

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.046

多因素影响下拖拉机侧向稳定性模型实验

张 硕¹ 李 臻¹ 朱忠祥¹ 毛恩荣¹ 光岡宗司² 井上英二²

(1. 中国农业大学现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083; 2. 日本九州大学农学部, 福岡 8120025)

摘要: 针对拖拉机斜坡直线行驶工况, 基于拖拉机比例模型和 3D 打印技术, 建立了模型拖拉机轮胎-地面载荷实验测试系统。以斜坡上侧车轮-地面载荷为主要参考量, 提出了针对拖拉机前、后轮的侧向稳定评价指标(拖拉机前、后轮的斜坡上侧车轮载荷分配系数)。采用田口实验设计方法, 选择前后轮轮胎类型、前配重质量、前后轮距和机具位置 6 个影响因素作为控制因子, 以 E 级和 F 级随机路面作为噪声因子, 设计了 6 因子混合水平的田口实验方案, 并对实验结果进行信噪比和均值的方差分析。实验结果表明, 对拖拉机斜坡上侧前、后轮侧向稳定性影响最大的控制因子分别是前配重质量和后轮距; 得出基于前、后轮侧向稳定性评价指标的拖拉机最优配置, 为拖拉机的稳定性优化设计提供了一定参考, 也为拖拉机防侧翻预警控制提供了理论基础。

关键词: 拖拉机比例模型; 田口实验设计; 随机路面; 侧向稳定性; 最优配置

中图分类号: S219.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)10-0358-06

Scale Model Experiment on Lateral Stability of Tractor Affected by Multi-factors

ZHANG Shuo¹ LI Zhen¹ ZHU Zhongxiang¹ MAO Enrong¹ MITSUOKA Muneshi² INOUE Eiji²

(1. Beijing Key Laboratory of Optimized Design for Modern Agricultural Equipment, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka 8120025, Japan)

Abstract: Along with the dramatically growing use of agricultural tractors, the associated vehicle lateral stability has been found to greatly affect operation efficiency and human safety. According to characteristics of the low speed driving condition of tractor on slope ground, a scaled experimental system for measuring the tire-ground reaction force was built. By applying the 3D printing technology, a scale-model-tractor attached with implement and the random terrain surfaces for the tractor to pass over was developed. Taking the uphill wheel load of the tractor as the main reference parameter, the lateral stability evaluation indexes for tractor's front and rear wheels were proposed. The choice of tire type, ballast weight, front and rear track widths, and implement height were selected as the control factors, while introducing the terrain roughness in classes E and F as the noise factors. Employing the Taguchi design of experiment, factorial significances were investigated by the corresponding ANOVA analysis. The experimental results showed that tractor frontal ballast had the greatest impact on the front-wheel-based tractor lateral stability, while the rear track width predominantly determined the rear-wheel-based one. Furthermore, an optimal tractor configuration was given by taking into account the stability indexes for both front and rear wheels. The approach provided a reference for tractor stability optimization design and a theoretical basis for further tractor anti-rollover control.

Key words: tractor scale model; Taguchi experimental design; stochastic road; lateral stability; optimal configuration

引言

随着农业机械化和智能化的飞速发展,非道路

车辆尤其是拖拉机在农业生产中的应用越来越广泛。由于拖拉机质量大、工作负荷大、作业环境比较复杂,车辆侧翻和侧滑极易发生,严重影响了拖拉机

收稿日期: 2017-07-24 修回日期: 2017-08-16

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2017QC191)和国家重点研发计划项目(2016YFD0700504)

作者简介: 张硕(1989—),男,博士生,主要从事车辆智能控制研究,E-mail: shuo891001@163.com

通信作者: 朱忠祥(1976—),男,副教授,博士生导师,主要从事农业机械设计、仿真以及自动控制研究,E-mail: zhuzhongxiang@cau.edu.cn

作业效率,威胁驾驶员安全。据统计,在全世界拖拉机致死事故中,大多涉及到拖拉机侧向稳定性和安全性问题,半数以上是由拖拉机侧翻引起的^[1-2]。因此,研究影响其侧向稳定的影响因素,对于优化拖拉机配置,提高其安全性有着重要的意义。

