

纯电动汽车整车热管理系统集成仿真技术研究及展望

王伟民, 徐人鹤, 王希诚, 王小碧, 周坤, 李洪涛, 肖能, 陈雷

(东风汽车公司技术中心, 武汉, 430058)

摘 要: 本文首先使用 GT-SUITE 软件搭建纯电动汽车包括传动系统的一维整车模型, 通过 NEDC 循环工况下的常温仿真结果与转毂试验结果进行对比, 验证了整车基础模型的有效性。在此基础上进一步集成了热管理各子系统形成完整的整车热管理系统模型, 将快充工况下的仿真结果与试验结果进行对比, 证实了模型的合理性。最后对将来要开展的热管理系统在不同工况下对纯电动汽车整车动力经济性的影响分析及应用进行了展望。

关键词: 纯电动汽车, 热管理系统, 动力经济性, GT-SUITE

Abstract: Firstly, a base simulation model of EV vehicle including transmission system and whole vehicle was built in this paper. It has been confirmed that the model is effective by comparing simulation results and the test results of the NEDC cycle on the rotating hub at normal temperature. The thermal management systems were integrated to the base model in order to form a complete model of the EV vehicle. Simulation results and the test results at rapid charging were compared, and it has been confirmed that the complete model is reasonable. Finally, we forecast analysis study of the influence of thermal management system on the dynamic performance and mileage of the EV vehicle under different working conditions and its application.

Key words: EV, thermal management system, dynamic performance and mileage, GT-SUITE

1. 前言

随着传统汽车保有量的不断增长, 对石油能源的需求也不断的增加, 为了有效减少对传统石油能量的依赖和降低排放污染, 必须寻找新的替代能源减少传统车辆的能源消耗和排放。在新能源汽车中, 纯电动汽车 (EV) 是主要的开发车型, 如何有效地进行设计优化降低纯电动汽车能耗, 延长行驶里程, 改善动力经济性, 具有十分重要的意义。

在纯电动车的运行过程中, 电池是整车能量的唯一来源。整车热管理系统的能耗直接来自电池, 也就直接影响纯电动车的行驶性能, 如: 续航里程、加速性能等。同时, 电池的工作温度直接影响电池的性能和寿命, 直接影响纯电动车的行驶性能。因此, 必须进行热管理系统能耗优化和温度的精确控制。

本文的基本思路是分两步走, 首先使用 GT-SUITE 软件搭建一维纯电动整车和传动系统模型, 通过 NEDC 循环工况下的试验结果与常温转毂试验结果进行对比, 验证了整车及传动系统的基础模型的有效性。然后再使用 GT-SUITE 软件集成热管理系统的各子系统形成完成的整车模型, 分析热管理系统对整车性能的影响。将来通过优化控制策略, 降低热管理系统能耗, 提高整车动力经济性。

2. 某款纯电动汽车热管理系统概要

在建立纯电动汽车整车模型的过程中, 需要的纯电动车整车和电池电机的主要参数表如下表 1。所研究的电池包热管理系统具体结构原理图如图 1。电机冷却系统已经使用了不少时间, 没有问题, 不是我们改善的主要研究对象。

表 1 某款纯电动车的主要参数表

整车参数	整备质量	1541kg
	阻力/升力系数	用滑行试验参数代替
电池参数	电池类型	锂电池
	电池容量	140 A-h
	充/放电开路电压	温度-SOC-电压 MAP
	充/放电内阻	温度-SOC-内阻 MAP
电机参数	最大转矩	转速-转矩表
	效率	转速-转矩-效率 MAP

该车型采用水冷散热，制冷剂侧与空调系统共用一套压缩机和冷凝器，分别使用 chiller 和蒸发器完成电池包、空调系统水侧和制冷剂侧的热交换，各支路都配有独立的膨胀阀和电子水泵。在冷却模式下制冷剂经过压缩机压缩为高温高压状态，经冷凝器散热降温分别输送至空调支路和电池热管理支路，各支路制冷剂由独立膨胀阀节流并通过蒸发器和 chiller 完成与空气和冷却水的换热。在低温环境下，关闭制冷剂回路，由 PTC 加热冷却液控制电池包的温度。

