

拖拉机串联式液力机械复合传动系统设计与试验

李贤哲¹ 刘孟楠^{2,3} 徐立友¹ 张明柱¹ 闫祥海^{1,3}

(1. 河南科技大学车辆与交通工程学院, 洛阳 471003; 2. 拖拉机动力系统国家重点实验室, 洛阳 471039;
3. 中国一拖集团有限公司技术中心, 洛阳 471039)

摘要: 针对现有拖拉机变速器存在机械结构复杂、挡位数较多、模式切换繁琐等问题,提出了一种串联式液力机械复合传动方案(Series hydraulic and mechanical hybrid transmission,HMD)及其配套拖拉机总体设计方法,包括功能需求、传动路线设计、组件特性分析、性能参数计算、仿真模型搭建、作业性能对比。针对无级调速模块有效性设计牵引性能与匹配性能试验,合理的发动机匹配使得液力传动最高效率达到 0.894,重载与轻载区段能够实现无级变速,工况适应性良好。性能对比结果表明:HMD 牵引特性场位于原拖拉机与 HMCVT 之间,各挡牵引功率峰值幅度变化平稳,深谷面积明显减小;犁耕工况下,牵引力覆盖范围平均提升 15.3%,负载作业速度平均提升 8.2%;旋耕工况下,动力输出功率平均提升 1.7%。研究可为多模式无级变速拖拉机总体设计提供技术路线参考。

关键词: 拖拉机; 串联式; 液力机械; 复合传动系统

中图分类号: S219.0 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)01-0406-08 **OSID:** 

Design and Test of Tractor Serial Hydraulic and Mechanical Hybrid Transmission System

LI Xianzhe¹ LIU Mengnan^{2,3} XU Liyou¹ ZHANG Mingzhu¹ YAN Xianghai^{1,3}

(1. College of Vehicle and Traffic Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China
2. State Key Laboratory of Power System of Tractor, Luoyang 471039, China
3. YTO Group Corporation R&D Center, Luoyang 471039, China)

Abstract: Most tractors in the world still use manual mechanical shifting transmissions. Such transmissions face problems for instance power interruption and cumbersome operation during gear shifts, which is extremely unfavorable for vehicles with load operations such as construction machinery, which not only increases the fatigue intensity of the driver, but also reduces productivity. To ensure the maximum flexibility of use at each speed and exploit the maximum engine power available under all working conditions. A series hydraulic and mechanical hybrid transmission system (HMD) and its supporting tractor overall design method were proposed, including functional requirements, transmission route design, component characteristics analysis, performance parameter calculation, simulation model building, and operation performance comparison. The system scheme was based on the series combination of hydraulic torque converter (TC) and dual clutch transmission (DCT). Based on the proposed design method, the Dongfanghong 1804 tractor was selected as the research object. According to the effectiveness of stepless speed regulation module, the traction performance and matching performance test were designed. Reasonable engine matching made the maximum efficiency of hydraulic transmission reach 0.894, and the stepless variable speed can be realized in heavy and light load sections, and the adaptability of working conditions was excellent. The comparison results showed that the traction characteristic field of HMD was located between the original tractor and HMCVT, and the peak amplitude of tractive force in each gear varied smoothly and the area of deep valley was significantly reduced. Under ploughing tillage, traction coverage was increased by an average of 15.3%, and the load operation speed was increased by an average of 8.2%. Under rotary tillage, the take-off power was increased by 1.7% on average. The research can provide a technical route reference for the overall design of multimodal infinitely variable speed tractors.

Key words: tractor; series connection type; hydraulic machinery; hybrid transmission system

0 引言

变速器是拖拉机传动系统中克服多变负载作业的必要部件,其中包括了许多新技术的应用,也是影响拖拉机各项性能指标的关键因素^[1-3]。

国内大多数拖拉机依然采用同步器式换挡,其齿轮数较多和动力中断的缺点对负荷作业效率有较大影响^[4-6]。动力换挡变速方案的提出解决了该问题。席志强等^[7]对动力换挡变速器动态换挡特性方法和控制策略进行了研究,提出了新的参数评价指标;TANELLI 等^[8]提出了适用于大功率拖拉机的动力换挡传动方案,并设计程序对换挡质量进行分类自动优化。但是,随着拖拉机的田间载荷以及配备农机具的多样性不断增加,拥有无级调速能力的液力机械双流传动变速器成为了发展趋势。徐立友等^[9]分析了液力机械无级变速器循环功率存在条件及其对变速机构输出的影响;杨树军等^[10]建立了液力机械无级变速器排量比调节模型,并对其全功率换挡过程进行研究分析。该类变速装置多采用行星轮系与液压系统并联组合,机械结构复杂,模式切换控制过程繁琐,使用成本较高。近年来,双离合器自动变速器(Dual clutch transmission, DCT)的兴起为拖拉机新型传动系统研究提供了新思路,其结构动力换挡响应时间极短,也拥有较高传动效率等优

点^[11-13]。国内,徐立友等^[14]对拖拉机 DCT 传动系统进行了动力学建模仿真研究,同时对换挡品质提出了新的评价指标;国外,GOETZ 等^[15]对 DCT 综合换挡动力控制进行了研究。但是,由于拖拉机载荷波动频繁,DCT 在低速换挡时产生的滑摩功和冲击度较大,对离合器摩擦片材料强度要求很高,而且不易对发动机最佳工况点进行匹配^[16]。

