质子交换膜燃料电池堆输出电流调节装置设计

韩冬林，徐鑫，王庆桦，陈愚

（天津中德应用技术大学，天津300350）

摘要：针对车用质子交换膜燃料电池关键部件膜电极的劣化模式，提出了一种基于2个电流调节器协同工作的燃料电池堆输出电流控制方法，采用由燃料电池主控单元根据车辆的运行工况和电池堆的运行状态，协同控制2个电流调节器的电流方向和平均电流值，实时优化调整燃料电池堆输出电流和动力电池组充放电电流的配比，能够有效解决膜电极高电位和电位循环的问题。

质子交换膜燃料电池具有操作温度低、比能量高、无污染、启动速度快等特点，被认为是电动汽车、固定发电站等的首选能源[1]，除了成本因素之外，燃料电池堆的寿命是制约燃料电池发动机汽车商业化的重要影响因素[2]。通过质子交换膜燃料电池汽车的示范运行，发现车用燃料电池堆关键部件膜电极的劣化模式主要有以下四种[3]：（1）频繁地启动停止引起的质子交换膜电极高电位造成催化剂碳载体的腐蚀；（2）反复加减速引起的质子交换膜电极电位循环造成催化剂铂颗粒粗大化；（3）低负荷运行导致质子交换膜分解；（4）低温循环所伴随的胀缩造成质子交换膜电极机械损伤。

为了解决上述劣化模式（1）和模式（2）中的膜电极高电位和膜电极电位循环的问题，本文设计了一种用于质子交换膜燃料电池堆的电流调节装置，采用在燃料电池堆与电机驱动器直流母线之间、动力电池组与电机驱动器直流母线之间分别加入电流调节器的控制方法，由燃料电池主控单元同时协同控制2个电流调节器的运行状态，根据车辆的实际运行工况和燃料电池堆的实际运行状态，实时优化调整燃料电池堆输出电流和动力电池组充放电电流的配比，以达到使燃料电池堆关键部件膜电极单体工作电压能够平衡在最佳工作点附近的控制目标，从而缓解由于车辆频繁启停和反复加减速所引起的膜电极性能衰减，提升车用工况条件下质子交换膜燃料电池堆的工作寿命。

