

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2023.01.009

# 智能农机动力系统作业工况匹配与换挡优化

程帅铭, 钟勇, 王镛

(福建省汽车电子与电驱动重点实验室, 福建 福州 350118)

**摘要:** 利用车辆经济性与动力性软件 CRUISE, 根据 FJ1004 智能无人驾驶拖拉机的动力传动系统搭建了整车模型, 通过柴油机的特性曲线分析匹配动力特性, 依据工况特征加载拖挂特性, 模拟机具消耗。通过工况仿真分析了拖拉机整车的动力性与经济性, 与实验数据对比分析, 最高车速误差为-0.76%; 犁耕油耗和旋耕油耗误差分别为-1.2%和-1.3%。最后通过分析柴油 AMT 拖拉机工作特性, 结合 MIGA 算法对换挡策略进行优化, 确定最优功率和燃油经济性的换挡规律, 在田间转移工况下油耗优化 9.21%; 在保证需求动力性的轻负载作业工况下油耗优化 1.28%。为后续自适应工况换挡策略提供参考与优化方向。

**关键词:** 拖拉机动力匹配; 作业工况; 换挡优化; 遗传算法

中图分类号: S232.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2023)01-0055-08

## Working condition matching and gear shift optimization of intelligent agricultural machinery power system

CHENG Shuaiming, ZHONG Yong, WANG Yong

(Fujian Key Laboratory of Automotive Electronics and Electric Drive, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** The vehicle economy and power software CRUISE was used to build a vehicle model according to the power transmission system of FJ1004 intelligent unmanned tractor. The dynamic characteristics were analyzed and matched by the characteristic curve of the diesel engine, and the trailer characteristics were loaded according to the working condition characteristics to simulate the tool consumption. The dynamics and economy of the tractor were analyzed through the simulation of working conditions, and the maximum speed error was -0.76% compared with the experimental data. The fuel consumption errors of ploughing and rotary tillage were -1.2% and -1.3%, respectively. Finally, by analyzing the working characteristics of diesel AMT tractor, combined with MIGA algorithm, the shifting strategy was optimized, and the shifting law of optimal power and fuel economy was determined, and the fuel consumption was optimized by 9.21% under field transfer conditions. The fuel consumption is optimized by 1.28% under light load working conditions that ensure demand dynamics. This research provides model reference and optimization direction for subsequent adaptive working condition shifting strategies.

**Keywords:** tractor power matching; working condition; gear shift optimization; genetic algorithm

农用拖拉机作业性能的优劣很大程度上取决于动力传动系统以及整车控制策略, 近年来学者对于农用拖拉机做了很多的研究<sup>[1]</sup>。但大多数是基于单一部件或者着重于农机具控制, 如孙冬野等<sup>[2]</sup>研究建立了拖拉机动力学模型, 对升降挡

的控制进行了优化, 提高了重负荷作业下换挡的舒适度。张建友等<sup>[3-4]</sup>建立了拖拉机的整车传动系统匹配模型, 考虑犁耕工况下的工作阻力, 仅对变速箱速比进行了优化。由于农田作业的特殊性, 陈坤等<sup>[5]</sup>匹配了拖拉机不同工况下的动力性

收稿日期: 2022-11-15

基金项目: 中央引导地方发展专项(2020L3014)

第一作者简介: 程帅铭(1997—), 男, 江西萍乡人, 硕士研究生, 研究方向: 农机智能控制。

与经济性指标,但未对整车控制进行优化。以上研究缺少在不同作业工况下,基于整车动力系统模型对换挡策略的控制。

本研究基于 Cruise 与 Isight 联合仿真,以 FJ1004 无人驾驶拖拉机作为研究对象,通过分析不同作业工况特性建立了整车动力系统模型,进而对拖拉机 AMT 换挡规律优化进行了相关研究。

1 拖拉机整车动力传动模型的建立

1.1 拖拉机整车技术规格参数

研究对象为 FJ1004 柴油四驱轮式无人驾驶拖拉机,通过搭载疆驭农机自动驾驶系统完成无人驾驶作业。整车搭载玉柴 YC4DK110 发动机,采用 6 挡 AMT 变速箱,同时搭配有高低速换挡变速箱。Cruise 作为车辆分析动力性和经济性的通用仿真软件,基于拖拉机整车的动力传动系统参数在软件中搭建每个部件的模块,整车基本技术规格如表 1 所示。

