

无沟铺管机北斗导航控制系统设计与试验

王吉中, 赵 博*, 赵士猛, 邢高勇, 伟利国, 胡小安

(中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘 要: 针对因田间土壤质地不均匀或表面高低不平, 无沟铺管机出现行驶偏摆而导致管道铺设弯曲的问题, 设计了基于载波相位差分技术的北斗定位系统 (Real Time Kinematic-BeiDou Navigation Satellite System, RTK-BDS) 的导航控制系统。采用多模态控制策略, 通过传感器检测无沟铺管机工作时的左、右行走马达速度, 车辆实际平均车速, 发动机功率和两侧行走泵的压力等状态参数, 并输入到后向反馈 (Back Propagation, BP) 神经网络, 预测铺管机当前状态分类, 使用选择器选择模态控制参数, 采用自适应比例-积分-微分 (Proportion-Integral-Differential, PID) 控制算法进行导航控制。经过田间试验, 获取铺管机的模态控制参数和 BP 神经网络训练样本。导航控制系统上线试验结果表明, 导航控制横向超调量为 4.58 cm, 最大横向误差在 ± 4 cm 范围内, 平均横向误差在 ± 1.5 cm 范围内, 能够满足铺管机直线性作业要求。

关键词: 导航; 控制系统; BP 神经网络; 多模态控制; 自适应 PID 控制; 无沟铺管机

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.09.006

中图分类号: S24

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-09-0047-08

王吉中, 赵 博, 赵士猛, 等. 无沟铺管机北斗导航控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 47-54.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.09.006 <http://www.tcsae.org>

Wang Jizhong, Zhao Bo, Zhao Shimeng, et al. Design and test of the BDS navigation system for trenchless pipe laying machines[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(9): 47-54. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.09.006 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

农田暗管排水系统利用人为埋入地下的孔管排出土壤中多余水分与盐渍^[1-2], 具有防涝、控盐、节水节地、改善生态条件等多重功能^[3]。其中, 暗管铺设直线性^[4]关乎系统的工作性能、工程寿命和可维护性, 乃至系统运行的经济效益^[5]。传统方法通过人工瞄准标桩控制铺管直线性^[6-7], 不仅抬高了经验和技术门槛、耗费工人精力, 而且精度很难保证。近年来, 通过铺管机自动控制系统调节左右轮速实现直线性控制, 但仅适用于土壤质地均匀、附着条件良好的平整地表^[7]。因此, 亟需开发自动化程度高、环境适应性好且符合铺管直线性要求的铺管机导航系统, 以满足实际工程需要。

目前, 激光导航、视觉导航和卫星定位导航等技术已应用至农机领域^[8-10]。其中, 卫星定位导航使用便利、性能稳定且无需参照物, 尤其适合农田暗管排水系统大面积施工场景。近年来, Han 等^[11]基于 GNSS、RTK 和运动传感器开发出一套低成本的履带车辆自动驾驶系统, 并提出一种多传感器数据融合算法。试验表明, 路径跟随均方根误差小于 9 cm, 最大误差小于 30 cm。Takai 等^[12]基于 RTK-GPS 和惯性传感器, 采用自适应控制算法, 实现履带拖拉机自主导航。试验表明, 横向误差的

均方根小于 5 cm。伟利国等^[13-14]通过融合 GPS 定位信息、姿态信息和行走速度检测运行轨迹, 采用模糊控制方法实现开沟铺管机导航, 试验表明, 直线跟踪误差不超过 10 cm。宋彦等^[15]提出一种基于启发式动态规划算法的路径跟随控制方法, 并设计出一种适用于履带式机器人的路径跟随控制系统。试验表明, 算法的直线跟踪平均误差绝对值为 4 cm、均方根误差为 6 cm。丁幼春等^[16]基于免疫比例-积分-微分 (Proportion-Integral-Differential, PID) 控制算法设计出一种适用于履带车辆的导航控制器, 田间试验表明, 作业速度为 0.5 m/s 时, 直线跟踪平均绝对偏差为 5.8 cm, 最大偏差为 15.2 cm。上述研究表明, 履带式农机自动导航系统较少, 且现有研究多以小型装备为主, 缺乏针对大型履带农机装备自动导航技术的研究。

本研究基于载波相位差分技术的北斗定位系统 (Real Time Kinematic-BeiDou Navigation Satellite System, RTK-BDS) 实时获取铺管机定位和航向信息, 采用后向反馈 (Back Propagation, BP) 神经网络预测当前行驶状态, 然后选择器依据预测结果确定控制参数, 并通过自适应 PID 控制算法实现履带式无沟铺管机导航控制, 以满足铺管直线性需求。

1 无沟铺管机系统构成及原理

1.1 整机结构与原理

本研究基于中国农业机械化科学研究院研制的 PV1509HT 型 V 形犁式无沟铺管机 (如图 1)。作业时, 使用 V 形犁体切开土壤, 并掀起一个三角形土堡, 柔性波纹管经犁体内的导管进送至土堡底部, 从而完成管

收稿日期: 2021-03-12 修订日期: 2021-04-30

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2016YFC0501305)

