

增程式客车动力系统参数计算及仿真分析

马钊骢¹, 李惠林^{1*}, 何 锋¹, 边东生²

¹贵州大学机械工程学院, 贵州 贵阳

²奇瑞万达贵州客车股份有限公司, 贵州 贵阳

收稿日期: 2023年9月16日; 录用日期: 2023年11月9日; 发布日期: 2023年11月16日

摘 要

针对目前旅游出行, 新能源客车存在动力性能不足及续航里程焦虑问题, 本文基于某城市客车匹配出一款增程式客车。根据目标任务需求、工作场景、整车驱动结构布置和行驶动力性能等, 对客车增程器系统、驱动电机及动力电池进行参数匹配计算。利用AVL-CRUISE软件搭建整车模型、设置仿真任务并验证了匹配的合理性, 结果表明: 在中国普通客车行驶工况(CHTC-C)下车辆运动跟随情况良好、客车最高车速达到99 km/h、0~50 km/h加速时间为17.99 s较指标要求提升21.78%、最大爬坡度20.8%、续航里程为692 km相比指标要求提高了38.4%, 各方面均达到指标要求。

关键词

增程式, 客车, 参数匹配, AVL-CRUISE

Calculation and Simulation Analysis of Power System Parameters of Range-Extended Buses

Xingcong Ma¹, Huiling Li^{1*}, Feng He¹, Dongsheng Bian²

¹College of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou

²Chery Wanda Guizhou Bus Co., Ltd., Guiyang Guizhou

Received: Sep. 16th, 2023; accepted: Nov. 9th, 2023; published: Nov. 16th, 2023

Abstract

In view of the current tourism travel, new energy buses have insufficient power performance and

*通讯作者。

文章引用: 马钊骢, 李惠林, 何锋, 边东生. 增程式客车动力系统参数计算及仿真分析[J]. 建模与仿真, 2023, 12(6): 5324-5336. DOI: 10.12677/mos.2023.126484

crusing range anxiety, and this paper matches a range extension bus based on a city bus. According to the target task requirements, working scenarios, vehicle drive structure layout and driving power performance, the parameters of the bus range extender system, drive motor and power battery are matched and calculated. The AVL-CRUISE software was used to build the vehicle model, set the simulation task and verify the rationality of the matching, and the results showed that the vehicle motion following was good under the Chinese ordinary bus driving condition (CHTC-C), the maximum speed of the bus reached 99 km/h, and the acceleration time of 0~50 km/h was 17.99 s, which was 21.78% higher than the index requirements, the maximum climbing degree was 20.8%, and the cruising range was 692 km, which was 38.4% higher than the index requirements. All aspects meet the target requirements.

Keywords

Range Extension, Buses, Parameter Matching, AVL-CRUISE

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在当前低碳环保及能源危机的背景下，2021年《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰和工作的意见》指出要加快可再生能源技术发展及关键技术的研发和应用[1]。现今交通工具成为了制约旅游业发展的决定因素，传统燃油客车因排放对环境有污染且运营成本高逐渐被市场淘汰；纯电客车动力性能差且服务于旅游景点之间繁重的运输作业使得车辆需要频繁充电再加之充电时间长，并不适合作为旅游行业主流的交通工具。增程式客车相比传统燃油客车和纯电动客车，既有动力电池作为动力源又有发动机和发电机组成的增程器用于发电，解决了用于旅游出行的新能源客车动力性能差和续航里程忧虑的问题。

盛广庆[2]采用多目标优化控制策略对增程式汽车的增程器工作点进行设计，以提高增程器系统排放性能及燃油经济性；王玉猛[3]设计了一款双驱动四驱增程式电动汽车，并且基于所匹配动力系统设计了驱动控制策略和电池控制策略，使汽车有更好的燃油经济性，同时可有效减少电池充放电频率延长寿命；刘钊[4]对增程式电动客车动力系统研究结合了增程式客车动力性能及续驶里程方面，提出了一种关于动力系统匹配及整车能效提升的方案。但目前大量学者主要集中于研究增程式汽车的储能装置中动力电池的技术开发，动力系统的设计优化，以及能量管理控制策略的开发及设计。突出研究的是某一板块，而缺少对整车动力系统的研究。本文动力结构布置选用串联式系统，对增程器系统、驱动电机及动力电池系统进行参数匹配；在AVL-CRUISE软件上面搭建整车模型及设置仿真任务。结果表明，在中国普通客车CHTC-C行驶工况下客车速度跟随状态良好，动力性能达到指标，即增程式客车参数匹配合理。

2. 动力系统能量流

增程式客车因为同时兼有增程器和动力电池，所以其具备增程和纯电动两种工作模式[5]。其动力系统能量传输示意如图1所示，在客车动力电池电量未低于设定临界点30%则为纯电动行驶；当低于临界点或者客车纯电输出功率不足以满足整车行驶功率时，则增程器开始工作与动力电池共同满足整车需求

功率；若增程器输出功率大于整车行驶所需功率，则增程器满足整车行驶所需功率的同时多余的能量提供给动力电池充电；当客车处于驻车或者制动模式时增程器输出功率全部提供给动力电池充电。

