

质子交换膜燃料电池系统引射器的氢气循环特性

周 苏^{1,2}, 胡 哲¹, 王凯凯¹, 韩秋玲¹

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804; 2. 同济大学 中德学院, 上海 201804)

摘要: 针对质子交换膜燃料电池(PEMFC)低、中、高三种典型工况,采用索科洛夫方法进行了氢气循环引射器主要结构尺寸的设计并建立了相应流体动力学模型. 定义了测试用循环工况并进行了CFD模拟仿真,基于仿真数据进行了引射器工作特性曲线图的二维三次样条插值拟合及负载电流下各工作流约束压力值的计算. 搭建了引射器循环工况Simulink仿真模型进行相应的仿真分析,据此提出了两级引射器阳极循环系统方案. 仿真结果表明,两级引射器阳极循环系统可以满足PEMFC燃料电池0~300A全负载范围的工作需求,且具有较好的引射特性.

关键词: 燃料电池; 质子交换膜; 引射器; 索科洛夫引射器设计方法; 计算流体动力学; 循环特性

中图分类号: TK91

文献标志码: A

Simulation Analysis of Cyclic Characteristics of Ejectors for PEMFC Systems

ZHOU Su^{1,2}, HU Zhe¹, WANG Kaikai¹, HAN Qiuling¹

(1. College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Chinesisch-Deutsches Hochschulkolleg, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Based on the СОКОЛОВ ЯЕ ejector design method, the geometric parameters of ejectors were determined by the three kinds of selected working condition. Each ejector computational fluid dynamics (CFD) model was established in ANSYS/Fluent. The ejector cycle test model was established in Simulink, based on which the CFD model was used to carry out the simulation under six sets of load currents. Two-dimension cubic spline interpolation was used to obtain the two-dimension characteristic curve of the ejectors and primary fluid constraints were calculated. Finally, two-ejector anode recirculation system was proposed. The simulation results show that the proposed two-ejector system can meet the requirement of 0~300 A operating condition with a better circulation effect.

Key words: fuel cell; proton exchange membrane; ejector; E. Я. СОКОЛОВ ejector design method; computational fluid dynamics (CFD); cycle characteristics

引射器利用高速喷射工作流体造成的压差将喷出的气体不断吸入并再喷出,相比氢气循环泵,这种装置无移动部件、结构简单、运行可靠,而且无寄生功率,是实现燃料电池氢气循环利用的理想装置^[1]. 已有的质子交换膜燃料电池(PEMFC)系统引射器设计多采用开环设计^[2-4],无法体现其应用于实际系统时的工作特性. 引射器的设计工况点通常为最佳工况点,通过优化引射器的设计尺寸改变其工作特性和最佳工况点. 设计上,引射器的最佳工作区间应该能够覆盖PEMFC系统的全部工作区间. 以往的研究大多采用增加引射器移动部件或采用引射器与循环泵并联的方法实现上述设计目标. 例如, Brunner等人^[5]设计了一种可变喷嘴喉部直径的引射器,应用于巴拉德电堆系统,获得了较好的循环效果;文献^[6]提出了一种采用引射器和循环泵并联的阳极循环方式;文献^[7]采用喷氢技术和增加引射器移动部件等方法,解决了引射器在低功率负载下引射效果不佳的问题. 但是,上述方法通常需要较为精确而复杂的控制程序,或者以牺牲引射器无移动部件的优势为代价.

以多级引射器并联的阳极循环系统为研究对象,基于引射器循环系统工作特性的仿真分析,本文提出了一种适合80 kW级燃料电池大巴实际运行工况的引射器阳极循环方案.

1 引射器设计

1.1 设计工况

一个固定尺寸的引射器只存在一个最佳工况

收稿日期: 2017-08-11

基金项目: 同济大学-AVL List 博士后/博士基金; 同济大学-上海重塑能源科技“燃料电池技术特殊应用联合实验室”基金

第一作者: 周 苏(1961—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为新型车辆动力系统,燃料电池系统建模、仿真及控制. E-mail: suzhou@tongji.edu.cn

通讯作者: 胡 哲(1985—),博士生,主要研究方向为车用燃料电池建模、仿真与控制. E-mail: solar.hu@re-fire.cn



扫码
查看
作者
独家
介绍

点,只能在一定范围内具有较好的引射效果.因此,需要根据燃料电池系统的工作范围,确定引射器的设计工况.本文所研究的引射器应用对象是 Ballard MK902 电堆的燃料电池系统,因此,以该电堆的工作参数作为设计指导参数和仿真运行参数.以该电堆最大负载工况 300 A 作为设计参考工况(以下用

中负载设计工况表示),同时选择 150 A 作为低负载设计工况和 518 A 作为高负载设计工况,分别进行相应的引射器尺寸设计,进而对不同尺寸引射器在 0~300 A 负载范围的最佳工作区间进行对比分析.在 3 种设计工况下,燃料电池堆的工作参数如表 1 所示.

