

一种全局优化混合动力牵引计算仿真软件

张喜茂 孙丛君

(中车青岛四方车辆研究所有限公司, 266031, 青岛)

摘要 [目的]混合动力列车的配置最优化设计问题涉及系统成本、能耗及运营要求,有必要对具有全局优化功能的混合动力仿真软件进行研究。[方法]介绍了一种全局优化混合动力牵引计算仿真软件功能及架构,阐述了该软件关键模块的计算模型及计算原理。以某混合动力有轨电车项目为案例,进行混合动力列车车载储能与地面充电方案系统优化的仿真,验证软件的应用效果。[结果及结论]采用该全局优化混合动力牵引计算仿真软件,对列车储能装置及线路充电桩的排布方案进行全局优化后,不仅优化后的方案造价相较未经优化的方案造价有所降低,而且优化后方案完全能满足列车的正常运行要求。

关键词 轨道交通;混合动力;牵引计算;全局优化;线路仿真

中图分类号 TP311.56:U223.2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.06.045

A Hybrid Power Traction Calculation and Simulation Software with Global Optimization Approach

ZHANG Ximao, SUN Congjun

(CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd, 266031, Qingdao, China)

Abstract [Objective] Optimal design of hybrid power train configuration involves system cost, energy consumption and operation requirements. Therefore, it is necessary to study the hybrid power simulation software with global optimization function. [Method] The function and architecture of a hybrid power traction simulation software with global optimization function is introduced, the calculation model and calculation principle of the software key modules are expounded. With a hybrid power tram project as an example, the system optimization simulation of the hybrid power on-board energy storage and ground charging scheme is carried out to verify the application effect of the software. [Result & Conclusion] The global optimization hybrid power traction calculation and simulation software is used to comprehensively optimize the layout scheme of the train energy storage devices and line charging piles. After the optimization, not only is the cost of the optimized scheme reduced compared to the original scheme, but the opti-

mized scheme can fully meet the normal operation requirements of the train.

Key words hybrid power; traction calculation; global optimization; line simulation

借助混合动力仿真工具,不仅可完成混合动力列车设计的牵引及线路仿真计算,还可辅助完成前期设计及方案评估。本文所提的全局优化混合动力牵引计算仿真软件(以下简称“仿真软件”),能在给定混合动力部分设计输入的前提下,结合实际线路信息,模拟混合动力列车运行过程,有助于研究车载储能与地面充电方案耦合系统,实现混合动力系统的优化,并为工程设计及运营等部门的列车动力性能设计、车线耦合校验、运行线路建设等工作提供设计依据。

1 仿真软件的功能及架构

仿真软件选用 C++ 作为开发语言,以 Microsoft Visual Studio 2008 作为开发平台,并基于 MFC (Microsoft Foundation Classes) 框架进行开发。其数据库管理系统为 Microsoft Access,开发工具为 Microsoft Visual Studio .Net,由 .NET Framework 2.0 软件提供支持服务。

1.1 软件功能

仿真软件的主要功能包括车辆动力性能配置、车载储能装置容量设计、地面充电桩排布设计、列车全线运行仿真。该软件能模拟列车在不同情况下的取流、能耗、动力特性、车载储能装置的充放电过程及其状态、地面充电桩的工作情况等。

1.2 软件架构

仿真软件的总体架构如图 1 所示。由图 1 可见,仿真软件主要由列车及线路信息模块、仿真运行模块、仿真配置信息模块、车载储能与充电桩优化配置模块、优化计算结果模块、优化仿真运行模块和仿真结果处理模块等组成。

