

# 纯电动汽车动力性与经济性仿真研究

## The Research of Dynamic and Economic Performance Simulation of Electrical Vehicle

何荣国 李科迪 吴阳博

(上海大众汽车有限公司, 上海 201805)

**摘要:** 在纯电动汽车的开发阶段, 应用性能仿真指导零件选型、匹配和优化, 可以极大的降低开发成本, 缩短开发周期。本文研究了借助 GT-suite 仿真软件建立纯电动汽车整车性能仿真模型的方法, 并通过试验验证了模型的仿真精度。根据仿真结果, 本文分析了纯电动汽车的动力性和经济性, 以及整车性能优化方案, 证明了仿真模型在纯电动汽车开发过程中的应用价值。

**关键词:** 纯电动汽车 动力性 经济性 仿真

**Abstract:** In the development of electric vehicles, the simulation guidance of component selection, matching and optimization can greatly reduce development costs and shorten the development cycle. With the GT-suite simulation software, this paper created an electric vehicle performance simulation model. The simulation accuracy of the model had been experimentally verified. According to the simulation results, this paper analyzed the dynamics and economy performance of electric vehicles, as well as the vehicle performance optimization methods. It was proved that the simulation model is worth in electric vehicles development.

**Key words:** Electrical Vehicle, Dynamics, Economy, Simulation

## 0 引言

纯电动汽车是一种依靠电池携带电能, 仅通过电力驱动的新能源汽车。由于电机与内燃机的特性完全不同, 纯电动汽车的动力性会与传统汽车有所区别。又因为现阶段很难突破性提高电池的能量密度, 纯电动汽车远不及传统汽车的续驶里程成为了其普及的障碍。因此, 提高纯电动汽车的经济性也势在必行。在纯电动汽车的开发阶段, 对整车动力性和经济性进行仿真, 能为零部件选型、动力系统匹配及控制策略制定提供一定的参考。本文应用 GT-suite 软件, 对纯电动汽车的动力性及经济性进行了仿真研究。

## 1 整车仿真模型建立

GT-suite 是美国 Gamma Technologies 开发的致力于发动机/车辆设计的仿真软件。软件包中的 GT-SUITEmp 模块可以用于对车辆静力学、运动学和动力学进行仿真分析。利用模

块中提供的电池、电机、动力传动系统、车身及道路、环境等模板，就可以建立以零部件特性为基础的纯电动汽车整车性能仿真模型，如图1所示。

整车模型由电池模型通过功率输出的方式提供能量，经由电机转化为驱动扭矩和转速，再经过动力传动系统的分配

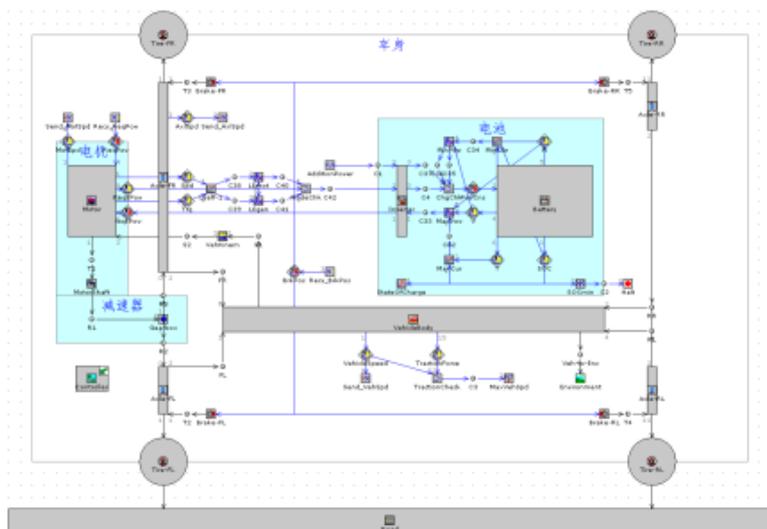


图1 电动汽车整车性能仿真模型

及损耗，传递到车轮模型作用于道路，最终实现对车身的驱动。汽车直线行驶时的力平衡方程如下<sup>[1]</sup>：

$$\frac{T_{tq} i_g i_0 \eta_T}{r} = Gf + \frac{C_D A}{21} \cdot 15 u_a^2 + Gi + \delta m \frac{du}{dt} \quad (1)$$