表 1 3 种设计工况参数列表

Tab.1 Parameters of three kinds of design condition

参数名称	参数值		
	低负载设计工况	中负载设计工况	高负载设计工况
工作流体入口压力 P_P / kPa	500	500	500
工作流体入口温度 T_P / K	300.15	300.15	300.15
工作流体入口质量流量 G_P / $g \cdot s^{-1}$	0.684	1.368	2.368
引射流体入口压力 P_H / kPa	128	203	203
引射流体入口温度 T_H / K	338.15	338.15	338.15
混合流体出口压力 P_c / kPa	157	223	320
混合流体出口温度 T_c / K	313.15	313.15	313.15

1.2 引射器尺寸设计

引射器的主要截面尺寸包括引射器入口截面直径 d_0 、喷嘴喉部截面直径 d_{p*} 、喷嘴出口截面直径 d_{p1} 、入口截面直径 d_2 、混合室出口截面直径 d_3 、自由流束直径 d_4 和扩压室出口截面直径 d_c ;其主要轴向

尺寸包括喷嘴收缩段长度 l_1 、喉孔长度 l_t 、喷嘴扩张段长度 l_2 、喷嘴距混合室入口长度 l_c 、混合室长度 l_k 和扩压室长度 l_s .图 1 为相应的结构示意图.

根据索科洛夫引射器设计方法^[8],可以得到如表 2 所示的引射器主要截面尺寸及轴向尺寸.

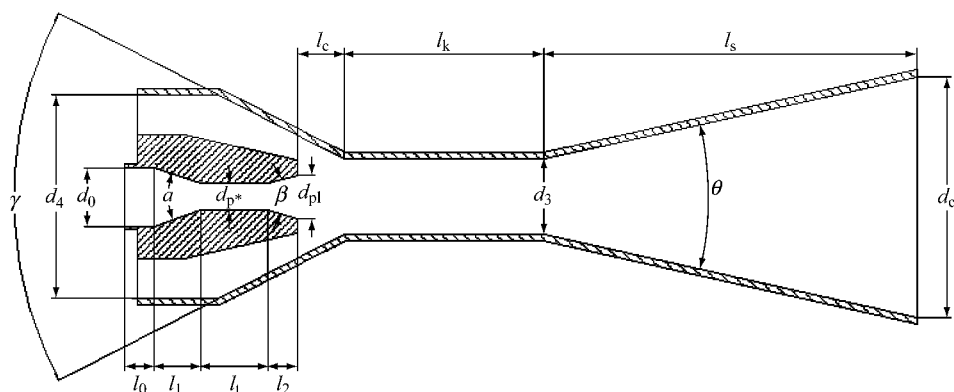


图 1 引射器结构尺寸

Fig.1 Configuration sizes of ejector

表 2 3 种引射器设计尺寸

Tab.2 Design dimensions of three ejectors

设计工况	d_0	d_{p*}	d_{p1}	d_3 (d_2)	d_4	d_c	l_1	l_2	l_t	l_c	l_k	l_s
低	7.00	1.68	1.84	5.04	6.43	32.00	5.7	0.14	3.36	1.67	50.43	128.23
中	7.00	2.37	2.41	6.03	9.30	32.00	4.96	0.18	4.75	2.97	48.25	92.38
高	7.00	3.13	3.18	7.94	12.46	32.00	4.15	0.24	6.25	18.48	79.36	56.61

1.3 引射器 CFD 建模

流体运动必须遵循质量守恒、动量守恒和能量守恒三大定律^[9].如果在流动过程中包含不同组分的相互作用和混合现象,系统还要遵循组分守恒定律;如果流体在流动时处于湍流状态,系统还要遵守附加的湍流输运方程^[10].

质量守恒方程(也称为连续性方程)的微分表达

式为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = S_m \quad (1)$$

式中: ρ 表示密度; t 表示时间; \mathbf{u} 表示速度矢量; S_m 表示连续相的源相.

