



质子交换膜燃料电池驱动直流电机转速性能的动态仿真模型*

A Dynamic Model Simulating the Velocity Properties of DC Motor Driven by PEMFC

许震宇 孙诚骁 / 同济大学航空航天与力学学院

摘 要: 燃料电池具有能量转化效率高、低噪声、低排放、稳定可靠等优点,被认为是继蒸汽机和内燃机之后的第三代动力系统。燃料电池已经成为无人机、轻型飞机的主动力,并用于大型客机的辅助动力装置。本文设计了应用质子交换膜燃料电池直接驱动直流电机和螺旋桨的方案,并利用Matlab/Simulink构建了仿真模型,模拟燃料电池的动态输出特性以及电动机的转速特性。该模型可以为燃料电池飞行器的研发提供参考数据。

Abstract: Fuel cell is believed to be the third generation power system after the steamer and the internal-combustion engine, with the virtues of high efficiency, low noise, low emission, reliability and stability. Fuel cell have been developed as the main power of UAV and light airplane, or as the APU of a large passenger airliner. In this paper, a DC motor system is proposed, which is driven directly by a Proton Exchange Membrane fuel cell. A Matlab/Simulink model is used to simulate the dynamic characteristics of the fuel cell and the motor speed. The work here can be applied to help the design of the fuel cell powered flight vehicles.

关键词: 质子交换膜燃料电池; 直流电机; 仿真; 动态模型

Keywords: proton exchange membrane fuel cell; DC motor; simulation; dynamic model

0 引言

对能源和环境问题的持续关注,

使人们对于核能、太阳能、风能、生物质能、地热能、海洋能、氢能等新能源的应

用寄予极大的期望^[1]。在汽车、轮船等交通工具中,已经推出了多种电驱动的型

$$G_x^{(i)}[k] = \min\{G_{x_1}^{(i)}[k], G_{x_2}^{(i)}[k]\} \quad (7)$$

余下的控制过程类似前面所述的加速度控制流程。

3 结论

针对如何对力和加速度两种信号进行双重同步控制这一力控振动试验关键问题,本文提出了一种可行的双控策略,可用于开发力控振动试验所需的新型振动控制器。

AST

参考文献

[1] Scharton, T.D. Force Limited

Vibration Testing Monograph. Jet Propulsion Lab., NASA RP 1403, Pasadena, CA, May 1997.

[2] Force Limited Vibration Testing. Jet Propulsion Lab., NASA Technical Handbook, NASA-HDBK-7004B, Pasadena, CA, Jan. 2003.

[3] Daniel B. and Worth A1. A Method for Implementing Force-Limited Vibration. Control [J]. Journal of the IEST, 1997, 40: 34-41.

[4] Soucy, Y., Dharanipathi, V.R. and Sedaghati, R. Comparison of Methods

for Force Limited Vibration Testing[C]. Proceedings of the IMAC XXIII Conference and Exposition on Structural Dynamics, Society of Experimental Mechanics, Bethel, CT, 2005.

[5] Chang, Kurng Y. Structural response loads in force-limited vibration testing [J]. Journal of the IEST, 2002, 45: 129-135.

作者简介

蒋瑜, 博士, 副教授, 主要研究方向为随机振动, 结构动力学与振动试验技术等。

号^[2]。航空领域也面临着能源、环境等同样的问题^[3, 4]。设计多电和全电飞机,是应对这些问题的有效途径。电驱动特别是燃料电池驱动的无人机和轻型飞机已经成功试飞了多个型号^[5-7],并且已经试验用作大型客机的辅助动力装置(APU)^[8]。燃料电池甚至有可能成为支线飞机、干线飞机的主动力^[9]。燃料电池具有污染小、噪声低、燃料利用率高、生命周期成本低、结构简单、可靠性高、热辐射小等优点,是航空推进技术的发展方向之一。

本文设计了利用质子交换膜燃料电池(PEMFC)直接驱动直流电动机的动力系统,并利用Matlab/Simulink构建了一个燃料电池驱动直流电机和螺旋桨的动态性能仿真模型,并通过实例计算和分析了该系统的动态特性。

