

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108512

动力电池组绝缘电阻检测与故障定位*

王 玉^{1,2} 游志宇^{1,2} 刘永鑫² 夏 跃²

(1.西南民族大学电子信息工程国家民委重点实验室 成都 610041; 2.西南民族大学电气工程学院 成都 610041)

摘要: 动力电池组在正常运行中需要符合绝缘安全性要求,以保障高压供电系统的正常运行。针对当前动力电池组绝缘电阻检测精度低、可靠性差、无法定位电池组内部绝缘故障点等问题,提出一种改进的绝缘电阻在线检测与故障点定位方法。该方法结合平衡电桥和非平衡电桥进行测量,改进绝缘电阻计算方法,能快速、准确的实现动力电池组绝缘电阻检测,并可估计电池组内部发生绝缘故障的位置。根据改进测量方案,利用微控制器、光耦继电器、差分模数转换器、数字信号隔离、隔离电源等设计了检测系统硬件及软件,实现了绝缘电阻检测与故障点定位。实验测试表明,改进的检测方法和检测系统能够准确检测出绝缘电阻值,检测误差在5%以内,绝缘故障点定位准确,为动力电池组绝缘电阻检测与故障定位提供了一种实用的方法。

关键词: 动力电池;绝缘电阻;平衡电桥;不平衡电桥;绝缘故障

中图分类号: TM934.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Insulation resistance detection and fault location for power battery pack

Wang Yu^{1,2} You Zhiyu^{1,2} Liu Yongxin² Xia Yue²

(1. Key Laboratory of Electronic and Information Engineering of State Ethnic Affairs Commission, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China; 2. College of Electrical Engineering, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to ensure the normal operation of the high-voltage power supply system, the high-voltage power battery pack needs to meet insulation safety requirements during normal operation. An improved method for on-line detection of insulation resistance and fault point location is proposed to solve the problems of low accuracy and poor reliability of insulation resistance detection of power battery packs, and inability to locate the internal insulation fault location of the battery pack. This method combines balanced bridge and unbalanced bridge to measure, improves the calculation method of insulation resistance, can quickly and accurately realize the insulation resistance detection of power battery pack, and can estimate the location of insulation fault inside the battery pack. According to the improved measurement principle, the hardware and software of the detection system are designed using microcontrollers, optocoupler relays, differential analog-to-digital converters, digital signal isolation, isolated power supplies, etc., to achieve insulation resistance detection and fault location. Experimental test show that the improved detection method and detection system can accurately detect the insulation resistance value, the detection error is within 5%, and the insulation fault point is located accurately, which provides a practical method for the insulation resistance detection and fault location of the power battery pack.

Keywords: power battery; insulation resistance; balanced bridge; unbalanced bridge; insulation fault

0 引言

社会经济的高速发展导致经济、环保、安全的能源消耗意识越来越强,高压动力电池组在纯电动汽车、混合动力系统、备用电源系统等得到了广泛应用。动力电池组一般由多个单体电池串并联而成,电池组的绝缘损坏将造成高压

漏电,严重时将造成人员、外围设备的损坏和安全事故,因此动力电池组绝缘安全至关重要。国标 GB/T 18384.1-2015^[1]规定未嵌入完整电路里的可充电储能系统(REESS)高压总正与总负对电平台(电池组外壳或系统地)的绝缘电阻除以最大工作电压不低于100 Ω/V。因此,实时在线监测高压动力电池组绝缘电阻大小和定位电池组内部故障位

