易产生协同误差,影响喷灌机行走控制。同时,喷灌机长期在露天、多粉尘、高湿度环境下工作,定位设备故障率升高,进一步拉高了日常运维成本。

5.3 展望

未来,应聚焦算法优化与技术融合,推动北斗定位与物联网、边缘计算等技术的深度融合,通过提升多频信号抗干扰能力、完善地基增强网络,提高其定位精度和稳定性。同时,要进一步拓展北斗卫星定位系统在智慧农业领域的应用,为农业节水提供新的技术方案。

参考文献

[1] 滕飞,熊波,张莉,等.北京市不同类型喷灌设备应用效果试验[J].农业工程,2018,8(2):74-76.
[2] 严海军,王春晔,李茂娜.北斗定位系统在大型喷灌机精准水肥管理的应用[J].农业信息化,2018,38(18):93-96.
[3] 祝凌,惠鑫,严海军,等.圆形喷灌机不同尾枪组合的水量分布特性及优化[J].农业工程学报,2025,41(6):42-51.

课题项目:山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目“大型喷灌装备关键技术研发与应用”,编号 2022CXGC020707

(责任编辑 崔亚男)