本文在双离合器自动变速器的基础上,以东方红 1804 型拖拉机为研究对象,根据功能需求分析,针对性提出适合拖拉机工况的串联式液力机械复合传动方案(HMD),计算动力性参数,进行试验证明有效性,建立数学模型对比牵引性能,为拖拉机 HMD 系统的开发设计提供理论依据。

1 串联式液力机械复合传动系统结构方案

1.1 功能需求

HMD 拖拉机底盘布局合理,传动系统质量轻便;拥有全功率或区段无级调速能力;换挡动力传递不会出现中断;配备独立式动力输出,满足多种类农机具装配需求。

1.2 传动方案

图 1 为串联式液力机械复合传动系统原理图,主要由发动机、动力输出模块、无级调速模块、动力换挡模块、主变速器模块、中央传动模块组成。

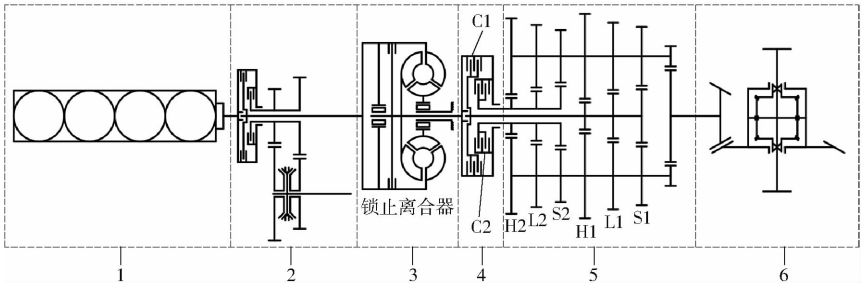


图 1 复合传动系统原理图

Fig. 1 Principle of hybrid transmission system

1. 发动机 2. 动力输出模块 3. 无级调速模块 4. 动力换挡模块 5. 主变速器模块 6. 中央传动模块

1.3 组件特性

HMD 系统中主变速器模块采用双中间轴式结构,按照牵引负载变化设置 6 个挡位,定义 H1 为基本工作段。无级调速模块采用三元件综合式液力变矩器,包括锁止离合器、泵轮、涡轮和导轮。动力换挡模块采用轴向嵌套布置湿式双离合器结构。PTO 传动装置由双联离合器独立控制完成两种标准转速输出。

综上所述,HMD 拖拉机拥有两种作业模式:重载和轻载区段为液力机械模式;运输区段为机械模式。各离合器控制逻辑如表 1 所示。HMD 拖拉机

能够在若干区段内无级调速,充分发挥液力传动自动适应阻力变化的优点,减少主变速器模块换挡次数和冲击度。同时,传动机构尺寸参数减小,结构紧凑。满足传动系统功能需求。

表 1 离合器控制逻辑

Tab. 1 Transmission clutch control logic

状态		H1	H2	L1	L2	S1	S2
无级调速模块	锁止离合器	○	○	○	○	●	●
	离合器 C1	●	○	●	○	●	○
动力换挡模块	离合器 C2	○	●	○	●	○	●

注:表中○表示离合器处于分离状态;●表示离合器处于接合状态。

2 主要参数设计

2.1 发动机参数匹配

拖拉机正常作业时,发动机有效功率应满足其驱动力的需求。依据变速器在重载Ⅰ挡输出转矩最大的特性,以进行犁耕作业时最大设定速度作为参考。此时所需求的驱动功率可表示为

$$P_{Tl} = \frac{F_{Tl} u_{gl}}{3.6 \eta_s} \tag{1}$$

式中 F_{Tl} ——犁耕驱动力,kN
 P_{Tl} ——犁耕驱动功率,kW
 u_{gl} ——犁耕行驶速度,km/h
 η_s ——传动系统总效率

在产品目录上选择合适的发动机,其额定功率 P_N 应满足关系

$$P_N \geq P_{Tl} \tag{2}$$

2.2 动力输出模块参数设计

动力输出轴标准转速一般在发动机标定转速的 80%~90% 时达到。当拖拉机通过 PTO 连接旋耕装置进行作业时,其功率需求为

$$P_d \geq 1.1 (10 h_k k_l B_l + m_s g f) \frac{u_{gx}}{3\,600} \tag{3}$$

式中 P_d ——动力输出功率,kW
 h_k ——耕深,cm
 k_l ——土壤比阻,kN/cm²
 B_l ——耕幅,cm
 m_s ——整机质量,kg
 f ——滚动阻力系数
 g ——重力加速度,m/s²
 u_{gx} ——旋耕行驶速度,km/h

2.3 无级调速模块参数设计

根据相似性原理,几何相似、运动相似、动力相似的一系列液力变矩器存在关系^[17-20]

$$\begin{cases} \lambda_b = \frac{T_b}{\rho g D_y^5 n_b^2} \\ \lambda_w = \frac{T_w}{\rho g D_y^5 n_w^2} \end{cases} \tag{4}$$

式中 λ_b ——泵轮转矩系数
 λ_w ——涡轮转矩系数
 T_b ——泵轮转矩,N·m
 T_w ——涡轮转矩,N·m
 n_b ——泵轮转速,r/min
 n_w ——涡轮转速,r/min
 ρ ——工作油液密度,kg/m³
 D_y ——循环圆有效直径,mm