1系统构成

本文设计的质子交换膜燃料电池堆电流调节装置的系统构成如图1所示。

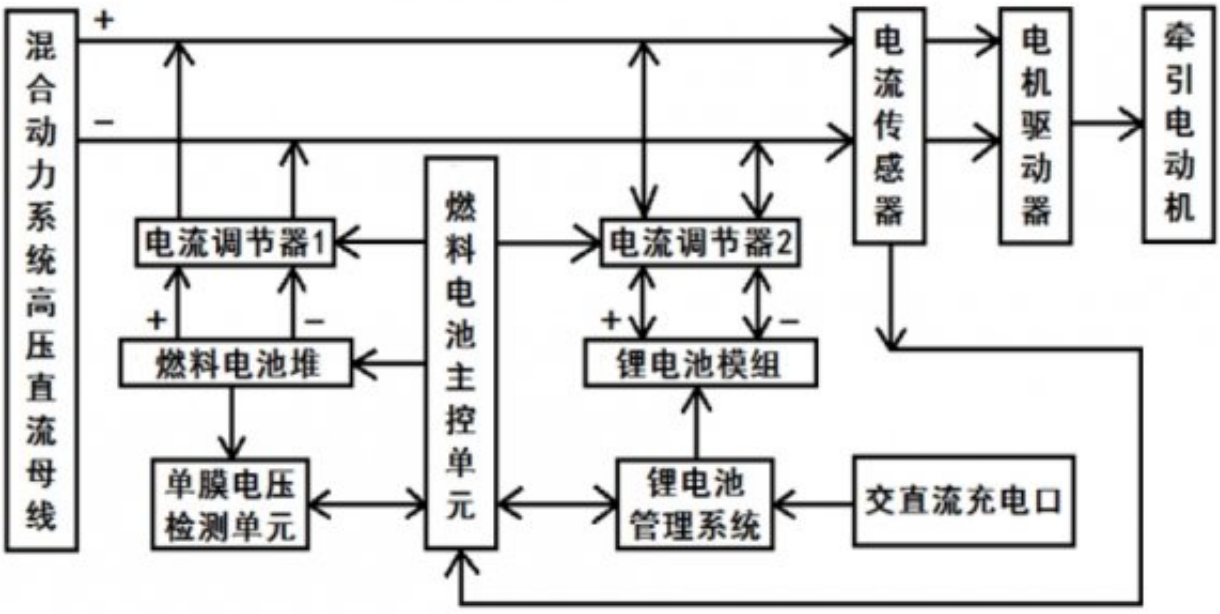

图 1　质子交换膜燃料电池堆电流调节装置系统框图

如图1所示，质子交换膜燃料电池堆主控单元作为电流调节装置的主控制器，燃料电池主控单元根据电机驱动器的输入电流和燃料电池堆的温度、压力传感器信号，计算燃料电池堆输出电流和动力电池组充放电电流数值，通过在燃料电池堆与电机驱动器直流母线之间加入电流调节器1，在锂离子动力电池组与电机驱动器直流母线之间分别加入电流调节器2，其中，电流调节器1为单向电流调节器，其电流方向只能从燃料电池堆流向电机驱动器直流母线，电流调

节器2为双向电流调节器，其电流方向可以在锂电池模组和电机驱动器直流母线之间双向变换。燃料电池主控单元的功能如下：（1）负责控制燃料电池堆、电流调节器1、电流调节器2的运行状态；（2）读取电机驱动器直流母线上的电流传感器的信号数据；（3）通过数据总线实现与单膜电压检测单元、锂电池管理系统之间的双向数据通讯功能。

单膜电压检测单元负责读取质子交换膜燃料电池堆中每一个膜电极单体的电压数据，并通过数据总线上报给燃料电池主控单元。

质子交换膜燃料电池膜电极单体的理想输出电压计算如式（1）所示[4]：

$$U_o = E_o + \frac{R \times T}{2F} \ln \frac{P_{H_2} \times \sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O}} \quad (1)$$

式中：P_{H2}、P_{O2}、P_{H2O} 分别为氢、氧和水蒸气的压力；E_O 为燃料电池膜电极单体的理想标准电动势；R 为通用气体常数；T 为燃料电池膜电极单体的工作温度；F 为法拉第常数[4]。质子交换膜燃料电池堆中膜电极单体电压的均衡性直接反映并影响整个燃料电池堆的性能和寿命[5]，因此本文设计的燃料电池主控单元需要通过数据总线读取单膜电压检测单元中的膜电极单体电压实时数据，并作为燃料电池堆运行状态的判定依据。

