

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.031

基于最优控制的导航拖拉机速度与航向联合控制方法*

韩科立 朱忠祥 毛恩荣 宋正河 谢斌 李明生

(中国农业大学工学院,北京 100083)

摘要:为提高自动导航拖拉机工作效率和作业质量,以自动变速系统和自动转向系统为硬件支撑,结合最优控制理论,设计了基于速度和转向角的双参数最优控制算法。针对耙地作业要求,设计了直线路径跟踪与地头转弯路径跟踪控制器,运用 Matlab 软件对所设计的控制器进行了仿真分析,通过田间试验对所设计的控制器进行了验证。试验结果表明:控制器的横向偏差小于 0.12 m,航向偏差小于 1.1°,速度偏差小于 0.2 m/s,满足自动导航作业要求。

关键词:自动导航拖拉机 自动变速 自动转向 双参数最优控制

中图分类号:V448.22+4;S219 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2013)02-0165-06

Joint Control Method of Speed and Heading of Navigation Tractor Based on Optimal Control

Han Keli Zhu Zhongxiang Mao Enrong Song Zhenghe Xie Bin Li Mingsheng

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The two-parameter optimal control method based on the speed and steering angle was designed with the optimal control theory. The automatic transmission system and the automatic steering system were developed for the automatic navigation tractor on the purpose of improving the work efficiency and the work quality. The straight path tracking controller and the turnrow turning path tracking controller were designed and simulated by the harrowing operation with the Matlab. The field test was carried out to validate the designed controller, and the results indicated that the control accuracy of the lateral deviation and the orientation deviation were less than 0.12 m and 1.1°, respectively. The speed control accuracy was less than 0.2 m/s.

Key words: Automatic navigation tractor Automatic transmission Automatic steering Two-parameter optimal control

引言

中国农业正在向大型化、智能化、集成化的方向发展,以高质量、高效率、低能耗为目标的精准农业也在快速发展^[1~2]。为适应现代化农业的发展、加快自动导航拖拉机在国内农业领域的应用步伐,对自动导航拖拉机相关技术进行深入研究很有必要。在农业自动导航领域,运用较多的控制方法有 PID

控制和单参数最优控制^[3~8],控制量一般为转向角,而对速度控制的研究主要集中在定速巡航系统开发上^[9],将速度和转向角结合起来进行双参数控制的研究较少,因此为提高工作效率和作业质量、减少驾驶员工作强度,将转向控制和速度控制相结合进行研究更具实际意义。拖拉机在田间作业过程中,直线作业时,应采用稳定的高速行驶,以提高工作效率;地头转弯时,应适当降低行驶速度,以提高转向

收稿日期:2011-12-30 修回日期:2012-02-05

*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD20B01,2011BAD20B02)

作者简介:韩科立,博士生,主要从事车辆智能控制和车辆运动学、动力学研究,E-mail:hanky2008@163.com

通讯作者:朱忠祥,副教授,主要从事农业机械智能化控制技术研究,E-mail:zhuzhongxiang@cau.edu.cn

操纵稳定性,减小地头转弯行驶距离,从而为实现真正意义上高精度、高质量无人驾驶提供技术支持。本文基于自行研制的自动变速系统和自动转向系统,运用最优控制理论设计开发直线路径和地头转弯路径跟踪最优控制器,结合自动导航拖拉机软硬件系统,通过田间试验验证所设计的控制器的可靠性和有效性。

1 自动导航硬件平台

实现速度和转向角双参数最优控制的硬件基础是自动变速系统和自动转向系统,以福田雷沃TG1254型拖拉机为平台,设计开发自动变速系统和自动转向系统。自动变速主要有油门调节和挡位调节2种方式^[10],由于所采用的平台为低速系统,采用油门调节更易实现硬件改造和实现实时控制。自动变速系统以节约改造成本、增强系统可控性为目标,根据平台实际情况,以步进电动机为动力源,通过一级减速装置带动油门拉线实现油门的自动调节,工作装置结构如图1所示。其工作原理为:步进电动机的动力经减速器传递到油门自动调节摇臂,拉动油门拉线,从而使油门调节杆绕油门调节杆连接销转动,最终带动节气门转动,实现油门调整。最大油门限位销用来限制油门最大位置,以免油门开度过大对发动机造成损害。