发动机曲轴与泵轮为刚性连接,由式(4)确定

循环圆有效直径为

$$D_y = \sqrt[5]{\frac{T_N}{\lambda_b \rho g n_N^2}} \tag{5}$$

式中 n_N ——发动机额定转速,r/min
 T_N ——发动机额定转矩,N·m

利用 λ_b 和 λ_w ,在泵轮转矩和转速不变的条件下,变矩系数 K 随涡轮转速改变而连续变化,即

$$K = \frac{\lambda_w}{\lambda_b} = \frac{T_w}{T_b} \tag{6}$$

在某一时刻,液力变矩器的效率和变矩系数存在关系

$$\eta_Y = \frac{n_w}{n_b} K \tag{7}$$

式中 η_Y ——液力变矩器瞬时效率

此外,当拖拉机处于运输挡位工作时,由于锁止离合器接合,变矩器的输入轴和输出轴成为刚性连接,有 $K=1, \eta_Y=1$ 。

2.4 动力换挡模块参数设计

双离合器作为动力换挡模块重要组件,设计方案以所选发动机和液力传动模块参数为依据。摩擦片尺寸已系列化与标准化,其外径由离合器所承受最大转矩得到,即

$$D_c = k_c \sqrt{T_{wmax}} \tag{8}$$

式中 T_{wmax} ——涡轮最大输出转矩,N·m
 D_c ——摩擦片外径,mm
 k_c ——摩擦片直径系数

根据摩擦定律和压力均匀假设,同时保证离合器在任何情况下都能可靠传递转矩,单位摩擦片上工作压紧力可以表示为

$$F_c = \frac{\beta T_{wmax}}{\mu Z_c R_c} \tag{9}$$

式中 F_c ——单位摩擦片工作压紧力,kN
 R_c ——摩擦力有效作用半径,mm
 β ——离合器后备系数,取 1.8~4.0
 μ ——滑动摩擦因数
 Z_c ——摩擦面数

2.5 主变速器模块参数设计

主变速器模块传动比分配由拖拉机不同模式作业下输出转矩设置。重载Ⅰ挡传动比 i_{H1} 由最大驱动力 F_{Tl} 确定,运输Ⅱ挡传动比 i_{S2} 由最高行驶速度确定,即

$$i_{H1} = \frac{F_{Tl} R_b}{T_{wmax} i_0 \eta_T} \tag{10}$$

$$i_{S2} = 0.377 \frac{n_N R_b}{i_0 u_{max}} \tag{11}$$

式中 u_{max} ——拖拉机最高行驶速度,km/h

R_b ——驱动轮半径,m
 η_T ——机械传动部分总效率
 i_0 ——中央传动模块传动比

根据田间载荷测量分析,实际生产中拖拉机挡间级比应根据发动机的调速特性按照近似等比级数原则分配,同时应满足外部牵引阻力矩增值比 δ ,即各挡位挡间级比的设定应适应多变载荷作业和提高生产效率,有

$$q_1 = \sqrt[3]{\frac{i_{H1}}{i_{L2}}} \geq \delta_{\max}$$

(12)

$$q_2 = \frac{i_{S1}}{i_{S2}} \geq \delta_s$$

(13)

式中 q_1 ——负载挡位挡间级比
 i_{L2} ——轻载Ⅱ挡传动比
 i_{S1} ——运输Ⅰ挡传动比
 q_2 ——运输挡位挡间级比
 $\delta_{\max}$ ——牵引阻力矩增值比最大值
 δ_s ——运输工况下阻力矩增值比

3 实例验证

3.1 实例设计

根据东方红 1804 型拖拉机配套农机具作业情况要求,确定额定牵引力为 67.5 kN,最大使用质量下的驱动力需求为 75.2 kN。基于上述方法,整理计算出 HMD 1804 型拖拉机整机主要参数及传动系统排挡设置,如表 2 所示。

3.2 试验方案

为了验证 HMD 传动系统的有效性,对无级调速模块核心部件进行试验验证。试验在河南省新能源重点实验室传动台架上进行,如图 2 所示。

本试验方案中输入源相关特性由加载试验平台驱动电机模块模拟提供。如图 3 所示,HMD 传动系统匹配的发动机外特性由中国一拖集团有限公司提供,在发动机转速处于 1 500 r/min 时输出转矩达到峰值 809 N·m;转速为 1 700 ~ 2 200 r/min 时,功率变化相对平缓,可以看作恒功率输出,在 1 700 r/min 时达到最大值 134.9 kW。

无级调速模块核心部件液力变矩器为 YJ375A 型,循环圆有效直径为 375 mm,最高效率为 88%,最大变矩系数为 3.1。设计试验参照 GB/T 7680—2005 和 QC/T 1056—2017 进行,分别进行基本牵引工况特性试验和实用匹配牵引性能试验。液力变矩器输入端通过联轴器连接惯性能量飞轮,输出端连接加载装置,同时加装机位防护罩,驱动设备与加载装置按设定旋转方向工作,通过速矩传感模块监测动态数据。试验时进口油温为 (90 ± 10) °C,出口油

