

基于 MATLAB 的电动汽车工况能耗仿真分析

杨桥生

(珠海广通汽车有限公司, 广东 珠海 519040)

摘要:根据行驶功耗模型、空调冷负荷模型和能量回馈模型建立电动汽车整车能耗模型,利用 MATLAB 编制仿真程序仿真分析整车能耗及续驶里程。

关键词:电动汽车; 能量消耗; MATLAB; 空调负荷

中图分类号:U469.72; U462.3⁺4 文献标志码:A 文章编号:1006-3331(2023)01-0045-04

Simulation and Analysis of Energy Consumption of Electric Vehicle in Working Condition Based on MATLAB

YANG Qiaosheng

(Zhuhai Guangtong Automobile(Shenyang) Co., Ltd., Zhuhai 519040, China)

Abstract: According to the driving power consumption model, air conditioning cooling load model, and energy feedback model, the author establishes the vehicle energy consumption model of the electric vehicle and uses MATLAB to compile the simulation program to simulate and analyze vehicle energy consumption and driving range.

Key words: electric vehicle; energy consumption; MATLAB; air conditioning load

影响电动汽车整车能耗的因素很多^[1],其中整车重量、电机驱动系统、空调、能量回馈是主要因素。相关的整车能耗测试^[2],是在未开空调状态下进行的,而客户要求在实际开空调状态下的整车续驶里程能达到目标值,并且希望整车能耗较低以降低运营成本。本文通过建立整车行驶功耗模型、空调制冷负荷模型和能量回馈模型,并利用 MATLAB 编制程序进行整车能耗及续驶里程仿真^[3],以确定是否满足客户需求。

1 电动汽车能耗模型

1.1 整车行驶功耗模型

根据汽车设计理论^[4],汽车行驶总阻力 F_z 的计算公式见式(1),车辆驱动力 F_q 的计算公式见式(2):

$$F_z = mgf \cos a + C_D AV^2 / 21.15 + \delta m \cdot dv/dt + mg \sin a \quad (1)$$

式中: m 为车辆质量,本文满载为18 000 kg; g 为重力加速度; f 为滚动阻力系数; a 为坡道角; C_D 为风阻系数,本文取0.63; A 为迎风面积,本文7.5 m²; V 为车速; δ 为旋转质量换算系数; dv/dt 为加速度, $dv/dt > 0$ 为加速, $dv/dt < 0$ 为减速。

$$F_q = T_q I_1 \eta / R \quad (2)$$

式中: T_q 为行驶电机驱动扭矩, $T_q > 0$ 为驱动, $T_q < 0$ 为制动; I_1 为减速器速比,本文为6.143; η 为机械传动效率; R 为轮胎滚动半径,本文取0.466 m。

根据汽车行驶阻力平衡方程 $F_q = F_z$,由式(1)式(2)得:

$$T_q(t) = R(mgf \cos a + C_D AV^2 / 21.15 + \delta m \cdot dv/dt + mg \sin a) / \eta / I_1 \quad (3)$$

根据式(3)求出所需行驶扭矩 $T_q(t)$ 。再根据车速可算出电机转速 $n = V \cdot I_1 / 0.377 / R$,因此用于汽车驱动消耗的电功率 $P_q(t)$:

$$P_q(t) = T_q(t) n(t) / \eta_m(t) / 9550 \quad (4)$$

收稿日期:2022-09-12。

第一作者:杨桥生(1977—),男,工程师;主要从事新能源汽车动力性经济性分析工作。E-mail:378912443@163.com。

式中: η_m 为电机系统驱动效率,是电机转速和扭矩的函数,具体计算见后面2.1节。

1.2 空调制冷负荷模型

由汽车空调理论^[5]可知, t 时刻汽车车厢内的总热量 $Q(t)$:

$$Q(t) = \sum K_{ai} A_{ai} [T_w(t) - T_n(t)] + \sum (\eta_b + \beta \alpha_w / \alpha_n) A_{bi} I_{di}(t) X_s + Q_v(t) + Q_p(t) + Q_m(t) \quad (5)$$

式中: K_{ai} 为车身侧围、前围、后围、车顶、底板和玻璃稳态传热系数; A_{ai} 为车身侧围、前围、后围、车顶、底板和玻璃传热面积; $T_w(t)$ 为 t 时刻车外环境温度; $T_n(t)$ 为 t 时刻车内温度; A_{bi} 为玻璃面积; η_b 为太阳辐射透过玻璃的透入系数; β 为玻璃对太阳辐射热吸收系数; α_w 为玻璃外表面放热系数; α_n 为玻璃内表面放热系数; $I_{di}(t)$ 为 t 时刻玻璃表面太阳垂直辐射强度; X_s 为遮阳修正系数; $Q_v(t)$ 为新风热负荷; $Q_p(t)$ 为车内人员热负荷; $Q_m(t)$ 为 t 时刻车内电器热负荷。

