

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200710063061.2

H01M 10/50 (2006.01)

H01M 10/42 (2006.01)

H01M 10/30 (2006.01)

G01K 3/08 (2006.01)

G06F 19/00 (2006.01)

[43] 公开日 2007 年 8 月 8 日

[11] 公开号 CN 101013765A

[22] 申请日 2007.1.26

[21] 申请号 200710063061.2

[71] 申请人 清华大学

地址 100084 北京市 100084 信箱 82 分箱清华大学专利办公室

[72] 发明人 林成涛 田光宇 仇 斌 陈全世 韩晓东

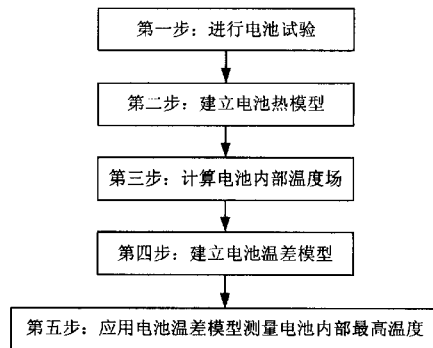
权利要求书 3 页 说明书 11 页 附图 8 页

[54] 发明名称

一种实时估计镍氢动力电池内外温差的方法

[57] 摘要

本发明属于电池组热管理技术领域，其特征在于，基于实验得到镍氢电池的平均比热、生热速率及电池平衡电动势温度影响系数；在计算机中，建立电池生热模型，使用软件 **Fluent** 得到电池内部温度场分布；再以自然风冷条件下的温差为基准，以变电流放电过程的平均电流为输入，建立一个同时反映电流、工作时间及电池表面传热系数对温度影响的温差模型；由于电池的内外温差曲线都具有幂函数特征，因而用幂函数拟合温差曲线，从而得到温差模型的各系数值；利用温差模型算出温差，再加上表面各点测温值便可得到电池内部的最大温度，从而填补了空白。



1、一种实施估计镍氢动力电池内外温差的方法，其特征在于，依次含有以下步骤：

步骤（1），进行镍氢电池生热特性试验、电池热物性参数测量试验和电池平衡电动势温度影响系数试验，其中：

电池生热特性试验，是在自然风冷条件下电池单体的恒流充电和放电生热试验，以掌握电池在不同散热条件下，在各设定的典型电流值恒流充电和恒流放电时的生热情况，得到充放电过程中电池表面的温度变化曲线；

电池热物性参数测量试验，是用冷却法测量电池的平均比热 C_p ：

$$C_p = \frac{m_{oil} C_{p,oil} \cdot \Delta T_{oil}}{M \cdot \Delta T_{cell}}$$

其中 m_{oil} 、 $C_{p,oil}$ 、 ΔT_{oil} 分别为电绝缘植物油的质量、比热和温度变化，试验测得， M 和 ΔT_{cell} 分别为电池单体的质量和温度变化，

由手册得到其他热物性参数、密度和导热系数；

电池平衡电动势温度影响系数试验，测量该影响系数 $\frac{dE_0}{dT}$ 受温度影响的程度， T 为电池表面的温度， E_0 为电池平衡电动势用，试验中用电池的开路电压 U_{oc} 代替， U_{oc} 由给定的电池荷电状态与 U_{oc} 的曲线得出；

步骤（2），在以计算机为基础的电池热管理系统中，计算并建立镍氢电池生热速率模型：

$$\text{生热速率 } \dot{q} = \frac{I_L}{V_B} \cdot (E_0 - U_L) - \frac{I_L}{V_B} \cdot T \cdot \frac{dE_0}{dT},$$

其中 I_L 为电池工作电流， U_L 为电池工作电压， V_B 为电池体积，

$\frac{I_L}{V_B} \cdot (E_0 - U_L)$ 描述由于电池内阻和其他不可逆效应引起的生热，

$-\frac{I_L}{V_B} \cdot T \cdot \frac{dE_0}{dT}$ 是由于电池内部电化学反应引起的生热，

初始条件为室温，

$$\text{边界条件为：} -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = h(T - T_\infty),$$

其中 T_∞ 为电池周围流体的温度， h 为电池表面与周围流体间的传热系数，为已知值， n 代表与电池表面垂直的方向，在直角坐标系中为 x 、 y 、 z 三个坐标方向，

步骤（3），所述系统计算电池内部温度场，依次含有以下步骤：

步骤（3.1），采用正六面体网格和正四面体网格相结合的方案建立镍氢电池单体的网格模型：镍氢电池单体网格模型中，集流体及其临近的空间区域几何形状比较复杂，使用正四面体网格；其他空间区域几何形状比较简单，使用正六面体网格；正六面体网格是结构化网格，正四面体网格是非结构化网格，结构化网格的网格区域内所有的内部点都具有相同的毗邻单元，非结构化网格的网格区域内的内部点不具有相同的毗邻单元；

步骤（3.2），采用 Fluent 软件计算在自然风冷条件下镍氢电池单体在不同的充、放电流，电池工作时间、电池表面传热系数和电池热物性参数下内部的温度场；

步骤（4），所述系统在忽略镍氢电池荷电状态 SOC 对电池单体内外温差影响的条件下，以自然对流散热条件下的温差为基准，此时电池表面与周围流体间的传热系数 $h=5$ ，按下式计算温差 ΔT ：

$$\Delta T = \beta \cdot k(\bar{I}) \cdot t^m \cdot \bar{h}^{\frac{1}{n}}$$

其中： \bar{I} 为变电流放电过程中电流 I 的平均电流，

$$\bar{I} = \frac{\sum_{t=t_j} (I_d \cdot t) + \sum_{t=t_k} (\alpha \cdot |I_c| \cdot t)}{\sum_{t=t_i} t},$$

t 为工作时间， i 为 t 的序列号，

α 为相同的镍氢电池单体内外温差所需的放电电流与充电电流之间的平均比例系数，取为 1.695，

I_d 为放电电流，对应时刻为 t_j ，

I_c 为充电电流，对应时刻为 t_k ，

$$t_i = t_j + t_k,$$

$$\bar{h} = \frac{\sum_{t=t_i} (h_i \cdot t)}{\sum_{t=t_i} t},$$

\bar{h} 为在 t 时间内的传热系数平均值，

$k(\bar{I}) \cdot t^m$ 是在自然对流散热条件下不同的 \bar{I} 和工作时间对电池单体内外温差的耦合影响，

其中：

t^m 描述工作时间对电池温差的影响，为正数， $k(\bar{I})$ 描述不同电流对电池温差的影响，

t^m 和 $k(\bar{I})$ 根据以下步骤得到：

首先，根据步骤（3）得到的在自然风冷散热条件下不同的电流恒流充电或恒流放电时，

各条电池温差随时间变化的曲线，都具有幂函数特征这一共同点确定幂函数指数 m ：基于诸多温差曲线特征确定 m 的合适取值范围为 0.5~0.8，在此范围内用穷举法来选取合适的 m 以确定出拟合各条温差曲线的幂函数，确定 m 具体数值的依据是参数 m 及由 m 进一步计算得到的 $k(\bar{T})$ 使得 $1C_N$ 充电过程电池内外温差的计算曲线和幂函数拟合曲线之间误差最小；

其次，采用温差计算曲线与所拟合的幂函数曲线误差最小的原则确定出各条拟合曲线 $k(\bar{T})$ 的系数 a_1 、 a_2 、 a_3 ；

得到： $k(\bar{T}) = a_1(\frac{\bar{T}}{C_N})^3 + a_2(\frac{\bar{T}}{C_N})^2 + a_3(\frac{\bar{T}}{C_N})$ ，其中 C_N 为电池的额定容量，

$\beta \cdot \frac{1}{h^n}$ 为以自然对流散热条件下的温差为基准，描述电池散热条件的电池内外温差的影响系数，所述的 β 、 n 按以下步骤得到：

