

文章编号 1004-924X(2014)01-0193-11

基于电阻层析成像的汽车动力电池内部温度监测

洪晓斌¹, 李年智¹, 尹文伟¹, 孔庆钊², 刘桂雄^{1*}

(1. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640;

2. 美国休斯敦大学 机械工程学院, 美国德克萨斯州 休斯敦 77204)

摘要:为了直观地在线检测动力电池的温度,以确保动力电池的安全,提出了一种基于电阻层析成像的动力电池内部温度监测新方法。引入温纳-施伦贝尔装置模型分析电池内部温度检测机理,推导了电池内部温度与电阻率的数学关系;应用抑制平滑度最小平方方法将多电极检测大数据进行图像反演重建,实现了对动力电池内部温度异常区的动态监测,并搭建了实验平台。文中通过建立相交区域试验模型,实验分析动力电池内部的电阻率静态分布,并验证方法可靠性。然后,实验分析动力电池内部电阻率的动态分布,得到45.5℃时反演图像色带差值增大了2.5倍,且坐标(0.047, 0.0005)内色带变化明显。最后,动态跟踪异常区临界温度。结果显示,在 $0.173 \Omega \cdot m$ 处突变骤升,电池内部产生异常。得到的结果表明,提出的方法可直观可靠地监测动力电池内部温度动态变化;可为动力电池的安全特性、寿命预测、负载控制等提供新的研究途径。

关键词:电阻层析成像;温纳-施伦贝尔模型;汽车动力电池;温度检测;图像反演

中图分类号:U463.63 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142201.0193

Monitoring of internal temperature of vehicle power battery based on electrical resistance tomography

HONG Xiao-bin¹, LI Nian-zhi¹, YIN Wen-wei¹, KONG Qing-zhao², LIU Gui-xiong^{1*}

(1. College of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Department of Mechanical Engineering, University of Houston, Houston 77204, Texas, USA)

* Corresponding author, E-mail: megxliu@scut.edu.cn

Abstract: A novel method to monitoring the internal temperature of a power battery was proposed based on the Electrical Resistance Tomography(ERT) to complement the temperature measurement in online and to insure the safety of the power battery. Through introducing the Wenner-Schlumberger model in the ERT, the relationships between the internal temperatures and the resistivity of power battery were deduced. And by using the smoothness-constrained least-square method to invert the images of multi-electrode tomographic detection data, the internal abnormal temperature regions were monitored dynamically and a test platform was established. To validate the reliability of this new method, an intersection region model was established to analyze the static distribution of internal re-

收稿日期:2013-04-22;修订日期:2013-07-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51305141);广东省中国科学院全面战略合作项目(No. 2012B091100224);中央高校基本科研业务费资助滚动项目(No. 2014ZG0016);广东省科技计划资助项目(No. 2012B020314001)

sistivity of the power battery. Then, dynamic resistivity distribution was analyzed in five different temperatures. The analysis shows that the color ribbon difference in the inversion image increases by 2.5 times in 45.5 °C as compared to those of other four tests, especially at coordinates (0.047, 0.0005), which changes significantly. Finally, dynamic tracking critical temperature in mutational area shows that the resistivity rebounds suddenly at 0.173 $\Omega \cdot m$, which indicates that a mutation occurs in the battery. These results demonstrate that the proposed method not only offers a visual and reliable monitoring result of internal temperature changes for the power battery, but also can provide a new research pathways for the power battery, such as safety characteristics, life prediction, and load control.

Key words: Electrical Resistance Tomography(ERT); Wenner Schlumberger model; vehicle power battery; temperature detection; image reconstruction

1 引言

近年来为解决能源与环境问题,各国都在加速发展节能汽车与新能源汽车,以使全球汽车工业实现可持续发展。目前,新能源汽车已经成为我国七大战略性新兴产业之一,电动汽车是新能源汽车的典型代表,而动力电池组是整个新能源汽车技术研发的核心^[1]。锂离子动力电池由于具有高能量密度和长循环使用寿命等优越性能,已成为最具发展前景和竞争力的动力电池之一,然而其使用过程中的安全性问题制约了它的发展,急需加大研究力度^[2]。

锂离子动力电池的安全性能取决于内部热的产生和散逸这一竞争过程^[3]。当动力电池运行中出现大电流放电、过充电及内部短路等情况时,内部就会产生大量的热量,如果这些热量不能及时释放出去,电池体系就会达到较高的温度,从而对电池造成不可逆转的热破坏作用,存在较大危险。目前,新能源汽车都采用串联的方式将动力电池组装使用,而各单体动力电池产热及散热情况不同,就会导致整体电池组的温度场分布存在明显差异。过高的局部温度不但影响电池寿命,而且存在燃烧爆炸等安全隐患。因此,动力电池温度的在线直观检测对于确保动力电池的安全性具有重要的意义。

加利福尼亚大学伯克利分校的 Chen^[4](1997)等通过研究桑迪亚概念模型动力聚合物电池放电所产生的热量,估算出电池内部的温度变化,以追踪电池放电过程中热量散失过程,但外界

环境的不同会造成一些热量损失,从而对温度变化估算产生影响;美国苏必利尔湖州立大学的 A. Hande^[5](2005)研究了低温下汽车动力电池的运行性能,通过计算低温环境下串联电池内阻的变化来研究内部温度的变化情况,但该实验需限制在低温条件下,实验结果存在一定的局限性。在国内,相关研究起步较晚,主要采用传统的温度传感器。例如,北京理工大学学者^[6](2008)采用 DS18B20 温度传感器对动力电池组进行了两点温度采集试验,该方法成本低廉,但两点式采集方式主要是监控电池组的局部表面温度情况;重庆大学与重庆长安公司^[7](2008)合作采用多点式 T 型热电偶构建了温度检测系统,克服了两点式方法的不足;随后郑州宇通客车有限公司^[8](2010)设计了基于热敏电阻(Negative Temperature Coefficient, NTC)的电池温度测量电路,使响应速度有所提高。然而,上述研究较少涉及电池内部温度监测。结合国内外的研究状况不难看出,为了更直观、方便地对汽车动力电池内部温度进行动态监测,新型监测方法尚待发掘。