收稿日期:2021-12-05

* 基金项目:西南民族大学中央高校基本科研业务费专项(2018.NQN43)资助

置至关重要,对保障高压动力电池组正常运行具有重要意义^[2]。

国内外对电池组绝缘电阻的检测方法主要有无源和有源两大类检测方法^[3-4]。无源检测主要有平衡电桥法^[5-7]、固定电阻偏置切换法^[1,8]和不平衡电桥法^[9],有源检测主要有直流电压注入法^[10-11]和低频脉冲信号注入法^[12-14]。平衡电桥法是在动力电池组的正负极两端设置两个等值电阻构建一个平衡电桥,当发生不对称绝缘故障时因电桥失去平衡而实现绝缘电阻检测。平衡电桥法结构简单易于实现,但只能实现动力电池组不对称绝缘电阻检测,无法对正负极两端同时下降的对称绝缘故障进行检测,不能确定绝缘故障发生的准确位置。固定电阻偏置切换法通过切换偏置电阻分别测出总正与总负对电平台的电压,再根据两端电压大小切入固定偏置电阻实现绝缘电阻测量。固定电阻偏置切换法是国标^[1]推荐的绝缘电阻检测方法,该方法可以准确检测电池组两端对地绝缘电阻值,但不能确定电池组内部发生绝缘故障的具体位置。文献[9]利用不平衡电桥,结合光控继电器和高精度放大器实现了绝缘电阻在线检测,但不具备绝缘故障定位。文献[11]通过直流母线注入高压直流电压实现电池绝缘电阻检测,克服了正负母线对称绝缘故障无法测量的问题。直流电压注入检测法需要通过隔离变压器给动力电池组的正负端注入直流电压,通过检测电阻的分压比来计算总正和总负对电平台的绝缘电阻。由于引入直流电压注入单元,导致电路结构复杂,且注入直流电压将影响动力电池组的供电电压稳定性。文献[12]和[13]通过注入低频交流信号对动力电池组的绝缘电阻进行检测,文献[14]通过改进低压脉冲信号注入法计算数学模型,实现了有效高精度绝缘电阻检测。但低频交流信号注入法需要脉冲信号发生电路,结构复杂,不易实现,且注入低频信号会增加动力电池组输出直流电压的纹波,影响供电质量,并对直流供电系统产生干扰。综上所述几种绝缘电阻检测方法虽能检测出电池组两端对地绝缘电阻值,但无法定位电池组内部发生绝缘故障的具体位置。本文结合平衡电桥和非平衡电桥测量法,改进绝缘电阻检测方法,提出一种改进的绝缘电阻在线检测与故障点定位方法,以实现快速、准确的动力电池组绝缘电阻检测与内部绝缘故障位置定位,为高压动力电池组绝缘电阻检测与故障定位提供一种实用的方案。

1 电桥绝缘电阻检测原理

1.1 平衡电桥检测

平衡电桥绝缘电阻检测是在动力电池组总正和总负两端与电池组系统地之间设置两个等值电阻,形成检测电路,其检测电路原理如图 1(a)所示。

图 1(a)中, R_+ 和 R_- 分别为电池组总正和总负与系统地之间的绝缘电阻。 V_+ 和 V_- 分别为电池组总正和总负与系统地之间的电压,可通过并联偏置电阻 R_0 测得。在绝缘

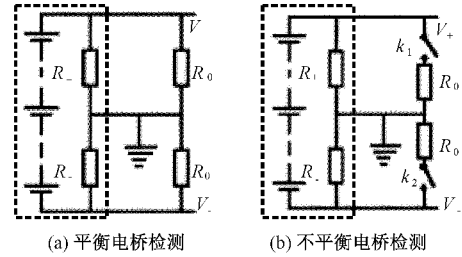


图 1 电桥法绝缘电阻检测原理

性能良好时,动力电池组 R_+ 与 R_- 无穷大,此时 $V_+=V_-$,无法计算出电池组的绝缘电阻。当电池组总正或总负出现单点接地故障时,根据检测电路原理可得方程:

$$\begin{cases} \frac{V_-}{R_0//R_+} = \frac{V_-}{R_0}, & \text{总正单点绝缘故障} \\ \frac{V_+}{R_0} = \frac{V_-}{R_0//R_-}, & \text{总负单点绝缘故障} \end{cases} \quad (1)$$