首先，计算得到 $1C_N$ 充电电流下充电结束时不同表面传热系数对应的电池温差，从而得到不同表面传热系数对应的温差曲线，

其次，以自然对流条件下的温差为基准，对所述温差曲线进行等比例的变换，得到 $1C_N$ 时不同表面传热系数对温差的影响曲线，并确定整数 n 和系数 β 的值：综合影响曲线的特征及 n 为整数的要求确定 n 应在 2、3、4、5 四个正整数中选取，使用穷举法确定 n 和 β 具体数值，即依据计算曲线与拟合曲线误差最小的原则，求得 n 在取为 2、3、4 和 5 时对应的 β 值，从而得到四组 (n, β) ，在这四组 (n, β) 中选定误差最小的为最终的参数；

步骤 (5)，计算机应用电池温差模型，得到电池内部最高温度点和表面各测温点之间的温差，把此各点温差与相应的各电池表面温差测量值相加，得到电池内部相对于外部环境的最高温度。

一种实时估计镍氢动力电池内外温差的方法

技术领域

一种实时估计镍氢动力电池内外温差的方法涉及电动汽车用电池组热管理技术领域。

背景技术

新能源汽车是汽车工业应对世界环境和能源问题的必然选择。电动汽车作为新能源汽车最重要的组成部分，是目前世界汽车科技的热点。按照动力源的不同，可以把电动汽车分为纯电池电动汽车（BEV）、混合动力汽车（HEV）和燃料电池汽车（FCV）三大类。BEV 和 HEV 均采用动力电池作为动力源，动力电池对整车的动力性、安全性和经济性都有决定性的影响。

BEV 和 HEV 目前最常使用的动力电池是镍氢电池和锂离子电池。因为镍氢电池和锂离子电池都有最优工作温度范围，它们在使用过程中都需要热管理技术。镍氢电池的最优工作温度范围是 25℃~40℃，相对而言，镍氢电池对热管理技术的需求更为迫切。应用热管理技术的直接目的就是要使电池在最优温度范围内工作。如果镍氢电池和锂离子电池不在最优温度范围内工作，它们的工作效率和使用寿命都会降低。而且如果没有热管理，则可能使电池处于过热状态，过热会引起电池的热失控，造成烧毁车辆以至威胁乘客人身安全的事故。

电动汽车上都配有电池组热管理系统来实现对动力电池组工作温度的控制。电池组热管理系统可采用风冷和液冷两种方式，目前采用最多的是风冷系统。热管理系统的控制单元根据电池组温度传感器采集的电池组当前温度，基于预先设定的热管理策略来控制热管理系统风扇或泵（油泵或水泵）的工作状态，从而实现对电池组工作温度范围的控制。

由于受到电池生产工艺的限制，目前电池组热管理系统所用温度传感器都布置在电池的表面，温度传感器测量的是电池组中电池单体的表面温度，不是电池内部的最高温度。对于电池组热管理系统，使用电池组内部的最高温度作为输入显然要比用电池单体表面温度作为输入更可靠、更安全。

在不使温度传感器深入电池内部的情况下，要想掌握电池内部的最高温度，必须知道电池内部温度场的变化规律。镍氢电池和锂离子电池均由多种材料构成，内部有液体存在，它们在工作过程中的生热与荷电状态（SOC）、工作电流密切相关，它们的散热状况还受到热管理系统散热强度和电池箱结构的影响，所以想掌握电动汽车上动力电池内部温度场的变化规律并非易事。目前国内外已有的研究工作，还没有关于在电动汽车上实时计算电池内部温度场的公开文献的介绍。

从电动汽车动力电池的管理技术来讲，有必要提出一种能够在不改变现有电池温度传感器布置方式的情况下，实时估计电池内部最高温度的方法。

国内外的研究工作中,已有运用电池热模型离线计算电池内部的温度场,进而用温度场计算结果优化电池组热管理系统设计的研究方法。该方法将为本发明提供研究基础。

发明内容

本发明提供了一种在不改变目前电池温度传感器布置位置的情况下,测量电池内部最高温度的简易方法,该方法可以很容易在现有电动汽车热管理系统控制单元中应用,实现电动汽车上对动力电池组最高温度的实时测量。

本发明以电池生热特性为研究基础,以电池热模型为理论依据,采用数值计算的方法获取电池内部的温度场,分析温度场得到电池内部最高温度点和表面测温点之间温差受电池工作电流、电池工作时间、电池外部散热条件、电池热物性参数(具体指密度、比热和导热系数)的影响规律。用此温差与实测电池表面温度相加得到电池内部的最高温度。本发明的研究思路和应用步骤适用于各种型号的镍氢电池动力电池。

如图1所示,本发明的应用过程分为五个步骤,下面对五个步骤进行详细说明。

第一步,进行电池试验。

第一步的电池试验内容包括电池生热特性试验、电池热物性参数测量试验和电池平衡电动势温度影响系数试验。电池生热特性试验是掌握电池在不同散热条件下(电池表面传热系数不同),在各典型电流值恒流充电和恒流放电时的生热情况;电池热物性参数测量试验的目的是获取电池的密度、比热和导热系数;电池平衡电动势温度影响系数试验测量的影响系数用于描述电池平衡电动势受温度影响的程度。上述电池试验测量得到的试验数据或参数是进行电池单体内部温度场数值计算的基础,而电池单体表面温度和电池单体内部最高温度的温差变化规律要以电池内部温度场计算结果为依据进行分析。

第二步,建立电池热模型。

电池热模型是计算电池单体内部温度场的理论依据。本发明使用式(1)所示的三维电池热模型来计算电池单体内部的温度场。求解式(1)所示的导热微分方程需要解决三个关键问题:①热物性参数,即密度 ρ 、比热 C_p 和导热系数 λ (包括 λ_x 、 λ_y 和 λ_z)的准确获取;②生热速率 \dot{q} 的准确表达;③定解条件(初始条件和边界条件)的准确确定。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \dot{q} \quad (1)$$

在发明的第一步中已经解决了热物性参数的获取问题。

生热速率 \dot{q} 采用式(2)所示的生热速率进行计算。式(2)中 I_L 为工作电流; U_L 为工作电压; E_0 为电池平衡电动势,因 E_0 与开路电压 U_{oc} 在数值上非常接近,计算时用开路电压 U_{oc} 代替; T 为电池温度; $\frac{dE_0}{dT}$ 为电池平衡电动势的温度影响系数; V_B 为电池体积。式(2)

右侧第一项 $\frac{I_L}{V_B} \cdot (E_0 - U_L)$ 描述由于电池内阻和其他不可逆效应引起的生热，第二项

$-\frac{I_L}{V_B} \cdot T \cdot \frac{dE_0}{dT}$ 是由于电池内部电化学反应引起的生热。

$$\dot{q} = \frac{I_L}{V_B} \cdot (E_0 - U_L) - \frac{I_L}{V_B} \cdot T \cdot \frac{dE_0}{dT} \quad (2)$$

定解条件中初始条件用温度定义。边界条件用式 (3) 描述，其中 h 为电池表面与周围流体（空气、油或水）间的传热系数、 T_∞ 为电池周围流体的温度， T 为电池表面温度， λ 为电池材料的导热系数， n 为与电池表面垂直的方向，在直角坐标系中为 x 、 y 、 z 三个坐标方向。在确定定解条件时，本发明通过计算流体力学方法（Computational fluid dynamics, 简称 CFD）计算 h 。CFD 方法求取 h 是数值传热学中的一种通用方法，对于电池表面不同的空气流速，可以 CFD 方法计算得到相对应的 h 。

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = h(T - T_\infty) \quad (3)$$