近年来,电阻层析成像(Electrical Resistance Tomography, ERT)作为一种基于高密度电阻率法的探测方法已经应用于地质及环境监测、两相管流的监测等领域。该方法主要利用不同导体具有不同电阻率的特点,通过检测被测物体内部的电阻率分布来研究其内部介质的构成,该方法对于土壤、岩石、油、水、天然气混合物等的监测均有较好效果。国内外学者针对 ERT 的测量方式开展了大量研究,加利福尼亚大学伯克利分校的 Karhunen^[9]等(2010)在环形电极阵列中,采用相

对激励模式对不同条件影响下的块状混凝土进行了三维探测分析,结果显示,该模式下电流密度分布均匀,检测效果精度高;曼彻斯特大学的 Rodgers^[10]等(2011)在环形电极阵列中采用较为简便的相邻激励装置,采用区域网络模型对存在扰动的管道内流体分布进行了良好的预测;中国矿业大学学者^[11](2013)在利用四级装置进行土壤电阻率测量时,提出了采用快速傅里叶变换直流分量法将传统直流激励与交流激励相结合,有效降低了测量误差。ERT 反演技术主要来源于电容层析成像(ECT)反演技术,哈尔滨理工大学学者^[12](2010)在两相流检测中采用基于 ECT 的 12 环形电极相邻激励方式,着重研究了采用加权奇异值分解截断共轭梯度反演技术;辽宁大学学者^[13](2012)同样基于 ECT 技术,研究了粒子滤波算法的应用前景,为电阻层析成像反演技术提供了有利参考。然而,目前虽然对 ERT 技术进行了广泛研究和应用,但将其应用到被测物内部进行温度检测,在国内外尚未见报道。

动力电池电解液是一种化学成分复杂的混合导体,温度对电解液的电特性影响较大。由于电池生产过程中成分、浓度等的差异会导致部分区域的电解液更易受温度影响发生异变,而电阻率恰能反映这种异变。本文针对电阻层析成像技术的特点,结合钢壳材料动力电池的内部结构特点,将电阻率与动力电池内部的温度相联系,采用在短测线上探测范围较深的温纳-施伦贝尔激励模型,提出了一种动力电池内局部温度检测的新方法,文中提供了丰富、直观的反演图像,对保障汽车动力电池实际安全使用有建设性作用。

2 基于温纳-施伦贝尔模型动力电池内部温度检测机理

2.1 基于温纳-施伦贝尔模型检测模式

鉴于锂离子动力电池内部具有多层结构的特殊性,因此选择合适的 ERT 检测模式是关键。温纳装置(如图 1 所示)适用于水平层状结构的检测,且抗干扰能力较强,是最常见的四级装置检测模式之一。图 1(a)中电极 A、M、N、B 等间距排列。其中:A、B 是供电电极,M、N 是测量电极,AM、MN、NB 为电极距,且有:AM=MN=NB。定义 AM 与 MN 之比 n 为电极间距因子,温纳装

置排列方式中,隔离系数 n 恒为 1。4 个电极之间的间距在初始间距 a 的基础上整数倍递增。温纳装置检测方式对浅部垂直方向的分辨率高,而对水平方向的电阻率变化不够敏感,且对检测对象深部的异常体分辨能力不足。

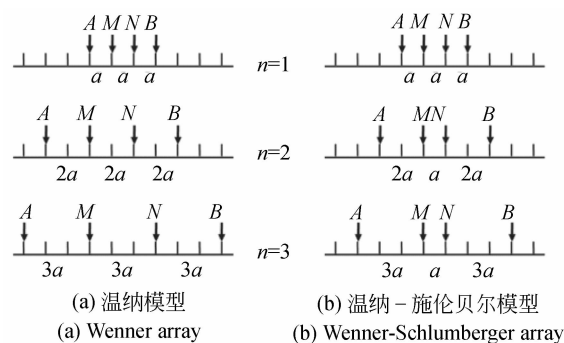


图 1 四级装置排列方式

Fig. 1 Arrangement of four-level device

在温纳装置的基础上基于非等间距排列的温纳-施伦贝尔装置检测模式则更为灵活,在水平和垂直方向上都有较高灵敏度,而且能够增加探测深度,从而更加适合监测动力电池的内部温度。温纳-施伦贝尔装置检测模式如图 1(b)所示,在电极走位过程中,需保持测量电极 M、N 的位置不变,而供电电极 A、B 等间隔向两边移动,即电极间距因子 n 依次取 1、2、3,当 $n=1$ 时,排列形式与温纳方式一致。A、B 电极每移动一次都测量一次 M、N 的电位。此外,为了增加探测深度,可以将温纳-施伦贝尔检测模式中的 M、N 电极间距扩大为 $2a$,即初始电极间距从 a 变成 $2a$,然后以相同的方式移动供电电极 A、B,完成测量工作。

通过控制温纳-施伦贝尔电极走位的顺序,可形成二维剖面,如图 2 所示。当电极间距因子 $n=1$ 时,A、M、N、B 4 个电极按照图中 station1 的方式排列,整体从左侧开始依次向右走位,获得第一层数据点;当 $n=2$ 时,同样从最左端开始,按照 station2 排列的方式向右走位,测得第二层数据;依次类推,改变 n 的取值,得到不同层数据。数据点的位置在直线 AB 的中垂线下方,而所在层数 i 与电极间距因子 n 并没有直接关系,层数即表示探测深度,探测深度的经验公式如下:

$$d = (1/6 \sim 1/4)AB, \quad (1)$$

其中:AB 又称为勘探线长度,当被测物体浅层电

阻率较小时,式(1)中的系数应取较小值,反之取较大值。设测线上共有 m 个电极,数据层数为 i ($i=1,2,3,\dots,N$),则对应于每一层的测量数据个数为 $m-i\times 2-1$;每层数据呈公差为 -2 的等差数列,数据总数为:

$$s = \sum_{i=1}^N (m - i \times 2 - 1). \quad (2)$$

每次测量可直接得到电压值,再通过下面的公式推导得出电池内部电解质的电阻率的分布情况,最后,电阻率反演成像来反映动力电池内部温度变化。

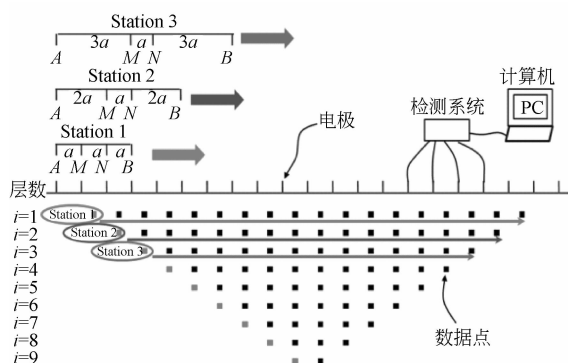


图 2 温纳-施伦贝尔二维探测剖面形成过程

Fig. 2 Formation of two-dimensional detecting cross section in Wenner-Schlumberger array

当 A, B 两点建立电场后,测量 M, N 两点的电位差。根据点电源场电位公式(3)和(4),可以得到 M, N 两点的电位:

$$U_M = (I\rho/2\pi) \cdot (1/AM - 1/BM), \quad (3)$$

$$U_N = (I\rho/2\pi) \cdot (1/AN - 1/BN), \quad (4)$$

式中: I 为供电电流强度; ρ 为电池真实电阻率; U_M 和 U_N 分别是 M, N 两点的电位; AM, BM, AN, BN 分别为电极间距。

由以上 2 式可以得到 M, N 两点间电位差值:

$$\Delta U_{MN} = (I\rho/2\pi) \cdot (1/AM - 1/AN - 1/BM + 1/BN). \quad (5)$$

ERT 中,电池的电阻率计算公式为:

$$\rho = K \cdot (\Delta U_{MN}/I), \quad (6)$$

其中:

$$K = 2\pi / (1/AM - 1/AN - 1/BM + 1/BN).$$

K 定义为动力电池电极装置系数,其与电极空间位置相关。由于在电极走位过程中, AM, BM, AN, BN 4 个电极间距是变化的,从而会得

到不同的 K 值,不同的 K 值反映电池不同层电场的强弱,一般 K 值随探测层深度的增大而增大,而 K 值越大,说明此层电场强度较弱。根据得到的不同层的 K 值和该层各点的电压数据即可得到不同层各点的电阻率。

2.2 视电阻率与实际电阻率的关系

电池内部结构复杂,电池电解质在不同位置浓度有所差异,由式(6)计算得到的电阻率是在电场作用范围内不同部位电阻率的综合影响的结果,称为视电阻率,用 ρ_s 表示:

$$\rho_s = K \cdot (\Delta U_{MN}/I). \quad (7)$$

进一步引入 MN 处电流密度 j_{MN} ,则有:

$$\Delta U_{MN} = E_{MN} \cdot MN = j_{MN} \cdot \rho_{MN} \cdot MN, \quad (8)$$

其中: E_{MN} 为 M, N 两点间的电场强度, ρ_{MN} 为 MN 所在介质的真电阻率。结合式(7),则有:

$$\rho_s = K \cdot (j_{MN} \cdot \rho_{MN} \cdot MN/I). \quad (9)$$

当 $MN \ll AB$ 时,可以认为其间的电场是均匀场,即电池内部电性均匀,电流密度分布均匀,此时,电流密度用 j_0 表示,此时介质视电阻率为真电阻率,用 ρ_0 来表示,那么:

$$\rho_0 = K \cdot (j_0 \cdot \rho_0 \cdot MN/I). \quad (10)$$

整理得:

$$1/j_0 = K \cdot (MN/I). \quad (11)$$

将式(11)代入式(9),可得

$$\rho_s = K(MN/I) \cdot j_{MN} \cdot \rho_{MN} = (j_{MN}/j_0) \cdot \rho_{MN}. \quad (12)$$

式(12)为视电阻率与真电阻率的关系式,表明动力电池内部某点的视电阻率和测量电极间所在介质的真电阻率成正比关系,其比例系数为 j_{MN}/j_0 。当 MN 间的空间内介质处于低阻态,正常电流线被电阻体吸引,使电池表面处的实际电流密度减小,即 $j_{MN} < j_0$,则 $\rho_s < \rho_{MN}$;相反,当 MN 间的空间内介质处于高阻态,正常电流线被电阻体排斥,使电池内壁表面处的实际电流密度增加,即 $j_{MN} > j_0$,此时 $\rho_s > \rho_{MN}$ 。因此,通过检测电池内介质视电阻率,并研究其变化,就可以对电池深层次的电阻率异常变化进行定位,对其分布情况进行描述。

2.3 基于视电阻率的动力电池内部异常区域温度监测

动力电池内部电解液物质构成复杂,放电过程必然导致某些部位产热不均,从而使电池内部温度分布略有不同,特别是异常区域的温度变化

情况复杂。然而,电阻率作为热敏感量,与温度存在一定线性关系:

$$\rho_0 = \rho_1 (1 + \alpha \cdot \Delta t), \quad (13)$$

其中: $\Delta t = t_1 - t_0$ 。 t_0 、 t_1 分别为放电过程中电池内部的初始温度和末端温度; ρ_0 、 ρ_1 分别为 t_0 、 t_1 温度下对应的电池内部电阻率; α 为电阻温度系数。目前,电池电解液的电阻温度系数并没有统一的界定值。通过分析比较,可在充放电过程中,选取电阻率单调均匀变化的若干样本数据,以电池表面温差 Δt_0 近似代替内部温差 Δt ,求得近似电阻温度系数 α_0 ,以此进一步确认内部异常区域温度。

