

混合动力拖拉机传动系统设计理论与方法*

邓晓亭 朱思洪 高辉松 张莹
(南京农业大学工学院, 南京 210031)

【摘要】 根据混合动力传动系统原理和拖拉机工作特性和传动特性要求,设计了一种并联式混合动力拖拉机传动系统。在对混合动力拖拉机牵引特性理论分析的基础上,提出了混合动力拖拉机动力性和经济性评价指标及其计算公式。并对其动力传动系统各部件主要参数的设计计算进行了探讨,提出了混合动力拖拉机传动系统的设计理论和计算方法。以某混合动力拖拉机为研究对象,通过计算分析了不同挡位下,发动机分别提供60%和40%负荷时的驱动力和爬坡度,以及混合动力拖拉机犁耕作业稳定工作1h的等效能耗随发动机和电动机转速的变化关系,并对犁耕作业时的理论计算结果进行了仿真验证。结果表明,各挡驱动力和爬坡度与发动机提供的负荷呈正比,而转速匹配范围随发动机负荷的增大而减小。犁耕作业时,理论计算结果与仿真分析结果的最大误差不超过4%,理论计算结果可靠;且在某一挡位下,等效能耗随发动机和电动机转速的增高而增高。对混合动力拖拉机与同功率燃油拖拉机进行了仿真比较分析,发现混合动力拖拉机在犁耕作业下,最高可节能24%。

关键词: 混合动力拖拉机 传动系统 评价指标 设计理论 计算方法
中图分类号: S219.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)08-0024-08

Design Theory and Method for Drive Train of Hybrid Electric Tractor

Deng Xiaoting Zhu Sihong Gao Huisong Zhang Ying
(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract

According to the theory of hybrid electric drive train and requirements of working properties and transmission characteristics of tractors, a drive train for parallel hybrid electric tractor (PHET) was designed. Evaluation indicator and calculation model for dynamic and economic performance of hybrid electric tractor (HET) were suggested based on the theory analysis of traction characteristics of HET. The parameter design methods of each component of drive train were discussed. The theory of design and calculation method for drive train of HET was proposed. Taking a designed HET as study object, the changing relationship of driving force and climbing property with the speed changing of engine and motor under different gearshift when engine was working on 60% and 40% of load, and the changing relationship of equivalent energy consumption for 1 h steady operation on plowing with the speed changing of engine and motor under different gearshift were analyzed by calculating. The calculation result of plowing status was checked by simulation model. Results showed that driving force and climbing property were directly proportional with the load of engine, but speed matching range of engine and motor decreased with the increasing of working load of engine. Moreover, when plowing, the error rate was not over 4% in maximum between calculation result and simulation result, and when increasing the speed of engine and motor, equivalent energy consumption increased under a certain gearshift. Furthermore, the energy conservation of HET was higher by 24% in maximum compared to traditional tractor with the same power.

Key words Hybrid electric tractor, Drive train, Evaluating indicator, Design theory, Calculation method

收稿日期: 2012-02-28 修回日期: 2012-04-26
* 引进国际先进农业科学技术计划(948计划)资助项目(2010-Z18)和江苏省普通高校研究生科研创新计划
作者简介: 邓晓亭, 博士生, 主要从事车辆电驱动及控制研究, E-mail: xiaotingdeng@yahoo.com.cn
通讯作者: 朱思洪, 教授, 博士生导师, 主要从事车辆系统动力学及控制和车辆电驱动及控制研究, E-mail: zhushihong@njau.edu.cn

引言

汽车燃油消耗和尾气排放所造成的资源短缺和环境污染一直备受关注,而非公路车辆所造成的影响未被重视。美国环境保护总署(EPA)的调查显示,到 2020 年无控制的非公路车辆将产生 33% 的 HC、9% 的 CO、9% 的 NO_x 和 2% 的微粒物排放^[1],其中,农用车辆所占的比重相当高,因此开展节能环保型农用车辆,特别是混合动力拖拉机的研究具有重要意义。

目前,混合动力拖拉机的研究主要集中在国外。Stanislav 等设计了 300 马力的串联式混合动力拖拉机,并与同马力的下动力换挡式拖拉机进行了犁耕作业比较试验研究,发现串联式混合动力拖拉机在犁耕作业时生产率提高了 2%,且节油 18%^[2]。Manuel 等研制了应用在农业机械和拖拉机上的混合动力驱动系统,并进行了仿真研究,发现在混合动力模式下进行犁耕作业时能节油 5%^[3]。国内仅有史立新等对串联混合动力拖拉机的传动系统参数设计进行了理论方面的研究^[4],尚未见到其他相关的研究报道。

与混合动力汽车主要靠制动能量回收及再利用和通过控制策略使发动机工作在最佳工况进行节能减排^[5]不同,混合动力拖拉机主要通过控制策略使发动机工作在最佳工况,以及不同作业工况下通过不同驱动方式优化匹配的方法来节能减排,因此开展混合动力拖拉机传动系统设计理论与方法的研究,对提高混合动力拖拉机的节能减排具有重要意义。本文设计一种动力耦合装置和变速箱协同调速的并联式混合动力拖拉机传动系统,对传动系统各部件主要参数的设计理论与方法进行探讨,结合所设计的混合动力拖拉机,对所提出的设计理论与方法进行验证。

1 混合动力拖拉机传动系统

1.1 传动方案

图 1 为混合动力拖拉机传动系统原理图。该拖拉机主要由发动机、制动装置、动力耦合装置、电动机、电动机控制器、蓄电池、离合器、胶带、变速箱差速器集成装置(以下简称变速箱)和驱动桥等组成。

