



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111244568 B

(45) 授权公告日 2022. 10. 18

(21) 申请号 202010027160.0

G01R 27/26 (2006.01)

(22) 申请日 2020.01.10

G01R 31/387 (2019.01)

G01R 31/389 (2019.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 111244568 A

(43) 申请公布日 2020.06.05

(73) 专利权人 西安建筑科技大学
地址 710055 陕西省西安市雁塔路13号

(56) 对比文件

CN 103809126 A, 2014.05.21

CN 108896930 A, 2018.11.27

CN 109061477 A, 2018.12.21

FR 2967303 A1, 2012.05.11

(72) 发明人 杨乃兴 王萌 吕鑫 王娟
付永红 许世维

张志超等. 锂离子电池充放电过程中产热特性研究综述.《储能科学与技术》.2019,

张浩等. 电动车动力锂离子电池水冷系统研究.《汽车实用技术》.2017, (第06期),

李斌等. 车用动力锂电池产热机理研究现状.《电源技术》.2014, (第02期),

段艳丽等. 电动汽车电池冷却系统的试验研究.《制冷与空调》.2018, (第06期),

刘恒伟等. 加速量热仪在锂离子电池热测试中的应用.《集成技术》.2015, (第01期),

(74) 专利代理机构 西安恒泰知识产权代理事务所 61216

专利代理师 李婷 金艳婷

审查员 崔海洋

(51) Int. Cl.

H01M 10/613 (2014.01)

H01M 10/625 (2014.01)

H01M 10/633 (2014.01)

H01M 10/6568 (2014.01)

G01K 13/00 (2021.01)

权利要求书4页 说明书9页 附图2页

(54) 发明名称

电动汽车动力电池液冷系统实时制冷量计算方法及其控制

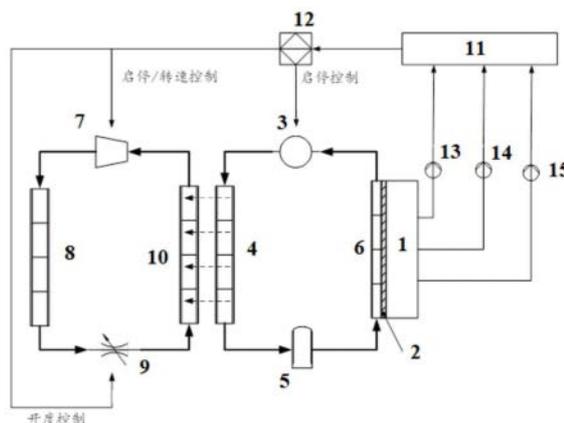
的能耗,从而提高电动汽车的续航里程。

(57) 摘要

本发明公开了电动汽车动力电池液冷系统实时制冷量计算方法及其控制,通过公式(1)和(2)计算电池制冷系统当前t时刻所需的制冷量

$\dot{Q}_L(t)$, 然后根据压缩机转速与制冷量之间的对应关系调节压缩机转速,达到当前t时刻电池所需该制冷量 $\dot{Q}_L(t)$ 。本发明提出的液冷系统的制冷量方法实际考虑了电池的温度、发热功率、电

池荷电状态SOC、衰退等因素,得到的制冷量相比传统方法具有更好地适应性,将显著增强液冷系统的温控能力。本发明的制冷控制系统可根据电动汽车行驶过程中电池热负荷的动态变化自动调节制冷量,使得液冷系统在满足电池散热需求的情况下以最小功率运行,将显著降低液冷系统



1. 一种电动汽车动力电池液冷系统实时制冷量计算方法,其特征在于,通过公式(1)和(2)计算电池制冷系统当前t时刻所需的制冷量 $\dot{Q}_L(t)$;

$$\dot{Q}_L(t) = q_m \cdot C_{P_cool} \cdot (T_{cool_out}(t) - T_{cool_in_max}(t)) \quad (1)$$

$$T_{cool_in_max}(t) = T_{cool_out}(t) - \left(I(t)^2 \cdot R_{in}(t) + I(t) \cdot T(t) \cdot \varepsilon(t) - C_{P_cell} \cdot m_{cell} \cdot \frac{T_{dis_max} - T(t)}{t_1 - t} \right) / (q_m \cdot C_{P_cool}) \quad (2)$$

其中:

$\dot{Q}_L(t)$ 为当前t时刻电池散热所需的制冷量,单位为W;

$T_{cool_out}(t)$ 为当前t时刻液冷板出口处冷却液体的温度,单位为K;

C_{P_cool} 为冷却液体的质量比热容,单位为 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$;

q_m 为冷却液体的质量流量,单位为 $kg \cdot s^{-1}$;

$T_{cool_in_max}(t)$ 为满足当前t时刻热负荷散热要求的液冷板进口处冷却液所需的最高温度,单位为K;

$T(t)$ 为当前t时刻电池的温度,单位为K;

$I(t)$ 为当前t时刻下电池的运行电流,单位为A;

T_{dis_max} 为电池允许最大放电温度,单位为K;

C_{P_cell} 为电池的质量比热容,单位为 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$;

m_{cell} 为锂离子电池的质量,单位为kg;

$R_{in}(t)$ 为当前t时刻电池的内阻,单位为 Ω ;

$\varepsilon(t)$ 为当前t时刻电池的熵变系数,单位为 $V \cdot K^{-1}$;

t_1 为当前t时刻电池以当前电流 $I(t)$ 放电至电量为0的时长,单位为s;

电池内阻 R_{in} 的获取方法为:

(1) 确定未使用的锂离子电池在不同温度T、不同电流I下的放电容量 C_{total_new} 的估算公式,具体为:

首先在不同环境温度和电流的正交工况下,对新电池进行恒电流放电试验,测量电池在这些正交工况点下的放电容量;然后基于测量得到的放电容量,拟合得到新电池放电容量的估算公式 $C_{total_new} = f(I, T)$;

(2) 将未使用的SOC=100%的锂离子电池放入温度为 T_{amb} 的恒温箱内静置;

(3) 测试电池表面温度T,当温度T满足: $|T - T_{amb}| < 0.1^\circ C$,且 $dT/dt < 0.02^\circ C \cdot min^{-1}$ 时,以I的电流对电池进行恒电流放电;

(4) 当电池放电 $\Delta SOC \cdot C_{total_new}$ 的容量时,停止放电,记录当前电池的SOC和端电压U(I, T, SOC),并对电池进行恒温静置;其中, $\Delta SOC = 5\%$;

