

基于电池 SOE 预测电动汽车的续驶里程

林仕立^{1,2,3}, 宋文吉^{1,2,3}, 吕 杰^{1,2,3}, 冯自平^{1,2,3}

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院可再生能源重点实验室, 广东 广州 510640;
3. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 提出采用电池能量状态(SOE)估算以提高电动汽车续驶里程预测的精度。在基本 SOE 定义的基础上,引入热能参数对数学模型进行修正,结合车辆质量、行驶阻力、电池组性能及行驶工况等影响因素,研究电动汽车供需功率模型,建立基于 SOE 的续驶里程预测方法。标准循环测试工况验证表明:该方法的精度比传统方法提高了 4.09%,预测结果更接近实际值。

关键词: 能量状态(SOE); 电动汽车; 续驶里程预测; 供需功率模型

中图分类号: TM912.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1579(2017)03-0137-03

Forecasting the driving range of electric vehicle based on the SOE of battery

LIN Shi-li^{1,2,3}, SONG Wen-ji^{1,2,3}, LV Jie^{1,2,3}, FENG Zi-ping^{1,2,3}

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640, China;
2. CAS Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou, Guangdong 510640, China; 3. Guangdong Provincial
Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

Abstract: The state of energy (SOE) estimation was proposed to improve the accuracy of electric vehicle driving range prediction. Based on the basic definition of SOE, the thermal parameters were introduced to modify the mathematical model of SOE. Combined with some influence factors, such as vehicle quality, driving resistance, battery performance and driving conditions, the power supply and demand model was researched and the driving range prediction method based on SOE was established. It could be verified through the standard cycle test that the accuracy of this method was 4.09% higher than that of the traditional method and the predicted results were closer to the actual values.

Key words: state of energy (SOE); electric vehicle; driving range prediction; power supply and demand model

续驶里程的准确预测是电动汽车应用中的关键问题。电池作为电动汽车的动力来源,一般通过荷电状态(SOC)衡量容量,并通过 SOC 与端电压乘积的积分计算剩余能量,从而实现整车续驶里程的预测。单纯采用电池模型的 SOC 估算方法精度较低,误差超过 10% 以上^[1]。文献[2]引入电压电流校正手段,使行驶过程中 SOC 预测精度优于 10%;文献[3]采用 BP 神经网络对库仑效率进行修正,估算精度比传统方法提高 4.9%。目前的预测结果并不精确,主要是因为采用 SOC 衡量续驶里程存在两方面的问题:①电动汽车的功率需求由电池

端电压和充放电电流共同决定,采用 SOC 描述电量,忽略了端电压的影响,难以线性对应续驶里程等与功率直接相关的预测参量;②电动汽车行驶过程对电池而言属于高倍率、变工况的充放电状态, SOC 估算方法忽略了电池生热所带来的热能损耗影响,导致最终结果容易出现较大的误差。

本文作者提出采用电池能量状态(SOE)对电动汽车续驶里程进行预测。通过引入电池内阻生热的影响,提出基本 SOE 数学定义式的修正方法,并分析影响续驶里程的主要因素,建立电动汽车供需功率模型;进而提出以 SOE 为自变量、

作者简介:

林仕立(1983-),男,广东人,中国科学院广州能源研究所助理研究员,研究方向:大规模储能控制技术;

宋文吉(1978-),男,山东人,中国科学院广州能源研究所研究员,研究方向:大规模储电系统控制技术,本文联系人;

吕 杰(1984-),女,河南人,中国科学院广州能源研究所助理研究员,研究方向:电池均衡控制技术;

冯自平(1968-),男,宁夏人,中国科学院广州能源研究所研究员,研究方向:先进储能技术。

基金项目:国家自然科学基金项目(51607176,51477171),广州市科技计划项目(201509030005)

