

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2025.205

引用格式:黄淇,黄潇辉,曹华军,等.计及制造成本的纯电动工程机械动力总成优化设计[J].重庆大学学报, 2026,49(1): 1-16.



计及制造成本的纯电动工程机械动力总成优化设计

黄 淇^{1a,1b}, 黄潇辉^{1a,1b}, 曹华军^{1a,1b}, 曾 浩^{1a,1b}, 鄢万斌^{1a,1b,2}

(1. 重庆大学 a. 机械与运载工程学院; b. 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 广西柳工机械股份有限公司 柳工柳州传动件有限公司, 广西 柳州 545007)

摘要:为提高电动工程机械的动力性和经济性,加快工程机械电气化,降低非道路移动源的碳排放,提出了一种计及制造成本的电动工程机械动力总成优化设计方法。以纯电动轮式装载机为案例,采用模糊 TOPSIS 法进行考虑广义成本的动力总成优化部件选择,使用改进的多目标水母搜索算法,以特定客户需求工况运行成本、动力性能及狭义制造成本为目标,对选定的部件参数进行优化;建立 Matlab/Simulink 仿真模型对优化结果进行验证。结果表明,改进后的水母算法具有一定的优越性,在特定客户需求工况下电机工作效率提升了 0.214%、0.190%、0.150%,最高车速加速时间分别减少 1.798、2.231、1.006 s,制造成本降低了 3.129%、5.043%、3.946%,有效提高了电动工程机械的动力性和经济性。

关键词:电动工程机械;动力总成;制造成本;水母搜索算法;参数优化

中图分类号:TH243

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2026)01-001-16

Optimization design method for electric construction machinery powertrains considering manufacturing cost

HUANG Qi^{1a,1b}, HUANG Xiaohui^{1a,1b}, CAO Huajun^{1a,1b}, ZENG Hao^{1a,1b}, YAN Wanbin^{1a,1b,2}

(1a. College of Mechanical and Vehicle Engineering; 1b. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. Research Institute of Transmission, Liugong Liuzhou Driveline Co., Guangxi Liugong Machinery Co., Ltd., Liuzhou, Guangxi 545007, P. R. China)

Abstract: To improve the operational performance of electric construction machinery, accelerate industry electrification, and reduce carbon emissions from non-road mobile equipment, a powertrain optimization design method considering manufacturing cost is proposed. The pure electric wheel loader is selected as the research object, and suitable components are first identified using the fuzzy TOPSIS method. Then, operating costs under customer demand conditions, power performance under loader turnaround conditions, and narrowly defined manufacturing costs are simultaneously optimized using an improved multi-objective Jellyfish search algorithm. Finally, the proposed method is verified on a Matlab/Simulink platform. Results show that the improved algorithm

收稿日期:2024-01-02 网络出版日期:2025-03-18

基金项目:柳州市科技计划项目(2021AAB0101);国家重点研发计划项目(2020YFE0201000)。

Supported by Liuzhou City Science and Technology Planning Project (2021AAB0101), and China Key Research and Development Program (2020YFE0201000).

作者简介:黄淇(1998—),男,硕士研究生,主要从事绿色制造与装备研究,(E-mail) huang_sifan@cqu.edu.cn。

通信作者:曹华军,男,教授,博士生导师,(E-mail) hjcao@cqu.edu.cn。

outperforms benchmark approaches. Motor efficiency increases by 0.214%, 0.190%, and 0.150% under different working conditions; the acceleration time from 0 to maximum speed is decreased by 1.798 s, 2.231 s, and 1.006 s; and manufacturing cost is reduced by 3.129%, 5.043%, and 3.946%. Overall, both power performance and operational comfort are significantly enhanced.

Keywords: electric construction machinery; powertrain; manufacturing cost; Jellyfish search algorithm; parameter optimization

随着环保政策的持续推进,交通运输行业作为中国碳排放和污染物来源的主要行业之一,面临节能减排的巨大压力^[1]。工程机械作为交通行业的重要组成部分,其单位碳及污染物排放远高于乘用车,然而对比电动乘用车的大规模推广,电动工程机械仍处于起步阶段^[2],因此加快工程机械电气化具有重大意义。

由于电池容量的限制,“里程焦虑”一直是限制车辆电气化的核心问题^[3-4]。电动乘用车领域的研究经验表明,提高动力总成的能源利用效率是延长续航里程的有效方法。例如,Yi等^[5]引入粒子群算法对地下电动装载机进行传动比优化,优化后在单个工作循环下电能消耗降低1.98%;王少杰等^[6]针对轮式装载机,提出一种基于不同权重物料铲装数据优化变速箱传动比的方法,以满足装载机定制化的需求;Eckert等^[7-8]通过交互式自适应加权遗传算法优化了变速箱、差速器传动比、电池电压和电容等参数变量,实现了燃油消耗降低,废气排放减少等多个目标。上述研究通过优化动力总成部件(电池、电机、变速箱和驱动桥)中的一个或多个实现了提高车辆续航里程的目的^[9-10]。

工程机械运行工况复杂,目前缺乏通用的驾驶循环用于评估其运行性能^[11-12]。工程机械行业竞争激烈且是典型的重资产行业,这使制造商不得不考虑由于定制化生产带来的包括生产周期、原料消耗、加工设备等各类成本^[13],因此制造商通常采用对一个或多个通用部件进行定制化设计实现系统性能的优化^[14-16]。例如,Lu等^[17]设计了快速响应客户需求的汽车等速万向节数字化平台,实现等速万向节的定制配置,并在一定程度上降低成本;Zhang等^[18]提出了一种数据驱动的逆向设计优化方法,以轮式装载机传动系统定制化设计为例,为产品定制化设计提供决策支持。上述研究通过对机械系统中的某个或多个部件进行面向客户需求的定制化生产,实现了产品溢价,增加了客户黏性,进而提高制造商营收利润。

基于以上分析,通过定制化生产动力总成某个或多个部件在提升电动工程机械的续航能力、增加产品溢价提高制造商利润等方面具有很大潜力。但目前还存在一些不足:优化定制部件的选择缺乏依据,各动力总成部件优化均可提高续航里程和产品溢价,但未考虑选择的优化部件对生产过程带来的影响;优化设计主要面向通用工况的运行成本,缺乏对制造商制造成本和特定客户需求工况的考虑,可能导致制造商缺乏改进意愿且优化结果对特定客户需求工况缺乏适应性。

综上所述,文中提出一种计及制造成本的纯电动工程机械动力总成优化设计方法,以纯电动轮式装载机作为案例,采用模糊TOPSIS法进行考虑广义成本的动力总成优化部件选择;以特定客户需求工况运行成本、动力性能及狭义制造成本为目标,在满足约束条件下采用改进的多目标水母搜索优化算法对优化模型进行求解;最后,采用Matlab/Simulink仿真模型对优化结果进行了仿真验证。

1 计及广义成本的优化定制部件选择决策

1.1 纯电动轮式装载机动力总成结构分析

纯电动装载机是目前我国电气化发展较快的工程机械之一^[19],为保证方法对市面上的电动装载机有一定的针对性和普适性,并且对未来市场有开发前景,选择某制造商生产的一款双电机5 t纯电动轮式装载机作为文中研究对象,其动力总成主要由电池、驱动电机、变速箱、驱动桥组成,如图1所示。

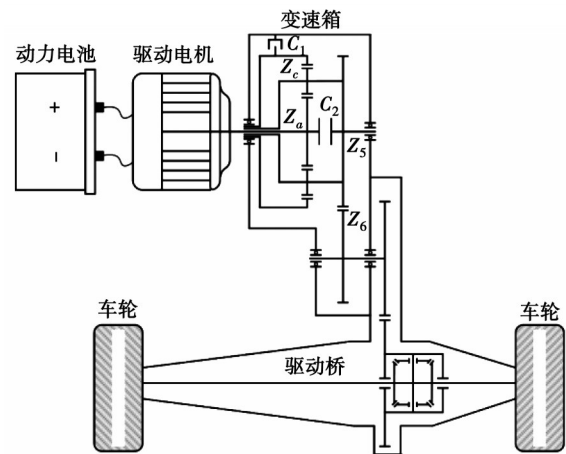


图 1 纯电动装载机动力总成结构

Fig. 1 Powertrain structure of pure electric loader

纯电动轮式装载机的部分整机参数如表 1 所示。

表 1 某型号纯电动装载机整机参数

Table 1 Parameters of a model of pure electric loader

类别	参数	类别	参数
整车质量 M_w/kg	19 000	迎风面积 A/m^2	7.5
装载质量 M_G/kg	5 000	车轮半径 r/m	0.735
设计最高车速 $V_{\max}/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	40	传动总效率 η_t	0.88

