doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.10.045

电动拖拉机动力电池压载构型设计与参数优化

武仲斌1 刘 宇1 张 君1,2 周锋涛3 何景强3 谢 斌4

(1.太原理工大学机械与运载工程学院,太原 030024; 2. 宁夏天地奔牛实业集团有限公司,银川 753001;

3. 中国煤炭科工集团太原研究院有限公司,太原 030006;

4. 中国农业大学现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要:为改善电动拖拉机动力电池压载效果以提升整机牵引性能,提出了一种位置可调的电池压载框架结构;基于 牵引性能预测基本方程,以驱动效率、滑转率和前轴安全压载综合最优为目标建立电池压载参数优化模型,该模型 可根据作业条件给出最优电池压载参数;在 Matlab/Simulink 仿真平台上搭建了电动拖拉机牵引作业仿真模型,针 对负载1~5 kN 范围内的水平牵引工况,对电池压载参数优化前后的牵引性能进行了仿真对比分析;基于所提出的 位置可调电池压载框架结构,搭建了电动拖拉机实验样机,并在室内土槽环境下对压载参数优化模型进行验证。 结果表明:在保证前桥安全压载的前提下,所提出的电池压载构型使牵引车速和能量利用率分别提升 4.16% 和 5.66%,有效提升了电动拖拉机的牵引作业性能。



Configuration Design and Parameter Optimization of Power Battery Ballast for Electric Tractor

WU Zhongbin¹ LIU Yu¹ ZHANG Jun^{1,2} ZHOU Fengtao³ HE Jingqiang³ XIE Bin⁴

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

2. Ningxia Tiandi Benniu Co., Ltd., Yinchuan 753001, China

Taiyuan Institute of China Coal Technology and Engineering Group, Taiyuan 030006, China
 Beijing Key Laboratory of Optimized Design for Modern Agricultural Equipment, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The tractor traction performance is closely related to the distribution of the tractor's total weight on the front and rear axles. For the rear wheel drive tractor, it is one of the effective ways to improve the tire-soil adhesion state so as to promote the traction performance of the tractor by reasonably selecting the ballast weight for the drive axle and optimizing the axle load distribution between the front and rear axles. A position-adapted battery ballast frame structure was proposed to improve the ballast effect so as to improve the traction performance of the electric tractor. Based on the equations for traction performance prediction, an optimization model of battery ballast parameters was established with the goal of comprehensive optimization of driving efficiency, slip ratio and safety ballast of front axle. The simulation model of electric tractor under the horizontal traction condition with the load range of $1 \sim 5$ kN was built on the Matlab/Simulink platform, and the traction performances before and after the ballast optimization were simulated and analyzed. Referring to the position-adapted battery ballast frame structure, the experimental prototype of electric tractor was designed, and the ballast parameter optimization model was verified by ploughing in the soil tank in the indoor environment. The results showed that under the premise of ensuring the safety ballast of the front axle, the battery layout optimization can improve the traction speed and energy utilization rate by 4.16% and 5.66%, respectively, which effectively improved the traction performance of electric tractor.

Key words: electric tractor; layout optimization; battery ballast; traction; slip

作者简介:武仲斌(1987—),男,讲师,博士,主要从事车辆动力传动控制研究,E-mail: wuzhongbin0575@126.com

通信作者:谢斌(1973—),男,副教授,博士,主要从事农业装备智能化研究,E-mail: xiebincau@126.com

收稿日期: 2020-12-10 修回日期: 2021-03-01

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFB1314000)

0 引言

当前,我国农业现代化呈加速发展态势,新的农 业形态和发展模式对生态、节能、环保型农业机械有 着迫切的需求^[1-3]。在农机装备产业转型升级中, 电动拖拉机作为最主要的绿色环保型动力机械,成 为农业机械现代化发展的重要途径^[4]。对于以车 载电池供电的电动拖拉机而言,在目前试制水平下, 电池质量往往占到拖拉机总结构质量的 30% ~ 50%,对底盘总体布局和前后桥之间的轴荷分配,以 及机组作业时驱动轮的滚动、滑转状态和轮胎附着 性能具有重要影响^[5-8],因此,研究电池质量分布对 驱动轮工作特性、机组增重特性以及配重使用的影 响规律,对提升电动拖拉机牵引性能具有重要意义。

