**包头师范学院**

**本科毕业论文**

|  |  |
| --- | --- |
| **题 目：** | **基于模型预测控制方法的燃料电池**  **系统电压控制仿真** |
| **学 号：** | **1914860044** |
| **学生姓名：** | **刘高硕** |
| **学 院：** | **信息科学与技术学院** |
| **专 业：** | **电子信息科学与技术** |
| **班 级：** | **2019级电子班** |
| **指导教师：** | **张为** |

**二 〇 二 三 年 五 月**

摘 要

质子交换膜燃料电池（Proton exchange membrane fuel cells——PEMFC）以氢能作为燃料，具有无污染、高效率、低噪音等优点，已成为当前使用领域最广的一类燃料电池。高效、稳定的控制策略可以极大地提高燃料电池系统的可靠性，稳定的输出电压是评估燃料电池系统作为电源可靠性的关键标准。本研究建立了燃料电池系统模型，并研究了其在不同工况下的性能。在此基础上，提出模型预测控制(MPC)控制，并应用于燃料电池系统中，通过同时调节氢气流量和空气流量将输出电压控制在理想值，解决了多输入单输出控制问题。仿真结果表明，所建立的燃料电池系统模型能够较好地捕捉系统行为。所研制的MPC控制器能有效地控制燃料电池系统的输出电压。MPC控制器具有响应速度快、超调量小等优点。所提到的MPC控制器可以很容易地应用于燃料电池系统的各种控制应用。

关键词：质子交换膜燃料电池；模型预测控制；电压控制

ABSTRACT

Proton exchange membrane fuel cells -- PEMFC take hydrogen energy as fuel, with no pollution, high efficiency, low noise and other advantages, has become the most widely used fuel cells in the current field. Useful and fixed control strategy can excellently improve the reliability of fuel cell system. Stable output voltage is the key standard to evaluate the reliability of fuel cell system as a power source. In this study, a fuel cell system model is established and its performance under different operating conditions is studied. On this basis, model predictive control (MPC) is proposed and applied to fuel cell system. By adjusting hydrogen flow and air flow at the same time, the output voltage is controlled to the ideal value, which solves the problem of multi-input single-output control. The simulation results show that the fuel cell system model can capture the system behavior well. The MPC controller can effectively control the output voltage of the fuel cell system. The MPC controller has the advantages of fast response and small overshoot. The proposed MPC controller can be easily applied to various control applications of fuel cell systems. In recent years, the price of fossil energy such as oil has been increasing, and the shortage of fossil resources has become increasingly prominent. Despite recent discoveries of major reserves, fossil fuels are being rapidly consumed and may not be sufficient to meet future energy needs, creating an energy supply and demand gap in the near future, which in turn threatens the world's energy security. In addition, there is no doubt that fossil fuels pollute the environment, causing acid rain, global warming and climate change.

Key words: proton exchange membrane fuel cell; Model predictive control; Voltage management

**目录**

[1. 绪论 4](#_Toc131874602)

[1.1研究背景和意义 4](#_Toc131874603)

[1.2 国内外研究现状 5](#_Toc131874604)

[1.3 研究内容及方法 6](#_Toc131874605)

[2． 燃料电池系统基础知识 7](#_Toc131874606)

[2.1 燃料电池系统的基本原理 7](#_Toc131874607)

[2.2 燃料电池系统的分类 8](#_Toc131874608)

[2.3 燃料电池系统的构成及工作原理 9](#_Toc131874609)

[2.4 燃料电池系统的数学模型 11](#_Toc131874610)

[3. 基于模型预测方法的燃料电池系统电压控制原理 13](#_Toc131874611)

[3.1 模型预测控制方法的基本结构 13](#_Toc131874612)

[3.2 模型预测控制算法 14](#_Toc131874613)

[3.2.1 滚动优化 15](#_Toc131874614)

[3.2.2 反馈校正 16](#_Toc131874615)

[3.2.3 参考轨迹 17](#_Toc131874616)

[3.3 基于模型预测方法的燃料电池系统电压控制仿真模型 18](#_Toc131874617)

[3.3.1 建立预测模型： 18](#_Toc131874618)

[3.3.2建立控制模型： 18](#_Toc131874619)

[3.3.3建立仿真模型： 18](#_Toc131874620)

[3.3.4进行仿真实验： 18](#_Toc131874621)

[4. 基于MPC的燃料电池系统电压控制仿真结果 19](#_Toc131874622)

[4.1 燃料电池系统电压控制仿真实验设计 19](#_Toc131874623)

[4.2 基于MPC的燃料电池系统电压控制仿真结果分析 22](#_Toc131874624)

[4.3 基于MPC的燃料电池系统电压控制仿真效果评价 25](#_Toc131874625)

[4.3.1分析仿真结果 25](#_Toc131874626)

[4.3.2 优化控制算法 25](#_Toc131874627)

[5. 总结 28](#_Toc131874628)

[参考文献 29](#_Toc131874629)

[致 谢 30](#_Toc131874630)

# 1. 绪论

1.1研究背景和意义

近年来，由于化石能源价格不断上涨、资源短缺问题凸显以及化石燃料污染环境等原因，许多国家和公司开始投入巨资研究和开发新型的可再生替代能源和技术，以应对未来可能出现的能源供需缺口。在这些替代能源和能源转换技术中，氢能和燃料电池被认为是最有前途的绿色清洁能源和能源转换装置，因为它们具有低或零碳排放和环境污染的特点，而且效率比其他替代能源和可再生能源及能源转换技术更高。

燃料电池作为一种新型的清洁能源，在汽车、船舶、飞机等领域被广泛应用。但是，燃料电池系统的控制问题一直是其商业化应用的重要挑战之一。特别是在燃料电池系统电压控制方面，由于燃料电池的输出特性复杂、动态响应快、受多种因素影响，因此难以实现精确的控制。因此，开展燃料电池系统电压控制的研究，对于提高其性能和稳定性以推动其商业化应用具有重要意义。

针对燃料电池系统电压控制问题，现有研究主要集中在PID控制、模型预测控制、滑模控制和自适应控制等方法上。而MPC作为一种先进的控制方法，具有较好的控制精度和鲁棒性，已成为燃料电池系统电压控制的研究重点。通过预测未来状态并在每一时刻进行优化，MPC方法可以实现对燃料电池系统的精确控制。然而，现有研究大多基于仿真模型，缺乏实际验证和应用。因此，需要进一步开展基于MPC方法的燃料电池系统电压控制研究，并通过实验验证其控制效果和优化方法，为燃料电池系统的商业化应用提供有力支持。

