

遥操作拖拉机路感模拟系统设计与实验

薛金林 曹梓建 李雨晴

(南京农业大学工学院, 南京 210031)

摘要: 为了使遥操作拖拉机驾驶员对路面信息有更直观的感受,在课题组前期设计的一套拖拉机遥操作系统的基礎上设计了路感模拟系统。首先提出路感模拟系统的总体设计方案。然后分析拖拉机路感产生机理,并对遥操作拖拉机的转向执行机构以及控制器进行改造,设计出路感测试系统。最后根据所设计的路感测试系统,在草地、水泥地等路面上对遥操作拖拉机进行原地转向以及行驶转向时不同速度下的转向阻力矩测量,并且利用 Logitech G29 方向盘式操纵装置在草地和水泥路面展开路感的模拟实验。实验及测试结果表明,遥操作拖拉机在不同路面的转向阻力矩相差较大,但是总体变化趋势相同,一开始转向阻力矩随着方向盘转角增大而增大并在方向盘转角处于 100°~120° 时开始回落,当方向盘转角处于 200° 左右时有小幅度的上升。通过方向盘式操纵装置对遥操作拖拉机路感展开模拟,各项评价指标得分均在 6.3~8.5 分之间,表明该方法模拟路感的可行性。

关键词: 拖拉机; 遥操作; 路感模拟; 转向系统

中图分类号: S232.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)03-0432-08 OSID: 

Design and Tests of Road Feel Simulation System for Teleoperated Tractors

XUE Jinlin CAO Zijian LI Yuqing

(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: To make the teleoperated tractor driver have more intuitive feeling of the road information, road feel simulation system was designed on the basis of the teleoperation system for tractors that was designed before. By referring to the research ideas of road feel in the steer-by-wire system and combining sensor measurement method and parameter fitting method, the road sense was tested and simulated on the platform of teleoperated tractor. First of all, the overall design scheme of road feel simulation system was proposed. Then, through the analysis of the mechanism of tractor road feel, and the transformation of the steering actuator and controller of the teleoperation tractor, the road feel test system was designed. Finally, according to the road feel test system, the steering resistance torque of teleoperated tractor was measured on the grass and cement roads at different speeds, and the simulation test of road feel was carried out on the grass and cement roads by using the Logitech steering wheel. The test results showed that the steering torque of teleoperated tractor on different roads varied greatly, but the overall trend was the same. At first, the steering torque was increased with the increase of the angle, and it began to fall when the steering wheel angle was between 100° and 120° and rose slightly when the steering wheel angle was about 200°. The road feel of teleoperation tractor was simulated by the G29 steering wheel of Logitech, and the score of evaluation indexes were between 6.3 and 8.5, which showed that the simulated road feel satisfied the driver.

Key words: tractor; teleoperation; road feel simulation; steering system

0 引言

农业拖拉机在田间工作时,其工作环境较为恶劣并且复杂多变,驾驶员长期驾驶拖拉机不仅容易

疲劳而且会导致作业质量下降,甚至有可能发生意外事故,遥操作系统可以实现远程操控,很好地解决了这个问题^[1-4]。但由于遥操作驾驶员远离拖拉机,因此对于路面信息的了解较少,不利于驾驶员对

路面的判断。因此需要对遥操作拖拉机进行路感模拟设计。

目前对于路感的设计方法主要有 3 种,即传感器测量法^[5]、动力学计算法^[6]以及参数拟合法^[7]。BAHAI^[8]在转向电机上安装电流传感器,并且通过算法估计出方向盘的阻力矩,通过路感电机反馈给驾驶员。从光好^[9]建立方向盘力矩模型,选取路感有关的变量,拟合出方向盘力矩。谢有浩等^[10]将线控转向系统转向电机的转向阻力矩等效为所克服转向负载的方法,设计方向盘操纵转向阻力矩,使之更接近传统车辆的路感。刘彦琳等^[11]建立汽车线控转向动力学模型进行仿真分析,仿真结果表明所提出路感反馈策略能为驾驶员提供合适的路感。赵含雪等^[12]通过线控转向系统转向电机驱动电流对反馈主力矩进行设计,结合参数拟合法和动力学计算法,清晰地还原了路感。杨学平等^[13]从路感的影响因素出发,提出路感模拟的经验公式,并采用模糊控制的方法来研究经验公式中各函数和路感的关系,结果表明模拟出的路感提高了驾驶员的舒适性。解后循等^[14]对农用车辆电动液压助力转向系统方向盘反馈力矩数学模型进行了分析,结果表明该方法能有效提高方向盘动态反馈力矩的精度。魏波等^[15]通过控制力矩电机电流的大小和正负来分别控制输出力矩的大小和方向,结果表明系统有效可靠。