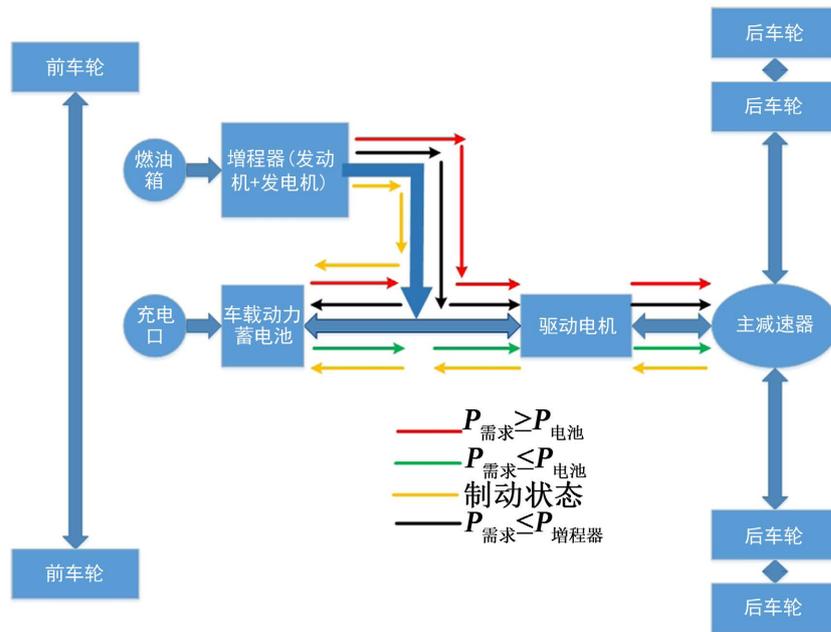


Figure 1. Schematic diagram of the energy flow of the power system of the extended-range tourist bus
图 1. 增程式客车动力系统能量流示意

3. 动力系统参数匹配及选型

根据整车动力学进行各部件的参数匹配，参照《GB/T 18386.2022 重型商用车实验方法》[6]，《GB/T 19752-2005 混合动力电动汽车动力性能实验方法》[7]得出如表 1 所示增程式客车参数指标和表 2 所示性能要求。

Table 1. Key design parameters of extended-range buses
表 1. 增程式客车的关键设计参

设计参数	参数值
外廓尺寸长(mm)	11,990
外廓尺寸宽(mm)	2550
外廓尺寸高(mm)	3480
整备质量(kg)	11,800
最大总质量(kg)	17,900
主减速比 i_0	6.14
传动系数效率 η_t	0.96
迎风面积 A (m ²)	8.9
空气阻力系数 C_D	0.75
车轮半径 r (mm)	478.25

Table 2. Passenger car dynamic performance requirements
表 2. 客车动力性能要求

参数指标	参数要求
最高车速(km/h)	≤100
最大爬坡度(%)	≥20
0~50 km/h 加速时间(s)	≤23

3.1. 驱动电机参数匹配与选型

驱动电机在增程式客车运行时将整车的电能和机械能进行转化，是提供车辆所需驱动力的唯一输出件，其输出功率的大小直接影响客车动力性。本文客车的使用场景决定了它必须要可以满足频繁的启停及加减速，要能够在恶劣情况下工作，稳定性要求高。相较于直流电机、感应电机而言，永磁同步电机具有功率密度大、效率高、可靠性好等优势[8]，满足增程式客车驱动电机的行驶要求。驱动电机的匹配包括功率、转速、转矩；其中峰值功率、最高转速及峰值扭矩，与整车的最高车速、最大爬坡度和加速时间密切相关；额定功率、额定转速和额定转矩与整车稳定特性有关。

3.1.1. 功率匹配

车辆匹配驱动功率必须满足车辆的行驶需求及动力性能：

① 最高车速模式：增程式客车在水平良好路面上以最高车速行驶

$$P_m^1 = \frac{U_{\max}}{3600\eta_t} \left(mgf + \frac{C_D A U_{\max}^2}{21.15} \right) \quad (1)$$

其中 $f = 0.0076 + 0.000056U_{\max}$ ，带入相关数据得出

$$P_m^1 = 158.3 \text{ kW}$$

② 最大爬坡度模式：

$$P_m^2 = \frac{U_p}{3600\eta_t} \left(mgf \cos \alpha_{\max} + mg \sin \alpha_{\max} + \frac{C_D A U_p^2}{21.15} \right) \quad (2)$$

设计中要求客车以 20 km/h 速度通过 20% 坡，所以 $U_p = 20 \text{ km/h}$ ， $\alpha = \arctan 0.2$ 。得出

$$P_m^2 = 208.5 \text{ kW}$$

③ 0~50 km/h 加速模式：

$$P_m^3 = \frac{U_a}{3600\eta_t} \left(mgf + \delta m \frac{dU_a}{3.6dt} + \frac{C_D A U_a^2}{21.15} \right) \quad (3)$$