因此，本文旨在通过基于MPC方法的燃料电池系统电压控制仿真研究和实验验证，探索和分析MPC方法在燃料电池系统电压控制方面的应用效果和优化方法，为燃料电池系统的控制和优化提供一定的理论和技术支持。1.2 国内外研究现状

由于燃料电池系统的输出特性复杂、动态响应快、受多种因素影响，现有的控制方法在实际应用中存在一定的局限性。因此，开展基于MPC方法的燃料电池系统电压控制研究，具有非常重要的意义和应用价值。

1.2 国内外研究现状

近年来，燃料电池系统电压控制方面的研究已经取得了不少的成果。这些研究主要集中在PID控制、模型预测控制、滑模控制和自适应控制等方法上，并且在国内外都有相关机构和大学进行了深入研究。在美国加州大学伯克利分校等发达国家的研究团队中，他们提出了一系列的控制方法和策略，例如基于滑动模式控制、神经网络控制和模型预测控制等方法。而国内的研究则主要集中在清华大学、中国科学技术大学和中国电力科学研究院等大学和科研机构。MPC方法在控制领域的广泛应用引起了越来越多学者对其在燃料电池系统电压控制方面的应用的关注。在发达国家如美国、德国和日本等的研究者中，已经开始开展基于MPC方法的燃料电池系统电压控制研究并取得了一定的研究成果。

1.3 研究内容及方法

本研究旨在探究基于模型预测控制（MPC）方法的燃料电池系统电压控制策略，并通过仿真和实验验证其有效性和优化方法。具体研究内容如下：

建立燃料电池系统的数学模型：通过对燃料电池系统的物理学原理进行分析，建立燃料电池系统的数学模型，并对模型进行验证和优化。

设计基于MPC方法的燃料电池系统电压控制策略：将MPC方法应用于燃料电池系统电压控制中，利用未来状态的预测和优化方法，实现对燃料电池系统电压的精确控制。

进行仿真实验：基于Matlab/Simulink软件平台，对所设计的燃料电池系统电压控制策略进行仿真实验，分析其控制效果和优化方法。

进行实验验证：在燃料电池实验平台上，对所设计的燃料电池系统电压控制策略进行实验验证，分析其在实际应用中的控制效果和优化方法。

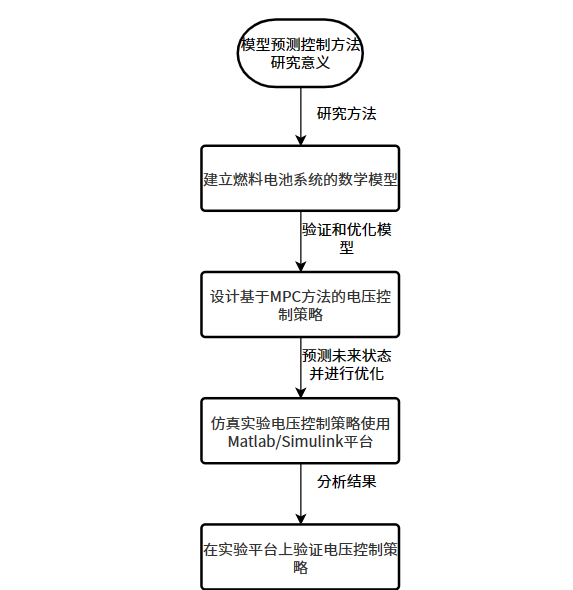
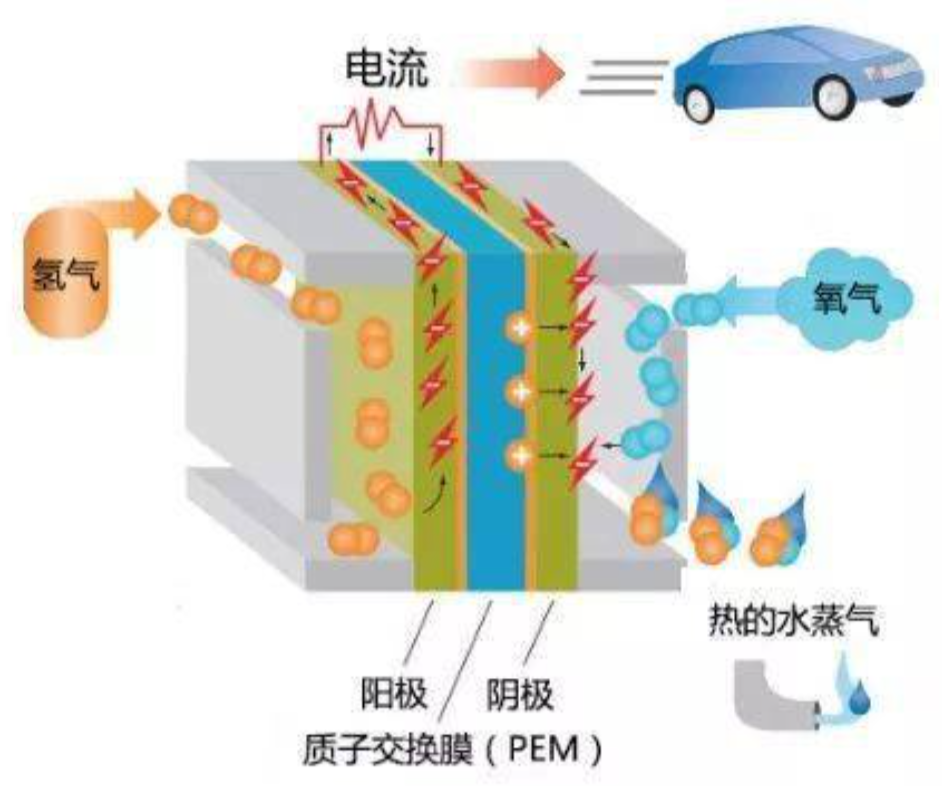
具体的研究方法包括理论分析、数学建模、仿真实验和实验验证等。通过理论分析和数学建模，建立燃料电池系统的数学模型和基于MPC方法的燃料电池系统电压控制策略。通过仿真实验和实验验证，分析燃料电池系统电压控制的控制效果和优化方法，为燃料电池系统的商业化应用提供有力支持。如图1.

