



## 混合动力装载机复合储能系统 $6\sigma$ 稳健设计

刘振博, 林慕义, 白宇, 成恺

引用本文:

刘振博, 林慕义, 白宇, 成恺. 混合动力装载机复合储能系统  $6\sigma$  稳健设计[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2024, 38(5): 187-194.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

### 效率最优的混合动力客车控制策略研究

Research on Control Strategy of Hybrid Electric Bus Based on Optimal Efficiency

重庆理工大学学报(自然科学). 2021, 35(9): 42-49 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2021.09.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2021.09.006)

### 混合动力城郊物流车模糊逻辑能量管理策略研究

Research on Fuzzy Logic Energy Management Strategy of Hybrid Electric Suburban Logistics Vehicle

重庆理工大学学报(自然科学). 2021, 35(12): 10-17 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2021.12.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2021.12.002)

### 应用免疫粒子群算法的电动汽车经济性换挡策略研究

Research on Economic Shift Schedule of Electric Vehicle with Immune Particle Swarm Optimization Algorithm

重庆理工大学学报(自然科学). 2021, 35(1): 67-74,144 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2021.01.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2021.01.009)

### 基于Q学习的纯电动重型商用车智能换挡控制策略研究

Study on Intelligent Shift Control Strategy for Pure Electric Heavy Commercial Vehicle Based on Q Learning

重庆理工大学学报(自然科学). 2021, 35(9): 73-82 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2021.09.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2021.09.010)

### 基于HyperWorks的混合动力环卫车副车架有限元分析及轻量化设计

Finite Element Analysis and Lightweight Design of Sub-frame of Hybrid Electric Sanitation Vehicle Based on HyperWorks

重庆理工大学学报(自然科学). 2021, 35(10): 9-15 [https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2021.10.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2021.10.002)

# 混合动力装载机复合储能系统 $6\sigma$ 稳健设计

刘振博<sup>1</sup>,林慕义<sup>1,2</sup>,白宇<sup>1</sup>,成恺<sup>1</sup>

(1. 北京信息科技大学 机电工程学院, 北京 100192;

2. 北京电动车辆协同创新中心, 北京 100192)

**摘要:**复合储能式混合动力装载机可以降低车辆燃油消耗,实现能量高效回收,但由于系统组成较为复杂、装载机工作环境恶劣且存在较多不确定性因素,使得整车运行的经济性无法达到最佳状态。为此,采用 $6\sigma$ 稳健优化设计理论,对影响复合储能系统性能的参数进行优化设计,得到可靠性较高的优化参数;在4种常见工况下通过装载机的整车后向仿真模型对 $6\sigma$ 算法的优化结果进行验证,发现整车燃油消耗量明显下降,4种工况的平均节油率分别为11.14%、10.30%、10.40%、11.38%;利用dSPACE硬件在环的试验方式验证了仿真结果与试验结果基本一致,误差在0.5 g内,证明 $6\sigma$ 优化效果切实有效。

**关键词:**  $6\sigma$ 理论;稳健设计;动态工况;复合储能

**中图分类号:** TH137

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-8425(2024)05-0187-08

## 0 引言

工程车辆在国家建设中有着重要作用,主要工作在采矿、道路桥梁建设、海港等领域<sup>[1]</sup>。工程车辆工作环境复杂,作业时所需输出功率较大,要实现纯电动零排放的目标短期内仍是难题。但是,对于大型工程车辆进行混合动力技术运用是可实现的,因此如何在不损失工程车辆动力的前提下提升工程车辆整体经济性能成为高质量发展的重要一步。

Ness Capacitor公司开发了一种将铅酸电池和超级电容组合构成的复合储能系统,该系统在车辆加速过程中能够提供更大的输出功率,在车辆进行制动的情况下能够高效地将制动能量回收回到电池中<sup>[2]</sup>。Hosseini等<sup>[3]</sup>提出了一种由电池组和超级电容器组组成的混合动力系统,采用遗传算法优化的模糊推理规则定义电源之间的电源管理控制,提高了电动汽车的续航里程和行驶性能。曹海歧等<sup>[4]</sup>利用协同优化的理论优化设计复合储能系统,提高了系统运行的协同性,

有效降低了车辆的燃油消耗量。徐大雨等<sup>[5]</sup>利用田口法稳健设计的方法,设计出系统波动参数最稳定的优化方案,优化后整车的节油率达到18%以上。但是,上述优化研究都是在理想情况下进行的,并没有考虑现实工作条件下可能存在的不确定因素对装载机复合储能系统的影响。

本文中通过对复合储能式装载机各系统进行 $6\sigma$ 稳健设计,优化不确定因素带来的影响,在保证系统工作具有最佳性能的同时使系统在各种工作环境下也拥有较高可靠性,提高复合储能系统的可靠度,并利用dSPACE硬件在环实验验证了 $6\sigma$ 优化效果的优越性。

## 1 $6\sigma$ 稳健设计理论

### 1.1 $6\sigma$ 设计优化原理

$6\sigma$ 优化原理如图1所示。在优化过程中,首先根据确定性优化模型得到确定性最优解A,在这个确定性最优解位置,如果发生波动 $\Delta F_A$ ,可能导致对应的响应增量超出约束

收稿日期: 2023-12-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51275053)

作者简介: 刘振博,男,博士,实验师,主要从事液力混合动力车辆控制、优化研究,E-mail:lzb@bistu.edu.cn;通信作者 林慕义,男,博士,教授,主要从事液力控制技术 & 优化研究,E-mail:285975833@qq.com。

本文引用格式: 刘振博,林慕义,白宇,等. 混合动力装载机复合储能系统 $6\sigma$ 稳健设计[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2024,38(5):187-194.

