

文章编号:0253-4339(2019)02-0012-08
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2019.02.012

制冷剂冷却电池的纯电动汽车热管理系统夏季工况模拟

张聪哲¹ 叶芳¹ 郭航^{1,2} 马重芳¹

(1 北京工业大学环境与能源工程学院 传热强化与过程节能教育部重点实验室 传热与能源利用北京市
重点实验室 北京 100124; 2 北京电动车辆协同创新中心 北京 100081)

摘 要 以纯电动汽车整车热管理系统为研究对象,本文提出纯电动汽车整车热管理方案,研究在夏季工况下的整车热管理性能。电池与乘客舱采用制冷剂并联冷却,利用热管的高导热系数来传递热量,电机采用液冷,并在新欧洲驾驶循环工况下用系统模拟的方法进行测试。结果表明:经过 64 s,乘客舱温度从 35 ℃ 降至 24 ℃,随后乘客舱始终围绕设定温度 24 ℃ 上下波动;电池温度经过 68 s 从 35 ℃ 降至 25 ℃,然后在整车控制策略下,使其维持稳定温度;电机温度在市内循环缓慢增长,在郊区循环急速增长,但维持在 80 ℃ 以内。

关键词 电动汽车;热管理系统;数值模拟;制冷剂;热管

中图分类号:TB61⁺2; U469.72; U462.3 **文献标识码**: A

System Simulation of Pure Electric Vehicle Thermal Management with a Refrigerant Cooling Battery under Summer Conditions

Zhang Congzhe¹ Ye Fang¹ Guo Hang^{1,2} Ma Chongfang¹

(1. Beijing Key Laboratory of Heat Transfer and Energy Conversion, MOE Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation, College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing, 100124, China; 2. Collaborative Innovation Center of Electric Vehicles, Beijing, 100081, China)

Abstract Based on thermal management systems of pure electric vehicles, a thermal management scheme for a whole vehicle is proposed in this study under summer conditions. In this scheme, a parallel cooling system using refrigerant is developed for the batteries and cabin, and the heat transfer performance of the heat pipe is considered for heat exchange between the batteries and refrigerant. A liquid cooling system is used for the motor. The proposed thermal management system was tested using a system simulation under the New European Driving Cycle at 35 ℃. The results demonstrated that the temperature of the cabin reached 24 ℃ after 64 s. The cabin temperature then maintained a dynamic stability near the setting temperature. Moreover, the temperature of the batteries reached 25 ℃ after 68 s then maintained a stable temperature under the vehicle control strategy. An increase in motor temperature occurred at a low rate under an urban cycle and exhibited a rapid increase under an suburb cycle. However, the temperature of the motor was maintained within 80 ℃.

Keywords electric vehicle; thermal management system; numerical simulation; refrigerant; heat pipe

近几年,随着传统汽车保有量的增加,在消耗大量化石能源的同时,导致环境严重恶化^[1]。根据北京市相关部门数据,2012 年北京全市 PM_{2.5} 来源的 22%^[2] 来自于机动车排放。

电动汽车动力为电能,电能绿色环保且来源广泛,污染物排放相比传统汽车排放可减少 97%,因此电动汽车的推广可有效缓解资源紧张^[3] 和环境恶化的现状。

但与传统汽车相比,电动汽车仍面临严峻的挑战。动力驱动方式改变的同时带来了一些新的问题^[4],例如汽车空调冬季的加热、电池的冷热管理、

维持电机温度在安全范围等一系列问题。

电动汽车失去了内燃机这一余热源^[5],因此目前国内厂家多采用正温度系数热敏电阻(positive temperature coefficient, PTC)加热,但是 PTC 加热严重影响了电动汽车续航里程^[6]。由于电动空调系统是电动汽车功耗最大的辅助系统,需要设计出高能效的空调系统^[7]来降低能耗,因此国外汽车公司研发了电动汽车热泵空调系统新技术。这在一定程度上提升了冬季空调^[8]的性能。电池温度过高或过低都会很大程度上影响电池的性能以及循环寿命,其安全性和长周期下的性能必须得到保证^[9],因此电池需

要将温度控制在 20~40 ℃^[10],并且单体间温差需在 5 ℃^[11] 以下。此外动力电机温度较高时,其使用寿命和效率^[12] 会急剧下降。根据文献[13],电机所使用的滑动轴承,其工作温度上限为 80 ℃,滚动轴承工作温度上限为 95 ℃。在应对电动汽车的安全、性能、里程和节能等一系列问题时,整车热管理是应对上述一系列挑战的良好途径^[14],因此有必要对电动汽车进行统筹兼顾的热管理^[15]。