续驶里程为因变量的循环工况预测方法,并在标准循环工况实验下对续驶里程进行预测;最后对预测结果进行对比。

1 SOE 修正模型

与 SOC 不同,SOE 从能量角度出发,表示剩余可用能量占总能量的比值^[4]。考虑到不同充放电倍率及温度下电池的生热差异较大,以热能及总可用能的影响修正 SOE 基本定义^[5],可得到精度高且适用于实际工况的估算方程,计算式见式(1)。

$$\text{SOE}(t) = \frac{E_{\text{remain}}}{E_{\text{max}} - E_b} \times 100\% = \text{SOE}_0 - \int_0^t \frac{W_e + W_t}{\mu E_{\text{max}}} dt \quad (1)$$

式(1)中: E_{max} 为电池最大可用能; E_b 为某工况下无法释放的能量;两者差值为能量释放的实际值,比值用 μ 表示; W_e 为单位时间内的电能; W_t 为单位时间内的热能;SOE₀为初始时刻电池 SOE 值。

2 基于 SOE 的续驶里程预测方法

电动汽车的续驶里程主要是指动力电池从满电运行直到放电完全时,电池可用于支持汽车行驶的里程数。续驶里程与电池在运行过程中的能量消耗密切相关,准确预测需要同时考虑电池能量状态及运行功率变化状态的影响。

2.1 续驶里程的影响因素

影响电动汽车续驶里程的因素较多,主要分为车辆内在因素及行驶过程的外部环境因素。

内在因素包括汽车总质量、行驶阻力以及电池组性能等参数。车载动力电池提供的驱动主要用来克服运行过程中的空气阻力、滚动阻力、坡度阻力及加速阻力^[6],所需功率即为 4 类功率的总和。对于电池组,当所配置的能量一定时,适当提高电池的比能将有助于提高电动汽车的续驶里程;同时,成组电池排布方式、单体之间一致性及电池组健康状态等,都会影响能量的对外输出以及损耗。

外部因素主要可划分为行驶工况及外部环境两类。一方面,为满足行驶过程中的功率需求,电动汽车要不断调整电池组能量输出,导致不同工况下的续驶里程存在较大差异;另一方面,环境温度也对续驶里程有影响,具体表现在:低温时电池性能较差,需要提供较多的能量以维持工作温度,热能损耗比例上升,减少了实际对外做功的电能;高温时电池容易达到工作温度上限,导致部分能量不能被合理使用。

2.2 电动汽车的功率供需模型

结合上述电动汽车影响因素的分析,可建立电动汽车运行过程的功率需求模型,数学方程式如式(2)所示^[7]。

$$P = \frac{Gfv}{3600} + \frac{C_d Av^3}{3600} + \frac{Giv}{3600} + \frac{\delta mv}{3600} \frac{dv}{dt} \quad (2)$$

式(2)中: P 为运行过程所需功率; m 为车辆及载重的总质量; G 为车辆及载重的重力和; v 为速度; dv/dt 为加速度; f 为滚动阻力系数; C_d 为空气阻力系数; A 为迎风面积; i 为行驶坡度; δ 为汽车旋转质量换算系数。

2.3 基于 SOE 的续驶里程预测

假设电池单体一致性较高且运行过程损耗均匀,电池组

有效能量(E)及剩余能量(E_{res})可由式(3)表示:

$$\begin{cases} E = mnE_{\text{max}}\eta_{\text{dis}}Z_{\text{DOD}} \\ E_{\text{res}} = mnE_{\text{max}}\eta_{\text{dis}}\text{SOE} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: m 为电池并联组数; n 为电池单体串联数量; E_{max} 为单体电池最大可用能量; η_{dis} 为电池放电能量效率; Z_{DOD} 为放电深度。

结合式(1)~(3),当电动汽车处于匀速行驶工况时,可认为所需功率恒定,则电池所提供的能量 P 在单位时间内也为恒定值,放电时间 t 及续驶里程 S 可由式(4)得到。

$$\begin{cases} t = \frac{mnE_{\text{max}}\eta_{\text{dis}}\text{SOE}}{P} \\ S = vt \end{cases} \quad (4)$$

在标准行驶工况下,一般可采用连续重复的标准测试工况对电池进行放电,直至达到截止电压。标准工况下车速不恒定,车辆所需功率将随着车速而变化,但对选定的标准循环测试工况,由于单位时间内的速度和行驶时间都确定,则单个循环工况所需能量可由功率积分获得,继而得到电池对外做功所提供的电能及实际消耗的内部能量,由此,根据式(4)同样可以计算得到放电时间及续驶里程。