表 1 拖拉机基本参数

Tab.1 Basic parameters of the tractor

参数		数值
整车尺寸/mm	长	4 600
	宽	1 985
	高	2 764
迎风面积/m <sup>2</sup>		6.24
空气阻力系数		0.6
轴距/mm		2 297
轮距/mm	前轴	1 520
	后轴	1 520
整车整备质量/kg		3 640
最大总质量/kg		3 910
轮胎规格	前轮	12.4~24
	后轮	16.9~34
油箱容积/L		160
前后轮举升系数	前轮	0.05
	后轮	0.04
挂钩到前轴距离/mm		3 229
发动机功率(额定)/kW		81
发动机转速/(r·min <sup>-1</sup> )		2 200

续表 1

参数	数值
变速器传动效率	0.985
主减速器传动比	6.4
差速器各轴转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	0.01
差速器效率	0.95
制动器摩擦系数	0.25
制动器活塞缸表面积/mm <sup>2</sup>	5 500
轮胎摩擦系数	0.98
轮胎惯性冲量/(kg·m <sup>2</sup> )	4

1.2 柴油机特性分析与匹配

图 1 为合作厂家提供数据拟合后的柴油机外特性曲线图,从曲线分析可得,功率  $P$  随着转速的上升先是保持上升,到额定转速附近接近平稳;转矩与比油耗在不同转速下都比较平缓,田间工作过程中负载变化比较频繁,柴油机特点适配于拖拉机工作条件<sup>[6]</sup>,将发动机的外特性与万有特性曲线 MAP 图导入 CRUISE 发动机模块中,为后续整车匹配分析提供基础。

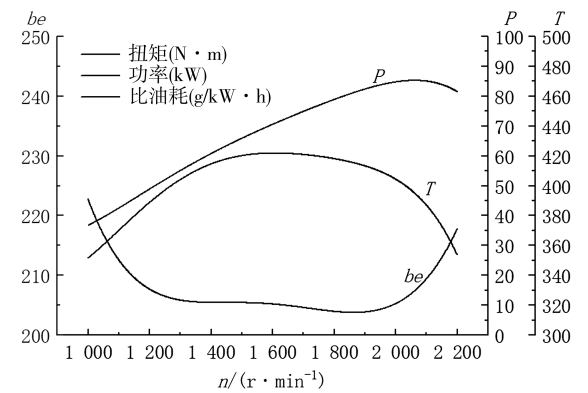


图 1 柴油机外特性曲线

Fig.1 Exterior characteristic curve of diesel engine

2 拖拉机作业工况分析与建模

2.1 拖拉机拖挂农机运输阻力分析

拖拉机在运输作业工况下,可根据路面状况选择高低速挡进行运输,此时拖挂农具进行转场,并未入土,可将拖挂农具视为车辆质量的一部分,此工况下农具运输阻力如式(1):

$$F_G = (m_1 + m_2) \cdot g \cdot (f \cdot \cos\theta + \sin\theta) \quad (1)$$

式中: $F_G$  为拖挂机具的行驶阻力,N; $m_1$  为拖拉机

质量,kg; $m_2$  为拖挂机具重量,kg; $g$  为重力加速度, $m/s^2$ ; $f$  为滚动阻力系数; $\theta$  为坡度角, $(^\circ)$ 。

2.2 犁耕作业工况的负载阻力分析

犁耕作为农用拖拉机具有代表性的作业方式,可表征拖拉机在田间作业过程的工作特性。拖拉机犁耕作业速度在 5~10 km/h,拖拉机拖挂农机具进行耕地工作。由于机具入土将产生牵引阻力,根据农机具种类与规格,土壤类型的不同按式(2)进行具体分析:

$$F_T = k_n B_n = 0.1 \cdot k \cdot Z \cdot b_n \cdot h \tag{2}$$

式中: $F_T$  为拖拉机犁耕阻力,N; $k_n$  为机具单位幅宽的阻力,N/m; $B_n$  为机具工作幅宽,m; $k$  为土壤比阻,kPa; $Z$  为犁铧数,个; $b_n$  为犁体耕作幅宽,cm; $h$  为耕深,cm。

