(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 101641607 B
(45)授权公告日 2012.10.10

(21)申请号 200880009620.4

(22)申请日 2008.03.07

(30)优先权数据
077598/2007 2007.03.23 JP

(85)PCT申请进入国家阶段日
2009.09.23

(86)PCT申请的申请数据
PCT/JP2008/054693 2008.03.07

(87)PCT申请的公布数据
WO2008/126631 JA 2008.10.23

(73)专利权人 丰田自动车株式会社
地址 日本爱知县

(72)发明人 西勇二 竹本毅 芳贺伸烈
渊本哲矢

(74)专利代理机构 北京东方亿思知识产权代理有限责任公司 11258
代理人 柳春雷 南霆

(51)Int.Cl.
G01R 31/36(2006.01)

(56)对比文件
JP 11-204149 A,1999.07.30, 全文.
CN 1314012 A,2001.09.19, 全文.

审查员 王晓萍

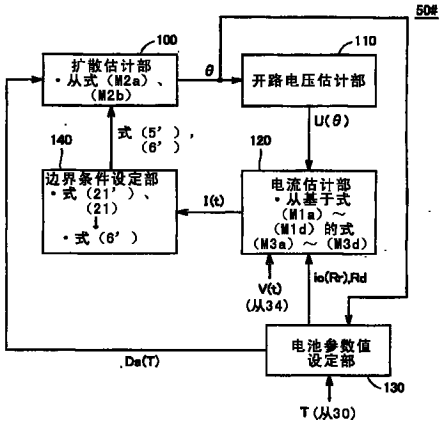
权利要求书 3 页 说明书 23 页 附图 12 页

(54)发明名称

二次电池的状态估计装置

(57)摘要

扩散估计部(100)按照通过极坐标表示的活性物质内的扩散方程式来估计活性物质内部的锂浓度分布。开路电压估计部(110)根据基于由扩散估计部(100)估计出的活性物质界面处的锂浓度的局部SOC(θ)来求出开路电压(U(θ))。电流估计部(120)使用由电压传感器测出的电池电压(V(t))、估计出的开路电压(U(θ))以及由电池参数值设定部(130)设定的电池参数,并通过将电化学反应式简化了的电压-电流关系模型表达式来估计电池电流密度(I(t))。边界条件设定部(140)基于估计出的电池电流密度(I(t))来逐次设定扩散估计部(100)的扩散方程式的活性物质界面处的边界条件。



CN 101641607 B

1. 一种二次电池的状态估计装置，其中，

所述二次电池包括：

包含活性物质的第一电极和第二电极，其中在所述活性物质的内部包含有助于电化学反应的反应物质；以及

用于在所述第一电极和所述第二电极之间传导离子化的所述反应物质的离子导体，

所述二次电池的状态估计装置包括：

电压检测器，所述电压检测器检测所述第一电极和所述第二电极之间的电池电压；

扩散估计部，所述扩散估计部按照活性物质扩散模型表达式来估计所述反应物质的浓度分布，所述活性物质扩散模型表达式基于给定的边界条件来规定所述活性物质的内部中的所述反应物质的浓度分布；

开路电压估计部，所述开路电压估计部基于由所述扩散估计部估计出的、所述活性物质的与电解液的界面处的所述反应物质的浓度，来估计所述第一电极和所述第二电极之间的开路电压；以及

电流估计部，所述电流估计部按照基于电化学反应的电压电流关系模型表达式来估计所述二次电池的电池电流密度，所述电压电流关系模型表达式表示所述开路电压、根据所述二次电池的电池电流密度而计算出的过电压、根据所述电池电流密度而产生的电压降、以及所述电池电压之间的关系，

所述电流估计部通过将由所述电压检测器检测出的所述电池电压、由所述开路电压估计部估计出的所述开路电压、以及所述二次电池的参数值代入所述电压电流关系模型表达式中来计算所述电池电流密度，

所述二次电池的状态估计装置还包括边界条件设定部，所述边界条件设定部基于由所述电流估计部估计出的所述电池电流密度来计算所述界面处的反应电流密度，并根据计算出的反应电流密度来设定所述活性物质扩散模型表达式的所述界面处的所述边界条件。

2. 如权利要求 1 所述的二次电池的状态估计装置，其中，还包括：

温度检测器，所述温度检测器检测所述二次电池的电池温度；以及

参数值设定部，所述参数值设定部用于至少根据所述电池温度来可变地设定所述参数值，

所述参数值设定部还至少根据所述电池温度来可变地设定所述活性物质扩散模型表达式中的表示扩散速度的参数值。

3. 如权利要求 2 所述的二次电池的状态估计装置，其中，

所述电压电流关系模型表达式由线性近似表达式构成，所述线性近似表达式表示从所述开路电压中减去所述电池电流密度与作为所述参数值的电极每单位面积上的电阻的乘积而得的电压等于所述电池电压的关系，

所述参数值设定部根据由所述扩散估计部估计出的所述界面处的所述反应物质的浓度以及由所述温度检测器检测出的所述电池温度来可变地设定所述电阻。

4. 如权利要求 1 所述的二次电池的状态估计装置，其中，

还包括电流运算部，所述电流运算部将总的所述电池电流密度分离为有助于电化学反应的第一电流密度、和由在所述二次电池内部所产生的双电荷层电容成分产生的第二电流密度，

所述边界条件设定部基于由所述电流运算部计算出的所述第一电流密度来计算所述界面处的反应电流密度，

在所述电压电流关系模型表达式中，基于所述第一电流密度来计算所述过电压。

5. 如权利要求 4 所述的二次电池的状态估计装置，其中，

还包括：

温度检测器，所述温度检测器检测所述二次电池的电池温度；以及

参数值设定部，所述参数值设定部用于至少根据所述电池温度来可变地设定所述参数值，

所述电压电流关系模型表达式包括：

线性近似表达式，所述线性近似表达式表示所述第一电流密度与作为所述参数值的电极每单位面积上的第一电阻的乘积等于所述电池电压的关系；和

表示作为所述参数值的、流过电极每单位面积上的电容的所述第二电流密度是与所述电池电压随时间的变化量成比例的值的表达式，

所述参数值设定部根据由所述扩散估计部估计出的所述界面处的所述反应物质的浓度以及由所述温度检测器检测出的所述电池温度来可变地设定所述第一电阻，并且根据所述电池温度来可变地设定所述电极每单位面积上的电容量。

6. 如权利要求 1 所述的二次电池的状态估计装置，其中，

所述扩散估计部针对所述第一电极和所述第二电极的每一个而具有通过极坐标表示的所述活性物质扩散模型表达式。

7. 如权利要求 1 所述的二次电池的状态估计装置，其中，

所述扩散估计部具有被所述第一电极和所述第二电极共用的通过极坐标表示的所述活性物质扩散模型表达式。

8. 如权利要求 1 所述的二次电池的状态估计装置，其中，

所述电压电流关系模型表达式基于电压方程式以及电化学反应式而被导出，所述电压方程式表示所述活性物质和所述电解液的平均电位、随着所述界面处的所述电化学反应而产生的过电压的平均值、以及所述开路电压之间的关系，所述电化学反应式表示所述电池电流密度和所述过电压的平均值之间的关系。

9. 如权利要求 8 所述的二次电池的状态估计装置，其中，

在所述第一电极和所述第二电极的每一个中，通过假定电极中的电化学反应不具有位置依赖性而相同来将所述电极中的所述活性物质和所述电解液的电位分布简化为二次函数，并在此基础上求出所述活性物质和所述电解液的所述平均电位，由此导出所述电压电流关系模型表达式。

10. 如权利要求 1 至 9 中任一项所述的二次电池的状态估计装置，其中，还包括：

平均浓度计算部，所述平均浓度计算部基于由所述扩散估计部估计出的所述反应物质的浓度分布来计算所述活性物质内的所述反应物质的平均浓度；以及

第一充电率估计部，所述第一充电率估计部按照预先求出的所述平均浓度和所述二次电池的充电率的对应关系并基于由所述平均浓度计算部计算出的所述平均浓度来估计所述充电率。

11. 如权利要求 10 所述的二次电池的状态估计装置，其中，

还包括：

电流检测器，所述电流检测器检测所述二次电池的电池电流；

第二充电率估计部，所述第二充电率估计部基于所述电池电流的累计来估计所述二次电池的充电率变化量；以及

第三充电率估计部，所述第三充电率估计部基于所述第一充电率估计部和所述第二充电率估计部的估计结果来逐次更新所述二次电池的充电率估计值，

所述第三充电率估计部通过在所述充电率估计值的前次值上反映由所述第二充电率估计部估计出的相对于所述前次值的所述充电率变化量、以及由所述第一充电率估计部估计出的当前充电率与所述前次值之间的充电率误差，来计算所述充电率估计值的当前值，

使用比所述充电率误差的反映相对小的时间常数来反映所述充电率变化量。

12. 如权利要求 10 所述的二次电池的状态估计装置，其中，

还包括：

电流检测器，所述电流检测器检测所述二次电池的电池电流；

第二充电率估计部，所述第二充电率估计部基于所述电池电流的累积来估计所述二次电池的充电率变化量；以及

第三充电率估计部，所述第三充电率估计部基于由所述第一充电率估计部和所述第二充电率估计部估计出的估计结果来逐次更新所述二次电池的充电率估计值，

所述第三充电率估计部通过在所述充电率估计值的前次值上反映由第二充电率估计部估计出的相对于所述前次值的所述充电率变化量、以及由所述第一充电率估计部估计出的当前充电率与所述前次值之间的充电率误差，来计算所述充电率估计值的当前值，

所述第三充电率估计部在所述电池电流的绝对值大于预定值时或者在所述二次电池的电池温度低于预定温度时，中止所述充电率误差的反映并计算所述充电率估计值的当前值。

13. 如权利要求 11 或 12 所述的二次电池的状态估计装置，其中，

还包括偏移估计部，所述偏移估计部基于由所述电流估计部估计出的所述电池电流密度来计算所述电池电流的估计值，并且基于所述电池电流的估计值与由所述电流检测器检测出的检测值的误差来估计所述电流检测器的偏移误差，

所述第二充电率估计部使用由所述偏移估计部估计出的所述偏移误差来修正由所述电流检测器检测出的所述电池电流的检测值，并且基于修正后的所述检测值的累计来估计所述二次电池的充电率的变化量。

14. 如权利要求 1 至 9 中任一项所述的二次电池的状态估计装置，其中，还包括：

电流检测器，所述电流检测器检测所述二次电池的电池电流；

偏移估计部，所述偏移估计部基于由所述电流估计部估计出的所述电池电流密度来计算所述电池电流的估计值，并且基于所述电池电流的估计值与由所述电流检测器检测出的检测值的误差来估计所述电流检测器的偏移误差；以及

充电率估计部，所述充电率估计部使用由所述偏移估计部估计出的所述偏移误差来修正由所述电流检测器检测出的所述电池电流的检测值，并且基于修正后的所述检测值的累计来估计所述二次电池的充电率的变化量。

二次电池的状态估计装置

技术领域

[0001] 本发明涉及二次电池的状态估计装置，特别是涉及依照基于电化学反应可估计二次电池的内部状态的电池模型的二次电池的状态估计装置。

背景技术

[0002] 被构成为通过可充电的二次电池向负荷提供电源并根据需要在该负荷的运行当中也能够对该二次电池进行充电的电源系统正被使用。作为代表性例子，将通过二次电池驱动的电动机用作驱动力源的混合动力汽车或电动汽车安装了这样的电源系统。在这些电源系统中，除了二次电池的储存电能被用作作为驱动力源的电动机的驱动电力之外，该二次电池还通过由该电动机再生发电时的发电电力或随着发动机的旋转而发电的发电机的发电电力而充电。在这样的电源系统中，要求二次电池的状态估计装置正确地求出代表性的相对于充满状态的充电率（SOC：State of Charge，荷电状态）。

[0003] 特别是在混合汽车中，为了使二次电池可接收再生电力、并且只要有要求就能够立刻向电动机供应电力，需要将该二次电池的充电率控制在充满状态（100％）和完全未充电状态（0％）的大致中间附近（50％～60％）。

[0004] 另外，如果二次电池进行过放电或过充电，则有可能导致电池性能劣化，寿命变短。因此，在如上述那样以中间的 SOC 作为控制目标而重复执行充放电的二次电池的使用方式中，从进行逐次把握二次电池的充电量以限制过度的充放电的充放电控制的观点来说，也很有必要正确地进行二次电池的状态估计。

[0005] 关于作为二次电池的状态估计而具代表性的充电率估计，例如如专利文献 1（日本专利文献特开 2005-37230 号公报）所公开的那样，采用了基 于电池电流的累积值来估计 SOC 的变化的方法。特别是在专利文献 1 中，与通过电流传感器进行的电池电流的测量并行地执行估计充放电电流的运算，并一方面通过计算电池电流来求出实测 SOC，另一方面通过累积估计充放电电流来求出估计 SOC。并且，累积作为估计 SOC 和实测 SOC 之差的 SOC 差的经时变化来求出累计 SOC 值，并在该累计 SOC 值与初始值比较大于等于预定值时检测出电池的劣化。

[0006] 但是，在专利文献 1 中，估计充放电电流是按照基于内部电阻、电池电压以及电池输入之间的欧姆法则的关系式而求出的。因此，难以基于电化学反应来正确地估计电池的内部状态。

[0007] 另外，在专利文献 2（日本专利文献特开 2004-178848 号公报）中，公开了二次电池的充电率估计装置的结构：使用适用的数字滤波器根据二次电池的电流以及端子电压的测量值来估计开路电压（OCV），并基于预先求出的开路电压与充电率的关系来估计充电率。

[0008] 但是，在上述二次电池的充电率估计装置中，由于使用低通滤波器作为二次电池的内部等效电路模型，因此难以正确地估计由有助于电化学反应的反应参与物质的扩散引起的二次电池的内部举动。

[0009] 因此，在非专利文献 1（W.B.Gu and C.Y.Wang，THERMAL-ELECTROCHEMICAL COUPLED

MODELING OF A LITHIUM-ION CELL,ECS Proceedings Vol.99-25(1),2000,ECS,p748-762)中,对使用了锂电池内部的电化学反应式的电池模型进行了研究,并汇报了通过与实际电池进行比较能够精度高地表现出特性。特别是在对比文件 1 中指出了以下情况 :二次电池的开路电压依赖于电极的电解液界面(活性物质表面)上的局部 SOC,从而缓和时的电池电压受到依赖于活性物质内锂浓度分布的锂扩散的支配。特别是公开了以下内容 :活性物质内的反应参与物质(锂)的扩散受到将活性物质作为球来处理的球坐标的扩散方程式的支配,并且扩散过程中的物质扩散速度受扩散系数的支配。

[0010] 如上所述,在专利文献 1 和 2 所示的二次电池的状态估计中,由于通过将二次电池的电池电压和电池电流作为输入输出的宏观等效模型来估计二次电池的内部状态,因此难以基于伴有反应参与物质的扩散的二次电池 的内部状态来进行高精度的估计。

[0011] 另一方面,如非专利文献 1 公开的那样,当基于电池内部的电化学反应使用扩散方程式来表现反应参与物质的扩散、并且认定电池的开路电压依赖于依赖与电极 - 电解液界面(活性物质表面)的局部 SOC 时,虽然电池模型是非线性的,但能够以更高精度估计电池状态。但是,当按照非专利文献 1 所公开的模型进行解析时,运算量非常大,因此难以实现例如安装在实际设备上并在使用二次电池时在联机状态下进行状态估计。

发明内容

[0012] 本发明是为解决上述问题而作出的,其目的在于,提供一种二次电池的状态估计装置,该二次电池的状态估计装置使用了能够基于电化学反应来估计二次电池的内部状态并减少了计算量的电池模型,适于安装在实际设备上。

[0013] 根据本发明的二次电池的状态估计装置是一种二次电池的状态估计装置,其中二次电池包括 :包含活性物质的第一电极和第二电极,其中在所述活性物质的内部包含有助于电化学反应的反应物质 ;以及用于在第一电极和第二电极之间传导离子化的反应物质的离子导体,所述二次电池的状态估计装置包括电压检测器、扩散估计部、开路电压估计部、电流估计部、以及边界条件设定部。电压检测器检测第一电极和第二电极之间的电池电压。扩散估计部按照活性物质扩散模型表达式来估计反应物质的浓度分布,所述活性物质扩散模型表达式基于给定的边界条件来规定在性物质的内部中的反应物质的浓度分布。开路电压估计部基于由扩散估计部估计出的、活性物质的与电解液的界面处的反应物质的浓度,来估计第一电极和第二电极间的开路电压。电流估计部按照基于电化学反应的电压电流关系模型表达式来估计二次电池的电池电流密度。该电压电流关系模型表达式表示开路电压、根据二次电池的电池电流密度而计算出的过电压、根据电池电流密度而产生的电压降、以及电池电压之间的关系。特别是电流估计部通过将由电压检测器检测出的电池电压、由开路电压估计部估计出的开路电压、以及二次电池的参数值代入电压电流关系模型表达式中来计算电池电流密度。边界条件设定部基于由电流估计部估计出的电池电流密度计算界面处的反应电流密度,并根据计算出的反应电流密度来设定活性物质扩散模型表达式的界面处的边界条件。

[0014] 根据上述二次电池的状态估计装置,通过按照活性物质扩散模型来估计活性物质内的反应物质(代表性的是锂电池中的锂)的扩散,并利用经简化的电压电流关系模型表达式和活性物质扩散模型表达式的组合,能够估计反应物质的浓度分布,所述电压电流关