近年来,国内外关于拖拉机侧向稳定性和安全预警的研究已经逐步展开。主要是通过建立多自由度的非线性数学模型、结合仿真分析或实车实验来研究拖拉机的侧翻特性^[3-6]。有的学者将虚拟仿真技术与实验相结合,采用改进的横向载荷转移率(Load transfer ratio, LTR)、侧翻预测时间(Time to rollover, TTR)、静态稳定系数(Static stability factor, SSF)等方法评价拖拉机侧向稳定性,也有学者基于拖拉机前轮转角、轮胎与地面的接触状态等来研究不同阶段的拖拉机侧翻特性,为侧翻预警提供研究基础,提高拖拉机的驾驶安全性^[7-12]。

目前,针对拖拉机侧向稳定性的研究主要是借鉴汽车横向稳定性的研究方法,通过理论研究结合实车实验验证的方式来进行,理论研究的局限性较大,不能反映拖拉机的实际侧翻特性。另外,在拖拉机上侧向稳定性实验,很难实现轮胎、轮距和配重等因素的更换和调整,而且斜坡工况下的田间实验危险性较高,极大地限制了拖拉机侧向稳定性及安全预警控制技术的发展。在近些年的研究中,也有少数涉及到了模型拖拉机的研究^[13-16],但是研究不够深入,实验方法也比较单一。本文基于拖拉机比例模型,结合田口实验设计方法^[17],在已知拖拉机配置和设计参数的基础上,探究影响拖拉机侧向稳定性的主要因子,对拖拉机进行优化配置,以期提高侧向稳定性。

1 实验系统与评价

针对斜坡直线行驶工况,设计并搭建了模型拖拉机轮胎-地面载荷实验测试系统,采用斜坡上侧车轮-地面载荷为主要参考量,提出拖拉机侧向稳定性评价指标。

1.1 实验系统构成

如图 1 所示,实验系统主要包括拖拉机比例模型、模拟斜坡路面和数据采集系统等。基于 YANMA 某小型拖拉机,按照 1:12.4 的缩放比例,采用 3D 打印技术制作了拖拉机比例模型和悬挂机具(旋耕机)。模拟斜坡路面是由与地面有一定夹角的基板、直线行驶导轨和随机路面实体组成。数据采集系统主要包括计算机、电路板、数据记录仪。

如图 1 所示,2 条直线行驶导轨平行分布在与水平面保持一定夹角的基板上,基板与水平面夹角

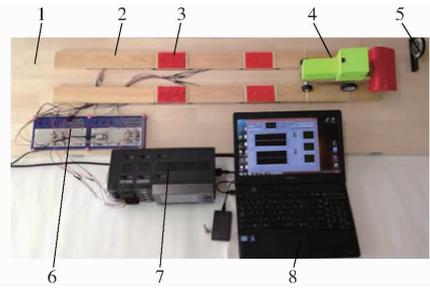


图 1 实验系统

Fig. 1 Experimental system

1. 基板 2. 直线行驶导轨 3. 随机路面实体 4. 拖拉机比例模型 5. 量角器 6. 电路板 7. 数据记录仪 8. 计算机

为 17.1° ,随机路面实体等间距分布在直线行驶导轨上。模型拖拉机采用电动机进行后轮驱动,其轮距、轮胎类型、配重和农具悬挂位置均可调,基本参数如表 1 所示。

表 1 拖拉机比例模型基本参数

Tab. 1 Key parameters of scale model tractor

参数	数值
长/m	0.20
宽/m	0.10 ~ 0.16
高/m	0.17
拖拉机质量/kg	0.68
机具质量/kg	0.15
前轴可摆动角度/ $(^\circ)$	11

基于田间斜坡低速运输的行驶路面,参照缩放比例和实验系统设计,采用 3D 打印技术制作了长度为 10 cm 的 E 级和 F 级随机路面实体,打印的随机路面实体如图 2 所示。

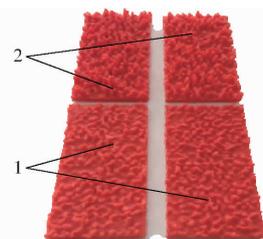


图 2 3D 打印加工的随机路面实体

Fig. 2 Random road surfaces processed by 3D printer

1. E 级随机路面 2. F 级随机路面

在直线行驶导轨的测试区即铺设 3D 打印随机路面实体的导轨部分,3D 打印随机路面实体的下方布置了一层盖板,盖板下方紧密贴合布置了力传感器,随机路面实体、盖板和力传感器紧密贴合,力传感器安装背面拆分如图 3 所示。