发动机是其主动力源,采用压燃式单缸柴油机,动力性能稳定、可靠。设计了行星差动轮系式动力耦合装置,它由一级变速斜齿轮传动、单排行星差速轮系传动和一级定轴直齿轮传动组成,用于对发动机和电动机的动力进行切换及匹配耦合,可实现发动机或电动机单独工作或发动机与电动机同时工作

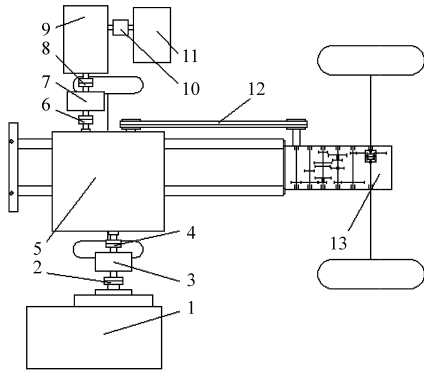


图 1 混合动力拖拉机传动系统方案

Fig. 1 Scheme of drive train of HET

1. 发动机 2、4、6、8. 联轴器 3、7. 制动装置 5. 动力耦合装置
9. 电动机 10. 电动机控制器 11. 蓄电池 12. 胶带 13. 变速箱差速器集成装置

(同向或反向)。其辅助动力源电动机采用串励直流电动机,启动转矩大、启动性能好,有较宽的恒功率调速范围,能满足电动机单独工作时和混合动力模式时的动力需求。

发动机与动力耦合装置中一级变速斜齿轮传动的输入轴相连,电动机与动力耦合装置中一级定轴直齿轮传动的输入轴相连。工作时,发动机的动力经过一级变速斜齿轮传动至单排行星差动轮系的太阳轮,电动机的动力经一级定轴直齿轮传动至单排行星差动轮系的外齿圈,动力由单排行星差动轮系的行星架输出。

电动机控制器采用直流斩波控制器,用于控制电动机的转速,在混合动力模式工作时,配合动力耦合装置自动调节电动机转速,使动力耦合装置正常运转。采用铅酸蓄电池,为电动机提供电能且回收贮存电能。离合器位于变速箱输入端,用于接通和切断动力耦合装置到驱动轮间的动力传递。发动机和电动机输出端各设有一个制动装置,在其单独工作时将电动机或发动机锁死,用于切换动力。发动机、电动机和动力耦合装置共称为总动力源,动力由总动力源传出,经胶带传动传至变速箱,再由变速箱传至后驱动轮。

1.2 总动力源传动建模

总动力源中发动机和电动机的输出转速、转矩和功率与动力耦合装置的输出转速、转矩和功率间存在关系

$$n_H = \frac{\frac{n_e}{i_e} + \frac{pn_m}{i_m}}{1 + p} \tag{1}$$

式中 n_H 、 n_e 、 n_m ——发动机、电动机和动力耦合装置的输出转速, r/min
 p ——行星排特征参数

$i_e、i_m$ ——一级变速斜齿轮和一级定轴直齿轮传动比

$$T_H = -(1+p)T_e i_e \eta_e = -\frac{1+p}{p}T_m i_m \eta_m \quad (2)$$

其中 $\eta_e = \eta_{ce} \eta_o \quad \eta_m = \eta_{cm} \eta_o$

式中 $T_H、T_e、T_m$ ——发动机、电动机和动力耦合装置的输出转矩, N·m

$\eta_e、\eta_m$ ——发动机端和电动机端的传动效率, 即分别从发动机、电动机到动力耦合装置输出端的传动效率

$\eta_{ce}、\eta_{cm}$ ——发动机和电动机分别到动力耦合装置中行星差动轮系的太阳轮和齿圈的传动效率

η_o ——动力耦合装置中行星差动轮系传动效率

$$P_H = (q-1)P_e \eta_e = -\frac{q-1}{q}P_m \eta_m \quad (3)$$

其中 $q = -\frac{pn_m}{n_e}$

式中 $P_H、P_e、P_m$ ——发动机、电动机和动力耦合装置的功率, kW

q ——行星差动轮系功率分配系数

2 混合动力拖拉机动力性能评价

拖拉机主要用于农田作业和道路运输。不同作业工况下其阻力载荷是不同的^[6]。根据其作业工况,将拖拉机的作业模式分为3种^[7]:重载模式(100%全功率)、中载模式(约85%全功率)和轻载模式(约70%全功率)。根据载荷模式,设计了混合动力拖拉机的3种工作模式:当进行犁耕或重载运输等作业时,用混合动力模式;当进行收获或中载运输等作业时,用发动机单独工作模式或混合动力模式;当进行播种或轻载运输等作业时,用电动机单独工作模式。其动力性能主要从牵引性能、爬坡度和加速时间3方面进行评价。

2.1 牵引性能

2.1.1 牵引平衡方程式

图2为后轮驱动混合动力拖拉机在牵引作业工况下的受力分析图。图中 G 为混合动力拖拉机使用总重,作用在拖拉机的质心(a, h)上; F_D 为牵引阻力,即牵引农具的总牵引阻力在水平面的分力,(由于 γ 较小,垂直分力 $F_D'\tan\gamma$ 忽略不计); F_q 为驱动力,即驱动轮受到平行地面的土壤反作用力; $S_e、S_q$ 分别为前、后轮受到的土壤水平反作用力,近似用拖拉机总滚动阻力 $F_f = Gf$ 来代替($S_e + S_q$); $Z_e、Z_q$ 分别为前、后轮受到的土壤垂直反作用力; $r_e、r_q$