以上均是对具备线控转向系统的传统车辆进行路感的设计,而对于遥操作车辆的路感研究较少。本文借鉴线控转向系统中路感的研究思路,结合传感器测量法和参数拟合法,以遥操作拖拉机为平台对其路感进行测试和模拟,首先提出系统的设计要求以及总体设计方案,再对拖拉机的路感产生机理进行分析,通过对现有拖拉机的转向系统进行改造以及路感测试系统的软硬件设计,完成遥操作拖拉机在不同路面的路感采集反馈实验,最后通过罗技转向操纵装置对不同路面的路感进行模拟,以实现路感再现。

1 总体设计方案

所设计的遥操作拖拉机路感模拟系统应满足以下设计要求:①驾驶员可以通过发送指令远程实时控制拖拉机。②遥操作驾驶员可以通过摄像头观察到路面类型以便于路感模拟模式的切换。③驾驶员可以通过方向盘式操纵装置实现转向并获得路感。

遥操作拖拉机路感模拟系统由遥操作控制端和拖拉机端组合而成,如图 1 所示,两者通过无线网络进行信息传输。遥操作驾驶员通过上位机下达加速、刹车及熄火等指令,转向指令的发送和路

感模拟则是采用 Logitech G29 方向盘式转向操纵装置来完成,行驶时通过摄像头反馈的路面信息确定路面类型,然后通过按键切换来完成不同路面路感模拟。拖拉机端的视觉系统由前置摄像机和顶置摄像机组成,分别用来获取道路前方以及拖拉机周边的环境信息和路面种类,而路感的测试则是由安装在方向盘上的转矩传感器来完成。遥操作拖拉机路感模拟系统设计思路如下:首先通过加装在方向盘上的转矩传感器测得拖拉机在草地、水泥路等几种典型路面不同方向盘角度对应的转向阻力矩,拟合出遥操作拖拉机在不同路面上方向盘角度和转向阻力矩的关系。然后将前一步中得到的关系即几种路面力反馈情况定义在 Logitech G29 转向操纵装置的按键上,最后行驶时通过摄像头的视觉反馈确定路况,然后通过按键切换,由此完成路感模拟的模式化设计。

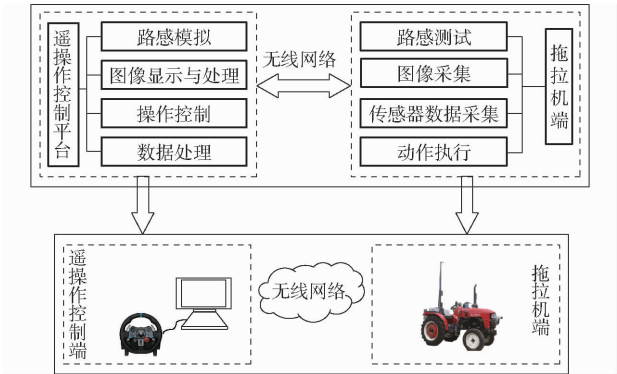


图 1 遥操作路感模拟系统框图

Fig. 1 Road feel simulation system for teleoperation

2 拖拉机路感产生机理分析

路感就是车辆在直线行驶或转向的过程中,驾驶员通过方向盘感受到的路面传递给方向盘的力矩信息。一般分为 3 类^[16]:直线行驶中的路感、回正过程中的路感和转向过程中的路感。本文在利用 Logitech G29 转向操纵装置对路感进行模拟时不希望操纵装置震动较大,同时转向操纵装置具备良好的回正性能,因此本文仅对转向过程中的路感进行研究。

方向盘的转向阻力矩 T_d 主要由理想反馈力矩 T_{fb} 、摩擦力矩 T_{fr} 、限位控制力矩 T_{lim} 、阻尼控制力矩 T_{damp} 组成^[16-17],即

$$T_d = T_{fb} + T_{fr} + T_{lim} + T_{damp} \quad (1)$$

理想反馈力矩即车辆在行驶时反馈给驾驶员的力矩,它反映了车辆的行驶状态、路面的附着情况以及回正力矩的变化等。该力矩是方向盘转向阻力矩的重要组成部分,很多路感的设计都是围绕该力矩展开。

摩擦力矩主要是由转向系统中各个机械部件之间的相互摩擦造成的,该力矩并不能反映出车辆和路面的相关信息,不属于有效的路感信息,可以说是有效路感的“噪声”,但在对路感模拟要求较高的系统中不可忽视。

车辆在高速行驶的过程中,方向盘较小的转角变化可能就会使车辆失去稳定性,为了避免这一现象的发生,在路感力矩中加入了阻尼控制力矩,对高速行驶中车辆的转向起阻碍作用。该力矩和方向盘的角速度和车速呈正比例关系,有

$$T_{damp} = C_{damp}(v)\omega$$

(2)