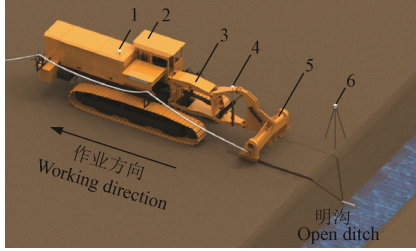
作者简介: 王吉中, 博士生, 研究方向为智能化装备及相关技术。

Email: 780227311@qq.com

*通信作者: 赵博, 研究员, 博士生导师, 研究方向为图像处理和机械设计。

Email: zhaoboshi@126.com

道铺设。为了保证 V 形犁正常作业, 需要机器提供较大的牵引力。但由于田间土壤存在松软差异和高低不平, 势必导致车辆行驶偏摆, 进而影响管道铺设的直线性。因此, 迫切需要为机器设计导航控制系统, 以保证铺管作业质量。



1. 导航移动站 2. 主机 3. 悬挂架 4. 高程控制移动站 5. 犁体 6. 基站
1. Mobile station for navigation 2. Tractor 3. Hitch 4. Mobile station for level control 5. Plow body 6. Base Station

图 1 PV1509HT 型 V 形无沟铺管机

Fig.1 PV1509HT V-plow drain-pipe installation machine

1.2 导航控制系统

该机采用双泵双回路全液压驱动的履带行驶系统, 其导航控制原理如图 2 所示。机载控制器读取 RTK-BDS 和各传感器的工况信息, 并依据暗管施工设置, 通过脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 波控制比例阀调节左、右行走泵排量大小, 进而改变左、右行走马达转速, 实现导航控制。

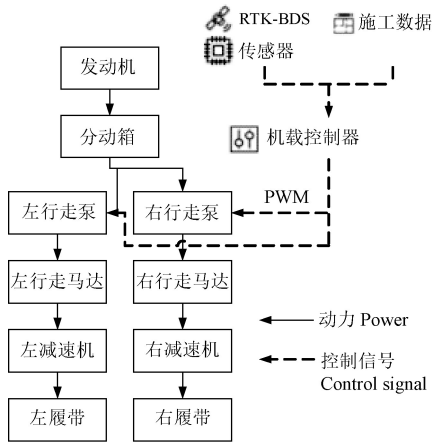


图 2 导航控制系统

Fig.2 Navigation control system

2 无沟铺管机数学模型

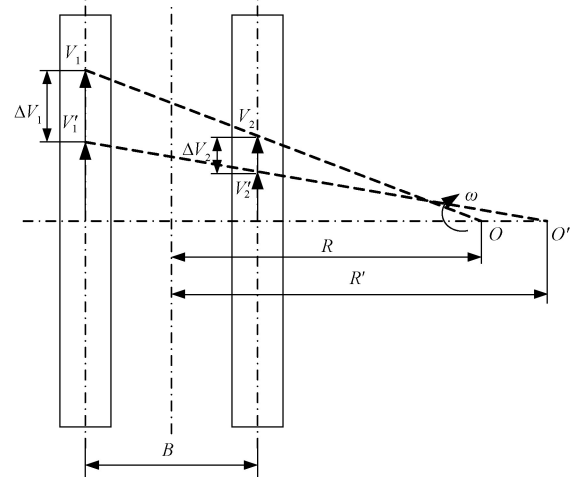
2.1 履带转向运动学模型

在水平地面上, 铺管机稳定转向行驶^[17-19]如图 3 所示, 点 O 为整机的转向瞬心, 从 O 点到履带纵向对称平面的距离 R 为转向半径。机器任意一点至点 O 的距离乘以角速度 ω , 即为该点的绝对速度, 因此两履带的绝对速度分别为

$$V_1 = \omega(R + 0.5B) \quad (1)$$

$$V_2 = \omega(R - 0.5B) \quad (2)$$

式中 B 为履带轨距, m; V_1 为外侧履带绝对速度, m/s; V_2 为内侧履带绝对速度, m/s。



注: O 为整机的转向瞬心; O' 为滑动后转向瞬心; B 为履带轨距, m; V_1 为外侧履带绝对速度, m·s⁻¹; V_2 为内侧履带绝对速度, m·s⁻¹; V_1' 为外侧履带滑转后绝对速度, m·s⁻¹; V_2' 为内侧履带滑转后绝对速度, m·s⁻¹; ΔV_1 为外侧履带滑转速度, m·s⁻¹; ΔV_2 为内侧履带滑转速度, m·s⁻¹; R 为转向半径, m; R' 为实际转向半径, m; ω 为角速度, rad·s⁻¹。

Note: O is the turning center of the whole machine; O' is the turning center after sliding; B is the track gauge, m; V_1 is the absolute speed of the outer crawler, m·s⁻¹; V_2 is the absolute speed of the inner crawler, m·s⁻¹; V_1' is the absolute speed of the outer crawler after sliding, m·s⁻¹; V_2' is the absolute speed of the inner crawler after sliding, m·s⁻¹; ΔV_1 is the speed of the outer crawler, m·s⁻¹; ΔV_2 is the speed of the inner crawler, m·s⁻¹; R is the turning radius, m; R' is the actual turning radius, m; ω is the angular velocity, rad·s⁻¹.