U_a 为加速终止速度，计算得

$$P_m^3 = 206.7 \text{ kW}$$

驱动电机功率 $P_e \geq \max \{ P_e^1, P_e^2, P_e^3 \}$

$$P_m = 208.5 \text{ kW}$$

设置峰值功率为 210 kW，额定功率 $P_{me} = \frac{P_m}{\lambda}$ ， $\lambda \in (1.5, 2.5)$ 为过载系数，此处为 2，则

$$P_{me} = 105 \text{ kW}。$$

3.1.2. 转速匹配

驱动电机最高转速与车辆的最高车速息息相关：

$$n_{emax} = \frac{i_0 U_{max}}{0.377r} \quad (4)$$

得出 $n_{emax} = 3407 \text{ r/min}$ ，确定转速为 3500 r/min。

额定转速 $n_e = \frac{n_{emax}}{\beta}$ ， β 为基数比取值在 2~3，此处为 2.5，得

$$n_e = 1400 \text{ r/min}。$$

3.1.3. 转矩匹配

峰值扭矩 $T_{emax} = \frac{9550P_m}{n_e}$ ，得

$$T_{emax} = 1432.5 \text{ Nm}。$$

3.2. 增程器参数匹配与选型

增程器是在动力电池 SOC 低于 30% 或者汽车所需驱动功率大于电池输出功率时才会开启，它由发动机和汽车启动发电一体机(ISG)组成，所以其匹配与选型包括两方面。对比柴油机、汽油机、转子发动机等优缺点以及考虑增程器的使用频率和场景，决定选用成本低，比功率高的四缸四冲程汽油机作为增程器用发动机；ISG 电机的选型与驱动电机选型依据一样，对比分析决定选用永磁同步电机。

① 根据增程式客车在电量较低时增程器工作以满足整车行驶，参照 GB/T18386.2-2022 中客车恒速段最低车速为 80 km/h，得增程器输出功率为：

$$P_{APU} = \frac{U_{a2}}{3600\eta_t} \left\{ mgf + \frac{C_D A U_{a2}^2}{21.15} \right\} + P_s \quad (5)$$

式中： U_{a2} 为巡航车速 80 km/h； P_s 为空调损耗功率，车辆设计要求空调制冷量不小于 37 kW，按照整体式冷暖空调 2 级能耗的标准能效比值 3.1 [9] 得出 $P_s = 12 \text{ kW}$ ，则

$$P_{APU} = 107.81 \text{ kW}$$

② 发电机输出功率：

$$P_E = \frac{P_{APU}}{\eta_{mc}} \quad (6)$$

η_{mc} 为功率变换器效率，取值为 95%，

得 $P_E = 113.48 \text{ kW}$ 。

发动机输出功率为：

$$P_{ICE} = \frac{P_E}{\eta_m} \quad (7)$$

η_m 为发电机效率，取值为 90%，

得 $P_{ICE} = 126.09 \text{ kW}$ 。

3.3. 燃油箱参数匹配

燃油箱容积由所设计的车辆增程续航里程决定，确保车辆续航里程满足要求。

$$V = \frac{P_{U_{a2}} S \varepsilon_e}{1000 \rho U_{a3}} \quad (8)$$

本文客车综合续航里程为 500 km，设定巡航车速 80 km/h 下续航里程为 400 km；按照设定的 40 km/h 等速测试法纯电动工况下纯电动续航里程为 100 km。

式中： $P_{U_{a2}}$ 为巡航车速 U_{a2} 对应的发动机功率， S 为增程里程， ε_e 为发动机燃油消耗率，取值 260 g/kWh， ρ 为汽油密度，取值 0.725 kg/L。得出 $V = 226.1$ L，取整 230 L。

3.4. 动力电池参数匹配与选型

作为增程式客车储能的唯一部件，动力电池的选择不仅关乎整车的动力性能还会影响车辆制造成本，表 3 所示为常见几种动力电池性能对比。增程式客车中动力电池主要有如下几点要求：

- ① 安全性好，成本低，寿命长；
- ② 能量密度大且充放电效率高，可满足整车行驶功率；
- ③ 长时间放电及频繁放电力强，适应增程式客车使用场景。

Table 3. Comparison of battery parameters

表 3. 电池参数对比

性能	镍氢电池	铅酸电池	锰酸锂电池	磷酸铁锂电池
成本	高	低	中	低
比功率(W/kg)	170~220	50~80	260~300	1500~2300
比能量(Wh/kg)	70~80	20~50	150~250	110~160
安全性	镍有毒	铅有毒	无毒	无毒
循环寿命	500~200	300~1500	300~500	3000

如表 3 对比市场上成熟运用的四种电池：镍氢电池、铅酸电池、锰酸锂电池和磷酸铁锂电池，决定选用循环寿命更长、成本更低、安全性更好以及比功率和比能量更好的磷酸铁锂电池。

根据《GB/T 31466-2015》[10]，将电动汽车动力电池系统的电压划分为 6 个等级，规定电动汽车的电池电压范围为 144~576V。本文选择某企业生产的磷酸铁锂电池，标称电压 $U_{cell} = 3.2$ V，依据所计算的驱动电机数据与市场现有型号配对，选用额定电压 U_e 为 540 V 的某款驱动电机；按照动力电池组电压 U_{bat} 要满足电动机额定电压 U_e 的要求，故取磷酸铁锂电池标称电压整数倍可得 $U_{bat} = 544$ V。

动力电池的选型及参数匹配还要满足整车的纯电动行驶，故需要进行峰值功率和能量的验证。

动力电池峰值功率的确定

动力电池系统的最大功率需满足汽车的动力性，满足电机最大输出功率输出值：

$$P_{bmax-out} = \frac{KC_b U_{bat}}{1000} \geq \frac{P_m}{\eta_{me}} + P_s \quad (9)$$

$$C_b \geq \frac{1000 \left(\frac{P_m}{\eta_{me}} + P_s \right)}{K U_{bat}} \quad (10)$$