3 实验平台

3.1 实验对象

本实验平台中采用的是电动汽车主要使用的动力电池类型之一,即钢壳锰酸铁锂单体动力电池,如图 3(a)所示。其容量为 10 AH;放电电流最大可达 40 A,内阻约为 10 m Ω 。尺寸规格为 130 mm \times 65 mm \times 16.5 mm,净重为 0.4 kg,放电截止电压为 2.7 V,最大充电电压为 4.2 V,图 3(b)中电池一侧已经装有电极片。

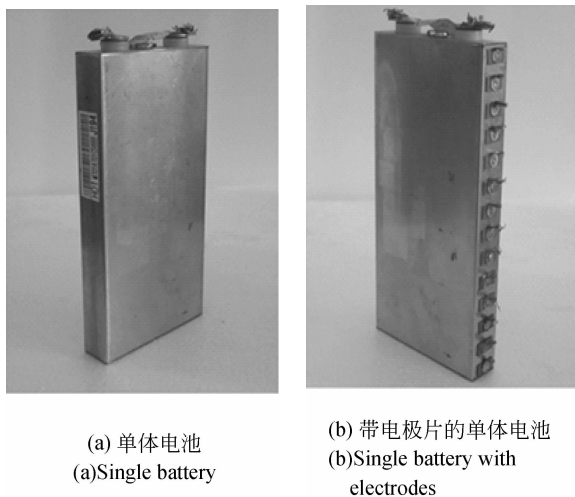


图 3 实验单体动力电池

Fig. 3 Single power batteries used in experiment

3.2 检测系统

ERT 检测系统主要由系统外围模块、下位机测控模块、上位机 PC 图像处理分析模块以及表面温度检测模块组成,如图 4 所示。其中,系统外

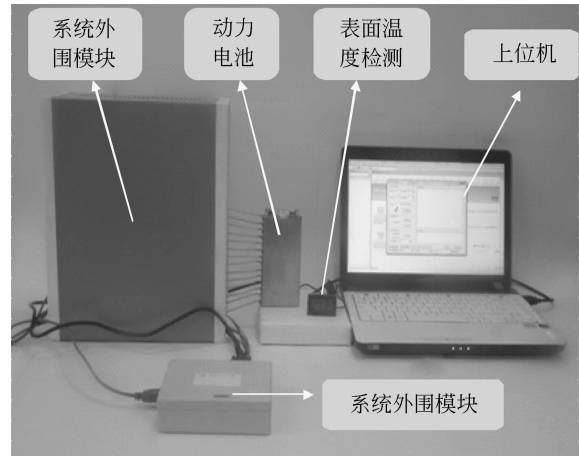


图 4 ERT 系统实验平台

Fig. 4 Experimental platform for ERT system

围模块是整个系统的关键所在,该模块划分为电压控制电流源子模块(VCCS)、信号处理子模块、电极端口子模块等。实验中,系统外围模块通过电缆与电池表面电极片连接(如图 5(a)),下位机发出控制命令,外围电路板各功能模块按照温施法的电极激励原理施加激励电流,在电池表面形成电场,同时将测量到的电极的电压数据传输至下位机处理,最后下位机与上位机进行串口通讯,上位机功能包括两个方面:一方面是电压数据经过 Matlab 处理后^[14]转换为电阻率数据;另一方面利用 Res2dinv 软件将电阻率数据进行图像反演重建。反演程序采用抑制平滑度最小平方法,如下:

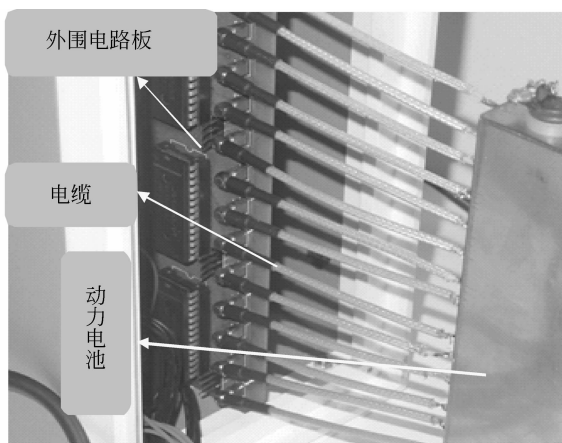
$$(\mathbf{J}'\mathbf{J} + \mu\mathbf{F})\mathbf{D} = \mathbf{J}'\mathbf{g}, \quad (14)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{f}_x\mathbf{f}_x' + \mathbf{f}_z\mathbf{f}_z'. \quad (15)$$

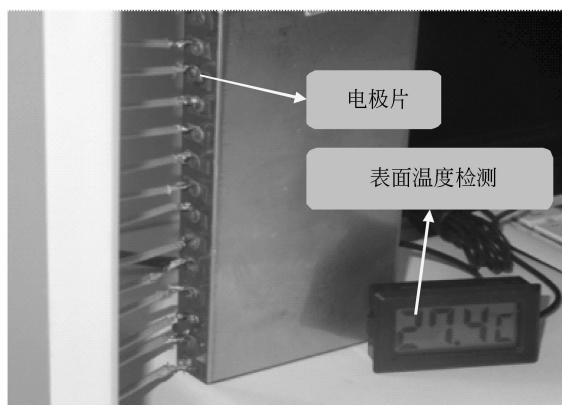
其中: \mathbf{F} 为滤波系数矩阵, \mathbf{f}_x 为水平平滑滤波系数矩阵; \mathbf{f}_z 为垂直平滑滤波系数矩阵; \mathbf{J} 为偏导数矩阵; \mathbf{f}_x' 、 \mathbf{f}_z' 和 \mathbf{J}' 分别为 \mathbf{f}_x 、 \mathbf{f}_z 和 \mathbf{J} 的转置矩阵; μ 为阻尼系数, \mathbf{D} 为扰动系数, \mathbf{g} 为差异矢量。程序反演中采用均方根误差 RMS 来度量视电阻率与测量电阻率值之间的差异。

