



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2405719

引用格式:曹丽英,渠志宏,李春东,等.增程式混合动力柠条收获机动力系统参数设计[J].科学技术与工程,2025,25(15):6268-6274.

Cao Liying, Qu Zhihong, Li Chundong, et al. Design of dynamic system parameters of extended range hybrid caragana harvester[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(15): 6268-6274.

农业科学

增程式混合动力柠条收获机动力系统参数设计

曹丽英¹, 渠志宏¹, 李春东^{2*}, 张星¹, 张上旺¹, 张家宁¹

(1. 内蒙古科技大学机械工程学院, 包头 014010; 2. 内蒙古科技大学工程训练中心, 包头 014010)

摘要 柠条是内蒙古地区主要的防风固沙植被, 种植区域广、面积大。柠条平茬、收获对收获机的需求量大。针对传统柠条收获机油耗高、污染重的问题, 以课题组设计的增程式混合动力柠条收获机的最高车速、最大爬坡度和纯电动续航里程为目标函数进行动力参数设计。首先依据整机设计参数及性能需求, 进行了收获机增程器、驱动电机、电池的参数设计。结合实际作业工作参数运用 AVL/Cruise 软件进行仿真, 寻找整机性能指标的最优解。通过整机现场试验验证仿真结果的合理性, 对比二者结果知: 最高车速的误差为 9.012%, 爬坡度误差为 6.404%; 两种结果误差在允许范围内。研究表明仿真模型的合理性, 可为后续增程式混合动力柠条收获机动力参数优化提供参考。

关键词 混合动力; 柠条收获机; Cruise 仿真; 参数匹配

中图分类号 S225.5; **文献标志码** A

Design of Dynamic System Parameters of Extended Range Hybrid Caragana Harvester

CAO Li-ying¹, QU Zhi-hong¹, LI Chun-dong^{2*}, ZHANG Xing¹,
ZHANG Shang-wang¹, ZHANG Jia-ning¹

(1. School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;
2. Engineering Training Center of Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

[Abstract] Caragana is the main wind-breaking and sand-fixing vegetation in Inner Mongolia, with a wide planting area and a large area. There is a great demand for harvesting machine in the stubble and harvesting of caragana. Aiming at the problems of high fuel consumption and heavy pollution of traditional caragana harvester, the maximum speed, maximum gradient and pure electric driving range of the extended range hybrid caragana harvester designed by our research group were used as the objective functions to design the dynamic parameters. Firstly, according to the design parameters and performance requirements of the whole machine, the parameters of the range extender, drive motor and battery of the harvester were designed. Combined with the actual working parameters, AVL/Cruise software was used to simulate and find the optimal solution of the overall performance index. Combined with the actual working parameters, AVL/Cruise software was used to simulate and find the optimal solution of the overall performance index. The reasonableness of the simulation results is verified by the field test of the whole machine. Comparing the two results, it is found that the error of the maximum speed is 9.012% and the climbing error is 6.404%. The error of the two results is within the allowable range. The results show that the simulation model is reasonable and can provide reference for the optimization of dynamic parameters of the extended range hybrid Caragana harvester.

[Keywords] hybrid; caragana harvester; Cruise simulation; parameter matching

为了防治内蒙古地区土地沙漠化^[1], 在鄂尔多斯、乌兰察布、包头、乌海等 12 个盟市 90 个旗县广泛种植柠条, 2022 年种植面积达 6 227.9 (1 亩 = 666.67

m²), 柠条收获机的需求量日益增加。传统柠条收获机主要以柴油机为动力^[2], 在作业时, 由于地形不平整, 负载不稳定, 会引起柴油机输出功率不稳定, 偏离

收稿日期: 2024-07-30 修订日期: 2024-11-24

基金项目: 内蒙古科技大学基本科研业务费专项(2023QNJS045)

第一作者: 曹丽英(1980—), 女, 汉族, 内蒙古呼和浩特人, 博士, 教授。研究方向: 农业及矿用机电系统集成技术。E-mail: kdclly@imust.edu.cn。

* 通信作者: 李春东(1981—), 男, 汉族, 内蒙古赤峰人, 高级工程师。研究方向: 特种车辆整体技术、农业机械智能化。E-mail: lichundong@imust.edu.cn。

经济节油区,导致燃油消耗高、污染重。为解决传统柠条收机能耗高的问题,在保证续航里程的情况下,采用以电机驱动的增程式混合动力系统代替传统柴油机驱动。与传统柠条收获机动力系统相比,这种设计有助于提高动力性能、降低能耗和排放。增程式混合动力系统^[3]包括增程器(发动机和发电机)、驱动电机及动力电池;而三者的参数匹配^[4]是保证动力系统优良性能的关键。

