



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20180211

数字出版日期: 2020-01-14; 数字出版网址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1355.N.20200114.1413.008.html>

## 基于实际作业工况的电动拖拉机传动系统 参数多指标同步优化

张峻霞<sup>1</sup>, 杨金哲<sup>2</sup>, 纪国才<sup>3</sup>, 李宗霖<sup>1</sup>, 朱曰莹<sup>1</sup>

(1. 天津科技大学机械工程学院, 天津 300222; 2. 吉利动力总成研究院, 宁波 315336;  
3. 天津拖拉机制造有限公司, 天津 300190)

**摘要:** 针对电动拖拉机实际作业特点, 分析其动力传动系统参数匹配计算方法, 提出 20 kW 电动拖拉机两挡动力传递方案. 以同步提升电动拖拉机动力性和经济性为目标, 定义了电动拖拉机旋耕最大速度、连续犁耕作业时间、连续旋耕作业时间 3 个性能指标, 建立基于权重系数的多指标同步优化目标函数. 以 20 kW 电动拖拉机为研究对象, 对其传动系统参数进行多指标同步优化, 并对优化方案下的电动拖拉机动力电池及电机动态性能进行仿真分析. 结果说明了本文提出的 20 kW 电动拖拉机两挡动力传递方案的可行性, 同时表明本文提出的基于电动拖拉机实际作业工况的传动系统参数多指标同步优化策略的有效性.

**关键词:** 电动拖拉机; 传动系统; 多指标同步优化

中图分类号: U481

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2020)03-0063-06

## Multi-objective Optimization of the Transmission System Parameters of Electric Tractors Based on Actual Conditions

ZHANG Junxia<sup>1</sup>, YANG Jinzhe<sup>2</sup>, JI Guocai<sup>3</sup>, LI Zonglin<sup>1</sup>, ZHU Yueying<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China;  
2. Geely Research Institute of Power Assembly, Ningbo 315336, China;  
3. Tianjin Tractor Manufacturing Co., Ltd., Tianjin 300190, China)

**Abstract:** Based on the working conditions of the electric tractor, the parameters calculation method of the transmission system is analyzed, and a novel two-gear transmission for 20 kW electric tractors is proposed. To increase the power and improve economic efficiency of the electric tractor synchronously, three indicators are defined: the maximum velocity for rotating plough, continuous normal ploughing time and continuous rotating ploughing time. A multi-objective optimization function with the three weight factors is then proposed. Using the 20 kW electric tractor as the research subject, the parameters of the transmission system are optimized for multi-objective optimization functions. The dynamic performance of the battery and motor for the optimal transmission parameters are analyzed through simulation. The results show that, for the 20 kW electric tractor, the new two-gear transmission scheme is feasible and the proposed multi-objective synchronous optimization strategy for the transmission parameters is effective.

**Key words:** electric tractor; transmission system; multi-objective optimization

相对于传统的燃油拖拉机, 电动拖拉机可以降低能源的消耗以及尾气的排放, 可以缓解世界能源危机问题, 对改善环境污染具有积极的作用. 值得注意的

是, 拖拉机的特殊工作环境和非线性负载特性, 在客观上要求电动拖拉机在动力性和经济性达到同步提升, 因此电动拖拉机传动系统参数匹配是一个亟需解

收稿日期: 2018-07-03; 修回日期: 2019-04-16

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFD0701000)

作者简介: 张峻霞(1968—), 女, 山西原平人, 教授, zjx@tust.edu.cn

决的科学问题<sup>[1]</sup>.

针对电动拖拉机传动系统参数匹配问题,南京农业大学高辉松<sup>[2]</sup>运用电动拖拉机电驱动系统设计理论及计算方法设计了电动拖拉机传动比,并计算了其动力性能,在建立了电驱动仿真系统的仿真模型后,对其进行仿真,提出了一种通过仿真模型检验电动拖拉机参数计算合理性的方法.周志立等<sup>[3]</sup>以邢台XT120小型拖拉机为研究对象,设计了其驱动系统的主要参数,并绘制了速度特性曲线、牵引功率特性曲线以及连续作业时间与负荷率、行驶速度的关系曲线,提出了电动拖拉机不需要频繁换挡就可以满足工况的理念.商高等<sup>[4]</sup>依据整车技术性能要求,针对不同作业特点,对传动系统进行匹配,并对传动比进行初步的优化.这些文献均针对电动拖拉机传动系统进行三挡变速器设计,并在三挡动力传递基础上开展了相关研究工作,均没有考虑电动拖拉机两挡传动的可行性.而两挡动力配制的电动拖拉机在制造成本、节省能源方面有着非常大的优势.