2硬件电路设计

因篇幅所限，本文只给出装置系统框图中的电流调节器1和电流调节器2的电路原理图，如图2所示。

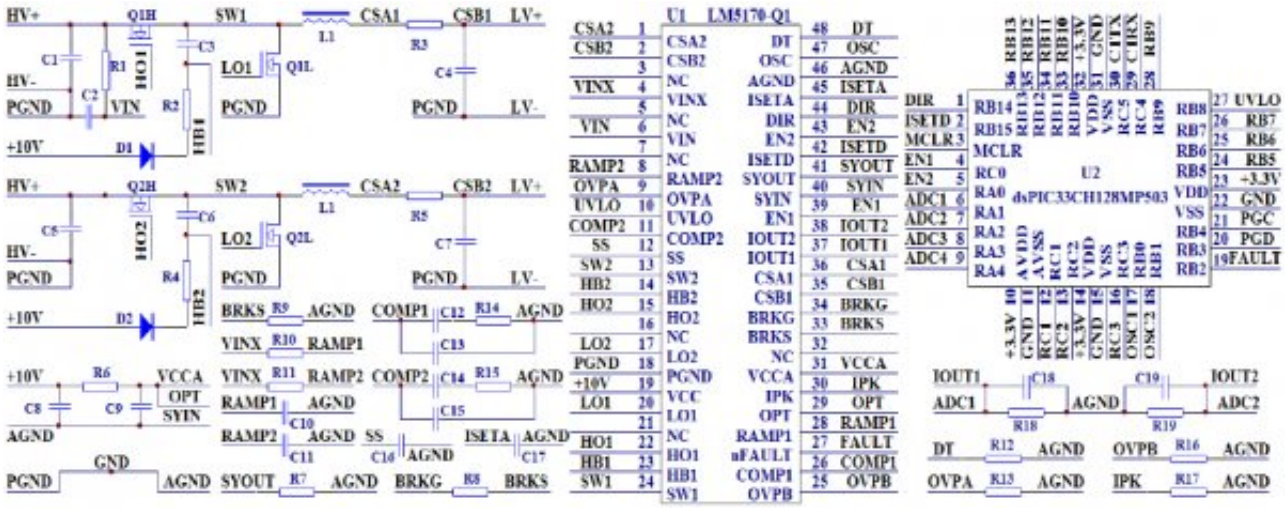

图 2　电流调节器电路原理图

图2中本设计采用TI公司的LM5170-Q1芯片作为双向电流控制器，并采用MICROCHIP公司的dsPIC33CH128-MP503双核数字信号控制器作为主CPU，其中LM5170-Q1芯片内部集成了采用180度交错运行方式的两相Buck-Boost转换器，单个LM5170-Q1芯片可以实现高达60A的双向电流控制功能[6]，LM5170-Q1芯片的DIR输入管脚用于控制高压端口HV和低压端口LV之间的电流方向，ISETD输入管脚用于设定高压端口HV和低压端口LV之间的平均电流值，EN1、EN2输入管脚用于允许/禁止芯片内部的2相Buck-Boost转换器工作。dsPIC33CH128MP503芯片从内核通过RC0、RA0输出允

许/禁止信号给LM5170-Q1芯片的EN1、EN2管脚，通过RB14输出电流方向控制信号给LM5170-Q1芯片的DIR管脚，并通过RB15输出PWM脉冲调节信号给LM5170-Q1芯片的ISETD管脚，通过调节PWM脉冲信号的占空比来控制LM5170-Q1芯片内部的Buck-Boost转换器平均电流值。图2所示的电流调节器电路可以工作在单向或双向模式，由dsPIC33CH128MP503芯片控制多相双向电流控制器LM5170-Q1芯片，实现单向或双向电流控制调节功能。dsPIC33CH128MP503芯片的主内核通过C1TX、C1RX管脚实现与燃料电池主控单元之间的CAN总线通讯功能，电流调节器1和电流调节器2通过CAN总线接收燃料电池主控单元发来的电流方向命令数据和平均电流设定值数据。