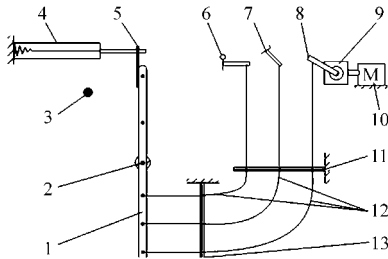


图1 油门自动调节机构原理图

Fig.1 Schematic diagram of automatic adjusting mechanism of throttle

1. 油门调节杆 2. 油门调节杆连接销 3. 最大油门限位销
4. 油门位置传感器 5. 传感器连接板 6. 手油门操纵手柄
7. 脚油门操纵踏板 8. 油门自动调节摇臂 9. 减速器 10. 步进电动机 11. 横固定板 12. 油门拉线 13. 竖固定板

自动转向系统主要参考了陈文良等^[11]的设计思路,即在原人工转向的基础上并联一套全液压转向器,并在其基础上改进了动力源部分油路,使系统工作更稳定,改进后的自动转向系统结构布局如图2所示。其工作原理为:人工转向和自动转向功能的切换由二位三通电磁换向阀控制实现,电磁换向阀断电,阀芯在弹簧力作用下处于右位,油泵的液压油流向原转向器,此时人工转向系统起作用,加装

的转向器处于中位,它与油源的连接被电磁换向阀断开,与转向油缸的连接被自身特定结构断开,处于隔离状态,不起转向作用。电磁阀通电,电磁换向阀的阀芯处于左位,液压油流向加装的转向器,此时由步进电动机驱动转向器实现自动转向功能,原转向器处于隔离状态,不起转向作用。转向轮转速和转向的控制通过调整步进电动机的转速和转向来实现。

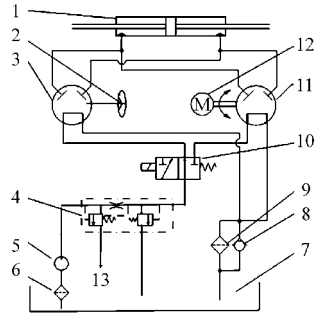


图2 自动转向系统工作原理图

Fig.2 Working principle diagram of automatic steering system

1. 转向油缸 2. 方向盘 3. 加装的转向器 4. 单路稳定分流阀
5. 齿轮泵 6. 进油滤清器 7. 油箱 8. 单向阀 9. 回油滤清器
10. 二位三通电磁换向阀 11. 原转向器 12. 步进电动机
13. 其他油路

2 状态方程建立

动力学模型和运动学模型是2种最常用车辆模型^[12],车辆动力学模型是基于车辆行驶中的受力状态,结合牛顿第二定律建立起来的;而车辆运动学模型则不考虑力和质量等因素的影响,运用几何学的方法分析车辆运动状态,从而建立车辆状态方程。由于拖拉机属于低速运动车辆,田间实际作业过程中速度普遍不高,一般在0.5~3.0 m/s,为简化车辆模型,暂不考虑拖拉机的受力和行驶中的侧滑与倾斜,采用运动学模型进行状态分析。

拖拉机运动学模型建立过程中,以拖拉机的后轴中心点为控制参考点,假设 x 轴为期望的跟踪路径,可将拖拉机的运动学模型简化成一个两轮车模型,如图3所示。

运动方程为

$$\dot{x}_2 = \frac{dx_2}{dt} = v \cos \theta \quad \dot{y}_2 = \frac{dy_2}{dt} = v \sin \theta$$