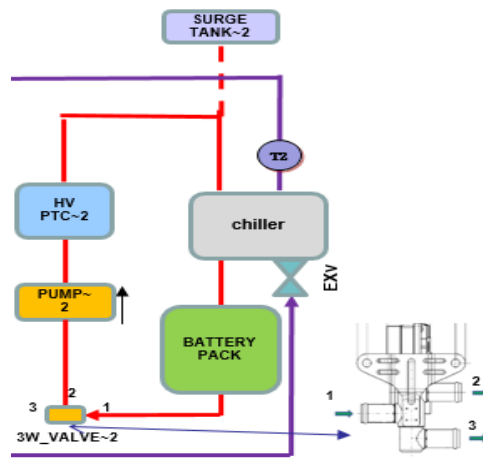


图 1 电池包热管理系统结构图

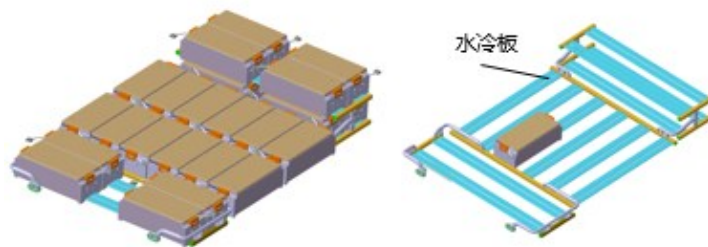


图 2 电池包和水冷板模型

其中电池包由 24 个模组串联而成，冷却水通过水冷板与模组热交换散热，如图 2 所示。在加热

模式下，空调和电池包热管理系统采用独立 PTC 进行加热，并配备单独的电子水泵控循环水流量。

3. 基于 GT-SUITE 的软件的整车热管理系统的建模和分析

本课题研究目的是通过仿真手段预测不同环境温度及不同工况下的整车性能，主要包括各种极限温度环境下的整车热安全性（电池包温度是否在合适的温度范围内），整车动力经济性，快速充电效率等，并通过调整热管理系统的控制策略降低环境温度对车辆性能的影响，提高能耗效率，同时指导系统零部件的选型，以缩短车型开发时间减少开发成本。

基于以上研究目的，所搭建的仿真模型包括以下几部分：整车传动系统、电机驱动系统、电池包（能准确描述不同温度工况下的表现）、乘员舱模型（包含冷热负荷）、空调系统、电池热管理系统、电机热管理系统、机舱前端模块（以三维或准三维手段计算热交换器的散热能力）、制动能量回收系统和热管理系统控制策略等。

本文描述了整车基础模型的搭建，并通过基础模型的 NEDC 循环工况仿真和试验对标验证了整车基础模型的合理性。然后使用集成热管理各子系统的整车模型，以高温快充试验工况为例做了仿真分析，仿真结果合理。

3.1 基础模型的仿真分析及试验对比

为了验证建模思路的合理性，本文首先使用 GT-SUITE 搭建了一个不包含热管理系统的整车一维模型，如图 3 所示，该模型包括以下几个子模块：

- 1) 电池包：该车型电池包由 24 个模组组成，每个模组由 8 个电芯 2 并 4 串组成，整个电池包沿用 GT-SUITE 软件提供的电池包模板，通过电芯的参数代数计算和经验参数修正，得到整个电池包的输入参数，主要为电池包容量、充放电内阻 MAP、充放电开路电压 MAP、库伦效率、电池包质量、冷板面积及物性参数等；

