空冷自增湿燃料电池最优控制方法研究

游志宇[1]，邵仕泉[1]，刘涛[2]，李奇[2]

（1.西南民族大学电气信息工程学院，成都610041；2.西南交通大学电气工程学院，成都610031）

摘要：通过对影响质子交换膜燃料电池（PEMFC）输出性能因素的分析，得出PEMFC电堆工作温度、电堆输出电流是影响PEMFC输出性能的主要因素。在输出电流一定的情况下，电堆工作温度是影响PEMFC输出电压的主要因素。为实现对空冷自增湿PEMFC的最优控制，采用实验测试及数据拟合方法，得到PEMFC电堆最优温度与输出电流的函数关系式，通过控制PEMFC电堆工作在最优温度，以实现PEMFC输出电压的最优控制。实验测试表明，该控制方法简单实用、控制效果优越，可为空冷自增湿PEMFC的最优控制提供具有实用价值的控制方法。

0引言

质子交换膜燃料电池（proton exchange membrane fuel cell，PEMFC）是一种非线性、强耦合、高效率的电化学能量转换装置，其运行过程涉及气、液、固三相混合的电化学动态变化过程。由于具有运行温度低、功率密度高、启动快、稳定性好、零污染等特点，质子交换膜燃料电池成为解决环境和能源枯竭问题的首选新能源，处于商业应用的最前沿，在移动电源、交通、军事、航空等领域得到广泛应用研究[1~3]。

PEMFC根据冷却方式的不同，可分为空气冷却和循环水冷却2种类型。空冷自增湿PEMFC属于空气冷却型，除具有水冷PEMFC的优点外，还自带增湿，具有结构简单、自身功耗低、工作温度低等优点。空冷自增湿PEMFC构成的电源系统结构如图1所示。电堆反应所需的O2通过冷却风扇为电堆供给，同时排出电堆反应产生的热量，使电堆达到某一热平衡；反应所需的H2通过PEMFC阳极入口进入，流进内部流场参与电堆化学反应；反应后的不纯氢气及水经出口排除，以控制电堆内部质子交换膜的含水量，防止水淹。

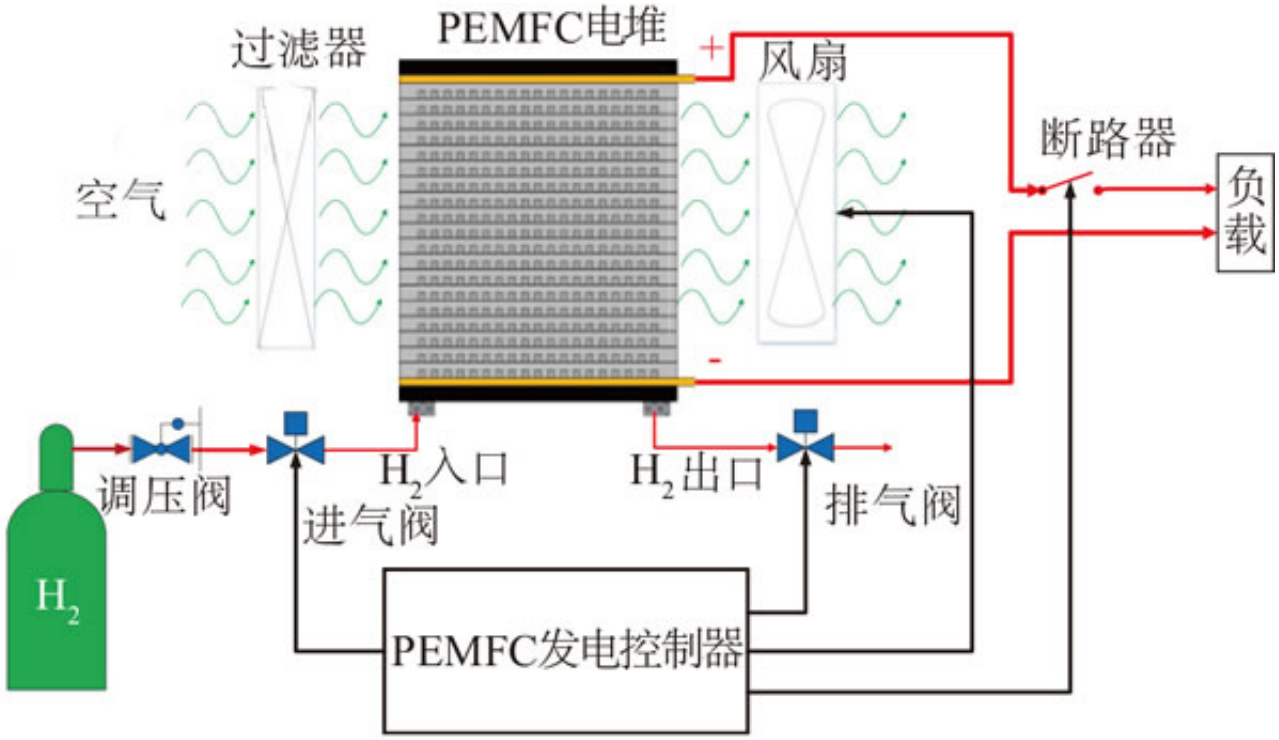


图1　空冷自增湿PEMFC电源系统结构示意图

Fig. 1　Structure of PEMFC power system

从图1可知，空冷自增湿PEMFC运行时，能参与控制的仅有冷却风扇及尾气排气阀。调整冷却风扇转速将为电堆提供充足的O2，避免电堆氧饥饿，同时排出电堆产生的多余热量，使电堆质子交换膜处于某一工作温度，进而影响电

堆的化学反应活性；调整电堆尾气排气周期及间隔，将排除堆内不纯H2及反应产生的水，以改变质子交换膜的含水量，进而影响电堆工作温度及化学反应活性。因此，有必要研究空冷自增湿PEMFC的最优控制方法，通过对冷却风扇、尾气排气进行合理、有效控制，以提高电堆的输出性能[4]，延长电堆的使用寿命。

1 PEMFC性能影响分析

单片 PEMFC 理论开路电压约为 1.2 V，由于 PEMFC 运行时电堆电极会发生一系列化学和物理反应，所以实际运行时输出端电压小于理论开路电压，该偏差电压是由于克服电极阻力对电极反应的阻碍作用而引起的电压降。这种克服阻力而消耗的能量使得电极电动势偏离理想电动势，其中损失的电动势包括活化损失电动势 V_{act}、欧姆极化损失电动势 V_{ohmic} 以及浓差极化损失电动势 V_{con}[5]，各量单位为 V。根据热力学电动势、燃料电池各种损耗及理想气体状态方程，单片 PEMFC 输出电压表达式为[6]：

$$V_{cell}=E_{Nernst}-V_{act}-V_{ohmic}-V_{con} \tag{1}$$

式中，E_{Nernst} ——能斯特热力学电动势，V；V_{cell} ——单片电池端电压，V。

1.1 能斯特热力学电动势 E_{Nernst}

在忽略损耗的情况下，PEMFC 化学反应前后的吉布斯自由能变化量等于 PEMFC 在可逆条件下能够对外移动电子 e^- 所做的非体积功，即对外输出的电功率。根据 Nernst 方程[7~9]以及吉布斯自由能的变化可得：

$$\Delta G=-2F\times E_{Nernst} \tag{2}$$

式中，F ——法拉第常数，一般取 96485。

由于氢氧燃料电池化学反应的吉布斯自由能变化受温度、反应物和生成物浓度的影响，吉布斯自由能的变化量 ΔG 可表示为：

$$\Delta G=\Delta G^0+RT_{stack}\ln\left(\frac{p_{H_2O}}{p_{H_2}\times p_{O_2}^{1/2}}\right) \tag{3}$$