因为 $v_1 \cos \alpha = v \quad v_1 \sin \alpha = l \dot{\theta}$

$$l \dot{\theta} = \frac{v}{\cos \alpha} \sin \alpha = v \tan \alpha$$

所以 $\dot{\theta} = \frac{v}{l} \tan \alpha$

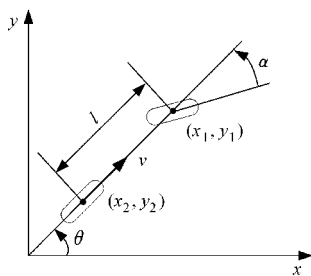


图3 拖拉机运动学模型

Fig. 3 Kinematic model of tractor

由此得到其运动学模型为

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \frac{v}{l} \tan \alpha \\ \dot{x}_2 = v \cos \theta \\ \dot{y}_2 = v \sin \theta \end{cases}$$

式中 θ ——航向角, ($^\circ$) l ——轴距, m

α ——前轮转向角, ($^\circ$)

v ——拖拉机后轮速度, m/s

v_1 ——拖拉机前轮速度, m/s

由于拖拉机有 5 个状态量, 其矩阵形式为

$$\mathbf{x} = [x \ y \ \theta \ \alpha \ v]^T$$

因此, 拖拉机最终的状态方程可表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta \\ \dot{y} = v \sin \theta \\ \dot{\theta} = \frac{v \tan \alpha}{l} \\ \dot{\alpha} = u_1 \\ \dot{v} = u_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中 u_1 ——拖拉机转向角变化率, rad/s

u_2 ——拖拉机纵向加速度, m/s²

3 双参数最优控制器建立

基于速度和转向角的双参数最优控制系统框图如图 4 所示。控制量为拖拉机行驶速度变化率和前轮转向角变化率, 即根据定位导航系统提供的位姿、速度和转向角信息, 经过航位推算计算前方注视点的位姿信息, 其与期望路径上的位姿信息对比得出各姿态偏差量, 通过所设计的双参数最优控制器, 计算出速度和转向角的控制量, 并通过下位伺服控制器来控制自动变速系统和自动转向系统中的步进电动机实现变速和转向, 使拖拉机在最短时间内以最优路径运动到预定目标点。

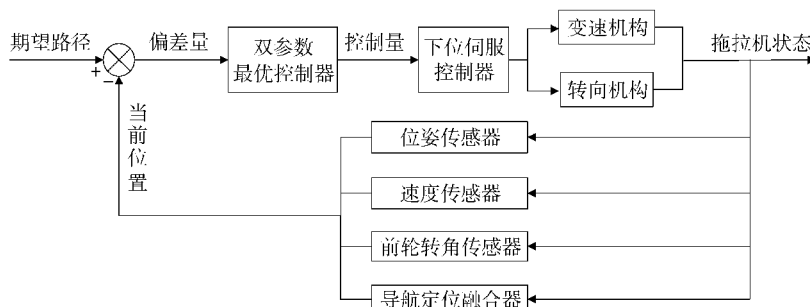


图4 双参数最优控制系统框图

Fig. 4 Schematic diagram of two-parameter optimal control

在拖拉机自动导航控制中, 由于各传感器存在着采样时间滞后的问题, 所以选择当前控制点的前方注视点作为实际参考点, 与期望路径上的位姿信息进行比较, 其具体控制方案如图 5 所示。通过 GPS、IMU、电子罗盘和角位移传感器对拖拉机进行定位(设为当前点 X), 并利用航位推算定位方法计算出拖拉机下一时刻的位置(前方注视点 Q), 在预

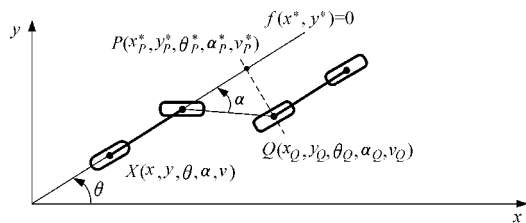


图5 导航坐标系

Fig. 5 Coordinate system of automatic navigation system

定路径 $f(x^*, y^*) = 0$ 上找出离拖拉机位置最近的点(设为目标点 P_i)。将前方注视点 Q 和目标点 P_i 的偏差表示为状态量 $\delta \mathbf{x} = [\delta x \ \delta y \ \delta \theta \ \delta \alpha \ \delta v]$, 即

$$\begin{cases} \delta x = x_Q - x_p^* \\ \delta y = y_Q - y_p^* \\ \delta \theta = \theta_Q - \theta_p^* \\ \delta \alpha = \alpha_Q - \alpha_p^* \\ \delta v = v_Q - v_p^* \end{cases} \quad (2)$$