3控制软件设计

本文所设计的质子交换膜燃料电池堆电流调节装置，其控制程序流程如图3所示。

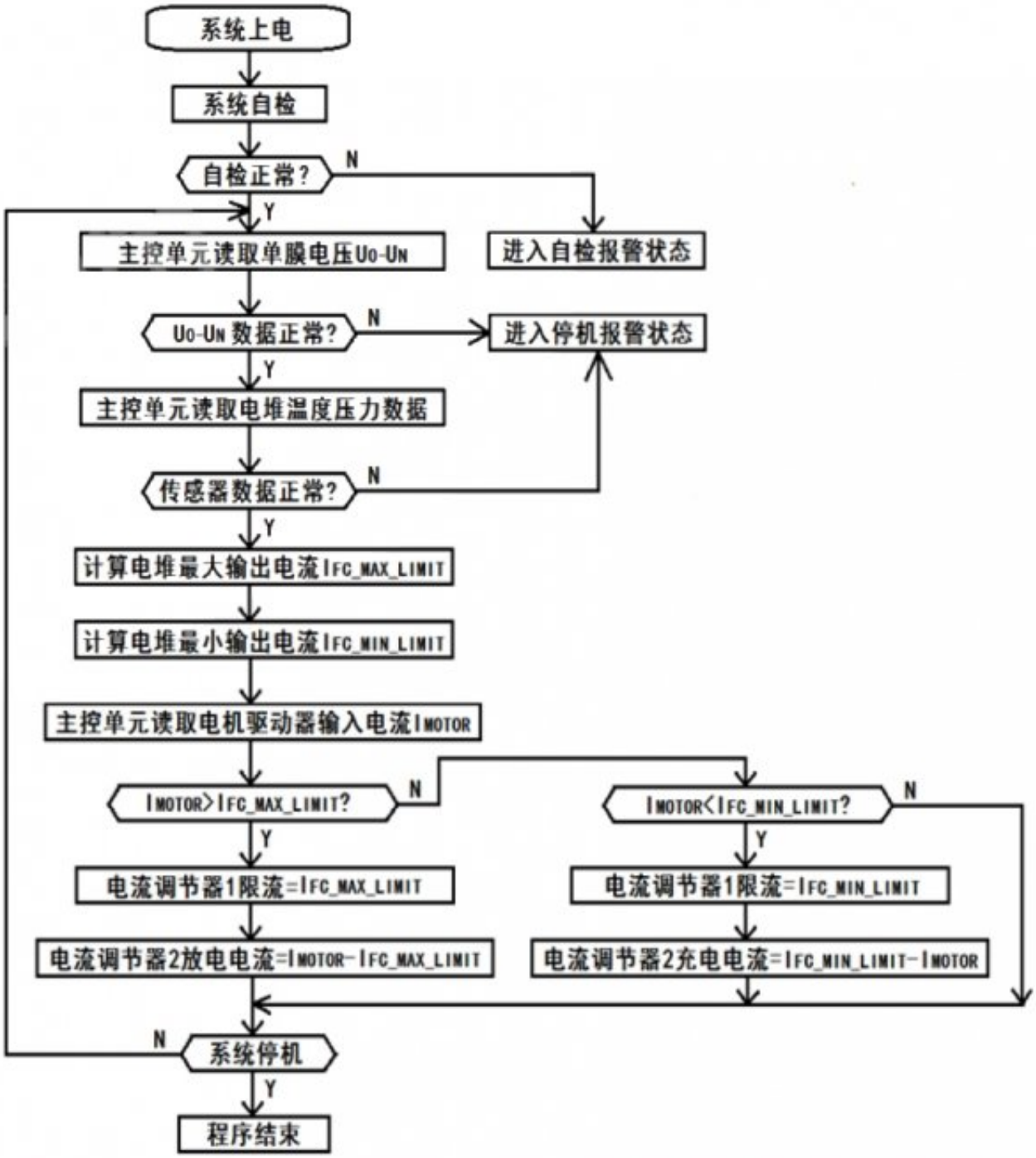

图 3　质子交换膜燃料电池堆电流调节装置控制程序流程图

本文设计的质子交换膜燃料电池堆电流调节装置控制软件主要流程如下：

(1)主控单元读取质子交换膜燃料电池堆中所有膜电极单体工作电压数据 U_0–U_N(其中 N 为燃料电池堆中所有膜电极单体总数)；

(2)如果膜电极单体工作电压数据 U_0–U_N 中有小于膜电极单体最低工作电压 U_{LOW_LIMIT}，或 U_0–U_N 中有大于膜电极单体最高工作电压 U_{HIGH_LIMIT} 的异常情况，则主控单元进入停机报警状态；如果没有以上异常情况，则进入步骤(3)；

(3)主控单元读取质子交换膜燃料电池堆的温度、压力传感器信号数据；

(4)如果质子交换膜燃料电池堆的温度、压力传感器信号数据无异常，则根据温度、压力传感器数据查表获得燃料电池

堆最大允许输出电流 $I_{FC_MAX_LIMIT}$ 数据和最小允许输出电流 $I_{FC_MIN_LIMIT}$ 数据，然后转入步骤(5)；如果温度、压力传感器信号有异常，则主控单元进入停机报警状态；