其中， $T_{tq}$ 为电机扭矩(Nm)， $i_g$ 为变速器传动比， $i_0$ 为主减速器传动比， $\eta_T$ 为传动系机械效率， $r$ 为轮胎滚动半径(m)， $G$ 为整车重力(N)， $f$ 为滚阻系数， $C_D$ 为风阻系数， $A$ 为迎风面积(m<sup>2</sup>)， $u_a$ 为车辆行驶速度(km/h)， $\theta$ 为道路坡度， $\delta$ 为汽车旋转质量换算系数， $m$ 为汽车质量(kg)。根据该式可以求解整车的动力性。

将力平衡方程转换为功率平衡方程：

$$P_M = \frac{u_a}{3600 \eta_T} Gf + \frac{C_D A}{21.15} u_a^2 + Gi + \delta m \frac{du}{dt} \quad (2)$$

则可以求解汽车在特定工况下的能量消耗，即汽车的经济性。

## 1.1 电池模型

动力蓄电池是纯电动汽车的储能元件。目前用于新能源汽车的主要是属于第三代电池的锂离子电池，包括磷酸铁锂电池、三元材料电池等。不管电池采用何种材料，表征电池物理特性的有几个主要参数：容量、开路电压 $V_{oc}$ 和内阻 $R_{int}$ 。电池容量(Ah)与开路电压(V)的乘积就是电池能够携带的能量(V·Ah，即Wh)。电池内阻则会在电池充放电的过程中造成能量损耗，一定电流下的电池输出功率。除了这三个参数，电池在使用中还有一个荷电状态(SOC)的概念。电池在正常情况下只能工作在介于0~100%的一定SOC范围内。

事实上,容量、开路电压和内阻就是 GT-SUITEmp 中电池模型的基本输入,而 SOC 则是软件通过 SOC 初始值和电池充放电状态实时估算的。在模型中,开路电压和内阻特性可以表示成随 SOC 和温度变化的 MAP (图 2),由当前电池所处状态查表得到下一时刻的电池特性。在进行续驶里程仿真时,当电池 SOC 达到预设的下限值,仿真即被终止。最终,电池放出的总能量由瞬时充放电功率在时域上积分得到。

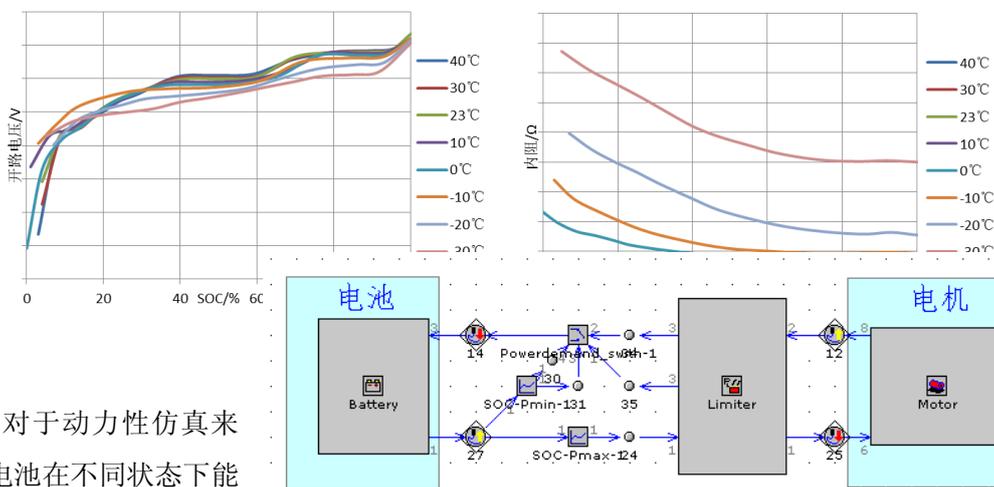


图 3 电池充放电功率限制模型

对于动力性仿真来说,电池在不同状态下能够释放的最大功率也很重要。软件中的电池模型

$$P_{\max} = \frac{V_{oc}^2}{4R_{int}} \quad [2]$$

可以根据开路电压和内阻简单计算一个最大放电功率,然而这一算法没有考虑电池系统实际的电流承受能力,也不能反映电池控制器的充放电策略。如果能够直接得到电池的充放电最大功率或最大电流曲线,则可以通过在电池功率请求端和功率输出端增加控制模型的方法为电池的充放电功率设置门限(如图 3 所示),真实反映 SOC 降低时电池放电能力的衰退。

