

# 基于 Cruise 与 Simulink 联合的纯电动轻型卡车经济性与动力性仿真分析

张艳影<sup>1,2</sup>, 汪帆<sup>1,2</sup>, 张立新<sup>1,2</sup>, 肖业<sup>1,2</sup>

(1. 中车时代电动汽车股份有限公司, 湖南 株洲 412007; 2. 中车科技创新(北京)有限公司, 北京 100080)

**摘要:**为提高纯电动轻型卡车的经济性与动力性,本文根据整车参数与性能指标,对电驱桥系统进行精准匹配。基于 Cruise 平台建立整车动力学模型,并利用 Simulink 开发电机驱动与制动能量回收控制策略,通过联合仿真对设计方案进行分析与优化。仿真结果表明,优化后的电驱桥系统匹配方案可使该纯电动轻型卡车在经济性和动力性方面均满足设计目标。与基准车型相比,优化车型在续航里程、最高车速、爬坡性能及加速能力等方面均有显著提升。

**关键词:**纯电动轻型卡车; 仿真分析; 经济性; 动力性

中图分类号:U469.72; U462.3 文献标志码:A DOI:10.15917/j.cnki.1006-3331.2025.06.001

## Co-simulation of Cruise and Simulink for Analysis of Energy Economy and Dynamic Performance in a Pure Electric Light Truck

ZHANG Yanying<sup>1,2</sup>, WANG Fan<sup>1,2</sup>, ZHANG Lixin<sup>1,2</sup>, XIAO Ye<sup>1,2</sup>

(1. CRRC Electric Vehicle Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China;

2. CRRC Technology Innovation (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100080, China)

**Abstract:**To enhance the economic efficiency and dynamic performance of a pure electric light truck, this paper conducts a precise matching of the electric drive axle system based on vehicle parameters and performance indicators. It uses the Cruise platform to establish a vehicle dynamics model, develop motor drive and regenerative braking control strategies in Simulink, and analyze and optimize the design through co-simulation. The simulation results demonstrate that the optimized electric drive axle matching scheme enables the pure electric light truck to meet all designated targets in both economic efficiency and dynamic performance. Compared to the baseline model, the optimized vehicle shows significant improvements in driving range, maximum speed, gradeability, and acceleration capability.

**Key words:**pure electric light truck; simulation analysis; economic efficiency; dynamic performance

在全球能源结构转型深入推进、环境保护意识持续增强的背景下,提升纯电动轻型卡车(下文简称轻卡)动力总成的效率,已成为应对交通污染与能源消耗问题的关键路径之一<sup>[1]</sup>。在此过程中,如何在满足动力需求的同时,进一步提高轻卡的经济性与动力性,已成为技术研发与产业化面临的核心挑战。尤其在城市复杂路况下,有效降低能量消耗、提升续航里程,将直接影响纯电动轻卡的市场竞争力与可持续发展前景<sup>[2-3]</sup>。

本文以我司一款正在研发的纯电动轻卡为对象,聚焦其电驱桥系统匹配问题。先通过 Cruise 软件搭

建整车动力学模型,并基于 Simulink 开发融合自适应电机驱动与制动能量回收的控制策略,从而对多种工况下的整车动力性与经济性进行仿真分析,以确定最优电驱桥驱动方案<sup>[4-5]</sup>。再通过对比优化前后系统表现,评估车辆在动力性与经济性两方面的提升效果。

### 1 整车基本参数及性能指标要求

本文以纯电动轻卡为例进行仿真分析。该车型采用电机直驱后桥的驱动方案,该方案通过简化动力系统和省去传统传动装置,提升了传动效率;利用电机的瞬时大扭矩输出,满足了城市配送中频繁启停的

收稿日期:2025-05-29。

第一作者:张艳影(1999—),女,硕士,助理工程师,主要从事整车性能开发相关工作。E-mail: 2870155711@qq.com。

需求;同时,其在降低维护成本与优化空间布局方面也具有显著优势。车辆的主要配置参数及动力系统技术指标要求见表1和表2。

表1 纯电动轻卡整车配置基本参数

项目	数值
车型尺寸/mm	5 995×2 400×2 380
轴距/mm	3 360
前/后悬/mm	1 180/1 145
前/后轮距/mm	1 590/1 550
整备质量/kg	2 850
满载质量/kg	4 500
滚动半径/m	0.376
滚动阻力系数	0.012
迎风面积/m <sup>2</sup>	6.2
空气阻力系数	0.38
动力电池总电量/kW·h	81.144