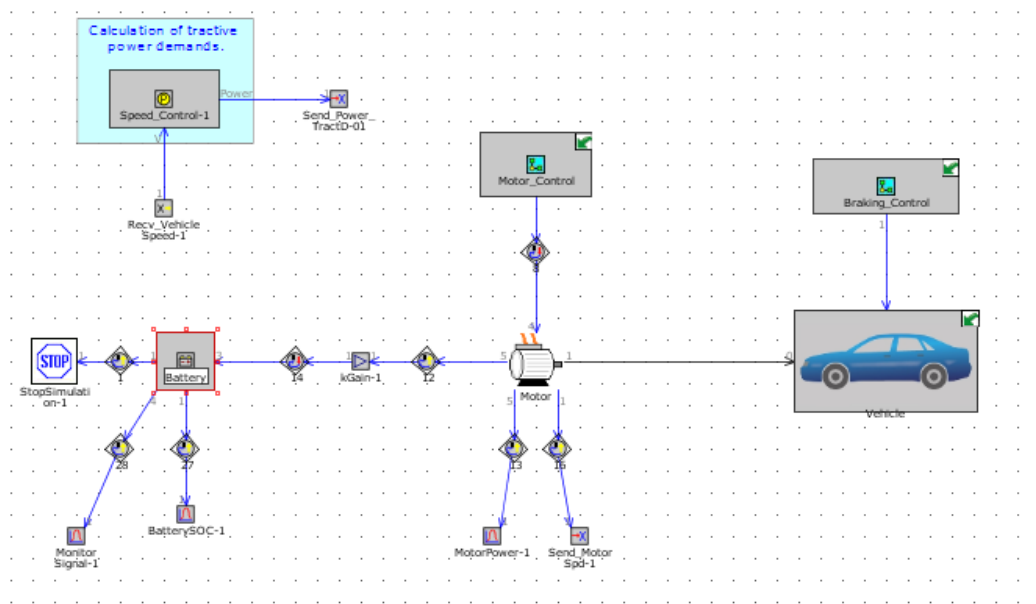


图 3 纯电动车基础模型示意图

- 2) 电机：电机主要参数为扭矩-转速-效率 MAP，最大扭矩-转速曲线等，由于电机采用自然冷却，所以未考虑温度影响；
- 3) 整车参数：主要包括整备质量、整车几何参数、制动力矩 MAP、滑行试验参数等；
- 4) 制动控制策略：由于该车型使用并联制动控制策略，机械液压制动和电机反拖同时工作，所以将机械制动力矩 MAP 和电机反拖力矩做代数和得到综合制动力矩，控制策略模型图 4 所示。

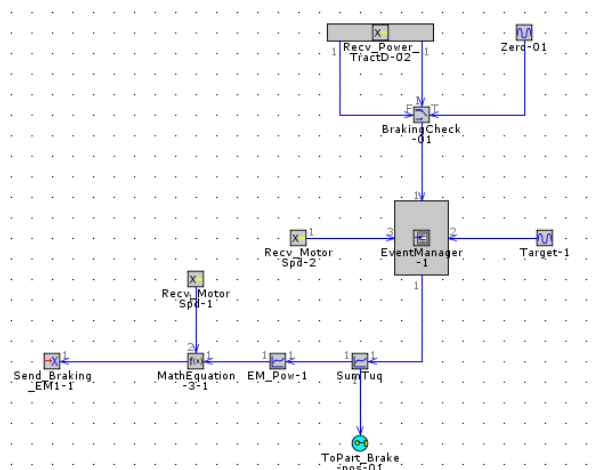


图 4 制动控制策略示意图

为验证模型的合理性和精度，本文使用 NEDC 循环工况作为输入，环境温度设定为 25°C ，与两个 NEDC 工况的转鼓试验结果进行对标，主要对比电池 SOC-时间曲线和电机的功率曲线，对比结果如图 5~7 所示。