动量守恒方程的本质是牛顿第二定律,在惯性坐标系的 i 方向上其微分表达式如下:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_i \mathbf{u}) \\ & = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ii}}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ik}}{\partial x_k} + F_i \end{aligned} \quad (2)$$

式中: u_i 表示 i 方向上的速度分量; P 表示静压力值; $\tau_{ii}, \tau_{ij}, \tau_{ik}$ 表示黏性应力 $\bar{\tau}$ 在 ii, ij, ik 3 个方向上的分量; x_i, x_j, x_k 表示惯性坐标系中的 3 个分量; F_i 表示外部体积力(包含了系统相关源项)。

能量守恒方程即为热力学第一定律,其微分表达式一般为

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} T) = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla \cdot T) + S_T \quad (3)$$

式中: T 表示温度; k_{eff} 表示有效热导系数; S_T 表示源项,即化学反应热和其他体积的热源。

在 ANSYS/Fluent 软件中,采用表 1 和表 2 的数据作为模型的边界条件和参数,建立引射器二维轴对称的流体动力学模型。为了验证仿真模型的准确性,通过仿真得到中负载工况下设计的引射器在不同工作入口压力 P_P 下的工作入口质量流量 G_P ,如图 2 所示。由图 2 可知,仿真结果中 G_P 与 P_P 成正比关系,可表示如下:

$$G_P = k_P P_P + b_P \quad (4)$$

此结果与理论推导的结论相符^[11]。

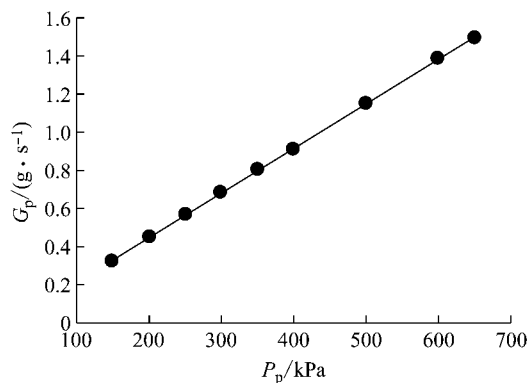


图2 工作流体入口质量流量随工作流体入口压力的变化曲线

Fig.2 The curve of primary fluid mass flow versus its pressure

2 测试工况和系统环境

2.1 测试用循环工况

用于燃料电池大巴的阳极循环系统设计上应该满足城市大巴实际运行的需要。因此,进行阳极循环系统仿真时,首先需要确定测试用循环工况。燃料电池大巴的实际运行工况总体而言可以分为启动、怠

速、变负载、高功率负载和停止这 5 个过程。2008 年北京奥运会期间运行的燃料电池大巴实际行驶工况分布图谱如图 3 所示,从中可以得出 1 h 的循环工况图谱参数^[12],即

$$\{n_1 = 1, t_1 = 13 \text{ min}, n_2 = 56, t_2 = 14 \text{ min}\} \quad (5)$$

式中, n_1, t_1 分别表示每小时平均启停次数、怠速时间; n_2, t_2 分别表示每小时平均加载次数、平均高功率加载时间。

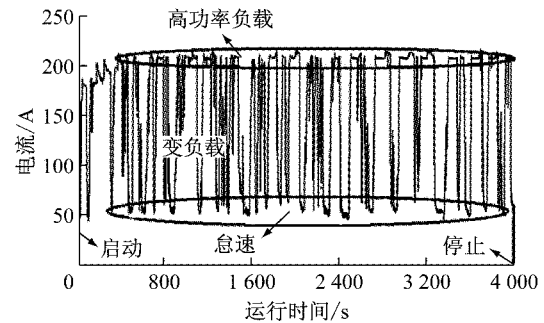


图3 PEMFC大巴实际运行工况图^[11]

Fig.3 FC bus actual operating condition

MK902 电堆的最大功率为 85 kW,怠速电流为 5 A,最大允许电流为 300 A。因此,根据式(5)的实际运行工况图谱参数,可定义如图 4 所示的仿真用电流负载循环工况。

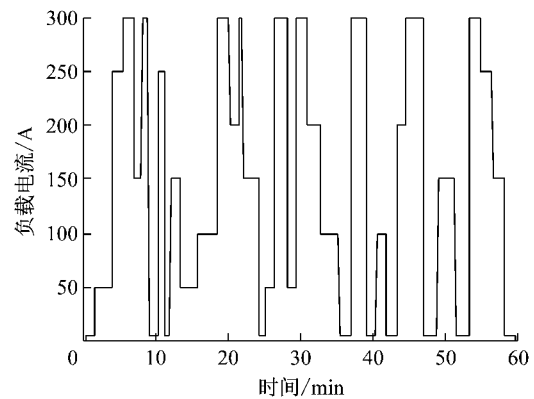


图4 测试用 PEMFC 系统循环工况

Fig.4 Test cycle of PEMFC system

在图 4 所示的 1 h 循环周期内,对应于怠速电流 5 A 的怠速时间为 13 min,对应于最大电流 300 A 的加载时间为 14 min;在变负载工况范围选取 50 A、100 A、150 A、200 A 和 250 A 这 5 个工况点并平均分配时间。