2.3 旋耕作业工况的负载阻力分析

旋耕作业工况下,拖拉机在拖挂了农机具同时需通过 PTO (动力输出) 经过万向节传递旋转

扭矩带动机具入土旋转。拖拉机旋耕作业所受的人土阻力为:

$$F_p = 10k_\lambda \cdot k_j \cdot B_n \cdot h \tag{3}$$

式中: $F_p$  为旋耕阻力,N; $k_\lambda$  为土壤的旋耕比阻修正系数; $k_j$  旋耕比阻常数项,取常数值为 110, kPa; $B_n$  为耕幅,m; $h$  为耕深,cm。

PTO 轴旋转所消耗功率根据当前 PTO 的转矩与负荷进行计算,如式(4)所示:

$$P_{out} = n_p \cdot T_p \tag{4}$$

式中: $n_p$  为 PTO 转速, r/min; $T_p$  为 PTO 转矩,N·m。

2.4 作业工况加载

在 CRUISE 中没有拖挂机具的模块,建立牵引子系统模块来仿真模拟运输阻力  $F_G$ ,通过内置的 Mechanical Consumer 模块中的扭矩消耗模式模拟机具入土的负载阻力  $F_T$  与  $F_p$ ,上述模块中的功率消耗模式模拟 PTO 轴的功率消耗  $P_{out}$ 。Cruise 中搭建的拖拉机作业工况模型如图 2 所示。



图 2 整车动力系统模型  
Fig.2 Vehicle power system model

- 1) 田间运输工况加载:此工况仅激活牵引子系统模块,农具作为拖挂质量负载  $m_2$  添加。
- 2) 犁耕作业工况加载:激活牵引子系统模块;通过图 2 中的机具土壤阻力负载模块加载犁耕作业负载阻力  $F_T$  消耗的扭矩。根据式(2)加载不同犁具、不同耕深的作业负载阻力。
- 3) 旋耕作业工况加载:激活牵引子系统模块;通过图 2 中的机具土壤阻力负载模块加载旋耕作业负载阻力  $F_p$  消耗的扭矩。依据旋耕机种类与旋耕耕深由式(3)加载旋耕作业负载阻力。

由于旋耕作业的特殊性,通过图 2 中的 PTO 模块加载动力输出轴工作消耗的功率  $P_{out}$ 。

2.5 经济性与动力性仿真

根据试验场所可提供的试验项目进行仿真工况的匹配,试验项目如表 2 所示,根据表 3 与式(1)计算牵引运输阻力  $F_G$  值;由表 4 与式(2)计算机具入土的负载阻力  $F_T$  与  $F_p$  分别为 10 125 N 和 19 359 N;由双法兰扭矩传感器和 PTO 轴转速传感器的测试值计算 PTO 负载功率。

表 2 试验项目类型  
Tab.2 Types of test items

作业特征	犁耕	旋耕	运输
指标类型	经济性	经济性	动力性
农具名称	1L-330 铧犁	1GQZ-220 旋耕机	无
农具质量/kg	240	400	0
耕幅/cm	90	221	0
耕作速度/ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	6	5	3~37
作业挡次	低速 5 挡	低速 6 挡	高低速 6×2 挡
植被	原茬地	熟地	无
土壤类型	沙壤土	沙瓢土	道路
土壤比阻/ kPa	50	73	无
作业深度/cm	20~25	10~14	0

在经济性仿真中,犁耕作业工况加载拖挂子系统,设置犁耕农具入土阻力  $F_T$ ,犁耕平均作业速度为 6 km/h。通过 Cycle Run 文件夹的任务计算等速作业工况下的燃油消耗量,犁耕作业燃油消耗曲线如图 3 所示。由仿真结果可知,在 6 km/h 的犁耕作业下使用低速 5 挡的油耗为 16.39 kg/h。

在旋耕作业工况下同时加载拖挂子系统,旋耕农具入土阻力  $F_p$ ,PTO 扭矩消耗模块,旋耕作业燃油消耗曲线如图 3 所示。由仿真结果可知,在 5 km/h 的旋耕作业下,使用低速 6 挡的油耗为 17.60 kg/h。