(5)主控单元读取电机驱动器输入电流传感器的信号数据 I_{MOTOR}；

(6)如果 I_{MOTOR} 大于 $I_{FC_MAX_LIMIT}$，说明当前车辆处于加速运行工况，牵引电机驱动器需要的输入电流较大，已经超过了当前温度、压力等运行参数下的燃料电池堆最大允许输出电流 $I_{FC_MAX_LIMIT}$，则主控单元控制电流调节器 1，将燃料电池堆的输出电流限制在 $I_{FC_MAX_LIMIT}$ 以下，同时主控单元控制电流调节器 2，将电流调节器 2 设定为放电状态，电流调节器 2 调节锂离子动力电池组的放电电流 $I_{DISCHARGE}=I_{MOTOR}-I_{FC_MAX_LIMIT}$，这样既能防止膜电极电位过低引起电位循环发生，同时又能及时调整锂电池模组的放电电流，保证当前车辆牵引电机加速运行工况的电流需求；

(7)如果 I_{MOTOR} 小于 $I_{FC_MIN_LIMIT}$，说明当前车辆处于减速或停止运行工况，牵引电机驱动器需要的输入电流较小，已经低于当前温度、压力等运行参数下的燃料电池堆最小允许输出电流 $I_{FC_MIN_LIMIT}$，则主控单元控制电流调节器 1，将燃料电池堆的输出电流限制在 $I_{FC_MIN_LIMIT}$ 以上，同时主控单元控制电流调节器 2，将电流调节器 2 设定为充电状态，电流调节器 2 调节锂电池充电电流 $I_{CHARGE}=I_{FC_MIN_LIMIT}-I_{MOTOR}$，这样既能防止膜电极电位过高引起电位循环发生，同时又能及时调整锂电池模组的充电电流，将燃料电池堆输出的多余部分的电流作为锂电池模组的充电电流储存起来；

(8)控制程序重新返回步骤(1)，如此循环反复执行，直至系统停机退出。

4实测效果

膜电极单体电压数据是测试质子交换膜燃料电池堆控制系统运行性能的直接指标之一，采用本文设计的燃料电池堆输出电流调节方案的硬件电路和控制软件后，质子交换膜燃料电池堆膜电极单体电压实测效果如图4所示。