表2 动力系统技术指标

性能参数	性能要求
最高车速/(km·h <sup>-1</sup> )	>100
最大爬坡度/%	>20
0~50 km/h 加速时间/s	<6
40 km/h 等速续航里程/km	>350
综合续航里程/km	>210

## 2 轻卡的经济性与动力性

### 2.1 经济性

#### 2.1.1 电机经济性

当电机系统处于电动工作状态时,其输入功率对应控制器直流母线输入的电功率,输出功率对应电机轴端的机械功率,电机系统在电动工作状态下的效率<sup>[6]</sup> $\eta_1$ 的计算公式见式(1)。

$$\eta_1 = Tn/9.55UI \times 100\% \quad (1)$$

式中: $T$ 为电机轴端转矩,N·m; $n$ 为电机转速,r/min; $U$ 为控制器直流母线电压平均值,V; $I$ 为电机控制器直流母线电流平均值,A。

当电机系统处于发电工作状态时,其输入功率对应电机轴端的机械功率,输出功率对应驱动控制器直流母线输出的电功率。电机系统发电工作状态下的效率 $\eta_2$ 的计算公式见式(2)。

$$\eta_2 = 9.55UI/Tn \times 100\% \quad (2)$$

#### 2.1.2 整车经济性

轻卡加速工况单位里程能量消耗量 $E_j$ <sup>[7]</sup>的计算

公式见式(3)。

$$E_j = \frac{1}{\eta_T} \left[ \frac{C_D A}{2 \times 21.15} (u_j^2 + u_0^2) + (mgf + mgi + \delta ma_j) \right] \quad (3)$$

式中: $\eta_T$ 为纯电动轻卡传动系统效率; $C_D$ 为空气阻力系数; $A$ 为迎风面积,m<sup>2</sup>; $u_j$ 为加速终了速度,km/h; $u_0$ 为加速初始速度,km/h; $m$ 为轻卡整备质量,kg; $g$ 为重力加速度,m/s<sup>2</sup>; $f$ 为轮胎滚动阻力系数; $i$ 为坡度; $a_j$ 为加速度,m/s<sup>2</sup>; $\delta$ 为轻卡旋转质量换算系数,其计算公式见式(4)。

$$\delta = 1 + \sum I_w / mr^2 + I_m \cdot i_1^2 \cdot \eta_T / mr^2 \quad (4)$$

式中: $I_w$ 为车轮转动惯量,kg·m<sup>2</sup>; $I_m$ 为传动系统转动惯量,kg·m<sup>2</sup>; $r$ 为车轮滚动半径,m; $i_1$ 为传动系统的传动比。

轻卡等速工况单位里程能量消耗量 $E_p$ 的计算公式见式(5)。

$$E_p = \frac{1}{\eta_T} \left( \frac{C_D A u_d^2}{21.15} + mgf + mgi \right) \quad (5)$$

式中: $u_d$ 为轻卡等速行驶速度,km/h。

轻卡整个循环的能量消耗率 $E$ 的计算公式见式(6)。

$$E = \sum E_i S_i / \sum S_i \quad (6)$$

式中: $E_i$ 为某一工况下的单位里程能量消耗率,kW·h/km; $S_i$ 为某一工况下的续驶里程,km。

#### 2.1.3 整车续驶里程

续驶里程是衡量纯电动轻卡单次充电后行驶能力的关键指标。续驶里程的长短直接影响车辆在城市配送、长途运输、区域物流等不同应用场景下的适用性和经济性。

电池的额定总能量 $E_m$ 的计算公式见式(7)。

$$E_m = C_m U_m = G_m q \quad (7)$$

式中: $C_m$ 为电池的额定容量,A·h; $U_m$ 为电池的端电压,V; $G_m$ 为轻卡携带的电池总质量,kg; $q$ 为电池比能量,W·h/kg。