Citation format: LIU Zhenbo, LIN MUYI, BAI Yu, et al. Hybrid loader hybrid energy storage system 6 sigma robust design[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science),2024,38(5):187-194.

$\Delta x$  的限制,最终造成设计失败。在经过可靠性优化后得到  $B$  点可靠性最优解相对应的响应增量,相比之下波动  $\Delta F_B$  明显减少,但当前的可靠性最优解可能并不是满足产品要求质量水平的最优解,需要进一步优化得到一个更稳健、更可靠的稳健最优点  $C$ ,其相对响应增量  $\Delta F_C$  与前两点相比急剧减少,相对均值也是最优,满足平均性能最优和波动最低的优化目标<sup>[6]</sup>。

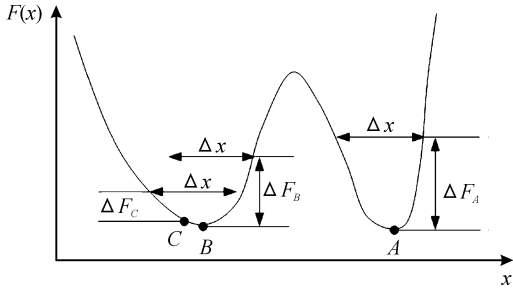


图1 6σ优化原理示意图

### 1.2 6σ多目标优化策略

在实际工程中,往往期望目标不止一种,而是期望各种性能指标能够同时达到最优,因此就需要求解多目标优化问题<sup>[7]</sup>。对于多目标优化来说,需要定义多目标优化中的相关最优解概念。在6σ稳健优化设计的基础上,将所设计的变量参数、优化目标函数和相关约束条件都包括在内,使优化目标函数不会因变量参数的波动而出现明显的敏感和误差<sup>[8]</sup>。

6σ设计的数学模型为:

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^M f_m(x_i), & m = 1, 2, \dots, M \\ \text{s. t. } g_j(x_i) \geq 0, & j = 1, 2, \dots, j \\ h_k(x_i) = 0, & k = 1, 2, \dots, K \\ x_{L,i} \leq x_i \leq x_{U,i}, & i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (1)$$

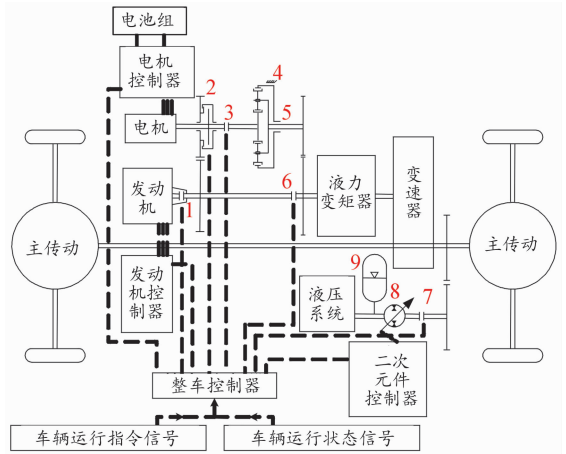
式中:  $M$  为优化目标函数总个数;  $f_m$  为第  $m$  个优化目标函数;  $g_j(x_i)$  为第  $j$  个不等式约束;  $h_k(x_i)$  为第  $k$  个等式约束。

## 2 复合储能系统分析及仿真模型建立

### 2.1 系统结构分析

复合储能系统结构主要包括3个动力系统:装载机发动机动力系统、电池电机电力系统和液压蓄能器动力系统,3个系统分别进行各自的动力及能源输出,如图2所示。

动力输出路线:一部分由电机和发动机两者进行动力输出,先通过电磁离合器将输出动能进行耦合,再通过行星齿轮锁止机构和液力变矩器等元件将动能输出到装载机的传动系统中;另一部分的液压系统中,能量从液压蓄能器输出,经过二次元件控制器将输出的动能输入装载机传动系统中配合其他2个动力系统一同为装载机提供所需动力。