2.2 阳极循环仿真约束条件

为了模拟配置了引射器的燃料电池系统真实工作条件,需要给出相应的约束条件。不考虑排气阀的作用,燃料电池系统应该满足如下约束条件:

(1) 引射器出口质量流量 G_c 等于工作流质量流量 G_p 与引射流质量流量 G_H 之和,即

$$G_c = G_p + G_H \quad (6)$$

(2) 引射流量 G_H 不大于阳极出口的理论流量,即

$$G_H \leq G_c - G_a \quad (7)$$

式中: G_a 为电流对应的理论氢气质量消耗流量.

(3) 引射器出口质量流量 G_c 满足氢气过量供应的需求,即

$$G_c \geq k_a G_a \quad (8)$$

式中: k_a 为氢气过量系数.

(4) 不发生引射回流,即引射系数 u 不小于零,即

$$u \geq 0 \quad (9)$$

(5) 引射器出口压力 P_c 等于阳极侧的理论需求压力 P_a ,即

$$P_c = P_a \quad (10)$$

3 负载电流下各工作流约束压力值计算

3.1 引射器特性曲线拟合

为了获取满足上述 5 个约束条件对应的工作流压力与负载电流的关系式,首先需要得到引射器特性曲线.

以中负载设计工况为例,进行引射器特性曲线拟合.选取 5 A、100 A、150 A、200 A、250 A 和 300 A 6 组负载电流,分别在 150 kPa、200 kPa、250 kPa、300 kPa、350 kPa、400 kPa、500 kPa 和 600 kPa 8 个工作流压力下进行 CFD 模拟仿真,得到 6 组仿真结果 (I, P_p, u) .

给定尺寸的引射器具有的引射系数 u 与负载电流 I 和工作流压力 P_p 之间呈一定的函数关系.给定负载工况下即负载电流保持不变时,给定尺寸的引射器的引射系数 u 与工作流压力 P_p 之间的关系可表示为

$$u = f(P_p) = a_0 + a_1 P_p + a_2 P_p^2 + a_3 P_p^3 \quad (11)$$

对上述 6 组仿真结果,进行二维三次样条插值拟合,可以得到拟合的函数关系式如下:

$$u = F(I, P_p) \quad (12)$$

图 5 即为引射器工作特性曲线.

已知关系式

$$u = \frac{G_H}{G_p} \quad (13)$$

$$G_c = (1 + u)G_p \quad (14)$$

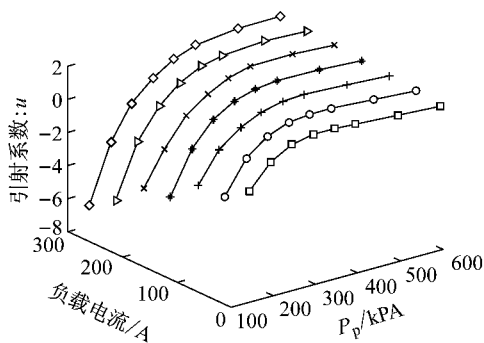


图 5 引射器二维特性曲线

Fig. 5 Two-dimension characteristic curves

联立式(4)、式(11)~式(14)可得

$$G_c = (1 + f(P_p))(k_p P_p + b_p) = h(P_p) \quad (15)$$

联立式(7)~式(9)和式(15),可得不等式方程组如下:

$$\begin{cases} F(I, P_p)G_p \leq G_c - G_a \\ (1 + F(I, P_p))G_p \geq k_a G_a \\ F(I, P_p) \geq 0 \end{cases} \quad (16)$$

在不同负载电流下,根据法拉第公式,阳极侧氢气理论消耗的质量流量为

$$G_a = \frac{nI}{F} \quad (17)$$

式中: F 为法拉第常数; n 为电堆中单池数量(本文中 $n=440$).

