DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.04.020

电动汽车锂离子动力电池冷却方案的对比研究*

彭 影,黄 瑞*,俞小莉,许建青

(浙江大学 动力机械及车辆工程研究所,浙江 杭州 310027)

摘要:针对电动汽车磷酸铁锂离子电池(LiFePO4)在高温环境下寿命缩短、安全性降低的问题,为了保证其合适的工作温度范围,开展了动力电池组冷却方案的对比研究。运用Fluent软件建立了电池组-空气的三维流固耦合模型,计算了电池组在典型放电状态下的温度场分布,同时采取并行通风形式,以电池组内最高温度和最大温差值为指标,分析对比了不同温度、不同流量条件下,环境风强制对流冷却、空调风强制对流冷却及导热油强制对流冷却3种方案对各典型放电状态下电池组的冷却能力。研究结果表明,对工作中的电池组采取强制对流冷却措施是必要的,在较高的环境温度下,高流速的环境风冷却或较低温度的低速空调风冷却能够满足电池组冷却需求;导热油强制冷却能够以较低的流动速度显著降低各个倍率条件下工作的电池组最高温度及最大温差,是一种有效的冷却方案。

关键词:磷酸铁锂电池;温度场;冷却方案;Fluent 中图分类号:U469.722;TM912;TK02 文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)04-537-07

Comparison of the cooling methods on LiFePO₄ **power battery for electrical vehicle**

PENG Ying, HUANG Rui, YU Xiao-li, XV jian-qing

(Institute of Power Machinery and Vehicular Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the problem that LiFePO₄ battery in electrical vehicle has a shortened life and reduced security when working at high temperature condition, in order to ensure its proper operating temperature range, a comparative study of battery cooling methods has been carried out. A 3D-FSI model of battery and air flow has been established to master the temperature field undertypical discharge status based on Fluent. Also a parallel ventilation formsimulation has been conducted to compare the cooling capacity of ambient wind cooling, air condition wind cooling and heat transfer oil cooling methods using maximum temperature and temperature difference as indicators. The results indicate that forced convection cooling methods are necessary, and athigh temperature, high speed ambient wind and low speed colder air condition wind can meet the cooling demand; heat transfer oil cooling can significantly reduce the maximum temperature and temperature difference of the battery packat low speed, it is an effective cooling method.

Key words: LiFePO4 battery; temperature field; cooling methods; Fluent

0 引 言

目前,电动汽车上采用的高容量、大功率磷酸铁锂 (LiFePO₄)动力电池性能对温度变化较敏感,长时间工 作在高温环境下,虽然可增大其放电容量,但也会加快 其老化速度,严重缩短其使用寿命。据文献[1-7]数据 显示,磷酸铁锂电池的最佳工作温度为18 ℃~45 ℃, 可接受的温差范围应不高于10 ℃。而由于车辆动力 舱的空间限制,磷酸铁锂电池都是密集排布在汽车电 池箱内,在电池工作过程中,其内部所产生的焦耳热、 极化热、反应热和副反应热等热量更容易积聚,如果

收稿日期: 2014-12-09

基金项目:浙江省重点科技创新团队计划资助项目(2011R50008)

作者简介: 彭 影(1989-),女,山西太原人,主要从事电动汽车电池热管理方面的研究. E-mail:ohmydearpp@126.com 通信联系人: 黄 瑞,男,助理研究员. E-mail:hrssl@zju.edu.cn

电池在绝热或高温等冷却不充分的环境中运行,其温 度将会显著上升,从而降低电池充、放电循环效率,甚 至导致电池组热失控,影响系统的安全性与可靠性 ^[8]。因此,掌握磷酸铁锂动力电池组温度场对于推动 其在电动汽车领域的应用是非常必要的。

