

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.003

# 多功能自走式牧草育种小区作业机械传动系匹配优化\*

高扬<sup>1</sup> 王德成<sup>1</sup> 方宪法<sup>2</sup> 赵建柱<sup>1</sup> 王光辉<sup>1</sup> 王宗稳<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

**【摘要】** 针对集旋耕、播种、割草和运输功能于一体的多功能自走式牧草育种小区作业机械动力传动系统,在发动机机架试验基础上,利用 Matlab 开发的优化设计软件进行了优化匹配研究。通过对动力传动系统动力性和燃油经济性模拟仿真,并对动力与传动系统匹配计算,选取最佳的发动机与传动系统匹配方案。对优选出的发动机与传动系统最佳的匹配方案进一步优化设计,得出优化后的传动参数为:1挡传动比 2.003 9、2挡传动比 1.459 5、3挡传动比 0.977 5、4挡传动比 0.675 1、倒挡传动比 1.984 0、高档和低挡传动比分别为 1.047 8 和 3.110 2、中央传动比为 5.371 1。优化后多功能自走式牧草育种小区作业机械的动力性和燃油经济性都得到改善,优化后的传动系与动力的匹配度提高了 6.29%。

**关键词:** 牧草育种小区 作业机械 传动系统 优化匹配

**中图分类号:** S210.6; S220.31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)S0-0011-08

## Optimal Matching of Transmission System for Multi-purpose Self-propelled Pasture Plot Operation Machine

Gao Yang<sup>1</sup> Wang Decheng<sup>1</sup> Fang Xianfa<sup>2</sup> Zhao Jianzhu<sup>1</sup> Wang Guanghui<sup>1</sup> Wang Zongwen<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

### Abstract

Based on the engine experiment, the transmission system of multi-purpose (rotary tilling, seeding, mowing and transporting) self-propelled pasture plot operation machine was optimally matched by using optimum design software which was developed in Matlab. The best matching scheme was obtained after simulation of power performance and fuel economy of transmission system and matching calculation between engine and transmission system. The selected matching scheme of engine and transmission system was optimized further, and then the transmission parameters were obtained after optimization. The results of transmission parameters were as follows: transmission ratio of first speed was 2.003 9, second speed was 1.459 5, third speed was 0.977 5, fourth speed was 0.675 1, reverse gear was 1.984 0, transmission ratio of high-gear and low-gear were 1.047 8 and 3.110 2, respectively, and transmission ratio of central drive was 5.371 1. Power performance and fuel economy of machine were improved to some extent, and matching degree between engine and transmission system was increased by 6.29% after optimization.

**Key words** Pasture plot, Operation machine, Transmission system, Optimal matching

### 引言

虽然我国是世界上牧草资源最丰富的国家之

一,但是几乎没有自己的优良品种<sup>[1]</sup>,80%的牧草种子依靠进口,牧草育种是制约我国牧草业发展的瓶颈之一<sup>[2]</sup>。

收稿日期: 2012-07-07 修回日期: 2012-07-15

\* 国家牧草产业技术体系资助项目(CARS-35)

作者简介: 高扬, 博士生, 主要从事草业机械研究, E-mail: gycan@yahoo.cn

通讯作者: 王德成, 教授, 博士生导师, 主要从事牧草机械研究, E-mail: wdc@cau.edu.cn

牧草新品种培育一般是在专门的牧草育种试验小区内完成的<sup>[3]</sup>。育种试验小区内从播种到收获的整个过程中都普遍存在着工作程序繁琐、人工参与的环节多、劳动强度大,既费工费时又容易造成人为误差等问题<sup>[4]</sup>。基于以上原因,本课题组自主研发了一种多功能自走式牧草育种小区作业机械(以下简称小区作业机)。

目前针对农业机械动力传动系统的优化匹配研究相对较少<sup>[5]</sup>,有关小区作业机动力传动系统的优化匹配问题,国内未见相关报道。本文以现有相关理论为基础,通过建立优化模型、利用 Matlab 开发计算机模拟程序和编写传动系参数优化软件,对小区作业机动力性、燃油经济性、匹配程度进行计算机模拟计算和仿真,实现动力传动系统合理、准确、快速的匹配。

本文在小区作业机基本参数和发动机确定的情况下优选传动系统,主要是变速器的各挡传动比、中央传动比等传动系参数的选择,通过参数的优化设计进一步完善发动机和传动系统的匹配。

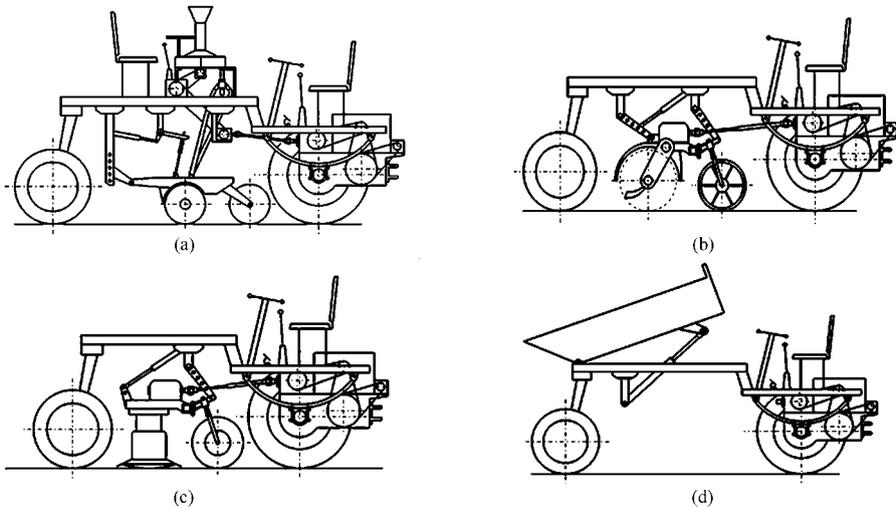


图2 多功能自走式牧草小区作业机动力平台搭载示意图

Fig.2 Boarded schematic diagram of multi-purpose self-propelled pasture plot operation machine