图 3 履带转向运动学模型

Fig.3 Turning kinetic model of track system

根据两侧履带的绝对速度可求得转向半径 R 为

$$R = \frac{B(V_1 + V_2)}{2(V_1 - V_2)} \quad (3)$$

单位时间内的偏航角度 θ 为

$$\theta = \frac{V_1 - V_2}{B} \quad (4)$$

实际情况中, 履带会发生滑转。引入滑转速度后, 求得内、外侧履带的绝对速度为

$$V_1' = V_1 - \Delta V_1 \quad (5)$$

$$V_2' = V_2 - \Delta V_2 \quad (6)$$

式中 V_1' 、 V_2' 为考虑滑转的外、内侧履带绝对速度, m/s; ΔV_1 、 ΔV_2 为外、内侧履带滑转速度, m/s。

此时, 可求得实际转向半径 R' 不再等于 R 。

$$R' = \frac{B(V_1 + V_2) - B(\Delta V_1 + \Delta V_2)}{2(V_1 - V_2) - 2(\Delta V_1 - \Delta V_2)} \quad (7)$$

所以, 受履带滑转的影响, 回转中心实际与点 O 并不重合。因此, 针对不同的滑转情况, 应采取不同的控制方式。

2.2 导航偏差模型

在控制铺管机导航行驶时, 首先判断机器与预设铺管参考线的相对位置, 再采取不同的策略控制车辆行驶, 图 4 显示了相对位置的 9 种情况。

预设用于确定参考线的两点 M 和 N 坐标分别为 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) , 其中 $x_1 \neq x_2$ 或 $y_1 \neq y_2$ 。如图 5 所示, 可求得参考线方程为

$$\frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \quad (8)$$

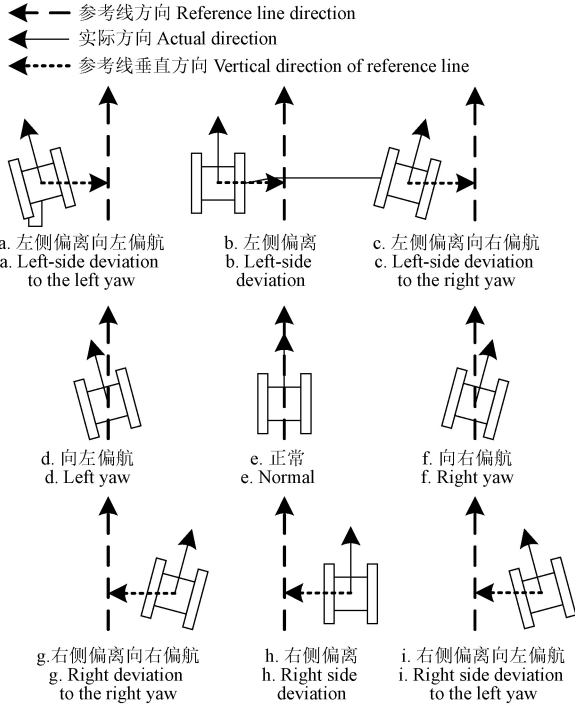


图4 铺管机与参考线相对位置

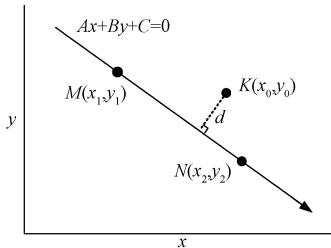
Fig.4 Relative positions between the pipe laying machine and reference line

由 RTK-BDS 可获得铺管机当前位置为 $K(x_0, y_0)$, 则铺管机与参考线的横向误差 d 为

$$d = \frac{|Ax_0 + By_0 + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (9)$$

其中

$$\begin{cases} A = y_2 - y_1 \\ B = x_1 - x_2 \\ C = x_2(y_1 - y_2) - y_2(x_1 - x_2) \end{cases} \quad (10)$$



注: M 为参考线第一确定点, N 为参考线第二确定点, K 为铺管机当前位置点。

Note: M is the first determined point of the reference line; N is the second determined point of the reference line; K is the current position of the pipelayer.

图5 横向误差 (d) 计算Fig.5 Calculation of lateral error d

假设以正北方向为起始方向, 沿逆时针旋转为正, 由图6可求得铺管参考线方向角 α ($0^\circ \leq \alpha < 360^\circ$) 为

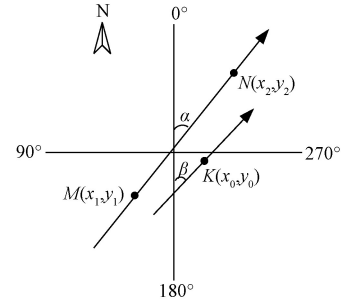
$$\alpha = \begin{cases} 0^\circ & x_1 = x_2, y_1 < y_2 \\ \alpha_0 & x_1 > x_2, y_1 < y_2 \\ 90^\circ & x_1 > x_2, y_1 = y_2 \\ 180^\circ & x_1 = x_2, y_1 > y_2 \\ 180^\circ + \alpha_0 & x_1 < x_2, y_1 > y_2 \\ 270^\circ & x_1 < x_2, y_1 = y_2 \end{cases} \quad (11)$$

其中

$$\alpha_0 = \arctan \left| \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} \right| \quad (0^\circ < \alpha_0 < 90^\circ) \quad (12)$$

由磁力计可实时获取铺管机的航向角 β , 则航向误差 $\Delta\theta$ 为

$$\Delta\theta = \beta - \alpha \quad (13)$$



注: α 为铺管参考线方向角, ($^\circ$); β 为铺管机的航向角, ($^\circ$)。

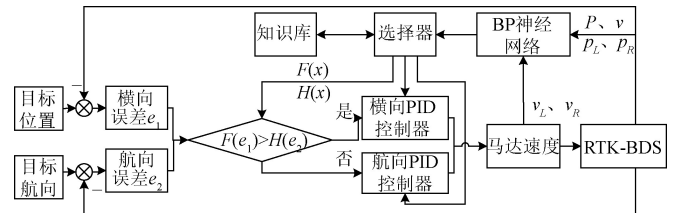
Note: α is the direction angle of the pipelaying reference line, ($^\circ$); β is the heading angle of the pipelayer, ($^\circ$).