轻卡等速行驶续驶里程 $S_d$ 的计算公式见式(8)。

$$S_d = E_m u / P_m \cdot \eta_d \quad (8)$$

式中: $u$ 为轻卡行驶车速,m/s; $P_m$ 为轻卡行驶时所消耗的功率,kW; $\eta_d$ 为蓄电池放电效率。

多工况续驶里程 $S$ 的计算公式见式(9)。

$$S = \sum_{j=1}^k S_j \quad (9)$$

式中: $S_j$ 为每个状态行驶的距离,km; $k$ 为车辆能够完成的状态总数。

## 2.2 动力性

纯电动轻卡在行驶过程中, 动力电池储存的电能通过控制器输出给驱动电机, 电机产生的转矩经传动系统传递到驱动轮上, 通过轻卡的行驶方程计算驱动力  $F_t$ , 其计算公式见式(10), 式(11)则用于计算驱动电机输出转矩与整车行驶阻力之间的关系。可通过式(12)~(15)计算纯电动轻卡整车的动力性能<sup>[8]</sup>。

$$F_t = F_f + F_w + F_i + F_j \quad (10)$$

$$\frac{T_{tq} i_i \eta_T}{r} = G f \cos \alpha + \frac{C_D A u^2}{21.15} + G \sin \alpha + \delta m \frac{du}{dt} \quad (11)$$

式中:  $F_f$  为滚动阻力, N;  $F_w$  为空气阻力, N;  $F_i$  为坡度阻力, N;  $F_j$  为加速阻力, N;  $T_{tq}$  为驱动电机的牵引扭矩, N·m;  $G$  为车辆重量, N;  $\alpha$  为坡道倾角, ( $^\circ$ );  $\frac{du}{dt}$  为行驶加速度, m/s<sup>2</sup>;  $t$  为加速时间, s。

纯电动轻车的动力性评价指标主要包括最高车速、加速性能和爬坡性能。本节将针对这三项关键指标进行分析, 探讨其计算方法及影响因素, 以评估车辆的整体动力性能。这些指标对于纯电动轻卡的设计优化和实际应用具有重要意义。

### 2.2.1 最高车速

最高车速<sup>[9]</sup>是衡量纯电动轻卡动力性的关键指标之一, 指车辆在满载或规定载荷条件下, 于平坦干燥的铺装路面上能够保持稳定行驶的最大速度。该速度由电动机的功率与转速、电池管理系统的功率输出策略、整车重量及空气阻力等因素共同决定。当轻卡达到最高车速时, 电机运行于恒功率区域, 且驱动力与行驶阻力(即滚动阻力和空气阻力)达到平衡。为确保车辆运行的安全可靠, 其最高车速取以下两个独立物理限制中的数值较低者: 其一是由动力平衡决定的“平衡理论车速”, 即驱动力与行驶阻力曲线的交点; 其二是由电机及传动系统物理极限决定的“转速理论车速”, 可根据电机最高转速由式(12)计算得出。

$$u_{\max} = 0.377 r n_{\max} / i_i \quad (12)$$

式中:  $n_{\max}$  为电机最高转速, r/min;  $u_{\max}$  为轻卡最高车速, km/h。

### 2.2.2 加速性能

纯电动轻卡整车动力性中的加速性能是指车辆在一定时间内从静止状态(或某一初始速度)加速到目标速度的能力, 该性能主要通过加速时间与加速度两类指标进行量化。加速时间越短, 或加速度越大,

则代表车辆的加速性能越优异。对于纯电动轻卡而言, 加速性能是评价车辆动力系统效率、响应速度及整车设计的重要指标。

轻卡的行驶加速度  $a_j$  的计算公式见式(13)。

$$a_j = [F_t - (F_f + F_w)] / \delta m \quad (13)$$

轻卡从静止起步全力加速至速度  $u_a$  的加速时间  $t$  的计算公式见式(14)。

$$t = \int_0^{u_a} \frac{\delta m}{3.6 [F_t - (F_f + F_w)]} du \quad (14)$$

### 2.2.3 爬坡性能

爬坡性能是纯电动轻车的一项关键动力性指标, 指车辆在满载情况下, 于特定坡度上克服重力、保持稳定行驶的能力。该性能直接关乎车辆在山区或坡道等复杂路况下的运输效能, 通常以最大爬坡度  $i_{\max}$  来量化, 其计算公式见式(15),  $i_{\max}$  具体数值由车辆的驱动力、扭矩输出及传动系统效率共同决定。

$$i_{\max} = \tan \left[ \arcsin \frac{D_{\max} - f \sqrt{1 - D_{\max}^2 + f^2}}{1 + f^2} \right] \quad (15)$$