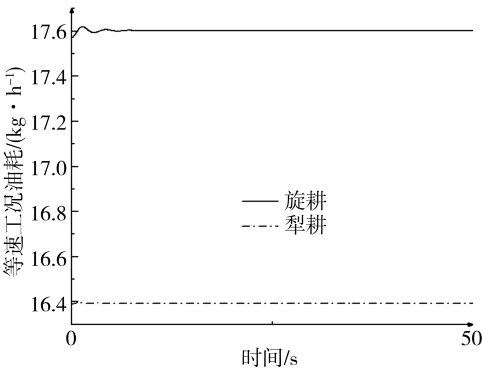


图 3 仿真油耗曲线

Fig.3 Simulation of fuel consumption curves

拖拉机整车动力性仿真中,采用静态模式,车辆处于空载道路行驶状态,拖拉机在发动机最大转速时,获得每个挡位所能达到的最高转速。在 Cruise 中通过稳态行驶工况 (Constant Drive) 中的 Maximum Velocity 任务计算车辆每个挡位的最高车速,计算结果如表 3 所示。

表 3 各挡最高速度仿真数据

Tab.3 Simulation data of maximum speed of each gear

挡位类型	( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )					
	1 挡	2 挡	3 挡	4 挡	5 挡	6 挡
低速挡	2.90	4.08	5.59	7.36	8.62	10.36
高速挡	12.64	14.20	17.77	21.88	24.37	37.42

3 田间试验与分析

3.1 田间作业试验

试验在某农业机械鉴定站试验产地进行。田间作业试验场土壤为沙壤土、沙瓢土等,配套机具为液压翻转犁、旋耕机等,作业质量符合当地农艺的要求,且负荷系数符合试验的要求,场地室温 27.4 ℃,气压 102.1 kPa。试验依据 GB/T 3781—2006《农业拖拉机 试验规程》、GB/T 15370.2—2012《农业拖拉机 通用技术条件 第 2 部分: 50 kW~130 kW 轮式拖拉机》、GB/T 24648.1—2009《拖拉机可靠性考核》进行拖拉机燃油经济性和动力性的相关试验。试验车速与仿真车速的对比如图 4 所示,设定状况下的犁耕与旋耕的油耗值如表 4 所示。

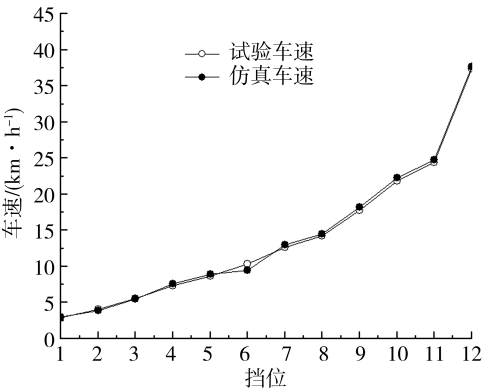


图 4 仿真与试验的各挡位最高车速对比曲线

Fig.4 Comparison curve of the maximum speed of each gear in simulation and test



表 4 燃油消耗试验数据  
Tab.4 Fuel consumption test data

耗油负荷指标	犁耕	旋耕
耗油率/( kg · h <sup>-1</sup> )	12.66	12.74
平均作业负荷系数	76.3	71.4

3.2 试验数据分析

根据耗油率与平均作业负荷系数的比值求出全负荷系数下犁耕试验油耗数据为 16.59 kg/h,旋耕试验油耗数据为 17.84 kg/h。仿真与试验对比结果如表 5,由表 5 可知,建立的拖拉机整车模型与实际结果偏差在允许范围之内,验证了模型的有效性,其中作业阻力与 PTO 负载消耗模块可正确反映作业过程中机具的功率消耗方向,可基于此仿真对拖拉机田间作业的控制策略进行开发。

表 5 模型仿真与试验数据对比  
Tab.5 Comparison of model simulation and experimental data

试验参数	试验值	仿真值	相对误差/%
最高车速/( km · h <sup>-1</sup> )	37.71	37.42	-0.76
犁耕油耗/( kg · h <sup>-1</sup> )	16.59	16.39	-1.20
旋耕油耗/( kg · h <sup>-1</sup> )	17.84	17.60	-1.30