(a) 小区播种机 (b) 旋耕机 (c) 割草机 (d) 运输装置

小区作业机主要由动力装置、传动装置、行走及变速装置、转向装置、工作部件等组成,它集多种功能于一体,实现牧草小区育种作业全机械化,极大地提高育种工作效率、节省投资,并且具有机动灵活、转弯半径小、生产效率高、操作方便、视野良好等优点。

## 2 试验及优化评价方法

### 2.1 小区作业机主要性能、设计参数

小区作业机基本性能、设计参数和动力底盘技术参数如表1和表2所示。

## 1 小区作业机整体结构

如图1~2所示,该机由一个多功能自走式动力平台为主体,在动力平台上可以搭载播种、旋耕、割草、运输车等工作装置,解决牧草育种试验区内的劳动强度大,设备投入高等问题,实现小区牧草育种作业全机械化<sup>[6-10]</sup>。

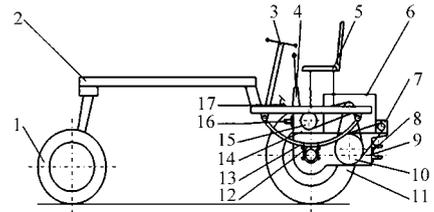


图1 多功能自走式牧草小区作业机动力平台

Fig.1 Power platform of multi-purpose self-propelled pasture plot operation machine

1. 转向前桥 2. 机架 3. 转向操纵装置 4. 换挡杆 5. 座位
6. 发动机 7. 液压泵 8. 牵引框架 9. 驱动桥架 10. 离合器
11. 驱动轮 12. 半轴套筒 13. 钢板弹簧 14. 动力输出装置
15. 离合器 16. 动力输出轴 17. 制动器

该小区作业机的变速器型式:齿轮啮合式、组合式变速器 $(4+1) \times 2$ ,主变速箱为同步器换挡、副变速箱为啮合套换挡,基于前期研究,本文采用变速器和中央传动的3种可选方案,参数如表3所示。每一方案主变速器1~4挡和副变速器高、低挡组成I~VIII挡传动比,并得到由低到高的I~VIII挡速度。

### 2.2 发动机性能台架试验

该小区作业机选用的是江动ZH1125型柴油机,在发动机和传动系匹配计算之前,在中国农业大学发动机性能实验室进行发动机性能台架试验,借鉴相关标准<sup>[11]</sup>,测得所需外特性和万有特性试验数

表1 小区作业机基本设计、性能参数

Tab.1 Basic design parameters of machine

参数	数值
长×宽×高/mm×mm×mm	3 000×1 360×1 680
前轮轮距/mm	1 200~1 400(每级差100 mm)
旋耕机幅宽/mm	1 250
播种幅宽/mm	900
割草幅宽/mm	1 300
整机质量/kg	1 200
轴距/mm	1 680
后轮轮距/mm	1 200~1 400(每级差100 mm)
旋耕机耕深/mm	120
圆盘开沟器数/组	6
割茬高度/mm	40~60
运输满载质量/kg	2 200

表2 底盘型式

Tab.2 Type of chassis

指标	规格型号
驱动型式	发动机后置,后轮驱动
离合器型式	弹簧压紧式双作用离合器
前轮轮胎型号	5.00-15
最终传动型式	轮边齿轮啮合式
制动型式	前后液压制动
转向型式	全液压转向
后轮轮胎型号	11.2-24
最终传动比	4.817

表3 变速器传动比

Tab.3 Parameters of machine of gearbox and central drive

	方案1	方案2	方案3	
主变速器	1挡	2.305 2	2.350 7	2.527 2
	2挡	1.826 2	1.808 2	1.866 7
	3挡	1.127 9	1.111 0	1.076 0
	4挡	0.710 2	0.701 2	0.676 9
	倒挡	2.066 7	2.088 4	1.984 0
副变速器	高挡	1.00	0.884 6	0.92
	低挡	4.00	3.778	3.583 3
中央传动比	5.625	5.625	5.375	

据。试验所用器材为凯迈机电 CW-50 型电涡流测功机、FST3 型发动机测控系统和上海内燃机研究所 FCM-D 型油耗转速自动测量仪,表 4、5 分别是 CW-50 型电涡流测功机主要参数和江动 ZH1125 型柴油机基本参数。图 3 为江动 ZH1125 型柴油机和凯迈机电 CW-50 型测功机。

表4 CW-50 型测功机主要参数

Tab.4 Main parameters of type CW-50 dynamometer

参数	数值
额定功率/kW	50
最高转速/ $r \cdot \min^{-1}$	10 000
冷却水压/MPa	0.04~0.1
转矩测量精度/%	$\pm(0.2 \sim 0.3)$
最大扭矩/ $N \cdot m$	176
冷却介质	淡水
出水温度/ $^{\circ}C$	<55
转速测量精度/ $r \cdot \min^{-1}$	$\pm 1$