分别为前、后轮动力半径; $a_e、a_q$ 分别为前、后轮土壤反作用力作用点至轮胎垂直轴线的距离; a_D 为牵引阻力作用点至驱动轮垂直轴线的距离; L 为混合动力拖拉机轴距。

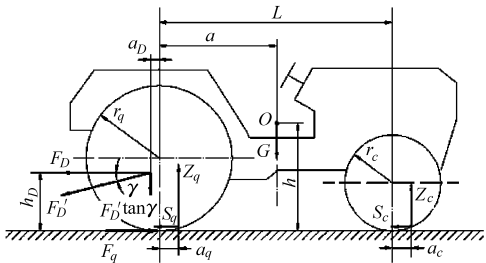


图2 混合动力拖拉机受力分析
Fig. 2 Force analysis of HET

考虑各个力在水平方向的平衡,可得到混合动力拖拉机总的牵引平衡方程式为

$$F_q = F_D + F_f \quad (4)$$

2.1.2 额定牵引力

以拖拉机最基本且负荷最重的犁耕作业为例,混合动力拖拉机牵引农具所需要的牵引阻力 F_D 可用正常工作条件下农具所受的平均阻力表示,即

$$F_D = zb_l h_k k \quad (5)$$

式中 z ——犁铧数 b_l ——单犁铧宽度, cm

h_k ——耕深, cm k ——土壤比阻, N/cm²

考虑到因工作条件和农具的变化所引起的阻力变化,一般应该留有10%~20%的储备牵引能力。所以混合动力拖拉机额定牵引力 F_{DN} 可表示为

$$F_{DN} = (1.1 \sim 1.2) F_D \quad (6)$$

2.1.3 牵引效率

混合动力拖拉机的牵引效率 η_T 是混合动力拖拉机在水平地面稳定作业时所发挥的牵引功率 P_T 与动力耦合装置有效功率 P_H 的比值,即

$$\eta_T = P_T / P_H \quad (7)$$

又可表示为^[8-9]

$$\eta_T = \eta_H \eta_\delta \eta_f \quad (8)$$

其中 $\eta_\delta = 1 - \delta \quad \eta_f = F_D / F_q$

式中 η_H ——机械传动效率(从变速箱到驱动轮的传动效率)

η_δ ——滑转效率 δ ——滑转率

η_f ——滚动效率

2.2 爬坡度

以混合动力拖拉机运输工况为例,计算其爬坡度。设混合动力拖拉机在坡度角为 α 的坡道上匀速行驶,则牵引平衡方程式(4)变为

$$F_q = F_D + F_f + F_i = G_n(f\cos\alpha + \sin\alpha) + Gf\cos\alpha + G\sin\alpha \quad (9)$$

式中 F_i ——坡度阻力, N

G_n ——拖车和货物的总重, N

f ——滚动阻力系数

混合动力拖拉机在不同挡位下所能产生的最大驱动力为

$$F_q = \frac{T_H i_b i_g \eta_T}{r_q} \tag{10}$$

式中 i_b 、 i_g ——胶带传动和变速箱(包括中央传动)的传动比

由式(9)和式(10)可得坡度角为

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{T_H i_b i_g \eta_T}{(G_n + G) r_q} - f \right) \tag{11}$$

爬坡度为

$$i_H = \tan \alpha = \tan \left(\arcsin \left(\frac{T_H i_b i_g \eta_T}{(G_n + G) r_q} - f \right) \right) \tag{12}$$

2.3 加速时间

混合动力拖拉机加速行驶时需克服加速阻力 F_j , 加速时, 平移质量产生惯性力, 旋转质量产生惯性力矩。为了便于计算, 把旋转质量的惯性力矩转换为平移质量的惯性力, 则

$$F_j = \delta m \frac{du}{dt} \tag{13}$$

式中 δ ——旋转质量换算系数, $\delta > 1$
 m ——混合动力拖拉机质量, kg
 u ——行驶速度, km/h

起步加速时, 混合动力拖拉机行驶平衡方程

$$F_q = F_f + F_j \tag{14}$$

由式(13)和式(14)可得加速时间为

$$t = \int_{u_1}^{u_2} \frac{\delta m}{\frac{T_H i_b i_g \eta_T}{r_q} - f G} du \tag{15}$$

3 经济性能评价

燃油拖拉机的经济性主要用耗油率, 即拖拉机的小时耗油量和牵引功率之比来评价^[10]。纯电动拖拉机的经济性主要用连续作业时间和能耗利用率来评价^[9]。混合动力拖拉机与上述两类不同, 本文采用牵引燃油消耗率、小时平均电能消耗量和等效能耗作为其经济性能评价指标。

3.1 牵引燃油消耗率

混合动力拖拉机的牵引燃油消耗率 g_T 是其小时耗油量 G_T 和牵引功率 P_T 之比, 即

$$g_T = \frac{1\,000 G_T}{P_T} = \frac{1\,000 g_e}{(q-1) \eta_e \eta_T} \tag{16}$$

式中 g_e ——发动机的燃油消耗率, g/(kW·h)

3.2 小时平均电能消耗量

蓄电池在 1 h 内放电过程的平均电能消耗量称为小时平均电能消耗量 N_d 。拖拉机工作状态不同,

蓄电池的工作状态会发生改变, 且蓄电池本身有其放电特性。在各稳定阶段蓄电池的总电能消耗量为

$$N_{dN} = \int_{t_1}^{t_2} \frac{U_{d1} I_{d1}}{1\,000} dt + \int_{t_3}^{t_4} \frac{U_{d2} I_{d2}}{1\,000} dt + \cdots \tag{17}$$

