

氢能源有轨电车运行能耗仿真计算方法研究

倪 尉

(上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 200092, 上海//高级工程师)

摘 要 结合氢能源有轨电车的能源使用特征和运行特征建立了氢能源有轨电车运行能耗的仿真计算方法。首先,将氢能源有轨电车的连续运行曲线离散化;然后,通过各个离散步长内的牵引能耗反算实时牵引电流值;最后,基于氢燃料电池在不同电流值下的能源转换效率函数计算得到氢能源的消耗量。将以上仿真计算方法应用于运营中的佛山高明氢能源有轨电车项目工程,以供氢能源有轨电车项目规划时的车辆配置、场站布局作参考。

关键词 有轨电车;氢能源;列车运行曲线;能耗仿真计算

中图分类号 U482.19

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.03.020

Study on Energy Consumption Simulation Calculation Method of Hydrogen Energy Tram

NI Wei

Abstract An energy consumption simulation calculation method of hydrogen energy tram is established based on characteristics of energy usage and tram operation. Firstly, the continuous running curve of tram is discretized. Then the real-time traction current value is reversely calculated from traction energy consumption within each discrete step size. Finally, the hydrogen energy consumption is calculated based on the energy conversion efficiency function of hydrogen fuel cell under different current values. The simulation calculation method is applied to Foshan Gaoming hydrogen energy tram project, providing reference for vehicle configuration and station layout in hydrogen energy tram planning.

Key words tram; hydrogen energy; train running curve; simulation calculation of energy consumption

Author's address Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., 200092, Shanghai, China

相对于电容储能式有轨电车,氢能源有轨电车的续航里程更长,这使得有轨电车线网规划和运行计划的弹性大大增加。同时,氢能源的生产和使用相对于采用电能供电的有轨电车要更为环保;氢和氧的电化学反应得到的水对环境无污染,真正实现

了零排放,契合我国实施的“碳中和”战略。

在氢能源有轨电车线路的实际实施中,需要在车辆段设置加氢站,以满足车辆充氢的需求。一般每列氢能源有轨电车需要装备6~12个储氢罐。根据车辆厂家提供的参数,1列氢能源有轨电车单次充氢后运营里程可达100~200 km。有轨电车的网络化运营和不同线路之间的互联互通是其在城市交通系统中取得成功的核心条件之一。而氢能源有轨电车的能源供应需要基于加氢站的布局,这成为其实现网络化和互联互通的重要参数。因此,在氢能源有轨电车前期设计阶段,在科学合理计算氢能源有轨电车运行能耗的基础上,需要对加氢站的规模、布局,以及氢能源列车的配置数量和运行方案之间的匹配性进行评估。氢能源有轨电车的平面示意图如图1所示。

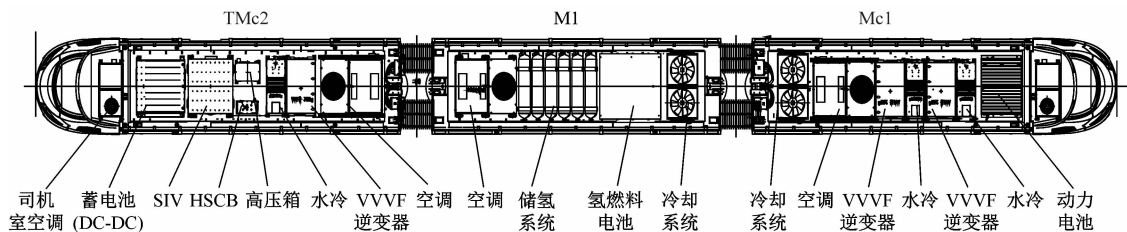
基于氢能源有轨电车的以上特征和规划设计阶段对决策和方案比选的实际需求,本文设计了一套专用于氢能源有轨电车运行的氢能耗计算方法。

1 氢能源有轨电车运行能耗计算方法设计

1.1 有轨电车牵引能耗计算方法

列车运行的能耗主要来自列车牵引过程中的起动、加速、巡航和爬坡等操作。列车制动或者惰行过程中一般不会消耗能量。列车的牵引能耗主要受到列车质量、运行基本阻力和线型坡度等因素的综合影响,其能耗一般通过电力提供。在规划、设计阶段的牵引计算中,只能得到估算的牵引能耗值,尚无法得到详细的区段能耗指标。本文选取某有轨电车线路的部分区段,以该区段某列有轨电车为例,其运距-能耗曲线如图2所示。