表5 发动机基本参数

Tab.5 Basic parameters of engine

指标	规格型号
型式	卧式、单缸、蒸发水冷、四气门、直喷活塞式
额定功率(转速)/kW( $r/\min$ )	20(2 200)
喷油器	PF68S19 长型多空喷油嘴,偶件型号:LLD154S295
供油提前角/ $^{\circ}$	21~23
外形尺寸/mm×mm×mm	816×467×685
缸径×活塞行程/mm×mm	125×120
压缩比	17±1
排量/L	1.473
喷油泵	AD 型单体齿条泵
最低油耗/ $g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$	240.7
净质量/kg	190

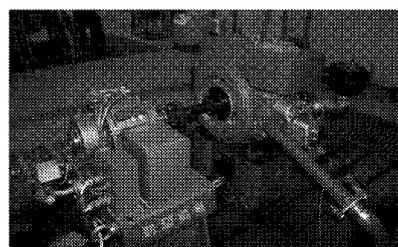


图3 江动 ZH1125 型柴油机和凯迈机电 CW-50 型测功机图片

Fig.3 Jiangdong ZH1125 diesel engine and Kiamajidian CW-50 dynamometer

### 2.3 优化软件及评价指标

采用的优化软件是基于 Matlab/GUI 程序编写的,可以实现对小区作业机动力传动系统的优化与仿真。该软件包括动力性仿真模块、经济性仿真模块、匹配度计算分析模块和传动系参数优化仿真模块。

#### 2.3.1 动力性仿真模块

该模块包括发动机外特性的拟合,各挡最大牵

引功率、各挡最大牵引力、高档最大爬坡度和最大行驶速度的计算。在动力性仿真计算之前,根据小区作业机的发动机性能试验数据,拟合出发动机的外特性曲线,并用绘图工具将其绘制出来。利用拟合出来的多项式进行下一步的计算。

### (1) 各挡最大牵引功率及假想牵引效率

根据不同挡位、不同工作条件、不同地面附着系数和滚动阻力系数,可以得到各挡的行驶速度和牵引力随转速的函数关系,计算各挡的最大牵引功率,并可绘制各挡牵引功率随转速的变化曲线图。得到各挡最大牵引功率之后,进一步计算得到各挡的假想牵引效率以及各挡最大牵引功率时的牵引力。

$$P_T = F_T v_p / 3\ 600 \quad (1)$$

$$\eta_{jT} = P_{Tmax} / P_{eN} \times 100\% \quad (2)$$

$$\eta_{Ly} = F_R / F_T \times 100\% \quad (3)$$

式中  $P_T$ ——牵引功率, kW

$F_T$ ——牵引力, N

$v_p$ ——实际行驶速度, m/s

$\eta_{jT}$ ——各挡在最大牵引功率时的假想牵引效率, %

$P_{Tmax}$ ——各挡最大牵引功率, kW

$P_{eN}$ ——发动机标定功率, kW

$\eta_{Ly}$ ——牵引力利用系数, %

$F_R$ ——工作阻力, N

同时可以计算出各挡最大牵引功率时的牵引力和行驶速度<sup>[5,12]</sup>。

### (2) 各挡最大牵引力

根据不同挡位、不同工作条件、不同地面附着系数和滚动阻力系数,可以得到各挡的行驶速度和牵引力随转速的函数关系,根据式(1)计算得到各挡的最大牵引力,并可绘制各挡的牵引功率随转速的变化曲线图<sup>[5,12]</sup>。

### (3) 高档最大爬坡度

根据高档行驶和工作条件,对其进行爬坡度的计算,可以得到爬坡度随小区作业机行驶速度的函数关系式,计算出最大爬坡度

$$i_{max} = (F_{dmax} - F_f) / G_s \quad (4)$$

$$\sigma_{max} = \arctan i_{max} \quad (5)$$

式中  $i_{max}$ ——最高挡的爬坡度

$F_{dmax}$ ——高档运输作业时的最大驱动力, N

$F_f$ ——高档运输作业时的滚动阻力, N

$\sigma_{max}$ ——高档时小区作业机能爬上的最大爬坡度角, (°)

并绘制小区作业机高档时的爬坡度曲线图<sup>[10,12]</sup>。

### (4) 高档最大行驶速度

根据高档行驶和工作条件,计算出高档最大行驶速度

$$v_{pmax} = 0.377 r_q n_e (1 - \delta) / i \quad (6)$$

式中  $v_{pmax}$ ——最高挡的最大行驶速度, m/s

$r_q$ ——车轮半径, m

$n_e$ ——满足条件的发动机最大转速, m/s

$\delta$ ——转速  $n_e$  下对应的滑转率, %

$i$ ——最高挡的总传动比

并可绘制小区作业机满载运输时的驱动力-行驶阻力平衡图,使计算结果更加直观<sup>[5,12]</sup>。

## 2.3.2 经济性仿真模块

首先根据发动机性能试验数据,进行发动机万有特性曲线的拟合,拟合为发动机转速和发动机转矩的函数,并用 Matlab 绘图工具将其绘制出来。利用拟合出来的多项式进行下一步的计算<sup>[5,12]</sup>。

根据旋耕、播种、割草、运输等不同作业工况时的行驶条件以及小区作业机的工作状态,计算各个工作模式下常用工作速度时的发动机燃油消耗率。

## 2.3.3 动力与传动系匹配度仿真模块

小区作业机的基本参数和工作状态确定后,选择适当的动力与传动系统匹配评价指标,对既定的发动机与几种可选的传动系进行匹配计算,从而找出较优的传动系方案,为传动系参数的优化奠定基础<sup>[5,12]</sup>。