将式(14)和式(17)代入不等式组(16),可以将约束条件(2)~(4)转化为工作流压力与负载电流的关系,即

$$\begin{cases} P_p \geq f_2(I) \\ P_p \geq f_3(I) \\ P_p \geq f_4(I) \end{cases} \quad (18)$$

式中: $f_2(I)$ 、 $f_3(I)$ 和 $f_4(I)$ 分别是根据约束条件(2)~(4)求得的工作流压力下限值.因此,工作流压力取值 $P_p = f_2(I) = \max(f_2(I), f_3(I), f_4(I))$ 时,满足系统所有的约束条件.

由以上计算过程,可得在低、中和高负载设计工况下设计的不同引射器(参见表 2)在 0~300 A 负载电流下各工作流约束压力值和最终的工作流压力值,如图 6 所示.

在一个测试循环工况下,燃料电池系统的负载电流值及引射器工作流入口压力分布如图 7 所示.

由图 7 及式(17)可计算得到电堆阳极侧氢气消耗质量流量 G_a 及其累计氢气消耗量和氢瓶按一定过量系数消耗质量流量 $k_a G_a$ 及其累计氢气消耗量,分别如图 8a 和图 8b 所示.

由图 8 可知,一个测试循环工况下电堆阳极侧

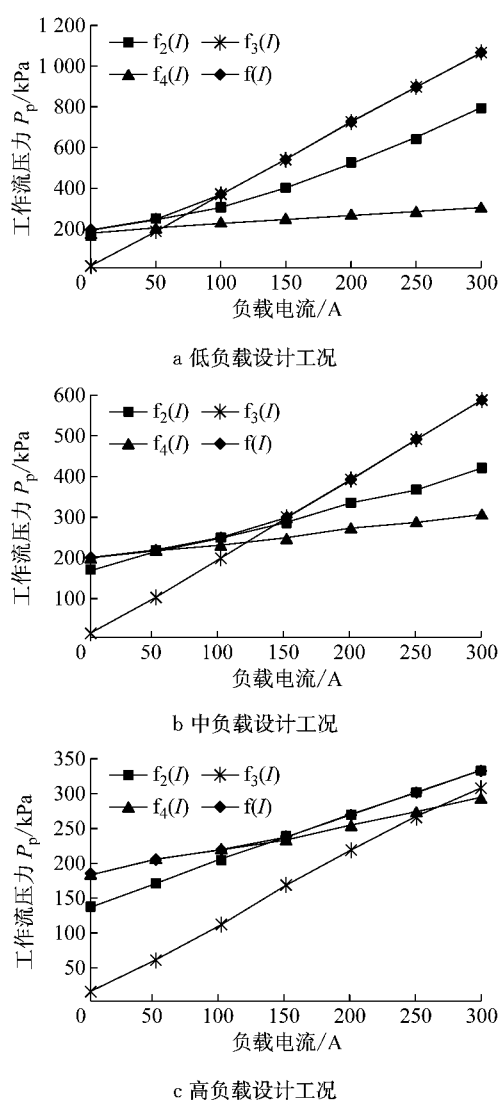


图6 在低、中和高负载设计工况下设计的引射器各工作流约束压力值和最终的工作流压力值

Fig.6 Primary fluid pressure constraints and the final primary fluid pressure of three ejectors

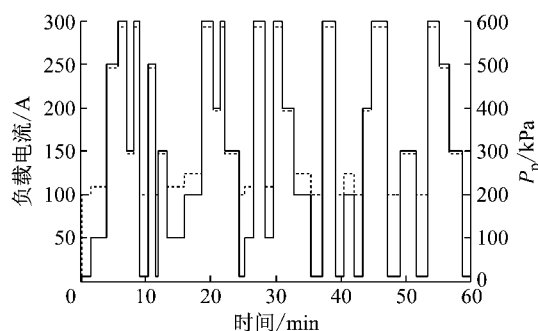


图7 燃料电池负载电流值及引射器的工作流入口压力分布

Fig.7 Load current of PEMFC and primary fluid pressure of ejector

理论消耗的氢气量为 2.349 0 kg, 氢瓶实际消耗的氢气量高达 3.865 6 kg, 其中有近 40% 的氢气没有

被利用, 通过排气阀排出, 造成氢气浪费. 因此, 有必要采取氢循环措施, 如采用引射器作为阳极循环装置, 提高氢气利用率.