通过 Z 传递函数法计算空调制冷负荷 $Q_{ac}(z)$:

$$Q_{ac}(z) = G(z) Q(z) \quad (6)$$

式中: $G(z)$ 为车厢内总热量 Q 与空调制冷负荷 Q_{ac} 的 Z 传递函数; Z 变换是对离散量进行计算的拉普拉斯变换的特例,是一个收敛的幂级数展开式。

将上式进行 Z 变换,则空调制冷负荷 Q_{ac} 的 Z 变换 $Q_{ac}(z)$ 可表示为^[6-7]

$$Q_{ac}(z) = \sum_{j=0}^n Q_{ac}(j) Z^{-j} \quad (7)$$

车厢内总热量 Q 的 Z 变换 $Q(z)$ 可表示为

$$Q(z) = \sum_{j=0}^n Q(j) Z^{-j} \quad (8)$$

为减少计算项数,提高收敛速度,传递函数 $G(z)$ 采用两个 Z 的高次多项式之比表示:

$$G(z) = (\lambda_0 + \lambda_1 Z^{-1} + \lambda_2 Z^{-2} + \dots + \lambda_n Z^{-n}) / (1 + \omega_1 Z^{-1} + \omega_2 Z^{-2} + \dots + \omega_n Z^{-n}) \quad (9)$$

将式(7)、式(8)和式(9)代入式(6),得

$$\sum_{j=0}^n Q_{ac}(j) Z^{-j} / \sum_{j=0}^n Q(j) Z^{-j} = \frac{\sum_{j=0}^n \lambda_j Z^{-j}}{1 + \sum_{j=1}^n \omega_j Z^{-j}} \quad (10)$$

式中: λ_j 、 ω_j 为 Z 传递函数系数。按等式两边同次幂项系数相等原则整理,可得到任意 t 时刻制冷负荷计

算式:

$$Q_{ac}(t) = \sum_{j=0}^n \lambda_j Q(t-j) - \sum_{j=1}^n \omega_j Q_{ac}(t-j) \quad (11)$$

λ_j 和 ω_j 收敛很快,取2~3项即可满足工程要求,故简化得到任意 t 时刻空调冷负荷为 $Q_{ac}(t)$:

$$Q_{ac}(t) = \lambda_0 Q(t) + \lambda_1 Q(t-1) - \omega_1 Q_{ac}(t-1) \quad (12)$$

式中: $Q(t)$ 为 t 时刻车厢内总热量; $Q(t-1)$ 为 $t-1$ 时刻车厢总热量; $Q_{ac}(t-1)$ 为 $t-1$ 时刻制冷负荷; λ_0 、 λ_1 和 ω_1 可查阅相关文献获得。根据空调制冷负荷 $Q_{ac}(t)$,可得空调功耗 $P_{ac}(t)$:

$$P_{ac}(t) = Q_{ac}(t) / K_{ac}(t) \quad (13)$$

式中: K_{ac} 为空调能效比,与制冷系统及温度有关,可从空调实验获得。

1.3 能量回馈模型

当汽车减速时,由式(3)可计算出减速度 dv/dt (负值)所需的整车总制动扭矩。本文为并联式制动模式,在制动踏板为自由行程时整车总制动扭矩完全由电机提供;在制动踏板开度大于自由行程开度时,整车总制动扭矩由电机制动和机械制动共同提供^[8-10]。

电机制动(回馈扭矩)值与动力电池SOC、电机转速和制动踏板开度相关:电机转速 <350 r/min 或 >2400 r/min时,回馈扭矩为零,SOC $>95\%$ 时回馈扭矩为零;其他时候本文样车回馈扭矩 T_h 与电机转速 n 和制动踏板开度 K 的函数关系式如下:

$$T_h = 366.82 - 1.37n - 18.06K + 0.0005n^2 + 0.001n \cdot K + 0.1247K^2 \quad n \in [350, 2400] \quad (14)$$