1 燃料电池原理

燃料电池是一种把储存在燃料和氧化剂中的化学能,等温地按电化学原理转化为电能能量转换装置。燃料电池是由含催化剂的阳极、阴极和离子导电的电解质构成。燃料氢气在阳极氧化,氧化剂在阴极还原,产生唯一的产物——水。电子从阳极通过负载流向阴极构成电回路,产生电能且驱动负载工作。燃料电池与常规电池的不同在于,它工作时需要连续不断地向电池内输入燃料和氧化剂,并通过电化学反应生成水,释放出电能,只要保持燃料供应,电池就会不断地工作、提供电能。

目前正在开发的商用燃料电池除了质子交换膜燃料电池,还包括碱性燃料电池(Alkaline Fuel Cell, AFC)、磷酸燃料电池(Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC)、熔融碳酸盐燃料电池(Molten

Carbonate Fuel Cell, MCFC)、固体氧化物燃料电池(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)^[10]。

由于具有工作温度低、启动快等特点,PEMFC最适于用作汽车、轻型飞机的动力电源。PEMFC的原理见图1,显示的是单层质子交换膜的结构。实际中电池堆是由多层质子交换膜叠加形成的。影响燃料电池能量输出特性的因素很多,包括初始温度、环境温度、电流密度、质子交换膜的湿度、氢气和氧气的分压等。

2 燃料电池仿真模型

PEMFC的性能计算研究方法一般有两种:计算流体力学模型和仿真模型^[11]。计算流体力学模型可以详细地模拟PEMFC内部,包括压力分布、流场分布等。但是如果用于研究燃料电池系统的性能,计算流体力学模型的计算量较大。

在对PEMFC系统进行研究时,需要经过较少的计算就能根据燃料电池的工作条件,了解系统的总体性能。所以,本文利用Matlab/Simulink软件构建了PEMFC的动态仿真模型^[12, 13]。

