

文章编号: 1002-0268 (2005) 03-0119-05

电动汽车电池组热管理系统的关键技术

付正阳, 林成涛, 陈全世

(清华大学 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 电池组热管理系统的研究与开发对于电动汽车的安全可靠运行有着非常重要的意义。本文分析了温度对电池组性能和寿命的影响, 概括了电池组热管理系统的功能, 介绍了电池组热管理系统设计的一般流程, 并对设计热管理系统提出了建议。文章重点分析了设计电池组热管理系统过程中的关键技术, 包括电池最优工作温度范围的确定、电池生热机理研究、热物性参数的获取、电池组热场计算、传热介质的选择、散热结构的设计等。

关键词: 电动汽车; 电池组; 热管理系统

中图分类号: TM911.41

文献标识码: A

Key Technologies of Thermal Management System for EV Battery Packs

FU Zheng-yang, LIN Cheng-tao, CHEN Quan-shi

(State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Research and development of battery thermal management system (BTMS) is very important for the operation safety and reliability of electric vehicle (EV). In this paper, by analyzing the influence of temperature on the performance and service life of batteries the desired function of a BTMS was outlined, a procedure for designing BTMS was introduced. Several key technologies during designing a BTMS were introduced and analyzed, including optimum operating temperature range of a battery, heat generation mechanism, acquisition of the thermodynamic parameters, calculation of temperature distribution, selection of heat transfer medium, design of cooling structure and so on.

Key words: Electric vehicle; Battery pack; Thermal management system

0 引言

能源与环境的压力使传统内燃机汽车的发展面临前所未有的挑战, 各国政府、汽车公司、科研机构纷纷投入人力物力开发内燃机汽车的替代能源和动力, 这大大促进了电动汽车的发展。

电池作为电动汽车中的主要储能元件, 是电动汽车的关键部件^[1,2], 直接影响到电动汽车的性能。电池组热管理系统的研究与开发对于现代电动汽车是必需的, 原因在于: (1) 电动汽车电池组会长时间工作

在比较恶劣的热环境中, 这将缩短电池使用寿命、降低电池性能; (2) 电池箱内温度场的长久不均匀分布将造成各电池模块、单体性能的不均衡; (3) 电池组的热监控和热管理对整车运行安全意义重大。

清华大学从承担国家“八五”电动汽车攻关项目以来, 在电动汽车、混合动力汽车和燃料电池汽车关键技术的研究中, 积极开展了电池组热管理系统的研究, 并在样车上进行了道路试验, 目前电池组热管理系统的优化设计与改进工作正在进行中。本文是对前阶段研究工作的总结和今后工作的展望。

收稿日期: 2004-03-16

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)重大专题项目(2003AA501100)

作者简介: 付正阳(1978-), 男, 北京人, 清华大学汽车工程系硕士研究生, 主要从事电动汽车方面的研究。

1 电池组热管理系统的功能

为了提高电动汽车电池组的性能,一方面电池生产商努力开发满足电动汽车使用要求的电池,另一方面电池使用者也通过优化现有电池的使用环境发掘电池的潜能。电池组热管理系统是从使用者角度出发,用来确保电池组工作在适宜温度范围的整套系统,包括电池箱、传热介质、监测设备等部件。

电池组热管理系统有如下5项主要功能:(1)电池温度的准确测量和监控;(2)电池组温度过高时的有效散热和通风;(3)低温条件下的快速加热,使电池组能够正常工作;(4)有害气体产生时的有效通风;(5)保证电池组温度场的均匀分布。

2 电池组热管理系统的设计流程

设计性能良好的电池组热管理系统,要采用系统化的设计方法。很多研究人员都发表文献介绍了各自设计热管理系统的方法^[3~5]。美国国家可再生能源实验室(NREL)的 Ahmad A. Pesaran 等人在文献[6]中介绍的电池组热管理系统设计的一般过程具体而系统,最具有代表性,其设计过程包括7个步骤:(1)确定热管理系统的目标和要求;(2)测量或估计模块生热及热容量;(3)热管理系统首轮评估(包括选定传热介质,设计散热结构等);(4)预测模块和电池组的热行为;(5)初步设计热管理系统;(6)设计热管理系统并进行实验;(7)热管理系统的优化。

3 电池组热管理系统设计过程中的关键技术

3.1 确定电池最优工作温度范围

在不同的气候条件、不同的车辆运行条件下,电池组热管理系统要确保电池组在安全的温度范围内运行,并且尽量将电池组的工作温度保持在最优的工作温度范围之内。所以设计电池组热管理系统的前提是要知道电池组最优的工作温度范围,可以由电池制造商提供,也可以由电池使用者通过实验来确定。