吴祯利^[8] 提出将电池包作为空调系统的一个负载,即在制冷剂回路增加单独为电池散热的蒸发器。宁秋宇^[16] 也将空调系统设计成双蒸发器循环,并对空调系统进行参数匹配计算。上述研究均未涉及电机的散热。王健等^[17] 搭建了一套集成的纯电动汽车热管理系统,该系统主要包括电动车前舱水冷和电池包风冷两个系统,电机及其元件采用水冷,进入电池包散热的冷空气为电池进行冷却。随着汽车热管理要求的提高,越来越多的科研人员采用液冷、热管^[18] 等更高效的散热方式。于会涛等^[19] 介绍了一种液流多回路循环电动汽车热管理系统,通过控制不同的回路来适应不同组件的散热需求,乘客舱和动力电池加热采用 PTC 加热实现,并针对该方案设计了多种运行模式,但对热管理性能,并未在特定工况下测试系统的性能。T. Kiss 等^[5] 运用其所在实验室 Matlab/Simulink 工具进行了汽车热管理模拟,并对复合回路热管理系统进行模拟,制冷剂回路与冷却剂回路进行热交换,乘客舱的冷却和电池的散热由冷却回路完成,乘客舱的加热和电池的预热由电机及其元件余热和 PTC 完成,但并没有研究该系统在车速工况下的热管理性能。

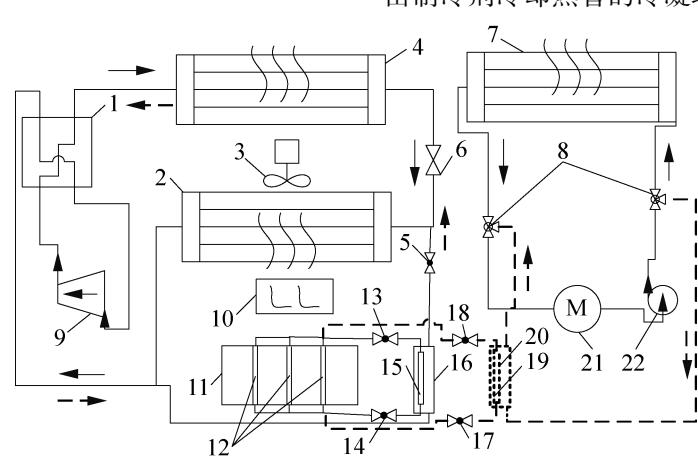
相关专利也涉及热管理系统,K. J. Robinet 等^[20] 提出的基于液流冷却的热管理系统,电池和电机采用液流冷却,最后与空调系统进行热交换。国外的电动汽车厂商特斯拉(Tesla)在其专利中^[21-23] 也提出了以空调系统为中心的整车热管理系统。V. G. Johnston^[24] 提出了包含一个制冷剂回路和两个非制冷剂回路的热管理系统,非制冷剂回路控制电池和驱动系统。

目前,在所有研究电动汽车热管理系统的文献中,多为部件间集成的热管理,如两个部件进行集成热管理,未发现在统一车速工况下,涵盖空调、电池、电机的全年季节的整车热管理系统研究。为此,本文提出了涵盖空调、电池和电机的可以全年工作的纯电动汽车整车热管理系统,本文主要介绍热管理系统在夏季工况下的热管理,冬季工况下热管理系统将后续研究。基于纯电动汽车热管理系统,采用系统模拟的方法研究在夏季新欧洲驾驶循环工况(New European Driving Cycle, NEDC^[25]) 下的整车热管理性能,为整车系统设计提供参考。

1 整车热管理系统模型建立

1.1 整车热管理系统方案及目标

整车热管理系统,必须满足各部件散热及供暖需要,且部件间要统筹兼顾,本文设计了包含冬夏两季的整车热管理系统,如图 1 所示。实线部分为夏季整车热管理系统方案,虚线部分为冬季热管理方案。夏季整车热管理方案为:电池与乘客舱采用制冷剂并联冷却,为增强换热效果,采用热管将电池热量导出,再由制冷剂冷却热管的冷凝端(部件 15),通过阀门(部



1 四通换向阀;2 乘客舱侧换热器;3 风机;4 外部换热器;5 阀门 1;6 膨胀阀;7 电机冷却液换热器;8 三通阀;
9 压缩机;10 乘客舱;11 电池组;12 热管蒸发段;13 阀门 2;14 阀门 3;15 热管冷凝端;16 制冷剂流道;
17 阀门 4;18 阀门 5;19 热管蒸发端(冬季工作);20 相变材料(冬季工作);21 电机;22 泵。

图 1 纯电动汽车整车热管理系统夏季工况
Fig.1 Thermal management system of pure electric vehicle under a summer condition

件 5) 的开关来控制进入电池侧管道的制冷剂质量流量;电机采用液冷进行冷却,冷却液选用乙醇,电机与冷却液换热后,冷却液在汽车前端换热器与空气换热,最后通过冷却液循环泵(部件 22)来进行液流循环。