式中:  $D_{\max}$  为最大动力因数。

## 3 仿真结果与分析

### 3.1 轻卡整车模型的建立

根据整车设计需求, 对轻卡整车经济性和动力性<sup>[9]</sup>进行仿真分析。整车Cruise与Simulink模型架构如图1所示。根据实车运行情况, 使用Simulink模型编写电机驱动与制动能量回收控制策略, 并基于实车运行参数设定模型参数。已有大量的研究证实了Cruise与Simulink联合仿真方法的合理性<sup>[10-12]</sup>。

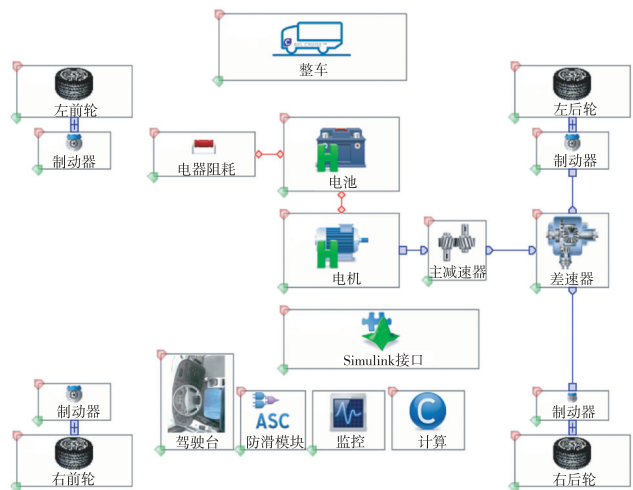


图1 纯电动轻卡整车Cruise与Simulink模型架构

### 3.2 轻卡电驱桥传动比仿真分析

为准确评估纯电动轻卡的能效和动力性能,需要开展不同标准化工况的测试。两种常见的测试工况为等速法工况和中国轻型货车行驶工况(CHTC-LT工况)。40 km/h 等速法工况是一种专门用于评估纯电动轻卡在稳定车速下的能效和性能的测试方法,而CHTC-LT工况是我国针对轻卡制定的一套标准驾驶工况<sup>[13]</sup>,类似欧洲的WLTP工况和美国的FTP-75工况。CHTC-LT工况充分考虑了城市配送、短途运输等实际场景。与等速法仅反应稳定工况不同,CHTC-LT工况涵盖了快速启停、加减速、低速巡航等多种动态过程。因此,CHTC-LT工况能更精确地模拟车辆的真实运行状态,其评价结果也更具实际参考价值。

在纯电动轻卡的驱动系统设计中,电驱桥传动比作为一个关键参数,直接影响车辆的动力性、能效和驱动性能<sup>[14]</sup>。本文通过Cruise与Simulink联合仿真,计算不同电驱桥传动比下车辆的经济性和动力性,最终确定最佳传动比。根据选定的驱动电机参数(表3中A款为正在研发的电驱桥驱动电机;B款为我司某量产车型的基准电驱桥,其传动比为15.58)和电驱桥传动比的计算公式,确定取值范围并间隔取值,并在此基础上进行仿真分析,具体结果如表4和图2、图3所示。

表3 2款电驱桥驱动电机参数对比

项目	A款	B款
额定功率/kW	75	60
额定电压/V	540	540
峰值功率/kW	140	120
峰值扭矩/N·m	420	360
峰值转速/(r·min <sup>-1</sup> )	12 000	12 000
持续扭矩/N·m	200	160