图 1.实验内容及方法流程图

# 2． 燃料电池系统基础知识

2.1 燃料电池系统的基本原理

燃料电池是一电化学装置，它能利用空气中的氧气，通过电化学方法将氢等燃料中的化学能转化为电能。由于燃料电池过程不涉及燃烧，它比等效功率的热发电机更高效。此外，当使用纯氢作为燃料时，电化学反应的副产物只有水和热，所以它也是一项清洁技术。因此，燃料电池的低化学、热能和二氧化碳排放使其成为一种非常有吸引力的降低碳排放强度的技术。燃料电池是一种将化学能直接转化为电能的电化学装置，其基本原理是通过在阳极和阴极之间引入氢气或其他燃料，使其在阳极上发生氧化反应，同时在阴极上发生还原反应，从而产生电能和水。燃料电池与传统电池不同之处在于，传统电池的电能是由化学反应产生的，而燃料电池则是通过将燃料和氧气直接转化为电能，因此燃料电池具有更高的能量密度和更长的使用寿命。

燃料电池的基本构成部分包括电解质膜、阳极、阴极和电路负载等。燃料电池的核心部件是电解质膜，它可以将阳极和阴极隔离开来，防止电子和离子的混合，同时还可以选择性地传递离子，从而促进反应的进行。阳极和阴极则分别负责燃料的氧化和氧还原反应，通常是使用贵金属催化剂来促进反应的进行，电路负载则是将燃料电池产生的电能输出到外部电路中。

2.2 燃料电池系统的分类

燃料电池的种类很多，常见的有质子交换膜燃料电池（PEMFC）、固体氧化物燃料电池（SOFC）、碱性燃料电池（AFC）等。不同种类的燃料电池具有不同的特性和优缺点，在实际应用中需要根据具体需求进行选择。一种新兴的燃料电池--微生物燃料电池（MFCs）正受到燃料电池研究人员更大的关注。除了电解质和燃料之外，燃料电池的基本设计几乎是相同的。以下是常用的几种燃料电池。

2.2.1碱性燃料电池（Alkaline Fuel Cell, AFC）

碱性燃料电池(AFC)使用强碱性溶液（如KOH、NaOH等）作为电解质，在传导电极之间传输离子。与质子交换膜燃料电池（PEMFC）不同的是，AFC中的离子导体为氢氧根离子（OH-），因为电解液是碱性的。 AFC是最早应用于车辆和实际应用领域的燃料电池之一。 然而，AFC的缺点是必须使用纯氢气和纯氧气作为燃料，因为它对CO2和N2非常敏感，所以不适合在地面上使用。

2.2.2熔融碳酸盐燃料电池（Molten Carbonate Fuel Cell，MCFC）

碳酸盐燃料电池（MCFC）由多孔陶瓷电解质隔膜、和金属极板组成，采用熔融态碳酸盐作为电解质。相较于其他类型的燃料电池，MCFC具有多项优点：因为作温度较高，所以反应速度更快；对于燃料纯度的要求相对较低，且可以在电池内进行燃料重整；成本较低；易于操作。MCFC也存在一些缺点：在高温条件下，液体电解质的管理较为困难，容易发生腐蚀和渗漏现象，导致缩短了电池的使用寿命。

2.2.3 直接甲醇燃料电池（Direct Methanol Fuel Cell, DMFC）

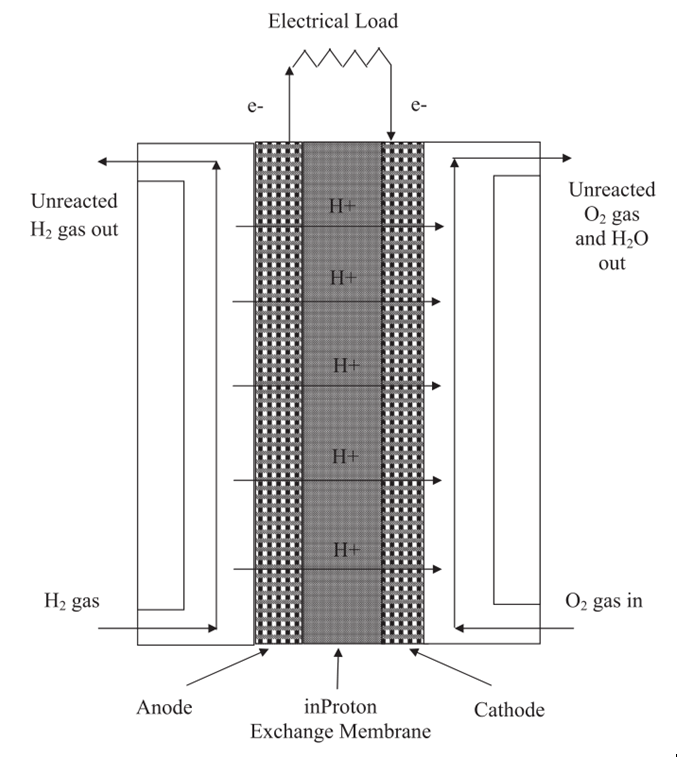
直接甲醇燃料电池（DMFC）因其高效率、简单设计、内部燃料直接转换和方便加燃料等多个优点引起了世界各地燃料电池研究人员的广泛关注。尽管DMFC相对于其他燃料电池有明显的优势，但其发展速度却较慢。其中的主要缺陷是甲醇及其中间产物导致催化剂中毒。在阳极氧化过程中，甲醇会生成类似CO的中间产物，从而导致铂中毒。因此，大多数DMFC采用具有一定抗CO中毒性能的催化剂。

2.2.4 质子交换膜燃料电池（Proton Exchange Membrane Fuel Cell， PEMFC）

今年来，PEMFC被认为是最具潜力的电力能源之一。它是由单个燃料电池组成的基本单元，每个单体电池的电化学电动势大约为1V左右，同时它的电流密度约为每平方厘米100毫安。如果，为了满足大多数用电负载的需求，需要将多个单体电池通过串联和并联的方式组合起来，形成一个电池组。只有这样才能实现质子交换膜燃料电池系统的实用化。这个电池组具备一定的功率，并且可以满足各种用电负载的需求。要将燃料电池组建成一个连续、稳定的供电电源，需要配置多种组件，包括氢燃料储存单元、空气供给单元、及系统控制单元等等。这些组件与电池一起协作，使整个燃料电池系统能够正常运行，并提供稳定的电力输出。在下文中，我们采用PEMFC作为燃料电池的模型。

2.3 燃料电池系统的构成及工作原理

基本的PEMFC堆栈由 膜电极组件（MEAs）组成，它们被双极板夹住，用垫圈密封，两端被集电板包住，由几个螺栓和螺母固定，每当有氢气和空气供应时，电化学氧化还原反应就会产生电能，如图1.所示