为提升拖拉机牵引性能,ZHANG 等^[9]设计了一 种牵引压载定位系统,其可通过移动专门设计的压 载装置来调节轴荷分配比例,以确保牵引作业时前 轴动态轴荷维持在拖拉机总质量的12%~18%,由 此获得较好的动力性和燃油经济性;CLARK 等^[10] 针对传统配重流程耗时、耗力且不准确的缺陷,设计 了一种自动压载系统,通过向机载储液罐内注入或 排出液体来调节轴荷分配,实时性较好;PRANAV 等^[11]基于 Visual Basic 环境,开发了一款农业拖拉 机配重管理软件,其可根据驱动类型、土壤条件、轮 胎参数、机具类型和作业参数等,为拖拉机提供最佳 配重,并能对滑转率、滚动效率、牵引效率、燃油消耗 率等性能指标进行预测。

上述配重压载方案均基于传统内燃机式农业拖 拉机,对于以车载蓄电池供电的电动拖拉机并不完 全适用。通常情况下,动力电池成组后外形结构相 对规整,其与电动底盘的空间耦合度较低^[12-15],在 保证横向稳定性的前提下,若能通过调节电池纵向 位置来改善拖拉机牵引作业时压载效果,则可能进 一步提升机组牵引效率和整机重量利用率,而在这 方面目前尚存在研究空白点。为实现这一设计理 念,本文将依据质量分布对牵引性能的影响规律,提 出一种电池位置可调的底盘构型;基于该构型,建立 以驱动效率、滑转率和前轴安全压载综合最优为目 标的电池压载参数优化模型;围绕电池压载参数优 化,基于 Matlab/Simulink 平台和室内土槽环境,依 次进行性能仿真分析和样机验证实验。

1 牵引性能预测基本方程

拖拉机在水平牵引作业时,通过驱动轮与土壤 之间的相互作用产生必需的牵引力和牵引速度,在 此过程中,必然伴随着一定比例的滑转损失和滚动 损失,为定量描述作业过程中的功率转化过程,本文 以后轮驱动拖拉机为研究对象,如图1所示,首先给 出驱动轮工作特性及机组增重特性与牵引性能表征 参数之间的数学联系。图中,*a*为质心到前轴距离, *F_{x,q}为拖拉机后轮处纵向地面反力,v*为拖拉机行驶 速度,*m*₀为拖拉机质量,其余详见文中公式。



1.1 驱动轮工作特性

驱动轮工作特性主要包含3个无因次量之间的 关系,即驱动轮滑转率和驱动轮效率随驱动力系数 (驱动轮动载利用系数)而变化的关系^[16-18]。文 献[19-21]提出的广义通用预测模型参数少、通用 性强,当土壤环境为非高度压实状态时,其拟合置信 度高达95%^[22]。对于后轮驱动拖拉机,驱动轮滑 转率与驱动力系数之间的关系可表示为

$$\varphi_q = \frac{F_q}{W_q} = \frac{F_T + W_q f_q}{W_q} = 0.75 (1 - e^{-0.3C_{n,q}\delta}) \quad (1)$$

其中

$$_{q,q} = \frac{C_I b_q d_q}{W_q} \tag{2}$$

$$f_q = \frac{F_{f,q}}{W_q} = \frac{1.2}{C_{n,q}} + 0.04$$
(3)

从动轮拟合系数计算式为

 C_{r}

$$C_{n,c} = \frac{C_I b_c d_c}{W_c} \tag{4}$$

式中	$arphi_q$ ——驱动力系数
	F _q ——驱动力,kN
	F _T 牵引阻力,kN
	W_q 、 W_c ——驱动轮、从动轮载荷,kN
	δ滑转率
	f_q ——驱动轮滚阻系数
	$C_{n,q}$ 、 $C_{n,c}$ ——驱动轮、从动轮拟合系数
	<i>C</i> 1土壤圆锥指数,kPa
	b_q 、 b_c ——驱动轮、从动轮轮胎截面宽度,m
	d_q 、 d_c ——驱动轮、从动轮轮胎直径, m
	F 亚动秋游动四五 IN

 $F_{f,q}$ ——驱动轮滚动阻力,kN

驱动轮效率 η。为驱动轮的输出功率与驱动功

(8)

率之比,由滑转效率和滚动效率两部分组成^[21],计 算式为

$$\eta_q = (1 - \delta) \left(1 - \frac{f_c + f_q}{\varphi_q} \right) \tag{5}$$

其中
$$f_c = \frac{F_{f,c}}{W_c} = \frac{1.2}{C_{n,c}} + 0.04$$
 (6)

式中 f_{e} ——驱动滚动阻力系数 $F_{f,e}$ ——从动轮滚动阻力,kN

联立式(1)、(5),消去滑转率δ,有

$$\eta_{q} = \left(1 + \frac{1}{0.3C_{n,q}} \ln\Delta\right) \left(1 - \frac{f_{c} + f_{q}}{\varphi_{q}}\right)$$
(7)
$$+ \Delta = 1 -$$

其中

$$\frac{1.2C_{n,q}^{-1} + 0.04}{0.75} - \frac{F_T + W_q f_q + (1.2C_{n,c}^{-1} + 0.04)W_c}{0.75W_q}$$