## 1.2 电机模型

电机同发动机一样,是汽车的动力源泉。表征电机动力大小的指标是峰值扭矩  $T_{\max}$  和峰值功率  $P_{\max}$ 。由电机在不同转速下能达到的最大扭矩所构成的曲线就是电机的外特性。理想电机的外特性曲线具有低转速恒扭矩,高转速恒功率的特点。与发动机不同的是,电机没有最低稳定转速,可以从 0 转速起步,最高转速也比普通内燃机高出许多。基于这些特点,纯电动汽车不需要复杂的多级变速器,也可以保证较强的动力性。除了可以输出正扭矩用于驱动,在受到负扭矩(反拖)的时候,电机还可以充当发电机使用。因此,电机还有一条发电状态的外特性曲线。

发动机是将燃料的化学能转化为动能的机器,其转化效率只有 20~35%。而电机将电能转化为动能的效率可以高达 90%以上。电机的效率 MAP 图可以描绘电机在外特性范围内各转

速和扭矩工作状态下的能量转化效率。外特性和效率 MAP 图可以通过台架试验得到, 作为电机仿真模型的输入。图 4 为某款电机在外特性范围内的效率 MAP 图。

GT-SUITEmp 中的电机模型有两种控制方式: 扭矩控制和功率控制。扭矩控制要求输入电机在不同油门开度的情况下对应的扭矩响应特性曲线, 可以较为精确的反应电机的控制策略, 主要用于整车动力性能的仿真。

功率控制则是直接根据整车行驶的功率和车速需求对电机提出扭矩和转速请求, 只要不超过电机的外特性曲线, 电机就可以提供车辆所需的功率。这一控制方法相对简单, 但可以反映电机的功率输出, 即能量消耗, 因此适用于各种工况的经济性仿真。

### 1.3 阻力模型

根据汽车驱动力平衡方程, 可知驱动汽车的能量主要消耗在克服轮胎滚动阻力和空气阻力。当然, 在计算车辆的爬坡能力时, 还要考虑道路坡度阻力。

根据汽车理论, 轮胎滚动阻力系数  $f = f_0 + f_1 \frac{u_a}{100} + f_4 \frac{u_a^4}{100^4}$ , 车速较小时

4 次项可忽略不计。可见, 滚动阻力并非定值, 而是与车速相关。GT-SUITEmp 中, 滚阻系数在车轮模型中设置, 可以输入从车速的 0 次项到 2 次项共 3 个系数。软件会根据车速算出此刻的滚阻系数, 再根据车身模型里输入的整车质量、质心位置等信息算出每个车轮与地面的正压力, 从而相乘得到车辆行驶时的滚动阻力。

作用于汽车的空气阻力  $F_w = \frac{1}{2} C_D A \rho u_r^2$ , 即风阻, 主要取决于迎风面积和风阻系数  $C_D$ , 并与相对风速的 2 次项有关。迎风面积和风阻系数在车身模型中输入。在进行车辆动力性和经济性仿真时, 要求是无环境风的, 因此相对风速就是车速。但计算风阻所需的空气密度  $\rho$ , 是由环境模型中的气温、气压等因素决定的。

### 1.4 控制模型

除了这些硬件部分, 整车模型还包含一些控制模块, 根据特定的逻辑驱动整个动力学模型。纯电动汽车为了提高续航里程, 改善经济性, 一般都具有制动能量回馈功能。所谓制动能量回馈, 就是让驱动电机工作在发电状态下, 将制动减速的动能, 转化为电能重新储存到电池中。好的制动能量回馈策略, 不仅要充分利用这些动能, 还要保证整车所需的制动效能, 甚至需要保证良好的驾驶感受。这就要求回馈策略能够让电机工作在发电的高效区域, 回馈力矩输出平顺, 并且与机械式制动器的制动力矩合理分配。