表 2 复合传动系统装机参数

Tab.2 Hybrid transmission system installed parameters

参数	数值
外形尺寸/(mm × mm × mm)	5 200 × 2 696 × 2 970
轴距/mm	2 848
前轮轮距/mm	1 704 ~ 2 200
后轮轮距/mm	1 620 ~ 2 200
最小离地间隙/mm	495
最小使用质量/kg	7 350
最大使用质量/kg	12 640
最小转向圆半径/m	6.2 ± 0.2
发动机	额定功率/kW
	134.9
	额定转速/(r·min ⁻¹)
	2 200
动力输出轴	转速/(r·min ⁻¹)
	540/1 000
	最大功率/kW
	120.6
液力变矩器	循环圆直径/mm
	375
	额定输入转速/(r·min ⁻¹)
	2 200
	额定输入功率/kW
	142
	零速变矩比
	3.1
	最高效率/%
	≥88
变速器挡位数	
6(F) + 6(R)	
传动比	重载Ⅰ挡
	2.25
	重载Ⅱ挡
	1.87
	轻载Ⅰ挡
	1.56
	轻载Ⅱ挡
	1.30
	运输Ⅰ挡
	0.88
	运输Ⅱ挡
	0.74
最大牵引力/kN	
67.5	

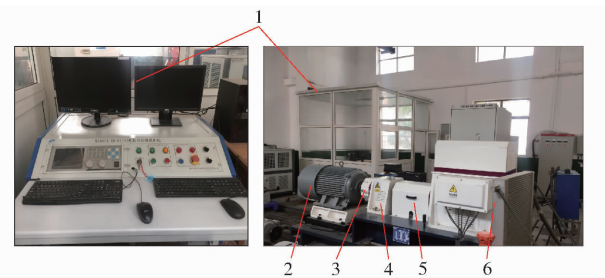


图 2 液力传动部件加载试验平台

Fig.2 Loading test platform for hydraulic transmission

1. 综合性能测试系统平台 2. 驱动电机模块 3. 惯性能量飞轮
4. 速矩监测传感模块 5. 液力变矩器安装机位防护罩 6. 加载装置

温不超过 120℃,测量仪器精度为转矩 ± 5% (N·m),转速 ± 4% (r/min),压力和温度 1.5 级,流量 ± 1.5%,待工况稳定后采集数据,绘制 YJ375A 型液力变矩器相关特性曲线。

基本牵引工况特性试验方法为:提高泵轮输入轴转速到规定值并保持不变,通过调节负载,改变涡轮轴转速,测量试验点根据转速比间隔确定为 0.1,在最高效率点处以及耦合器工况处缩小间距至 0.05。图 4 为 YJ375A 型液力变矩器基本牵引工况

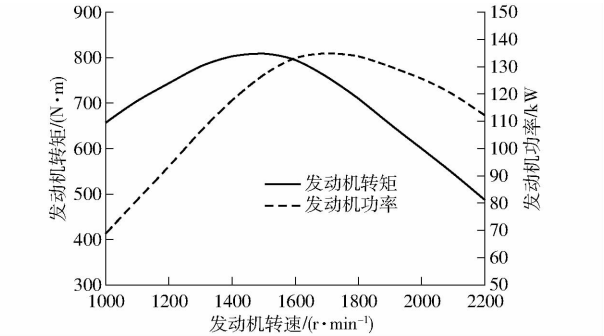


图3 发动机外特性曲线

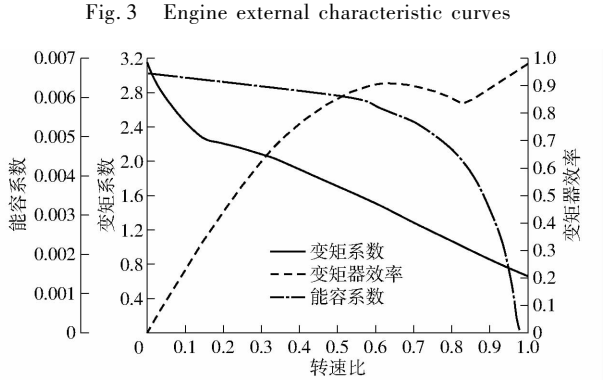


图4 液力变矩器基本牵引工况特性曲线

Fig.4 Basic traction characteristic curves of hydraulic torque converter

特性曲线。能容系数基本覆盖整个液力变矩器工作区间,泵轮轴吸收功率能力符合拖拉机驱动要求。液力变矩器高效区($\eta_y \geq 0.75$)对应转速比范围为0.39~0.85,最高效率为0.894,此时对应转速比为0.65,能容系数为 5.5×10^{-3} ;当转速比超过0.85时,转换为耦合工况。

实用匹配牵引性能试验方法为:输入力矩和转速按照匹配发动机油门全开时净转矩曲线值输入到液力变矩器泵轮轴上的外特性曲线进行调节,试验从输出转速为0开始,以设定增量逐次提高至预定值,再以相同的增量逐次降低至0。如图5a所示,以液力变矩器高效区特性曲线通过发动机恒功率区间,使得变矩器高效区尽可能与发动机高功率区重合,根据式(4),对于每个转速比都有唯一 λ_b 与其对应,有

$$a_0 + a_1 n_{bi} + (a_2 - \lambda_{bi} \rho g D_y^5) n_{bi}^2 + a_3 n_{bi}^3 = 0 \quad (14)$$

式中 a_0, a_1, a_2, a_3 ——多项式待定系数

n_{bi} ——不同转速比对应泵轮输入转速, r/min

λ_{bi} ——不同转速比对应泵轮转矩系数

采用 Matlab 非线性方程求根函数,得到共同工作点泵轮转速范围为1620~1910 r/min。如图5b所示,以速矩监测模块采集样点(n_{wi}, T_{wi})为离散函数值,利用最小二乘法对其进行一元线性拟合,涡轮高效区转速范围为814~1562 r/min,最大输出扭矩