则小时平均电能消耗量为

$$N_d = \frac{\sum_{i=1}^n U_{di} I_{di} t_i}{1\,000 t} \tag{18}$$

式中 U_{di} ——某稳定阶段蓄电池输出电压, V
 I_{di} ——某稳定阶段蓄电池输出电流, A
 t_i ——某稳定阶段蓄电池放电时间, s
 t ——总放电时间, s

3.3 等效能耗

混合动力拖拉机的能量消耗由燃油消耗量和电能消耗量 2 部分构成, 其评价指标和计量单位不同。在此提出等效能耗的概念, 根据能量转换关系, 将电能消耗量转换为燃油消耗量, 其总消耗量称为等效能耗。

电能消耗量与燃油消耗量的转换关系为

$$V_E = \frac{3.6 \times 10^3 N_d}{H Q_e} \tag{19}$$

式中 V_E ——转换的燃油消耗量, V
 H ——柴油热值, J/g
 Q_e ——柴油密度, g/cm³

则等效能耗为

$$N_E = \left(G_T + \frac{3.6 \times 10^3 N_d}{H} \right) \frac{t_e}{Q_e} \tag{20}$$

式中 N_E ——等效能耗, L
 t_e ——总工作时间, h

4 传动系统主要参数设计

混合动力拖拉机传动系统的性能与系统中的发动机、电动机和动力耦合装置等的参数匹配有重要关系, 正确地选择这些参数, 能够有效地提高混合动力拖拉机的动力性。

4.1 总功率

混合动力拖拉机总功率是发动机和电动机的功率和, 根据混合动力拖拉机在基本作业挡下所产生的牵引力应大于额定牵引力的原则来确定, 即

$$P_{TH} \geq \frac{F_{DN} u_j}{3\,600 \eta_T \beta} \tag{21}$$

式中 P_{TH} ——混合动力拖拉机总功率, kW
 β ——功率储备系数

总功率中发动机和电动机的功率配比由混合度即电动机功率占总功率的百分比^[11~14]决定

$$R = \frac{P_{Tm}}{P_{TH}} = \frac{P_{Tm}}{P_{Te} + P_{Tm}} \tag{22}$$

式中 R ——混合度

P_{Te} 、 P_{Tm} ——发动机和电动机额定功率, kW

混合度主要由动力系统的总功率、燃油经济性要求和混合度边值条件来决定^[14]。从式(21)、(22)可以看出,当混合动力拖拉机总功率确定后,混合度可由电动机的功率来决定。电动机的功率由电动机单独工作模式下播种等轻载作业的载荷决定,需要发挥全功率的70%左右,而由电动机特性可知,其峰值功率可达到额定功率的2倍以上,计算得到混合度为35%,再根据混合动力拖拉机的燃油经济性要求和混合度边值条件等约束条件,确定混合度为30%,则发动机与电动机的功率比为7:3。

4.2 变速器参数

变速箱的传动比可根据拖拉机不同作业时设置的各挡理论速度计算。为了使各挡都能充分利用主动力源发动机的功率及获得较好的经济性,变速箱的传动比主要根据发动机额定转速来确定,即

$$i_g \approx 0.377 \frac{n_{eN} r_q}{u_{jN}} \tag{23}$$

式中 i_g ——变速箱传动比

n_{eN} ——发动机额定转速, r/min

u_{jN} ——第 j 挡下的理论速度, km/h

4.3 动力耦合装置参数

根据混合动力拖拉机的工作和传动特性要求,及发动机、电动机和变速器参数,设计了动力耦合装置。根据3种模式下混合动力拖拉机的最高行驶速度要求,得到3种模式下动力耦合装置中单排差动行星轮系传动比的计算公式为

混合动力模式

$$i_{ab}^H = \frac{0.377 n_e r_q - u_{Hmax} i_j i_e i_m}{0.377 n_m r_q - u_{Hmax} i_j i_e i_m} \tag{24}$$

发动机单独工作模式

$$i_{aH}^b = \frac{0.377 n_e r_q}{u_{emax} i_j i_e} \tag{25}$$

电动机单独工作模式

$$i_{bH}^a = \frac{0.377 n_m r_q}{u_{mmax} i_j i_m} \tag{26}$$

式中 i_{ab}^H 、 i_{aH}^b 、 i_{bH}^a ——混合动力模式、发动机单独工作模式和电动机单独工作模式下的传动比

u_{Hmax} 、 u_{emax} 、 u_{mmax} ——混合动力模式、发动机单独工作模式和电动机单独工作模式下最高行驶速度, km/h

根据行星排特征参数 p 、行星差动轮系传动比间的关系和行星齿轮传动运动学普遍关系,将混合

动力模式和电动机单独工作模式下的传动比转换为发动机单独工作模式下的传动比,并对其进行比较。综合拖拉机工作要求,并根据行星差动轮系设计原理确定 i_{aH}^b 。