根据式(1)可解出总正和总负与系统地之间的绝缘电阻 R_+ 和 R_- 。在电池组总正和总负与系统地之间出两点接地绝缘故障时,根据检测电路原理可得方程:

$$\frac{V_+}{R_0//R_+} = \frac{V_-}{R_0//R_-} \quad (2)$$

此时无法直接求解获得绝缘电阻 R_+ 和 R_- ,需按照国标 GB/T 18384.1-2015^[1]中的测量方法进行检测。先将 R_+ 和 R_- 中绝缘电阻值较大的那个设为无穷大,然后按照式(1)进行求解。当 R_+ 和 R_- 非常接近时,绝缘电阻检测结果会比实际值偏大;当 R_+ 和 R_- 相等时,将无法求得绝缘电阻值。

1.2 非平衡电桥检测

平衡电桥检测法只适于单点绝缘故障,在多点绝缘故障时检测误差较大或无法检测,存在检测局限性。鉴于此,对平衡电桥进行改进,形成如图 1(b)所示的非平衡电桥检测电路原理。在原有固定偏置电阻支路上串联两个开关 k_1 和 k_2 ,实现偏置电阻 R_0 的接入与断开,从而实现动力电池组总正和总负与系统地之间的电压 V_+ 和 V_- 的测量,进而实现绝缘电阻检测。根据 k_1 和 k_2 闭合与断开的不同组合,可得到方程组:

$$\begin{cases} \frac{V_+}{R_0//R_+} = \frac{V_-}{R_0}, & k_1 \text{ 闭合 } k_2 \text{ 断开} \\ \frac{V'_-}{R_+} = \frac{V'_-}{R_0//R_-}, & k_1 \text{ 断开 } k_2 \text{ 闭合} \end{cases} \quad (3)$$

其中, V_+ 和 V_- 为 k_1 闭合、 k_2 断开时测得的总正和总负与系统地之间的电压, V'_+ 和 V'_- 为 k_1 断开、 k_2 闭合时测得的总正和总负与系统地之间的电压。求解式(3)可得电池组的绝缘电阻 R_+ 和 R_- 分别为:

$$\begin{cases} R_+ = \frac{V_- V'_+ R_0^2 - V_+ V'_- R_0}{V'_- (V_- + V'_- R_0)} \\ R_- = \frac{V_+ V'_- R_0 - V_- V'_+}{V (V'_+ + V'_-)} \end{cases} \quad (4)$$

非平衡电桥检测可以检测总正和总负两点绝缘故障时的绝缘电阻值,且不受两端绝缘电阻对称变化的影响。

2 平衡-非平衡绝缘电阻检测与故障定位

动力电池组绝缘故障点定位有利于故障电池组的维护与检修,其绝缘故障往往起始于单点绝缘电阻的降低,从而导致动力电池组发生绝缘故障。因此,检测动力电池组绝缘电阻值,并确定电池组单点绝缘故障位置,为防止绝缘故障恶化提供定位信息有利于及时解决故障,避免损失。平衡电桥和非平衡电桥绝缘电阻检测法仅能检测出绝缘电阻值大小,无法确定动力电池组内部绝缘故障的位置。为了实现在检测绝缘电阻的同时有效定位单点绝缘故障位置,本文利用平衡电桥和非平衡电桥构建了如图 2 所示的平衡-非平衡绝缘电阻检测与故障定位电路原理。设电池组总负端为位置 0, R_x 表示第 x 个单体电池正极与电平台间的绝缘电阻值; R_0 、 R_1 、 R_2 、 R_3 分别为引入的测量电阻,且 $R_2=R_3$ 。 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 为测量控制切换开关。