质子交换膜燃料电池基本结构

PEMFC是一种使用质子交换膜作为核心MEA的电化学能量转换设备。它由两个电极（阳极和阴极）夹着质子交换膜组成，当氢气和空气供应到电池时，氧化还原反应会产生电能。双极板通常由低孔隙率聚合物石墨复合材料制成，它们通过气通道或流场将氢和空气均匀地分布在MEA的阳极和阴极上，并将电子通过相邻的阳极和阴极。密封垫用于密封PEMFC堆栈，以防止气体泄露或混合。电流收集器板被用来从末端阳极传导电流到相应的末端阴极。MEA的电极通常由碳纸或碳布组成的气体扩散层和催化剂层组成。阳极的催化剂层主要含有铂(Pt)，而阴极的催化剂层则包括铂(Pt)和钌(Ru)。这些催化剂层浸渍在活性炭、碳纳米管和碳纳米纤维等碳材料上。

Pt催化剂存在时，在阳极发生的氢氧化反应为:

Pt-Ru催化剂存在下阴极氧还原反应的过程:

PEMFC的整体反应如下:

质子交换膜或固体聚合物电解质通常是一种质子导电的聚合物，它们不透气且不导电子。全氟磺酸（PSFA）是其中一种优秀的质子导体，可以将气体交叉和电子短路保持在最低限度，但其有效工作温度限制在80-90℃。该薄膜将质子从阳极引导到阴极，完成电路；电子则从阳极通过外部负载传导到阴极，在阴极与氧气反应生成水。理论上，单个燃料电池在开路时产生1.23 V的电势。但连接到负载时，电势会随着负载从电池中吸取电流而下降，通常的工作电压范围为0.6-0.7 V。电压损失是由以下几个因素引起的：阳极和阴极缓慢的电化学反应引起的激活极化、氢交叉或电子通过膜短路引起的欧姆极化损失、当两种反应物都被快速消耗时，两个电极上的氢和氧浓度梯度引起的质量输运极化、以及电池内阻引起的欧姆损失。通过增加MEA的有效面积，可以从单个燃料电池中获得更大的总电流。

2.4 燃料电池系统的数学模型

由于燃料电池内部发生一些损失，其典型输出电压通常小于理想值，燃料电池的净输出电压如下：

,, , , , 分别表示燃料电池系统的输出电压、电池个数、可逆电压、活化压降、欧姆压降、浓度压 降。是根据能斯特方程计算的：

式（2-5）

, , 分别为电池堆温度、氢气分压、氧气分压。由于电极的激活而产生激活压降定义为：

其中，ξ为半经验系数，Co2 为氧气浓度，I 为电流。氧气浓度计算如下：

欧姆电压降 来自电子转移和质子转移的电阻。它被给出为：

其中，Rm、、、I、A、i、λ分别表示膜电阻、电子传导等效接触电阻、膜电阻率、膜厚度、膜活性面积、实际电流密度，以及取决于膜含水量的可调参数膜。浓度电压降是由于质量传递，降低了反应物压力，确定为

这里，β是一个与燃料电池工作条件有关的参数系数，表示最大电流密度。燃料电池的动态行为主要受 "电荷双层 "现象的影响。界面电极/电解质上的电荷层充当了一个电容器。电荷层跟随电流的变化总是有一个延迟。这种延迟只影响到激活和浓缩电压降，可以用以下公式来描述

这里，C和Ra表示系统的等效电容和等效电阻。因此，燃料电池的输出电压可以改写为。

# 3. 基于模型预测方法的燃料电池系统电压控制原理

3.1 模型预测控制方法的基本结构

MPC是一种独特的控制方法，它使用被控模型来预测未来的系统行为，并不断优化当前的时隙。它能够处理多输入控制问题，无需实施额外的MPC控制器。MPC控制器的输入包括参考电压、实际电压和状态矢量，这是由被控系统线性化得到的。如图3.，基于输入信号，MPC控制器可以预测燃料电池系统的未来行为并通过解决优化问题计算出正确的氢气和空气流量，从而实现理想电压输出。基于输入信号，MPC控制器可以预测燃料电池系统的未来行为，并通过解决优化问题计算出正确的氢气和空气流量，以实现理想的电压输出。这种方法通过对未来可能发生的各种情况进行评估和权衡，能够使系统保持在最佳操作状态下，同时兼顾稳定性和响应速度。在工业应用中，MPC已广泛用于化工、制造和自动化控制等领域，同时也被应用于能源管理和电力系统控制。

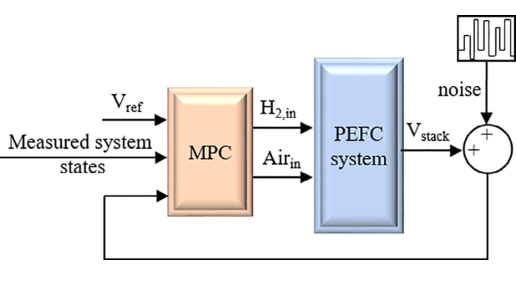


图 3. MPC控制方案

3.2 模型预测控制算法

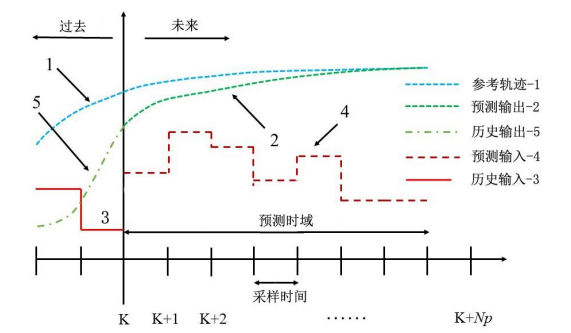
MPC是一种基于模型的控制算法，其重点在于利用预测模型来对未来输出进行预测，而不是强调预测模型的形式。预测模型主要依据对象的历史信息和未来输入来进行预测。MPC方法并没有特别限定预测模型的形式，只需要具备预测功能的信息集合都可以被视为预测模型。因此，无论是非线性系统或分布参数系统，只要有预测功能，都可以作为预测模型使用。相比传统的控制算法或策略，MPC更加注重基于信息建立最适合功能要求的模型，从而打破了对模型结构的严格要求。此外，MPC还可以根据实时反馈信息进行在线调整和优化，以实现更可靠、精确的控制。这种方法使得MPC算法更加灵活和适用范围更广，因此被广泛应用于化工、制造、能源管理和电力系统控制等领域。