燃料电池发电过程的建模涉及到电化学、热力学和质量输运等多个学科。燃料电池的输出电压为单层膜输出电压的叠加

$$V_{\text{out}} = N_{\text{cell}} V_{\text{cell}} \quad (1)$$

其中, N_{cell} 是质子交换膜的层数, V_{cell} 是单层的输出电压

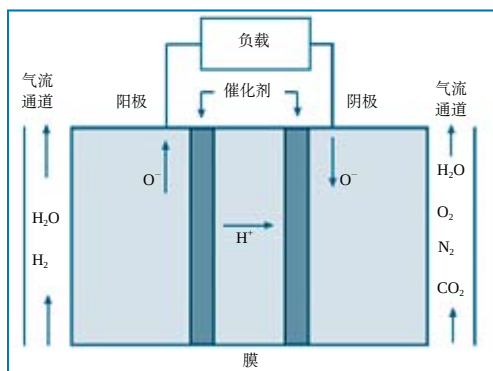


图1 PEMFC的原理图

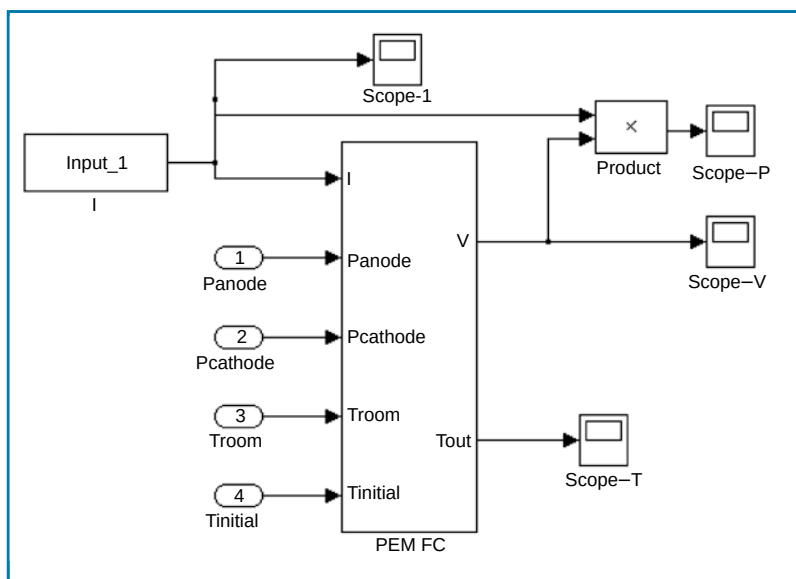


图2 PEMFC 的仿真模型

* 基金项目:受上海市青浦区同济大学科技合作项目2011项目资助。

$$V_{\text{cell}} = E_{\text{nerst}} - V_{\text{act, cell}} - V_{\text{ohm, cell}} - V_{\text{conc, cell}} \quad (2)$$

其中, E_{nerst} 是可逆电位, $V_{\text{act, cell}}$ 是活化损失, $V_{\text{ohm, cell}}$ 是欧姆损失, $V_{\text{conc, cell}}$ 是浓度损失。

燃料电池内部产生的净热量为

$$\dot{q}_{\text{net}} = \dot{q}_{\text{chem}} - \dot{q}_{\text{elec}} - \dot{q}_{\text{sens+latent}} - \dot{q}_{\text{loss}} \quad (3)$$

其中, $\dot{q}_{\text{chem}}$ 是化学反应生成热, $\dot{q}_{\text{elec}}$ 是电热, $\dot{q}_{\text{sens+latent}}$ 是热, $\dot{q}_{\text{loss}}$ 是由于对流导

致的耗散热。该净热量引起电池堆内部的温度升降。

再考虑质量的传输和守恒, 就构成了燃料电池的整个方程体系^[12]。图2是在Simulink中建立的燃料电池模型。负载的电流 I 随时间的变化可以通过文件输入。输入1~4分别为正负极的气压、环境温度和电池堆初始温度。输出为电池功率、路端电压以及电池堆温度。