为确保 ERT 系统的有效运行,电极材料的电导率要大于被测对象表面的电导率,实验选用电导率高于钢的紫铜作为电极材料。电极片规格

为 $10\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 0.2\text{ mm}$, 可以精确测量电场的变化情况, 如图 5(b) 所示。铜极片阵列在电芯一侧依次排列, 并通过传输电缆连接至外围检测端口。鉴于单体电池体积较小, 实验采用 0.5 mA 的电流作为激励源, 以在电池内部形成稳定电场。表面温度检测模块采用的是热电偶传感器, 其测量精度为 $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$, 由于传感器探头较长, 将其黏附在电池表面, 就能够覆盖 ERT 大部分的探测区域。实验中选择电池的高为边, 将其作为实验测线来布置电极片。测线长(最远端两侧电极中心距) $d_1 = 110\text{ mm}$, 相邻电极的初始中心距 $r = 9\text{ mm}$, 共有 14 个电极片。温纳-施伦贝尔模型的理论最大测量深度大致为 $d/6 \sim d/4$, 实验最大探测深度在 25 mm 左右。



(a) 电缆连接细节图
(a) Cable connections in detail



(b) 表面温度检测
(b) Detection of surface temperature

图 5 系统细节图

Fig. 5 Details of ERT system

4 实验结果与讨论

4.1 动力电池内部电阻率静态分布分析

电池内部某些易受温度影响的区域, 其视电阻率可能存在变化不稳定的情况, 称之为“异变区”。为了尽可能捕捉动力电池内部由于温度过高而出现的异常现象, 并进一步确定“异变区”, 首先需要在恒温条件下, 了解电池剖面电阻率的基本分布情况。本实验将本文方法与交互垂直剖面电阻率的分布情况进行对比分析。实验中, 先在电池一侧布置电极进行实验, 由于电极与电缆固定, 在另一侧进行对比实验时, 直接移动电极片的放置位置即可, 如图 6 所示。图 6 中分别用宽侧面和窄侧面表示 2 个测量剖面, 2 个测量剖面垂直相交, 形成相交区域, 表现在图 6 中则是宽侧面与窄侧面垂直相交形成的相交线或相交面。相交区域具有相似的电阻率分布, 在反演图像上 2 个测量面的电阻率非常相似, 通过比对两垂直面在相交面上的数据或图像反演结果, 这一结论可以得到有效验证。

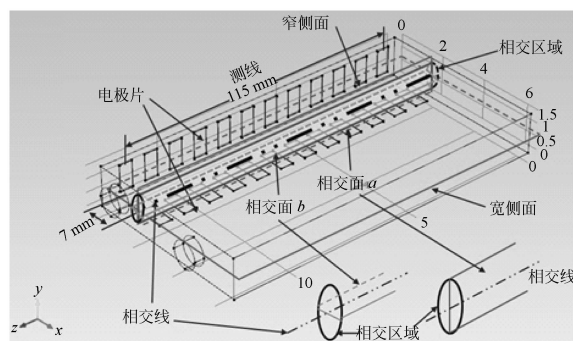


图 6 相交区域实验模型

Fig. 6 Experimental model of intersection region

由于测线长度较短, 实际可以使用的电极片数量有限, 导致电池的探测深度受到限制, 所以相交区域的位置比较靠前。由于反演图像呈倒梯形分布, 宽侧面的实际探测深度(X 轴方向)最大只有 40 mm 左右, 为了得到较宽的反演界面, 实验中, 将窄侧面的中心置于 $X = 7\text{ mm}$ 处, 从而可以

确定其与宽侧面垂直相交区域的空间范围。在理论误差范围内,可用一个相交面近似代替相交区域,图 6 给出了 2 个相互垂直的相交面 a 、 b 。

实验中,室温环境为 $20.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,电池电压为 4.17 V ,通过 2 次实验获得了电池温度为 $21.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,宽侧面和窄侧面在相交区域内的图像反演结果。反演中利用优化后的最小二乘迭代算法,经过三次迭代演算得到反演图像,如图 7 所示。图 7 中,横轴反映了电池表面测线的概貌,纵轴显示出反演图像的实际探测深度,均方根误差 RMS 控制在 $1.25\%\sim 1.35\%$ 。反演结果显示,在不同色带代表的电阻率值相近的条件下,不同深度部

位的色带分布规律一致,即在有限的误差范围内,不同侧面探测的电池内部电阻率的分布情况基本相同,中心紫色带电阻率临界值在 $0.201\sim 0.206\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ 左右,电阻率由里向外逐渐减小,直至深蓝色带最小,为 $0.155\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ (彩图见期刊电子版)。实验结果表明,相交面 a 和相交面 b 的反演图像结果相似,即在理论误差范围内,两垂直剖面在相交区域的电阻率分布一致,这一方面验证了在电阻层析成像中采用温纳-施伦贝尔方法对动力电池内部温度检测的可靠性,另一方面还掌握了电阻率初始分布模型,为将来对于动态温度下内部电阻率分布变化的研究奠定了基础。