在实验过程中,参考拖拉机田间斜坡运输速度和模型缩放比例,模型拖拉机以 0.21 m/s 的速度通过模拟斜坡路面,前、后轮依次通过不同等级的随机路面实体,由力传感器采集到的轮胎地面反

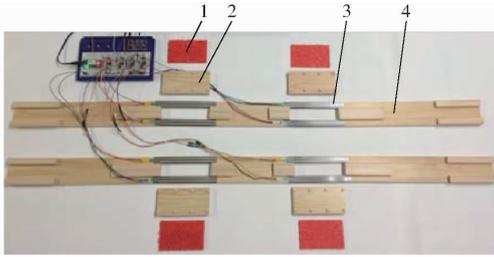


图3 力传感器安装示意图

Fig.3 Installation diagram of force sensor

1. 随机路面实体 2. 盖板 3. 力传感器 4. 直线行驶导轨

力信号经数据采集仪记录并发送到计算机,用于数据处理。

1.2 侧向稳定性评价

在传统的车辆侧向稳定性研究中,多采用LTR、TTR、SSF等来评价拖拉机的侧向稳定性。本文重点研究的是斜坡直线行驶工况下的拖拉机动态侧向稳定性,基于斜坡上侧车轮-地面载荷,提出了一种斜坡上侧车轮载荷分配系数 i_f 、 i_r 为评价指标,表达式为

$$i_f = \frac{F_{f_up}}{F_{f_up} + F_{f_down}} \quad (i_f \in [0, 1]) \quad (1)$$

$$i_r = \frac{F_{r_up}}{F_{r_up} + F_{r_down}} \quad (i_r \in [0, 1]) \quad (2)$$

式中 i_f ——拖拉机前轮的斜坡上侧车轮载荷分配系数

i_r ——拖拉机后轮的斜坡上侧车轮载荷分配系数

F_{f_up} 、 F_{f_down} ——拖拉机前轮的斜坡上侧、下侧车轮载荷,N

F_{r_up} 、 F_{r_down} ——拖拉机后轮的斜坡上侧、下侧车轮载荷,N

由式(1)和式(2)可知,较小角度的斜坡直线行驶工况下,在拖拉机前进过程中,左右两侧车轮载荷平均分配时,安全性最高,斜坡上侧车轮载荷分配系数为0.5;当斜坡上侧车轮抬起时,斜坡上侧车轮载荷分配系数为0,向下发生侧翻的可能性较高;当斜坡下侧车轮抬起时,斜坡上侧车轮载荷分配系数为1,向下发生侧翻的可能性较低;当两侧车轮同时抬起时, i_f 、 i_r 分母为0,无法计算,此时,拖拉机双轮离地,危险程度最高。对式(1)和式(2)进行变换,并引入不同侧翻阶段的拖拉机侧向稳定性评价指标

$$i_f = \begin{cases} 100 \min \left(\frac{F_{f_up}}{F_{f_up} + F_{f_down}} \right) & (F_{f_up} \neq 0) \\ Am + Bn & (F_{f_up} = 0) \end{cases} \quad (3)$$

$$i_r = \begin{cases} 100 \min \left(\frac{F_{r_up}}{F_{r_up} + F_{r_down}} \right) & (F_{r_up} \neq 0) \\ Am + Bn & (F_{r_up} = 0) \end{cases} \quad (4)$$

式中 A ——仅拖拉机斜坡上侧车轮离地的危险系数,取-1

B ——拖拉机斜坡上、下侧车轮同时离地的危险系数,取-2

m ——一次实验中仅拖拉机斜坡上侧车轮离地的次数

n ——一次实验中拖拉机斜坡上、下侧车轮同时离地的次数

如式(3)和式(4)所示,在评价系统中,以拖拉机斜坡上侧车轮受力为参考指标。在拖拉机斜坡上侧车轮接地良好的情况下,不论斜坡下侧车轮是否离地,都认为拖拉机侧向稳定性较好,不易发生侧翻。此时,以斜坡上侧车轮最接近离地的情况,即 i_f 或 i_r 的最小值来评价拖拉机侧向稳定性。