并且,*A*≥e^{-0.3C_{n,q}}。

1.2 机组增重特性

拖拉机在进行牵引作业时,作用在拖拉机尾部 挂钩上的牵引力会使拖拉机前后桥垂直载荷发生转 移,进而影响到牵引性能各表征参数,如驱动轮效 率、滑转率和滚动效率等。对于后轮驱动水平牵引 机组,驱动桥增重计算式为^[16]

$$\Delta W_{q} = \frac{F_{T}h_{T} + W_{0}(l\beta + f_{c}r_{c})}{l - f_{q}r_{q} + f_{c}r_{c}}$$
(9)

式中 β——拖拉机静载荷系数,表示后轴静轴荷占 总质量的比例

 ΔW_a ——驱动轮载荷转移量, kN

h_T-----挂钩高度,m

W₀——拖拉机总重量,kN

考虑机组增重效应后,拖拉机驱动桥和从动桥 上的动载荷分别为

$$W_{q} = W_{0}\beta + \Delta W_{q} = W_{0}\beta + \frac{F_{T}h_{T} + W_{0}(l\beta + f_{c}r_{c})}{l - f_{a}r_{a} + f_{c}r_{c}}$$
(10)

$$W_{c} = W_{0}(1 - \beta) - \Delta W_{q} =$$

$$W_{0}(1 - \beta) - \frac{F_{T}h_{T} + W_{0}(l\beta + f_{c}r_{c})}{l - f_{T} + f_{T}r}$$
(11)

式中,因 f_e 和 f_q 分别与 W_e 、 W_q 有关(1.1节),因此, 式(10)、(11)分别为关于 W_q 和 W_e 的隐函数。采 用数值方法求解动载荷 W_e 和 W_q 时,可先为 f_e 和 f_q 赋初值,并通过多次迭代满足一定的收敛精度,以 求得给定牵引阻力下的动载荷以及对应的滚阻系 数。同时,由式(10)、(11)可知,当牵引阻力一定 时,动载荷 W_e 、 W_q 同样为关于静载荷系数 β 的函 数。结合式(1)、(5)不难发现,驱动轮效率 η_q 和 滑转率 δ 均与动载荷 W_e 、 W_q 有关,因而,也同样为 关于静载荷系数 β 的函数,其为电池压载构型优 化设计的理论依据。

1.3 牵引功率平衡方程

拖拉机在进行水平牵引作业时,若行驶速度小于 20 km/h,可略去空气阻力,此时,驱动电机的有效输出功率主要用于克服传动系统机械损失、驱动轮滑转损失、车轮滚动损失以及挂钩牵引和行驶速度调节,相应的功率平衡方程式为

$$N_{e} = N_{m} + N_{s} + N_{f} + N_{T} + N_{j}$$
(12)

式中 N_e----驱动电机的有效输出功率,W

N_m——传动系统损失的功率,W

N_s——驱动轮滑转损失的功率,W

N_f——克服滚动阻力所消耗的功率,W

N_T-----牵引功率,₩

N_i-----加速消耗的功率,W

式(12)中,驱动电机有效输出功率很大一部 分消耗在机械损失、滑转损失和滚动损失上,研究 表明,这部分功率占总输出功率的25%~ 40%^[23]。

1.4 静载荷系数与牵引性能表征参数的关系

根据 1.1~1.3 节中给出的牵引性能预测方程, 不难获得牵引性能各表征参数随静载荷系数的变化 关系,如图 2 所示。当β从 0.5 开始逐渐增加时,后 轴载荷逐渐增加,前轴动载荷逐渐减小,这使得滑转 率随后轴动载荷的增加逐渐下降,而滚动效率则表 现为先增加后减小的趋势。由式(5)可知,驱动轮 效率由滚动效率和滑转率共同决定,因而,其在开始 一段时间内显示为增长率逐渐下降的增加趋势,并 在β=0.7 附近达到极值,之后开始下降。



static load coefficient

驱动轮效率随静载荷系数的不单调性变化意味 着在有效区间内总存在一个最优的静载荷系数,使 得驱动轮效率最高。由于拖拉机轴间静载荷分配与 电池质量分布密切相关,因此,为提升驱动轮效率, 有必要对电池质量分布进行优化。