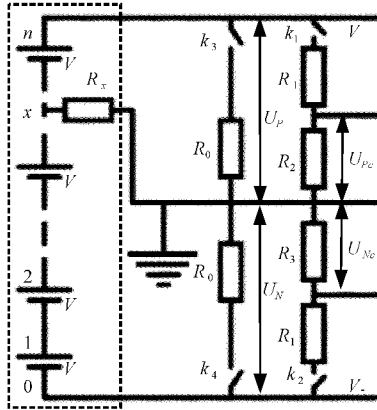


图 2 平衡-非平衡绝缘电阻检测与故障定位原理

根据国标 GB/T 18384.1-2015^[1] 规定,当发生绝缘故障时,电池组绝缘故障电阻值远小于各点的正常绝缘电阻值和测量电阻值。设单体电池电压为 V ,在电池组第 x 个单体电池处发生绝缘故障时,利用节点电流、电路电压平衡关系建立对应的 KCL、KVL 方程,进而实现测量。

断开 k_3 、 k_4 , 闭合 k_1 、 k_2 , 利用平衡电桥原理可测量出电池组总正、总负对电平台的电压值 U_p 、 U_N , 再根据电路电压平衡关系,可得:

$$\begin{cases} U_p = \frac{U_{Pc}}{R_2}(R_1 + R_2) \\ U_N = \frac{U_{Nc}}{R_3}(R_1 + R_3) \\ \left(\frac{U_{Nc}}{R_3} - \frac{U_{Pc}}{R_2}\right)R_x + U_N = xV \end{cases} \quad (5)$$

其中, U_{Pc} 、 U_{Nc} 分别为测量电阻 R_2 、 R_3 上的测量值。

当 $U_{Pc} > U_{Nc}$ 时, 闭合 k_3 、断开 k_4 , 形成不平衡测量电桥, 此时:

$$\begin{cases} U'_p = \frac{U'_{Pc}}{R_2}(R_1 + R_2) \\ U'_N = \frac{U'_{Nc}}{R_3}(R_1 + R_3) \\ \left(\frac{U'_{Nc}}{R_3} - \frac{U'_p}{(R_1 + R_2)/R_0}\right)R_x + U'_N = xV \end{cases} \quad (6)$$

当 $U_{Pc} \leq U_{Nc}$ 时, 闭合 k_4 、断开 k_3 , 形成不平衡测量电桥, 此时:

$$\begin{cases} U'_p = \frac{U'_{Pc}}{R_2}(R_1 + R_2) \\ U'_N = \frac{U'_{Nc}}{R_3}(R_1 + R_3) \\ \left(\frac{U'_{Nc}}{(R_1 + R_3)/R_0} - \frac{U'_{Pc}}{R_2}\right)R_x + U'_N = xV \end{cases} \quad (7)$$

其中, U'_p 、 U'_N 分别是在 k_3 或 k_4 闭合时电池组正端、负端对电平台电压, U'_{Pc} 、 U'_{Nc} 分别是在 k_3 或 k_4 闭合时测量电阻 R_2 、 R_3 上测得的电压值。

当 $U_{Pc} > U_{Nc}$ 时, 利用式(5)与(6) 可得:

$$\begin{cases} R_x - \frac{R_0(R_1 + R_2)(U'_{Nc} + U_{Nc})}{R_0(U_{Nc} - U_{Pc} - U'_{Nc}) + (R_0 + R_1 + R_2)U'_{Pc}} \\ x = \frac{(R_0 + R_1 + R_2)(R_1 + R_2)U_{Nc}U'_{Pc} - R_0(R_1 + R_2)U_{Pc}U_{Nc}}{R_2[R_0(U_{Nc} - U_{Pc} - U'_{Nc}) + (R_0 + R_1 + R_2)U'_{Pc}]}V \end{cases} \quad (8)$$