第三步，计算电池内部温度场。

由于无法实时测量电池内部各点的温度，本发明基于电池生热特性试验数据（发明第一步的试验获得），采用数值计算的方法分析电池内部温度场受电池工作电流、电池工作时间、电池外部散热条件（电池表面传热系数）和电池热物性参数的影响规律，该规律将用于建立电池温差模型。计算电池内部的温度场需要建立电池的网格模型，计算过程使用 Fluent 软件来完成。

第四步，建立电池温差模型。

电池单体表面温度和电池单体内部最高温度之间的温差 ΔT 是电池工作电流 I 、电池工作时间 t 、电池散热环境和电池热物性参数耦合作用的结果。其中电池表面传热系数 h 描述电池的散热环境，电池热物性参数包括密度、比热和导热系数。虽然在同一工作电流下，不同 SOC 时镍氢电池的生热速率略有不同，但由于镍氢电池在常用 SOC 工作范围内不同 SOC 处的生热速率基本相等，所以本发明忽略 SOC 对电池单体内外温差的影响。对于确定的电池，其材料的热性参数已经确定，在使用电池热模型计算电池单体内部温度场的时候，已经考虑了电池热物性参数的影响，所以本发明提出如式 (4) 所示的电池单体内外温差估计模型，该模型考虑了工作电流 I 、工作时间 t 和电池表面传热系数 h 的影响，并实现了对影响因素的解耦分析。温差估计模型以自然对流散热条件下 ($h=5$) 的温差为基准，其中 $f_1(I,t)$ 描述在自然对流散热条件下不同电流和工作时间对电池单体内外温差的耦合影响， $f_2(h)$ 是电池散热条件对电池内外温差的影响系数 ($h=5$ 时 $f_2(h)=1$)。 $f_1(I,t)$ 和 $f_2(h)$ 的计算公式分别如式 (5) 和式 (6) 所

示。根据式（4）所示温差模型，在电动汽车上根据电池组热管理系统测量的电池外壁温度、电池组工作的历史信息 and 电池组热管理系统出口风速或液体流速，可以实时计算电池组内部的最高温度。

$$\Delta T = f_1(I, t) \cdot f_2(h) \quad (4)$$

$$f_1(I, t) = \Delta T_{h=5} = k(I) \cdot t^m = \left(a_1 \left(\frac{I}{C_N} \right)^3 + a_2 \left(\frac{I}{C_N} \right)^2 + a_3 \left(\frac{I}{C_N} \right) \right) \cdot t^m \quad (5)$$

$$f_2(h) = \beta \cdot h^{\frac{1}{n}} \quad (6)$$

在式（5）所示 $f_1(I, t)$ 的计算公式中 $k(I)$ 描述不同电流对电池温差的影响， t^m 描述工作时间对电池温差的影响， m 为正数。在求取 $f_1(I, t)$ 时，首先基于电池内部温度场计算结果，得到在不同电流恒流充电或恒流放电（自然风冷散热条件下）时，电池温差随时间变化的曲线，该曲线是对应不同电流的一组曲线。由于每条曲线都有幂函数的特点，基于诸多温差曲线特征确定 m 的合适取值范围为 0.5~0.8，在此范围内用穷举法来选取合适的 m 并得出拟合各条温差曲线的幂函数，确定 m 具体数值的依据是参数 m 及由 m 进一步计算得到的 $k(I)$ 使得 $1C_N$ 充电过程电池内外温差的计算曲线和幂函数拟合曲线之间误差最小。在确定 m 后，采用计算曲线与拟合曲线误差最小的原则，确定各条拟合曲线的系数（即 $k(I)$ 值）。在各个电流拟合曲线的表达式均给出后，根据不同电流时的 $k(I)$ 值，用三次多项式给出 $k(I)$ 的一般表达式，式（5）中 C_N 是电池的额定容量。

通过大量研究还发现， $f_2(h)$ 最适合用幂函数来拟合。在式（6）所示 $f_2(h)$ 的计算公式中， n 为正整数， β 为保证 $f_2(h)$ 曲线拟合精度的系数。在具体求取 n 和 β 时，首先要计算得到 $1C_N$ 充电电流下充电结束时不同表面传热系数对应的电池温差，从而得到不同表面传热系数对应的温差曲线。然后以自然对流条件下的温差为基准（ $h=5$ 时 $f_2(h)=1$ ），对温差曲线进行等比例变换，从而得到 $f_2(h)$ ，根据 $f_2(h)$ 曲线特征，确定整数 n 和系数 β 的值。确定 n 和 β 的具体过程如下：综合 $f_2(h)$ 曲线特征及 n 为整数的要求确定 n 应在 2、3、4、5 四个正整数中选取，使用穷举法确定 n 和 β 得具体数值，即依据计算曲线与拟合曲线误差最小的原则，求得 n 在取为 2、3、4 和 5 时对应的 β 值，从而得到四组 (n, β) ，在这四组 (n, β) 中选定误差最小的一组为最终的参数。

因为电动汽车动力电池组通常工作在变电流充放的状态下，而且充电生热与放电生热存在差异，所以要在电动汽车上实时估计电池组内单体内外温差，还需要解决变电流向恒电流等效的问题。为了解决电池温差模型在电动汽车上的实用问题，本发明首先将电池组的变电流充放电过程等效为变电流放电过程，然后用变电流放电过程电流 I 的平均电流 \bar{I} 作为温差

估计模型的输入。在工作过程中，随着热管理系统风扇或泵工作状态的变化，电池组表面传热系数 h 会有变化，这里使用 h 的时间平均值 \bar{h} 作为温差估计模型的输入。 \bar{I} 的计算公式如式 (7) 所示， \bar{h} 的计算公式如式 (8) 所示。

$$\bar{I} = \frac{\sum_{t=t_j} (I_d \cdot t) + \sum_{t=t_k} (\alpha \cdot |I_c| \cdot t)}{\sum_{t=t_i} t} \quad (7)$$

$$\bar{h} = \frac{\sum_{t=t_i} (h_i \cdot t)}{\sum_{t=t_i} t} \quad (8)$$

由此，根据式 (4) ~ 式 (8) 可以得到完整的电池温差模型如式 (9) 所示，式 (9) 中的 m 式 (5) 中的 m 完全相同，式 (9) 中的 n 和式 (6) 中的 n 完全相同。

$$\Delta T = f_1(\bar{I}, t) \cdot f_2(\bar{h}) = \beta \cdot k(\bar{I}) \cdot t^m \cdot \bar{h}^{\frac{1}{n}} \quad (9)$$

第五步，应用电池温差模型测量电池内部最高温度。

根据试验数据和电池内部温度场数值计算结果辨识得到电池温差模型的有关参数如 β 、 m 、 n 、 α 等，经过优化，就可以应用于电动汽车电池组热管理系统中，进行电池组最高温度的实时测量。

附图说明

图 1 本发明的应用步骤

图 2 由 320 单体串联构成的 80 Ah 镍氢电池组

图 3 镍氢电池模块和电池单体

图 4 获取电池单体内部最高温度的过程

图 5 镍氢电池单体生热特性试验示意图：

1—温度传感器；2—数据采集模块。

图 6 单体生热特性试验测温点

图 7 镍氢电池单体 40 A 恒流生热特性试验温度变化曲线：

—■— 点1、2_充 —▲— 点5、6_充 —◆— 点1、2_放 —▶— 点5、6_放
—●— 点3、4_充 —▼— 点7、8_充 —◀— 点3、4_放 —●— 点7、8_放

图 8 镍氢电池单体 80 A 恒流生热特性试验温度变化曲线：

—■— 点1、2_充 —▲— 点5、6_充 —◆— 点1、2_放 —▶— 点5、6_放
—●— 点3、4_充 —▼— 点7、8_充 —◀— 点3、4_放 —●— 点7、8_放

图 9 镍氢电池单体平均比热试验示意图：

3—充电机；4—电池模块；5—电流计；6—绝热桶；7—温度计。

图 10 镍氢电池平衡电动势温度影响系数试验示意图：

a) 电池温度; b) 环境温度。

图 11 镍氢电池单体零件示意图:

8—电池单体; 9—外壳; 10—内核; 11—气隙; 12—集流体; 13—外壳盖; 14—螺母。

图 12 10 单体镍氢电池模块的开路电压

图 13 电池箱内单体散热空间结构示意图

图 14 电池单体间典型气隙截面

图 15 镍氢电池单体网格模型

图 16 $1C_N$ 放电单体各点温度变化

c) 点 9 计算温度; d) 点 1 计算温度; e) 点 8 试验温度; f) 点 1 试验温度。

图 17 $1C_N$ 充电结束时面 1-5-2-6 的温度

图 18 $1C_N$ 充电结束时单体内各线的温度分布

--- 线5-6 —— 线1-2 -·-·-·- 线9-10

图 19 自然对流条件下不同电流时电池单体的内外温差

图 20 恒流充电或放电 1 小时时刻电池单体的内外温差:

g) 充电时的温差, 拟合公式为 $k=1.372x^3-0.882x_2+2.724x$;

h) 充电时的温差, 拟合公式为 $k=2.7333x^3-3.184x_2+2.1387x$ 。

图 21 传热系数 h 对内外温差的影响系数:

i) 曲线拟合的结果; j) 数值计算的结构。

图 22 相同内外温差时的电流值:

k) 放电时的曲线; l) 充电时的情况。

图 23 镍氢电池组工况试验电流电压曲线:

图 a) 工况试验中电池组电压的变化曲线; 图 b) 工况试验中电池组电流的变化曲线。

图 24 工况试验下电池单体内外温差估计模型应用效果

m) 温差模型估计的结果; n) 热模型计算的结果。

具体实施方式

下面以一由 320 单体串联而成, 额定容量为 80Ah 的镍氢电池组为例, 介绍实时估计电动汽车动力电池内外温差方法的实施过程。图 2 所示为镍氢电池组, 图 3 所示为电池组中的电池模块和电池单体, 图中最右侧电池单体被剥去了外壳。图 4 给出了利用本发明获取电池单体内部最高温度的过程

第一步: 进行电池试验。

(1) 镍氢电池生热特性试验

电池生热特性试验用于掌握电池在充放电过程中电池表面的温度变化曲线, 该曲线是验证电池热模型的基本依据。电池生热特性试验内容是自然风冷条件下电池单体的恒流充电和

放电生热试验，选用电流是 40A ($C_N/2$) 和 80A ($1C_N$)。所有的生热试验均在室温 (约 25℃) 进行。图 5 所示为镍氢电池单体生热特性试验示意图，图 6 中点 1~点 8 均为温度测量点。图 7 所示为镍氢电池单体 40A 恒流充电和放电各测温点的温度变化曲线，图 8 所示为镍氢电池单体 80A 恒流充电和放电各测温点的温度变化曲线。两图说明中，“点 1、2_充”表示充电试验中点 1 和点 2 温度的平均值，其他点也与此相同。

(2) 电池热物性参数测量试验

电池热物性参数包括密度、比热和导热系数。

本发明使用冷却法测量电池的平均比热，图 9 所示为试验示意图。图 9 中，绝热桶内盛有比热为 1.876 kJ/(kg·K) 的电绝缘植物油，被测电池单体放在绝热桶中，植物油恰好将电池单体完全浸没；温度计的传感器完全浸泡在植物油中。试验前使电池单体为 0℃。试验中首先将质量为 3.205 kg 植物油加热至 35.62℃ 倒入绝热桶中，然后迅速将 0℃ 电池单体放入绝热桶中使之与植物油进行热交换，在达到热平衡时电池和植物油的温度为 28.25℃。根据能量守恒，可以由式 (10) 计算得到电池单体的平均比热 C_p 为 1.028 kJ/(kg·K)。其中 m_{oil} 、 $C_{p,oil}$ 、 ΔT_{oil} 分别为油的质量、比热和温度变化， M 和 ΔT_{cell} 分别为电池单体的质量和温度变化。

$$C_p = \frac{m_{oil} \cdot C_{p,oil} \cdot \Delta T_{oil}}{M \cdot \Delta T_{cell}} = \frac{3.205 \times 1.876 \times (35.62 - 28.25)}{1.526 \times (28.25 - 0)} = 1.028 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} \quad (10)$$

(3) 电池平衡电动势温度影响系数试验

电池热模型的热源项 (即电池生热速率) 中的电池平衡电动势的温度影响系数 dE_0/dT 需要通过试验测量。本实施例设计如图 10 所示的试验过程测量该影响系数。实验中将三个 SOC 分别为 0.25、0.5 和 0.75 的 10 单体镍氢电池模块放入恒温箱，控制恒温箱内的温度按照图 10 中虚线所示的时间温度曲线变化。依据试验测得的模块开路电压，使用线性回归方法计算在三个 SOC 点的镍氢电池平衡电动势温度影响系数，取平均值最终为 0.000167V/℃

第二步，建立电池热模型。

本实施例通过确定电池热物性参数、生热速率、定解条件三个要素来建立镍氢电池的热模型。在确定三要素前，首先分析镍氢电池单体的物理结构。图 11 所示为镍氢电池单体的零件示意图，完整的电池单体由零件 9~零件 14 构成。其中，外壳 9 和外壳盖 13 共同构成单体完整的外壳，材料均为增强型尼龙 66 (一种工程塑料)；内核 10 是电池单体的热源部分，它由极片和隔膜交替叠压而成，在本实施例中将其视为介质均匀的同一种材料；集流体 12 (包括极柱) 和螺母 14 的材料相同，均为黄铜；11 为电池内核与外壳之间的间隙。

(1) 获取电池热物性参数

表 1 所示为构成镍氢电池单体的各零件质量，表 2 所示为镍氢电池单体各材料在室温的热物性参数。除图 9 测量的电池比热外，其他参数均可通过查找典型物质的热物性参数手册

得到。其中考虑到气隙气体处于运动状态的特点，选取的气隙气体导热系数是经过多次计算优选的等效导热系数。

表1 镍氢电池单体各零件的重量

名称	材料	体积(mm ³)	总重量(kg)	密度(kg/m ³)
电池单体	多种材料	557937	1.5260	2735
外壳	尼龙 66	144422	0.1964	1360
集流体	黄铜	4567	0.0779	8530
螺母	黄铜	1088	0.0371	8530
气隙	气隙气体	43032	0.00005	1.165
内核	内核材料	357000	1.2141	3401

表2 镍氢电池单体各材料的热物性参数

材料	密度	比热	导热系数
	kg/m ³	kJ/(kg·K)	W/(m·K)
尼龙 66	1360	1.500	0.35
7/3 黄铜	8530	0.396	121
气隙气体	1.225	1.006	242
内核材料	3401	1.012	0.82, 0.9, 0.9

(2) 镍氢电池生热速率模型的确定

本实施例用式(2)所示的生热速率公式进行计算。其中 I_L 、 U_L 、 T 为试验记录的数据， E_0 为图 12 所示 10 单体镍氢电池模块开路电压数值的十分之一，平衡电动势的温度影响系数 dE_0/dT 为 0.000167 V/°C， V_B 为表 1 中的 557937 mm³。

(3) 定解条件的确定

定解条件中的初始条件用温度确定，均取为室温 25°C。边界条件中的电池表面传热系数采用数值计算方法求得。图 2 所示镍氢电池箱具有图 13 所示的散热空间结构，由于该散热空间结构具有对称性，所以截面取图 14 所示的计算空间来求电池表面传热系数。实测图 2 所示镍氢电池箱在风扇开启后的出口风速，作为电池表面传热系数计算的重要指标。通过计算得到在风扇工作条件下的电池表面传热系数是 8.95W/(m²·K)。