为了达到整车热管理目标,对整车热管理系统相应部件设定温度要求,乘客舱设定温度为 24 ℃,当温度达到 24 ℃时,压缩机转速会有一定程度的调整;电池组设定温度为 25 ℃,其控制阈值为 24.5~25 ℃,当温度达到 24.5 ℃时,控制制冷剂的阀门(部件 5)关闭,当电池组温度达到 25 ℃时,该阀门打开;电机采用液冷,其热管理目标为低于 80 ℃。

1.2 整车热管理系统模型假设

在整车热管理系统模型的建立过程中,作如下假设:1)系统管内制冷剂流动为一维流动^[26];2)冷凝器和蒸发器侧入口空气为一维均匀条件,忽略空气的流动不均匀性^[27];3)电机内部,两侧空腔对称且温度相同^[28];4)电机在圆周方向冷却条件相同^[29];5)电池箱与外界空气的对流换热表面传热系数为定值不变^[18];6)电池内部材料均匀,且材料的物理性质不受外界影响,保持定值^[30]。

1.3 整车热管理系统模型及方程

整车热管理系统主要包括空调系统、电池热管理系统和电机热管理系统。该系统还包括相关电子附件,控制系统等。在整车热管理系统中,空调系统包含乘客舱、蒸发器、冷凝器、压缩机等模型。乘客舱模型的相关参数见表 1。在空调系统中制冷剂选用 R410A,充注量为 0.75 kg。

其中,压缩机出口质量流量:

$$M_c = \eta_v \rho_s NL \tag{1}$$

表 1 乘客舱参数 Tab.1 The parameters of cabin				
温度/ ℃	环境湿 度/%	光照强度/ (W/m ²)	太阳辐射 吸收系数	外传热 面积/m ²
35	50	1 000	0.85	13.3

压缩机出口制冷剂分别在冷凝器和蒸发器中换热,冷凝器和换热器相关参数如表 2 和表 3 所示。其换热量由式(2)和式(3)得出:

$$\phi_i = h_i S_i (T_r - T_w) \tag{2}$$
$$\phi_o = h_o S_o (T_a - T_w) \tag{3}$$

膨胀阀出口质量流量:

$$M_e = \rho_r \frac{A_e}{\sqrt{\varepsilon}} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_r}} \tag{4}$$

表 2 冷凝器参数 Tab.2 The parameters of condenser				
长×宽×高/ mm ³	翅片长 度/mm	翅片厚 度/mm	翅片间 距/mm	每流程 的管数
525×20×403	12	0.1	1.3	12、9、6、4

表 3 蒸发器参数 Tab.3 The parameters of evaporator				
长×宽×高/ mm ³	翅片长 度/mm	翅片厚 度/mm	翅片间 距/mm	每流程 的管数
406×71×175	9.2	0.18	1.6	14、12、9

外界环境与乘客舱进行对流换热同时考虑了风速和乘客舱壁面热容的影响,风速与车速的加和主要影响乘客舱外表面对流换热表面传热系数。而乘客舱壁面温度的变化则为进出壁面单位总能量与热容之比。外界环境与乘客舱进行对流换热:

$$\phi_{ext} = h_{ext} S_{ext} (T_{cw} - T_{ext}) \tag{5}$$

乘客舱壁面温度与舱内空气对流换热:

$$\phi_{int} = h_{int} S_{int} (T_{cw} - T_{int}) \tag{6}$$

电池热管理系统中,包含电池模型、热管模型、温度信号传递等。热管模型用高导热系数铜棒模型代替^[18],其比热取定值。制冷剂流过热管外壁,与热管直接换热,电池将温度信号传递至控制系统,整车控制策略来控制电池侧阀门的闭合以及乘客舱温度。电池模型选择 100 Ah 磷酸铁锂电池,其相关参数见表 4。

表 4 磷酸铁锂电池参数 Tab.4 The parameters of lithium-ion phosphate battery				
容量/ Ah	电压/ V	电池内阻/ mΩ	循环 次数	尺寸/ mm ³
100	3.2	≤1	8 000	141×66×218

电池生热量参考 Bernardi 生热公式:

$$Q = I^2 R_o + IT \frac{dE_o}{dT} \tag{7}$$

式中: $T \frac{dE_o}{dT}$ 取定值 11.16 mV^[18]。

电池电流主要由电机功率决定:

$$I = \frac{P_e}{U \eta_m} \tag{8}$$

电池组与制冷剂换热过程中,热管模型温度变化:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{d\phi_h}{mc_p} \tag{9}$$

制冷剂与热管换热：

$$M_b H_b = h_r A_b (T_h - T_r) \tag{10}$$

电机热管理系统中包含电机模型、换热器模型、冷却液泵模型等。

电机生热量由下式得出：

$$Q_m = I^2 R_m \tag{11}$$

电机与冷却液换热参考式(9)和式(10)计算,冷却液通过换热器与外界环境换热参考式(2)和式(3)计算。

1.4 整车热管理系统模型验证

为了验证该热管理系统,对空调系统、电池生热和电机生热曲线进行了模型验证。首先在环境温度 35 ℃ 下对空调系统进行了验证,相关数据^[4]如表 5,得到了模型验证结果,如图 2。