本文根据电动拖拉机设计参数以及实际作业工况,在ADVISOR中建立了电动拖拉机仿真模型.基于电动拖拉机作业工况对电动拖拉机工作特性及工作区间分布进行分析,提出了两挡动力传递方案.以同步提高电动拖拉机动力性能和经济性能为目标,提出了基于拖拉机作业工况的多指标同步优化策略,实现了对传动系参数的优化设计,并且以20kW电动拖拉机为例,验证了本文提出方法的有效性.

## 1 电动拖拉机动力传动系统参数计算

### 1.1 电动拖拉机电机选取

根据电动拖拉机车辆功率需求,可以计算得到驱动电机功率

$$P = \frac{P'}{\eta_1} \quad (1)$$

式中: $P$ 为电机功率; $P'$ 为电动拖拉机需求功率; $\eta_1$ 为电机效率.

### 1.2 犁地阻力的确定

电动拖拉机在田地中作业的行驶速度基本保持一个定值,电机转速 $n$ 为

$$n = \frac{u_j \cdot i_j}{0.377r} \quad (2)$$

式中: $u_j$ 为在 $j$ 挡下的行驶速度; $i_j$ 为在 $j$ 挡下的传动比; $r$ 为驱动轮半径.

电机的需求转矩 $T'$ 为

$$T' = \frac{r}{\eta_1 \cdot i_j} (Gf + F_T) \quad (3)$$

式中: $F_T$ 为电动拖拉机工作时的牵引阻力; $G$ 为电动拖拉机重力; $f$ 为滚动摩擦因数.

电动拖拉机作业分为犁耕作业和旋耕作业.由于电动拖拉机旋耕刀旋转的切线力不会阻碍电动拖拉机行驶,反而会为电动拖拉机提供向前的推力,所以旋耕时,电动拖拉机没有牵引阻力<sup>[5-6]</sup>.对于电动拖拉机犁耕,其犁耕作业时所需克服犁地的牵引力 $F_{T1}$ 为

$$F_{T1} = abz_1 h_k k \quad (4)$$

式中: $a$ 为储备能力系数,一般为1.1~1.2<sup>[7]</sup>;  $z$ 为犁铧数; $b_1$ 为单个犁铧宽度; $h_k$ 为耕深; $k$ 为土壤比阻.

### 1.3 传动比确定

传动比可根据电动拖拉机在不同作业情况下的理论速度计算

$$i \approx 0.377 \frac{n' \cdot r}{u_j} \quad (5)$$

式中: $n'$ 为电机额定转速; $r$ 为驱动轮半径.

### 1.4 电池组数量确定

电池组数量可以根据电动机最大功率和连续作业时间两个指标进行确定<sup>[7-10]</sup>.

电动拖拉机工作时,锂电池的最大输出功率必须满足电动机的最大功率需求,因此满足最大功率需求的电池数目 $n_1$ 为

$$n_1 \geq \frac{P_{N\max}}{P_{\max} \cdot \eta_{mc}} \quad (6)$$

式中: $P_{N\max}$ 为电动机峰值功率; $P_{\max}$ 为锂电池在整机作业过程中所能提供的最大功率; $\eta_{mc}$ 为电动机及控制器的整体效率.

电动拖拉机的电池供电量应保证电动拖拉机最低连续作业时间 $t_{\min}$ ,因此满足连续作业时间需求的电池数目 $n_2$ 为

$$n_2 \geq \frac{t_{\min} (F_T + fm_1 g) u_j}{3.6 C_b E D_\eta \left( \frac{I_b}{I'} \right)^{m-1} \eta_{mc} \eta_M} \quad (7)$$

式中: $m_1$ 为电动拖拉机的质量; $g$ 为重力加速度; $C_b$ 为电池的额定容量; $E$ 为电池的额定电压; $I'$ 为电池的恒放电电流,由于电池恒放电电流小于驱动电机额定电流,因此在计算时采用驱动电机额定电流; $m$ 为电池放电指数; $I_b$ 为电池的额定放电电流; $D_\eta$ 为电池的放电深度; $\eta_M$ 为整机从电动机到牵引农具之间的传递效率.