图6 航向误差计算

Fig.6 Calculation of directional error

3 基于 BP 神经网络的导航控制系统

导航控制流程如图7, 预先通过试验获取模态分类和相应控制参数, 并存储在知识库内, 同时采用试验数据训练 BP 神经网络。导航控制时, 首先采用霍尔传感器检测左、右行走马达速度 v_L 、 v_R , 采用 RTK-BDS 获取铺管机绝对速度 v , 通过控制器局域网络 (Controller Area Network, CAN) 通信读取发动机功率 P , 采用压力传感器检测左、右行走泵的压力 p_L 、 p_R , 然后将上述参数值输入至 BP 神经网络, 并预测铺管机当前时刻的模态分类。根据神经网络的预测结果, 选择器从知识库中选择自适应函数 $F(x)$ 和 $H(x)$, 以及 PID 控制参数, 分别发送给自适应比较器和控制器。自适应比较器依据横向误差和航向误差, 通过自适应函数选择横向或航向控制器, 实现导航控制。



注: v_L 为左行走马达速度, $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$; v_R 为右行走马达速度, $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$; v 为车辆实际平均车速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; P 为发动机功率, kW ; p_L 为左侧行走泵压力, Pa ; p_R 为右侧行走泵压力, Pa 。下同。

Note: v_L is the speed of the left travel motor, $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$; v_R is the speed of the right travel motor, $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$; v is the actual average velocity of vehicle, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; P is the engine power, kW ; p_L is the left travel pump pressure, Pa ; p_R is the right travel pump pressure, Pa . The same below.

图7 导航控制流程图

Fig.7 Flow chart of navigation control

3.1 BP 神经网络设计

将铺管机的可控性分为 4 种模态, 每一模态对应知

识库中不同控制参数。通过 BP 神经网络预测模态,以适应复杂田间环境下的各种工况。BP 神经网络架构如图 8 所示。

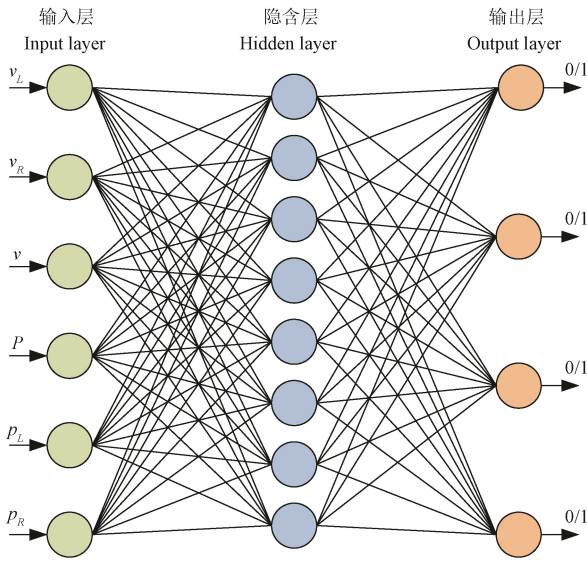


图 8 BP 神经网络架构
Fig.8 Framework of BP neural network

BP 神经网络由输入层、隐含层和输出层构成^[20]。其中,输入层设计有 6 个神经元,分别对应左行走马达速度 v_L 、右行走马达速度 v_R 、车辆实际平均车速 v 、发动机功率 P 和左、右侧行走泵压力 p_L 、 p_R 的输入。由于各输入变量的单位不一致且数值范围相差较大,提前依据最大最小原则^[21]进行归一化,即

$$L(\xi_{i,j}) = \frac{\xi_{i,j} - \xi_{i,\min}}{\xi_{i,\max} - \xi_{i,\min}} \quad (14)$$

式中 $\xi_{i,j}$ 为输入变量 i 的第 j 个值; $\xi_{i,\min}$ 为输入变量 i 的最小值; $\xi_{i,\max}$ 为输入变量 i 的最大值。

输出层包含 4 个神经元,分别对应 4 个控制模态。输出层中某神经元输出为 1 时,代表铺管机的可控性处于该模态,输出为 0 时代表可控性不处于该模态。

隐含层神经元个数可由式 (15)^[22]确定为 8 个。

$$n = \sqrt{n_1 + n_2} + a \quad 0 \leq a \leq 10 \quad (15)$$

式中 n 为隐含层神经元个数; n_1 为输入层神经元个数; n_2 为神经元个数; a 为可变系数。

输入层和隐含层中,每个神经元的激活函数均采用 tanh 函数

$$h(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (16)$$

由于输出层的输出值只有 0 和 1 两种,则输出层的激活函数采用 sigmoid 函数

$$S(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (17)$$

获得该神经网络的输出值后,使用概率最大阈值函数判断系统状态

$$f(x) = \begin{cases} 0 & |x| < \max \\ 1 & |x| \geq \max \end{cases} \quad (18)$$