3 实验及结果分析

根据上述预测方法,使用 Chroma 17020 充放电设备(台湾省产)模拟电动汽车进行续驶里程估算及验证。所参照的电动汽车性能参数包括:整车整备质量为 1 090 kg、满载质量为 1 400 kg、迎风面积为 2.04 m²,空气阻力系数为 0.34,滚动阻力系数为 0.017,传动效率为 0.9,轮胎半径为 0.275 m。

实验用电池组由 20 Ah/3.2 V 磷酸铁锂正极锂离子电池单体(河南产,7.2 mm × 174 mm × 250 mm)通过 2 并 100 串组成, Z_{DOD} 为 80%。测试工况按 GB/T18386-2005《电动汽车能量消耗率和续航里程》^[8]中 A.2.1 测试工况图的规定进行,以此设置设备程序,对电池组进行充放电。

结合试验循环测试工况及式(2)的功率需求模型,可求得标准工况下各时刻的实时功率。在 $Z_{\text{DOD}} = 80\%$ 时,磷酸铁锂正极锂离子电池可认为工作在电压平台,因此可得到电池组在单位循环工况下的电流变化趋势,如图 1 所示。

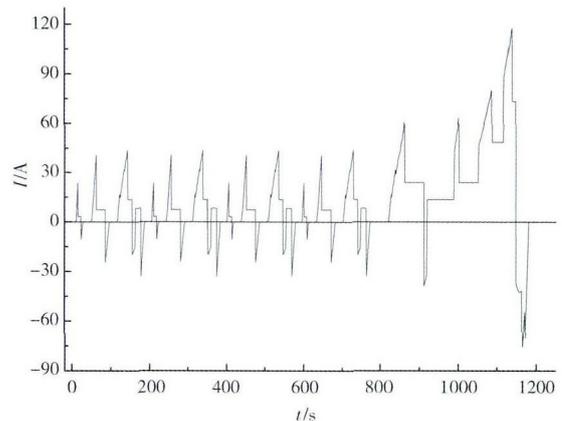


图 1 电流变化趋势图

Fig. 1 The changing curve of current

图1中,正值为放电时段,表示此时电池组向车辆提供动力;负值为充电时段,此时电池组回收刹车产生的制动能量。从图1可知,车辆处于频繁的加速和制动过程。

根据电池组的电流变化,可得到各循环工况下电池 SOE 的变化趋势,其中首次循环的 SOE 变化情况如图2所示。

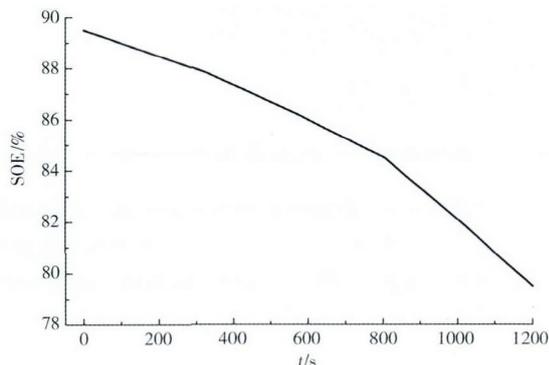


图2 首次循环的 SOE 变化情况

Fig. 2 Changing situation of SOE during initial cycle

从图2可知,在1200s循环工况变化的过程中,SOE由89.7%下降至79.5%。市郊循环工况的平均放电倍率大于市区循环工况,因此在循环工况后期,电池的SOE下降得较为明显。

在固定的循环测试工况下,车辆续航里程可认为是一个确定值,利用该值与经过路程的差值即可得到剩余续航里程。结合电动汽车主要性能参数,可得到剩余续航里程预测情况,如图3所示。