图 4. MPC控制策略原理

预测模型作为MPC控制算法的核心，具有展示被控系统未来动态行为的重要功能。通过预测模型，MPC控制器可以提前了解系统未来的状态变化，并根据这些预测结果做出相应的控制决策，以达到预期的目标输出。

在MPC中，预测模型提供了对未来行为的先验知识，使得MPC控制器能够选择合适的控制输入来影响系统的输出。通过预测模型，MPC控制器能够预测出未来时刻被控对象的输出变化，从而决定何时调整控制输入和如何调整控制输入，以实现最优控制效果。

因此，预测模型在MPC控制算法中扮演着非常重要的角色，它不仅提供了对未来行为的预测，还可以通过与优化算法的结合实现最佳控制效果。同时，预测模型的准确性也直接影响了MPC控制器的性能和鲁棒性。因此，在使用MPC算法进行控制时，需要选择合适的预测模型，并不断对其进行优化和改进，以保证MPC控制器的效果和稳定性。

### 3.2.1 滚动优化

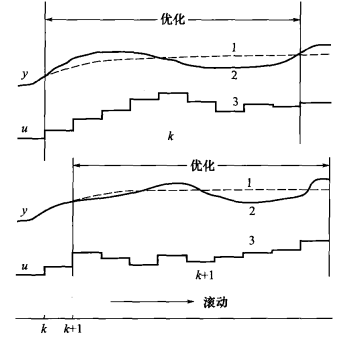
 MPC算法是一种控制算法，通常采用在线优化的方法。它在工业应用和理论研究中得到了广泛应用。MPC的主要目标是确定未来的控制作用，以实现系统的最佳性能。在这个过程中，MPC会利用预测模型对未来的控制作用进行优化，并根据反馈信息对预测模型进行实时修正，以更好地适应实际系统的动态特性。MPC算法的性能指标通常涉及到系统未来的行为，例如跟踪期望轨迹的方差最小或控制能量最小等。

图 5. 滚动优化

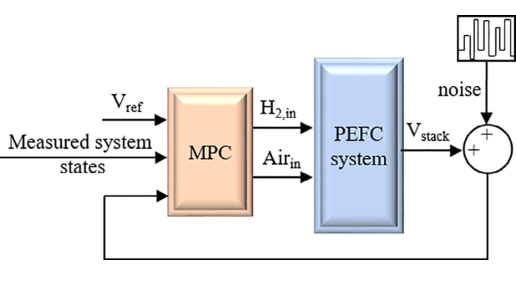
与传统的最优控制算法不同，在MPC中优化过程是有限时域内的滚动优化策略。在每一采样时刻，优化性能指标通常只考虑未来的有限时间窗口内的影响，并根据预测模型推断出未来时刻的被控对象输出。随着时间的推移，这个时间窗口也会向前移动，从而形成不同的相对时间窗口，即不同时刻的优化性能指标所包含的时间区域是不同的。但是，不同时刻的优化性能指标的相对形式是相同的。这种滚动式的、有限时域的优化策略使得MPC更加适合于复杂的动态系统控制，同时也保证了MPC的计算效率。然而，由于MPC需要实时地对当前时刻的预测模型进行优化，因此MPC的稳定性和性能取决于预测模型的准确性和可靠性。因此，在MPC的应用中，需要选择合适的预测模型，并不断对其进行更新和改进，以保证MPC控制器的鲁棒性和性能。。

在MPC中，通常是采用滚动优化的方法，即反复在线运行。这种方法是MPC与传统最优控制区别的根本特点。滚动优化的核心思想是通过实时调整控制策略来应对模型失配、时变和干扰等不确定性因素，从而保持控制在实际上的最优状态。虽然有限时域优化目标的局限性意味着MPC算法只能寻找全局次优解，但滚动优化方法可以及时弥补由于不确定性因素引起的偏差。通过将实际反馈信息与预测模型相结合，MPC算法始终在实际基础上建立新的优化过程，并且不断地进行调整。这种实时的反馈和调整机制可以提高控制系统的稳定性，从而实现更加精确和可靠的控制效果。对于实际的复杂工业过程来说，由于模型失配、外加干扰等不确定性因素的影响，滚动优化策略更加有效。

### 3.2.2 反馈校正

反馈在控制系统中有着基本的、不可替代的作用，可以帮助克服干扰和不确定性的影响，获得闭环稳定性。MPC作为一种基于模型的控制算法，需要用反馈来优化控制效果。

在MPC算法中,滚动优化时的基点应与实际系统情况相一致。预测模型虽然是对象动态特性的粗略描述,但由于实际系统存在模型失配、外加噪声等因素,基于静态模型的预测并不能完全符合实际情况。因此，为了弥补模型预测的不足或对基础模型进行在线修正，MPC算法需要通过附加预测手段来实现。这些额外的预测手段可以在运行时对模型进行精细调整，以提高控制精度和稳定性。MPC算法的优越性建立在反馈校正基础上。因此，当MPC算法确定未来的控制作用后，它不会立即实施所有的控制作用，而只实施当前时刻的控制作用。在下一次采样时刻，MPC算法会根据监测对象的实际输出状态，并采取各种反馈策略，以修正预测模型或进行补偿。然后，MPC将基于这些新的信息进行重新优化，从而在下一个周期内继续控制系统的运行。



MPC算法将优化建立在实际系统的基础上，想要达到对系统未来的动态行为做出准确预测。因此，在MPC中，优化不只是对模型，而且还需要反馈信息，构成闭环优化。这种方法使得MPC算法更加适用于复杂的动态系统控制，并增强了控制器的稳定性。

### 3.2.3 参考轨迹

在MPC中，为了避免输入和输出的剧烈变化对过程造成冲击，需要考虑过程的动态特性。通常情况下，我们要求过程沿着一条平稳的期望曲线到达设定值，以此来引导系统的运行方向。这条期望曲线通常被称作参考轨迹(k)，是设定值通过在线柔化后得到的结果。最常用的参考轨迹形式是一阶指数变化形式。