## 2.3.4 传动系参数优化仿真模块

在小区作业机基本参数确定后,选择合适的目标函数,包括动力性、经济性分目标函数以及两者的加权因子,基于复合形算法对传动系参数进一步优化,使动力与传动系统匹配更佳<sup>[5,12]</sup>。

# 3 结果与分析

## 3.1 动力性仿真

限于篇幅,仅以方案3的传动系参数对小区作业机进行动力性仿真计算。

### 3.1.1 发动机外特性的拟合

外特性的拟合用 Matlab 语言编写程序,对试验数据进行计算处理得出拟合多项式和拟合曲线。

利用该软件中的外特性拟合程序对曲线进行拟合,取拟合阶数为5阶,为了使拟合系数更加精确,拟合计算时将发动机转速缩小1000倍,得到各阶系数为:  $a_0 = -72.573\ 4$ ,  $a_1 = 588.664\ 3$ ,  $a_2 = -880.193\ 7$ ,  $a_3 = 658.288\ 1$ ,  $a_4 = -238.024\ 9$ ,  $a_5 = 32.824\ 5$ 。

多项式表达形式为

$$T_{tq} = -72.5734 + 588.6643 \frac{n_e}{1000} - 880.1937 \left(\frac{n_e}{1000}\right)^2 + 658.2881 \left(\frac{n_e}{1000}\right)^3 - 238.0249 \left(\frac{n_e}{1000}\right)^4 + 32.8245 \left(\frac{n_e}{1000}\right)^5 \quad (7)$$

转速为 1 650 r/min 时,发动机的转矩最大,最大值为 96.702 9 N·m,转速为 2 200 r/min 时,发动机最大功率为 20.18 kW。图 4 为拟合后的发动机外特性转矩曲线,拟合结果和实际情况很接近,拟合结果准确,该拟合方法的可信度较高。

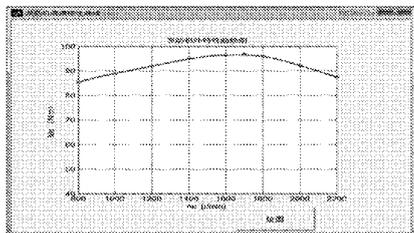


图 4 发动机外特性曲线

Fig. 4 Curves of engine full-load performance

### 3.1.2 各挡的最大牵引功率仿真

对小区作业机各挡的最大牵引功率进行仿真,各挡旋耕作业时的仿真结果如图 5 所示,各挡播种作业时的仿真结果如图 6 所示,各挡割草作业时的仿真结果如图 7 所示,各挡田间运输作业时的仿真结果如图 8 所示。结合小区作业机的挡位速度设置,结合仿真结果可以设定 I、II 挡进行旋耕作业,III、IV 挡进行播种作业, V、VI 挡进行割草作业, VII、VIII 挡进行田间运输作业。并对各挡的最大牵引功率进行仿真,结果如图 9 所示。结果显示,各个挡位的牵引功率和牵引效率符合各挡的作业分配。

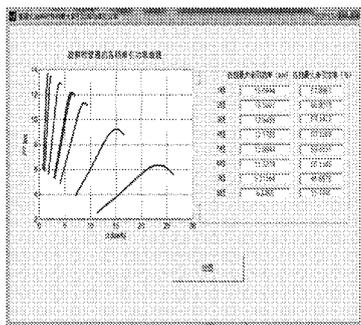


图 5 各挡旋耕作业时的最大牵引功率仿真结果

Fig. 5 Simulation curves of rotary tilling at different gears

### 3.1.3 各挡最大牵引力仿真

小区作业机 I、II 挡旋耕作业, III、IV 挡播种作业, V、VI 挡割草作业, VII、VIII 挡田间运输作业,各挡的牵引力仿真结果如图 10 所示。由图可知小区作业机在旋耕状态下的牵引力要远远大于田间运输状态。