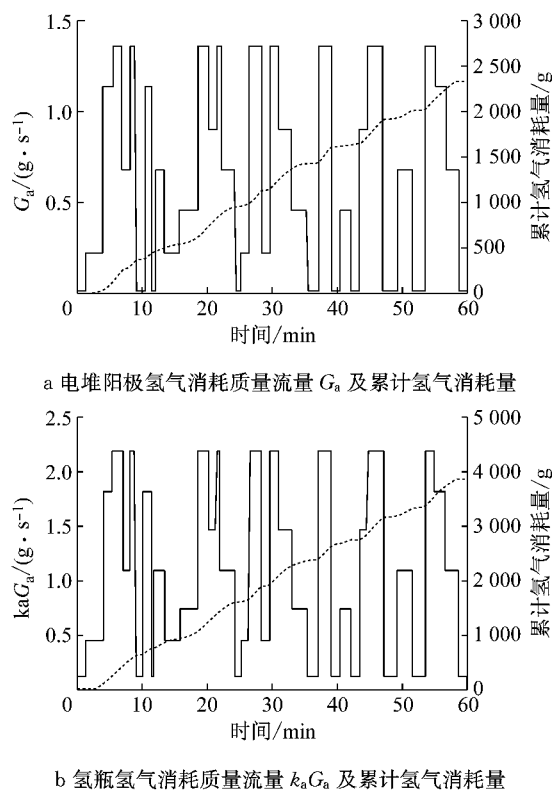


图8 电堆阳极侧氢气消耗质量流量 G_a 及其累计氢气消耗量和氢瓶氢气消耗质量流量 $k_a G_a$ 及其累计氢气消耗量

Fig.8 Consumption mass flow rate and accumulated hydrogen consumption at the anode of the stack and hydrogen tank

3.2 引射器循环仿真模型搭建

由式(17)可知, 氢气理论消耗质量流量 G_a 只与负载电流有关, 与是否采用引射器循环系统以及引射器尺寸等无关. 在本文给定的一个循环工况下, 由上节可知, 电堆阳极侧理论氢气消耗量为一个确定的值, 即 2.349 0 kg. 因此, 氢瓶实际消耗的氢气量越小, 采取的氢循环效果越好. 采用引射器循环时, 氢瓶实际消耗的氢气量是引射器工作流质量流量 G_p 的积分值, G_p 与工作流体压力 P_p 的关系如式(4)所示. 引射器工作流体压力 P_p 由图6所示的工作流约束压力值关系曲线确定. 氢瓶实际消耗的氢气量与电堆阳极侧理论消耗氢气量的差值则为通过排气阀排出燃料电池的氢气量.

引射器循环仿真模型以图4所示的测试循环工况作为输入; 根据图7所示引射器工作流约束压力值曲线以及式(12), 搭建一级引射器阳极循环

Simulink 仿真模型,如图 9 所示。

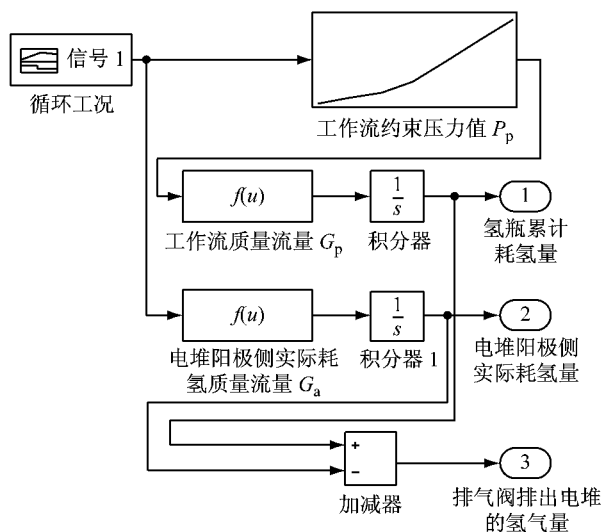


图 9 一级引射器阳极循环仿真模型

Fig.9 One-ejector anode recirculation system model

4 引射器循环特性分析

4.1 一级引射器循环特性分析

在一个循环工况下,采用三种尺寸引射器(参见表 2)的燃料电池系统其理论工作流入口压力分布和氢瓶累积氢气消耗量如图 10 所示。由仿真结果可知,一个循环工况下低、中、高三种设计工况下得到的一级引射器阳极循环系统,其氢瓶累积耗氢量分别为 2.583 6 kg、2.883 9 kg、3.973 8 kg。

由上文分析可知,工作流体的质量流量 G_p 与压力 P_p 成正比, P_p 的约束条件决定了该系统实际的氢气消耗量。根据图 6 的信息,可以得到如下结论。

(1) 低负载工况下设计的一级引射器

低负载工况下设计的引射器在 0~100 A 电流负载范围内,其 P_p 小于 400 kPa。当负载电流大于 150 A 时, P_p 大于 550 kPa;负载电流达到 300 A 时, P_p 超过 1 000 kPa。按此设计,会导致引射器喷嘴承受过高的压力而产生磨损,同时存在严重的安全隐患。