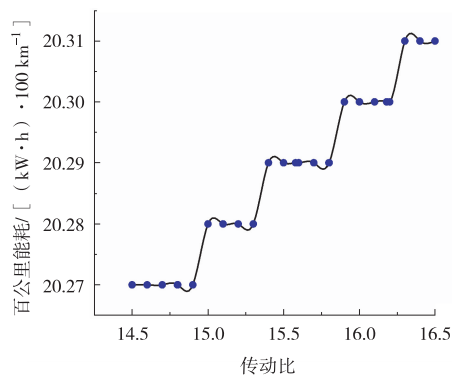


图2 40 km/h 等速法能耗与传动比的关系

表4 不同传动比仿真结果

传动比	百公里能耗/ [(kW·h)·100 km <sup>-1</sup> ]		最大 爬坡 度/%	0~50 km/h 加速时间/s	最高车速/ (km·h <sup>-1</sup> )
	40 km/h 等速法	CHTC-LT 工况法			
14.5	20.27	32.94	37.48	4.40	117.20
14.6	20.27	32.95	37.79	4.37	116.40
14.7	20.27	32.96	38.10	4.35	115.60
14.8	20.27	32.81	38.39	4.33	114.80
14.9	20.27	32.82	38.68	4.31	114.00
15.0	20.28	32.83	38.99	4.29	113.20
15.1	20.28	32.84	39.30	4.27	112.60
15.2	20.28	32.85	39.60	4.25	111.80
15.3	20.28	32.86	39.91	4.23	111.00
15.4	20.29	32.87	40.22	4.21	110.40
15.5	20.29	32.88	40.52	4.20	109.60
15.6	20.29	32.89	40.83	4.18	109.00
15.7	20.29	32.90	41.14	4.16	108.20
15.8	20.29	32.91	41.44%	4.14	107.60
15.9	20.30	32.92	41.77%	4.13	106.80
16.0	20.30	32.93	42.07%	4.11	106.20
16.1	20.30	32.94	42.40%	4.09	105.60
16.2	20.30	32.96	42.71%	4.08	104.80
16.3	20.31	32.97	43.02%	4.06	104.20
16.4	20.31	32.98	43.34%	4.05	103.60
16.5	20.31	32.99	43.66%	4.03	103.00

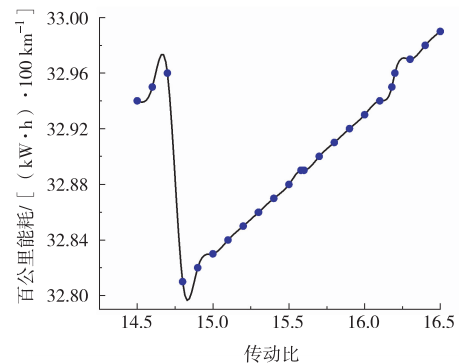


图3 CHTC-LT工况法能耗与传动比的关系

由图2和图3可知,当轻卡传动比为14.8时,CHTC-LT工况法和40 km/h等速法百公里能耗均处于最小值,车辆的动力性能完全得到满足,综合考虑现有体系资源、成本和性能需求,最终选定电驱桥的

最优传动比为 14.8。

### 3.3 轻卡整车经济性仿真分析

在轻卡满载条件下, 分别进行 40 km/h 等速工况与 CHTC-LT 行驶工况经济性仿真测试, 测试结果如图 4 和图 5 所示。40 km/h 等速工况下车辆百公里能耗为 20.27 kW·h/100 km, CHTC-LT 工况下车辆百公里能耗为 32.81 kW·h/100 km。为直观对比优势, 图 6 (a) 与图 6 (b) 分别展示了采用优化后的 A 款电驱桥与我司原有 B 款电驱桥在 CHTC-LT 工况下的仿真工况点分布, 其中 A 款电驱桥的传动比为 14.8。与 B 款相比, A 款电驱桥有更多工况点分布在电机高效区间, 且 90% 以上高效点的占比与机械效率均更高, 这表明 A 款电驱桥的低能耗经济性更优。这主要得益于其采用的适宜传动比, 该传动比通过降低轮端输出扭矩需求, 减小了齿轮啮合与传动轴旋转过程中的能量损失<sup>[15]</sup>。电机在起步、加速、爬坡等高动力需求的工况下, 无需脱离高效区间即可满足功率需求, 从而显著提高了电能利用率。