(5) 当电池端电压U满足: $dU/dt < 0.1mV \cdot min^{-1}$ 时,停止搁置,记录电池的端电压U(I, T, SOC),并以I的电流对电池进行恒电流放电;

(6) 计算电池在该I、T和SOC状态下的内阻:

$$R_{in}(I, T, SOC) = [U(I, T, SOC^+) - U(I, T, SOC^-)] / I \quad (3)$$

(7) 改变电池的SOC状态,重复上述步骤(3)~(6),可获得当前I和T条件下不同SOC状态

点的电池内阻；

(8) 改变电流I和温度T,设计I和T的正交试验,利用步骤(3)~(7)的测试方法即可获得锂离子电池在不同I、T和SOC下的内阻数值,从而拟合得到 R_{in} 的估算公式。

2. 如权利要求1所述的电动汽车动力电池液冷系统实时制冷量计算方法,其特征在于,电池的熵变系数 ϵ 计算过程为:

(1) 确定未使用的锂离子电池在不同温度T、不同电流I下的放电容量 C_{total_new} 的估算公式,具体为:

首先在不同环境温度和电流的正交工况下,对新电池进行恒电流放电试验,测量电池在这些正交工况点下的放电容量;然后基于测量得到的放电容量,拟合得到新电池放电容量的估算公式 $C_{total_new} = f(I, T)$;

(2) 将未使用的SOC=100%的锂离子电池放入温度为 T_H 的恒温箱内静置; $30^\circ\text{C} \leq T_H \leq 40^\circ\text{C}$;

(3) 在温度 T_H 下,当电池端电压U满足 $dU/dt < 0.1\text{mV} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,记录电池的端电压 U_{OCV_TH} ,并改变恒温箱温度为 T_L ; $10^\circ\text{C} \leq T_L \leq 20^\circ\text{C}$;

(4) 在温度 T_L 下,当电池端电压U满足 $dU/dt < 0.1\text{mV} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,记录电池的端电压 U_{OCV_TL} ;

(5) 计算当前SOC状态下电池的熵变系数:

$$\epsilon = \frac{U_{OCV_TH} - U_{OCV_TL}}{T_H - T_L} \quad (4)$$

(6) 改变恒温箱温度为 T_H ,并以I的恒定电流对电池放电 $\Delta\text{SOC} \cdot C_{total_new}$ 的容量后停止放电;其中, $\Delta\text{SOC} = 5\%$;

(7) 对电池继续搁置,改变SOC的状态,重复上述步骤(3)~(6),即可获得不同SOC下电池熵变系数 ϵ 的数据,从而拟合得到其估算公式。

3. 如权利要求1所述的电动汽车动力电池液冷系统实时制冷量计算方法,其特征在于, $t_1 = \text{SOC}(t) \cdot C_{total_new}(t) \cdot \text{SOH}(t) / I(t)$;

其中,SOC(t)为电池当前t时刻下的荷电状态;

SOH(t)为电池在当前t时刻的健康状态;

C_{total_new} 为未使用的锂离子电池在温度T和电流I下的放电容量,单位为Ah; C_{total_new} 的获取方法为:首先在不同环境温度和电流的正交工况下,对新电池进行恒电流放电试验,测量电池在上述正交工况点下的放电容量;然后基于测量得到的放电容量,拟合得到新电池放电容量的估算公式 $C_{total_new} = f(I, T)$ 。

4. 电动汽车动力电池液冷系统实时制冷量控制方法,其特征在于,该控制方法包括:

采集当前t时刻电池的温度、电流以及液冷板出口处冷却液体的温度,根据权利要求1至3任一项所述的公式(1)和(2)计算电池当前t时刻所需的制冷量 $\dot{Q}_L(t)$,然后根据压缩机转速与制冷量之间的对应关系调节压缩机转速,达到当前t时刻电池所需该制冷量 $\dot{Q}_L(t)$ 。

5. 电动汽车动力电池液冷系统实时制冷量控制系统,其特征在于,包括:

数据采集模块,包括用于实时采集电池温度和实时采集液冷板进出口处冷却液体温度的温度传感器以及用于实施采集电池电流的电流传感器;

制冷量计算模块,通过公式(1)和(2)计算电池的制冷系统当前t时刻所需的制冷量

$\dot{Q}_L(t)$;

$$\dot{Q}_L(t) = q_m \cdot C_{P_cool} \cdot (T_{cool_out}(t) - T_{cool_in_max}(t)) \quad (1)$$

$$T_{cool_in_max}(t) = T_{cool_out}(t) - \left(I(t)^2 \cdot R_{in}(t) + I(t) \cdot T(t) \cdot \varepsilon(t) - C_{P_cell} \cdot m_{cell} \cdot \frac{T_{dis_max} - T(t)}{t_1 - t} \right) / (q_m \cdot C_{P_cool}) \quad (2)$$

其中： $\dot{Q}_L(t)$ 为当前t时刻电池散热所需的制冷量，单位为W；

$T_{cool_out}(t)$ 为当前t时刻液冷板出口处冷却液体的温度，单位为K；

C_{P_cool} 为冷却液体的质量比热容，单位为 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ；

q_m 为冷却液体的质量流量，单位为 $kg \cdot s^{-1}$ ；

$T_{cool_in_max}(t)$ 为满足当前t时刻热负荷散热要求的液冷板进口处冷却液所需的最高温度，单位为K；

C_{P_cell} 为电池的质量比热容，单位为 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ；

$T(t)$ 为当前t时刻电池的温度，单位为K；

$I(t)$ 为当前t时刻下电池的运行电流，单位为A；

T_{dis_max} 为电池允许最大放电温度，单位为K；

m_{cell} 为锂离子电池的质量，单位为kg；

$R_{in}(t)$ 为当前t时刻电池的内阻，单位为 Ω ；

$\varepsilon(t)$ 为当前t时刻电池的熵变系数，单位为 $V \cdot K^{-1}$ ；

t_1 为当前t时刻电池以当前电流 $I(t)$ 放电至电量为0的时长，单位为s；

制冷量调节模块，用于根据压缩机转速与制冷量之间的对应关系调节压缩机转速，使得制冷系统达到当前t时刻电池所需该制冷量 $\dot{Q}_L(t)$ ；

所述的制冷量计算模块中，电池内阻 R_{in} 的获取方法为：

(1) 确定未使用的锂离子电池在不同温度T、不同电流I下的放电容量 C_{total_new} 的估算公式，具体为：

首先在不同环境温度和电流的正交工况下，对新电池进行恒电流放电试验，测量电池在这些正交工况点下的放电容量；然后基于测量得到的放电容量，拟合得到新电池放电容量的估算公式 $C_{total_new} = f(I, T)$ ；