系模型表达式使用基于估计出的活性物质的与电解液的界面处的反应物质浓度而估计的开路电压 (OCV)、测出的电池电压、以及预先求得的二次电池的参数值来估计二次电池的电池电流密度。从而，能够实现在通过采用简化后的电压电流关系模型表达式而降低运算负荷的基础上基于电化学反应而高精度地估计出二次电池的内部状态的电池模型表达式。

[0015] 优选如下：二次电池的状态估计装置还包括温度检测器以及至少根据电池温度来可变地设定参数值的参数值设定部。温度检测器检测二次电池的电池温度。参数值设定部还至少根据电池温度来可变地设定活性物质扩散模型表达式中的表示扩散速度的参数值。

[0016] 由此，由于根据二次电池的温度能够可变地设定在电池模型表达式中使用的参数值，因此能够反映电池参数的温度依赖性，并还能高精度地进行二次电池的状态估计。

[0017] 另外，优选如下：电压电流关系模型表达式由线性近似表达式构成，所述线性近似表达式表示从开路电压中减去电池电流密度与作为参数值的电极每单位面积的电阻的乘积而得的电压等于电池电压。参数值设定部根据由扩散估计部估计出的界面处的反应物质的浓度以及由温度检测器检测出的电池温度来可变地设定电阻。

[0018] 由此，通过应用线性近似表达式，在从电池电压估计电池电流密度的电压电流关系模型表达式的运算中不需要进行收敛计算。从而，能够减少基于电压电流关系模型表达式的运算的负荷并使得该运算稳定，因此能够实现适于安装到实际设备上的电池模型表达式。

[0019] 另外，优选如下：二次电池的状态估计装置还包括电流运算部。电流运算部将总的电池电流密度分离为有助于电化学反应的第一电流密度和由在二次电池内部所产生的双电荷层电容成分产生的第二电流密度。并且，边界条件设定部基于由电流运算部计算出的第一电流密度来计算界面处的反应电流密度，并在电压电流关系模型表达式中，基于第一电流密度来计算过电压。

[0020] 通过如上构成，由于能够从整个二次电池中的电池电流成分中分离不助于电化学反应的流经双电荷层电容的电流，来执行活性物质扩散模型表达式和电压电流关系模型表达式的运算，因此能够提高估计精度。

[0021] 并且，优选如下：二次电池的状态估计装置还包括温度检测器，所述温度检测器检测出二次电池的电池温度；以及参数值设定部，所述参数值设定部用于至少根据电池温度来可变地设定参数值。并且，电压电流关系模型表达式包括：线性近似表达式；所述线性近似表达式表示第一电流密度与作为参数值的电极每单位面积上的第一电阻的乘积等于电池电压；以及表示作为参数值的、流过电极每单位面积上的电容的第二电流密度是与电池电压随时间的变化量成比例的值的表达式。并且，参数值设定部根据由扩散估计部估计出的界面处的反应物质的浓度以及由温度检测器检测出的电池温度来可变地设定第一电阻，并且根据电池温度来可变地设定电极每单位面积上的电容量。

[0022] 由此，通过应用线性近似表达式，在从电池电压估计出电池电流密度的电压电流关系模型表达式的运算中不需要进行收敛计算。从而，能够减少基于电压电流关系模型表达式的运算的负荷并使得运算稳定，因此能够实现适于安装到实际设备上的电池模型表达式。

[0023] 优选如下：扩散估计部针对第一电极和第二电极的每一个而具有通过极坐标表示的活性物质扩散模型表达式。

[0024] 通过如上构成，由于通过对第一电极和第二电极的每一个建立不同的活性物质扩散模型而能够按照每个电极对反应物质（例如，锂）的扩散进行建模，因此能够提高估计精度。

[0025] 另外，优选如下：扩散估计部具有被第一电极和第二电极共用的通过极坐标表示的活性物质扩散模型表达式。

[0026] 通过如上构成，由于采用被第一电极和第二电极共用的活性物质扩散模型，因此通过进一步减少运算负荷，能够实现更适于安装到实际设备上的电池模型表达式。

[0027] 或者优选如下：电压电流关系模型表达式基于电压方程式以及电化学反应式而被导出，电压方程式表示活性物质和电解液的平均电位、随着界面处的电化学反应而产生的过电压的平均值、以及开路电压之间的关系，电化学反应式表示电池电流密度以及过电压的平均值之间的关系。

[0028] 进一步优选如下：在第一电极和第二电极的每一个中，通过假定电极中的电化学反应不具有位置依赖性而相同来将电极中的活性物质和电解液的电位分布简化为二次函数，并在此基础上求出活性物质和电解液的平均电位，由此导出电压电流关系模型表达式。

[0029] 通过如上构成，由于基于表示活性物质和电解液的平均电位、随着电化学反应而产生的过电压的平均值、以及开路电压之间的关系的电压方程式，并且还基于表示电池电流密度以及过电压的平均值之间的关系电化学反应式来导出上述电压电流关系模型表达式，因此能够简化电化学反应模型表达式，同时不会导致估计精度显著降低。

[0030] 优选如下：二次电池的状态估计装置还包括平均浓度计算部和第一充电率估计部。平均浓度计算部基于由扩散估计部估计出的反应物质的浓度分布来计算活性物质内的反应物质的平均浓度。第一充电率估计部按照预先求出的平均浓度和二次电池的充电率的对应关系并基于由平均浓度计算部算出的平均浓度来估计充电率。

[0031] 通过如上构成，由于根据电极的活性物质内的反应物质的平均浓度来估计二次电池的充电率，因此能够通过基于二次电池内部的电化学反应的状态估计来高精度地估计充电率。

[0032] 并且，优选如下：二次电池的状态估计装置还包括电流检测部、第二充电率估计部、以及第三充电率估计部。电流检测部检测二次电池的电池电流。第二充电率估计部基于电池电流的累计来估计二次电池的充电率变化量。第三充电率估计部基于第一充电率估计部和第二充电率估计部的估计结果来逐次更新二次电池的充电率估计值。并且，第三充电率估计部通 过在充电率估计值的前次值上反映由第二充电率估计部估计出的相对于前次值的充电率变化量、以及由第一充电率估计部估计出的当前充电率与前次值之间的充电率误差，来计算充电率估计值的当前值。特别是使用比充电率误差的反映相对小的时间常数来反映所述充电率变化量。

[0033] 通过如上构成，通过组合对短时间内的估计精度高的基于电流测量值的积累所进行的充电率估计和基于上述电池模型的充电率估计，能够高精度地估计二次电池的充电率。

[0034] 另外，进一步优选如下：二次电池的状态估计装置还包括电流检测器、第二充电率估计部、以及第三充电率估计部。电流检测器检测二次电池的电池电流。第二充电率估计部基于第二电流的累积来估计二次电池的充电率变化量。第三充电率估计部基于由第一充

电率估计部和第二充电率估计部估计出的估计结果来逐次更新二次电池的充电率估计值。并且，第三充电率估计部通过在充电率估计值的前次值上反映由第二充电率估计部估计出的相对于前次值的充电率变化量、以及由第一充电率估计部估计出的当前充电率与前次值之间的充电率误差，来计算充电率估计值的当前值。特别是第三充电率估计部在电池电流的绝对值大于预定值时或者在二次电池的电池温度低于预定温度时，中止充电率误差的反映并计算充电率估计值的当前值。

[0035] 由此，在将利用电流测量值的累积的充电率估计和基于上述电池模型的充电率估计进行组合的结构中，当由电池模型引起的估计误差下降的大电流和 / 或低温时，能够防止由于电池模型的估计误差而导致充电率的估计精度下降。

[0036] 并且，优选如下 ：二次电池的状态估计装置还包括偏移估计部。偏移估计部基于由电流估计部估计出的电池电流密度来计算电池电流的估计值，并基于电池电流的估计值与电流检测器的检测值的误差来估计电流检测器的偏移误差。并且，第二充电率估计部使用由偏移估计部估计出的偏移误差来修正由电流检测器检测出的电池电流的检测值，并且基于修正后的检测值的累计来估计二次电池的充电率的变化量。

[0037] 或者优选如下 ：二次电池的状态估计装置还包括电流检测器、偏移估 计部、以及充电率估计部。电流检测器检测二次电池的电池电流。偏移估计部基于由电流估计部估计出的电池电流密度来计算电池电流的估计值，并基于电池电流的估计值和电流检测器的检测值的误差来估计电流检测器的偏移误差。充电率估计部使用由偏移估计部估计出的偏移误差来修正由电流检测器检测出的电池电流的检测值，并且基于修正后的检测值的累计来估计二次电池的充电率的变化量。

[0038] 通过如上构成，通过基于由电池模型估计出的电池电流来估计电流检测器的偏移并对修正偏移后的电流测量值进行累积，能够提高基于电流累积的充电率估计的精度。

[0039] 因此，本发明的主要优点是能够实现使用了电池模型的适于安装到实际设备上的二次电池的状态估计装置，其中电池模型可基于电化学反应来估计二次电池的内部状态，并减少了运算负荷。

附图说明

[0040] 图 1 是说明电源系统的结构例的概要框图，在该电源系统中应用依照本发明实施方式的二次电池的状态估计装置 ；

[0041] 图 2 是二次电池的概要结构图 ；

[0042] 图 3 是示出在电池模型内使用的变量和常量的一览的图 ；

[0043] 图 4 是说明根据本实施方式的二次电池的建模的概要的概念图 ；

[0044] 图 5 是示出以极坐标表示的活性物质模型的概念图 ；

[0045] 图 6 是示出二次电池的端子电压和各平均电位的关系的概念图 ；

[0046] 图 7 是说明扩散系数的温度依赖性的概念图 ；

[0047] 图 8A 和图 8B 是示出开路电压和局部 SOC 的关系的概念图 ；

[0048] 图 9 是说明根据实施方式 1 的二次电池的状态估计装置的概要结构的框图 ；

[0049] 图 10 是说明根据实施方式 1 的二次电池的状态估计装置的 SOC 估计结构的框图 ；

[0050] 图 11 是示出活性物质内锂平均浓度和充电率 (SOC) 的关系的图 ；

[0051] 图 12 是说明依照实施方式 1 的二次电池的状态估计装置的电池状态 估计以及 SOC 估计的一系列处理的流程图；

[0052] 图 13 是说明由依照实施方式 1 的二次电池的状态估计装置进行的 SOC 估计误差的自我修正的概念图；

[0053] 图 14 是说明由依照实施方式 2 的二次电池的状态估计装置进行的 SOC 估计的框图；

[0054] 图 15 是示出电池电流的传感器测量值与模型估计值的关系的概念性波形图；

[0055] 图 16 是示出电流传感器的偏移误差的概念性波形图；

[0056] 图 17 是用于在电池 ECU 中实现按照图 14 所示的实施方式 2 的 SOC 估计的流程图；

[0057] 图 18 是说明按照实施方式 2 的变形例的二次电池的状态估计装置所进行的 SOC 估计的框图；

[0058] 图 19 是用于通过电池 ECU 来实现按照图 18 所示的实施方式 2 的变形例的 SOC 估计的流程图；

[0059] 图 20 是示出考虑了双电荷层电容的二次电池的等效电路模型的概要电路图；

[0060] 图 21 是说明根据实施方式 3 的二次电池的状态估计装置的概要结构的框图。

具体实施方式

[0061] 下面参考附图对本发明的实施方式进行详细说明。下面，对于图中相同或相当的部分标注相同的标号，并且其说明原则上不进行重复。

[0062] （实施方式 1）

[0063] 图 1 是说明电源系统的结构例的概要框图，在该电源系统中应用按照本发明实施方式的二次电池的状态估计装置。

[0064] 参考图 1，电源系统 5 包括：二次电池 10、负荷 20、以及由电子控制单元 (ECU：Electronic Control Unit) 构成的、电池 ECU 50 和控制装置 60。各 ECU 代表性地由用于执行预先已编程的预定程序和预定运算的微型计算机以及存储器 (RAM：Random Access Memory，随机访问存储 器 ROM：Read Only Memory，只读存储器等）构成。

[0065] 作为可充放电的二次电池 10 代表性地使用锂离子电池。锂离子电池由于其输出特性随着电池内部、特别是电极的活性物质内部的反应物质（锂）浓度的分布状态而变化，因此适于应用本发明。

[0066] 二次电池 10 设置有测量电池温度 Tb 的温度传感器 30、测量二次电池 10 的输入输出电流 Ib（下面也称为电池电流 Ib) 的电流传感器 32、以及测量正极和负极间的端子间电压 Vb（下面也称为电池电压 Vb) 的电压传感器 34。

[0067] 负荷 20 通过来自二次电池 10 的输出电力而被驱动。另外，假定图中没有示出的发电 / 供电元素被设置在负荷 20 中，或者与负荷 20 分开单独设置，二次电池 10 可通过来自该发电 / 供电元素的充电电流进行充电。从而当二次电池 10 放电时，电池电流为正（＞ 0)，当二次电池 10 充电时，电池电流为负（＜ 0)。

[0068] 电池 ECU 50 基于来自设置在二次电池 10 中的传感器群 30、32、34 的检测值，并按照电池模型来每隔预定周期逐次计算表示电池状态的状态估计值，该电池模型可基于电化

学反应来估计二次电池 10 的内部状态，对此将在下面进行详细说明。

[0069] 并且，电池 ECU 50 基于计算出的状态估计值来生成用于限制二次电池的充放电的电池信息。作为代表性的，电池信息包含：表示相对于充满状态（100％）的充电量（剩余容量）的 SOC(0％～ 100％）、作为当前允许的充电电力的上限值的可输入电力 Win 以及作为放电电力的上限值的可输出电力 Wout。

[0070] 控制装置 60 相应向负荷 20 的动作请求，并且在考虑来自电池 ECU50 的电池信息进行充放电限制以避免二次电池 10 发生过充电或过放电地的基础上，生成负荷 20 的动作指令。例如，控制装置 60 限制二次电池 10 的输入输出电力以使其在可输入输出电力 Win、Wout 以下，并生成负荷 20 的动作指令。另外，当二次电池 10 的 SOC 变到下限值以下时，禁止负荷 20 的电力消耗动作，或者强制启动负荷 20 的发电动作（二次电池 10 的充电动作）。相反地，当二次电池 10 的 SOC 达到上限值以上时，强制禁 止负荷 20 的发电动作。

[0071] （二次电池的结构及其电池模型）

[0072] 图 2 是二次电池的概要结构图。

[0073] 参考图 2，二次电池 10 包括：负极 12、隔离部件 14、以及正极 15。隔离部件 14 通过使电解液渗透到设置在负极 12 和正极 15 之间的树脂中来构成，对应于本发明中的“离子导体”。另外，横坐标轴 x 表示电极厚度方向上的位置。

[0074] 负极 12 和正极 15 分别由球形的活性物质 18 的集合体构成。当放电时，在负极 12 的活性物质 18 的界面上进行释放锂离子 Li^+ 和电子 e^- 的化学反应。另一方面，在正极 15 的活性物质 18 的界面上进行吸收锂离子 Li^+ 和电子 e^- 的化学反应。

[0075] 在负极 12 上设置有吸收电子 e^- 的电流集电器 13，在正极 15 上设置有释放电子 e^- 的电流集电器 16。负极的电流集电器 13 代表性地由铜构成，正极的电流集电器 16 代表性地由铝构成。在电流集电器 13 上设置有负极端子 11n，在电流集电器 16 上设置有正极端子 11p。通过经由隔离部件 14 进行的锂离子 Li^+ 的提供和接受，二次电池 10 进行充放电，产生充电电流 Ib(＞ 0) 或放电电流 Ib(＜ 0)。

[0076] 首先，对应用于图 2 所示的概要电池模型的在非专利文献 1 中公开的电池模型表达式进行说明。

[0077] 按照本发明实施方式的二次电池的充电装置所使用的基础的电池模型表达式通过由下面的式 (1) ～ (11) 构成的基础方程式表示。另外，图 3 示出了在电池模型内使用的变量和常量的一览表。

[0078] 对于以下说明的模型表达式中的变量和常量，下标 e 表示是电解液中的值，下标 S 表示是活性物质中的值。特别是下标 j 用于区分正极和负极，j ＝ 1 表示正极中的值，j ＝ 2 表示负极中的值。当概括表述正极和负极中的变量或者常量时，省略下标 j 进行记载。另外，关于表示是时间函数的 (t) 的记载、表示电池温度依赖性的 (T) 的记载、或者表示局部 SOC 依赖依赖性的 (θ) 的记载等，在说明书中有时也省略记载。此外，添加在变量或常量上的记号 # 表示平均值。

[0079]

$$\frac{j_j^{Li}(x,\theta_j,t)}{a_{sj}} = i_{0j}(x,\theta_j,T,t)\cdot\left[\exp\left(\frac{\alpha_{aj}F}{RT}\cdot\eta_j\#(x,\theta_j,t)\right)-\exp\left(-\frac{\alpha_{cj}F}{RT}\cdot\eta_j\#(x,\theta_j,t)\right)\right]$$

[0080] … (1)

[0081] $\eta_j(x, \theta_j, t) = \Phi_{sj}(x, t) - \theta_{ej}(x, t) - U_j(x, \theta_j, t) \cdots (2)$

[0082] 上述式 (1)、(2) 是表示电极（活性物质）中电化学反应的式子，被称为巴物勒-伏尔默 (Butler-Volmer) 公式。

[0083] 另外，作为与电解液中的锂离子浓度守恒法则有关的式子，有式 (3) 成立。另一方面，作为与活性物质内的锂离子浓度守恒法则有关的式子，应用式 (4) 的扩散方程式、以及由式 (5) 和式 (6) 示出的边界条件式。式 (5) 表示活性物质中心部的边界条件，式 (6) 表示活性物质的与电解液的界面（下面也简称为“界面”）处的边界条件。