目前,增程式电动汽车的参数匹配过程主要包括以下几个步骤:首先,确定研究的目标车型并收集整车的基本参数;接着,明确关键部件的类型和参数;然后,建立整车模型并进行仿真分析;最后,选择优化变量和目标函数,以实现最佳的整车性能。Wang 等^[5]以混合动力汽车为研究对象,采用正交试验融合 Cruise 软件相结合的混合动力总成匹配方法。此方法减少传统电力系统匹配工作量,为动力系统匹配与优化提供一定的参考。Fu 等^[6]根据整车基本参数和性能指标,提出了一种基于多目标优化的混合动力汽车动力总成系统参数匹配优化方法来降低油耗和排放。王鲁闽等^[7]针对动力性、经济性需求问题,设计了串联式搅拌车混合动力系统。基于 C-WTVC(world transient vehicle cycle)循环工况仿真分析,较于传统柴油机动力搅拌车,节油率达到 21.4%。李永亮等^[8]针对增程式电动汽车动力系统参数匹配问题,提出了基于典型工况统计分析的匹配设计方法。运用粒子群算法对控制参数进行了多目标优化,百公里综合油耗下降 7.2%,平均充电电流下降 3.1%,提高了整车性能和电池使用寿命。钟勇等^[9]针对传统规则能量管理策略在应对增程式汽车多变行驶工况上的局限性,应用 Isight 软件对发动机工作点参数优化,优化结果表明,NEDC(new European driving cycle)工况、

WLTC(world light-duty vehicle test cycle)工况、混合工况的百公里油耗分别降低 3.51%、7.3%、8.5%,为增程式汽车定点控制策略优化提供了一种新方法。

综合上述研究方法,以增程式混合动力柠条收获机为研究对象,以整机动力性和续航里程为设计目标,完成对动力系统中增程器、驱动电机和蓄电池的参数设计。

1 总体设计及整机参数

整机以动力电池为主要动力源,增程器作为辅助动力源,动力通过驱动电机传递到减速器,再通过驱动桥传递到轮胎,如图 1 所示。集成式电驱动桥采用集体式布置,可将电机与车桥联接并布置在底盘上,该布置方式具有零部件数量少、传动效率高的优点。

2 关键参数设计

本文中柠条收获机整机质量、风阻系数等基本设计参数如表 1 所示,动力性和经济性等性能指标如表 2 所示。

表 1 柠条收获机基本参数

Table 1 Basic parameters of the caragana harvester

参数	数值
整机质量 m_0 /kg	8 000
满载质量 m /kg	10 000
驱动轮半径 r /mm	0.645
主减速器速比 i_0	3.92
风阻系数 C_D	0.3
迎风面积 A /mm ²	4.5
滚动阻力系数 f	0.1
传动系效率 η_t	0.92

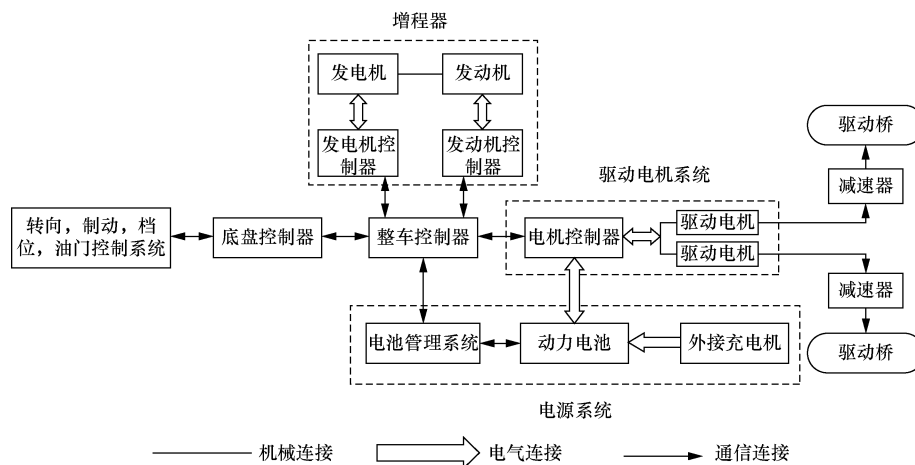


图 1 柠条收获机混合动力系统构成

Fig. 1 Power structure of the caragana harvester

表2 整机性能指标

Table 2 Overall performance indicators

参数	数值
最高车速 $v_{\max}/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	≥ 30
5 km/h的爬坡度 $\alpha/\%$	≥ 25
纯电动续航里程 S/km	5