1.2 计及广义成本的优化定制部件决策过程

为了正确地选择动力总成的优化定制部件,从而在提高动力运行性能的同时减少对生产过程成本的影响,在对电动装载机优化的前置条件中,应增加对客户和制造商双边效益的考虑,完整分析双方需求并建立评价体系和指标,完善优化前的部件选择依据,形成纯电动装载机优化部件的评价—优化—检验的方法。因此,既要充分考虑原料成本等狭义制造成本,也要考虑到部件定制化生产对供应链、制造周期、库存转运等无法量化的广义成本的影响。结合焦玉民等^[20]提出的工程机械质量评价体系与某制造商动力总成生产实际,综合考虑了纯电动装载机在设计、制造、运行过程中需求,制定了如表 2 所示的评价指标 $F_n(n=1,2,\cdots,12)$ 。

表 2 广义成本指标与专家评价结果

Table 2 Broad cost indicators and expert evaluation results

阶段	符号	评价指标	集结模糊权重	阶段	符号	评价指标	集结模糊权重
设计	F_1	产品论证	(3,7.5,9)	运行	F_7	可靠性	(5,7,9)
	F_2	材料选择	(3,5,9)		F_8	安全性	(3,6.5,9)
	F_3	装备选型	(5,7,9)		F_9	工作效率	(5,8,9)
生产	F_4	加工设备	(1,3,5)	维护	F_{10}	维修零件规范性	(1,7.5,9)
	F_5	制造工艺	(1,4.5,9)		F_{11}	维修周期	(3,8,9)
	F_6	生产周期	(3,4,7)		F_{12}	故障可诊断性	(1,3,5)

上述评价指标难以采用数学公式进行准确表达和定量分析,但通过分析可知优化部件的选择过程是一个典型的模糊多准则决策问题,因此选择多属性评价与决策的模糊 TOPSIS 法解决以上问题,该方法具有高

效、直观和适用领域广等特点,已运用在电动汽车和工程机械等多个领域,其具体流程如图2所示。

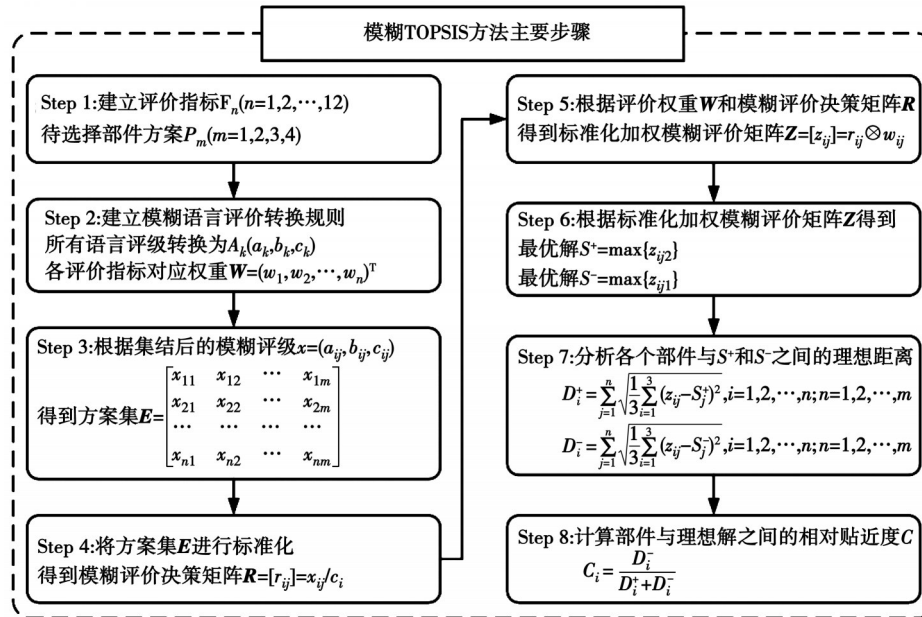


图2 模糊TOPSIS法主要步骤

Fig. 2 Main steps of the fuzzy TOPSIS method

模糊TOPSIS方法的模糊语言评价转换规则如表3所示。

表3 模糊语言评价转换规则

Table 3 Fuzzy language evaluation conversion rules

语言评价	模糊规则
非常负面(VL),不重要(LI)	(1,1,3)
负面(L),中度重要(MI)	(1,3,5)
合适(M),重要(I)	(3,5,7)
积极(H),非常重要(VI)	(5,7,9)
非常积极(VH),绝对重要(AI)	(7,9,9)

针对待优化部件进行选择决策,制造商所邀请的20位评价人员中除了包含自身的技术人员外,还有非工程机械领域的客户和暂不熟悉相关设计领域的供应商。专家组成员对待优化部件的各项评价指标进行了语言评级,评级相关结果如表2和表4所示。

结合表2~4及图2的计算流程得到如表5所示的优化部件方案重要性排序,其中 D_i^+ 和 D_i^- 表示待优化部件 i 理想解的距离, C_i 表示相对贴近度。根据表5的排序结果,可以发现制造商更愿意对变速箱进行优化以满足客户需求且相应的优化程度会考虑更多的细节,而电机和驱动桥的重要程度仅次于变速箱,电池的重要程度最低。由于新能源汽车的迅速发展,驱动电机、驱动桥和动力电池均已成为标准化的产品,因此在优化过程中仅考虑电机和驱动桥的标准化型号选型,电池则更倾向于考虑在优化过程中提供相应的约束条件。

表 4 优化定制部件方案评价
Table 4 Evaluation of custom widget optimization solutions

评价指标	待优化部件方案			
	变速箱	电机	驱动桥	电池
F ₁	(1, 5, 9)	(1, 5, 9)	(1, 59)	(1, 5.25, 9)
F ₂	(1, 4.5, 9)	(1, 3, 9)	(1, 3, 9)	(5, 7, 9)
F ₃	(1, 3, 9)	(1, 3.5, 9)	(3, 7, 9)	(1, 3, 5)
F ₄	(1, 5, 9)	(1, 3.75, 9)	(1, 3.25, 9)	(1, 3, 7)
F ₅	(5, 7.5, 9)	(3, 5.5, 9)	(1, 3.75, 9)	(1, 3, 5)
F ₆	(1, 5, 9)	(5, 7.25, 9)	(3, 5.25, 9)	(1, 5, 9)
F ₇	(3, 7, 9)	(1, 5, 7)	(1, 3.75, 9)	(5, 7, 9)
F ₈	(1, 5.75, 9)	(1, 3, 5)	(3, 7.5, 9)	(3, 5, 9)
F ₉	(3, 5.25, 7)	(5, 7, 9)	(3, 5.25, 7)	(1, 5, 9)
F ₁₀	(5, 7, 9)	(5, 7.25, 9)	(3, 5, 9)	(1, 1.75, 5)
F ₁₁	(3, 7.5, 9)	(1, 5.5, 9)	(5, 7, 9)	(1, 1, 3)
F ₁₂	(3, 5.25, 9)	(3, 5.75, 9)	(1, 3.75, 9)	(1, 3.25, 9)

表 5 优化定制部件方案贴近度排序
Table 5 The proximity ranking of custom widget optimization solutions

部件	D_i^+	D_i^-	C_i	重要性
变速箱	60.149 2	60.361 0	0.500 9	1
电机	60.711 9	59.784 6	0.496 2	2
驱动桥	60.776 6	59.669 5	0.495 4	3
电池	61.760 5	58.402 1	0.486 0	4

2 计及狭义制造成本的定制部件优化设计

2.1 计及狭义制造成本的多目标优化模型

在定制化生产的过程中,根据客户需求提高整机的运行性能、降低运行成本和制造成本,从而加快客户投资回报是提高客户的购买意向和加快工程机械电动化的重要手段。然而,定制部件参数的差异导致所需的材料规格、工艺路线或数控机床往往不同,难以用统一的制造成本目标衡量制造商生产的部件。为满足制造商和客户的双边效益,实现在设计阶段对制造成本的科学规范预测,文中建立以特定客户需求工况的运行成本、动力性能及狭义制造成本为目标的多目标优化模型。