当前动力电池组通常有气体冷却、液体冷却和相 变材料冷却等冷却方式,本田公司Insight和丰田混合 动力Prius都采用强制空气冷却对电池组进行散热管 理。在早期的电池冷却方案设计中,各汽车公司主要 采用串行通风结构对圆形电池模块进行冷却散热,即 冷却流体依次通过各电池单体表面,该方式沿流场方 向冷却流体和电池的温差逐渐减小,换热能力也逐渐 减小;而对于当前应用较广的方形锂离子电池模块, 并行通风结构更加适用,该方式中冷却流体同时流过 各电池单体,各单体和冷却流体的热交换条件相近, 冷却效果更加均匀^[8]。

为了解动力电池在实际工作状态下的冷却需求, 保证其工作寿命,提高整车的性能,本研究计算锂离 子电池组在不同工况下的温度场分布情况,并以电池 组内最高温度和最大温差值为指标,分析对比在不同 流量及温度条件下空气强制冷却及导热油强制冷却 方案对电池组的冷却能力。

1 模型建立

本研究选取某电动汽车使用的100 Ah磷酸铁锂电 池为研究对象。其单体结构及热物性参数如表1所示。 电池组则由12块该电池单体排列组成,单体间隙5 mm。

表1 电池单体结构参数及热物性参数

参数	数值
由油苗休标称容量/Ab	100

电池单体标称容量/Ah	100
电池单体标称电压/V	3.2
电池单体长度/mm	218
电池单体宽度/mm	67
电池单体高度/mm	142
折算平均导热系数 X 方向/(W·m·K ⁻¹)	21.1
折算平均导热系数 Y 方向/(W·m·K ⁻¹)	21.1
折算平均导热系数 Z 方向/(W⋅m⋅K⁻¹)	1.05
折算平均密度/(kg·m ⁻³)	1 542.9
折算平均比热容/(J·kg·K⁻¹)	1 337

1.1 电池热模型

处于工作状态的电池会产生焦耳热、极化热、反 应热和副反应热等热量,其冷却环境由电池组热管理 系统控制。电池生热速率受工作电流、内阻和电池荷 电状态(SOC)等因素影响。为降低温度场计算的复杂 性,本研究对电池做如下简化:电池内部的各材料介 质均匀,同种材料的比热容、同一方向各处的导热系数相等,且不受温度和SOC变化的影响。

电池温度场的模拟需要获得电池组的生热速率,但 实时精确获取电池的生热速率非常困难,通常用数学模型进行描述。目前常用的是美国加州大学伯克利分校 D.Benardi^[9]提出的Benardi生热速率模型,其假设电池 生热在电池体内均匀分布,生热速率g的估算公式为:

$$q = \frac{I}{V_b} \left[\left(U - U_0 \right) + T \frac{\mathrm{d}U_0}{\mathrm{d}T} \right] \tag{1}$$

式中:q一电池生热速率; V_b 一电池单体体积;I一充 放电电流;U一电池单体电压; U_0 一电池开路电压; $T dU_0/dT$ —电池的温度影响系数,是与电化学反应相 关的物理量。

当电池组达到温度平衡状态时,由牛顿冷却公式 可知^[10]:

$$q = h(T - T_0) \tag{2}$$

式中:q —表面换热系数,T —电池表面温度, T_0 —冷 却介质温度。

1.2 网格模型

本研究运用ICEM软件建立锂离子电池组模型, 并进行必要简化,如简化极柱形状及表面浅槽等;冷 却空气流场模型包含进风部分的流场、电池组各单体 电池之间的冷却通道流场和出风部分的流场。全场 模型网格节点数为694 360。

计算冷却温度场时将电池组与冷却空气流场模型进行装配,形成流固耦合模型^[11],导入Fluent软件进行后续计算。

2 计算结果及分析

考虑到电池在车辆实际运行中状态的复杂性,为 了减少计算量,本研究仅针对电池的几种典型工作状 态下(1/3 C、2/3 C、1 C倍率恒流放电)电池组达到热 平衡时的温度场进行分析。实际中电动车辆的行驶 工况即是电池不同倍率放电情况的组合。