根据式(6)和(7)计算出的电池组数量,选取电池

数目  $N$  为

$$N = \max\{n_1, n_2\} \quad (8)$$

## 2 两挡动力传递模式分析

由于电机低速恒转矩、高速恒功率的特性,在电动拖拉机设置挡位时,与传统燃油拖拉机不同,一般设置行驶挡、旋耕挡、犁耕挡 3 个挡位<sup>[11-13]</sup>. 针对 20 kW 电动拖拉机及其匹配机具,图 1 为计算分析得到的三挡位电动拖拉机驱动力与车速特性曲线,曲线所覆盖的区域为电动拖拉机整车所能达到的动力性能范围.

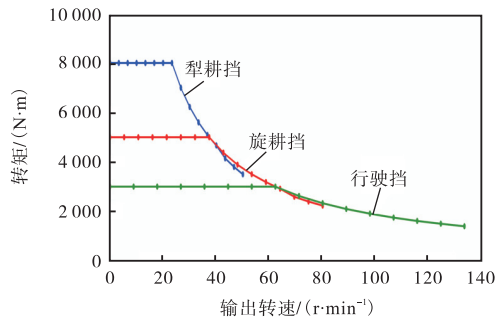


图 1 电动拖拉机不同挡位输出转矩与转速特性曲线

Fig. 1 Torque and speed characteristic curve of different gear output of the electric tractor

图 2 为该电动拖拉机不同作业工况作业点及作业区域分布图. 由图 2 可知: 犁耕作业点和旋耕作业点分布在不同的区域,但是两部分区域均在旋耕挡工作曲线范围之内,同时旋耕挡又比犁耕挡具有速度优势. 这说明利用旋耕挡来代替犁耕挡和旋耕挡的组合是可行的. 这样可以简化电动拖拉机的挡位设置,减轻电动拖拉机质量,一定程度上增大电动拖拉机连续作业时间;另外,两挡方案也有利于成本的降低.

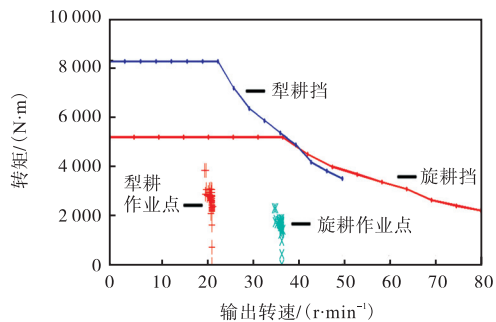


图 2 拖拉机不同作业工况作业区域分布

Fig. 2 Operating area distribution of the tractor under different operating conditions

## 3 优化变量及约束条件

### 3.1 优化变量及约束条件

在电机、电池以及拖拉机参数确定的基础上,传动比会直接影响电动拖拉机的动力性能和经济性. 因此,对于挡位优化变量  $X$  为

$$X = [X_1, X_2] \quad (9)$$

式中:  $X_1$  为作业挡传动比;  $X_2$  为行驶挡传动比.

电动拖拉机的约束主要有动力性能约束和连续行驶时间约束. 动力性能约束主要包括最高车速以及爬坡度的要求;同时还要满足各个挡位所对应的驱动力应大于等于其行驶阻力.

拖拉机行驶挡行驶速度应该满足一定条件,建立速度约束

$$g_1(X) = u_2 - \frac{0.377 \cdot n' \cdot r}{X_2} \leq 0 \quad (10)$$

式中:  $u_2$  为拖拉机行驶挡行驶速度.

拖拉机在平直路面行驶挡运行时,需满足牵引力约束

$$g_2(X) = G \cdot f - \frac{\eta \cdot T_{\max}}{r} X_2 \leq 0 \quad (11)$$

式中:  $G$  为拖拉机重力;  $T_{\max}$  为额定工况下电机最大转矩.