[0084] 这里，活性物质界面中的局部的锂离子浓度分布、即局部 SOC θ_j 由式 (7) 定义。式 (7) 中的 c_{sej} 如式 (8) 所示，表示正极和负极的活性物质界面处的锂离子浓度。另外，$c_{sj,max}$ 表示活性物质内的界限锂浓度。

[0085] $$\frac{\delta\left[\varepsilon_{ej} \cdot c_{ej}(x,t)\right]}{\delta t} = \nabla \cdot \left[D_{ej}^{eff} \nabla c_{ej}(x,t)\right] + \frac{1-t_+^0}{F} \cdot j_j^{Li}(x,\theta_j,t) - \frac{i_{ej} \cdot \nabla t_+^0}{F} \quad \cdots (3)$$

[0086] $$\frac{\partial c_{sj}(x,r_j,t)}{\partial t} = D_{sj}\left[\frac{\partial^2 c_{sj}}{\partial r_j^2} + \frac{2}{r_j}\frac{\partial c_{sj}}{\partial r_j}\right] \quad \cdots (4)$$

[0087] $$\left.\frac{\partial c_{sj}(x,r_j,t)}{\partial r}\right|_{r_j=0} = 0 \quad \cdots (5)$$

[0088] $$\left.\frac{\partial\left[\varepsilon_{sj} \cdot c_{sj}(x,r_j,t)\right]}{\partial t}\right|_{r_j=r_{sj}} = -\frac{j_j^{Li}(x,\theta_j,t)}{a_{sj}F} \quad \cdots (6)$$

[0089] $$\theta_j = \frac{c_{sej}}{c_{sj,max}} \quad \cdots (7)$$

[0090] $c_{sej} = c_{sj}(x, r_{sj}, t) \quad \cdots (8)$

[0091] 并且，作为与电解液中的电荷守恒法则有关的式子，由式 (9) 成立，作为与活性物质中的电荷守恒法则相关的式子，有式 (10) 成立。另外，作为活性物质界面上的电化学反应式，有表示电流密度 I(t) 和反应电流密度 j_j^{Li} 的关系的式 (11) 成立。

[0092] $$\nabla \cdot \left[\kappa_j^{eff}(x,t) \nabla \phi_{ej}(x,t)\right] + \nabla \cdot \left[\kappa_{Dj}^{eff}(x,t) \nabla \ln c_{ej}(x,t)\right] + j_j^{Li}(x,\theta_j,t) = 0 \quad \cdots (9)$$

[0093] $$\nabla \cdot \left[\sigma_j^{eff} \nabla \phi_{sj}(x,t)\right] - j_j^{Li}(x,\theta_j,t) = 0 \quad \cdots (10)$$

[0094] $$I(t) = \int_0^{L_j} j_j^{Li}(x,\theta_j,t)\,dx \quad \cdots (11)$$

[0095] （本实施方式中的电池模型表达式的简化）

[0096] 上述式 (1) ～ (11) 的基础方程式已在非专利文献 1 公开，但由于 ECU（电池 ECU 50) 的运算量和运算时间的制约，很难将这些电池模型表达式直接应用到安装在实际设备上以联机状态估计二次电池的状态的状态估计装置中。因此，在本实施方式中，执行如下说明的电池模型表达式的简化。

[0097] 参考图 4，在本实施方式中，假定负极 12 和正极 15 的各电极中的电化学反应是相同的。即、假定在各电极 12、15 中，在 x 方向上反应均匀地发生。另外，假定在负极 12 和正极 15 的各电极内，各活性物质的反应是均匀的，因此在负极 12 和正极 15 的每个电极中设

定一个活性物质模型。其结果是，图 2 所示的二次电池的概要结构被建模为图 4 所示。

[0098] 当放电时，通过负极活性物质模型 18n 表面上的电极反应，活性物质模型 18n 内的锂原子 Li 通过释放电子 e^- 而变为锂离子 Li^+，并被释放到隔离部件 14 中的电解液中。另一方面，在正极活性物质模型 18p 表面上的电极反应中，获取电解液中的锂离子 Li^+ 并吸收电子 e^-。由此，锂原子被送入正极活性物质模型 18p 的内部。通过从负极活性物质 18n 释放锂离子 Li^+ 以及正极活性物质模型 18p 接收锂离子 Li^+，电流从正极电流隔离部件 16 向负极电流隔离部件 13 流动。

[0099] 相反地，当二次电池充电时，通过负极活性物质模型 18n 表面上的电极反应而获取电解液中的锂离子 Li^+，通过正极活性物质模型 18p 表面上的电极反应而向电解液释放锂离子 Li^+。在电池模型表达式中，对充放电时的活性物质模型 18p($j = 1$) 和活性物质模型 18n($j = 2$) 的表面上的电极反应、活性物质模型 18p、18n 内部中的锂的扩散（径向）和电解液中的锂离子的扩散（浓度分布）、以及各部位上的电位分布和温度分布进行建模。

[0100] 如图 5 所示，各活性物质模型 18p、18n 内的锂浓度 c_s 假定在圆周方向上不具有位置依赖性，能够以半径方向的坐标 r(r：各点距中心的距离，r_s：活性物质半径）上的函数来表示。该活性物质的模型用于估计随着界面上的电化学反应的活性物质内部的锂扩散现象，沿径向 N 分割 (N：大于等于 2 的自然数）而得的各区域 ($k = 1 \sim N$) 的锂浓度 $c_{s,k}(t)$ 按照后述的扩散方程式来估计。

[0101] 作为这些假定的结果，非专利文献 1 中的基础方程式 (1) ～ (6) 以及式 (8) 被简化为下述式 (1’) ～ (6’)、式 (8’)。

[0102] $$\frac{j_j^{Li}\#(\theta_j,t)}{a_{sj}} = i_{0j}\#(\theta_j,T,t)\cdot\left[\exp\left(\frac{\alpha_{aj}F}{RT}\cdot\eta_j\#(\theta_j,t)\right)-\exp\left(-\frac{\alpha_{aj}F}{RT}\cdot\eta_j\#(\theta_j,t)\right)\right]$$

[0103] … (1′)

[0104] $\eta_j\#(\theta_j,t) = \Phi_{sj}\#(t)-\Phi_{ej}\#(t)-U_j\#(\theta_j,t)$ … (2′)

[0105] $c_{ej}(t) = \text{const.}$ … (3′)

[0106] $$\frac{\partial c_{sj}(r_j,t)}{\partial t} = D_{sj}\left[\frac{\partial^2 c_{sj}}{\partial r_j^2}+\frac{2}{r_j}\frac{\partial c_{sj}}{\partial r_j}\right]$$ … (4′)

[0107] $$\left.\frac{\partial c_{sj}(r_j,t)}{\partial r}\right|_{r_j=0} = 0$$ … (5′)

[0108] $$\left.\frac{\partial\left[\varepsilon_{sj}\cdot c_{sj}(r_j,t)\right]}{\partial t}\right|_{r_j=r_{sj}} = -\frac{j_j^{Li}\#(\theta_j,t)}{a_{sj}F}$$ … (6′)

[0109] $c_{sej} = c_{sj}(r_{sj},t)$ … (8′)

[0110] 特别是在式 (3’) 中，通过假定电解液浓度相对于时间不变，而假定 $c_{ej}(t)$ 为固定值。另外，针对就各电极 12、15 分别定义一个的活性物质模型 18n、18p，扩散方程式 (4) ～ (6) 仅考虑极坐标方向上的分布而变形为扩散方程式 (4’) ～ (6’)。式 (8’) 中的物质界面处的锂浓度 c_{sej} 对应于图 5 所示的 N 分割区域中的最外周区域处的锂浓度 $c_{si}(t)$。

[0111] 并且，与电解液中的电荷守恒法则有关的式 (9) 利用假定了电极中的电化学反应均匀并且电解液浓度相对于时间不变的式 (3’)，被简化为下述式 (12)。即，电解液的电位

Φ_{ej} 通过 x 的二次函数来近似。并且，用于计算过电压 η_j# 的电解液中的平均电位 Φ_{ej}# 通过下述式 (13) 来求出，式 (13) 是用电极厚度 L_i 对式 (12) 进行积分的式子。

[0112] 关于负极 12，由于从式 (12) 有下述式 (14) 成立，因此用下述式 (15) 来表示电解液的平均电位 Φ_{e2}# 和与隔离部件 14 的边界处的电解液电位的电位差。同样地，关于正极 15，用下述式 (16) 来表示电解液的平均电位 Φ_{e1}# 和与隔离部件 14 的边界处的电解液电位的电位差。

[0113] $$\nabla\cdot\left[\kappa_j^{eff}(t)\nabla\phi_{ej}(x,t)\right]+j_j^{Li}\#(\theta_j,t)=0\Leftrightarrow\phi_{ej}(x,t)=-\frac{j_j^{Li}\#(\theta_j,t)}{2\kappa_j^{eff}}x^2 \quad \cdots(12)$$

[0114] $$\phi_{ej}\#(t)=-\frac{j_j^{Li}\#(\theta_j,t)}{2\kappa_j^{eff}}\frac{1}{L_j}\int_0^{Lj}x^2dx=-\frac{j_j^{Li}\#(\theta_j,t)}{6\kappa_j^{eff}}\cdot L_j^2 \quad \cdots(13)$$

[0115] $$\phi_{e2}(L_2,t)=-\frac{j_2^{Li}\#(\theta_2,t)}{2\kappa_2^{eff}}L_2^{\,2} \quad \cdots(14)$$

[0116] $$\phi_{e2}\#(t)-\phi_{e2}(L_2,t)=-\frac{j_2^{Li}\#(\theta_2,t)}{6\kappa_2^{eff}}L_2^{\,2}-\left(-\frac{j_2^{Li}\#(\theta_2,t)}{2\kappa_2^{eff}}L_2^{\,2}\right)$$

[0117] $$=\frac{j_2^{Li}\#(\theta_2,t)}{3\kappa_2^{eff}}L_2^{\,2}=\frac{L_2}{3\kappa_2^{eff}}I \quad \cdots(15)$$

[0118] $$\phi_{e1}\#(t)-\phi_{e1}(L_1,t)=-\frac{j_1^{Li}\#(\theta_1,t)}{3\kappa_1^{eff}}L_1^{\,2}=-\frac{L_1}{3\kappa_1^{eff}}I \quad \cdots(16)$$

[0119] 同样地，与活性物质中的电荷守恒法则有关的式 (10) 也被简化为下 述式 (17)。即，活性物质的电位 Φ_{sj} 也通过 x 的二次函数来近似。并且，用于计算过电压 η_j# 的活性物质中的平均电位 Φ_{sj}# 通过下述式 (18) 来求出，式 (18) 是用电极厚度 L_i 对式 (12) 进行积分的式子。因此与电解液中的电位同样地，正极 15 中的活性物质平均电位 Φ_{s1}# 和与集电体 (电流集电器 16) 的边界处的活性物质电位的电位差通过下述式 (19) 来表示。关于负极 12 也同样，有下式 (20) 成立。

[0120] $$\nabla\cdot\left[\sigma_j^{eff}\nabla\phi_{sj}(x,t)\right]-j_j^{Li}\#(\theta_j,t)=0\Leftrightarrow\phi_{sj}(x,t)=\frac{j_j^{Li}\#(\theta_j,t)}{2\sigma_j^{eff}}x^2 \quad \cdots(17)$$

[0121] $$\phi_{sj}\#(t)=\frac{j_j^{Li}\#(\theta_j,t)}{2\sigma_j^{eff}}\frac{1}{L_j}\int_0^{Lj}x^2dx \quad \cdots(18)$$

[0122] $$\phi_{s1}\#(t)-\phi_{s1}(L_1,t)=-\frac{j_1^{Li}\#(\theta_1,t)}{3\sigma_1^{eff}}L_1^{\,2}=\frac{L_1}{3\sigma_1^{eff}}I \quad \cdots(19)$$

[0123] $$\phi_{e2}\#(t)-\phi_{s2}(L_2,t)=-\frac{j_2^{Li}\#(\theta_2,t)}{3\sigma_2^{eff}}L_2^{\,2}=-\frac{L_2}{3\sigma_2^{eff}}I \quad \cdots(20)$$

[0124] 图 6 示出了二次电池的端子电压 V(t) 与如上求出的各平均电位的关系。另外，在图 6 中，由于在隔离部件 14 中反应电流密度为 $j_j^{Li}=0$，因此，隔离部件 14 处的电压降与电流密度 I(t) 成比例，为 $L_s/\kappa_s^{eff}\cdot I(t)$。

[0125] 并且，如上所述，通过假定各电极中的电化学反应均匀，在极板每单位面积的电流

密度 I(t) 和反应电流密度（锂离子生成量）j_j^{Li} 之间，由下述式 (21) 成立。

[0126] $$I(t) = -j_1^{Li}(\theta_1, t)L_1 = j_2^{Li}(\theta_2, t)L_2 \quad \cdots(21)$$

[0127] 因此，根据图 6 所示的电位关系以及上述式 (21)，关于电池电压 V(t)，有下述式 (22) 成立。式 (22) 是以图 6 所示的式 (23) 的电位关系式为前提的。

[0128] 接着计算平均过电压 η#(t)。如果设 j_j^{Li} 为固定，并在巴物勒－伏尔默 关系式中设 $\alpha_{aj} = \alpha_{cj} = 0.5$（即充放电效率相同），则有下式 (24) 成立。通过对式 (24) 进行逆变换，平均过电压 η#(t) 由下式 (25) 求出。

[0129] $$V(t) = \phi_{s1}\#(t) - \frac{L_1}{3\sigma_1^{eff}}I(t) - \left(\phi_{s2}\#(t) - \frac{L_2}{3\sigma_2^{eff}}I(t)\right) \quad \cdots(22)$$

[0130] $$\Phi_{sj}\#(t) = U_j\#(t) + \Phi_{ej}\#(t) + \eta_j\#(t) \quad \cdots(23)$$

[0131] $$j_j^{Li}\# = a_{sj}i_{0j}(\theta_j, t)\cdot\left[\exp\left(\frac{\alpha_{aj}F}{RT}\cdot\eta_j\#(t)\right) - \exp\left(-\frac{\alpha_{cj}F}{RT}\cdot\eta_j\#(t)\right)\right]$$

[0132] $$= 2a_{sj}i_{0j}(\theta_j, t)\sinh\left(\frac{\alpha_{aj}F}{RT}\cdot\eta_j\#(t)\right) \quad \cdots(24)$$

[0133] $$\eta_j\#(t) = \frac{RT}{\alpha_{aj}F}\operatorname{arcsinh}\left(\frac{j_j^{Li}\#(\theta_j, t)}{2a_{sj}i_{0j}(\theta_j, t)}\right) \quad \cdots(25)$$

[0134] 然后，根据图 6 求出平均电位 Φ_{s1} 和 Φ_{s2}，并将平均电位 Φ_{s1} 和 Φ_{s2} 带入式 (22) 中，并将由式 (25) 求出的平均过电压 $\eta_1\#(t)$ 以及 $\eta_2\#(t)$ 代入式 (22) 中。其结果是，基于作为被简化的电化学反应式的式 (1')、(21) 以及电压关系式 (2')，导出依照电化学反应模型表达式的下述的电压－电流关系模型表达式 (M1a)。

[0135] 并且，通过锂浓度守恒法则（扩散方程式）的式 (4') 和边界条件式 (5')、(6')，求出关于正极 15 和负极 12 各自中的活性物质模型 18p、18n 的活性物质扩散模型表达式 (M2a)。

[0136] $$V(t) = U_1\#(\theta_1, t) - U_2\#(\theta_2, t)$$

[0137] $$+\frac{RT}{\alpha_{a1}F}\left\{\operatorname{arcsinh}\left(\frac{-I(t)}{2L_1a_{s1}i_{01}(\theta_1, T, t)}\right) - \operatorname{arcsinh}\left(\frac{I(t)}{2L_2a_{s2}i_{02}(\theta_2, T, t)}\right)\right\}$$

[0138] $$\underbrace{-I(t)\left(\frac{L_1}{3\kappa_1^{eff}} + \frac{L_s}{3\kappa_s^{eff}} + \frac{L_2}{3\kappa_2^{eff}} + \frac{L_1}{3\sigma_1^{eff}} + \frac{L_2}{3\sigma_2^{eff}}\right)}_{Rd(T)} \quad \cdots(M1a)$$

[0139] $$\left.\begin{aligned}\frac{\partial c_{s1}(r_1, t)}{\partial t} &= D_{s1}(T)\left[\frac{\partial^2 c_{s1}}{\partial r_1^2} + \frac{2}{r_1} + \frac{\partial c_{s1}}{\partial r_1}\right]\\ \frac{\partial c_{s2}(r_2, t)}{\partial t} &= D_{s2}(T)\left[\frac{\partial^2 c_{s2}}{\partial r_2^2} + \frac{2}{r_2} + \frac{\partial c_{s2}}{\partial r_2}\right]\end{aligned}\right\} \quad \cdots(M2a)$$

[0140] 模型表达式 (M1a) 的右边第一项表示通过活性物质表面上的反应物质（锂）浓度而确定的开路电压 (OCV)，右边第二项表示过电压（$\eta_1\#-\eta_2\#$），右边第三项表示由电池电

流引起的电压降。即，二次电池的直流纯电阻用式 (M1a) 中的 Rd(T) 表示。

[0141] 另外，在式 (M2a) 中，由于被用作规定作为反应物质的锂的扩散速度的参数的扩散系数 D_{s1} 和 D_{s2} 具有温度依赖性，因此，作为相对于由温度传感器 30 检测出的电池温度 T 而可变地设定的可变参数，例如按照如图 7 所示的映射图来设定。如图 7 所示，扩散系数 D_{s1} 和 D_{s2} 具有随着电池温度降低而相对变小，另一方面随着温度上升而相对变大。因此，反应这样的温度依赖性并根据基于温度传感器 30 的检测值 Tb 而检测的电池温度 T，预先生成将式 (M2a) 中的扩散系数 D_{s1} 和 D_{s2} 设定为电池参数值的映射图。