4 AMT 换挡规律的优化

在目前的研究中,以换挡参数的数量区分单参数、双参数和多参数换挡规律等。单参数换挡过程中,变速器仅根据车速进行换挡,控制结构简单,驾驶员在行驶过程中无法利用油门踏板对换挡策略进行干预。在实际应用中可适用的行驶工况单一,无法满足拖拉机复杂工况的需求,双参数换挡规律在现有车辆上应用最为广泛,通常以车速和加速踏板油门开度作为控制参数,可满足驾驶员对车辆操控性能的要求,同时稳定可靠,易于实现,在其他研究<sup>[7~10]</sup>中,多参数换挡规律是在双参数换挡规律的基础上添加加速度参数、油门开度变化率等体现驾驶意图的控制参数,对于田间作业工况复杂的拖拉机,容易在作业过程中出现动力不足或频繁换挡的情况,综合考虑本文选择不同负载工况下的油门开度、车速作为双参数

换挡规律的控制参数。

4.1 多岛遗传算法优化

在 AMT 换挡优化中本文采用多岛遗传算法 (MIGA)。遗传算法是以全局最优为目标的优化算法,区别于传统遗传算法的主要特点是,每个个体种群被划分为若干个称为“岛屿”的亚种群。所有传统的遗传操作都是在每个亚群上单独进行的。假设个体可在岛之间迁徙,具有迁徙能力的为精英个体,保持优化参数解的多样性,提高了种群整体的交叉与变异概率,使得算法可以跳出局部最优,达到全局最优的效果。具体操作方法是每个岛屿中选择一些个体并定期迁移到不同的岛屿。此操作称为“迁徙”。迁徙过程由两个参数控制:迁徙间隔是每次迁徙之间的世代数,迁徙率是迁徙时从每个岛屿迁徙的个体的百分比。多岛遗传算法进行参数寻优,其中设置种群数为 10,岛数为 10,遗传代数为 10,迭代次数为 1 000 次。遗传算法过程如图 4 所示。

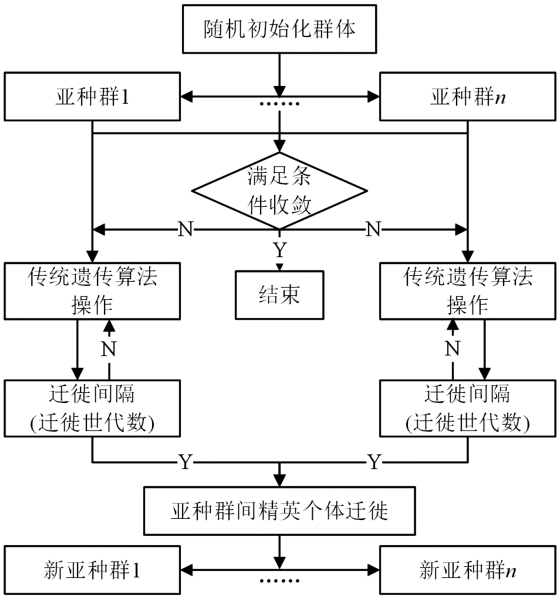


图 5 多岛遗传算法流程图

Fig.5 Flowchart of multi-island genetic algorithm

通过 Cruise-Isight 联合仿真实现 AMT 换挡规律的优化,首先确定拖拉机所处的负载工况,同时仿真预设滑转率不会大幅度突变,选择换挡规律曲线中的升挡车速、降挡车速、以及油门开度作为优化变量的输入参数,建立分析拖拉机燃油经济性的循环工况仿真任务,改变变速器控制模块的输入变量,将仿真任务结果中的百公里油耗作为经济性评价指标。

4.2 田间转移工况下的换挡规律优化

当农机仅用于运输和驾驶,拖拉机并未拖挂机具入土,PTO 模块处于关闭状态,此时将拖拉机工况定义为田间转移及道路运输工况,在仿真任务中,关闭机具入土牵引拖挂模块以及 PTO 负载模块,模拟道路行驶循环工况,此时优化目标为行驶过程尽可能减少燃油的消耗,达到提高车辆经济性的目的。在 Cruise 中可根据选择高速挡(6~12 挡)的升、降挡车速以及油门开度作为优化输入变量;以循环工况中燃油经济性作为目标函数,同时为了避免跳挡,频繁换挡,换挡曲线冲突的情况,设置高挡的降挡车速必须高于高挡的最小车速;同一挡位下随着油门开度的增加,升、降挡车速保持不变或者加大,保证换挡的平顺性。整个联合仿真流程如图 6 所示。