第三步，计算电池内部温度场。

在建立了镍氢电池单体的网格模型后，使用本发明第二步建立的镍氢电池热模型计算在不同使用条件下的镍氢电池单体内的温度场。图 15 所示为本实施例进行镍氢电池单体内部温度场数值计算所用的网格模型，网格模型采用混合网格方案。集流体及其临近的空间区域几何形状比较复杂，使用正四面体网格；其他空间区域几何形状比较简单，使用正六面体网格。正六面体网格是结构化网格，正四面体网格是非结构化网格，结构化网格的网格区域内

所有的内部点都具有相同的毗邻单元，非结构化网格的网格区域内的内部点不具有相同的毗邻单元。

在进行电池单体内部温度场计算时使用的软件是 Fluent。图 16 所示是自然风冷条件下镍氢电池单体 $1C_N$ 放电过程中，电池温度变化的试验值和计算值，其中的计算值就是用本实施例所建立电池热模型计算的结果。在生热特性试验中， $1C_N$ 放电时间为 2700 s。图 16 中给出了 $1C_N$ 恒流放电电池单体点 1、点 9 的计算温度和点 1、点 8 的试验温度。从 $1C_N$ 恒流放电和其他生热特性试验过程的数值计算结果与试验数据比较来看，在试验结束时刻，本实施例建立的镍氢电池热模型数值计算结果与试验数据的误差都不超过 1.5°C 。

图 17 为镍氢电池单体 $1C_N$ 恒流充电结束时刻电池单体内部各面的温度分布，图中温度单位为 K。图 17 对应图 6 中所示垂直于 z 轴的面 1-5-2-6。图 18 为镍氢电池单体 $1C_N$ 恒流充电结束时刻电池内部各线的温度分布，线的位置由图 6 定义。在电动汽车上无法测量图 17、图 18 所示温度分布，通过该计算得到的温度分布可以掌握电池表面与最高温度点的温度差。

采用相同的方法，使用本实施例建立的镍氢电池热模型，可以计算其他恒流和变电流试验过程中电池单体内部的温度场，从而掌握电池内部最高温度与电池表面温度的温差信息。

第四步，建立电池温差模型。

建立本实施例研究的镍氢电池温差模型需要分别求取 $f_1(I,t)$ 和 $f_2(h)$ ，并解决变电流充放电工况试验条件下温差模型的应用问题。

基于自然对流散热条件下 ($h=5$) 电池单体恒流充电、放电试验数据进行数值计算，可得到图 19 所示的电池单体内外温差曲线。图中显示的数值计算结果是使用镍氢电池热模型计算得到的温差曲线，具体数值为图 6 所示点 1 和点 9 温度的差值。与试验测量温度相比，用于计算温差的数值计算温度可以保证小于 1°C 的误差。

由于 $f_2(5)=1$ ，使用幂函数对图 19 中各数值计算结果进行拟合，可以得到式 (11) 所示的 $f_1(I,t)$ 的表达式， m 的最优值取为 0.65。

$$f_1(I,t) = \Delta T_{h=5} = k(I) \cdot t^m = k(I) \cdot t^{0.65} \quad (11)$$

表 3 所示为不同电流时系数 $k(I)$ 的取值，用三次多项式对 $k(I)$ 进行拟合，得到式 (12) 所示的 $k(I)$ 的表达式。如图 20 所示， $k(I)$ 表示恒流充电或放电 1 小时时刻电池单体的内外温差，图中横坐标电流倍率为电流值与电池额定容量 C_N 的比值。

表 3 不同电流时的 $k(I)$ 值

电流倍率	$0C_N$	$0.5C_N$	$1C_N$	$1.5C_N$
$k(I)$, 充电	0	1.313	3.214	6.732
$k(I)$, 放电	0	0.615	1.688	5.269

$$k(I) = \begin{cases} 1.732\left(\frac{|I|}{C_N}\right)^3 - 0.882\left(\frac{|I|}{C_N}\right)^2 + 2.724\left(\frac{|I|}{C_N}\right), & (I < 0) \\ 2.7333\left(\frac{I}{C_N}\right)^3 - 3.184\left(\frac{I}{C_N}\right)^2 + 2.1387\left(\frac{I}{C_N}\right), & (I \geq 0) \end{cases} \quad (12)$$

运用镍氢电池热模型进行电池单体内部温度场计算，使用计算结果可以求取 $f_2(h)$ ，这里用到的计算数据仍然是 $1C_N$ 恒流充电试验数据。取电池表面传热系数 h 分别为 5、8.95、25、50 等不同值时，进行 $1C_N$ 恒流充电条件下的电池单体内外温差计算，可以得到温差曲线 $\Delta T(h)$ 。

由于 $f_2(5)=1$ ，根据 $\Delta T(h)$ 曲线进行等比例调整，可以得到 $f_2(h)$ 在 h 分别为 1、8.95、25 和 50 时的数值，具体数值如图 21 标记的各点所示。用幂函数拟合曲线 $f_2(h)$ ，得到式 (13) 所示公式， n 的合适取值为 3，图 21 中给出了 $f_2(h)$ 的拟合曲线。

$$f_2(h) = \beta \cdot h^{\frac{1}{3}} = 0.6733h^{\frac{1}{3}} \quad (13)$$

本实施例仍用恒流充电或放电 1 小时时刻电池单体的内外温差来建立充电与放电的电流等效关系。转换图 20 的横坐标与纵坐标重新画图，得到图 22 所示电池单体内外温差对应的充电与放电电流值。对图 22 中每一温差对应的放电电流与充电电流的比值取平均值，即得到获得相同电池单体内外温差所需放电电流与充电电流之间的平均比例系数 α 。对于本实施例研究的镍氢电池单体， α 取为 1.695。

综合上面的推导，可得到式 (14) 所示的镍氢电池单体内外温差估计模型。其中 I_d 为放电电流，对应时刻为 t_j ， I_c 为充电电流（负值），对应时刻为 t_k 。

第五步，应用电池温差模型测量电池内部最高温度。

本实施例用工况试验数据来评价温差模型的应用效果。由于无法测量试验过程中电池单体内部的最高温度，这里使用基于试验数据的电池热模型计算结果间接评价电池单体内外温差估计模型的精度。

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta T &= f_1(\bar{I}, t) \cdot f_2(\bar{h}) = \beta \cdot k(\bar{I}) \cdot t^m \cdot \bar{h}^n \\ &= \left(1.8403\left(\frac{\bar{I}}{C_N}\right)^3 - 2.1438\left(\frac{\bar{I}}{C_N}\right)^2 + 1.44\left(\frac{\bar{I}}{C_N}\right) \right) \cdot t^{0.65} \bar{h}^{\frac{1}{3}} \\ \bar{I} &= \frac{\sum_{t=t_j} (I_d \cdot t) + \sum_{t=t_k} (\alpha \cdot |I_c| \cdot t)}{\sum_{t=t_i} t} \\ \bar{h} &= \frac{\sum_{t=t_i} (h_i \cdot t)}{\sum_{t=t_i} t} \end{aligned} \right. \quad (14)$$

图 23 所示为镍氢电池组工况试验过程示意图，试验历时 6000s，试验中最大放电电流 190.88A，最大充电电流 91.24A，平均电流 49.78A。试验的初始 SOC 为 0.734，终止 SOC 为 0.245，试验开始时电池组平均温度 24.51℃，试验完成时电池组平均温度 26.17℃。由于试验过程中电池组风扇全开，所以取电池表面传热系数为 8.95W/(m²·K)。

基于图 23 所示工况试验数据分别使用电池热模型和温差模型进行计算，得到图 24 所示的电池热模型的计算结果和温差估计模型的估计结果。以热模型计算结果为基准，算得温差估计模型的平均误差为 0.17°C ，最大误差为 0.37°C 。这里热模型计算结果可以保证 1°C 以内的误差，总体而言，电池单体内外温差估计模型具有令人满意的精度。

