

基于模糊控制的质子交换膜燃料电池氮管理

周奕，顾欣，蔡俊，夏增刚，刘士广

(上海汽车集团股份有限公司技前瞻技术部，上海201804)

摘要：针对质子交换膜燃料电池（PEMFC）阴极侧的氮向阳极侧扩散，并在阳极侧累积的问题，文章提出一种基于模糊控制的阳极氮管理策略。该策略克服质子交换膜燃料电池阳极氮浓度变化大惯性的特点，采用模糊控制，并使用估计模型的估计结果作为输入变量，并以模糊控制器的输出控制燃料电池氢气路尾排动作，控制阳极侧的氮浓度在阈值范围内。该控制模型具有模型简单实用，控制策略易于表格化，且鲁棒性强等优点。

引言

随着机动车辆的增加，机动车污染已成为空气污染的重要来源，是造成细颗粒物、光化学烟雾污染的重要原因，机动车污染使得新能源汽车开发的紧迫性日益凸显[1]。氢燃料电池汽车具有零排放，加注速度快，功率密度大，启动速度快等优点，是一种非常理想的未来车载能源[2-3]。

车载质子交换膜燃料电池运行中，阴极通入加压的空气，阳极通入从氢气瓶减压后的纯氢。由于浓度差引起的扩散作用，阴极测的氮气不断向阳极侧扩散，并在阳极侧积累。不断升高的氮浓度降低燃料电池的发电功率并降低系统效率且对催化剂有破坏作用，所以质子交换膜燃料电池阳极流道氮浓度管理十分重要[4-5]。

针对阳极侧氮浓度问题，文献[6]提出一种电路等效模型，进而使用状态空间模型与预测控制策略对等效电路进行建模，利用燃料电池运行特征参数拟合等效模型，并对一个9节带有氢气循环泵的燃料电池动态运行过程中的传质变化进行估计。该模型采样电路等效，难以应对大范围运行时的非线性问题。

文献[7]忽略质子交换膜燃料电池运行过程中的暂态过程，从稳态角度，建立简化的燃料电池等效一维模型并建立尾排模型，从而对阳极稳态氮浓度进行管理。但质子交换膜燃料电池车载运行下，工况复杂多变，稳态模型难以符合实际需求。

文献[8]使用偏微分传质方程组对一个90kW的电堆传质过程进行建模，详细分析了水、氮、氧、氢在运行过程中的传质变化。并详细讨论了氮浓度积累对电堆运行的影响。该方法具有较强的理论意义，但偏微分方程组在工程中求解困难，且对边界条件要求较高。

针对以上问题，本文提出一种基于模糊控制的氮浓度管理策略。该策略使用估计模型的估计结果，结合模糊控制方法，对质子交换膜阳极流道尾排周期进行控制，从而管理氮浓度，保障电堆可靠运行。该方法具有鲁棒性强，计算量小，适合车载控制器使用的特点。

1 基于模糊控制的氮管理策略

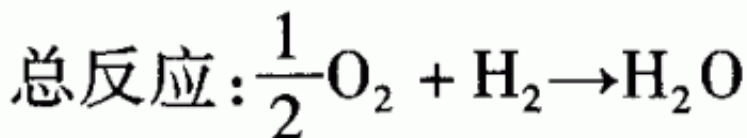
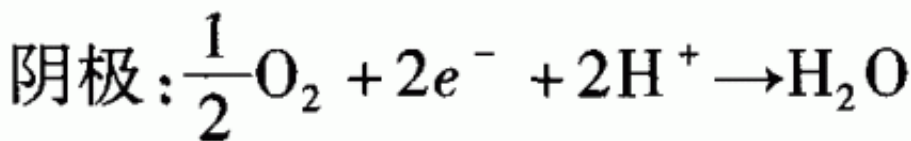
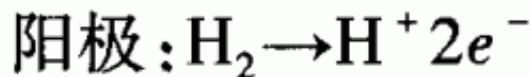
1.1 质子交换膜燃料电池系统

如图1所示，车载燃料电池系统通常使用空气压缩机加压空气，并冷却增湿后，通入阴极流道；高压氢气罐中的氢气在罐内高压作用下经过增湿器进入电堆阳极。氢气在催化剂的作用下生成质子和电子，质子通过质子交换膜和氧气反应，生成水，同时电子通过外电路形成电流，向负载输出电能。在电堆阴极反应后剩余的空气和阳极尾排的排出的气体一起通入大气。