1,3,6,7 - 电磁离合器; 2,5 - 行星齿轮离合器;  
4 - 锁止机构; 8 - 二次元件; 9 - 蓄能器

图2 复合储能系统结构

### 2.2 装载机常用工况分析

“I”型作业工况:装载机正对装载物料进行直线往复行驶,运输车的行驶轨迹与物料和装载机相垂直。

“L”型作业工况:运输车停靠在装载机前方且两车呈垂直状态,物料在两车上方,三者形成三角形状态。

“T”型作业工况:物料与运输车在一条直线上并呈平行状态,装载机在两者之间进行装卸。

“V”型作业工况:物料在装载机正前方,运输车停靠在装载机的斜前方<sup>[9]</sup>。

4种作业工况如图3所示。

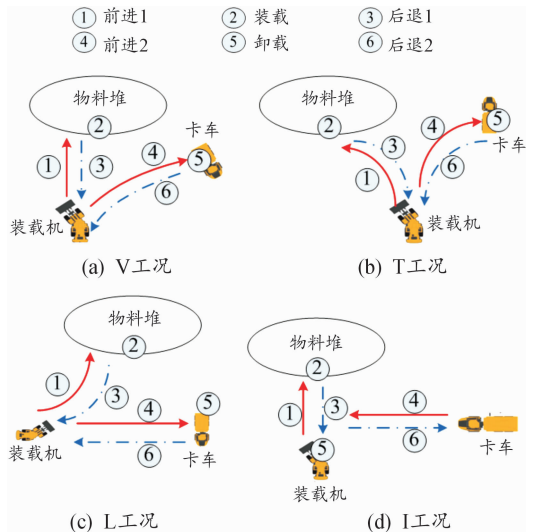


图3 4种作业工况示意图

### 2.3 复合储能式混合动力装载机仿真模型

根据复合储能式混合动力装载机各个单元模块的数学模型搭建仿真模型,并将各个模块封装组合。通过 Matlab/Simulink 搭建研究所需的装载机整车后向仿真模型,如图4所示。

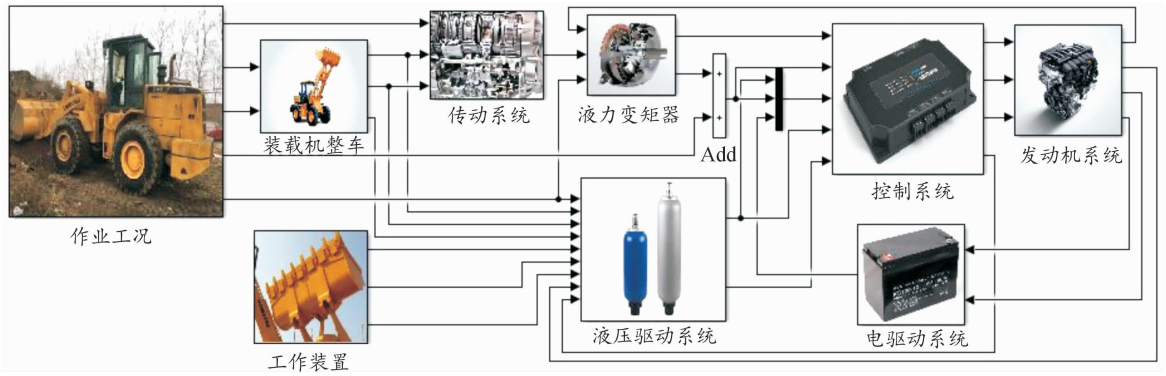


图4 整车后向仿真模型示意图

### 3 复合储能系统6σ 稳健优化设计

#### 3.1 6σ 稳健优化设计流程

将6σ 多目标稳健优化设计与相关的多目标优化算法组合进行优化设计,致力于设计目标函数在满足可靠度要求的前提下无限接近目标最优值,同时不会受相关随机变量的波动而产生较大误差,具体优化设计流程如图5所示。

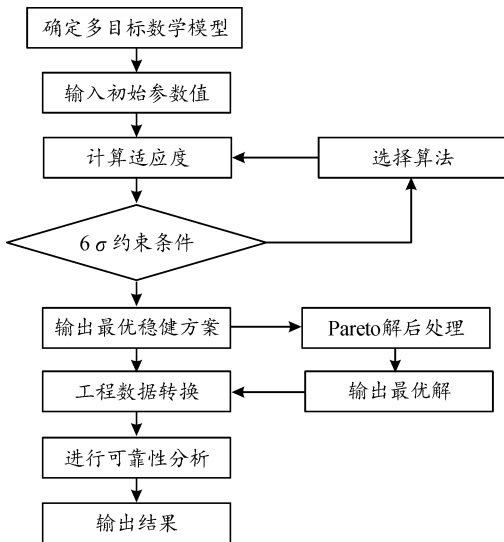


图5 6σ 稳健优化设计流程

#### 3.2 各子系统优化参数设计

##### 3.2.1 建立各子系统优化目标函数

由于复合储能系统主要由传动系统、液压驱动系统和电池电机系统组成,因此需要对3个子系统分别进行优化设计。

对于传动系统来说,作为整车系统最重要的动力来源,它的优化目标是实现装载机工作过程中有更好的动力输出。因此,系统优化的目标函数为最大驱动力与实际装载机所需驱动力之差的绝对值,使两者之差的绝对值最小,保证整车的动力性,表达式为

$$\min F(x) = \left| [f(k)] - \frac{M_T \prod_i \prod_{\eta}}{r_d} \right| = \left| [f(k)] - \frac{M_T i_0 i_{g1} i_{t1} \eta_g \eta_l}{r_d} \left| \frac{\delta y}{\delta x} \right| \right| \quad (2)$$

式中: $f(k)$ 为优化目标最大驱动力; $M_T$ 为装载机液力变矩器转矩; $i_0$ 为装载机主减速器传动比; $\eta_g$ 为发动机传动系统效率; $\eta_l$ 为装载机液力变矩器效率; $r_d$ 为车轮半径。