有轨电车运行过程中的电能消耗主要由牵引列车时的电压和电流值共同决定。其中,电压值一般是固定的,电流值受到列车本身速度和外部环境的变化影响,但主要与速度相关。因此,在列车牵引曲线的计算中可结合列车能耗数据得到实时电



注:TMc2——带司机室的半动车;M1——不带司机室的动车;Mc1——带司机室的动车;DC-DC——直流-直流;SIV——辅助逆变器;HSCB——高速断路器;VVVF——变压-变频。

图1 氢能源有轨电车平面示意图

Fig. 1 Schematic plan of hydrogen energy tram

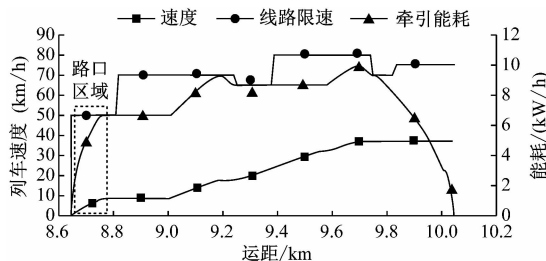


图2 某区段某列有轨电车的运距-能耗曲线图

Fig. 2 Diagram of running distance-energy consumption curve of certain tram in certain section

压和电流需求。典型的有轨电车速度和牵引电流关系如图3所示。

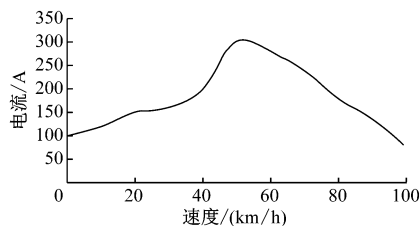


图3 典型的有轨电车速度与牵引电流关系图

Fig. 3 Diagram of typical speed and traction current relationship of tram

1.2 氢燃料电池电能转换率特点

氢能源有轨电车的氢动力系统主要包括氢燃料电池、储氢模块、冷却模块、DC-DC 蓄电池装置和牵引蓄电池等。不同于传统的轨道交通能耗计算方法,氢能源有轨电车的能耗计算需要考虑氢能在转换成电能过程中的损耗问题。因此,不同工况下的氢能源转换率是关键参数。氢能源电池的电能转化率与其实时输出的电压电流有关,在不同的温度和线路条件下,氢能源电池的综合电能转换率是存在差别的,一般低功耗条件下转换率较高,高功耗条件下转换率较低。式(1)为氢燃料电池综合能源转换率 η 的计算公式。

$$\eta = \frac{\int_t^{t+\Delta t} V(t)I(t) dt}{\int_t^{t+\Delta t} m(t)q dt} \quad (1)$$

式中:

$V(t)$ ——输出电压;

$I(t)$ ——输出电流;

$m(t)$ ——氢燃料消耗质量;

q ——热值;

t ——时间;

Δt ——时间增量。

与道路车辆的复杂工况条件不同,有轨电车由于线路运行环境和运营计划相对固定,可对其运行过程的电池功率消耗进行相对准确的计算,进而对氢能源的消耗量进行合理估算。因此,在规划、设计过程中对氢能源有轨电车线路的牵引能耗计算,可以通过对其具体线路参数和车辆参数进行有针对性的仿真来实现。而对于不同电压和电流条件下的转换率,可根据氢能源电车和列车厂家的参数及现场运行的实际消耗进行估算和校正。因为电压一般是固定的,对氢燃料电池的能源转换率 η ,可在规划设计阶段直接建立以电流值 I 为参数的转换率函数 $f(I)$ (如式(2)和图4所示),从而快速实现氢能源有轨电车的运行能耗仿真计算。

$$\eta = f(I) \quad (2)$$

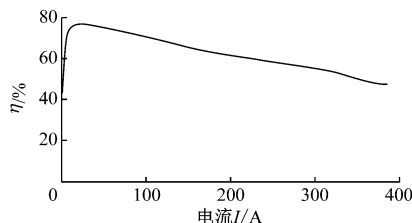


图4 氢燃料电池的电能转换效率曲线图

Fig. 4 Conversion efficiency curve of hydrogen fuel cell to electrical energy

1.3 基于离散转换率的氢能耗计算

氢能源有轨电车在线路区段的牵引曲线可通过离散化的牵引仿真计算来实现,具体为以列车当前的速度状态和线路运行环境为基础,根据运行的速度目标值来计算下一个步长的列车运行状态。其中,每个步长所需的能量消耗可以通过列车的质量、速度变化、坡度和外界环境等其他参数来综合反映。为了计算每个仿真步长的氢能转为电能的转换率,需要通过每个步长的能量消耗反算每个步长的瞬时电流来实现。具体流程如下:

- 1) 将整个氢能源有轨电车的牵引制动曲线按照仿真计算的时间间隔进行离散化,并获取每个步长条件下列车的状态数据,包括速度、位置、牵引/制动指令和能量消耗等;
- 2) 根据氢能源有轨电车在每个步长的能量消耗状态和供电系统的电压值,反算出当前步长的电流值;
- 3) 以每个步长的电流值为参数,根据车辆厂家提供的参数或者现场试验的数据建立电流指标与氢能源转换率函数,得到每个步长的氢能源转换率;
- 4) 根据每个步长的氢能源转换率和实际的牵引能量消耗计算当前步长的氢能源消耗;
- 5) 通过汇总计算得到计算里程内的总氢能源消耗和综合氢能源转换率。之后可通过对氢能源有轨电车全线或全线网的数据计算,从而估算整个线路或线网的总氢能源消耗和综合氢能源转换率。

步长的划分对于计算精度起着关键的作用。显然,步长越小,精度越高,但计算量和计算复杂度也越大。一般规划设计的不同阶段对于能耗计算精度的要求不同,可以根据具体需求,在 50 ms、100 ms、200 ms、500 ms 的范围内选取不同的步长。

2 仿真计算方法的实现与应用案例

2.1 仿真计算方法的实现

根据以上流程,本文结合牵引计算模型设计了一套氢能源有轨电车能耗仿真计算方法。如图 5 所示,该仿真计算方法主要包括牵引曲线计算、牵引能耗反算电流计算、氢能消耗计算和数据展示模块 4 个部分。

2.2 应用案例

本文以佛山高明氢能源有轨电车某长大区间为案例,进行了氢能源有轨电车运行能耗仿真计算

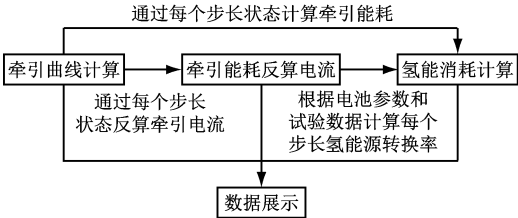


图 5 氢能源有轨电车运行能耗仿真计算方法

Fig. 5 Calculation method for operating energy consumption of hydrogen energy tram

方法的试用。佛山高明氢能源有轨电车是中国首条商业运营的氢能源有轨电车线路,位于广东省佛山市高明区。如图 6 所示,该项目规划总投资为 10.7 亿元,规划线路全长 17.4 km,设车站 20 座;2019 年,一期开通线路长约 6.5 km,设车站 10 座(从高明汽车站站至体育中心站)。本次测试将该线二期工程的富湾湖站——佛山照明站作为仿真测试区段,测试区段的长度约为 1.3 km。



图 6 佛山高明有轨电车线路走向示意图

Fig. 6 Diagram of Foshan Gaoming tram route

在定员情况下的平直干燥轨道上,车轮为半磨耗状态,额定供电电压时车辆轴重及相关速度、加速度特性如表 1 所示。

通过输入表 1 的车辆性能参数和对应区段的线路线型数据,可得到该有轨电车运行的速度曲线和实时牵引能耗及氢能耗累积曲线图,如图 7 所示。最终计算得到氢能源有轨电车在该区段运行时的氢能耗转为电能的综合转换率为 54.8%,其中:牵引能耗为 4.96 kW/h;氢能耗为 9.05 kW/h。

表1 佛山高明氢能源有轨电车性能参数
Tab.1 Vehicle performance parameters of Foshan Gaoming hydrogen energy tram

设计参数	指标值	备注
轴重/t	12.5	
起动平均加速度/(m/s ²)	≥0.9	对应速度为0~40 km/h
列车平均加速度/(m/s ²)	≥0.6	对应速度为0~70 km/h
常用制动平均减速度/(m/s ²)	≥1.1	对应速度为70~0 km/h
紧急制动平均减速度/(m/s ²)	≥2.3	对应速度为70~0 km/h
安全制动平均减速度/(m/s ²)	≥1.2	对应速度为70~0 km/h
常用制动平均减速度率/(m/s ³)	≤1.5	