式中，P_{H_2} ——H_2 分压，MPa；p_{O_2} ——O_2 分压，MPa；p_{H_2O} ——反应生成的水汽分压，MPa；R ——理想气体常数；T_{stack} ——电堆温度，℃。

假设反应生成物为液态水，则水汽分压 p_{H_2O} 为 1。代入式(3)，并结合式(2)，可将 E_{Nernst} 表示为：

$$E_{Nernst}=-\frac{\Delta G}{2F}=-\frac{\Delta G^0}{2F}+\frac{RT_{stack}}{2F}\ln(p_{H_2}\times p_{O_2}^{1/2}) \tag{4}$$

式中，ΔG^0 ——标准大气压下的吉布斯自由能变化量。在标准大气压、温度为 25 ℃时，能斯特热力学电动势 E_0 的值随温度变化的关系式为：

$$E_0 = -\frac{\Delta G^0}{2F} = 1.229 - (8.5\times10^{-4})(T_{stack} - 298.15) \quad (5)$$

代入式(4)可得：

$$E_{Nernst} = 1.229 - (8.5\times10^{-4})\times(T_{stack} - 298.15) + \frac{RT_{stack}}{2F}\times(\ln p_{H_2} + \frac{1}{2}\ln p_{O_2}) \quad (6)$$

从式(6)可知，E_{Nernst} 是 PEMFC 电堆温度 T_{stack}、H_2 分压 p_{H_2}、O_2 分压 p_{O_2} 的函数，表明电堆温度 T_{stack} 将影响电堆能斯特热力学电动势 E_{Nernst}，从而影响电堆输出端电压。

1.2 活化损失电动势 V_{act}

在 PEMFC 电极表面刚要激活电化学反应时呈现出一种速率迟钝的现象，该现象表现出的损失电势即为活化损失电动势 V_{act}。V_{act} 与 PEMFC 电化学反应速度有关，引起这种现象的原因是电极无法克服电化学反应中电荷迁移过程所需的活化能。在 PEMFC 的阴极、阳极均会引起活化损失电动势，但由于阳极的 H_2 氧化速度相当快，而阴极的 O_2 氧化还原反应比较慢，远远低于阳极产生的速度，因此 V_{act} 主要由阴极的活化损失电动势决定，其关系表达式为：

$$V_{act} = \frac{RT_{stack}}{2\alpha F}\times\ln\frac{I_{fc}+I_n}{I_o} \quad (7)$$

式中，α——电荷转移常数，介于 0~1 之间；I_{fc}——电堆电流密度，A/cm²；I_n——电堆内部电流密度，A/cm²；I_o——电堆交换电流密度，A/cm²。

根据 Tafel 方程及 Henry 定律，可将式(7)进行参数拟合，表示成参数化表达式[10]：

$$\begin{cases} V_{act} = \xi_1 + \delta T_{stack} + \xi_3 T_{stack}\ln C_{O_2} + \xi_4 T_{stack}\ln I_{stack} \\ \delta = \xi_2 + 2\times10^{-4}\ln A + 4.3\times10^{-5}\ln C_{H_2} \\ C_{O_2} = 1.97\times10^{-7}\times p_{O_2}\times\exp(498/T_{stack}) \\ C_{H_2} = 9.17\times10^{-7}\times p_{H_2}\times\exp(-77/T_{stack}) \end{cases} \quad (8)$$

式中，ξ_1——通过实验数据，根据热动力、流体动力、电化学拟合得到的系统参数；C_{O_2}——阴极催化剂界面溶解氧气的浓度，mol/cm³；C_{H_2}——阳极催化剂界面溶解氢气的浓度，mol/cm³；A——PEMFC 质子交换膜的有效活化面积，cm²，其值为常数；I_{stack}——PEMFC 的输出电流，A。

从式(8)可知，V_{act} 为 PEMFC 电堆温度 T_{stack}、电堆电流 I_{stack}、H_2 分压 p_{H_2}、O_2 分压 p_{O_2} 的函数，表明电

堆温度 T_{stack} 将影响电堆活化损失电动势 V_{act}，进而影响电堆输出端电压。

1.3 浓差极化损失电动势 V_{con}

正常运行时，反应气体及反应产物在 PEMFC 阳极流场、阴极流场及质子交换膜内扩散，会引起一定浓度差，从而引起浓度差极化损失电动势 V_{con}，其关系式可表示为[5]：

$$V_{con} = me^{n/stack} \tag{9}$$

式中，m ——与电堆温度 T_{stack} 有关的质量传递系数，由电堆的工作性能状态确定；n ——电堆催化层中电化学反应产物的增长率，一般取常数值。

从式(9)可知，V_{con} 为质量传递系数 m 、电堆电流 I_{stack} 的函数，而质量传递系数 m 又与电堆温度 T_{stack} 有关，因此 V_{con} 是电堆温度 T_{stack} 、电堆电流 I_{stack} 的函数，表明电堆温度 T_{stack} 将影响浓差极化损失电动势 V_{con}，进而影响电堆输出端电压。

1.4 欧姆极化损失电动势 V_{ohmic}

PEMFC 发生电化学反应时，H^+质子从阳极迁移到阴极时质子交换膜存在等效膜阻抗 R_m；电子 e^-经外电路从阳极迁移到阴极时外电路也存在等效阻抗 R_c，因此会引起一定的电压降，该电压降即为欧姆极化损失电动势 V_{ohmic}。根据欧姆定律，其关系式可表示为[6]：

$$V_{ohmic} = I_{Stack} \times (R_m + R_c) \tag{10}$$

由于离子电荷传输比电子电荷传输更难，因此可忽略 R_c 的影响，式(10)可简化为：

$$V_{ohmic} = I_{stack} \times R_m$$

$$R_m = \frac{\rho_m \times l}{A}$$

$$\rho_m = \frac{181.6\left[1 + 0.03\frac{I_{stack}}{A} + 0.062\left(\frac{T_{stack}}{303}\right)^2\left(\frac{I_{stack}}{A}\right)^{2.5}\right]}{\left[\sigma_{an} - 0.634 - \frac{3I_{stack}}{A}\right]\exp\left[4.18\left(\frac{T_{stack} - 303}{T_{stack}}\right)\right]} \tag{11}$$