一旦斜坡上侧车轮离地,即 $F_{f_up} = 0$ 或 $F_{r_up} = 0$,拖拉机侧翻的危险程度变高,容易发生侧翻。在这种情况下,如果斜坡下侧轮胎接地良好,即 $F_{f_down} \neq 0$ 或 $F_{r_down} \neq 0$ 时,此时定义拖拉机危险系数为 $A = -1$,拖拉机发生侧翻的可能性较高;如果斜坡下侧轮胎离地,即 $F_{f_down} = 0$ 或 $F_{r_down} = 0$ 时,拖拉机发生侧翻的可能性进一步提高,危险系数增加,定义此时的侧翻危险系数加倍,即 $B = -2$ 。

2 实验方案设计

采用田口实验方法对影响拖拉机侧向稳定性的配置进行分析与优化设计。田口实验由日本学者田口玄一提出,是一种基于正交实验和信噪比评价的优化设计方法,可以打破传统正交实验次数多、实验步骤重复率高的缺点^[18-22]。以具有代表性的少数实验,来优化设计对目标影响较大的因子,并基于不同噪声因子的响应数据,得到影响因子的最佳组合。

2.1 实验因素和水平

在前人研究的基础上,选择前、后轮轮胎类型、前配重质量、前轮距、后轮距和机具位置6个对拖拉机侧向稳定性影响较大的影响因子^[23-26],设计了6因子混合水平田口实验。其中,后轮轮胎类型为2水平,其余因子为3水平;以E级和F级随机路面作为噪声因子。实验方案如表2所示。其中,R1、R2表示2种不同类型的后轮轮胎,F1、F2、F3表示3种不同类型的前轮轮胎,轮胎实物如图4所示。

2.2 评价方法

在田口实验方法中,始终都需要使信噪比最大化。在信噪比计算的过程中,有望大、望目和望小3种方法^[17]。综合本文提出的拖拉机侧向稳定性评价指标,选择望目特性的信噪比计算方法。另外,为

表 2 田口实验设计方案

Tab.2 Scheme of Taguchi design of experiment

序号	后轮 轮胎 类型	前轮 轮胎 类型	前配重 质量/ kg	前轮距/ m	后轮距/ m	机具 位置
1	R1	F1	0	0.10	0.10	低
2	R1	F1	0.08	0.13	0.13	中
3	R1	F1	0.16	0.16	0.16	高
4	R1	F2	0	0.10	0.13	中
5	R1	F2	0.08	0.13	0.16	高
6	R1	F2	0.16	0.16	0.10	低
7	R1	F3	0	0.13	0.10	高
8	R1	F3	0.08	0.16	0.13	低
9	R1	F3	0.16	0.10	0.16	中
10	R2	F1	0	0.16	0.16	中
11	R2	F1	0.08	0.10	0.10	高
12	R2	F1	0.16	0.13	0.13	低
13	R2	F2	0	0.13	0.16	低
14	R2	F2	0.08	0.16	0.10	中
15	R2	F2	0.16	0.10	0.13	高
16	R2	F3	0	0.16	0.13	高
17	R2	F3	0.08	0.10	0.16	低
18	R2	F3	0.16	0.13	0.10	中