2.1.1 考虑狭义制造成本目标

对如图 1 所示的变速箱传动原理进行分析,其中包括太阳轮 Z_a 、4 个行星轮 Z_c 、齿圈、定轴齿轮 Z_5 和 Z_6 。当离合器 C_1 闭合、离合器 C_2 分离时,行星齿轮的齿圈和变速箱外壳固定, Z_a 为主动轮,行星架将动力传递到齿轮 Z_5 和 Z_6 中;当离合器 C_1 分离、离合器 C_2 闭合时,行星轮系同速转动, Z_5 为主动轮传递动力。两档传动比为

$$i_1=\left(\frac{Z_a+2Z_c}{Z_a}+1\right)\times\frac{Z_6}{Z_5},\tag{1}$$

$$i_2=Z_6/Z_5,\tag{2}$$

式中: i_1 表示为 1 档传动比; i_2 为 2 档传动比。在满足动力性和可靠性的情况下,应尽量减少变速箱齿轮毛坯的体积,从而达到降低对工艺处理及其他标准件使用需求的目的^[21-23]。因此将齿轮体积作为变速箱制造成本

的主要影响因素,即变速箱齿轮按照标准圆柱来近似处理:

$$C_{\text{box}} = c \times \left(\frac{\pi}{4} (m_1 Z_a)^2 b_1 + n_p \frac{\pi}{4} (m_1 Z_c)^2 b_1 + \frac{\pi}{4} (m_2 Z_5)^2 b_2 + \frac{\pi}{4} (m_2 Z_6)^2 b_2 \right) \quad (3)$$

式中: C_{box} 为变速箱成本; c 为拟合系数; m_1 和 m_2 为齿轮模数; b_1 和 b_2 为齿宽; n_p 为行星齿轮的个数。由于电机、驱动桥无需进行优化定制,制造成本取决于供应商定价,备选电机、驱动桥参数及成本如表6和表7所示。

表6 某制造商备选电机型号参数

Table 6 Alternative motor model parameters for a manufacturer

部件型号	峰值功率 P_{max} /kW	峰值扭矩 T_{max} /(N·m)	峰值转速 n_{max} /(r·min ⁻¹)	成本 C_{motor} /万元
驱动电机1	160	2 100	3 500	2.5
驱动电机2	180	2 500	3 000	3.0
驱动电机3	200	2 800	2 500	3.5

表7 某制造商备选驱动桥型号参数

Table 7 A manufacturer's alternative drive axle model parameters

部件型号	减速比 i_g	成本 C_{bridge} /万元
驱动桥1	22.547	3.0
驱动桥2	23.258	4.0
驱动桥3	24.628	5.0

电池作为纯电动装载机的动力源,主要考虑其电池容量能否在复杂的铲装工况中完成长时间的工作。由于客户通常要求电池容量 W_{battery} 至少满足4 h的工作要求,为

$$W_{\text{battery}} \geq \frac{W_{\text{work}}}{(\eta_{\text{SOC},1} - \eta_{\text{SOC},0}) \eta_m \eta_b}, \quad (4)$$

式中: W_{work} 工作循环的耗电量;考虑到电池的使用寿命和误差,电池能量的可用范围为电池满电状态 $\eta_{\text{SOC},1}$ 和电池工作最低限位状态 $\eta_{\text{SOC},0}$; η_m 为驱动电机效率; η_b 为电池的放电效率。根据美国再生能源实验室对电池成本的研究,在不考虑电池配件的情况下电池成本主要取决于单元材料所能储存的总能量,通过函数拟合得到电池成本 C_{battery} 的模型^[24]为

$$C_{\text{battery}} = (a + b \times R_{P/E}) \times W_{\text{battery}}, \quad (5)$$

式中: a 、 b 为拟合系数; $R_{P/E}$ 为电池功率能量比, 1/h。最终得到狭义的制造成本目标

$$f_c(X) = C_{\text{motor}} + C_{\text{bridge}} + C_{\text{box}} + C_{\text{battery}} \quad (6)$$

2.1.2 考虑装载机转场工况动力性能目标

百公里加速时间是评价电动汽车动力性的重要指标,为满足纯电动装载机在工作地点间的转场需求,以电动装载机加速到设计最高车速的时间表征其动力性能目标

$$f_T(X) = \frac{1}{3.6} \left(\int_0^{V_{H1}} \frac{\delta_1 M_{w1}}{\frac{T_{\text{max},n} i_{g,n} \eta_t}{r} i_1 - M_{w1} g f - \frac{C_D A}{21.15} v^2} dv + \int_{V_{H1}}^{V_{\text{max}}} \frac{\delta_1 M_{w1}}{\frac{3\,600.35 P_{\text{max},n} \eta_t}{v} - M_{w1} g f - \frac{C_D A}{21.15} v^2} dv \right), \quad (7)$$

式中: M_{w1} 为整车质量; g 为重力加速度; $P_{\text{max},n}$ 、 $T_{\text{max},n}$ 为型号 n 的电机峰值功率、峰值扭矩; $i_{g,n}$ 为型号 n 的驱动桥速比; η_t 为传动总效率; f 为道路摩擦系数; C_D 为空气阻力系数; A 为迎风面积; δ_1 为旋转质量换算系数; C_D 为空气阻力系数; V_{H1} 为在1档状态下电机达到额定转速时整车的速度; V_{max} 为整车设计最高车速。

2.1.3 考虑特定客户需求工况的运行成本目标

根据客户的使用情况来看,装载机往往需要面对复杂多变的作业工况。作业物料颗粒大小、物料密实程度等,都会影响装载机在作业过程中载荷变化,对于粒度较小且较疏松的河沙,载荷变化小且平缓;对于硬度

大且规则形状不均匀的碎石,载荷变化幅度增加。但装载机通常在固定场所进行铲装工作,客户需求的铲装物料比较固定,如:发电厂每天需要铲装大量的煤炭;搅拌站需要铲装固定比例的河沙和碎石。

在纯电动轮式装载机执行铲装物料的过程中,运行成本可描述为驱动电机的电能消耗,不同铲装物料的电机工作点所对应的效率影响着纯电动装载机的能量利用率。通过调查分析客户使用需求确定相应物料的使用权重比例如表 8 所示。

表 8 客户需求物料权重比例统计数据
Table 8 Statistical data on the weighting ratio of customer demand materials