根据公式(1),本研究估算得该电池组在不同倍 率放电状态下的生热率如表2所示。

表2 电池组不同倍率放电状态下的生热功率

放电倍率/C	放电电流/A	电池生热功率/W
1/3	33	155.3
2/3	66	1 347.9
1	100	5 688.0

2.1 空气自然对流冷却时的电池组温度场特性

为了解该成组电池的生热特性,本研究首先对自 然对流冷却下的电池组的温度场进行仿真分析,设定

环境温度为30℃,计算结果如图1、表3所示。



(a) 1/3 C倍率恒流放电



(b) 2/3 C倍率恒流放电



(c) 1 C倍率恒流放电

- 图1 T=30 ℃时空气自然对流冷却电池组温度场特性
- 表3 T=30 ℃时空气自然对流冷却电池组温度场仿真结果

.1
7.6
2.9

从图1及表3可以看出,在同样的初始温度下,电 池组以不同倍率恒流放电至热平衡状态时,温度分布 各不相同。处在电池组中间位置的电池单体温度最 高,两侧温度逐渐降低。随着放电倍率增大,电池组 整体温升增大,且在大倍率状况下已达到171.9℃,不 仅已远远超过了电池的最佳工作温度区间,而且电池 极有可能出现热失控而引发爆炸,带来极大的安全隐 患。同时随着放电倍率的增加,电池表面的温差也急 剧增大,电池组内部温度也越发不均衡。因此,必须 为工作中的电池组采取一定的强制对流冷却措施。

2.2 环境风强制对流冷却时的电池组温度场特性

在上述仿真分析的基础上,本研究引入环境空气 对电池组进行强制风冷。冷却流道如图2所示,左下 方为进风端,右上方为出风端。

环境温度设定为30℃,即冷却风的进口温度为 30℃。首先本研究设定进口速度为1 m/s的低速风冷



图2 电池组-空气的流固耦合网格模型

状态,此时在不同放电倍率下,电池组达到温度平衡时的计算结果及温度场分布如图3、表4所示。





(c) 1 C倍率恒流放电

图 3 环境风强制对流冷却方式(*T*=30 ℃, *V*=1 m/s) 下的电池组温度场特性

表4 环境风强制对流冷却方式下的温度场仿真结果 (*T* =30 ℃, *V* =1 m/s)

放电倍率/C	最高温度/℃	最低温度/℃	最大温差/℃
1/3	30.8	30.2	0.6
2/3	37.7	32.5	5.2
1	63.8	42.6	21.2

可见,仅在1/3 C、2/3 C的放电状况下,低速环境 风对流冷却可以有效控制电池组的温度及温差,而当 放电倍率增大到1 C时,电池组内最高温度已达到 63.8 ℃,温差也高达21.2 ℃,故笔者尝试增大冷却强 度,提高环境风进口速度到3 m/s,探究是否能够将温 度控制在理想范围内。计算结果如图4、表5所示。



(a) 1/3 C倍率恒流放电



(b) 2/3 C倍率恒流放电



(c) 1 C倍率恒流放电

图4 环境风强制对流冷却方式(*T*=30 ℃, *V*=3 m/s)下的 电池组温度场特性

表 5 环境风强制对流冷却方式下的温度场仿真结果 (*T* =30 ℃, *V* =3 m/s)

放电倍率/C	最高温度/℃	最低温度/℃	最大温差/℃
1/3	30.6	30.2	0.4
2/3	34.1	31.2	2.9
1	48.6	35.0	13.6

可见,提高环境风强制冷却的进口风速至3 m/s后, 电池组的最高温度明显降低,但1 C倍率下最高温度为 48.6 ℃,最大温差达到13.6 ℃左右,仍然需要改善。进 一步提高环境风强制对流冷却强度,当环境风进口速度 达到5 m/s时,计算结果和温度分布如表6、图5所示。

表 6 环境风强制对流冷却方式下的温度场仿真结果 (*T* = 30 ℃, *V* = 5 m/s)