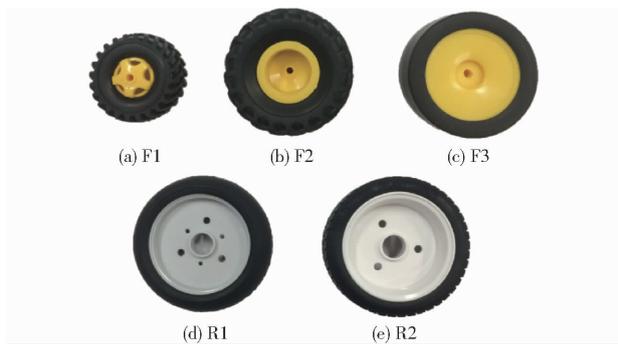


图 4 前、后轮轮胎类型

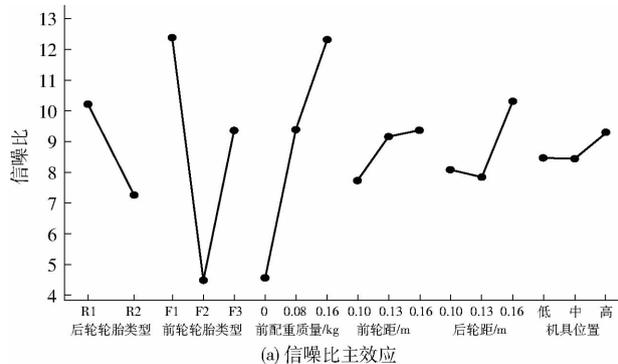
Fig.4 Types of front and rear wheel tyres

了降低实验结果中奇异点或者实验次数不足对结果分析的影响,在优先考虑信噪比分析的基础上,增加对均值的分析,以得到更好的优化配置。

3 实验结果与分析

3.1 实验结果

采用表 2 所示的实验方案进行实验,采集实验结果并计算响应。根据田口实验数据处理和望目特



(a) 信噪比主效应

性信噪比计算方法^[17]以及式(3)、(4)的评价指标所计算的实验结果转换为非负数,转换后的实验结果如表 3 所示。

表 3 实验结果

Tab.3 Experimental results

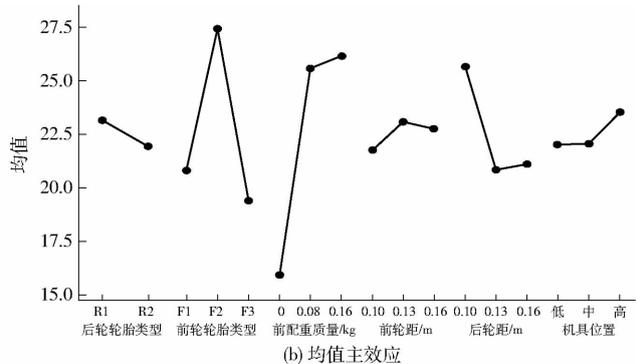
序号	i_j		i_r	
	E 级路面	F 级路面	E 级路面	F 级路面
1	21.00	13.00	17.00	15.00
2	22.61	27.53	22.49	14.00
3	18.00	20.00	32.86	17.00
4	30.88	1.00	28.56	9.00
5	46.26	23.20	34.16	25.00
6	50.76	29.00	22.05	17.00
7	20.00	11.00	25.33	12.00
8	24.09	14.00	22.08	18.00
9	25.10	19.00	31.14	20.00
10	21.00	10.00	42.66	24.60
11	36.19	19.00	19.00	9.00
12	24.38	17.00	27.65	15.00
13	26.37	7.00	37.27	21.00
14	37.92	18.00	22.17	11.00
15	38.71	20.00	22.19	21.00
16	21.00	9.00	31.00	22.37
17	22.57	15.00	39.24	21.00
18	31.71	20.00	22.20	9.00

3.2 结果分析

为了更全面地反映各个因子对拖拉机侧向稳定性的影响和所占比重,选择信噪比和均值的主效应分析,观测不同实验设计下实验因子对拖拉机侧向稳定性影响的显著性。前轮实验分析结果如图 5、6 所示。其中,图 5a 和图 5b 分别为基于拖拉机前轮评价指标 i_j 的信噪比和均值主效应,图 6a 和图 6b 分别为基于拖拉机后轮评价指标 i_r 的信噪比和均值主效应。

