

分 类 号: TP273  
研究生学号: 2020522057

单位代码: 10183  
密 级: 公开



# 吉 林 大 学

## 硕士学位论文

(学术学位)

基于参数辨识的燃料电池阻抗测量方案研究

Research on Impedance Measurement Scheme of  
Fuel Cell System Based on Parameter Identification

作者姓名: 王义琳

专 业: 控制科学与工程

研究方向: 燃料电池系统控制与参数估计

指导教师: 高金武 教授

培养单位: 通信工程学院

2023 年 5 月



---

基于参数辨识的燃料电池阻抗测量方案研究

---

Research on Impedance Measurement Scheme of  
Fuel Cell System Based on Parameter Identification

---

作者姓名：王义琳

专业名称：控制科学与工程

指导教师：高金武 教授

学位类别：工学硕士

答辩日期：2023 年 05 月 28 日



## 吉林大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交学位论文，是本人在指导教师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：王义琳

日期：2023年05月28日



## 关于学位论文使用授权的声明

本人完全了解吉林大学有关保留、使用学位论文的规定，同意吉林大学保留或向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权吉林大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。

（保密论文在解密后应遵守此规定）

论文级别：☒硕士 ☐博士

学科专业：控制科学与工程

论文题目：基于参数辨识的燃料电池阻抗测量方案研究

作者签名：王义琳

指导教师签名：高金武

2023 年 05 月 28 日





## 摘要

### 基于参数辨识的燃料电池阻抗测量方案研究

作者姓名：王义琳

专业名称：控制科学与工程

指导教师：高金武 教授

随着我国“碳达峰、碳中和”战略的不断推进，清洁能源如雨后春笋般迅速崛起并发展壮大，燃料电池作为高效率、零排放的氢-电转化技术载体，是实现我国氢能战略、推动能源革命和交通领域低碳化的核心产业。进行燃料电池工作时内部状态信息如功率特性、水含量等的在线检测，可以更好地对燃料电池进行机理分析，对延长系统使用寿命，提升系统输出效率有重要意义。但是在燃料电池系统运行时，其内部含水量等参数无法直接测量，可以借助在线测量并推导分析燃料电池内部阻抗的方式，映射系统的工作状态，进而达到间接监测系统的目的。

本文以质子交换膜燃料电池发电系统为研究对象，主要研究工作围绕着燃料电池的阻抗测量展开，着重探讨了基于负载扰动和激励信号注入式的两种在线阻抗测量方案，结合两种测量方案的测量精度、抗噪声特性和功耗等的影响，分析了两种方案更适宜的阻抗测量场景，以此实现针对燃料电池的在线阻抗测量，本文主要的研究内容总结如下：

1. 依据燃料电池的工作原理建立了电堆输出电压模型。将电堆的活化损耗、欧姆损耗和浓差损耗补偿到燃料电池的开路电压中，以此作为燃料电池的终端输出电压。之后对燃料电池发电系统中的 DC-DC 变换器进行建模，通过 Boost 升压电路实现 DC-DC 变换器的升压功能，进行 Boost 升压电路占空比的调节，实现对电堆输出电流添加交流扰动的功能。依据所建立模型，在 Simulink 仿真环境中建立燃料电池电堆阻抗测量仿真平台，为阻抗测量方案的验证提供了验证基础。

2. 设计基于负载扰动的燃料电池阻抗测量方案。通过 DC-DC 变换器对电堆

的输出电流调节，实现对燃料电池电堆的激励信号添加。借助 Randles 电路对燃料电池的电化学反应进行描述，将电堆描述为理想电压源和 Randles 电路串联的形式，将阻抗测量转化为对等效电路未知参数的辨识。之后建立了面向参数辨识的电路模型，设计基于递归最小二乘法的参数辨识方案，通过对测量电路模型中未知参数的辨识推导出燃料电池阻抗。最后，在燃料电池阻抗测量仿真平台上验证方案的有效性，并进行产生交流扰动所需功率的分析。

3. 设计基于激励信号注入式的在线阻抗测量方案。在燃料电池系统工作时通过负载扰动对电堆产生激励的测量方案，会造成燃料电池稳定工作点的波动，且存在噪声抑制效果较差和瞬时消耗功率波动过大的问题。因此，提出在燃料电池系统外部添加交流电源的改进方案，将其产生的交流信号作为对电堆的激励。本文中针对外加激励式阻抗测量方案进行测量电路设计，建立面向参数辨识的电路状态空间方程模型。基于卡尔曼滤波算法对状态空间方程中未知状态变量进行辨识，反推出 Randles 电路的未知参数，实现阻抗的在线测量。最后，在燃料电池阻抗测量仿真平台上进行方案验证和激励电源消耗功率分析。

关键词：

质子交换膜燃料电池，在线阻抗测量，参数辨识，递归最小二乘法，卡尔曼滤波

## Abstract

### Research on Impedance Measurement Scheme of Fuel Cell System Based on Parameter Identification

**Candidate:** Wang Yilin

**Specialty:** Control Science and Engineering

**Supervisor:** Professor. Gao Jinwu

As our country "carbon emissions peak and carbon neutralization" strategy continues to advance, clean energy quickly rises and develops rapidly. Fuel Cell System as a high efficiency, zero emission of hydrogen and electric transformation technology carrier. It's the core industry of realizing our hydrogen energy strategy, promote energy revolution and low carbon transportation. The on-line detection of internal state information, such as power characteristics and water content, can better analyze the mechanism of Fuel Cells, which is of great significance to extend the service life of the system and improve the output efficiency of the system. However, when the Fuel Cells System is running, the internal water content and other parameters can't be directly measured. By means of online measurement and derivation analysis of the internal impedance of the Fuel Cells, the working state of the system can be mapped, so as to achieve the purpose of indirect monitoring of the system.

This paper takes the Proton Exchange Membrane Fuel Cells power generation system as the research object, and focuses on the impedance measurement of Fuel Cells. Two kinds of online impedance measurement schemes based on load disturbance and excitation signal injection are discussed. Combining the influence of the measurement accuracy, anti-noise characteristics and power consumption of the two schemes, the more suitable impedance measurement scenarios of the two schemes are analyzed. In order to achieve the online impedance measurement of Fuel Cells, the main research content of this paper is summarized as follows:

1. According to the working principle of the Fuel Cell, the output voltage model is established. The activation loss, ohmic loss and concentration loss of the reactor are compensated into the open-circuit voltage of the Fuel Cell, which is used as the terminal output voltage. After that, the model of the DC-DC converter in the system is built. The Boost function of the DC-DC converter is realized through the Boost circuit, and the

duty cycle of the boost circuit is adjusted to realize the function of adding AC disturbance to the output current of the Fuel Cell Stack. According to the established model, a Fuel Cell Impedance measurement simulation platform is established in the Simulink environment. Through the simulation platform, the subsequent impedance measurement scheme is verified.

2. An impedance measurement scheme based on load disturbance is designed. By adjusting the output current of the reactor by the DC-DC converter, the excitation addition of the reactor is realized. The Randles circuit is used to describe the electrochemical reaction of the Fuel Cell. The reactor is described as an ideal voltage source and Randles circuit in series. The impedance measurement is translated into the identification of unknown parameters of the equivalent circuit. Then a circuit model oriented to parameter identification is established, and a parameter identification scheme based on Recursive Least Square method is designed. The impedance of Fuel Cell was derived by identifying unknown parameters in the model. Finally, the effectiveness of the scheme is verified on the Fuel Cell Impedance measurement simulation platform and the power required to generate AC disturbance is analyzed.

3. An online impedance measurement scheme based on excitation signal injection is designed. When the Fuel Cell System is working, the measurement scheme that generates excitation to the reactor through load disturbance will cause the fluctuation of the stable operating point of the Fuel Cell, and there are some problems such as poor noise suppression effect and large fluctuation of instantaneous power consumption. Therefore, an improved scheme of adding AC power outside the Fuel Cell System is proposed, and the AC signal generated by it is used as the excitation of the reactor. In this paper, the measurement circuit is designed for the excitation impedance measurement scheme, and the circuit state space equation model oriented to parameter identification is established. The unknown state variables in the state space equation are identified based on Kalman filter algorithm, and the unknown parameters of Randles circuit are derived backwards to realize the online impedance measurement. Finally, the scheme is verified on the Fuel Cell Impedance measurement simulation platform and the power consumption of the excitation power source is analyzed..

**Keywords:**

Proton Exchange Membrane Fuel Cell, Online Impedance Measurement, Parameter Identification, Recursive Least Square Method, Kalman Filter Method.

# 目录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 燃料电池介绍.....	2
1.2.1 燃料电池分类.....	2
1.2.2 质子交换膜燃料电池工作原理.....	3
1.2.3 质子交换膜燃料电池系统结构.....	4
1.3 国内外研究进展.....	6
1.3.1 燃料电池检测技术研究.....	6
1.3.2 燃料电池电化学阻抗谱测量研究 .....	8
1.4 论文主要研究内容.....	10
第二章 阻抗测量仿真测试平台搭建 .....	13
2.1 引言.....	13
2.2 PEMFC 电堆电压模型.....	13
2.2.1 燃料电池开路电压.....	13
2.2.2 活化损耗.....	15
2.2.3 欧姆损耗.....	16

2.2.4 浓差损耗.....	17
2.2.5 燃料电池终端电压.....	17
2.3 DC-DC 变换器模型 .....	18
2.3.1 Boost 升压电路模型 .....	19
2.3.2 DC-DC 变换器设计 .....	23
2.4 燃料电池系统仿真测试平台搭建 .....	26
2.4.1 燃料电池电堆仿真平台.....	26
2.4.2 DC-DC 仿真平台 .....	27
2.5 本章小结.....	29
第三章 基于负载扰动的在线阻抗测量 .....	31
3.1 引言.....	31
3.2 基于负载扰动的测量电路模型建立 .....	31
3.2.1 Randles 电路模型 .....	31
3.2.2 阻抗测量等效电路动态模型.....	33
3.3 基于负载扰动的阻抗测量方案设计 .....	35
3.4 基于递归最小二乘法的阻抗测量 .....	36
3.5 阻抗测量仿真验证.....	37

3.5.1 电路参数辨识结果分析.....	37
3.5.2 负载扰动功率分析.....	44
3.6 本章小结.....	45
第四章 基于激励信号注入的在线阻抗测量 .....	47
4.1 引言.....	47
4.2 基于激励信号注入的测量电路模型建立 .....	47
4.2.1 阻抗测量电路动态建模.....	47
4.2.2 模型验证.....	51
4.3 基于激励信号注入的阻抗测量方案设计 .....	51
4.4 基于卡尔曼滤波的阻抗测量 .....	52
4.4.1 Kalman 最优滤波原理 .....	53
4.4.2 Kalman 滤波参数辨识原理 .....	56
4.5 阻抗测量仿真验证.....	59
4.5.1 电路参数辨识结果分析.....	59
4.5.2 激励信号注入功率分析.....	66
4.6 本章小结.....	67
第五章 全文总结与展望 .....	69

5.1 全文总结.....	69
5.2 研究展望.....	70
参考文献.....	73
攻读硕士学位期间的研究成果 .....	79
致谢.....	81



## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景及意义

近年来，环境污染和资源短缺日益严重，为了减少污染以及解决能源短缺带来的问题，实现能源体系的脱碳化发展是关键，对可再生的清洁能源及其关键技术的开发迫在眉睫。随着我国“碳达峰、碳中和”战略的不断推进，清洁能源如雨后春笋般迅速崛起并发展壮大，氢能由于具备清洁、安全性可控及来源广泛等特性，成为连接传统化石能源和新兴可再生能源之间的桥梁，由此寄期望于氢能以改变现有能源体系<sup>[1-6]</sup>。

燃料电池系统是氢能产业应用端的核心产品，是拉动氢能需求，促进氢能制、储、运的引擎。在政策层面，燃料电池产业在国家“十四五”规划、新型储能、绿色低碳循环产业发展、新能源汽车产业规划、能源政策等国家产业引导政策中被重点关注，是战略性新兴产业发展的重要方向，是推动能源体系向绿色低碳转型的重要路径。据中国氢能联盟预计，2020年至2025年间，我国氢能产业产值将达到万亿元级别，2026年至2035年行业产值可达5万亿元，届时我国将形成较为完备的氢能产业技术创新体系、助力“碳达峰、碳中和”目标的实现。燃料电池是实现我国氢能战略、推动能源革命和交通领域低碳化的核心产业，因此，氢燃料电池在分布式发电、交通领域以及改善能源结构上有着广泛的应用场景<sup>[7-13]</sup>。

氢燃料电池作为氢-电转化技术的载体，是一种可以将氢能所具有的化学能转化为电能的化学装置，具有排放物清洁、充电时间短和功率密度高等优点。燃料电池系统在工作时，将氢的化学能转化为电能、热和水，根据燃料电池运用电解质的类型，可以将燃料电池分为：熔融碳酸盐燃料电池（Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC）、磷酸盐燃料电池（Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC）、固体氧化物燃料电池（Solid Oxide Fuel Cell, SOFC）、碱性燃料电池（Alkaline Fuel Cell, AFC）、直接甲醇型燃料电池（Direct Methanol Fuel Cell, DMFC）和质子交换膜燃料电池（Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC）六种。目前，质子交换膜燃料电池被广泛应用于数十瓦至百千瓦级的应用场景

中，其具有体积小、工作温度低、运行安静和功率密度高的优点，可在车载环境和分布式发电场景下运行。

针对 PEMFC 而言，单片电池只能产生最高 1 V 的电压，为了实现高功率输出，以满足实际需求，PEMFC 电堆经常由几十甚至上百片燃料电池串联组成。每片单电池相对独立发电，但是，单片电池的运行状况便会影响到整个电堆的性能与安全。因此，需要实时监测各单片电池的工作状态，助力电堆控制系统做出正确决策，以保障电堆的安全运行，提高使用寿命<sup>[14-15]</sup>。

目前，通常采用燃料电池电堆巡检装置（Cell Voltage Monitoring, CVM）来实现对燃料电池系统的监测，实时检测每片燃料电池的输出电压，以保证电堆中每一单体燃料电池响应的一致性。该方式便于操作，但燃料电池单体电压状态只能反应输出状态，并不能直接描述出发生化学反应时电堆内部状态，例如电堆中含水量，这样也就无法判断燃料电池所处的工作状态，那么开展可以反映出燃料电池工作状态的监测技术研究，用以延长系统寿命与提升系统效率是十分必要的。阻抗是线性两端口网络的重要特征，燃料电池的内部阻抗是反应其功率性能和内部状态的重要参数。因此，可以借助在线测量并推导分析燃料电池内部阻抗的方式，映射系统的工作状态，进而达到间接监测系统的目的。

## 1.2 燃料电池介绍

### 1.2.1 燃料电池分类

依据燃料电池电解质的差异，可以将主流的燃料电池产品分为 6 类，下面将针对燃料电池的运行原理与工作场景的不同进行介绍<sup>[16-20]</sup>：

熔融碳酸盐燃料电池的电解质一般为碱性金属的碳酸盐混合物，通过碳酸根离子（ $\text{CO}_3^{2-}$ ）导电，在工作时通过二氧化碳（ $\text{CO}_2$ ）循环实现电池连续工作，在循环中阴极的二氧化碳为反应物，而在阳极则为生成物，其反应温度一般为 600-700 °C。MCFC 使用非贵金属催化剂，且具有燃料适用性广和余热温度高的特点，常用于百千瓦至百兆瓦级的应用场景。

磷酸盐燃料电池采用磷酸电解质，常温下为固体，通过电极上的 Pt 催化剂加速反应，其反应温度略高于 PEMFC 与 AFC，一般为 150-200 °C。由于较高的反应温度，PAFC 对反应物的纯度要求较低，可以利用天然气和甲醇等低价燃

料，且利用较廉价的碳材料为骨架可以降低其使用成本，常用于百千瓦至数十兆瓦级的应用场景。

固体氧化物燃料电池是一种全固态的化学发电装置，在所有燃料电池中需求反应温度最高，一般为 800-1000 °C，且具有全固态、高效率 and 反应气体广泛适用性的特性。SOFC 可用于数千瓦至上百兆瓦级的应用场景，但是，SOFC 受电极材料成本高和启动时间过长的影响，更适用于固定式热电联产发电站和船舶动力源等连续工作的环境中。

碱性燃料电池以氢氧化钾为电解质、碳为电极，其工作温度约为 70 °C，启动速度快、生产成本低。AFC 常用于数百瓦至数百千瓦级的应用场景，其工作环境相似于 PEMFC，但是其功率密度却远小于 PEMFC，因此其更适宜运用于小型固定式发电装置。

直接甲醇型燃料电池在原理上是 PEMFC 的一种，但是 DMFC 可以直接以甲醇为燃料，省去了相对繁琐的重整制氢过程，甲醇在阳极先转化成氢气和二氧化碳，然后氢气再与氧气反应，其工作温度约为 120 °C，但是甲醇具有较高的氧化过电位，从而导致实际效率降低。DMFC 尚处于技术发展初期，常用于数瓦至数百瓦级的应用场景，较适用于便携式的电源。

质子交换膜燃料电池是目前应用最广泛的一种燃料电池，其具有工作温度低、体积小巧、功率密度高、启动快和运行安静的优点，常工作于数十瓦至百千瓦级的应用场景中，被认为是交通、分布式发电等领域的首选燃料电池产品，在本文中针对 PEMFC 产电系统进行研究。

### 1.2.2 质子交换膜燃料电池工作原理

质子交换膜燃料电池电堆由几十甚至上百片单体燃料电池串联构成，每片燃料电池均由催化层、双极板、扩散层和质子交换膜组成，其中质子交换膜为电池结构中最为重要的部分，影响着燃料电池的性能和寿命。PEMFC 的工作原理是氢气和氧气之间发生化学反应，产生水和能量，近似于逆向电解水的化学反应，质子交换膜燃料电池的工作原理如图 1.1 所示<sup>[21-22]</sup>。

在 PEMFC 工作时，高纯度氢气在阳极端的催化剂作用下，分解为电子和氢质子，氢质子可以通过质子交换膜进入阴极端，电子只能通过外围电路移动的阴极，阳极的化学反应可以描述为：



在阴极催化剂作用下，氧气与穿越过质子交换膜的氢质子以及电子发生反应生成水，阴极的化学反应可以描述为：



将 PEMFC 的总化学反应方程描述为：



通过氧化还原反应，PEMFC 将氧气和氢气的化学能转化为电能，通过电子在外电路的移动产生电流，向负载提供电能。

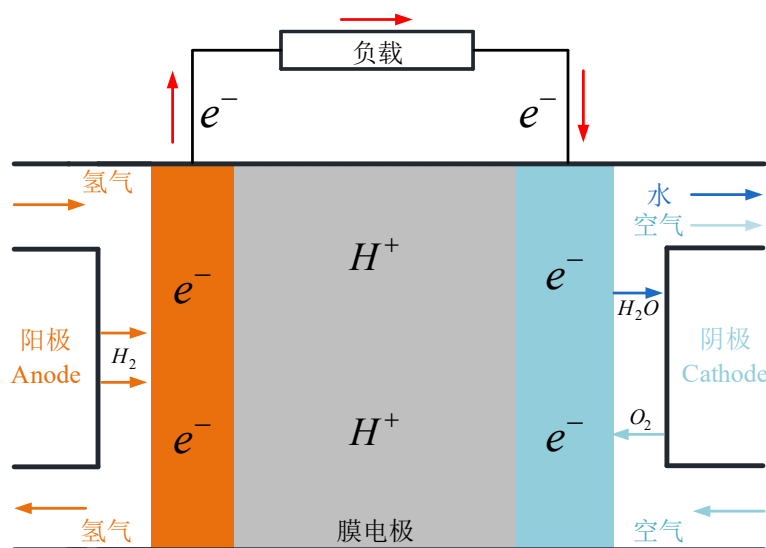


图 1.1 质子交换膜燃料电池工作原理

### 1.2.3 质子交换膜燃料电池系统结构

为保证质子交换膜燃料电池产电系统的高效运行，需要氢气供给系统、空气供给系统、能量管理系统和水热管理系统四者协同工作，共同调控系统的进气流量与压力、输出电流与电压状态以及系统的温度与湿度，以延长 PEMFC 的使用寿命，助力其高性能发电，PEMFC 系统结构如图 1.2 所示。

氢气供给系统为质子交换膜燃料电池的阳极供给氢气，高压氢罐内储存的氢气压力远高于电堆需求的氢气压力，故需要减压阀降低氢气压力。之后通过进氢电磁阀来调节进入电堆中参与反应的氢气流量和压力。在氢气回路末端，未参与反应的氢气可经由氢气循环泵循环至电堆入口继续参与反应。通过对出口排气阀的调节可以辅助调节阳极压力，并将多余的水排出系统<sup>[23]</sup>。

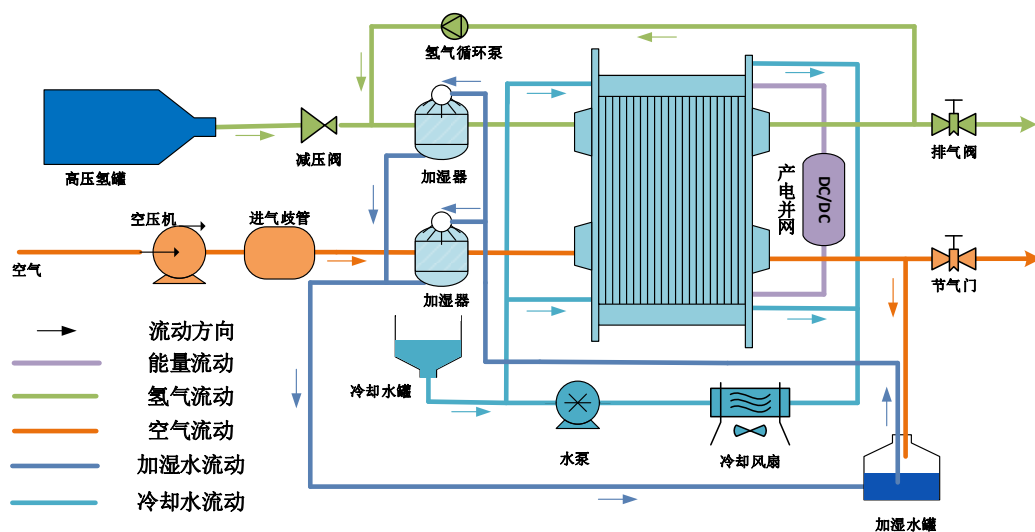


图 1.2 质子交换膜燃料电池系统结构示意图

空气供给系统为 PEMFC 的阴极供给空气，通过空气压缩机工作，将空气压缩进入进气歧管。空压机工作时产热量较大，热量会传递给空气，便需中冷器和加湿器对空气降温与加湿。然后，湿润与冷却后的空气进入阴极参与反应。反应后产生的水循环至加湿水罐中留存，废气则通过节气门排出。在空气供给系统中，通过对空压机转速和节气门开度的调节，可以实现对阴极压力和进气流量的调节<sup>[24-25]</sup>。

能量管理系统对 PEMFC 系统产生的电能进行分配，电堆产生的电能通过 DC-DC 变换器升压后便可应用与负载端。PEMFC 系统的能量流向分为两部分，一部分用来供给高压水泵、氢气循环泵以及空压机等系统附属高压部件的能量消耗；另一部分则作为能量进行输出，从而实现燃料电池系统发电的目的，产电并网供给电能需求端<sup>[26]</sup>。

水热管理系统主要功能是对系统中的温度和反应气体的湿度进行调控，对系统温度的管理分为主水路和辅助水路两部分<sup>[27-29]</sup>。主水路由水箱、高压水泵、去离子器和散热器组成，主要对电堆、中冷器和氢气循环泵的温度进行调节，同时起到对反应气体加湿和对反应生成水的排出作用。主水路循环与燃料电池的反应息息相关，如果循环中电导率较高，会使离子反应速度降低，因此该部分需使用去离子水进行冷却。辅助水路由水泵和散热风扇组成，主要对空压机及其控制器和 DC-DC 变换器的温度进行调节，该部分只起到散热作用，对冷却液品质无要求。

## 1.3 国内外研究进展

### 1.3.1 燃料电池检测技术研究

当燃料电池处于膜干燥、水淹等异常情况时，会造成产电性能的下降，甚至于对燃料电池造成不可逆的损坏<sup>[30-33]</sup>。因此，寻找有效的检测技术对燃料电池工作状态进行实时监测，用以延长系统使用寿命与提升系统输出效率是十分必要的。目前已有多种针对燃料电池系统的诊断方案被提出，包含电压扫描（Voltage Sweeping, VS）、总谐波失真分析（Total Harmonic Distortion Analysis, THDA）、CVM 等监测方案。其中，VS 方案需要在燃料电池电堆多种工况的输出电压下，采集稳定的输出电压与电流曲线，由于所涉及的采样工作点范围大、耗时长，很难在在线诊断中进行广泛应用；THDA 方案会在燃料电池电堆的输出电流上添加较大波动的扰动电流，以此对输出电压的响应进行谐波分析，但是 THDA 方案添加的扰动可能会超出电堆的线性工作范围，从而影响系统的正常工作；CVM 方案实时检测每片燃料电池的输出电压，该方案便于操作，但燃料电池单体电压状态只能反映输出状态，并不能直接描述燃料电池系统的工作状态。

除了上述几种对燃料电池系统的监测方案外，还有一些研究着眼于对燃料电池电堆的阻抗测量<sup>[34-35]</sup>。由于燃料电池系统的阻抗通常与温度、电流密度和水含量等相关，因此在燃料电池工作时，进行电堆内部阻抗的在线测量，可以映射系统的工作状态，起到对燃料电池电堆实时监测的作用。文献[36]中介绍了交流阻抗（AC Resistance）、电流中断（Current Interrupt, IR）、高频阻抗（High Frequency Resistance, HFR）和电化学阻抗谱（Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS），四种用于测量燃料电池阻抗的方式，下面将对这四种测量方案进行介绍。

交流阻抗法通过在燃料电池系统外添加一个交流阻抗测量装置，对电堆添加高频正弦信号，以测量该添加频率下电堆和负载的总阻抗。然后，将负载阻抗补偿后，便可以获得电堆当前时刻的阻抗值。由于添加的交流扰动信号要远小于燃料电池电堆正常工作时的负载电流，所以该方案对燃料电池电化学反应的干扰最小。交流阻抗法测量时需要对负载阻抗的响应信号进行精确的相位测