式中 \max 为阈值分割系数,取输出层 4 个神经元输出值中的最大值。

3.2 自适应比较器设计

作业时,铺管机的犁体深入土壤,因此在导航控制时,机器转向角度不能过大,不然轻则影响犁体切割土垡,重则导致暗管折断。为保证在不影响犁体正常工作的同时,能够快速减小导航误差,设计了自适应比较器。

在获取到航向偏差和横向偏差后,自适应比较器使用自适应函数 $F(x)$ 和 $H(x)$,分别计算两个偏差的比较值。当航向偏差的比较值更大时,比较器命令控制器进行横向控制,否则进行航向控制。经过如此反复调整,可保证铺管机的航向偏差和横向偏差均逐渐减小,而不会出现瞬时转向角度过大的现象。

3.3 模态选择器设计

为了应对神经网络的预测结果中可能出现的模态重叠现象,即同时存在两个或两个以上模态,设计了模态选择器。

模态选择器包含知识库和选择器。知识库中存储着预先通过试验得到的 4 种控制模态参数,每一种模态参数包含有比较器的自适应函数和 PID 控制参数。

选择器依据神经网络预测的控制模态做出判断,再从知识库中调用相关模态的参数,并发送给控制器和比较器。选择器的选择规则为:若仅有 1 个模态预测结果,则选择该模态为当前模态;若有 2 个连续的预测结果,则选择控制难度更高的模态为当前模态;若有 2 种不连续的预测结果,则与上一时刻模态组合,选择 3 个模态的中间模态作为当前时刻的模态;如果有 3 个及以上预测结果,则保持前一时刻的模态。

4 田间试验

2020 年 12 月,在山东省德州市庆云县开展田间试验,采用 5 点取样法测试土壤的含水率平均值为 24.2%,坚实度平均值为 527.2 kPa。田间试验现场如图 9 所示。



图 9 田间试验现场
Fig.9 Scene of field test

4.1 铺管机模态控制试验

4.1.1 确定模态控制参数

为获取不同负载下的铺管机控制模态,在平整度偏差为 ± 2 cm 的地面上,铺管深度从 0 开始,每次增加 0.05 m。每组试验中,铺管机以 0.2 m/s 的速度行驶 10 m。

自试验开始起,一直采用满足作业要求的同一套参数实现导航控制,直到第24组试验(铺管深度1.2 m)时,横向误差大于0.04 m,此时记0~1.2 m过程中的控制参数为第一模态控制参数。保持1.2 m铺管深度,再次调整控制参数,直至满足作业要求,一直沿用至第30组试验(铺管深度1.5 m)时,横向误差再次大于0.04 m,此时记1.2~1.5 m过程中的控制参数为第二模态控制参数。按上述步骤继续试验,直到第36次,铺管深度为1.8 m时,铺管机原地滑转,地面行驶速度微乎其微,试验终止。最后得到1.5~1.65 m过程中的控制参数为第三模态控制参数;1.65~1.8 m过程中的控制参数为第四模态控制参数。

4.1.2 模态控制试验

使用4种模态控制参数对所有模态分别进行导航控制试验,横向误差结果如表1所示。

表1 模态控制横向误差
Table 1 Lateral error of modal control

| 模态参数 Modal parameters | 铺管深度 Depth/m | | | |
|-----------------------------|--------------|----------|-----------|-------|
| | 0~1.2 | >1.2~1.5 | >1.5~1.65 | >1.65 |
| 1 | ±3.2 | ±11.2 | U.C. | U.C. |
| 2 | ±6.2 | ±3.7 | ±30.5 | U.C. |
| 3 | U.C. | ±19.5 | ±3.8 | U.C. |
| 4 | U.C. | U.C. | U.C. | ±3.6 |

注:表中的U.C.表示不可控。

Note: The U.C. indicates uncontrollable in the table.

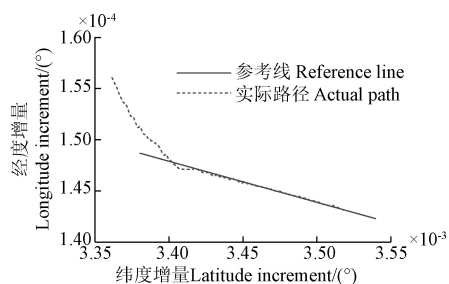
由表1可知,每种模态控制参数在各自模态下的横向误差均在±4 cm范围内,即每种模态控制参数都能够适应各自状态的控制。但是,在其他的作业深度分组时,误差超过±5 cm范围,甚至不可控。

4.2 BP神经网络样本采集

在确定控制模态参数的试验中,通过传感器采集,得到每个控制模态下铺管机的状态参数。在36组试验数据中,各随机选取100条试验数据,作为BP神经网络的训练集。

4.3 上线控制试验

铺管作业前,机器应到达预定的参考线上,即首先进行上线操作。上线过程中,犁体完全离开地面,即铺管深度为0,符合第一控制模态的工况,因此直接使用相应的控制参数实现导航,试验结果见图10。



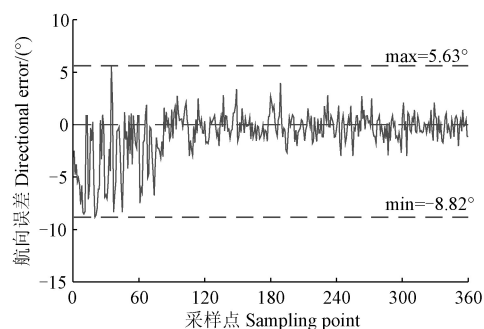
注:原点经纬度为东经117.573140°,北纬37.84335°。

Note: The longitude and latitude of the original point are 117.573140°E and 37.84335°N.