### 3.1.4 高挡的最大行驶速度和爬坡能力仿真

小区作业机满载运输时,对其高挡的最大行驶

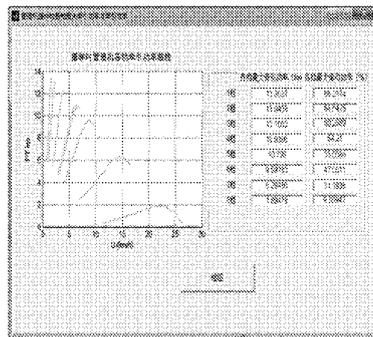


图 6 各挡播种作业时的最大牵引功率仿真结果

Fig. 6 Simulation curves of seeding at different gears

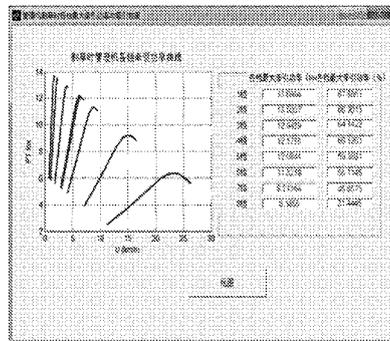


图 7 各挡割草作业时的最大牵引功率仿真结果

Fig. 7 Simulation curves of mowing at different gears

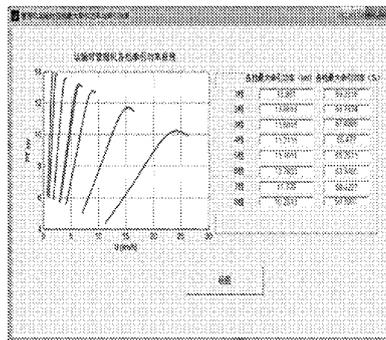


图 8 各挡田间运输作业时的最大牵引功率仿真结果

Fig. 8 Simulation curves of transporting at different gears

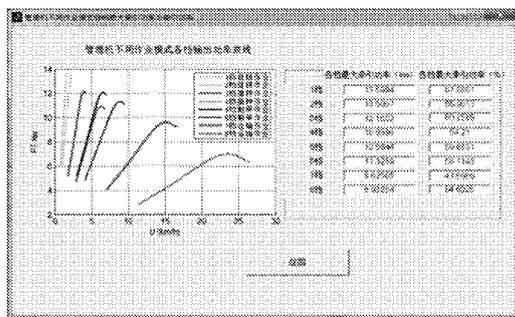


图 9 各挡最大牵引功率与牵引效率仿真结果

Fig. 9 Simulation results of drawbar horsepower and traction efficiency at different gears

速度和爬坡度进行仿真计算,仿真结果如图 11 所示。VII 挡最大行驶速度为 16.613 6 km/h, VIII 挡最大行驶速度为 26.406 2 km/h; VII 挡最大爬坡度为 0.223 4, VIII 挡最大爬坡度为 0.103 7。

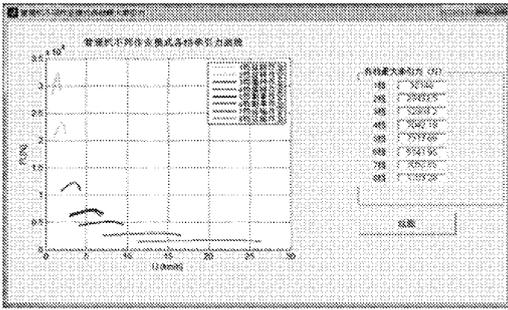


图 10 各挡最大牵引力仿真结果

Fig. 10 Simulation results of traction force at different gears

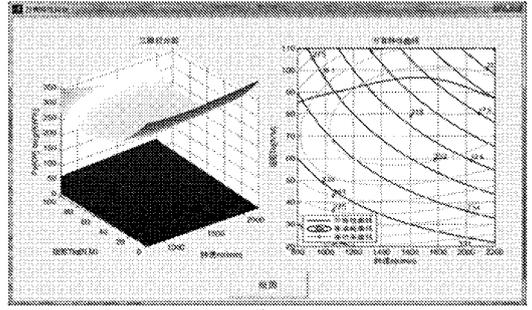


图 12 拟合的万有特性图

Fig. 12 Curves of engine fuel-consumption performance

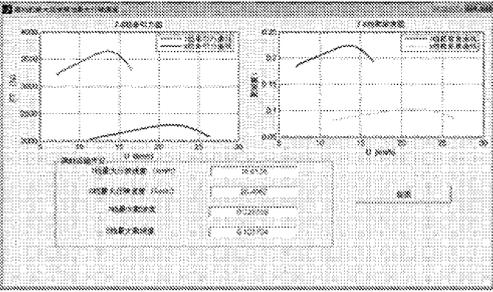


图 11 高挡的最大行驶速度和爬坡能力仿真结果

Fig. 11 Simulation results of running speed and grade ability at different gears

### 3.2 经济性仿真

仅以方案 3 的传动系参数对小区作业机的燃油经济性进行仿真计算。

#### 3.2.1 万有特性的拟合

根据发动机性能试验数据,采用多元线性回归方法,拟合发动机万有特性曲面。本文取拟合系数为 3,进行拟合计算,得到拟合系数: $a_0 = -478.5858$ ,  $a_1 = -0.1647$ ,  $a_2 = -3.7786$ ,  $a_3 = 1.03 \times 10^{-4}$ ,  $a_4 = -9.7969 \times 10^{-4}$ ,  $a_5 = 3.2646 \times 10^{-4}$ ,  $a_6 = -1.866 \times 10^{-8}$ ,  $a_7 = 2.7384 \times 10^{-7}$ ,  $a_8 = -2.2128 \times 10^{-6}$ ,  $a_9 = 2.0322 \times 10^{-6}$ 。

发动机的燃油消耗率表示成多项式为

$$b_e = -478.5858 - 0.1647n_e - 3.7786T_{tq} + 1.03 \times 10^{-4}n_e^2 - 9.7969 \times 10^{-4}n_eT_{tq} + 3.2646 \times 10^{-4}T_{tq}^2 - 1.866 \times 10^{-8}n_e^3 + 2.7384 \times 10^{-7}n_e^2T_{tq} - 2.2128 \times 10^{-6}n_eT_{tq}^2 + 2.0322 \times 10^{-6}T_{tq}^2 \quad (8)$$

根据发动机性能试验数据和所确定的回归方程,使用 Matlab 软件中的 Mesh 语句对数据进行曲面拟合,生成发动机万有特性的三维曲面,图 12 为拟合后的万有特性图,用 Matlab 中的 Contour 语句自动生成等油耗曲线,然后用一系列平行于转速-转矩平面的平面截取发动机万有特性三维曲面,其一系列交线在转速-转矩平面内的投影即是等油耗曲线。

#### 3.2.2 旋耕作业燃油经济性仿真

小区作业机旋耕作业,使用质量  $m = 1200$  kg,

地面附着系数  $\varphi = 0.60$ ,滚动阻力系数  $f = 0.10$ 。I 挡旋耕作业,作业速度为 1.5 km/h 时的燃油消耗率为 275.796 g/(kW·h);II 挡旋耕作业,作业速度为 2.4 km/h 时的燃油消耗率为 253.186 g/(kW·h)。