2 电池压载构型与压载参数优化

2.1 PAB 电池构型与静载荷分配

为使电动拖拉机静载荷分配比例能够根据实际 牵引负载水平灵活调节,设计了一种位置可调式电 池组构型(Position-adapted battery pack, PAB),其结 构组成和位置调节方式见图 3。在该底盘结构中, 2 台驱动电机被分散布置在后轮内侧,同时,为了平 衡前后桥之间的载荷分配关系,动力电池组被分成 两部分,即固定布置在后桥上方的1#电池组 (PAB),以及布置在前桥上方且位置可调的2#电池 组,其中,2#电池组托盘下方设置4个滑轮,使得2# 电池组可在固定于车架的直线滑轨上前后滑动,电 池沿滑轨的前后移动由布置在托盘底部中央的电动 推杆驱动。2#电池组在垂直方向的位移由限位槽内 的限位销进行限制。调节2#电池组的纵向位置时, 拖拉机静载荷系数β将在一定范围内随之变化。



图 3 电动拖拉机位置可调式电池组结构

 Fig. 3
 Position-adapted battery pack structure for tractors

 1.位置可调动力电池组(2#电池组)
 2.直线滑轨
 3.电池垂向

 限位槽
 4.固定式电池组(1#电池组)
 5.右侧轮边减速机
 6.右

 侧驱动电机
 7.电能输出接口
 8.左侧驱动电机
 9.左侧减速

 机
 10.电动推杆
 11.车架
 12.电池托盘滑轮

2.2 静载荷系数随电池位置的变化规律

静载荷系数与电池位置定量关系的获取是电池 压载构型设计的关键。由于实际物理样机重心位置 不易测量,故考虑采用虚拟样机方法获得整机在不 同电池位置下的质量分布特性,具体为:

(1)如图4所示,在样机试制与组装过程中,核 实主要部件质量,其中车架、1#电池组、2#电池组、机



(2)基于 SolidWorks 建模环境,以通过拖拉机 后轴中心的铅垂平面为参考基准面,并以后轴中心 为原点建立局部坐标系,同时,定义 PAB 位置 x_b为 其前 端 面 至 该 基 准 面 的 距 离,见 图 4b,通 过 SolidWorks 的"距离配合"功能,为 x_b设置不同距离 参数值,对应地,在整机模型质量属性中可获得电池 处于不同位置时整机质心在拖拉机纵向方向的坐标 值(局部坐标系),由此,可换算得到静载荷系数 β, 并进一步得到静载荷系数与电池位置定量关系,如 图 4c 所示。

2.3 电池压载参数优化模型

根据牵引性能预测模型,驱动轮效率是滚动效 率和滑转效率的综合体现,为提高电动拖拉机作业 时的能耗经济性,应尽可能提升驱动轮效率;为避免 牵引作业时因驱动轮滑转率过大而造成土体破坏, 还应特别关注滑转率并尽量将其控制在 10% ~ 20%内^[24];挂钩牵引力会造成前桥载荷转移,为保 证一定的转向和通过能力,一般要求前桥载荷不低 于整机质量的 20%^[9]。

由上述分析可知,静载荷系数与驱动轮效率、滑转率和前桥载荷3个性能表征量均密切相关,而电池位置与静载荷系数呈一定的线性关系(图4c),为 实现最优压载,拟对 PAB 位置进行优化,兼顾三方性能需求,通过加权组合,制定以电池位置为优化变量的单目标优化模型,即

 $\min J(x_b) = \lambda_1 J_1(x_b) + \lambda_2 J_2(x_b) + \lambda_3 J_3(x_b)$

其中
$$J_1(x_b) = 1 - \eta_q(x_b)$$
 (14

$$J_{2}(x_{b}) = \begin{cases} -\frac{1}{0.3C_{n,q}} \ln \Delta & (\Delta \ge e^{-0.3C_{n,q}}) \\ 1 & (\Delta \ge e^{-0.3C_{n,q}}) \end{cases}$$
(15)





图 4 不同电池位置下拖拉机质量分布特性

(b) 虚拟样机

Fig. 4 Mass distribution characteristics of tractor with different battery positions

1. 后轴中心(基准) 2.1#电池组 3. 电控箱 4.2#电池组 5. 机罩 6. PAB 前端面 7. 前桥总成 8. 车架 9. 后驱总成

$$J_{3}(x_{b}) = \begin{cases} \frac{W_{c}}{W_{0}} & \left(0.1 \leq \frac{W_{c}}{W_{0}} \leq 1\right) \\ 10^{5} & (其他) \\ \lambda_{1} + \lambda_{2} + \lambda_{3} = 1 \end{cases}$$
(16)

式中 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 ——驱动轮效率、滑转率、前轴荷占 比权重系数

> *J*₁、*J*₂、*J*₃——表征驱动效率、滑转状态和前桥 压载的评价函数

本文以提高拖拉机作业能耗经济性为主,兼顾 驱动轮滑转及前桥压载状态,将 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别取值 为 0.4、0.3 和 0.3; x_b 为优化变量,即 PAB 纵向位置 (图 4b), $x_b \in [1\ 000\ \text{mm}, 2\ 000\ \text{mm}]$ 。