式中，l ——质子交换膜的厚度，cm；ρ_m ——Nafion 系列质子交换膜的电阻率，Ω·cm；σ_{an} ——阳极侧含水量，是阳极气体相对湿度的函数，反应气体湿度状态，通常取值范围在 10~23。

对于已制造生产的 PEMFC 电堆，l、A 为常数，

而空冷自增湿 PEMFC 的膜为自增湿，所以 ρ_m 一般可取常值，因此由式(11)可知，V_{ohmic} 是电堆温度 T_{stack}、电堆电流 I_{stack} 的函数，表明电堆温度 T_{stack} 会影响浓差极化损失电动势 V_{ohmic}，进而影响电堆输出端电压。

1.5 电堆电压近似函数关系

将式(6)、式(8)、式(9)、式(11)代入式(1)，可得 PEMFC 输出端电压的近似函数关系式：

$$V_{cell}=f(T_{stack},I_{stack},p_{H_2},p_{O_2}) \tag{12}$$

从式(12)可知，电堆堆温 T_{stack}、电堆电流 I_{stack}、H_2 分压 p_{H_2}、O_2 分压 p_{O_2} 是影响 PEMFC 输出端电压的主要因素。又因空冷自增湿 PEMFC 的阴极采用贯通开放式结构，与外部空气直接相通，其 O_2 分压 p_{O_2} 接近一常值；阳极入口前端采用精密比例电气调节阀，能自动调节入口 H_2 压力，保持在设置的压力点，其 H_2 分压 p_{H_2} 也可近似为一常值。因此，式(12)可近似简化为电堆堆温 T_{stack}、电堆电流 I_{stack} 的函数关系式：

$$V_{cell}=f(T_{stack},I_{stack}) \tag{13}$$

从式(13)可看出，PEMFC 端电压是电堆堆温 T_{stack}、电堆电流 I_{stack} 的函数。在输出电流 I_{stack} 一定的条件下，电堆工作温度 T_{stack} 将是影响电堆输出电压 V_{cell} 的主要因素。由于电堆输出电流 I_{stack} 是由负载决定的，因此在某一工作电流下，PEMFC 存在一个电堆工作温度 T_{stack}，使电堆输出电压最大，也即电堆输出功率最大，输出性能达到最优。

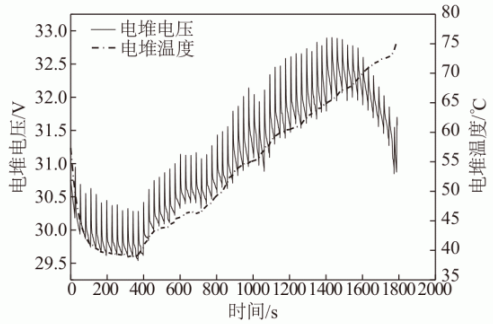
2 PEMFC最优控制方法

根据PEMFC极化曲线可知，PEMFC输出电流与输出电压一一对应，要使PEMFC输出最优，也即使输出功率最大，因此在当前输出电流下，只需保证PEMFC输出电压最高即可实现PEMFC输出功率最大，性能最优。从式（13）可知，在PEMFC输出电流Istack一定的条件下，电堆工作温度Tstack是影响电堆输出电压的主要因素。在某一PEMFC输出电流Istack下，必然存在一个电堆工作温度Tstack，使PEMFC输出电压Vcell最高，输出功率最大，可将该工作温度称为电堆最优工作温度Topt。这样便将PEMFC最优控制转化为电堆工作温度的最优控制，因此通过PEMFC工作温度控制，可间接实现PEMFC最优控制。

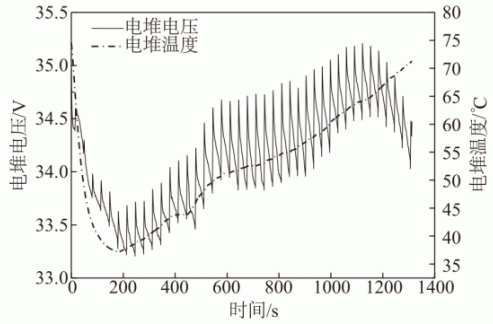
2.1输出性能测试

文献[11]通过实验测试表明，在某一固定输出电流下电堆输出电压先随温度的升高而逐渐上升，当电堆温度达到一定值后，输出电压随温度的升高而急剧下降。文献[12~14]通过实验揭示了电堆存在最佳工作温度特性，当电堆工作在最佳温度特性范围内时，其输出电压最高，性能最佳。为实现PEMFC的最优温度控制，需先获取PEMFC的最优参考温度参数，而PEMFC使用手册并未提供电堆的最优温度关系式。因此需对被控PEMFC进行测试，以获取PEMFC的最优工作温度。

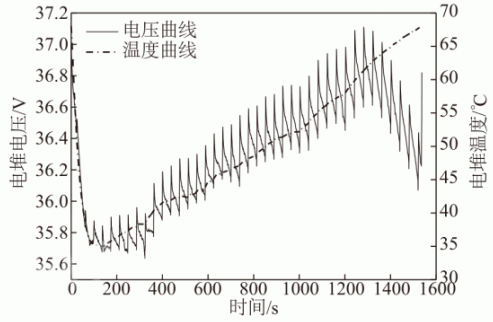
以Ballard公司的2kW空冷自增湿PEMFC为研究对象，利用空冷自增湿PEMFC测试平台，测试电堆在给定输出电流下输出电压随电堆温度变化的响应曲线，以验证函数关系式（13）的正确性。电堆由56片单电池组成，额定功率为2kW，输出电流范围为0~75A，最高工作温度为75℃，H2工作压力范围为16~56kPa，实验时采用压力为36kPa，输出电压范围为28~56V。实验在恒定环境温度下进行，分别在70、60、50及40A电流点进行测试，所得的电压与温度的响应曲线如图2所示。从图2可看出，在给定输出电流Istack下，电堆电压随温度的升高而逐渐升高，当温度达到某一值后，电压随温度的升高而下降。测试结果充分说明PEMFC在一定的输出电流Istack下，存在一个最优工作温度Topt，当PEMFC运行在该温度点时，电堆输出电压最大。从图2可知，在不同输出电流下最大输出电压对应的最优工作温度Topt的值不同，也即在不同输出电流下，对应不同的最优工作温度。



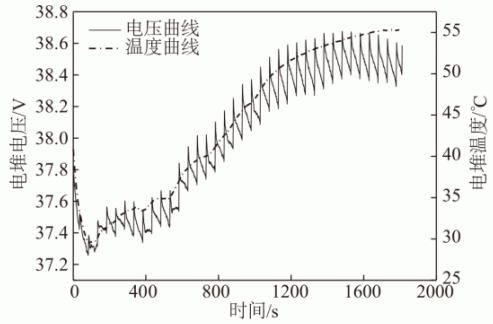
a. 70 A



b. 60 A



c. 50 A



d. 40 A

图2　电堆电压/温度曲线

Fig. 2　Voltage-temperature curve of PEMFC

图 2 中电压曲线出现的尖峰是因阳极尾气排气引起的。在阳极尾气排气瞬间，可以排出阳极流道内不纯 H_2 及反应产生的水，改善 PEMFC 输出性能。阳极尾气排气周期 T_{Purge} 及排气间隔采用电堆数据手册建议参数，排气周期按式(14)进行计算，排气间隔为 200 ms。

$$T_{Purge} = \frac{2300\,A \cdot s}{I_{stack}} \tag{14}$$

电堆电压/温度曲线是基于Ballard公司的2kW空冷自增湿PEMFC电堆获取的，对于任意空冷自增湿PEMFC电堆采用同样方法进行测试，获得类似的电压/温度曲线。