式中： C_b 为电池容量， K 为磷酸铁锂电池最大放电倍率 5， U_{bat} 为电池组电压， η_{me} 为驱动电机效率为 90%，得 $C_b \geq 90.2 \text{ Ah}$ ，根据市场现有磷酸铁锂电池型号取 $C_b = 92 \text{ Ah}$ 。

同时电池能量又要满足整车的纯电动续航里程[11]，即：

$$E_b \geq \frac{\left(mgf + \frac{C_D A U_a^2}{21.15} \right) l}{3600 \eta_i \eta_{me} \eta_{mc} (SOC_{initial} - SOC_{final})} \tag{11}$$

式中： E_b 为动力蓄电池的能量， P_i 为客车按 GB/T 18386 规定的 40 km/h，等速测试法行驶所需的功率， l 为纯电续航里程 100 km， $SOC_{initial}$ ， SOC_{final} 分别为电池初始和终止荷电状态，根据学者研究发现 SOC 在 90%~30%之间为最佳工作区[4]，本文设定 $SOC_{initial}$ 为 100%、 SOC_{final} 为 30%，可得

$$E_b \geq 113.54 \text{ kWh}$$

同时功率匹配时 $U_{bat} = 544 \text{ V}$ 、 $C_b = 92 \text{ Ah}$ ，故匹配的电池组所能提供的电能为：

$$E = U_{bat} \times C_b \div 1000 = 50.048 \text{ kWh}$$

电池组并联数为： $E_b \div E = 2.26$ ，取值 3，此时电池组提供纯电行驶电能为 105.1 kWh。

综上可得到如表 4 所示各部件匹配参数。

Table 4. Powertrain matching parameters

表 4. 动力系统匹配参数

动力系统部件	项目	参数
永磁同步驱动电机	峰值转速(r/min)	3500
	基速(r/min)	1400
	峰值功率(kW)	210
	额定功率(kW)	105
	峰值扭矩(Nm)	1432.5
发动机	排量(L)	2
	峰值功率(kW)	126.09
	油箱容积(L)	230
动力电池	额定电压(V)	544
	单体电压(V)	3.2
	单体容量(Ah)	92
	串并联数	3P170S

4. 基于 AVL-CRUISE 的增程式客车建模与仿真分析

4.1. 整车模型搭建

AVL-CRUISE 是一款前向仿真软件，主要用于车辆动力学仿真研究与分析，动力系统参数匹配与优化和整车性能的模拟计算。使用 AVL-CRUISE 研究员可以仿真得出汽车的动力性能及燃油经济性等。

在完成上述分析计算及运行方式的逻辑基础上，将所配型的部件参数及厂家实验数据输入到 AVL-CRUISE 软件上面的模块，完成如图 2 所示对整车模型的搭建。

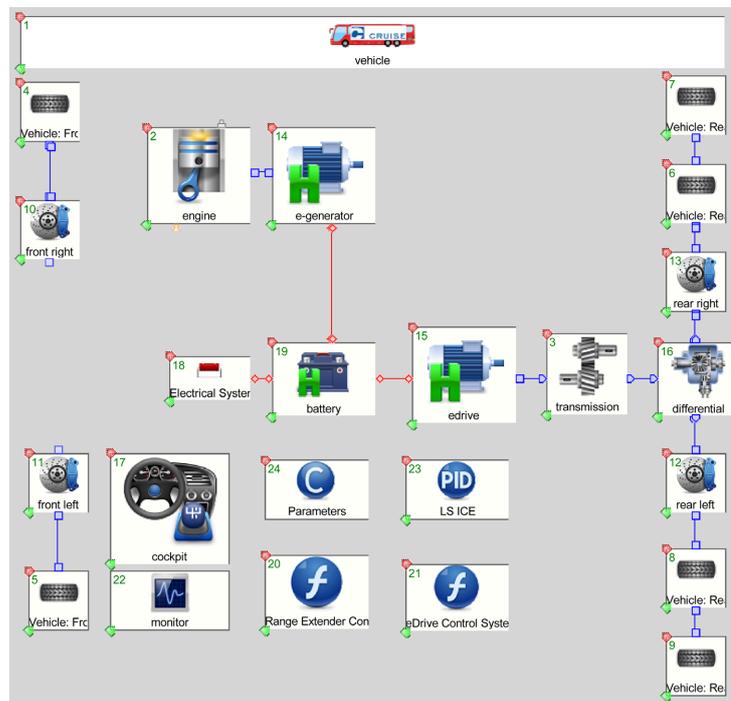


Figure 2. Model of a range extender tourist bus
图 2. 增程式客车整车模型

4.2. 仿真分析

在整车模型基础上设置动力性仿真任务[12]验证客车是否满足最大爬坡度、最高车速、0~50 km/h 加速能力；同时仿真分析本文增程式客车在中国普通客车行驶工况(CHTC-C)下的跟随情况和续航里程。