图 1 质子交换膜燃料电池电堆一维等效模型

两个电极发生的反应如下：



由于氧气的消耗，质子交换膜燃料电池阴极流道内的氮气浓度超过80%，阴极和阳极的氮气浓度差使得氮气不断向阳极扩散，并在阳极积累，降低了阳极侧氢气的浓度，从而降低了燃料电池的功率输出以及运行效率。所以对阳极氮浓度的管理算法十分重要。

1.2 模糊控制器

模糊控制是基于模糊数学的基本思想，将工程经验简化成为模糊规则，并利用模糊推理和模糊数据集进行控制决策，并将控制器输出的模糊集去模糊化，作为控制信号驱动执行器。总而言之，虽然传统控制方法对明确清晰的系统具有很好的控制效果，但对于复杂且建模困难的系统，模糊控制可以充分利用已有的工程经验简化控制模型，达到满足一定精度要求的控制。

1.3 基于模糊控制的质子交换膜燃料电池阳极侧氮浓度管理

模糊控制器由模糊化、去模糊化、数据库、规则库、模糊推理规则构成。本文的控制器设计采用三角形模糊集合、重心法去模糊化。推理规则采用Mamdani型模糊推理。

采用两输入一输出模糊控制，两输入分别是当前阳极氮浓度偏差 e ，以及当前阳极氮浓度偏差与上一时刻氮浓度偏差差值 ec ，输出为尾排阀尾排周期 u 。

e 的论域为： $\{ \min 5, \min 4, \min 3, \min 2, \min 1, \text{mid}, \max 1, \max 2, \max 3, \max 4, \max 5 \}$

e 的隶属函数如图 2 所示。

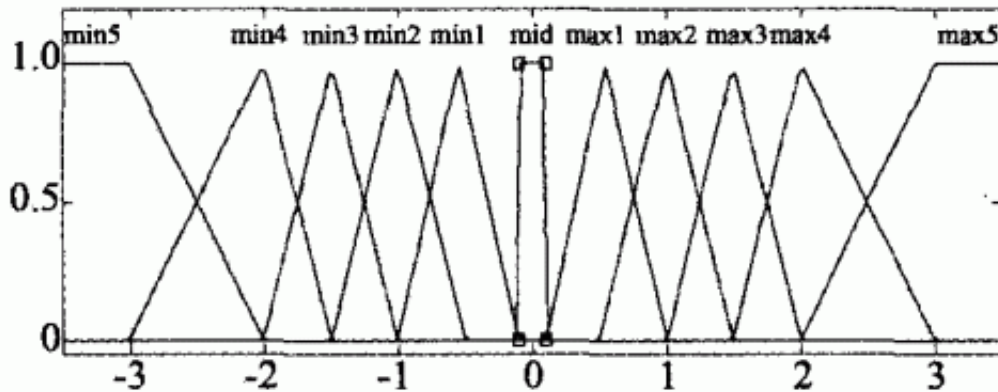


图 2 输入变量 e 的隶属函数

ec 的论域为：

$\left\{ \begin{array}{l} dif \min 4, dif \min 3, dif \min 2, dif \min 1, \text{mid}, \\ dif \text{mix } 1, dif \text{mix } 2, dif \text{mix } 3, dif \text{mix } 4 \end{array} \right\}$