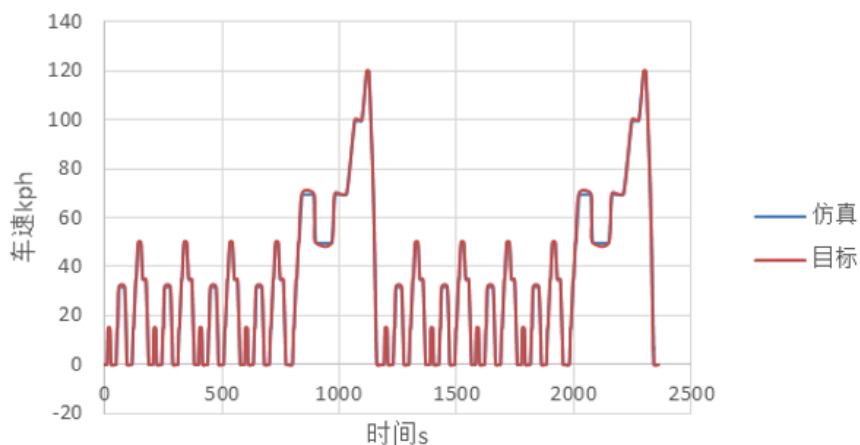


图 5 仿真车速与标准 NEDC 工况车速对比

从图 5 可以看出在机械液压制动和电机制动能量回收的联合控制下，仿真车速与转鼓试验的实际车速比较吻合，试验的结果具有较高可信度。

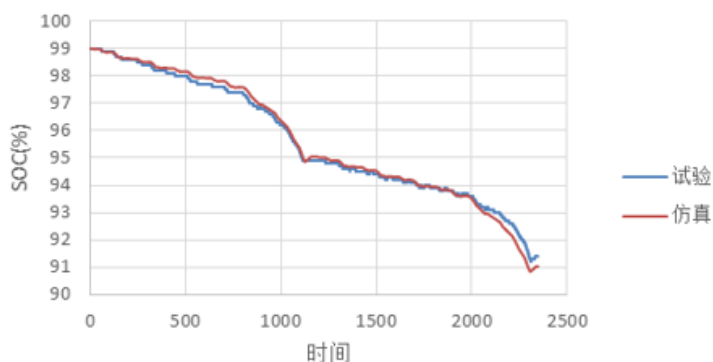


图 6 SOC-时间曲线

从图 6 可得知，试验从 SOC99%开始经过两个 NEDC 工况，试验车 SOC 下降至 91.3%，仿真结果下降至 91%，考虑试验误差，温度对整车性能的影响等因素，仿真结果属于正常可接受范围之内，其中 SOC 上升的部分为电机制动能量回收为电池充电，曲线上各特征点基本吻合。

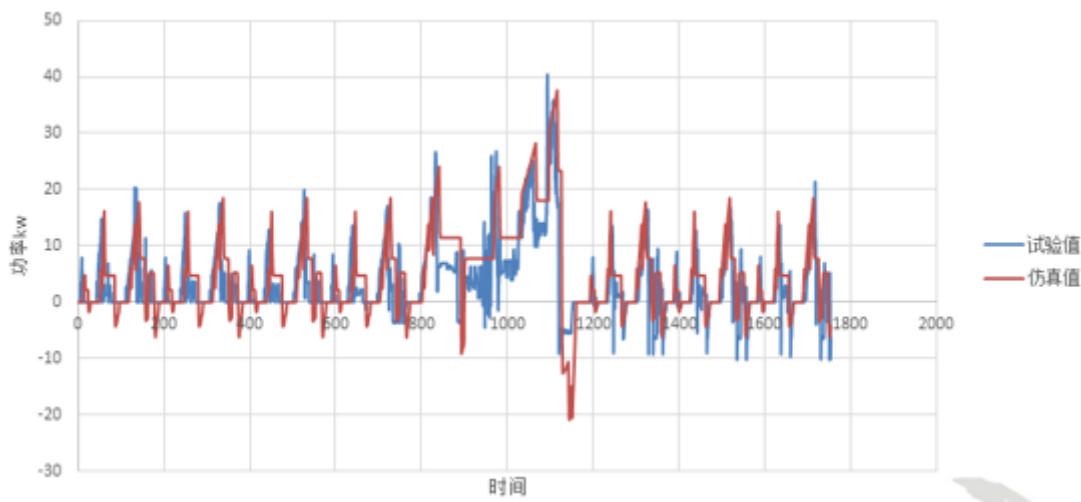


图 7 电机功率-时间曲线

图 7 为整个过程中电机功率的对比，由于实验过程中的车速由人为控制完成，相比仿真结果，电机的功率变化波动较大，但是从功率时间积分及各特征点的对照结果来看，仿真的精度属于可接受范围。

通过基础模型的试验对比，有效验证了基础模型的合理性，关键指标的仿真结果满足精度要求，为后续研究热管理系统对整车性能的影响，尤其是动力经济性的影响提供了有效支撑。

3.2 纯电动车热管理系统分析及试验对比

鉴于纯电动车性能尤其是电池包性能对温度的敏感性，要准确研究其动力经济性必须考虑温度影响，将热管理各子系统系统集成到一维整车模型中。本文根据某款纯电动汽车的真实结构搭建了一维整车 GT-SUITE 模型，如图 8 所示。