4.2.1. 中国普通客车行驶工况

CHTC-C 工况包括市区(1 部)，城郊(2 部)和高速(3 部) 3 个速度区间，它能够更加真实的表示普通客车的运行情况，工作曲线如图 3 所示：

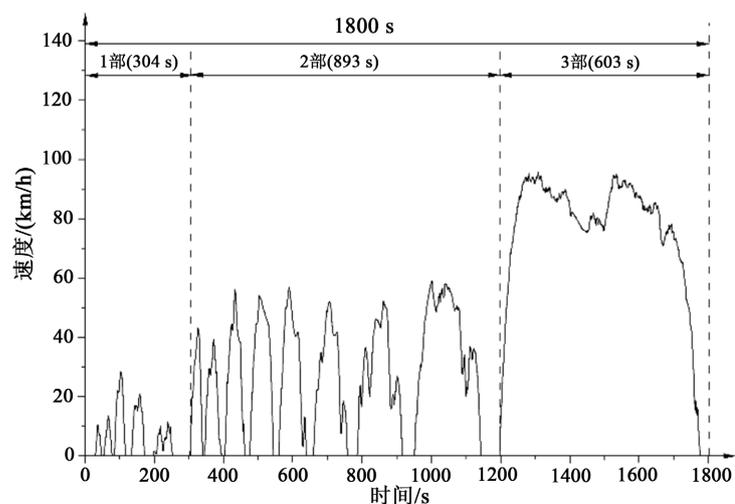


Figure 3. CHTC-C working curve
图 3. CHTC-C 工况曲线

CHTC-C 工况仿真结果如图 4 所示,对比分析可知期望车速与实际的仿真车速吻合状态很好[13],这说明了在中国普通客车行驶工况下的增程式客车动力性能能满足所需的要求。

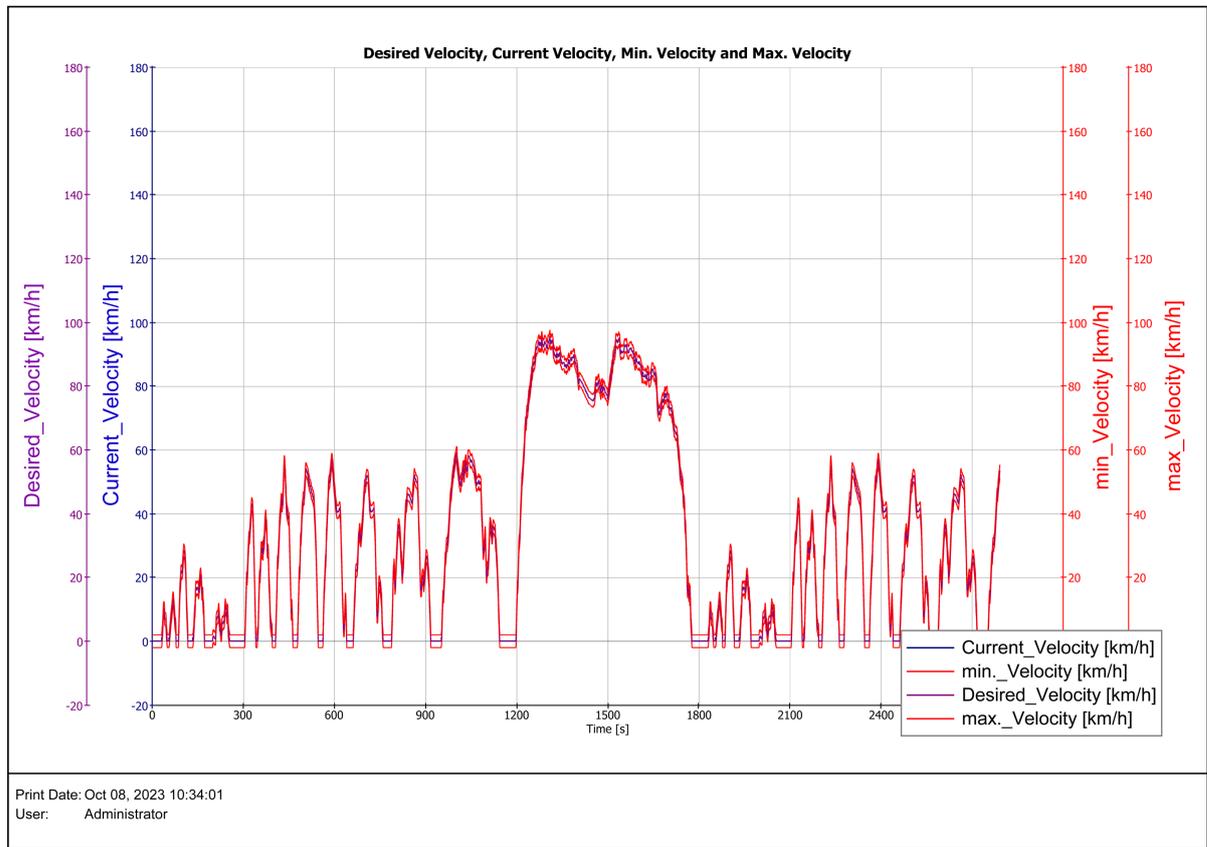


Figure 4. Actual operation of the bus under CHTC-C working conditions
图 4. CHTC-C 工况下客车实际运行