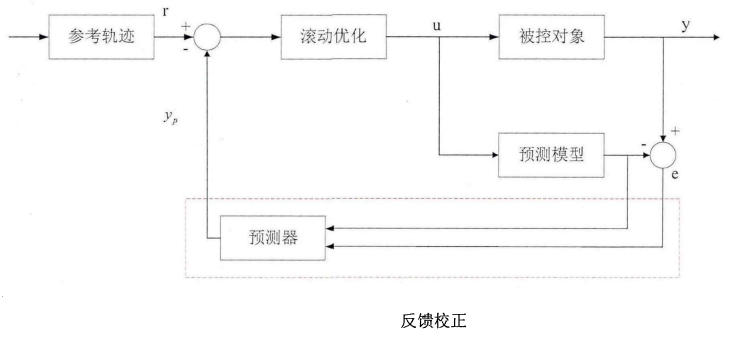
 Ts表示采样周期，T为参考轨迹的时间常数，下标r表示参考值（Reference Value），y(k)为当前时刻的实际输出测量值，为设定值。当T取值较小时，a的取值就会变小，使得参考轨迹能够更快地接近设定值。在MPC中，参数a具有非常重要的作用，它对闭环系统的动态特性产生影响。

图 6.预测控制的步骤

3.3 基于模型预测方法的燃料电池系统电压控制仿真模型

### 3.3.1 建立预测模型：

预测模型应该基于输入变量和输出变量的历史数据，运用机器学习或其他预测算法建立起来。输入变量可以是燃料电池系统的一些物理量，如电压、电流、温度、压力等，输出变量可以是燃料电池系统的一些性能指标，如效率、功率、压力等。

### 3.3.2建立控制模型：

控制模型应该基于预测模型和控制器的设计，运用线性控制理论或其他控制理论建立起来。控制器的设计应该根据燃料电池系统的特性和用户需求，运用 PID 或其他控制器设计算法进行设计。

### 3.3.3建立仿真模型：

将预测模型和控制模型结合起来，建立一个燃料电池系统仿真模型。在仿真模型中，可以模拟燃料电池系统的运行状态，包括氢气供应、氧气供应、温度控制、功率输出等各个环节。通过仿真模型，可以评估燃料电池系统的性能，包括效率、功率、可靠性等指标。

### 3.3.4进行仿真实验：

通过仿真模型的实验，可以得到燃料电池系统的一些性能指标，如电压、电流、功率、效率等。将这些指标与实验数据进行比较，可以评估仿真模型的准确性和可靠性。如果仿真模型与实验数据一致，则可以将其用于实际的燃料电池系统控制中。

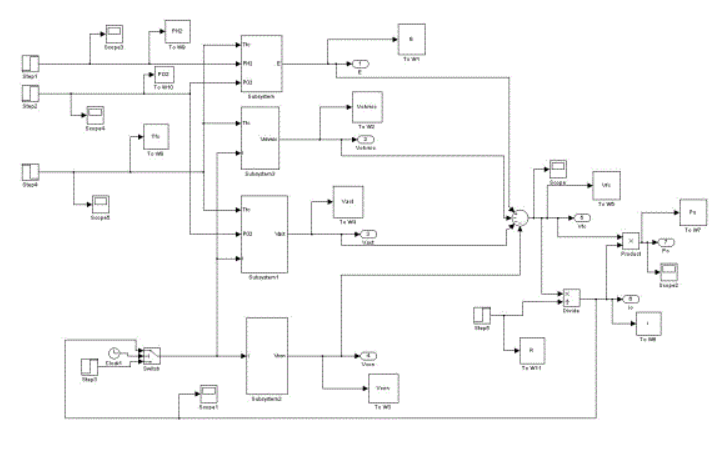


图 7.静态PEMF系统simulink仿真

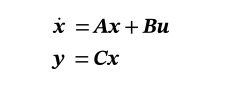
# 4. 基于MPC的燃料电池系统电压控制仿真结果

4.1 燃料电池系统电压控制仿真实验设计

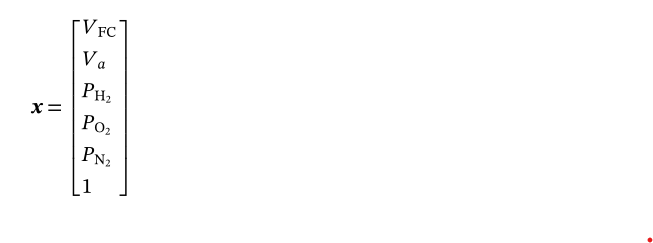
MPC控制器的调谐方法涉及原始PEFC系统模型的线性化，其明确的处理方法如下。

这里是方程（2）的微分，假设在一个预测范围内达到343K的恒定值。

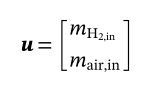
线性化的连续时间状态空间模型被写成：



状态向量x：

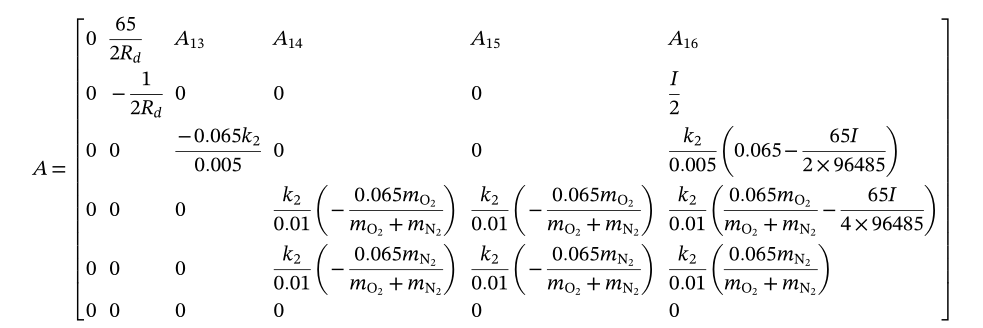


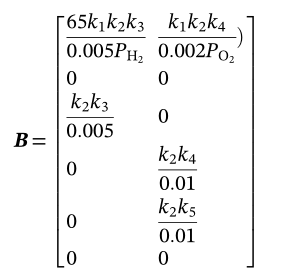
而输入的u是：



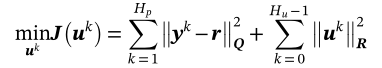
输出Y：



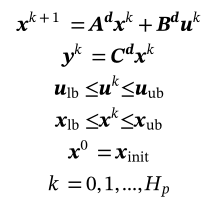
状态空间矩阵是：

 C = [1 0 0 0 0 0]