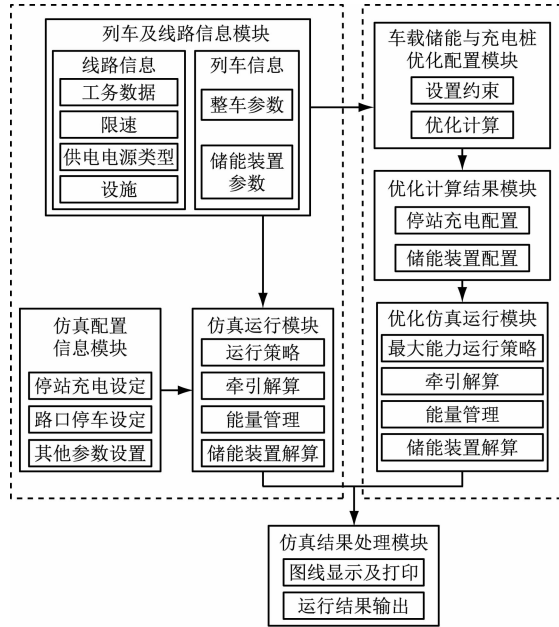


图1 仿真软件的总体架构图

Fig. 1 Overall architecture of simulation software

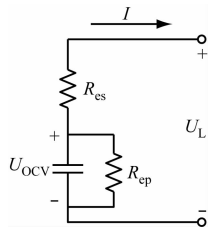
2 仿真软件的关键子模块

2.1 储能装置解算子模块

储能装置解算子模块隶属于仿真运行模块。储能装置解算算法根据将储能装置的总成特性与基本电路模型相结合:根据列车动力需求及储能装置能量管理策略,确定任意时刻储能装置的输出功率;再根据储能装置的基本电路模型,确定储能装置的电压、电流、SOC(剩余电量)等状态。仿真软件的储能装置主要为超级电容和化学电池。

2.1.1 超级电容计算模型

在储能装置解算子模块中,超级电容采用的基本电路模型为电容与内阻的串并联电路,如图2所示。超级电容计算模型需输入的特性参数主要包括:额定电压 U_N 、额定容量、SOC 上下限、充/放电效率曲线及内阻特性等。



注: R_{ep} —超级电容器的并联电阻; U_L —储能装置端压。

图2 储能装置解算子模块中的超级电容基本电路模型

Fig. 2 Supercapacitor circuit model in energy storage device solution operator module

根据储能装置的输出功率、SOC 初始值 S_{SOC1} 、储能装置开路电压 U_{OCV} (初始值取 U_{OCV1})、串联内阻 R_{es} , 可得到当前时刻下的电流 I_1 、储能装置端压 U_{L1} (初始值取 U_{OCV1}), 计算下一时刻的储能装置开路电压 U_{OCV2} 、端压 U_{L2} 及储能装置 SOC 值 S_{SOC2} 为:

$$U_{OCV2} = U_{OCV1} - \frac{\Delta t}{C} \times \left(\frac{U_{OCV1}}{R_{ep}} + I_1 / \eta \right) \quad (1)$$

$$U_{L2} = U_{OCV2} - I_1 R_{es} \quad (2)$$

$$S_{SOC2} = U_{OCV2} / U_N \quad (3)$$

式中:

Δt ——下一时刻时间间隔;

C ——超级电容的容量;

η ——放电效率。

2.1.2 化学电池计算模型

在储能装置解算子模块中,化学电池采用图3的电池等效模型,需输入的特性参数主要包括:额定电压、额定容量 Q 、SOC 上下限、 η 曲线、 U_{ocv} -SOC 曲线,以及化学电池的并联电阻 R_p 、串联电阻 R_o 及极化电容 C_p 特性等。

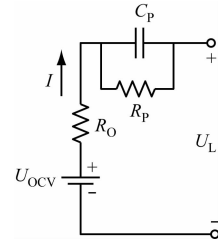


图3 储能装置解算子模块中的化学电池电路模型

Fig. 3 Chemical battery circuit model in energy storage device solution operator module

根据 S_{SOC1} 、查询 U_{OCV} -SOC 曲线得到初始时刻化学电池开路电压 U_{OCV1} , 根据储能装置的输出功率计算 I_1 、 U_{L1} (初始值设为 U_{OCV1}), 则下一时刻 S_{SOC2} 为:

$$S_{SOC2} = S_{SOC1} - \frac{I_1 \Delta t}{Q \eta} \quad (4)$$

进而,可得到化学电池端压 U_{L2} :

$$U_{L2} = U_{OCV2} - I_1 R_o - U_p \quad (5)$$

式中:

R_p ——极化电阻;

R_o ——串联电阻;

Q ——额定容量;

U_p ——极化电压,且 $U_p = U_{p0} e^{\frac{\Delta t}{C_p R_p}} + R_p I_1 (1 - e^{\frac{\Delta t}{C_p R_p}})$ 。