电池惯性较大时,由电缸驱动的电池运动难以 适应牵引阻力的高频变化,因此,上述模型为准静态 调节模型,主要响应耕深或地形轮廓改变时所引起 牵引力变化中的低频成分。模型求解采用图 5 所示 的迭代计算流程在 x_b 的定义域内进行循环寻优,计 算过程 中所使用的主要模型参数分别为: C_I = 490 kPa、 W_0 = 11 000 kN、 b_c = 0. 155 m、 d_c = 0. 629 m、 b_q = 0. 241 m、 d_q = 1. 022 m。

3 仿真验证

为定量分析电池分布对拖拉机牵引性能的影响,并为后续样机牵引实验提供依据,基于 Matlab/ Simulink 平台,搭建了电动拖拉机牵引作业仿真模型,如图 6 所示,主要包括 PID 速度调节模型、传动 系统数学模型、驱动轮数学模型以及拖拉机纵向动 力学模型,其中,驱动轮数学模型主要包括驱动轮工 作特性、驱动轮增重特性、驱动轮滑转率的计算方程



Fig. 5 Solution flowchart of optimization model

以及驱动轮转动动力学方程。仿真计算所采用的整 机及土壤环境参数见表1,水平牵引负载则从拖拉 机实际牵引作业时所测得的牵引阻力水平分量数据 中截取共200s,所对应的牵引速度为5~7km/h,如 图7所示,牵引力变化范围为1~5kN。





图 7 为电池分布优化模型根据变化的牵引力计 算出的电池目标位置。结合模型的优化目标,分析 电池位置随牵引力的变化趋势可知,当牵引力在 2.5 kN 以内时,随着牵引力增加,电池有向后轴方 向移动的趋势,此时,电池移动以抑制后轴滑转为 主;当实际牵引力明显超过 2.5 kN 时,如在 120~ 150 s 期间,电池不再随着牵引力的增加而向后桥方 向移动,而是向前桥方向移动,此时,电池移动以保 证前桥轴荷为主。因此,图7中最优电池目标位置 的确定实际上兼顾了驱动轮滑转、驱动效率及前桥 动载3方面的性能,这与前面制定目标函数时追求 的牵引性能综合最优一致。

图 8a 为拖拉机牵引作业过程中驱动轮滑转率 随牵引力的变化情况。为分析电池分布对滑转率的

表1 实验样机及土壤环境基本参数

Tab. 1	Basic	parameters	for	experimental	prototype
--------	-------	------------	-----	--------------	-----------

数值
11 000
12
320
125
36
320
375
2×8
57.6
1.650
0.5
490
0. 629
1.022
0. 155
0. 241









影响,分电池位置未优化和优化两种模式进行对比 说明,其中,未优化模式下电池位置参数参照同功率 等级燃油拖拉机前后轴荷分配确定,根据经验,取 $\beta = 0.595$,对应的 $x_b = 1311 \text{ mm}(下同),优化模式下$ 的电池位置参数按照图 7 给出的最优位置选取。仿 真结果显示,相比于未优化模式,优化模式下驱动轮 的滑转率总体走势更低,对 0~200 s 内的滑转率进 行统计,如表 2 所示,优化模式下滑转率均值为 0.181 2, 方差为 0.007 9,比未优化时分别下降 15.21%和27.52%,即电池质量的最优分配在一定 程度上抑制了驱动轮的滑转。

表 2 仿真计算结果统计对比 Tab. 2 Statistical comparison of simulation results

		1		
参数	模式	滑转率	驱动轮效率	前轴荷占比/%
拓店	未优化	0. 213 7	0.4488	33. 68
均阻	优化	0. 181 2	0.4680	21.16
+	未优化	0. 010 9	0.0035	0.079
刀左	优化	0.0079	0.0031	0.065

图 8b 显示了电池位置未优化与优化两种模式 下驱动轮效率的变化情况。在总体变化趋势上, 优化模式下的驱动轮效率比未优化时更高,对0~ 200 s内的驱动轮效率进行统计,见表2,结果显示, 优化模式下驱动轮效率均值为0.4680,比未优化 时提升4.28%,方差为0.0031,比未优化时收敛 11.4%。

综合图 8 中滑转率、驱动轮效率的变化趋势和 统计结果可知,优化模型给出的电池位置并不追求 每一时刻牵引性能的最优化,而是关注整个作业周 期内总体作业性能的提升,因而在后续样机实验中, 将重点对作业过程中驱动滑转、能量利用以及轴荷 安全裕度的统计性能进行对比分析。