量，同时需要考虑负载对交流激励信号初始相位的影响，以保证对燃料电池阻抗测量的精度。

电流中断法被广泛应用于电化学系统的内阻测量中，通过对电池负载电流的快速切断，采集电流中断前和中断期间的输出电压，以此估计出电池内阻。在进行内阻估计时，假定切断电流前后所产生的电压上升差值均由内阻产生，估计内阻便可以描述为电压上升的值除以中断前的电流值。IR 法不需要外加设备，且具有数值单一、便于解释内阻成因的优势，但是，该方法在极短时间内对电池添加一个显著的电流扰动，会对电堆的工作产生影响，且需要精密的电压测量设备以保证测试精度。

高频阻抗法通过电子负载在电堆的输出电流上叠加小的交流信号，以叠加的信号作为对燃料电池的激励，再通过对负载电流和电堆响应电压的幅值和相位进行采集与计算，来实现阻抗的测量。在激励强度和持续时间上，HFR 方案对燃料电池工作时的状态影响最小，适宜用于燃料电池工作时的定期阻抗检测。通过比较在不同频率范围下，负载电流和响应电压之间的相位差，可以选择最适宜用于阻抗检测的频率，提高测量精度。

电化学阻抗谱是对 HFR 方案的一种扩充，EIS 较 HFR 而言，具有更广泛的测量频率，且综合考虑阻抗的实部和虚部，更适宜用来进行燃料电池系统的运行状态监测。EIS 和 HFR 对阻抗实部的测量结果一致，但是，EIS 通过多测量频率的扫频测量，可以获得更丰富的燃料电池阻抗信息，以此可以进行相应工作状态分析，以保证燃料电池系统的高效发电<sup>[37]</sup>。

燃料电池 EIS 作为一种对燃料电池系统运行状态有效的监测手段，被广泛应用于故障检测中，文献[38]中应用快速 EIS 检测系统，提出了对 PEMFC 系统运行中干燥、水淹和缺氧等的检测方案；文献[39]中通过燃料电池 EIS 响应，研究了温度、压力状态发生变化时对膜电极的影响，从而将 EIS 测量与燃料电池的运行状态联系起来；文献[40]中在不同工况下对燃料电池进行动态阻抗测量，确定燃料电池最佳工作条件，基于等效电路参数对电流的依赖关系，给出了燃料电池工作时的综合阻抗特性，可作为燃料电池发电系统运行期间监测和诊断的在线工具。因此 EIS 在燃料电池状态检测领域起到重要作用，下面将介绍对燃料电池电化学阻抗谱测量方式的相关研究。

### 1.3.2 燃料电池电化学阻抗谱测量研究

针对阻抗测量的基本方法是对待测物体添加一个交流扰动激励信号，之后对响应信号进行采集，依据激励信号与响应信号之间的变化情况，计算待测物体的阻抗值。

依据阻抗测量基本原理，有一些科研人员的研究工作针对激励信号的生成方式展开：文献[41]中设计了一种主动负载调制的激励信号注入方式，通过对负载输入电压信号控制，产生激励信号。文章中验证了有源负载在频率最高设定在 20 kHz 时对阻抗的估计能力，证明了该激励信号生成方式的有效性。文献[42]通过 DC-DC 电路引入交流信号，将阻抗测试装置和 DC-DC 变换器结合在一起，节省了系统空间。文献[43]中提出了多频率扰动信号添加的方式，以改进传统 EIS 测量耗费时间和不易于实时诊断的劣势，利用构成频率分量对扰动信号进行合成以提高相关精度的方案，实现阻抗谱相对无噪声的测量，保证了多频率方案带来的精度损失最小化，同时减少了 EIS 的测量时间。

在对阻抗测量值计算方式的研究中，可以分为基于电路原理和基于阻抗模型的计算方式。基于电路原理的阻抗测量方案，通过对输入激励信号和输出响应信号之间产生的幅值、相位等的变化进行采集，借助于欧姆定律、欧拉公式等电路原理，进行阻抗值求解。文献[44]中提出了一种基于互相关方法数字锁相放大器的阻抗测量方案，通过解析测量的激励信号、响应信号与噪声实现阻抗的测量。文献[45]中通过 Bangbang 控制引入单频或多频叠加激励信号的交流信号调控方法，运用快速傅里叶变换对各频率下的幅值和相位计算，拟合出对应频率下阻抗的 Nyquist 曲线，实现了对 EIS 的测量。文献[46]中通过对燃料电池系统中 DC-DC 变换器的纹波进行调制，以此作为激励源引入燃料电池电堆中，用于燃料电池的 EIS 测量，运用模型预测控制算法，来实现对 DC-DC 变换器纹波调制的快速和稳定需求。通过对升压模型线性化建模，在参考电压中引入三角波波动，基于模型预测控制算法，计算电路系统中 IGBT 的最优占空比，实现激励信号的稳定添加，最终，通过对电堆激励信号和响应信号采集与傅里叶变换实现 EIS 测量。基于电路原理的阻抗计算方式，需要精度非常高的采样设备才能保证测量精度，同时在采样过程中会引入测量噪声，在理论上的响应信



号上叠加了纹波,造成信号提取难度加大,由此才需要采用锁相放大器、傅里叶变换等方式来固定响应信号频率,并对响应信号提取用以进行阻抗值计算。

基于模型的阻抗计算方式被研究人员广泛应用,其原理是将燃料电池电堆描述为含有未知参数的理想模型,通过对输入、输出信号的采集与分析,来确定模型未知参数,从而实现阻抗测量。

一些研究工作中基于采集的实验数据,运用遗传算法和神经网络的方式进行阻抗等效电路未知参数的分析,文献[47]中使用基于数据驱动的方式建立了燃料电池工作状态的分数阶模型,通过采集燃料电池不同工况下的阻抗测试数据集,运用遗传算法确定各工况下拟合程度最高的分数阶阻抗模型的参数,以此提出了一种选取单一数据集以涵盖燃料电池全工况下的阻抗信息的方式。最后,通过与等效电路模型比较来说明该分数阶模型的有效性。文献[48]中提出一种运用物理学基础建立的能量守恒 EIS 模型,利用 SOFC 和相关的实验装置,将化学反应和 SOFC 的阻抗响应联系起来。文中采用遗传算法确定 EIS 模型参数,使模型预测的阻抗曲线与相同操作条件下的实验数据吻合,以此验证阻抗测量的有效性。文献[49]中运用了燃料电池等效电路的方法来进行燃料电池阻抗测量,依据 1.2 kW 的 PEMFC 运行工况,将添加激励频率设定为 90 mHz 到 12 kHz 之间,通过遗传算法确定了添加幅值为 1 A 的激励电流时电路的参数。文献[50]中运用了 Randles 等效电路和卷积神经网络的方式进行燃料电池的阻抗测量。基于等效电路模型,可以快速进行燃料电池不同运行工况下的阻抗参数和 EIS,通过神经网络进行电路模型参数的辨识,以此可以更详细的描述不同运行工况对燃料电池内部状态的影响。

还有一些研究工作通过迭代递推的方式进行电路模型中未知参数的求解,文献[51]中将燃料电池的阻抗作为电堆的健康状态指标,运用复杂非线性最小二乘法对燃料电池等效电路中的未知参数进行辨识,以此估计未来的阻抗信息,并对燃料电池的电压退化趋势进行预测。文献[52]中根据施加在电池上的电流大小,建立了 PEMFC 低电流和高电流两个等效电路模型,利用恒定相位元件和 Warburg 阻抗来模拟燃料电池的动态行为,对采集的电堆阻抗数据,应用非线性最小二乘拟合法进行电路参数的拟合。最终,通过电路模型来确定各种性能损失产生的原因,实现燃料电池阻抗的离线辨识。文献[53]中应用最小二乘辨

识算法对从燃料电池实验平台上采集到的阻抗参数进行处理，确定复阻抗参数的变化规律，以此建立了以电气元件为基础的燃料电池复阻抗模型。最后通过残差分析方法对实验采集数据与建模采集数据进行对比研究，将实测结果和理论结果叠加得到了一般模型。

在基于电路模型的阻抗测量研究中，大多数研究工作通过对采集数据集的离线辨识，以获取阻抗信息。针对燃料电池系统而言，进行在线阻抗测量以反映系统实时运行状态更具有实际工程意义，但是受大功率燃料电池系统输出电压、电流较高所限制，实现阻抗的在线辨识还有较高难度，需要进一步研究。

## 1.4 论文主要研究内容

为了实现对燃料电池运行状态的实时检测，本文致力于对燃料电池系统的在线阻抗测量研究，提出了基于负载扰动和激励信号注入两种阻抗测量方案，最后通过对未知参数辨识的方式实现阻抗测量。本文中搭建了燃料电池阻抗测量仿真测试平台，用于阻抗测量方案的验证工作。其次，设计了 DC-DC 升压变换器的仿真环境，用来对燃料电池的输出电流进行调控，实现负载扰动添加的功能。针对基于负载扰动式的燃料电池阻抗测量方案，由 DC-DC 变换器在燃料电池的输出电流上叠加小交流扰动信号，以此实现对电堆的激励，通过对输出电压的响应检测，实现阻抗测量。但是，在燃料电池系统工作时通过负载扰动对电堆产生激励，会造成燃料电池稳定工作点的波动，从而对输出功率和燃料电池寿命产生影响，因此提出了基于激励信号注入的阻抗测量方案，在燃料电池发电系统外添加激励电流信号源，以此对电堆产生激励，通过对激励电流信号和燃料电池响应电压信号的采集，进行电堆阻抗的测量。

本文的研究内容主要分为以下几个部分：

第 1 章介绍了文章的研究背景及意义，阐述了主流燃料电池产品的种类和更适宜的应用场景，详细描述了针对燃料电池系统运行状态检测的方案和研究现状，特别针对燃料电池电化学阻抗谱的测量方式及原理进行研究与分析，最后对本文所进行的研究进行总结。

第 2 章介绍了燃料电池阻抗测量仿真平台的搭建过程，依据燃料电池反应原理和对内部产生电压损失原因的分析，建立了基于数学模型的阻抗测量仿真

平台。依据 Boost 升压电路设计了燃料电池系统中的 DC-DC 变换器的仿真环境，将通过 DC-DC 变换器和基于数学模型的阻抗测量仿真平台共同进行阻抗测量方案有效性验证。

第 3 章介绍了基于负载扰动的燃料电池阻抗测量方案，通过 DC-DC 变换器对燃料电池的输出电流添加扰动，实现对电堆的扰动添加。借助 Randles 电路对燃料电池的电化学反应阐述，实现阻抗建模，将阻抗测量转化为对模型未知参数的辨识。针对负载扰动，设计了阻抗测量电路，建立了面向参数辨识的测量电路模型，借助递归最小二乘法进行燃料电池阻抗参数的辨识。最后，在阻抗测量仿真平台上进行测量方案的验证，并分析了负载扰动所需的瞬时消耗功率和平均消耗功率。

第 4 章介绍了基于激励信号注入的燃料电池阻抗测量方案，通过外接的激励信号生成电源生成交流激励信号，实现电堆激励信号的添加。首先针对测量方案进行了测量电路设计，建立了应用于参数辨识的电路模型。之后设计了基于卡尔曼滤波理论基础的燃料电池阻抗参数辨识方案，将所建立电路模型描述为状态空间方程的形式，对方程中未知状态矩阵进行辨识，推导出阻抗参数值，实现阻抗的在线测量。最后，在燃料电池阻抗测量仿真平台上进行方案验证，并进行消耗功率的分析。

第 5 章总结并阐述了全文的研究工作，并对下一步研究工作进行了展望。



## 第二章 阻抗测量仿真测试平台搭建

### 2.1 引言

为进行燃料电池阻抗测量方案和控制策略的验证，基于 MATLAB/Simulink 仿真环境搭建了燃料电池阻抗测量仿真测试平台。本章将分为三个部分进行描述：第一部分针对 PEMFC 电堆的动态输出特性进行数学化描述，建立电堆输出电压、电流的动态模型；第二部分介绍 PEMFC 系统中 DC-DC 变换器的工作原理，同时对 Boost 升压电路进行建模，设计基于反馈 PI 控制器，在 Boost 稳态电路中引入正弦交流量的控制方案；第三部分将介绍 Simulink 仿真阻抗测量平台的搭建。

### 2.2 PEMFC 电堆电压模型

PEMFC 系统在工作时通过氢气和氧气的反应生成水和电能，其产生的开路电压可以通过反应物和生成物之间的能量守恒定律来计算。但是在燃料电池系统产生电能的过程中，内部也存在对输出电压产生影响的消耗部分，在建模时需要进行描述以保证所建立模型可以贴近实际系统的工作状态。依据文献[14]中介绍的燃料电池电堆工作原理，在建模时主要考虑三种损耗形式：活化损耗、欧姆损耗和浓差损耗。将上述误差补偿到开路电压中，最终建立 PEMFC 的输出电压模型。

#### 2.2.1 燃料电池开路电压

燃料电池系统可以将化学能直接转化为电能，此过程中所释放出的能量可以借助于吉布斯自由能（Gibbs free energy）来描述。吉布斯自由能指的是在热力学过程中，系统中减少的内能和对外做功的能量转化部分，在燃料电池系统中将其描述为反应物与生成物之间的自由能差值。PEMFC 系统的基本化学反应可以简化描述为：



在反应过程中的自由能变化量可以定义为水的自由能和氢气、氧气的自由能之间的差值，描述为  $\Delta g_f$ ：

$$\Delta g_f = g_{f,p} - g_{f,r} = g_{f,H_2O} - g_{f,H_2} - g_{f,O_2} \quad (2-2)$$

物质的吉布斯自由能和温度与压强之间呈现出强相关性，为方便描述非标准状况下的吉布斯自由能，借助范特霍夫等温方程（Van't Hoff equation）将系统自由能描述为：

$$\Delta g_f = \Delta g_f^0 - R_{air} T_{FC} \ln \left( \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{1/2}}{p_{H_2O}} \right) \quad (2-3)$$

式中， $T_{FC}$  为燃料电池系统的工作温度，单位为开尔文（Kelvin，K）、 $\Delta g_f^0$  为在标准大气压（1 atm）下随燃料电池工作温度变化的吉布斯自由能变化量、 $p_{H_2}$ 、 $p_{O_2}$  和  $p_{H_2O}$  分别为系统中氢气、氧气和水蒸气分压，单位为标准大气压（atm）、 $R_{air}$  为理想气体常数  $R_{air} = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

假设燃料电池系统的化学反应可逆，那么工作时所有的吉布斯自由能全部转化为电能，对参与反应的每摩尔氢气都伴随着两摩尔电子通过外部电路做功，将所作电功描述为：

$$W_{FC} = -2FE \quad (2-4)$$

式中， $F$  为法拉第常数（ $F = 96485 \text{ C/mol}$ ）、 $E$  为燃料电池的电压。假设反应可逆，那么系统所做的功等于吉布斯自由能的变化量，将二者联立可得：

$$\Delta g_f = -2FE \quad (2-5)$$

联立式（2-3）和（2-5），将燃料电池的电压描述为：

$$E = -\frac{\Delta g_f}{2F} = -\frac{\Delta g_f^0}{2F} + \frac{R_{air} T_{FC}}{2F} \ln \left( \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{1/2}}{p_{H_2O}} \right) \quad (2-6)$$

在对燃料电池实际应用过程中，由于部分参与反应的化学能会转化为热能，因此式（2-6）中的燃料电池电压会大于实际系统中的电压值，所以将式（2-6）中的电压值描述为能斯特电压（可逆开路电压）。

选取在  $25^\circ \text{C}$ （298.15 K）、1 atm 条件为标准状态，此时参考电压为 1.229 V，将温度与此时状态的差值所造成的偏差描述为  $-\frac{\Delta g_f^0}{2F}$ ：

$$-\frac{\Delta g_f^0}{2F} = 1.229 + (T_{FC} - T_O) \left( \frac{\Delta S^0}{2F} \right) = 1.229 - \frac{\Delta S_f^0}{2F} + \left( \frac{\Delta S_O^0}{2F} \right) T_{FC} \quad (2-7)$$

式中， $T_0$ 为标准状态下的温度：25 °C（298.15 K）、 $\Delta S^0$ 为系统熵变。由于系统的比热随温度变化较小，所以给定反应的熵变可以设置为常数  $\Delta S_0^0$ 。将上述标准状态下的熵变值代入式（2-6）进一步展开，可得燃料电池的开路电压：

$$E = 1.229 - 8.5 \times 10^{-4} (T_{FC} - 298.15) + 4.308 \times 10^{-5} T_{FC} \left[ \ln \left( \frac{P_{H_2}}{1.01325} \right) + \frac{1}{2} \ln \left( \frac{P_{O_2}}{1.01325} \right) \right] \quad (2-8)$$

将燃料电池的电流密度定义为：

$$i = \frac{I_{st}}{A_{FC}} \quad (2-9)$$

式中， $A_{FC}$ 为每片电池的活化区域面积，单位为平方厘米（ $\text{cm}^2$ ）、 $I_{st}$ 为电堆电流，单位为安培（A），由于燃料电池电堆通过多节单片燃料电池串联而构成，因此单片燃料电池的电流同样由  $I_{st}$  表示。

燃料电池工作时的实际电压要小于式（2-8）所描述的开路电压，所产生的差异主要是由燃料电池内部损耗和不可逆性造成的，在建模中将损耗描述成活化损耗、欧姆损耗和浓差损耗，将上述三种损耗补偿到开路电压模型中，使模型更贴近真实电堆。

### 2.2.2 活化损耗

燃料电池电堆在反应过程中通过阴极的氧气和阳极的氢气之间的化学反应产生电荷，随着电荷的移动产生电流，当电流通过电极时，两端电极会分别发生氧化和还原反应，在反应时将会影响电极上的带电程度，从而对电极电势的平衡值造成偏离，故将这部分能量变化定义为活化损耗。活化损耗发生在燃料电池的电极上，其中氧气的化学反应速率会远慢于氢气反应速率，因此活化损耗主要受氧气的反应条件影响。依据电化学原理中的 Tafel 公式，将活化损耗电压与电流密度描述为：

$$V_{act} = a \ln \left( \frac{i}{i_0} \right) \quad (2-10)$$

式中， $a$ 和交换电流密度  $i_0$  均为经验常数。Tafel 公式可以应用于  $i > i_0$  的运行场景中，对于在低温环境下运行的燃料电池系统， $i_0$  的取值约为  $0.1 \text{ mA/cm}^2$ 。由

于此时式（2-10）受电流密度的限制，考虑对电流密度的全范围有效的等效替代，将活化损耗电压近似描述为：

$$V_{act} = V_0 + V_a (1 - e^{-m_i i}) \quad (2-11)$$

式中， $m_i$  为常数（ $m_i = 10$ ）、 $V_0$  和  $V_a$  单位为伏特（V），可以描述为：

$$\begin{cases} V_0 = 0.279 - 8.5 \times 10^{-4} (T_{FC} - 298.15) \\ \quad + 4.308 \times 10^{-5} T_{FC} \left[ \ln \left( \frac{p_{ca} - p_{sat}}{1.01325} \right) + \frac{1}{2} \ln \left( \frac{0.1173(p_{ca} - p_{sat})}{1.01325} \right) \right] \\ V_a = \left( -1.618 \times 10^{-5} T_{FC} + 1.618 \times 10^{-2} \right) \left( \frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat} \right)^2 \\ \quad + \left( 1.8 \times 10^{-4} T_{FC} - 0.166 \right) \left( \frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat} \right) + \left( -5.8 \times 10^{-4} T_{FC} + 0.5736 \right) \end{cases} \quad (2-12)$$

式中， $V_0$  为电流密度为 0 时所造成的压降、 $p_{sat}$  为系统中水蒸气饱和时所对应的压力，其单位为标准大气压（1 atm），水蒸气的饱和压力和燃料电池所处的环境温度相关，因此将其表示为：

$$\log_{10}(p_{sat}) = -1.69 \times 10^{-10} T_r^4 + 3.85 \times 10^{-7} T_r^3 - 3.39 \times 10^{-4} T_r^2 + 0.143 T_r - 20.92 \quad (2-13)$$

式中， $T_r$  表示环境温度，单位为开尔文（K）。

### 2.2.3 欧姆损耗

质子交换膜燃料电池工作时产生的电子在穿过质子交换膜、电极和集电极时会产生阻力，从而产生电能损失，将该部分损失定义为欧姆损耗，可以将其描述为压降与电流密度的关系：

$$V_{\Omega} = i R_{\Omega} \quad (2-14)$$

式中， $R_{\Omega}$  为电堆内部的欧姆电阻，单位是欧姆（ $\Omega$ ）。在燃料电池中，电阻与质子交换膜湿度和电堆工作温度息息相关，可以将欧姆电阻描述为：

$$R_{\Omega} = \frac{t_m}{\sigma_m} \quad (2-15)$$

式中， $t_m$  为膜的导电性与膜厚度和材料相关，在实际中将其描述为常数（ $t_m = 0.0125$ ）、 $\sigma_m$  为质子交换膜电导率，单位是  $(\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$ ，可以将其描述



为膜的含水量和电堆温度的相关函数，将膜的电导率随膜含水量和电堆温度的变化描述为：

$$\sigma_m = k_1 e^{k_2 \left( \frac{1}{303} - \frac{1}{T_{FC}} \right)} \quad (2-16)$$

式中，比例系数  $k_1$  和  $k_2$  分别为：

$$\begin{cases} k_1 = 5.139 \times 10^{-3} \lambda_m - 3.26 \times 10^{-3} \\ k_2 = 350 \end{cases} \quad (2-17)$$

式中， $\lambda_m$  为膜的含水量，其取值范围随着膜的相对湿度而改变，一般取 0 对应着膜 0 % 的湿度、取 14 对应着膜 100 % 的湿度。

#### 2.2.4 浓差损耗

随着燃料电池反应的持续进行，阴、阳两极的反应物浓度会随着反应而产生变化，进而影响燃料电池的电压变化，因此将这部分能量的变化定义为浓差损耗。浓差损耗是高电流密度下产生电压迅速下降的问题所在，在此将浓差损耗所引起的电压损失描述为：

$$V_{conc} = i \left( m_2 \frac{i}{i_{\max}} \right)^{m_3} \quad (2-18)$$

式中， $i_{\max}$  为导致电压迅速降低对应的电流密度，定义为常数 ( $i_{\max} = 2.2$ )， $m_3$  为常数 ( $m_3 = 2$ )，将系数  $m_2$  描述为：

$$m_2 = \begin{cases} \left( 7.16 \times 10^{-4} \right) \left( \frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat} \right) + (-1.45 \times 10^{-3} T_{FC} + 1.68) & \left( \frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat} \right) < 2 atm \\ \left( 8.66 \times 10^{-5} T_{FC} - 0.068 \right) \left( \frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat} \right) + (-1.6 \times 10^{-4} T_{FC} + 0.54) & \left( \frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat} \right) \geq 2 atm \end{cases} \quad (2-19)$$

#### 2.2.5 燃料电池终端电压

将前文所描述的活化损耗、欧姆损耗和浓差损耗补偿到燃料电池的开路电压中，可以将燃料电池的终端电压描述为：

$$\begin{aligned}
 V_{FC} &= E - V_{act} - V_{\Omega} - V_{conc} \\
 &= E - \left[ V_0 + V_a (1 - e^{-m_i i}) \right] - (i R_{\Omega}) - \left[ i \left( m_2 \frac{i}{i_{max}} \right)^{m_3} \right]
 \end{aligned} \quad (2-20)$$

由于燃料电池电堆是由多片燃料电池堆叠而形成的，电堆的输出电压便可以描述为单体燃料电池的电压与堆中电池总数（ $n$ ）相乘的形式，将其描述为：

$$V_{st} = n \times V_{FC} \quad (2-21)$$

进而，将燃料电池的输出功率描述为：

$$P_{st} = I_{st} \times V_{FC} \quad (2-22)$$

至此，完整地描述了对燃料电池电堆内部的建模过程，考虑了电池电压的形成过程以及可能发生损耗的影响，并介绍了电堆输出电压和功率的表述形式，使所建立数学模型更贴近实际的燃料电池系统。

### 2.3 DC-DC 变换器模型

在 PEMFC 发电系统中，DC-DC 变换器起到对燃料电池系统的输出电压和电流进行调节的功能，经 DC-DC 变换器调节后将能量输送至动力电池或者反馈到电网中。第三章中所设计的阻抗测量方案，将通过 DC-DC 变换器，在燃料电池的输出电流上叠加一个小的交流电流信号，以此实现对燃料电池的激励，所以在仿真模型的搭建过程中，需要针对 DC-DC 变换器模块进行建模。本文中所考虑到的 DC-DC 变换器起到将燃料电池电堆的输出电压拉升的作用，因此，应用 Boost 升压电路来实现升压过程，在升压过程中通过对开关占空比的调节来引入激励电流。本节将详细描述对 Boost 升压电路建模过程，同时阐述 DC-DC 变换器产生小交流激励信号的原理与仿真实现过程。

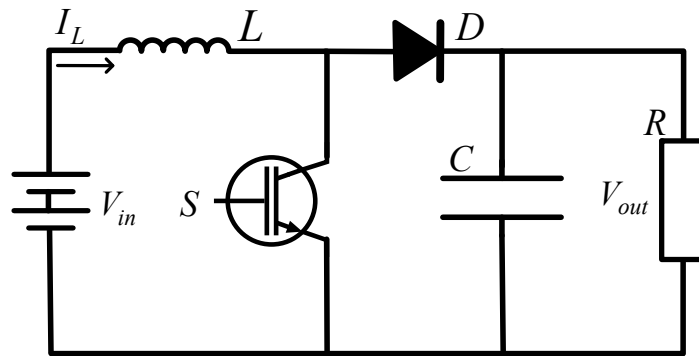


图 2.1 Boost 升压电路拓扑结构

### 2.3.1 Boost 升压电路模型

Boost 升压电路是一种斩波电路，将输入的电压成比例放大后输出，通过周期控制开关的闭合状态，来实现对电压的调节<sup>[54-60]</sup>，电路中包含电感、开关管、二极管和电容，Boost 升压电路的拓扑结构如图 2.1 所示。

电路图中  $L$  表示电感、 $S$  表示开关管、 $D$  表示二极管、 $C$  表示电容、 $R$  表示负载电阻、 $V_{in}$  表示系统的输入电压、 $V_{out}$  表示系统输出电压近似等于电容电压、 $I_L$  表示经过电感的电流也近似为系统的输入电流。