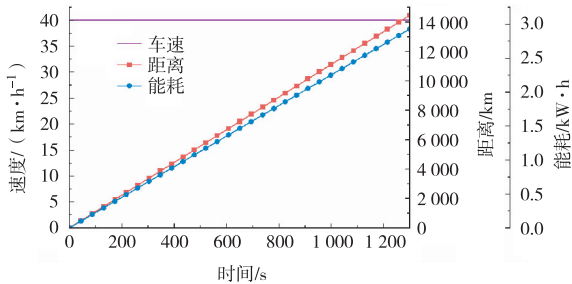


图 4 40 km/h 等速工况仿真结果

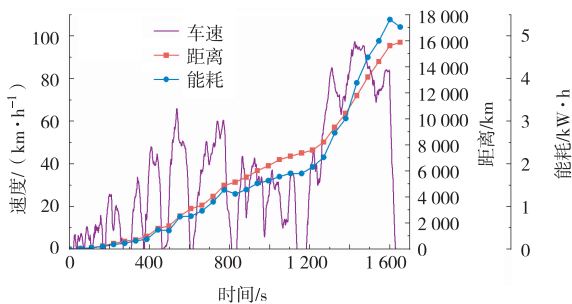
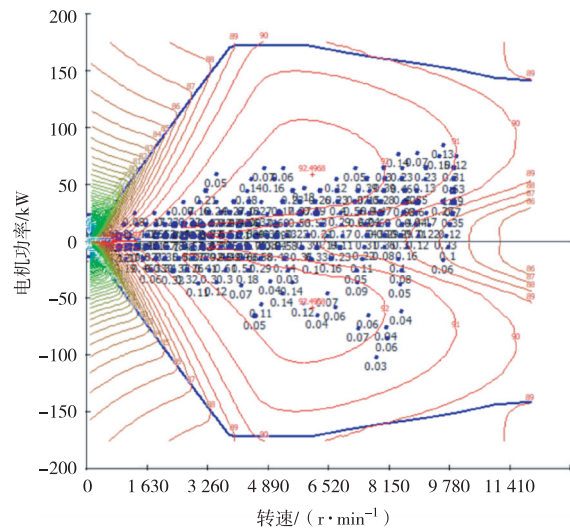


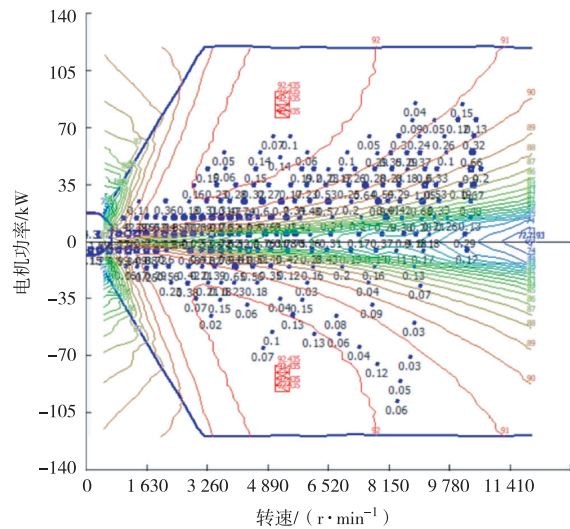
图 5 CHTC-LT 工况仿真结果

对 A 款电驱桥整车系统进行测试, 电池 SOC 从 100% 开始, 至 10% 截止, 电池总容量约为 81.144 kW·h。优化后电驱桥(A 款)的 CHTC-LT 续驶里程约为 222.57 km, 基准车型(B 款)的续驶里程约为 216.05 km, 优化后续驶里程提升了约 3.02%; A 款电驱桥 40 km/h 等速工况车辆续驶里程约为 360.26 km, B 款电驱桥的续驶里程约为 342.84 km, 优化后

续驶里程提升了约 5.08%。测试结果表明, 优化后的 A 款电驱桥满足续驶里程的设计要求。



(a) A 款电驱桥



(b) B 款电驱桥

图 6 CHTC-LT 仿真工况点分布

### 3.4 轻卡整车动力性仿真分析

#### 3.4.1 最高速度

测试表明, 当电机转速为 11 986 r/min 时, 配备 A 款电驱桥的轻卡最高车速达到 114.80 km/h, 满足不低于 100 km/h 的设计要求, 相较 B 款的 109 km/h, 其最高车速提升了 5.3%。

#### 3.4.2 加速性能

图 7 为 A 款车辆加速过程中的位移、速度与加速度曲线。测试结果表明: 在轻卡满载条件下, 配备 A 款电驱桥的车辆 0~50 km/h 加速时间为 4.33 s, 而 B 款电驱桥的加速时间为 5.42 s, 前者比后者缩短了 1.09 s; 同时, 前者整车最大加速度达到了 3.39 m/s<sup>2</sup>。