4.4 动力蓄电池参数

蓄电池是电动机单独工作时的重要参数,它决定了电动机单独工作时所能提供的最大动力。先选定蓄电池类型,再根据电动机最大功率确定其数目^[7]。

由欧姆定律可知, t 时刻蓄电池端电压为

$$U_t = E_t - I_t R_t \tag{27}$$

式中 U_t —— t 时刻蓄电池端电压, V

E_t —— t 时刻电动势, V

I_t —— t 时刻放电电流, A

R_t —— t 时刻电池内阻, Ω

设铅酸电池初始电动势为 E_0 , 且恒功率输出, 由式(27)可得蓄电池最大输出功率为

$$P_{bmax} = \frac{E_0^2}{4\,000 R_0} \tag{28}$$

式中 P_{bmax} ——蓄电池最大输出功率, kW

R_0 ——初始时刻电池内阻, Ω

电动机单独工作时, 蓄电池的最大输出功率必须满足电动机的最大功率需求, 因此蓄电池数目为

$$n \geq \frac{P_{mmax}}{P_{bmax} \eta_{mc}} \tag{29}$$

式中 P_{mmax} ——电动机最大功率, kW

η_{mc} ——电动机和电动机控制器效率

5 设计计算实例

以某研发中的混合动力拖拉机为例,应用上述公式对其传动系统进行设计计算和分析。

5.1 主要参数设计

以犁耕作业为例计算混合动力拖拉机的额定牵引力。其配套农具为双犁铧,犁宽为25 cm,耕深为20 cm,土壤比阻为4~6 N/cm²。由式(5)和式(6)计算得到额定牵引力范围为4 400~7 200 N,综合考虑功率储备、电池质量和滚动阻力等因素,额定牵引力取为6 680 N。根据式(21)和功率比,计算得到发动机和电动机的功率,由此选择发动机和电动机的型号。

根据混合动力拖拉机实际作业速度需要,变速箱挡位设计为6个前进挡和1个倒挡,由式(23)计算得到各挡传动比如表1所示。

表 1 变速箱各挡传动比
Tab.1 Gear ratio of each shaft of gearbox

挡位	I	II	III	IV	V	VI	倒挡
传动比	83.90	36.92	26.74	22.09	11.77	7.04	35.77

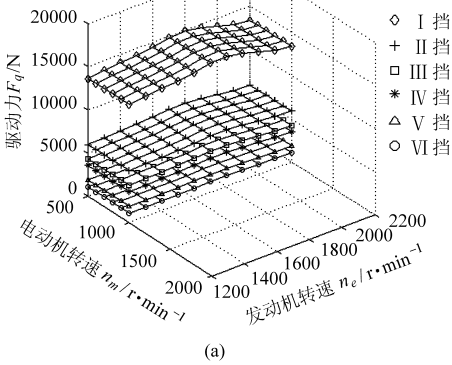
根据上述计算结果,由式(24)~(26)计算得到 3 种模式下的行星差动轮系传动比,经传动比转换比较后,选取行星差动轮系传动比为 3.103 4,行星排特征参数为 2.103 4,行星轮个数为 3 个。根据电动机参数选定蓄电池类型,由式(27)~(29)计算得到蓄电池个数。混合动力拖拉机各部分参数如表 2 所示。

表 2 混合动力拖拉机主要参数

Tab. 2 Main parameters of HET		
整车/ 部件	参数	数值
发动机	额定功率/kW	12.1
	额定转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	2 200
	额定转矩/ $\text{N}\cdot\text{m}$	58.9
电动机	额定功率(最大功率)/kW	5 (11)
	额定转速(最高转速)/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	1 500 (2 000)
	额定转矩(最大转矩)/ $\text{N}\cdot\text{m}$	31.8 (143.1)
电池组	额定电压/V	72
	额定容量/Ah	210
	电池组数/个	12
动力耦合装置	一级变速斜齿轮传动比增速比(增扭比)	1 (0.36)
	单排行星差动轮系传动比	3.103 4
	一级定轴直齿轮传动比	1
变速箱	行星排特征参数	2.103 4
	直齿整体式	6 + 1
整车	结构质量/kg	1 551
	使用质量/kg	1 651
	额定牵引力/N	6 680

5.2 计算结果分析

图 3 所示为发动机和电动机同时同向工作时,发动机提供 60% 负荷(图 3a)和 40% 负荷(图 3b)时,混合动力拖拉机的各挡驱动力。



从图 3 可以看出,在某一挡位下,电动机转速一定时,随发动机转速变化时的驱动力与发动机负荷特性曲线变化一致。发动机提供的负荷越大,驱动力越大。发动机转速一定时,随着电动机转速的增大,受动力耦合装置传动效率的影响,驱动力略有增大。

图 3a 和 3b 比较可知,各挡驱动力和发动机与电动机的转速匹配范围大小与发动机提供的负荷有关。发动机提供的负荷越大,各挡驱动力就越大,但转速匹配范围相应减小,发动机转速范围保持不变,而电动机转速范围变小。如发动机提供 40% 负荷时,电动机转速范围 500 ~ 1 300 r/min ;发动机提供 60% 负荷时,电动机转速范围为 500 ~ 1 000 r/min 。这与发动机和电动机的转矩匹配有关,发动机提供的负荷越大,则需要电动机提供的匹配负荷越大。

图 4 所示为发动机和电动机同时同向工作时,发动机提供 60% 负荷(图 4a)和 40% 负荷(图 4b)时,混合动力拖拉机的爬坡度。

从图 4 可以看出,在某一挡位下,电动机转速一定时,沿发动机转速变化时的爬坡度与发动机负荷特性曲线相似,发动机提供的负荷越大,爬坡度越大。发动机转速一定时,随着电动机转速的增大,爬坡度略有增大。

图 4a 和 4b 比较可知,各挡爬坡度与发动机提供的负荷呈正比,发动机提供的负荷越大,各挡爬坡度越大。发动机分别提供 40% 和 60% 负荷,发动机和电动机转速分别为 1 800 r/min 和 1 000 r/min 时,爬坡度分别为 20.5% 和 33.93%。发动机提供 60% 负荷时,V 挡爬坡度不足 1%;发动机提供 40% 负荷时,V 挡丧失了爬坡能力。