2.2最优温度拟合

电堆输出电流是负载抽取的，其大小是随机任意的，无法通过实验事先测得任意电流下的最优工作温度。从式(13)可知，需要已知任意输出电流下对应的最优温度，才能控制 PEMFC 运行在对应的最优工作温度点，使 PEMFC 输出电压最高，输出功率最大。实验测试表明，在不同输出电流 I_{stack} 下，对应不同的最优工作温度 T_{opt}。为获得任意电流下对应的最优温度，建立一个以电堆电流 I_{stack} 为自变量的电堆最优温度函数关系式，如式(15)所示：

$$T_{opt}=f(I_{stack}) \tag{15}$$

为获得式（15）的关系表达式，可对空冷自增湿PEMFC电堆的最优温度进行测试，然后对所有测试点数据进行拟合，进而得到式（15）的具体表达式。以Ballard2kW空冷自增湿PEMFC为例，在电堆稳定运行一段时间后，分别测试出几个不同输出电流时对应的电堆最优温度，对测试数据进行整理后得到各测试电流下最大电堆电压Vcell对应的电堆最优工作温度Topt，如表1所示。

表1　不同输出电流下最优工作温度

Table 1　Optimal operating temperature at different output current

I_{stack}/A	V_{cell}/V	T_{opt}/℃
0	55.18	16.41
5	45.91	28.56
10	44.37	31.11
20	42.68	36.78
30	39.89	41.88
40	38.68	47.36
50	37.11	52.69
60	35.21	57.56
70	32.90	63.31

在电堆电流较小（10A以下）时，由于环境温度及冷却风扇最低转速（满足电堆过氧比要求的空气流量的最低转速）等因素，使得电堆温度恒定在某一值不会产生变化，从而使得测试出的电堆温度、电堆电压数据不能很好地反映电堆性能。这是因为在低电流时电堆产生的热量比较小，虽然冷却风扇转速已降低到最低转速，但风扇散走的热量与电堆产生的热量已达到某一平衡点，电堆温度不再升高而维持在某一稳定值。2kW空冷自增湿PEMFC电堆数据手册给出了Ballard实验室在环境湿度为25%~30%、环境温度为18~24°C时测试电流点对应的最优工作温度及电堆工作温度允许范围，数据如表2所示。

表2　数据手册给出的不同输出电流下工作温度

Table 2　Operating temperature given by Ballard Lab.

I_{stack}/A	V_{cell}/V	T_{max}/℃	T_{opt}/℃	T_{min}/℃
0	56.3	52	26	6
7.3	47.6	55	30	10
14.5	45.8	57	34	14
29.0	43.6	62	41	21
51.7	40.5	70	53	33
65.3	38.3	75	61	41
77.0	36.1	75	67	47
87.1	33.8	75	72	65

将表1、表2中数据绘制成电流-最优温度曲线，如图3所示。从图3可看出，实际测试的最优温度曲线在电堆数据手册给出的最小Tmin与最大Tmax范围之内，在大电流阶段，实际测试的最优温度略高于数据手册给出的温度，在低电流阶段略低于数据手册给出的温度，但基本与Ballard实验室的数据一致，表明测试数据基本正确。数据差异存在的主要原因与实验测试环境温度、湿度、数据采集精度、实验电堆等有关，不同的PEMFC电堆，即使在相同的实验条件下测试出的结果也不能保证完全一致，这与PEMFC的自身特性相关。

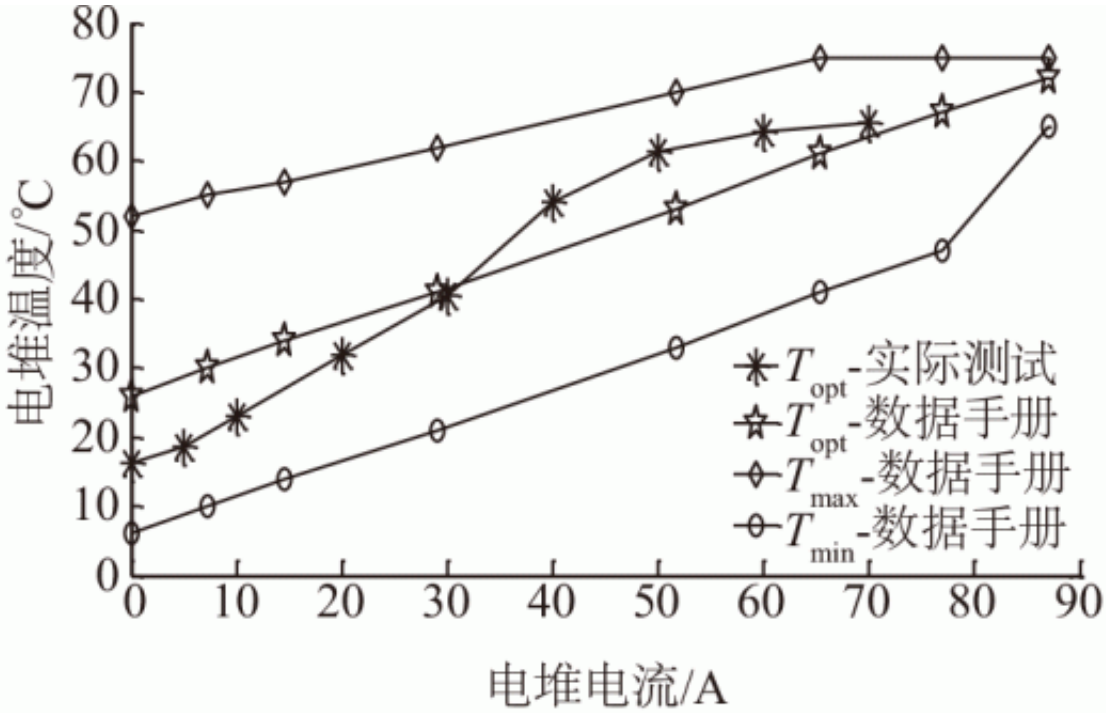


图3　电堆电流-最优温度曲线

Fig. 3　Current-temperature curve of PEMFC

由表1、表2中的数据绘制成的PEMFC电堆极化曲线（电流-电压曲线）如图4所示。从图4中可知实际测试的极化曲线与Ballard实验室测试的极化曲线趋势基本一致，表明实验测试数据正确可靠。