客户类型	物料类型			%
	河沙	煤炭	碎石	
客户类型 1	90	0	10	
客户类型 2	20	80	0	
客户类型 3	35	0	65	

对客户选择的 3 种物料分别进行铲装工况运行测试,归一化后得到相应的工况载荷谱如图 3 所示。

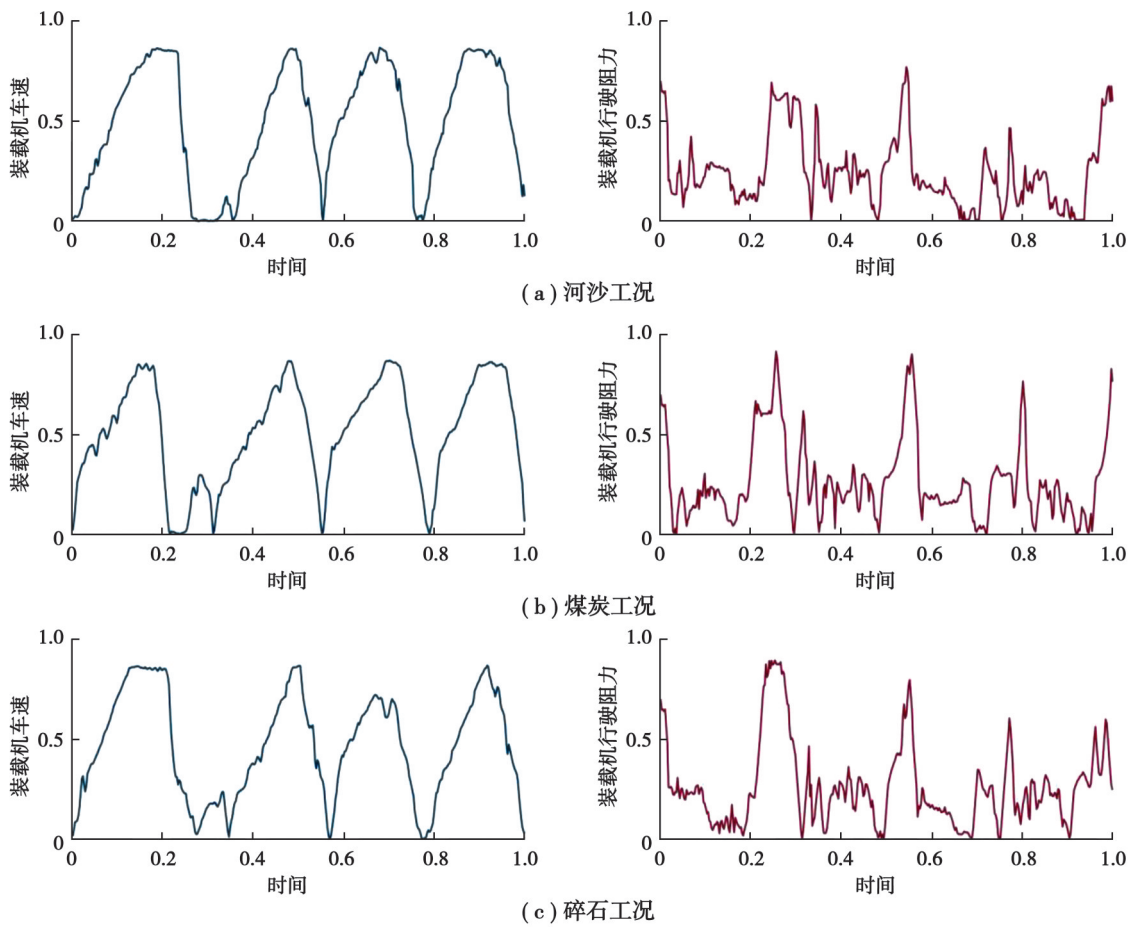


图 3 铲装工况运行测试结果
Fig. 3 Shoveling operation test results

根据客户需求权重比例,对驱动电机能耗加权计算得到运行成本目标 $f_w(X)$ 为

$$f_w(X)=\sum_{i=1}^3q_i\int_0^{T_i}\left(\frac{F_{ij}\times v_{ij}}{\eta_t/\eta_{m_{ij}}}\right)dt,\quad i\in[1,2,3],j\in[1,\cdots,T],$$

(8)

式中: $i=1,2,3$, 分别为河沙、煤炭和碎石3种物料; j 表示铲装工况测试的时间点; q_i 为 i 物料下的客户需求百分比; F_{ij} 为 i 物料下 j 时刻的装载机所需牵引力; T_i 为 i 物料下铲装工况总时间; v_{ij} 为所需速度; $\eta_{m_{ij}}$ 为驱动电机效率。

2.1.4 约束条件和优化变量范围

在驱动电机处于最大输出扭矩的状态下, 动力总成需要提供足够大的牵引力完成铲装工况, 为

$$\frac{T_{\max,n} i_{g,n} i_1 \eta_i}{r} \geq F_{i_{\max}}, \quad (9)$$

式中: $F_{i_{\max}}$ 为铲装所选 i 物料下的最大驱动力; r 为车轮滚动半径。在驱动电机处于最大输出转速的状态下, 电机达到最大驱动力时不能小于其在道路上的最大速度行驶阻力, 为

$$\frac{T_{\max,n} i_{g,n} i_2 \eta_i}{r} \geq M_{wl} g f + \frac{C_D A}{21.15} V_{\max}^2. \quad (10)$$

为满足设计要求制定的最高车速 V_{\max} , 保证纯电动装载机在工作区域转移的动力性能, 需满足

$$0.377 \times \frac{n_{\max,n} r}{i_{g,n} i_2} \geq V_{\max}, \quad (11)$$

式中: $n_{\max,n}$ 为型号 n 的电机峰值转速。变速箱在使用标准圆柱齿轮的情况下, 为避免加工时齿轮的根切现象, 所有齿轮的最小齿数不能小于17; 对于工程车辆考虑选用较大的模数以降低噪声带来的影响, 考虑第一系列和第二系列中的商用车常用模数作为优化范围; 在设计行星齿轮的过程中对于单排行星齿轮中的太阳轮、行星轮、齿圈应该满足相应的加工、安装及强度条件。各个行星轮之间应该保留有一定的间距, 避免行星轮之间相撞, 即2个相邻的行星轮的齿顶圆半径之和小于其中心距, 为

$$d_c < 2a'_{ac} \sin \frac{\pi}{n_p}, \quad (12)$$

式中: d_c 为行星齿轮 Z_c 的齿顶圆直径; a'_{ac} 为太阳轮和行星轮啮合副的中心距。按齿面接触疲劳强度、齿根弯曲疲劳强度对行星轮系进行约束^[25]:

$$\begin{cases} d_a \geq 768 \times \sqrt[3]{\frac{T_1 K_A K_{H\Sigma} K_{Hp}}{\Phi_d \sigma_{H\lim}^2} \times \frac{u+1}{u}}, \\ m_1 \geq 12.1 \times \sqrt[3]{\frac{T_1 K_A K_{F\Sigma} K_{Fp} Y_{Fa1}}{\Phi_d Z_a^2 \sigma_{F\lim}}}, \end{cases} \quad (13)$$

式中: d_a 为太阳轮 Z_a 的齿顶圆直径; T_1 为啮合齿轮副中小齿轮的名义转矩; K_A 为使用系数; $K_{H\Sigma}$ 为综合系数; K_{Hp} 为计算接触强度的行星轮载荷分布不均系数; Φ_d 为齿宽系数; u 为齿数比; $\sigma_{H\lim}$ 为齿轮的接触疲劳极限; $K_{F\Sigma}$ 为综合系数; K_{Fp} 为计算弯曲强度的行星轮载荷分布不均系数; Y_{Fa1} 为小齿轮齿形系数; $\sigma_{F\lim}$ 为齿轮的弯曲疲劳极限。按齿面接触疲劳强度、齿根弯曲疲劳强度定轴式齿轮进行约束:

$$\begin{cases} d_6 \geq \sqrt[3]{\frac{2KT_1}{\Phi_d} \frac{u+1}{u} \left(\frac{Z_H Z_E}{\sigma_{H\lim}} \right)^2}, \\ m_2 \geq \sqrt[3]{\frac{2KT_1}{\Phi_d Z_6} \left(\frac{Y_{Fa} Y_{Sa}}{\sigma_{F\lim}} \right)}, \end{cases} \quad (14)$$

式中: d_6 为齿轮 Z_6 的齿顶圆直径; Z_H 为区域系数; Z_E 为材料的弹性影响系数; K 为载荷系数; Y_{Fa} 为小齿轮齿形系数; Y_{Sa} 为应力修正系数。根据上述方法, 目标函数表示为

$$\min F(X) = [f_1(X), f_w(X), f_c(X)]. \quad (15)$$

设计变量为

$$X = [X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}] = [Z_a, Z_c, Z_5, Z_6, m_1, m_2, b_1, b_2, P_{\max,n}, i_{g,n}]. \quad (16)$$

式中: $f_1(X)$ 代表动力性能优化指标; $f_w(X)$ 代表运行成本优化指标; $f_c(X)$ 代表制造成本优化指标。通过式(9)~

(14)建立相应的约束范围:

$$\begin{cases} 17 \leq X_1 \leq 40, \\ 17 \leq X_2 \leq 40, \\ 17 \leq X_3 \leq 70, \\ 17 \leq X_4 \leq 70, \\ X_5 = 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5, \\ X_6 = 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5, \\ 7X_5 \leq X_7 \leq 8.6X_5, \\ 7X_6 \leq X_8 \leq 8.6X_6, \\ X_9 = 160, 180, 200, \\ X_{10} = 22.547, 23.258, 24.628. \end{cases} \quad (17)$$

2.2 改进水母搜索多目标优化算法

2.2.1 原始多目标水母搜索算法

根据多目标优化模型所建立的目标函数和相应的约束范围可知,电动轮式装载机动力总成的优化问题涉及变速箱、驱动桥和电机的选型涉及多个范围不同整数解集,在优化过程中常因整数解的问题导致算法的搜索能力和收敛能力减弱。为能够保证良好的寻优效果,要选择合适的算法优化涉及整数解的问题。多目标水母搜索算法(multi-objective jellyfish search algorithm, MOJS)是 Chou 等^[26]于 2020 年提出的最新群体智能超启发式全局优化算法之一,已被证明在解决整数解集的实际工程问题方面具有优势。

MOJS 的优化过程是基于水母在时间控制下寻找海洋食物密度最高区域的行为,水母运动方式如下:水母跟随洋流寻找食物密度最大的区域;水母在群体中以 2 种明确的行为方式 A 和 B 运动。当水母被洋流中的食物吸引时,更新后的水母位置为

$$X_i(t+1) = X_{c,i}(t) + \left(X_b(t) - 3 \times \text{rand}(0, 1) \times \frac{\sum X_{c,i}}{n_{\text{pop}}} \right) \times S, \quad (18)$$