在每个时间步骤中，将解决一个二次编程（QP）问题，以获得最佳控制输入：

 式（3-12）

约束条件为：



这里Ad、Bd和Cd是离散时间的状态空间矩阵；Hp和Hu是预测和控制区间长度；r是控制参考；Q和R是参考跟踪和控制输入的权重调谐参数；

、、和是输入u和状态x的下限和上限；是最新测量值，即状态反馈。

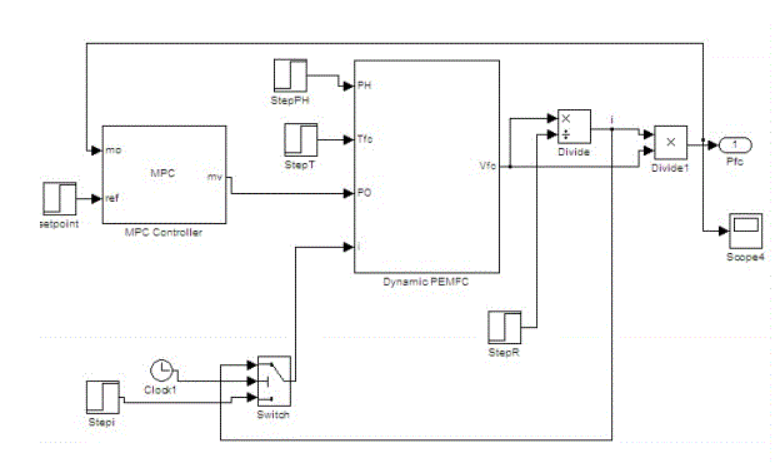
根据上述引用及描述建立燃料电池模型预测控制器如图

图 8. 燃料电池模型预测控制器

4.2 基于MPC的燃料电池系统电压控制仿真结果分析

（1）本文所建立的模型没有考虑反应气体湿度对电堆性能的影响，忽略

PEMFC中水蒸气的作用，工具箱参数：预测域 Np＝20，Nc＝8采样间隔0.01 输入权值0输出权值1.2剩下的为默认。

（2）本文基于PEMFC的电化学模型，采用Matlab／Sinulink进行 PEMFC动态 特性的研究，模型中有些经验参数，需要结合实验数据来确定，经验参数的选取的精度会影响仿真的准确性。

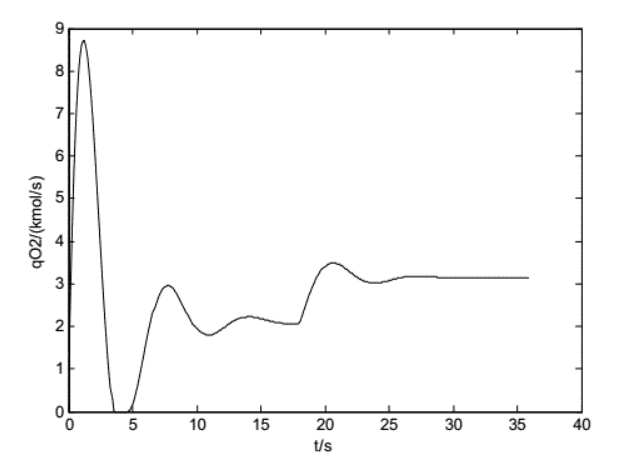
（3）本文建立的数学模型是基于电堆温度一致性的假设前提下建立的。虽然本文考虑到了负载电流的变化引起的电堆最佳工作温度的变化。但是，认为阴极和阳极的温度是相同的，如果要充分考虑水相变就需要将阴极和阳极分开来计算。

图 9.氧气气压

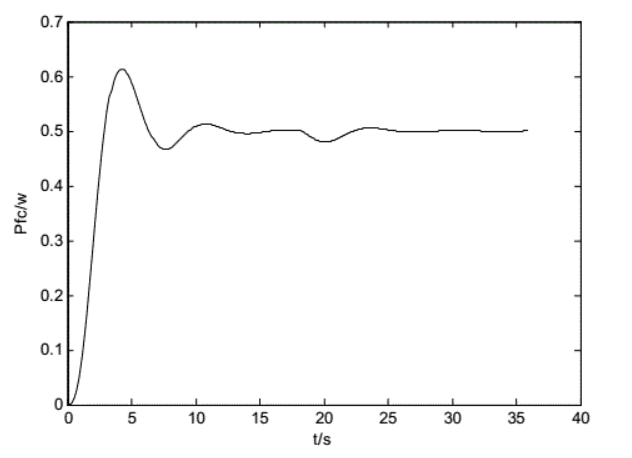
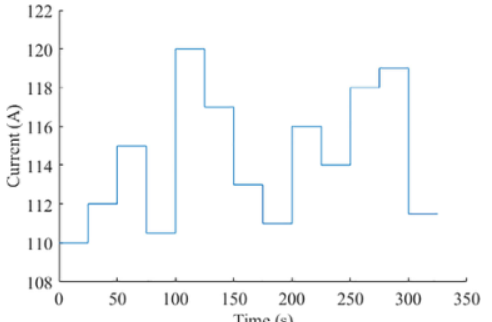