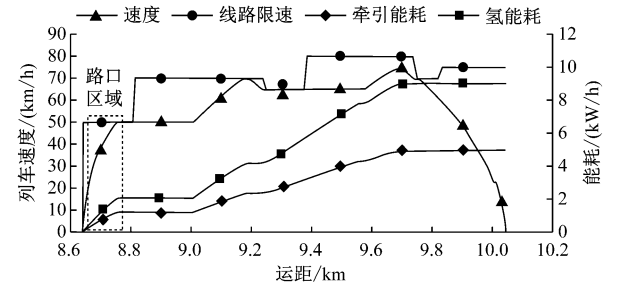


图7 氢能源能耗仿真计算结果
Fig.7 Simulation calculation result of hydrogen energy consumption

图8为计算出来的每个仿真步长的牵引能耗、氢能耗和氢能源转换率。由图8可以看到,在不同的运行状态下,氢能耗的转换率是不断变化的。在列车加速时,由于功率大,能耗转换率较低;在列车巡航时功率相对较小,能耗转换率较高;在惰行和制动时,列车没有产生牵引能耗。

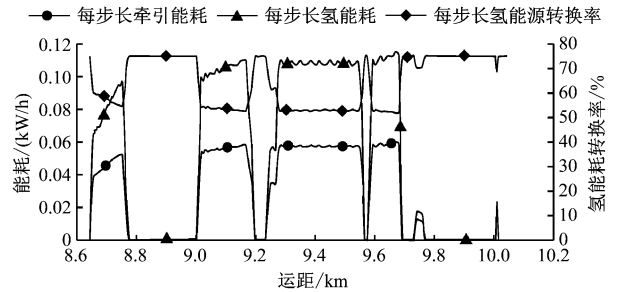


图8 牵引能耗、氢能耗及氢能源转换率曲线图
Fig.8 Curve of traction energy consumption, hydrogen energy consumption and hydrogen energy conversion efficiency

通过对该案例线路区段的能耗仿真计算,可以估算出在不同线路长度且运营期间不加氢的条件下,需要设置的最小车载氢能源储存设备容量。根

据本文仿真计算得出的数据,建议在线路站位设计时氢能源有轨电车最小站间距不宜小于800 m,以减小起停和低速运行的时间比例,最大程度地提高全线的氢能源利用率;通过仿真计算结果数据发现:当列车速度过低时,氢能源的转换效率偏低,无法到达节能和“碳中和”的目标;但当速度过高时,牵引所消耗的能耗偏高且氢能转换效率偏低。因此,建议在规划设计线路时,尽量将旅行速度提高至25 km/h左右,以最大程度地提高氢能源的利用率。此外,建议道路交通系统提高对有轨电车信号优先申请的采纳率,以减少列车起停概率,以提高列车的旅行速度和氢能利用率。

3 结语

本文通过运用离散化的仿真牵引计算方法,利用有轨电车驱动电压稳定的特征,用单个步长的牵引能耗反算电流值来模拟计算氢燃料电池的实时电能转化率,从而实现对氢能源有轨电车全线路或线网的氢能源总消耗和综合氢能源转换率的估算。本文所提出的仿真计算方法可在规划设计阶段为氢能源有轨电车项目的氢能源消耗和综合氢能源转换率估算提供参考,并对规划设计阶段的车载氢能源储存设备容量、车站间距和线路旅行速度等设计要点提出了相关建议。

参考文献

[1] 陈祥. 氢能源有轨电车的应用实践[J]. 现代城市轨道交通, 2021(5):28.
CHEN Xiang. Application practice of hydrogen energy tram[J]. Modern Urban Rail Transit, 2021(5):28.
[2] 徐意. 城市轨道交通列车控制仿真模型研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017(5):82.
XU Yi. Modeling and simulation for trains control in urban rail transit[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017(5):82.
[3] 毛保华. 列车运行计算与设计[M]. 北京:人民交通出版社, 2008.
MAO Baohua. Train operation calculation and design[M]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2008.
[4] 刘炜,李群湛. 地铁牵引仿真计算中的牵引策略研究[J]. 机车电传动, 2006(1):46.
LIU Wei, LI Qunzhan. Study on traction strategy in simulation calculations of metro tractions[J]. Electric Drive for Locomotives, 2006(1):46.

(收稿日期:2021-06-28)