2.1 驱动电机性能参数设计

2.1.1 驱动电机的峰值功率计算

采用永磁同步直流电机^[10],该驱动电机具有效率高、体积小、寿命长、可靠性高且维护成本低等优点,在新能源车辆中广泛应用^[11]。驱动电机的功率必须满足整机性能要求,其峰值功率一般由最高车速、爬坡度、匀速行驶性能参数确定^[12]。最高车速 v_{\max} 对应的峰值功率为 P_{m1} ,最大爬坡工况 α_{\max} 对应的峰值功率为 P_{m2} ,具体计算公式为

$$P = \frac{Fv}{3600\eta_t} \quad (1)$$

$$F = mgfi + mgf + \frac{C_D A v_{\max}^2}{21.15} \quad (2)$$

$$P_{m1} \geq \frac{v_{\max}}{3600\eta_t} \left(mgf + \frac{C_D A v_{\max}^2}{21.15} \right) \quad (3)$$

$$P_{m2} = \frac{v_i}{3600\eta_t} (mgf \cos\alpha + mgsin\alpha) \quad (4)$$

式中: F 为牵引力; i 为道路坡度; v 为行驶速度; η_t 为驱动效率; g 为重力加速度, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$; v_i 为整机爬坡车速; α 为坡角。

当 $\alpha = 0^\circ$,且最高车速 $v_{\max} = 30 \text{ km/h}$ 时,计算得 $P_{m1} \geq 89.289 \text{ kW}$ 。

当 $v_i = 5.0 \text{ km/h}$,且坡度 $\alpha^\circ = 16.5^\circ$;忽略空气阻力,计算得 $P_{m2} \geq 18.390 \text{ kW}$ 。

计算得到最高车速-峰值功率曲线、最大爬坡度-峰值功率曲线,如图2所示。

由此知峰值功率须满足关系式

$$P_m \geq \max(P_{m1}, P_{m2}) \quad (5)$$

考虑到整机行驶在某些复杂道路导致需求功率增大的因素,需驱动电机提供后备功率,所以将驱动电机峰值功率确定为 125 kW 。

2.1.2 驱动电机额定功率计算

$$P_{me} \geq \max\left\{P_{m1}, \frac{P_m}{\lambda}\right\} \quad (6)$$

式(6)中: P_{me} 为驱动电机额定功率; λ 为电机过载系数,若 $\lambda = 2$,得 $P_{me} = 62.5 \text{ kW}$ 。

2.1.3 驱动电机最高转速和额定转速计算

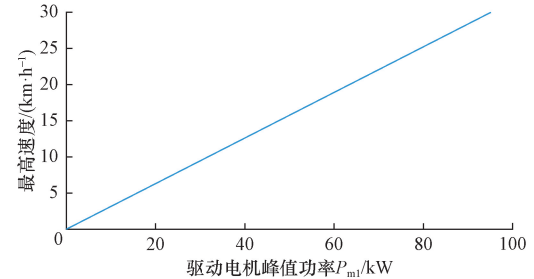
$$n_{\max} = \frac{60v_{\max}i}{3.6 \times 2\pi r} \quad (7)$$

式(7)中: n_{\max} 为电机最高转速。将表1与表2中参数代入式(7),计算得 $n_{\max} = 6000 \text{ r/min}$ 。

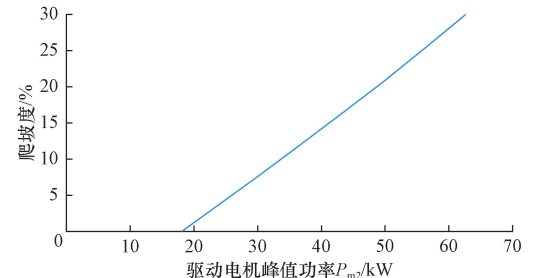
$$n_{me} = \frac{n_{\max}}{\beta} \quad (8)$$

式(8)中: n_{me} 为额定转速; β 为扩大恒功率系数,若 $\beta = 2$,得电机额定转速 $n_{me} = 3000 \text{ r/min}$ 。

考虑到收获机作业速度较低,电机选型为中速永磁同步电机,基本参数如表3所示。



(a) 电机功率-最高车速曲线



(b) 电机功率-爬坡度曲线

图2 动力性与驱动电机峰值功率

Fig. 2 Power performance and peak power of driving motor

表3 驱动电机选型参数

Table 3 The driving motor basic parameters

参数	数值
额定功率 P_{me}/kW	62.5
峰值功率 P_m/kW	125
额定扭矩 $T_{me}/(\text{N}\cdot\text{m})$	175
最大扭矩 $T_m/(\text{N}\cdot\text{m})$	410
额定转速 $n_{me}/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	3000
最高转速 $n_{\max}/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	6000
额定电压/V	540