[0142] 另外，扩散系数 D_{s1} 和 D_{s2} 根据需要不仅具有温度依赖性，还可以具有局部 SOC θ 依赖性，此时，根据检测的电池温度 T 和估计的局部 SOC θ，预先生成将这些扩散系数设定为参数值的二维映射图。

[0143] 同样地，如图 8A 和图 8B 所示，式 (M1a) 中的开路电压 U_1 和 U_2 也具有随着局部 SOC θ 的降低而上升或降低的依赖性。从而，反应这样的局部 SOC 依赖性并根据估计的局部 SOC θ，预先设定对式 (M1a) 的开路电 压 U_1 和 U_2 进行设定的映射图。图 8A 示出了正极 (j = 1) 的开路电压 U_1 的局部 SOC θ 依赖性，图 8B 示出了负极 (j = 2) 的开路电压 U_2 的局部 SOC θ 依赖性。

[0144] 另外，虽图中没有示出，但式 (M1a) 中的交换电流密度 i_{01} 和 i_{02} 也对局部 SOC θ 和电池温度 T 具有依赖性，因此预先准备将 θ 和 T 作为自变量的二维映射图，并根据当前的局部 SOC θ 和电池温度 T 来确定交换电流密度 i_{01} 和 i_{02} 作为电池参数值。

[0145] 同样地，直流纯阻抗 Rd 也具有温度依赖性，因此反应温度依赖性并按照温度传感器 30 的检测值 Tb 所检测的电池温度 T，预先生成将直流纯阻抗 Rd 设定为电池参数的映射图。

[0146] 上述的映射图群可基于对二次电池 10 进行公知的交流阻抗测量等而得的实验结果来生成，关于这一点进行明确记载。

[0147] (电池模型表达式的变形例 1 :活性物质模型的共用化)

[0148] 代替图 4 所示的对负极 12 和正极 15 分别使用个别的活性物质模型的方法，也可以对负极 12 和正极 15 应用共用的活性物质模型来进行进一步降低运算负荷的建模。在此情况下，由于将负极 12 和正极 15 的活性物质模型 18n、18p 共同处理为单独的元件，因此需要进行如下式 (26) 这样的式子的替换。在式 (26) 中删除了用于区别正极和负极的下标 j。

[0149]
$$\left.\begin{aligned} U(\theta,t) &= U_1\#(\theta_1,t) - U_2\#(\theta_2,t) \\ i_{0j}(\theta_j,T,t) &= i_0(\theta,T,t) \\ c_{sj}(r_j,t) &= c_s(r,t) \\ D_{sj} &= D_s \\ a_{sj} &= a_s \\ L_j &= L \\ \alpha_{sj} &= \alpha_s \\ \theta_j &= \theta_1 \end{aligned}\right\} \quad \cdots(26)$$

[0150] 其结果是，作为进一步简化了模型表达式 (M1a) 和 (M2a) 的模型，可得到下述式

(M1b) 和 (M2b)。另外，在如上应用了将正极和负 极共用化的活性物质模型的电池模型表达式中，电流密度 I(t) 与反应电流密度 j_j^{Li} 的关系式采用式 (21') 以代替式 (21)。

[0151] $$V(t)=U(\theta,t)$$

[0152] $$+\frac{RT}{\alpha_a F}\arcsin h\left(\frac{-I(t)}{2La_s i_0(\theta,T,t)}\right)$$

[0153]

$$\underbrace{-I(t)\left(\frac{L_1}{3\kappa_1^{eff}}+\frac{L_s}{3\kappa_s^{eff}}+\frac{L_2}{3\kappa_2^{eff}}+\frac{L_1}{3\sigma_1^{eff}}+\frac{L_2}{3\sigma_2^{eff}}\right)}_{Rd(T)} \quad \cdots(M1b)$$

[0154] $$\frac{\partial c_s(r,t)}{\partial t}=D_s\left[\frac{\partial^2 c_s}{\partial r^2}+\frac{2}{r}\frac{\partial c_s}{\partial r}\right] \quad \cdots(M2b)$$

[0155] $I(t) = -L \cdot j^{Li}\#(\theta, t)$ $\cdots(21')$

[0156] (电池模型表达式的变形例 2：极化电压项的线性近似)

[0157] 在上述式 (M1a) 中，由于在表示过电压的右边第二项中存在 arcsinh 项，所以产生了求解非线性方程式的必要。因此，在式 (M1a) 的运算中需要重复计算，从而除运算量增大之外，还有可能损害运算的稳定性。因此，导出对式 (M1a) 中的 arcsinh 项进行一次近似 (线性近似) 的电压－电流关系模型表达式 (M1c)。

[0158] $$V(t)=U_1\#(\theta_1,t)-U_2\#(\theta_2,t)$$

[0159] $$+\frac{RT}{\alpha_{a1}F}\frac{-I(t)}{2L_1a_{s1}i_{01}(\theta_1,T,t)}-\frac{RT}{\alpha_{a1}F}\frac{I(t)}{2L_2a_{s2}i_{02}(\theta_2,T,t)}$$

[0160]

$$\underbrace{-I(t)\left(\frac{L_1}{3\kappa_1^{eff}}+\frac{L_s}{3\kappa_s^{eff}}+\frac{L_2}{3\kappa_2^{eff}}+\frac{L_1}{3\sigma_1^{eff}}+\frac{L_2}{3\sigma_2^{eff}}\right)}_{Rd(T)} \quad \cdots(M1c)$$

[0161] $$Rr(\theta_1,\theta_2,T)=\frac{RT}{2\alpha_{a1}F}\left\{\frac{1}{L_1a_{s1}i_{01}(\theta_1,T)}+\frac{1}{L_2a_{s2}i_{02}(\theta_2,T)}\right\} \quad \cdots(27)$$

[0162] $V(t) = U_1\#(\theta_1, t)-U_2\#(\theta_2, t)-Rr(\theta_1, \theta_2, T)I(t)-Rd(T) \cdot I(t)$ $\cdots(28)$

[0163] 在式 (M1c) 中，进行线性近似的结果，右边第二项也使用电流密度 I(t) 和反应电阻 Rr 之积来表示。如上述式 (27) 所示，反应电阻 Rr 对有关交换电流密度 I01、i02 的局部 SOC θ 和电池温度 T 具有依赖性。因此，当使用电压－电流关系模型表达式 (M1c) 时，对于反应电阻 Rr(θi, T)，也基于实验结果等来预先生成反应了对局部 SOC θ 和电池温度 T 的依赖性的映射图，并参考映射图适当地设定反应电阻，以作为电池的一个参数。

[0164] 其结果是，电压－电流关系模型表达式 (M1c) 如上述式 (28) 所示，可通过在电池电压 V(t)、电池电流密度 I(t)、作为电池参数的 Rr(θ, T) 和 Rd(T)、以及开路电压 U_1、U_2 之间成立的线性模型表达式来表示。

[0165] 同样地，对于上述的式 (M1b)，也通过对右边的 arcsinh 项进行线性近似来得到下述式 (M1d)。式 (M1d) 也与式 (M1c) 一样可以线性模型表达式来表示。

[0166]

$$V(t)=U(\theta,t)+\underbrace{\frac{RT}{\alpha_a F}\frac{-I(t)}{2L_1 a_s i_0(\theta,t)}}_{-Rr(\theta,T)\cdot I(t)}-I(t)\underbrace{\left(\frac{L_1}{3\kappa_1^{eff}}+\frac{L_s}{\kappa_s^{eff}}+\frac{L_2}{3\kappa_2^{eff}}+\frac{L_1}{3\sigma_1^{eff}}+\frac{L_2}{3\sigma_2^{eff}}\right)}_{Rd(T)} \quad \cdots(M1d)$$

[0167] （根据实施方式 1 的二次电池的状态估计装置的结构）

[0168] 接着，对通过上述电压 - 电流关系模型表达式 (M1a) ～ (M1d) 中的任一个以及与其对应的活性物质扩散模型 (M2a) 或 (M2b) 的组合而实现的、根据本发明实施方式 1 的二次电池的状态估计装置的结构进行说明。假定下面说明的状态估计装置基本上通过由图 1 所示的电池 ECU 50 执行的程序处理来实现。

[0169] 图 9 是说明根据本发明实施方式 1 的二次电池的状态估计装置的概要结构的框图，图 9 所示的各方框基本上通过由电池 ECU 50 执行的程序处理来实现。

[0170] 参考图 9，状态估计装置 50# 包括 :扩散估计部 100、开路电压估计部 110、电流估计部 120、电池参数值设定部 130、以及边界条件设定部 140。

[0171] 扩散估计部 100 利用活性物质扩散模型表达式 (M2a) 或 (M2b)，并基于由边界条件设定部 140 根据式 (5') 和式 (6') 设定的边界条件，通过例如微分公式来逐次计算活性物质内部的锂浓度分布。基于由扩散估计部 100 估计出的锂浓度分布，将最外周区域中的锂浓度作为物质界面处的锂浓度 c_{sej}，按照式 (7) 来设定局部 SOC θ 。

[0172] 开路电压估计部 110 按照图 8A 和图 8B 所示的反映了特性的映射图，求出正极和负极各自的开路电压、或者将正极和负极合成了的开路电压。在图 9 中，将这些开路电压概括记载为开路电压 U(θ)。

[0173] 电池参数值设定部 130 根据按照温度传感器 30 的检测值 Tb 而检测的电池温度 T、以及基于扩散估计部 100 的估计的当前的局部 SOC θ 来设定要使用的电池模型表达式中的电池参数。如上所述，被用在扩散估计部 100 中的、模型表达式 (M2a)、(M2b) 中的扩散常数 D_{s1}、D_{s2}、D_s 根据电池温度 T 而被设定，另外，模型表达式 (M1a) ～ (M1d) 中的直流纯电阻 Rt、或者模型表达式 (M1a)、(M1b) 中的交换电流密度 i_{01}、i_{02}、或者模型表达式 (M1c)、(M1d) 中的反应电阻 Rr 等由电池参数值设定部 130 进行设定。

[0174] 电流估计部 120 基于上述式 (M1a) ～ (M1d)，按照用于计算电池电流密度 I(t) 的下式 (M3a) ～ (M3d) 中的任一个，并代入由开路电压估计部 110 估计出的开路电压 U(θ) 和按照电压传感器 34 的检测值 Vb 而检测的当前的电池电压 V(t) 来计算电池电流密度 I(t)。

[0175] $$h[I(t)]=V(t)-U_1\#(\theta_1,t)+U_2\#(\theta_2,t)$$

[0176] $$-\frac{RT}{\alpha_{a1}F}\left\{\arcsin h\left(\frac{-I(t)}{2L_1 a_{s1} i_{01}(\theta_1,T,t)}\right)-\arcsin h\left(\frac{I(t)}{2L_2 a_{s2} i_{02}(\theta_2,T,t)}\right)\right\}$$

[0177]

$$+I(t)\underbrace{\left(\frac{L_1}{3\kappa_1^{eff}}+\frac{L_s}{3\kappa_s^{eff}}+\frac{L_2}{3\kappa_2^{eff}}+\frac{L_1}{3\sigma_1^{eff}}+\frac{L_2}{3\sigma_2^{eff}}\right)}_{Rd(T)} \quad \cdots(M3a)$$

[0178] 例如，式 (M3a) 相当于关于电池电流密度 I(t) 求解式 (M1a) 而得的式子。当使用牛顿法等来解作为非线性方程式的式 (M3a) 时，可通过如下来求解：假定 I(t) 的初始值，代入电池电压 V(t)、开路电压 U(θ) 以及电池参数值来计算 I(t)，并反复进行计算，直到算出的 I(t) 与假定的 I(t) 一致为止。

[0179] 同样地，在使用 (M1b) 式的电池模型表达式中，通过利用与求解式 (M3a) 的方法相同的方法来求解下式 (M3b)，能够计算出电池电流密度 I(t)。

[0180] $$h[I(t)]=V(t)-U(\theta,t)$$

[0181] $$-\frac{RT}{\alpha_a F}\arcsin h\left(\frac{-I(t)}{2La_s i_0(\theta,T,t)}\right)$$

[0182]

$$+I(t)\underbrace{\left(\frac{L_1}{3\kappa_1^{eff}}+\frac{L_s}{3\kappa_s^{eff}}+\frac{L_2}{3\kappa_2^{eff}}+\frac{L_1}{3\sigma_1^{eff}}+\frac{L_2}{3\sigma_2^{eff}}\right)}_{Rd(T)} \quad \cdots(M3b)$$

[0183] 另外，在线性近似后的式 (M1c)、(M1d) 的电池模型表达式中，使用下式 (M3c)、(M3d)，能够在不进行如非线性方程式那样的反复计算的情况下代入电池电压 V(t)、开路电压 U(θ) 以及电池参数值来唯一地计算出电池电流密度 I(t)。由此，可减轻运算负荷并提高运算的稳定性。

[0184] $$I(t)=\frac{U_1\#(\theta_1,t)-U_2\#(\theta_2,t)-V(t)}{Rr(\theta_1,\theta_2,T)+Rd(T)} \quad \cdots(M3c)$$

[0185] $$I(t)=\frac{U(\theta,t)-V(t)}{Rr(\theta,T)+Rd(T)} \quad \cdots(M3d)$$

[0186] 接着，边界条件设定部 140 使用上述式 (21) 或式 (21')，将算出的电流密度 I(t) 换算成反应电流密度（锂生成量）j_j^{Li}，并按照式 (6') 来更新 活性物质扩散模型表达式 (M2a)、(M2b) 的边界条件。

[0187] 因此，在根据实施方式 1 的二次电池的状态估计装置中，将基于电压传感器 34 的测量值的电池电压 V(t) 以及基于温度传感器 30 的测量值的当前的电池温度 T 作为输入，并基于活性物质中的反应物质（锂）的扩散模型表达式 (M2a)、(M2b) 式来进行估计，并且通过与根据电化学反应模型表达式的简化了的电压 - 电流关系模型表达式 (M1a) ～ (M1d) 进行组合，来估计活性物质中的反应物质（锂）的浓度分布，并基于该浓度分布，能够高精度地估计二次电池的内部状态。由此能够实现通过采用简化的电化学反应模型表达式来减轻运算负荷、同时基于电化学反应来高精度地估计二次电池内部状态的、适于安装在实际设备上的电池模型表达式。

[0188] 在根据实施方式 1 的二次电池的状态估计装置中，基于估计出的二次电池的内部状态，能够进一步估计二次电池 10 的充电率 (SOC)。

[0189] 图 10 示出了根据实施方式 1 的二次电池的状态估计装置所执行的 SOC 估计。

[0190] 参考图 10，根据实施方式 1 的二次电池的状态估计装置还包含平均浓度计算部 160 和 SOC 估计部 200。

[0191] 平均浓度计算部 160 通过下式 (29)，求出由扩散估计部 100 估计出的、正极活性物

质模型 18p 内的锂平均浓度 $c_{save}(t)$。并且，SOC 估计部 200 通过下式 (30) 生成二次电池 10 整体的 SOC 估计值 SOCe。

[0192] $$c_{save}(t)=\sum_{k=1}^{N}c_{s1,k}(t)\cdot\frac{\Delta V_k}{V} \quad \cdots(29)$$

[0193] $$SOC\#=\frac{CO-c_{save}(t)}{CO-Cf}\cdot 100(\%) \quad \cdots(30)$$

[0194] 如上所述，式 (29) 中的锂浓度 $c_{s1,k}(t)$、(k ＝ 1 ～ N) 是如图 5 所示那样沿径向对活性物质模型表达式 18p 进行 N 分割而得的各区域的锂浓度，通过扩散模型表达式 (M2a)、(M2b) 来估计。另外，ΔV_k 表示各 个分割区域的体积，V 表示活性物质全体的体积。

[0195] 另外，当在正负极间共用了活性物质模型时，通过与式 (29) 同样地求出被共用后的活性物质模型内的各区域的锂浓度 $c_{s,k}(t)$、(k ＝ 1 ～ N) 的平均值，能够求出锂平均浓度 $c_{save}(t)$。

[0196] 在图 11 中作为一个例子示出了正极 15 的活性物质锂平均浓度与 SOC 估计值 SOCe 的关系。如图 11 所示，SOC 随着正极活性物质内锂平均浓度的上升而降低。因此，预先求出充满电时 (SOC ＝ 100％) 的锂平均浓度 Cf 和完全放电时 (SOC ＝ 0％) 的锂平均浓度 CO，通过在两者之间进行线性插值，能够按照上述式 (30) 来估计 SOC。

[0197] 图 12 是说明根据实施方式 1 的二次电池的状态估计装置所进行的电池状态估计以及 SOC 估计的一系列处理的流程图。在电池 ECU 50 中每隔预定计算周期调出图 12 所示的一系列处理来执行。

[0198] 参考图 12，电池 ECU 50 在步骤 S100 中基于电压传感器 34 的检测值 Vb 来获取电池电压 V(t)，在步骤 S110 中基于温度传感器 30 的检测值 Tb 来获取当前的电池温度 T。

[0199] 并且，电池 ECU 50 在步骤 S120 中，基于扩散模型表达式 (M2a)、(M2b) 的上一次计算时的锂浓度分布，并基于活性物质表面上的锂浓度来计算局部的 SOC θ 。