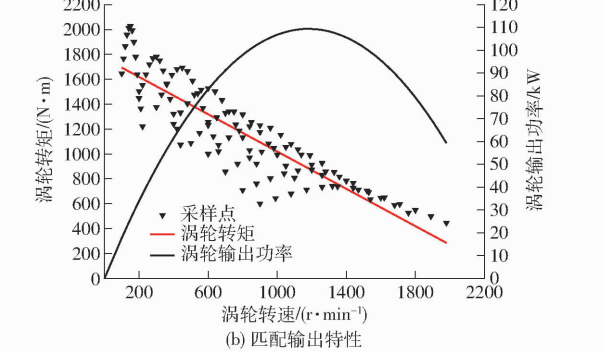
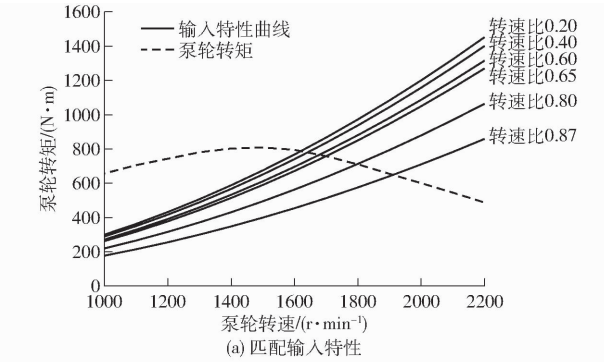


图5 发动机与液力变矩器匹配牵引特性曲线

Fig.5 Engine and torque converter matching traction characteristic curves

为1768.7 N·m。在实际使用时,转速分布规律 $f(n_w)$ 随拖拉机外载荷呈现不规则变化,因此采用均匀分布比较性计算方法获得接近实际的特性,有

$$f(n_w) = 1 / (n_w'' - n_w') \quad (15)$$

式中 n_w' ——高效区涡轮最小工作转速, r/min

n_w'' ——高效区涡轮最大工作转速, r/min

高效区平均输出功率为

$$\bar{P}_w = \int_{n_w'}^{n_w''} f(n_w) \frac{T_{wi} n_{wi}}{9550} dn_w = 105.7 \text{ kW} \quad (16)$$

共同工作输出稳定且范围较宽,符合设计要求。

4 性能分析

机组牵引特性作为拖拉机作业时主要动力性能指标,同时也是验证发动机与传动系统、行走机构与负载农具之间参数匹配合理程度的重要依据^[21-25]。根据图1传动结构方案与表1离合器控制逻辑,在SimulationX仿真软件中建立性能计算模型如图6所示,导入拖拉机相关尺寸参数以及试验数据,绘制HMD1804型拖拉机牵引特性曲线,并进行性能对比分析。

图7为滑转率-牵引力关系曲线。对于自然密实粘性新切土典型地面条件,滑转率有经验公式

$$\xi = 0.1 \frac{F_{TM}}{m_s g} + 9.24 \left(\frac{F_{TM}}{m_s g} \right)^8 \quad (17)$$