图10 上线控制轨迹图

Fig.10 Online control trajectory diagram

由图10可知,在一定的初始偏差下,铺管机逐渐靠近参考线,上线初期出现了一次超调,但之后与参考线的距离逐渐减小。上线期间的航向误差如图11所示,横向距离误差如图12所示。



注:横坐标为固定时间长的连续采样点数,采样频率为5 Hz。下同。

Note: The abscissa is the number of continuous sampling points for a fixed time, and the sampling frequency is 5 Hz. The same as below.

图11 上线航向误差

Fig.11 Direction error during on-line control

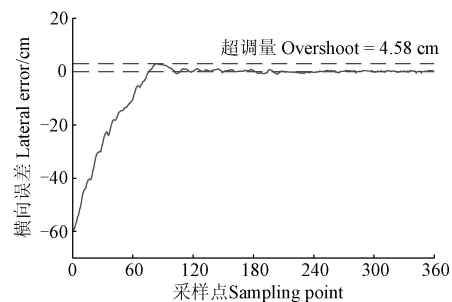


图12 上线横向误差

Fig.12 Lateral error during on-line control

由图11可知,在上线初期会不时地纠正铺管机航向,最大航向误差在±9°范围内。上线后,航向误差在±4°范围内。由图12可知,在控制初期,横向误差不断减小且减小的速度不断放缓,在出现4.58 cm的超调后,铺管机与参考线间横向误差的波动逐渐减小,最终稳定在±2.6 cm之内。

4.4 直线导航试验

在1.6 m的恒定铺管深度下,以0.2 m/s的铺管速度,沿预设铺管参考线作业,以验证导航控制的效果,航向误差和横向误差如图13和图14所示。

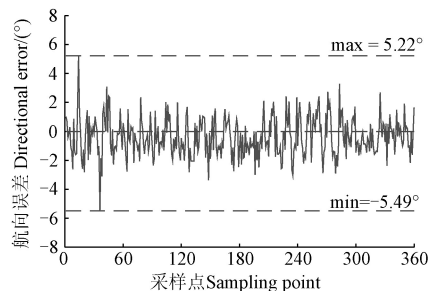


图13 线上控制航向误差

Fig.13 Direction error during working along reference line

图13和图14表明,航向误差在±5.5°之内,横向误差在±3 cm之内。航向和横向误差较大的情况虽偶有出

现,但在 96.2%的情况下,航向误差在 $\pm 3^\circ$ 之内;在 89.6%的情况下,横向导航误差在 ± 1 cm 之内。因此,该导航控制能够满足铺管机直线性作业要求。

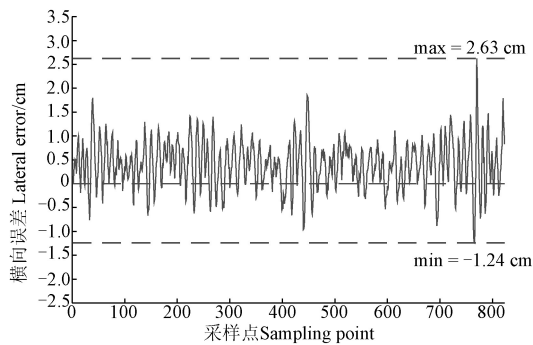


图 14 线上控制横向误差

Fig.14 Lateral error during working along reference line

4.5 工程应用试验

试验区域地面平整度偏差为 ± 10 cm,选取施工作业中最为常见的几种铺管深度,设置坡降比例为 3/10 000 (每 100 m 深度减小 3 cm),进行导航直线性控制试验,结果如表 2 所示。

表 2 无沟铺管机在不同铺管深度工况下试验结果

Table 2 Test results of the pipelayer under different initial depths

| 起始深度 Initial depth/m | 最大航向误差 Max directional error/(°) | 最大横向 误差 Max lateral error/cm | 平均航向 误差 Avg directional error/(°) | 平均横向 误差 Avg lateral error /cm |
|----------------------------|--|---------------------------------------|--|--|
| 1.20 | 5.64 | 2.64 | 2.61 | 0.54 |
| 1.25 | 5.55 | 2.57 | 2.54 | -0.41 |
| 1.30 | 5.71 | 2.85 | 2.67 | 0.85 |
| 1.35 | 5.84 | -2.74 | -0.62 | 0.14 |
| 1.40 | -6.05 | 3.08 | 1.65 | -0.35 |
| 1.45 | -6.14 | -3.45 | -2.94 | -0.27 |
| 1.50 | 6.47 | 3.44 | 2.88 | 1.11 |
| 1.55 | 6.35 | 3.55 | 3.37 | 1.08 |
| 1.60 | 6.57 | 3.68 | -3.44 | 1.39 |

由表 2 可知,航向误差控制在 $\pm 7^\circ$ 范围内,平均航向误差在 $\pm 3.5^\circ$ 范围内,最大横向误差在 ± 4 cm 范围内,平均横向误差在 ± 1.5 cm 范围内,满足铺管机作业要求。