拖拉机行驶过程中的爬坡度应该满足大于 20% 的条件,建立爬坡度约束

$$g_3(X) = 20\% - \tan \arcsin \left( \frac{T_{\max} \cdot \eta}{G \cdot r} X_2 - f_1 \right) \leq 0 \quad (12)$$

根据拖拉机作业时间(电动拖拉机最低连续作业时间不得小于 6 h),建立作业时间约束

$$g_4(X) = 6 - \frac{3.6nC_0ED\eta}{(F_T + Gf)u_1} \leq 0 \quad (13)$$

拖拉机旋耕速度应在一定范围内,根据旋耕速度条件建立约束(根据国家标准,拖拉机旋耕的速度范围是 8 ~ 12 km/h)

$$g_5(X) = 8 - (0.377n \cdot r) / X_1 \leq 0 \quad (14)$$

$$g_6(X) = \frac{0.377n \cdot r}{X_1} - 12 \leq 0 \quad (15)$$

拖拉机在犁耕作业时,需满足牵引力约束

$$g_7(X) = \frac{T_{\max} \cdot X_1}{r} \geq (F_T + Gf_1) \quad (16)$$

### 3.2 优化指标

电动拖拉机需满足动力性和经济性两个指标需

求. 动力性指标主要用于克服电动拖拉机作业过程中的突变大载荷; 另外, 也可反映到作业速度上, 作业速度越快, 侧面反映其工作效率越高, 因此将旋耕最大速度  $u_{\max}$  作为动力性能指标. 对于电动拖拉机经济性能, 主要体现在连续作业时间上, 因此, 本文选择犁耕连续作业时间  $t_1$  和旋耕连续作业时间  $t_2$  作为反映电动拖拉机经济性能的技术指标.

### 3.3 目标函数

由于电动拖拉机旋耕最大速度、旋耕连续作业时间、犁耕连续作业时间的最优值所对应的传动比可能是不同的, 即 3 个性能指标存在不能同步达到最大化的可能性, 因此, 为了权衡 3 个性能指标之间的关系, 实现电动拖拉机整体性能的提升, 基于权重系数定义电动拖拉机性能综合指标系数, 其表达式为

$$K(X) = \frac{\lambda_3 \cdot u_{\max}}{(u_{\max})_{\max}} + \frac{\lambda_1 \cdot t_1}{(t_1)_{\max}} + \frac{\lambda_2 \cdot t_2}{(t_2)_{\max}} \quad (17)$$

$$K(X_{\text{opt}}) = \max\{K(X)\} \quad (18)$$

式中:  $\lambda_1$  表示犁耕连续作业时间权重系数;  $\lambda_2$  表示旋耕连续作业时间权重系数;  $\lambda_3$  表示犁耕最大速度权重系数;  $t_1$  表示犁耕连续作业时间;  $t_2$  表示旋耕连续作业时间;  $u_{\max}$  表示该方案下电动拖拉机旋耕最大速度;  $(u_{\max})_{\max}$  表示所有方案中电动拖拉机旋耕的最大速度;  $(t_1)_{\max}$  表示所有方案中电动拖拉机犁耕的连续行驶作业最大时间;  $(t_2)_{\max}$  表示所有方案中电动拖拉机犁耕的连续行驶作业最大时间.

## 4 20 kW 电动拖拉机传动系统优化设计

### 4.1 电动拖拉机参数选择及传动系统参数计算

由于永磁同步电机具有功率因数大、效率高、功率密度大、可靠性高、响应速度快等特点, 因此选用永磁同步电机作为电动拖拉机驱动电机. 这里以 20 kW 电动拖拉机为例, 根据式(1)得出的结果, 选取额定功率为 20 kW 的永磁同步电机作为驱动电机. 根据式(2)一式(4)进行工作机具与电机功率匹配, 采用 27 系列铧式犁. 根据式(6)一式(8)选择电池参数, 将电动拖拉机参数汇总, 见表 1.

由于拖拉机旋耕时牵引阻力基本恒定. 对于旋耕只考虑其工作时的行驶速度. 而对于犁耕, 电动拖拉机所受载荷是动态大载荷, 牵引速度相对稳定(约 5 km/h), 因此, 在拖拉机恒定 5 km/h 的速度下, 测量其所受到的牵引阻力, 并绘制拖拉机测试工况, 电动拖拉机犁耕时的牵引阻力、行驶速度与时间关系如图

3 所示.