(2) 将未使用的SOC=100%的锂离子电池放入温度为 T_{amb} 的恒温箱内静置；

(3) 测试电池表面温度T，当温度T满足： $|T - T_{amb}| < 0.1^\circ C$ ，且 $dT/dt < 0.02^\circ C \cdot min^{-1}$ 时，以I的电流对电池进行恒电流放电；

(4) 当电池放电 $\Delta SOC \cdot C_{total_new}$ 的容量时，停止放电，记录当前电池的SOC和端电压U(I, T, SOC)，并对电池进行恒温静置；其中， $\Delta SOC = 5\%$ ；

(5) 当电池端电压U满足： $dU/dt < 0.1mV \cdot min^{-1}$ 时，停止搁置，记录电池的端电压U(I, T, SOC)，并以I的电流对电池进行恒电流放电；

(6) 计算电池在该I、T和SOC状态下的内阻：

$$R_{in}(I, T, SOC) = [U(I, T, SOC^+) - U(I, T, SOC^-)] / I \quad (3)$$

(7) 改变电池的SOC状态，重复上述步骤(3)~(6)，可获得当前I和T条件下不同SOC状态

点的电池内阻；

(8) 改变电流I和温度T,设计I和T的正交试验,利用步骤(3)~(7)的测试方法即可获得锂离子电池在不同I、T和SOC下的内阻数值,从而拟合得到 R_{in} 的估算公式。

6. 如权利要求5所述的电动汽车动力电池液冷系统实时制冷量控制系统,其特征在于,所述的制冷量计算模块中,电池的熵变系数 ϵ 计算过程为:

(1) 确定未使用的锂离子电池在不同温度T、不同电流I下的放电容量 C_{total_new} 的估算公式,具体为:

首先在不同环境温度和电流的正交工况下,对新电池进行恒电流放电试验,测量电池在这些正交工况点下的放电容量;然后基于测量得到的放电容量,拟合得到新电池放电容量的估算公式 $C_{total_new} = f(I, T)$;

(2) 将未使用的SOC=100%的锂离子电池放入温度为 T_H 的恒温箱内静置; $30^\circ\text{C} \leq T_H \leq 40^\circ\text{C}$;

(3) 在温度 T_H 下,当电池端电压U满足 $dU/dt < 0.1\text{mV} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,记录电池的端电压 U_{OCV_TH} ,并改变恒温箱温度为 T_L ; $10^\circ\text{C} \leq T_L \leq 20^\circ\text{C}$;

(4) 在温度 T_L 下,当电池端电压U满足 $dU/dt < 0.1\text{mV} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,记录电池的端电压 U_{OCV_TL} ;

(5) 计算当前SOC状态下电池的熵变系数:

$$\epsilon = \frac{U_{OCV_TH} - U_{OCV_TL}}{T_H - T_L} \quad (4)$$

(6) 改变恒温箱温度为 T_H ,并以I的恒定电流对电池放电 $\Delta\text{SOC} \cdot C_{total_new}$ 的容量后停止放电;其中, $\Delta\text{SOC} = 5\%$;

(7) 对电池继续搁置,改变SOC的状态,重复上述步骤(3)~(6),即可获得不同SOC下电池熵变系数 ϵ 的数据,从而拟合得到其估算公式。

7. 如权利要求5所述的电动汽车动力电池液冷系统实时制冷量控制系统,其特征在于,所述的制冷量计算模块中, $t_1 = \text{SOC}(t) \cdot C_{total_new}(t) \cdot \text{SOH}(t) / I(t)$;

其中,SOC(t)为电池当前t时刻下的荷电状态; $C_{total_new}(t)$ 为未使用的电池在当前t时刻的温度T(t)和电流I(t)下的放电容量,单位为Ah;SOH为电池在当前t时刻的健康状态。

电动汽车动力电池液冷系统实时制冷量计算方法及其控制

技术领域

[0001] 本发明属于电动汽车动力电池热管理技术领域,涉及一种电动汽车动力电池液冷系统实时制冷量计算方法及其控制。

背景技术

[0002] 目前,锂离子电池由于其在比能量、寿命、成本等方面的优异性能而成为电动汽车最为常用的储能元件,但其性能指标受温度影响较大。温度过低,锂离子电池易出现充电析锂和容量(或功率)缩水等现象;温度过高,锂离子电池内部的衰退过程将明显加快,同时还易引发热失控等安全问题。因此,对电动汽车动力锂离子电池服役过程中的温度应进行严格控制,通常锂离子电池的最佳运行温度范围为 $15\sim 35^{\circ}\text{C}$,适宜运行温度范围为 $10\sim 40^{\circ}\text{C}$ 。

[0003] 电动汽车动力电池常见的冷却方法主要包括风冷系统、液冷系统和直冷系统。液冷系统由于其具有换热效率高、制冷量大、结构紧凑、技术成熟度高等方面的优点,已成为当前电动汽车动力电池冷却的主流技术选择。目前,基于液冷技术的电动汽车动力电池典型液冷系统如图1所示。当电动汽车采用上述液冷系统进行电池冷却时,液冷系统和制冷系统的启停通常基于电池管理系统采集到的电池温度进行控制。

[0004] 也存在少部分的电动汽车对其冷却系统的制冷量进行实时控制,但其制冷量的控制思路是:利用电池温度或电池温升速率,对液冷系统中的压缩机转速或节流阀开度或循环泵转速进行控制,从而实现对液冷系统制冷效果的实时控制,以适应电动汽车动力电池散热负荷的动态变化。在电动汽车实际行驶过程中,利用上述控制方法进行液冷系统实时控制时,存在液冷系统制冷效果与电池散热负荷之间的适应性较差的缺陷。图2给出了液冷系统制冷效果控制过程中常见的4个工况点(1-A、2-A、1-B和2-B),其中曲线1的升温速率小于曲线2的升温速率,A点的电池剩余电量高于B点的电池剩余电量。根据经验,显然上述4个工况点所需要的制冷量各不相同。当利用电池温度进行液冷系统制冷效果控制时,将不能区分上述4个工况点散热需求的差异;当利用电池温升速率进行液冷系统制冷量控制,将不能区分A点和B点散热需求的差异。

[0005] 因此,上述方法将带来以下问题:①液冷系统制冷量可能过大,引起液冷系统频繁启停,从而影响压缩机、节流阀和循环泵的使用寿命,同时冷却液流量过大将增大冷却液泄漏等风险;过大的制冷量增大了系统能耗,从而降低电动汽车的续航能力。②液冷系统制冷量可能过小,引起电池降温不及时而易出现“电池过热”问题,进一步降低电池的性能指标(如:寿命、容量等),增大了电动汽车发生“热安全”事故的风险。