则电机制动回馈功率 $P_h(t)$:

$$P_h(t) = n(t) T_h(t) \eta_h(t) / 9550 \quad (15)$$

式中: η_h 为电机系统回馈效率,是电机转速和扭矩的函数,具体计算见后面2.4节。

1.4 整车能耗模型

根据式(4)、式(13)和式(15)可计算整车能耗 E :

$$E = \int [P_q(t) + P_{ac}(t) - P_h(t)] dt \quad (16)$$

2 整车能耗仿真

根据上述电动汽车能耗模型利用MATLAB进行

编程,导入整车相关参数,导入电机系统各转速和扭矩下的系统效率数据,导入行驶工况和空调工况,然后仿真分析整车能耗及续航里程。

2.1 导入电机系统驱动效率数据

将电机标定测试得到的各采集点转速和扭矩下的电机系统效率数据导入 MATLAB,把电机系统效率 η_m 看作是电机转速 A 和电机扭矩 B 的函数,用多项式表示: $\eta_{mi} = a_0 + a_1 A_i + a_2 B_i + a_3 A_i^2 + a_4 A_i B_i + a_5 B_i^2 + \dots + a_{N-2} A_i^j + a_{N-1} A_i^{j-1} B_i + a_N B_i^j + e_i$, j 为多项式阶数,本文取 2; $a_0, a_1, a_2 \dots a_N$ 为回归系数,因多项式阶数为 2,则对应的 N 为 5, $i = (1, 2 \dots k)$, k 个采集点,根据多元回归分析法构建回归模型:

$$\begin{bmatrix} \eta_{m1} \\ \eta_{m2} \\ \vdots \\ \eta_{mk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & A_1 & B_1 & A_1^2 & A_1 \cdot B_1 & B_1^2 \\ 1 & A_2 & B_2 & A_2^2 & A_2 \cdot B_2 & B_2^2 \\ & & & \vdots & & \\ 1 & A_k & B_k & A_k^2 & A_k \cdot B_k & B_k^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_k \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中: A_1, A_2, \dots, A_k 为电机转速; B_1, B_2, \dots, B_k 为电机扭矩; $a_0, a_1 \dots a_5$ 为待确定的回归系数, $e_1, e_2 \dots e_k$ 为残差,根据最小二乘法原理解回归方程,得系数 $a_0 = 78.9483, a_1 = 0.0239, a_2 = 0.0092, a_3 = 0.0000, a_4 = 0.0000, a_5 = 0.0000$,拟合得电机系统效率 map 图如图 1 所示。

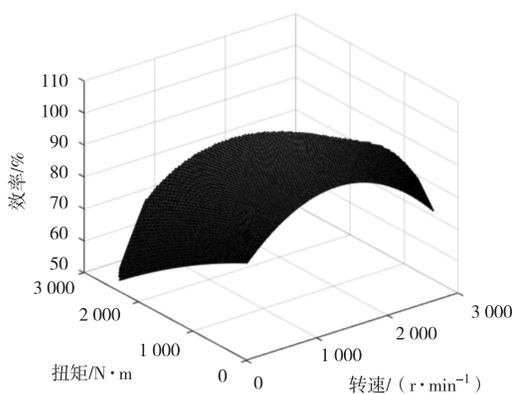


图 1 电机系统效率 map 图

将电机系统效率 η_m 代入式(4)即可求得相应电

机转速 n 和相应驱动扭矩 T_q 下的驱动功率 P_q 。

2.2 导入行驶工况

通过后台监控平台采集珠海某公交线路的行驶数据,通过片段提取,聚类分析构建得到此路线行驶工况如图 2 所示。

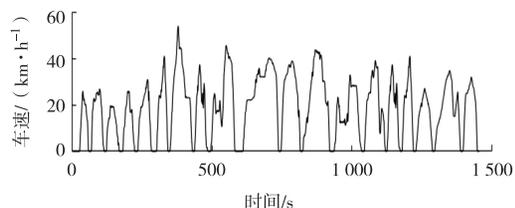


图 2 公交线路行驶工况

2.3 导入空调工况

以农业气象大数据系统中珠海夏季太阳辐射强度作为参照,得出夏季炎热天气车外环境参数见表 1。

表 1 车外环境参数

时刻/h	车外温度 $T_w/^\circ\text{C}$	太阳辐射强度/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$
8/9/10	27.4/28.9/30.4	462/664/824
11/12/13	31.8/32.9/33.6	926/962/926
14/15	34.1/33.7	824/664
16/17	33.2/32.1	462/244

乘员按 65 人计算,车内设置目标温度为 25°C ; 将车外温度 $T_w(t)$ 和太阳辐射强度 $I_{di}(t)$ 代入式(5),可计算得到上午 8 点到下午 17 点间汽车车厢内的总热量。

2.4 能量回馈

将电机标定测试得到的各采集点转速和发电扭矩下的电机效率数据导入 MATLAB,同样通过最小二乘法多元回归分析法,可得电机回馈效率方程:

$$\eta_h = 75.1907 + 0.0345n + 0.0188T_h \quad (18)$$

将电机回馈效率 η_h 代入式(15)即可求得相应转速 n 和相应回馈扭矩 T_h 下的回馈功率 P_h 。

根据式(14)和式(18),可得到电机回馈效率 map 及电机回馈扭矩曲线,如图 3 所示;图 3 只示意了制动踏板开度为 100%时的回馈扭矩曲线,其他开度下的回馈扭矩曲线同样可由式(14)求得。