[0200] 并且，电池 ECU 50 在步骤 S130 中，参考根据图 8 所示的特性的映射图，针对负极 12 和正极 15 的每一个或者正负极双方，根据局部的 SOC θ 来计算开路电压 U(θ) 值。即，步骤 S130 的处理相当于图 9 中的开路电压估计部 110 的功能。

[0201] 并且，电池 ECU 50 在步骤 S140 中，通过图 9 所示的电流估计部 120 的功能，根据电池电压 V(t)、开路电压 U(θ)、以及根据电池温度 T 设定的电池参数值，利用电压 - 电流关系模型表达式 (M1a) ～ (M1b) 中的任一个来计算电池电流密度 I(t) 的估计值。

[0202] 并且，电池 ECU 50 在步骤 S150 中，基于式 (21) 或 (21') 从所估计的电池电流密度 I(t) 计算出反应电流密度 (锂生成量) j_j^{Li}，并且使用计算出的反应电流密度来设定扩散模型方程式 (M2a)、(M2b) 的活性 物质界面处的边界条件 (活性物质界面)。即，步骤 S150 的处理相当于图 9 中的边界条件设定部 140 的功能。

[0203] 并且，电池 ECU 50 在步骤 S160 中，使用扩散方程式模型 (M2a)、(M2b)，计算就负极 12 和正极 15 的每一个或者正负极双方而设定的活性物质模型内的锂浓度分布，并更新各区域的锂浓度估计值。即，步骤 S160 的处理相当于图 9 的扩散估计部 100 的功能。如上所述，此时算出的最外周的分割区域中的锂浓度在执行下一次的计算时用于计算活性物质表面的局部的 SOC θ 。

[0204] 作为进一步的处理，电池 ECU 50 通过步骤 S170 能够基于在步骤 S100 ～ S160 求

出的二次电池内部状态来估计二次电池 10 整体的充电率 (SOC)。

[0205] 例如，步骤 S170 包括基于在步骤 S160 中求出的活性物质内的锂浓度分布来计算锂平均浓度 c_{save} 的步骤 S171、以及基于在步骤 S171 中求出的锂平均浓度 c_{save} 来计算二次电池的充电率的步骤 S172。步骤 S171 的处理相当于图 10 的平均浓度计算部 160 的功能，步骤 S172 的处理相当于图 10 的 SOC 估计部 200 的处理。

[0206] 如上所述，根据涉及实施方式 1 的二次电池的充电估计装置，将电池电压 V(t) 作为输入来估计电池电流 (电池电流密度 I(t))，并基于此估计二次电池的内部状态。由此，如下面使用图 13 进行说明的那样，具有即使产生模型误差也可自我修正的功能。

[0207] 参考图 13，例如从上述电池模型表达式 (M1a) 等可知，当进行充电时，将在二次电池 10 的电池电压 V(t) 和开路电压 OCV 之间产生如图 13 所示的极化电压 ΔV。并且，从线性近似后的式 (M1c)、(M1d) 可知，该极化电压为与电池电流密度 I 相对应的值。

[0208] 因此，当假设在电池模型中发生了计算误差，从而开路电压相对于真实值被过小地估计时，OCV(估计) ＜ OCV(真实值)，并且 SOC(估计) ＜ SOC(真实值)，从而极化 ΔV(估计) ＞ ΔV(真实值)。于是，电池电流密度 I(t) 相对于真实值被过大地估计。其结果是，通过根据式 (21)、式 (21’)，反应电流密度 j_j^{Li} 也被过大地估计，因此，在下一个 计算周期中将过大地估计 SOC 的上升量，从而与 SOC 有关的模型误差将被自我修正。同样地，在开路电压相对于真实值被过大地估计时，与 SOC 有关的模型误差也能够朝着与上述相反的方向自我修正。

[0209] 即，在根据实施方式 1 的二次电池的充电估计装置中，由于能够在以后的计算中对一时发生的模型估计误差进行自己修正，因此电池模型误差不被累积，能够高精度地估计二次电池的内部状态以及充电率 (SOC)。

[0210] (实施方式 2)

[0211] 在实施方式 2 中，对基于根据实施方式 1 的二次电池的内部状态估计结果来估计 SOC 的另一方法进行说明。

[0212] 图 14 是说明根据实施方式 2 的二次电池的状态估计装置的 SOC 估计的框图。

[0213] 参考图 14，实施方式 2 的二次电池的状态估计装置包括偏移估计部 170、电流累积部 180、以及 SOC 估计部 210。

[0214] 偏移估计部 170 基于由电流估计部 120 估计的电池电流密度 I(t) 以及由电流传感器 32 测出的电池电流 Ib(t)，通过下式 (31) 计算电流传感器 32 的偏移误差 Iof。在式 (31) 中，模型电池电流 Im(t) 通过由电流估计部 120 估计的电池电流密度 I(t) 和电极表面积的相乘来求出。如式 (31) 所示，偏移估计部 170 对模型电池电流 Im(t) 和由电流传感器 32 测出的电池电流 Ib(t) 的偏差进行累积，并通过将该累积值除以累积时间来计算电流偏移误差 Iof。

[0215] $$I_{of} = \frac{1}{Tm}\int_{Tm}\{Ib(t) - Im(t)\}dt \quad \cdots(31)$$

[0216] $$\Delta SOCi \propto \sum \{Ib(t) - I_{of}\} \quad \cdots(32)$$

[0217] $$SOCe = SOCe(0) + \Delta SOCi \quad \cdots(33)$$

[0218] 然后，运算部 175 从由电流传感器 32 检测出的电池电流 Ib(t) 减去由偏移估计部 170 估计的偏移误差 Iof，从而求出修正电池电流 Ibc(t)。

[0219] 电流累积部 180 求出由运算部 175 算出的修正电池电流 Ibc(t) 的累积值Σ Ibc。并且 SOC 估计部 210 按照上式 (32) 并根据修正电池电流 Ibc(t) 的累积值Σ Ibc，求出 SOC 变化量 ΔSOCi。SOC 变化量 ΔSOCi 表示从上次的 SOC 估计运算之后至当前为止的 SOC 的变化量。并且，SOC 估计部 210 通过上述式 (33) 求出在上次的估计运算中获得的 SOC 估计值 SOCe(0) 和通过式 (32) 求出的 SOC 变化量 ΔSOCi 之和，由此计算当前的 SOC 估计值 SOCe。

[0220] 这里如图 15 所示，电池模型所引起的电流估计误差通常不具有偏移性 (offset)，并显示出如果进行长时间积分则接近于 0 的特性。与此相对，如图 16 所示，电流传感器 32 的偏移误差被维持在固定值，因此作为传感器测量值的电池电流 Ib(t) 和模型估计值 Im(t) 的偏差总是具有固定的直流量。因此，通过在偏移估计部 170 中基于上式 (31) 进行运算，能够算出电流传感器 32 的偏移误差 Iof。

[0221] 图 17 是用于通过电池 ECU 50 来实现图 14 所示的实施方式 2 的 SOC 估计的流程图。如上所述的 SOC 估计处理通过用图 17 所示的步骤 S173 ～ S175 替换图 12 中的步骤 S170 来实现。

[0222] 参考图 17，电池 ECU 50 在步骤 S173 中通过对基于电池电流密度 I(t) 的电池电流模型估计值 Im(t) 和电流传感器 32 的检测值 Ib(t) 的偏差进行累积来计算偏移误差 Iof，其中所述电池电流密度 I(t) 是通过电池模型将电池电压 V(t) 作为输入而求出的。即，步骤 S173 的处理相当于图 14 中的偏移估计部 170 的功能。

[0223] 并且，电池 ECU 50 通过步骤 S174 使用偏移误差 Iof 来修正检测值 Ib(t)，由此计算修正电池电流 Ibc(t)。步骤 S174 的处理相当于图 14 中的运算部 175 的功能。

[0224] 并且，电池 ECU 50 在步骤 S175 中，基于修正电池电流 Ibc(t) 的累积来计算二次电池的充电率估计值 SOCe。即，步骤 S175 的处理相当于图 14 中的电流累积部 180 和 SOC 估计部 210 的功能。

[0225] 根据以上说明的实施方式 2 的二次电池的状态估计装置的 SOC 估计，能够基于电池模型表达式检测出偏移误差，并且能够基于除去了偏移误差 的电流累积来高精度地估计二次电池 10 的充电率 (SOC)。

[0226] (实施方式 2 的变形例)

[0227] 图 18 是说明按照实施方式 2 的变形例的由二次电池的状态估计装置进行的 SOC 估计的框图。

[0228] 参考图 18，根据实施方式 2 的二次电池的状态估计装置包含在实施方式 1 中说明的 SOC 估计部 200、基于电流累积的 SOC 估计部 210#、以及对两者的 SOC 估计结果进行综合而生成最终的 SOC 估计值 SOCe 的 SOC 估计部 220。

[0229] SOC 估计部 200 与实施方式 1 的相同，基于根据本发明实施方式的电池模型表达式执行的二次电池的内部状态估计，并根据活性物质内的锂平均浓度来估计 SOC 模型估计值 SOCm。其详细说明与利用图 10 进行的说明相同，因此不再赘述。

[0230] 另一方面，SOC 估计部 210# 基于由电流传感器 32 测出的电池电流 Ib(t) 的累积来求出在 SOC 的估计运算周期内的 SOC 变化量 ΔSOCi。

[0231] SOC 估计部 210# 不限于如在图 14 中说明的那样通过基于电池模型的电流传感器 32 的偏移误差估计、以及对将偏移误差修正之后的修正电池电流 Ibc(t) 的累积来求出 SOC 的变化量 ΔSOCi 的结构，也可以构成为通过对由电流传感器 32 测出的电池电流 Ib(t) 进

行累积来求出 SOC 变化量 ΔSOCi 的结构。但是，当将图 14 所示的 SOC 估计部 210 用作图 18 的 SOC 估计部 210 时，由于修正偏移误差，因此能够高精度地求出 SOC 变化量的 ΔSOCi。

[0232] SOC 估计部 220 基于下式 (34) 来计算最终的 SOC 估计值 SOCe。

[0233] $SOCe = SOCe(0)+k1 \cdot \Delta SOCi+k2 \cdot (SOCm-SOCe(0))$ …(34)

[0234] 在式 (34) 中，SOC 估计值 SOCe 通过对上次的 SOC 估计值 SOCe(0)、在基于电流累积而得的 SOC 变化量 ΔSOCi 上乘以增益 k1 的项、以及在 SOC 模型估计值 SOCm 与上次的 SOC 估计值 SOCe(0) 之差上乘以增益 k2 的项求和，来求出 SOC 估计值 SOCe。

[0235] 关于增益 k1、k2，通过设定为 k1 ＞ k2，例如设定为增益 k1 ＝ 1.0、增益 k2 ＜ 1.0，能够执行组合了电流累积和基于电池模型的内部状态估计的 SOC 估计。由此，对于短期间内的 SOC 变化估计，能够用较小的时间常数来反映可靠性高的 SOC 变化量 ΔSOCi，并且为了消除由于长时间使用电池而引起的 SOC 估计误差，能够用相对较大的时间常数来反映模型估计值 SOCm，该模型估计值 SOCm 反映了二次电池的内部状态变化。

[0236] 或者，也可以根据电池状态来改变增益 k1、k2。例如，在电池模型的精度下降的低温状态下、或者当以大电池电流充放电时，优选降低增益 2 来主要执行基于电流累积的 SOC 估计。特别是在电压－电流关系模型表达式 (M1c)、(M1d) 中，由于 arcsinh 项被线性近似，因此当 $I(t)/\{2L_j a_{sj} i_{oj}(\theta, T)\}$ 项的绝对值达到预定值以上时电池模型表达式的误差将会增大。即，在大电流时 ($|I(t)| >> 0$) 以及在电池温度 T 为低温从而交换电流密度 $i_{ej}(\theta, T)$ 下降时，由于上述项的绝对值变大，因此电池模型误差增大。因而，在这样的情形下，例如，通过假设 k2 ＝ 0 来停止电池模型的 SOC 估计，由此能够防止二次电池 10 的充电率 (SOC) 的估计误差由于电池模型误差而增大。

[0237] 图 19 是用于通过电池 ECU 50 实现图 18 所示的实施方式 2 的变形例的 SOC 估计的流程图。

[0238] 参考图 19，电池 ECU 50 执行图 19 所示的步骤 S171、S172#、S173、S174、S175#、S176 以代替图 12 中的步骤 S170，由此能够执行图 18 所示的实施方式 2 的变形例的 SOC 估计。

[0239] 参考图 19，电池 ECU 50 在执行步骤 S171（与图 12 相同）的处理后，通过步骤 S172#，与步骤 S172 一样地基于在步骤 S171 求出的锂平均浓度 c_{save} 来计算模型 SOC 估计值 SOCm。

[0240] 另一方面，电池 ECU 50 在执行步骤 S173、S174（与图 17 相同）处理后，通过步骤 S175#，基于修正电流值 Ibc(t) 的累积来计算 SOC 的估计运算执行期间内的 SOC 变化量 ΔSOCi。如上所述，在步骤 S175# 中执行的 SOC 变化量 ΔSOCi 的计算也可以不进行偏移误差 Iof 的修正，而通过电流传感器 32 的测量值 Ib(t) 的累积来求出。

[0241] 并且，电池 ECU 50 在步骤 S176 中基于上次的 SOC 估计值 SOCe(0)、在步骤 S172# 中求出的模型 SOC 估计值 SOCm、以及在步骤 S175# 中求出的 SOC 变化量 ΔSOCi，并依据式 (34) 来计算当前的 SOC 估计值 SOCe。

[0242] 通过如此构成，可通过适当地组合对于短期间内的 SOC 变化估计可靠性高的利用电流累积的 SOC 估计和利用反映了二次电池的内部状态变化的电池模型表达式的 SOC 估计，来高精度地估计二次电池的充电率 (SOC)。

[0243] （实施方式 3）

[0244] 在实施方式 1 和 2 中所说明的电池模型表达式是在全部电池电流流过活性物质而贡献于电化学反应的前提下导出的。但是，实际上特别是在低温时等，电解液和活性物质的界面上所产生的双电荷层电容的影响将显现出来，从而全部电池电流被分流为有助于电化学反应的电化学反应电流和流过电容的电容电流。

[0245] 在图 20 中示出了考虑了这样的双电荷层电容的二次电池的等效电路。

[0246] 参考图 20，与电池电流密度 I(t) 相对应的总电池电流成分被分流为流过活性物质模型 18（概括表示正极活性物质模型 18p 和负极活性物质模型 18n）的电化学反应电流成分（电流密度 $I^{EC}(t)$）和流过双电荷层电容 19 的电容电流成分（电流密度 $I^{C}(t)$）。即，电池电流密度 I(t) 通过电化学反应电流密度 $I^{EC}(t)$ 和电容电流密度 $I^{C}(t)$ 之和来表示。

[0247] 流过活性物质模型 18 的电化学反应电流成分有助于电化学反应，但另一方面电容电流成分不助于电化学反应。并且，总电池电流成分流过式 (M1a) ～ (M1d) 所示的直流纯电阻 Rd(t)。

[0248] 在实施方式 3 中，以将流经双电荷层电容的电容电流成分和电化学反应电流成分分离的方式构成电池模型表达式。

[0249] 图 21 是说明实施方式 3 的二次电池的状态估计装置的概要结构的框图。

[0250] 通过比较图 21 与图 9 可知，在实施方式 3 的二次电池的状态估计装置 中，电流估计部 120 被构成为还包含电流运算部 125。

[0251] 首先，对根据图 20 所示的电池模型来考虑电容电流成分的分离时的电压－电流关系模性式 (M1a) 的变形进行说明。

[0252] 参考图 20 可知，对于正极 12 和负极 15，在总电流密度 I(t)、电化学反应电流密度 $I^{EC}(t)$、以及电容电流密度 $I^{C}(t)$ 之间，有下式 (35) 的关系成立。并且，活性物质模型 18 中的电化学反应由于仅与电化学反应电流密度 $I_j^{EC}(t)$ 有关，因此通过将电极中的电化学反应假定为均匀而简化的电化学反应式 (21) 被修正为式 (36)。

[0253] 另外，在式 (35) 中，电容电流密度 $I_j^{C}(t)$ 由下式 (37) 表示。

[0254] $$I(t)=I_1^{EC}(t)+I_1^{C}(t)=I_2^{EC}(t)+I_2^{C}(t) \quad \cdots(35)$$

[0255] $$I_1^{EC}(t)=-j_1^{Li}\#(\theta_1,t)L_1,\ I_2^{EC}(t)=j_2^{Li}(\theta_2,t)L_2 \quad \cdots(36)$$

[0256] $$I_1^{C}(t)=-C_1\frac{d\psi_1(t)}{dt},\ I_2^{C}(t)=C_2\frac{d\psi_2(t)}{dt} \quad \cdots(37)$$

[0257] 另外，式 (37) 中的电压 $\psi_1(t)$ 和 $\psi_2(t)$ 分别在下式 (38)、(39) 中通过求出正极 15 和负极 12 各自的开路电压 U(θ，t) 和过电压 η(t) 之和而给出。

[0258] $$\psi_1(t)=U_1\#(\theta_1,t)+\eta_1\#(t)$$

[0259] $$=U_1\#(\theta,t)+\frac{RT}{\alpha_{aj}F}\arcsin h\left[\frac{-I_1^{EC}(t)}{2L_1a_{s1}i_{01}(\theta_1,T,t)}\right] \quad \cdots(38)$$

[0260] $$\psi_2(t)=U_2\#(\theta_2,t)+\eta_2\#(t)$$

[0261] $$=U_2\#(\theta_2,t)+\frac{RT}{\alpha_{aj}F}\arcsin h\left[\frac{I_2^{EC}(t)}{2L_2a_{s2}i_{02}(\theta_2,T,t)}\right] \quad \cdots(39)$$