ec 的隶属函数如图 3 所示。

输出 u 的论域为： $\{ neg4, neg3, neg2, neg1, \text{mid}, pos1, pos2, pos3, pos4 \}$

u 的隶属函数如图 4 所示。

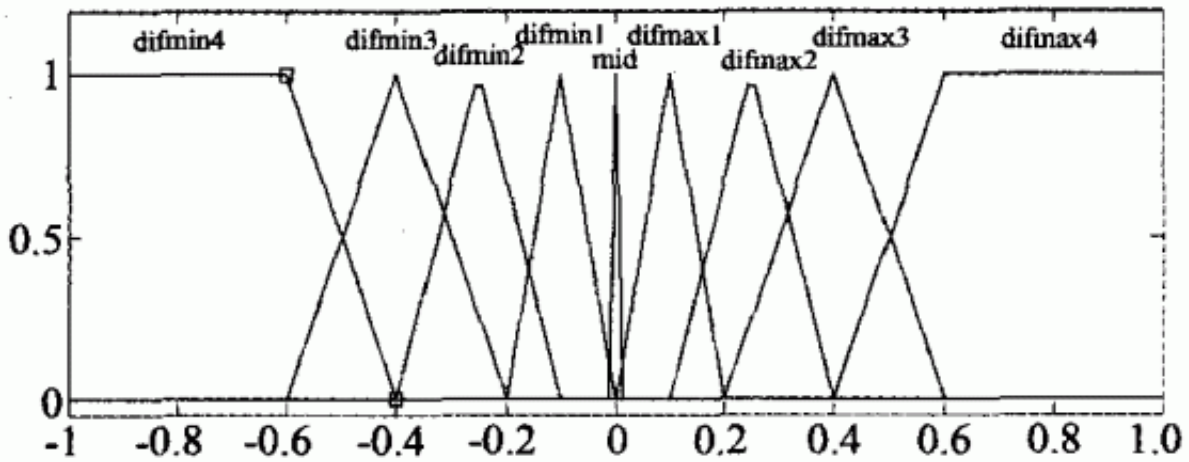


图3 输入变量 ec 的隶属函数

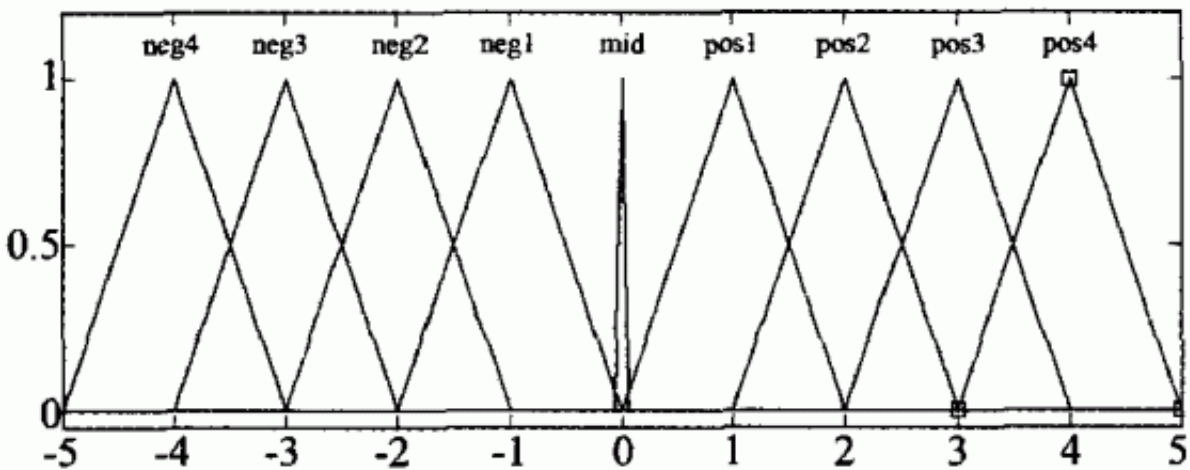


图4 输出变量 u 的隶属函数

2仿真分析

仿真模型如图5所示，预测氮浓度和给定氮浓度之差作为第一个输入 e ， e 的变化量作为第二个输入 ec ，通过模糊控制器计算，输入氢气路尾排阀周期，驱动执行器，控制燃料电池阳极流道氮浓度。