其中

$$C_{damp}(v) = \begin{cases} 0 & (v \leq v_1) \\ k_{damp}(v - v_1) & (v > v_1) \end{cases}$$

(3)

式中 $C_{damp}(v)$ ——与车速 v 有关的函数
 ω ——方向盘角速度 v_1 ——临界车速
 k_{damp} ——与车速相关的系数,用于调节阻尼

限位控制指的是转动方向盘可以达到的最大角度,在传统的转向系统中,驾驶员和方向盘直接接触,因此可以感受到方向盘的左右极限位置,而在遥操作系统中,限位控制需要重新设计,通过软件设计实现驾驶员对转动左右极限位置的感知。当方向盘转动到左右极限位置时引入参数 T_{lim} ,即

$$T_{lim} = \begin{cases} 0 & (|\theta_1| \leq \theta_{lim}) \\ k_{lim}(|\theta_1| - \theta_{lim}) & (|\theta_1| > \theta_{lim}) \end{cases}$$

(4)

式中 θ_1 ——方向盘转动角
 θ_{lim} ——方向盘左右极限位置对应转动角
 k_{lim} ——限位控制力矩系数

由于拖拉机行驶速度较低,可以不考虑阻尼控制力矩。而对于限位控制力矩,可以在 Logitech G29 方向盘中通过相关函数设置其左右极限从而使遥操作驾驶员感受到拖拉机方向盘的极限位置。因此,本文重点考虑理想反馈力矩和摩擦力矩,它们最终折算到方向盘上形成方向盘转向阻力矩,在第 4 节对方向盘转向阻力矩进行实测。

3 遥操作拖拉机路感测试与模拟系统设计

为了测试拖拉机在不同路面的路感为路感模拟提供数据支持,首先对现有拖拉机的转向系统进行改造,其中包括传感器与转向执行机构的安装等,同时设计了路感测试系统的软硬件,最后对 Logitech G29 方向盘进行二次开发来实现路感的模拟。

3.1 拖拉机转向执行机构改造

原有转向系统采用电机作为执行机构,并和齿轮系相结合来带动方向盘实现转向的方式,由于需要测试方向盘的转向阻力矩,因此在方向盘和转向电机之间安装扭矩传感器,如图 2 所示,传感器的下

端轴通过齿轮和电机的齿轮啮合,上端轴的齿轮作为主动轮和方向盘上的从动轮啮合,从而实现转向以及方向盘力矩的测量。



图 2 改造后的转向系统结构图

Fig.2 Structure diagram of modified steering system

该系统测量方向盘扭矩的原理为:给系统上电后,当转向电机带动传感器的轴转动时,传感器轴上端的主动轮带动方向盘的从动轮转动,由于方向盘转动过程中受到地面的阻力作用,因此传感器的轴会发生扭变,该传感器采用应变片电测技术,当传感器的轴发生扭变时应变片会产生电信号,将测得的电信号经过传感器内部电路放大等一系列处理后使之成为便于系统采集的电压信号。

原有转向电机小齿轮齿数为 17,模数为 3.5 mm,方向盘大齿轮齿数为 73,模数为 3.5 mm。选取最佳安装位置后,经过测量,传感器上端轴与方向盘转向轴的中心距为 165 mm,电机转轴与传感器下端轴的中心距为 65 mm,根据

$$d = mz$$

(5)

$$a = \frac{mz_1 + mz_2}{2}$$

(6)

式中 m ——齿轮模数 z ——齿轮齿数
 z_1 ——齿轮 1 齿数 z_2 ——齿轮 2 齿数
 d ——分度圆直径 a ——中心距

计算可得传感器上下轴齿轮齿数分别为 21 和 20。
为了能够精确地测量方向盘的转向阻力矩,传感器采用 JN-DN 型旋转(动态)扭矩传感器,该传感器多用于电动机、发动机、内燃机等旋转动力设备输出扭矩及功率的检测,具有检测精度高、稳定性好、抗干扰性强等优点。传感器量程为 $-5 \sim 5 \text{ N}\cdot\text{m}$,经过计算量程满足测量要求,为了便于采集,选用的微型 JN-DN 型传感器输出信号为 $1 \sim 5 \text{ V}$ 的模拟电压,且输出电压和力矩线性相关。

