

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1801891

纯电动汽车动力电池温度预测模型实验研究*

魏国强 高兰芳

(河南省驻马店财经学校 驻马店 463000)

摘要: 温度是影响动力电池寿命和安全性能的一个重要因素,在复杂的行驶工况下,对车载动力电池的温度预测控制显得非常重要。针对纯电动汽车动力电池温度测量精确度下降的问题,分别采集了车辆在 FTP75 和 UDSS 两种典型行驶工况下的温度数据,在动力电池热动力学模型的基础上,采用基于参数模型的广义预测控制算法,建立了纯电动汽车整车模型以及动力电池温度精确预测模型,并搭建了动力电池温度测量实验台架,试验结果表明,在车辆 FTP75 和 UDSS 两种典型行驶工况,模型预测温度与实际温度的误差极小,广义预测控制算法模型满足了车用动力电池温度精确预测的目标需求。

关键词: 温度;动力电池;广义预测控制;预测模型

中图分类号: 中图分类号:TN701 **文献标识码:** 文献标识:A **国家标准学科分类代码:** 510.20

Experimental study on temperature prediction model of electric vehicle power battery

Wei Guoqiang Gao Lanfang

(Henan Zhumadian Finance and Economics School, Zhumadian 463000, China)

Abstract: Temperature is an important factor affecting the life and safety performance of power batteries. Under complex driving conditions, temperature prediction control of vehicle power batteries is very important. Aiming at the problem of the accuracy measurement of the temperature measurement of the pure electric vehicle power battery, the temperature data of the vehicle under the typical driving conditions of FTP75 and UDSS are collected respectively. Based on the thermodynamic model of the power battery, the parameter model based generalization is adopted. The predictive control algorithm establishes the vehicle model of pure electric vehicle and the accurate prediction model of power battery temperature, and builds a test bench for power battery temperature measurement. The test results show that the model predicts the temperature in two typical driving conditions of vehicle FTP75 and UDSS. The error with the actual temperature is very small, and the generalized predictive control algorithm model satisfies the target demand for accurate prediction for the temperature of vehicle power battery.

Keywords: temperature; power battery; generation predictive control; prediction model

0 引言

电池作为混合动力汽车、纯电动汽车的重要储能和驱动来源,其安全性以及使用寿命一直是人们担心的问题,也是专家学者研究的热点以及难点。动力电池温度是动力电池及其管理系统良好性能的一个表征参数,车辆在复杂的行驶工况下需要频繁地起停,大电流的冲击使动力电池温度上升,当电池大功率使用时,产生的热量较多,会导致内部温度急剧上升,远大于电池表面温度,而电池温度大惯性、大延迟的特点使电池外表面温度的变化要滞后一段相

当长的时间^[1]。因此,建立实时在线测量的温度预测模型对实现电池冷却散热十分必要,与此同时,对电池热管理系统有效抑制动力电池温度过高具有实际意义。

对准确预测动力电池温度的研究,国内外学者都投入了大量的精力也取得了丰硕的成果,其中 Cech 等^[2]分析了动力电池充放电过程中影响电池温度的因素;Krivik 等^[3]利用电池电化学阻抗谱来预测电池温度;文献[4]采用电阻层析成像方法预测电池内部温度。上述采用的方法是在理想的状况下预测动力电池温度,本文在电池热动力学模型基础上,利用车辆两种不同的城市典型行驶工况采集的温度数据

收稿日期:2018-12-26

* 基金项目:国家自然科学基金(50874114)、河南省教育厅自然科学基金基础研究项目(2008A630064)资助

集,构建了基于参数优化模型的广义预测算法的动力电池温度预测模型,动力电池温度预测精度高,模型预测速度快,延长了使用寿命,更保证了动力电池热管理系统的安全管理。

1 电池热动力学模型

在复杂的城市行驶环境下,动力电池的生热过程主要由电池内阻生热、内部化学反应产生热量以及内部循环的热量组成。由此可见,车辆动力电池的温度测量可以通过测试动力电池箱体的环境温度以及表面温度,但是动力电池的性能是由其内部温度决定的。文献[5]利用多数据信息融合建立了一种电池热动力学模型,获得了实时行驶工况下混合动力汽车动力电池温度数据集。依据热物理规则,车辆行驶过程中的动力电池热动力学模型描述如下:

$$\tau \frac{dT_n(t)}{dt} + T_n(t) - T_m(t) = \alpha R_{int} I^2(t)$$

$$\lim_{t \rightarrow t_{end}} \tau \frac{dT_n(t)}{dt} + T_n(t) = T_{am} \quad (1)$$