3.1 地头转弯路径跟踪最优控制器建立

地头转弯路径上的目标航向角 θ_p^* 和转向角 α_p^* 均为变量, 目标速度 v_p^* 为定值, 将式(1)所示的拖拉机状态方程变换成以偏差量 $\delta \mathbf{x}$ 为状态量的状态方程, 则

$$\begin{cases} \delta \dot{x} = -v_p^* \sin \theta_p^* \delta \theta + \cos \theta_p^* \delta v \\ \delta \dot{y} = v_p^* \cos \theta_p^* \delta \theta + \sin \theta_p^* \delta v \\ \delta \dot{\theta} = \frac{v_p^*}{l \cos^2 \alpha_p^*} \delta \alpha + \frac{\tan \alpha_p^*}{l} \delta v \\ \delta \dot{\alpha} = \delta u_1 \\ \delta \dot{v} = \delta u_2 \end{cases} \quad (3)$$

即 $\delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_1 \delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \delta \mathbf{u}$

其中

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -v_p^* \sin \theta_p^* & 0 & \cos \theta_p^* \\ 0 & 0 & v_p^* \cos \theta_p^* & 0 & \sin \theta_p^* \\ 0 & 0 & 0 & \frac{v_p^*}{l \cos^2 \alpha_p^*} & \frac{\tan \alpha_p^*}{l} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \delta \mathbf{u} = \begin{bmatrix} \delta u_1 \\ \delta u_2 \end{bmatrix}$$

根据能控性判据得

$$\mathbf{Q}_{1c} = [\mathbf{B} \quad \mathbf{A}_1 \mathbf{B} \quad \mathbf{A}_1^2 \mathbf{B} \quad \mathbf{A}_1^3 \mathbf{B} \quad \mathbf{A}_1^4 \mathbf{B}] =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cos \theta_p^* & \frac{-v_p^* \sin \theta_p^*}{l \cos^2 \alpha_p^*} & \frac{-v_p^* \sin \theta_p^* \tan \alpha_p^*}{l} \\ 0 & 0 & 0 & \sin \theta_p^* & \frac{v_p^* \cos \theta_p^*}{l \cos^2 \alpha_p^*} & \frac{v_p^* \cos \theta_p^* \tan \alpha_p^*}{l} \\ 0 & 0 & \frac{v_p^*}{l \cos^2 \alpha_p^*} & \frac{\tan \alpha_p^*}{l} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$\text{Rank} \mathbf{Q}_{1c} = 5$, 即能控性矩阵 \mathbf{Q}_{1c} 满秩, 该系统具有完全可控性。地头转弯路径跟踪最优控制器的性能指标为

$$J_1(\delta \mathbf{u}) = \int_0^{\infty} (\delta \mathbf{x}^T \mathbf{Q}_1 \delta \mathbf{x} + \delta \mathbf{u}^T \mathbf{R}_1 \delta \mathbf{u}) dt \quad (4)$$

矩阵 $\mathbf{Q}_1 = \text{diag}(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5)$ ($q_i \geq 0, i = 1, 2, 3, 4, 5$) 为 5 阶半正定对称阵, $\mathbf{R}_1 = \text{diag}(r_1, r_2)$ ($r_1 > 0, r_2 > 0$) 为 2 阶正定对称阵, 当时间 t 无限小时, 求解最优控制量 $\delta \mathbf{u}$ 使性能指标 J_1 最小的问题将转换为求解 Riccati 方程

$$\mathbf{P}_1 \mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_1^T \mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_1 \mathbf{B} \mathbf{R}_1^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}_1 + \mathbf{Q}_1 = 0$$

从而可求得最优控制量为

$$\delta \mathbf{u}^* = -\mathbf{R}_1^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}_1 \delta \mathbf{x} = -\mathbf{K}_1 \delta \mathbf{x}$$