目前电动汽车用电池主要有铅酸电池、氢镍电池和锂离子电池。铅酸电池应用到电动汽车上的时间比较长,相关研究比较多。Anderson^[7]研究了1984~1988年超过500万辆汽车的SLI用(启动、照明、点火)电池,总结出SLI铅酸电池的寿命随着温度增加线性减少,然而充电效率却线性增加。Sharpe和Conell^[8]研究了温度对铅酸电池充电的影响,发现随着电池温度的降低充电接受能力下降,特别是0℃以下。Dickinson和Swan^[9]评估了几种电动车用铅酸电

池组的性能和寿命,发现模块间的温度梯度减少了整个电池组的容量,他们推荐保持电池组内温度的均匀分布和控制现有铅酸电池温度在35~40℃之间。Wicks和Doane^[10]研究了一种电动车用铅酸电池的温度相关性能,他们发现效率和最大运行功率在-26~65℃范围内增加。

氢镍电池的性能也与温度相关。当温度超过50℃时,电池充电效率和电池寿命都会大大衰减,在低温状态下,电池的放电能力也比正常温度小得多。图1是本实验室做的某80Ah氢镍电池不同温度下电池放电效率实验,由图中可以看出,在温度高于40℃或者温度低于0℃时,电池的放电效率显著降低。如果仅根据这一限制,此电池的工作运行范围应该在0~40℃之间。

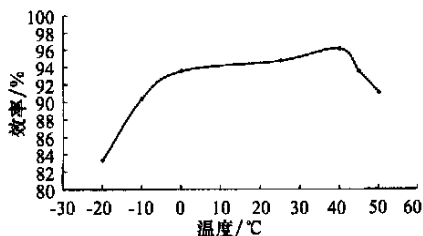


图1 不同温度下氢镍电池放电效率

锂离子电池与氢镍电池、铅酸电池相比,体积比功率更高,导致生热更多,所以散热也需要更加有效。对锂离子电池的热管理系统研究更多地集中于安全性和低温性能上。

铅酸电池、氢镍电池、锂离子电池热管理的必要性取决于各自的生热率、能量效率和性能对温度的敏感性。氢镍电池在高温(>40℃)时生热最多、效率最低并且易于发生热失控事故。因此,氢镍电池很需要热管理,很多对氢镍电池进行液体冷却的努力也突出了这一点^[11]。

3.2 电池热场计算及温度预测

电池不是热的良导体,仅掌握电池表面温度分布不能充分说明电池内部的热状态,通过数学模型计算电池内部的温度场,预测电池的热行为,对于设计电池组热管理系统是不可或缺的环节。台湾新竹清华大学的Mao-Sung Wu等^[12]用二维模型研究了氢镍电池的散热能力。美国加州大学的Yufei Chen等^[13]在计算锂聚合物电池内部温度场时使用了的三维模型,其模型如下:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q \quad (1)$$

式中, T 是温度; ρ 是平均密度; C_p 是电池比热; k_x 、 k_y 、 k_z 分别是电池在 x 、 y 、 z 方向上的热导率;

q 是单位体积生热速率。

3.2.1 电池生热速率

工程应用中准确获取电池单位体积生热速率 q 表达式比较困难, 这是求解电池温度场的难点所在。目前主要有理论计算和实验两种方法得到 q 。

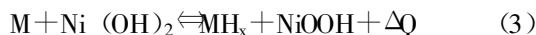
Bernadi^[14] 假设电池生热在电池体内均匀分布, 建立了一种典型的电池生热模型。

$$q = \frac{I}{V_b} \left[(E - E_0) + T \frac{dE_0}{dT} \right] \quad (\text{J}/[\text{m}^3\text{s}]) \quad (2)$$

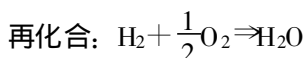
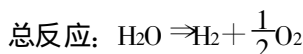
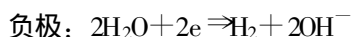
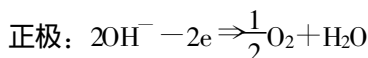
式中, V_b 是电池单体体积; I 是充放电电流(A), 充电为正, 放电为负; E 是电池单体电压; E_0 为电池开路电压; T 是温度; dE_0/dT 是温度系数(V/K); $(E - E_0)$, TdE_0/dT 分别表示焦耳热部分和可逆反应热部分。