将 Boost 升压电路分为开关闭合和断开两种工作状态：当电路结构中的开关闭合时，电路中的二极管防止电容向地放电，此时假设充电电流恒定，输入电压向电感充电，与此同时，电容上的电压向负载电阻供电；当开关断开时，由于电感具有电流保持性，其电流不会瞬间释放，所以电感会对新电路缓慢放电，此时输入电压和电感同时对电容进行充电并向负载电阻供电，因为输入电压和电感同时放电，电容两端的电压会高于输入电压，实现电路升压的作用，Boost 升压电路工作状态如图 2.2 所示，图 2.2 (a) 为开关闭合状态下的电路结构，图 2.2 (b) 为开关断开状态下的电路结构。

依据 Boost 升压电路的工作原理，进行对应电路运行状态分析，首先假设：电路处于零初始状态且所有元器件都处于理想状态下；电感和电容值都足够大；电容电压和电感电流分别等效于输入电压与输入电流。

定义开关对应的占空比为  $D$ ，其表示在一个周期  $T$  内对电感电流的增量描述，可得：

$$\begin{cases} \Delta I_L = \int_0^{DT} \frac{1}{L} V_{in} dt & 0 < t \leq DT \\ \Delta I_L = -\int_{DT}^T \frac{1}{L} (V_{out} - V_{in}) dt & DT < t \leq T \end{cases} \quad (2-23)$$

基于伏秒平衡法则，在 Boost 升压电路处于稳态时，电感电流的增加与损失量相同，可以将占空比描述为：

$$D = \frac{V_{out} - V_{in}}{V_{out}} \quad (2-24)$$

在理想状态下，Boost 升压电路满足能量守恒定律，即输入输出功率保持相等，那么将输入、输出电流和输入、输出电压之间的关系描述为：

$$\begin{cases} \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \\ \frac{I_{out}}{I_L} = 1-D \end{cases} \quad (2-25)$$

式中,  $I_{out}$  为经过 Boost 升压电路变换后的输出电流, 可以将其描述为:

$$I_{out} = \frac{V_{out}}{R} \quad (2-26)$$

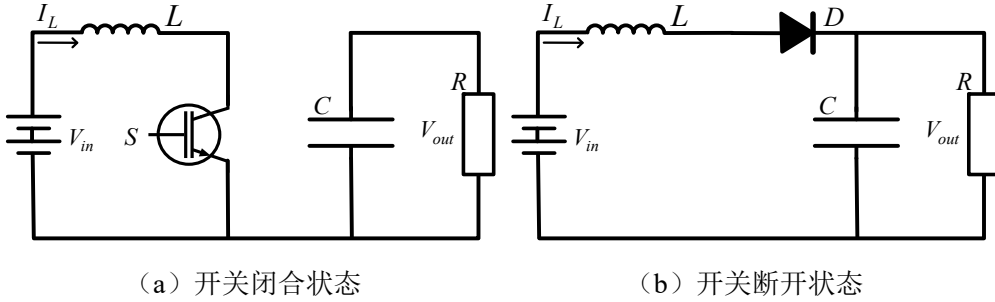


图 2.2 Boost 升压电路工作原理

由式 (2-26) 可以发现, 经过 Boost 电路升压后, 电路输出电压大于其输入电压, 相应的输出电流会减小。为方便对 Boost 升压电路进行建模, 定义开关闭合和断开在一个周期内的开关系数为  $p(t)$ , 将其描述为;

$$p(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < DT_s \\ 0 & DT_s \leq t < T_s \end{cases} \quad (2-27)$$

式中,  $T_s$  为时间常数, 满足:

$$T_s \rightarrow \frac{1}{T_s} \int_{t-T_s}^t p(\tau) d\tau = D(t) \quad (2-28)$$

分别对开关闭合与断开两种电路状态建模, 开关闭合时电路结构如图 2.2 (a) 所示, 此时可以将 Boost 电路看成两个相对独立的回路, 输入电压对电感充电, 此时假设充电电流恒定, 与此同时电容向负载放电, 因此将电感电压和电容电流描述为:

$$\begin{cases} L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_{in}(t) \\ C \frac{dV_{out}(t)}{dt} = -\frac{V_{out}(t)}{R} \end{cases} \quad (2-29)$$

同理, 将图 2.2 (b) 所示的开关断开状态下的电感电压和电容电流描述为:

$$\begin{cases} L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_{in}(t) - V_{out}(t) \\ C \frac{dV_{out}(t)}{dt} = I_L(t) - \frac{V_{out}(t)}{R} \end{cases} \quad (2-30)$$

分别联立式（2-29）和式（2-30）中的电感电压和电容电流方程，来求取一个周期内的电流、电压的平均值，下面先进行电流平均值的描述，将电感电压方程联立描述为：

$$\begin{cases} \frac{dI_L(t)}{dt} = \frac{1}{L} V_{in}(t) \\ \frac{dI_L(t)}{dt} = \frac{1}{L} V_{in}(t) - \frac{1}{L} V_{out}(t) \end{cases} \quad (2-31)$$

进一步结合式（2-27），可以将上式转化为电感的状态方程：

$$\frac{dI_L(t)}{dt} = \frac{1}{L} p(t) V_{in}(t) + \frac{1}{L} [1 - p(t)] [V_{in}(t) - V_{out}(t)] \quad (2-32)$$

至此，将一个周期内的平均电流进一步描述为：

$$\begin{aligned} \overline{\frac{dI_L(t)}{dt}} &= \frac{1}{L} D(t) \overline{V_{in}(t)} + \frac{1}{L} [1 - D(t)] [\overline{V_{in}(t)} - \overline{V_{out}(t)}] \\ &= \frac{1}{L} \overline{V_{in}(t)} - \frac{1}{L} [1 - D(t)] \overline{V_{out}(t)} \end{aligned} \quad (2-33)$$

同理，进行电压平均值的描述，联立电容电流方程可得：

$$\begin{cases} \frac{dV_{out}(t)}{dt} = -\frac{1}{C} \frac{V_{out}(t)}{R} \\ \frac{dV_{out}(t)}{dt} = \frac{1}{C} I_L(t) - \frac{1}{C} \frac{V_{out}(t)}{R} \end{cases} \quad (2-34)$$

将电容的状态方程描述为：

$$\frac{dV_{out}(t)}{dt} = -\frac{1}{C} p(t) \frac{V_{out}(t)}{R} + \frac{1}{C} [1 - p(t)] \left[ I_L(t) - \frac{V_{out}(t)}{R} \right] \quad (2-35)$$

由此，将一个周期内的平均电压描述为：

$$\overline{\frac{dV_{out}(t)}{dt}} = -\frac{1}{C} \frac{\overline{V_{out}(t)}}{R} + \frac{1}{C} [1 - D(t)] \overline{I_L(t)} \quad (2-36)$$

在后续针对燃料电池的阻抗测量方案中，将通过 DC-DC 产生交流扰动，实现对电堆的激励信号添加，因此将对 DC-DC 变换器产生叠加在输入电流上的交

流信号的原理进行分析。产生交流信号的主要方式是对稳态状态下的 Boost 升压电路添加一个交流扰动，由电路中的电流、电压和占空比等参数按照设定的方案周期性变化来实现扰动信号的产生。以这种方式进行 DC-DC 扰动信号的产生时，要保证扰动信号幅值应远小于稳定状态下的信号值，信号频率也要远小于对开关的控制频率。

下面对 DC-DC 交流扰动信号的产生进行建模，首先，将扰动叠加到 Boost 升压电路的稳定值中，将其描述为：

$$\begin{cases} D(t) = D + \tilde{d}(t) \\ I_L(t) = I_L + \tilde{i}_L(t) \\ V_{in}(t) = V_{in} + \tilde{v}_{in}(t) \\ V_{out}(t) = V_{out} + \tilde{v}_{out}(t) \end{cases} \quad (2-37)$$

式中， $D$ 、 $I_L$ 、 $V_{in}$ 、 $V_{out}$  代表着占空比、输入电流、输入电压和输出电压的直流分量， $\tilde{d}$ 、 $\tilde{i}_L$ 、 $\tilde{v}_{in}$ 、 $\tilde{v}_{out}$  代表着相应参数的交流分量。将式（2-37）带入式（2-33）可得：

$$L \frac{d(I_L + \tilde{i}_L)}{dt} = (V_{in} + \tilde{v}_{in}) - (1 - D - \tilde{d})(V_{out} + \tilde{v}_{out}) \quad (2-38)$$

对上式进行化简可得：

$$L \frac{dI_L(t)}{dt} + L \frac{d\tilde{i}_L(t)}{dt} = V_{in} + \tilde{v}_{in} - (1 - D)(V_{out} + \tilde{v}_{out}) + \tilde{d}V_{out} - \tilde{d}\tilde{v}_{out} \quad (2-39)$$

分离上式中的直流变量和交流变量，并忽略掉两阶的交流扰动量，可得：

$$L \frac{d\tilde{i}_L(t)}{dt} = \tilde{v}_{in} - (1 - D)\tilde{v}_{out} + V_{out}\tilde{d} \quad (2-40)$$

将式（2-37）带入式（2-36）可得：

$$C \frac{d(V_{out} + \tilde{v}_{out})}{dt} = -\frac{V_{out} + \tilde{v}_{out}}{R} + (1 - D - \tilde{d})(I_L + \tilde{i}_L) \quad (2-41)$$

同理，分离上式中的直流、交流变量，并忽略两阶交流扰动量，得到：

$$C \frac{d\tilde{v}_{out}}{dt} = -\frac{\tilde{v}_{out}}{R} + (1 - D)\tilde{i}_L - I_L\tilde{d} \quad (2-42)$$

至此，可以将电流与电压的扰动系数模型描述为：

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{i}_L(t)}{dt} = \frac{1}{L}\tilde{v}_{in} - \frac{1}{L}(1-D)\tilde{v}_{out} + \frac{1}{L(1-D)}V_{in}\tilde{d} \\ \frac{d\tilde{v}_{out}(t)}{dt} = -\frac{1}{C}\frac{\tilde{v}_{out}}{R} + \frac{1}{C}(1-D)\tilde{i}_L - \frac{1}{RC(1-D)}V_{out}\tilde{d} \end{cases} \quad (2-43)$$

对上式进行拉普拉斯变换，将时域系统转化为频域进行分析，得到：

$$\begin{cases} \tilde{i}_L(s) \cdot s = \frac{1}{L}\tilde{v}_{in}(s) - \frac{1}{L}(1-D)\tilde{v}_{out}(s) + \frac{1}{L}V_{in}\tilde{d}(s) \\ \tilde{v}_{out}(s) \cdot s = -\frac{1}{C}\frac{\tilde{v}_{out}(s)}{R} + \frac{1}{C}(1-D)\tilde{i}_L(s) - \frac{1}{RC(1-D)}V_{in}\tilde{d}(s) \end{cases} \quad (2-44)$$

假设输入电压是恒定的，那么此时输入电压的变化量就为零，由式（2-44）得到占空比关于电流和电压之间的传递函数：

$$\begin{cases} G_{du-dis} = \frac{\tilde{v}_{out}(s)}{\tilde{d}(s)} = \frac{V_{in}}{(1-D)^2} \frac{-\frac{L}{R(1-D)^2}s+1}{\frac{LC}{(1-D)^2}s^2 + \frac{L}{R(1-D)^2}s+1} \\ G_{di-dis} = \frac{\tilde{i}_L(s)}{\tilde{d}(s)} = \frac{2V_{out}}{R(1-D)^2} \frac{\frac{RC}{2}s+1}{\frac{LC}{(1-D)^2}s^2 + \frac{L}{R(1-D)^2}s+1} \end{cases} \quad (2-45)$$

### 2.3.2 DC-DC 变换器设计

依据 Boost 升压电路的基本原理，设计在输入电流上叠加交流扰动的 DC-DC 变换器，下面将详细介绍对电路参数的计算方式，以及对产生稳定的交流电流的控制方式。首先，依据输入输出电压之间的关系，来确定占空比，随着输入电流改变，会造成电堆输出电压波动，设电堆的输出电压范围是  $V_{in,min} \sim V_{in,max}$ ，根据燃料电池电堆输出电压的改变，将占空比的最大值与最小值描述为：

$$\begin{cases} D_{max} = \frac{V_{out} - V_{in,min}}{V_{out}} \\ D_{min} = \frac{V_{out} - V_{in,max}}{V_{out}} \end{cases} \quad (2-46)$$

为保证 Boost 升压电路的响应可以满足实际系统的需要，此时将占空比取最大值。对电路中电感值的计算可以描述为：

$$L \geq \frac{D(1-D)V_{out}}{f\eta_L\Delta I_L} \quad (2-47)$$

式中， $f$  为开关频率，单位为赫兹（Hz）、 $\eta_L$  为电流纹波率，一般取常数 0.4、 $\Delta I_L$  为引入的交流电流信号的幅值，单位为安培（A）。对电路中的电容值的计算可以描述为：

$$C \geq \frac{D(1-D)I_L}{f \times \Delta V_{out}} \quad (2-48)$$

式中， $\Delta V_{out}$  为引入的交流电压信号的幅值，单位为伏特（V）。对电路中的电阻值的计算可以描述为：

$$R = \frac{V_{out}}{I_{out}} \quad (2-49)$$

以上，描述了对占空比、电感、电容和电阻的参数设计方式，之后将描述对 DC-DC 变换器输入电流的精确控制方式。针对在输入电流上叠加小信号的方式，将采用 PI 控制器对输入电流进行调节，控制方案如图 2.3 所示。对输入电流的控制方案中包含 PI 控制器、脉宽调制模块、占空比-电流传递函数和反馈调节模块，其中采用 PI 控制器实现对电流值的调节，经过脉宽控制器输出对占空比的调节，之后通过占空比-电流传递函数可以计算出所给占空比对应的电流响应，作为系统的响应电流输出。最后通过反馈调节，计算期望电流和响应电流之间的差值，补偿到 PI 控制器中进行调节，实现系统输入电流可以按照参考电流值变换，达到 DC-DC 变换器对电堆添加交流扰动信号的目的。

在图 2.3 中， $I_{ref}$  表示设定的系统输入电流的设定值、 $I_L$  表示系统实际的响应电流。将 PI 控制器的传递函数描述为  $G_{pi}(s)$ ，可得：

$$G_{pi}(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (2-50)$$

式中， $K_p$  和  $K_i$  分别对应比例系数和积分系数，通过二者的调节可以实现对系统性能的调整。将脉宽调制模块描述为  $G_{pwm}(s)$ ，可得：



$$G_{pwm}(s) = \frac{K_{er}}{K_k V_{out}} \quad (2-51)$$

式中：  $K_{er}$  表示对误差放大的倍数、  $K_k$  表示斜坡发生器的系数。依据式（2-45），将占空比-电流传递函数描述为  $G_{di-dis}(s)$ ，可得：

$$G_{di-dis}(s) = \frac{2V_{out}}{R(1-D)^2} \frac{\frac{RC}{2}s + 1}{\frac{LC}{(1-D)^2}s^2 + \frac{L}{R(1-D)^2}s + 1} \quad (2-52)$$

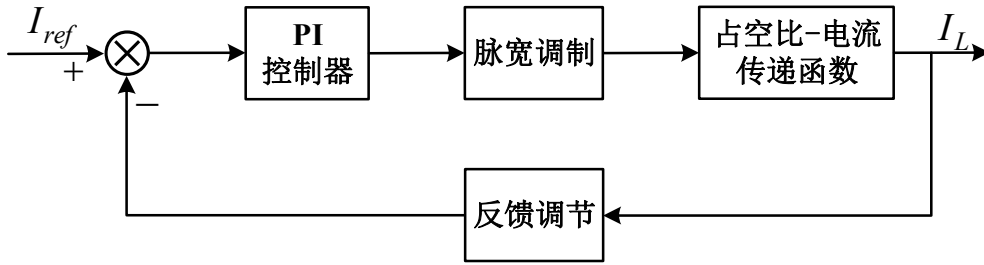


图 2.3 输入电流调节控制方案

将反馈环节的传递函数描述为  $H(s)$ ，将其设置为：

$$H(s) = 1 \quad (2-53)$$

依据式（2-50）、式（2-51）、式（2-52）和式（2-53），将输入电流调节控制方案的开环传递函数为  $G_I(s)$ ，可得：

$$\begin{aligned} G_I(s) &= G_{pwm}(s) G_{pi}(s) G_{di-dis}(s) H(s) \\ &= \frac{K_{er} [K_p RC s^2 + (K_i RC + 2K_p)s + 2K_i]}{K_k [RLC s^3 + L s^2 + R(1-D)^2 s]} \end{aligned} \quad (2-54)$$

对开环传递函数进行相频、幅频特性分析，以选取适宜的比例、积分系数，令  $s = j\omega$ ，将式（2-54）转化为：

$$G_I(j\omega) = \frac{K_{er} [-K_p RC \omega^2 + j(K_i RC + 2K_p)\omega + 2K_i]}{K_k [-jRLC \omega^3 - L\omega^2 + jR(1-D)^2 \omega]} \quad (2-55)$$

进一步，将幅频特性  $L_I(\omega)$  和相频特性  $\gamma_I(\omega)$  分别描述为：

$$\begin{cases} L_I(\omega) = -20 \log |G_I(j\omega)| \\ \gamma_I(\omega) = \arctan \left( \frac{\text{Im}[G_I(j\omega)]}{\text{Re}[G_I(j\omega)]} \right) \end{cases} \quad (2-56)$$

依据 Boost 升压电路所需要的产生交流扰动电流的通过频率，将开环传递函数的截止频率设置为：

$$\omega_c = 2\pi f_c \quad (2-57)$$

式中， $\omega_c$ 为截止频率、 $f_c$ 为穿越频率。结合开环传递函数的幅频、相频特性和截止频率，之后仅需设计相应的相位裕度便可以求取比例系数和积分系数，最后得到系统的开环传递函数  $G_I(s)$ 。

## 2.4 燃料电池系统仿真测试平台搭建

依据本章第二节和第三节中对燃料电池电堆和 DC-DC 变换器的数学模型描述，本节将介绍在 Simulink 仿真平台中对电堆和变换器的模型搭建过程，构建了基于数学模型的燃料电池阻抗测量仿真测试平台。

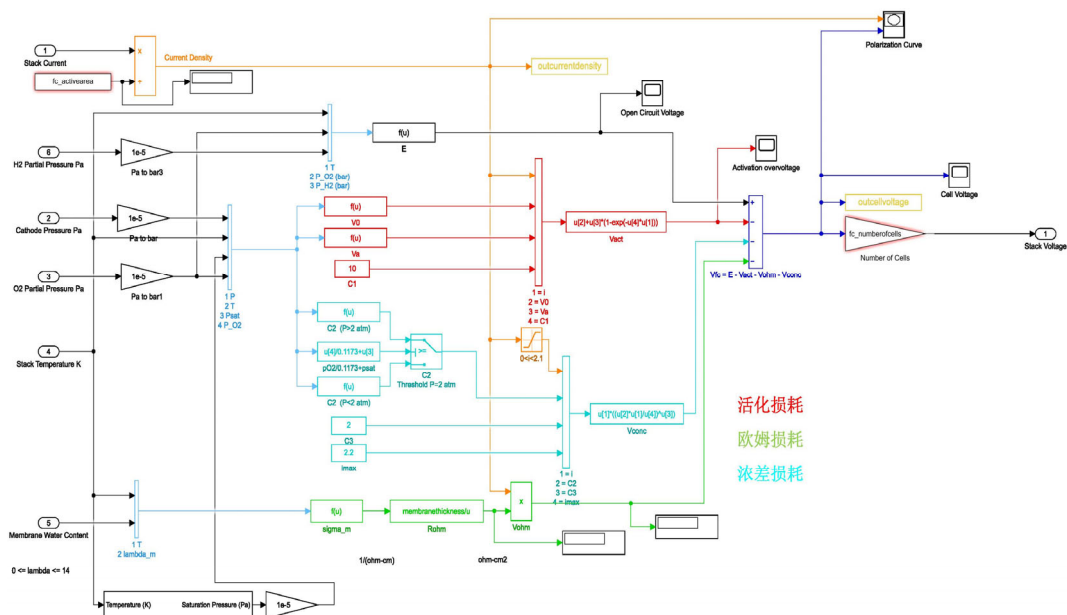


图 2.4 基于数学模型的燃料电池仿真环境

### 2.4.1 燃料电池电堆仿真平台

参照前文中对燃料电池电堆电压的输出模型，在电堆的开路电压中补偿由活化损耗、欧姆损耗和浓差损耗造成的电压损失，由此建立基于数学模型的仿真测试平台，在 Simulink 中搭建的仿真环境如图 2.4 所示，图中红色连线表示对活化损耗的补偿项、绿色连线表示对欧姆损耗的补偿项、蓝色连线表示对浓差损耗的补偿项。

针对所建立的基于数学模型的仿真环境，按照实验室现有燃料电池电堆的响应特性，将仿真电堆的输出电流设计为 0-220 A 的变化，绘制电压-电流和输出功率-电流的极化曲线，对应电压和功率曲线如图 2.5 所示，图中电压和功率的响应曲线十分贴近真实燃料电池系统的输出特性，可以用于后续阻抗测量方案的验证。

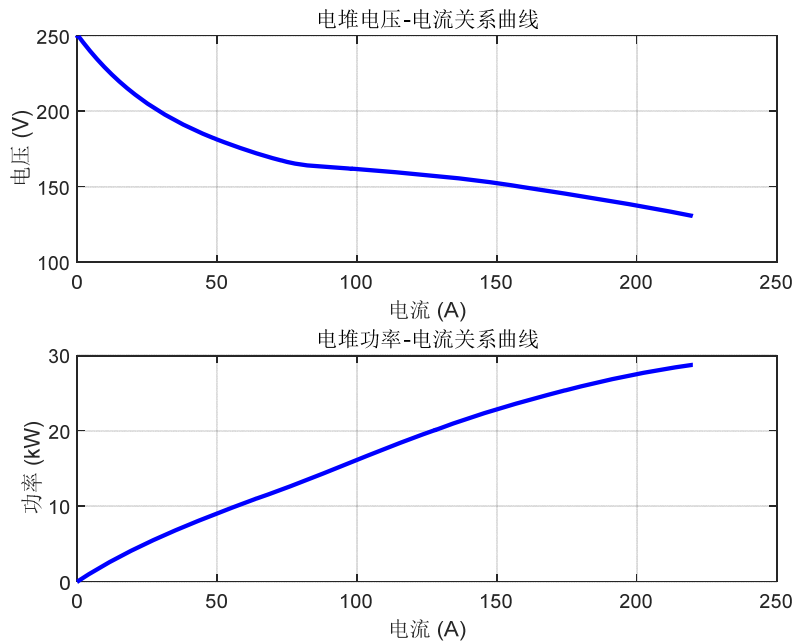


图 2.5 基于数学模型仿真环境极化曲线

#### 2.4.2 DC-DC 仿真平台

参照对 DC-DC 变换器的设计流程，搭建 DC-DC 变换器仿真验证平台，依据电堆仿真测试平台中的性能参数，设计 DC-DC 变换器的输入电流为 90 A、输入电压范围为 160-180 V、输出电压为 350 V，由此 DC-DC 变换器的性能参数为表 2.1 所示。

表 2.1 DC-DC 变换器性能参数

参数名称	参数值
输入电流	90 [A]
输入电压	160~180 [V]
输出电压	350 [V]
开关频率	100 [kHz]

依据选定的 DC-DC 变换器的性能参数，依据式 (2-46)可以计算出电路占空比应处于 0.4857~0.5429 之间，为满足系统实际需要，将占空比设置为 0.5429。之后依据式 (2-47)~(2-49)进行电感、电容、电阻对应参数的计算，综合考虑计算数值和工程上的可实现性，将设计的电路参数值在表 2.2 中给出，此时给定电感单位为微亨、电容单位为微法、电阻单位为欧姆。

表 2.2 电路参数

参数名称	参数值
电感	483 [ $\mu H$ ]
电容	65 [ $\mu F$ ]
电阻	8.5 [ $\Omega$ ]

由于需要通过对 DC-DC 变换器控制以实现产生交流扰动电流的目的，所产生扰动电流的频率约为 500-1000 Hz，为保证对通频带留有一定的裕量，将通过频率设置为 1500 Hz，以此计算出产生交流扰动电流控制器的相关参数，响应参数由表 2.3 给出。

表 2.3 交流扰动电流控制器参数

参数名称	参数值
误差放大倍数	100
斜坡发生器系数	0.104
截止频率	9424.8 [rad/s]
比例系数	30
积分系数	18

结合图 2.3 中对 DC-DC 变换器添加交流扰动电流的控制器建模和表 2.2 与 2.3 中相应控制参数选取，在 Simulink 中构建了 DC-DC 变换器仿真平台，如图 2.6 所示。图中，将期望负载电流信号作为输入，通过 PI 控制器调节负载电流，之后对控制器输出进行脉宽调制，作为 Boost 升压电路的占空比，依据占空比计算对应的电流响应，作为响应电流输出。最后，通过反馈调节计算期望电流和响应电流之间的差值，补偿到 PI 控制器中进行调节，实现 DC-DC 变换器的

输入电流可以按照参考电流值变换的目的。在 DC-DC 变换器仿真平台中，将电堆输出电流的直流分量定义为 90 A，叠加频率为 500 Hz、幅值  $\pm 5$  A 的正弦交流电流信号作为交流扰动信号，这样电流的参考信号就设置为  $90 \pm 5$  A 的正弦交流信号。经本节中设计的 PI 控制器进行电流调节，实现对电堆输出电流的调控。DC-DC 变换器的输入电流信号变换为在负载电流上叠加扰动信号的形式，如图 2.7 所示。由图中放大展示部分可以看出，经变换器调节后的电流波形可以跟踪设定值，达到预期设计目的。