4.2.2. 最高车速

作为汽车动力性的评判基准之一,它是否满足设计要求反映了客车的动力性好坏。由图 5 所示仿真结果分析可知,仿真得最高车速为 99 km/h,而增程式客车设计最高时速不超过 100 km/h,故满足最高车速要求。

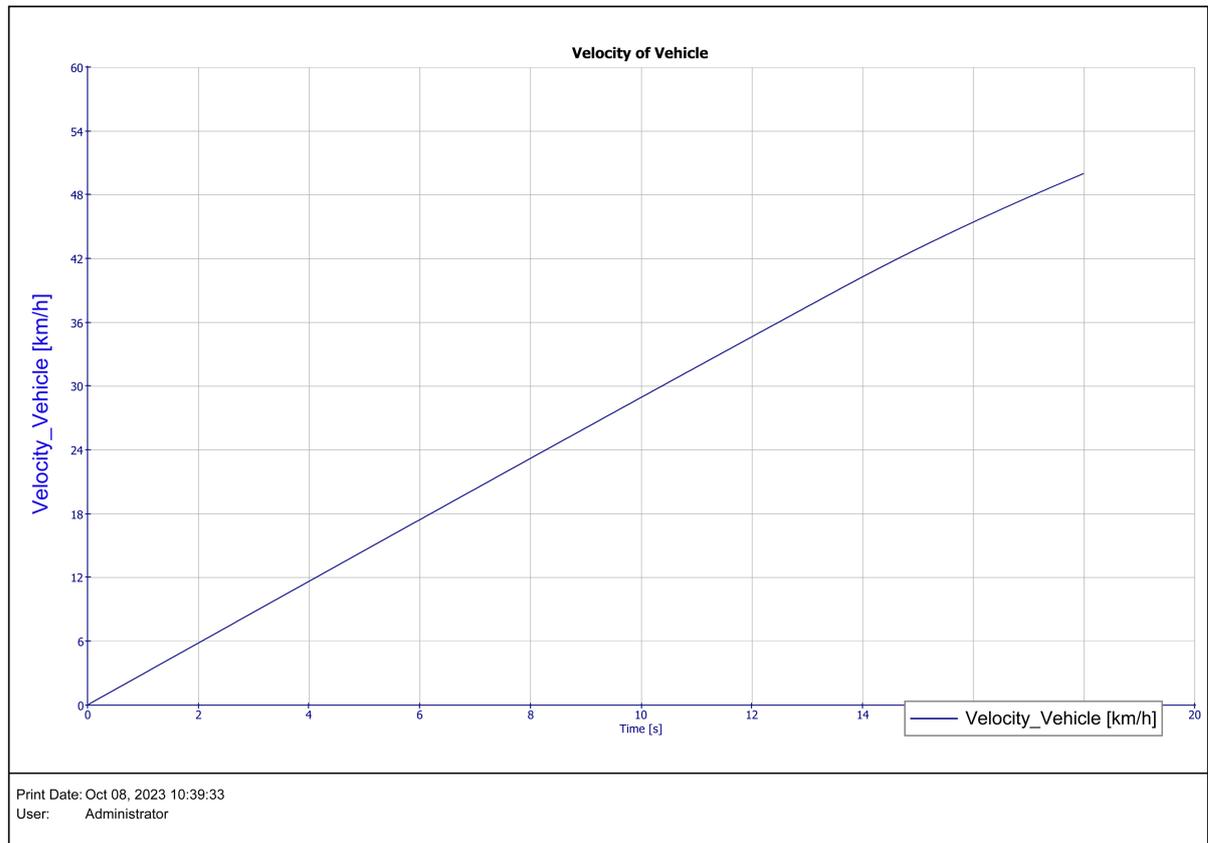
```

CONSTANT DRIVE - vMax
Theoretical Obtainable Maximum Velocity: 113.16 <km/h>
Real Obtainable Maximum Velocity      : 99.00 <km/h>
Evaluated Gear Step                   : 1
Ratio                                  : 0.870
Single ratio transmission              : 6.140
Maximum velocity in the gears:
Gear      Velocity      Speed      Measured Speed Ratio
<->      <km/h>         <1/min>   <->
1         99.00         3472.83   0.00
    
```

Figure 5. Maximum speed of a range-extended tourist bus
图 5. 增程式客车最高车速

4.2.3. 加速性能

客车的加速性能决定了其瞬时功率迸发大小的能力，由图 6 仿真结果分析可知，客车 0~50 km/h 加速时间为 17.99 s，满足所需的加速时间。



FULL LOAD ACCELERATION - Elasticity

Velocity <km/h>	Gear <->	Time <s>	Distance <m>	Speed <l/min>	Measured Speed Ratio <->
10.00	1	3.44	4.78	350.79	0.00
20.00	1	6.89	19.17	701.58	0.00
30.00	1	10.37	43.35	1052.37	0.00
40.00	1	13.90	77.64	1403.16	0.00
50.00	1	17.99	129.06	1753.95	0.00

Figure 6. Acceleration time of extended range tourist buses

图 6. 增程式客车加速时间

4.2.4. 最大爬坡度

最大爬坡度反映了汽车的爬坡能力，尤其在本文增程式客车上面，因为其工作场景多在坡多弯多的山区，所以爬坡能力对其影响很大，由图 7 仿真分析可知客车满足 20 km/h 通过 20% 的坡度要求，且其最大爬坡度为 20.8%。