Noboru Sato 和 Kazuhiko Yagi^[15] 利用氢镍电池电化学反应原理分析了氢镍电池的生热量。根据电化学反应中电子迁移个数与反应生热量之间的关系进行理论推导, 可以得到化学反应生热速率和电池充、放电电流之间的数学表达式 (4) ~ 式 (6)。

氢镍电池电化学反应表示如下:



过充电时的电化学反应为:



氢镍电池的生热因素主要有4项: 电池化学反应生热、电池极化生热、过充电副反应生热、内阻焦耳热。

电池充电过程中的反应生热可以分为两个阶段。在没有发生过充电副反应之前为第1阶段, 生热量主要来自: 电池化学反应生热、电池极化生热、内阻焦耳热。生热量可用下式计算。

$$Q_{\text{Charge}} = 0.547I_c + 3.6I_c^2R_t \quad (\text{kJ}/\text{h}) \quad (4)$$

在发生过充电副反应之后为第2阶段, 生热量主要来自: 电池化学反应生热、电池极化生热、过充电副反应生热、内阻焦耳热。其中大部分的生热量来自于过充电副反应生热。充电末期和过充电时, 过充电副反应就开始发生, 其生热量如下

$$Q_{\text{Charge}'} = 5.334I_c + 3.6I_c^2R_t \quad (\text{kJ}/\text{h}) \quad (5)$$

电池放电过程中的生热量主要来自: 电池化学反应生热、电池极化生热、内阻焦耳热。需要指出的是氢镍电池放电时化学反应是吸热反应, 能吸收一部分

热量, 所以生热问题不是很严重, 生热量如下

$$Q_{\text{Discharge}} = -0.547I_d + 3.6I_d^2R_t \quad (\text{kJ}/\text{h}) \quad (6)$$

式中, R_t 是电池内阻和极化内阻的和; I_c 是电池的充电电流; I_d 是电池的放电电流。

电池的内阻是影响电池生热速率的关键指标, 它随着电池 SOC 变化。利用方程 (4) 式 ~ (6) 式计算电池生热量时, 要在事先通过实验获取准确的电池内阻值。图2是本实验室测量的某12V ~ 80Ah 氢镍电池模块在不同 SOC 下的内阻值。

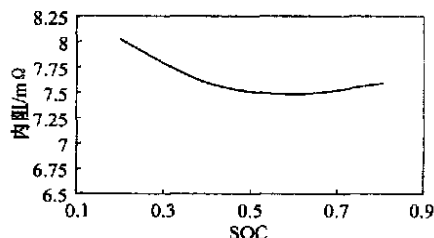


图2 不同 SOC 下氢镍电池模块内阻

实验的方法也可以用来测量电池充、放电过程中的生热量。如果热容量已知, 将电池单体或者模块绝热, 可以根据温度变化判断电池的生热量。因为绝热的条件难以严格满足, 准确获取电池的热容量有较大难度, 所以实验结果不会很精确。

采用专门设计的量热计可以直接测量出电池的生热量, 还可以测出电池的热容量。美国国家可再生能源实验室采用的就是这种方法, 该实验室的实验结果显示电池的生热量主要与以下因素有关^[16]: (1) 电池电化学和电池结构; (2) 初始 SOC 值; (3) 电池初始温度; (4) 不同的充放电倍率和充放电循环。

3.2.2 电池热物性参数的获取

计算电池热模型方程 (1), 必须测量电池的热物性参数, 即电池比热 C_p 和热导率 k_x 、 k_y 、 k_z , 计算过程中还要设定准确的边界条件。在工程应用中准确获得上述参数并非易事。

电池模块的热容量可以按照物理学定义用量热计直接测量得到, 也可以采用理论计算的方法得到。根据电池单体中每一种材料的比热, 通过质量加权平均的办法可以计算出电池单体的热容量, 电池模块的热容量等于单体热容量乘以单体个数。

$$C_p = \frac{1}{m} \sum C_i \cdot m_i \quad (7)$$

式中, C_p 为电池单体的比热; m 为电池单体的质量; m_i 为电池单体每种材料的质量; C_i 为电池单体每种材料的比热。

电池是各向异性的, 各个方向上平均热传导率一

般都不相等。电池由很多部件和电解液组成,采用实验方法直接测量热导率有较大难度。在文献[17]中,采用了简单的理论估算方法。文献[6]中,用有限元(FEA)方法来计算电池的热导率。