发明内容

[0006] 为解决现有技术中存在的不足,本发明提供了一种电动汽车动力电池液冷系统实时制冷量计算方法及其控制,克服现有技术制冷量计算不准确而引起的电动汽车液冷系统实时控制与电池散热负荷之间适应性较差的问题。

[0007] 为了解决上述技术问题,本发明采用如下技术方案予以实现:

[0008] 一种电动汽车动力电池液冷系统实时制冷量计算方法,通过公式(1)和(2)计算电池制冷系统当前t时刻所需的制冷量 $\dot{Q}_L(t)$;

$$[0009] \quad \dot{Q}_L(t) = q_m \cdot C_{P_cool} \cdot (T_{cool_out}(t) - T_{cool_in_max}(t)) \quad (1)$$

$$[0010] \quad T_{cool_in_max}(t) = T_{cool_out}(t) - \left(I(t)^2 \cdot R_{in}(t) + I(t) \cdot T(t) \cdot \varepsilon(t) - C_{P_cell} \cdot m_{cell} \cdot \frac{T_{dis_max} - T(t)}{t_1 - t} \right) / (q_m \cdot C_{P_cool}) \quad (2)$$

[0011] 其中, $\dot{Q}_L(t)$ 为当前t时刻电池散热所需的制冷量,单位为W;

[0012] $T_{cool_out}(t)$ 为当前t时刻液冷板出口处冷却液体的温度,单位为K;

[0013] C_{P_cool} 为冷却液体的质量比热容,单位为 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$;

[0014] q_m 为冷却液体的质量流量,单位为 $kg \cdot s^{-1}$;

[0015] $T_{cool_in_max}(t)$ 为满足当前t时刻热负荷散热要求的液冷板进口处冷却液所需的最高温度,单位为K;

[0016] $T(t)$ 为当前t时刻电池的温度,单位为K;

[0017] $I(t)$ 为当前t时刻下电池的运行电流,单位为A;

[0018] T_{dis_max} 为电池允许最大放电温度,单位为K;

[0019] C_{P_cell} 为电池的质量比热容,单位为 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$;

[0020] m_{cell} 为锂离子电池的质量,单位为kg;

[0021] $R_{in}(t)$ 为当前t时刻电池的内阻,单位为 Ω ;

[0022] $\varepsilon(t)$ 为当前t时刻电池的熵变系数,单位为 $V \cdot K^{-1}$;

[0023] t_1 为当前t时刻电池以当前电流 $I(t)$ 放电至电量为0的时长,单位为s。

[0024] 具体的,电池内阻 R_{in} 的获取方法为:

[0025] (1) 确定未使用的锂离子电池在不同温度T、不同电流I下的放电容量 C_{total_new} 的估算公式,具体为:

[0026] 首先在不同环境温度和电流的正交工况下,对新电池进行恒电流放电试验,测量电池在这些正交工况点下的放电容量;然后基于测量得到的放电容量,拟合得到新电池放电容量的估算公式 $C_{total_new} = f(I, T)$;

[0027] (2) 将未使用的SOC=100%的锂离子电池放入温度为 T_{amb} 的恒温箱内静置;

[0028] (3) 测试电池表面温度T,当温度T满足: $|T - T_{amb}| < 0.1^\circ C$,且 $dT/dt < 0.02^\circ C \cdot min^{-1}$ 时,以I的电流对电池进行恒电流放电;

[0029] (4) 当电池放电 $\Delta SOC \cdot C_{total_new}$ 的容量时,停止放电,记录当前电池的SOC和端电压 $U(I, T, SOC^-)$,并对电池进行恒温静置;其中, $\Delta SOC = 5\%$;

[0030] (5) 当电池端电压U满足: $dU/dt < 0.1mV \cdot min^{-1}$ 时,停止搁置,记录电池的端电压 $U(I, T, SOC^+)$,并以I的电流对电池进行恒电流放电;

[0031] (6) 计算电池在该I、T和SOC状态下的内阻:

$$[0032] \quad R_{in}(I, T, SOC) = [U(I, T, SOC^+) - U(I, T, SOC^-)] / I \quad (3)$$

[0033] (7) 改变电池的SOC状态,重复上述步骤(3)~(6),可获得当前I和T条件下不同SOC状态点的电池内阻;

[0034] (8) 改变电流I和温度T,设计I和T的正交试验,利用步骤(3)~(7)的测试方法即可获得锂离子电池在不同I、T和SOC下的内阻数值,从而拟合得到 R_{in} 的估算公式。

[0035] 具体的,电池的熵变系数 ϵ 计算过程为:

[0036] (1) 确定未使用的锂离子电池在不同温度T、不同电流I下的放电容量 C_{total_new} 的估算公式,具体为:

[0037] 首先在不同环境温度和电流的正交工况下,对新电池进行恒电流放电试验,测量电池在这些正交工况点下的放电容量;然后基于测量得到的放电容量,拟合得到新电池放电容量的估算公式 $C_{total_new} = f(I, T)$;

[0038] (2) 将未使用的SOC=100%的锂离子电池放入温度为 T_H 的恒温箱内静置; $30^\circ\text{C} \leq T_H \leq 40^\circ\text{C}$;

[0039] (3) 在温度 T_H 下,当电池端电压U满足 $dU/dt < 0.1\text{mV} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,记录电池的端电压 U_{OCV_TH} ,并改变恒温箱温度为 T_L ; $10^\circ\text{C} \leq T_L \leq 20^\circ\text{C}$;

[0040] (4) 在温度 T_L 下,当电池端电压U满足 $dU/dt < 0.1\text{mV} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,记录电池的端电压 U_{OCV_TL} ;

[0041] (5) 计算当前SOC状态下电池的熵变系数:

$$[0042] \quad \epsilon = \frac{U_{OCV_TH} - U_{OCV_TL}}{T_H - T_L} \quad (4)$$

[0043] (6) 改变恒温箱温度为 T_H ,并以I的恒定电流对电池放电 $\Delta\text{SOC} \cdot C_{total_new}$ 的容量后停止放电;其中, $\Delta\text{SOC} = 5\%$;

[0044] (7) 对电池继续搁置,改变SOC的状态,重复上述步骤(3)~(6),即可获得不同SOC下电池熵变系数 ϵ 的数据,从而拟合得到其估算公式。

[0045] 具体的, $t_1 = \text{SOC}(t) \cdot C_{total_new}(t) \cdot \text{SOH}(t) / I(t)$;