表 1 电动拖拉机参数

Tab. 1 Parameters of the electric tractor

位置	参数	数值
永磁同步电机	额定功率/kW	20
	额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	3 500
	额定电压/V	320
	额定转矩/(N·m)	54.6
	电机效率/%	93
27 系列铧式犁	犁铧个数	3
	耕深/cm	18
	单犁铧宽度/cm	27
	配套动力/kW	20
	土壤比阻/(N·cm <sup>-2</sup> )	2
电池	额定电压/V	320
	电池数目	11
	额定容量/(A·h)	80
其他	驱动轮半径/m	0.48
	电动机及控制器整体效率/%	94

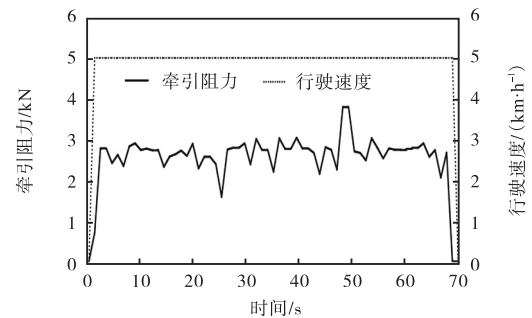


图 3 电动拖拉机犁耕工况

Fig. 3 Plough-working conditions of the electric tractor

绘制电动拖拉机驱动电机轮端输出转矩与转速特性曲线, 按照第 2 节两挡动力传递模式分析方法, 将拖拉机犁耕、旋耕作业点(轮端输出转矩与转速)标注于图中, 结果如图 4 所示.

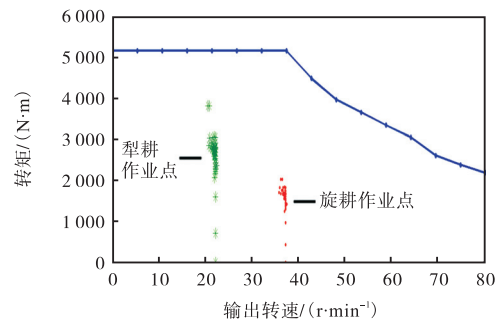


图 4 电动拖拉机犁耕及旋耕工作点

Fig. 4 Plowing and rotary operating point of the electric tractor

由图 4 可知: 在实际作业工况中, 电动拖拉机犁耕、旋耕工况输出转矩点均小于相同输出转速条件下

转矩最大值,因此两挡速比方案完全可以满足拖拉机犁耕、旋耕两种作业工况. 对于本文研究 20 kW 电动拖拉机, 根据车辆参数及约束方程得到初始方案, 其作业挡、行驶挡两种模式传动比分别为 94、30.

### 4.2 传动比对性能指标影响分析

根据电动拖拉机设计参数和得到的动力电池驱动电机等参数, 在 ADVISOR 中建立电动拖拉机模型, 根据式 (10) 一式 (16), 计算得到作业挡传动比范围为 63 ~ 94. 根据拖拉机作业工况, 将不同传动比条件下电动拖拉机模型进行仿真分析. 考虑电动拖拉机旋耕速度、旋耕作业时间、犁耕作业时间 3 个指标, 传动比对 3 个指标影响如图 5 所示.

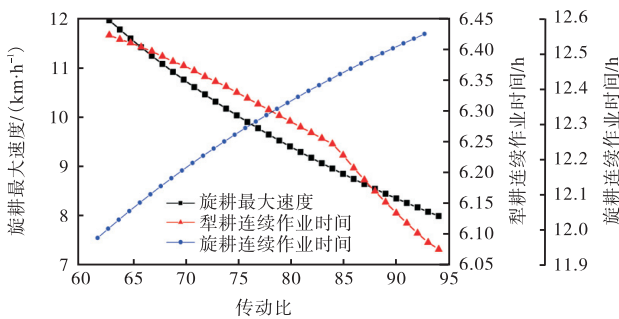


图 5 电动拖拉机传动比对各参数指标影响

Fig. 5 Influence of the transmission ratio of electric tractor on each parameter index

由图 5 可以看出, 在不同传动比的条件下, 传动比数值的选择对电动拖拉机旋耕最大速度、旋耕连续作业时间、犁耕连续作业时间均产生了较大影响. 随着传动比增加, 3 个指标变化规律为: 电动拖拉机旋耕速度和犁耕连续作业时间指标随着传动比的增大而减小; 电动拖拉机旋耕连续作业时间随着传动比的增大而增大. 所以需要选择恰当的传动比, 实现 3 个指标的同步优化.