4.2.5. 续航里程

增程式客车的续航里程大小直接影响着里程焦虑问题[14]，本文分别对纯电动行驶工况和增程行驶工况进行能耗仿真分析。

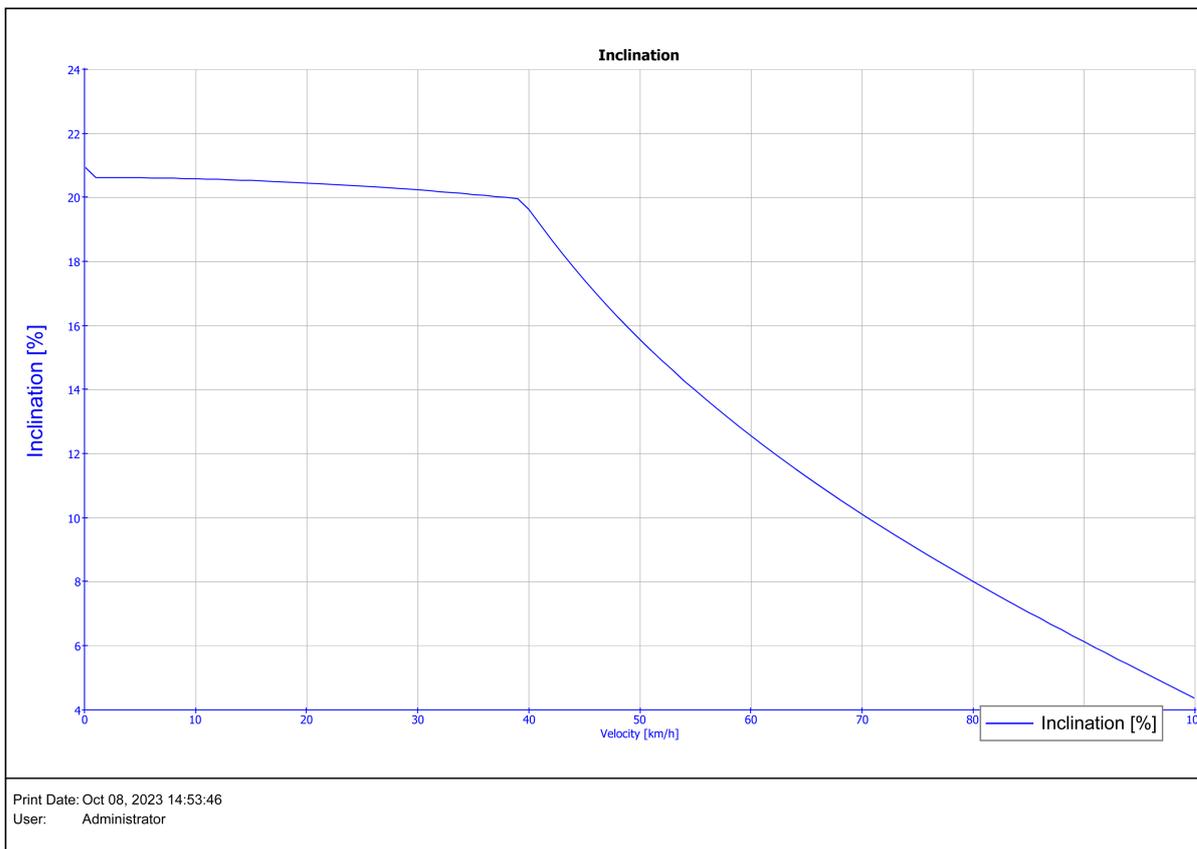


Figure 7. Maximum climbing degree of a range-extended tourist bus
图 7. 增程式客车最大爬坡度

增程模式下的续航里程：将动力电池的初始 SOC 值设定为 30%即为增程器开启的阈值[15]，使得仿真过程均为增程工作模式，燃油消耗率如图 8 所示，可知百公里油耗为 36.98 L，则增程续航里程为 623 km 相比指标要求里程提高 55.75%。

```

Calculation running ..
Current equilibrium could not be achieved as voltage is at the lower limit.
[WARNING S_105 : EM_CalculateNetEquilibrium]

Fuel Consumption of 1 Combustion Engine(s):    36.98 [l/100km]
Fuel Consumption of 3 Electrical Motor(s):    239.80 [kWh/100km]
H2 Consumption of 0 Fuel Cell(s):              0.000 [kg/100km]

NOx-Emission of 1 Combustion Engine(s):    267.61 [g]
CO-Emission of 1 Combustion Engine(s):    1541.26 [g]
HC-Emission of 1 Combustion Engine(s):    94.61 [g]
Soot-Emission of 1 Combustion Engine(s):    0.00 [g]

NOx-Emission after 0 Catalyst(s):          0.00 [g]
CO-Emission after 0 Catalyst(s):           0.00 [g]
HC-Emission after 0 Catalyst(s):           0.00 [g]
Soot-Emission after 0 Catalyst(s):         0.00 [g]

Covered Distance: 18903.51 [m]
.. Calculation of Task Complete
    
```

Figure 8. Energy consumption in range extender mode of a tourist bus
图 8. 增程式客车增程模式下能耗