5 结 论

1) 基于载波相位差分技术的北斗定位系统 (Real Time Kinematic-BeiDou Navigation Satellite System, RTK-BDS) 设计了多模态自适应比例-积分-微分 (Proportion-Integral-Differential, PID) 控制算法。算法使用后向反馈 (Back Propagation, BP) 神经网络判断无沟铺管机的控制模态,采用自适应 PID 控制算法控制铺管机导航,用于改善无沟铺管机的适应性。

2) 通过试验获取铺管机模态分类及 BP 神经网络训练样本数据后,开展一系列导航控制试验。上线试验中,横向距离超调为 4.58 cm。直线导航试验中 (铺管深度 1.6 m),航向误差在 $\pm 5.5^\circ$ 范围内,最大横向误差在 ± 3 cm 范围内。工程应用试验中 (坡降比例 3/10 000),航向误差控制在 $\pm 7^\circ$ 范围内,最大横向误差在 ± 4 cm 范围内。上述

结果表明,该导航控制系统能够满足 V 形犁式无沟铺管机的作业要求。

[参 考 文 献]

- [1] 于淑会,刘金铜,李志祥,等.暗管排水排盐改良盐碱地机理与农田生态系统响应研究进展[J].中国生态农业学报,2012,20(12):1664-1672.
Yu Shuhui, Liu Jintong, Li Zhixiang, et al. Mechanism of saline-alkali lands improvement of subsurface pipe drainage systems and agro-ecosystem response[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(12): 1664-1672. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王少丽,许迪,陈皓锐,等.农田除涝排水技术研究综述[J].排灌机械工程学,2014,32(4):343-349.
Wang Shaoli, Xu Di, Chen Haorui, et al. Review on research of farmland drainage technology[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(4): 343-349. (in Chinese with English abstract)
- [3] Blann K L, Anderson J L, Sands G R, et al. Effects of agricultural drainage on aquatic ecosystems: A review[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2009, 39(11): 909-1001.
- [4] TD/T 1043.2-2013,暗管改良盐碱地技术规程 第 2 部分:规划设计与施工[S].中华人民共和国国土资源部,2013.
- [5] 郭大方,陈坤,胡小安,等.农田排水暗管系统施工方法和装备研究现状与展望[J].农业工程,2020,10(11):58-65.
Guo Dafang, Chen Kun, Hu Xiaolan, et al. Status and prospects for R&D on installation machinery of subsurface land drain-pipes[J]. Agricultural Engineering, 2020, 10(11): 58-65. (in Chinese with English abstract)
- [6] Broughton R S, Fouss J L. Subsurface drainage installation machinery and methods[J]. Agricultural Drainage, 1999, 38: 963-1003.
- [7] Ritzema H P, Nijland H J, Croon F W. Subsurface drainage practices: From manual installation to large-scale implementation[J]. Agricultural water management, 2006, 86(1/2): 60-71.
- [8] 黄剑雄,刘小雄,章卫国,等.基于视觉/惯导的无人机组合导航算法研究[J].计算机测量与控制,2021,29(2):137-143,149.
Huang Jianxiong, Liu Xiaoxiong, Zhang Weiguo, et al. Research on vision/inertial based integrated navigation technology of UAVs[J]. Computer Measurement and Control, 2021, 29(2): 137-143, 149. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张漫,季宇寒,李世超,等.农业机械导航技术研究进展[J].农业机械学报,2020,51(4):1-18.
Zhang Man, Ji Yuhuan, Li Shichao, et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology[J].