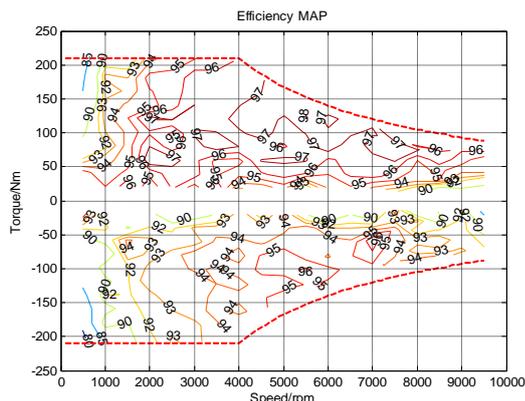


图 4 电机外特性和效率 MAP 图

为了在仿真模型中实现制动能量回馈策略，首先需要输入电机在不同工况下的回馈扭矩曲线，本文采取的策略分为不踩踏板滑行和踩下制动踏板制动两种状态。然后根据当前车速和制动扭矩需求，查表得到电机能够提供的制动扭矩，并请求电机提供该扭矩。如果整车需求的制动力超过了电机的制动能力，则由机械制动器提供剩余扭矩。在电机转速很低的情况下，制动回馈的效率不高，电机制动的效能也低，所以完全由机械制动器提供制动力。模型中的控制策略输入如图 5 所示。

Attribute	Event Description	Event Exit Criterion	Next Event No.	Output 1	Output 2
Unit					
1	Power Iraction	powdem <= 0	2	powdem	0
2	Purely Regenerative Sliding	powdem > 0 \ \ powdem <= sldlim \ \ motspd < 1000	3-5	sldlim	0
3	Queue	powdem > 0	1	0	0
4	Queue	powdem <= sldlim	6	0	0
5	Queue	motspd < 1000	13	0	0
6	Purely Regenerative Braking	powdem > sldlim \ \ powdem <= brklim \ \ motspd < 10...	7-9	brklim	0
7	Queue	powdem > sldlim	2	0	0
8	Queue	powdem <= brklim	10	0	0
9	Queue	motspd < 1000	13	0	0
10	Braking Power Split	powdem > brklim \ \ motspd < 1000	11-12	brklim	powdem - brklim
11	Queue	powdem > brklim	6	0	0
12	Queue	motspd < 1000	13	0	0
13	Purely Friction Braking	powdem > 0 \ \ motspd >= 1000	14-15	0	powdem
14	Queue	powdem > 0	1	0	0
15	Queue	motspd >= 1000	2	0	0

图 5 制动能量回馈策略编写界面示例

## 2 仿真结果与分析

根据纯电动汽车的相关试验标准，动力性试验主要考查汽车的最高车速、加速性能、爬坡性能等动力性指标，经济性试验则考查其续航里程和能量消耗率等。在进行动力性和经济性仿真时，本文参照欧洲和国内的试验标准，选取了以下评价指标<sup>[3]</sup>：

表 1 整车性能仿真评价指标

	指标	单位
动力性	最高车速	km/h
	最大爬坡度	%
	0-50km/h 加速时间	s
	50-80km/h 加速时间	s
	0-100km/h 加速时间	s
经济性	NEDC 工况续航里程	km
	NEDC 工况能量消耗率	Wh/km

### 2.1 仿真与试验验证

0 在 GT-suite 的工况设置中设置好仿真工况，软件可以依次计算上述性能指标。其中，最高车速和最大爬坡度是根据电机外特性，采用静力平衡的原理计算出来的。加速时间则是