式中: n_{pop} 是种群数量; $X_i(t+1)$ 是第 i 只水母在 t 时刻的位置; $X_{c,i}$ 是 X_b 是归档种群中的最佳位置; S 为水母跟随的 Lévy 飞行行为。通常,早期形成的水母群保持 A 型随机移动或者 B 型主动移动。移动后的第 i 个水母的位置可以表示为

$$X_i(t+1) = X_b(t) + (X_{c,i}(t) - X_b(t)) \times S, \quad (19)$$

$$X_i(t+1) = X_b(t) + \text{rand}(0, 1) \times \vec{d}, \quad (20)$$

$$\vec{d} = \begin{cases} X_{c,j}(t) - X_{c,i}(t), & \text{if } X_{c,j}(t) > X_{c,i}(t), \\ X_{c,i}(t) - X_{c,j}(t), & \text{if } X_{c,i}(t) > X_{c,j}(t). \end{cases} \quad (21)$$

MOJS 模拟了生物的选择与进化过程,利用个体间不同目标的支配关系进行排序和淘汰,最终实现对帕累托前沿的逼近^[27]。帕累托支配关系的基本规则是解集对某个目标函数的优化不能使另一目标变差,其表达式为

$$(\forall i) f_i(X_A) \leq f_i(X_B) \wedge (\exists j) f_j(X_A) < f_j(X_B), \quad (22)$$

式中: f_i 表示为目标函数; X_A 和 X_B 为满足约束的任意 2 个解。从式(22)可以得出 X_A 的目标值均小于等于 X_B 的目标值,则可以说明 X_A 相对于 X_B 来说是更优的解,即 X_A 支配 X_B 。此时,若不存在任何的其他解支配 X_A ,则 X_A 就是帕累托最优解,其他如同 X_A 的解组成了最优帕累托解集。在进行支配关系的排序过程中,为了防止解集均过度集中在某一区域,在优化算法中通常引入拥挤度这一指标。每个个体的拥挤度在数值上等于归一化后帕累托前沿中该个体两侧 2 个个体的目标函数之差的和的大小,假设个体为 p 的拥挤度 d 为

$$d_p = \sum_{s=1}^2 \frac{|f_{p+1} - f_{p-1}|}{\max\{f_1, f_2, \dots, f_i\} - \min\{f_1, f_2, \dots, f_i\}}, \quad (23)$$

式中, f_{p+1} 和 f_{p-1} 为个体 p 两侧的个体对应的目标函数值。所得解集的个体可以根据拥挤度大小进行排序,即个体拥挤度大比拥挤度小的次序更靠前;也可根据支配关系进行排序,即比被支配数小的个体比被支配数大的个体靠前。

2.2.2 多目标水母优化算法寻优策略的改进

水母的3种运动方式影响着最终的寻优结果,对MOJS使用到的简单策略进行改进能够提升算法的性能。在随洋流运动和A型运动中,水母的位置跳跃被描述为均匀步长状态的Lévy飞行,缺乏在寻优过程中的适应性和全局搜索能力,在2种运动中加入自适应算子 T :

$$T = \exp\left(-\frac{t-1}{T_{\max iter}}\right), \quad (24)$$

$$X_i(t+1) = X_{e,i}(t) + T \times \left(X_b(t) - 3 \times \text{rand}(0, 1) \times \frac{\sum X_c}{n_{\text{pop}}}\right) \times S, \quad (25)$$

$$X_i(t+1) = X_b(t) + T \times (X_{e,i}(t) - X_b(t)) \times S_o. \quad (26)$$

式(25)和式(26)分别表示改进后水母跟随洋流和A型运动的位置变化; $\sum X_c$ 为精英种群的集合; v, u 为正态分布; $T_{\max iter}$ 为最大迭代时间。将鲸鱼算法中的座头鲸螺旋气泡网捕食思想融入B型运动中^[28]:

$$\varphi = (-t/T_{\max iter} - 2) \times \text{rand}(0, 1) + 1, \quad (27)$$

$$X_i(t+1) = X_b(t) + e^{\theta \times \varphi} \times \cos(2\pi\varphi) \times \overrightarrow{\text{step}},$$

$$\overrightarrow{\text{step}} = \begin{cases} X_{e,j}(t) - X_{e,i}(t), & \text{if } X_{e,i}(t) > X_{e,j}(t), \\ X_{e,i}(t) - X_{e,j}(t), & \text{if } X_{e,j}(t) > X_{e,i}(t). \end{cases} \quad (28)$$

式中: θ 为螺旋线形状参数; φ 为根据水母种群当前迭代时间构造的随机量;对于MOJS使用的反向学习策略加入正弦混沌初始化和动态思想,增强反向解的随机性,有效提升解的适应能力。通过正弦混沌初始化生成正向解,再依据正向解动态生成反向解,为

$$X_{i+1}(t) = \delta^8 1 \left(+8\delta \sin(\pi X_i(t)) \right)^\beta \bmod 1, \quad i \in [1, \dots, n_{\text{pop}}/2]; \quad (29)$$

$$X_i'(t) = X_i(t) + r \times (r \times (B_U + B_L - X_i(t)) - X_i(t)), \quad i \in [n_{\text{pop}}/2 + 1, \dots, n_{\text{pop}}], \quad (30)$$

式中: δ, β 为系统调节系数; \bmod 为取余操作; r 为 $\text{rand}(0, 1)$; B_U, B_L 为上下限范围;正反解合并形成新种群 $\{X_i(t) \cup X_i'(t)\}$ 。改进后的水母搜索算法流程如图4所示。

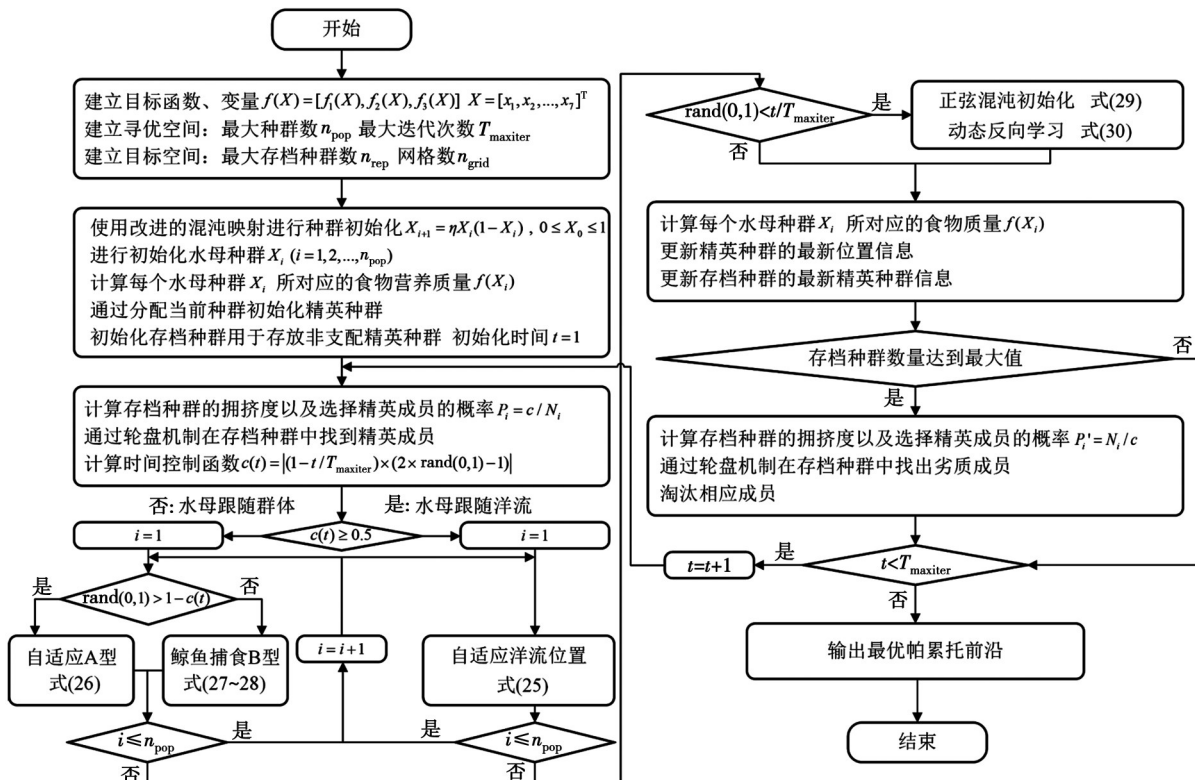


图4 改进的MOJS算法基本流程图

Fig. 4 Basic flowchart of the improved MOJS algorithm

2.2.3 改进算法的测试评价和优化结果

为评估算法改进后的综合性能,通常使用以下 4 种指标对优化后的解集质量进行检验:1)反向世代距离指标(inverted generational distance,IGD),IGD 指标越小,优化解集的分布性和收敛性越好;2)世代距离指标(generational distance,GD),GD 指标越小,优化解集性能越好;3)超体积指标(hypervolume,HV),HV 指标越大表示收敛性和多样性的方面更加接近真实帕累托前沿;4)空间指标(spacing indicator,SP),SP 指标值越小表示该解集在目标空间中有着越均匀的分布,质量越好。