液压驱动系统的能量回收性能是评价系统性能的重要标准,因此将液压驱动制动能量回收系统优化中建立的目标函数作为能量的回收效率。而在优化过程中,目标函数一般都是求函数的最小值,故在建立的能量回收效率公式的基础上,优化的目标函数为能量回收效率的倒数,通过计算目标函数的最小值来得到能量回收效率的最大值,如式(3)所示。

$$\min f(\varepsilon) = \frac{m(v_2^2 - v_1^2)/2}{p_1 V_1^n (V_2^{1-n} - V_1^{1-n})/(n-1)} \quad (3)$$

式中: $v_1$ 为装载机行驶的初速度; $v_2$ 为装载机行驶的末速度; $V_1$ 为装载机液压蓄能器的最低气体体积; $V_2$ 为装载机液压蓄能器的最高气体体积; $p_1$ 为装载机液压蓄能器的最低工作压力; $n$ 为气体多变指数。

装载机的电池电机系统中,电机转矩的输出对装载机的动力性有较大影响。为使装载机拥有良好的动力性,将电机的最大额定输出转矩作为该系统的优化目标,依然取电机最大额定转矩的倒数作为优化目标函数,以此来优化求解电机的最大额定功率,见式(4)。

$$\min f(T_b) = \frac{1}{9.550 P_b n_b} \quad (4)$$

式中: $T_b$ 为装载机电机转矩; $P_b$ 为装载机电机功率; $n_b$ 为装载机电机转速。

##### 3.2.2 建立约束条件

3个子系统都有各自的运行特点和相应约束,为保证优化过程是在装载机正常运行条件下进行,根据最大爬坡度、最低稳定行驶车速、最高车速、地面附着条件、液力变矩器转速以及液压蓄能器的有效容积等约束条件,计算得出相关参数变量的约束边界范围,见表1。



表1 复合储能系统参数变量边界范围

参数变量	最小值	最大值
主减速器传动比 $i_0$	4.855	5.905
变速器1挡传动比 $i_{g1}$	3.451	4.542
变速器2挡传动比 $i_{g2}$	1.675	1.786
变速器3挡传动比 $i_{g3}$	1.025	2.225
变速器4挡传动比 $i_{g4}$	0.494	1.368
液力变矩器传动比 $i_T$	0.959	1.452
轮边减速器传动比 $i_L$	3.833	4.953
液压蓄能器最低工作压力 $p_1/\text{MPa}$	11.689	17.692
液压蓄能器最高工作压力 $p_2/\text{MPa}$	23.136	29.166
液压蓄能器最低压力容积 $V_1/\text{L}$	40.355	80.375
液压蓄能器最高压力容积 $V_2/\text{L}$	70.112	119.005
驱动电机额定功率 $P_b/\text{kW}$	48.125	69.225
驱动电机额定转速 $n_b/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	1 600	2 000

### 3.3 各子系统 $6\sigma$ 稳健优化设计

参数优化分析完成后,根据设定的相关参数约束条件,优化结果可能达到目标值。但由于优化结果过于理想,未考虑不确定性因素的影响,在实际工程中很难达到理想条件,导致最终可能在应用过程中无法达到优化目标,优化参数值不是绝对可靠。因此,需要在完成参数优化的条件下进行  $6\sigma$  稳健优化,保证优化后的参数有较高的可靠性,在实际工作过程中达到优化目标<sup>[10-11]</sup>。

#### 3.3.1 确定目标函数

$6\sigma$  稳健优化函数的设立目标就是在优化参数变量的变化范围以及约束条件内,使优化目标的方差和标准差最小,从而在优化出最优解之后目标的波动变化最小,如式(5)所示。

$$\begin{aligned} \min M_1 = & [(i_T - \bar{i}_T)^2 + \sigma_{i_T}^2] + [(i_L - \bar{i}_L)^2 + \sigma_{i_L}^2] + \\ & (i_0 - \bar{i}_0)^2 + \sigma_{i_0}^2 + (i_{g1} - \bar{i}_{g1})^2 + \sigma_{i_{g1}}^2 + \\ & (i_{g2} - \bar{i}_{g2})^2 + \sigma_{i_{g2}}^2 + (i_{g3} - \bar{i}_{g3})^2 + \\ & \sigma_{i_{g3}}^2 + (i_{g4} - \bar{i}_{g4})^2 + \sigma_{i_{g4}}^2 \end{aligned} \quad (5)$$