对上述热动力学模型进行离散化:

$$\tau \frac{T_n(k+1) - T_n(k)}{\Delta T} = T_m(k) - T_n(k) + \alpha R_{int} I^2(k)$$

$$T_n(k+1) = \frac{\tau - \Delta T}{\tau} T_n(k) + \frac{\Delta T}{\tau} T_m(k) + \frac{\Delta T}{\tau} \alpha R_{int} I^2(k) \quad (2)$$

式中: τ 代表热动力学时间常数; α 代表热传递常数; R_{int} 代表电池内阻; T_n 、 T_m 分别代表电池内部温度和表面温度。其中热动力学时间常数和热传递常数都是关于电池电流和电池表面温度的函数。

其中,采用双参数电路模型来表征电池的生热行为,只要计算电路终端的电压与电流就能准确的估算电池内阻。

$$R_{int}(k) = \frac{V_{oc}(k) - V_t(k)}{I_t(k)} \quad (3)$$

式中: V_t 、 I_t 分别表示动力电池模型的终端电压与终端电流; V_{oc} 表示动力电池模型电路的开路电压。

上述热动力学模型准确的描述了动力电池生热的机理过程,形象的表明了电池内阻、内部循环生热对电池内部温度的影响,与此同时,动力电池内部温度与表面温度在充放电过程中趋于稳定,且收敛于环境温度。

2 动力电池温度采集

为了确保预测模型的精度,在车辆实时行驶工况下采集动力电池温度数据,摒弃以往以车辆速度为表征参数的行驶工况信息,以电机的需求电流为识别参数,一方面能清楚的看出大电流对电池的冲击与温度急剧上升,另一方面电机需求电流的变化更形象地描述车辆起步、一般行驶、加速、刹车制动以及停车的状态。车辆动力电池采用标称 420 V/65 Ah 的锂电池,采集了 FTP75^[6]和 UDDS^[7]两种不同行驶工况下动力电池的温度数据,两种行驶工况如图 1 所示。

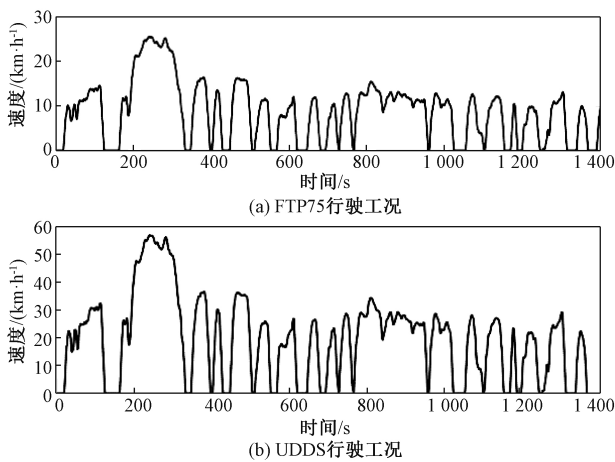


图 1 车辆两种不同行驶工况

3 动力电池温度预测模型建立

3.1 广义预测控制算法模型

广义预测控制^[8](generation predictive control, GPC)是一种基于参数模型的预测控制算法,在解决系统时延估计不精确、在线预测精度不足的问题上起到了很大的作用,是在模型预测控制(model algorithm control, MAC)以及动态矩阵控制(dynamic matrix control, DMC)的滚动优化策略基础上的进一步优化。摒弃了极点配置自校正控制器对系统阶次敏感的缺点,与此同时,也打破了时延估计不准对系统数学模型高精度要求的束缚,利用广义预测控制算法来构建动力电池温度预测模型同样具有预测模型、滚动优化和在线反馈校正的特征,基于广义预测控制算法构建的动力电池温度预测模型设计简单,预测误差小,对于复杂行驶工况下动力电池温度预测系统有优良的控制和鲁棒性。

文献[9]指出广义预测控制算法是由柔化、调节以及预测 3 部分组成的,在任意时刻,系统给定值数据集通过柔化得到期望输出值,偏差向量则是由期望输出值与预测输出值做差得到,偏差向量与动态向量的点积得到控制增量,而后通过一系列的运算作用于系统控制对象。广义预测控制算法控制结构图如图 2 所示。