当 $U_{Pc} \leq U_{Nc}$ 时, 利用式(5)与(7) 可得:

$$\begin{cases} R_x - \frac{R_0(R_1 - R_2)^2(U'_{Nc} - U_{Nc})}{R_0(R_1 + R_2)(U_{Nc} - U_{Pc} + U'_{Nc}) - R_2(R_0 + R_1 + R_2)U'_{Nc}} \\ x = \frac{R_0(R_1 - R_2)^2(U'_{Nc}U_{Nc} - U_{Nc}U'_{Pc} - U_{Nc}U'_{Pc}) - R_2(R_1 - R_2)(R_0 + R_1 + R_2)U'_{Nc}U'_{Nc}}{R_2[R_0(R_1 + R_2)(U_{Nc} - U_{Pc} - U'_{Nc}) - R_2(R_0 + R_1 + R_2)U'_{Nc}]}V \end{cases} \quad (9)$$

根据式(8)或(9), 只需检测测量电阻在平衡和非平衡条件下的电压, 再代入对应公式即可计算出对应的绝缘电阻值 R_x 和发生绝缘故障的位置 x 。为保证绝缘电阻检测精度, 测量电阻 R_0 、 R_1 、 R_2 、 R_3 需采用低温漂、高精度电阻。

3 检测系统设计

根据平衡-非平衡绝缘电阻检测与故障定位原理, 测量过程需要对测量电阻和偏置电阻进行切换, 实现不对称测量, 进而根据公式计算获得绝缘电阻值和故障点位置。为有效抑制共模噪声和高压电池组对测量系统的干扰, 采用信号隔离技术、差分信号采样技术、电源隔离技术等实现绝缘电阻与故障定位检测^[16], 以增强测量系统的抗干扰能力, 提高检测可靠性与稳定性。

3.1 检测硬件设计

为增强测量电路系统的稳定性与抗干扰能力, 与动力电池组总正、总负相连的信号调理与采样部分供电电源应与微控制器测量控制电路供电电源隔离, 以避免功率侧电路的浪涌、波动、干扰等对测量控制系统产生影响。电源系统采用隔离 DC/DC 电源模块 B0505S-1WR 对供电电源进

行隔离变换,实现两侧供电电源的隔离,其供电电源电路原理如图 3 所示。

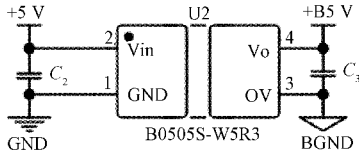


图 3 供电电源隔离变换电路原理

在测量过程中,需要对测量电阻和偏置电阻进行切换。为实现测量过程自动切换,采用高速光耦继电器 AQV258 实现图 2 中的电子开关 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 ,电路原理如图 4 所示。MCU_ONOFF 为微控制器输出的开关控制信号,其通过 Q1 实现对光耦继电器 U1 的开通与关断控制,进而实现电子开关 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 的控制。K₊、K₋ 为电子开关 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 的两个连接端点,分别与电路控制点两端连接。

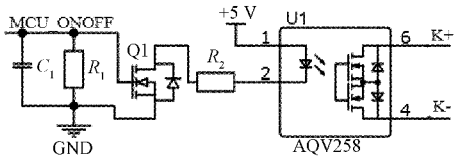


图 4 光耦继电器电子开关原理

根据图 2 设计的绝缘电阻检测与故障定位电路如图 5 所示。 V_+ 、 V_- 接电池组的总正、总负,测量电阻 R_{12} 、 R_{13} 用于对其进行分压检测,将其转换成模数转换器 ADS1147 允许的电压输入范围。ADS1147 是带有 SPI 通信接口的 16 位、2 ksp/s 差分模数转换器,其 SPI 接口信号通过 ADUM1200 和 ADUM1201 实现隔离。隔离后的信号再与微控制器 MCU 的 SPI 接口连接,从而实现了对模数采样转换的隔离与数据采样。