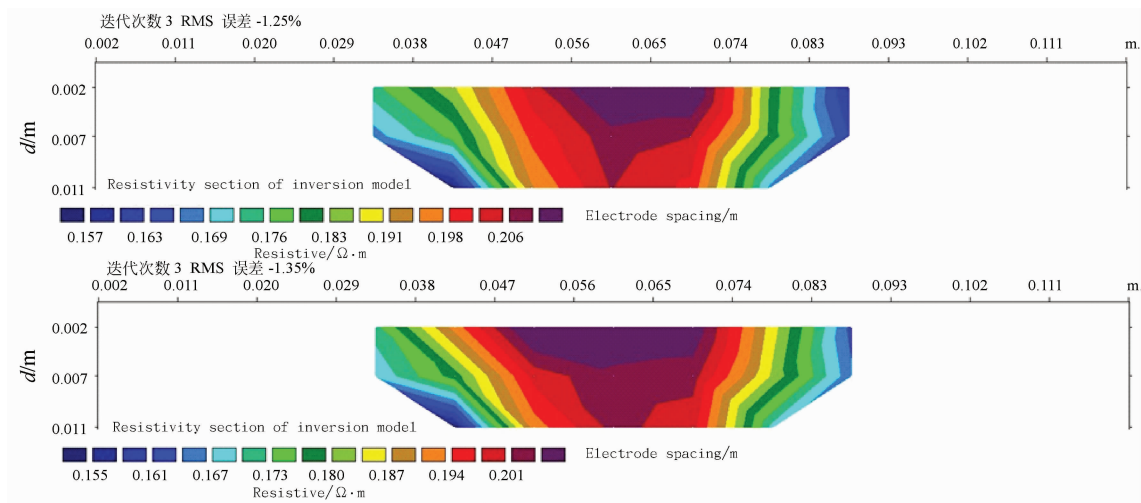


图 7 窄侧面(上)与宽侧面(下)正交带反演图像

Fig. 7 Inversion images of the perpendicular band between board side (up) and narrow side (below)

4.2 动力电池内部电阻率动态分布分析

由上面的分析可知,在恒温条件下,两垂直剖面的相交区域电阻率分布表现出相似性。在此基础上,本实验研究了动力电池温度变化对动力电池工作过程中内部电阻率分布的影响,并以此作为寻找“异变区”的媒介。在理论误差范围内,仍以相交面近似替代相交区域,由于窄侧面的被探测深度足够,噪音小,可以得到精确的结果,所以本实验主要对相交面 a 进行了分析。在相同实验环境下,实验过程中将电池表面温度为 $21.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为初始温度时刻,温度每升高 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$,测量一次视电阻率,在电池充分放电后,采集的表面温度($45.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)

作为最后一组数据,共获得了 9 组数据。由于篇幅有限,图 8 只给出了 5 组温度时刻的相交面 a 反演图像,分别是 21.5 、 27.5 、 33.5 、 39.5 、 $45.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

通过 5 组反演图像,可以判断出电池内部视电阻率随表面温度的变化情况。仔细观察图 8 可以发现,周围色带随表面温度的升高向内扩张,而中间部分色带向上逐渐萎缩,即这些区域的视电阻率随温度的升高而降低。变化比较明显的紫色带随表面温度升高时面积骤减(彩图见期刊电子版)。需要强调的是,前 4 组变化均衡,RMS 误差小,控制在 1.5% 以内,色带最大的跨度值也在 $0.05\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ 以下,而在反演温度为 $45.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,反演

软件警告提示表面视电阻率误差较大,迭代 3 次的 RMS 误差就达到了 4.2%,这要明显高于前 4 组的温度反演情况,色带之间的最大视电阻率的跨度值更达到了 $0.125 \Omega \cdot m$,这说明该温度时刻,电池内部电解液处于非常不稳定的状态,而且此时电量已经较低,若继续强制放电,会造成较大的安全隐患。

整体趋势上,温度变化对电池内部的电阻率

分布有较大影响。温度升高时,电阻率会下降。极个别区域色带变化忽高忽低,表现出不稳定性,即存在“异变区”。仔细观察容易发现,图 8 中坐标为(0.078,0.01)的小圆圈区域就是一个“异变区”样本,在 $27.5 \sim 39.5^\circ C$,其电阻率持续下降,而在 $45.5^\circ C$ 时,其电阻率反而急剧上升。以该区域作为数据分析样本,将获得更多有用信息。