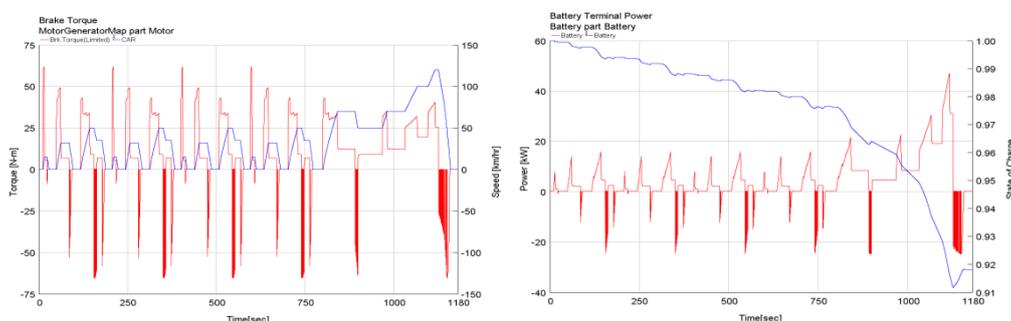


图 6 仿真得到的车速、电机扭矩、电池功率及 SOC 曲线

在油门开度 100%的情况下，根据电机扭矩输出进行动力学计算得到的。经济性指标是用速度控制的方法，让车辆跟随 NEDC 循环工况曲线行驶，最后得出车辆的能量消耗。计算完成后，可以通过软件的后处理模块进行结果查看和分析（图 6）。

本文以某 A0 级纯电动汽车为例，进行了仿真结果与实车试验结果的对比：

表 2 仿真与试验结果对比

	试验	仿真	对比
最大车速 (km/h)	136	143	5.1%
最大爬坡度 (%)	>30	35.2	N/A
0-50km/h 加速时间 (s)	4.0	4.1	2.5%
50-80km/h 加速时间 (s)	3.5	3.4	-2.9%
0-100km/h 加速时间 (s)	10.8	11.0	1.9%
NEDC 工况续驶里程 (km)	118	119	0.9%
NEDC 工况能量消耗率 (Wh/km)	136	135	-0.7%

总的来说，各性能指标的仿真精度较高，特别是经济性指标。根据欧洲纯电动汽车试验标准，能量消耗率是车辆在行驶两个 NEDC 循环工况后，用充入汽车的电量除以行驶里程得到的<sup>[4]</sup>。但仿真模型目前尚不能计算车辆充电时的能量损耗，所以这里对比的是用从电池中释放出的能量计算的消耗率。

## 2.2 整车性能优化方案

在纯电动汽车开发过程中，整车及零部件参数并未最终确定，可以进行选型和优化。此时，研究输入参数对动力性和经济性的影响，对整车性能优化有很好的指导作用。

从前文的整车行驶方程式分析，对整车动力性和经济性影响较大的整车参数主要有整备质量、风阻系数和迎风面积，以及滚阻系数；零部件的性能参数为电池的开路电压及内阻特性，电机及控制器的效率图，电机外特性，减速器的传动比等等。显然，减少整车的整备质量、风阻系数、滚阻系数等有利于整车性能的优化。而对零部件的性能要求则需要进行一定的分析及匹配以使达到最优方案。例如，匹配电机工作电压和电池的电压等级使其都发挥最优性能；根据电机的效率特性，利用仿真软件的 DOE 功能求解在综合工况下的最佳传动比，为减速器设计或选型提供指导。

## 3 总结

纯电动汽车虽然比内燃机汽车更早问世，但至今仍未完全普及，很难取得有价值的实车试验数据。借助仿真工具，在车辆开发阶段对其动力性与经济性做出评估，从而指导零件选型、匹配和优化，可以极大的降低开发成本，缩短开发周期。本文研究了借助 GT-suite 仿真软件建立纯电动汽车整车性能仿真模型的建模方法，并通过试验验证了模型的仿真精度。根据仿真结果，本文分析了纯电动汽车的动力性和经济性，以及整车性能优化方案，证明了仿真模型在纯电动汽车开发过程中的应用价值。

## 4 参考文献

- [1] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009
- [2] GTISE Help. Gamma Technologies Inc.
- [3] GB/T 18386-2005 电动汽车能量消耗率和续驶里程试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005
- [4] ECE-R101. Uniform Provisions Concerning the Approval of Passenger Cars Equipped with an Internal Combustion Engine with Regard to the Measurement of the Emission of Carbon Dioxide and Fuel Consumption and of Categories M1 and N1 Vehicles Equipped with an Electric Power Train with Regard to the Measurement of Electric Energy Consumption and Range. 2000