2.2 能量管理子模块

仿真软件的能量管理子模块隶属于仿真运行模块,其功能包括:

1) 停站充电控制。列车停站时,能量管理子模块按照停站充电的电能和时间要求,计算平均充电功率,并控制储能装置在充电时间内按充电功率计算值进行充电,同时将充电电流控制在设定的充电电流限值内。

2) 结合列车总需求功率和当前 SOC,控制储能装置的放电功率。

3) 基于与控制速度相关的电压极限,进行充放电控制。对于有电区的列车运行,通过储能装置电压-列车运行速度曲线,可以实现类滞环控制。根据与列车速度相关的充放电电压极限设定,对储能装置的充放电予以控制,使储能装置仅能提供一部分牵引功率,以避免频繁储能装置频繁充放电,利于延长储能装置的寿命。

4) 控制 SOC。在任何条件下,确保储能装置的 SOC 被控制在设定的上下限范围之内,否则将强行停止充放电行为。

5) 电流控制。监控储能装置电流瞬时值及电流均方根值,使其不超出设定的限值。若超出,则强制将瞬时电流降至电流峰值限值之下。若累积到当前时刻的电流均方根值超出持续电流限值,则强制降低瞬时电流。

2.3 车载储能与充电桩优化配置模块

车载储能与充电桩优化配置模块的对象是车载储能装置配置、地面充电桩容量、数量及分布。优化目标有 3 种:最小车载储能容量、最经济充电桩布局方案、最优车载储能+充电桩布局。其中“最优车载储能+充电桩布局”的配置是一个多目标优化问题。优化目标可通过用户输入加权的方式最终转化为单目标优化问题。目标函数为:

$$\min J = \min \left(\sum_{i=1}^n P_i X_i + P_{\text{batter}} X_{\text{batter}} \right) \quad (7)$$

式中:

P_i —— i 站充电桩价格;

X_i —— i 站充电桩数量,按是否存在分别取 1 或 0;

P_{batter} ——车载储能装置单位容量价格;

X_{batter} ——车载储能装置容量。

用户约束条件主要为:能量约束——储能设备容量须大于相邻充电桩区间列车能耗;充电桩约

束——列车所停站的充电桩数目及布局,须满足允许范围;质量约束——储能设备质量须满足列车轴重允许范围;串联电压允许范围约束——储能装置的串联电压须满足允许范围;时间约束——列车停站时间须满足设定;充电电流约束——充电桩充电电流须满足设定。

根据用户对各优化目标的权重及约束条件,采用遗传算法,求解最优目标,进而给出最佳配置。

3 仿真试验案例

选取 1 列城市轨道交通混合动力概念有轨电车(以下简称“试验列车”),截取一段有轨电车试验线路的部分数据,以车载储能额定电量及储能装置质量为待求解参数,对储能装置配置及充电桩排布方案进行优化,并对优化后的方案进行线路仿真试验。

试验列车搭载超级电容,采用有网/无网混合供电方式。截取部分的试验线路全长 4.92 km,共设 8 座车站(ST1—ST8)和 6 个路口(CR1—CR6),其中 CR1、CR3、CR5 路口设置路口停车,部分车站设置充电桩。试验列车的基本参数及停站充电信息仿真设定如表 1 及表 2 所示。

表 1 试验列车仿真运行基本参数

Tab. 1 Basic parameters of simulated test train operation

参数	取值	参数	取值
牵引质量/t	75	DC/DC(直流/直流)变换器效率	0.98
起动加速度/(m/s ²)	1.15	最大充电电流峰值/A	1 000
制动减速度/(m/s ²)	1	辅助功率/kW	100

表 2 停站充电信息仿真设定

Tab. 2 Simulated setting of train stop charging information at station

停车站	是否允许排布充电桩	停站时间/s	最大充电电流/A
ST2	是	120.0	1 000.0
ST3	否	200.0	1 000.0
ST4	是	60.0	1 000.0
ST5	是	120.0	1 000.0
ST6	否	180.0	1 000.0
ST7	是	120.0	1 000.0
ST8	否	120.0	1 000.0