图 5 所示为混合动力拖拉机在犁耕作业下稳定工作 1 h 的等效能耗图,图 5a 为理论计算得到的结果。为了验证理论计算结果,在 SimulationX 中建立

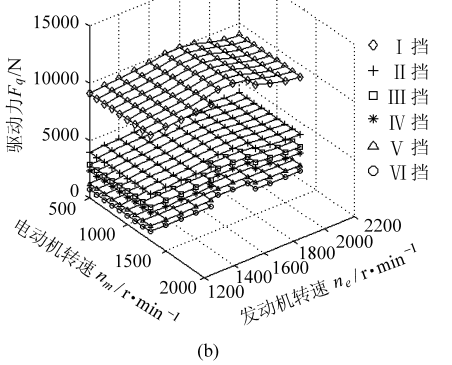


图 3 混合动力拖拉机驱动力

Fig. 3 Driving force diagram of HET

(a) 发动机 60% 负荷 (b) 发动机 40% 负荷

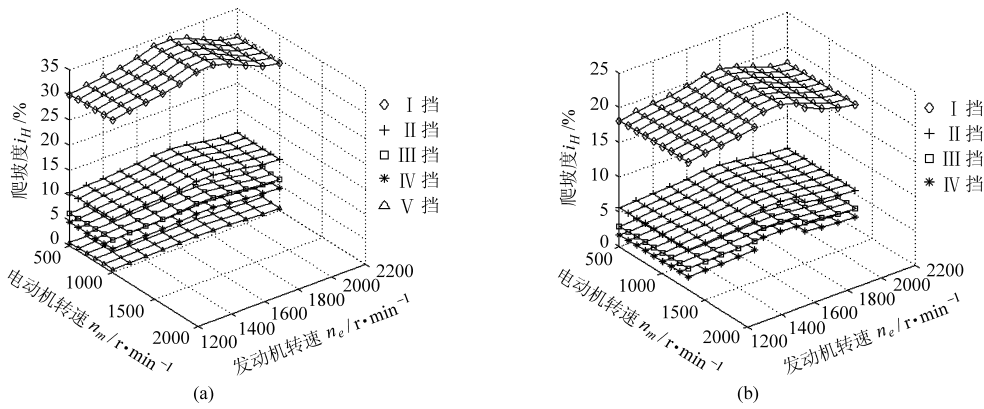


图 4 混合动力拖拉机爬坡度

Fig. 4 Climbing property diagram of HET

(a) 发动机 60% 负荷 (b) 发动机 40% 负荷

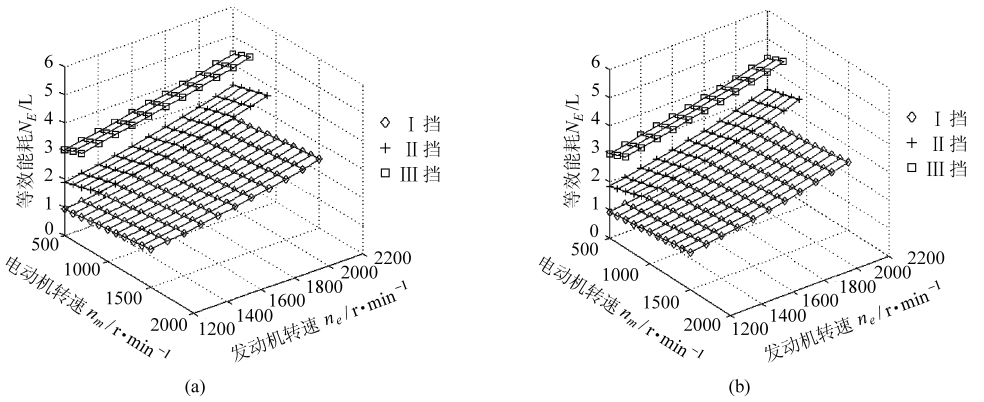


图 5 混合动力拖拉机等效能耗

Fig. 5 Equivalent energy consumption diagram of HET

(a) 理论计算结果 (b) 仿真结果

了混合动力拖拉机仿真模型,得到仿真结果如图 5b 所示。

图 5a 和图 5b 比较可知,当变速箱工作在 I 挡,发动机和电动机转速分别为 1 200 r/min 和 1 300 r/min 时,理论计算和仿真分析得到的等效能耗误差最大,分别为 1.28 L 和 1.26 L,误差率为 1.5%;当变速箱工作在 III 挡,发动机和电动机转速分别为 1 200 r/min 和 700 r/min 时,理论计算和仿真分析得到的等效能耗误差最大,分别为 3.14 L 和 3.02 L,误差为 3.8%。可见,仿真分析结果与理论计算结果的最大误差不超过 4%,说明理论计算结果可靠。

从图 5 中可以看出,当采用混合动力模式进行犁耕作业时,可使用 I、II 和 III 3 个挡位。I 挡时发动机和电动机的转速匹配范围最大,电动机最高转速可达 1 500 r/min,且等效能耗最低;III 挡时转速匹配范围最小,电动机最高转速仅到 700 r/min,且等效能耗最高。说明 III 挡不适宜进行犁耕作业,优先选择 I 挡和 II 挡进行犁耕作业。