### 4.3 传动系统多指标同步优化

为了改善式 (16) 中电动拖拉机性能综合指标系数, 选取  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$  共 4 种权重系数组合. 在拖拉机作业指标中, 3 个指标同等重要. 但是, 根据图 5 中传动比数值对 3 个指标的影响规律进行分析, 可以发现传动比的改变引起的旋耕速度的数值变化较大 (约为 4), 而另外两个指标的数值变化相对较小 (约为 0.5), 如果旋耕最大速度系数取值较大就会导致另外两个指标无法实现有效的优化, 因此为了均衡 3 个指标的优化效果, 按照比例关系取旋耕最大速度系数为 0.050, 另外两个系数均取 0.475, 这样可以实现 3 个指标的均衡优化. 权重系数分配见表 2.

表 2 不同权重系数选取

Tab. 2 Different weight coefficients

方案	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$
$C_1$	1	0	0
$C_2$	0	1	0
$C_3$	0	0	1
$C_4$	0.475	0.475	0.050

在确定各指标权重系数和目标函数式 (17) 的基础上, 利用得到的不同传动比条件下的拖拉机性能参数数值, 计算不同传动比下拖拉机性能综合目标函数值. 针对  $C_4$  权重系数方案, 利用多项式拟合方法对数据进行拟合运算, 得到的综合目标函数值以及拟合曲线如图 6 所示. 通过求解拟合多项式在传动比区间的最大值, 可以得到电动拖拉机整车性能综合指标系数最大值所对应的传动比为 67.2.

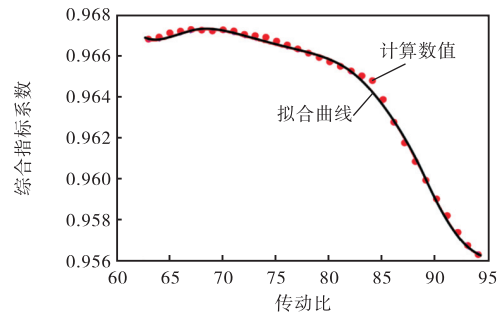


图 6 电动拖拉机在  $C_4$  权重系数下的综合指标系数以及拟合曲线

Fig. 6 Composite index coefficient and fitting curve of the electric tractor under the weight coefficient of  $C_4$

### 4.4 优化结果分析

表 3 为优化前后各参数指标数值, 由表 3 可知: 虽然优化后旋耕连续作业时间指标出现了 5.59% 的降低, 但是旋耕最大速度和犁耕连续作业时间均增大, 总体综合指标系数增大量为 1.11%. 因此, 说明利用本文提出的多指标同步优化策略, 实现了电动拖拉机整车综合性能的提高.

表 3 优化前后各参数指标对比

Tab. 3 Comparison of parameters and indexes before and after optimization

方案	$u_{max}/(km·h^{-1})$	$t_2/h$	$t_1/h$	综合指标系数
初始方案 (30, 94)	8	17.17	6.076	0.956 1
$C_4$ 方案 (30, 67.2)	11.2	16.21	6.395	0.967 2
变化量/%	40	-5.59	5.25	1.11

### 4.5 两挡传动电动拖拉机性能仿真

荷电状态 (SOC) 是衡量电池状态的重要物理量, 也叫剩余电量. 当  $SOC = 0$  时表示电池放电完全, 当  $SOC = 1$  时表示电池完全充满.

根据提出的基于作业工况的电动拖拉机传动比优化设计方案,得到了拟设计电动拖拉机的最优匹配方案.根据最优的方案,对建立的电动拖拉机仿真模

型进行犁耕工况作业仿真分析,得到的犁耕作业条件下电机电流、电机输出转矩和动力电池 SOC 指标特性如图 7 所示.