MOJS 已被证明相对于 MOPSO 和 NSGAI 拥有更好的性能^[26],因此仅对比改进前后的 MOJS 在测试函数 ZDT1~ZDT6 中的表现。为保证测试的公平性,在测试开始前两者的种群规模均为 100,存档种群数量为 100,迭代次数为 200,网格数量为 20,测试函数的设置均相同。同时为避免结果偶然性,对于 2 种算法均独立运行 30 次,分别取 4 个评价指标的平均值(mean)和标准差(std)的结果如表 9 所示。

表 9 改进 MOJS 和原始 MOJS 的 4 种评价指标比较
Table 9 Comparison of four evaluation indicators between improved MOJS and original MOJS

算法	指标	统计值	ZDT1	ZDT2	ZDT3	ZDT4	ZDT6
改进的 MOJS	IGD	Mean	0.006 720	0.004 955	0.019 750	0.004 789	0.264 500
		Std	0.004 920	0.000 463	0.015 690	0.000 753	0.753 600
	GD	Mean	0.000 402	0.000 143	0.001 293	0.000 139	0.196 000
		Std	0.000 530	0.000 059	0.001 431	0.000 100	0.105 400
	HV	Mean	0.716 600	0.443 900	0.597 600	0.719 300	0.316 100
		Std	0.006 355	0.000 573	0.013 370	0.000 884	0.100 300
	SP	Mean	0.008 911	0.007 572	0.013 140	0.007 564	0.030 910
		Std	0.002 031	0.001 028	0.005 103	0.000 866	0.066 170
原始的 MOJS	IGD	Mean	0.091 410	0.128 700	0.147 600	0.216 200	3.595 000
		Std	0.095 340	0.189 000	0.085 030	0.210 200	1.952 000
	GD	Mean	0.009 724	0.013 760	0.012 600	0.022 460	0.459 400
		Std	0.012 260	0.017 640	0.008 821	0.022 680	0.158 000
	HV	Mean	0.602 500	0.327 800	0.538 500	0.485 300	0.040 160
		Std	0.124 100	0.146 700	0.063 110	0.203 400	0.109 100
	SP	Mean	0.015 680	0.014 180	0.018 410	0.008 695	0.064 190
		Std	0.006 775	0.008 202	0.012 280	0.001 605	0.078 530

由表 9 可以得出,改进后的 MOJS 在各个性能指标中均有比较好的优势,部分指标甚至下降了一个数量级。与此同时,为检验改进的 MOJS 在涉及多个整数解集的动力总成优化问题中也能有出色的表现,采用改进后的 MOJS 和多目标遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithms,NSGAI)^[29]、多目标粒子群算法(multiple objective particle swarm optimization,MOPSO)^[30]和原始 MOJS 进行优化对比。

为保证公平性,根据前文所提到的所有模型和算法均在 MATLAB R2021a 软件中运行,所用的个人电脑携带 Windows 10 操作系统,其处理器为 Intel(R)Core(TM) i5-7500 CPU @ 3.40 GHz,内存为 16.0 GB。4 种算法种群规模设置为 100,最大迭代次数为 200,其中 MOPSO 和 NSGAI 的设置均使用标准版本。在多次的测试下,改进后的 MOJS 均表现出存在部分解集可支配其他算法所得解集的情况。改进后的 MOJS 优化结果归一化后如图 5(a)所示,与 MOPSO、NSGAI、MOJS 的优化结果对比如图 5(b)所示。

根据算法流程和生产要求,从 3 种客户需求工况的多目标优化结果中选择一组动力总成参数进行仿真验证和性能比较,选择参数如表 10 所示。

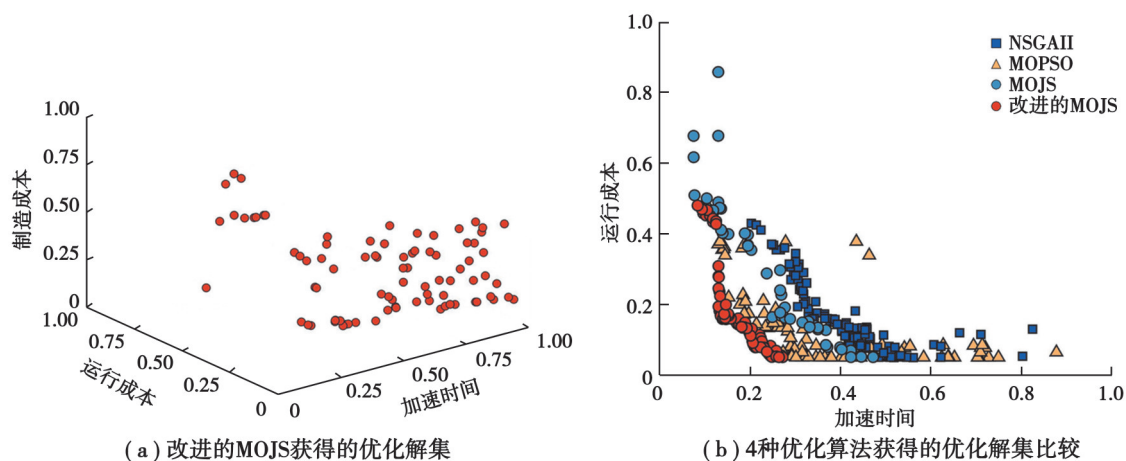


图5 算法优化结果

Fig. 5 Algorithm optimization results

表10 优化后的动力系统各部分参数

Table 10 Optimized parameters of each part of the powertrain

状态	需求	Z_a	Z_c	Z_5	Z_6	m_1	m_2	b_1	b_2	P_{\max}	i_1	i_2	i_g
优化前	未区分需求	22	19	57	48	6.5	6.0	55.000	50.000	180	3.139	0.842	22.547
	客户1	38	24	46	41	5.5	5.0	43.092	40.926	180	2.906	0.891	22.547
优化后	客户2	29	18	42	38	6.0	5.0	47.511	35.563	180	2.933	0.904	22.547
	客户3	35	24	38	33	5.5	5.5	44.914	39.364	180	2.929	0.865	22.547

3 仿真验证与讨论

基于笔者之前研究^[31]中建立的工程机械协作系统仿真模型,建立了如图6所示的电动装载机 Simulink 仿真模型用于验证优化结果。

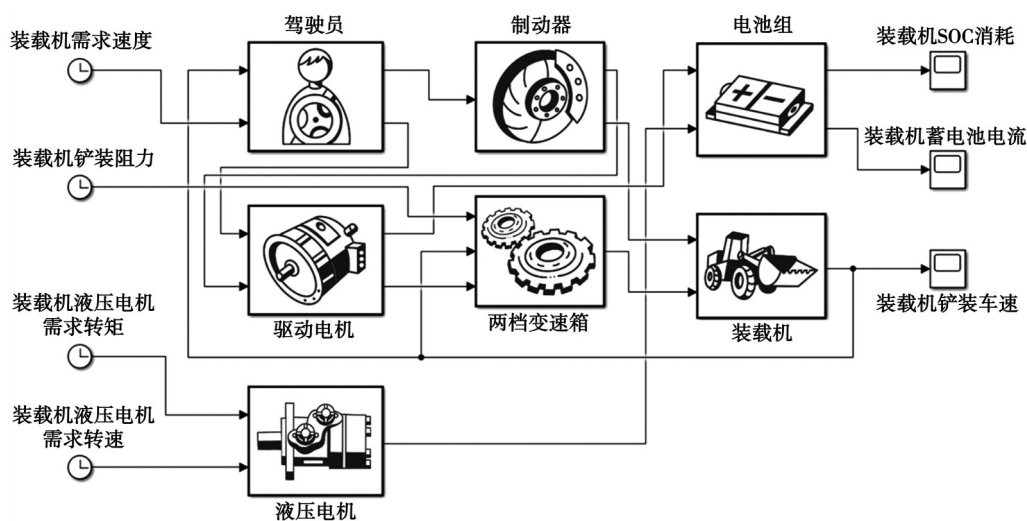


图6 电动装载机仿真模型

Fig. 6 Electric loader simulation model

优化前后的纯电动装载机在3种客户需求工况中电池SOC消耗比较结果如图7(a)(c)(e)所示,最高需求比例工况的电机工作点分布如图7(b)(d)(f)所示。在60 s的工作循环下,优化后的能耗降低约0.03、0.025、0.022 kW·h,电机工作效率提升了约0.214%、0.190%、0.150%。仿真结果充分说明了在选择相同电机和驱动桥主减速器速比的情况下,变速箱速比影响着工况点在电机效率图中的分布,优化速比在提高能效方面具有成效。