采用仿真软件对试验线路的储能装置配置及充电桩排布方案进行优化,结果如表 3 所示。

表 3 优化后的储能装置配置及充电桩排布方案

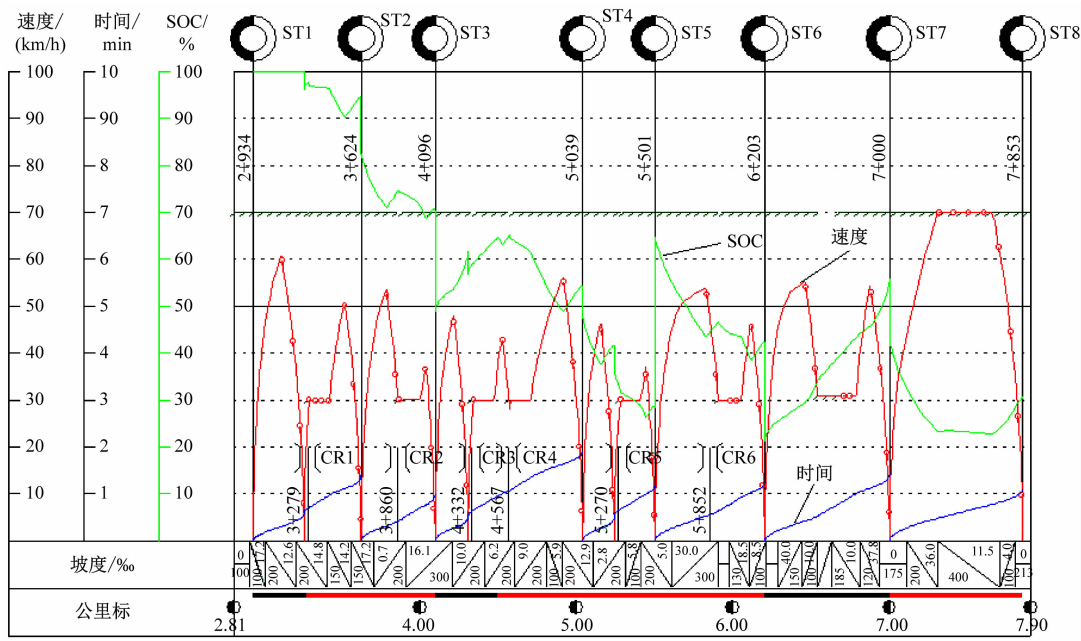
Tab.3 Optimized energy storage device configuration and charging pile layout plan

充电桩 个数	储能装 置容量/ (kWh)	储能装 置总能 耗/(kWh)	充电桩 造价/ 万元	储能装 置造价/ 万元	列车质 量/t
1	25.45	20.75	100	127.25	77.5

根据表 3 的方案,形成优化后的试验线路,仅在车站 ST5 设置充电桩。按相应的线路信息,进行了

线路仿真计算验证。优化后试验路线的仿真计算结果截图如图 4 所示,部分具体数值如表 4 所示。

经仿真软件验证:无论如何改变充电桩位置,均无法把仿真过程中储能装置 SOC 限制在设定范围;而若降低充电桩数量,则会因 SOC 过低而无法完成全线运行;若增加充电桩的数量或储能装置容量,则势必增加系统的造价。可见,优化结果能够满足软件设计目标。



注:公里标黑色处代表电网区间,其余为无电区间。

图 4 优化后试验路线的仿真计算结果截图

Fig. 4 Screenshot of simulation calculation results of optimized experimental route

表 4 优化后试验路线仿真计算结果的部分数据

Tab.4 Partial data of simulation calculation results of optimized experimental route

区间	供电方式	有无充电桩	充电桩补充电量/(kWh)	电网补充电量/(kWh)	区间起始的列车电量/(kWh)	区间的列车最低电量/(kWh)	列车到站剩余电量/(kWh)
ST1—ST2	混合供电	无	0	0.36	25.45	22.40	23.06
ST2—ST3	车载储能装置供电	无	0	0	19.55	15.37	15.64
ST3—ST4	混合供电	无	0	4.49	9.79	9.79	10.77
ST4—ST5	车载储能装置供电	有	9.5	0	9.02	3.27	3.50
ST5—ST6	车载储能装置供电	无	0	0	13.00	6.06	6.54
ST6—ST7	牵引电网供电	无	0	6.6	1.28	1.28	11.81
ST7—ST8	车载储能装置供电	无	0	0	8.30	3.34	4.70