表 5 空调模型验证参数

Tab.5 Parameters of model verification of air conditioning

温度/ ℃	环境 湿度/%	光照强度/ (W/m ²)	车速/ (km/h)	时间/ s
35	50	1 000	50	1 200

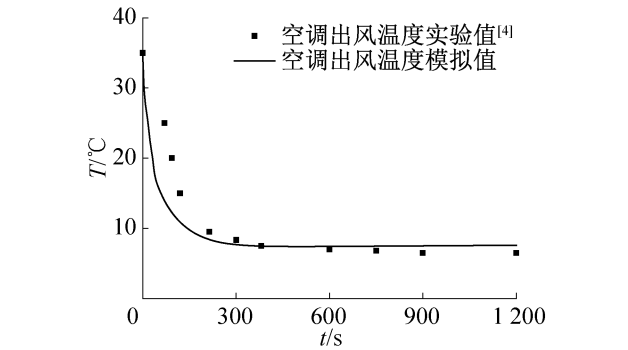


图 2 空调系统模型验证

Fig.2 Model verification of air conditioning

实验结果与模型的空调出口温度均下降较快,相比而言,模型结果温度下降更快,但最终均维持在恒定温度,这是由于空调系统模型稳定性优于实验系统。在最终温度上,模型和实验相差不大,模拟结果与实验数据取得良好的一致性。

分别对电池生热和电机生热进行模型验证。如图 3 所示,根据文献[31]的数据,在 1 C 放电倍率下,运行 3 600 s,得到模型与实验对比的电池生热曲线。电池在 1 C 放电倍率下,电池升温明显,且 3 600 s 放电结束时,电池温度从 25 ℃ 升至 33 ℃ 左右,并且实

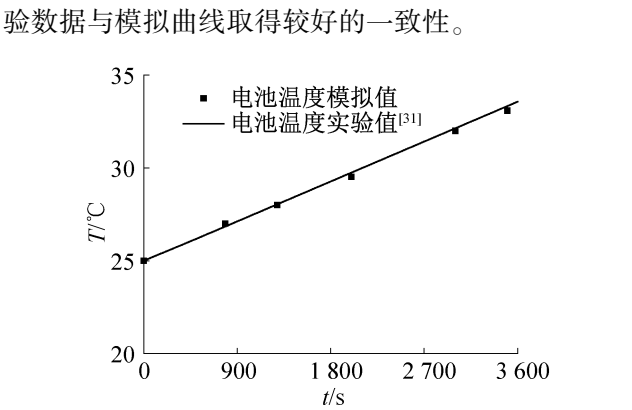


图 3 电池生热模型验证

Fig.3 Model verification of battery heat generation

根据文献[32],在环境温度为 30 ℃,以 3 500 r/min 运行 2 400 s,得到了电机的生热曲线,如图 4 所示,前期电机温升明显,500 s 左右迅速升至 70 ℃ 后期电机温度达到了稳定状态,这是由于生热与散热达到动态平衡。

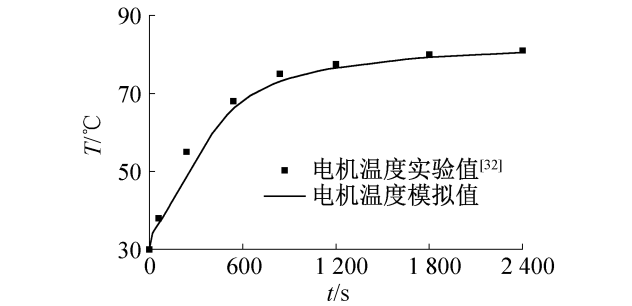


图 4 电机生热模型验证

Fig.4 Model verification of heat generation of motor

2 整车热管理系统模拟结果与讨论

2.1 整车热管理系统车速测试工况

在环境温度为 35 ℃ 下,采用 NEDC 欧洲油耗及排放测试工况进行模拟,得到整车热管理的结果。其中 NEDC 工况由 4 个市内循环和 1 个郊区循环组成,市内和郊区最高车速分别为 50 km/h 和 120 km/h。

2.2 乘客舱热管理性能

乘客舱温度设定为 24 ℃,并通过调节压缩机转速来控制温度。图 5 所示为 NEDC 工况乘客舱温度随时间的变化。由图 5 可知,运行 65 s 时,乘客舱温度迅速降低至设定温度 24 ℃,之后乘客舱温度在 24 ℃ 上下波动,波动幅度为+1 ℃ 和-4 ℃,这是由整车控制策略和车速变化决定的。当车速较高时,乘客舱与外界换热效果加强,所以乘客舱温度有明显的温升。在市内循环的 143、339、533、728 s,达到最大车速后,乘客舱温度均达到顶峰;在郊区循环,由于其车