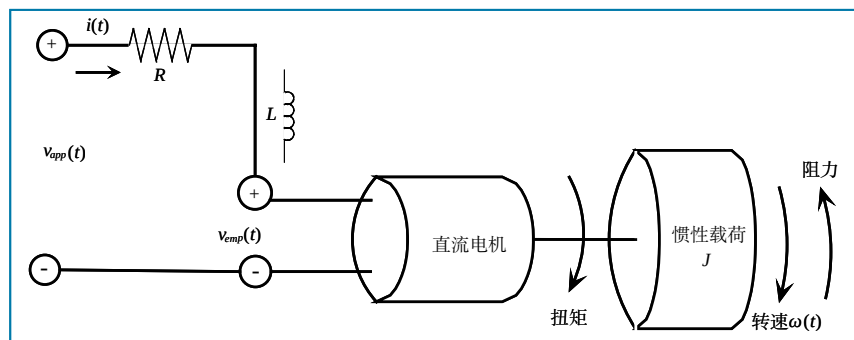


图3 直流电动机等效电路

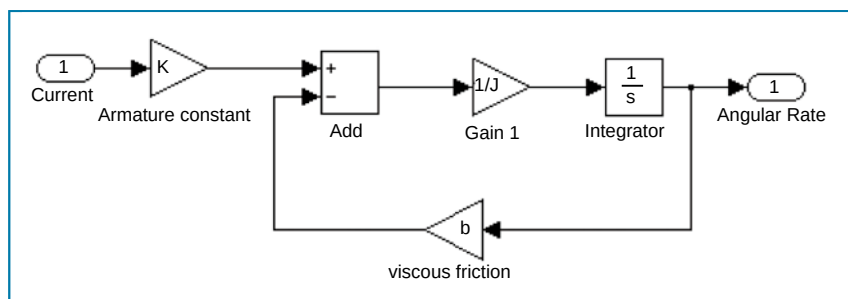


图4 直流电机的仿真模型

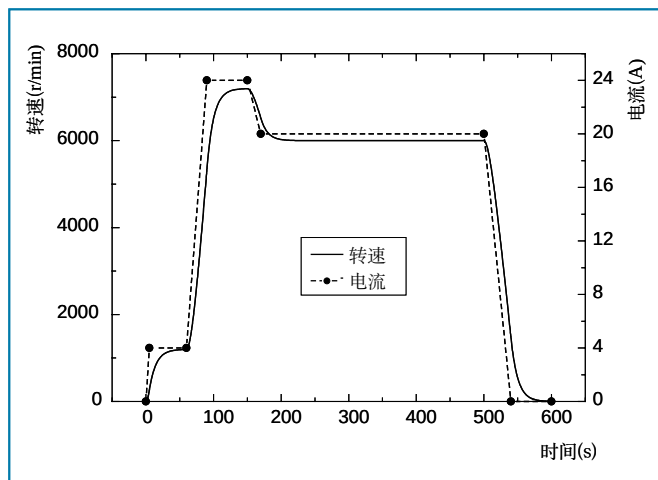


图5 输入电流和电动机转速

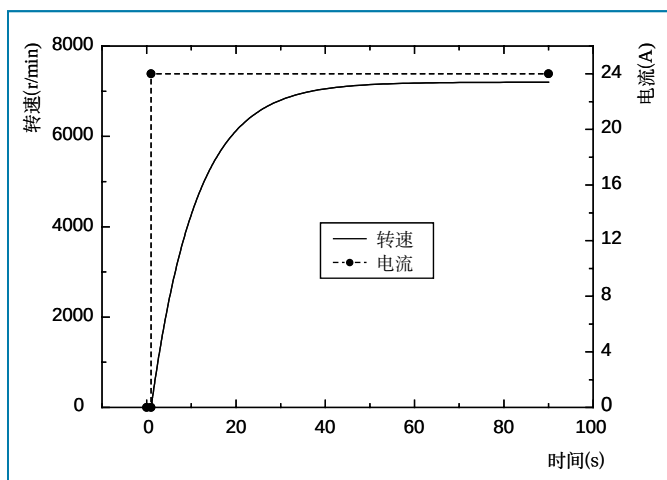


图6 电动机转速对阶跃电流的响应

3 电动机与螺旋桨模型

燃料电池输出的是直流电, 可以直接驱动直流电动机。直流电动机的特性可以用图3所示的等效电路描述。螺旋桨和电动机转子可以简化为具有惯性矩的负载, 在转动时会产生与转速成正比的阻力。相应的控制方程为

$$\begin{aligned} \frac{di}{dt} &= \frac{V_{app}}{L} - \frac{R}{L}i - \frac{K_{\phi}}{L}\omega \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{K_{\phi}}{J}i - \frac{b}{J}\omega \end{aligned} \quad (4)$$

其中, i 为电流, V_{app} 为路端电压, ω 为电动机转速, b 为摩擦系数, J 为负载的惯性矩, K_{ϕ} 为电枢常数。

由于文中负载电路的电流是给定的, 所以只需根据公式(4)中的第2个式子, 在Simulink中建立相应的直流电机模型, 如图4所示。

4 算例分析

将燃料电池模型与电动机模型结合起来, 就可以描述燃料电池和电动机的动态特性。假设某型500W质子交换膜燃料电池驱动电动机完成一次10分钟的运行。燃料电池的输入参数为: 阳极和阴极气压分别为1.5atm和1atm, 环境温度和电池堆的初始温度均为25℃。