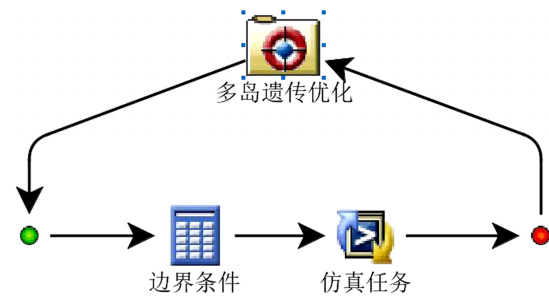


图 6 联合仿真优化流程

Fig.6 Co-simulation optimization process

整体优化任务结构为调用 Cruise 中的仿真任务,通过 Isight 使用 MIGA 优化算法产生新值并再次导入工况任务中,对比优化前后的目标函数值,获取全局最优的参数数值继而得到经济性换挡规律参数。优化过程中的变量为每个挡位下不同开度的升挡车速  $v_{up}$ 、换挡车速  $v_{down}$  以及对应油门开度区间  $\theta_T$ :

$$X=[v_{up},v_{down},\theta_T] \tag{5}$$

经济性目标函数(百公里油耗)数学模型为:

$$\min \left[ F_c=Q_s=\frac{g_e}{3\ 672\gamma\eta_T}\left(G_s\cdot f+\frac{C_D A v_\alpha^2}{21.15}+G_s\cdot i+\delta\frac{G}{g}\ddot{x}\right) \right] \tag{6}$$

式中: $\gamma$  为燃油的重度, N/L;  $\eta_T$  为传动效率;  $G_s$  为拖拉机与机具的重量, N;  $f$  为滚动阻力系数;  $C_D$  为空气阻力系数;  $A$  为车辆迎风面积,  $m^2$ ;  $v_\alpha$  为车速, km/h;  $i$  为坡度,  $^\circ$ ;  $\ddot{x}$  为汽车加速度,  $m/s^2$ ;  $\delta$  为汽车旋转质量换算系数。

由于换挡过程中需保证正常行驶的动力性

能,避免跳挡问题设置换挡规则条件,小油门开度下的换挡速度大于大油门开度下的换挡速度,两挡位之间的升挡速度大于降挡速度,油门开度区间分为 10 个。

$$v_{\theta_n}\leq v_{\theta_{n+1}};v_{up}>v_{down};\theta_{T_n}=[10(n-1),10n];n\in[1,10] \tag{7}$$

联合仿真生成的优化前后换挡曲线如图 7 和图 8 所示,将换挡参数设置量导入 Cruise 中的变速器控制模块,在田间转场循环工况下,拖拉机优化前后的百公里油耗如表 7 所示。