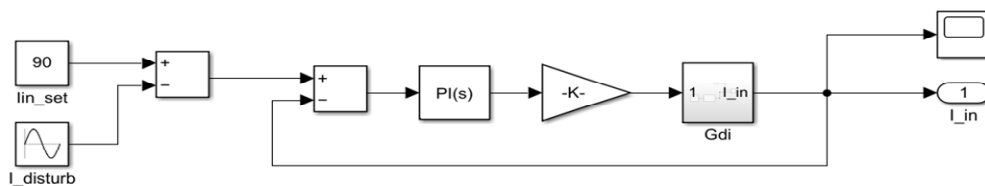


图 2.6 DC-DC 变换器仿真平台

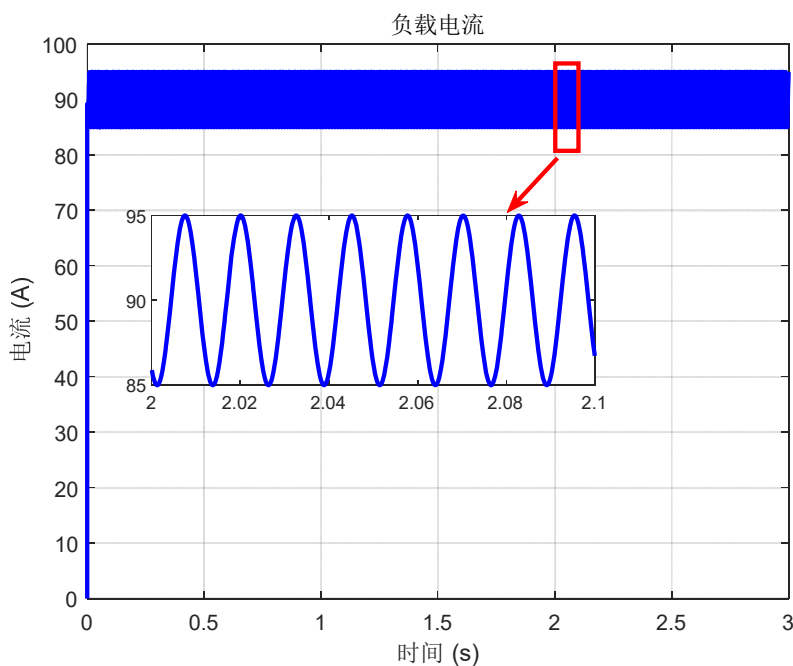


图 2.7 DC-DC 变换器输入电流

## 2.5 本章小结

本章中详细介绍了对 PEMFC 电堆和 DC-DC 升压变换器的建模方式，根据对应数学模型推导，在 Simulink 仿真环境中建立了面向燃料电池阻抗测量方案

验证的仿真测试平台，所建立仿真测试平台包含基于数学模型的燃料电池电堆仿真测试平台和 DC-DC 变换器仿真测试平台，在下文中将利用仿真测试平台进行在线阻抗测量方案的验证。

## 第三章 基于负载扰动的在线阻抗测量

### 3.1 引言

为实现质子交换膜燃料电池阻抗测量工作，本章提出了基于负载扰动的阻抗测量方案，通过对 DC-DC 变换器输入电流的调节实现对燃料电池电堆的激励添加。通过兰德尔斯电路模型（Randles-Model）对燃料电池的电化学反应进行描述，实现对燃料电池电堆阻抗的建模，将阻抗测量转化为对 Randles 电路关键参数的辨识。首先，进行了阻抗测量电路的设计，并根据测量电路建立了面向参数辨识的模型。其次，介绍了基于递归最小二乘法（Recursive Least-Squares, RLS）的参数辨识方案，通过对测量电路模型未知参数的辨识推导出燃料电池阻抗。最后，将在基于数学模型的燃料电池阻抗测量仿真测试平台上进行阻抗测量方案验证。

### 3.2 基于负载扰动的测量电路模型建立

质子交换膜燃料电池系统的产电过程实质是电化学反应过程，为方便对阻抗的测量，首先应对燃料电池电堆的阻抗进行电路模型描述。Randles 电路是电化学阻抗测量中被广泛应用的等效电路，其包含了电化学系统中电极、电极片、电解质、隔膜等影响因素，同时也包含了在电极与电解质之间产生的电子转移和氧化还原等的化学反应过程，因此借助于 Randles 电路来描述燃料电池内部的电化学反应过程<sup>[61-62]</sup>。

进行基于负载扰动的阻抗测量电路设计，借助于 Randles 电路，将燃料电池电堆描述为理想电压源和 Randles 电路串联的结构，以此建立燃料电池阻抗测量动态模型，依据模型将测量阻抗转化为对电路结构中未知参数的辨识，实现燃料电池电堆的阻抗测量。

#### 3.2.1 Randles 电路模型

针对燃料电池阻抗的电化学反应建模，依据 Randles 等效电路，将燃料电池阻抗描述为由电荷转移电阻串联 Warburg 阻抗后与双极板电容并联，最后再串联电极欧姆电阻的形式，Randles 等效电路如图 3.1 (a)所示。其中，电荷转移电阻为电池将化学能转化为电能的过程中产生的电荷传递电阻，其依赖于电池结构和工作状态；Warburg 阻抗指电化学反应中的扩散阻抗，其由反应物浓度、

生成物浓度及电位变化所产生，因其工作在低频区间，放电过程中可忽略不计；双极板电容由双电层形成而产生，代表着有效极板区以及电解液的电介质强度，受热力学影响，电极浸入电解液后会吸附电荷，于是在电解质-电极界面的两端会形成带符号相反的电荷分布；电极欧姆电阻包含了金属电阻（代表金属电极和组件连接处的电阻）和电解液电阻，为电池电解液和极板构成的主动极化阻抗，不会使信号发生相位改变。

根据电路原理，将 Randles 等效电路的阻抗值描述为：

$$Z = R_{\Omega} + \frac{1}{j\omega C_{PE} + (1/(R_c + Z_{ws}))} \quad (3-1)$$

式中， $R_{\Omega}$  为电极欧姆电阻， $R_c$  为电荷转移电阻， $C_{PE}$  为双极板电容， $Z_{ws}$  为 Warburg 阻抗，可以将其描述为：

$$Z_{ws} = \frac{RT}{n^2 F^2 S \sqrt{j\omega}} \frac{\tanh \sqrt{j\omega \delta^2 / D}}{C \sqrt{D}} \quad (3-2)$$

由于 Warburg 阻抗占阻抗中较小部分，同时其变化相对较缓慢，且其在低频段起作用，因此将 Randles 电路简化为如图 3.1 (b)所示的形式，忽略 Warburg 阻抗部分。因此，简化后的 Randles 等效电路的阻抗值可以描述为：

$$Z = R_{\Omega} + \frac{R_c}{1 + j\omega R_c C_{PE}} \quad (3-3)$$

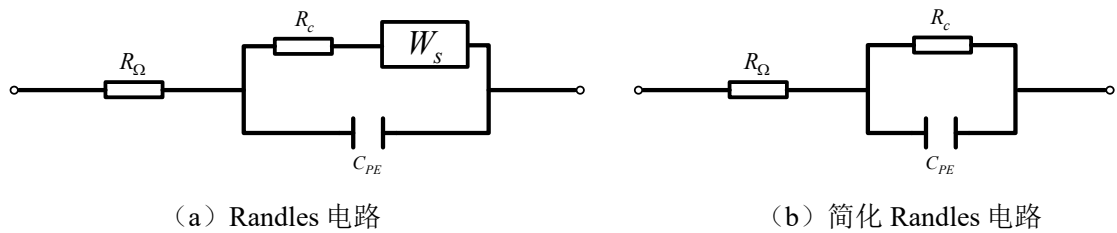


图 3.1 燃料电池阻抗 Randles 电路

至此，依据对 Randles 电路的合理简化，完成对质子交换膜燃料电池电堆的电化学反应建模过程，后续将针对该模型中的未知参数进行辨识，实现对电堆的阻抗测量。



### 3.2.2 阻抗测量等效电路动态模型

结合 Randles 电路将燃料电池电堆描述为理想电源和 Randles 电路串联的形式，进行电路分析时假设系统处于稳态响应，阻抗测量等效电路如图 3.2 所示。

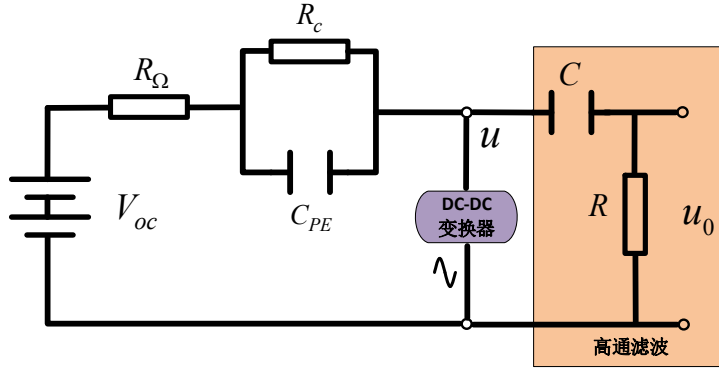


图 3.2 阻抗测量等效电路

依据基尔霍夫定律，将阻抗测量等效电路的输入输出关系描述为：

$$\begin{cases} V_{oc} = u + i \left( R_{\Omega} + \frac{R_c}{1 + R_c C_{PE} s} \right) \\ u_0 = \frac{RCs}{1 + RCs} u \end{cases} \quad (3-4)$$

式中， $V_{oc}$  代表着电堆产生的电压、 $u$  代表着电堆实际输出的电压、 $i$  代表着电堆的输出电流、 $R$  和  $C$  代表着高通滤波器的电阻和电容参数。在阻抗测量系统中，电堆输出电流经过 DC-DC 变换器添加交流扰动后，实现对电堆的激励信号添加，此时输出电流便是交流信号，可以将电堆的输出电流描述为由直流负载电流和 DC-DC 叠加上交流扰动激励电流组成的形式：

$$i = I_{load} + i_{inject} \quad (3-5)$$

式中， $I_{load}$  表示对电堆设定的负载电流， $i_{inject}$  表示由 DC-DC 变化器叠加的扰动电流。在实际燃料电池系统中，电堆产生的电压  $V_{oc}$  不能直接测量，故在测量系统中添加了高通滤波器以实现电压响应信号的采集。令  $\tau_1 = R_c C_{PE}$ 、 $\tau = RC$ ，将式（3-4）描述为：

$$\begin{cases} V_{oc} = u + (I_{load} + i_{inject}) \left( R_{\Omega} + \frac{R_c}{1 + \tau_1 s} \right) \\ u_0 = \frac{\tau s}{1 + \tau s} u \end{cases} \quad (3-6)$$

从上式中可以看出，在系统稳定的条件下，电压的交流分量主要由扰动电流  $i_{inject}$  所产生，所以假设经高通滤波器后产生的高频信号分量为：

$$u_0 = -i_{inject} \left( R_\Omega + \frac{R_c}{1 + \tau_1 s} \right) \quad (3-7)$$

对式（3-7）进行简化，可得：

$$u_0 (1 + \tau_1 s) = -i_{inject} R_\Omega (1 + \tau_1 s) - i_{inject} R_c \quad (3-8)$$

上式可以表示为：

$$u_0 + \tau_1 u_0 s = -(R_\Omega + R_c) i_{inject} - R_\Omega \tau_1 i_{inject} s \quad (3-9)$$

令  $a = R_\Omega + R_c$ 、 $b = R_\Omega \tau_1$ ，则上式可以化简为：

$$u_0 + \tau_1 u_0 s = -a i_{inject} - b i_{inject} s \quad (3-10)$$

对上式进行拉普拉斯反变换，令  $s = \frac{x(k) - x(k-1)}{T}$ ，可得：

$$u_0(k) + \frac{\tau_1}{T} [u_0(k) - u_0(k-1)] = -a i_{inject}(k) - \frac{b}{T} [i_{inject}(k) - i_{inject}(k-1)] \quad (3-11)$$

进一步可以得到：

$$u_0(k) = \frac{\tau_1}{\tau_1 + T} [u_0(k-1)] - \frac{b + aT}{\tau_1 + T} i_{inject}(k) + \frac{b}{\tau_1 + T} i_{inject}(k-1) \quad (3-12)$$

取  $y = u_0$ ， $u_c = -i_{inject}$  将此时状态变量描述为：

$$x(k) = [y(k-1) \quad u_c(k) \quad u_c(k-1)]^T \quad (3-13)$$

之后进行系数替换，令：

$$\begin{cases} k_1 = \frac{\tau_1}{\tau_1 + T} \\ k_2 = \frac{b + aT}{\tau_1 + T} \\ k_3 = -\frac{b}{\tau_1 + T} \end{cases} \quad (3-14)$$

设  $\theta = [k_1 \quad k_2 \quad k_3]$ ，只需要对  $\theta$  对应参数进行辨识即可，对  $\theta$  辨识后，对应的电路参数可以进行推导求解：首先，设  $k_0 = \tau_1 + T$ ，之后可以将式（3-14）转化为：

$$\begin{cases} \tau_1 = -\frac{k_1 T}{k_1 - 1} \\ k_0 = \tau_1 + T = T - \frac{k_1 T}{k_1 - 1} = \frac{-T}{k_1 - 1} \\ b = -k_0 k_3 \\ a = \frac{k_0 k_2 - b}{T} \end{cases} \quad (3-15)$$

最终，将电路模型中的未知系数描述为：

$$\begin{cases} R_\Omega = \frac{b}{\tau_1} \\ R_c = a - R_\Omega = a - \frac{b}{\tau_1} \\ C_{PE} = \frac{\tau_1}{R_c} = \frac{\tau_1}{a - R_\Omega} \end{cases} \quad (3-16)$$

### 3.3 基于负载扰动的阻抗测量方案设计

基于负载扰动的阻抗测量方案，通过 DC-DC 变换器在电堆的输出电流上叠加一个小的交流扰动电流信号，通过该扰动信号，实现对电堆激励信号的添加，基于负载扰动的测量方案拓扑结构如图 3.3 所示。通过 DC-DC 变换器实现对燃料电池电堆添加激励电流的功能，通过 PI 控制器进行电堆负载电流的调节，通过反馈调节计算期望电流和响应电流之间的误差，借助 PI 控制器对误差进行消除，从而保证扰动信号可以贴合预期设定值。最终，结合对 Randles 电路建模过程，将采集的燃料电池输出电流和输出电压进行干扰分离和参数估计，对电路模型中三个未知参数  $R_\Omega$ 、 $R_c$  和  $C_{PE}$  进行辨识，最终达到阻抗测量的目的。

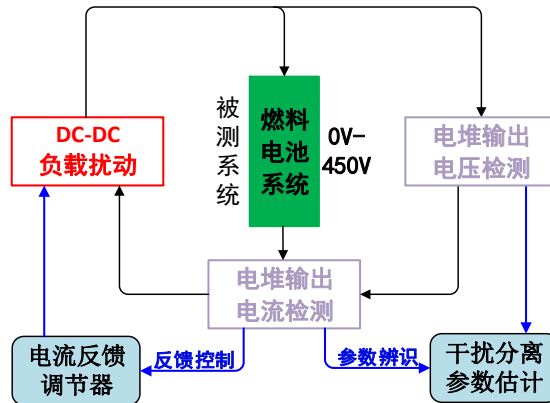


图 3.3 燃料电池阻抗测量装置拓扑结构

### 3.4 基于递归最小二乘法的阻抗测量

最小二乘法是一种被广泛应用的优化算法，他通过对误差平方和的最小化寻找数据的最优拟合函数，利用该方法可以便捷地求取未知参数，并使所求参数与实际数据之间的误差平方和最小。递归最小二乘法是一种常用的滤波器，较传统最小二乘法而言，在处理动态变换参数时，具有收敛性更快、鲁棒性更好、可实时计算等优点。

RLS 算法在处理过程中不需要假定输入序列的统计特性，而是把参数计算过程描述为决定性最小化问题，通过历史数据进行参数的辨识，以此实现模型参数的迭代优化，在每次迭代更新的过程中，从历史数据中计算出最贴切的模型参数，最终实现对系统参数的高精度预测。下面将介绍递归最小二乘法的实现过程，首先将系统的期望值与输出的实际值之间的误差描述为：

$$e(k) = y(k) - \theta(k-1)x(k) \quad (3-17)$$

基于最小均方差理论，此时将 RLS 算法的代价函数描述为：

$$J(k) = \sum_{i=0}^k \lambda^{k-i} |e(i)|^2 = \sum_{i=0}^k \lambda^{k-i} |y(i) - \theta(k)x(i)|^2 \quad (3-18)$$

式中，将  $\lambda$  的值取为 0.99，对代价函数中的状态变量  $\theta$  求偏导，并将偏导值设置为 0，得到：

$$\frac{\partial J(k)}{\partial \theta} = 0 \Rightarrow \sum_{i=0}^k \lambda^{k-i} x(i) \theta(k) x^T(i) = \sum_{i=0}^k \lambda^{k-i} x(i) y(i) \quad (3-19)$$

对上式左右两边分开处理，对等式左边进行变换，将  $R(k)$  描述为：

$$\begin{aligned} R(k) &= \sum_{i=0}^k \lambda^{k-i} x(i) x^T(i) = \sum_{i=0}^{k-1} \lambda^{k-i} x(i) x^T(i) + x(k) x^T(k) \\ &= \lambda \sum_{i=0}^{k-1} \lambda^{k-i-1} x(i) x^T(i) + x(k) x^T(k) = \lambda R(k-1) + x(k) x^T(k) \end{aligned} \quad (3-20)$$

取  $P(k) = R^{-1}(k)$ ，可以将其描述为：

$$\begin{aligned} P(k) &= R^{-1}(k) = \lambda^{-1} R^{-1}(k-1) - \frac{\lambda^{-2} R^{-1}(k-1) x(k) x^T(k) R^{-1}(k-1)}{1 + \lambda^{-1} x^T(k) R^{-1}(k-1) x(k)} \\ &= \lambda^{-1} [P(k-1) - L(k) x^T(k) P(k-1)] \end{aligned} \quad (3-21)$$

式中， $L(k)$  为误差修正因子，将其描述为：

$$L(k) \xrightarrow{\text{def}} \frac{P(k-1)x(k)}{\lambda + x^T(k)P(k-1)x(k)} = P(k)x(k) \quad (3-22)$$

对式（3-18）中等式右侧进行变换，得到：

$$\begin{aligned} r(k) &= \sum_{i=0}^k \lambda^{k-i} x(i)y(i) = \sum_{i=0}^{k-1} \lambda^{k-i} x(i)y(i) + x(k)y(k) \\ &= \lambda \sum_{i=0}^{k-1} \lambda^{k-i-1} x(i)y(i) + x(k)y(k) = \lambda r(k-1) + x(k)y(k) \end{aligned} \quad (3-23)$$

此时，便可以将状态变量描述为：

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(k) &= R^{-1}(k)r(k) = P(k)r(k) \\ &= P(k-1)r(k-1) - L(k)x^T(k)P(k-1)r(k-1) \\ &\quad + \lambda^{-1} [P(k-1)x(k) - L(k)x^T(k)P(k-1)x(k)]y(k) \\ &= \theta(k-1) + L(k)[y(k) - x^T(k)\theta(k-1)] \\ &= \theta(k-1) + L(k)e(k) \end{aligned} \quad (3-24)$$

至此，基于 RLS 算法实现对模型中未知参数的辨识，下面将利用基于数学模型的燃料电池阻抗测量仿真测试平台进行方案的有效性验证。

### 3.5 阻抗测量仿真验证

#### 3.5.1 电路参数辨识结果分析

依据文献[50]中对阻抗测量的结果与分析，首先将仿真平台中的待辨识参数设计如表 3.1 所示，既最终的辨识结果应与设定值相近。

表 3.1 待辨识参数

参数名称	设定值
$R_{\Omega}$	0.15 [ $\Omega$ ]
$R_c$	0.1 [ $\Omega$ ]
$C_{PE}$	0.02 [F]

在本节中将通过燃料电池负载电流和扰动电流的变化来验证所设计测量方案的有效性，在实际应用中，信号中往往会叠加噪声，造成采样失真，本节中综合考虑信号中有无噪声叠加的情况，选用四种工况进行所设计阻抗测量方案

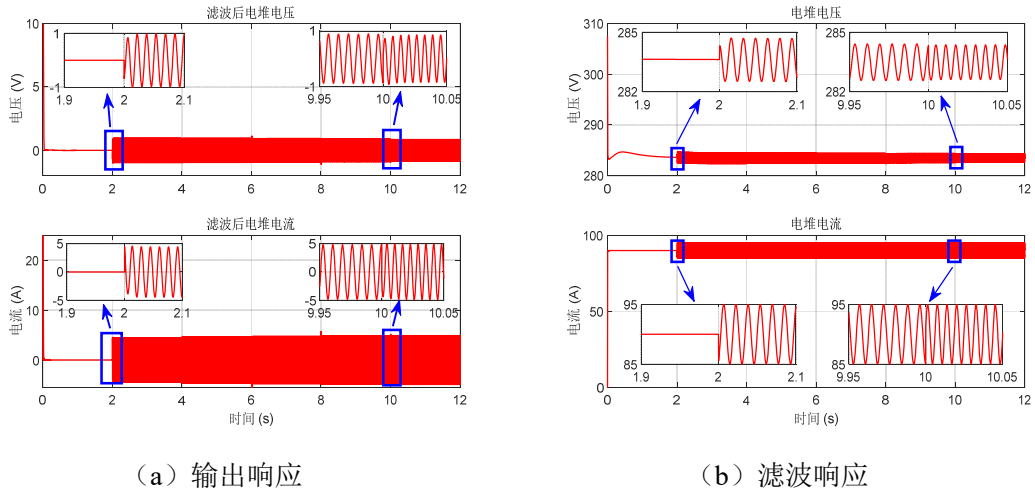


图 3.4 工况一：燃料电池电流、电压响应

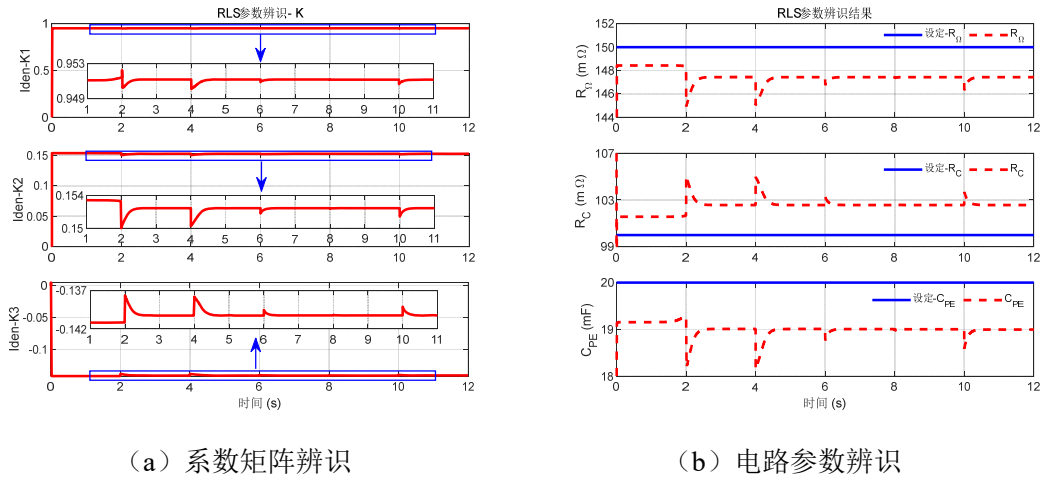


图 3.5 工况一：RLS 算法参数辨识

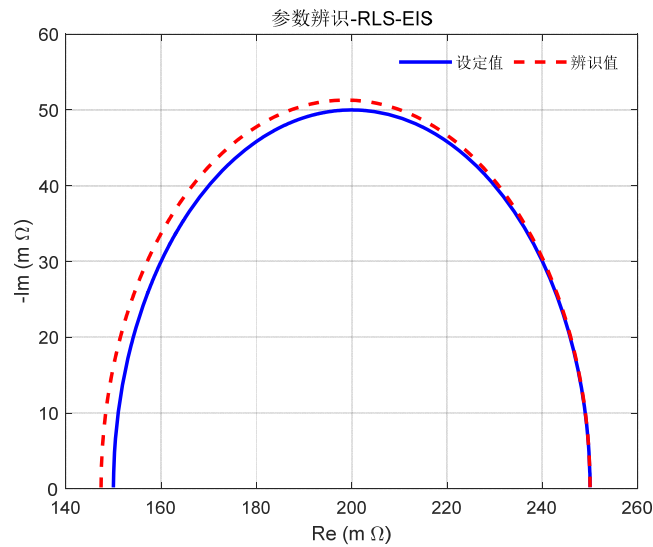


图 3.6 基于负载扰动阻抗测量方案 EIS

的验证，四种工况分别是：无噪声条件下固定负载电流，更改叠加扰动信号的频率；有噪声条件下固定负载电流，更改叠加扰动信号的频率；无噪声条件下固定叠加扰动信号频率，令负载电流阶跃变化；有噪声条件下固定叠加扰动信号频率，令负载电流阶跃变化，下面将针对上述四种工况分别进行介绍。

在不考虑系统中存在噪声的条件下，保持负载电流稳定输出不进行改变，对叠加到电流上的扰动信号频率进行改变，进行第一种实验工况的验证，首先，依据 EIS 扫频的测量方式，将对 DC-DC 变换器添加的扰动信号设定为幅值-5~5 A 的正弦信号，依据时间变化将频率设计如表 3.2 所示：0~2 s 电堆输出电流恒定，不添加扰动信号；2~4 s 时添加频率 400 Hz 的正弦扰动信号；4~6 s 时添加频率为 500 Hz；6~8 s 时添加频率为 600 Hz；8~10 s 时添加频率为 800 Hz；10~12 s 时添加频率为 1000 Hz。

表 3.2 激励信号添加波形

时间 [s]	电流幅值 [A]	频率 [Hz]
0~2	90	0
2~4	85~95	400
4~6	85~95	500
6~8	85~95	600
8~10	85~95	800
10~12	85~95	1000

在第一种实验工况条件下，燃料电池电堆的输出电流和输出电压如图 3.4 (a) 所示。在燃料电池系统刚开使工作时，需要经过调节才能达到电流、电压稳定输出，在图 3.4 (a)中放大展示了在 2 s 和 10 s 时的输出电流和电压的响应曲线，由此可以表示所设计的扰动添加模块可以较好响应系统动态，实现激励信号的添加与响应。经过滤波调节后的输出电流和电压响应曲线如图 3.4 (b)所示，由于高通滤波器在系统刚启动时，将低频直流分量进行滤除需要响应时间，会造成初始阶段的较高超调，待系统稳定后便可稳定进行高通滤波。在图 3.4 (b)中放大展示了在 2 s 和 10 s 时经滤波后的输出电流和电压响应曲线，这两个时刻对应着扰动信号频率从 0~400 Hz 和 800~1000 Hz 的变化，频率的变化会造成滤波的瞬时波动，之后便可以继续稳定输出。