#### 3.3.2 建立约束条件

根据参数优化分析得到的相关参数变量的约束边界范围,以初始变量参数范围为前提,增加优化参数的可靠性约束条件来提高参数变量的可靠性,即  $6\sigma$  稳健优化约束条件,如式(6)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} 4.855 + 6\sigma_{i_{g0}} &\leq i_{g0} \leq 5.905 - 6\sigma_{i_{g0}} \\ 3.451 + 6\sigma_{i_{g1}} &\leq i_{g1} \leq 4.542 - 6\sigma_{i_{g1}} \\ 1.675 + 6\sigma_{i_{g2}} &\leq i_{g2} \leq 1.786 - 6\sigma_{i_{g2}} \\ 1.025 + 6\sigma_{i_{g3}} &\leq i_{g3} \leq 2.225 - 6\sigma_{i_{g3}} \\ 0.494 + 6\sigma_{i_{g4}} &\leq i_{g4} \leq 1.368 - 6\sigma_{i_{g4}} \\ 0.959 + 6\sigma_{i_T} &\leq i_T \leq 1.452 - 6\sigma_{i_T} \\ 3.833 + 6\sigma_{i_L} &\leq i_L \leq 4.953 - 6\sigma_{i_L} \\ 11.689 + 6\sigma_{p_1} &\leq p_1 \leq 17.692 - 6\sigma_{p_1} \\ 23.136 + 6\sigma_{p_2} &\leq p_2 \leq 29.166 - 6\sigma_{p_2} \\ 40.355 + 6\sigma_{V_2} &\leq V_2 \leq 80.375 - 6\sigma_{V_2} \\ 70.112 + 6\sigma_{V_2} &\leq V_2 \leq 119.005 - 6\sigma_{V_2} \\ 48.125 + 6\sigma_{p_b} &\leq p_b \leq 69.225 - 6\sigma_{p_b} \\ 1\ 600 + 6\sigma_{n_b} &\leq n_b \leq 2\ 000 - 6\sigma_{n_b} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

## 4 基于 Isight 的复合储能系统的稳健优化及仿真分析

### 4.1 稳健优化

#### 4.1.1 搭建 $6\sigma$ 稳健优化流程

在 Isight 软件中建立 Sim-flow 工作流程时需要将  $6\sigma$  优化模块嵌套入优化算法模块中,如图6所示,从而在对各子系统  $6\sigma$  稳健优化的同时进行复合储能系统的多目标优化,经过多次的循环计算之后得出能够保证复合储能系统性能最优的各个子系统参数变量的最优值。

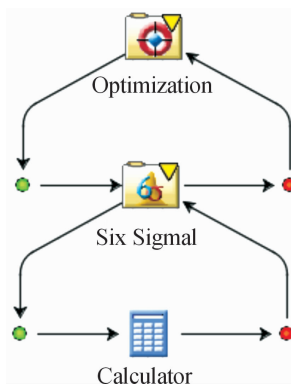


图6 Sim-flow 工作流程

将已经建立好的模型优化目标函数以及参数变量的初始值一同输入到 Calculator 计算模块中进行运算,检验目标函数等相关参数的准确性,其运算界面如图7所示。

#### 4.1.2 变量参数设置

打开  $6\sigma$  优化模块完成变量参数的范围、初始值、约束条件等的设置,选择 Optimization 优化中的 Variables 变量设置模块,将参数变量的初始值以及分析计算得出的变量参数边界值输入其中,设置界面如图8所示。

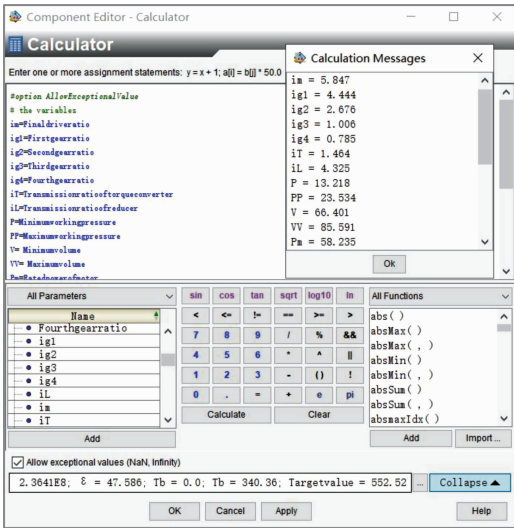


图7 Calculator 模块运算界面

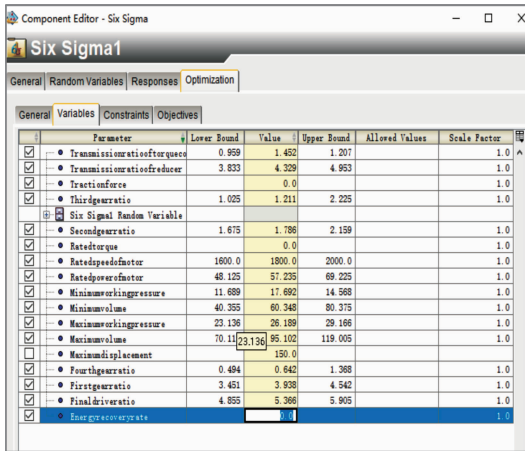


图8 参数变量设置界面

4.1.3 选择优化算法

在 Isight 软件中进行计算之前,对优化算法进行选择 and 设定。在之前分析比较中得到,6σ 模块选择的是蒙特卡洛模拟的方法,选择简单随机抽样,接着进行最大运行次数的设定。理论上讲,模拟次数越多,结果越准确,但过多会影响速度;模拟次数过少,随机数的分布就不均匀,影响模拟结果的可靠性,一般设定次数为 1 000 次<sup>[12-15]</sup>。最后,在多目标优化 Optimization 模块中选择 NSGA- II 优化算法,并对算法的参数进行设置。