由实施例可见，本发明提出的温差模型将复杂的镍氢电池热模型简化并实施应用在电动汽车上，初步解决了在电动汽车上电池组最高温度的实时测量问题。

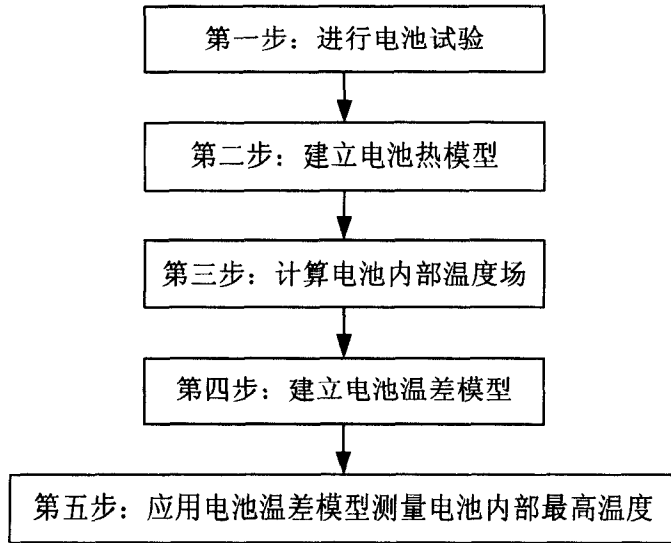


图 1

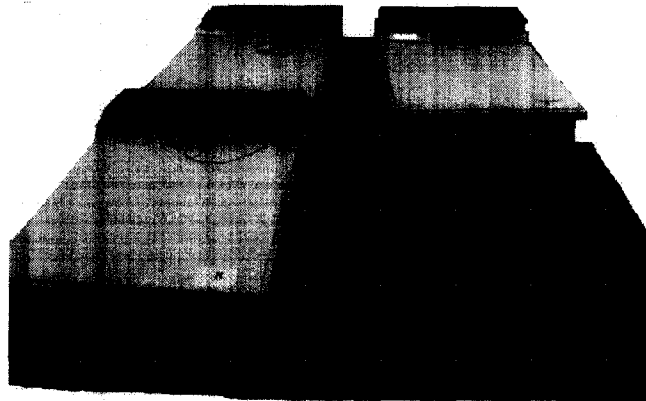


图 2



图 3

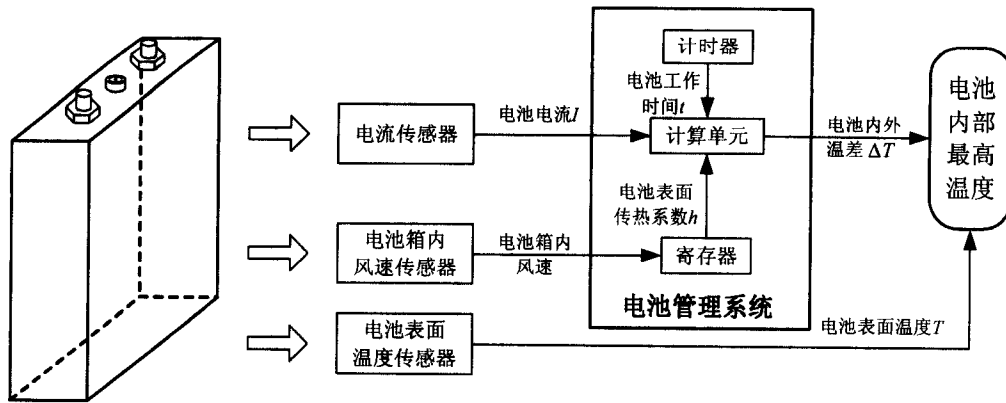


图 4



图 5

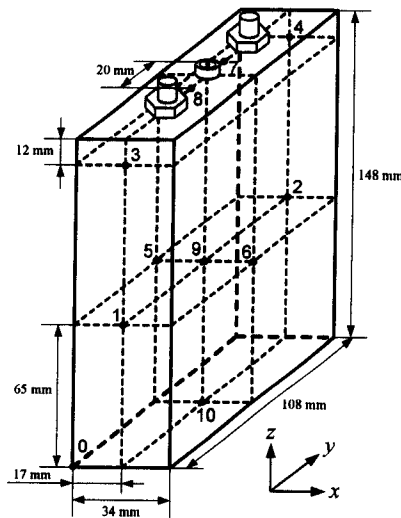


图 6

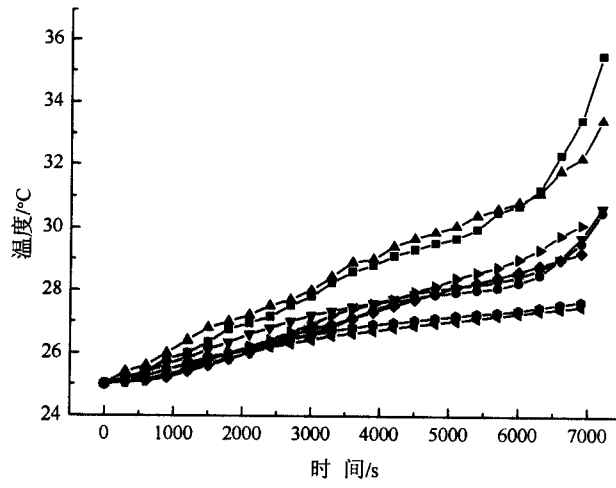


图 7

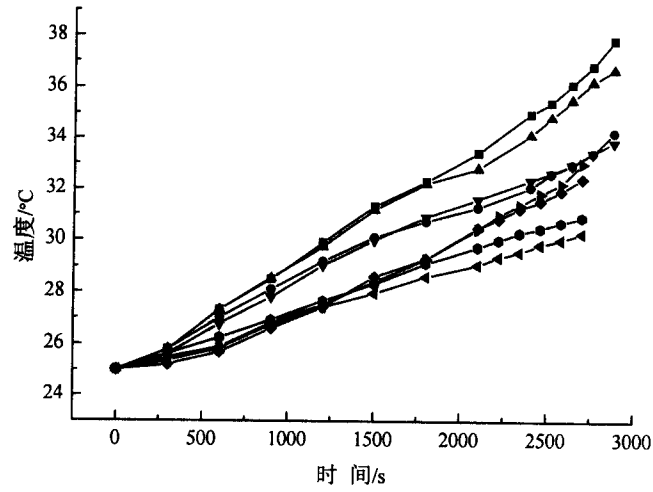


图 8