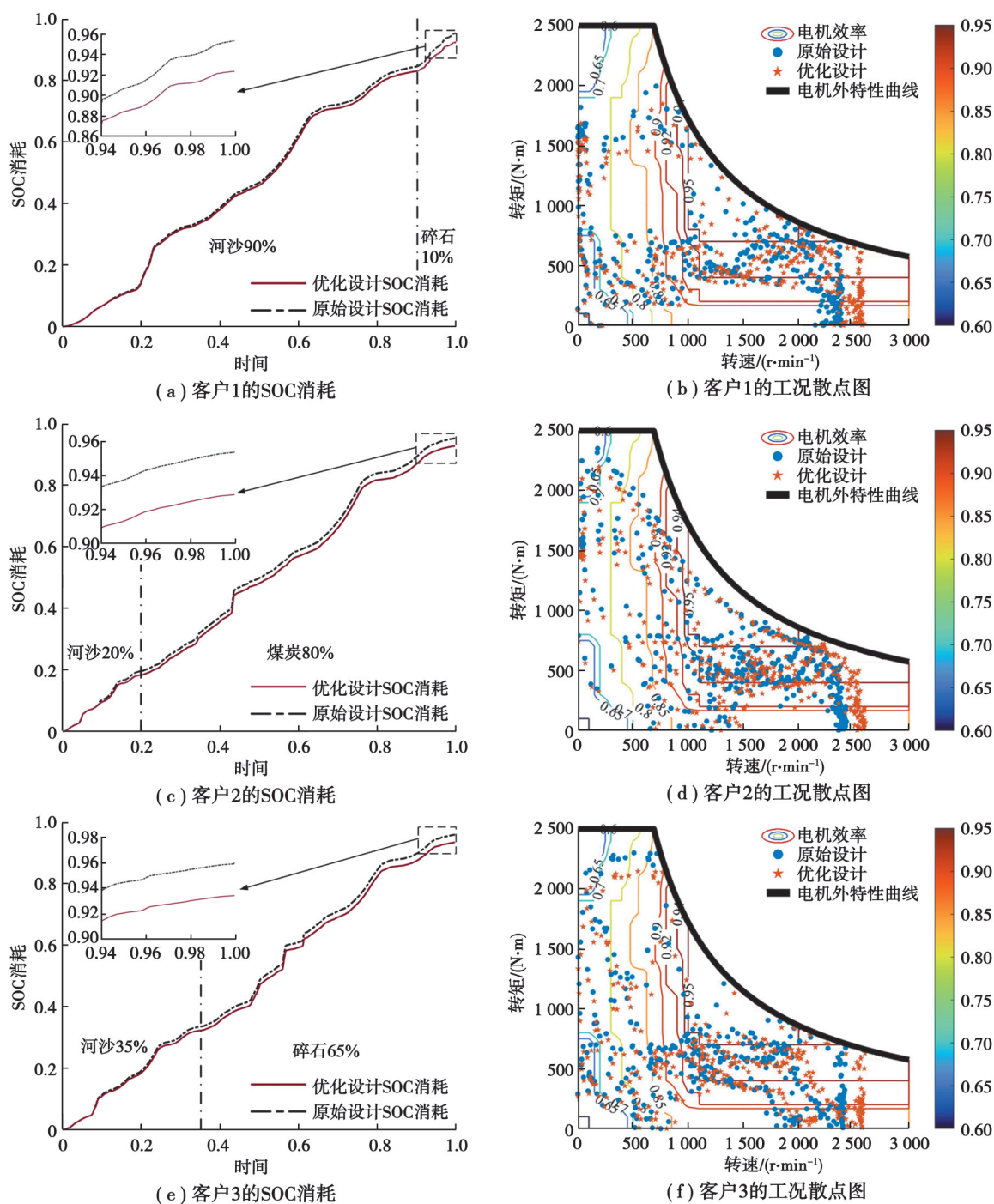


图7 SOC消耗和电机工作点分布图

Fig. 7 SOC consumption and motor operating point distribution map

电池的健康状态(state of health, SOH)是影响后期使用过程中维护成本的关键因素,因此,优化后的动力总成应确保各特定客户需求工况下的电池寿命得到改善。根据实验数据的电池衰减经验公式^[32-33]为

$$Q_{\text{loss}} = A_q \exp\left(-\frac{E_a + B_q C_r}{RT}\right) A_h \approx 0.0032 \exp\left(-\frac{15162 - 1516 C_r}{RT}\right) (N_{cy} \times D \times Q_c)^{0.824} \quad (31)$$

式中: Q_{loss} 为电池容量损失, %; R 为气体摩尔常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; C_r 为放电倍率; T 为环境温度, K ; Q_c 为电池容量, $\text{A} \cdot \text{h}$; D 为放电深度; N_{cy} 为放电循环次数。

优化前后动力总成性能比较如图8所示。从图8(a)~(d)可以看出, 优化后的动力总成电池容量寿命提升约2.275%、1.723%、1.965%; 整车动力总成的制造费用分别降低3.129%、5.043%、3.946%; 最高车速加速时间分别减少1.798、2.231、1.006 s; 变速箱相邻档位比值分别降低12.50%、12.983%、9.170%, 在一定程度上降低了换挡冲击性。由此可见, 在固定的场合使用定制化设计的动力总成对制造商和客户来说可以达到性能提升、降低成本的效果。

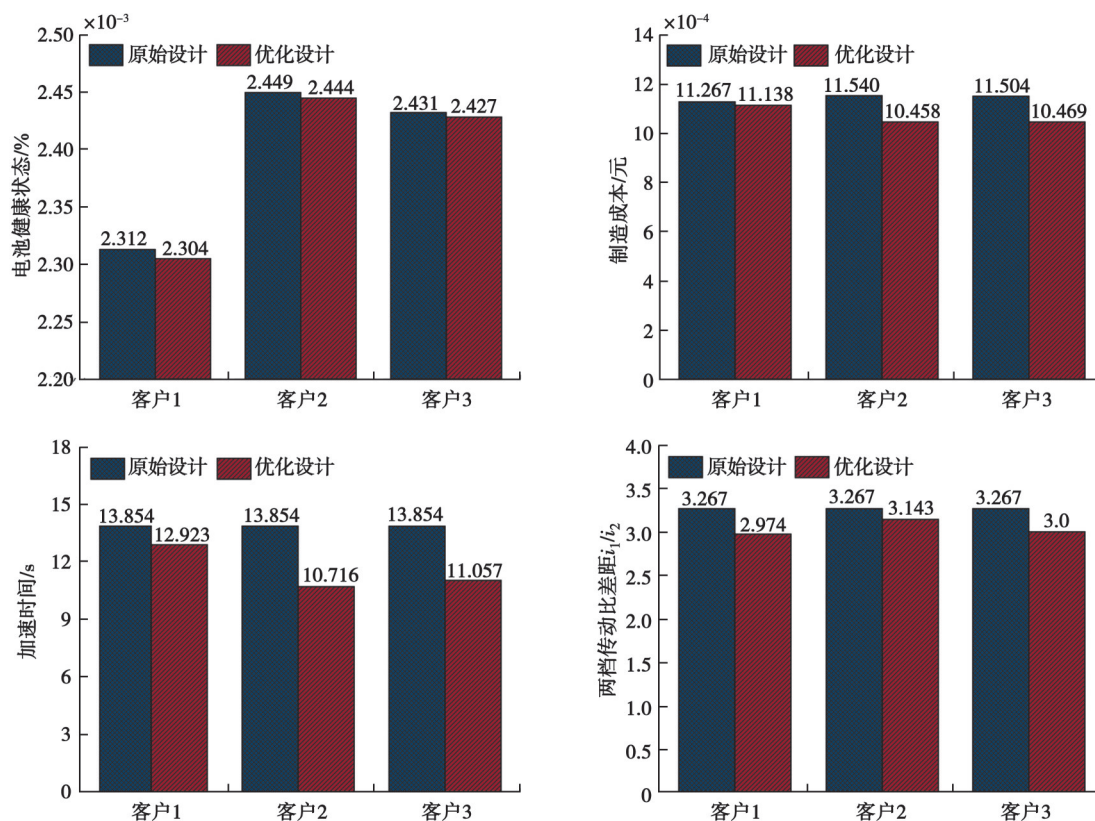


图8 优化前后动力总成性能比较图

Fig. 8 Comparison of powertrain performance before and after optimization

4 结束语

文中提出一种计及制造成本的电动工程机械动力总成优化设计方法, 以纯电动轮式装载机作为应用对象, 结合客户的优化需求和制造商生产能力采用模糊 TOPSIS 法选择优化定制部件, 以某制造商生产的一款双电机 5 t 纯电动轮式装载机为研究对象, 分析其动力总成工作原理, 以变速箱齿轮齿数、模数、齿宽、多款电机参数和多款驱动桥速比为设计变量, 考虑装载机转场需求的动力性能、特定客户需求工况的运行成本和狭义制造成本为优化目标, 使用改进的多目标水母搜索算法对优化模型进行求解, 得到定制化动力总成最优参数解集和多种满足约束的设计方案。