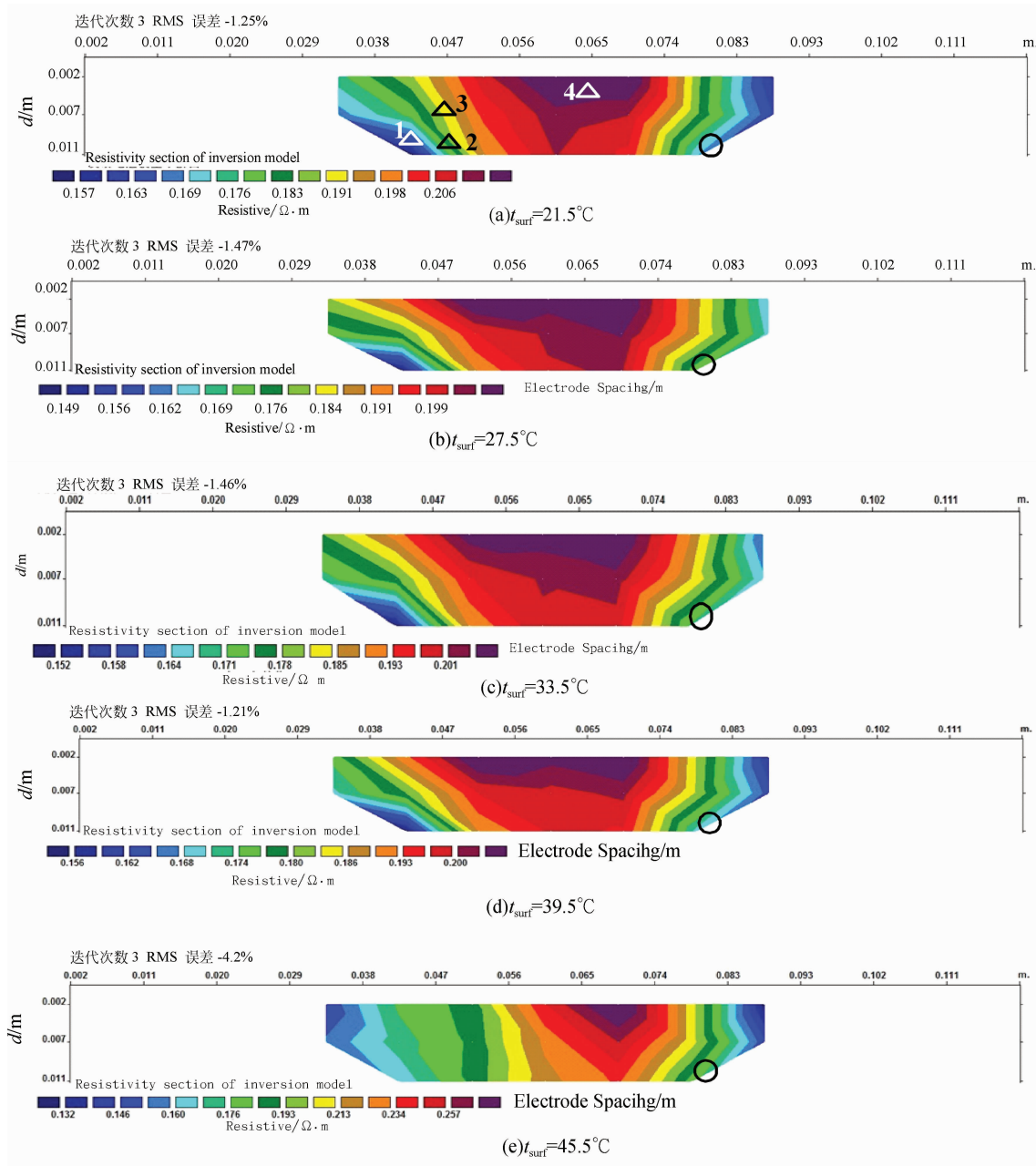


图 8 不同表面温度下相交面 a 反演图像

Fig. 8 Inversion images of intersection surface a under different temperatures

4.3 异变区临界温度动态追踪

如果动力电池工作过程中温度持续上升,会导致电池内部电阻率显著下降,其中,少数“异变区”的不稳定变化将对电池的使用安全产生影响。实际中,分析温度对“异变区”电阻率的影响规律,并掌握引起“异变区”产生急剧突变的临界温度值,将有助于使用者合理把握电池工作温度,提高电池寿命,降低使用风险。本实验室针对图 8 中坐标(0.078,0.01)处的“异常区”,进一步分析了其影响规律,并获取了临界温度值。

图 8(a)中三角形圈出了 4 组具有不同色带电阻率数据的区域,其电阻率随表面温度变化单调减小,可视为正常区域,在图 9 中进一步证明了它们的电阻率与表面温度的关系。易知表面温差 $\Delta t_0 = 24\text{ }^\circ\text{C}$,易求取各组电阻温度系数,求算术平均得到近似电阻温度系数 α_0 约为 $-0.0005 \times 10^{-6}\text{ m}/^\circ\text{C}$ 。

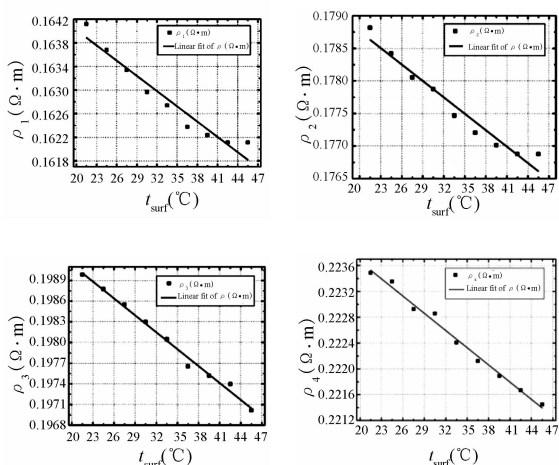


图 9 正常样本数据点电阻率与表面温度关系

Fig. 9 Relationship between resistivity of normal sample data points and surface temperature

相同实验条件下,通过另外 2 组独立重复试验,获取不同表面温度条件下,以坐标(0.078,0.01)区域为参考点的电阻率数据,图 10 给出了电阻率与表面温度的曲线关系,曲线 A、B、C 分别代表第一、二、三次重复试验。通过对曲线走势的分析,动力电池在放电初期,异常区域电解液的活跃性会导致电阻率暂时升高,一般上升至 $0.1742\text{ }\Omega \cdot \text{m}$ 左右,而在其后的时间中,视电阻

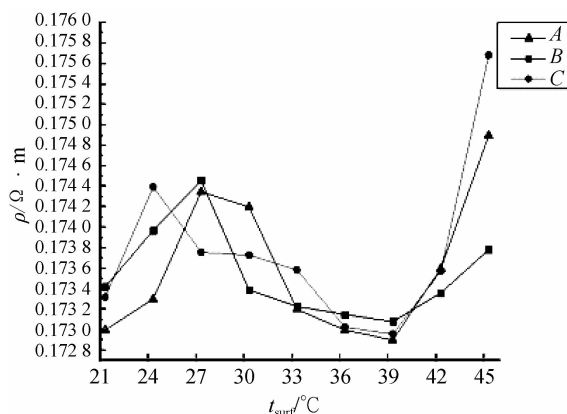


图 10 3 次实验中异常数据点视电阻率与表面温度关系
Fig. 10 Apparent resistivity of abnormal data points varies with surface temperature in three experiments

率随表面温度升高而正常减小,当电池放电一段时间后,由于电量损耗,表面温度升至 $39\text{ }^\circ\text{C}$ 左右时视电阻率降为 $0.173\text{ }\Omega \cdot \text{m}$,此后电阻率反弹急速上升,表现为电阻率的不可逆性。

图 10 中 $27\sim 39\text{ }^\circ\text{C}$ 为异常区正常下降段,以 A 曲线为例,根据式(13)可知, t_0 近似为 $27\text{ }^\circ\text{C}$, α_0 已求出,则 ρ_0, ρ_1 分别为 $0.17435, 0.17296\text{ }\Omega \cdot \text{m}$,可计算出电阻率异变反弹时的实际临界温度 $t_1 = 42.9\text{ }^\circ\text{C}$ 。同理,可分别求出第二、三次实验中的实际临界温度分别为 $42.8, 41\text{ }^\circ\text{C}$ 。可见,电池的使用次数增加,异变区临界温度会逐渐减小,即异变越易产生。所以,实验动力电池的内部温度在 $43\text{ }^\circ\text{C}$ 时即开始处于警界状态,这时用户需要对电池的工作状态进行一些适当的调整,以保证动力电池的安全性。综上所述,“异变区”电阻率受温度影响虽然性能不稳定,但有规律可循,该类动力电池内部临界温度值 $43\text{ }^\circ\text{C}$ 就能作为预警值。