[0262] 因此，按照上式 (38)、(39) 依次计算出 $\psi_1(t)$ 和 $\psi_2(t)$，将上 次的运算周期中的电压值和此次的运算周期中的电压值代入式 (37) 和式 (35) 中求解，由此能够算出 $I_1^{EC}(t)$

和 $I_2^{EC}(t)$。即，通过联立这些式 (35) ～ (39) 来构成图 21 的电流运算部 125。

[0263] 并且，电压 - 电流关系模型表达式 (M1a) 被变换为将将式 (M1a) 的表示极化电压的右边第二项的电流密度替换成电化学反应电流密度 $I_1^{EC}(t)$ 和 $I_2^{EC}(t)$ 的式 (M4a)。

[0264] $$V(t)=U_1\#(\theta_1,t)-U_2\#(\theta_2,t)$$

[0265] $$+\frac{RT}{\alpha_{a1}F}\left\{\arcsin h\left(\frac{-I_1^{EC}(t)}{2L_1a_{s1}i_{01}(\theta_1,T,t)}\right)-\arcsin h\left(\frac{I_2^{EC}(t)}{2L_2a_{s2}i_{02}(\theta_2,T,t)}\right)\right\}$$

[0266]

$$\underbrace{-I(t)\left(\frac{L_1}{3\kappa_1^{eff}}+\frac{L_s}{3\kappa_s^{eff}}+\frac{L_2}{3\kappa_2^{eff}}+\frac{L_1}{3\sigma_1^{eff}}+\frac{L_2}{3\sigma_2^{eff}}\right)}_{Rd(T)} \quad \cdots(M4a)$$

[0267] 因此，电流估计部 120 基于模型表达式 (M4a) 俩计算电池电流密度 I(t)。更具体地说，在上式 (M3a) 中，通过与上式 (M3a) 同样地对将与过电压有关的项的电池电流密度 I(t) 替换成电化学反应电流密度 $I_1^{EC}(t)$ 和 $I_2^{EC}(t)$ 的式求解，还能够得到电流密度 I(t)。

[0268] 并且，边界条件设定部 140 如式 (36) 所示的那样使用电化学反应电流密度 $I_j^{EC}(t)$ 来设定负极 12 和正极 15 的活性物质扩散模型表达式 (M2a)、(M2b) 的边界条件。

[0269] 同样地，对考虑电容电流成分的分离时的电压 - 电流关系模型表达式 (M1b) 的变形进行说明。

[0270] 如式 (M1b) 所示，当正极和负极使用共用的活性物质模型时，用下式 (40) 表示图 20 所示的电池模型中的总电流密度 I(t)、电化学反应电流密度 $I^{EC}(t)$、以及电容 $I^C(t)$ 之间的关系。另外表示反应电流密度 j_j^{Li} 和电流密度之间的关系的式 (21') 被变换为下式 (41)。并且，与电容电流有关的上式 (37) ～ (39) 被替换成下式 (42) 和下式 (43)。

[0271] $$I(t) = I^{EC}(t)+I^C(t) \quad \cdots(40)$$

[0272] $$j^{Li}\#(\theta,t)=-\frac{I^{EC}(t)}{L} \quad \cdots(41)$$

[0273] $$I^C(t)=-C\frac{d\psi(t)}{dt} \quad \cdots(42)$$

[0274] $$\psi(t)=U(\theta,t)+\eta\#(t)$$

[0275] $$=U(\theta,t)+\frac{RT}{\alpha_aF}\arcsin h\left[\frac{-I^{EC}(t)}{2La_si_0(\theta,T,t)}\right] \quad \cdots(43)$$

[0276] 从而，当对电流 - 电压关系模型表达式 (M1b) 考虑电容电流成分的分离时，通过式 (40) ～ (43) 构成电流运算部 125，并运算反应电流密度 $I^{EC}(t)$。

[0277] 并且，电流估计部 120 中的模型表达式 (M1b) 被替换成将第二项（过电压项）的电流密度 I(t) 替换成电化学反应电流密度 $I^{EC}(t)$ 的下述的模型表达式 (M4b)。即，电流估计部 120 通过与上式 (M3a) 同样地对将上述 (M3b) 中的与过电压有关的项的电池电流密度 I(t) 替换为电化学反应电流密度 $I^{EC}(t)$ 的式进行求解，还能够得到电流密度 I(t)。

[0278] $$V(t)=U(\theta,t)$$

[0279] $$+\frac{RT}{\alpha_aF}\arcsin h\left(\frac{-I^{EC}(t)}{2L_1a_si_0(\theta,T,t)}\right)$$

[0280]

$$-I(t)\underbrace{\left(\frac{L_1}{3\kappa_1^{eff}}+\frac{L_s}{3\kappa_s^{eff}}+\frac{L_2}{3\kappa_2^{eff}}+\frac{L_1}{3\sigma_1^{eff}}+\frac{L_2}{3\sigma_2^{eff}}\right)}_{Rd(T)} \quad \cdots(M4b)$$

[0281] 接着，对考虑电容电流成分的分离时的将电压－电流关系模型表达式中的arcsinh项线性近似后的电压－电流关系模型表达式(M1c)的变形进行说明。

[0282] 首先，在正极和负极中考虑各自的活性物质模型的模型表达式(M1c)中，关于总电流密度I(t)、电化学反应电流密度$I_1^{EC}(t)$、$I_2^{EC}(t)$、以及电容电流密度$I^C(t)$之间的关系，应用上式(35)、(37)，关于反应电流密度同样能够应用上式(36)。但是，关于电压ψ(t)，代替上式(38)、(39)而应用下式(44)。

[0283]

$$\left.\begin{aligned}\psi_1(t)&=U_1\#(\theta_1,t)-Rr(\theta_1,T,t)\cdot I_1^{EC}(t)\\ \psi_2(t)&=U_2\#(\theta_2,t)-Rr(\theta_2,T,t)\cdot I_2^{EC}(t)\end{aligned}\right\} \quad \cdots(44)$$

[0284] 在此情况下，通过联立式(44)与上式(35)、(37)，同样能够求出电化学反应电流密度$I_1^{EC}(t)$、$I_2^{EC}(t)$。即，通过联立式(35)、(37)、(44)来构成图21的电流运算部125。另外，模型表达式(M1c)被变换为下式(M4c)。

[0285] $$V(t)=U_1\#(\theta_1,t)-U_2\#(\theta,t)$$

[0286] $$+\frac{RT}{2\alpha_{a1}F}\left\{\frac{-I_1^{EC}(t)}{L_1a_{s1}i_{01}(\theta_1,T,t)}-\frac{I_2^{EC}(t)}{L_2a_{s2}i_{02}(\theta_2,T,t)}\right\}-I(t)\cdot Rd(T) \quad \cdots(M4c)$$

[0287] 其结果是，在电流估计部120中，通过代替上式(M3c)而应用下式(M3c')，能够求出电流密度I(t)。

[0288] $$h[I(t)]=V(t)-U_1\#(\theta_1,t)+U_2\#(\theta,t)$$

[0289]

$$-\frac{RT}{2\alpha_{a1}F}\left\{\frac{-I_1^{EC}(t)}{L_1a_{s1}i_{01}(\theta_1,T,t)}-\frac{I_2^{EC}(t)}{L_2a_{s2}i_{02}(\theta_2,T,t)}\right\}+I(t)\cdot Rd(T) \quad \cdots(M3c')$$

[0290] 最后，对电压－电流关系模型表达式(M1d)式的考虑电容电流时的变形进行说明。

[0291] 在正极和负极应用共用的活性物质模型并且考虑电容电流的该情形中，对于电流密度I(t)、电化学反应电流密度$I^{EC}(t)$、以及电容电流 密度$I^C(t)$，有下式(45)成立。式(45)中的ψ(t)与先前的说明一样作为开路电压和极化电压之和由下式(46)给出。另外，与锂生成量相当的反应电流密度j_j^{Li}通过下式(47)利用电化学反应电流密度$I^{EC}(t)$求出。

[0292] $$I(t)=I^{EC}(t)+I^C(t)$$

[0293] $$=I^{EC}(t)-C\frac{d\psi(t)}{dt} \quad \cdots(45)$$

[0294] $\psi(t)=U(\theta,t)-Rr(\theta,T,t)\cdot I^{EC}(t)$ …(46)

[0295] $$j^{Li}\#(\theta,t)=-\frac{I^{EC}(t)}{L} \quad \cdots(47)$$

[0296] 在该情形下，通过将由式(46)定义的电压ψ(t)与式(45)联立求解，能够求出电化学反应电流密度$I^{EC}(t)$。即，通过联立式(45)、(46)来构成图21的电流运算部125。

[0297] 另外，电流估计部 120 中的电流 - 电压模型表达式 (M1d) 被替换为将模型表达式 (M1d) 的右边第二项（与极化电压有关的项）中的电流密度 I(t) 替换成电化学反应电流密度 $I^{EC}(t)$ 的模型表达式 (M4d)。因此，在电流估计部 120 中，通过代替上述式 (M3d) 而应用下式 (M3d')，能够求出电流密度 I(t)。

[0298] $V(t) = U(\theta, t) - Rr(\theta, T, t) \cdot I^{EC}(t) - Rd(T) \cdot I(t)$ … (M4d)

[0299] $$I(t) = -\frac{V(t) - U(\theta, t) + Rr(\theta, T) \cdot I^{EC}(t)}{Rd(T)} \quad \cdots (M3d')$$

[0300] 如上所述，根据实施方式 3 的二次电池的状态估计装置，由于能够将电流密度 I(t) 分离为电化学反应电流密度 $I^{EC}(t)$ 和不对电化学反应起作用的电容电流密度 $I^{C}(t)$ 来估计电池的内部活动，因此能够更高精度地估计二次电池的内部状态，具体来说为活性物质中的锂浓度分布，从而能 够提高内部状态的估计精度。另外，通过对这样的电池的内部状态估计装置和在实施方式 1 的后半部分或在实施方式 2 中说明的 SOC 估计进行组合，能够高精度地估计二次电池的充电率 (SOC)。

[0301] 另外，由于图 20 所示的双电荷层电容 19 具有温度依赖特性，因此关于在电流运算部 125 中使用的模型表达式中的电容 $C(C_1, C_2)$，通过基于实验结果等来预先生成映射图，能够通过电池参数设定部 130 根据电池温度 T 来可变地进行设定。

[0302] 在以上说明的实施方式 1 ～ 3 中，将二次电池作为锂离子电池进行了说明，但本发明的二次电池的状态估计装置对负荷的类型不特别进行限定，也同样能够应用于锂离子电池以外的其他的二次电池。例如，在镍氢电池的情况下，通过利用扩散方程式计算作为活性物质内部中的反应相关物质的质子的浓度分布，并将开路电压定义为活性物质表面的质子的函数，能够同样地应用本发明的方法。

[0303] 此外，也明确地记载以下事项：通过对由本发明的图 1 ～图 9 中所述的二次电池的内部状态估计装置执行的反应物质的浓度分布估计和本说明书所说明以外的 SOC 估计方法进行组合，也能够实现二次电池的充电率 (SOC) 估计装置。

[0304] 应当认为此次公开的实施方式在所有方面均只是例示，并非用来限制的。本发明的范围并非由上述的说明而是由权利要求书给出，与权利要求书等同的含义以及范围内的所有变更也将包括在本发明的范围内。

[0305] 产业上的实用性

[0306] 本发明的二次电池的状态估计装置能够应用于用于电源系统的二次电池，其中电源系统具有通过可充电的二次电池向负荷供电、并且根据需要在该负荷的运行过程中也可对该二次电池进行充电的结构。

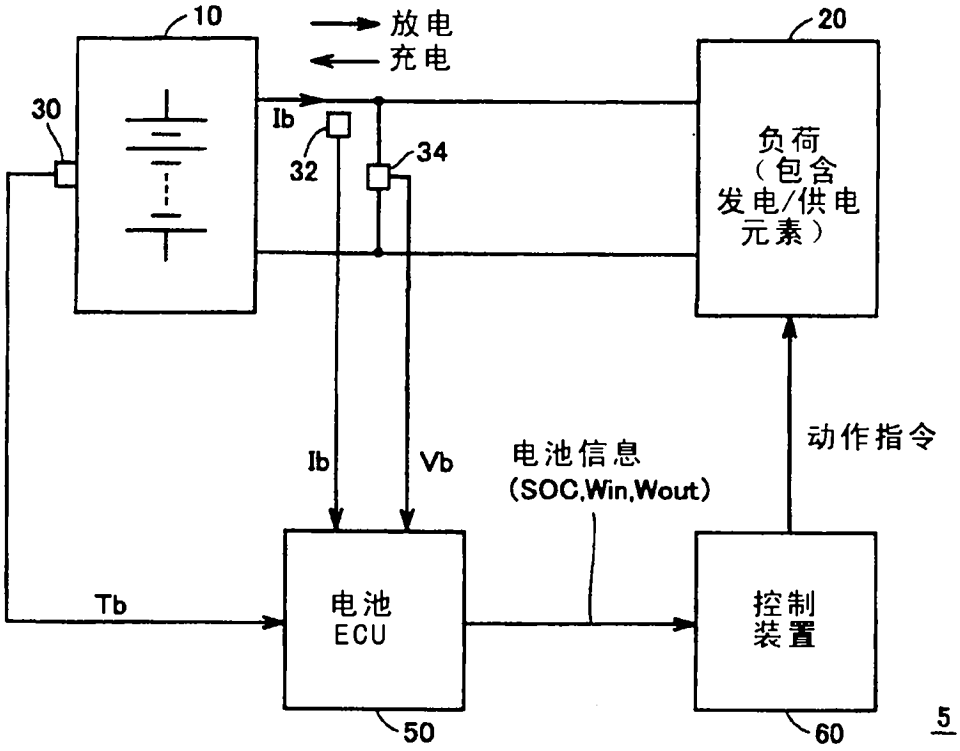

10
放电
充电
20
30
Ib
32
34
负荷
（包含
发电/供电
元素）
Ib
Vb
电池信息
(SOC,Win,Wout)
动作指令
Tb
电池
ECU
控制
装置
50
60
5

图 1

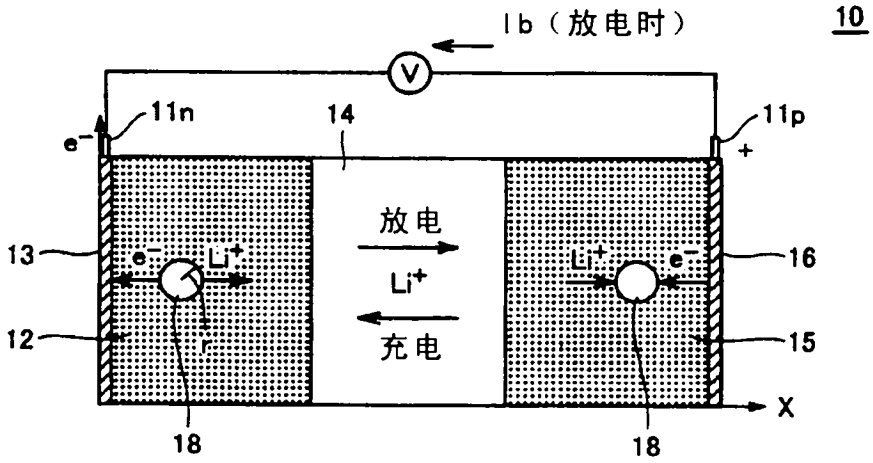

Ib（放电时）
10
V
11n
14
11p
e⁻
+
放电
13
e⁻
Li⁺
Li⁺
Li⁺
e⁻
16
12
r
15
充电
X
18
18

图 2

下标的定义	e:电解液 j=1:正极 s:活性物质 j=2:负极

c_{ej}	电解液Li浓度
c_{sj}	活性物质Li浓度
$c_{sj,max}$	边界Li浓度
c_{sej}	活性物质界面Li浓度
ϕ_{ej}	电解液电位
ϕ_{sj}	活性物质电位
T	绝对温度
j_j^{Li}	单位体积且单位时间的Li生成量（反应电流密度） $I=\int j_j^{Li}dv$
α_{aj}	电极反应j_j^{Li}的移动系数（氧化反应）
α_{cj}	电极反应j_j^{Li}的移动系数（还原反应） $a_{aj}+a_{cj}=1$
F	法拉第常数
i_{oj}	交换电流密度
η_j	电极反应j_j^{Li}的过电压
U_j	OCP（开路电压）
θ_j	活性物质界面的局部SOC $\theta_j=\frac{c_{sej}}{c_{sj,max}}$
R_f	电极表面的被膜电阻
t_+^0	Li离子传输率
D_{sj}	活性物质扩散系数
D_{ej}^{eff}	电解液有效扩散系数
a_{sj}	电极每单位体积的活性物质表面积
r_{sj}	活性物质半径
ε_{sj}	体积分率（活性物质） $\varepsilon_s+\varepsilon_e+\varepsilon_p+\varepsilon_f=1$
ε_{ej}	体积分率（电解液）
K_j^{eff}	电解液的有效离子导电率
K_{Dj}^{eeff}	电解液的扩散导电率
σ_j^{eff}	活性物质的有效导电率
I	电流密度（极板每单位表面积）
L_j	电极厚度