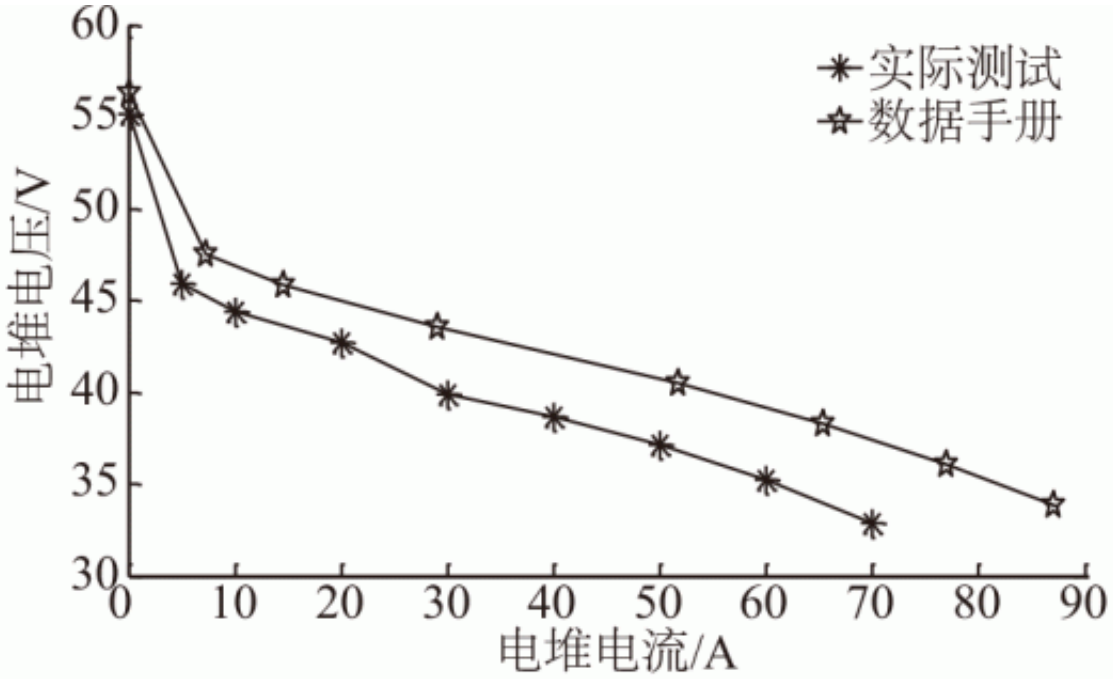


图4　PEMFC电堆极化曲线

Fig. 4　Polarization curve of PEMFC

通过实验测试得到指定输出电流下的最优工作温度值，但不能通过实验测试出所有输出电流下的最优温度值。在实际控制应用中，需计算出任意输出电流对应的最优工作温度。因此需对表1中的数据进行拟合，以得到电堆电流Istack与电堆最优工作温度Topt的函数关系式。采用多项式函数曲线拟合方法对表1中的数据进行拟合，得到电堆电流Istack与最优工作温度Topt的拟合曲线图如图5所示。

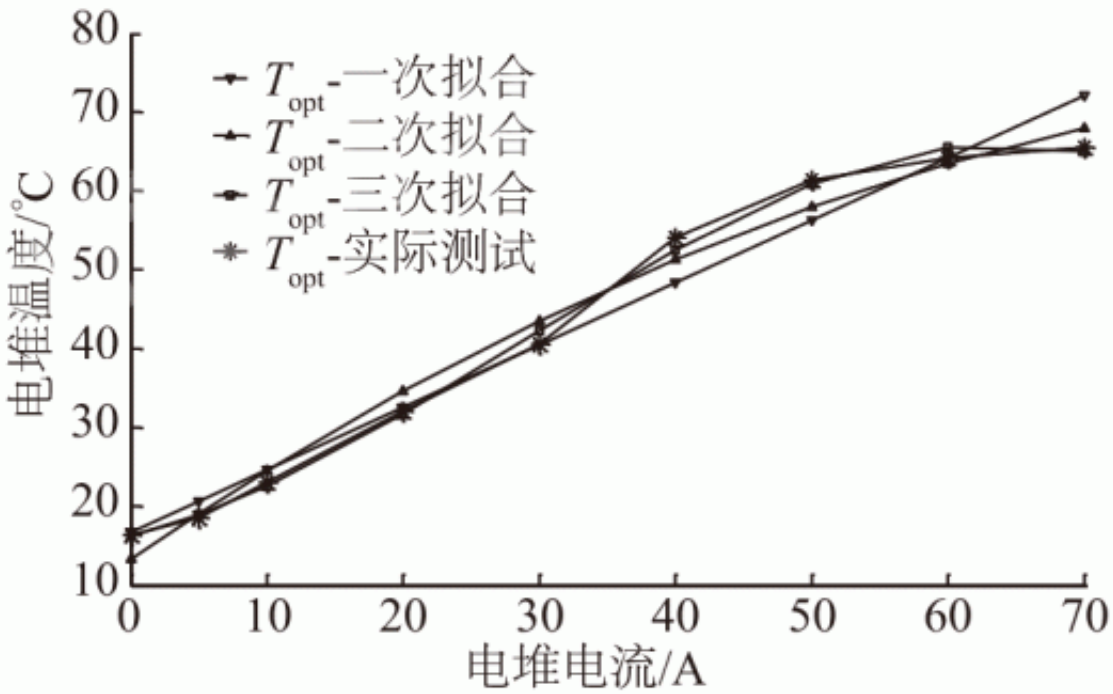


图5　电流-最优温度拟合曲线

Fig. 5　Fitting curve of current-optimal temperature

由拟合曲线可知，采用三次多项式拟合能较好地逼近实际测试曲线，得到PEMFC电堆最优温度拟合关系表达式为：

$$T_{opt} = -0.0003I_{stack}^3 + 0.0231I_{stack}^2 + 0.4180I_{stack} + 16.3177 \tag{16}$$

式中，T_{opt}——电堆输出电流为 I_{stack} 时电堆的最优工作温度，℃；I_{stack}——电堆输出电流，A。

根据式（16）可知电堆在任意输出电流下对应的电堆最优工作温度。在非最优温度点工作时，其输出性能会降低，但不会对电堆造成不可恢复的损坏。当电堆工作在一定温度范围之外时，容易对电堆造成不可恢复的损坏。空冷自增湿PEMFC电堆数据手册给出了电堆在不同电流下的最大与最小工作温度限值，如表2所示。当电堆工作在限值温度范围之外时，容易造成不可恢复的损坏，对电堆性能及使用寿命产生不利影响。当电堆运行温度过高时，电堆质子交换膜容易干燥，膜电阻增大，导致电堆欧姆极化损失增大，使电堆性能下降；当电堆运行温度过低时，容易引起电堆内部水淹，增大离子传输阻力，从而使电堆性能降低。为获取任意输出电流时对应的最大、最小温度限值，可对表2中最大与最小温度数据进行最小二乘法拟合，得到电堆最大与最小工作温度函数表达式：

最大工作温度：

$$T_{max}=\begin{cases}0.3458\times I_{stack}+52.0883 & I_{stack}\leqslant 65.3\ \mathrm{A}\\ 75 & I_{stack}>65.3\ \mathrm{A}\end{cases}\quad(17)$$