[0046] 其中,SOC(t)为电池当前t时刻下的荷电状态;

[0047] SOH为电池在当前t时刻的健康状态;

[0048] C_{total_new} 为未使用的锂离子电池在温度T和电流I下的放电容量,单位为Ah; C_{total_new} 的获取方法为:首先在不同环境温度和电流的正交工况下,对新电池进行恒电流放电试验,测量电池在上述正交工况点下的放电容量;然后基于测量得到的放电容量,拟合得到新电池放电容量的估算公式 $C_{total_new} = f(I, T)$;

[0049] 本发明还公开电动汽车动力电池液冷系统实时制冷量控制方法,该控制方法包括:

[0050] 采集当前t时刻电池的温度、电流以及液冷板出口处冷却液体的温度,根据权利要求1至4任一项所述的公式(1)和(2)计算电池当前t时刻所需的制冷量 $\dot{Q}_L(t)$;然后根据压缩机转速与制冷量之间的对应关系调节压缩机转速,达到当前t时刻电池所需该制冷量 $\dot{Q}_L(t)$ 。

[0051] 本发明还公开电动汽车动力电池液冷系统实时制冷量控制系统,包括:

[0052] 数据采集模块,包括用于实时采集电池温度和实时采集液冷板进出口处冷却液体温度的温度传感器以及用于实施采集电池电流的电流传感器;

[0053] 制冷量计算模块,通过公式(1)和(2)计算电池的制冷系统当前t时刻所需的制冷

量 $\dot{Q}_L(t)$;

$$[0054] \quad \dot{Q}_L(t) = q_m \cdot C_{P_cool} \cdot (T_{cool_out}(t) - T_{cool_in_max}(t)) \quad (1)$$

$$[0055] \quad T_{cool_in_max}(t) = T_{cool_out}(t) - \left(I(t)^2 \cdot R_{in}(t) + I(t) \cdot T(t) \cdot \varepsilon(t) - C_{P_cell} \cdot m_{cell} \cdot \frac{T_{dis_max} - T(t)}{t_1 - t} \right) / (q_m \cdot C_{P_cool}) \quad (2)$$

[0056] 其中, $\dot{Q}_L(t)$ 为当前t时刻电池散热所需的制冷量,单位为W;

[0057] $T_{cool_out}(t)$ 为当前t时刻液冷板出口处冷却液体的温度,单位为K;

[0058] C_{P_cool} 为冷却液体的质量比热容,单位为 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$;

[0059] q_m 为冷却液体的质量流量,单位为 $kg \cdot s^{-1}$;

[0060] $T_{cool_in_max}(t)$ 为满足当前t时刻热负荷散热要求的液冷板进口处冷却液所需的最高温度,单位为K;

[0061] C_{P_cell} 为电池的质量比热容,单位为 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$;

[0062] $T(t)$ 为当前t时刻电池的温度,单位为K;

[0063] $I(t)$ 为当前t时刻下电池的运行电流,单位为A;

[0064] T_{dis_max} 为电池允许最大放电温度,单位为K;

[0065] m_{cell} 为锂离子电池的质量,单位为kg;

[0066] $R_{in}(t)$ 为当前t时刻电池的内阻,单位为 Ω ;

[0067] $\varepsilon(t)$ 为当前t时刻电池的熵变系数,单位为 $V \cdot K^{-1}$;

[0068] t_1 为当前t时刻电池以当前电流 $I(t)$ 放电至电量为0的时长,单位为s。

[0069] 制冷量调节模块,用于根据压缩机转速与制冷量之间的对应关系调节压缩机转速,使得制冷系统达到当前t时刻电池所需该制冷量 $\dot{Q}_L(t)$ 。

[0070] 具体的,所述的制冷量计算模块中,电池内阻 R_{in} 的获取方法为:

[0071] (1) 确定未使用的锂离子电池在不同温度 T 、不同电流 I 下的放电容量 C_{total_new} 的估算公式,具体为:

[0072] 首先在不同环境温度和电流的正交工况下,对新电池进行恒电流放电试验,测量电池在这些正交工况点下的放电容量;然后基于测量得到的放电容量,拟合得到新电池放电容量的估算公式 $C_{total_new} = f(I, T)$;

[0073] (2) 将未使用的SOC=100%的锂离子电池放入温度为 T_{amb} 的恒温箱内静置;

[0074] (3) 测试电池表面温度 T ,当温度 T 满足: $|T - T_{amb}| < 0.1^\circ C$,且 $dT/dt < 0.02^\circ C \cdot min^{-1}$ 时,以 I 的电流对电池进行恒电流放电;

[0075] (4) 当电池放电 $\Delta SOC \cdot C_{total_new}$ 的容量时,停止放电,记录当前电池的SOC和端电压 $U(I, T, SOC^-)$,并对电池进行恒温静置;其中, $\Delta SOC = 5\%$;

[0076] (5) 当电池端电压 U 满足: $dU/dt < 0.1mV \cdot min^{-1}$ 时,停止搁置,记录电池的端电压 $U(I, T, SOC^+)$,并以 I 的电流对电池进行恒电流放电;

[0077] (6) 计算电池在该 I 、 T 和SOC状态下的内阻:

$$[0078] \quad R_{in}(I, T, SOC) = [U(I, T, SOC^+) - U(I, T, SOC^-)] / I \quad (3)$$

[0079] (7) 改变电池的SOC状态,重复上述步骤(3)~(6),可获得当前 I 和 T 条件下不同SOC

状态点的电池内阻；

[0080] (8) 改变电流I和温度T,设计I和T的正交试验,利用步骤(3)~(7)的测试方法即可获得锂离子电池在不同I、T和SOC下的内阻数值,从而拟合得到 R_{in} 的估算公式。

[0081] 具体的,所述的制冷量计算模块中,电池的熵变系数 ε 计算过程为:

[0082] (1) 确定未使用的锂离子电池在不同温度T、不同电流I下的放电容量 C_{total_new} 的估算公式,具体为:

[0083] 首先在不同环境温度和电流的正交工况下,对新电池进行恒电流放电试验,测量电池在这些正交工况点下的放电容量;然后基于测量得到的放电容量,拟合得到新电池放电容量的估算公式 $C_{total_new}=f(I,T)$;

[0084] (2) 将未使用的SOC=100%的锂离子电池放入温度为 T_H 的恒温箱内静置; $30^{\circ}\text{C}\leq T_H\leq 40^{\circ}\text{C}$;