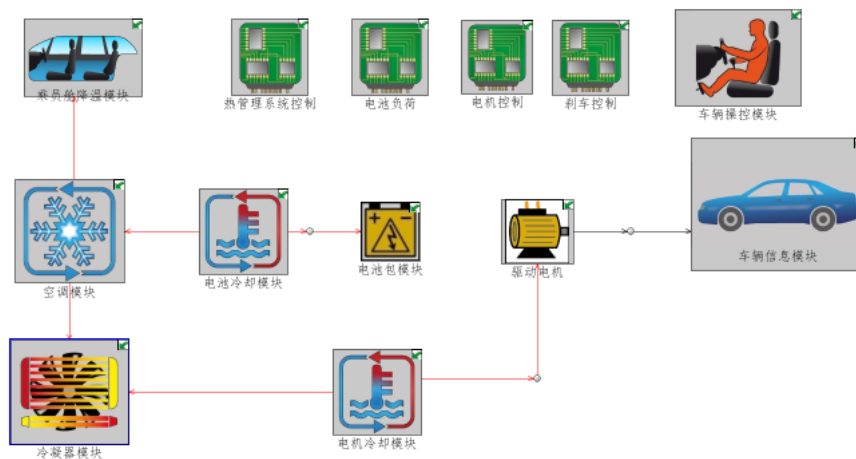


图 8 包含热管理系统的整车一维完整模型

模型主要包括以下几个模块：

- 1) 整车模块，电池包模块，电机模块与基础模型建模方法相同；
- 2) 电池冷却模块：主要针对电池包热管理系统的水侧，包括电子水泵、PTC 加热器、相关管路和控制阀门；
- 3) 乘员舱模块：包括了完整的蒸发器空气侧、风扇、乘员舱模型等，并考虑了热负荷、损失；

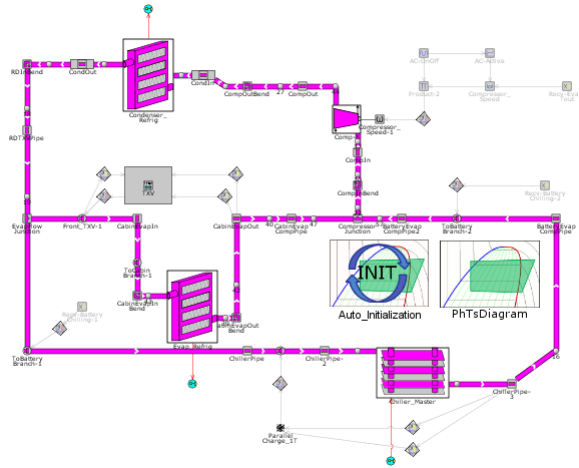


图 9 空调模块模型示意图

- 4) 空调模块：包括了整个热管理系统的制冷器侧，如图 9 所示，其中压缩机转速、电子膨胀阀开度均由 PID 控制；
- 5) 冷凝器模块：由 GT-SUIT 的 COOL3D 功能搭建，采用一种拟三维的方法将机舱布置及格栅开口对热交换器散热性能的影响纳入考虑范围。
- 6) 控制模块：主要包括电池包控制、电机控制、刹车制动能量回收控制、车速控制和热管理系统控制；

在此模型的基础上，本文对整车进行了一次快充工况仿真，并与实车试验进行了对比，由于车辆快充时乘员舱无人值守，空调处于关闭状态，主要考虑电池热管理系统的运转情况。快充工况下的控制策略为：当电池包平均温度大于 32°C ，热管理系统打开，当电池包平均温度小于 28°C 时完全关闭。模型以充电功率作为输入，主要对标充电过程中的 SOC-时间曲线，电池包平均温度曲线以及电池包冷却水出口和入口的平均温度。其中充电功率时间曲线如图 10 所示，由于在 GT-SUITE 软件中电池放电功率为正，因此充电过程中功率均为负值。

充电过程持续 3000s，SOC 和电池包平均温度的仿真和试验结果的比较如图 11 和 12 所示。从图 11 的仿真结果来看电池经过一段时间充电，SOC 从 23.4% 上升至 78.2%，与仿真结果的 80.1% 相比误差为 4.9%，满足仿真精度要求。