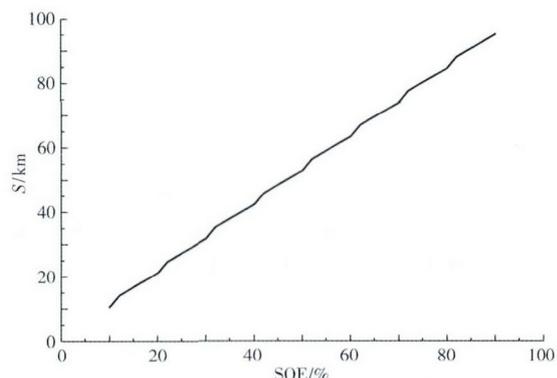


图3 电动汽车续航里程预测情况

Fig. 3 Forecast of driving range of electric vehicle

从图3可知,采用SOE估算方法对电动汽车续航里程进行预测,当电池SOE处于10%~90%时,对应剩余续航里程范围为10.56~95.04km,且在运行过程中,任一循环工况所经历的时间、路程与SOE变化值基本保持一致。

传统续航里程计算法是将汽车运行阻力功率与传动系数的乘积等同于电池的输出功率,传动系数一般是确定的数值,电池的输出功率完全依赖于电池运行阻力功率。通过选用初始SOE=90%的电池,按标准放电实验模拟电动汽车实际运行工况并放电至截止条件,采用传统型SOE方法对续航里程进行估测,得到两种方法预测的续航里程结果,如表1所示。

表1 续航里程预测结果对比

Table 1 Comparison of prediction results of driving range

循环周期	里程/km		
	实际值	传统型	改进型
1	83.80	85.36	83.47
2	71.90	74.40	72.75
3	60.60	64.60	61.20
4	49.30	53.64	50.86
5	38.00	43.85	39.64
6	26.70	32.46	28.90
7	15.40	21.98	17.22
8	4.10	11.52	6.14

从表1可知,在相同初始SOE情况下,在每个循环周期内,利用改进型SOE计算方法得到的预测值都比传统型的续航时间更少,续航里程值更短;同时,经过若干个周期,当电池组达到设置的放电截止条件时,预测的剩余里程数更少,与电动汽车无法继续提供动力的状态更加吻合。该现象符合本文作者提出的SOE定义修正方法,即SOE估算模型考虑了电池充放电过程中产生的热能损耗,在全过程工况下,该方法估算精度比传统方法提高了约4.09%,使预测结果更接近实际值。

4 小结

续航里程的准确预测是电动汽车应用中的关键问题。电池能量状态SOE与行驶过程功率参数具有较好的线性关系,可提高续航里程等与功率直接相关参量的估算精度。引入电池热能,对基本SOE定义式进行修正,通过研究电动汽车行驶过程的影响因素和供需模型,提出基于SOE的续航里程预测方法,并在标准循环测试工况下验证该方法的精确性,可为电动汽车续航里程预测提供参考。

参考文献:

- [1] 尹安东,赵韩,周斌,et al. 基于行驶工况识别的纯电动汽车续航里程估算[J]. 汽车工程, 2014, 36(11): 1310-1315.
- [2] 黄小玲,那伟,叶磊,et al. 混合动力汽车用锂离子电池荷电状态的估计[J]. 电池, 2014, 44(5): 290-292.
- [3] 吴海东,任晓明,那伟,et al. 改进安时法结合神经网络估算锂离子电池SOC[J]. 电池, 2016, 46(1): 16-19.
- [4] MAMADOU K, LEMAIRE E, DELAILLE A, et al. Definition of a state-of-energy indicator (SOE) for electrochemical storage devices: application for energetic availability forecasting [J]. J Electrochem Soc, 2012, 159(8): A1298-A1307.
- [5] 罗玲,宋文吉,林仕立,et al. 电池SOE估算方法及在电动汽车工况下的应用[J]. 电池, 2016, 46(1): 31-34.
- [6] 徐贵宝,王震坡,张承宁,et al. 电动汽车续航里程能量计算和影响因素分析[J]. 车辆与动力技术, 2005, (2): 53-58.
- [7] 赵侃,朱聪,曾诚,et al. 基于电化学模型的电动公交车续航里程预测及分析[J]. 公路交通科技, 2013, 30(8): 153-158.
- [8] GB/T18386-2005. 电动汽车能量消耗率和续航里程[S].

收稿日期:2016-10-23