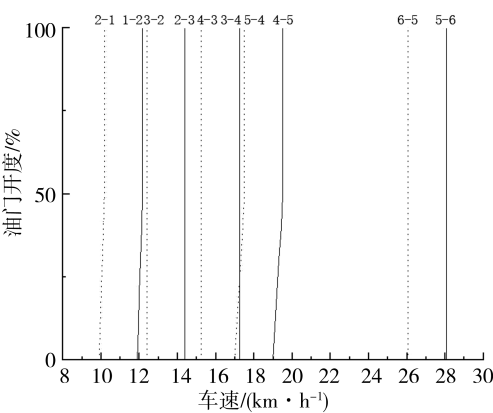


图 7 优化前田间转移工况下的换挡规律

Fig.7 Shifting law under field transfer conditions before optimization

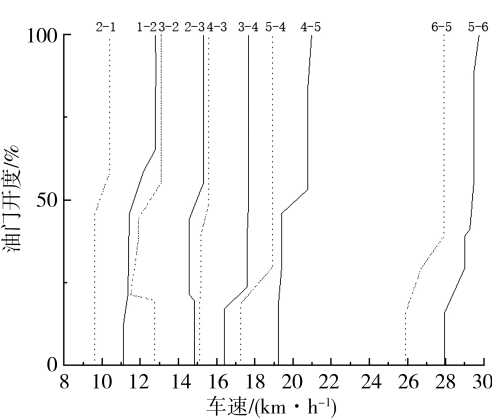


图 8 优化后田间转移工况下的换挡规律

Fig.8 Shifting law under field transfer conditions after optimization

4.3 轻负载作业工况下的换挡规律优化

拖拉机在稳定的作业如播种、中耕施肥等工况中,入土深度浅(0~20 cm),滑移率与滑转率较小且较为稳定,负载消耗低(0~70 kW),定义为轻负载工况。在 Cruise 仿真任务中建立轻负载作业循环工况,激活牵引拖挂子系统同时设置 PTO

负载消耗功率为 30 kW。拖拉机在轻负载情况下,阻力相对小,对速度有一定要求,在保证作业效果下尽量提高速度,减少燃油消耗。此时优化变量同样以变速器控制模块(1~6 挡)的升、降挡曲线的升挡、降挡车速以及油门开度作为优化变量,基于作业动力需求设置整车动力性能指标作为优化的约束条件;具体性能指标为全负载加速至 6 挡最大车速(10.36 km/h)的时间。优化目标函数为作业工况下的百公里油耗。在保证足够的动力性能下得到燃油消耗低的综合性换挡规律。优化变量和目标函数与上述 4.2 节中相同,须添加优化的约束条件为:

$$t = \frac{1}{3.6} \sum_{n=1}^6 \int_{v_{n-1}}^{v_n} \frac{\delta_{n-1} m}{F_{t_{n-1}} - f \cdot G_s - \frac{C_D A}{21.15} V^2} dv +$$
$$\int_{v_n}^{v_{n+1}} \frac{\delta_n m}{F_{t_n} - f \cdot G_s - \frac{C_D A}{21.15} V^2} dv \leq t_0 \quad (8)$$

式中: $F_t$  是对应挡位的最大驱动力,N; $\delta_n$  是对应挡位的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ; $V_n$  为每挡的升挡速度, $V_0=0, V_6=10.36 \text{ km/h}; t_0=6 \text{ s}$ 。

在作业工况下的优化前后换挡曲线如图 8 和图 9 所示,采用综合性换挡规律前后的燃油消耗如表 7 所示。

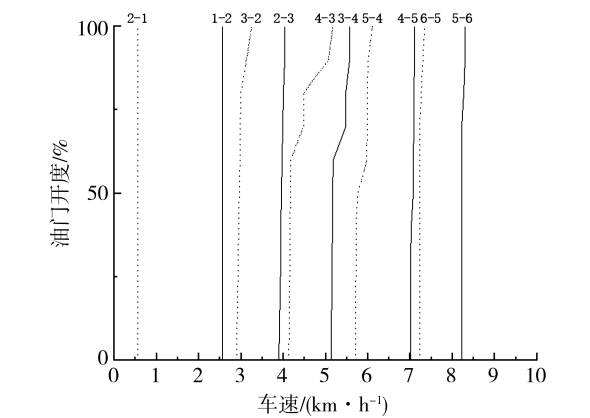


图 9 优化前轻负载作业工况下的换挡规律

Fig.9 Shifting law under light load operating conditions before optimization

从表 7 可以看到,在田间转场工况中,可通过双参数换挡规律将整个行驶过程中的能源消耗降低,同时在作业工况中,通过设置边界条件的方法,完成了在动力性能充足前提下对燃油经济性的提高,同时由 Cruise 中 GSP 工具箱生成的换挡