式中 \mathbf{P}_1 ——Riccati 方程解 \mathbf{K}_1 ——反馈增益

利用 Matlab 软件中 LQR 函数进行求解, 其解出的控制器参数随曲线路径上导航点目标航向角 θ_p^*

和转向角 α_p^* 的改变而改变, 矩阵 \mathbf{Q}_1 中各行元素值的不同, 体现了对偏差量 $\delta \mathbf{x}$ 的分量在各时刻的要求不同, 重要性不同, 地头转向时对横向偏差、航向偏差和转向角偏差与速度偏差的要求略有不同, 其中对横向偏差和转向角偏差要求高一些, 即拖拉机不能偏离目标路径太多、转向轮不能往复大幅度调整, 而对航向偏差和速度偏差要求相对不高, 根据客观条件和现实作业要求及前人经验, 取 $q_1 = q_2 = q_4 = 10, q_3 = q_5 = 5$ 。矩阵 \mathbf{R}_1 中各行元素值的不同, 体现了对相应的控制量 $\delta \mathbf{u}$ 的分量在各时刻的要求不同, 重要性不同。矩阵 \mathbf{R}_1 中参数取值较大, 表示“控制量不要过大”更重要, 取值较小, 表示“ \mathbf{x} 尽量接近于零”更重要。对于田间作业的拖拉机, 希望其保持恒定的速度, 且前轮转向角的摆动尽可能小, 因此选择 $r_1 = 100, r_2 = 1$ 。为验证所设计的控制器的稳定性, 选取地头转弯路径中的一点作为目标导航点进行仿真分析, 其状态量为 $\mathbf{x}_{p1} = [2.50 \quad -0.73 \quad -28.59 \quad 0.87 \quad 1.0]$, 初始偏差 $\delta \mathbf{x}_{01} = [-0.3 \quad 0.3 \quad -0.3 \quad 0.3 \quad 0.3]$ 时所对应的状态响应曲线如图 6 所示, 该点的控制器方程为

$$\delta \mathbf{u} = -\mathbf{K}_{p1} \delta \mathbf{x}$$

$$\delta u_1 = -0.1815 \delta x + 0.2589 \delta y -$$

$$0.7292 \delta \theta - 0.8447 \delta \alpha - 0.0197 \delta v$$

$$\delta u_2 = 2.5896 \delta x + 1.8149 \delta y - 3.6056 \delta \theta -$$

$$1.9721 \delta \alpha - 3.4551 \delta v$$

式中 \mathbf{K}_{p1} ——目标点 P_1 处的反馈增益

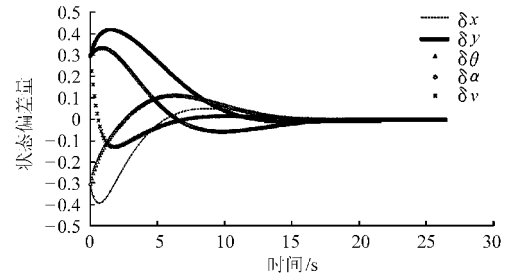


图 6 地头转弯路径跟踪时状态响应曲线

Fig. 6 State response curve of turnrow turning path tracker

3.2 直线路径跟踪最优控制器建立

直线路径上的目标航向角 θ_p^* 为常量, 目标转向角 α_p^* 恒为零, 目标速度 v_p^* 为常量。因此直线路径跟踪控制器模型可在地头转弯路径跟踪控制器模型的基础上进行简化, 经过变换后的状态方程为

$$\begin{cases} \delta \dot{x} = -v_p^* \sin \theta_p^* \delta \theta + \cos \theta_p^* \delta v \\ \delta \dot{y} = v_p^* \cos \theta_p^* \delta \theta + \sin \theta_p^* \delta v \\ \delta \dot{\theta} = \frac{v_p^*}{l} \delta \alpha \\ \delta \dot{\alpha} = \delta u_1 \\ \delta \dot{v} = \delta u_2 \end{cases} \quad (5)$$

即 $\delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_2 \delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \delta \mathbf{u}$