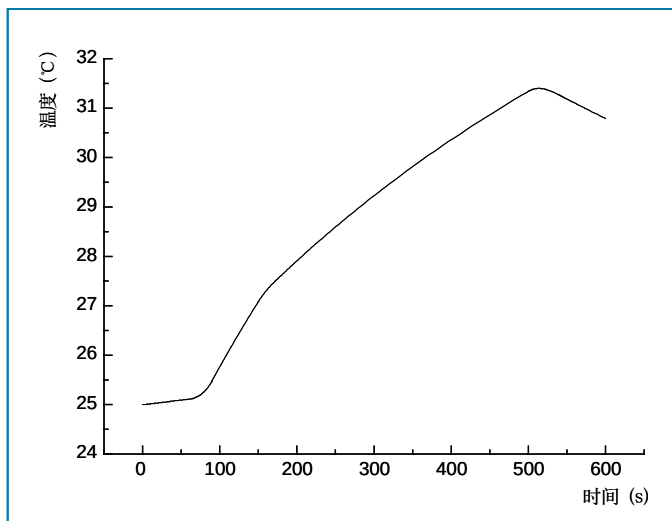


图7 电池堆温度的变化过程

电动机和螺旋桨的参数选定为: $K_\phi = 0.3$, $b = 0.001$, $J = 0.01$ 。

图5显示了电流的变化过程以及相应的电动机转速变化。可见,转速的变化与电流的变化趋势相符,但是有些滞后。这是由于一方面电动机和螺旋桨具有惯性,另一方面燃料电池发电过程是需要氢离子的扩散,本身需要一段时间完成。为考察滞后效应的大小,假设电流是阶跃变化,电动机转速的响应如图6所示。对于阶跃变化的电流,电动机转速需要在20秒左右达到稳定值。所以,操纵此类飞行器时应避免急速的动作,而且可以通过在控制电路中设计大功率放电的超级电容等设备,以改善电动机的转速响应特性。

图7为电池堆温度在这个过程中的变化情况。由于目前在模型中电池堆散热采用自然对流方式,所以电池堆的温度并不稳定,如在模型中采用风扇强制对流的方式,可以使电池堆的温度变化平稳。

5 结论

本文设计了质子交换膜燃料电池直接驱动直流电动机及螺旋桨的动力方案,并建立了Matlab/Simulink 动态模型,模拟该系统的动态特性。结果表明,

该动力模型能够初步满足飞行的需要。为进一步改善燃料电池和电动机的动态响应特性,在后续的工作中还可以考虑加入直流/直流变换器(DC-DC)和储能装置等器件。

AST

参考文献

- [1] Mehrdad Ehsani, et. al. 现代电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池汽车基本原理、理论和设计[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [2] W. Winkler. Fuel cells in aircrafts and synergies, international symposium and workshop on fuel cells and hydrogen for aerospace and maritime applications[C]. Hamburg, 16-17th September 2004.
- [3] G. Lemiska, A. Quina, M. Woodman. A study of air traffic contributions to air pollution in Hong Kong and Guangdong [EL/OL]. www.civic-exchange.org/
- [4] U. Schumann. Effects of aircraft emissions on ozone, cirrus clouds, and global climate[J]. AIR & SPACE EUROPE, 2000, (3), 29-33.
- [5] J. Dunn. 'E-Plane' fuel cell electric aircraft: fuel cell electric aircraft

- A New Era of Aviation[C]. Proceedings of the 4th Annual BCC Conference, Stamford, May 2-4, 2004

[6] M. D. Guynn, J. E. Freech, E. D. Olson. Evaluation of a hydrogen fuel cell powered blended-wing-body aircraft concept for reduced noise and emissions[R]. NASA/TM-2004-212989.

[7] P. Harrop, S. Davis. 21st century technology propels electric aircraft into the "Blue Yonder"[J]. Power Electronics Technology, 2010, (10): 16-21.

[8] J. Kallo, et. al. Fuel cell system development and testing for aircraft applications[C]. 18th World Hydrogen Energy Conference 2010 - WHEC 2010, Essen .May 16-21, 2010.

[9] A. K. Sehra, J. Shin. Revolutionary propulsion systems for 21st century aviation, NASA/TM-2003-212615.

[10] 詹姆斯·拉米尼, 安德鲁·迪克斯. 燃料电池系统[M]. 北京:科学出版社, 2006.

[11] A. D. Le, B. Zhou. A general model of proton exchange membrane fuel cell [J]. J. Power Source, 2008, 182:197-222.

[12] C. S. Wang, M. H. Nehrir, S. R. Shaw. Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(2): 442-451.

[13] Z. Ural, et. al., Dynamic Simulation of a PEM fuel cell system [J]. Proceedings 2nd International Hydrogen Energy Congress and Exhibition, Turkey Istanbul, IHEC 2007, 13-15, July, 2007.

作者简介

许震宇, 副教授, 主要从事新能源飞行器设计、应用力学等方面的研究。