4 样机实验

4.1 实验平台

为验证电动拖拉机在牵引作业时轴间载荷转移 效应,以及电池分布对电动拖拉机牵引性能的影响 效果,搭建了如图 9a 所示的电动拖拉机样机平台。 为保证对比实验过程中牵引阻力的一致性,选择在 室内土槽环境中进行,如图 9b 所示。电动拖拉机样 机参数如表1 所示,为实现2.1 节中提出的 PAB 构 型,在机架纵梁上布置了导轨及滑轮,以使部分电池 模组能够在轨道上沿拖拉机纵向前后滑动;为给电 池移动提供必要的空间,底盘采用后轮独立驱动方 式,电机及减速器参数见表1。

4.2 实验条件

(1)实验按照电池位置未优化和优化 2 种模式进行,在未优化模式中,调节电池位置为 x_b = 1 311 mm,相应的 β 为 0. 595;在优化模式中,电池位置由优化模型计算,负荷为 3 kN 时,电池位置应为 x_b = 1 195 mm, β 为 0. 621 0。



(a) 电动拖拉机实验样机

图 9 电动拖拉机室内牵引实验平台 Fig. 9 Electric tractor indoor traction experimental

1. PAB 电池 2. 控制系统 3. 独立后驱 4. 轮边驱动电机 5. 轮边减速器

(2)牵引作业时,驱动电机目标转速设定为 2000 r/min,对应的理论作业车速为6.7 km/h,左右 两侧驱动电机采用等转矩分配方式^[25-26];同时,为 对比分析,为拖拉机施加近似固定的3 kN 牵引 负荷。

(3)分别采集实验过程中的水平牵引力、电机转速、电机驱动转矩、直流母线电压、母线电流,由仿 真结果可知,分析单点作业性能并无意义,故应分别 计算前桥轴荷(式(11))、平均滑转率以及平均能量 利用率,用以对比分析电池位置优化前后拖拉机的 牵引性能。平均滑转率和平均能量利用率计算式为

$$\bar{\delta} = \frac{\bar{\omega}r - \bar{v}}{\bar{v}} \tag{18}$$

$$\bar{\xi} = \frac{\bar{F}_r \bar{v}}{\bar{U}\bar{I}} \tag{19}$$

式中
$$\overline{\delta}$$
——时间段 $t_1 \sim t_2$ 平均滑转率
 $\overline{\xi}$ ——时间段 $t_1 \sim t_2$ 平均能量利用率
 \overline{F}_r ——时间段 $t_1 \sim t_2$ 平均牵引力,N
 \overline{U} ——时间段 $t_1 \sim t_2$ 平均母线电压,V
 \overline{I} ——时间段 $t_1 \sim t_2$ 平均母线电流,A
 $\overline{\omega}$ ——时间段 $t_1 \sim t_2$ 平均驱动轮角速度,rad/s
 \overline{v} ——时间段 $t_1 \sim t_2$ 平均车速,m/s

4.3 实验结果

图 10a 为电池位置未优化时拖拉机在牵引作业 过程中牵引阻力的变化情况以及为克服牵引阻力而 从电池端输出的电流、电压变化情况,截取 120 s 的 牵引数据进行分析可知,牵引阻力基本在 3 kN 上下 波动,动力电池输出电压平台为 48 V,输出电流受 牵引阻力变化的影响显著,在 230 A 上下波动;牵引 阻力的随机变化引起了拖拉机行驶车速和电机转速 的变化,如图 10b 所示,由于牵引作业时左侧驱动轮 处于犁沟之中而使机体向左倾斜,因而,在电机等转 矩分配模式下,左侧电机(或驱动轮)转速在总体趋 势上较右侧更低,而行驶车速基本在 6 km/h 上下波 动,并且在整个牵引过程中,前轴荷占比始终维持在



Fig. 10 Traction performance under non-optimized condition 整机质量的 20% ~ 30%,较之前提出的转向裕度下 限 20%,仍有一定的优化空间。

电池位置经过优化后,拖拉机同样以近似3kN 的水平牵引阻力进行牵引作业,所测得的牵引力及 电池输出电压、电流变化情况如图11a所示,对比 图10a可知,在同样的电压平台下,优化后的电池输 出电流仍在230A附近波动,但在总体变化幅度上, 尤其对于少数数值较大的电流而言,较优化前有一 定的收敛;电池位置优化后拖拉机车速及驱动转速 的变化如图11b所示,左侧电机(或驱动轮)驱动转 速在总体趋势上仍较右侧低,但与图10b对比可知, 左右两侧电机(或驱动轮)转速波动的剧烈程度均 有明显下降,相应地,拖拉机牵引速度的变化幅度较