通过测试和仿真结果表明, 改进后的水母搜索多目标优化算法在处理动力总成的优化问题上更有优势, 优化后的动力总成在一定程度上提升了动力性能和经济效益, 整车动力系统的制造费用分别降低 3.129%、5.043%、3.946%; 最高车速加速时间分别减少 1.798、2.231、1.006 s; 变速箱相邻档位比值分别降低 12.50%、12.983%、9.170%, 在一定程度上降低了换挡冲击性。

由于影响成本的因素较多,文中对动力总成的主要组成部件进行了成本分析,未考虑变速箱涉及的其他部件,如端盖、轴承、轴等。在未来将考虑更多的部件成本和面向全生命周期的产品研发创新,进一步提升制造商和客户的双边效益。

参考文献

- [1] Mallapaty S. How China could be carbon neutral by mid-century[J]. *Nature*, 2020, 586(7830): 482-483.
- [2] 莫艳芳. 纯电动装载机动力传动系统设计与开发[J]. *工程机械*, 2022, 53(3): 83-86, 11-12.
Mo Y F. Design and development of drive system of pure electric loader[J]. *Construction Machinery and Equipment*, 2022, 53(3): 83-86, 11-12. (in Chinese)
- [3] Noel L, Zarazua de Rubens G, Sovacool B K, et al. Fear and loathing of electric vehicles: The reactionary rhetoric of range anxiety[J]. *Energy Research & Social Science*, 2019, 48: 96-107.
- [4] Cano Z P, Banham D, Ye S Y, et al. Batteries and fuel cells for emerging electric vehicle markets[J]. *Nature Energy*, 2018, 3(4): 279-289.
- [5] Yi S X, Yang Z J, Zhou L Q, et al. Power system parameter matching and particle swarm optimization of battery underground loader[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2021, 13(10): 1-15.
- [6] 王少杰, 侯亮, 方奕凯, 等. 考虑产品运行大数据的装载机变速箱优化设计[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(22): 218-232.
Wang S J, Hou L, Fang Y K, et al. Optimization design of wheel loader gearbox considering product operational big data[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(22): 218-232. (in Chinese)
- [7] Da Silva S F, Eckert J J, Silva F L, et al. Multi-objective optimization design and control of plug-in hybrid electric vehicle powertrain for minimization of energy consumption, exhaust emissions and battery degradation[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 234: 113909.
- [8] Eckert J J, Santicioli F M, Silva L C A, et al. Vehicle drivetrain design multi-objective optimization[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2021, 156: 104123.
- [9] Nezhadali V, Eriksson L, Fröberg A. Modeling and optimal control of a wheel loader in the lift-transport section of the short loading cycle[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2013, 46(21): 195-200.
- [10] Nezhadali V, Eriksson L. Wheel loader optimal transients in the short loading cycle[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2014, 47(3): 7917-7922.
- [11] Wang S, Hou L, Lee J, et al. Evaluating wheel loader operating conditions based on radar chart[J]. *Automation in Construction*, 2017, 84: 42-49.
- [12] Xiao L S, Liu W L, Guo Q H, et al. Comparative life cycle assessment of manufactured and remanufactured loading machines in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 131: 225-234.
- [13] Tong Z M, Miao J Z, Li Y S, et al. Development of electric construction machinery in China: a review of key technologies and future directions[J]. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 2021, 22(4): 245-264.
- [14] Chen X K, Wang C Y, Shi G B, et al. Multidisciplinary design optimization of vehicle chassis product family[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2022, 236(5): 498-508.
- [15] Galizia F G, ElMaraghy H, Bortolini M, et al. Product platforms design, selection and customisation in high-variety manufacturing[J]. *International Journal of Production Research*, 2020, 58(3): 893-911.
- [16] Jalali H, Van den Broeke M, Van Nieuwenhuyse I. Platform and product design for markets with quality and feature sensitive customers[J]. *International Journal of Production Economics*, 2022, 244: 108354.
- [17] Lu Y J, Wang W, Zhang K, et al. Studying on the design of automobile constant velocity universal joint based on mass customization[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 122(1): 11-25.
- [18] Zhang W, Wang S J, Hou L, et al. Operating data-driven inverse design optimization for product usage personalization with an application to wheel loaders[J]. *Journal of Industrial Information Integration*, 2021, 23: 100212.
- [19] Lin T L, Lin Y Z, Ren H L, et al. Development and key technologies of pure electric construction machinery[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 132: 110080.
- [20] 焦玉民, 张琦, 王强. 基于模糊层次分析法的工程机械质量评价[J]. *中国工程机械学报*, 2010, 8(4): 489-494.
Jiao Y M, Zhang Q, Wang Q. Quality evaluation for construction machinery using fuzzy analytic hierarchy process[J].

- Chinese Journal of Construction Machinery, 2010, 8(4): 489-494. (in Chinese)
- [21] 石旭东, 成博源, 黄琨, 等. 基于模糊 TOPSIS-FMEA 的飞机 IDG 风险评价[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(6): 2060-2064.
- Shi X D, Cheng B Y, Huang K, et al. Risk assessment of aircraft IDG based on fuzzy TOPSIS-FMEA[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(6): 2060-2064. (in Chinese)
- [22] 刘卫红. 如何降低齿轮箱制造成本[J]. 江苏冶金, 2003(1): 59-60.
- Liu W H. How to reduce the manufacturing cost of gearbox[J]. Jiangsu Metallurgy, 2003(1): 59-60. (in Chinese)
- [23] 杨玉巍, 马雅丽. 基于产品结构树的减速器快速成本估算及报价[J]. 机械设计与制造, 2010(5): 63-65.
- Yang Y W, Ma Y L. Rapid cost estimation and quotation of gearbox based on the product structure tree[J]. Machinery Design & Manufacture, 2010(5): 63-65. (in Chinese)
- [24] Markel T. Plug-in HEVs: a near-term option to re-duce petroleum consumption from FY05 milestone[R]. National Renewable Energy Laboratory January 19, 2006.
- [25] 国家质量监督检验检疫总局 中国国家标准化管理委员会. 行星齿轮传动设计方法: GB/T 33923—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Design methods for planetary gear drives: GB/T 33923—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)
- [26] Chou J S, Truong D N. Multiobjective optimization inspired by behavior of jellyfish for solving structural design problems[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2020, 135: 109738.
- [27] 王丽萍, 任宇, 邱启仓, 等. 多目标进化算法性能评价指标研究综述[J]. 计算机学报, 2021, 44(8): 1590-1619.
- Wang L P, Ren Y, Qiu Q C, et al. Survey on performance indicators for multi-objective evolutionary algorithms[J]. Chinese Journal of Computers, 2021, 44(8): 1590-1619. (in Chinese)
- [28] Mirjalili S, Lewis A. The whale optimization algorithm[J]. Advances in Engineering Software, 2016, 95: 51-67.
- [29] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [30] Coello C A, Reyes-Sierra M. Multi-objective particle swarm optimizers: a survey of the state-of-the-art[J]. International Journal of Computational Intelligence Research, 2006, 2(3): 287-308.
- [31] Huang X H, Huang Q, Cao H J, et al. Optimal design for improving operation performance of electric construction machinery collaborative system: Method and application[J]. Energy, 2023, 263: 125629.
- [32] Wang J, Liu P, Hicks-Garner J, et al. Cycle-life model for graphite-LiFePO₄ cells[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(8): 3942-3948.
- [33] Akar F, Tavlasoglu Y, Vural B. An energy management strategy for a concept battery/ultracapacitor electric vehicle with improved battery life[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2017, 3(1): 191-200.

(编辑 詹燕平)