4.1.4 优化计算

在完成设计流程的搭建以及相关参数的设定后,进行优化计算求解。经过 Isight 软件运行计算后,求得各子系统参数变量优化结果如表 2 所示。

由表 2 可知,优化前后各个参数变量的值均有变化,并且优化后的各参数变量的 σ 水平均达到了 6σ,有些甚至达到了 8σ,可靠度均接近 100%,达到一般工程可靠度要求,证明了稳健优化的正确和有效。

表 2 参数变量优化结果

参数变量	优化前	优化后	σ 水平	可靠度/%
$i_0$	5.366	5.335	8	100
$i_{g1}$	3.938	3.944	6	99.999
$i_{g2}$	2.159	2.182	6	99.999
$i_{g3}$	1.211	1.204	6	99.999
$i_{g4}$	0.642	0.631	6	99.999
$i_T$	1.207	1.215	8	100
$i_L$	4.329	4.342	6	99.999
$p_1/\text{MPa}$	14.568	14.687	6	99.999
$p_2/\text{MPa}$	26.189	26.144	6	99.999
$V_1/L$	60.348	60.348	8	100
$V_2/L$	95.102	95.252	8	100
$p_b/\text{kW}$	57.235	57.455	6	99.999
$n_b/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	1 800	1 856	8	100

4.2 优化结果仿真验证

将优化后参数输入已建立的装载机整车后向仿真模型中,对比分析在 4 种工况下装载系统稳健优化前后的燃油消耗量变化,仿真结果如图 9 所示。

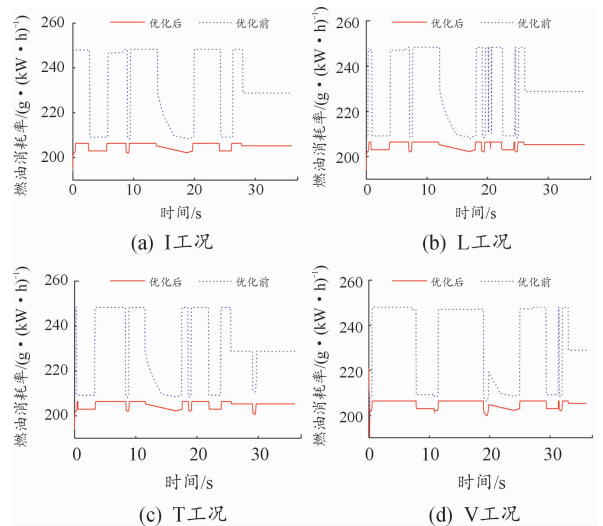


图 9 4 种工况下装载机燃油消耗量

由图 9 可知,在 4 种工况下,经过稳健设计优化后的装载机燃油消耗量有大幅度降低,优化前的燃油消耗率在 220 ~ 260 g/(kW · h) 波动,优化后的燃油消耗率在 200 ~ 210 g/(kW · h) 波动,不仅燃油消耗率大幅度下降,油耗曲线也相较优化前较为平缓,没有较大的波动,说明优化后的装载机系统参数在各种工况下都具有良好的可靠性与抗干

扰能力,有助于延长装载机各个部件的工作寿命。以上结果可以说明,在进行 $6\sigma$ 稳健优化后,装载机的复合储能系统的稳健性与可靠性具有显著提升,证明了优化的可行性。

通过节油率式(7)来计算优化前后装载机在4种工况下的节油效果。

$$\rho = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \times 100\% \quad (7)$$

式中: $\rho$ 为节油率; $Q_1$ 为优化前装载机燃油消耗量; $Q_2$ 为优化后装载机燃油消耗量。

如图10所示,I工况、L工况、T工况和V工况的平均节油率分别为11.14%、10.30%、10.40%和11.38%,节油率均在10%以上,证明对装载机系统进行稳健优化是可行有效的。

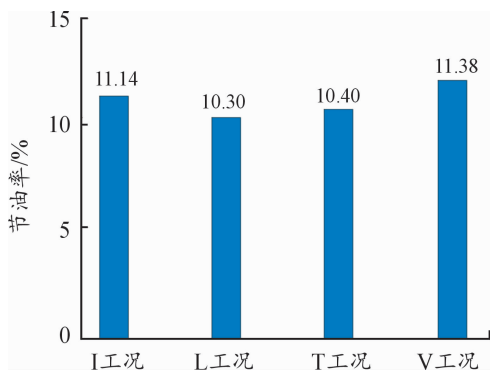


图10 节油率直方图

## 5 硬件在环仿真试验

### 5.1 试验台架基本原理

混合动力装载机复合储能系统的试验台架由3部分组成,即电液动力制动系统试验台架、再生制动能量回收系统试验台架和混合动力系统试验台架。已经搭建完成的试验台架为电液动力制动系统和再生制动能量回收系统,如图11所示。将仿真模型中的液压驱动和制动能量回收部分以实物替换,其他部分仍为Simulink模型,进行硬件在环试验。试验中主要是通过连接通信的I/O接口,将压力传感器和流量传感器所收集到的试验数据传送到相应的试验模型中。