Fig. 11 Traction performance under optmized condition

实验样机 (b) 室内土槽实验环境 电动拖拉机室内牵引实验平台

platform

未优化时也有所改善,并且,在整个作业过程中,牵 引速度基本超过6 km/h,较未优化时有所提升,前 轴荷占比接近20%,与优化目标吻合。

为定量对比未优化、优化两种牵引模式下各 指标的变化情况,按照式(11)、(18)、(19),分别 求取前轴荷占比、滑转率和能量利用率的平均值, 结果如表3所示。由表3可知,两种牵引模式下牵 引阻力的均值和方差基本相同,保证了牵引条件 的一致性;在电池位置未优化时,拖拉机平均行驶 速度为6.00 km/h,平均滑转率为0.1987(左侧) 和0.2814(右侧),而经过优化后,区间内的平均 滑转率下降为0.1942(左侧)/0.2332(右侧),驱 动轮滑转率的减少使得拖拉机平均牵引速度提高 为6.25 km/h,提升量为4.16%;在能量利用率方 面,电池位置经过优化后,由于滑转损失的减少和 牵引车速的提高,用于牵引作业的有效净功率有所 增加,因而平均能量利用率由未优化时的45.9%增 加为优化后的48.5%,增加量为5.66%,需要指明 的是,在能量利用率中,除了驱动轮效率外,实际上 还包含了电机驱动系统效率和机械效率成分,考虑 到两种模式下机械系统和电机驱动系统效率因工况 一致而基本相同,故这里实际上是以能量利用率近 似反映驱动轮效率的变化;在前轴荷占比保持方面, 优化前后的前桥载荷均值分别为25.59%和 19.88%,即经过电池位置优化后,在保证前桥安全 压载裕度的前提下,更多的电池质量被分配至后驱 动轮,由此又提升了牵引作业过程中驱动轮的滑转 性能和能耗经济性。

表 3 实验结果统计对比 Tab. 3 Statistical comparison of experimental results

牵引模式	平均阻力/	平均速度/	电机平均转速/	平均电压	平均电流	平均前轴荷	平均滑转率	平均能量
	kN	$(\operatorname{km} \cdot \operatorname{h}^{-1})$	$(\mathbf{r} \cdot \mathbf{min}^{-1})$	/V	/A	占比/%		利用率/%
未优化	3.02	6.00	2241(左侧)/	48.71	224. 7	25.59	0.1987(左侧)/	45.9
			2499(右侧)				0.2814(右侧)	
优化	2.05	6.25	2319(左侧)/	49 70	48.70 224.2	2 19.88	0.1942(左侧)/	48.5
	5.05	0.25	2437(右侧)	48.70			0.2332(右侧)	

5 结论

(1)拖拉机牵引性能与驱动桥压载之间存在 一种非单调的函数关系,优化电池压载构型和压 载参数是提升电动拖拉机作业效率、改善驱动轮 滚动及滑转状态、维持前后轴安全压载的有效方 式之一。

(2)以提升牵引性能为目标的电池压载参数优

化模型并不追求每一时刻性能最优,而更关注整个 作业周期内的总体作业性能,且可从有限电池能量 转化效率、驱动滑转状态以及前轴压载安全裕度方 面对牵引性能进行综合评价。

(3) 土槽牵引实验表明,所提出的电池压载构 型在保证前桥安全压载的前提下,可使电动拖拉机 牵引车速和能量利用率分别提升 4.16% 和 5.66%, 即有效提升了电动拖拉机的牵引作业性能。

参考文献

- [1] 赵剡水,杨为民.农业拖拉机技术发展观察[J].农业机械学报,2010,41(6):42-48.
 ZHAO Yanshui, YANG Weimin. Technological development of agricultural tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(6):42-48. (in Chinese)
- [2] 郭栋才,张清河. 机械化是农业现代化的重要标志[J]. 农业机械学报,1980,21(1):112-117.
 GUO Dongcai, ZHANG Qinghe. Farm mechanization——an important mark of agricultural modernization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1980,21(1):112-117. (in Chinese)
- [3] 罗锡文,廖娟,胡炼,等.提高农业机械化水平促进农业可持续发展[J].农业工程学报,2016,32(1):1-11.
 LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Improving agricultural mechanization level to promote agricultural sustainable development[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(1):1-11. (in Chinese)
- [4] 谢斌,武仲斌,毛恩荣.农业拖拉机发展现状和展望[J/OL].农业机械学报,2018,49(8):1-17.
 XIE Bin, WU Zhongbin, MAO Enrong. Development and prospect of modern agricultural tractor technology [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(8):1-17. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180801&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.001. (in Chinese)
- [5] 赵思夏,刘孟楠,徐立友. 电动拖拉机底盘多目标优化设计[J/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(Supp.): 492-498. http://www.j-csam.