2.2 动力电池参数选型设计

根据驱动电机的额定电压,电池组电压设定为 540 V 。同时,考虑电池放电效率 $\eta_{d1} = 90\%$ 以及驱动电机及控制器的运行效率 $\eta_{d2} = 98\%$,可以计算出所需的动力电池功率 P_1 为

$$P_1 = \frac{P_m}{\eta_{d1}\eta_{d2}} \quad (9)$$

计算得: $P_1 = 141.723 \text{ kW}$ 。

采用等速法,即根据收获机满载等速 $v = 5 \text{ km/h}$ 行驶时的续航里程计算动力电池组的总能量 W 和额定容量 C 为

$$W \geq \frac{P_v S}{(\text{SOC}_1 - \text{SOC}_2)\eta_1\eta_{d2}v} \quad (10)$$

$$C \geq \frac{mgfS}{3.6U\eta_{mc}\eta_{di}\eta_{d2}\eta_t} \quad (11)$$

式中: SOC_1 为动力电池初始容量, $SOC_1 = 100\%$; SOC_2 为动力电池末容量, $SOC_2 = 10\%$; p_v 为 $v_b = 5$ km/h 时的功率。动力电池组电压 $U = 540$ V; 续航里程 $S = 5$ km, 动力电池放电深度 $\eta_{mc} = 90\%$ 。计算得 $W \geq 18.638$ kW·h, $C \geq 34.440$ A·h。

为满足上述参数要求, 选磷酸铁锂 $LiFePO_4$ 电池组, 其单体电压为 3.6 V, 基本参数如表 4 所示。

表 4 动力电池选型参数
Table 4 Power batteries parameters

电池能量 $W/(kW \cdot h)$	单体电池数量	电池组电压 U/V	电池组容量 $C/(A \cdot h)$
19	150	540	40

2.3 增程器系统设计

2.3.1 发动机选型设计

发动机功率设计原则是: 在兼顾发动机效率的情况下, 发动机输出功率不小于驱动电机和附件的功率和^[13], 最高车速时发动机额定输出功率计算公式为

$$P_e \geq \frac{v_{max}}{3600\eta_t\eta_g} \left(mgf + \frac{C_D A v_{max}^2}{21.15} \right) \quad (12)$$

式(12)中: η_g 为发电机效率, $\eta_g = 0.93$; 计算得 $P_e \geq 99.987$ kW, 考虑整机附属电气设备消耗功率等因素, 选用四缸发动机额定功率为 129 kW, 峰值扭矩为 2 200 r/min(表 5)。

表 5 发动机选型参数
Table 5 Engine specification

额定功率 P_e/kW	峰值扭矩 $n/(r \cdot min^{-1})$	排量 L
129	2 200	4.837

2.3.2 发电机选型设计

在结构上, 发动机与发电机直连, 因此二者的工作转速及机械输出功率须保持一致, 以满足可靠性、稳定性要求。计算得发电机额定功率为 $P_{ge} = P_e \eta_g = 100$ kW。发电机选型参数如表 6 所示。

基于部件参数匹配, 合理试验数据以优化动力系统模型。为提升发动机效能, 选定的高效区功率须高于常用工作点效率预测, 避免功率过低导致的高负荷低效运行。同时, 过大功率加剧成本及空间负担。因此, 合理确定发动机功率, 是平衡性能与经

表 6 发电机选型参数

Table 6 Generator parameters

额定功率 P_{ge}/kW	额定转速 $n /$ $(r \cdot min^{-1})$	峰值功率 P_g/kW	最高转速 $n_{max} /$ $(r \cdot min^{-1})$
100	1 500	137	3 000

济性的关键。其中驱动电机效率、发电机效率以及发动机万有特性曲线如图 3 所示。

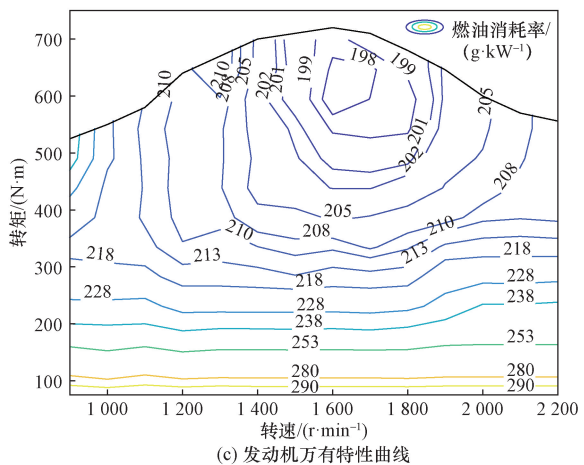
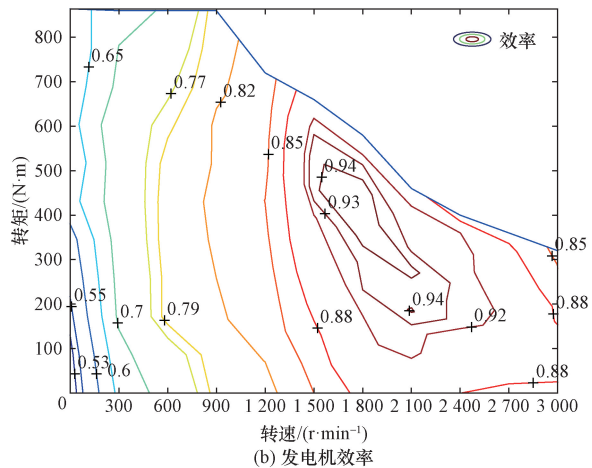
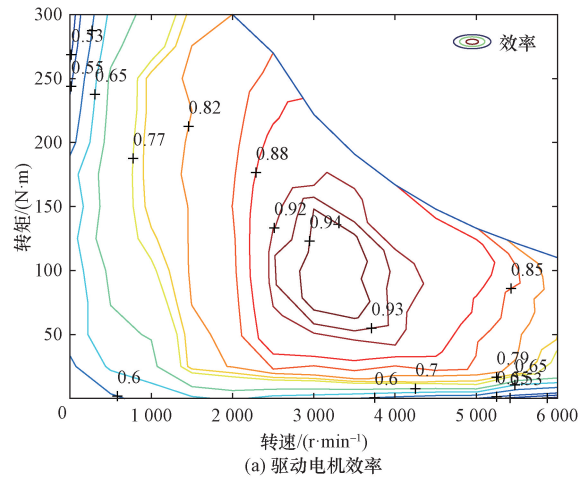