[0085] (3) 在温度 T_H 下,当电池端电压U满足 $dU/dt<0.1\text{mV}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,记录电池的端电压 U_{OCV_TH} ,并改变恒温箱温度为 T_L ; $10^{\circ}\text{C}\leq T_L\leq 20^{\circ}\text{C}$;

[0086] (4) 在温度 T_L 下,当电池端电压U满足 $dU/dt<0.1\text{mV}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,记录电池的端电压 U_{OCV_TL} ;

[0087] (5) 计算当前SOC状态下电池的熵变系数:

$$[0088] \quad \varepsilon = \frac{U_{OCV_TH} - U_{OCV_TL}}{T_H - T_L} \quad (4)$$

[0089] (6) 改变恒温箱温度为 T_H ,并以I的恒定电流对电池放电 $\Delta\text{SOC}\cdot C_{total_new}$ 的容量后停止放电;其中, $\Delta\text{SOC}=5\%$;

[0090] (7) 对电池继续搁置,改变SOC的状态,重复上述步骤(3)~(6),即可获得不同SOC下电池熵变系数 ε 的数据,从而拟合得到其估算公式。

[0091] 与现有技术相比,本发明的有益效果是:

[0092] (1) 本发明提出的液冷系统的制冷量计算方法实际考虑了电池的温度、发热功率、电池荷电状态SOC、衰退等因素,得到的制冷量相比传统方法具有更好地适应性,将显著增强电动汽车动力电池液冷系统的温控能力。

[0093] (2) 由于液冷系统制冷量的可控性使得其与动力电池热负荷之间始终保持良好的适应性,从而减少了液冷系统频繁启停现象的发生,有利于减少液冷系统故障、延长其使用寿命。

[0094] (3) 本发明的制冷控制系统可根据电动汽车行驶过程中电池热负荷的动态变化自动调节制冷量,使得液冷系统在满足电池散热要求的情况下以最小功率运行,将显著降低液冷系统的能耗,从而提高电动汽车的续航里程。

附图说明

[0095] 图1是现有的电动汽车动力电池典型液冷系统示意图。

[0096] 图2是液冷系统制冷量控制过程的典型工况点示意图。

[0097] 图3是本发明制冷量可控的电动汽车动力电池液冷系统示意图。

[0098] 图中各标号的说明:1-动力锂离子电池组,2-导热绝热垫,3-循环泵,4-换热器,5-膨胀水壶,6-液冷板,7-压缩机,8-冷凝器,9-电子膨胀阀,10-蒸发器,11-电池管理系统,

12-液冷控制器,13-电流传感器,14-电压传感器,15-温度传感器。

具体实施方式

[0099] 如图3所示,本发明的液冷系统包括动力锂离子电池组1、导热绝热垫2、冷却液循环回路和制冷循环回路,其中,冷却液循环回路包括循环泵3、换热器4、膨胀水壶5和液冷板6,制冷循环回路包括压缩机7、冷凝器8、电子膨胀阀9和蒸发器10。动力锂离子电池组3中的锂离子电芯之间布置有液冷板6,其中在液冷板6与锂离子电池外表之间布置有导热绝热垫2;导热绝热垫2不但可防止外部短路事故的发生风险(因液冷板6通常为金属导体),还可以增强液冷板6与电池表面之间的热量传导速率。

[0100] 该液冷系统的冷却过程为:对动力锂离子电池组1进行冷却时,循环泵3开启,高温冷却液经换热器4散热后变为指定温度(即:液冷板进口温度)的低温冷却液,低温冷却液经电子膨胀水壶5流入液冷板6对动力锂离子电池组1进行冷却,吸热后的冷却液以高温状态流出液冷板6,高温冷却液经循环泵3后再次通过换热器4变为低温冷却液,从而对动力锂离子电池形成持续冷却;膨胀水壶5一方面可储存因压力脉动而“溢出”的低温冷却液体,另一方面在更换冷却液体时还具有排气作用。在制冷回路中,压缩机7开启,饱和蒸汽状态的制冷剂经压缩机7变为过热状态,然后经冷凝器8放热到饱和液体状态,饱和液体状态的制冷剂经电子膨胀阀9绝热节流后变为低温湿饱和和蒸汽状态,通过蒸发器10吸收冷却液中的热量,制冷剂变为饱和蒸汽状态再次进入压缩机7。

[0101] 其中,压缩机7选用变频压缩机,可实现对其转速在允许范围内进行连续调节,从而控制压缩机7的排量;选用的电子膨胀阀9可通过控制施加于膨胀阀上的电压或电流对其进行任意开度位置的控制,从而根据压缩机7排量调整与之匹配的制冷剂流量,最终完成对制冷循环制冷量的调节。

[0102] 基于上述液冷系统,本发明的实施例中提出了一种电动汽车动力电池液冷系统实时制冷量计算方法,通过下式(1)和(2)计算电池的制冷系统当前t时刻所需的制冷量 $\dot{Q}_L(t)$;

$$[0103] \quad \dot{Q}_L(t) = q_m \cdot C_{P_cool} \cdot (T_{cool_out}(t) - T_{cool_in_max}(t)) \quad (1)$$

$$[0104] \quad T_{cool_in_max}(t) = T_{cool_out}(t) - \left(I(t)^2 \cdot R_{in}(t) + I(t) \cdot T(t) \cdot \varepsilon(t) - C_{P_cell} \cdot m_{cell} \cdot \frac{T_{dis_max} - T(t)}{t_1 - t} \right) / (q_m \cdot C_{P_cool})$$

$$[0105] \quad (2)$$

[0106] 其中, $\dot{Q}_L(t)$ 为当前t时刻电池散热所需的制冷量,单位为W;

[0107] $T_{cool_in_max}(t)$ 为满足当前t时刻热负荷散热要求的液冷板进口处冷却液所需的最高温度;

[0108] $T(t)$ 为当前t时刻电池的温度,单位为K;该参数通过温度传感器实时测量得到;

[0109] $I(t)$ 为当前t时刻下电池的运行电流,单位为A;该参数通过电流传感器测量得到;

[0110] T_{dis_max} 为电池允许最大放电温度,单位为K;该参数在电池出厂时已经确定;

[0111] $T_{cool_out}(t)$ 为当前t时刻液冷板出口处冷却液体的温度,单位为K;该参数通过温度传感器测量得到;

[0112] C_{p_cool} 为冷却液体的质量比热容,单位为 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$;

[0113] q_m 为冷却液质量流量,单位为 $kg \cdot s^{-1}$;该参数可通过循环泵或流量计测量进行确定;