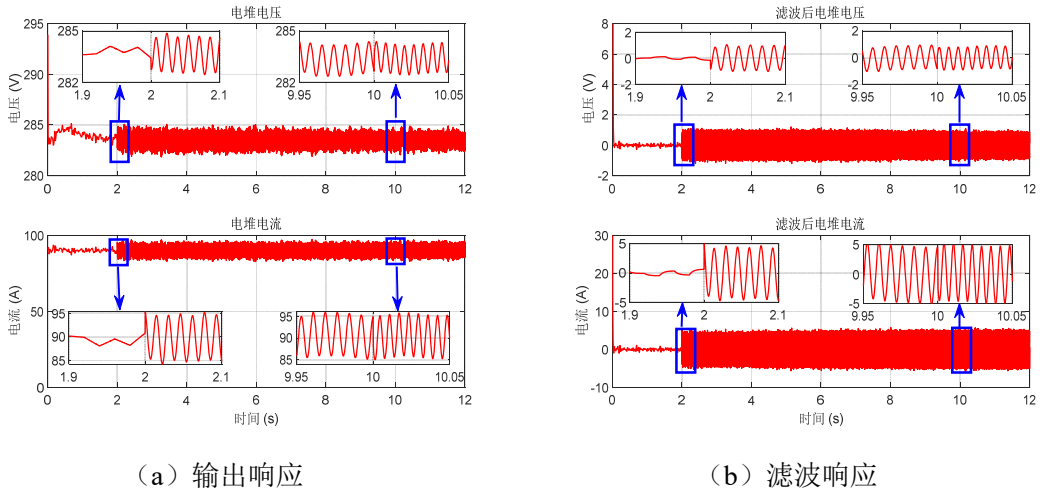


图 3.7 工况二：燃料电池电流、电压响应

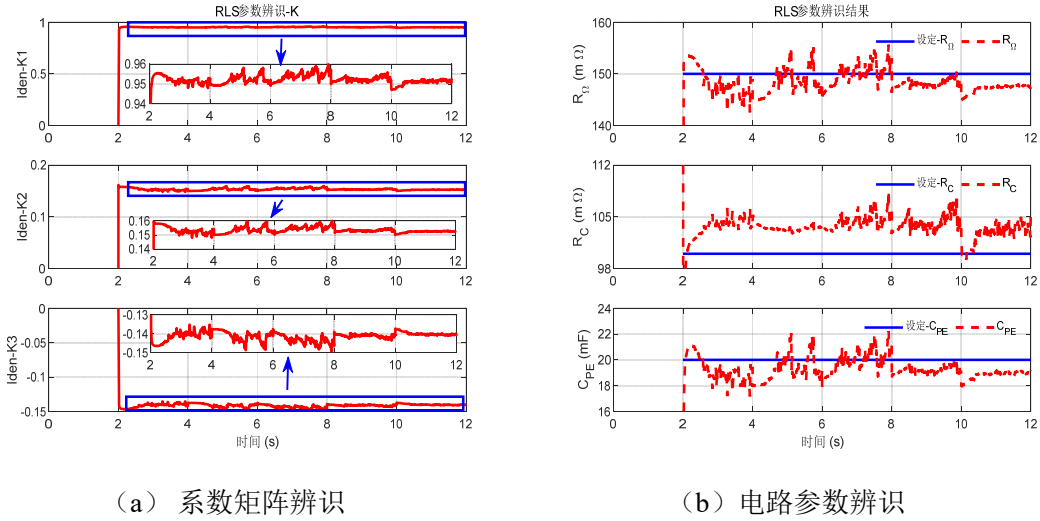


图 3.8 工况二：RLS 算法参数辨识

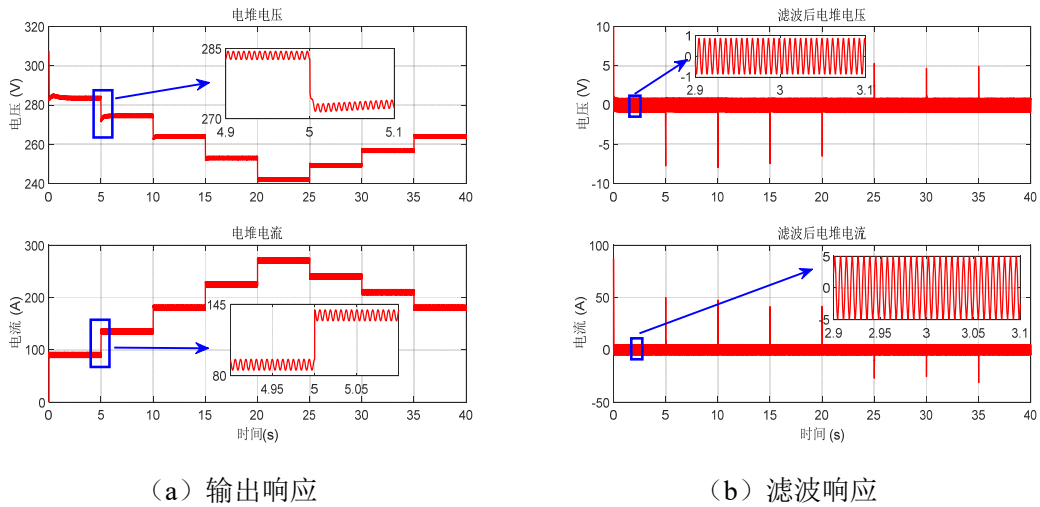


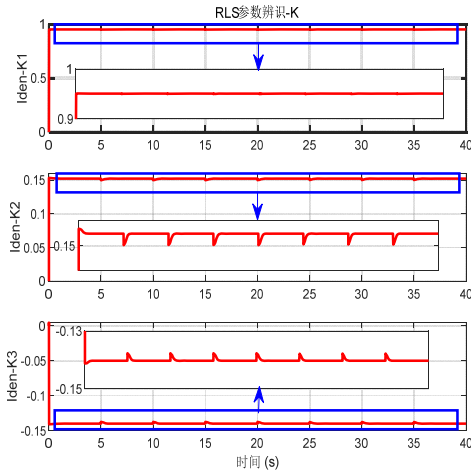
图 3.9 工况三：燃料电池电流、电压响应



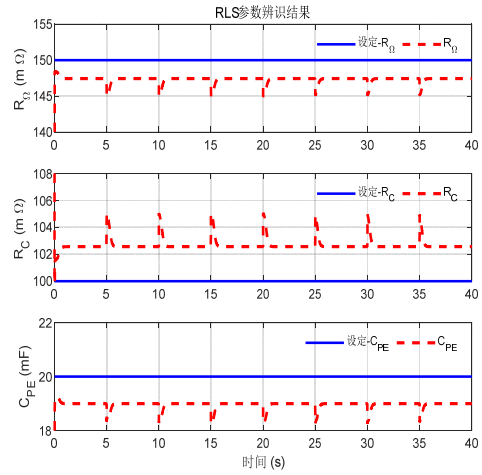
经 RLS 算法辨识出的待辨识参数矩阵效果如图 3.5 (a)所示, 由于燃料电池系统刚启动时的输出动态调节和对 RLS 算法初值的设计问题, 造成辨识结果的突变, 待系统稳定后, 便可以稳定输出。随着激励电流的频率改变, 会造成辨识参数结果的突变, 突变后辨识参数依旧可以稳定输出, 而且其调整时间小于 500 毫秒。

依据辨识出来的参数矩阵, 对 Randles 电路未知参数进行推导, 电路参数辨识结果如图 3.5 (b)所示。图中, 蓝色实线为对 Randles 电路中未知参数的设定值, 红色虚线为经 RLS 算法辨识出来的未知参数值, 将图中的电阻单位转化为毫欧、电容单位转化为毫法。从图 3.5 (b)中可以看出, 在燃料电池发电系统刚启动时, 由于系统动态不稳定, 造成了辨识结构的波动, 当系统动态稳定后, 辨识结果便可以贴合设定值。在激励电流的频率产生变化时, 辨识结果也会跟随造成波动, 但是很快便可以稳定, 调节时间小于 500 毫秒。从实验数据图中设定结果和辨识结果可以看出, 在仿真环境下, 对  $R_{\Omega}$  和  $R_c$  的辨识精度可达 3 毫欧, 对  $C_{PE}$  的辨识精度可达 1 毫法。之后, 将 Randles 电路中参数的设定值和辨识值转化为 EIS, 转化后的效果如图 3.6 所示, 图中曲线从左至右所对应的激励信号频率逐渐减小。

第二种实验工况中考虑了系统中含有噪声的情况, 将负载电流的直流分量依旧设定为 90 A, 扰动信号的频率如表 3.2 所示, 在燃料电池输出电流上叠加频率为 50 Hz 的高斯白噪声。在第二种工况下燃料电池的输出电压和电流如图 3.7 (a)所示, 从图中可以看出, 加噪声后的电压、电流响应叠加上了明显的噪声波动, 图中放大展示了系统在第 2 秒和第 10 秒的响应情况。系统经高通滤波后的电压、电流响应曲线如图 3.7 (b)所示, 较无噪声条件而言, 曲线具有明显波动, 这样会造成后续参数计算值的波动, 从图中可以看出, 燃料电池刚启动时具有明显的调节, 因此, 在前两秒不进行扰动信号的叠加和未知参数的计算。在此工况下待辨识参数矩阵如图 3.8 (a)所示, 在有噪声的环境下, 系数矩阵的辨识会有波动, 而且在频率变化点时, 也会有一定的跳变。依据辨识出的参数矩阵进行未知电路参数的计算, 对应计算的电路参数如图 3.8 (b)所示, 图中蓝色实线为设定值, 红色虚线为辨识值, 对未知电路参数的辨识结果虽然存在波

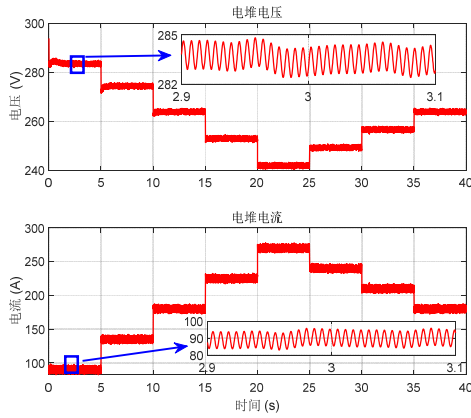


(a) 系数矩阵辨识

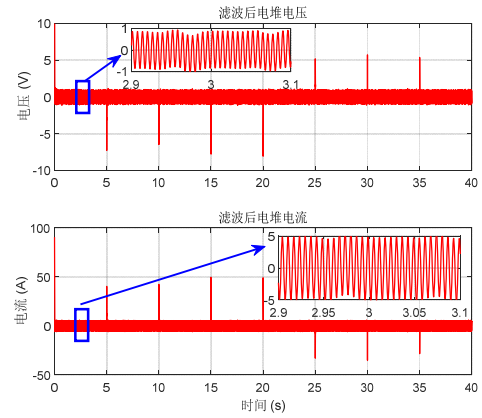


(b) 电路参数辨识

图 3.10 工况三：RLS 算法参数辨识

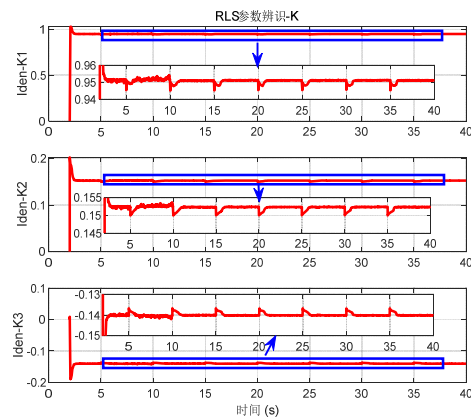


(a) 输出响应

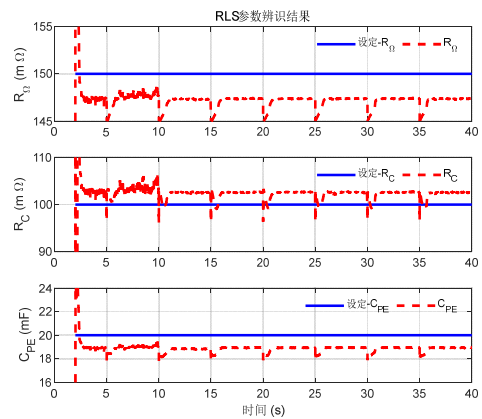


(b) 滤波响应

图 3.11 工况四：燃料电池电流、电压响应



(a) 系数矩阵辨识



(b) 电路参数辨识

图 3.12 工况四：RLS 算法参数辨识

动，但是辨识结果十分贴近设定值，对  $R_{\Omega}$  和  $R_c$  的辨识精度可达 5 毫欧，对  $C_{PE}$  的辨识精度可达 2 毫法。

表 3.3 负载电流波形

时间 [s]	电流幅值 [A]	频率 [Hz]
0~5	85~95	1000
5~10	130~140	1000
10~15	175~185	1000
15~20	220~230	1000
20~25	265~275	1000
25~30	235~245	1000
30~35	205~215	1000
35~40	175~185	1000

在第三种实验工况中，固定了扰动信号的频率为 1000 Hz，将负载电流的直流分量设定为阶跃变化的形式，直流分量的变化形式如表 3.3 所示，对应的电流、电压响应如图 3.9 (a)所示，当负载电流阶跃变化时，电压的响应存在一个调节时间才保持稳定输出，经高通滤波器滤波后的电压、电流响应如图 3.9 (b)所示，从图中可以看出，在电流发生阶跃变化时，滤波效果会出现尖峰，此时，滤波器进行调节滤除突变的直流变量。经 RLS 算法进行参数辨识后的系数矩阵如图 3.10 (a)所示，此时参数辨识结果较为平稳，当负载电流阶跃变化时，会造成辨识结果的突变，但是很快便可以将突变消除掉。依据未知系数矩阵，推导出电路的未知参数，辨识未知参数结果如图 3.10 (b)所示，图中蓝色实线为设定值，红色虚线为辨识值，从实验数据图中设定结果和辨识结果可以看出，在仿真环境下对  $R_{\Omega}$  和  $R_c$  的辨识精度可达 3 毫欧，对  $C_{PE}$  的辨识精度可达 1 毫法。

第四种实验工况在第三种工况的条件下引入了测量噪声，在有测量噪声条件下相应的燃料电池电流、电压响应如图 3.11 (a)所示，从图中放大部分可以明显看出在输出电流和电压上存在噪声的影响，此时经滤波后对应的响应曲线如图 3.11 (b)所示，滤波后的曲线同样受到噪声的影响，且在负载电流阶跃变化的时刻，滤波器会有滤波的波动以消除阶跃变换的直流分量。经 RLS 算法辨识的系数矩阵如图 3.12 (a)所示，前两秒时，燃料电池刚启动时的波动会造成辨识结

果失真，所以设定在两秒后，燃料电池稳定后再进行参数辨识，在有噪声的条件下，系统需要更长时间调节才能保持参数值稳定输出。依据未知系数矩阵，进行电路未知参数的推导，辨识电路中未知参数结果如图 3.12 (b)所示，图中蓝色实线为设定值，红色虚线为辨识值，对未知电路参数的辨识结果虽然存在波动，但是十分贴近设定值，对  $R_{\Omega}$  和  $R_c$  的辨识精度可达 5 毫欧，对  $C_{PE}$  的辨识精度可达 2 毫法。

### 3.5.2 负载扰动功率分析

在基于负载扰动的阻抗测量方案中，通过 DC-DC 变换器产生对电堆的激励信号，因此可以通过未添加扰动时电堆输出功率与添加扰动后输出功率之间差值来描述负载扰动方案的瞬时消耗功率，此时可以通过对输出电流、电压进行低通滤波来描述未添加扰动时的输出状态。

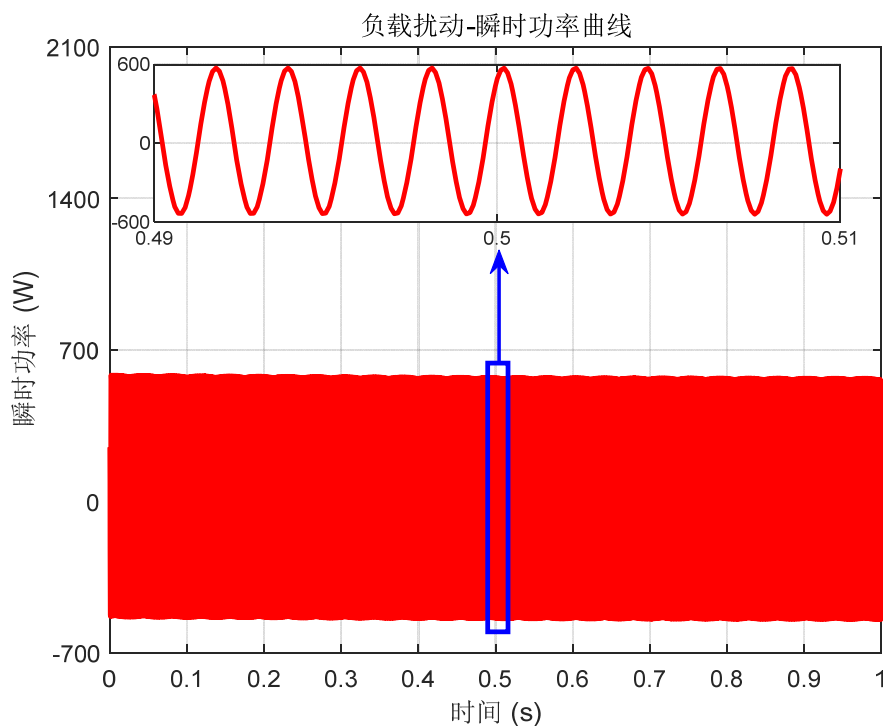


图 3.13 负载扰动瞬时功率

在进行功率分析时，将扰动电流设置为幅值  $\pm 5$  A、频率 500 Hz 的正弦信号，将扰动电流叠加在电堆 90 A 的负载电流上，作为实际的负载电流。借助电堆输出功率在无扰动添加和有扰动添加状态下的功率差值，来描述产生负载扰动所需要的瞬时功率。在系统处于稳态响应时，通过 DC-DC 变换器产生交流扰

动的阻抗测量方案在 1 s 内的瞬时功率如图 3.13 所示，其瞬时功率约在-600 ~ 600 W 之间变化，图中放大展示了 0.5 s 处的瞬时功率，此时，DC-DC 变换器的瞬时消耗功率呈现正弦波动状态。将瞬时消耗功率转换为平均消耗功率可以更直观描述负载扰动所需消耗功率，平均消耗功率可以描述为：

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (3-25)$$

式中，P 表示平均消耗功率，单位为瓦特（W）、p(t)表示瞬时消耗功率、T 表示一个时间周期。依据图 3.13 采集的瞬间消耗功率数据，当瞬时功率为正值时，代表着 DC-DC 变换器做功，拉升负载电流，消耗电能；当瞬时功率为负时，代表着从系统中吸收能量，但对 DC-DC 变换器而言，不能进行能量的储存，因而此时 DC-DC 变换器仅起到抑制负载电流输出的功能，不能进行能量回收，这部分能量便被浪费掉。因此，计算基于负载扰动测量方案的平均功率时，仅对瞬时消耗功率为正时的部分进行积分，那么便可以得到，在单位时间内负载扰动添加激励电流的平均消耗功率约为 183.9 W。

### 3.6 本章小结

在本章中介绍了 Randles 电路，将燃料电池电堆描述为理想电压源和等效电路串联的形式，由此将燃料电池的阻抗测量转化为对电路中未知参数的辨识。首先，本章中设计了一种基于负载扰动的在线燃料电池阻抗测量方案，通过燃料电池系统中的 DC-DC 变换器在电堆的输出电流上叠加交流扰动信号，以此实现对电堆激励信号添加，根据电堆的输出电流和电压信号进行参数辨识。其次，通过递归最小二乘法进行燃料电池阻抗未知参数的辨识，分别考虑了固定负载电流调节叠加扰动频率和固定叠加扰动频率调节负载电流两种情况下对电路未知参数辨识的影响，并在基于数学模型的燃料电池阻抗测量仿真平台上进行验证。经验证结果表明：如果测量中不含噪声，对参数的辨识精度分别可达 3 毫欧和 1 毫法；如果在测量中叠加噪声，测量精度可达 5 毫欧和 2 毫法。最后，进行了该方案在对电堆添加激励信号的瞬时和平均消耗功率的计算，在添加幅值 5 A、频率 500 Hz 的正弦扰动时，瞬时消耗功率约在-600 ~ 600 W 之间变化，由于 DC-DC 变换器不能进行能量回收的特性，导致该方案的平均消耗功率较大，约为 183.9 W。

本章中提出的测量方案可以实现对燃料电池电堆阻抗在线测量的目的，但是基于负载扰动的测量方案，将在电堆输出电流上叠加交流扰动，会造成燃料电池稳定工作点的改变，且瞬时消耗功率的变化范围过大和较大的平均消耗功率，所以该方案更适宜用于对瞬时输出功率精度要求较低或对测量精度要求严苛的场景中。

## 第四章 基于激励信号注入的在线阻抗测量

### 4.1 引言

第三章中所介绍的基于负载扰动的阻抗测量方案，通过 DC-DC 变换器在电堆输出电流上叠加交流扰动会改变燃料电池的稳定工作点，且瞬时功耗较大。为避免上述问题，本章提出了一种基于激励信号注入的在线阻抗测量方案，其实质是在燃料电池系统外部添加一个交流电源，将其产生的交流信号作为对电堆的激励。本章依旧使用 Randles 电路对燃料电池电化学反应进行描述，通过参数辨识方案进行阻抗测量。首先，针对外加激励式阻抗测量方案进行测量电路设计，建立面向参数辨识的模型。其次，介绍一种基于卡尔曼滤波的参数辨识方案，对状态空间方程中的状态矩阵进行辨识，反推出 Randles 电路的未知参数，实现阻抗的在线测量。最后，将在燃料电池阻抗测量仿真平台上进行方案验证，并进行激励信号源所消耗功率的分析。

### 4.2 基于激励信号注入的测量电路模型建立

#### 4.2.1 阻抗测量电路动态建模

在燃料电池系统外，对电堆添加一个交流激励信号发生源，以此构成基于激励信号注入的燃料电池阻抗测量方案，该方案电路结构如图 4.1 (a)所示。燃料电池电堆产生的电能，经滤波电路输出至负载。通过理想交流电流源产生正弦信号，实现对电堆的扰动信号添加。在交流电流源的电路中添加电阻  $R_s$  和电容  $C_s$  对激励电流源进行保护，以防止电堆输出的直流高电压对交流电流源产生影响<sup>[61-62]</sup>。

依据 Randles 电路将燃料电池电堆描述成理想电压源和阻抗  $Z$  串联的形式，以此将电路结构简化，如图 4.1 (b)所示，在简化电路结构中， $v_0$  代表电堆实际产生电压，该部分为电压直流分量； $u$  代表系统输出电压，该部分包含电堆输出的直流分量和由添加激励信号所产生的交流分量，所以系统输出电压为交流量； $i$  代表对系统添加的激励信号，该部分为电流的交流分量； $I$  代表系统的直流负载电流，为电流的直流分量。由于电堆实际产生的电压  $v_0$  在实际工程中不能直接获得，因此，在图 4.1 (b)中在输出电压端添加了高通滤波器，以获取系

统中的高频交流分量，在系统中，所有引入的高频信号分量均是由外接激励源所产生的，因此，假定经高通滤波器提取出来的高频信号便是激励信号经燃料电池等效阻抗所产生的响应，图中  $R$  和  $C$  代表着高通滤波器的设计参数， $u_0$  代表着经高通滤波器输出的高频信号。

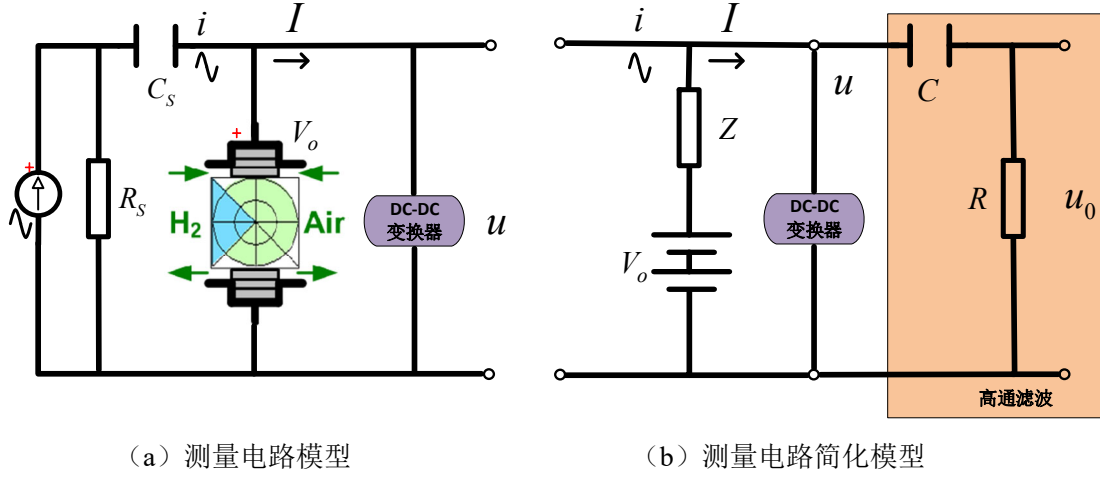


图 4.1 基于激励信号注入的阻抗测量方案电路结构

依据图 4.1 (b) 中的电路结构，将阻抗测量电路动态模型描述为  $V_0 \rightarrow u$  和  $u \rightarrow u_0$  之间的传递关系，下面将依据电路结构进行阻抗测量电路动态模型推导，此时假设系统处于稳态响应：首先，将激励信号  $i$  设置为：

$$i = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (4-1)$$

式中， $A$ 、 $\omega$  和  $\varphi$  分别代表着激励信号的幅值、周期和初始相位。将燃料电池系统的输出电压、滤波后的电压和实际电压之间的关系描述为：

$$\begin{cases} u = V_0 + zi - zI \\ u_0 = \frac{RCs}{1 + RCs} u \end{cases} \quad (4-2)$$