图 3 电机和发动机试验数据

Fig. 3 Motor and engine test data

3 动力系统性能仿真

3.1 建立仿真模型

基于 AVL/Cruise 建立整机动力系统^[14]模型如图 4 所示。

采用恒温式能量管理策略^[15], 该策略是通过 SOC

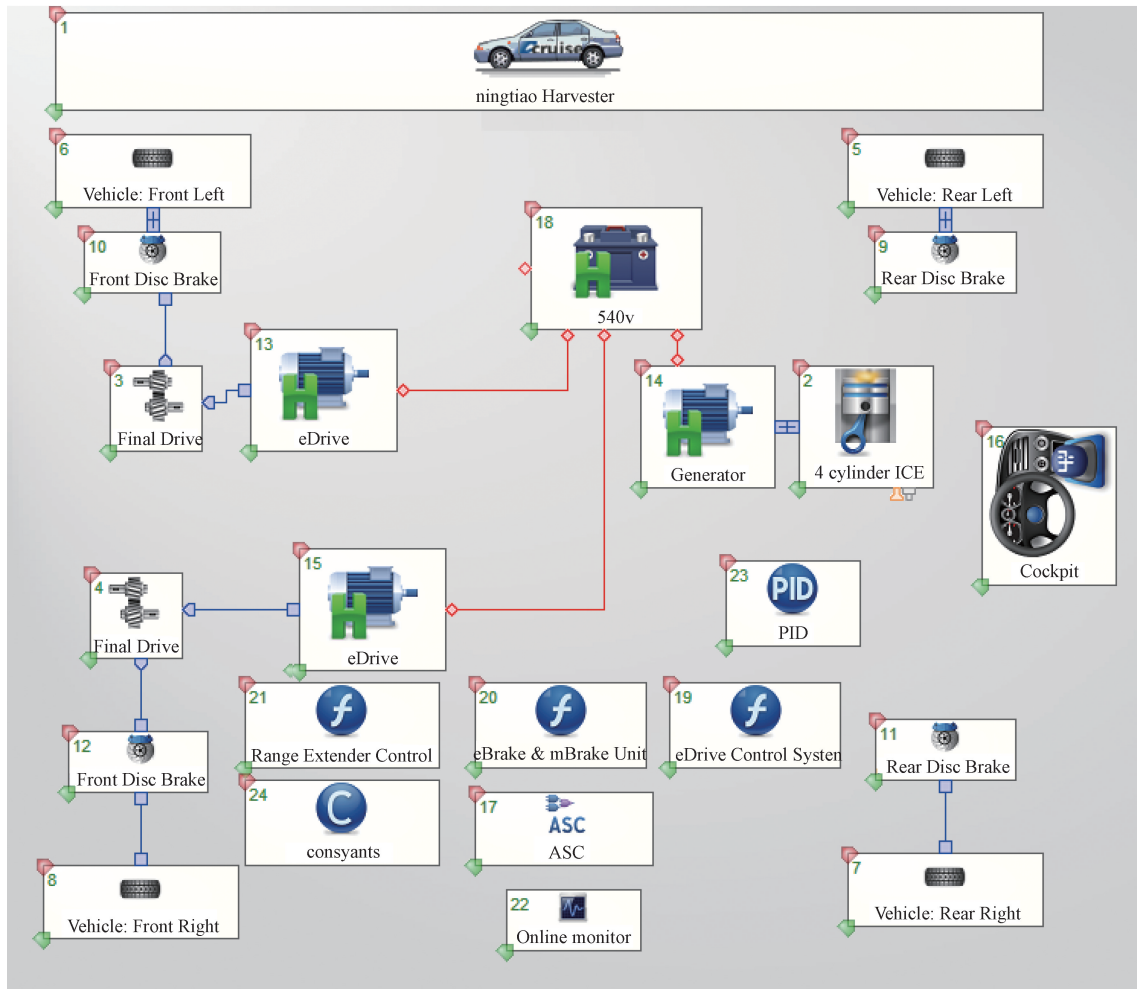


图4 柠条收获机动力系统仿真模型

Fig. 4 Simulation model of dynamic system of the caragana harvester

值控制增程器的启停。当SOC低于设定启动阈值时,增程器启动,发动机在预定的工作点以恒定功率运行;当SOC达到停机阈值时,增程器关闭。工作点根据MAP图设置在发动机最佳燃油效率区间,确保发动机持续在高效状态下工作,油耗维持在 $198 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,处于高效区间。通过Cruise软件中Function模块搭建恒温控制策略^[15]。

收获机工况^[16]分别由非作业工况和作业工况组成。如图5所示,0~800 s为非作业阶段;800~1 100 s为柠条收获机单程作业阶段,包括加速、速度波动和减速阶段;1 100~1 180 s为柠条收获机掉

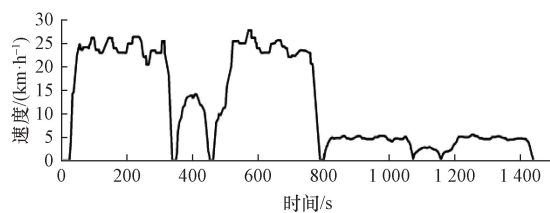


图5 柠条收获机循环工况

Fig. 5 Cycle condition of the caragana harvester

头阶段,1 180~1 430 s为柠条收获机返程作业阶段,如此往复直至完成整片土地的收获作业。

3.2 仿真结果分析

3.2.1 能量管理策略分析