图 3

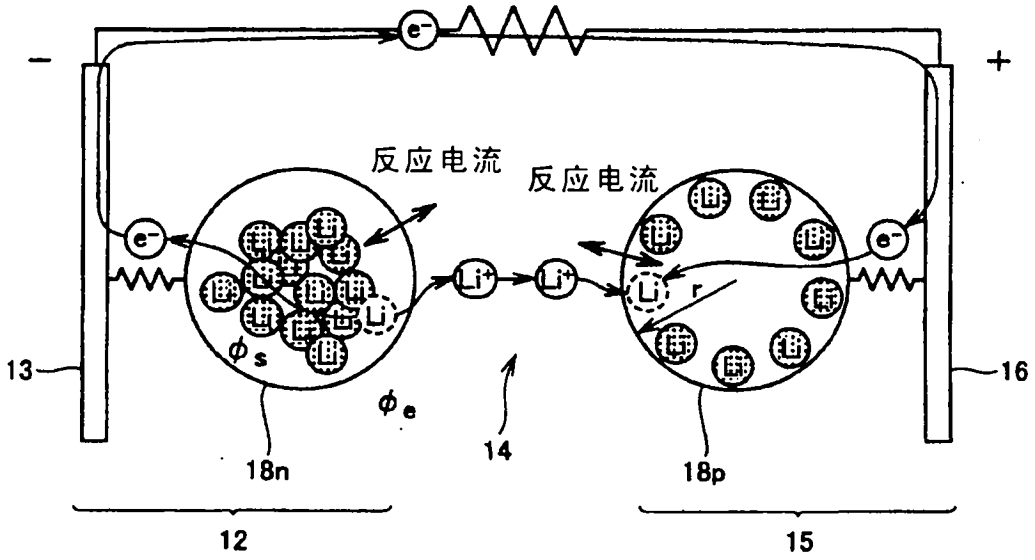

e⁻
−
+
反应电流
反应电流
e⁻
e⁻
Li⁺
Li⁺
Li
r
Li
φs
φe
13
16
14
18n
18p
12
15

图 4

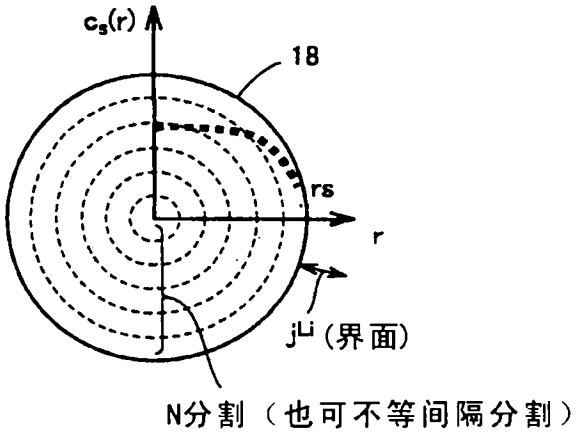

cs(r)
18
rs
r
jLi (界面)
N分割（也可不等间隔分割）

图 5

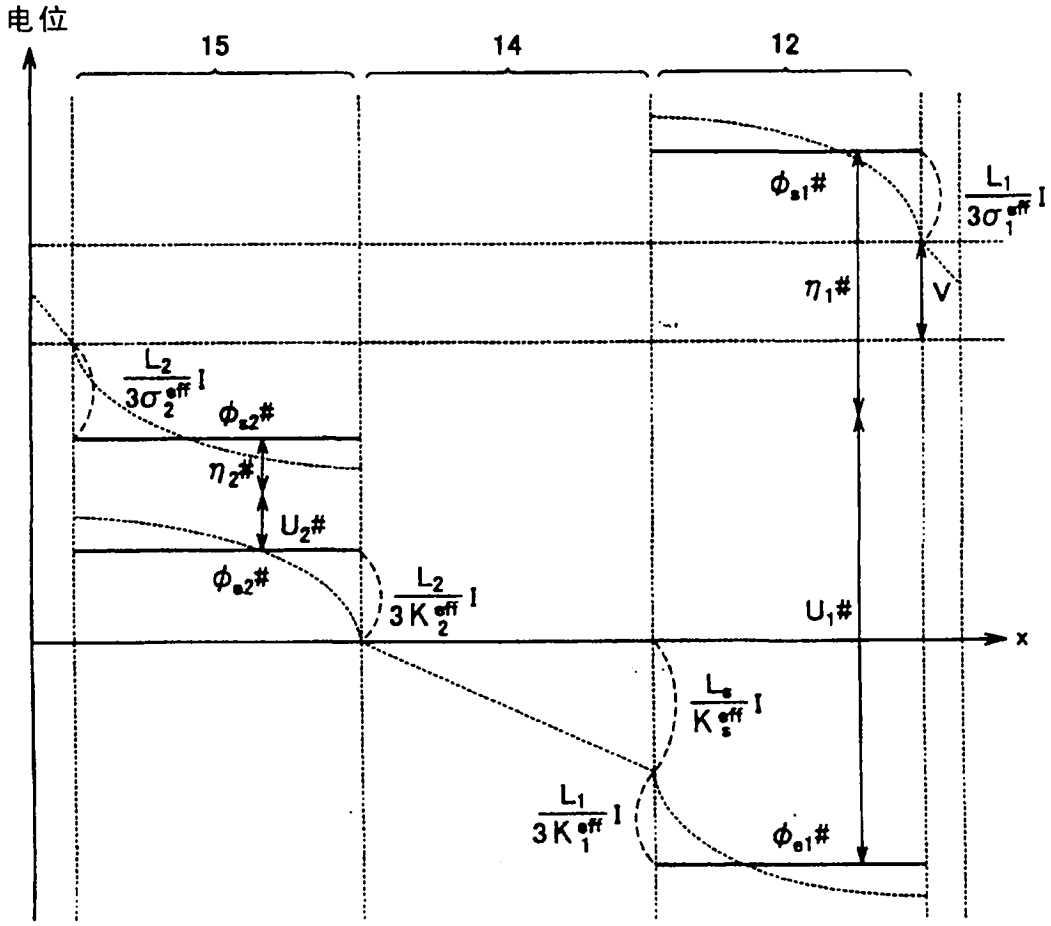

电位
15
14
12
ϕ_{s1}#
$\frac{L_1}{3\sigma_1^{eff}}I$
η_1#
V
$\frac{L_2}{3\sigma_2^{eff}}I$
ϕ_{s2}#
η_2#
U_2#
ϕ_{e2}#
$\frac{L_2}{3K_2^{eff}}I$
U_1#
x
$\frac{L_s}{K_s^{eff}}I$
$\frac{L_1}{3K_1^{eff}}I$
ϕ_{e1}#

图 6

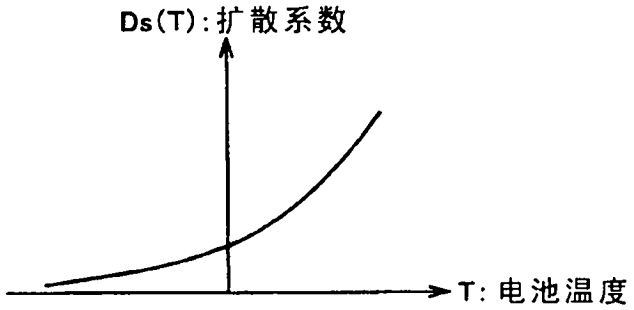

Ds(T):扩散系数
T:电池温度

图 7

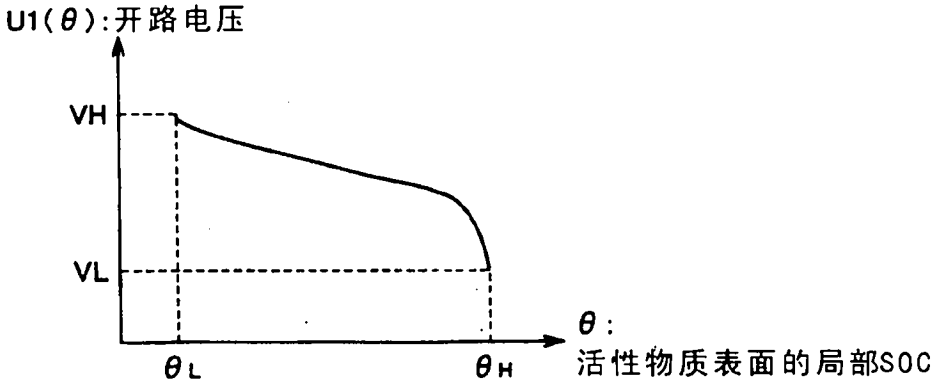


图 8A

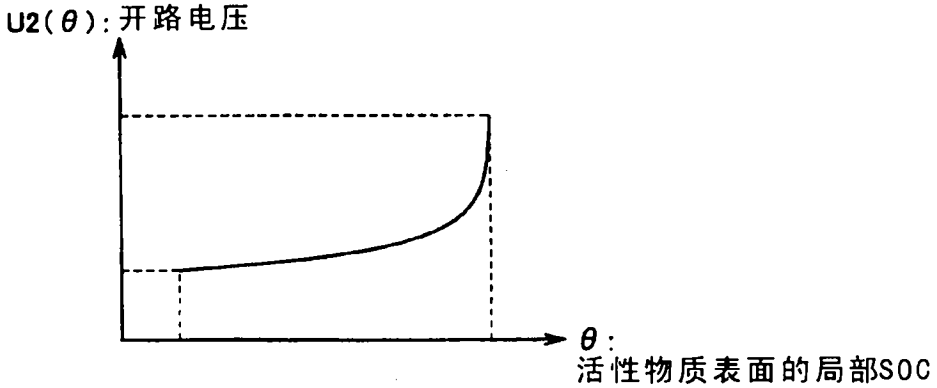


图 8B

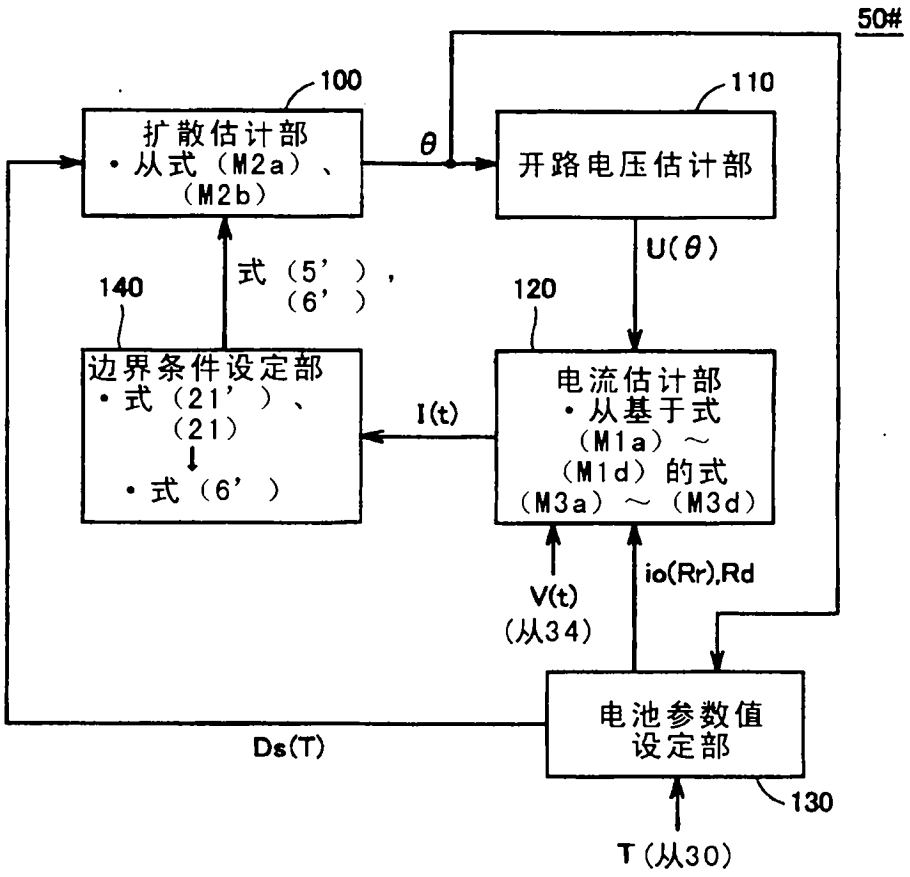

50#
100
扩散估计部
・从式（M2a）、
（M2b）
θ
110
开路电压估计部
U(θ)
式（5’），
（6’）
140
120
边界条件设定部
・式（21’）、
（21）
↓
・式（6’）
I(t)
电流估计部
・从基于式
（M1a）～
（M1d）的式
（M3a）～（M3d）
V(t)
（从34）
io(Rr),Rd
电池参数值
设定部
Ds(T)
130
T（从30）

图 9

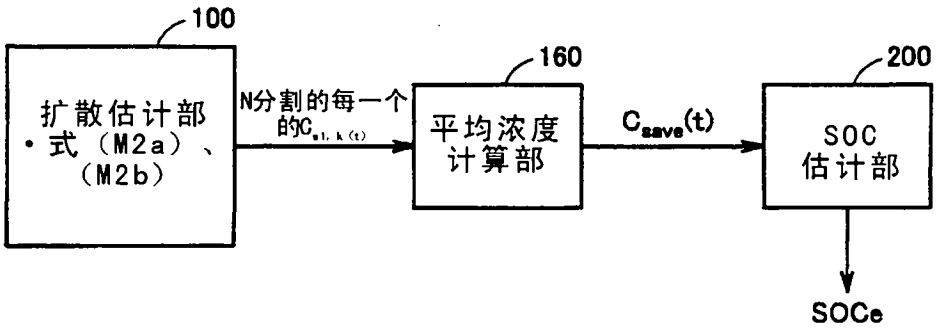

100
扩散估计部
・式（M2a）、
（M2b）
N分割的每一个
的$C_{s1,k(t)}$
160
平均浓度
计算部
$C_{save}(t)$
200
SOC
估计部
SOCe

图 10

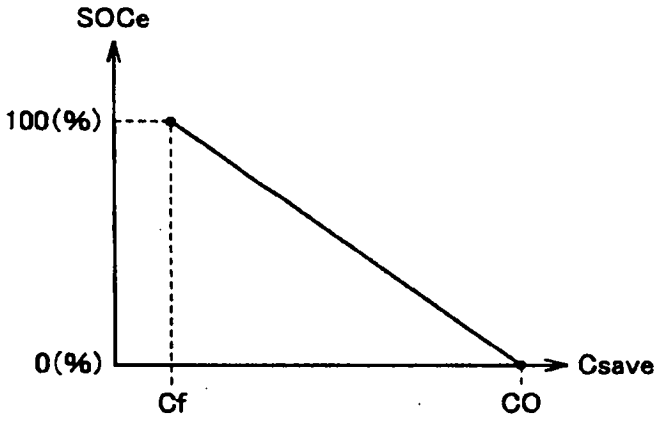


图 11

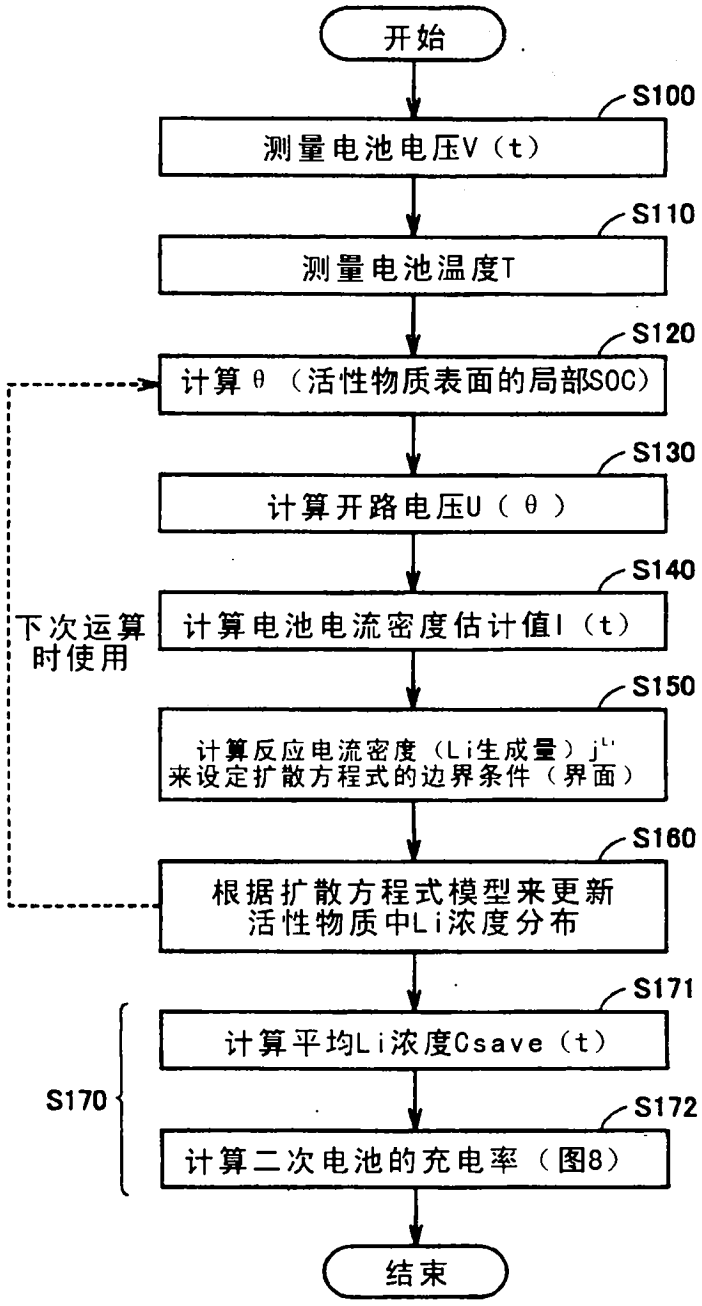

开始
S100
测量电池电压V（t）
S110
测量电池温度T
S120
计算θ（活性物质表面的局部SOC）
S130
计算开路电压U（θ）
S140
计算电池电流密度估计值I（t）
下次运算时使用
S150
计算反应电流密度（Li生成量）j
来设定扩散方程式的边界条件（界面）
S160
根据扩散方程式模型来更新
活性物质中Li浓度分布
S171
计算平均Li浓度Csave（t）
S170
S172
计算二次电池的充电率（图8）
结束