式中， $V_0$  代表着电堆的实际电压， $z$  表示燃料电池电堆阻抗， $I$  代表着电堆的负载电流， $R$  和  $C$  代表着高通滤波器的设计参数，依据 Randles 电路，可以将其描述为：

$$\begin{aligned} z &= R_\Omega + \frac{R_C}{1 + R_C C_{PE} s} \\ &= \frac{R_\Omega + R_C + R_\Omega R_C C_{PE} s}{1 + R_C C_{PE} s} \end{aligned} \quad (4-3)$$



联立式(4-2)和(4-3)，假定系统中的高频交流分量均由外加激励信号所产生，那么经高通滤波器处理后的信号便可以描述为 $u_0 = zi$ ，之后考虑把激励电流作为阻抗测量系统的输入量，滤波后电压作为系统的响应信号即输出量，令：

$$\begin{cases} u_0 \Rightarrow y \\ i \Rightarrow u_c \end{cases} \quad (4-4)$$

以此，将式(4-2)转化为：

$$y = \frac{R_\Omega + R_C + R_\Omega R_C C_{PE} s}{1 + R_C C_{PE} s} u_c \quad (4-5)$$

对上式进行处理，可得：

$$(1 + R_C C_{PE} s) y = (R_\Omega + R_C + R_\Omega R_C C_{PE} s) u_c \quad (4-6)$$

对上式进行离散化处理，令：

$$s = \frac{x(k) - x(k-1)}{T} \quad (4-7)$$

因此，将式(4-6)转化为：

$$\begin{aligned} & y(k) + \frac{R_C C_{PE}}{T} [y(k) - y(k-1)] \\ &= (R_\Omega + R_C) u_c(k) + \frac{R_\Omega R_C C_{PE}}{T} [u_c(k) - u_c(k-1)] \end{aligned} \quad (4-8)$$

对上式进行化简，可得：

$$\begin{aligned} & \frac{T + R_C C_{PE}}{T} y(k) - \frac{R_C C_{PE}}{T} y(k-1) \\ &= \frac{T(R_\Omega + R_C) + R_\Omega R_C C_{PE}}{T} u_c(k) - \frac{R_\Omega R_C C_{PE}}{T} u_c(k-1) \end{aligned} \quad (4-9)$$

进一步，由式(4-9)可得：

$$\begin{aligned} y(k) &= \frac{R_C C_{PE}}{T + R_C C_{PE}} y(k-1) \\ &+ \frac{T(R_\Omega + R_C) + R_\Omega R_C C_{PE}}{T + R_C C_{PE}} u_c(k) - \frac{R_\Omega R_C C_{PE}}{T + R_C C_{PE}} u_c(k-1) \end{aligned} \quad (4-10)$$

令式(4-10)中的系数为：

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{R_C C_{PE}}{T + R_C C_{PE}} \\ \alpha_2 = \frac{T(R_\Omega + R_C) + R_\Omega R_C C_{PE}}{T + R_C C_{PE}} \\ \alpha_3 = -\frac{R_\Omega R_C C_{PE}}{T + R_C C_{PE}} \end{cases} \quad (4-11)$$

联立式 (4-10) 和式 (4-11) 可得:

$$y(k) = \alpha_1 y(k-1) + \alpha_2 u_c(k) + \alpha_3 u_c(k-1) \quad (4-12)$$

至此, 完成对激励信号注入式测量电路的模型建立。

基于模型, 将对电堆阻抗测量转化为对未知参数矩阵的系数辨识, 即对  $\theta = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3]$  进行辨识。下面将介绍对 Randles 电路中未知参数的求解过程, 首先, 取:

$$a = R_C C_{PE} = \frac{\alpha_1 T}{1 - \alpha_1} \quad (4-13)$$

以此将电路参数描述为:

$$\begin{cases} R_\Omega = -\frac{\alpha_3}{\alpha_1} \\ R_C = \frac{\alpha_2(T + a) - R_\Omega(T + a)}{T} \\ C_{PE} = \frac{a}{R_C} \end{cases} \quad (4-14)$$

联立式 (4-13) 和式 (4-14) 可将电路参数和待辨识矩阵联系起来:

$$\begin{cases} R_\Omega = -\frac{\alpha_3}{\alpha_1} \\ R_C = \frac{\alpha_1 \alpha_2 + \alpha_3}{\alpha_1(1 - \alpha_1)} \\ C_{PE} = \frac{\alpha_1^2 T}{\alpha_1 \alpha_2 + \alpha_3} \end{cases} \quad (4-15)$$

### 4.2.2 模型验证

为了验证所建立的基于激励信号注入的阻抗测量电路模型和真实系统的贴合程度，在 Simulink 仿真测试平台中进行了模型验证工作。将阻抗测量模型进行了相应数学描述，搭建了对应的验证模块，仿真模型验证结果如图 4.2 所示。图中，红色线是阻抗测量电路模型对应的电堆电压，绿色虚线是在仿真系统中对应的电堆电压，从模型验证结果中可以看出，所建立模型可以很好地贴近系统的真实响应趋势，且所建立模型角真实系统的差值在 2 % 以内，因此在后续的控制方案设计中，可以对所建立模型进行参数辨识，实现阻抗参数的测量。

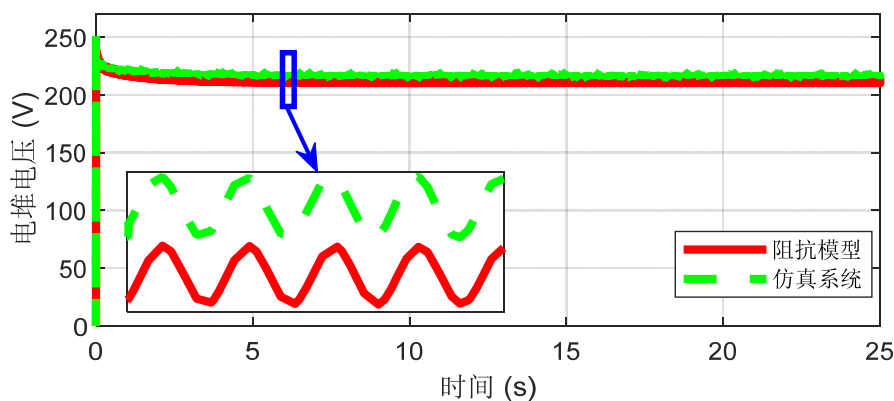


图 4.2 基于激励信号注入的阻抗测量电路模型验证结果

### 4.3 基于激励信号注入的阻抗测量方案设计

为实现基于激励信号注入的燃料电池阻抗测量方案，将在线阻抗测量装置的拓扑结构设计为图 4.3 所示，可以将测量方案总结为激励信号生成和信号采集两部分进行叙述。

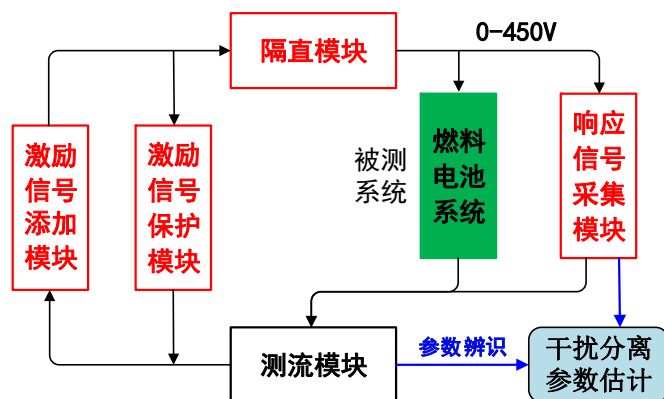


图 4.3 燃料电池在线阻抗测量装置拓扑结构

针对激励信号生成而言，包含激励信号添加、激励信号源保护、阻隔直流三个功能：激励信号添加的作用是要实现对燃料电池电堆激励信号的添加，通过该部分，生成正弦波、三角波或阶跃信号等连接到燃料电池电堆上，实现信号的添加，本文中生成正弦激励信号；激励信号源保护要实现对产生激励信号装置的保护，因为添加的激励信号不同，会对燃料电池造成不同的扰动，这种扰动可能造成激励信号添加模块的损坏，故设计该部分实现对激励信号源的保护；阻隔直流要实现电路的隔直通交的作用，燃料电池堆产生的电压是直流电压，因电堆是由几十甚至上百片燃料电池串联起来组成的，在电堆正常工作时将产生百伏以上的直流高压电，这样高压电会影响到激励信号添加的稳定性，故需要隔离直流，将直流高电压阻挡住。

针对信号采集而言，包含激励电流采集、响应电压信号采集和阻抗计算三个功能：激励电流采集要实现对激励信号的波形与幅值的测量，因为当激励信号添加到电堆的时候，由于添加的对激励信号源保护和隔离直流可能造成波形和幅值的改变，故需要电流检测来对真正添加到电堆内的信号进行测量；响应信号采集实现对燃料电池响应电压信号的采集功能，当将激励信号注入到燃料电池时，燃料电池会产生一个对该信号的响应，通过该部分实现对响应信号的采集与处理，输出燃料电池的响应信号用于之后的阻抗计算；通过注入的激励信号和采集到的燃料电池电堆的响应信号进行在线阻抗测量，下面将介绍基于干扰分离和参数估计的在线阻抗测量方案，设计基于卡尔曼滤波的参数辨识方案，并通过燃料电池阻抗测量仿真测试平台进行方案的有效性验证。

#### 4.4 基于卡尔曼滤波的阻抗测量

在本节中将介绍基于卡尔曼滤波（Kalman Filtering）的原理及参数辨识方法，主要介绍卡尔曼滤波算法在最优滤波和参数辨识两个方面的应用。基于Kalman滤波的参数辨识方法，实现对状态空间方程的未知状态矩阵辨识，对状态矩阵进行逆向求解，推导出Randles电路中的未知参数，实现对燃料电池电堆阻抗的测量<sup>[63-66]</sup>。

Kalman滤波是一种基于递归形式的估计方法，通过输入、输出数据变化规律，进行未知状态变量的最优估计，实现参数辨识的目的，通过上一时刻估计

的状态值和当前时刻观测数据，就可以计算出当前对状态的估计值，可以对数据实时处理与更新迭代，同时，该方法能滤除数据中的测量噪声，以实现系统参数的最优估计，下面将介绍 Kalman 算法的原理和应用于系统参数估计的方式。

#### 4.4.1 Kalman 最优滤波原理

首先，将线性离散随机系统描述为：

$$\begin{cases} X(k+1) = \Phi(k+1, k)X(k) + G(k+1, k)U(k) + \Upsilon(k+1, k)W(k) \\ Z(k) = H(k)X(k) + V(k) \end{cases} \quad (4-16)$$

式中， $X(k)$  为系统中的未知状态向量， $U(k)$  为输入向量， $Z(k)$  为测量向量， $\Phi(k+1, k)$ 、 $G(k+1, k)$ 、 $\Upsilon(k+1, k)$  和  $H(k)$  为系统已知系数矩阵， $W(k)$  和  $V(k)$  分别为系统中的干扰和噪声向量。假定  $W(k)$  和  $V(k)$  是高斯白噪声且两者之间相互独立，将数学期望值和协方差描述为：

$$\begin{cases} E\{W(k)\} = 0 \\ E\{V(k)\} = 0 \end{cases} \quad (4-17)$$

$$\begin{cases} Cov\{W(k), W(i)\} = Q_k \delta_{ki} \\ Cov\{V(k), V(i)\} = R_k \delta_{ki} \\ Cov\{W(k), V(i)\} = 0 \end{cases} \quad (4-18)$$

式中， $Q_k$  为对称非负定矩阵， $R_k$  为对称正定矩阵， $\delta_{ki}$  为克罗内克函数（Kronecker Delta），将其描述为：

$$\delta_{ki} = \begin{cases} 1 & k = i \\ 0 & k \neq i \end{cases} \quad (4-19)$$

将式（4-17）中状态向量初值  $X(0)$  的数学期望和方差描述为：

$$\begin{cases} E\{X(0)\} = \mu_0 \\ Var\{X(0)\} = E\{[X(0) - \mu_0][X(0) - \mu_0]^T\} = P_0 \end{cases} \quad (4-20)$$

假定状态初值  $X(0)$  和干扰与噪声之间互不相关，将协方差描述为：

$$\begin{cases} Cov\{W(k), X(0)\} = 0 \\ Cov\{V(k), X(0)\} = 0 \end{cases} \quad (4-21)$$

假定估计的状态向量  $\hat{X}(i|k)$  和观测向量  $Z(k)$  之间是无偏估计且呈线性相关，其数学期望可描述为：

$$E\{\hat{X}(i|k)\} = E\{X(i)\} \quad (4-22)$$

将估计的状态向量与真实状态向量之间的误差描述为：

$$\tilde{X}(i|k) = X(i) - \hat{X}(i|k) \quad (4-23)$$

下面将进行 Kalman 滤波算法最优预测方程的推导，此时忽略输入信号的作用，令  $U(k)=0$ ，将用于卡尔曼滤波的线性离散系统描述为：

$$\begin{cases} X(k+1) = \Phi(k+1, k)X(k) + \Upsilon(k+1, k)W(k) \\ Z(k) = H(k)X(k) + V(k) \end{cases} \quad (4-24)$$

将状态变量在  $k+1$  时刻的一步最优预测估计描述为：

$$\hat{X}(k+1|k) = \Phi(k+1, k)\hat{X}(k|k) \quad (4-25)$$

此时对观测量的估计值便可以描述为：

$$\hat{Z}(k+1|k) = H(k+1)\hat{X}(k+1|k) \quad (4-26)$$

将观测量的实际值与估计值之间的误差描述为：

$$\begin{aligned} \tilde{Z}(k+1|k) &= Z(k+1) - \hat{Z}(k+1|k) \\ &= [H(k+1)X(k+1) + V(k+1)] - [H(k+1)\hat{X}(k+1|k)] \\ &= H(k+1)\tilde{X}(k+1|k) + V(k+1) \end{aligned} \quad (4-27)$$

之后，基于线性最小方差估计，将状态变量下一步描述为：

$$\hat{X}(k+1|k+1) = \hat{X}(k+1|k) + K(k+1)[Z(k+1) - H(k+1)\hat{X}(k+1|k)] \quad (4-28)$$

对上式化简可得：

$$\hat{X}(k+1|k+1) = \hat{X}(k+1|k) + K(k+1)[H(k+1)\tilde{X}(k+1|k) + V(k+1)] \quad (4-29)$$

式中， $\tilde{X}(k+1|k)$  为状态量在  $k+1$  时刻的预测估计误差，可以将此时状态量的滤波估计误差描述为：

$$\begin{aligned} \tilde{X}(k+1|k+1) &= X(k+1) - \hat{X}(k+1|k+1) \\ &= X(k+1) - \hat{X}(k+1|k) - K(k+1)[H(k+1)\tilde{X}(k+1|k) + V(k+1)] \\ &= \tilde{X}(k+1|k) - K(k+1)H(k+1)\tilde{X}(k+1|k) - K(k+1)V(k+1) \end{aligned} \quad (4-30)$$

其中,  $\tilde{X}(k+1|k+1)$  与  $Z(k+1)$  正交, 可推得:

$$E\{\tilde{X}(k+1|k+1)Z^T(k+1)\} = 0 \quad (4-31)$$

进一步可得:

$$\begin{aligned} & E\{\tilde{X}(k+1|k+1)Z^T(k+1)\} \\ &= E\left\{\left[\tilde{X}(k+1|k) - K(k+1)H(k+1)\tilde{X}(k+1|k) - K(k+1)V(k+1)\right] \cdot \left[H(k+1)X(k+1) + V(k+1)\right]^T\right\} \\ &= P(k+1|k)H^T(k+1) - K(k+1)H(k+1)P(k+1|k)H^T(k+1) \\ &\quad - K(k+1)R_{k+1} = 0 \end{aligned} \quad (4-32)$$

式中,  $P(k+1|k)$  为对  $k+1$  时刻状态矩阵的预测估计误差方差矩阵, 为:

$$P(k+1|k) = E\{\tilde{X}(k+1|k)\tilde{X}^T(k+1|k)\} \quad (4-33)$$

由式 (4-32), 可以将  $k+1$  时刻滤波增益矩阵描述为:

$$K(k+1) = P(k+1|k)H^T(k+1)[H(k+1)P(k+1|k)H^T(k+1) + R_{k+1}]^{-1} \quad (4-34)$$

之后, 将最优滤波的估计误差方差矩阵描述为:

$$\begin{aligned} & P(k+1|k+1) = E\{\tilde{X}(k+1|k+1)\tilde{X}^T(k+1|k+1)\} \\ &= E\left\{\left[\tilde{X}(k+1|k) - K(k+1)H(k+1)\tilde{X}(k+1|k) - K(k+1)V(k+1)\right] \cdot \left[\tilde{X}(k+1|k) - K(k+1)H(k+1)\tilde{X}(k+1|k) - K(k+1)V(k+1)\right]^T\right\} \\ &= P(k+1|k) - P(k+1|k)H^T(k+1)K^T(k+1) \\ &\quad - K(k+1)H(k+1)P(k+1|k) + K(k+1)R_{k+1}K^T(k+1) \\ &\quad + K(k+1)H(k+1)P(k+1|k)H^T(k+1)K^T(k+1) \end{aligned} \quad (4-35)$$

式中,  $\tilde{X}(k+1|k+1)$  为滤波估计误差矩阵, 可以将其描述为:

$$\tilde{X}(k+1|k+1) = X(k+1) - \hat{X}(k+1|k+1) \quad (4-36)$$

对式 (4-35) 进一步化简, 可以将滤波误差方差矩阵的递推形式描述为:

$$\begin{aligned} & P(k+1|k+1) = P(k+1|k) - P(k+1|k)H^T(k+1) \\ &\quad \cdot [H(k+1)P(k+1|k)H^T(k+1) + R_{k+1}]^{-1} H(k+1)P(k+1|k) \\ &\quad = [I - K(k+1)H(k+1)]P(k+1|k) \\ &\quad \cdot [I - K(k+1)H(k+1)]^T + K(k+1)R_{k+1}K^T(k+1) \end{aligned} \quad (4-37)$$

之后，依据式（4-36），将  $k+1$  时刻的状态预测估计描述为：

$$\begin{aligned}\tilde{X}(k+1|k) &= X(k+1) - \hat{X}(k+1|k) \\ &= \Phi(k+1, k)\tilde{X}(k|k) + \Upsilon(k+1, k)W(k)\end{aligned}\quad (4-38)$$

式中， $\tilde{X}(k|k)$  为滤波估计误差，可以描述为：

$$\tilde{X}(k|k) = X(k) - \hat{X}(k|k) \quad (4-39)$$

将预测估计误差方差矩阵描述为：

$$\begin{aligned}P(k+1|k) &= E\{\tilde{X}(k+1|k)\tilde{X}^T(k+1|k)\} \\ &= \Phi(k+1, k)P(k|k)\Phi^T(k+1, k) + \Upsilon(k+1, k)Q_k\Upsilon^T(k+1, k)\end{aligned}\quad (4-40)$$

至此，构成了 Kalman 滤波的最优滤波递推方程，Kalman 滤波的迭代原理可以概括为五步：首先，估计未知的状态量的最优预测矩阵；第二，进行预测估计误差的方差矩阵求解；第三，设计最优滤波增益矩阵；第四，求解当前时刻最优滤波状态矩阵的估计；最后，迭代计算滤波估计误差方差矩阵，以此循环迭代求取系统最优解。可以将滤波递推方程描述为：

$$\begin{cases} \hat{X}(k|k-1) = \Phi(k, k-1)\hat{X}(k-1|k-1) \\ P(k|k-1) = \Phi(k, k-1)P(k-1|k-1)\Phi^T(k, k-1) \\ \quad + \Upsilon(k, k-1)Q_{k-1}\Upsilon^T(k, k-1) \\ K(k) = P(k|k-1)H^T(k)[H(k)P(k|k-1)H^T(k) + R_k]^{-1} \\ \hat{X}(k|k) = \hat{X}(k|k-1) + K(k)[Z(k) - H(k)\hat{X}(k|k-1)] \\ P(k|k) = [I - K(k)H(k)]P(k|k-1)[I - K(k)H(k)]^T \\ \quad + K(k)R_kK^T(k) \end{cases} \quad (4-41)$$

对递推初值设定为：

$$\begin{cases} \hat{X}(0|0) = E\{E(0)\} = \mu_0 \\ P(0|0) = E\left\{\left[X(0) - \hat{X}(0|0)\right]\left[X(0) - \hat{X}(0|0)\right]^T\right\}\end{cases} \quad (4-42)$$

#### 4.4.2 Kalman 滤波参数辨识原理

Kalman 滤波可以应用与对动态系统的参数的在线估计，依据式（4-12）所设计的用于阻抗测量系统参数辨识的差分方程为：

$$y(k) = \alpha_1 y(k-1) + \alpha_2 u_c(k) + \alpha_3 u_c(k-1) \quad (4-43)$$



式中,  $y(k)$  和  $u_c(k)$  代表着系统的输出和输入量,  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  和  $\alpha_3$  和代表着系统的待辨识参数, 将上式改写为 Kalman 滤波的标准形式, 取待辨识参数为状态变量:

$$\begin{cases} x_1(k) = \alpha_1(k) \\ x_2(k) = \alpha_2(k) \\ x_3(k) = \alpha_3(k) \end{cases} \quad (4-44)$$

将上式转化为状态方程, 下一时刻值描述为当前时刻和噪声的关系:

$$\begin{cases} x_1(k+1) = \alpha_1(k) + w_1(k) \\ x_2(k+1) = \alpha_2(k) + w_2(k) \\ x_3(k+1) = \alpha_3(k) + w_3(k) \end{cases} \quad (4-45)$$

式中,  $w(k)$  为系统噪声, 假设为高斯白噪声。以此, 构造待辨识的状态矩阵为:

$$\begin{aligned} X^T(k) &= [x_1(k) \quad x_2(k) \quad x_3(k)] \\ &= [\alpha_1(k) \quad \alpha_2(k) \quad \alpha_3(k)] \end{aligned} \quad (4-46)$$

将系统状态方程描述为

$$X(k+1) = X(k) + W(k) \quad (4-47)$$

式中,  $W(k)$  由  $w_i(k)$ , ( $i=1,2,3$ ) 构成, 可以将其描述为:

$$W^T(k) = [w_1(k) \quad w_2(k) \quad w_3(k)] \quad (4-48)$$

将  $W(k)$  的方差描述为:

$$E\{W(k)W^T(i)\} = Q_k \delta_{ki} \quad (4-49)$$

设系统的系数矩阵为:

$$H(k) = [y(k-1) \quad u_c(k) \quad u_c(k-1)] \quad (4-50)$$

以此, 将观测方程设计为:

$$y(k) = H(k)X(k) + v(k) \quad (4-51)$$

式中,  $v(k)$  为高斯白噪声, 可以将其方差描述为:

$$E\{v(k)v^T(i)\} = R_k \delta_{ki} \quad (4-52)$$

联立式 (4-47) 和式 (4-51), 将待辨识状态空间方程描述为:

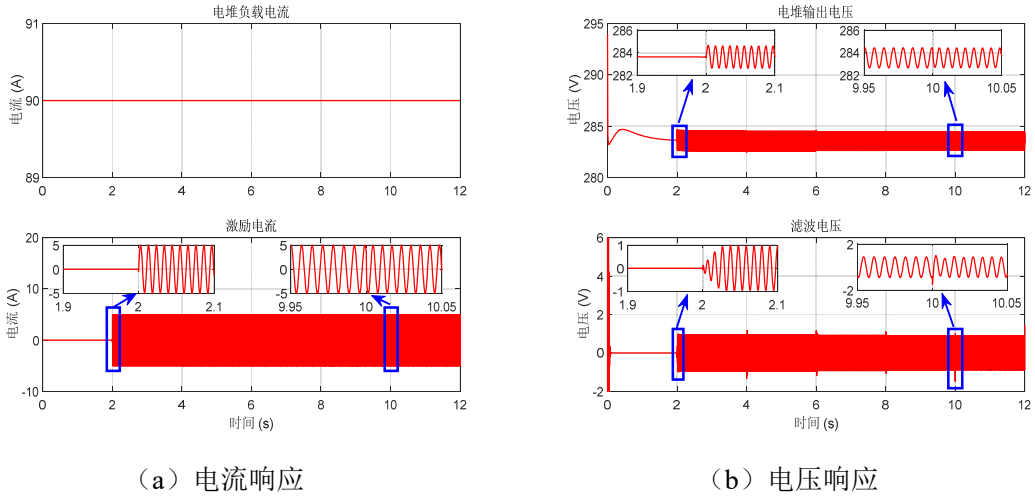


图 4.4 工况一：燃料电池电流、电压响应

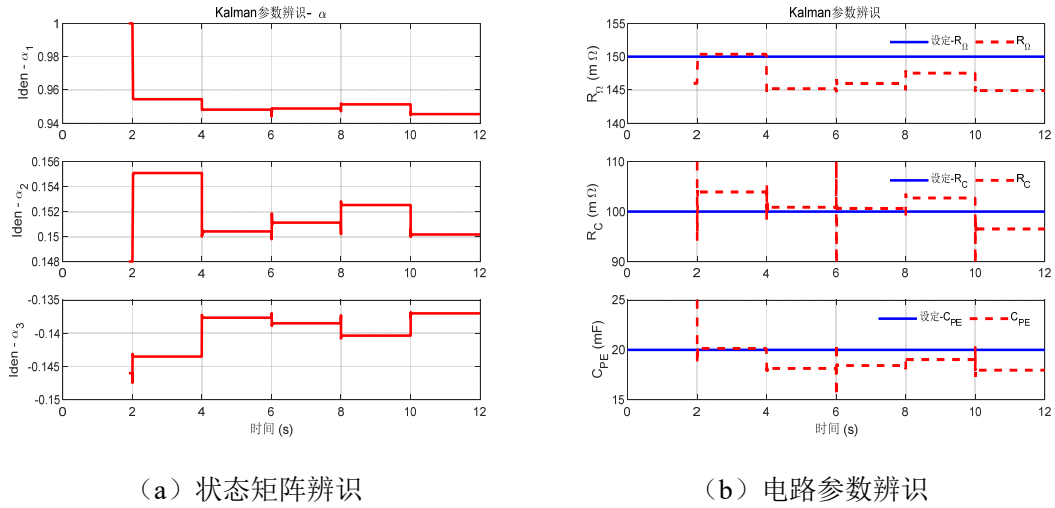


图 4.5 工况一：Kalman 滤波参数辨识

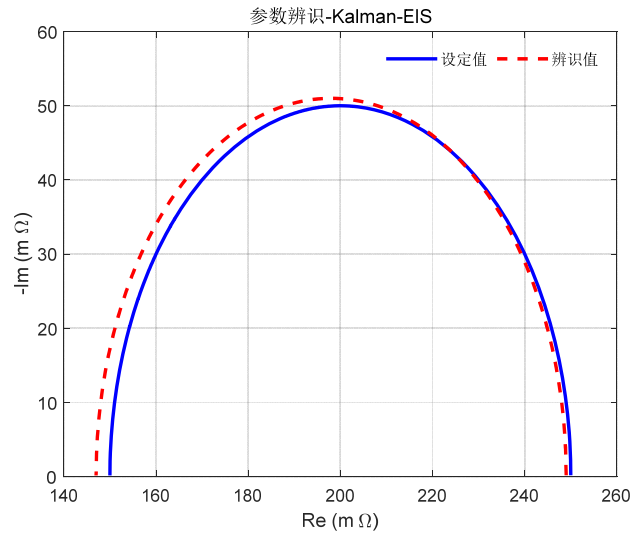


图 4.6 基于激励信号注入式阻抗测量方案 EIS

$$\begin{cases} X(k+1) = X(k) + W(k) \\ y(k) = H(k)X(k) + v(k) \end{cases} \quad (4-53)$$