#### 3.2.3 播种作业燃油经济性仿真

小区作业机播种作业,使用质量  $m = 1200$  kg,地面附着系数  $\varphi = 0.50$ ,滚动阻力系数  $f = 0.16$ 。III 挡播种作业,作业速度为 4 km/h 时的燃油消耗率为 300.605 g/(kW·h);IV 挡播种作业,作业速度为 6 km/h 时的燃油消耗率为 261.706 g/(kW·h)。

#### 3.2.4 割草作业燃油经济性仿真

小区作业机割草作业,使用质量  $m = 1200$  kg,地面附着系数  $\varphi = 0.60$ ,滚动阻力系数  $f = 0.10$ 。V 挡割草作业,作业速度为 6 km/h 时的燃油消耗率为 219.636 g/(kW·h);VI 挡割草作业,作业速度为 8 km/h 时的燃油消耗率为 218.952 g/(kW·h)。

#### 3.2.5 田间运输作业燃油经济性仿真

小区作业机田间运输作业,满载质量  $m = 2200$  kg,地面附着系数  $\varphi = 0.70$ ,滚动阻力系数  $f = 0.05$ 。VII 挡运输作业,作业速度为 12 km/h 时的燃油消耗率为 281.370 g/(kW·h);VIII 挡运输作业,作业速度为 20 km/h 时的燃油消耗率为 243.452 g/(kW·h)。旋耕、播种、割草、运输作业的燃油经济性计算和仿真结果如图 13 和 14 所示。

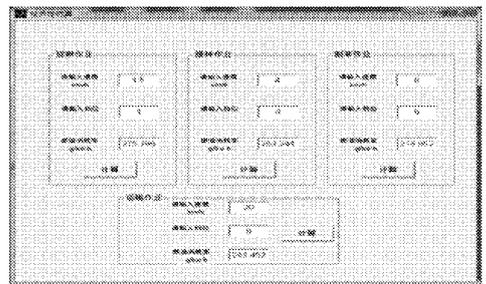


图 13 各挡燃油经济性计算结果

Fig. 13 Calculation of fuel economy at different gears

### 3.3 动力与传动系统匹配计算

在发动机与传动系多种组合中选出满足要求的最佳方案,本文发动机已选定,传动系统方案如表 3

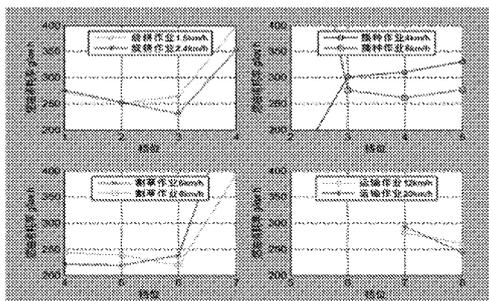


图 14 小区作业机燃油经济性仿真结果

Fig. 14 Simulation of fuel economy of machine

所示。根据相关文献<sup>[5,11-14]</sup>,利用动力与传动系统匹配的综合评价指标对小区作业机的动力与传动系统匹配进行计算,本文取动力性、经济性和综合性能指标的权系数分别为 0.3、0.3 和 0.4。用本软件进行 3 种传动系统的匹配度计算,3 种传动系统方案的动力性、经济性和综合评价指标的计算结果如表 6 所示。

表 6 3 种传动系匹配度计算结果

Tab. 6 Calculation results of three type of matching of transmission systems

指标	方案 1	方案 2	方案 3
动力性	76.50	79.72	81.60
经济性	79.88	83.11	85.76
综合性能	25.71	27.59	28.73
综合评价 Z	57.19	59.88	61.70

在 3 种传动系方案中,无论是动力性、经济性和综合性能指标,方案 3 都较好,并且综合评价最高,因此本文初选方案 3 作为小区作业机的传动系统。

### 3.4 传动系统优化设计

根据上述的匹配分析,初选方案 3 传动系参数,用本优化软件基于复合形算法进行优化,优化参数是变速器的传动比和中央传动比。复合形算法的反射系数、重构系数、扩展系数、收缩系数、预定精度分别取 1.3、0.5、1、0.7、 $10^{-10}$ 。

本优化软件采用的动力性分目标为匹配分析模块的动力性指标的倒数,经济性分目标是匹配分析模块的经济性指标的倒数。动力性和经济性的权系数为 0.2 和 0.8。

用本软件对传动系参数优化,优化前后传动系参数的变化率同时计算并输出,并且计算出优化前后动力与传动系统的匹配度。表 7 为优化前后动力与传动系统的匹配度评价指标计算结果,表 8 为优化前后变速器的传动比和中央传动比。优化后小区作业机的动力性和燃油经济性都有了一定程度改善,优化后的传动系与动力的匹配度提高了 6.29%。

表 7 优化前后动力与传动系统的匹配指标对比

Tab. 7 Comparison of matching index of engine and transmission system before and after optimization

参数	动力性指标	经济性指标	综合性指标	综合评价 Z
优化前	81.60	85.76	28.73	61.70
优化后	87.41	89.66	31.15	65.58
变化率/%	7.12	4.55	8.42	6.29

表 8 优化前后传动比

Tab. 8 Comparison of transmission parameters before and after optimization

	优化前	优化后
主变速器	1 挡	2.527 2
	2 挡	1.866 7
	3 挡	1.076 0
	4 挡	0.676 9
	倒挡	1.984 0
副变速器	高档	0.920
	低挡	3.583 3
中央传动比	5.375	5.371 1