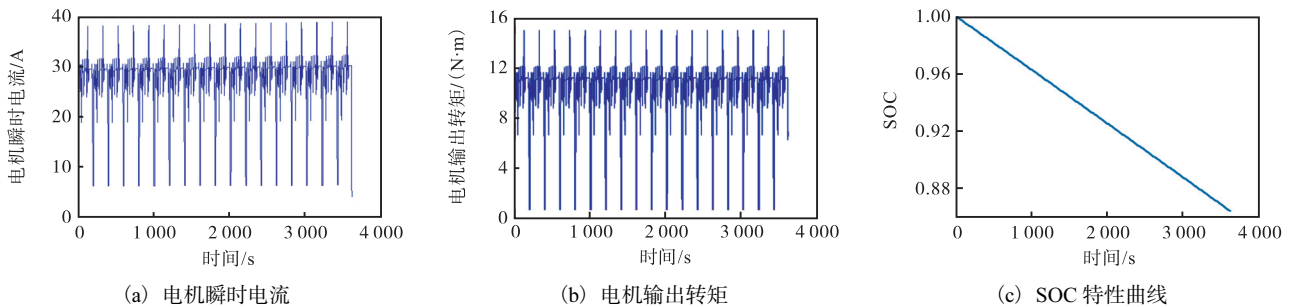


图 7 拖拉机犁耕作业仿真结果

Fig. 7 Simulation results of tractor plowing operation

由图 7 可知:电动拖拉机在犁耕作业工况下驱动电机瞬时电流和转矩输出均在额定范围内,满足设计要求;SOC 下降也较平稳.这说明本文提出的电动拖拉机传动系统的优化设计方案能很好地满足拖拉机犁耕工况的行驶要求,速度良好,工作平稳;结合表 3 数据对比,说明了本文提出的优化设计方法对改善电动拖拉机的整体作业性能具有一定的意义.

## 5 结 语

(1) 本文在电动拖拉机设计参数基础上建立了电动拖拉机整车性能仿真模型;基于电动拖拉机作业工况,提出电动拖拉机两挡传递方案并进行分析.分析结果表明:利用旋耕挡来代替犁耕挡和旋耕挡组合的方式,在不改变电动拖拉机性能指标要求的前提下,实现了控制成本以及轻量化的目标.

(2) 为实现电动拖拉机动力性能和经济性能同步提升的目标,定义了电动拖拉机性能综合指标系数,研究传动比对电动拖拉机整车性能的影响规律,提出一种基于拖拉机实际作业工况的电动拖拉机传动比多指标同步优化策略.

(3) 利用建立的 20 kW 电动拖拉机整车性能仿真模型,分析了匹配优化后电动拖拉机性能特性,结果表明:本文提出的优化匹配方案可使旋耕最大速度提升 40%,犁耕连续作业时间提升 5.25%,综合指标系数提升 1.11%,很好地满足了拖拉机在各工况的行驶要求.

## 参考文献:

[1] Patil P G. Prospects for electric vehicles[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1990, 5(12):

15-19.  
 [2] 高辉松. 电动拖拉机驱动系统研究[D]. 南京:南京农业大学, 2008.  
 [3] 周志立, 夏先文, 徐立友. 电动拖拉机驱动系统设计[J]. 河南科技大学学报:自然科学版, 2015, 36(5): 78-81.  
 [4] 商高高, 夏勇. 履带式电动拖拉机传动系统的匹配及优化[J]. 农机化研究, 2015(9): 250-253.  
 [5] Bodria L, Fiala M. Design and testing of an electric-powered walking tractor[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1995, 60(1): 57-62.  
 [6] 邱宣怀. 机械设计[M]. 4 版. 北京:高等教育出版社, 2006.  
 [7] 高辉松, 朱思洪. 电动拖拉机传动系统设计理论与方法研究[J]. 南京农业大学学报, 2009, 32(1): 140-145.  
 [8] 卢杰祥. 锂离子电池特性建模与 SOC 估算研究[D]. 广州:华南理工大学, 2012.  
 [9] Zheng M M, Qi B J, Du X W. Dynamic model for characteristics of li-ion battery on electric vehicle[C]// Proceedings of the 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Application. Xi'an: IEEE, 2009: 2867-2871.  
 [10] 陈全世, 仇斌, 谢起成. 燃料电池电动汽车[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.  
 [11] 程莺, 冯能莲, 李克强, 等. ADVISOR 混合动力电动汽车仿真系统的二次开发及应用[J]. 汽车工程, 2004, 26(3): 249-252.  
 [12] 卢毅. 温室电动拖拉机主要部件的研究与设计[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2012.  
 [13] Arjham W, Koike M, Takigawa T, et al. Preliminary study on the applicability of an electric tractor(Part 1)[J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 2001, 63(3): 130-137.

责任编辑:周建军