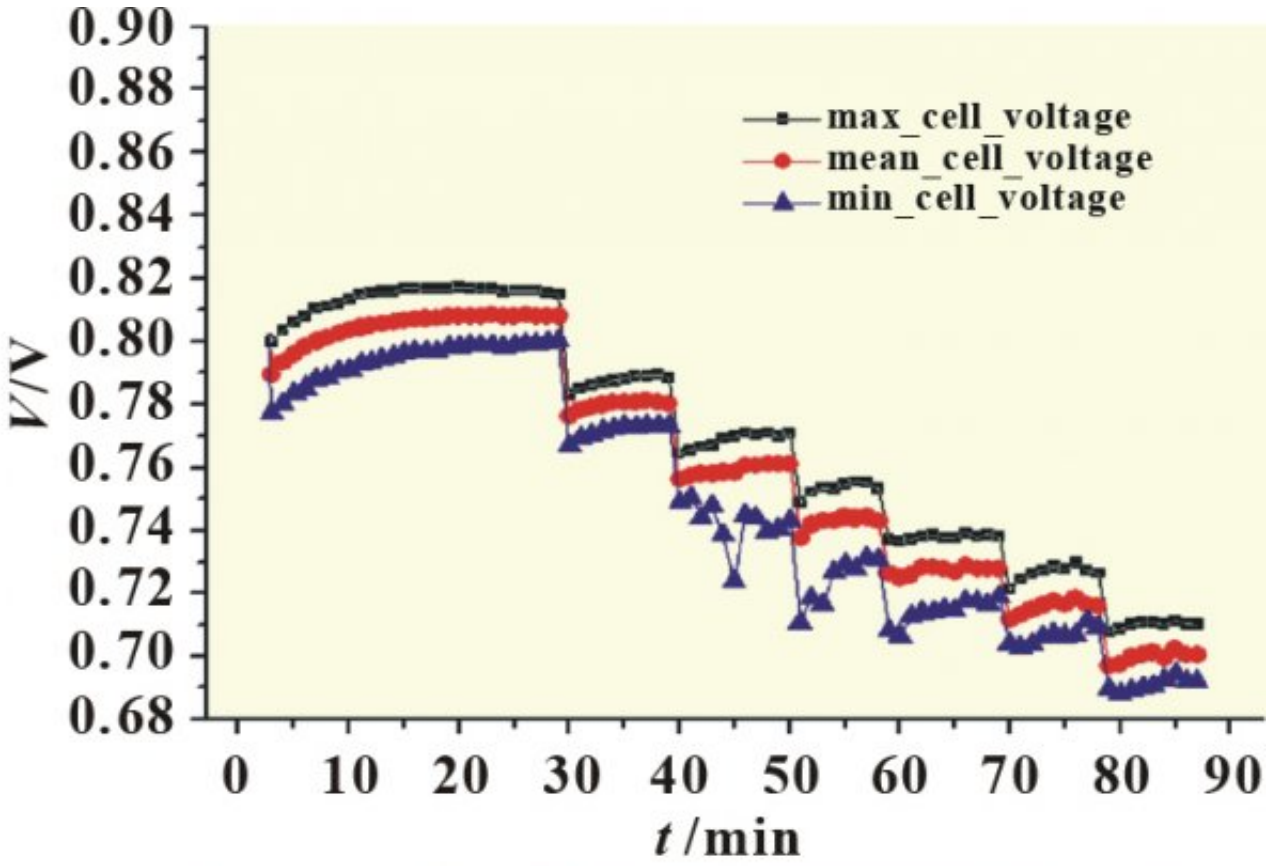

图 4　膜电极单体电压实测数据分析

图4中连续采集了90min的7种不同负载工况下的膜电极单体电压数据，其中黑色曲线为膜电极单体电压最大值max_cell_voltage，蓝色曲线为膜电极单体电压最小值min_cell_voltage，红色曲线为膜电极单体电压平均值mean_cell_voltage，可以看出在90min内由于燃料电池堆的输出电流呈现阶跃式递增，膜电极单体电压也为阶跃式递减，但是膜电极单体电压平均值能够控制在0.81～0.70V之间，膜电极单体电压最大值能够控制在0.82～0.71V之间，膜电极单体电压最小值能够控制在0.80～0.69V之间。

5结论

本文设计的质子交换膜燃料电池堆电流调节装置，采用由燃料电池主控单元同时控制2个电流调节器协同运行的方法，能够根据车辆牵引电机驱动器的输入电流数据和燃料电池堆的温度、压力传感器数据，实时优化调整燃料电池堆的输出电流与动力电池组充放电电流之间的配比，保证车辆在不同的运行工况中，燃料电池堆膜电极单体工作电压能够在最佳工作点附近平衡浮动。与单个电流调节器的装置及其控制方法相比，本文设计的2个电流调节器协同工作的装置及其控制方法在响应速度、调节范围和克服燃料电池堆频繁启停这三个方面均有明显的优势，新方法能够缓解燃料电池堆膜电极性能衰减，从而提升燃料电池堆工作寿命。

参考文献：

[1]方源，章桐.质子交换膜燃料电池动态响应研究综述[J].电源技术，2013，37（10）：1875-1876.

[2]李建秋，方川，徐梁飞.燃料电池汽车研究现状及发展[J].汽车安全与节能学报，2014（1）：17-29.

[3]王诚，王树博，张剑波，等．车用燃料电池耐久性研究[J].化学进展，2015（4）：424-435.

[4]王玲，李欣然，马亚辉，等．燃料电池发电系统的机电动态模型[J]．中国电机工程学报，2011（8）：40-47.

[5]戴朝华，史青，陈维荣，等.质子交换膜燃料电池单体电压均衡性研究综述[J].中国电机工程学报，2016（5）：1289-1302.

[6]Texas Instruments Incorporated. LM5170-Q1 multiphase bidirec-tional current controller data sheet[M].Texas：Texas Instruments In-corporated，2017.

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/168194.html