式中 ξ ——滑转率

F_{TM} ——牵引力, kN

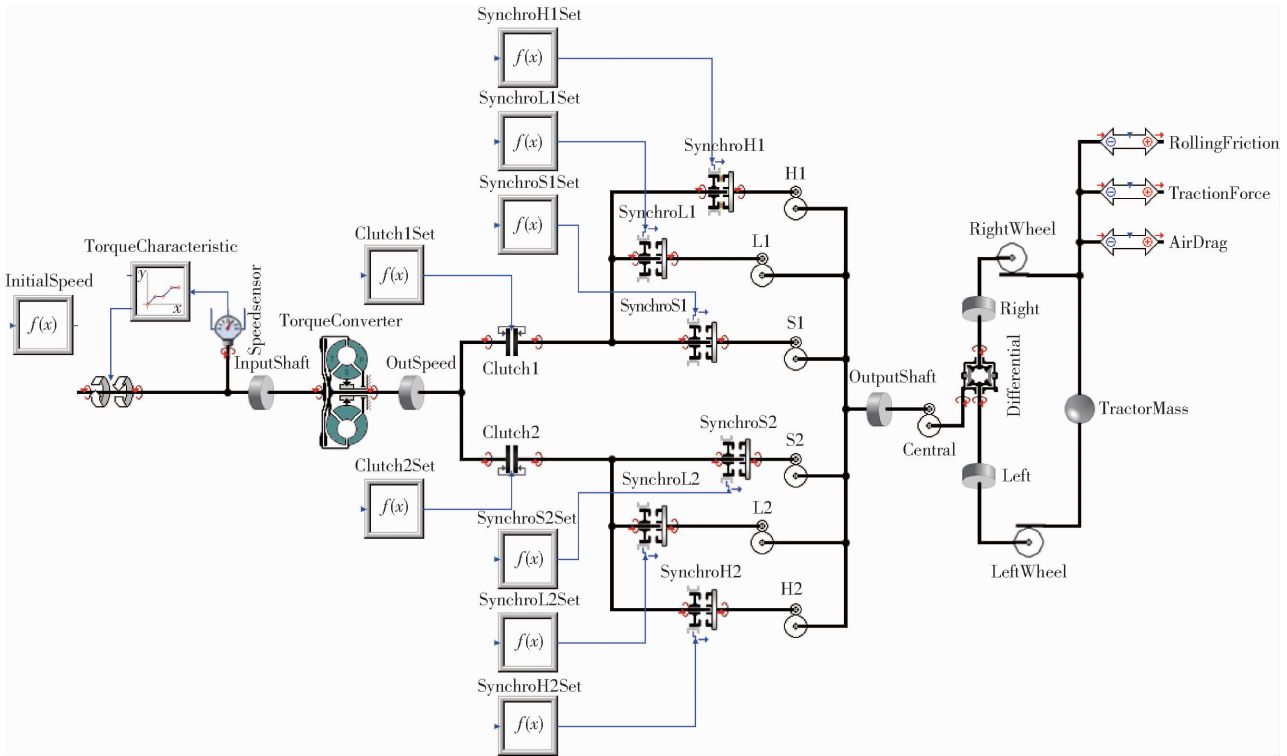


图 6 串联式液力机械复合传动拖拉机性能计算模型

Fig. 6 Performance calculation model of series hydraulic mechanical hybrid drive tractor

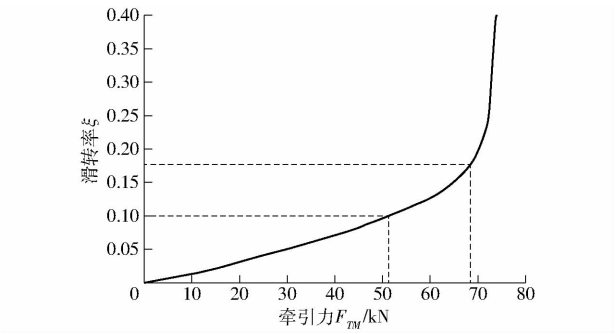


图 7 牵引力与滑转率关系曲线

Fig. 7 Relationship curves between traction and slippage rate

可以看出,当牵引力低于 52 kN 时,滑转率小于 0.1,此时滑转对整机牵引性能影响较小;当滑转率达到 0.18 时,拖拉机能够发挥出最大牵引力 67.5 kN;当达到最大驱动力 75.2 kN 时,滑转率超过 0.4,对牵引稳定性有较大影响。

图 8 为牵引力-牵引功率关系曲线。可以看出, HMD 牵引特性场基本位于原拖拉机与 HMCVT 之间,挡位数量减少 50%,各挡牵引功率峰值幅度变化平稳,深谷面积明显减小,覆盖牵引力范围提升 15.3%。处于基本工作段 H1 时,由于液力传动能耗损失以及较大的滑转率,导致牵引功率低于原特性场;处于 L1 段附近时,能够达到最大牵引功率 86.2 kW,原因在于此时地面附着能力良好,滑转率影响较小;处于 S1 段时,牵引功率为 79.3 kW,高于原拖拉机功率需求。

图 9 为牵引力-作业速度关系曲线。可以看

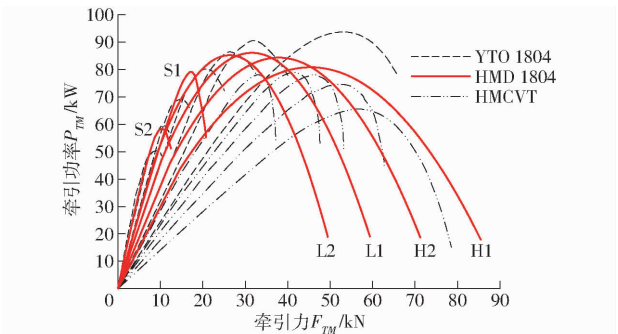


图 8 牵引力与牵引功率关系曲线

Fig. 8 Relationship curves between traction and traction power

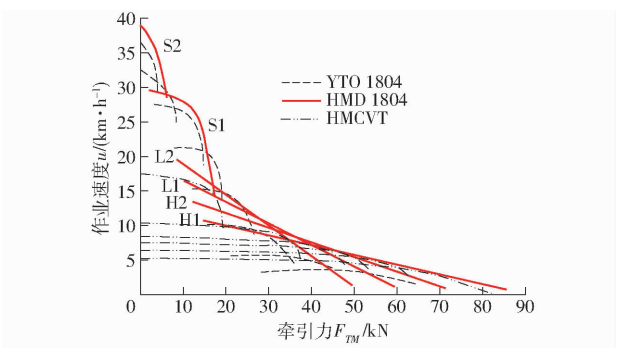


图 9 牵引力与作业速度关系曲线

Fig. 9 Relationship curves between traction and working speed

出, HMD 拖拉机在满足额定牵引力条件下, 负载作业速度较原拖拉机和 HMCVT 平均提升 8.2% 和 4.7%, 并且在 H1、H2、L1、L2 区段拥有无级调速

特性。处于重载区段时,发挥最大牵引力的车速为3.25 km/h,此时牵引力覆盖范围较大,充分实现高效率耕作;处于轻载区段的牵引力变化范围为8.5 ~ 59.4 kN,作业速度变化范围为0 ~ 19.6 km/h,占拖拉机正常工况需求的75.4%;处于运输区段最高行驶速度可以达到38.9 km/h,低负载工况下效率得到大幅度提升。

图10为HMD 1804型拖拉机犁耕特性曲线。取耕深 h_k 与土壤比阻 k_t 的乘积为0.30 kN/cm,在正常工作负载范围内,重载区段能够提供驱动力72.2 kN供六铧犁作业;轻载区段能够满足四铧犁(47.6 kN)到双铧犁(24.3 kN)驱动力需求。