速无频繁的启停,与外界换热维持稳定,所以乘客舱温度波动较小。

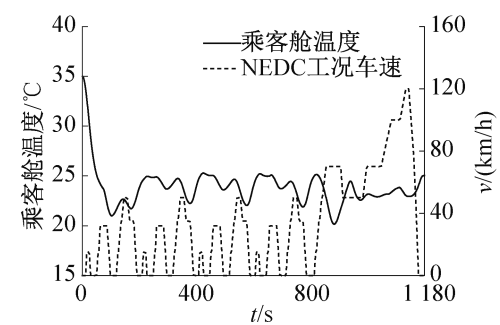


图 5 NEDC 工况下乘客舱温度随时间的变化
Fig.5 Temperature of cabin changes with time under NEDC condition

整车控制策略也是造成乘客舱温度波动的原因之一,此处的整车控制策略是指制冷剂对电池和乘客舱并联冷却控制和压缩机对乘客舱温度控制。图 6 所示为 NEDC 工况压缩机转速随时间的变化。由图 6 可知,在市内循环的 143、339、533、728 s,达到最大车速后,由于乘客舱温度的上升使压缩机转速达到波峰,使乘客舱温度下降,乘客舱温度控制是乘客舱温度曲线变化的主要原因。

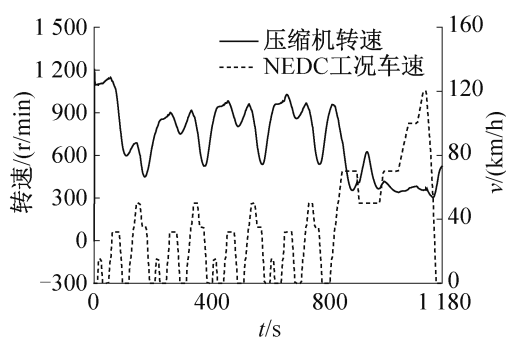


图 6 NEDC 工况下压缩机转速随时间的变化
Fig.6 The compressor speed changes with time under NEDC condition

图 7 所示为 NEDC 工况蒸发器入口制冷剂质量流量随时间的变化。由图 7 可知,75 s 处电池温度达到设定温度,导致蒸发器流量达到顶峰,使图 5 中 100 s 处乘客舱温度有明显下降。综合上述原因,导致乘客舱温度围绕 24 °C 的动态变化。

2.3 电池组热管理性能及对乘客舱温度影响

电池温度由制冷剂通过热管与电池换热来进行热管理,电池温度的控制依靠制冷剂管道阀门的开启。电池设定温度为 25 °C,其控制阈值为 24.5 ~ 25 °C,当电池温度达到 24.5 °C 时,阀门关闭。图 8 所示为 NEDC 工况电池温度随时间的变化,由图 8 可

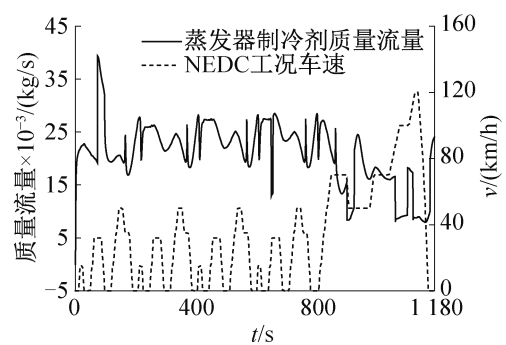


图 7 NEDC 工况下蒸发器入口制冷剂质量流量随时间的变化
Fig.7 The entrance refrigerant mass flow of the evaporator changes with time under NEDC condition

知,在 72 s 处电池温度降至 24.5 °C,随着车速变化有细微的上升过程。图 9 所示为 NEDC 工况电池组入口制冷剂质量流量随时间的变化。由图 9 可知,在市内循环的 640、896、1 060、1 123 s,积聚的热量使电池温度达到阈值上限 25 °C,这时,制冷剂阀门重新开启,直到电池温度降低至阈值下限 24.5 °C,制冷剂阀门重新关闭。

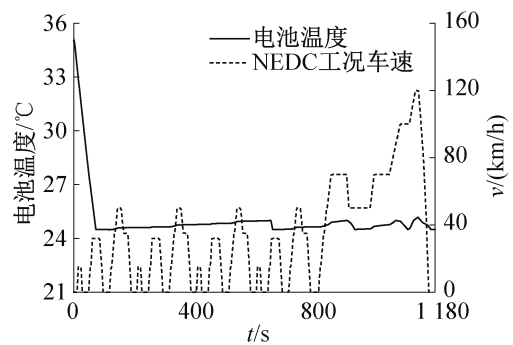


图 8 NEDC 工况下电池温度随时间的变化
Fig.8 Temperature of battery changes with time under NEDC condition