(2) 中负载工况下设计的一级引射器

中负载工况下设计的引射器在 0~50 A 电流负载范围,其 P_p 受约束条件(4)的限制,引射系数为 0,引射器不工作;在 50~150 A 范围内, P_p 受约束条件(2)的限制,引射器出口的氢气供应量恰好等于系统需求的氢气供应量;在 150~300 A 高负载范围, P_p 受约束条件(3)的限制,引射器按照过量系数要求供应氢气,供应量大于系统需求的氢气量。

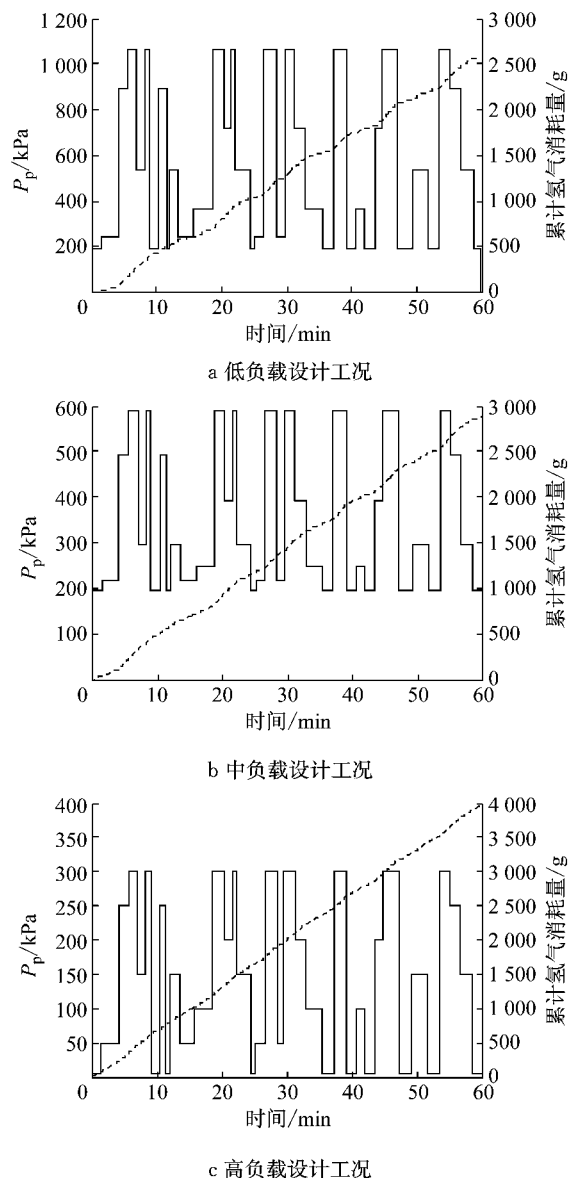


图 10 一个循环工况下工作流入口压力分布和氢瓶累积耗氢量

Fig.10 Primary fluid pressure of ejector and accumulated hydrogen consumption of three ejectors in one cycle

(3) 高负载工况下设计的一级引射器

高负载工况下设计的引射器在 0~100 A 电流负载范围内,其 P_p 受约束条件(4)的限制,引射系数为 0,引射器不工作;当负载电流大于 150 A 时, P_p 受约束条件(2)的限制,引射流量恰好等于阳极出口理论流量。在最大负载 300 A 时,工作流的压力值 P_p 为 333.569 kPa,此值低于安全操作压力值。

综上所述,低负载工况下设计的引射器在 0~100 A 负载范围内引射效果较好,大于 150 A 时会产生氢气浪费、引射器零件磨损和操作安全隐患等问题;中负载工况下设计的引射器在 50~150 A 负

载范围内循环效果较好,0~50 A 和 150~300 A 负载范围内仍然存在氢气浪费现象;高负载工况下设计的引射器在大于 150 A 时引射效果较好,但不适合在 0~100 A 负载范围内工作. 3 种负载工况下设计的一级引射器循环系统单独工作都不适用于覆盖 0~300 A 整个负载工况范围的要求.

4.2 两级引射器方案及循环特性分析

由 4.1 节分析可知,低负载工况下和高负载工况下设计的引射器分别在 0~100 A 和 150~300 A 负载范围内引射效果较好. 因此,本文提出采用两个引射器并联的两级引射器循环方案(其系统结构如图 11 所示),并按此进行整个循环工况的仿真分析.