- Transactions of The Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 1-18. (in Chinese with English abstract)
- [10] 侯加林, 蒲文洋, 李天华, 等. 双激光雷达温室运输机器人导航系统研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 80-88. Hou Jialin, Pu Wenyang, Li Tianhua, et al. Development of dual-lidar navigation system for greenhouse transportation robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(14): 80-88. (in Chinese with English abstract)
- [11] Han J, Park C, Kwon J H, et al. Performance evaluation of autonomous driving control algorithm for a crawler-type agricultural vehicle based on low-cost multi-sensor fusion positioning[J]. Applied Sciences, 2020, 10(13): 4667.
- [12] Takai R, Yang L, Noguchi N. Development of a crawler-type robot tractor using RTK-GPS and IMU[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2014, 7(4): 143-147.
- [13] 伟利国, 胡小安, 王丽丽. 开沟铺管机自动导航系统设计与试验[J]. 武汉理工大学学报: 信息与管理工程版, 2012, 34(6): 667-670. Wei Ligu, Hu Xiaolan, Wang Lili. Automatic navigation system design and Experiment pipe-laying trencher[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Information and Management Engineering Edition, 2012, 34(6): 667-670. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王丽丽, 胡小安, 伟利国, 等. 大型开沟铺管机自动控制系统的研制[J]. 机电工程, 2012, 29(12): 1448-1452, 1460. Wang Lili, Hu Xiaolan, Wei Ligu, et al. Development of automatic control system on large-sized trencher and pipe-layer[J]. Journal of Mechanical and Electrical Engineering, 2012, 29(12): 1448-1452, 1460. (in Chinese with English abstract)
- [15] 宋彦, 张羊阳, 姚琦, 等. 基于启发式动态规划的履带机器人路径跟随控制方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 24-33. Song Yan, Zhang Yangyang, Yao Qi, et al. Path following control method of tracked mobile robot based on heuristic dynamic programming[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 24-33. (in Chinese with English abstract)
- [16] 丁幼春, 何志博, 夏中州, 等. 小型履带式油菜播种机导航免疫 PID 控制器设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(7): 12-20. Ding Youchun, He Zhibo, Xia Zhongzhou, et al. Design of navigation immune controller of small crawler-type rape seeder[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(7): 12-20. (in Chinese with English abstract)
- [17] 关卓怀, 沐森林, 吴崇友, 等. 履带式联合收获机水田作业转向运动学分析与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 29-38. Guan Zhuohuai, Mu Senlin, Wu Chongyou, et al. Steering kinematic analysis and experiment of tracked combine harvester working in paddy filed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(13): 29-38. (in Chinese with English abstract)
- [18] 迟媛, 石丹丹, 王洪涛, 等. 松软地面履带车辆差速转向实际载荷比的研究[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 32-39. Chi Yuan, Shi Dandan, Wang Hongtao, et al. Research on actual steering power ratio of differential steering mechanism of tracked vehicle on soft ground[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(21): 32-39. (in Chinese with English abstract)
- [19] 武萌, 尹训锋. 基于运动学约束的履带通信车组合导航研究[J]. 压电与声光, 2019, 41(1): 141-145. Wu Meng, Yin Xunfeng. Research on integrated navigation of tracked communication vehicle based on kinematic constraints[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2019, 41(1): 141-145. (in Chinese with English abstract)
- [20] 石惠娴, 孟祥真, 游煜成, 等. 植物工厂地源热泵系统热负荷 BP 神经网络预测及验证[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 196-202. Shi Huixian, Meng Xiangzhen, You Yucheng, et al. Prediction and verification on heating load of source heat pump heating system based on BP neural network for plant factory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(2): 196-202. (in Chinese with English abstract)
- [21] 刘秀英, 余俊茹, 王世华. 光谱特征变量和 BP 神经网络构建油用牡丹种子含水率估算模型[J]. 农业工程学报, 2020, 36(22): 308-315. Liu Xiuying, Yu Junru, Wang Shihua. Estimation of moisture content in peony seed oil using spectral characteristic variables and BP neural network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(22): 308-315. (in Chinese with English abstract)
- [22] 包涵春. 基于 BP 神经网络能量预测的地面式超级电容储能系统能量管理策略[D]. 北京: 北京交通大学, 2020. Bao Hanchun. Energy Management Strategy of Wayside Supercapacitor Energy Storage System Based on BP Neural Network Energy Prediction[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020. (in Chinese with English abstract)

Design and test of the BDS navigation system for trenchless pipe laying machines

Wang Jizhong, Zhao Bo^{*}, Zhao Shimeng, Xing Gaoyong, Wei Liguang, Hu Xiaolan

(Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problem of pipeline bending caused by slippage of trenchless pipe laying machine, a navigation control system of trenchless pipe laying machine was designed based on Real Time Kinematic-BeiDou Navigation Satellite System (RTK-BDS). According to the idea of multi-mode control algorithm, the multi-mode adaptive PID control algorithm of trenchless pipe laying machine was proposed. The analyses of the kinematic model and slip yaw model of tracked vehicles showed that the turning radius of vehicles will increase when slipping occurs; Through the analysis of the deviation model of vehicles, the calculation models of the heading deviation and lateral deviation of vehicles were given; Based on the analysis of the structure and related structural equations of the hydraulic motor of vehicles, the control transmission function of the hydraulic motor of trenchless pipe laying machine was obtained. The navigation control system of trenchless pipe laying machine mainly consists of BP (Back Propagation) neural network classifier, modal selector, knowledge base, adaptive comparator and walking controller. BP neural network classifier uses sensors to detect the running speeds of the left and right tracks, the actual average vehicle speed, the engine power and the oil pump pressure of the hydraulic motors on both sides of the trenchless pipe laying machine, so as to obtain the running state of the relevant modes of the vehicle, and input the sampled data to the computer. According to the model trained by BP neural network, the current state classification of vehicles is predicted. The modal selector can obtain the relevant parameters of the current vehicle state from the knowledge base through the classification results of BP neural network, and send them to the adaptive comparator and walking controller. The knowledge base contains the adaptive functions of the vehicle control system and the control parameters of positions. The adaptive comparator can calculate the weights of the two errors according to the current heading error and lateral error of the vehicle and the reference line, and compare the two weights. If the heading error weight is larger than the lateral error weight, the heading PID controller is selected to control the vehicle navigation, otherwise the lateral PID (Proportion-Integral-Differential) controller is selected to control the vehicle navigation. The vehicle modal control parameters and BP neural network training samples were obtained through the field test. The test results showed that the lateral overshoot was within 4.58 cm, the heading error reduced to $\pm 3.7^\circ$ and the lateral error was stable within ± 2.6 cm. The linear control experiment results showed that the heading error of the control algorithm was within $\pm 5.5^\circ$, which was within $\pm 3^\circ$ under 96.2% cases, and the lateral error was within ± 2.6 cm, which was within ± 1 cm under 89.6% cases. The engineering application test showed that the heading error could be kept within $\pm 7^\circ$ and the average heading error was within $\pm 3.5^\circ$ and the transverse error could be kept within ± 4 cm. The control system can meet the construction requirements of trenchless pipe laying machine.

Keywords: navigation; control system; BP neural network; multimode control; adaptive PID control; trenchless pipe laying machine