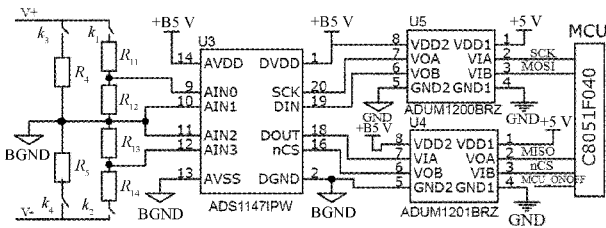


图 5 绝缘电阻检测与故障定位电路原理

微控制器 C8051F040 集成了 CAN 控制器,可将检测的绝缘电阻值及故障定位信息输出,为外部监控系统提供测量数据。集成 CAN 控制器仅实现了收发逻辑及控制协议,还需外接收发器才能实现 CAN 通信,设计的 CAN 通信收发接口电路如图 6 所示。收发器采用通信速率高、抗干扰能力强和可靠性高的 SN65HVD230 实现,CANTX、CANRX 与 MCU 的 CAN 接口连接,CANH、CANL 分别与 CAN 通信接口输出端口连接。

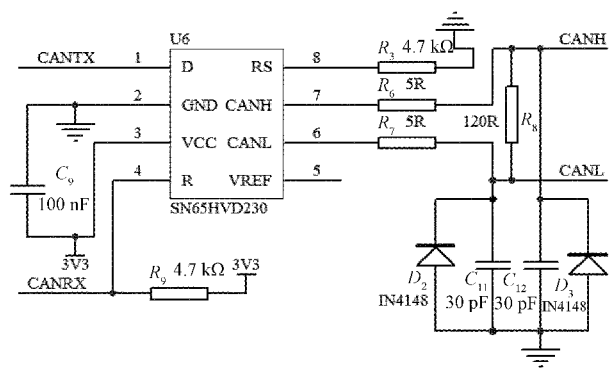


图 6 CAN 通信接口原理

3.2 检测软件设计

绝缘电阻检测与故障诊断采用 C8051F040 微控制器作为系统的主控制器,并基于模块化程序设计思想建立了系统初始化设置(包括系统资源初始化配置、SPI 初始化配置、电子开关控制初始化配置、CAN 通信参数配置)、ADS1147 初始化设置、上电自检、绝缘电阻检测、故障点定位计算、测量结果输出等功能步骤,检测程序流程如图 7 所示。