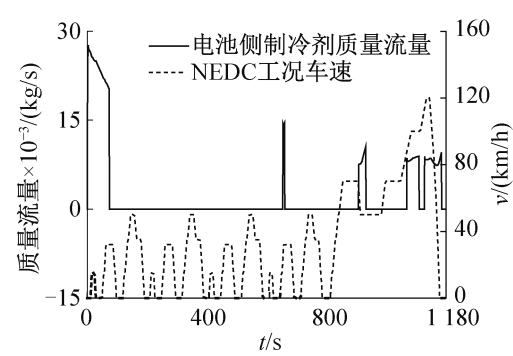


图 9 NEDC 工况下电池组入口制冷剂质量流量随时间的变化
Fig.9 The entrance refrigerant mass flow of the battery changes with time under NEDC condition

此外,由于电池侧制冷剂与乘客舱侧并联冷却,电池侧制冷剂质量流量变化会影响进入蒸发器的制

冷剂质量流量,从而影响乘客舱温度。电池侧制冷剂阀门打开导致乘客舱侧制冷剂质量流量骤降,如图 7 中 646、899、1054、1 110 s 均出现制冷剂质量流量骤降,当电池侧制冷剂阀门关闭时,蒸发器的制冷剂质量流量在 75、649、917、1 088、1 164 s 均出现一次突增。上述乘客舱侧制冷剂质量流量的变化均导致乘客舱温度的动态变化。

2.4 电机热管理性能

由于电机耐受 80 ℃ 以下温度^[14],因此对电机采用液冷散热。在市内车速循环工况,电机温度缓慢增加,这是因为在市内循环车速较低;但是到了郊区车速循环,由于车速大幅增加,电机温度急剧增加。图 10 所示为 NEDC 工况下电机温度随时间的变化。由图 10 可知,在 900 s 附近,电机温度有轻微的下降,这是因为汽车降低速度,产热量减少,但是电机与环境的换热仍维持良好的状态。而随后的上升是因为,汽车开始加速,电机产热增加。电机最高温度出现在 1 150 s 左右,这是因为积聚的热量达到顶峰。最终电机温度达到约 67 ℃,随后由于车速的不断减小,在 1 150 s 附近,电机温度开始下降。在此过程,电机温度一直处于 80 ℃ 之内。

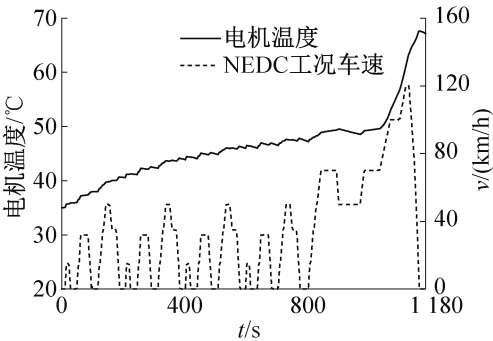


图 10 NEDC 工况下电机温度随时间的变化
Fig.10 Temperature of motor changes with time
under NEDC condition

3 结论

本文在建立整车热管理模型的基础上,提出了包括空调系统、电池制冷剂冷却和电机液冷的整车热管理方案,在 35 ℃ 下,基于新欧洲驾驶循环工况进行了热管理性能测试,得到如下结论:

1) 在新欧洲驾驶循环工况下,在 65 s 乘客舱温度达到设定温度,随后在整车控制策略的影响下,乘客舱温度始终围绕设定温度 24 ℃ 上下波动。

2) 在整车热管理方案中,电池与乘客舱并联冷却,电池温度间接影响乘客舱温度,这是导致乘客舱温度动态变化的原因之一。

3) 电池组采用热管高效导热,电池温度在 68 s 达到设定温度,由于车速的频繁变化,在 640、896、1 060、1 123 s,积聚的热量使电池温度超过设定值,在整车控制策略下,又迅速将电池温度降到设定温度。

4) 电机温度在新欧洲驾驶循环工况下,采用液冷散热,电机温度在市内循环缓慢增长,在匀速行驶时有一定程度下降,在郊区循环急速增长,但是仍处于 80 ℃ 之内。

符号说明

- A_b ——流体与材料传热面积, m^2
- A_e ——横截面积, m^2
- c_p ——定压比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$
- E_0 ——电池开路电压, V
- H_b —— t 时刻流体比焓, kJ/kg
- h_{ext} —— t 时刻乘客舱外对流换热表面传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
- h_i —— t 时刻制冷剂与换热器管道对流换热表面传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
- h_{int} —— t 时刻乘客舱内对流换热表面传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
- h_o —— t 时刻气体与换热器管道对流换热表面传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
- h_r —— t 时刻流体与材料对流换热表面传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
- I —— t 时刻电池放电电流, A
- L ——压缩机排气量, m^3
- M_b —— t 时刻流体质量流量, kg/s
- M_c —— t 时刻压缩机出口质量流量, kg/s
- M_e —— t 时刻膨胀阀出口质量流量, kg/s
- m ——质量, kg
- N —— t 时刻压缩机转速, r/min
- P_e ——电机有效功率, W
- p ——压力, MPa
- Q —— t 时刻电池生热量, W
- Q_m —— t 时刻电机生热量, W
- R_o ——电池内阻, $m\Omega$
- R_m ——电机线圈内阻, $m\Omega$
- S_{ext} ——乘客舱外部传热面积, m^2
- S_i ——制冷剂与管道传热面积, m^2
- S_{int} ——乘客舱内部传热面积, m^2
- S_o ——气体与管道传热面积, m^2
- T ——温度, $^\circ C$
- T_a —— t 时刻气体温度, $^\circ C$
- T_{ext} ——环境温度, $^\circ C$
- T_h —— t 时刻热管温度, $^\circ C$
- T_{int} —— t 时刻乘客舱温度, $^\circ C$