3.2 遥操作拖拉机路感测试系统设计

3.2.1 路感测试系统硬件优化设计

原有的车载控制 ECU 采用的是基于 ATMEGA8 处理器的 DM368 控制板,在发送指令时极易出现数据拥堵的情况,因此对其进行了更换。替代主

板需要满足的条件:①硬件接口具有至少 5 路模拟量输入接口,8 路开关量输出接口,具备 RS485 通信功能。②软件运行环境要求可以运行 Linux 操作系统,具备 RS485、开关量、模拟量、相应的底层 API 接口、支持多线程程序。为了满足上述要求,选取树莓派 4B 作为系统的主控制器,相比于之前的处理器,树莓派 4B 的性价比较高,同时具有体积较小、稳定高效等优点,多用于物联网、人工智能等产品开发,应用领域较为广泛^[18-19],同时选取 AI 扩展板、DO 扩展板以及 RS485 通信板,可以满足 8 路 AD 采集和开关量控制。车载控制系统结构如图 3 所示。遥操作驾驶员通过 NVR (网络硬盘录像机)回传的前置摄像机以及顶置摄像机的视频流来获取拖拉机周围的环境以及路面的种类,同时通过遥操作控制台发送指令实现对各个执行机构的控制。树莓派控制模块主要包括树莓派主控板、AD 采集板以及继电器开关控制板,实现对车轮转角、踏板位移以及方向盘转向矩信息的采集,并由 NVR 通过无线网络传输给遥操作端,其中对于方向盘转向阻力矩的采集仅在调试时采用树莓派,而在实测时采用基于 LabVIEW 设计的传感器数据实时读取平台。

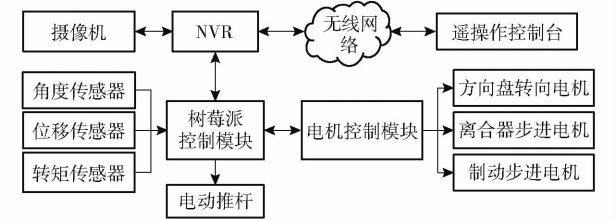


图 3 车载控制系统结构框图

Fig. 3 Structure diagram of on-board control system

3.2.2 路感测试系统软件设计

系统的主程序采用 C 语言编写,主程序流程如图 4 所示,程序开始时首先进行初始化,然后打开串口对串口的参数进行设置,包括端口号、波特率、数据位等设置,接着判断是否关闭串口,如果是,则关闭串口,运行结束;如果不是,则给树莓派上电后,运行程序 tractor_ctl,与树莓派进行通信,如果通信成功,则串口调试助手上显示“UART OK!”,此时可以通过串口发送相关操作指令,指令执行完成后会把相关数据发送到树莓派显示器的 Linux 终端上。

本文的路感实时数据采集软件基于 LabVIEW 开发,测试页面如图 5 所示。

3.3 遥操作拖拉机路感模拟系统设计

文献[20-23]表明路感力矩与车速以及方向盘的转向角相关,车速对于路感力矩的影响相对于转角较小,由于拖拉机是中低速行驶的车辆,因此车

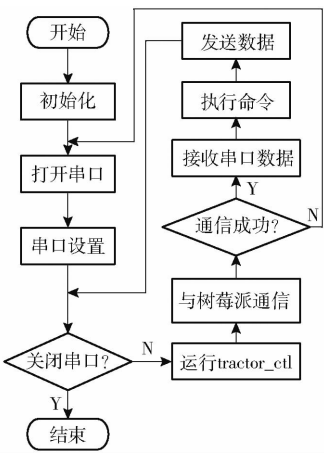


图 4 主程序流程图

Fig. 4 Flow chart of main program

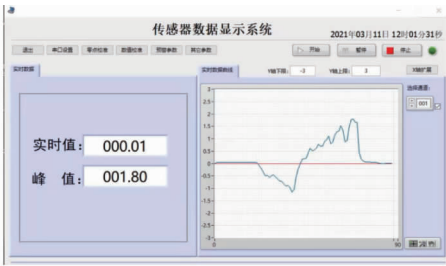


图 5 路感数据读取界面

Fig. 5 Interface of reading road feeling data

速对于转向路感的影响更是微乎其微,本文将在第 4 节对遥操作拖拉机不同车速下的转向阻力矩进行实测来验证这一结论。以草地路感模拟为例,路感模拟的过程如图 6 所示,首先进行程序初始化。然后检测草地路感模拟按钮是否被按下,如果是则调整路感为草地模式,同时读取 Logitech G29 转向操纵装置的转向角来实现模拟力矩的改变,直到检测