分别对实验结果的均值和信噪比进行方差分析,统计结果如表 4 和表 5 所示。

由表 4 可知,在拖拉机前轮实验结果的信噪比



(b) 均值主效应

图 5 i_j 实验结果

Fig.5 Experimental results of i_j

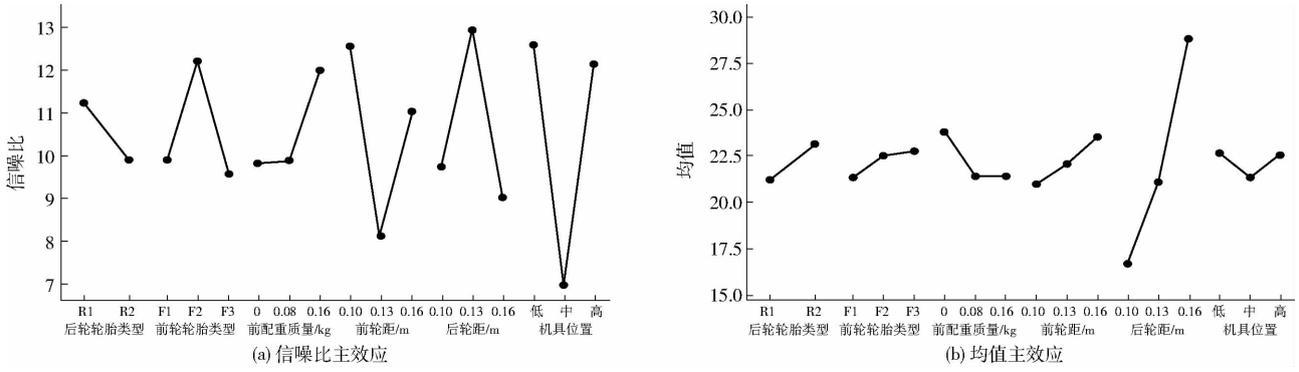


图6 i_r 实验结果

Fig.6 Experimental results of i_r

表4 i_f 均值和信噪比方差分析

Tab.4 ANOVA analysis of means and S/N of i_f

方差来源	自由度		平方和		均方和		F		P	
	信噪比	均值	信噪比	均值	信噪比	均值	信噪比	均值	信噪比	均值
后轮轮胎类型	1	1	39.61	6.46	39.61	6.46	3.06	0.25	0.131	0.633
前轮轮胎类型	2	2	190.30	221.29	95.16	110.65	7.36	4.33	0.024	0.069
前配重质量	2	2	182.00	392.95	91.00	196.50	7.03	7.68	0.027	0.022
前轮距	2	2	9.98	5.42	4.99	2.71	0.39	0.11	0.696	0.901
后轮距	2	2	22.30	86.50	11.15	43.25	0.86	1.69	0.469	0.262
机具位置	2	2	2.82	8.90	1.41	4.45	0.11	0.17	0.899	0.844

表5 i_r 均值和信噪比方差分析

Tab.5 ANOVA analysis of means and S/N of i_r

方差来源	自由度		平方和		均方和		F		P	
	信噪比	均值	信噪比	均值	信噪比	均值	信噪比	均值	信噪比	均值
后轮轮胎类型	1	1	8.09	16.71	8.09	16.71	0.12	2.19	0.743	0.190
前轮轮胎类型	2	2	24.25	6.96	12.12	3.48	0.18	0.46	0.842	0.654
前配重质量	2	2	18.48	22.85	9.24	11.43	0.13	1.50	0.877	0.297
前轮距	2	2	60.58	19.47	30.29	9.87	0.44	1.29	0.663	0.341
后轮距	2	2	51.87	450.14	25.93	225.10	0.38	29.46	0.701	0.001
机具位置	2	2	117.74	6.10	58.87	3.05	0.86	0.40	0.470	0.687

方差分析中,前轮轮胎类型和前配重质量的显著性和 F 值较高且差别较小。在均值的方差分析中,前配重质量的显著性较高 ($P = 0.022 < 0.05$)。因此,在前轮的侧向稳定性影响因子中,前配重质量的影响最大,前轮轮胎类型次之,其余控制因子影响较小。

由表5可知,在拖拉机后轮实验结果的信噪比方差分析中,各影响因子的显著性 P 值均大于 0.05,显著性较差,且 F 值普遍较小。此时,无法仅从信噪比的方差分析中得到优化配置。从均值的方差分析来看,后轮距显著性 $P = 0.001$,远小于 0.05,显著性较高,其他因子 P 值远大于 0.05;后轮距 $F = 29.46$,远大于其他因子。因此,综合各因子的均值和信噪比的方差分析来看,后轮距对拖拉机后轮侧向稳定性的影响远大于其他因子,后轮轮胎类型次之,其余控制因子影响较小。