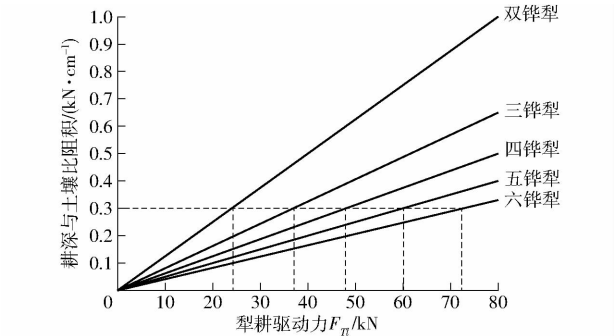


图10 犁耕驱动力与犁铧个数关系曲线
Fig. 10 Relationship curves between plough driving force and number of ploughshares

图11为HMD 1804型拖拉机旋耕特性曲线。设拖拉机配套旋耕机作业时,土地为留茬地,耕幅为180 cm,耕深为15 ~ 22 cm,旋耕速度为2 ~ 10 km/h。高速和低速PTO稳定区间为990 ~ 1 010 r/min和530 ~ 550 r/min,旋耕机正常作业时输出功率可以达到118.9 kW,能够满足旋耕机较大耕深作业需求。

5 结论

(1)通过分析现有拖拉机传动系统的缺陷,提出了液力变矩器与双离合变速器串联组合传动方案,包括功能需求、传动路线设计、组件特性分析、性能参数计算、仿真模型搭建、试验验证、牵引性能对比等。

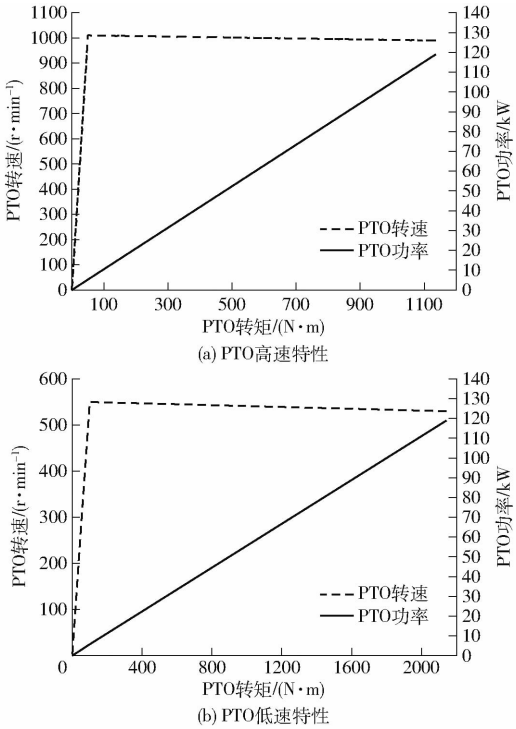


图11 动力输出负载特性曲线
Fig. 11 Load characteristics curves of power take-off

(2)对无级调速模块有效性进行牵引特性试验和匹配性能试验,结果表明:液力变矩器高效区对应转速比范围为0.39 ~ 0.85,最高效率为0.894,最大输出扭矩为1 768.7 N·m;依据均匀分布比较性计算方法获得接近实际的平均输出功率为105.7 kW;充分发挥了液力传动自适应阻力调速的优点,重载和轻载区段实现了无级调速,减少了主变速模块换挡次数和冲击度。

(3)基于SimulationX软件搭建性能计算模型,结果表明:HMD牵引特性场位于原拖拉机与HMCVT之间,各挡牵引功率峰值幅度变化平稳,深谷面积明显减小;犁耕工况下,牵引力覆盖范围平均提升15.3%,负载作业速度平均提升8.2%;旋耕工况下,动力输出功率平均提升1.7%。对比分析结果证明了所提出的HMD拖拉机综合性能较好。

参 考 文 献

[1] 徐立友,曹青梅,周志立,等. 拖拉机变速箱发展综述[J]. 农机化研究,2009,31(12):189-192.
XU Liyou, CAO Qingmei, ZHOU Zhili, et al. Review on the development of tractor transmission[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(12): 189-192. (in Chinese)
[2] FOUNTAS S, CARLI G, SORENSEN C G, et al. Farm management information systems: current situation and future perspectives [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 115(7): 40-50.
[3] 贾鸿社,周志立,周政. 拖拉机机组系统研究现状及展望[J]. 拖拉机与农用运输车, 2000(4): 13-17.
JIA Hongshe, ZHOU Zhili, ZHOU Zheng. The present and future of the tractor implement system study [J]. Tractor and Farm Transporter, 2000(4): 13-17. (in Chinese)
[4] 谢斌,武仲斌,毛恩荣. 农业拖拉机关键技术发展现状与展望[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 1-17.
XIE Bin, WU Zhongbin, MAO Enrong. Development and prospect of key technologies on agricultural tractor [J]. Transactions of