优化前后各挡牵引功率与牵引效率如表 9 所示,优化后 I ~ VI 挡各自作业时的最大牵引功率稍有降低, VII ~ VIII 挡运输作业的最大牵引功率有所提高,特别是 VIII 挡,提高了 12.03%。优化前后高档的最大爬坡度与最大行驶速度如表 10 所示,优化后高档满载田间运输最大行驶速度稍有降低,优化后小区作业机的最高挡最大行驶速度是 23.265 1 km/h;优化后高档满载田间运输最大爬坡度有明显的提高,特别是 VIII 挡的爬坡度提高了 25.94%。

优化作业燃油经济性仿真结果如图 15 所示,优化前后各挡作业燃油经济性对比如表 11 所示,优化后 I 挡 1.5 km/h 旋耕作业、II 挡 2.4 km/h 旋耕作业、III 挡 4 km/h 播种作业、IV 挡 6 km/h 播种作业、V 挡 6 km/h 割草作业、VI 挡 8 km/h 割草作业的燃油经济性都有明显的改善,但是 VII 挡 12 km/h、VIII 挡 20 km/h 田间运输作业时的燃油经济性有所降低,因为优化前后 VII、VIII 挡的动力性有很大提高,而动力性与经济性相互矛盾,使得 VII、VIII 挡的动力性和经济性不可能同时大幅度改善。

另外需要指出,对于小区作业机动力与传动系统优化匹配,除了要考虑小区作业机的动力性和燃料经济性之外,还要考虑小区作业机的实际制造问题,因为齿轮的模数是有标准系列,齿数为整数,因此小区作业机各挡传动比和中央传动比不能任意选取。

表9 优化前后牵引功率与牵引效率对比

Tab.9 Comparison of drawbar horsepower and traction efficiency before and after optimization

参数	I挡旋耕	II挡旋耕	III挡播种	IV挡播种	V挡割草	VI挡割草	VII挡运输	VIII挡运输
优化前功率/kW	13.6994	13.5007	12.1602	10.9396	12.0844	11.3239	9.6257	6.9828
优化后功率/kW	13.4444	13.1407	11.6012	10.42505	11.8512	10.9657	9.77464	7.8231
优化前效率/%	67.89	66.90	60.26	4.21	59.88	56.11	7.70	34.60
优化后效率/%	66.62	65.12	57.49	51.68	58.73	54.34	48.43	38.77
功率变化率/%	-1.86	-2.67	-4.60	-4.66	-1.93	-3.16	1.55	12.03

表10 优化前后高档的最大爬坡度与最大行驶速度

Tab.10 Comparison of running speed and grade ability before and after optimization

参数	VII挡	VIII挡
优化前/ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	16.6136	26.4062
最大行驶速度 优化后/ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	16.0689	23.2651
变化率/%	-3.28	-11.90
优化前/ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	0.2234	0.1037
最大爬坡度 优化后/ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	0.2347	0.1306
变化率/%	5.06	25.94

表11 优化前后各挡作业燃油经济性对比

Tab.11 Comparison of fuel economy before and after optimization at different gears with original

参数	I挡旋耕 (1.5 km/h)	II挡旋耕 (2.4 km/h)	III挡播种 (4 km/h)	IV挡播种 (6 km/h)	V挡割草 (6 km/h)	VI挡割草 (8 km/h)	VII挡运输 (12 km/h)	VIII挡运输 (20 km/h)
优化前燃油消耗率/ $\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$	272.935	253.186	300.605	261.706	219.636	226.668	281.370	243.452
优化后燃油消耗率/ $\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$	248.009	224.469	277.470	247.203	218.526	218.952	283.976	255.411
变化率/%	-9.13	-11.34	-7.70	-5.54	-5.05	-3.52	0.93	4.91

在使用该软件进行优化设计时,得到优化传动比之后,可根据实际使用情况对各挡传动比稍做改动。在更改传动比后,可利用软件对参数改动后的动力性能和燃油经济性进行模拟计算,验证更改后的参数是否合理,从而得到适合实际使用的传动系参数。

## 4 结论

(1) 通过对多功能自走式牧草小区作业机动力传动系统的动力特性和燃油经济特性模拟仿真,并对其动力与传动系统匹配计算,选取最佳的发动机与传动系统匹配方案,即主变速器1挡传动比为2.5272、2挡传动比为1.8667、3挡传动比为1.0760、

4挡传动比为0.6769、倒挡传动比为1.9840、高档和低挡的传动比分别为0.920和3.5833、中央传动比为5.375。

(2) 对优选出的最佳的发动机与传动系统匹配方案进一步优化设计,得出优化后的传动参数主变速器1挡传动比为2.0039、2挡传动比为1.4595、3挡传动比为0.9775、4挡传动比为0.6751、倒挡传动比为1.9840、高档和低挡的传动比分别为1.0478和3.1102、中央传动比为5.3711。

(3) 优化后多功能自走式牧草小区作业机械的动力性和燃油经济性都有了一定程度的改善,优化后的传动系与动力的匹配度提高了6.29%。

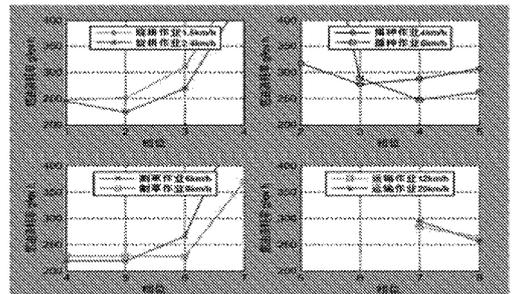


图15 优化前后各挡经济性仿真结果

Fig.15 Simulation of fuel economy before and after optimization at different gears