根据电池壁面与环境温差及换热系数,可以确定方程(1)的边界条件。电池模块壁面和环境之间的换热系数可以通过CFD方法或者实验得到。

3.3 传热介质选择

传热介质的选择对热管理系统的性能有很大影响,传热介质要在设计热管理系统前确定。按照传热介质分类,热管理系统可分为空冷、液冷及相变材料冷却3种方式。空气冷却是最简单方式,只需让空气流过电池表面。液体冷却分为直接接触和非直接接触两种方式。矿物油可作为直接接触传热介质,水或者防冻液可作为典型的非直接接触传热介质。液冷必须通过水套等换热设施才能对电池进行冷却,这在一定程度上降低了换热效率。电池壁面和流体介质之间的换热率与流体流动的形态、流速、流体密度和流体热传导率等因素相关。

空冷方式的主要优点有:(1)结构简单,重量相对较小;(2)没有发生漏液的可能;(3)有害气体产生时能有效通风;(4)成本较低。缺点在于其与电池壁面之间换热系数低,冷却、加热速度慢。

液冷方式的主要优点有:(1)与电池壁面之间换热系数高,冷却、加热速度快;(2)体积较小。主要缺点有:存在漏液的可能;重量相对较大;维修和保养复杂;需要水套、换热器等部件,结构相对复杂。

并联式混合动力电动车的电池组作为辅助的功率部件,运行条件不是十分恶劣,采用空冷方式就可能达到使用要求;对于纯电动汽车和串联式混合动力汽车,电池组作为主要的功率部件,生热量很大,要想获得比较好的热管理效果,可以考虑采用液冷的方式。

日本丰田公司的混合动力电动汽车Prius和本田公司的Insight都采用了空冷的方式。清华大学和多家单位共同研制的国家863燃料电池城市客车采用的也是空冷方式。

3.4 热管理系统散热结构设计

电池箱内不同电池模块之间的温度差异,会加剧电池内阻和容量的不一致性,如果长时间积累,会造成部分电池过充电或者过放电,进而影响电池的寿命与性能,并造成安全隐患。电池箱内电池模块的温度差异与电池组布置有很大关系,一般情况下,中间位置的电池容易积累热量,边缘的电池散热条件要好

些。所以在进行电池组结构布置和散热设计时,要尽量保证电池组散热的均匀性。以空冷散热为例来,通风方式一般有串行和并行两种,如图3和图4所示。



图3 串行通风示意图

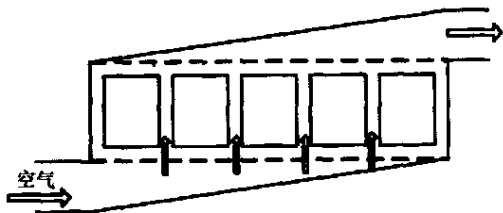


图4 并行通风示意图

图3所示串行通风方式下,冷空气从左侧吹入从右侧吹出。空气在流动过程中不断地被加热,所以右侧的冷却效果比左侧要差,电池箱内电池组温度从左到右依次升高。第一代丰田Prius和本田Insight都采取了串行通风方式。

图4所示,并行通风方式使得空气流量在电池模块间更均匀地分布。并行通风方式需要对进排气通道,电池布置位置进行很好地设计。丰田新Prius采用的就是并行通风结构,其楔形的进排气通道使得不同模块间缝隙上下的压力差基本保持一致,确保了吹过不同电池模块的空气流量的一致性,从而保证了电池组温度场分布的一致性。

3.5 风机与测温点选择

在设计电池热管理系统时,希望选择的风机种类与功率、温度传感器的数量与测温点位置都恰到好处。

以空冷散热方式为例,设计散热系统时,在保证一定散热效果的情况下,应该尽量减小流动阻力,降低风机噪音和功率消耗,提高整个系统的效率。可以用实验、理论计算和流体力学(CFD)的方法通过估计压降、流量来估计风机的功率消耗。当流动阻力小时,可以考虑选用轴向流动风扇;当流动阻力大时,离心式风扇比较适合。当然也要考虑到风机占用空间的大小和成本的高低。寻找最优的风机控制策略也是热管理系统的功能之一。

电池箱内电池组的温度分布一般是不均匀的,因此需要知道不同条件下电池组热场分布以确定危险的温度点。测温传感器数量多,有测温全面的优点,但会增加系统成本。考虑到温度传感器有可能失效,整

个系统中温度传感器的数量又不能太少, 至少为两个。根据不同的实际工程背景, 理论上利用有限元分析、试验中利用红外热成像或者实时的多点温度监控的方法可以分析和测量电池组、电池模块和电池单体的热场分布, 决定测温点的个数, 找到不同区域合适的测温点。一般的设计应该保证温度传感器不被冷却风吹到, 以提高温度测量的准确性和稳定性。在设计电池时, 要考虑到预留测温传感器空间, 比如可以在适当位置设计合适的孔穴。日本丰田公司的混合动力电动汽车 New Prius 的电池组有 228 个电池单体, 温度的监测由 5 个温度传感器完成。