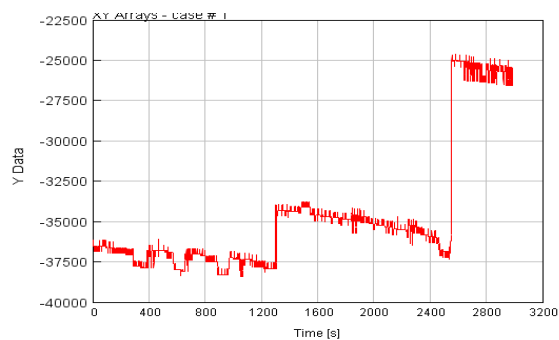


图 10 快充功率-时间曲线

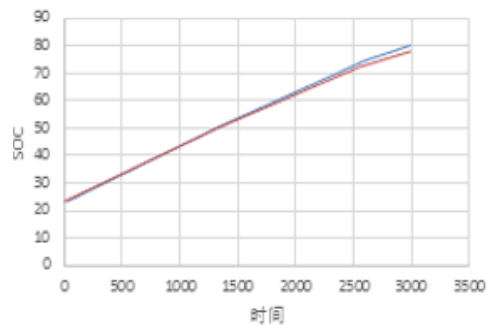


图 11 SOC-时间曲线

从图 12 可以看出电池包平均温度从 30°C 上升至 32°C ，此时热管理系统开启，对电池进行降温，使电池温度缓慢下降，整个过程趋势与仿真结果吻合，由于试验过程中热电偶测量精度有限（只能精确到 1°C ），考虑该情况可以认为温度数值满足要求。

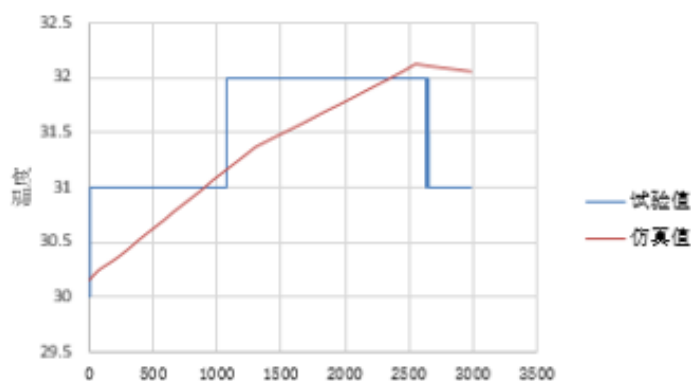


图 12 电池包平均温度-时间对比

4. 纯电动汽车整车热管理系统集成仿真技术的展望

本文已经在常温下验证了基础模型的正确性，又验证了车辆不动并乘员舱无人值守，空调处于关闭状态的一次快充工况仿真模型的正确性，今后还要开展重点研究搭载热管理系统之后整车在极端工况（高温、低温）下的快充-高速-快充，实车试验等各种循环工况下的整车动力性和续航里程，并希望在基本维持现有硬件系统的前提下通过优化热管理系统的控制策略（如图 13 所示），降低系统能耗，同时保持电池包、电机处于高效安全工作区间，提升车辆的续航里程。另一方面使用仿真手段指导系统零部件设计选型也是课题的重要研究方向。

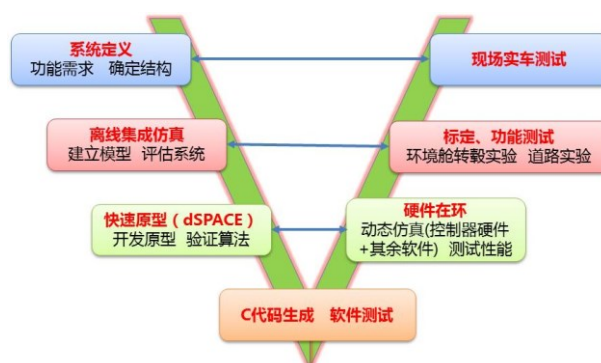


图 13 离线集成仿真技术在热管理控制策略优化开发中的应用

5. 总结

本文使用 GT-SUITE 软件搭建了一套完整的纯电动车整车热管理系统模型，并分析两种使用工况对模型精度进行了验证，仿真结果与试验结果基本一致，证实了该模型能够满足电动车热管理系统研究的要求，并对今后的研究工作提出了展望，全部的研究工作可以对纯电动汽车热管理系统的匹配和控制策略优化提供坚实的技术基础。

6. 参考文献

- [1] 窦昊、梁长裘、朱贞英、门永新，基于 GT-SUITE 的乘用车冷却系统匹配仿真分析与试验验证，2013 年 IDAJ 中国区年会，2013
- [2] Z Guo, B Song. Optimization of vehicle control strategy based on GT-SUITE and mode frontier [J] Society of Instrument & Control Engineers of Japan, 2015
- [3] 侯广永，基于 GT-SUITE 混合动力控制策略开发，2013 年 IDAJ 中国区年会，2013