4 结语

本文仿真案例中计算的列车运行速度及 SOC 变化趋势曲线等数据表明,经过优化后配置的车载

储能装置与充电桩既能保证较低的系统造价,也能够满足列车的正常运行要求。说明本软件可以为混合动力列车的整车特性、储能装置特性,以及线路充电桩的排布设计全局优化提供一定的数据支

撑和仿真手段。

参考文献

- [1] 杜昕. 混合动力列车运行仿真系统开发与实现[J]. 现代计算机(专业版), 2017(13): 26.
DU Xin. Development and implementation of hybrid electric train operation simulation system [J]. Modern Computer, 2017(13): 26.
- [2] 伍赛特. 混合动力列车的应用前景展望[J]. 交通节能与环保, 2019, 15(4): 117.
WU Saite. Prospect of application of hybrid electric train [J]. Transport Energy Conservation & Environmental Protection, 2019, 15(4): 117.
- [3] 杨继斌, 宋鹏云, 张继业, 等. 燃料电池混合动力列车建模与运行控制研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(9): 40.
YANG Jibin, SONG Pengyun, ZHANG Jiye, et al. Research on modeling and operation control of fuel cell hybrid electric train [J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(9): 40.

(上接第 249 页)

传算法有大幅提升,其中 MB 和 MC 的计算耗时已小于 1 ms,其原因在于二分法能使计算步长总数大幅减少。不同算法的误差距离均小于 0.5 m,均满足基本运算精度要求。MA、MB、MC 的误差距离逐次减小,原因在于二分法能减少步长间隙引起的计算误差。GA 采用了 0.1 s 的步长编码方式,故其距离误差与 MA 距离误差相近。在采用 MC 算法时,将步长缩短为 0.01 s 后,计算精度进一步提升,提高了节能效果,且计算耗时增长不大。

4 结语

本文提出了适应于有轨电车运行特性的定时节能曲线优化方法。与既有的数值分析法相比,该算法降低了模型的复杂度,简化了运算流程,有利于工程应用;与 GA 等启发式算法相比,该方法能获得全局近似最优解,较好地解决运算效率和精度问题,还能通过变更步长方式来调整运算精度和运算性能指标,可适用于不同的运算场景需求。

参考文献

- [1] 荀径, 杨欣, 宁滨, 等. 列车节能操纵优化求解方法综述[J].

- [4] 王天冬, 宋鹏云. 混合动力列车能量管理策略的优化方法及系统[J]. 内燃机与配件, 2019(22): 61.
WANG Tiandong, SONG Pengyun. Optimization method and system for energy management strategy of hybrid electric train [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2019(22): 61.
- [5] 李明, 付稳超, 黄烈威, 等. 100% 低地板轻轨车混合动力性能匹配计算[J]. 铁道机车车辆, 2013, 33(2): 55.
LI Ming, FU Wenchao, HUANG Liewei, et al. Hybrid performance matching calculation of 100% Low-floor LRV [J]. Railway Locomotive & Car, 2013, 33(2): 55.

· 收稿日期:2022-05-05 修回日期:2022-08-02 出版日期:2024-06-10
Received:2022-05-05 Revised:2022-08-02 Published:2024-06-10
· 通信作者:张喜茂,高级工程师,ximao2004@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

铁道学报, 2014, 36(4): 14.

- XUN Jing, YANG Xin, NING Bin, et al. Survey on trajectory optimization for train operation [J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(4): 14.
- [2] 丁勇, 毛保华, 刘海东, 等. 定时约束条件下列车节能操纵的仿真算法研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(10): 2241.
DING Yong, MAO Baohua, LIU Haidong, et al. An algorithm for energy-efficient train operation simulation with fixed running time [J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(10): 2241.
- [3] ASNIS I A, DMITRUK A V, OSMOLOVSKII N P. Solution of the problem of the energetically optimal control of the motion of a train by the maximum principle [J]. USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics, 1985, 25(6): 37.

· 收稿日期:2022-05-18 修回日期:2022-08-09 出版日期:2024-06-10
Received:2022-05-18 Revised:2022-08-09 Published:2024-06-10
· 第一作者:童文聪,工程师,tongwencong@tongji.edu.cn
通信作者:滕靖,教授,tengjing@tongji.edu.cn
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license