放电倍率/C	最高温度/℃	最低温度/℃	最大温差/℃
1/3	30.5	30.3	0.2
2/3	33.2	30.6	2.6
1	44.6	33.8	10.8

可见,进一步提高环境风强制冷却的进口风速至 5 m/s后,各倍率下电池组的最高温度均有明显降低,均 满足最佳工作温度范围,但1 C倍率下最大温差为 10.8 ℃,均匀性有待提高。为解决这一问题,本研究继 续提高环境风进口速度至10 m/s,计算结果如图6、表7 所示。



(a) 1/3 C倍率恒流放电



(b) 2/3 C倍率恒流放电



(c) 1 C倍率恒流放电

图 5 环境风强制对流冷却方式(*T* =30 ℃, *V* =5 m/s)下的 电池组温度场特性



(a) 1/3 C倍率恒流放电



(b) 2/3 C倍率恒流放电



(c) 1 C倍率恒流放电

图 6 环境风强制对流冷却方式(*T* = 30 ℃, *V* = 10 m/s) 下的电池组温度场特性

表7 环境风强制对流冷却方式下的温度场仿真结果 (*T* =30 ℃, *V* =10 m/s)

-				
	放电倍率/C	最高温度/℃	最低温度/℃	最大温差/℃
	1/3	30.2	30.0	0.2
	2/3	32.3	30.6	1.7
	1	40.4	32.4	8.0

可见,在几种典型放电状态下,该强度(10 m/s)的环境风强制冷却能够将电池组温度及温度均匀性控制在理想范围之内,同时也会带来一定的风扇噪声及功率消耗。

2.3 空调风强制对流冷却时的电池组温度场特性

除了引入环境风作为冷却介质,还可以引入车载 空调的低温空调风作为强制对流冷却的介质,与前者 相比,空调风风速有限,但具有更低的来流温度。下 面本研究对空调风强制对流冷却时的电池组温度场 进行模拟计算。取空调风温度为20℃,流速为0.1 m/ s时,计算结果如图7、表8所示。



(a) 1/3 C倍率恒流放电



(b) 2/3 C倍率恒流放电



(c) 1 C倍率恒流放电



由图7及表8可见,虽然空调风具有比环境风更低的来流温度,但由于其风速较低,在1C的放电倍率下,最高温度也达到近100℃,最大温差则高达32.2℃,为提高冷却效果,本研究降低空调风温度至10℃,计算结果如图8、表9所示。

表8	20	℃空调风强制对流冷却的温度场仿真结果
		$(T = 20 \ ^{\circ}C, V = 0.1 \ \text{m/s})$

放电倍率/C	最高温度/℃	最低温度/℃	最大温差/℃
1/3C	24.3	21.8	2.5
2/3C	46.0	35.0	11.0
1C	98.9	66.7	32.2
2/3C 1C	46.0 98.9	35.0 66.7	11.0 32.2



(a) 1/3 C倍率恒流放电



(b) 2/3 C倍率恒流放电



(c) 1 C 倍率恒流放电

图 8 空调风冷却方式(*T*=10 ℃, *V*=0.1 m/s)下的 电池组温度场特性

表9 空调风冷却方式下的温度场仿真结果 (*T*=30 ℃, *V*=0.1 m/s)

放电倍率/C	最高温度/℃	最低温度/℃	最大温差/℃
1/3	20.0	12.0	8.0
2/3	37.0	28.6	8.4
1	89.5	58.8	30.7

在该冷却条件下,1/3 C放电倍率放电达到稳态 时,电池组温度过低,冷却过度;2/3 C放电倍率时冷却 效果满足要求,但1 C的放电倍率下,虽然较20 ℃空 调风强制对流冷却时的温度场有整体的下降,但最高 温度及最大温差仍然无法满足理想条件,空调风冷却 效果并不理想。

2.4 导热油强制对流冷却时的电池组温度场特性

为适应高倍率放电状态下的电池组工作温度需 求,本研究提出了以一种冷却介质——导热油,对工 作中的电池组进行冷却。相比较空气、水等常用冷却 介质,导热油具有较高的导热系数,同时它的绝缘性 可以保证电池组的电安全性。如果以它作为电池组 的直接冷却介质,可以较快地转移走电池组内部热 量,从而增强其冷却效果。