5 结 论

本文将温纳-施伦贝尔装置模型引入到动力电池温度检测领域,提出了一种基于电阻层析成像的动力电池内部温度监测新方法。将电阻层析成像的温纳-施伦贝尔装置模型应用在测线短、深度相对较深的动力电池上,在水平和垂直方向上都有较高灵敏度;鉴于抑制平滑度最小二乘法比传统最小平方方法快 10 倍多,且 RMS 误差均小于 5%,能在有效保证反演精度的同时控制 RMS 误差,从

而保证方法的动态实时性和准确性;实验证明该方法对动力电池深部的异常区域分辨率高,能较快获取异常位置信息。探索电阻层析成像模式为

新能源汽车动力电池内部温度场研究提供了新视野,该方法对动力电池的安全特性、寿命预测、负载控制等方面提供了一种新的研究途径。

参考文献:

- [1] KHARE N, GOVIL R. Modeling automotive battery diagnostics [J]. *Power Electronics Technology*, 2008, 34(3): 36-41.
- [2] SONG Y H, YANG Y X, HU Z CH. Present status and development trend of batteries for electric vehicles [J]. *Dianwang Jishu/Power System Technology*, 2011, 35(4): 1-7.
- [3] 黄海江. 锂离子电池安全性研究及影响因素分析 [D]. 上海:中国科学院研究生院, 2005.
HUANG H J. Study on safety of lithium-ion battery [J]. *Shang Hai: Graduate University of Chinese Academy of Sciences*, 2005. (in Chinese)
- [4] CHEN Y F, EVANS W, SCHARRER G. Calculation of temperature rise in lithium polymer batteries of Sandia conceptual designs during USABC Dynamic Stress Test [J]. *Journal of Power Sources*, 1998, 70(2): 240-246.
- [5] HANDE A. Internal battery temperature estimation using series battery resistance measurements during cold temperatures [J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 158(2): 1039-1046.
- [6] 李司光, 张承宁, 夏孝敏. 基于 DS18B20 的电动车辆动力电池组温控系统 [J]. *电气应用*, 2008, 27(24): 54-56.
LI S G, ZHANG CH N, XIA, X M. Temperature control system of electric vehicle battery pack based on DS18B20 [J]. *Electric Detection*, 2008, 27(24): 54-56. (in Chinese)
- [7] 杨亚联, 张昕, 何培祥, 等. 混合动力汽车镍氢动力电池温度场测试系统 [J]. *四川兵工学报*, 2008, 29(4): 112-114.
YANG Y L, ZHANG X, HE P X, *et al.*. Test system of temperature field for Ni-MH power battery in hybrid vehicle [J]. *Sichuan Ordnance Journal*, 2008, 29(4): 112-114. (in Chinese)
- [8] 王永秋, 王庆国. 电动客车动力电池温度测量电路及仿真 [J]. *客车技术与研究*, 2010, 4: 37-38.
WANG Y Q, WANG Q G. Measurement circuit and simulation of battery temperature for electric passenger car [J]. *Bus Technology and Research*, 2010, 4: 37-38. (in Chinese)
- [9] KARHUNEN K, SEPPÄNEN A, LEHIKAINEN A, *et al.*. Electrical resistance tomography imaging of concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2010, 40(1): 137-145.
- [10] RODGERS T L, SIPERSTEIN F R, MANN R, *et al.*. Comparison of a networks-of-zones fluid mixing model for a baffled stirred vessel with three-dimensional electrical resistance tomography [J]. *Measurement Science and Technology*, 2011, 22(10): 1-12.
- [11] 朱勇, 王振翀. 基于快速傅里叶变换直流分量的土壤电阻率测量 [J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(1): 115-123.
ZHU Y, WANG ZH CH. Measurement of soil resistivity based on FFT DC component [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1): 115-123. (in Chinese)
- [12] 陈宇, 高宝庆, 张立新, 等. 基于加权奇异值分解截断共轭梯度的电容层析图像重建 [J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(3): 701-707.
CHEN Y, GAO B Q, ZHANG L X, *et al.*. Image reconstruction based on weighted SVD truncation conjugate gradient algorithm for electrical capacitance tomography [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3): 701-707. (in Chinese)
- [13] 吴新杰, 黄国兴, 王静文. 粒子滤波算法在 ECT 图像重建中的应用 [J]. *光学 精密工程*, 2012, 20(8): 1824-1830.
WU X J, HUANG G X, WANG J W. Application of particle filtering algorithm to image reconstruction of ECT [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8): 1824-1830. (in Chinese)
- [14] 洪晓斌, 刘桂雄. 面向 IP 模式测控系统 PLSR-

SBR 双层压缩方法[J]. 光学精密工程, 2010, 18(10): 2280-2287.

HONG X B, LIU G X. Double layer compression

method based on PLSR-SBR for IP mode measurement & control system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2280-2287. (in Chinese)

作者简介:



洪晓斌(1979—),男,广东揭阳人,副研究员,硕士生导师,2002年于武汉理工大学获得学士学位,2007年于华南理工大学获得博士学位,研究方向为网络化测量技术及仪器、无损检测技术。
E-mail: mexbhong@scut.edu.cn

通信作者:



刘桂雄(1968—),男,广东揭阳人,教授,博士生导师,1990年,1995年于重庆大学分别获得学士、博士学位,主要从事新型智能传感技术、网络化测控技术、制造过程质量检测、建模及控制等方面的研究。E-mail: megxliu@scut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)