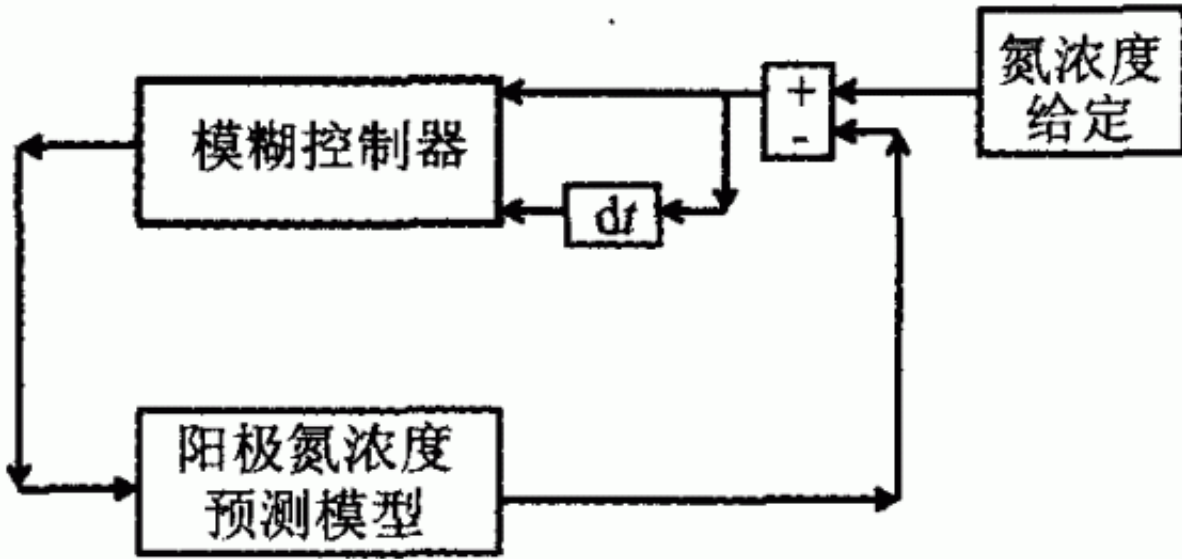


图 5 氮浓度控制仿真框图

初始氮浓度设为3%，给定氮浓度6%，仿真结果如图6所示。初始氮浓度设为3%，给定氮浓度为5%，仿真结果如图7所示。

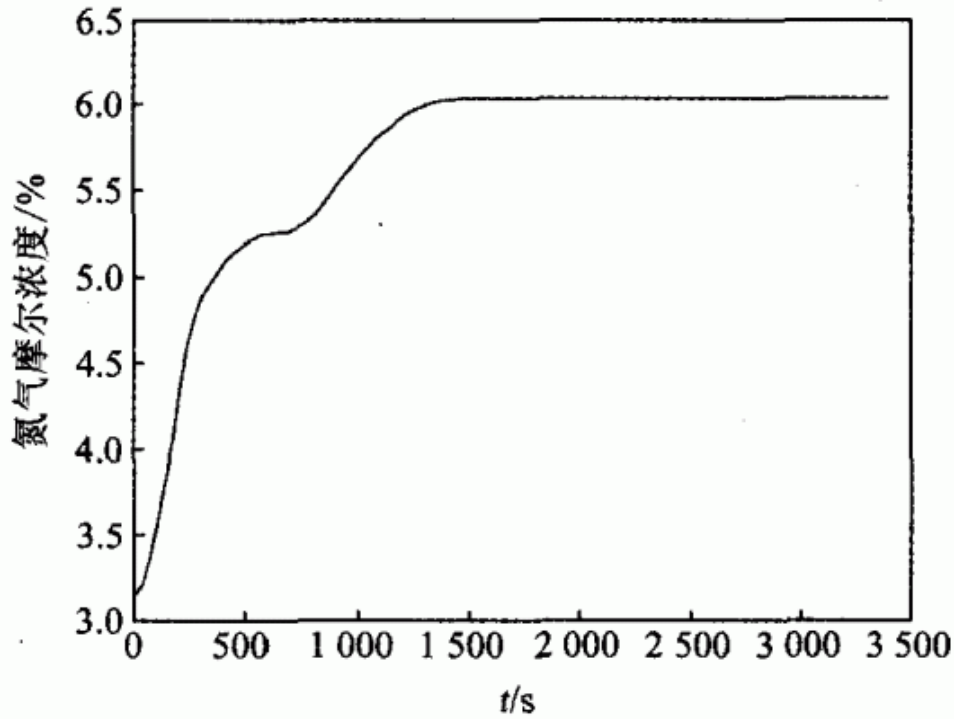


图6 氮浓度控制仿真1

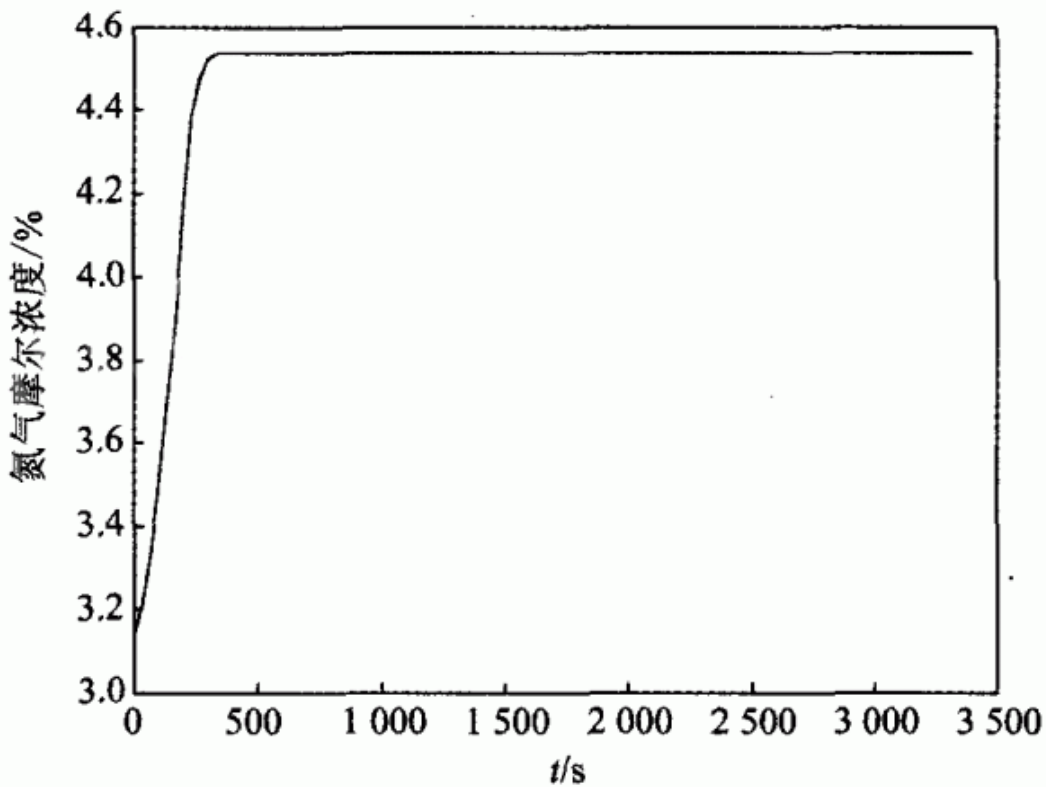


图7 氮浓度控制仿真2

仿真结果证明该方法可以对质子交换膜燃料电池阳极氮浓度有效控制，且控制方法简单，易于实现。

3结语

本文针对质子交换膜燃料电池阳极流道氮浓度控制问题，提出一种基于模糊控制的氮浓度控制策略，该控制方法使用阳极流道氮浓度预测值，输出符合控制目标的阳极尾排周期，驱动执行器。该方法控制逻辑简单，易于实现，仿真结果证明了该控制策略的有效性。

参考文献

- [1] Hu Z, Yu Y, Wang G et al. Anode purge strategy optimization of the polymer electrode membrane fuel cell system under the dead - end anode operation[J]. Journal of Power Sources, 2016,320: 68 - 77.
- [2] Matraji I, Laghrouche S, Wack M. Pressure control in a PEM fuel cell via second order sliding mode[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012,37: 16104 - 16116.
- [3] Rabbani A, Rokni M. Effect of nitrogen crossover on purging strategy in PEM fuel cell systems[J]. Applied Energy, 2013, 111:1061 - 1070.

[4] Chen Y, Yang C, Lee J. Implementation and evaluation for anode purging of a fuel cell based on nitrogen concentration [J]. *Applied Energy*, 2014, 113:1519 – 1524.

[5] Baik KD, Kim MS. Characterization of nitrogen gas cross-over through the membrane in proton – exchange membrane fuel cells [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36:732 – 739.

[6] Ebadighajari A, De Vaal J, Golnaraghi F. Optimal control of fuel over – pressure in a polymer electrolyte membrane fuel cell system during load change [J]. 2015 American Control Conference (ACC). American Automatic Control Council, 2015:3236 – 3241.

[7] Promislow K, St – Pierre J, Wetton B. A simple, analytic model of polymer electrolyte membrane fuel cell anode recirculation at operating power including nitrogen crossover [J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196:10050 – 10056.

[8] Ahluwalia RK, Wang X. Buildup of nitrogen in direct hydrogen polymer – electrolyte fuel cell stacks [J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 171:63 – 71.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/164838.html>