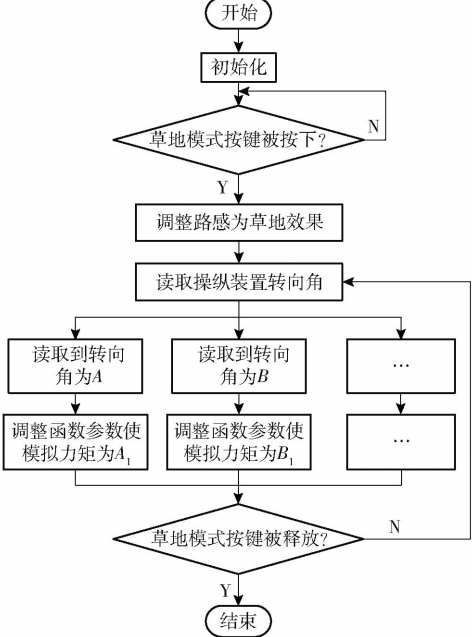


图 6 草地路感模拟流程图

Fig. 6 Simulation flow chart of road sense for grass

到草地模拟按钮被释放,则结束该模式下的路感模拟。其他路面路感模拟类似。

Logitech G29 转向操纵装置具备力反馈且反馈力大小可调的功能,将不同类型路面的模拟函数定义在 Logitech G29 转向操纵装置的按键上,如图 7 所示,行驶时通过摄像头的视觉反馈确定路面类型,然后通过按键切换,实现路感的“再现”。



图 7 方向盘按键功能制定
Fig. 7 Steering wheel key function formulation

4 遥操作拖拉机路感实测与路感模拟评价

选择转角作为路感力矩的影响因素,对拖拉机不同路面不同转角下的路感力矩进行实测,并将实测的转向阻力矩数据和转角的关系进行拟合,作为路感模拟的参考依据以便于 Logitech G29 方向盘进行路感的模式化设计。

4.1 遥操作拖拉机路感测试

4.1.1 实验方法

当拖拉机前轮与后轮平行时,此时方向盘转角为 0°,右转方向盘时所测转向阻力矩为正,左转方向盘所测力矩为负,发送转向指令使方向盘转动一周,便可以得到转向阻力矩随时间的变化关系,转向电机带动方向盘的转动为匀速圆周运动,方向盘转动一周为 360°,因此可以将转向阻力矩随时间的变化关系看作是转向阻力矩随角度的变化关系,通过 LabVIEW 将实验数据导出,并通过 Matlab 拟合出方向盘转角-转向阻力矩的关系曲线作为路感模拟的参考。

由于传感器和方向盘之间采用齿轮传动,因此传感器测量的转矩并非方向盘的转向阻力矩,方向盘转向阻力矩计算示意图如图 8 所示,其中 1、2 为传感器齿轮,齿数分别为 20 和 21,3、4 分别为转向电机齿轮和方向盘齿轮,齿数为 17 和 73,方向盘转向阻力矩和传感器所测转矩的关系为

$$T_d = T_{se} \frac{z_{st}}{z_{se}} \eta \tag{7}$$

式中 T_d ——方向盘转向阻力矩
 T_{se} ——传感器所测力矩

z_{st} ——方向盘齿轮齿数
 z_{se} ——传感器齿轮齿数
 η ——齿轮传动效率,通常取 0.98

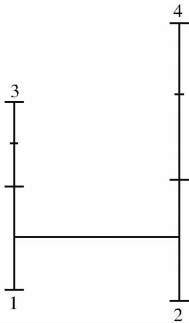


图 8 方向盘转向阻力矩计算示意图
Fig. 8 Diagram of steering wheel torque calculation diagram

为了测试系统的性能,进行实车测试之前在南京农业大学农机实验室内对拖拉机原地转向的力矩进行了实测,结果如图 9 所示。由图 9 可知,转角和转向阻力矩的关系较为复杂,且曲线波动较大,因此在实车实验时为了观察转向阻力矩的变化趋势需对力矩曲线进行平滑处理。

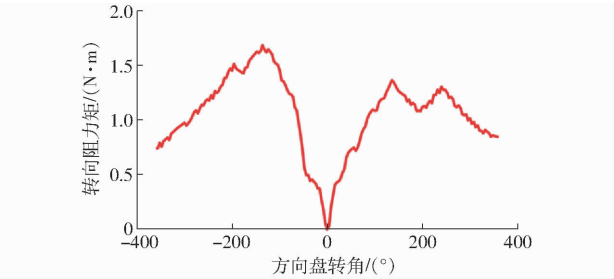


图 9 室内原地转向阻力矩曲线
Fig. 9 Curve of in-situ steering torque in laboratory

由文献[24]可知,拖拉机在作业环境下速度通常为 2 ~ 10 km/h,而在非作业环境下速度为 10 ~ 25 km/h。本文将水泥和石子路面作为遥操作拖拉机在非作业模式下路感模拟的参照,将草地和土路面作为遥操作拖拉机在作业模式下路感模拟的参照。

4.1.2 草地路感实测

拖拉机在作业环境下通常处于直线行驶状态并且车速较低,而转向一般发生在地头,可以看作是原地转向。本文对拖拉机在草地上原地转向和行驶过程中的转向路感进行了实测,其中在对行驶中的拖拉机进行路感实测时,车速取为 5、8、10 km/h,实验场景如图 10 所示,选取长度约为 100 m 的草坪作为实验场地来完成测试。