动力电池SOC初始值越高,直接影响到续航里程。为方便研究在增程模式下系统的效能,可将初始SOC值设定为一个相对较低值,而SOC上限值则由特定策略决定,下限值则是由电池固有功能决定,以避免SOC过低使电池的内阻增加,从而减低放电效能,所以SOC下限值不高于某一特定值。根据本文中得到的电池特性数据,设置控制参数SOC为20%~60%,选择发动机工作效率较高的转速 $1 700 \text{ r}/\text{min}$ 、扭矩 $600 \text{ N} \cdot \text{m}$ 处,在实际工况下进行仿真,以确定前文设计参数是否符合实际工况要求。

仿真结果如图6所示。在0~300 s内,整机动力须由动力电池提供,电池电量不断减少。在300~800 s期间,SOC达到20%后,增程系统开启,发动机发电机组输出功率跟随整机需求功率。在800 s后,增程器关闭。这一过程说明恒温控制策略可行。

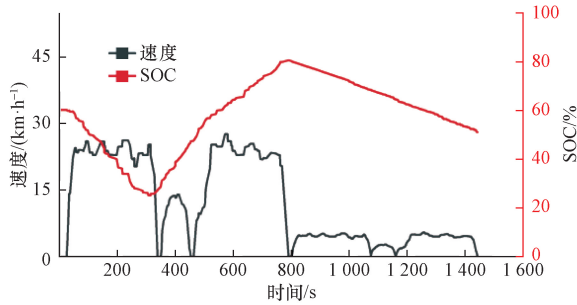


图6 工况下的车速及SOC变化

Fig. 6 Vehicle speed and SOC changes under operating conditions

3.2.2 最高车速结果分析

最高车速是衡量柠条收获机动力性的一项重要指标,仿真得到柠条收获机最高车速为33.621 km/h,如图7所示。满足最高车速 ≥ 30 km/h的设计要求。

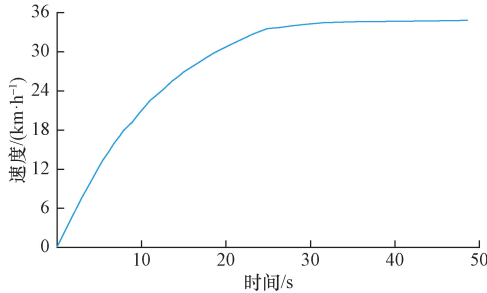


图7 最高速度仿真

Fig. 7 The maximum speed

3.2.3 最大爬坡度仿真

由图8可知,整机最大爬坡度为25.845%,满足最大爬坡度 $\geq 25\%$ 的设计要求;爬坡车速为5 km/h对应的爬坡度为25.680%,满足整机在25%坡度上爬坡时的速度 ≥ 5 km/h的设计要求。