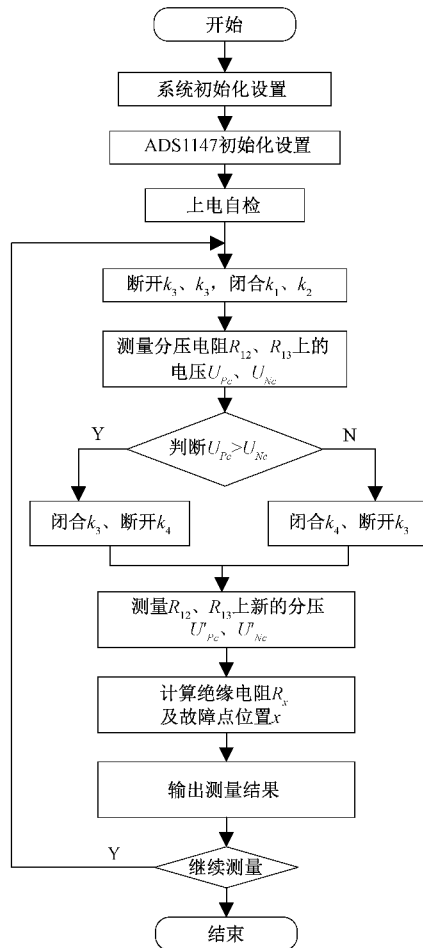


图 7 检测程序流程

在动力电池组绝缘电阻检测启动后,检测系统首先对主控制器进行硬件初始化设置、ADS1147 采样设置、上电自检,待检测系统正常启动后方可进行绝缘电阻检测和故障定位计算。检测时先闭合 k_1 、 k_2 ,断开 k_3 、 k_4 ,利用平衡电桥原理测量出电池组总正、总负对电平台分压电阻 R_{12} 、 R_{13} 的电压值 U_{Pc} 、 U_{Nc} ,随后根据式(5)计算出电池组总正、总负对电平台电压值。再根据 U_{Pc} 、 U_{Nc} 的大小控制电子开关 k_3 或 k_4 并入偏置电阻,构成非平衡检测电桥,并再次测量出电池组总正、总负对电平台分压电阻 R_{12} 、 R_{13} 的电压值 U'_{Pc} 、 U'_{Nc} ;最后根据 U_{Pc} 、 U_{Nc} 的大小利用计算式(8)或(9)进行绝缘电阻计算和故障点位置计算,最终实现动力电池组绝缘电阻检测与故障点定位,并将检测结果通过 CAN 通信接口输出。

4 系统测试与分析

为了对动力电池组平衡-非平衡绝缘电阻检测与故障定位系统进行测试验证,利用设计的检测硬件及控制软件,构建了实验测试平台。测试电池组采用 14 节标称值为 3.7 V、容量为 5.3 Ah 的低温高性能 Boston Swing 动力锂电池构成电池组,将动力电池组的总正、总负与检测硬件连接,搭建的实验平台如图 8 所示。启动检测后,系统自动实时在线检测绝缘电阻值和定位绝缘故障位置,并将检测信息通过 CAN 通信接口输出。

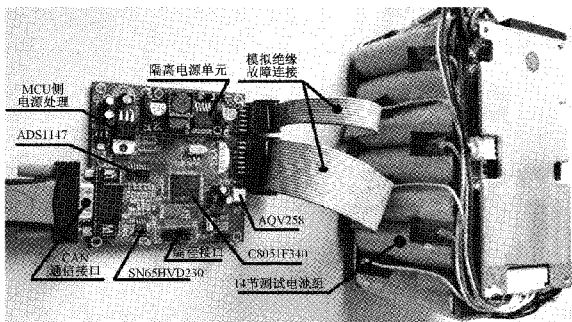


图 8 实验测试平台

测试平台将电压采样检测地 BGND 与电池组电平台连接在一起,并将电池组中每个单体电池正极引出,再与一个电阻串联接入检测系统,用于模拟电池组内部单点接地故障。在测试过程中,手动将模拟绝缘故障电阻逐一接入电池组的电平台(BGND),产生单点绝缘故障,并利用设计的检测系统进行实验测试。测试时分别接入的模拟绝缘故障电阻为 10、50、100、1 000 k Ω ,检测结果数据如表 1 所示。

从表 1 测试结果可知,接入 10 k Ω 模拟绝缘故障时测试误差低于 5%,接入 50 k Ω 模拟绝缘故障时测试误差低于 2%,接入 100 k Ω 模拟绝缘故障时测试误差低于 2%,接入 1 000 k Ω 模拟绝缘故障时测试误差低于 1%,实现了高精度绝缘故障在线检测。接入模拟单点绝缘故障时,检测系统均能准确定位发生绝缘故障的位置,实现了绝缘电阻内部单点绝缘故障定位。

表 1 绝缘电阻检测及故障定位测试结果

模拟故障 位置 x	接入模拟绝缘电阻/k Ω				故障定位 位置 x
	10	50	100	1 000	
0	9.64	50.02	99.87	998.68	0
1	9.86	50.11	100.15	997.85	1
2	9.78	49.47	99.57	997.99	2
3	9.68	49.82	99.43	1 001.12	3
4	10.12	49.77	100.21	1 002.34	4
5	9.56	49.68	99.35	998.65	5
6	9.79	49.55	99.34	1 001.78	6
7	9.89	49.23	99.38	999.87	7
8	9.74	49.91	99.54	999.78	8
9	9.92	50.08	100.21	1 002.02	9
10	10.21	49.48	99.63	999.94	10
11	9.81	49.35	99.7	1 001.81	11
12	9.95	49.59	99.69	999.74	12
13	9.58	50.12	99.87	998.83	13
14	9.92	49.81	100.18	1 000.15	14