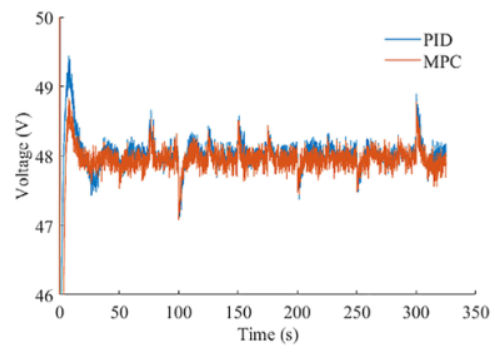
图 10. 燃料电池组功率

4.3 基于MPC的燃料电池系统电压控制仿真效果评价

### 4.3.1分析仿真结果

当电流负载受到任何随机扰动的干扰，其中几乎包含了电流负载的所有随机阶跃变化



从中可以看出，对于任何随机干扰，MPC和PID都有资格控制48V的电压，但MPC控制器仍然显示出更优越的性能，对于电流负载的每一步变化，超调更小，响应更快。

### 4.3.2 优化控制算法

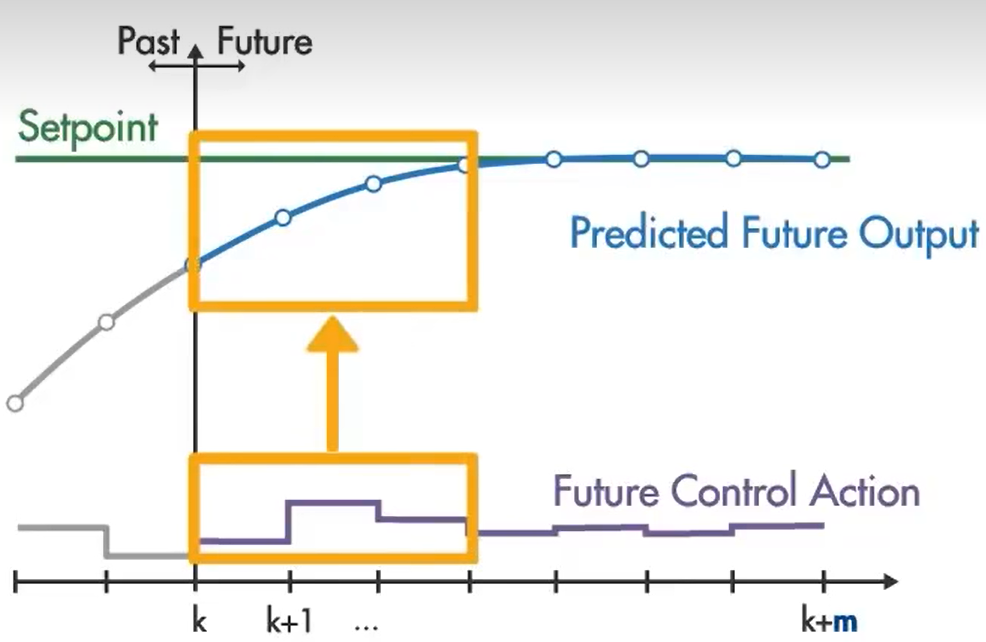
4.3.3.1 采样时间

采样时间决定了控制器执行控制算法的速率。如果采样时间太大，当系统受到干扰时，控制器就没有办法足够快速的对干扰做出反应。相反地，如果采样时间太短，控制器会对干扰和设定值变化反应更激烈。

4.3.3.2 权重设置

我们希望输出尽可能的接近设定值，同时希望控制动作平稳。达到系统性能和匹配目标值要靠权重来使二者达到平衡。燃料电池燃料输入速率和输出电压息息相关。在式（3-12）代价函数中，Q和R分别为状态和控制输入权重矩阵。当R与Q相对比值变大，说明当前更看重输入，即更关注能量的消耗；当相对比值变小时，说明当前系统更关注系统跟踪能力。

4.3.3.3 控制区间

控制区间是在采样时间控制移动到时间步长m的次数，每一个变量都是最优控制器计算的自由变量。所以，控制范围越小，计算量就越少。但是，如果我们选择控制范围总是为1，就会导致系统响应变慢，无法获得最好的系统机动性。通过增加控制范围，可以获得更好的系统预测，但是计算量会增加，控制器计算复杂度会提高。值得注意的是，通常只有前几个对控制动作对预测输出产生显著影响。

而其余动作只会产生很小的影响，并且会增加最优控制器的计算复杂度。根据经验将控制区间设置为预测区间的10%-20%。

# 5. 总结

本文讨论的基于模型预测控制方法的燃料电池系统电压控制仿真模型，不仅可以用于燃料电池系统的控制和优化，还可以为其他能源系统的控制和优化提供参考。具体来说，该模型可以应用于智能能源管理系统中，通过对燃料电池系统的控制和优化，可以提高能源的利用效率和安全性。此外，该模型还可以应用于燃料电池系统的设计和评估中，可以帮助开发人员更好地了解燃料电池系统的性能和行为，并优化系统的设计。除了本文提到的模型预测控制方法，还有许多其他的控制方法可以用于燃料电池系统的控制和优化。例如，基于模糊逻辑的控制方法、基于神经网络的控制方法、基于遗传算法的控制方法等等。这些方法都可以与模型预测控制方法相结合，以提高燃料电池系统的性能。

此外，在实际应用中，燃料电池系统还受到许多因素的影响，如传感器误差、模型不确定性、负载变化等等。因此，在实际应用中，需要对这些因素进行考虑和优化，以提高燃料电池系统的性能。

综上所述，基于模型预测控制方法的燃料电池系统电压控制仿真模型是一种非常有效的控制和优化方法，可以用于燃料电池系统的设计和评估、智能能源管理系统中的控制和优化，以及其他能源系统的控制和优化。未来，还需要进一步深入研究和改进该模型，以提高其性能和应用范围。

参考文献

[1]刘通.燃料电池模拟、控制和应用[J].机械工业出版社,北京:机械工业出版社,2010.(093674):2-3.

[2]中国电池网.中国的燃料电池技术[R]. 广州能源所:, 2006. 1-2.

[3]模型预测工程应用导论.[EB/OL]. 化学工业出版社.2010.

[4]方叶.基于MPC的质子交换膜燃料电池操作参数控制策略研究[D]. 湖南理工学院:, 2022. 9-10.

[5]GB/T35178-2017, 燃料电池电动汽车氢气消耗量[S].2023.

[6]Xiufei Li Yuanxin Qi Shian Li Per Tunestål Martin Andersso.A multi-input and single-output voltage control for a polymer electrolyte fuel cell system using model predictive control method[J].WILEY,:,2021.10.1002(er.6616):4-6.

[7]Wan Ramli Wan Daud，Edy Herianto Majlan.PEMFuelCellControl-AReview[J].RenewableEnergy,:,2017.10.1016():-.

[8]JIANG Z-M.Reflection on Energy Issues in China[N]. journal of shanghai Jiaotong University, 2008(257-274).

[9] A. Vahidi, A. Stefanopoulou, P. Huei, Current management in a hybrid fuel

cell power system: a model-predictive control approach, Control Syst.Technol. IEEE Trans. 14 (2006) 1047e1057.

[10] Rashapov R R, Unno J, Gostick J T. Characterization of PEMFC Gas Diffusion Layer Porosity[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2015, 162(6):603-612.

致 谢

在本研究完成之际，我想表达我对包头师范学院张为老师的最诚挚感谢。在整个研究过程中，提供了宝贵的指导和建议。他对我的研究工作进行了细致的审阅和指导，不断地激发我深入思考、勇于创新的精神，使我在研究过程中受益匪浅。

张老师是一位富有经验和智慧的导师，他不仅传授给我专业知识和技能，更重要的是培养了我批判性思维和创造性思维。他时刻关注着我的研究进展，通过组织讨论、提出问题、给予意见等方式引导我进行深入思考和独立探索，从而不断提高我的科研能力和水平。

同时，感谢各位专业课老师，学院的师资力量雄厚、教学设施先进，这些都为我的学习提供了坚实的基础和保障。在这里，我不仅获得了系统的知识训练和专业技能培养，更重要的是接受了全方位、多角度的综合素质提升。感谢各位老师诲人不倦。感谢信息科学与技术学院，在这里我收获扎实的专业知识和切实的人生道理。祝愿各位老师工作顺利。