纯电动模式下的行驶里程：在放电深度 70% 情况下，将动力电池初始 SOC 值设定为 100%，计算模式 SOCTarget 下循环数 1000，仿真结果如图 9 所示，根据动力电池储存能量与百公里电耗计算出 CHTC-C 工况下纯电行驶里程为 69 km。

```

Fuel Consumption of 1 Combustion Engine(s):      0.00 [l/100km]
Fuel Consumption of 3 Electrical Motor(s):      153.03 [kWh/100km]
H2 Consumption of 0 Fuel Cell(s):                0.000 [kg/100km]
NOx-Emission of 1 Combustion Engine(s):        0.00 [g]
CO-Emission of 1 Combustion Engine(s):         0.00 [g]
HC-Emission of 1 Combustion Engine(s):         0.00 [g]
Soot-Emission of 1 Combustion Engine(s):       0.00 [g]

NOx-Emission after 0 Catalyst(s):              0.00 [g]
CO-Emission after 0 Catalyst(s):               0.00 [g]
HC-Emission after 0 Catalyst(s):               0.00 [g]
Soot-Emission after 0 Catalyst(s):              0.00 [g]

Covered Distance: 196071.69 [m]
.. Calculation of Task Complete

```

Figure 9. Energy consumption in pure electric mode of range-extended tourist bus
图 9. 增程式客车纯电模式下能耗

所以增程式客车总续航里程为 692 km，相比指标要求增加了 38.4%。

综上所述，仿真分析汇总结果如表 5 所示，可知增程式客车符合设计要求。

Table 5. Simulation results of extended-range tourist buses

表 5. 增程式客车仿真结果

测试性能名称	指标要求	测试结果
CHTC-C 工况跟随情况	符合 CHTC-C 工况曲线	CHTC-C 工况跟随情况好
最高车速	≤100 km/h	99 km/h
0~50 km/h 加速时间	≤23 s	17.99 s
最大爬坡度	≥20%	20.8%
续航里程	500 km	692 km

5. 结论

(1) 针对新能源客车动力性能不足及续航里程焦虑问题，本文匹配出一款串联式结构增程式客车。根据整车设计参数结合本文增程式客车使用场景及设计标准提出整车性能要求，对增程式客车各个部件进行参数计算及选型，在 AVL-CRUISE 进行整车模型搭建并分别设置循环工况、动力性能及续航里程的仿真任务。

(2) 仿真分析整车性能和能耗，结果表明：增程式客车在 CHTC-C 工况下车辆运动跟随情况良好，且最高车速达到 99 km/h、0~50 km/h 加速时间为 17.99 s 比指标要求提升 21.78%、最大爬坡度 20.8%，续航里程为 692 km 相比指标要求提高了 38.4%。表明增程式客车的动力系统其性能满足所需工作的同时续航里程也超过了设计指标，即整车动力系统参数计算合理，为增程式客车能量管理及控制优化提供了参考。

基金项目

贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2023]一般 400)。

参考文献

- [1] 关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[Z/OL]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5649728.htm, 2021-09-22.
- [2] 盛广庆, 汪伟, 杨凤敏, 罗金, 王汝佳. 增程式电动汽车增程器多目标优化控制策略研究[J]. 江苏理工学院学报, 2020, 26(6): 68-74.
- [3] 王玉猛. SUV 增程式电动汽车动力系统参数匹配与性能仿真[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [4] 刘钊. 增程式电动客车动力系统研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2019.
- [5] 宋珂, 章桐, 李飞强. 燃料电池增程式电动汽车动力系统开发[M]. 上海: 同济大学出版社, 2021.
- [6] 全国汽车标准化技术委员会. GB/T 18386.2022 重型商用车实验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [7] 全国汽车标准化技术委员会. GB/T 19752.2005 混合动力电动汽车动力性能实验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [8] 沈启平. 车用高功率密度永磁同步电机的研究[D]: [博士学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2012.
- [9] 全国汽车标准化技术委员会. GB/T 31466-2015 电动汽车高压系统电压等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [10] 全国汽车标准化技术委员会. GB/T 38146.2-2019 中国汽车行驶工况 第 2 部分: 重型商用车[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [11] 杨裕生. 增程式汽车将是未来汽车主力[N]. 中国能源报, 2019-12-16(17).
- [12] Nan, J.R., Li, X. and Wu, W. (2013) Study on the Matching Design of an Extended Range Electric Vehicle Powertrain System. 2013 *Fourth International Conference on Digital Manufacturing & Automation*, Shinan, 29-30 June 2013, 1315-1318. <https://doi.org/10.1109/ICDMA.2013.314>
- [13] 李永亮, 黄英, 王绪, 郭汾. 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. <https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-1469.2021.03.04>
- [14] Pozzato, G., Formentin, S., Panzani, G. and Savaresi, S.M. (2020) Least Costly Energy Management for Extended-Range Electric Vehicles: An Economic Optimization Framework. *European Journal of Control*, **56**, 218-230. <https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2020.01.001>
- [15] Ye, J., Feng, H., Xiong, W.Y., Gong, Q.C.Y., Xu, J.B., and Shen, A.W. (2021) A Real-Time Model Predictive Controller for Power Control in Extended-Range Auxiliary Power Unit. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **70**, 11419-11432. <https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3113979>