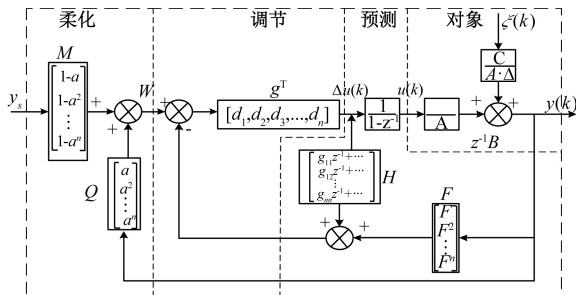


图 2 GPC 控制架构

由文献[10]可知,电池温度的测量系统是一个非线性突变的系统,在上述广义预测控制的控制架构图中对被控

对象采用受控自回归积分滑动平均模型(CARIMA)^[11]来描述,由此,采用基于CARIMA预测模型来构建不同工况下动力电池温度预测模型。

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})\Delta u(t-1) + D(z^{-1})u(t-1) + C(z^{-1})\xi(t) \quad (4)$$

其中:

$$\begin{cases} A(z^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^{n_{a1}} a_i z^{-i} \\ B(z^{-1}) = \sum_{i=1}^{n_{b1}} b_i z^{-i} \\ C(z^{-1}) = \sum_{i=1}^{n_{c1}} c_i z^{-i} \\ D(z^{-1}) = \sum_{i=1}^{n_{d1}} d_i z^{-i} \end{cases} \quad (5)$$

式中: y 、 Δu 、 u 、 ξ 分别表示输出量,输入量,前馈以及正态扰动,在车辆起步、加速以及制动3种工况下,选取动力电池温度(被测量)作为输出量;散热风扇速度(控制量)为输入量;电池内阻(可测扰动量)为前馈;电机需求电流(正态白噪声)为正态扰动。

在对输出量的预测过程中, $y(t)$ 含有预测模型中的未知信息,考虑到丢番图方程给出温度预测的目标函数如下:

$$J = E \left\{ \sum_{i=N_1}^{N_2} [y(t+k) - \omega(t+k)]^2 + \sum_{i=1}^{N_m} \lambda [\Delta u(t+k-1)]^2 \right\} \quad (6)$$

式中: N_1 、 N_2 、 N_m 表示最小、最大预测长度、控制长度; λ 表示控制加权序列;系统经过柔化后的参考量为 $\omega(t+k)$ 。

在动力电池温度预测模型建立过程中,这一闭环系统能得到稳定的闭环响应,保证输入输出的稳定性,即使系统输入控制量受到约束,也完全不会影响整个预测模型的稳定性^[12]。为了让温度预测模型系统获得优良的鲁棒性以及动态响应,需要优化控制对象、优化设计参数、让动力电池温度输出量能够沿着参考轨迹趋向设定的环境温度值。极小化目标函数,根据受控自回归积分滑动平均模型以及滚动优化规则,得到动力电池温度预测GPC模型的最优控制律^[13]如下:

$$\Delta U = (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T (W - f) \quad (7)$$

其中:

$$\begin{cases} \Delta U = [\Delta u(k), \Delta u(k+1), \Delta u(k+2), \dots, \Delta u(k+n-1)]^T \\ W = [\omega(k+1), \omega(k+2), \omega(k+3), \dots, \omega(k+n)]^T \\ f = [f(k+1), f(k+2), f(k+3), \dots, f(k+n)]^T \\ G = \begin{bmatrix} g_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{m-1} & \dots & g_0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (8)$$

式中: G^T 、 W 、 f 表示行向量、参考序列向量以及数据向量。

车辆动力电池系统是一个复杂的非线性系统,而在复杂的行驶工况下,动力电池的预测模型面临很多外部扰动,一些不稳定的因素也会被激励起来,从而容易导致系统模型预测失准。由可知模型失配给系统的鲁棒性带来的影响,温度预测误差增大,在面对车辆频繁启停导致电机电流和充放电电流波动比较大对动力电池冲击大,导致温度升高的状况下,采用GPC控制算法的动力电池温度预测模型必须加入补偿控制以此来调整优化。

广义预测控制和动态矩阵控制在优化控制策略上的机理大致相同,都具有滚动优化^[14]和反馈校正^[15]的功能,动态矩阵控制采用误差校正控制器来修正预测值,通过上述广义预测控制控制架构可知,广义预测控制可以通过优化柔化因子或者加装滤波器抑制零点干扰,增强系统鲁棒性,避免模型参数得不到优化导致温度预测误差大的影响,从而获得精确的动力电池温度预测模型,动力电池的温度预测也应该考虑单体均衡状态带来的影响,这是往后需要考虑进去的一个重要因素^[16]。