### 5.2 试验结果分析

如图12所示,装载机在4种工况下的燃油消耗量的仿真数据与试验数据基本保持一致,而在对比中可以看到,在一些时间段内的试验数据存在着一定范围的波动,这是由于在试验台架运行的过程中会伴随强烈的震动,试验数据的波动幅度一直控制在 $0 \sim 0.5$  g,属于正常的波动误差范围。试验结果表明,经过 $6\sigma$ 稳健设计优化后的装载机复合储能混合动力系统能够有效提高整车的燃油经济性,优化后的系统在实际工作中也具有较高的可靠性,各个主要系统可以平稳工作在最优区域,在提高使用寿命的同时节约能源,证明了 $6\sigma$ 稳健设计优化的有效性与实际应用的可行性。

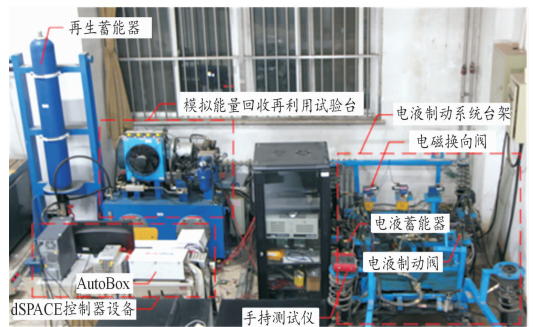


图11 液压驱动制动能量回收系统试验台架图

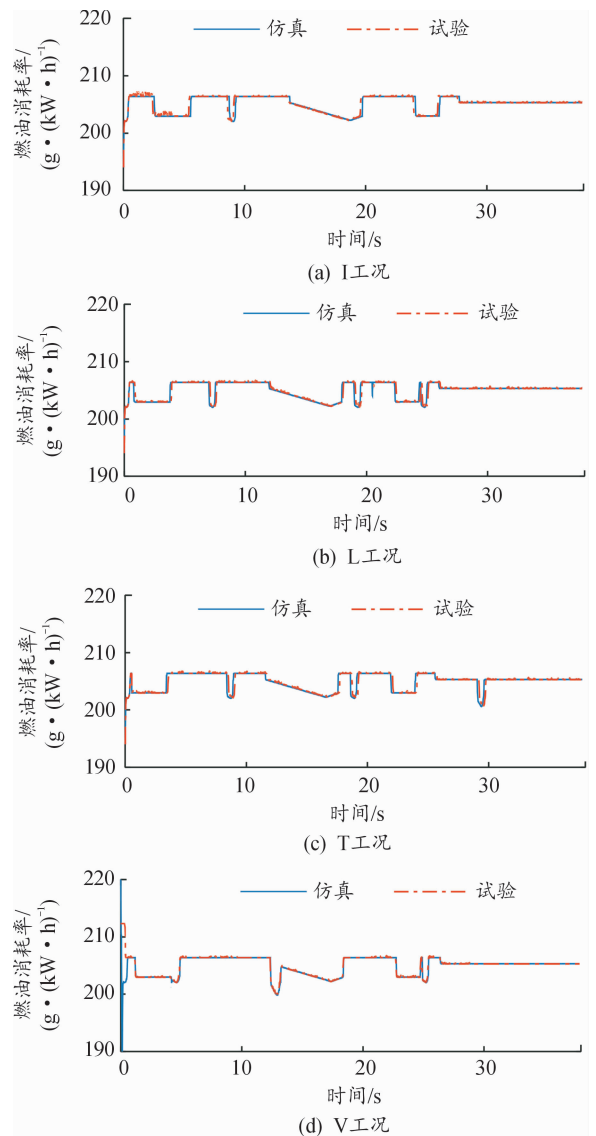


图12 4种工况下装载机仿真与实验数据曲线

## 6 结论

1) 对装载机的符合储能式混合动力系统的3个子系统即传动系统、液压驱动系统、电池电机系统分别建立优化目标函数,利用 $6\sigma$ 稳健优化理论对3个目标函数进行优化,对

I工况、L工况、T工况和V工况进行仿真,得到平均节油率分别为11.14%、10.30%、10.40%和11.38%。

2) 优化后参数变量的 $\sigma$ 水平可达到 $6\sigma$ 甚至 $8\sigma$ ,可靠度均接近100%,说明优化后的参数变量具有较高的可靠性,满足一般工程要求,证明了稳健优化的有效性。

3) 经过 $6\sigma$ 稳健优化后的复合储能系统的各个部件工作较为平顺,完全满足工程车辆实际的工作需求,可为其他类型工程车辆的复合储能系统的优化设计提供参考。

## 参考文献:

[1] 庞德良,卜睿,刘兆国.我国新能源汽车产业制度安排演进与优化建议[J].经济纵横,2022(4):106-115.

[2] SABRI M F M, DANAPALASINGAM K A, RAHMAT M F. A review on hybrid electric vehicles architecture and energy management strategies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016(53):1433-1442.

[3] BHOLA M, KUMAR N, GHOSHAL S K. Reducing fuel consumption of front end loader using regenerative hydro-static drive configuration-an experimental study[J]. Energy, 2018(162):158-170.

[4] 曹海岐,林慕义,陈勇.复合储能式装载机混合动力系统协同优化[J].机床与液压,2019,47(19):10-15.