实验结束后利用 Matlab 对实验数据进行处理,并采用 Curve Fitting 工具对关系曲线进行拟合,结果如图 11 所示。由图 11 可知,拖拉机在草地上原地转向和行驶转向时最大转向阻力矩分别为 1.95 N·m 和 1.67 N·m,无论是左转或者是右



图 10 草地路感实测场地

Fig. 10 Site of measuring grassland road feeling

转,转向阻力矩都随着转角的增大而增大,但是都在方向盘处于 $100^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 时开始回落且在 200° 时有小幅度的上升,同时不同车速下转向阻力矩相差不大,拖拉机行驶转向时的转向阻力矩比原地转向时略小。

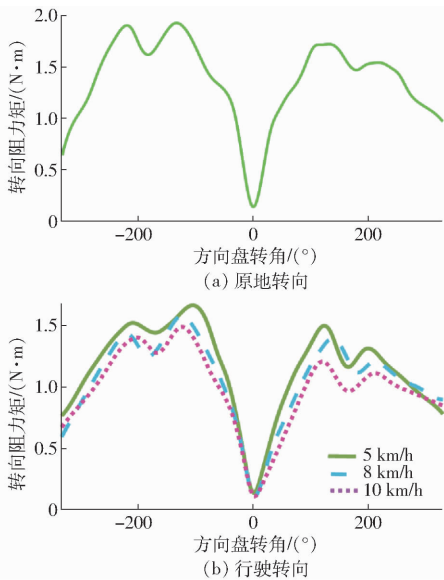


图 11 草地原地及行驶转向阻力矩曲线

Fig. 11 Curves of in-situ and running steering torque on grass

4.1.3 水泥路面路感实测

拖拉机在非作业环境下行驶时车速一般较高,因此在进行拖拉机行驶转向路感测量时拖拉机的行驶速度分别选取 10、15、20、25 km/h,用石灰粉标记转向的地方,如图 12 所示,当拖拉机到达参考线时完成转向操作。



图 12 水泥路面路感实测场地

Fig. 12 Site of measuring cement road feeling

实验结果如图 13 所示。由图 13 可得,拖拉机在水泥路面原地转向和行驶转向最大转向阻力矩分别为 $3.97 \text{ N}\cdot\text{m}$ 和 $2.71 \text{ N}\cdot\text{m}$,与草地上转向阻力矩的变化趋势相同,转向阻力矩都随着转角的增大而增大,并在方向盘转角处于 $100^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 时开始有所回落且在 200° 时有小幅度的上升,而行驶状态下的转向阻力矩明显小于原地转向。由图 13b 可得,车速对转向阻力矩的影响较小,最大相差 $0.5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。通过比较水泥路面和草地的实测数据可知,水泥路面所测得的转向阻力矩明显大于草地。

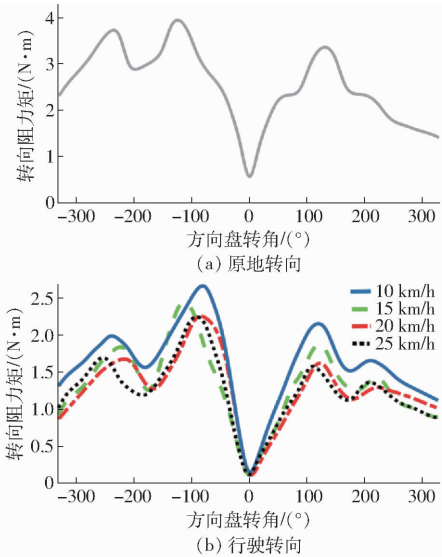


图 13 水泥路面原地及行驶转向阻力矩曲线

Fig. 13 Curves of in-situ and running steering torque on cement road

4.2 遥操作拖拉机路感模拟与评价

参考不同路面的力矩曲线,将不同路面转角-转向阻力矩变化关系写入转向操纵装置后,定义各个路面的模式切换按钮,对草地和水泥路面的路感模拟展开评价,实验场景如图 14 所示。