其中

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -v_p^* \sin \theta_p^* & 0 & \cos \theta_p^* \\ 0 & 0 & v_p^* \cos \theta_p^* & 0 & \sin \theta_p^* \\ 0 & 0 & 0 & \frac{v_p^*}{l} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

由状态能控性判据得

$$\mathbf{Q}_{2c} = [\mathbf{B} \quad \mathbf{A}_2 \mathbf{B} \quad \mathbf{A}_2^2 \mathbf{B} \quad \mathbf{A}_2^3 \mathbf{B} \quad \mathbf{A}_2^4 \mathbf{B}] =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cos \theta_p^* & \frac{-v_p^{*2} \sin \theta_p^*}{l} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin \theta_p^* & \frac{v_p^{*2} \cos \theta_p^*}{l} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{v_p^*}{l \cos^2 \alpha_p^*} & \frac{\tan \alpha_p^*}{l} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$\text{Rank} \mathbf{Q}_{2c} = 5$ 即能控性矩阵 \mathbf{Q}_{2c} 满秩, 该系统具有完全可控性。跟踪问题终端时间无限调节器设计准则下的性能指标为

$$J_2(\delta \mathbf{u}) = \int_0^\infty (\delta \mathbf{x}^T \mathbf{Q}_2 \delta \mathbf{x} + \delta \mathbf{u}^T \mathbf{R}_2 \delta \mathbf{u}) dt \quad (6)$$

矩阵 $\mathbf{Q}_2 = \text{diag}(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5)$ ($q_i \geq 0, i = 1, 2, 3, 4, 5$) 为 5 阶半正定对称阵, $\mathbf{R}_2 = \text{diag}(r_1, r_2)$ ($r_1 > 0, r_2 > 0$) 为 2 阶正定对称阵, 求解最优控制量 $\delta \mathbf{u}$ 使性能指标 J_2 最小的问题转换为求解 Riccati 方程, 即

$$\mathbf{P}_2 \mathbf{A}_2 + \mathbf{A}_2^T \mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_2 \mathbf{B} \mathbf{R}_2^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}_2 + \mathbf{Q}_2 = 0$$

从而可求得最优控制量为

$$\delta \mathbf{u}^* = -\mathbf{R}_2^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}_2 \delta \mathbf{x} = -\mathbf{K}_2 \delta \mathbf{x}$$

式中 \mathbf{P}_2 ——Riccati 方程的解

\mathbf{K}_2 ——反馈增益

由于直线跟踪时要求横向偏差尽量小, 前轮转角摆动小, 速度稳定, 对 4 个偏差的要求一样, 因此取 $q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = q_5 = 10$ 。同时, 对田间作业的拖拉机, 希望其保持恒定的速度, 且前轮转向角的摆动尽可能小, 因此选择 $r_1 = 100, r_2 = 1$ 。为验证所设计的控制器的稳定性, 选取直线路径中的一点作为目标导航点进行仿真分析, 其状态量为 $\mathbf{x}_{p2} = [10 \ 4 \ 0 \ 0 \ 1.5]$, 初始偏差 $\delta \mathbf{x}_{02} = [-0.2 \ -0.2 \ -0.3 \ -0.3 \ -0.3]$ 时所对应的状态响应曲线如图 7 所示, 该点的控制器方程为

$$\delta \mathbf{u} = -\mathbf{K}_{p2} \delta \mathbf{x}$$

$$\delta u_1 = 0.240 \ 1 \delta x - 0.205 \ 7 \delta y - 0.545 \ 6 \delta \theta - 0.887 \ 1 \delta \alpha - 0.022 \ 1 \delta v$$

$$\delta u_2 = -2.057 \ 4 \delta x - 2.401 \ 4 \delta y - 3.892 \ 2 \delta \theta - 2.202 \ 1 \delta \alpha - 4.330 \ 9 \delta v$$