最小工作温度：

$$T_{min}=\begin{cases}0.5310\times I_{stack}+6.0025 & I_{stack}\leqslant 77\ \mathrm{A}\\ 1.7820\times I_{stack}+90.2277 & I_{stack}>77\ \mathrm{A}\end{cases}\quad(18)$$

结合式（16）~式（18），可得到电堆在任意输出电流下对应的最优温度，为电堆的最优控制奠定基础。最优温度拟合的前提是需要获取电堆的实际工作电流、电压、温度等数据。对于任意的空冷自增湿PEMFC电堆，可采用类似的实验方法，获得电堆在不同输出电流下的最优工作温度数据，再利用数据拟合方法便可得到电堆最优温度关系表达式。

2.3最优控制方法

空冷自增湿PEMFC电堆可用于控制的参数仅有电堆输出电流Istack、电堆温度Tstack及电堆尾气排气，其控制目标是使电堆在当前输出电流下输出电能最优，也即电堆输出电压最高，输出功率最大。根据式（13），对PEMFC的最优控制，实际上是对PEMFC最优工作温度控制。只要控制电堆在当前输出电流下工作在最优工作温度点，即可使电堆输出电压最高，实现电堆最优控制。

由于空冷自增湿PEMFC运行过程是一个非线性、强耦合、时变的复杂系统，其精确数学控制模型难以建立。而温度控制又具有滞后、时变和强耦合等特点，采用传统的精确模型控制难以达到控制精度，对这种具有滞后、时变的温度控制一般采用如图6所示的控制方法进行控制。根据电堆输出电流Istack，利用最优温度公式（式（16））计算出最优温度Topt，Topt与检测到的电堆实际温度Tstack相比较，得到温度误差e，再根据温度误差e，采用某一控制策略产生控制信号，实时调整电堆风扇的控制电压u，从而通过改变风扇转速来调整电堆的工作温度，使电堆工作在最优工作温度点附近。图中“计算当前最优温度”是指按照拟合式（16）计算出的最优工作温度；图中的“控制器”一般采用智能温度控制算法，常见的温度控制方法有PID控制、模糊控制、模糊-PID控制及自适应模糊PID控制等[15]。