5 结 论

为实现动力电池组绝缘电阻精确检测与绝缘故障定位,在充分分析平衡电桥和非平衡电桥绝缘电阻检测的基础上,提出了一种改进的平衡-非平衡绝缘电阻在线检测与故障点定位方法,以实现绝缘电阻检测与故障定位。通过对平衡-非平衡绝缘电阻检测原理分析,提出了改进计算方法,推导出绝缘电阻与故障位置计算公式。根据检测原理设计了检测系统硬件及软件,最终实现了绝缘电阻与故障定位检测系统。实验测试表明改进的检测方法和检测系统能够准确检测出动力电池组的绝缘电阻值,检测误差在 5% 以内,绝缘故障点定位准确,为动力电池组绝缘电阻检测与故障定位提供了一种实用的检测方案,以满足动力电池组绝缘电阻检测与故障定位的应用需求。

参考文献

- [1] GB/T 18384.1-2015. 电动汽车安全要求第 1 部分:车载可充电储能系统(REESS)[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [2] 徐佳宁,梁栋滨,魏国,等. 串联电池组接触电阻故障诊断分析[J]. 电工技术学报,2017,32(18):106-112.
- [3] 陈照添,刘成沛. 电动汽车电池组内部绝缘故障研究[J]. 邵阳学院学报(自然科学版),2020,17(4):23-30.
- [4] 孙克亮,雷小军,程思. 基于交流注入的电动汽车绝缘检测系统设计[J]. 国外电子测量技术,2018,37(7):127-131.
- [5] JIANG J H, JI H. Study of insulation monitoring device for dc system based on multi-switch combination[C]. 2nd

- International Symposium on Computational Intelligence and Design(ISCID), Changsha, 2009:429-433.
- [6] 尹会春. 基于电桥法的电动汽车动力电池组绝缘监测系统研究[D]. 长沙:湖南大学, 2018.
- [7] 郭兴强, 党政, 纪哲夫, 等. 变电站直流系统接地故障解析及新型检测方法的研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(3):81-85.
- [8] 张超, 杜博超, 崔淑梅, 等. 电动汽车高压系统绝缘状态在线监测方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(12): 2657-2663.
- [9] 申永鹏, 刘安康, 崔光照, 等. 不平衡电桥电动汽车绝缘电阻在线检测系统设计[J]. 轻工学报, 2018, 33(6): 82-91.
- [10] 张向文, 高冠. 电动汽车动力电池绝缘电阻实时在线监测系统[J]. 吉林大学学报(工学版), 2017, 47(5): 1395-1402.
- [11] 周晨, 胡社教, 沙伟, 等. 电动汽车绝缘电阻有源检测系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(5):409-414.
- [12] 姜雨, 沙立民, 任谊. 基于低频信号法的电动汽车绝缘监测方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(11): 25-28.
- [13] 张志雄, 李小鹏. 电动汽车绝缘电阻检测方法研究[J]. 天津职业技术师范大学学报, 2018, 28(3):47-51.
- [14] 黄雨龙, 陈振斌, 崔相雨, 等. 电阻绝缘检测中低压脉冲信号注入法的算法改进[J]. 海南大学学报(自然科学版), 2020, 38(1):13-19.
- [15] 董海洋, 杨玉新, 罗羽, 等. 基于 STM32 的电动汽车绝缘电阻检测系统设计[J]. 电子设计工程, 2019, 27(19):180-183,188.

作者简介

王玉, 硕士, 讲师, 主要研究方向为电力系统稳定及其控制、电池管理与储能技术。

E-mail:wangyu@swun.edu.cn

游志宇, 博士, 讲师, 主要研究方向为新能源技术及其应用、能源变换与智能控制。

E-mail:youzhiyu@swun.edu.cn