3.2 动力电池温度 MATLAB 预测模型

利用 MATLAB2015b 与 GT-Suite 联合仿真软件平台构建了纯电动汽车的整车模型以及基于广义预测控制算法的动力电池温度预测模型,联合仿真模型如图3所示,行驶工况采用 FTP75 工况,在预测模型不断参数优化调整过程中,对模型参数选取了合适的数值,如表1所示。

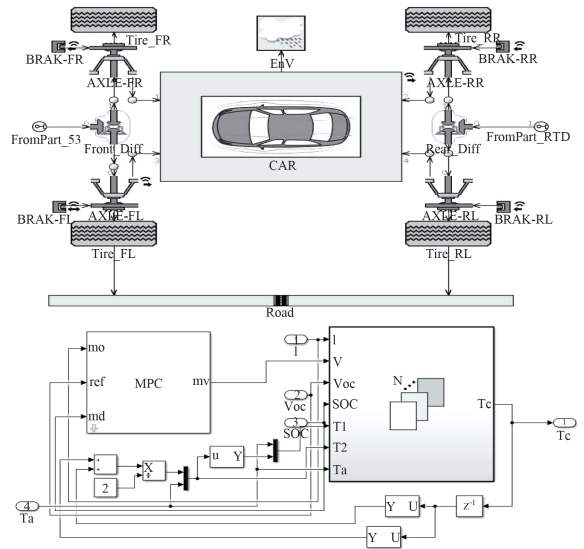


图3 联合仿真模型

表1 模型参数

参数	定义	数值
θ	柔化因子	3.25
α_0	多项式参数	1
λ	控制加权序列	0.4
N	预测步数	3

4 实验结果分析

在仿真实验过程中,对纯电动汽车动力电池在典型城市道路工况下动力电池温度进行模型预测,同时在实验台架中对动力电池的温度进行采集,车辆动力电池采用标称420 V/65 Ah的锂电池,温度测量采用多通道温度测试仪,实验环境如图4所示。

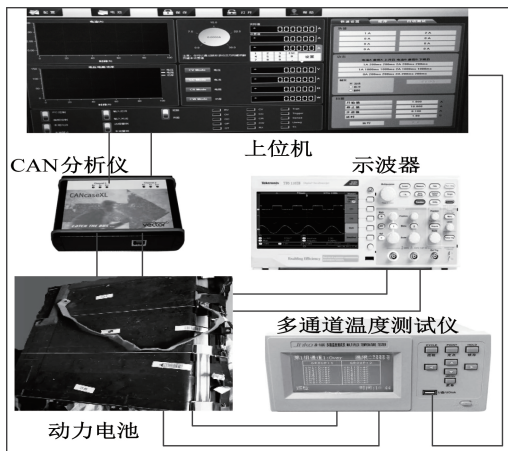


图4 动力电池温度测试实验环境

电池温度测量误差如图5所示,动力电池温度预测模型引入柔化作用,通过不断增大柔化因子来识别最优模型参数,提高了温度预测精度以及系统的稳定性。如图6所示,在FTP75和UDDS两种典型城市行驶工况下温度预测最大误差分别为1.31℃和1.38℃,动力电池温度预测误差小于2℃,满足温度预测精度目标要求。

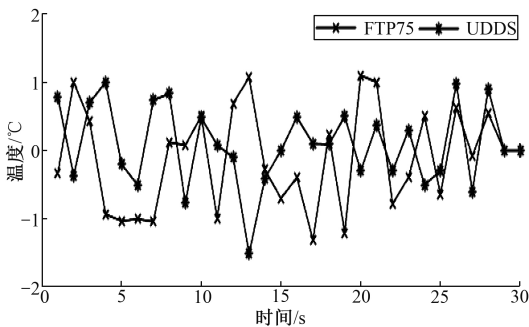


图5 电池温度测量误差

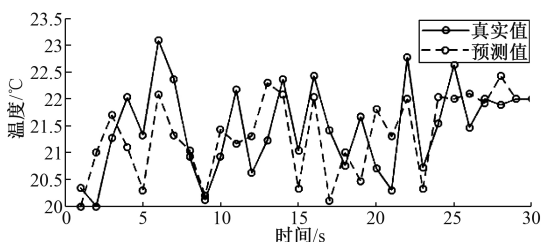


图6 大电流充电过程中温度预测温度

与此同时,分别对大电流充电工况(图6)和放电工况下动力电池温度(图7)进行了预测,从图6和7可以看出,大电流充电时温度的变化较大,预测的误差也比放电温度预测误差大,由此仍需考虑电池充放电电流带来的影响,采用基于参数模型的广义预测控制算法动力电池温度预测模型稳定可控、在处理系统外部扰动和模型失配上效果理想。