图 14 路感模拟实验场景

Fig. 14 Scene of road feel simulation test

分别在草地和水泥路面进行地头转向实验和直角转弯实验,拖拉机行驶轨迹如图 15 所示。

路感的评价方法包括客观评价和主观评价两种常见的评价方法。客观评价是将一些参数作为路感评价的参考指标,为路感评价提供数据支持。一般

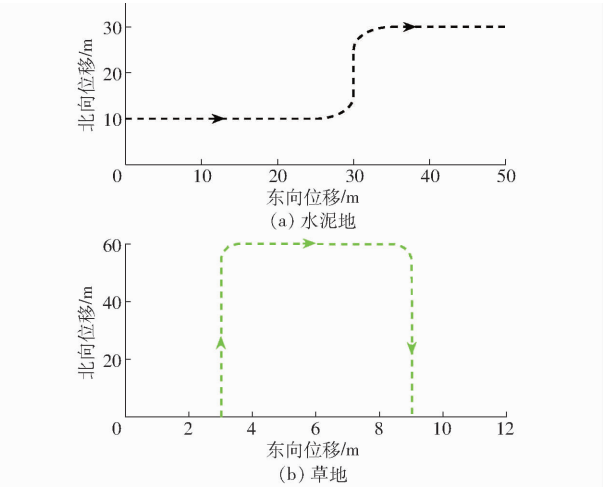


图 15 拖拉机行驶轨迹
Fig.15 Movement track of tractor

将中心操纵、反馈力矩水平和梯度、力反馈表现等参数作为评价路感的指标^[25],只需将各个参数控制在一定的范围内,驾驶员就可以获得理想的路感。由于客观评价中部分参数的测量有一定困难,因此本文采取主观评价的方法对基于 Logitech G29 方向盘模拟的路感展开评价,评价指标如表 1 所示。

表 1 主观评价指标
Tab.1 Subjective evaluation indexes

评价指标	主观感受
轻便性	路感轻重满意度
真实度	路感随路面类型、方向盘转角等变化满意度
转矩刚度	路感随转向角变化满意度
平稳性	路感连续、突变、抖动满意度
回正性	撒手后方向盘回正性满意度

具体评价方法如下:选取从未接触过遥操作系统的驾驶员 6 名,年龄 20 ~ 30 岁之间,其中女性 1 名,每个人都通过 Logitech G29 转向操纵装置远程操控完成左右转弯 3 次,针对路感模拟的轻重、转矩刚度以及平稳性展开评价,满分 10 分,取每个人 3 次评价得分的平均值作为此驾驶员的评分,再求 6 个人每一项的评分均值作为该项评价指标的得分。由于 Logitech G29 转向操纵装置本身具备良好的回正性能,因此对于转向的回正性无需评价。轻便性、转矩刚度、平稳性、真实度得分分别为 8.5、7.1、6.3、6.7。通过 Logitech G29 转向操纵装置模拟出的路感评分均在 6.3 ~ 8.5 分之间,验证了该方法模拟路感的可行性。

5 结论

(1)基于一台已经搭建完成的遥操作拖拉机进行了转向系统改造,实现了转向路感的测试,并采用 Logitech G29 方向盘式转向操纵装置对路感进行设计,完成了路感的模拟。

(2)对拖拉机在不同路面的路感进行实测,实验结果表明,转向阻力矩随着转角的增大而增大,并在方向盘转角处于 100° ~ 120°时开始回落且在转角在 200°左右有小幅度的上升。通过 Logitech G29 转向操纵装置对遥操作拖拉机路感展开模拟,各项评价指标得分均在 6.3 ~ 8.5 分之间,表明了该方法模拟路感的可行性。

参 考 文 献

[1] 孙景彬,楚国评,潘冠廷,等. 遥控全向调平地履带拖拉机设计与性能试验[J]. 农业机械学报,2021,52(5):358-369. SUN Jingbin, CHU Guoping, PAN Guanting, et al. Design and performance test of remote control omnidirectional leveling hillside crawler tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 358-369. (in Chinese)

[2] 薛金林,卫瑶瑶,闫嘉,等. 基于无线网络的拖拉机遥操作系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(8):395-402. XUE Jinlin, WEI Yaoyao, YAN Jia, et al. Design of wireless network for tractors based on teleoperation system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 395-402. (in Chinese)

[3] 赵春江,魏传省,付卫强,等. 静液压传动拖拉机定速巡航控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(4):359-365. ZHAO Chunjiang, WEI Chuansheng, FU Weiqiang, et al. Design and experiment of cruise control system for hydrostatic transmission tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 359-365. (in Chinese)

[4] 薛金林,闫嘉,夏成楷,等. 拖拉机遥操作系统优化与性能试验[J]. 农业机械学报,2019,50(8):386-393. XUE Jinlin, YAN Jia, XIA Chengkai, et al. Optimization and performance experiments of teleoperation system for tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 386-393. (in Chinese)

[5] AMBERKAR S, BOLOURCHI F, DEMERLY J, et al. A control system methodology for steer by wire systems[C] // Edinburgh:SAE International, 2018.

[6] 从光好,刘彦琳,赵林峰. 线控转向系统路感模拟及硬件在环仿真试验[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2018,41(11):1479-1483. CONG Guanghao, LIU Yanlin, ZHAO Linfeng. Simulation of road feel and hardware-in-the-loop test for steer-by-wire system[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2018, 41(11):1479-1483. (in Chinese)

[7] KIM C J, JANG J H, OH S K, et al. Development of a control algorithm for a rack-actuating steer-by-wire system using road information feedback[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering, 2008, 222(9): 1559-1571.