在某一挡位下,随着发动机和电动机转速的增加,等效能耗逐渐增高,且随发动机转速增高的幅度

大于随电动机转速增高的幅度。说明犁耕作业时,在某一挡位下,作业速度越快,能量消耗就越大,等效能耗就越大。从图中可以看出,在 I 挡发动机和电动机工作在较高转速时的等效能耗与在 II 挡发动机和电动机工作在较低转速时的等效能耗几乎相等,说明在一定等效能耗范围内,混合动力拖拉机进行某项作业时的动力选择范围较大,可根据牵引效率选择最佳工作点,使得等效能耗最低且牵引效率最高。

图 6 所示为混合动力拖拉机与同功率燃油拖拉机(17 kW 柴油机替代总动力源)在不同作业速度下,犁耕作业 1 h 的等效能耗仿真结果。

犁耕作业时,在相同负载下,混合动力拖拉机可工作在 I 挡、II 挡和 III 挡,其作业速度范围分别为 1.25 ~ 2.98、2.85 ~ 5.18 和 3.94 ~ 6.42 km/h。燃油拖拉机仅能工作在 I 挡,其作业速度为 2.08 ~ 3.81 km/h。作业速度相同时,混合动力拖拉机的等效能耗低于燃油拖拉机,当作业速度在 2.6 ~ 3.0 km/h 时,受发动机和电动机转速匹配的影响,混合动力拖拉机的等效能耗几乎与燃油拖拉机相等。当作业速度在 3.8 km/h 时,混合动力拖拉机与燃油

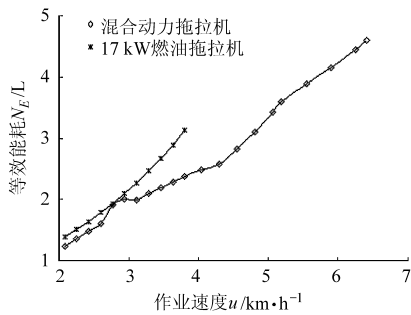


图 6 混合动力拖拉机与燃油拖拉机等效能耗比较

Fig.6 Comparison diagram of equivalent energy consumption between HET and traditional tractor

拖拉机的等效能耗分别为 2.38 L 和 3.13 L,混合动力拖拉机最高可节能 24%。

6 结论

(1) 设计了一种发动机和电动机为动力源,动力耦合装置和变速箱协同调速的并联式混合动力拖拉机传动系统,提出了混合动力拖拉机的动力性和经济性评价指标及其计算公式。

(2) 对混合动力拖拉机动力传动系统主要参数

的设计进行了探讨,并提出了设计计算方法。

(3) 以某型号混合动力拖拉机为设计实例,计算了其在不同挡位下,发动机分别提供 60% 和 40% 负荷时的驱动力和爬坡度随发动机和电动机转速的变化关系。结果表明,各挡驱动力、爬坡度大小与发动机提供的负荷呈正比,而转速匹配范围随着发动机负荷的增大相应减小。

(4) 以犁耕作业为例,计算了在不同挡位下,混合动力拖拉机在此状态下稳定工作 1 h 的等效能耗随发动机和电动机转速的变化关系,并进行了仿真验证。结果表明,理论计算结果与仿真分析结果的最大误差不超过 4%,理论计算结果可靠。挡位越低,发动机和电动机动力匹配范围越大;且在相同的发动机和电动机转速下,等效能耗越低。在某一挡位下,随着发动机和电动机转速的增加,等效能耗逐渐增高。

(5) 对混合动力拖拉机与同功率燃油拖拉机在不同作业速度下,犁耕工作 1 h 的等效能耗进行了仿真比较分析。结果表明,作业速度相同时,混合动力拖拉机的等效能耗低于燃油拖拉机,其最高可节能 24%。

参 考 文 献

1 Mousazadeh H, Keyhani A, Javadi A, et al. Life-cycle assessment of a solar assist plug-in hybrid electric tractor (SAPHT) in comparison with a conventional tractor[J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(3): 1 700 ~ 1 710.

2 Stanislav F, Dmitry I, Lev M, et al. Complete traction electric equipment sets of electro-mechanical drive trains for tractors [C]//IEEE Region 8 Sibircon-2010, Irkutsk Listvyanka, Russia, 2010.

3 Manuel G, Wolf D G, Mark M, et al. Electrically assisted powertrains for agricultural machinery in particular tractors [J]. Vdi-berichte 2060, 2009: 67 ~ 72.

4 史立新,朱思洪,聂信天. 基于串联混合动力系统的拖拉机传动参数设计[J]. 江西农业学报, 2010, 22(2): 115 ~ 117. Shi Lixin, Zhu Sihong, Nie Xintian. Design of tractor transmission parameters based on series hybrid power system[J]. Acta Agricultural Jiangxi, 2010, 22(2): 115 ~ 117. (in Chinese)

5 Sinoquet D, Rousseau G, Milhau Y. Design optimization and optimal control for hybrid vehicles [J]. Optimization and Engineering, 2011, 12(1 ~ 2): 199 ~ 213.

6 张松明,吴湘淦. 农业机械运用原理[M]. 北京:中国农业机械出版社,1990.

7 徐立友,周志立,张明柱,等. 拖拉机液压机械无级变速传动系统与发动机的合理匹配[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 109 ~ 113. Xu Liyou, Zhou Zhili, Zhang Mingzhu, et al. Reasonable matching of engine and hydro-mechanical continuously variable transmission system of tractor[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(9): 109 ~ 113. (in Chinese)

8 高辉松,王珊珊,朱思洪. 电动机拖拉机驱动力与传动效率特性试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(10): 40 ~ 43. Gao Huisong, Wang Shanshan, Zhu Sihong. Experiment on characteristics of driving force and transmission efficiency of electric tractor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10): 40 ~ 43. (in Chinese)

9 高辉松,朱思洪. 电动拖拉机传动系设计理论与方法研究[J]. 南京农业大学学报, 2009, 32(1): 140 ~ 145. Gao Huisong, Zhu Sihong. Study on design theory and method for driving line of electric tractor [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2009, 32(1): 140 ~ 145. (in Chinese)

10 Ionescu R, Nastasoiu S. An evaluation criterion for tractive and economic performance in the engine-transmission system of the farming tractor [J]. Bulletin of Transilvania University of Brasov, 2008, 50(1): 31 ~ 34.