之后进行未知参数的求解，从式（4-53）中可以得到部分系数矩阵为：

$$\begin{cases} \Phi = I \\ \Upsilon = I \end{cases} \quad (4-54)$$

以此，将式（4-41）化简为：

$$\begin{cases} P(k|k-1) = P(k-1|k-1) + Q_{k-1} \\ K(k) = P(k|k-1)H^T(k)[H(k)P(k|k-1)H^T(k) + R_k]^{-1} \\ \hat{X}(k|k) = \hat{X}(k|k-1) + K(k)[y(k) - H(k)\hat{X}(k-1|k-1)] \\ P(k|k) = [I - K(k)H(k)]P(k|k-1)[I - K(k)H(k)]^T + K(k)R_kK^T(k) \end{cases} \quad (4-55)$$

至此，便通过 Kalman 滤波算法迭代实现了对系统的未知参数辨识。

## 4.5 阻抗测量仿真验证

### 4.5.1 电路参数辨识结果分析

依据文献[50]中对燃料电池阻抗测量的分析结果，将仿真平台的阻抗参数设定与第三章设定的参数保持一致，具体参数如表 3.1 所示。依据第三章中所提出的测量方案有效性验证的逻辑，本节中同样采用固定负载电流调节激励电流频率和固定激励频率调节负载电流两种形式进行验证，具体分为四种工况来阐述方案的有效性：在无噪声条件下固定负载电流，更改外加激励信号的频率；在含有噪声条件下固定负载电流，更改外加激励信号的频率；在无噪声条件下固定外加激励信号的频率，使负载电流呈阶跃变化；在含有噪声条件下固定外加激励信号的频率，使负载电流呈阶跃变化。下面将针对上述四种工况分别进行介绍。

表 4.1 激励信号添加波形

时间 [s]	激励电流幅值 [A]	频率 [Hz]
0~2	0	0
2~4	-5~5	600
4~6	-5~5	700
6~8	-5~5	800
8~10	-5~5	900
10~12	-5~5	1000

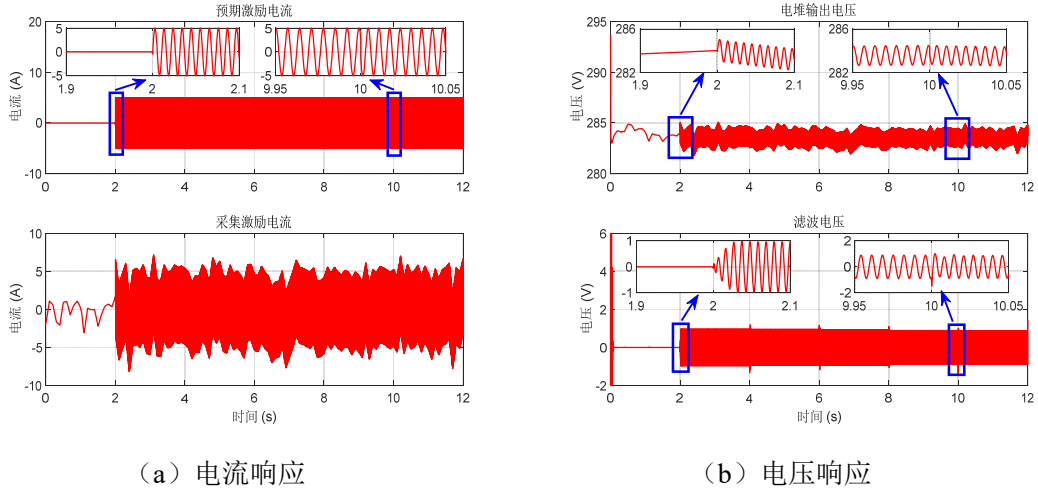


图 4.7 工况二：燃料电池电流、电压响应

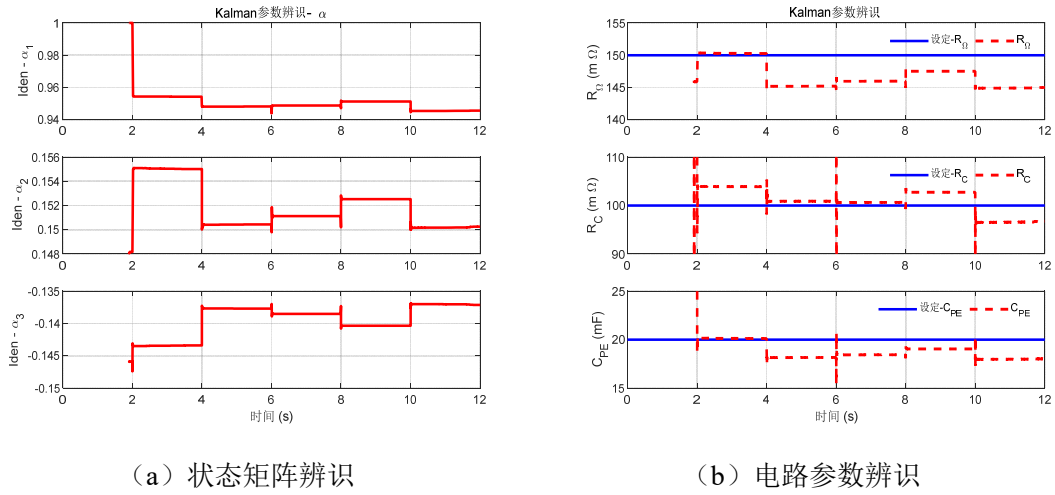


图 4.8 工况二：Kalman 滤波参数辨识

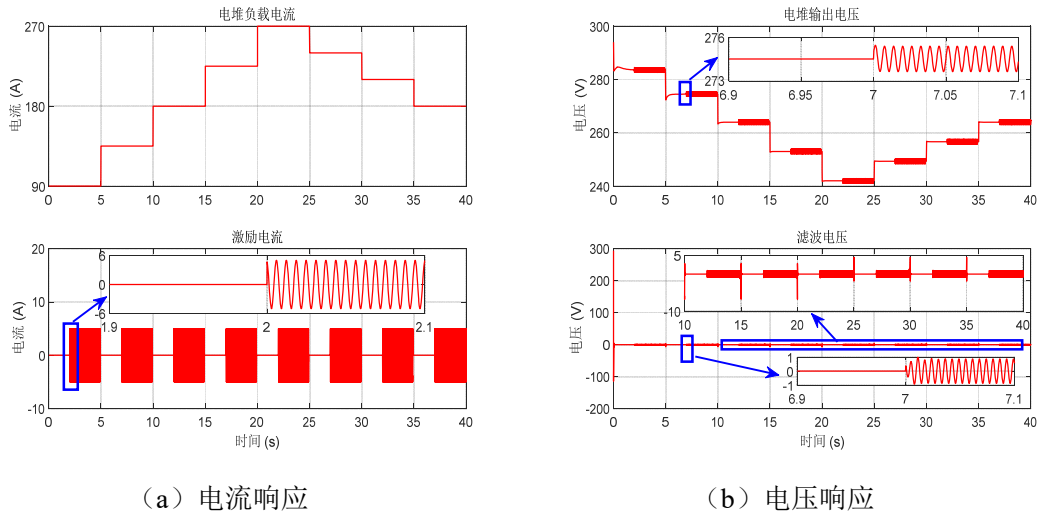
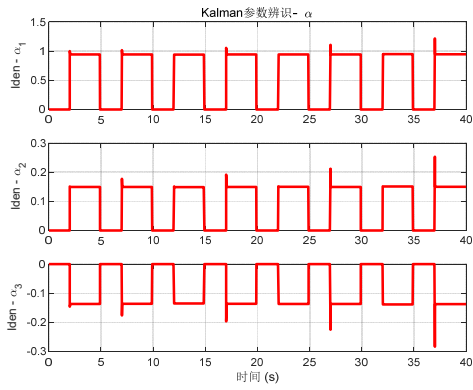


图 4.9 工况三：燃料电池电流、电压响应

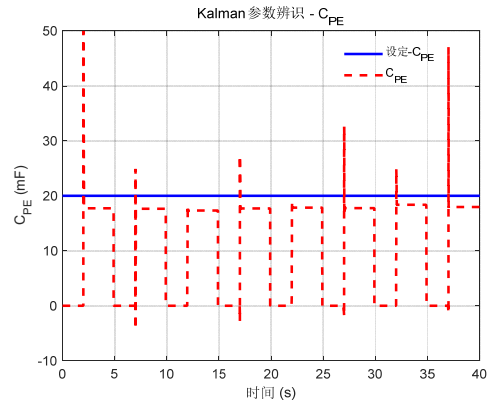
在不考虑系统中存在测量噪声的情况下，固定燃料电池系统的负载电流以保证输出稳定，通过改变外加激励电流的频率，进行第一种工况下的方案验证。此时，将外接激励电源设计成产生正弦电流信号的交流电流源，其幅值设定为  $\pm 5\text{ A}$ ，相应频率随着时间从  $600\text{ Hz}$  变化到  $1000\text{ Hz}$ ，频率随时间的变化形式如表 4.1 所示。

对应的燃料电池电堆的电流电压响应如图 4.4 所示，其中，图 4.4 (a) 代表着对系统设定的负载电流和激励电流曲线，在方案验证时将负载电流设定为  $90\text{ A}$ 。图中展示了对系统添加的激励电流波形，鉴于在燃料电池刚启动时，其电流电压响应有着较大的波动，所以前  $2\text{ s}$  时不对燃料电池系统添加激励。图中放大展示了第  $2\text{ s}$  和第  $10\text{ s}$  时的激励电流波形，这两个时间点外加激励电流频率从  $0 \sim 600\text{ Hz}$  和  $900 \sim 1000\text{ Hz}$  的变化。在图 4.4 (b) 中绘制了电堆输出电压曲线和经滤波变换后的电压曲线。从输出电压的变化可以看出，系统刚启动时，电压会有一定波动才开始稳定输出，在第  $2\text{ s}$  后开始进行激励电流的注入，在输出电压上叠加了相应的响应信号；滤波电压是对输出电压信号进行高通滤波后获取到的交流电压信号，其可以等效为电堆对激励信号产生的响应信号。在进行高通滤波时，信号会逐渐收敛至稳定输出，图中放大展示了第  $2\text{ s}$  和第  $10\text{ s}$  发生频率变化时的电压响应情况。

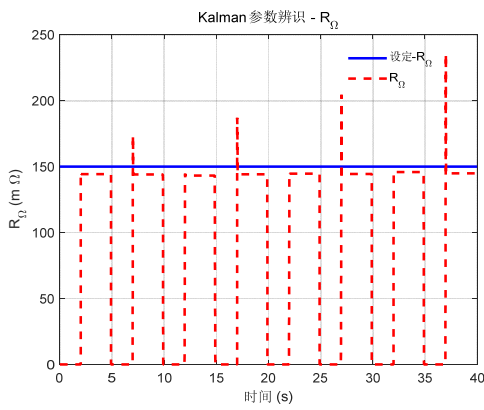
经 Kalman 滤波算法辨识出的结果如图 4.5 所示。其中，图 4.5 (a) 表示待辨识参数矩阵，图 4.5 (b) 表示对电路未知参数的辨识结果。考虑到系统稳定输出的响应时间和高通滤波器稳定输出的时间，选定在  $2\text{ s}$  后开始进行参数辨识，从图 4.5 (a) 中可以看出，在激励频率发生变化时，辨识参数会有波动，但是很快便可以收敛至稳定。依据对未知状态的辨识值可以反推出电路的未知参数，其结果如图 4.5 (b) 所示。图中蓝色实线对应着设定值，红色虚线对应着辨识结果，且将表 3.1 中设定的单位转化为了毫欧和毫法。在激励频率发生变化时，会发生辨识结果的跳变，但是很快便可以收敛且贴近设定值，对  $R_{\Omega}$  和  $R_c$  的辨识精度可达  $5\text{ 毫欧}$ ，对  $C_{PE}$  的辨识精度可达  $2\text{ 毫法}$ 。将对 Randles 电路中未知参数的设定值和辨识值转化为 EIS，其结果如图 4.6 所示，图中 EIS 曲线从左至右对应着激励频率的减小。



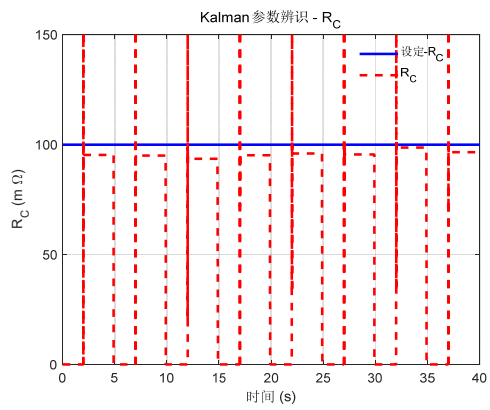
(a) 状态矩阵辨识



(b)  $C_{PE}$  辨识结果



(c)  $R_{\Omega}$  辨识结果



(d)  $R_C$  辨识结果

图 4.10 工况三: Kalman 滤波参数辨识

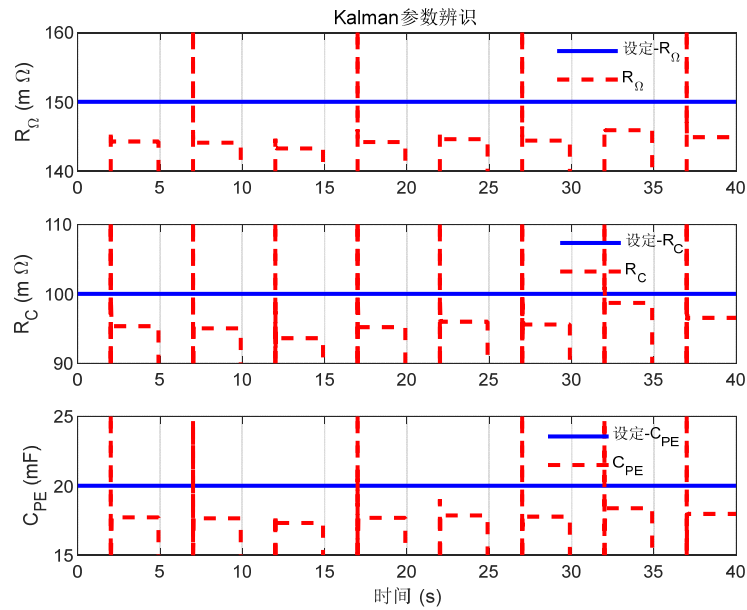


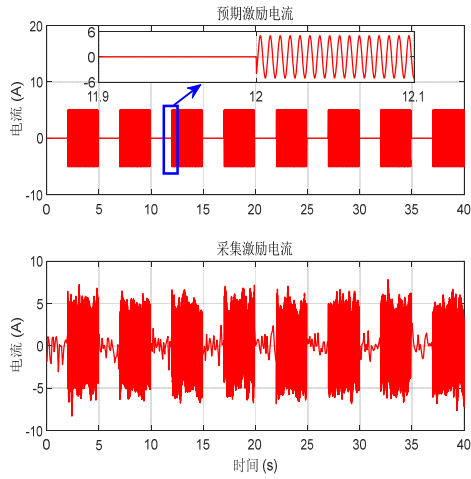
图 4.11 工况三: 电路参数辨识结果

第二种工况中考虑了含有测量噪声的情况，此时系统负载电流设定为 90 A，在信号采样时叠加频率为 50 Hz 的高斯白噪声。第二种工况条件下的电流电压响应如图 4.7 所示，其中图 4.7 (a)表示对系统添加的激励电流和叠加测量噪声后采集到的激励电流波形，图 4.7 (b)表示采样得到的电堆输出电压和经滤波后的输出电压，从图中可以看出较工况一而言，系统中叠加了明显的测量噪声。基于含有噪声的信号，进行状态空间方程中未知状态变量和电路未知参数的辨识，其辨识结果如图 4.8 所示。其中，图 4.8 (a) 表示待辨识参数矩阵，图 4.8 (b)表示对 Randles 电路未知参数的辨识结果。待电堆处于稳定工作状态后进行未知状态变量的辨识，此时设定为从 2 s 之后进行辨识，在激励信号发生频率变化时，辨识参数会发生抖动，但是很快便可以收敛至稳定。依据对未知状态变量的辨识，反推求解 Randles 电路的未知参数，图 4.8 (b)中，蓝色实线为设定值，红色虚线为辨识值，相应单位为毫欧和毫法，从图中可以看出，对  $R_{\Omega}$  和  $R_c$  的辨识精度可达 5 毫欧，对  $C_{PE}$  的辨识精度可达 2 毫法。此时较图 3.8 中的辨识结果而言，经 Kalman 滤波算法辨识出的电路参数数值更为稳定，受噪声的影响更小。

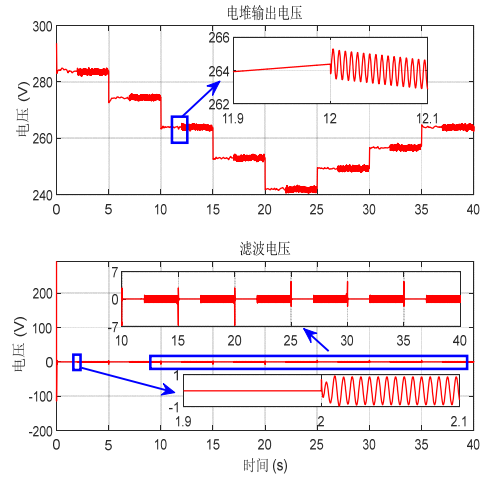
表 4.2 负载电流变化波形

时间 [s]	电流幅值 [A]
0~5	90
5~10	135
10~15	180
15~20	225
20~25	270
25~30	240
30~35	210
35~40	180

第三种实验工况中，在无噪声条件下固定外加激励信号的频率为 1000 Hz，使负载电流呈阶跃变化，负载电流变化如表 4.2 所示，该条件下的燃料电池电压、电流响应如图 4.9 所示。其中，图 4.9 (a)代表着对系统设定的负载电流和添加的激励电流曲线，图 4.9 (b)代表着电堆输出电压曲线和经滤波变换后的电压曲线。从图中可以看出，电堆的负载电流依据着表 4.2 所设置的逻辑进行阶跃式

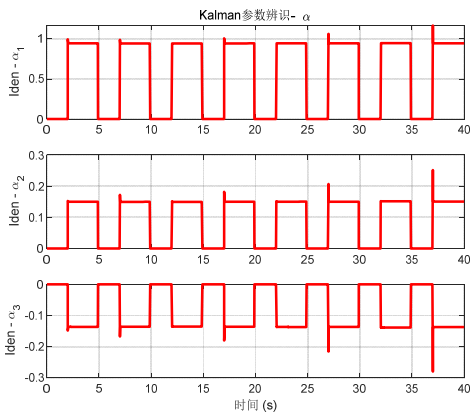


(a) 电流响应

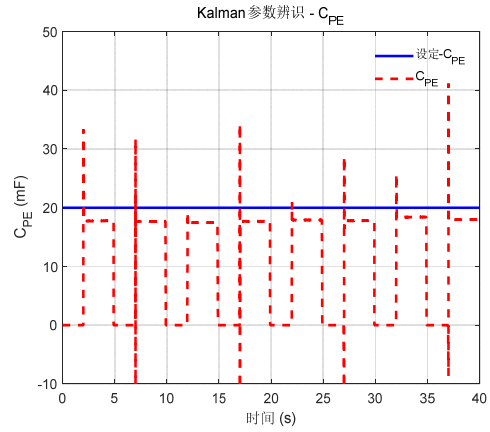


(b) 电压响应

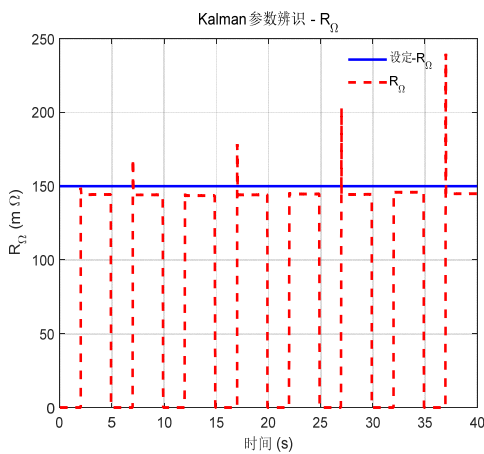
图 4.12 工况四：燃料电池电流、电压响应



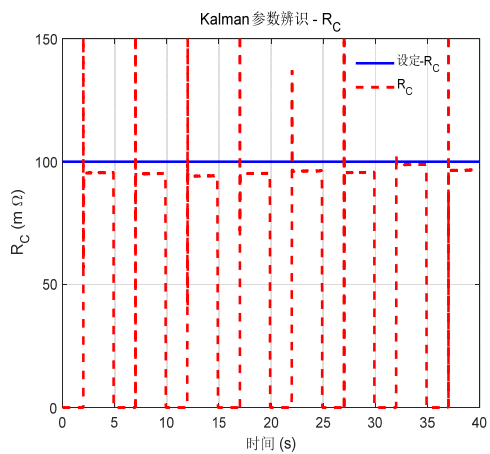
(a) 状态矩阵辨识



(b)  $C_{PE}$  辨识结果



(c)  $R_{\Omega}$  辨识结果



(d)  $R_C$  辨识结果

图 4.13 工况四：Kalman 滤波参数辨识



变换,在负载电流进行阶跃变化时,电堆的输出电压也会有相应的阶跃式变化,但是输出电压进行阶跃变化时,需要一个调节时间才能保持输出电压稳定。依据滤波电压曲线图可以得到,输出电压阶跃变化会对滤波电压造成影响,使得滤波电压造成突变,此处是由于高通滤波器对突变低频电压进行滤除所造成的。此时发生的滤波电压突变会对辨识结果造成影响,且在实际工程应用中也不需要功率变化时进行阻抗的测量。因此,将对系统的激励电流设置成 4.9 (a)中的形式,在系统发生负载电流改变时,不注入激励电流,待电堆输出电压稳定时,再次对电堆添加激励电流进行阻抗测量,图中放大展示了在 2 s 附近的激励电流变化形式。然后依据 Kalman 滤波算法进行未知状态变量的辨识,辨识结果如图 4.10 所示。其中,图 4.10 (a)代表着辨识出的未知状态变量,图 4.10 (b)、图 4.10 (c) 和图 4.10 (d)代表着对未知电路参数  $C_{PE}$ 、 $R_{\Omega}$  和  $R_c$  的辨识结果。在没有激励电流注入时,对应的辨识结果均为零,待燃料电池系统输出稳定后进行未知参数的辨识,从图中可以看出,在进行参数辨识的初始阶段,会有突变的较大波动,此时是由于 Kalman 滤波算法初始迭代参数过少的原因,之后很快就可以稳定输出。将对未知电路参数的辨识结果部分放大展示如图 4.11 所示,此时,对  $R_{\Omega}$  和  $R_c$  的辨识精度可达 5 毫欧,对  $C_{PE}$  的辨识精度可达 2 毫法。

第四种实验工况在第三种工况的条件下引入了测量噪声,假设引入的测量噪声为高斯白噪声、频率为 50 Hz。在有测量噪声的情况下燃料电池电压、电流响应如图 4.12 所示。其中,图 4.12 (a)代表着对系统设定的激励电流和采集到有噪声的激励电流曲线,图 4.12 (b)代表着电堆输出电压曲线和经滤波变换后的电压曲线,图中可以明显看出信号受到噪声影响。对含有噪声的信号进行参数辨识,经 Kalman 算法辨识结果如图 4.13 所示。其中,图 4.13 (a)代表着辨识出的未知状态变量,图 4.13 (b)、图 4.13 (c) 和图 4.13 (d)代表着对未知电路参数  $C_{PE}$ 、 $R_{\Omega}$  和  $R_c$  的辨识结果。在无激励电流注入的情况下,将所有辨识结果都置为零,从图中可以看出对电路中未知参数的辨识结果较为稳定,可以较好贴合设定值。将电路参数辨识结果部分放大展示如图 4.14 所示,对  $R_{\Omega}$  和  $R_c$  的辨识精度可达 5 毫欧,对  $C_{PE}$  的辨识精度可达 2 毫法。此时的辨识效果较图 3.12 的结果而言,对噪声有着更好的滤除效果,辨识结果更稳定。