图 12

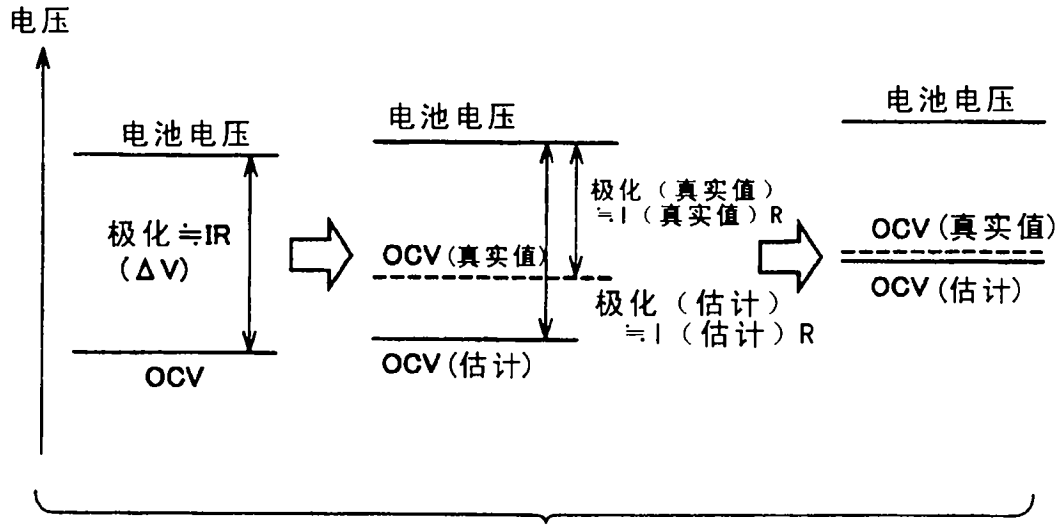

电压
电池电压
极化≒IR
(ΔV)
OCV
电池电压
OCV(真实值)
极化（真实值）
≒I（真实值）R
OCV(估计)
极化（估计）
≒I（估计）R
电池电压
OCV(真实值)
OCV(估计)

图 13

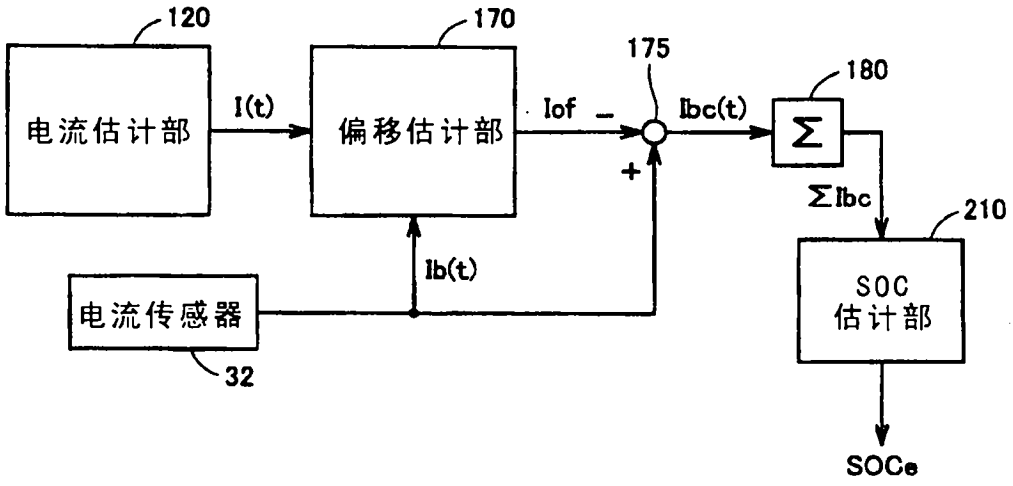

120
电流估计部
I(t)
170
偏移估计部
Iof
175
−
+
Ibc(t)
180
Σ
ΣIbc
210
SOC
估计部
SOCe
Ib(t)
电流传感器
32

图 14

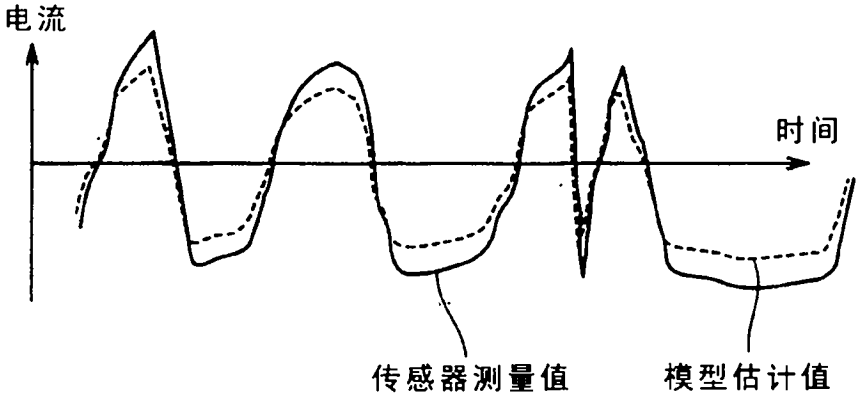

电流
时间
传感器测量值
模型估计值

图 15

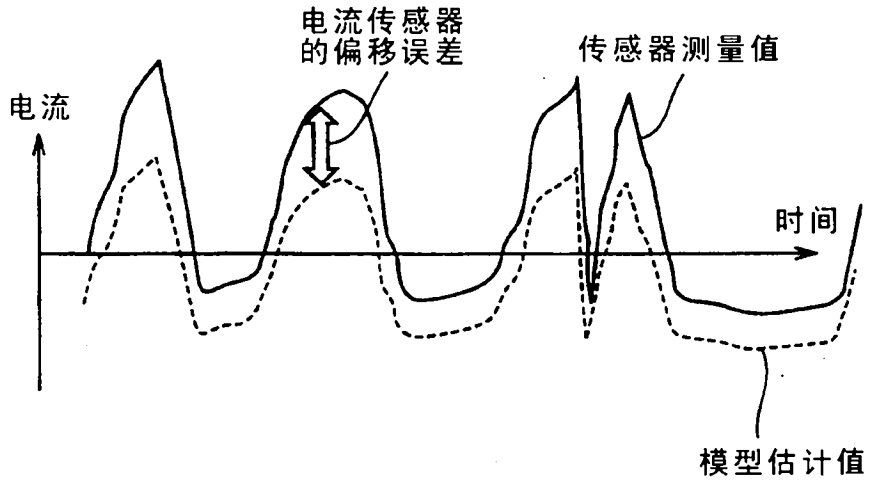

电流传感器
的偏移误差
传感器测量值
电流
时间
模型估计值

图 16

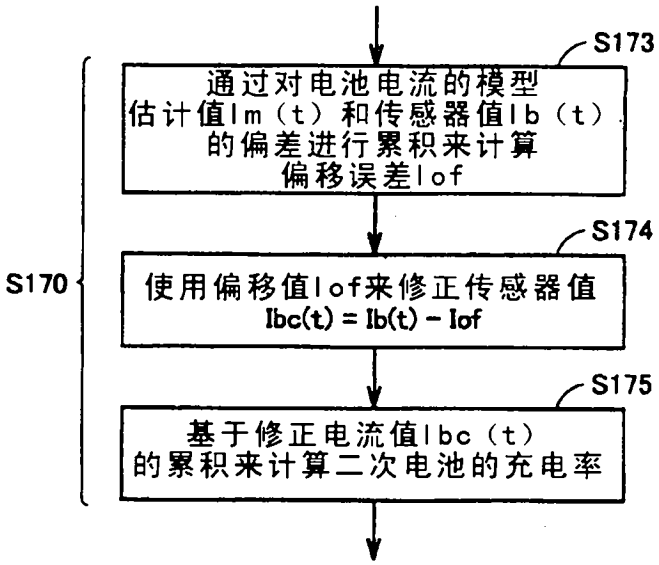

S173
通过对电池电流的模型
估计值Im（t）和传感器值Ib（t）
的偏差进行累积来计算
偏移误差Iof
S174
使用偏移值Iof来修正传感器值
Ibc(t) = Ib(t) - Iof
S175
基于修正电流值Ibc（t）
的累积来计算二次电池的充电率
S170

图 17

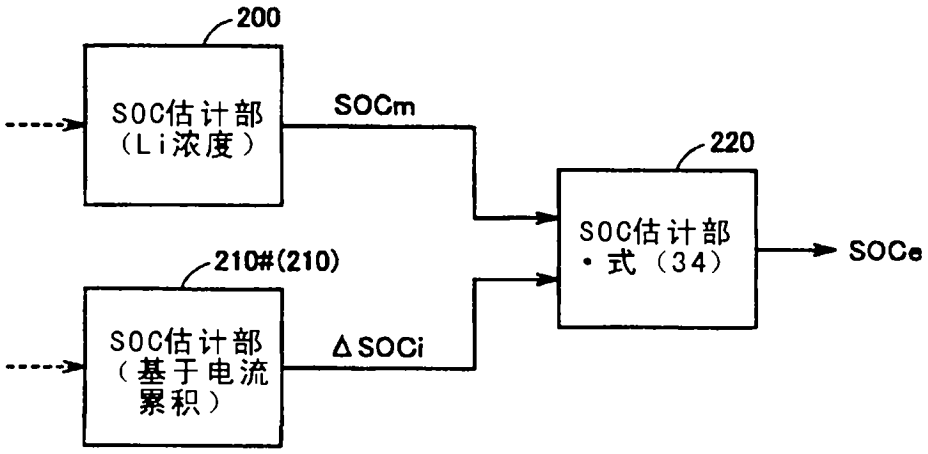

200
SOC估计部
（Li浓度）
SOCm
220
SOC估计部
·式（34）
SOCe
210#(210)
SOC估计部
（基于电流
累积）
ΔSOCi

图 18

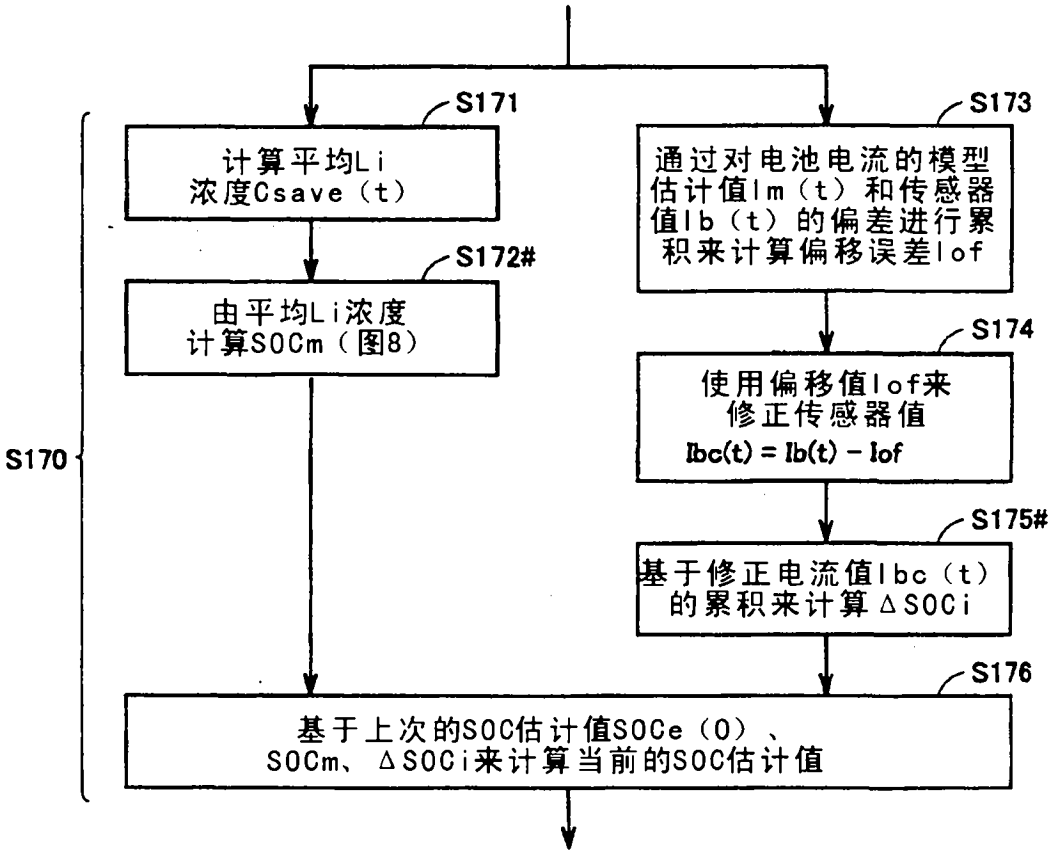

S171
计算平均Li
浓度Csave（t）
S172#
由平均Li浓度
计算SOCm（图8）
S173
通过对电池电流的模型
估计值Im（t）和传感器
值Ib（t）的偏差进行累
积来计算偏移误差Iof
S174
使用偏移值Iof来
修正传感器值
Ibc(t) = Ib(t) - Iof
S175#
基于修正电流值Ibc（t）
的累积来计算ΔSOCi
S176
基于上次的SOC估计值SOCe（0）、
SOCm、ΔSOCi来计算当前的SOC估计值
S170

图 19

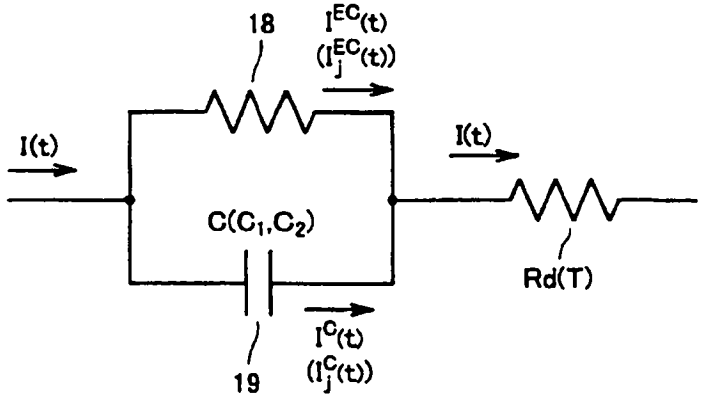

18
$I^{EC}(t)$
$(I_j^{EC}(t))$
I(t)
I(t)
C(C1,C2)
Rd(T)
$I^C(t)$
$(I_j^C(t))$
19

图 20

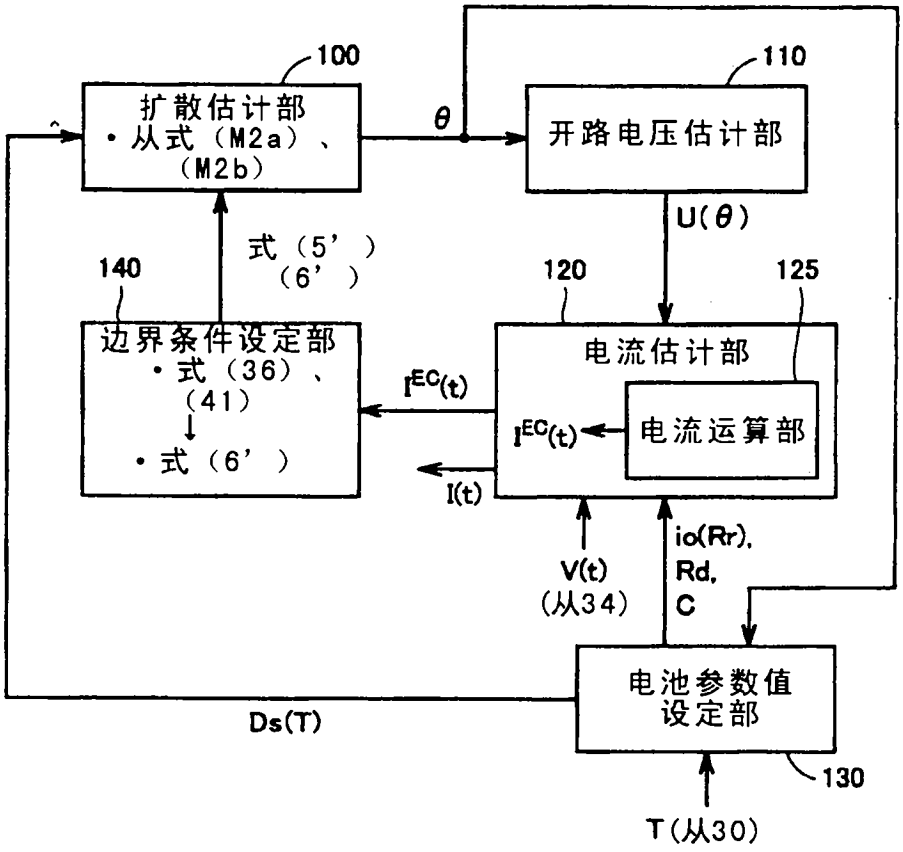

100
扩散估计部
• 从式（M2a）、（M2b）
θ
110
开路电压估计部
U(θ)
式（5’）（6’）
140
边界条件设定部
• 式（36）、（41）
• 式（6’）
120
125
电流估计部
$I^{EC}(t)$
$I^{EC}(t)$
电流运算部
I(t)
V(t)
（从34）
io(Rr),
Rd,
C
电池参数值设定部
130
Ds(T)
T（从30）

图 21