org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? flag = 1&file_no = 2018s067. DOI:10.6041/j.issn. 1000-1298.2018. S0.067. (in Chinese)

- [6] 王元杰,刘永成,杨福增,等. 温室微型遥控电动拖拉机的研制与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(22):23-29.
 WANG Yuanjie, LIU Yongcheng, YANG Fuzeng, et al. Development and test of tiny remotely controlled electric tractor for greenhouses[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(22): 23-29. (in Chinese)
- [7] WEERACHAI A, MASAYUKI K, TOMOHIRO T, et al. Preliminary study on the applicability of an electric tractor (part 2) effect of battery allocation on the tractive performance[J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 2001, 63 (5):92-99.
- [8] 高辉松,朱思洪,吕宝占. 电动拖拉机发展及其关键技术[J]. 拖拉机与农用运输车,2007,34(6):4-7.
 GAO Huisong, ZHU Sihong, LÜ Baozhan. Development of electric tractorand key techniques [J]. Tractor and Farm Transporter, 2007,34(6):4-7. (in Chinese)
- [9] ZHANG N Q, CHANCELLOR W. Automatic ballast position control for tractor[J]. Transactions of the ASABE, 1989, 32(4): 1159-1164.
- [10] CLARK R L, VANDE L G. A rapid automatic tractor ballast system [J]. Transactions of the ASABE, 1993, 36(5):1261 1266.
- [11] PRANAV P K, PANDEY K P. Computer simulation of ballast management for agricultural tractors [J]. Journal of Terramechanics, 2008, 45(6):185-192.
- [12] 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 Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2010,22(2):115-117. (in Chinese)
- [13] 谢斌,张超,毛恩荣,等. 基于 myRIO 的电动拖拉机驱动控制器设计与室内试验[J]. 农业工程学报,2015,31(18):55-62.
 XIE Bin, ZHANG Chao, MAO Enrong, et al. Motor controller design and indoor experiment for electric tractor based on myRIO[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(18): 55-62. (in Chinese)
- [14] 邓晓亭,朱思洪,高辉松,等. 混合动力拖拉机传动系统设计理论与方法[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(8):21-31.
 DENG Xiaoting, ZHU Sihong, GAO Huisong, et al. Design theory and method for drive train of hybrid electric tractor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(8):21-31. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20120805&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.08.
 005. (in Chinese)
- [15] 方树平,王宁宁,易克传,等. 纯电动拖拉机动力系统设计及性能分析[J]. 中国农机化学报,2017,38(1):80-84.
 FANG Shuping, WANG Ningning, YI Kechuan, et al. Design and performance analysis of power system for pure electric tractor[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017,38(1): 80-84. (in Chinese)
- [16] 方在华,张文春. 拖拉机-农具机组牵引性能的预测[J]. 农业机械学报,1987,28(1):13-20.
 FANG Zaihua, ZHANG Wenchun. The prediction of tractor implement unit traction performance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1987,28(1):13-20. (in Chinese)
- [17] 周志立,方在华. 拖拉机机组牵引动力学[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [18] 吴起亚,高行方. 拖拉机与农业机械牵引力学[M]. 北京:中国农业机械出版社,1985.
- [19] WISMER R D, LUTH H J. Off-road traction prediction for wheeled vehicles [J]. Journal of Terramechanics, 1973, 10(2): 49-61.
- [20] EVANS M D, CLARK R L, MANOR G. An improved traction model for ballast selection [J]. Transactions of the ASAE, 1991,34(3):773-780.
- [21] TIWARI V K, PANDEY K P, PRANAV P K. A review on traction prediction equations [J]. Journal of Terramechanics, 2010,47(3):191-199.
- [22] ARJHARN W, KOIKE M, TAKIGAWA T, et. al. Preliminary study on the applicability of an electric tractor (part1)[J]. Journal of JSAM, 2001, 63(5):92-99.
- [23] 李文哲,许绮川. 汽车拖拉机学[M]. 北京:中国农业出版社,2006.
- [24] GEE-CLOUGH D, PEARSON G, MCALLISTER M. Ballasting wheels tractors to achieve maximum power output in frictionalcohesive soils[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1982, 27(1):1-19.
- [25] 商高高,张家俊. 电动拖拉机驱动控制策略开发[J]. 中国农机化学报,2016,37(6):149-153. SHANG Gaogao, ZHANG Jiajun. Development of electric tractor powertrain control strategy[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(6): 149-153. (in Chinese)
- [26] 谢斌,张超,陈硕,等. 双轮驱动电动拖拉机传动性能研究[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(6):9-13.
 XIE Bin, ZHANG Chao, CHEN Shuo, et al. Transmission performance of two-wheel drive electric tractor [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(6):9-13. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20150602&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06. 002. (in Chinese)