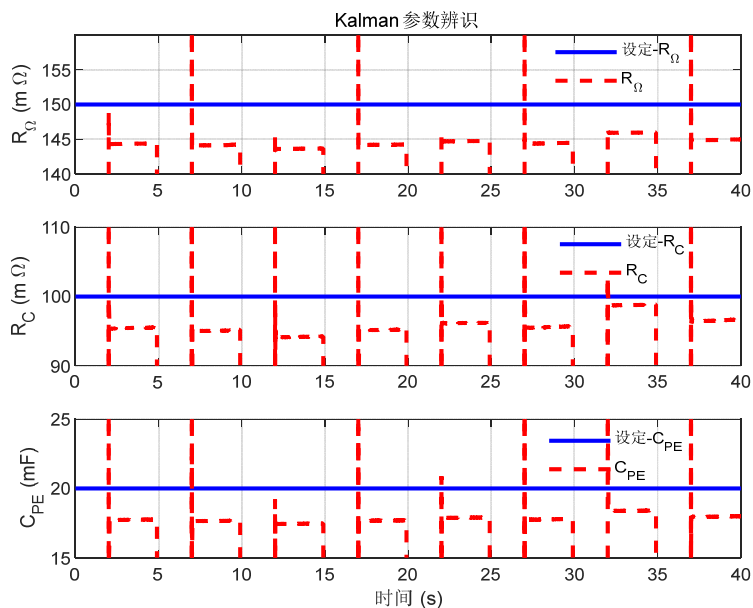


图 4.14 工况四：电路参数辨识结果

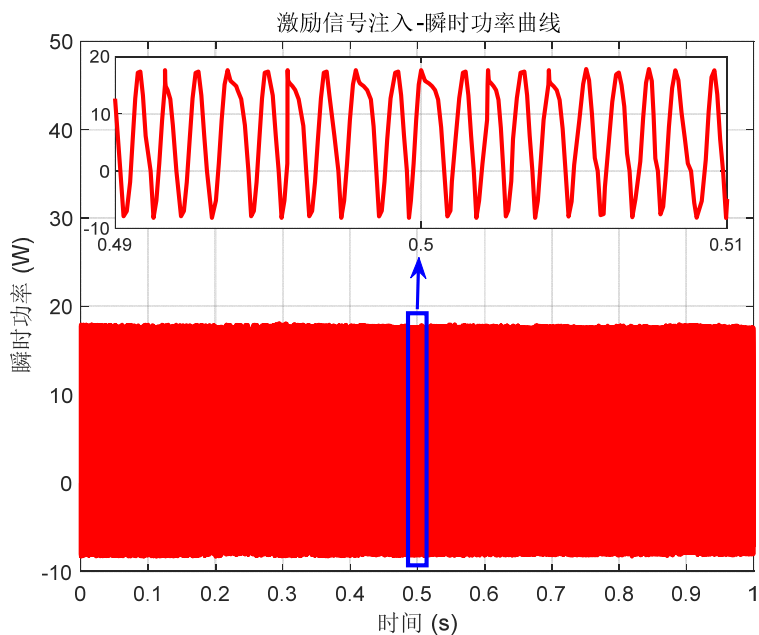


图 4.15 激励信号注入瞬时功率

#### 4.5.2 激励信号注入功率分析

在基于激励信号注入的阻抗测量方案中，激励信号由理想电流源生成，可以通过电源的输出电流和电压进行瞬时消耗功率的计算。令激励电流与第三章功率分析中的设定值保持一致，将输出电流设置为幅值 $\pm 5\text{ A}$ 、频率 $500\text{ Hz}$ 的正弦信号，通过电流源电流和电压的采样数据进行消耗功率计算。

在系统处于稳态响应时，理想电源在 1 s 内的瞬时功率如图 4.15 所示，图中放大展示了在 0.5 s 处的瞬时功率，由于激励电流呈正弦波动，因而消耗功率也呈现出波动状态，此时，依据式（3-25）和图 4.15 中的瞬时功率数据，可以得到激励信号注入方案的平均消耗功率，外加的激励电流源较 DC-DC 变换器而言，可以实现能量的回收利用。当瞬时消耗功率为正时，激励电流源消耗能量；当瞬时功率为负时，电流源吸收多余能源，因此外加激励电源的测量方案通过对周期内的瞬时功率积分求解平均消耗功率即可。经计算，基于激励信号注入的阻抗测量方案的平均消耗功率为 4.883 W。

## 4.6 本章小结

在本章中介绍了一种基于激励信号注入的燃料电池在线阻抗测量方案，在燃料电池产电系统外，对电堆单独添加一个产生激励信号的交流电流源，以实现电堆激励的添加。首先，针对激励信号注入的测量方案，设计了阻抗测量电路，将燃料电池电堆描述为理想电压源和 Randles 电路串联的形式，进一步将阻抗测量电路描述状态空间方程形式，通过对 Randles 电路中的未知参数辨识，实现燃料电池电堆的阻抗测量。其次，通过 Kalman 滤波算法对状态空间方程中的未知状态矩阵进行辨识，并分别考虑了固定负载电流调节注入的激励电流频率和固定激励电流频率调节负载电流两种情况下对电路未知参数辨识的影响。经验证，无论是否考虑测量噪声，本方案对电路未知参数的辨识精度均能达到 5 毫欧和 2 毫法。并且，在含有测量噪声的条件下，本章所提出的测量方案具有更好的噪声滤除效果，辨识参数的数值更稳定。最后，进行了激励信号源瞬时和平均消耗功率的计算，在添加幅值 5 A、频率 500 Hz 的正弦扰动时，瞬时消耗功率约在 -10 ~ 20 W 之间变化，1 秒内的平均消耗功率约为 4.883 W，故本章中提出的测量方案适宜用于对噪声和功耗较为敏感的燃料电池阻抗测量场景中。



## 第五章 全文总结与展望

### 5.1 全文总结

近年来,燃料电池的相关技术不断发展完善,同时在发电和交通领域得到广泛应用和推广,相应的检测技术研究伴随着其技术的提升而发展。本文中针对质子交换膜燃料电池的阻抗测量进行研究,提出了两种基于参数辨识的阻抗测量方案,通过仿真验证提出方案的有效性,将主要研究内容总结如下:

1.根据质子交换膜燃料电池工作原理,建立了 PEMFC 电堆电压模型,将电堆的活化损耗、欧姆损耗和浓差损耗补偿到燃料电池的开路电压中,以此作为燃料电池的终端输出电压。同时对 PEMFC 系统中的 DC-DC 变换器进行数学建模,通过 Boost 升压电路实现 DC-DC 变换器的升高电压功能。对 Boost 升压电路的占空比调节,实现对电堆输出电流添加交流扰动的功能。依据电堆电压和 DC-DC 变换器的模型,在 Simulink 仿真环境中建立了基于数学模型的燃料电池电堆阻抗测量仿真测试平台,后续将通过仿真测试平台进行阻抗在线测量方案的验证工作。

2.设计基于负载扰动的燃料电池阻抗测量方案,通过对 DC-DC 变换器的输入电流调节实现对燃料电池电堆的激励添加。通过 Randles 电路对燃料电池的电化学反应进行描述,实现对燃料电池电堆阻抗的建模,将阻抗测量转化为对 Randles 电路中的未知参数辨识。其次,对该方案的测量电路进行介绍,建立了面向参数辨识的电路模型,设计基于递归最小二乘法的参数辨识方案,通过对测量电路模型中未知参数的辨识推导出燃料电池阻抗。之后,在基于数学模型的燃料电池阻抗测量仿真测试平台上分为四种工况进行验证,结果表明:如果测量中不含噪声,对参数的辨识精度分别可达 3 毫欧和 1 毫法;如果在测量中叠加噪声,测量精度可达 5 毫欧和 2 毫法。最后,进行了添加激励信号所需的瞬时和平均消耗功率计算,在添加幅值 5 A、频率 500 Hz 的正弦扰动时,瞬时消耗功率约在-600 ~ 600 W 之间变化,受 DC-DC 变换器不能进行能量回收特性所限,导致该方案的平均消耗功率约为 183.9 W。

3.为改进上述测量方案在噪声抑制和瞬时消耗功率波动过大的问题,设计一种基于激励信号注入的在线阻抗测量方案,在燃料电池系统外部添加一个交

流电源，将其产生的交流信号作为对电堆的激励。首先，针对外加激励式阻抗测量方案进行测量电路设计，同时建立面向参数辨识的模型。其次，介绍一种基于卡尔曼滤波理论的参数辨识方案。通过对状态空间方程中未知状态矩阵进行辨识，反推出 Randles 电路的未知参数，实现阻抗的在线测量。之后，在燃料电池阻抗测量仿真平台上进行方案验证。结果表明：无论是否考虑测量噪声，该方案对电路未知参数的辨识精度均能达到 5 毫欧和 2 毫法，且在含有测量噪声的条件下，本章所提出的测量方案具有更好的噪声滤除效果。最后，进行所添加信号源瞬时和平均消耗功率的计算，在添加幅值 5 A、频率 500 Hz 的正弦扰动电流时，瞬时消耗功率约在 -10 ~ 20 W 之间变化，其平均消耗功率约为 4.883 W。

综合对比基于负载扰动和激励信号注入两种在线阻抗测量方案，基于负载扰动的测量方案可以集成在燃料电池 DC-DC 变换器中，不需要额外添加测量设备，且具有测量精度高的优势。但是，基于负载扰动的测量方案通过对燃料电池系统的负载电流进行调节以产生激励信号，这样会改变燃料电池的稳定工作点；在混入测量噪声的情况下，该方案的辨识结果存在较大抖动，受噪声影响较为严重，且瞬时消耗功率的变化范围过大、平均消耗功率较高，所以该方案适宜用于对瞬时输出功率精度不高或对测量精度严苛的场景中。较负载扰动的测量方案而言，激励信号注入的方案有着更低的瞬时和平均消耗功率，且对测量噪声有着较好的抑制作用，辨识结果更稳定，但是测量精度稍逊色于基于负载扰动的测量方案，故该测量方案适宜用于对噪声和功耗较为敏感的燃料电池阻抗测量场景中。

## 5.2 研究展望

本文中针对 PEMFC 电堆的阻抗测量提出了两种基于参数辨识的阻抗测量方案，且在仿真测试平台上进行验证，但是仍存在一些未解决的问题，需进行下一步研究：

1. 本文中所提出的阻抗测量方案，只进行了仿真验证，而未在实验平台上进行验证，因此，下一步研究应针对测量方案设计出相应阻抗测量装置，应用于实验平台。

2. 在基于激励信号注入的在线阻抗测量方案设计中，直接对系统添加了理想交流电流源作为激励信号的产生装置。但是，在实际应用中，需要对理想电源进行设计，同时对其添加一定的保护功能，防止燃料电池输出的高压直流电对电流源产生损坏。因此，下一步的研究工作将着重于对激励信号源的设计。





## 参考文献

- [1] California Fuel Cell Partnership. A california road MAP: the commercialization of hydrogen fuel cell vehicles[EB/OL]. (2012).  
<https://cafcp.org/sites/default/files/A%20California%20Road%20MAP%20June%202012%20%28CaFCP%20technical%20version%29.pdf>.
- [2] U.S. DRIVE ( Driving Research and Innovation for Vehicle efficiency and Energy sustainability). Fuel cell technical team roadMAP[EB/OL]. (2013).  
<https://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/program/usdrivepartnershipplanmar2013.pdf>.
- [3] E4tech and Element Energy. Hydrogen and fuel cells: opportunities for growth: a roadMAP for the UK[EB/OL]. (2016).  
<http://www.e4tech.com/wp-content/uploads/2016/11/UKHFC-RoadMAP-Final-Main-Report-171116.pdf>.
- [4] International Energy Agency. Technology roadMAP: Hydrogen and fuel cells [EB/OL]. (2015).  
<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadMAPHydrogenandFuelCells.pdf>.
- [5] Sharaf O Z, Orhan M F. An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2014, 32: 810-853.
- [6] Burger M, Capasso V. Mathematical modelling and simulation of non-isothermal crystallization of polymers[J]. Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, 2001, 11(06): 1029-1053.
- [7] Das V, Padmanaban S, Venkitusamy K, et al. Recent advances and challenges of fuel cell based power system architectures and control—A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 73: 10-18.
- [8] Daud W R W, Rosli R E, Majlan E H, et al. PEM fuel cell system control: A review[J]. Renewable Energy, 2017, 113: 620-638.
- [9] 戴海峰, 袁浩, 鱼乐, 魏学哲. 质子交换膜燃料电池建模研究评述[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(06): 880-889.
- [10] Sone Y, Ekdunge P, Simonsson D. Proton conductivity of Nafion 117 as measured by a four - electrode AC impedance method[J]. Journal of the Electrochemical

- Society, 1996, 143(4): 1254.
- [11] Hwang J J. Effect of hydrogen delivery schemes on fuel cell efficiency[J]. Journal of Power Sources, 2013, 239: 54-63.
  - [12] Jayakumar A, Sethu S P, Ramos M, et al. A technical review on gas diffusion, mechanism and medium of PEM fuel cell[J]. Ionics, 2015, 21: 1-18.
  - [13] Kim B, Chang I S, Dinsdale R M, et al. Accurate measurement of internal resistance in microbial fuel cells by improved scanning electrochemical impedance spectroscopy[J]. Electrochimica Acta, 2021, 366: 137388.
  - [14] Pukrushpan J T. Modeling and control of fuel cell systems and fuel processors[M]. University of Michigan, 2003.
  - [15] Suh K W. Modeling, analysis and control of fuel cell hybrid power systems[M]. University of Michigan, 2006.
  - [16] Ma Y, Zhang F, Gao J, et al. Oxygen excess ratio control of PEM fuel cells using observer-based nonlinear triple-step controller[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(54): 29705-29717.
  - [17] Li M, Yin H, Ding T, et al. Air flow rate and pressure control approach for the air supply subsystems in PEMFCs[J]. ISA transactions, 2022, 128: 624-634.
  - [18] Li X A, Sun K, Guo C, et al. Hybrid adaptive disturbance rejection control for inflatable robotic arms[J]. ISA transactions, 2022, 126: 617-628.
  - [19] Li J, Xia Y, Qi X, et al. Robust absolute stability analysis for interval nonlinear active disturbance rejection based control system[J]. ISA transactions, 2017, 69: 122-130.
  - [20] 高金武, 王义琳, 刘华洋, 王艺达. 基于滑模观测器的质子交换膜燃料电池阴极进气系统解耦控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(09): 2156-2167.
  - [21] McConnell V P. Downsized footprint and material changes for GM's fourth-generation fuel cell technology[J]. Fuel Cells Bulletin, 2007, 2007(1): 12-15.
  - [22] Weiß A, Schindler S, Galbiati S, et al. Distribution of relaxation times analysis of high-temperature PEM fuel cell impedance spectra[J]. Electrochimica Acta, 2017, 230: 391-398.
  - [23] Heinzmann M, Weber A, Ivers-Tiffée E. Advanced impedance study of polymer electrolyte membrane single cells by means of distribution of relaxation times[J]. Journal of Power Sources, 2018, 402: 24-33.

- [24] Vetter R, Schumacher J O. Free open reference implementation of a two-phase PEM fuel cell model[J]. Computer Physics Communications, 2019, 234: 223-234.
- [25] Xing L, Liu X, Alaje T, et al. A two-phase flow and non-isothermal agglomerate model for a proton exchange membrane (PEM) fuel cell[J]. Energy, 2014, 73: 618-634.
- [26] Wu H, Li X, Berg P. On the modeling of water transport in polymer electrolyte membrane fuel cells[J]. Electrochimica Acta, 2009, 54(27): 6913-6927.
- [27] Chaudhary S, Sachan V K, Bhattacharya P K. Two dimensional modelling of water uptake in proton exchange membrane fuel cell[J]. international journal of hydrogen energy, 2014, 39(31): 17802-17818.
- [28] Kalantari H. Numerical analysis of water distribution in the various layers of proton exchange membrane fuel cells[J]. Computers & Chemical Engineering, 2018, 118: 14-24.
- [29] Pivac I, Barbir F. Inductive phenomena at low frequencies in impedance spectra of proton exchange membrane fuel cells—A review[J]. Journal of Power Sources, 2016, 326: 112-119.
- [30] Yuan X Z, Li H, Yu Y, et al. Diagnosis of contamination introduced by ammonia at the cathode in a polymer electrolyte membrane fuel cell[J]. international journal of hydrogen energy, 2012, 37(17): 12464-12473.
- [31] Klotz D, Weber A, Ivers-Tiffée E. Practical guidelines for reliable electrochemical characterization of solid oxide fuel cells[J]. Electrochimica Acta, 2017, 227: 110-126.
- [32] Wang H, Gaillard A, Hissel D. Online electrochemical impedance spectroscopy detection integrated with step-up converter for fuel cell electric vehicle[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(2): 1110-1121.
- [33] Wang H, Gaillard A, Hissel D. A review of DC/DC converter-based electrochemical impedance spectroscopy for fuel cell electric vehicles[J]. Renewable Energy, 2019, 141: 124-138.
- [34] Yuan H, Dai H, Wei X, et al. Internal polarization process revelation of electrochemical impedance spectroscopy of proton exchange membrane fuel cell by an impedance dimension model and distribution of relaxation times[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 418: 129358.

- [35] Futter G A, Gazdzicki P, Friedrich K A, et al. Physical modeling of polymer-electrolyte membrane fuel cells: Understanding water management and impedance spectra[J]. *Journal of Power Sources*, 2018, 391: 148-161.
- [36] Cooper K R, Smith M. Electrical test methods for on-line fuel cell ohmic resistance measurement[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 160(2): 1088-1095.
- [37] Niya S M R, Hoorfar M. Study of proton exchange membrane fuel cells using electrochemical impedance spectroscopy technique—A review[J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 240: 281-293.
- [38] Lu H, Chen J, Yan C, et al. On-line fault diagnosis for proton exchange membrane fuel cells based on a fast electrochemical impedance spectroscopy measurement[J]. *Journal of Power Sources*, 2019, 430: 233-243.
- [39] Zhiani M, Majidi S, Silva V B, et al. Comparison of the performance and EIS (electrochemical impedance spectroscopy) response of an activated PEMFC (proton exchange membrane fuel cell) under low and high thermal and pressure stresses[J]. *Energy*, 2016, 97: 560-567.
- [40] Darowicki K, Janicka E, Mielniczek M, et al. The influence of dynamic load changes on temporary impedance in hydrogen fuel cells, selection and validation of the electrical equivalent circuit[J]. *Applied Energy*, 2019, 251: 113396.
- [41] Aroge F A, Barendse P S. Signal injection by active load modulation for pem fuel cell diagnostics[C]//2018 IEEE PES/IAS PowerAfrica. IEEE, 2018: 7-12.
- [42] Huang W, Qahouq J A A. An online battery impedance measurement method using DC-DC power converter control[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(11): 5987-5995.
- [43] Aroge F A, Barendse P S, Chamier J. Multi-Frequency Signal Synthesis for Accurate Fuel Cell Impedance Estimation[C]//2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). IEEE, 2019: 934-939.
- [44] Wei X, Wang X, Dai H. Practical on-board measurement of lithium ion battery impedance based on distributed voltage and current sampling[J]. *Energies*, 2018, 11(1): 64.
- [45] 杨鑫荣. 燃料电池内阻测试仿真研究及硬件设计[D]. 大连理工大学, 2021.
- [46] Long R, Chen W, Zhang L, et al. A fuel cell EIS measurement method based on the model predictive control strategy[C]//2017 29th Chinese Control And

- Decision Conference (CCDC). IEEE, 2017: 1878-1882.
- [47] Caponetto R, Matera F, Murgano E, et al. Fuel cell fractional-order model via electrochemical impedance spectroscopy[J]. *Fractal and Fractional*, 2021, 5(1): 21.
- [48] Shi J, Xue X. Mechanistic model based multi-impedance curve-fitting approach for solid oxide fuel cells[J]. *Journal of electroanalytical chemistry*, 2011, 661(1): 150-156.
- [49] Yahia M S B, Allagui H, Arafet Bouaicha A M. Fuel Cell Impedance Model Parameters Optimization using a Genetic Algorithm[J]. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 2017, 7(1): 196-205.
- [50] Ma T, Zhang Z, Lin W, et al. Impedance prediction model based on convolutional neural networks methodology for proton exchange membrane fuel cell[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(35): 18534-18545.
- [51] Pan R, Yang D, Wang Y, et al. Health degradation assessment of proton exchange membrane fuel cell based on an analytical equivalent circuit model[J]. *Energy*, 2020, 207: 118185.
- [52] Dhirde A M, Dale N V, Salehfar H, et al. Equivalent electric circuit modeling and performance analysis of a PEM fuel cell stack using impedance spectroscopy[J]. *IEEE transactions on energy conversion*, 2010, 25(3): 778-786.
- [53] Bouaicha A, Allagui H, Aglzim E H, et al. Validation of a methodology for determining the PEM fuel cell complex impedance modelling parameters[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(17): 12738-12748.
- [54] Baricci A, Mereu R, Messaggi M, et al. Application of computational fluid dynamics to the analysis of geometrical features in PEM fuel cells flow fields with the aid of impedance spectroscopy[J]. *Applied Energy*, 2017, 205: 670-682.
- [55] Du R, Wang X, Dai H, et al. Online impedance spectrum measurement of fuel cells based on Morlet wavelet transform[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(47): 24339-24352.
- [56] Niya S M R, Phillips R K, Hoorfar M. Study of anode and cathode starvation effects on the impedance characteristics of proton exchange membrane fuel cells[J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2016, 775: 273-279.

- [57] Kitamura N, Manabe K, Nonobe Y, et al. Development of water content control system for fuel cell hybrid vehicles based on AC impedance[R]. SAE Technical Paper, 2010.
- [58] 栾翔宇. 基于 DC/DC 电流扰动的燃料电池交流阻抗测量技术研究[D]. 电子科技大学, 2021.
- [59] Ren P, Pei P, Li Y, et al. Diagnosis of water failures in proton exchange membrane fuel cell with zero-phase ohmic resistance and fixed-low-frequency impedance[J]. *Applied Energy*, 2019, 239: 785-792.
- [60] Tang Z, Huang Q A, Wang Y J, et al. Recent progress in the use of electrochemical impedance spectroscopy for the measurement, monitoring, diagnosis and optimization of proton exchange membrane fuel cell performance[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 468: 228361.
- [61] Meyer Q, Zeng Y, Zhao C. Electrochemical impedance spectroscopy of catalyst and carbon degradations in proton exchange membrane fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2019, 437: 226922.
- [62] Li W, Huang Q A, Yang C, et al. A fast measurement of Warburg-like impedance spectra with Morlet wavelet transform for electrochemical energy devices[J]. *Electrochimica Acta*, 2019, 322: 134760.
- [63] 王志贤. 最优状态估计与系统辨识[M]. 西北工业大学出版社, 2004.
- [64] Dierickx S, Weber A, Ivers-Tiffée E. How the distribution of relaxation times enhances complex equivalent circuit models for fuel cells[J]. *Electrochimica Acta*, 2020, 355: 136764.
- [65] Beccuti A G, Mariéthoz S, Cliquennois S, et al. Explicit model predictive control of DC–DC switched-mode power supplies with extended Kalman filtering[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(6): 1864-1874.
- [66] Gomadam P M, Weidner J W. Analysis of electrochemical impedance spectroscopy in proton exchange membrane fuel cells[J]. *International Journal of Energy Research*, 2005, 29(12): 1133-1151.

## 攻读硕士学位期间的研究成果

作者简介：

王义琳，男，汉族，1997年12月出生于吉林省长春市。2020年6月毕业于延边大学工学院电子信息工程专业，获工学学士学位。2020年9月至今，攻读吉林大学通信工程学院控制科学与工程专业硕士研究生，主要研究方向为燃料电池进气系统控制和阻抗测量。

攻读硕士学位期间参与的科研项目：

[1] 燃料电池发动机集成与控制关键技术开发，吉林省智能制造重大科技专项，项目编号：20200501010GX。

[2] 低温环境下燃料电池混合动力乘用车能量-热量协同优化控制方法，国家自然科学基金区域创新发展联合基金，项目编号：U21A20166。

攻读硕士学位期间发表的论文：

[1] 高金武, 王义琳, 刘华洋, 王艺达. 基于滑模观测器的质子交换膜燃料电池阴极进气系统解耦控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(09): 2156-2167. (除导师外第一作者)

攻读硕士学位期间发表的专利：

[1] 高金武, 王义琳, 胡云峰, 陈虹, 尹海. 一种燃料电池组在线阻抗测量装置: CN114594383A [P]. 2022-06-07. (除导师外第一发明人, 已公开)

[2] 高金武, 王义琳, 尹海, 胡云峰, 陈虹. 燃料电池组电流、电压和阻抗测量装置: CN112838248A [P]. 2021-05-25. (除导师外第一发明人, 已公开)





## 致谢

时光荏苒、岁月如梭，转眼间，三年的硕士研究生学习生涯即将落下帷幕。回首往昔点滴，记忆犹新，往事历历在目，感慨万千。感谢一路走来陪在我身边的老师、同学、朋友和家人，因为有你们的加油和鼓励，才让我充满信心和斗志，以乐观向上的心态去迎接困难和挑战。

饮其流者怀其源，学其成时念吾师。特别感谢我的导师高金武先生，他严谨的治学态度、勤奋的敬业精神、对科研的不倦追求、对学术的倾心探索是我学习的楷模，更是我坚持、努力的动力。感谢老师三年来的教导，获益匪浅，我心怀感恩之情，师恩款款，春风化雨，宛若灯塔指引了我漫漫修远的道路和人生求索的方向，惟愿老师身体健康、万事顺遂，祝愿课题组日益壮大！

岁月虽清浅，时光亦潋滟。感谢课题组师兄侯圣彦、魏子凯、张宇、李凯、刘华洋、徐志尧，师姐林润滋，同僚王向阳、刘欣，师弟陈林、孙少龙、贾志桓、李昕放、刘轩、孙安博、杨凯添、刘进发、高明泽、秦亚朝的包容与支持。感谢基础楼 518 的诸位伙伴，室友王嘉琪、胡柄宇、申士杰、易子琦，好友徐基翔、梁宸、全圣旭、卢圣哲让我的研究生生活多姿多彩，充满欢声笑语。

家人常伴，灯火可亲。感谢爸爸、妈妈和奶奶在我求学之路无条件的支持、理解与陪伴，给予我勇往直前、砥砺前行的底气和勇气，父母之爱，四季常青，寸草心难报三春晖，子女情难报父母恩，惟愿家人福寿康宁，平安喜乐！写尽千山，落笔有你。感谢瑶瑶三年来的陪伴，你是冰镇后的可乐，入暮时的微风，漫天的星河。幸天光乍破遇，愿暮雪到白头。

何德何能，所遇之人皆不偏不倚，祝愿所有相遇：天高海阔，万事胜意，历遍山河，觉得人间值得。

一程山水一年华，独愿此去经年，一生坦荡，一生纯善。

2023 年 5 月

于 吉大南岭