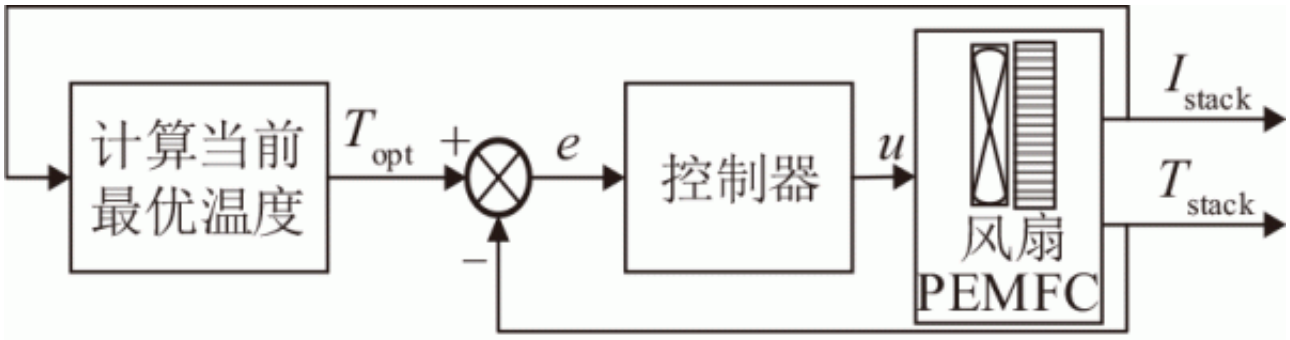


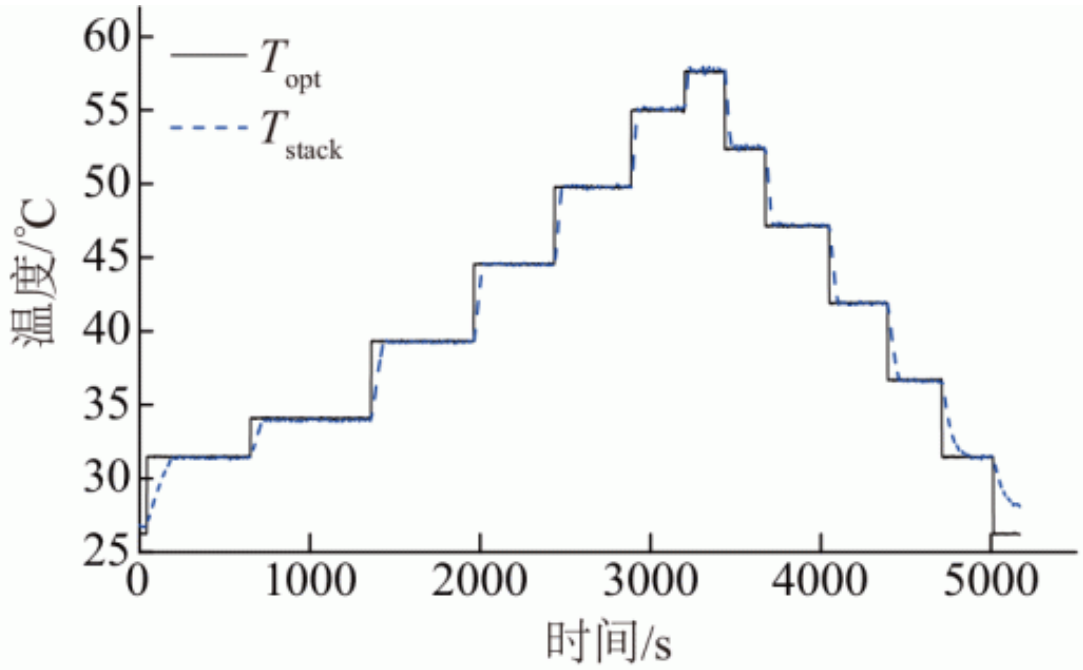
图6　PEMFC控制原理框图

Fig. 6　Structure of PEMFC control system

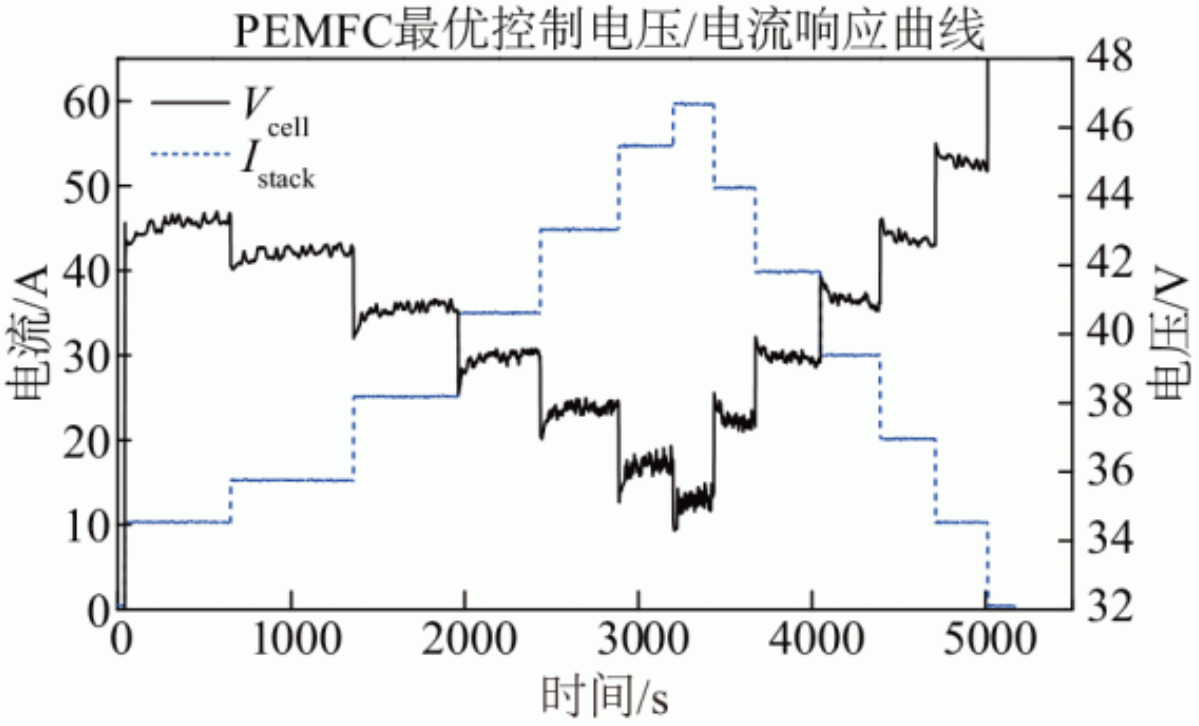
3 PEMFC最优控制测试与分析

为验证PEMFC工作在由式（16）~式（18）得到的最优温度时，电堆输出性能是否最优，按照图6所示控制原理，采用PID温度控制方法对Ballard2kW空冷自增湿PEMFC进行实验测试。

测试的响应曲线如图7所示。由图7a可知，温度的稳态误差在-0.30~+0.10°C范围内，具有较高的控制精度。从图7a可看出，在电堆温度达到稳态时，PEMFC输出电压波动非常小，这是因为稳态时PID控制器输出的控制量接近一恒定值，风扇转速稳定，电堆达到热量平衡，空气过氧比处于合理水平，所以输出电压平稳。图7中，当负载电流从小切换到大时，PEMFC输出电压先出现一个下降尖峰，随后输出电压上升并稳定在某一电压范围内，而当负载电流从大切换到小时，PEMFC输出电压先出现一个上升尖峰，随后下降并稳定在某一电压范围内，出现这种现象是由PEMFC本身特性决定的，充分表明测试曲线的正确性。