该模拟设定导热油的流入温度为30 ℃,采用的导 热油相关参数如表10所示。

表10 导热油相关物理参数

参数	数值
密度/(kg•m ⁻³)	800
导热系数/(W・(m・K)⁻¹)	0.14
比热容/(J•(kg•K)-1)	2 000
黏度系数/(kg•(m•s) ⁻¹)	0.05

由于导热油的黏性远大于空气,其在电池组间的 流速将会大大降低,本研究分别设定其流速为0.2 m/s、 0.5 m/s和1 m/s,在以1 C大倍率恒流放电至平衡状态 时,计算结果如表11、图9所示。

表 11 导热油冷却方式下1 C倍率恒流放电温度场仿真结果 (*T* = 30 ℃)

导热油入口流速/(m・s ⁻¹)	最高温度/℃	最低温度/℃	最大温差/℃
0.2	33.0	30.3	2.7
0.5	32.5	30.1	2.4
1	32.2	30.1	2.1



(a) V=0.2 m/s时1 C倍率恒流放电



(b) V=0.5 m/s时1 C倍率恒流放电



(c) V=1 m/s时1 C倍率恒流放电

图9 导热油冷却方式(T=30 ℃)下的电池组温度场特性

可见,在1C的高倍率恒流放电状态下,即使是很低的流速(如0.2 m/s),导热油冷却也能够非常好地控制电池组温升幅度,各单体电池间的温差也骤降至3℃以内,冷却效果很好。

当放电倍率为2/3 C时,计算结果如表12所示。

表 12 导热油冷却方式下 2/3 C 倍率恒流放电温度场仿真结果 (*T* = 30 ℃)

导热油入口流速	最高温度	最低温度	最大温差
$/(m \cdot s^{-1})$	/°C	/℃	/°C
0.2	30.7	30.1	0.6
0.5	30.6	30.1	0.5
1	30.5	30.0	0.5

由于较低倍率下的电池生热速率较低,而导热油的换热能力较强,电池组温升及温差随之降低,温度场分布均匀,导热油冷却效果非常好。当放电倍率为1/3 C时,计算结果如表13 所示。

表 13 导热油冷却方式下 1/3 C倍率恒流放电温度场仿真结果 (*T* =30 ℃)

导热油入口流速	最高温度	最低温度	最大温差	
$/(m \cdot s^{-1})$	/°C	/°C	/°C	
0.2	30.1	30.0	0.1	
0.5	30.1	30.0	0.1	
1	30.1	30.0	0.1	

由表13可见,此时电池组温升及温差进一步降低,整个电池组可以维持一个基本恒温的温度场分布,导热油冷却效果非常好。

综上所述,导热油冷却方式完全可以满足各倍率 放电条件下的电池组冷却需求,是一种十分有效的冷 却方式。

3 结束语

本研究通过分析不同工况下电池组的温度分布 情况,得出了以下结论:

(1)在车用锂离子电池组中,自然对流换热基本 能满足低倍率放电下的冷却要求,但无法满足高倍率 放电下的冷却要求。考虑到车辆运行工况的变化范 围,建议采用强制冷却方案;

(2)环境风强制对流冷却可以以较低的流速满足 中小倍率下的电池组的冷却需求,但需要较高的流速 来满足大倍率放电下的电池组冷却需求,此时将会带 来较大的风扇噪音和功率消耗,同时该方式对于环境 温度的依赖性较高;

(3) 空调风强制对流冷却可以达到较低的冷却温度,对环境温度没有依赖,可以以较低的流速满足大

倍率放电条件下的电池组温度要求;

(4)导热油强制冷却方案与空气强制对流冷却方案相比,前者对各倍率下的温度场冷却效果均较好,能够将电池组最高温度及最大温差控制在理想范围内,是一种有效的冷却方案,但密封性、绝缘性设计要求较高,结构较后者复杂。

参考文献(References):

- WU M S, LIU K H, WANG Y Y, et al. Heatdissipationdesignfor lithium-ionbatteries [J]. Journal of PowerSources, 2002(109):160–166.
- [2] AHMAD S. Battery thermal models for hybrid vehicle simulations [J]. Journal of Power Sources, 2002 (110): 377–382.
- [3] 常国峰,陈磊涛,许思传.动力蓄电池风冷热管理系统的 研究[J].汽车工程,2011,33(10):890-893.
- [4] 冯 勇,王 辉,梁 骁. 纯电动汽车电池管理系统研究

与设计[J]. 测控技术, 2010, 29(9):54-57.