式中 \mathbf{K}_{p2} ——目标点 P_2 处的反馈增益

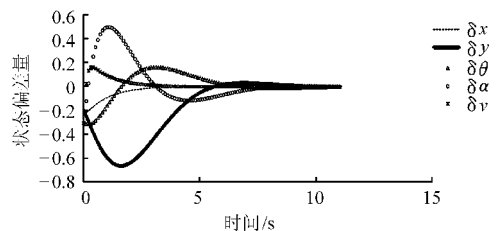


图 7 直线路径跟踪时状态响应曲线

Fig. 7 State response curve of straight path tracking

4 田间试验

为了验证所设计控制器的有效性和可靠性, 在上庄实验站选取了一块长 200 m、宽 35 m 的平整田地作为试验场地, 并按规划好的跨行式作业路径 (图 8) 进行了耙地作业自动导航试验, 其横向偏差、航向偏差和速度偏差变化曲线如图 9~11 所示。试验结果表明: 横向平均偏差为 0.05 m, 最大偏差为 0.12 m, 航向平均偏差为 0.45° , 最大偏差为 1.1° , 速度平均偏差为 0.1 m/s, 最大偏差为 0.2 m/s。

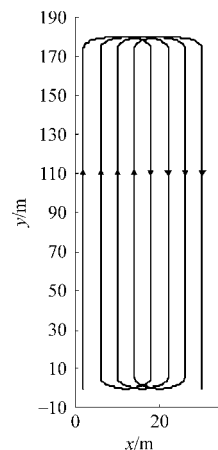


图 8 耙地作业田间导航参考路径

Fig. 8 Reference path of harrowing

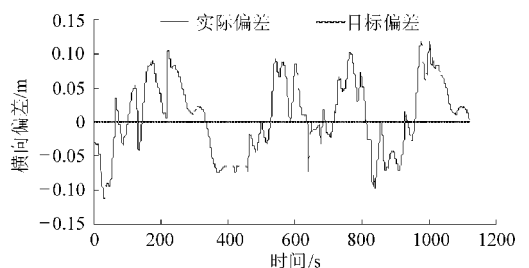


图 9 横向偏差

Fig. 9 Lateral deviation

5 结论

(1) 基于福田雷沃 TG1254 型拖拉机设计了自动变速系统和自动转向系统, 为实现双参数最优控

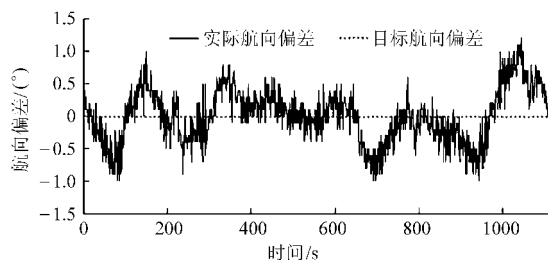


图10 航向偏差

Fig. 10 Orientation deviation

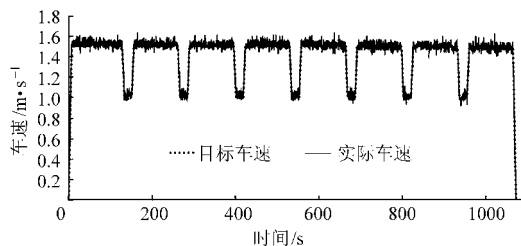


图11 速度变化曲线

Fig. 11 Velocity curve

制提供了硬件基础。

(2) 基于拖拉机状态方程,设计了基于速度和转向角的双参数最优控制算法,并利用 Matlab 对直线路径跟踪、地头转弯路径跟踪控制器进行了仿真分析,验证了控制器的稳定性和准确性。

(3) 基于自动导航拖拉机的自动变速系统和自动转向系统,结合所设计的双参数最优控制算法,进行了田间试验,验证了所设计控制器的可靠性,横向偏差小于 0.12 m,航向偏差小于 1.1°,速度偏差小于 0.2 m/s,满足自动导航作业要求。