综上所述,根据 i_r ,选择对拖拉机前轮侧向稳定性影响较大的控制因子为前配重质量和前轮轮胎类型,其中,前配重质量的3个水平中,选择最优水平为 0.16 kg;前轮轮胎类型3个水平中,选择最优水平为 F2。根据 i_r ,选择对拖拉机后轮侧向稳定性影响较大的控制因子为后轮距和后轮轮胎类型,其中,后轮距的3个水平中,选择最优水平为 0.16 m;后轮轮胎类型2个水平中,选择最优水平为 R1。另外,剩余的2个控制因子:前轮距和机具位置对 i_f, i_r 的影响都不明显,综合拖拉机的实用性、配置的经济性和实际使用的安全性能出发,分别选择 0.13 m 水平的前轮距和低水平的机具位置。由此,得到拖拉机的最优配置如表6所示。

4 结论

(1) 针对拖拉机斜坡直线行驶工况,提出了以

表 6 拖拉机最优配置实验结果

Tab. 6 Experimental results of desired tractor configurations

评价 指标	后轮轮胎 类型	前轮 轮胎类型	前配重 质量/kg	前轮距/ 后轮距/ m	机具 位置	
i_f, i_r	R1	F2	0.16	0.13	0.16	低

斜坡上侧车轮载荷分配系数 i_f, i_r 为参考量的拖拉机侧向稳定性评价指标。

(2) 基于田口实验设计方法, 设计了 6 因子混合水平正交实验, 研究了在 E 级和 F 级随机路面下, 拖拉机前、后轮的侧向稳定性, 分析得出对拖拉机前、后轮侧向稳定性影响最大的控制因子分别是前配重质量和后轮距。