[5] 徐大雨,林慕义,李钊.基于Isight对复合储能式混合动力系统的稳健设计[J].液压与气动,2021,45(3):77-85.

[6] CASALINO L, MASSENI F, PASTRONE D. Uncertainty analysis and robust design for a hybrid rocket upper stage[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2019,56(5):1424

-1431.

[7] HOU Daizheng, DONG Qichao, ZHOU Yafu. Taguchi robust design for adaptive energy management of plug-in fuel cell electric bus [J]. Journal of Energy Storage, 2022, 53:105038.

[8] PAUL K, BYRAN S J. Model-robust design of mixture experiments [J]. Quality Engineering, 2020, 32(4): 663-675.

[9] JI Xuewu, HE Xiangkun, LV Chen, et al. Adaptive-neural-network-based robust lateral motion control for autonomous vehicle at driving limits[J]. Control Engineering Practice, 2018,76:41-53.

[10] 严陈希,耿文冉,黄明宇,等.基于工况识别的混合动力汽车能量管理策略[J].机械设计与制造,2022,3(3):24-29.

[11] 伍建军,王子宁,金洪棋,等.基于 $6\sigma$ 稳健性的运输工装备轻量化设计[J].机械设计与制造,2020(7):273-277.

[12] 段楠,薛会民,潘越.用蒙特卡洛法计算可靠度时模拟次数选择[J].煤矿机械,2002(3):13-14.

[13] 周子强,胡昆,汪星雨,等.基于蒙特卡洛模拟的变电运行状态监测系统[J].自动化与仪器仪表,2023(7):174-177.

[14] 刘志祥,王凯,杨小聪,等.基于模糊故障树和蒙特卡洛方法的智能铲运系统可靠性分析[J].黄金科学技术,2023,31(3):477-486.

[15] 蒋慧.交叉熵蒙特卡洛法在含风电场电力系统小扰动稳定性评估中的应用[J].长春工业大学学报,2023,44(3):282-288.

## Hybrid loader hybrid energy storage system $6\sigma$ robust design

LIU Zhenbo<sup>1</sup>, LIN Muyi<sup>1,2</sup>, BAI Yu<sup>1</sup>, CHENG Kai<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering,

Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China;

2. Collaborative Innovation Center of Electric Vehicles in Beijing, Beijing 100192, China)

**Summary:** The composite energy storage hybrid loader, due to its complex system composition and harsh working environment with many uncertainties, does not achieve optimal economic performance. To cope with the complex and variable construction environment and reduce performance degradation caused by system parameter fluctuations, it is necessary to optimize the robustness and reliability of the composite energy storage system.

The composite energy storage hybrid loader studied in this paper has a parallel structure. The vehicle's power sources include the engine system, the battery-motor system, and the hydraulic system. The engine system serves as the primary power source, the battery-motor system mainly provides auxiliary power, and the hydraulic system inputs energy stored in the hydraulic accumulator into the transmission



system as another power output system for the loader. The composite energy storage system of the loader mainly consists of these three parts. By robustly optimizing these three subsystems, the composite energy storage system can achieve optimal performance during loader operation.

The optimization method used is  $6\sigma$  robust design. The principle involves combining the robust design of the tolerance model set with the modern optimization design theory of the  $6\sigma$  quality management standard. This approach not only optimizes the target function but also reduces the impact of some constraints and related variable fluctuations on the optimization target, thereby improving the reliability of the target after optimization and ultimately enhancing robustness. The specific process first involves deterministic analysis for each system, constructing objective functions, parameter variables, and variable constraints. However, the results of deterministic optimization are overly idealistic and do not consider the impact of uncertainties, making them unrealistic for practical engineering applications. Consequently, the optimized parameter values may not be absolutely reliable. Therefore, a  $6\sigma$  robust design is applied to the corresponding systems, constructing corresponding objective functions, parameter variables, and variable constraints. Using Isight software, a multi-objective optimization algorithm and Monte Carlo simulation robust optimization method are selected to optimize the models. The optimized data is then input into the established vehicle simulation model for validation under various working conditions.

Our results show a significant reduction in vehicle fuel consumption, with average fuel savings rates of 11.14%, 10.30%, 10.40%, and 11.38% across four working conditions. Finally, a hardware-in-the-loop experiment is conducted using dSPACE experimental equipment, and a comparative analysis of experimental and simulation data is performed. Our results demonstrate the effectiveness and feasibility of the  $6\sigma$  robust design optimization for the loader system.

In addition, the application of  $6\sigma$  robust design in the optimization process not only improves the economic efficiency of loaders, but also enhances their overall performance stability in various operating scenarios. This comprehensive approach ensures that loaders can better adapt to the harsh and unpredictable conditions of construction sites, thereby achieving more reliable and efficient operations. The successful implementation of this robust optimization method demonstrates its potential for wider application in similar engineering fields, where system reliability and performance are equally important in construction scenarios. Through continuous improvement and verification, this method can significantly improve the stability and safety of composite energy storage engineering machinery such as composite energy storage loaders.

**Key words:** six sigma theory; robust design; dynamic conditions; composite energy storage

(责任编辑 杨黎丽)