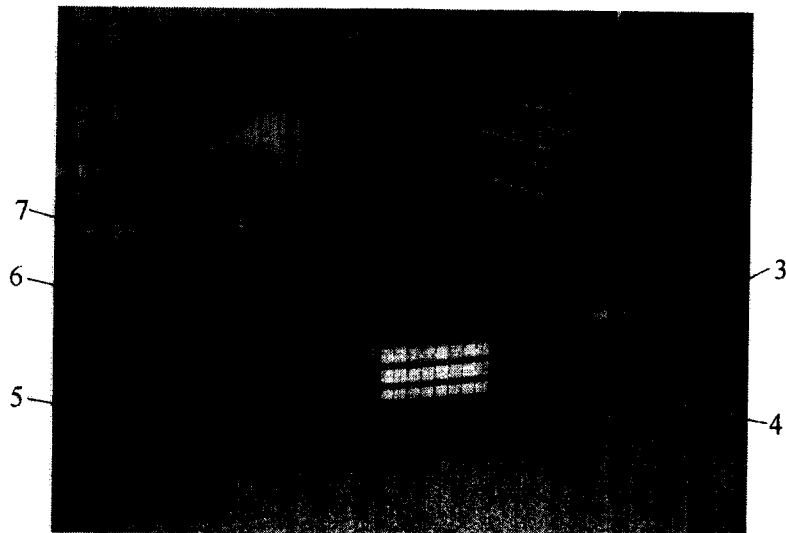


图 9

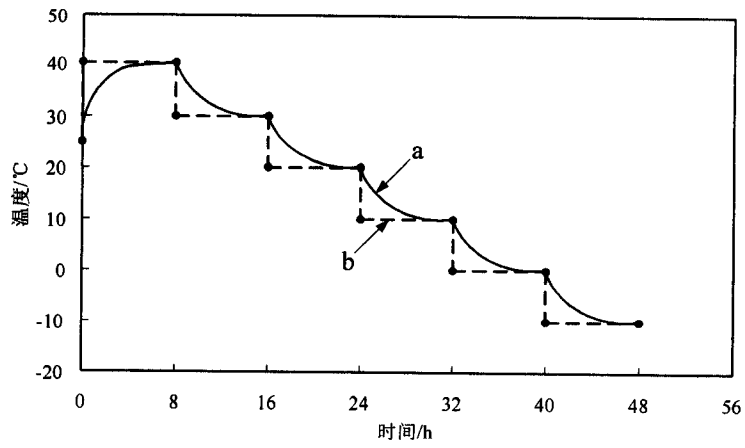


图 10

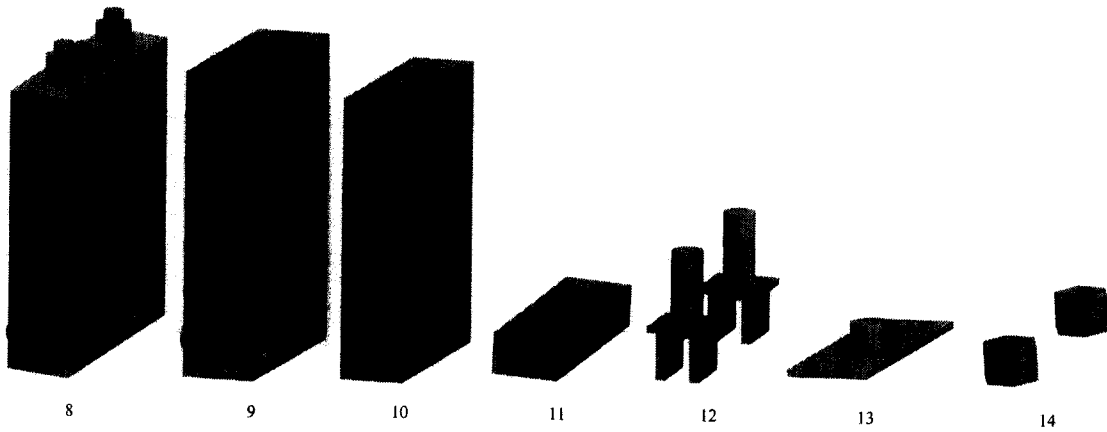


图 11

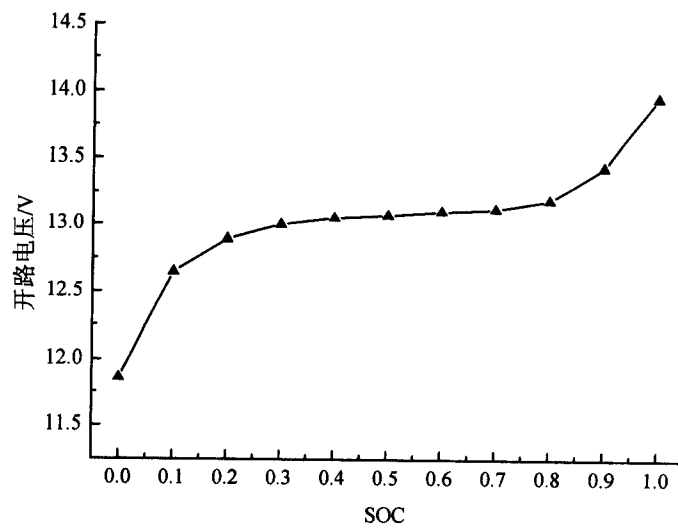


图 12

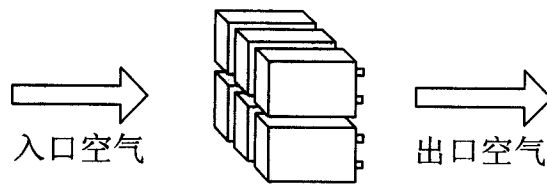


图 13

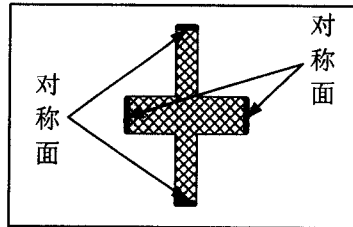


图 14

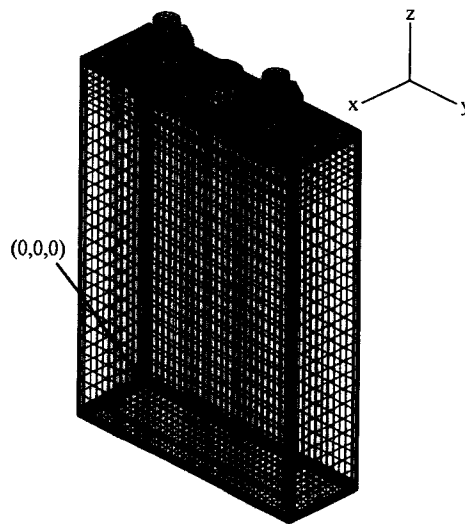


图 15

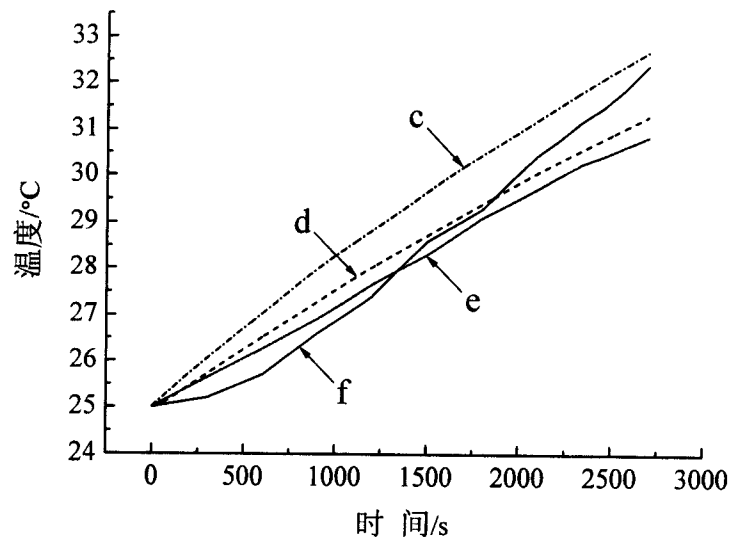


图 16