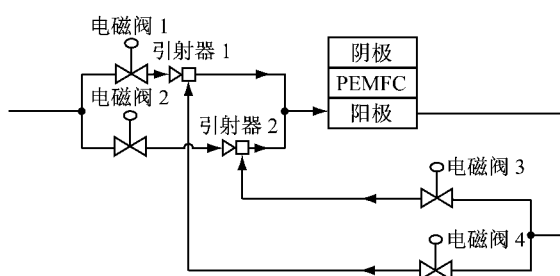


图 11 两级引射器阳极循环方案的系统结构

Fig. 11 Configuration of two-ejector anode recirculation system

本文建议的方案中,通过控制电磁阀 1~4 选择引射器 1 或引射器 2 实现氢气循环. 当负载工况在 0~150 A 电流负载范围内,采用低负载工况下设计的引射器 1;在 150~300 A 范围内,采用高负载工况下设计的引射器 2. 一个循环工况下采用两级引射器的系统氢瓶总氢气消耗量如图 12 所示.

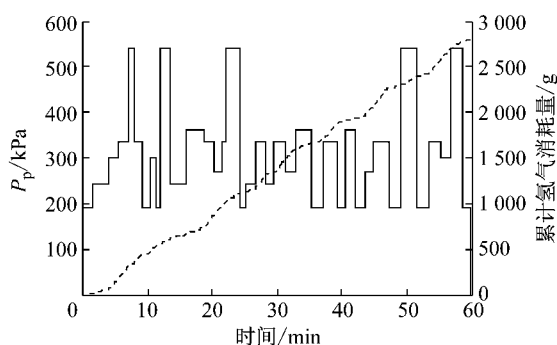


图 12 一个循环工况下氢气消耗量累积量(采用两级引射器循环方案)

Fig. 12 Accumulated hydrogen consumption of two-ejector anode recirculation system in one cycle

由图 12 可知,采用两级引射器的阳极循环系统在一个仿真循环工况下其氢瓶的氢气消耗量为 2.790 2 kg,最高工作入口压力不大于 550 kPa,

适用于 0~300 A 全电流负载范围.

5 结论

基于低、中、高设计工况设计的 3 种引射器参数,分别进行了氢循环仿真研究. 由仿真获得的一级引射器循环特性分析结果可知,3 种负载工况下设计的一级引射器循环系统单独工作都不适用于覆盖 0~300 A 整个负载工况范围的要求. 因此,本文提出并联的两级引射器氢循环方案,进行了相应的仿真研究. 结果表明,建议的两级引射器循环系统最高工作入口压力不大于 550 kPa,适用于 0~300 A 全电流负载范围,且能够减少氢气消耗量.

参考文献:

- [1] 王洪卫, 王伟国. 质子交换膜燃料电池阳极燃料循环方法[J]. 电源技术, 2007, 31(7): 559.
WANG Hongwei, WANG Weiguo. PEMFC anode fuel recirculation method[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2007, 31(7): 559.
- [2] 沈鹏远. PEMFC 用引射器的设计及数值模拟研究[D]. 上海: 同济大学, 2013.
SHEN Pengyuan. Development and numerical simulation study of ejector for PEM FC system [D]. Shanghai: Tongji University, 2013.
- [3] 许思传, 韩文艳, 王桂, 等. 质子交换膜燃料电池引射器的设计及特性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(1): 128.
XU Sichuan, HAN Wenyan, WANG Gui, et al. Hydrogen-recirculating ejector for proton exchange membrane fuel cell system: design and performance [J]. Journal of Tongji University, 2013, 41(1): 128.
- [4] 尹燕, 范明哲, 焦魁, 等. 质子交换膜燃料电池系统引射器的数值分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2016, 49(7): 763.
YIN Yan, FAN Mingzhe, JIAO Kui, et al. Numerical analysis of ejector used in a PEMFC system[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2016, 49(7): 763.
- [5] BRUNNER D A, MARCKSA S, BAJPAI M, et al. Design and characterization of an electronically controlled variable flow rate ejector for fuel cell applications[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(5): 4457.
- [6] AHLUWALIA R K, WANG X. Fuel cell systems for transportation: status and trends [J]. Journal of Power Sources, 2007, 177(1): 167.
- [7] 马丽, 徐洲, 吴兵. 共轨喷射器在燃料电池阳极系统应用的试验[J]. 电源技术, 2011, 35(12): 1548.
MA Li, XU Zhou, WU Bing. Experimental research on in-jector application in fuel cell positive system. [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2011, 35(12): 1548.

(下转第 1130 页)