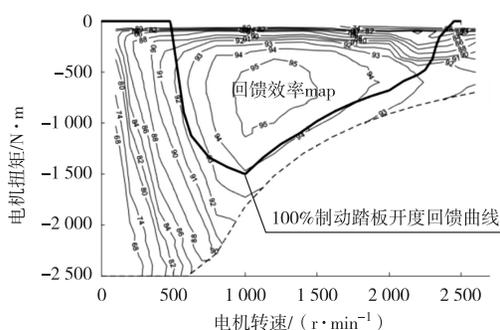


图3 电机回馈效率 map 及回馈扭矩曲线

2.5 仿真结果与试验验证

根据整车能耗模型计算得到8点到17点的整车能耗数据,见表2。

表2 整车能耗仿真

项目	整车能耗/(kWh·km ⁻¹)	续航里程/km
不开空调无能量回馈	1.07	251
不开空调有能量回馈	0.803	337
开空调有能量回馈	1.1	246
开空调无能量回馈	1.372	197

在预留10%电池电量的情况下,仿真得到能量回收1.589 kWh,开空调有能量回馈状态续航里程246 km,满足客户开空调实际工况续航里程大于200 km的要求;仿真结果反映夏季开空调状态续航里程比不开空调状态缩短91 km。从仿真结果看,有能量回馈续航里程比无能量回馈续航里程增加86 km,若开空调但无能量回馈续航里程无法满足大于200 km的要求,部分时刻整车能耗曲线如图4所示。

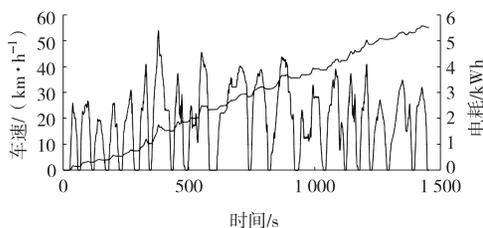


图4 整车电耗曲线

车辆运营前,在实验室按珠海某公交线路行驶工况进行不开空调状态整车能耗测试,整车加载3800 kg,通过功率分析仪采集能耗数据,试验测得有能量回馈状态整车能耗为0.809 kWh/km,能量回收量为1.576 kWh,整车能耗与能量回馈实测结果与仿真结

果接近。车辆实际运营后,通过远程监控终端后台获取7月份某天8点到17点运行数据,当天最高气温34℃,8点到17点间的气温在27~34℃之间,根据客流仪数据,8点到17点间的大部分时间乘员在50~80人之间。统计分析整车各时刻总电流和总电压数据,得出整车能耗为1.09 kWh/km,与仿真结果相近,实际能耗也满足客户对续驶里程的要求。

3 结束语

从整车行驶功耗模型、空调冷负荷模型及整车能量回馈模型构建整车能耗模型,所建模型贴近汽车使用空调时的实际运行工况,利用MATLAB的强大运算能力可快速仿真分析出能耗及续驶里程数据,为设计提供依据。

参考文献:

- [1] 陈清泉,孙逢春,祝嘉光. 现代电动汽车技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2002:18-24.
- [2] 中华人民共和国工业和信息化部. 电动汽车 能量消耗率和续航里程 试验方法:GB/T 18386—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017:11.
- [3] 刘浩,韩晶晶. MATLAB R2016a 完全自学一本通[M]. 北京:电子工业出版社,2015:17-287.
- [4] 余志生. 汽车理论:第5版[M]. 北京:机械工业出版社,2009:2-17.
- [5] 王若平. 汽车空调[M]. 北京:机械工业出版社,2007:3-8.
- [6] 王晓丹. 纯电动客车空调系统参数匹配与设计研究[D]. 长春:吉林大学,2009.
- [7] 秦大同,武仲斌,黄晶莹,等. 考虑电动空调能耗的纯电动汽车动力传动系统参数匹配[J]. 重庆大学学报,2013(12):1-8.
- [8] 霍汝锋,吴威. 纯电动汽车能效分析与功率分配[J]. 产业与科技论坛,2017,16(4):57-58.
- [9] 赵轩,马建,汪贵平. 基于制动驾驶意图辨识的纯电动客车复合制动控制策略[J]. 交通运输工程学报,2014(4):68-79.
- [10] 郭金刚,董昊轩,盛伟辉,等. 电动汽车再生制动能量回收最优控制策略[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2018,39(2):132-138.