(3) 根据本文提出的侧向稳定性评价指标, 确定了拖拉机的最优配置, 为拖拉机配置的优化设计提供了一定的参考。

参 考 文 献

- 1 ABUBAKAR M S, AHMAD D, AKANDE F B. A review of farm tractor overturning accidents and safety[J]. *Pertanika Journal of Science & Technology*, 2010, 18(2): 377 - 385.
- 2 LINDA J, MATTESON A. Trucks involved in fatal accidents fact book 2006[R]. Ann Arbor: The University of Michigan Transportation Research Institute, 2008: 188 - 193.
- 3 PREVIATI G, GOBBI M, MASTINU G. Mathematical models for farm tractor rollover prediction[J]. *International Journal of Vehicle Design*, 2014, 64(2/3/4): 280 - 303.
- 4 张文华, 张维强, 鲁植雄, 等. 基于虚拟样机技术的轮式拖拉机侧倾稳定性研究[J]. *机械强度*, 2017(1): 138 - 142.
- 5 ZHANG Wenhua, ZHANG Weiqiang, LU Zhixiong, et al. Research of wheeled tractor roll stability based on virtual prototyping technology[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2017(1): 138 - 142. (in Chinese)
- 6 梁山, 郑剑, 朱勤, 等. 非线性车辆模型混沌振动的仿真与实验研究[J]. *机械强度*, 2012(1): 6 - 12.
- 7 LIANG Shan, ZHENG Jian, ZHU Qin, et al. Numerical and experimental investigations on chaotic vibration of nonlinear vehicle model over road excitation[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2012(1): 6 - 12. (in Chinese)
- 8 马晓. 不同轮胎模型对重型载货汽车整车性能仿真的影响分析[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- 9 MA Xiao. Analysis of influence of different tire models on performance simulation for heavy-duty truck[D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese)
- 10 National Highway of Traffic Safety Administration U. S. Department of Transportation. Two active systems for enhancing dynamic stability in heavy truck operations[R]. *Trucks*, 1998.
- 11 CHEN Bo, PENG Hui. Differential-braking-based rollover prevention for sport utility vehicles with human-in-the-loop evaluations[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2001, 36(4 - 5): 359 - 389.
- 12 YU H. Heavy duty vehicle rollover detection and active roll control[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2008, 46(6): 451 - 470.
- 13 朱天军, 李飞, 宗长富, 等. 重型半挂车多目标稳定性控制策略[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(12): 32 - 37.
- 14 ZHU Tianjun, LI Fei, ZONG Changfu, et al. Multi-objective stability control strategy of heavy tractor semi-trailer[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(12): 32 - 37. (in Chinese)
- 15 王健, 余贵珍, 张为, 等. 基于滑模观测和模糊推理的车辆侧翻实时预警技术[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(6): 1 - 6.
- 16 WANG Jian, YU Guizhen, ZHANG Wei, et al. Real-time rollover prediction for vehicle based on principles of sliding mode and fuzzy inference system[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(6): 1 - 6. (in Chinese)
- 17 朱天军, 宗长富, 吴炳胜, 等. 基于改进 TTR 算法的重型车辆侧翻预警系统[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(10): 88 - 94.
- 18 ZHU Tianjun, ZONG Changfu, WU Bingsheng, et al. Rollover warning system of heavy duty vehicle based on improved TTR algorithm[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(10): 88 - 94. (in Chinese)
- 19 ZENG Dechao, ZHU Yonghua, ZHOU Yiming. A mathematical model for sideways overturning performance of tractor and trailer combinations[J]. *Journal of Terramechanics*, 1989, 26(3): 193 - 200.
- 20 MARCO B, GIOVANNI C, RENATO V, et al. A parametric approach for evaluating the stability of agricultural tractors using implements during side-slope activities[J]. *Contemporary Engineering Sciences*, 2015, 28: 1289 - 1309.
- 21 YANG J H, SAKAI H, MURAYAMA S, et al. Side over-turning of articulated-frame skidder running along a contour line[J]. *Journal of the Japanese Forestry Society*, 1991, 73: 1 - 10.
- 22 YISA M, TERAHO H, KUBOTA M. Dynamics of tractor-implement combinations on slopes[C]//ARBIP, 1995.
- 23 TAGUCHI G. Introduction to quality engineering[M]. New York: McGraw-Hill, 1990: 191.
- 24 张风宝, 杨明义, 李占斌. 微小区土壤侵蚀试验中田口方法代替全因子设计的可行性分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(13): 1 - 9.
- 25 ZHANG Fengbao, YANG Mingyi, LI Zhanbin. Feasibility analysis of replacing full factorial design with Taguchi method in mini-plot soil erosion experiments[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(13): 1 - 9. (in Chinese)
- 26 王艾萌, 温云. 田口法在内置式永磁同步电机优化设计中的应用[J]. *华北电力大学学报: 自然科学版*, 2016, 43(3): 39 - 44.
- 27 WANG Aimeng, WEN Yun. Application for optimal designing of interior permanent magnet synchronous machines by using Taguchi method[J]. *Journal of North China Electric Power University: Natural Science Edition*, 2016, 43(3): 39 - 44. (in Chinese)
- 28 JEYAPAL R, SHAHABUDEEN P, KRISHNAIAH K. Quality management research by considering multi-response problems in the Taguchi method—a review[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005, 26(11 - 12): 1331 - 1337.
- 29 ROSA J L, ROBIN A, SILVA M B, et al. Electro-deposition of copper on titanium wires: Taguchi experimental design approach[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(3): 1181 - 1188.
- 30 陈学军. 田口方法的思想与原理[J]. *电子产品可靠性与环境试验*, 1995, 20(2): 34 - 37.
- 31 CHEN Xuejun. The principle and thought of Taguchi method[J]. *Electronic Product Reliability and Environmental Testing*, 1995, 20(2): 34 - 37. (in Chinese)
- 32 FRIMBERGER M. Influences of parameters at vehicle rollover[C]//International Body Engineering Conference & Exposition, Detroit, MI, USA: SAE, 2000: 1 - 15.
- 33 LINES J A, PEACHEY R O, COLLINS T S. Predicting the ride vibration of an unsuspended tractor using the dynamic characteristics of rolling tyres[J]. *Journal of Terramechanics*, 1992, 29(3): 307 - 315.
- 34 NGUYEN V N, MATSUO T, KOUMOTO T, et al. Measurement of the properties of agricultural tire for tractor dynamic analyses (Part 2)—determination of drive tire stiffness and damping from dynamic tests[J]. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery*, 2009, 71: 55 - 62.
- 35 CROLLA D A, HORTON D N L. Factors affecting the dynamic behaviour of higher speed agricultural vehicles[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1984, 30: 277 - 288.