规律可输出到 TCU 中用于车辆的标定。

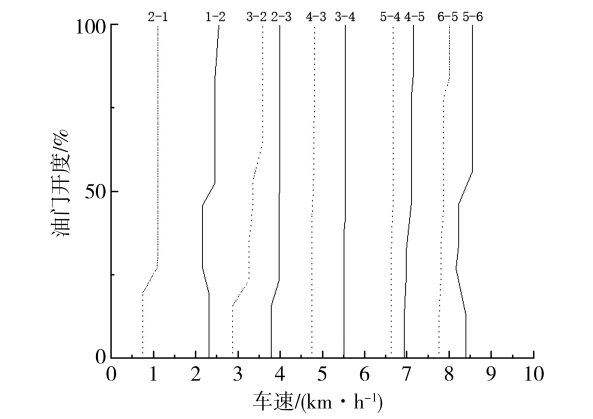


图 10 优化后轻负载作业工况下的换挡规律

Fig.10 Shifting law under light load operating conditions after optimization

表 7 百公里油耗优化前后对比

Tab.7 Comparison of fuel consumption per 100 kilometers before and after optimization

工况类型	优化前油耗/ (L · 100km <sup>-1</sup> )	优化后油耗/ (L · 100km <sup>-1</sup> )	优化百 分比/%
田间转移	20.31	18.44	9.21
轻负载作业	162.97	160.89	1.28

## 5 结论

- 1) 基于 FJ1004 农用拖拉机整车技术规格指标和柴油机特性曲线在通用动力经济性分析软件 Cruise 中建立了动力系统模型,建立经济性分析指标,通过加载拖拉机具牵引阻力子系统和 PTO 负荷消耗模块完成对典型田间作业工况犁耕、旋耕农作的模拟。
- 2) 分析试验工况下的农机具加载特性以及土壤阻力特性,在仿真任务中模拟田间作业环境,建立农业作业工况,通过田间作业试验得到具体作业过程中农业拖拉机的实际动力与燃油经济性性能指标,通过与实车试验与仿真值的对比,经济性与动力性指标相对误差较小,验证了基于数据驱动的整车动力系统模型的可靠性与合理性。由此可对换挡规律进行进一步的研究。
- 3) 通过 Cruise-Isight 联合仿真,采用多岛遗传算法(MIGA)进行优化,通过联调仿真任务的方法,评估不同换挡参数下的经济性指标优化效

果,在田间转移工况下,基于负载工况的特征,设计升、降挡速度和油门开度为输入变量;百公里油耗作为评价指标建立了田间转移工况下的经济性换挡策略;在轻载工况下,以动力性指标作为边界

条件建立了综合性换挡策略。由结果分析可知,换挡规律优化减少了农机在作业过程中燃油消耗,为后续智能自适应工况 TCU 控制策略提供了研究方向。

## 参考文献:

- [1] 袁建霞,张秋菊,胡小鹿,等. 无人驾驶拖拉机研究国际竞争态势与研究热点[J]. 农业工程,2021,11(7):9-16.
- [2] 孙冬野,陈旭东,李宝刚,等. 基于遗传算法的拖拉机动力换挡过程动态控制方法[J]. 重庆大学学报,2019,42(8):1-14.
- [3] 张建友,彭才望,付昌星,等. 农用拖拉机动力传动匹配仿真分析与试验[J]. 江苏农业科学,2021,49(5):199-203.
- [4] 黄薛凯,鲁植雄,陈雷,等. 基于整机经济性的拖拉机 HMCVT 目标速比优化及控制仿真[J]. 南京农业大学学报,2022,45(4):777-787.
- [5] 陈坤,李君,曲大为,等. 农田作业工况下拖拉机性能仿真分析与试验[J]. 科学技术与工程,2019,19(6):110-115.
- [6] 傅生辉,杨子涵,杜岳峰,等. 基于时变扰动抑制的动力换挡拖拉机起步控制方法[J]. 农业机械学报,2021,52(2):371-380.
- [7] 施信信,夏光. 大马力拖拉机牵引作业工况下换挡控制研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2019,42(5):601-607.
- [8] LI B, SUN D, HU M, et al. Automatic gear-shifting strategy for fuel saving by tractors based on real-time identification of draught force characteristics[J]. Biosystems Engineering,2020,193:46-61.
- [9] OUYANG T, LU Y, LI S, et al. An improved smooth shift strategy for clutch mechanism of heavy tractor semi-trailer automatic transmission[J]. Control Engineering Practice,2022,121:105040.
- [10] 孙冬野,杨彪,陈旭东. 拖拉机田间作业工况自适应换挡控制策略[J]. 重庆大学学报,2020,43(2):32-41.

(责任编辑:陈雯)