a. PEMFC最优控制温度响应曲线

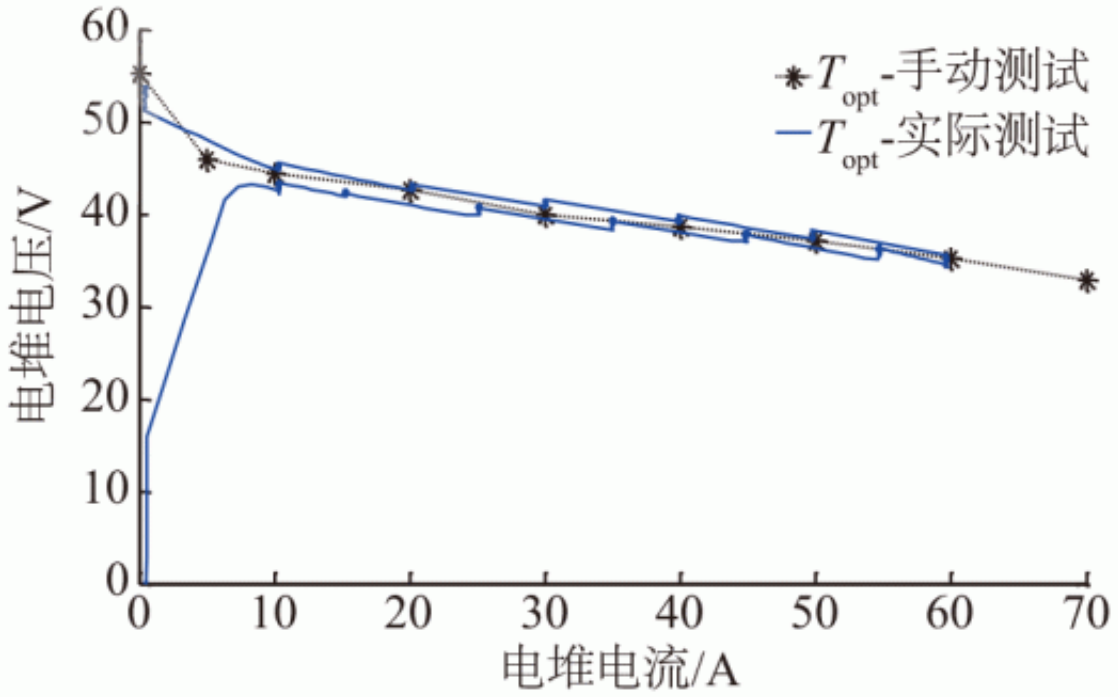


b. PEMFC最优控制电压/电流响应曲线

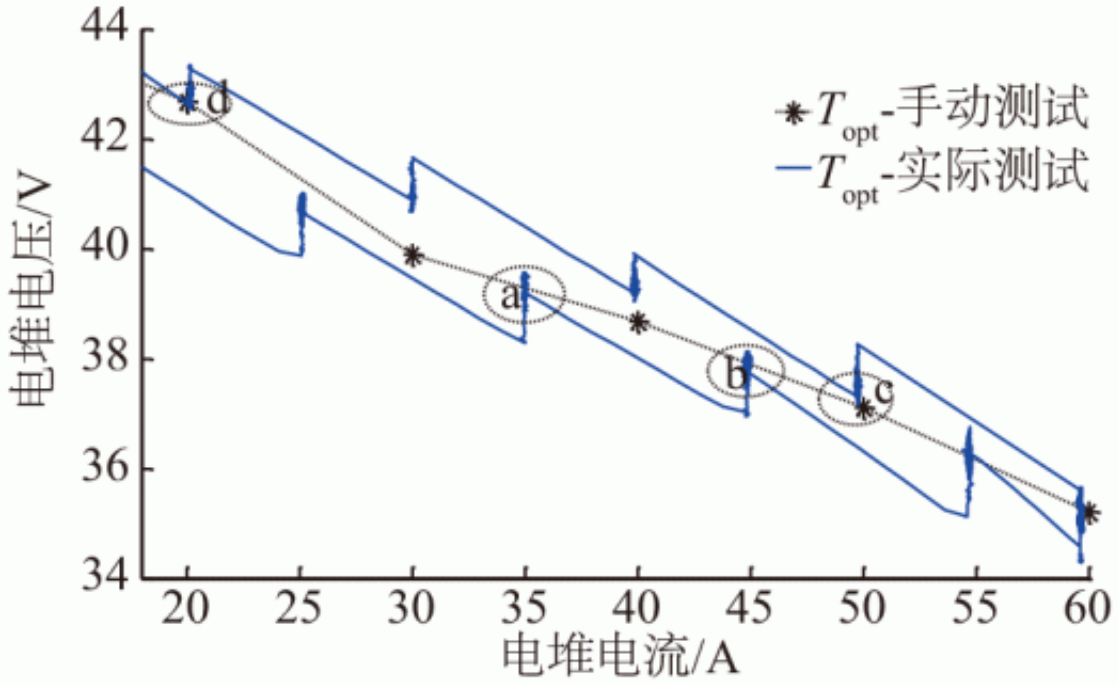
图7　最优控制温度响应曲线

Fig. 7　Temperature response curve of optimal control

将测试得到的PEMFC输出电压Vcell、电堆电流Istack数据与表1中手动测试的数据绘制成极化曲线，如图8a所示，局部放大曲线如图8b所示。图中“Topt-实际测试”曲线是PEMFC电堆运行过程的所有数据，未做删减处理。



a. 极化曲线



b. 极化曲线局部放大图

图8　最优控制极化曲线

Fig. 8　Polarization curve of optimal control

从图8a可看出，采用拟合的最优温度关系式进行PEMFC最优控制得到的极化曲线与手动测试得到的最优极化曲线基本重合。从局部放大图可看出，在给定运行电流点，PEMFC电堆稳态运行时，其输出电压基本稳定在最优输出电

压附近。如图8b中点a及点b所示，PEMFC输出电压基本在手动测试得到的最优输出电压附近。当PEMFC输出电流从35A切换到45A瞬间，输出电压先有一个下降趋势，这是当PEMFC输出电流发生变化时由PEMFC内部的极化现象阻碍引起的，为克服这种阻碍造成输出电压有一定的下降。随着化学反应的进行，输出电压快速达到一个平衡状态，在电堆最优温度控制下，使电堆输出性能达到最优。测试曲线表明，采用拟合最优温度控制方法较好地实现了空冷自增湿PEMFC最优控制，控制简单实用。

4结论

为寻求空冷自增湿PEMFC最优控制方法，本文对PEMFC内在工作机理、输出性能影响因素展开分析与实验，最终实现了PEMFC电堆的最优控制，并得到以下结论：

1）空冷自增湿PEMFC电堆输出电压是电堆工作温度、电堆电流的函数，电堆工作温度是影响PEMFC输出电压的主要因素。

2）可利用通过实验获得的PEMFC电堆在不同工作电流下的最优工作温度数据，拟合出电堆的最优工作温度公式，并可利用拟合的最优工作温度公式实现空冷自增湿PEMFC电堆的最优控制，使其输出电压最高，输出性能最优。

[参考文献]

[1] Peighambardoust S J, Rowshanzamir S, Amjadi M. Review of the proton exchange membranes for fuel cell applications[J]. Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(17): 9349—9384

[2] 游志宇，陈维荣，戴朝华，等. 燃料电池备用电源系统设计与控制研究[J]. 电力自动化设备，2014，34(3)：167—173.

[2] You Zhiyu, Chen Weirong, Dai Chaohua, et al. Design and control of fuel cell backup power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 167—173.

[3] Hosseinzadeh Elham R M. Development and validation of a simple analytical model of the proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) in a fork-lift truck power system[J]. Journal of Green Energy, 2013, 10(5): 523—543.

[4] 张传升，陈凤祥，高昆鹏，等. 1 kW 自呼吸PEMFC堆控制因素试验[J]. 同济大学学报：自然科学版，

2011，39(6)：890—894.

[4] Zhang Chuansheng，Chen Fengxiang，Gao Kunpeng，et al. Experimental study on control factors for a 1kw air-breathing PEMFC stack[J]. Journal of Tongji University：Natural Science，2011，39(6)：890—894.

[5] James L，Andrew D. Fuel cell systems explained[M]. Chichster：John Wiley & Sons Ltd，2003.

[6] Jia J，Wang Y，Li Q，et al. Modeling and dynamic characteristic simulation of a proton exchange membrane fuel cell[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion，2009，22(1)：283—291.

[7] Amphlett J C，Baumertr M，Mannr F. Performance modeling of the ballard mark IV solid polymer electrolyte fuel cell：Empirical model development[J]. Electrochem Soc，1995，142(1)：9—15.

[8] Amphlett J C，Mann R F，Peppley B A，et al. A model predicting transient responses of proton exchange membrane fuel cells[J]. Journal of Power Sources，1996，61(1)：183—188.

[9] Mannr F，Amphlett J C，Hooperma I. Development and application of a generalized steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell[J]. Journal of Power Sources，2000，86(1)：173—180.

[10] 李　奇. 质子交换膜燃料电池系统建模及其控制方法研究[D]. 成都：西南交通大学，2011.

[10] Li Qi. Research on modeling and control of proton exchange membrane fuel cell system[D]. Chengdu：Southwest Jiaotong University，2011.

[11] 周　靖，张晓维，谈金祝，等. 操作参数对PEMFC性能的影响[J]. 南京工业大学学报：自然科学版，2013，35(4)：78—81.

[11] Zhou Jing，Zhang Xiaowei，Tan Jinzhu，et al. Effects of operating parameters on performance of PEMFC[J]. Journal of Nanjing University of Technology：Natural Science Edition，2013，35(4)：78—81.

[12] 王斌锐，金英连，褚磊民，等. 空冷燃料电池最佳温度及模糊增量PID控制[J]. 中国电机工程学报，2009，29(8)：109—114.

[12] Wang Binrui，Jin Yinglian，Cchu Leimin，et al. Temperature optimization and fuzzy incremental PID control for air-breathing proton exchange membrane fuel cell stack[J]. Proceedings of the CSEE，2009，29(8)：109—114.

[13] 卫　东，郑　东，褚磊民. 空冷型质子交换膜燃料电池堆最优性能输出控制[J]. 化工学报，2010，61(5)：1293—1300.

[13] Wei Dong, Zheng Dong, Chu Leimin. Output control of optimal performance for air-cooling PEMFC stack[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering(China), 2010, 61(5): 1293—1300.

[14] Li Q, Chen W, Liu S, et al. Temperature optimization and control of optimal performance for a 300 W open cathode proton exchange membrane fuel cell[J]. Procedia Engineering, 2012, 29: 179—183.

[15] 游志宇，陈维荣，彭　赟，等. 大功率空冷自增湿PEMFC温度控制方法[J]. 西南交通大学学报，2015，50(1)：44—50.

[15] You Zhiyu, Chen Weirong, Peng Yun, et al. Performance measurement and analysis of temperature control for a large-power air-cooled self-humidifying PEMFC[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(1): 44—50.

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/164282.html