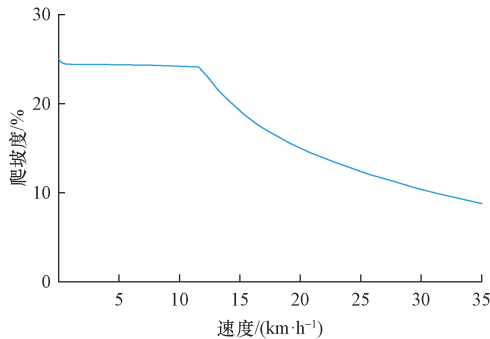


图8 爬坡度

Fig. 8 Gradeability

3.2.4 续驶里程仿真分析

动力电池荷电状态(SOC)上下限分别设置为90%、20%,纯电动续驶里程仿真结果如图9所示。在0~800 s期间,续驶里程随着车速上升,续驶里

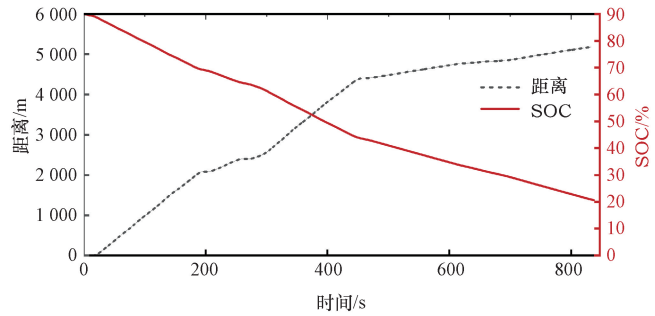


图9 纯电动续驶里程仿真结果

Fig. 9 Simulation results of pure electric vehicle range

程为4.1 km,0~1440 s期间,续驶里程为4.880 km,满足纯电动模式下里程数的设计要求。

4 现场试验与仿真结果对比分析

4.1 最高车速试验

在路面平直、坚实,跑道长150~250 m,路基宽不小于10 m;跑道纵向坡道不大于百分之一^[17],收获机以最高车速通过测试段,用秒表记录柠条收获机通过测试区域时间和观察驾驶员车速表的方法直接测量整车,重复5次,均在满载条件下进行,以精确测定并获取其最高速度数据。如表7所示。

表7 柠条收获机最高车速

Table 7 The maximum speed of the caragana harvester

试验数据	1	2	3	4	5
车速/(km·h ⁻¹)	30.509	30.622	30.614	30.597	30.614

由表7可知:实车测试中在满载载荷状态下的试验平均值为30.591 km/h,通过仿真的结果为33.621 km/h,仿真值与试验值误差为9.012%。在满载载荷下的最高车速与仿真结果误差较小,进一步验证了Cruise软件对整机仿真的可靠性。

4.2 爬坡性能试验

在常温地区,风速不超过3.3 m/s,同等坡度纵坡道长不少于25 m,宽不少于5 m和同等坡度侧坡道长不少于50 m,宽不少于6 m条件下,使整机对正试验近似25%纵坡和测坡,车首向上以5 km/h速度驶入坡道,试验进行五次,顺利通过不少于2次,记录车辆状态和通过情况,如表8所示。

实验得在满载下整机平均爬坡度为27.500%;实车测试与仿真结果误差为6.404%。验证了仿真结果的可靠性,并且参数设计满足性能需求。

表8 爬坡度

Table 8 Climbing

试验数据	1	2	3	4	5
坡度/%	30.500	26.000	28.000	24.000	29.000

5 结论

针对现有柠条收获机设计了一种增程式混合动力系统,完成了其增程器、驱动电机、动力电池的选型设计和参数匹配,并在Cruiser仿真平台上建立了整机模型,结合现场试验得到如下结论。

(1)通过实际工况统计分析,更好地考虑了实际工况对整机匹配的影响,从而提高了整机设计的工况适应性。

(2)通过整机现场试验仿真结果得出:最高速度仿真结果为33.621 km/h,现场试验为30.591 km/h,仿真值与试验值误差为9.012%;最大爬坡度仿真结果为25.680%,现场试验为27.500%,仿真值与试验值误差为6.404%;结果表明,所设计的增程式混合动力柠条收获机的动力性和经济性更加满足整机性能指标要求。