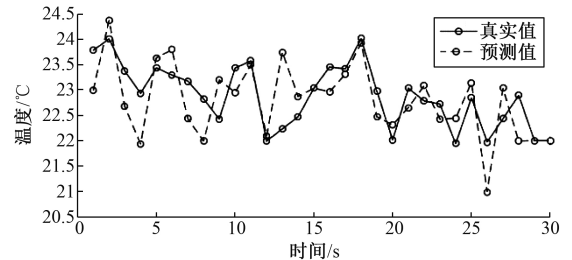


图7 放电过程中温度预测温度

5 结论

动力电池温度是一个车辆稳定安全的影响因素,针对电池温度预测误差大的问题,本文在动力电池热动力学数学模型的基础上,采集了车辆在FTP75和UDDS两种典型行驶工况下的温度数据,采用广义预测控制算法,并在GT-Suit/Simulink联合仿真平台搭建了基于广义预测控制算法的动力电池温度预测模型,利用模型柔化功能抑制外部扰动和不稳定因素,提高了温度预测模型鲁棒性和精确度,与此同时,温度预测模型具有较快的动态响应,但是在未来的实车工况下,仍需将动力电池单体间的均衡状态考虑进来,提高预测模型的预测精度,为以后更为复杂的车辆行驶工况下精确预测电池温度提供意义。

参考文献

- [1] 孙志文,朱建新,储爱华,等.混合动力汽车动力电池主动热管理系统设计[J].电源技术,2015(4):801-803,821.
- [2] CECH O, CHLADIL L, VANYSEK P, et al. The effect of post-treatment on the composition of formed negative electrode mass in lead acid batteries studied by XRD[J]. Journal of Energy Storage, 2017, DOI: 10.1016/j.est.2017.07.030.
- [3] KRIVIK P, MICKA K, BACA P, et al. Effect of additives on the performance of negative lead acid batteries electrode during formation and partial state of charge operation[J]. Journal of Power Sources, 2012, 209:15-19.
- [4] 孙金磊,朱春波,李磊,等.电动汽车动力电池温度在线估计方法[J].电工技术学报,2017,32(7):197-203.
- [5] LIU W. Introduction to Hybrid Vehicle System Modeling and Control[M]. Beijing: China Machine Press, 2014:153-154.

- [6] WI H S, LEE Y K, PARK J I, et al. Effects of FTP-75 mode vehicle fuel economy improvement due to types of power steering system[J]. International Journal of Automotive Technology, 2009, 10(6):771-776.
- [7] 郑悦, 谢长君, 黄亮, 等. 锂电池与超级电容混合电动汽车系统在环综合测试[J]. 中国机械工程, 2016, 27(6): 821-826.
- [8] CLARKE D, W MOHTADI C, TUFFS P S. Generalized predictive control: Part1 and Part2 [J]. Automation 1987, 23(1):137-160.
- [9] 李国勇, 杨丽娟. 神经模糊预测控制及其 MATLAB 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013: 291-295.
- [10] 高凯, 殷兴辉. 多路太阳能电池板温度监测系统的设计[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(4): 87-90.
- [11] 胡耀华, 贾欣乐. 广义预测控制综述[J]. 信息与控制, 2000, 29(3): 248-256.
- [12] 何群. 基于广义预测控制的锅炉测控系统[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2005.
- [13] 刘长良, 马增辉. 过热汽温系统的 Smith 预估器参数多目标优化控制[J]. 模式识别与人工智能, 2015, 8(3): 282-288.
- [14] 耿林霄, 景效国. 广义预测控制在过热蒸汽温度控制中的应用[J]. 热力发电, 2015, 44(3): 69-72.
- [15] 徐立鸿, 冯纯伯. 论广义预测控制[J]. 控制与决策, 1992(4): 241-246.
- [16] 裴莹, 王友仁, 刘泽元, 等. 电池组均衡技术研究现状[J]. 电子测量术, 2015, 38(8): 21-24, 49.

作者简介

魏国强, 讲师, 主要研究方向为机械、电子, 新能源汽车关键技术。

E-mail: Weigq1981@163.com

高兰芳, 本科, 讲师, 主要研究方向为机械、电子。