T_r —— t 时刻制冷剂温度, $^{\circ}\text{C}$
 T_{cw} —— t 时刻乘客舱壁面温度, $^{\circ}\text{C}$
 T_w —— t 时刻管道壁面温度, $^{\circ}\text{C}$
 t ——时间, s
 U —— t 时刻电机电压, V
 v —— t 时刻速度, km/h
 ε ——摩擦系数
 ρ ——密度, kg/m^3
 ρ_r —— t 时刻膨胀阀入口制冷剂密度, kg/m^3
 ρ_s —— t 时刻入口制冷剂密度, kg/m^3
 ϕ_{ext} —— t 时刻乘客舱与外界热交换, W
 ϕ_h —— t 时刻通过材料热通量, W
 ϕ_i —— t 时刻制冷剂与换热器管道换热量, W
 ϕ_{int} —— t 时刻乘客舱与空调热交换, W
 ϕ_o —— t 时刻气体与换热器管道换热量, W
 η_v ——压缩机容积效率
 η_m ——电机效率
 θ ——太阳辐射吸收系数

本文受北京电动车辆协同创新中心资助。(The project was supported by the Collaborative Innovation Center of Electric Vehicles in Beijing).

参考文献

- [1] 高庆毓, 高跃. 浅谈汽车尾气污染与治理[J]. 中国产经, 2013(5): 42-43. (GAO Qingyu, GAO Yue. Discussion on pollution and treatment of automobile exhaust gas [J]. Industry of China, 2013(5): 42-43.)
- [2] 徐晨曦. 汽车尾气与 $\text{PM}_{2.5}$ 之间的关系, 不是想象中那样简单——小汽车: 雾霾“嫌犯”, 并非“元凶”[J]. 中国战略新兴产业, 2014(2): 36-37. (XU Chenxi. The relationship between automobile exhaust and $\text{PM}_{2.5}$ is not as simple as imagined—the car: haze suspects are not the culprit [J]. China Strategic Emerging Industry, 2014(2): 36-37.)
- [3] 李丽, 魏名山, 彭发展, 等. 电动汽车用热泵空调系统设计与实验[J]. 制冷学报, 2013, 34(3): 60-63. (LI Li, WEI Mingshan, PENG Fazhan, et al. Design and experiment of a heat pump air-conditioning system for electric vehicles [J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(3): 60-63.)
- [4] 瞿晓华. 电动汽车热系统性能及控制优化研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012. (QU Xiaohua. Study on performance and control optimization of electric vehicle thermal management systems [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.)
- [5] KISS T, LUSTBADER J, LEIGHTON D. Modeling of an electric vehicle thermal management system in Matlab/Simulink [R]. Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2015.
- [6] 唐景春, 左承基. 电动汽车空调热泵型涡旋压缩机结构分析[J]. 制冷学报, 2014, 35(2): 54-58. (TANG Jingchun, ZUO Chengji, et al. Structural analysis of heat pump scroll compressor for electric automobile air-conditioning [J]. Journal of Refrigeration, 2014, 35(2): 54-58.)
- [7] AHN J H, KANG H, LEE H S, et al. Heating performance characteristics of a dual source heat pump using air and waste heat in electric vehicles [J]. Applied Energy, 2014, 119(12): 1-9.
- [8] 吴祯利. 电动车动力电池热管理与空调系统联合仿真及控制技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015. (WU Zhenli. Study of co-simulation and control technology for electric vehicle battery thermal management and air conditioning systems [D]. Changchun: Jilin University, 2015.)
- [9] TAO Xinran, WAGNER J. A thermal management system for the battery pack of a hybrid electric vehicle: modeling and control [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D: Journal of Automobile Engineering, 2016, 230(2): 190-201.
- [10] PANCHAL S, KHASOW R, DINCER I, et al. Thermal design and simulation of mini-channel cold plate for water cooled large sized prismatic lithium-ion battery [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 122: 80-90.
- [11] RAO Zhonghao, WANG Shuangfeng. A review of power battery thermal energy management [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(9): 4554-4571.
- [12] 杨菲. 永磁电机温升计算及冷却系统设计[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2007. (YANG Fei. Temperature calculation and cooling system design of permanent-magnet electric motors [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2007.)
- [13] 朱克敏, 张一兵. 新型电机冷却外壳的研制及冷却方法研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2004, 28(5): 664-667. (ZHU Kemin, ZHANG Yibing. A study of cooled jacket and cooling method for a new type electric motor [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2004, 28(5): 664-667.)
- [14] BENNION K, THORNTON M. Integrated vehicle thermal management for advanced vehicle propulsion technologies [R]. Colorado: National Renewable Energy Lab, 2010.
- [15] ZHANG Tianshi, GAO Chun, GAO Qing, et al. Status and development of electric vehicle integrated thermal management from BTM to HVAC [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 88: 398-409.
- [16] 宁秋宇. 电动车空调系统的匹配设计[D]. 长春: 吉林大学, 2011. (NING Qiuyu. Matching design for air conditioning system of electric vehicle [D]. Changchun: Jilin U-