传统车和混合动力车的平均每百公里油耗对比如表 7 所示。从仿真对比结果可以看出运用自适应神经网络得到的模糊推理系统可以很好地识别驾驶意图,并对混合动力汽车控制策略的优化,进一步降低油耗起到很好的帮助。

表 7 不同车型仿真结果对比
Tab.7 Contrast of simulation results

车型	百公里油耗 /L·(100 km) ⁻¹	节油/%
传统车	8.10	
没有驾驶意图识别的混合动力车	5.39	33
有驾驶意图识别的混合动力车	5.21	35

3 结 论

(1) 通过对模糊神经网络的训练,来生成模糊推理系统的推理规则,从而对驾驶意图进行识别。本方法不再只依靠专家或操作人员的经验和知识来设计模糊推理系统,而是采取基于数据的建模方法,即模糊推理系统是通过对比已知数据学习得到的。

(2) 从仿真结果可以看出运用本方法得到的模糊推理系统可以很好地识别驾驶意图,并且基于驾驶意图识别的控制策略可以进一步降低油耗,因此运用此驾驶意图识别方法可以有效地优化混合动力汽车的控制策略,从而进一步提高混合动力汽车燃油经济性。

参 考 文 献

1 钱立军, 裘著永, 赵韩. 基于模糊神经网络的混合动力汽车控制策略仿真[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(5): 1 384 ~ 1 387.
Qian Lijun, Xi Zhuoyong, Zhao Han. Simulation of hybrid electric vehicle control strategy based on fuzzy neural network[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(5): 1 384 ~ 1 387. (in Chinese)

2 王保华, 王伟明, 张建武, 等. 并联混合动力汽车控制策略比较研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(2): 401 ~ 404.
Wang Baohua, Wang Weiming, Zhang Jianwu, et al. Comparison research of different control strategies on parallel hybrid electric vehicle[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(2): 401 ~ 404. (in Chinese)

3 姚明亮, 秦大同, 胡明辉, 等. 基于模糊逻辑控制策略的混合动力汽车仿真研究[J]. 汽车工程, 2007, 29(11): 934 ~ 941.
Yao Mingliang, Qin Datong, Hu Minghui, et al. A study on the simulation of hybrid electric vehicle based on fuzzy logic control strategy[J]. Automotive Engineering, 2007, 29(11): 934 ~ 941. (in Chinese)

4 王庆年, 孙树韬, 冀尔聪, 等. 混合动力汽车电机最优工作曲线确定与应用[J]. 农业机械学报, 2008, 39(1): 11 ~ 14.
Wang Qingnian, Sun Shutao, Ji Ercong, et al. Motor optimal operation line's establishment and application of HEV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1): 11 ~ 14. (in Chinese)

5 Won J S, Langari R. Fuzzy torque distribution control for a parallel hybrid vehicle[J]. Expert Systems, 2002, 19(1): 4 ~ 10.

6 王伟, 王庆年, 初亮, 等. 混合动力汽车驱动电机性能评价体系研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 20 ~ 25.
Wang Wei, Wang Qingnian, Chu Liang, et al. Evaluation regime of traction motor for hybrid electric vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 20 ~ 25. (in Chinese)

7 Jeon S I, Jo S T, Park Y I, et al. Multimode driving control of a parallel hybrid electric vehicle using driving pattern recognition[J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2002, 124(1): 141 ~ 149.

8 Won J S, Largari R. Fuzzy torque distribution control for a parallel hybrid vehicle[J]. Expert System, 2002, 19(1): 4 ~ 10.

9 Johnson V H, Wipke K B, Ransen D J. HEV control strategy for real-time optimization of fuel economy and emissions[C]. SAE Paper 2001 - 01 - 1543, 2001.

10 王庆年, 唐先智, 王鹏宇, 等. 基于驾驶意图识别的混合动力汽车控制策略[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2012, 42(4): 789 ~ 795.

(上接第 31 页)

11 孙逢春, 何洪文. 混合动力车辆的归类方法研究[J]. 北京理工大学学报, 2002, 22(1): 40 ~ 44.
Sun Fengchun, He Hongwen. A study on the method of classification of hybrid vehicles[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2002, 22(1): 40 ~ 44. (in Chinese)

12 万佳. 混合动力电动汽车总成参数匹配与控制策略研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2008.
Wan Jia. Study on assembly parameter marching and control strategy for hybrid electric vehicle[D]. Nanchang: Nanchang University, 2008. (in Chinese)

13 李振磊. 混合动力电动汽车的动力系统设计与仿真[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
Li Zhenlei. The design and simulation on the power system of hybrid electric vehicle[D]. Changsha: Hunan University, 2007. (in Chinese)

14 曾小华, 王庆年, 王伟华. 混合动力汽车混合度设计方法研究[J]. 农业机械学报, 2006, 37(12): 8 ~ 12.
Zeng Xiaohua, Wang Qingnian, Wang Weihua. Study on design method for DOH of HEV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(12): 8 ~ 12. (in Chinese)