4 结语

(1) 设计电池组热管理系统应采用系统化的设计方法, 性能优良的热管理系统一般为多次优化设计的成果。

(2) 要综合考虑温度对电池性能和使用寿命的影响以确定电池最优工作温度范围。

(3) 根据实验, 考虑温度对放电效率和放电容量的影响, 大容量氢镍电池的最优工作运行范围在 $0 \sim 40^{\circ}\text{C}$ 。

(4) 电池热模型研究是电池热管理系统设计过程中的重要环节, 应重点进行研究。

(5) 空气冷却是目前电动汽车电池组最常用的散热方式。

(6) 从提高电池组工作性能角度来看, 并行通风方式优于串行通风方式, 在热管理系统中更为常用。

参考文献:

- [1] 陈全世, 齐占宁. 燃料电池电动汽车的技术难关和发展前景 [J]. 汽车工程, 2001, 23 (6): 362—363.
- [2] 林成涛, 陈全世. 燃料电池客车动力系统结构分析 [J]. 公路交通科技, 2003, 20 (5): 134—135.
- [3] Arun K Jaura, Anthony Grabowski, Edward Jih. Efficient Cooling and Package Of Traction Battery In Hybrid Electric Vehicle [C]. Proceedings of EVS-18, 2001.
- [4] Matthias Ullrich, Mathias Hommel, Siegfried Koehle, Peter Lueck. Electrical, Thermal, and Mechanical Design Issues of a Battery System for Hybrid Electric Vehicles [C]. Proceedings of EVS-19, 2002.
- [5] Arun K Jaura, Wolfram Buschhaus, B R Masterson. Efficient Thermal Management-A Requisite for the Success of Hybrid Vehicles [C]. EVS16, 1999.
- [6] Ahmad A Pesaran, Steve Burch, Matthew Keyser. An approach for designing thermal management systems for electric and hybrid vehicle battery packs [C]. The Fourth Vehicle Thermal Management Systems Conference and Exhibition, 1999.
- [7] R Anderson. Requirements for Improved Battery Design and Performance [J]. SAE Transactions, 1990, 99: 1190—1197.
- [8] T Sharpe, R Conell. Low-Temperature Charging Behavior of Lead-Acid Cells [J]. Journal of Applied Electrochemistry, 1987, 17: 789—799.
- [9] B Dickinson, D Swan. EV Battery Pack Life, Pack Degradation and Solutions [C]. Proceedings of the Future Transportation Technology Conference and Exposition, 1995.
- [10] F Wicks, E Doane. Temperature Dependent Performance of a Lead Acid Electric Vehicle Battery [C]. Proceedings of the 28th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1993.
- [11] Ahmad A Pesaran. Battery Thermal Management in EVs and HEVs: Issues and Solutions [C]. Advanced Automotive Battery Conference, 2001.
- [12] M S Wu, Y Y Wang, C C Wan. Thermal Behavior of Nickel/metal Hydride Batteries during Charge and Discharge [J]. J. Power Sources, 1998, 74: 203—204.
- [13] Yufei Chen, James W Evans. Three-Dimensional Thermal Modeling of Lithium Polymer Batteries under Galvanostatic Discharge and Dynamic Power Profile [J]. J. Electrochem. Soc., 1994, 141: 2947.
- [14] D Bernardi, E Pawlikowski, J Newman. A General Energy Balance for Battery System [J]. J. Electrochem. Soc., 1985, 5 (1): 132.
- [15] Noboru Sato, Kazuhiko Yagi. Thermal behavior analysis of nickel metal hydride batteries of electric vehicles [J]. JSAE Review, 2000, 21: 208—209.
- [16] Ahmad A Pasaran. Thermal characteristics of selected EV and HEV batteries [C]. California: Annual Battery Conference: Advances and Applications. Long Beach, 2001.
- [17] M S Wu, Y H Hung, Y Y Wang, C C Wan. Heat Dissipation Behavior of the Nickel/Metal Battery [J]. J. Electrochem. Soc., 2000, 147 (3): 931.
- [18] Ahmad A Pesaran, Andreas Vlahinos, Steven D Burch. Thermal Performance of EV and HEV Battery Modules and Packs [C]. Proceedings of EVS-14, 1997.