niversity, 2011.)

- [17] 王健, 许思传, 陈黎. 基于 AMESim 的纯电动汽车热管理系统的优化设计[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2011, 29(5): 656–660. (WANG Jian, XU Si-chuan, CHEN Li. Optimized design of thermal management system of electric vehicle based on AMESim software[J]. Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition), 2011, 29(5): 656–660.)
- [18] 王建, 郭航, 叶芳, 等. 热管散热装置对车用锂离子电池组内温度分布影响数值模拟[J]. 化工学报, 2016, 67(增刊 2): 340–347. (WANG Jian, GUO Hang, YE Fang, et al. Numerical simulation of effect of heat pipe cooling device on temperature distribution in lithium-ion battery pack of vehicle[J]. CIESC Journal, 2016, 67(Suppl.2): 340–347.)
- [19] 于会涛, 林玲, 何荣国. 多回路热管理系统在电动汽车中的应用[J]. 上海汽车, 2014(6): 46–48. (YU Huitao, LIN Ling, HE Rongguo. The application of multi-loop heat management system in electric vehicles [J]. Shanghai Auto, 2014(6): 46–48.)
- [20] ROBINET K J, NETKOWSKI P D, HAAS R P, et al. Active high voltage liquid cooled thermal management system; 20080295535A1[P]. 2008-12-04.
- [21] ZHOU P. Electric vehicle thermal management system; 7789176[P]. 2010-09-07.
- [22] ZHOU P. Electric vehicle thermal management system; 20100025006A1[P]. 2010-02-04.
- [23] ZHOU P. Electric vehicle thermal management system; 7841431[P]. 2010-11-30.
- [24] JOHNSTON V G. EV multi-mode thermal management system; 20160107508[P]. 2016-04-21.
- [25] BIELACZYK P, WOODBURN J, SZCZOTKA A. A comparison of carbon dioxide exhaust emissions and fuel consumption for vehicles tested over the NEDC, FTP-75 and WLTC chassis dynamometer test cycles[R]. SAE Technical Paper, 2015.
- [26] 祁照岗. 汽车空调部件及系统性能优化研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008. (QI Zhaogang. Performance optimization of mobile air conditioning components and system [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.)
- [27] 李海军. 纯电动汽车用低温热泵型空调系统性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015. (LI Haijun. Study on performance of low temperature heat pump air-conditioning system for pure electric vehicle[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.)
- [28] 朱巍. 电动车用高功率密度永磁同步电机热管理系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010. (ZHU Wei. Research on the thermal management of high power density permanent magnet synchronous motor in HEV[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.)
- [29] 姚望. 永磁同步牵引电机热计算和冷却系统计算[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013. (YAO Wang. Temperature calculation and cooling system calculation of permanent magnet synchronous traction motor[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2013.)
- [30] 欧阳陈志. 锂离子动力电池热分析及优化[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013. (OUYANG Chenzhi. Thermal analysis and optimization of lithium-ion power battery [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2013.)
- [31] 罗曼. 纯电动汽车用锂离子电池组液体冷却散热结构分析及优化[D]. 重庆: 重庆大学, 2014. (LUO Man. Analysis and optimization of liquid cooling heat dissipation structure for EV lithium-ion battery pack[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.)
- [32] 刘婉. 永磁同步电机温升建模及冷却性能分析[D]. 上海: 上海电机学院, 2016. (LIU Wan. Temperature rise modeling and cooling performance analysis of permanent magnet synchronous motor[D]. Shanghai: Shanghai Dianji University, 2016.)

通信作者简介

叶芳, 女, 副教授, 硕士生导师, 北京工业大学环境与能源工程学院, 13693060454, E-mail: yefang@bjut.edu.cn。研究方向: 传热传质, 新能源。

About the corresponding author

Ye Fang, female, associate professor, master supervisor, College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, +86 13693060454, E-mail: yefang@bjut.edu.cn. Research fields: heat and mass transfer, new energy.