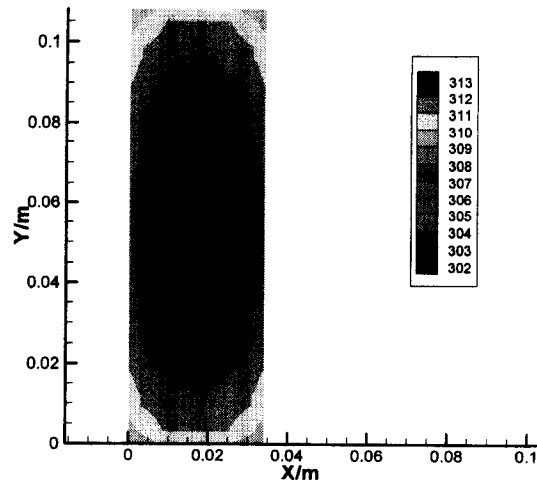


图 17

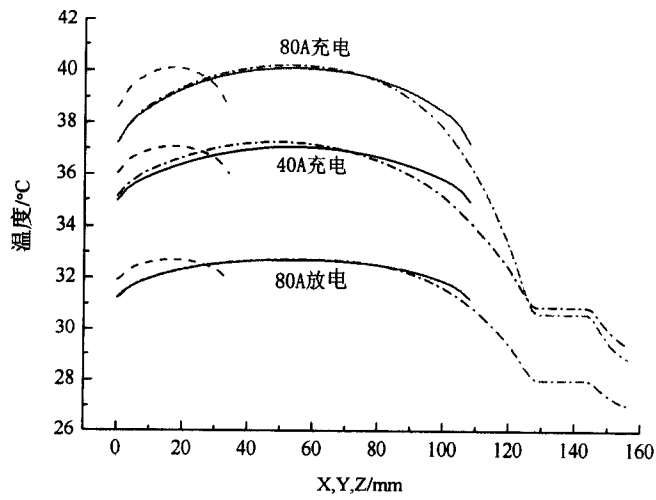


图 18

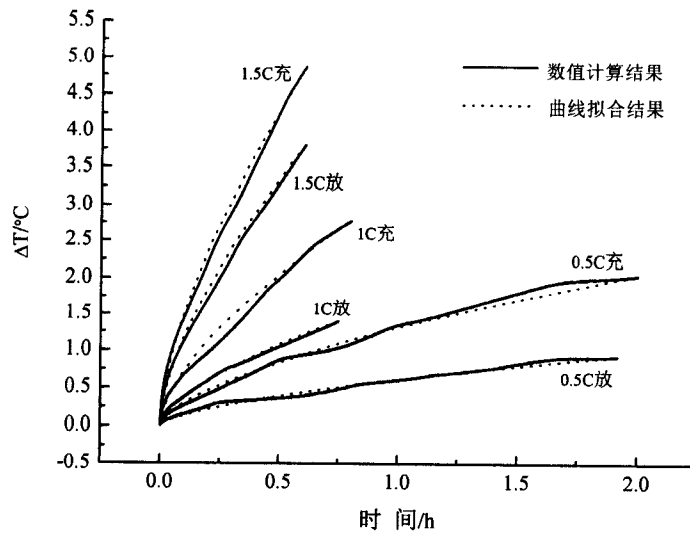


图 19

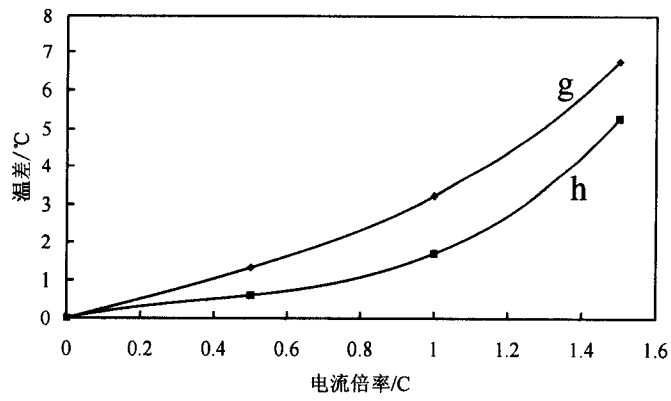


图 20

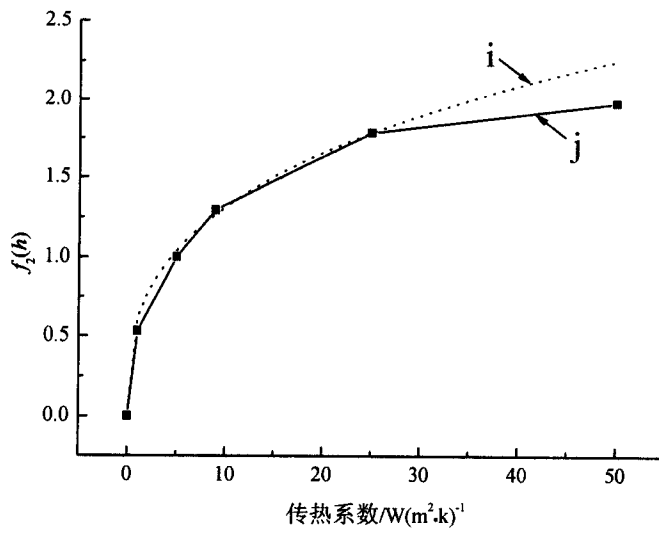


图 21

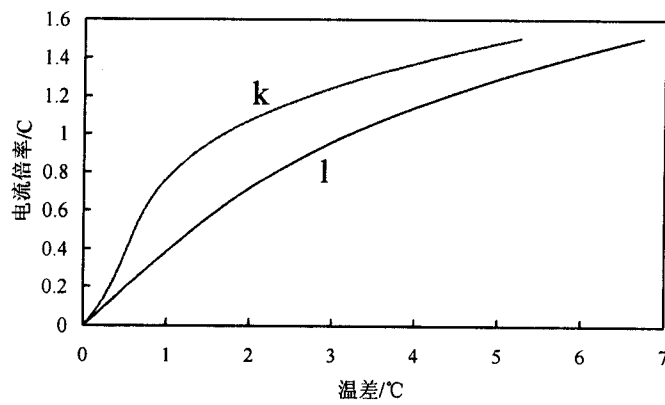


图 22

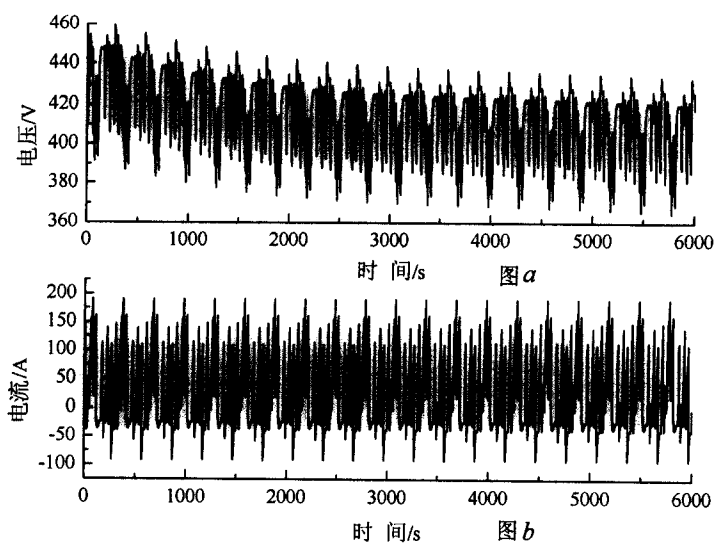


图 23

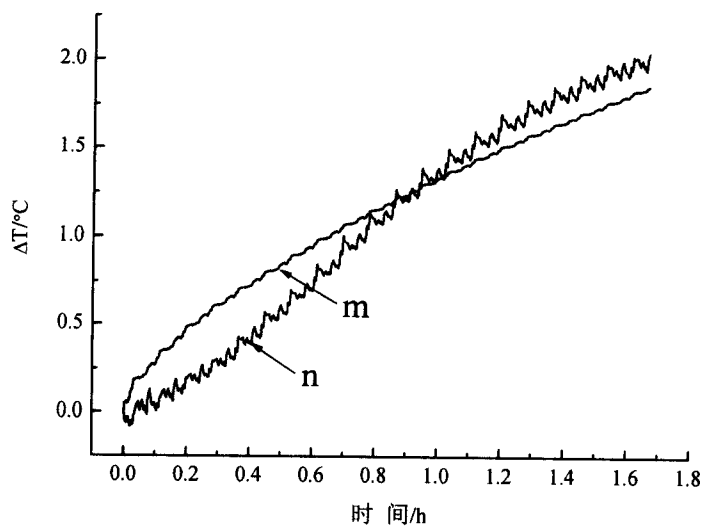


图 24