参 考 文 献

- 1 吴延霞,赵博,毛恩荣. 农业车辆自动导航系统综述[J]. 农机化研究,2009(3):242~245,252.
Wu Yanxia, Zhao Bo, Mao Enrong. A general survey of automatic navigation system in agriculture vehicle [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009(3):242~245, 252. (in Chinese)
- 2 李建平,林妙玲. 自动导航技术在农业工程中的应用研究进展[J]. 农业工程学报,2006,22(9):232~236.
Li Jianping, Lin Miaoling. Research progress of automatic guidance technologies applied in agricultural engineering [J]. Transactions of the CSAE, 2006,22(9):232~236. (in Chinese)
- 3 Garcia-Perez L, Garcia-Alegre M C, Ribeiro A, et al. An agent of behavior architecture for unmanned control of a farming vehicle [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 60(1): 39~48.
- 4 Nørremarka M, Griepentrog H W, Nielsen J, et al. The development and assessment of the accuracy of an autonomous GPS-based system for intra-row mechanical weed control in row crops[J]. Biosystems Engineering, 2008,101(4): 396~410.
- 5 朱忠祥,宋正河,谢斌,等. 拖拉机队列自动控制系统的[J]. 农业机械学报,2009,40(8):149~154.
Zhu Zhongxiang, Song Zhenghe, Xie Bin, et al. Automatic control system of tractors platooning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(8):149~154. (in Chinese)
- 6 刘沛,陈军,张明颖. 基于激光导航的果园拖拉机自动控制系统[J]. 农业工程学报,2011,27(3):196~199.
Liu Pei, Chen Jun, Zhang Mingying. Automatic control system of orchard tractor based on laser navigation[J]. Transactions of the CSAE, 2011,27(3):196~199. (in Chinese)
- 7 张智刚,罗锡文,赵祥喜,等. 基于Kalman滤波和纯跟踪模型的农业机械导航控制[J]. 农业机械学报,2009,40(增刊):6~12.
Zhang Zhigang, Luo Xiwen, Zhao Zuoxi, et al. Trajectory tracking control method based on Kalman filter and pure pursuit model for agricultural vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40 (Supp.):6~12. (in Chinese)
- 8 刘兆祥,刘刚,籍颖,等. 基于自适应模糊控制的拖拉机自动导航系统[J]. 农业机械学报,2010,41(11):148~152,162.
Liu Zhaoxiang, Liu Gang, Ji Ying, et al. Autonomous navigation system for agricultural tractor based on self-adapted fuzzy control [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(11):148~152, 162. (in Chinese)
- 9 王天华,毛恩荣,朱忠祥,等. 拖拉机机械式自动变速器动力换挡试验[J]. 农业机械学报,2009,40(1):5~8.
Wang Tianhua, Mao Enrong, Zhu Zhongxiang, et al. Experimental analysis of the tractor automatic mechanism transmission dynamic power shifting schedule[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(1):5~8. (in Chinese)
- 10 王洪亮,刘海鸥,陈慧岩. 越野车辆的自动变速系统[J]. 北京理工大学学报,2009,29(3):214~218.
Wang Hongliang, Liu Haiou, Chen Huiyan. Automatic shift control systems (ASCS) in off-road vehicles [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2009,29(3):214~218. (in Chinese)
- 11 陈文良,谢斌,宋正河,等. 拖拉机电控液压力转向系统的研究[J]. 农业工程学报,2006,22(10):122~125.
Chen Wenliang, Xie Bin, Song Zhenghe, et al. Electro-hydraulic power steering system for tractors [J]. Transactions of the CSAE, 2006,22(10):122~125. (in Chinese)
- 12 吕安涛,宋正河,毛恩荣. 拖拉机自动转向最优控制方法的研究[J]. 农业工程学报,2006,22(8):116~119.
Lü Antao, Song Zhenghe, Mao Enrong. Optimized control method for tractor automatic steering [J]. Transactions of the CSAE, 2006,22(8):116~119. (in Chinese)
- 13 胡寿松. 最优控制原理[M]. 5版. 北京:科学教育出版社,2007.
- 14 谢斌,朱忠祥,宋正河,等. 拖拉机作业机组分布式控制系统结构模型[J]. 农业机械学报,2011,42(12):182~185,196.
Xie Bin, Zhu Zhongxiang, Song Zhenghe, et al. Structural model of distributed control system for tractor implement combination [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(12):182~185,196. (in Chinese)