## 参 考 文 献

- 王宗礼. 牧草与粮食安全[J]. 中国农业资源与区划, 2009, 30(1): 21~25.  
Wang Zongli. Pasture and grain safety [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2009, 30(1): 21~25. (in Chinese)
- 苏加楷. 中国牧草新品种选育的回顾与展望[J]. 草原与草坪, 2001(4): 3~8, 16.  
Su Jiakai. The review and prospect of forage breeding in China [J]. Grassland and Turf, 2001(4): 3~8, 16. (in Chinese)

- 8 Grisso R, Perumpral J, Zoz F. An empirical model for tractive performance of rubber-tracks in agricultural soils[J]. Journal of Terramechanics,2006,43(2):225~236.
- 9 Al-Milli S, Seneviratne L D, Althoefer K. Track-terrain modelling and traversability prediction for tracked vehicles on soft terrain[J]. Journal of Terramechanics,2010,47(3):151~160.
- 10 巩青松,董阿忠,陈靖芯,等.履带式车辆关键机构分析与设计[J].农业装备与车辆工程,2008(4):10~14.  
Gong Qingsong, Dong Azhong, Chen Jingxin, et al. Analysis and design for key mechanisms of a tracked vehicle[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering,2008(4):10~14. (in Chinese)
- 11 孙振杰,刘俊峰,李彩凤,等.微型农用履带式行走装置的设计方法[J].农机化研究,2011(10):55~58.  
Sun Zhenjie, Liu Junfeng, Li Caifeng, et al. The design method of mini agricultural crawler running device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2011(10):55~58. (in Chinese)
- 12 余志生.汽车理论[M].北京:机械工业出版社,2009.
- 13 Janarthanan B, Padmanabhan C, Sujatha C. Longitudinal dynamics of a tracked vehicle: simulation and experiment[J]. Journal of Terramechanics,2012,49(2):63~72.
- 14 孙运强.橡胶履带底盘结构设计与实验仿真研究[D].大庆:东北石油学院,2010.  
Sun Yunqiang. Rubber-tracked chassis structure design and experimental simulation[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2010. (in Chinese)
- 15 黄晓云,张国忠,张凤赐.汽车总体设计专家系统的研制[J].中山大学学报,2003,42(3):31~34.  
Huang Xiaoyun, Zhang Guozhong, Zhang Fengci. Development of expert system of overall vehicle design[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni,2003,42(3):31~34. (in Chinese)
- 16 黄晓云,张国忠,张凤赐.基于参数化和专家系统技术的汽车总体设计CAD系统[J].东北大学学报,2003,24(8):806~809.  
Huang Xiaoyun, Zhang Guozhong, Zhang Fengci. Vehicle overall design CAD system based on parametric technology and expert system[J]. Journal of Northeastern University,2003,24(8):806~809. (in Chinese)
- 17 巩青松.履带式工作车辆设计及分析的关键技术研究[D].扬州:扬州大学,2008.

~~~~~

(上接第 18 页)

- 3 于林清,云锦凤.中国牧草育种研究进展[J].中国草地,2005,27(3):61~64.  
Yu Linqing, Yun Jinfeng. Research progress of forage breeding in China[J]. Grassland of China, 2005, 27(3): 61~64. (in Chinese)
- 4 宋江腾,张淑敏.小区播种机的研究现状及发展方向[J].农机化研究,2004(4):14~16.  
Song Jiangteng, Zhang Shumin. Current situation and developmental orientation of plot seeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2004(4): 14~16. (in Chinese)
- 5 孙维恭,冯一兵,孙海波.传动系优化及与发动机合理匹配研究[J].拖拉机与农用运输车,2000(4):23~29.  
Sun Weigong, Feng Yibing, Sun Haibo. Optimization of powertrain[J]. Tractor & Farm Transporter, 2000(4): 23~29. (in Chinese)
- 6 王德成,高扬,王光辉,等.一种自走式牧草小区作业机械:中国,ZL201120286111.5[P].2012-05-23.
- 7 王德成,高扬,王光辉,等.一种自走式牧草小区播种作业机械:中国,ZL201120286067.8[P].2012-05-30.
- 8 王德成,高扬,王光辉,等.一种自走式牧草小区耕整地作业机械:中国,ZL201120286104.5[P].2012-04-11.
- 9 王德成,高扬,王光辉,等.一种自走式牧草小区收获作业机械:中国,ZL201120317707.7[P].2012-05-09.
- 10 王德成,高扬,王光辉,等.一种自走式牧草小区运输作业机械:中国,ZL201120285550.4[P].2012-04-11.
- 11 GB/T 18297—2001 发动机性能试验方法[S].2001.
- 12 刘惟信,戈平,李伟.汽车发动机与传动系参数最优匹配的研究[J].汽车工程,1991(2):65~72.  
Liu Weixin, Ge Ping, Li Wei. Study of optimal matching between automobile engine and transmission parameters[J]. Automotive Engineering, 1991(2): 65~72. (in Chinese)
- 13 Peter Mizsey, Esmond Newson. Comparison of different vehicle power trains[J]. Journal of Power Sources, 2001, 102(1~2): 205~209.
- 14 宋宝玉,任秉银,于华波.汽车传动系参数优化设计系统的研究[J].哈尔滨工业大学学报,2001,33(2):179~182.  
Song Baoyu, Ren Bingying, Yu Huabo, et al. Optimization of automobile transmission parameters[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2001, 33(2): 179~182. (in Chinese)