- the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(8):1-17. (in Chinese)
- [5] CHEN Zhifeng,LIU Yanfang,FU Yanxiao,et al. Motor-torque-limited power-on upshift control in electric vehicles with automatic transmissions[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,2016,230(1):18-36.
- [6] LIANG Jiejunyi,WALKER P D,RUAN Jiageng,et al. Gearshift and brake distribution control for regenerative braking in electric vehicles with dual clutch transmission[J]. Mechanism and Machine Theory,2019,133(5):1-22.
- [7] 席志强,周志立,张明柱,等. 拖拉机动力换挡变速器换挡特性与控制策略研究[J]. 农业机械学报,2016,47(11):350-357. XI Zhiqiang,ZHOU Zhili,ZHANG Mingzhu,et al. Shift characteristics and control strategy of powershift transmission on tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(11):350-357. (in Chinese)
- [8] TANELLI M,PANZANI G,SAVARESI S M,et al. Transmission control for power-shift agricultural tractors: design and end-of-line automatic tuning[J]. Mechatronics,2011,21(1):285-297.
- [9] 徐立友,周志立,张明柱,等. 拖拉机液力机械无级变速器的特性分析[J]. 中国农业大学学报,2006,11(5):70-74. XU Liyou,ZHOU Zhili,ZHANG Mingzhu,et al. Characteristics analysis of hydro-mechanical continuously variable transmission of tractor[J]. Journal of China Agricultural University,2006,11(5):70-74. (in Chinese)
- [10] 杨树军,张曼,曾盼文,等. 液力机械无级传动全功率换挡过程排量比调节模型[J]. 农业工程学报,2019,35(13):64-73. YANG Shujun,ZHANG Man,ZENG Panwen,et al. Model of regulating displacement ratio in full power shifting process of hydro-mechanical variable transmission[J]. Transactions of the CSAE,2019,35(13):64-73. (in Chinese)
- [11] LI Guoqiang,GORGES D. Optimal control of the gear shifting process for shift smoothness in dual-clutch transmissions[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2018,103(5):23-38.
- [12] 廖林清,马安朋,张君,等. 双离合器自动变速器关键技术及应用前景分析[J]. 机械传动,2015,39(6):196-199. LIAO Linqing,MA Anpeng,ZHANG Jun,et al. Analysis of key techniques and application prospect of dual clutch transmission[J]. Journal of Mechanical Transmission,2015,39(6):196-199. (in Chinese)
- [13] MATTHES B. Dual clutch transmission-lessons learned and future potential[J]. SAE Technical Papers,2005(1):1021.
- [14] 徐立友,刘海亮,魏明亮. 拖拉机双离合器自动变速器传动系统建模与仿真分析[J]. 农机化研究,2015,37(11):236-242. XU Liyou,LIU Hailiang,WEI Mingliang. Modeling and simulation of dual clutch automatic transmission triving system for tractor[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2015,37(11):236-242. (in Chinese)
- [15] GOETZ M,LEVESLEY M C,CROLLA D A. Intergraded powertrain control of gearshifts on twin clutch transmission[J]. SAE Technical Papers,2004,2(22):16-17.
- [16] 陈飞,张魁榜,方志勤,等. 湿式双离合器自动变速器应用匹配技术[J]. 西华大学学报(自然科学版),2018,37(5):92-96. CHEN Fei,ZHANG Kuibang,FANG Zhiqin,et al. Application matching of the wet dual clutch transmission[J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition),2018,37(5):92-96. (in Chinese)
- [17] 徐礼超,侯学明. 基于典型工况的装载机发动机与液力变矩器匹配[J]. 农业工程学报,2015,31(7):80-84. XU Lichao,HOU Xueming. Power matching on loader engine and hydraulic torque converter based on typical operating conditions[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(7):80-84. (in Chinese)
- [18] SUN Wei,MA Bing,MA Jin,et al. Dynamic matching analysis of engine and torque converter in tracked coach car[J]. Advanced Materials Research,2014,945-949:314-318.
- [19] 王安麟,章明犬,李文嘉,等. 采用装载机整机实验的液力变矩器性能匹配指标[J]. 西安交通大学学报,2015,49(10):54-60. WANG Anlin,ZHANG Mingquan,LI Wenjia,et al. Performance matching index of torque converter based on loader tests[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2015,49(10):54-60. (in Chinese)
- [20] 王振宝,秦四成. 基于典型工况液力变矩器匹配性能的优化[J]. 中南大学学报(自然科学版),2017,48(2):331-336. WANG Zhenbao,QIN Sicheng. Optimization of matching on torque converter with engine based on typical operating condition[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2017,48(2):331-336. (in Chinese)
- [21] 徐立友,赵一荣,赵学平,等. 电动拖拉机综合台架试验系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(1):355-363. XU Liyou,ZHAO Yirong,ZHAO Xueping,et al. Design and test of multifunctional test system for electric tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(1):355-363. (in Chinese)
- [22] ZENG Haiyang,XU Wei,ZANG Mengyan,et al. Calibration of DEM-FEM model parameters for traction performance analysis of an off-road tire on gravel terrain[J]. Powder Technology,2020,362(2):350-361.
- [23] MD-TAHIR H,ZHANG Jumin,XIA Junfang,et al. Rigid lugged wheel for conventional agricultural wheeled tractors-optimising traction performance and wheel-soil interaction in field operations[J]. Biosystems Engineering,2019,188(12):14-23.
- [24] 赵思夏,刘孟楠,徐立友. 电动拖拉机底盘多目标优化设计[J]. 农业机械学报,2018,49(增刊):492-498. ZHAO Sixia,LIU Mengnan,XU Liyou. Optimization design of electric tractor chassis based on multiple performance objectives[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(Supp.):492-498. (in Chinese)
- [25] 刘孟楠,周志立,徐立友,等. 基于随机载荷功率谱的电动拖拉机复合能量系统研究[J]. 农业机械学报,2018,49(2):358-366. LIU Mengnan,ZHOU Zhili,XU Liyou,et al. Electric tractor energy system and management strategy research based on load power spectral density[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(2):358-366. (in Chinese)