[0114] m_{cell} 为锂离子电池的质量,单位为 kg ;

[0115] C_{p_cell} 为电池的质量比热容,单位为 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$;该参数在电池出厂时已经确定;

[0116] $R_{in}(t)$ 为当前 t 时刻电池的内阻, R_{in} 是与电池运行电流 I 、电池温度 T 和荷电状态 SOC 相关的参数,本发明可采用混合脉冲功率特性 (HPPC) 测试方法、开路电压和工作电压差值法、交流阻抗法或伏安特性曲线法中的一种获取 $R_{in}(t)$ 。

[0117] 本发明优选锂离子电池的混合脉冲功率特性 (HPPC) 测试方法(具体测试方法参见国家标准 GBT 31467.1 和 GBT 31467.2) 预先确定锂离子电池的内阻。在动力电池制冷量实时控制过程中,利用实时检测的 I 、 T 、SOC 数值获得当前 t 时刻下的电池内阻值 $R_{in}(t)$ 。具体测试步骤包括:

[0118] (1) 确定未使用的锂离子电池在不同温度 T 、不同电流 I 下的放电容量 C_{total_new} 的估算公式,具体为:

[0119] 首先在不同环境温度和电流的正交工况下,对新电池进行恒电流放电试验,测量电池在这些正交工况点下的放电容量;然后基于测量得到的放电容量,拟合得到新电池放电容量的估算公式 $C_{total_new} = f(I, T)$;

[0120] (2) 将未使用的满充状态 (SOC = 100%) 的锂离子电池放入温度为 T_{amb} 的恒温箱内静置;

[0121] (3) 测试电池表面温度 T ,当温度 T 满足: $|T - T_{amb}| < 0.1^\circ C$, 且 $dT/dt < 0.02^\circ C \cdot min^{-1}$ 时,以 I 的电流对电池进行恒电流放电;

[0122] (4) 当电池放电 $\Delta SOC \cdot C_{total_new}$ 的容量(本发明优选 $\Delta SOC = 5\%$) 时,停止放电,记录当前电池的 SOC 和端电压 $U(I, T, SOC^-)$,并对电池进行恒温静置;其中, $C_{total_new}(t)$ 为未使用的电池在当前 t 时刻的温度 $T(t)$ 和电流 $I(t)$ 下的放电容量,单位为 Ah;

[0123] (5) 当电池端电压 U 满足: $dU/dt < 0.1 mV \cdot min^{-1}$ 时,停止搁置,记录电池的端电压 $U(I, T, SOC^+)$,并以 I 的电流对电池进行恒电流放电;

[0124] (6) 计算电池在该 I 、 T 和 SOC 状态下的内阻:

[0125] $R_{in}(I, T, SOC) = [U(I, T, SOC^+) - U(I, T, SOC^-)] / I$ (3)

[0126] (7) 重复上述步骤 (3) ~ (6),可获得当前 I 和 T 条件下不同 SOC 状态点的电池内阻。

[0127] (8) 改变电流 I 和温度 T ,设计 I 和 T 的正交试验,利用步骤 (3) ~ (7) 的测试方法即可获得锂离子电池不同 I 、 T 和 SOC 下的内阻数值,从而拟合得到其估算公式。

[0128] 优选地,本发明实施例中选用: $I = [0.2C \ 0.5C \ 1.0C \ 1.5C]$; $T_{amb} = [10^\circ C \ 20^\circ C \ 30^\circ C \ 40^\circ C]$ 。

[0129] $\varepsilon(t)$ 为当前 t 时刻电池的熵变系数;电池的熵变系数 ε 与电池的荷电状态 SOC 相关,每种 SOC 状态对应一个熵变系数 ε ,单位为 $V \cdot K^{-1}$ 。电池在不同时刻对应不同的 SOC 状态,因此,某一电池的熵变系数 ε 计算过程为:

[0130] (1) 确定未使用的锂离子电池在不同温度 T 、不同电流 I 下的放电容量 C_{total_new} 的估算公式,具体方法同电池内阻 R_{in} 中 C_{total_new} 获取方法。

[0131] (2) 将未使用的满充状态 (SOC = 100%) 的锂离子电池放入温度为 T_H (本发明实施

例优选 $30^{\circ}\text{C} \leq T_H \leq 40^{\circ}\text{C}$)的恒温箱内静置;

[0132] (3) 在温度 T_H 下,当电池端电压 U 满足: $dU/dt < 0.1\text{mV} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,记录电池的端电压 $U_{\text{OCV_TH}}$,并改变恒温箱温度为 T_L (本发明实施例优选 $10^{\circ}\text{C} \leq T_L \leq 20^{\circ}\text{C}$);

[0133] (4) 在温度 T_L 下,当电池端电压 U 满足: $dU/dt < 0.1\text{mV} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,记录电池的端电压 $U_{\text{OCV_TL}}$;

[0134] (5) 计算当前SOC状态下电池的熵变系数:

$$[0135] \quad \varepsilon = \frac{U_{\text{OCV_TH}} - U_{\text{OCV_TL}}}{T_H - T_L} \quad (4)$$

[0136] (6) 改变恒温箱温度为 T_H ,并以 I 的恒定电流对电池放电 $\Delta\text{SOC} \cdot C_{\text{total_new}}$ 的容量(本发明优选 $\Delta\text{SOC} = 5\%$)后停止放电;

[0137] (7) 对电池继续搁置,重复上述步骤(3)~(6),即可获得不同SOC下电池熵变系数 ε 的数据,从而拟合得到其估算公式。

[0138] t_1 为当前 t 时刻电池以当前电流 $I(t)$ 放电至电量为0的时长,单位为s。

[0139] 本发明优选的, $t_1 = \text{SOC}(t) \cdot C_{\text{total}}(t) / I(t)$, $C_{\text{total}}(t) = C_{\text{total_new}}(t) \cdot \text{SOH}(t)$;

[0140] 其中, $\text{SOC}(t)$ 为电池当前 t 时刻下的荷电状态,相当于电池剩余电量; $C_{\text{total}}(t)$ 为电池当前 t 时刻下的放电容量,单位为Ah; SOH 为电池在当前 t 时刻的健康状态,本发明优选 SOH 的容量定义式,当前 t 时刻 SOH 的数值由电池管理系统直接获取; $C_{\text{total_new}}(t)$ 为未使用的电池在当前 t 时刻的温度 $T(t)$ 和电流 $I(t)$ 下的放电容量,单位为Ah; $C_{\text{total_new}}$ 获取方法为:首先在不同环境温度和电流的正交工况下,对新电池进行恒电流放电试验,测量电池在上述正交工况点下的放电容量;然后基于测量得到的放电容量,拟合得到新电池放电容量的估算公式 $C_{\text{total_new}} = f(I, T)$ 。