参 考 文 献

- [1] 陈月锋,董世平,邢东伦,等. 柠条平茬收获现状及发展建议[J]. 农业工程, 2020, 10(7): 30-34.
Chen Yuefeng, Dong Shiping, Xing Donglun, et al. Current situation and development suggestions for the harvesting of Ningtiao flat stubble [J]. Agricultural Engineering, 2020, 10 (7): 30-34.
- [2] 苏飞保,王振华,翟霞霞,等. 柠条机械化收获技术与装备研究现状及发展趋势[J]. 农业工程, 2021, 11(10): 20-27.
Su Feibao, Wang Zhenhua, Zhai Gaixia, et al. Research status and development trends of mechanized harvesting technology and equipment for Ningtiao [J]. Agricultural Engineering, 2021, 11 (10): 20-27.
- [3] 闫德超,马超,杨坤,等. 基于工况与粒子群优化的增程汽车能量管理策略开发[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(26): 11396-11404.
Yan Dechao, Ma Chao, Yang Kun, et al. Development of energy management strategy for extended range vehicles based on operating conditions and particle swarm optimization [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(26): 11396-11404.
- [4] 宋桂秋,王凯,李一鸣. 增程式电动汽车多模式切换控制策略与性能仿真[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(31): 94-100.
Song Guiqiu, Wang Kai, Li Yiming. Multi mode switching control strategy and performance simulation for extended range electric vehicles [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16 (31): 94-100.
- [5] Wang X, Liu S, Ye P, et al. Study of a hybrid vehicle powertrain parameter matching design based on the combination of orthogonal test and cruise software[J]. Sustainability, 2023, 15(14): 10774.
- [6] Fu X, Zhang Q, Tang J, et al. Parameter matching optimization of a powertrain system of hybrid electric vehicles based on multi-objective optimization[J]. Electronics, 2019, 8(8): 8080875.
- [7] 王鲁闽,武涛,缪雪龙. 混合动力搅拌车动力系统参数匹配与仿真[J]. 农业装备与车辆工程, 2022, 60(10): 93-97.
Wang Lumin, Wu Tao, Miao Xuelong. Parameter matching and simulation of hybrid mixer truck power system [J]. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering, 2022, 60(10): 93-97.
- [8] 李永亮,黄英,王绪,等. 增程式电动汽车动力系统参数匹配及控制策略优化[J]. 汽车工程学报, 2021, 11(3): 177-190.
Li Yongliang, Huang Ying, Wang Xu, et al. Parameter matching and control strategy optimization of extended range electric vehicle power system [J]. Journal of Automotive Engineering, 2021, 11 (3): 177-190.
- [9] 钟勇,李方舟,邱煌乐,等. 增程式电动汽车发动机的多工作点控制策略[J]. 农业装备与车辆工程, 2024, 62(1): 85-89.
Zhong Yong, Li Fangzhou, Qiu Huangle, et al. Multi operating point control strategy for extended range electric vehicle engines [J]. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering, 2024, 62(1): 85-89.
- [10] 李舒彬,周腊吾,王小菲,等. 基于多轮进化算法的车用双层磁钢永磁同步电机参数优化设计[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(23): 9891-9898.
Li Shubin, Zhou Lawu, Wang Xiaofei, et al. Optimization design of parameters for double-layer magnetic steel permanent magnet synchronous motor for vehicles based on multi wheel evolutionary algorithm [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24 (23): 9891-9898.
- [11] 王留步. 小型纯电动田间转运车驱动系统的参数匹配与优化研究[D]. 重庆:西南大学, 2018.
Wang Liubu. Research on parameter matching and optimization of drive system for small pure electric field transport vehicle [D]. Chongqing: Southwest University, 2018.
- [12] 余志生. 汽车理论[M]. 北京:机械工业出版社, 2000.
Yu Zhisheng. Automotive theory [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2000.
- [13] 吴志伟. 增程式电动客车动力系统参数匹配与运行优化研究[D]. 杭州:浙江大学, 2021.
Wu Zhiwei. Research on parameter matching and operation optimization of extended range electric bus power system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [14] 叶心,张腾,卢金涛,等. 基于多目标遗传算法的混合动力汽车能量管理优化[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(21): 9389-9397.
Ye Xin, Zhang Teng, Lu Jintao, et al. Optimization of energy management for hybrid electric vehicles based on multi objective genetic algorithm [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22 (21): 9389-9397.
- [15] 罗祥. 增程式电动汽车控制策略设计与优化算法研究[D]. 吉林:吉林大学, 2022.
Luo Xiang. Research on control strategy design and optimization algorithm for extended range electric vehicles [D]. Jilin: Jilin University, 2022.
- [16] 陈慧勇,梁伟智,刘志伟,等. 混合动力重卡标定参数工况适应性[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(8): 3353-3358.
Chen Huiyong, Liang Weizhi, Liu Zhiwei, et al. Hybrid heavy-duty truck calibration parameters adaptability to operating conditions [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21 (8): 3353-3358.
- [17] 李明生,叶进,王留步,等. 小型纯电动田间转运车设计[J]. 农机化研究, 2019, 41(11): 259-263.
Li Mingsheng, Ye Jin, Wang Liubu, et al. Design of small pure electric field transport vehicles [J]. Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(11): 259-263.