[8] BAHAI N J R. Direct current measurement based steer-by-wire systems for realistic driving feeling[C] // IEEE International

- Symposium on Industrial Electronics. IEEE, 2009: 1023 – 1028.
- [9] 从光好. 线控转向路感模拟及传动比特性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
CONG Guanghao. Research on simulation of steering-by-wire feeling and transmission ratio[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [10] 谢有浩, 赵林峰, 陈无畏, 等. 低附着路面条件的线控转向系统路感模拟与回正控制研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(16): 148 – 158.
XIE Youhao, ZHAO Linfeng, CHEN Wuwei, et al. Road feel and return control on low friction coefficient road for steer-by-wire vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(16): 148 – 158. (in Chinese)
- [11] 刘彦琳, 王凯, 谢有浩. 线控转向系统路感模拟与硬件在环试验研究[J]. 车辆与动力技术, 2018(2): 41 – 46.
LIU Yanlin, WANG Kai, XIE Youhao. A study on control of road feel simulation and hardware-in-the-loop test for steer-by-wire system[J]. Vehicle & Power Technology, 2018(2): 41 – 46. (in Chinese)
- [12] 赵含雪, 李芳, 吴艳, 等. 线控转向系统路感模拟与主动回正控制[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(4): 64 – 72.
ZHAO Hanxue, LI Fang, WU Yan, et al. Road feel simulation and active return control strategy of steer-by-wire system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(4): 64 – 72. (in Chinese)
- [13] 杨学平, 蒋超宇, 薛秀丽, 等. 新能源汽车线控转向系统路感模拟[J]. 系统仿真技术, 2018, 14(1): 40 – 42.
YANG Xueping, JIANG Chaoyu, XUE Xiuli, et al. Road feeling simulation of steer-by-wire system for new-energy vehicles[J]. System Simulation Technology, 2018, 14(1): 40 – 42. (in Chinese)
- [14] 解后循, 高翔. 基于路感的电动液压助力转向系统优化设计[J]. 农业装备与车辆工程, 2015, 53(2): 25 – 30.
XIE Houxun, GAO Xiang. Optimal design of electro-hydraulic power steering system based on road feel[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2015, 53(2): 25 – 30. (in Chinese)
- [15] 魏波, 徐颖. 基于线控转向的路感仿真模拟应用[J]. 机械工程与自动化, 2018(4): 6 – 8.
WEI Bo, XU Ying. Road-feeling simulation application based on steer-by-wire[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2018(4): 6 – 8. (in Chinese)
- [16] EMER H, WOLF G P, PETER D, et al. Future eleerical stering systems realizations with safety requirements[C] // Edinburgh: SAE International, 2018.
- [17] 胡延平, 朱天阳, 蒋鹏飞, 等. 线控转向系统路感摩擦补偿研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2020, 43(5): 584 – 589, 595.
HU Yanping, ZHU Tianyang, JIANG Pengfei, et al. Research on road feel friction compensation of SBW system[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2020, 43(5): 584 – 589, 595. (in Chinese)
- [18] 赵林峰, 从光好, 邵文彬, 等. 线控转向车辆转向盘转矩特性研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(24): 138 – 146.
ZHAO Linfeng, CONG Guanghao, SHAO Wenbin, et al. Study on steering torque characteristic for steer-by-wire vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(24): 138 – 146. (in Chinese)
- [19] 胡宏伟. 基于树莓派的宠物型机器人研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
HU Hongwei. Research on pet-type robot based on Raspberry Pi[D]. Changchun: Jilin University, 2020. (in Chinese)
- [20] 余志生. 汽车理论[M]. 5版. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [21] BERTOLLINI G P, HOGAN R M. Applying driving simulation to quantify steering effort preference as a function of vehicle speedy[R]. SAE Paper, 1999.
- [22] 宗长富, 麦莉, 王德平, 等. 基于驾驶模拟器的驾驶员所偏好的转向盘力矩特性研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(8): 1001 – 1005.
ZONG Changfu, MAI Li, WANG Deping, et al. Study on steering effort preference of drivers based on driving simulator[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(8): 1001 – 1005. (in Chinese)
- [23] TIAN Jie, WU Jin, CHEN Ning, et al. Research on road feeling control of steer-by-wire system[C] // 2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, IEEE. 2011: 4349 – 4353.
- [24] 韩科立, 朱忠祥, 毛恩荣, 等. 基于最优控制的导航拖拉机速度与航向联合控制方法[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 165 – 170.
HAN Keli, ZHU Zhongxiang, MAO Enrong, et al. Joint control method of speed and heading of navigation tractor based on optimal control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 165 – 170. (in Chinese)
- [25] 周煜国. 载人月球车转向操纵控制及路感模拟技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
ZHOU Yuguo. Research on steering maneuver control and road felling simulation technology of lunar rover vehicle[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)