- [5] 辛乃龙. 纯电动汽车锂离子动力电池组热特性分析及仿 真研究[D]. 长春:吉林大学汽车工程学院,2012.
- [6] 谢先宇,王 潘,安 浩,等.汽车用动力锂离子电池发展 现状[J].上海汽车,2010(1):21-25.
- [7] 张 遥,白 杨,刘兴江.动力用锂离子电池热仿真分析 [J].电源技术,2008,32(7):461-464.
- [8] 车杜兰.电动汽车锂离子电池包热特性研究与优化设计 [D].武汉:武汉理工大学汽车工程学院,2009.
- [9] BERNARDI D, PAWLIKOWSKI E, NEWMAN J. A general energy balance for battery system [J]. Journal of Electrochemical Society, 1985, 132(1):5–12.
- [10] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 3版. 北京:高等教育出版 社,1998.
- [11] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京:清华大学出版 社,2003.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

彭 影,黄 瑞,俞小莉,等,电动汽车锂离子动力电池冷却方案的对比研究[J]. 机电工程,2015,32(4);537-543.

PENG Ying, HUANG Rui, YU Xiao-li, et al. Comparison of the cooling methods on LiFePO4 power battery for electrical vehicle [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(4):537-543. 《机电工程》杂志:http://www.meem.com.cn

(上接第536页)

- [5] 王 淳,高元海.采用最优模糊C聚类和改进化学反应算
 法的配电网络动态重构[J].中国电机工程学报,2014,34
 (10):1682-1691.
- [6] RAO R S, NARASIMHAM S V L, RAMALINGARAJU M, et al. Optimal network reconfiguration of large-scale distribution system using harmony search algorithm [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(3):1080-1088.
- [7] 诸克军,苏顺华,黎金玲. 模糊 C-均值中的最优聚类与最 佳聚类数[J]. 系统工程理论与实践,2005(3):52-61.
- [8] GEEM Z W, KIM J H, LOGANATHAN G V. A new heuristic optimization algorithm: Harmony Search [J]. Simulation, 2001, 76(2):60–68.
- [9] 欧阳海滨,高立群,邹德旋,等.和声搜索算法探索能力研 究及其修正[J]. 控制理论与应用,2014,31(1):57-65.
- [10] 陈 春,汪 沨,刘 蓓,等. 基于基本环矩阵与改进和声 搜索算法的配电网重构[J]. 电力系统及其自动化,2014, 38(6):55-60.
- [11] CIVANLAR S, GRAINGER J J, YIN H, et al. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction [J]. **IEEE Trans**

on Power Delivery, 1988, 3(3):1217–1223.

- [12] 毕鹏翔,刘 健,张文元. 配电网潮流支路电流法收敛性 研究[J]. 西安交通大学学报,2001,35(4):343-346.
- [13] 毕鹏翔,刘 健,张文元. 配电网重构的改进支路交换法 [J]. 中国电机工程学报,2001,21(8):98-103.
- BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing [J].
 IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(2):1401-1407.
- [15] RAO R S, RAVINDRA K, SATISH K, et al. Power loss minimization in distribution system using network reconfiguration in the presence of distributed generation [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2013, 28(1):317–325.
- [16] LAVORATO M, FRANCO J F, RIDER M J, et al. Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2012, 27 (1):172-180.
- [17] 杨胡萍,彭云焰,熊 宁. 配电网动态重构的静态解法 [J]. 电力系统保护与控制,2009,37(8):53-57.