[0141] 本发明的另一个实施例中还公开了一种电动汽车动力电池液冷系统实时制冷量控制方法,该控制方法包括:

[0142] 采集当前 t 时刻电池的温度、电流以及液冷板出口处冷却液体的温度,根据上述实施例公开的公式(1)和(2)计算电池当前 t 时刻所需的制冷量 $\dot{Q}_L(t)$;然后根据压缩机转速与制冷量之间的对应关系调节压缩机转速,达到当前 t 时刻电池所需该制冷量 $\dot{Q}_L(t)$ 。其中压缩机转速与制冷量之间的对应关系在电动汽车制冷系统选定时已具备。

[0143] 本发明的另一个实施例中还公开了一种电动汽车动力电池液冷系统实时制冷量控制系统,该控制系统包括:

[0144] 数据采集模块,包括用于实时采集电池温度和实时采集液冷板进出口处冷却液体温度的温度传感器以及用于实时采集电池电流的电流传感器。进一步的,由于电池电压是控制电池充电和放电过程启停的依据,因此数据采集模块中还设置电压传感器。

[0145] 制冷量计算模块,通过上述实施例中的公式(1)和(2)计算电池的制冷系统当前 t 时刻所需的制冷量 $\dot{Q}_L(t)$;

[0146] 制冷量调节模块,用于根据压缩机转速与制冷量之间的对应关系调节压缩机转速,使得制冷系统达到当前 t 时刻电池所需该制冷量 $\dot{Q}_L(t)$ 。

[0147] 本发明通过设置一个电池管理系统11和液冷控制器12,如图3所示,制冷量计算模

块集成在电池管理系统11中,制冷量调节模块集成在液冷控制器12中。动力电池组1分别通过电流传感器13、电压传感器14和温度传感器15与电池管理系统11连接,以上的计算过程均在电池管理系统11中运行,通过液冷控制器12控制循环泵的启停以及压缩机7的启停和转速。

[0148] 需要说明的是,本发明并不局限于上述实施例,在本发明公开的技术方案的基础上,本领域的技术人员根据所公开的技术内容,不需要创造性的劳动就可以对其中的一些技术特征作出一些替换和变形,这些替换和变形均在本发明的保护范围内。

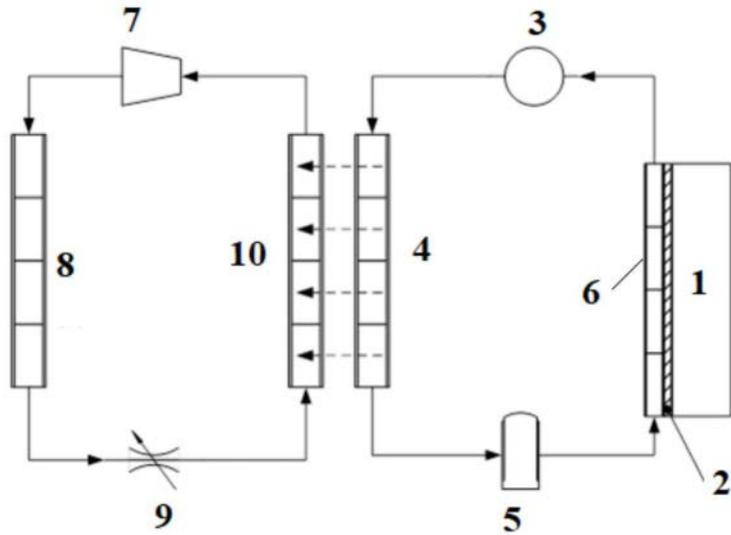


图1

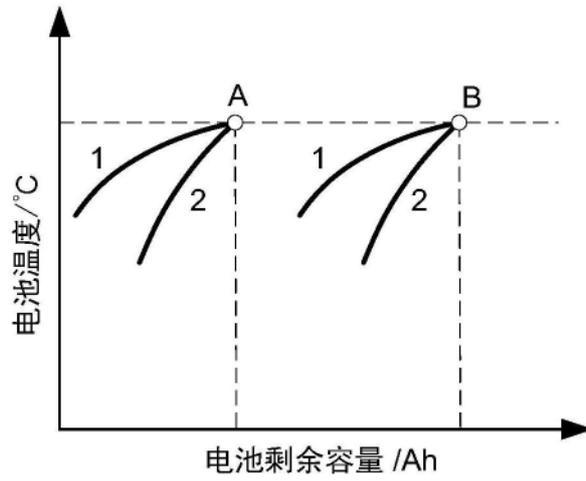


图2

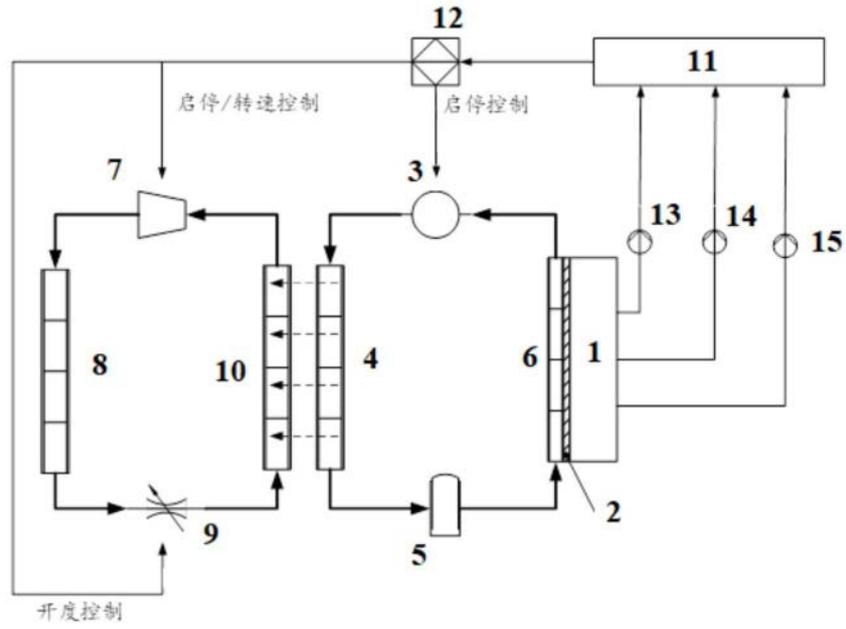


图3