加速性能满足设计要求。

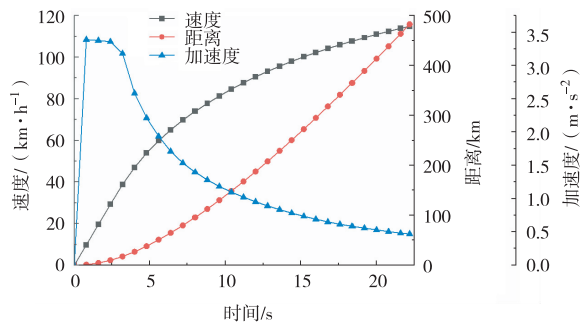


图7 0~50 km/h 加速性能仿真数据

### 3.4.3 爬坡性能

如图8所示,配备A款电驱桥的轻卡在满载状态下,最大爬坡度达到38.39%,且在车速低于40 km/h时,爬坡度均可维持在20%以上。相较于B款电驱桥34.01%的最大爬坡度,A款提升了4.38%。这一优势表明A款电驱桥能提供更大的牵引力,且性能满足设计需求。

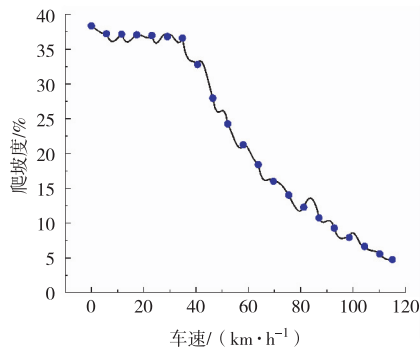


图8 爬坡性能仿真数据

## 4 结论

本文基于Cruise搭建整车动力学模型,并借助Simulink构建整车控制策略。通过联合仿真,对多种工况下整车的动力性与经济性进行了深入分析,优化了传动比,并筛选出最佳的电驱桥匹配方案。

仿真结果表明,采用此电驱桥系统匹配优化方案后,整车的各项性能指标均符合动力系统技术指标要求。优化后的整车CHTC-LT续驶里程提升了约3.02%,等速工况续驶里程提升了约5.08%,最高车速提升了约5.3%,加速时间缩短了约1.09 s,爬坡度

增加了约4.38%。

目前,本研究在仿真模型和控制策略的适应性方面仍存在一定局限,但研究成果具备重要的实际应用价值,所提供的仿真参数对后续整车产品的研发具有重要的参考意义。

### 参考文献:

- [1] 洪吉超,梁峰伟,杨京松,等. 新能源汽车产业及其技术发展现状与展望[J]. 科技导报,2023,41(5):49-59.
- [2] 孙彦兴,徐世福. 基于Cruise的商用车整车性能分析及设计应用[J]. 重型汽车,2023(4):34-35.
- [3] 王新国. 基于CRUISE软件的某纯电动汽车仿真分析[J]. 汽车测试报告,2023(2):142-144.
- [4] 童寒川,夏伟. 纯电动客车动力匹配与仿真研究[J]. 汽车科技,2017(5):53-59.
- [5] 田韶鹏,韩炜. 基于CRUISE的纯电动客车动力匹配和仿真分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2018,42(4):616-620.
- [6] 林程. 电动汽车工程手册:第一卷:纯电动汽车整车设计[M]. 北京:机械工业出版社,2019:214-216.
- [7] 崔胜民. 新能源汽车技术解析[M]. 北京:化学工业出版社,2016:109-112.
- [8] 余志生. 汽车理论[M]. 5版. 北京:机械工业出版社,2018:1-53.
- [9] 张海云. 基于CWTVC工况的纯电轻卡驱动电机系统优化设计[J]. 南方农机,2024,55(19):191-194.
- [10] 董先瑜,凤亚娇. 应用CRUISE软件进行整车性能计算[J]. 机械工程师,2016(4):225-228.
- [11] 王坤玉,陈冲,左鹏举,等. 基于Simulink和Cruise的电驱桥车辆控制策略开发与联合仿真[J]. 重型汽车,2021(5):20-22.
- [12] 邓建明,龚循飞,于勤,等. 基于Cruise和Simulink的纯电动车联合仿真分析[J]. 汽车实用技术,2019(12):15-16.
- [13] 王廷宏,雷健华. 基于Cruise和Simulink的燃料电池汽车联合仿真研究[J]. 现代工程科技,2024,3(8):1-4.
- [14] 中华人民共和国工业和信息化部. 中国汽车行驶工况第2部分:重型商用车:GB/T 38146.2—2019[S]. 北京:中国标准出版社,2019:1-18.
- [15] 王鹏程,汤沛,花居森. 纯电动物流车动力性设计及优化[J]. 建模与仿真,2024,13(6):6457-6468.