



OpenFC

氢燃料电池控制系统



目录

CONTENTS

- ① 影响电堆性能的因素
- ② 水、热、气、电控制
- ③ 控制流程
- ④ 基于人工智能的控制

章节
Part 01

影响电堆性能的因素

影响电堆性能的因素

PERFORMANCE OF THE STACK

01



质子交换膜

02



催化剂

03



气体扩散层

MEA整体通透性



04

双极板



05

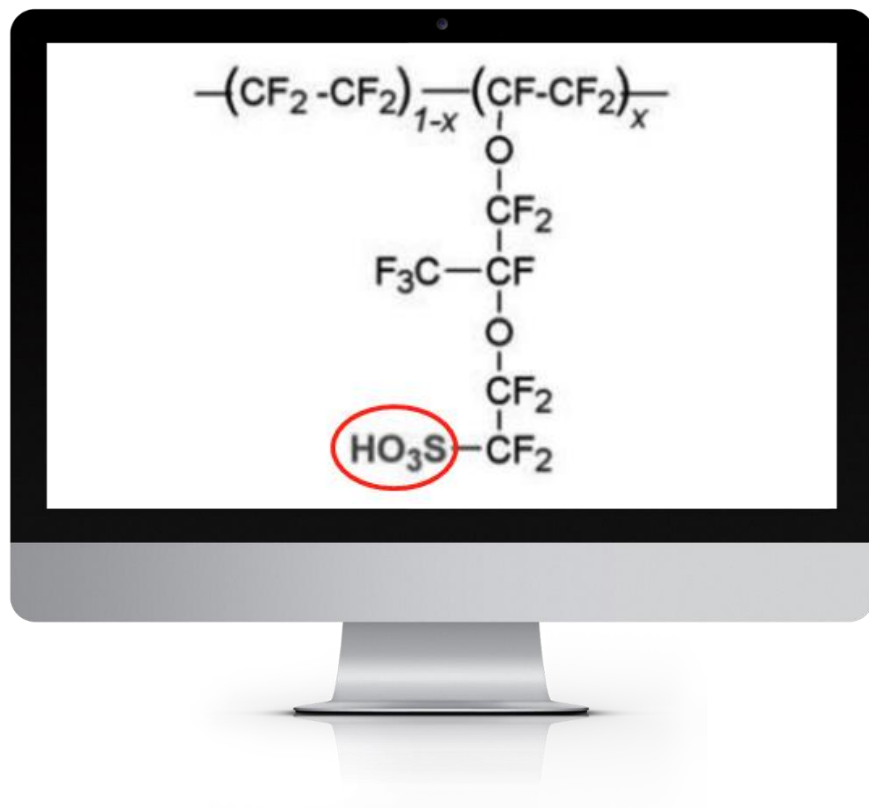
温度湿度气压



06

质子交换膜

PROTON EXCHANGE MEMBRANE



01

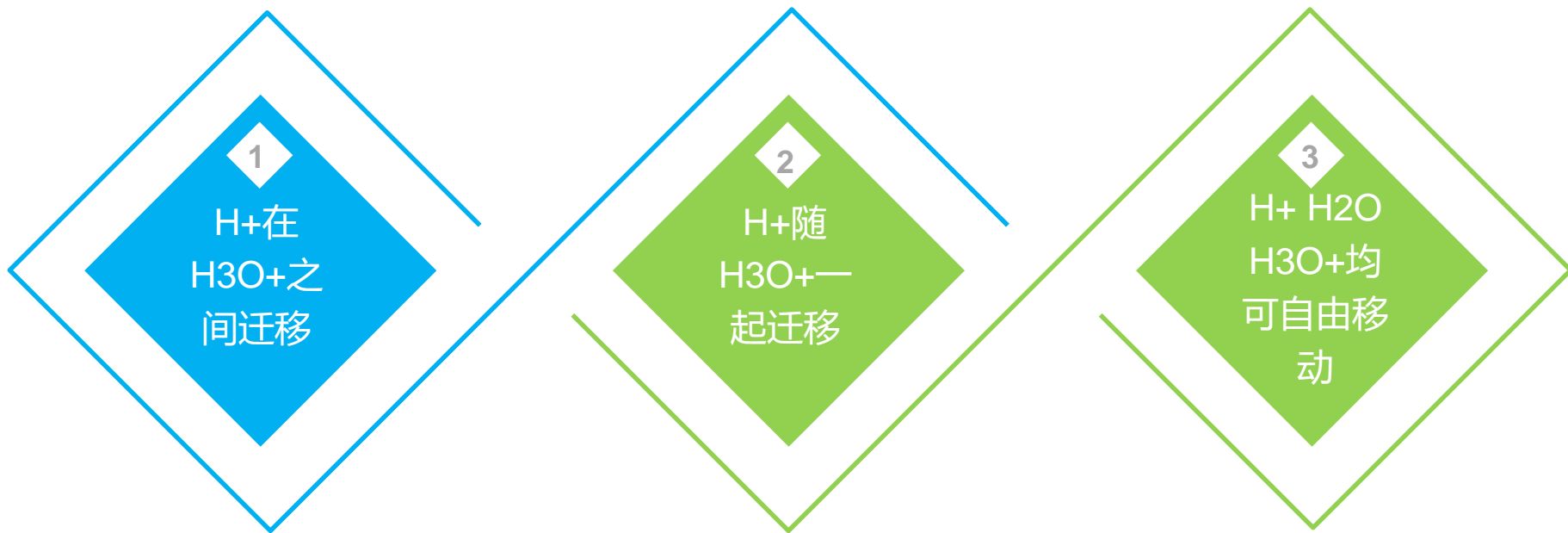
质子交换原理

02

水传输机制

质子交换原理

PRINCIPLE OF PROTON EXCHANGE



在平均每个磺酸基周围水分子比较少的环境下，H⁺在H₃O⁺之间迁移

在平均每个磺酸基周围水分子比较多的环境下，H⁺随H₃O⁺一起迁移

在平均每个磺酸基周围水分子饱和的环境下，H⁺、H₂O、H₃O⁺均可自由移动

水传输机制

TRANSFER MECHANISM OF WATER

电渗迁移

01

H₂O和H⁺结合成H₃O⁺一起从阳极迁移到阴极的过程

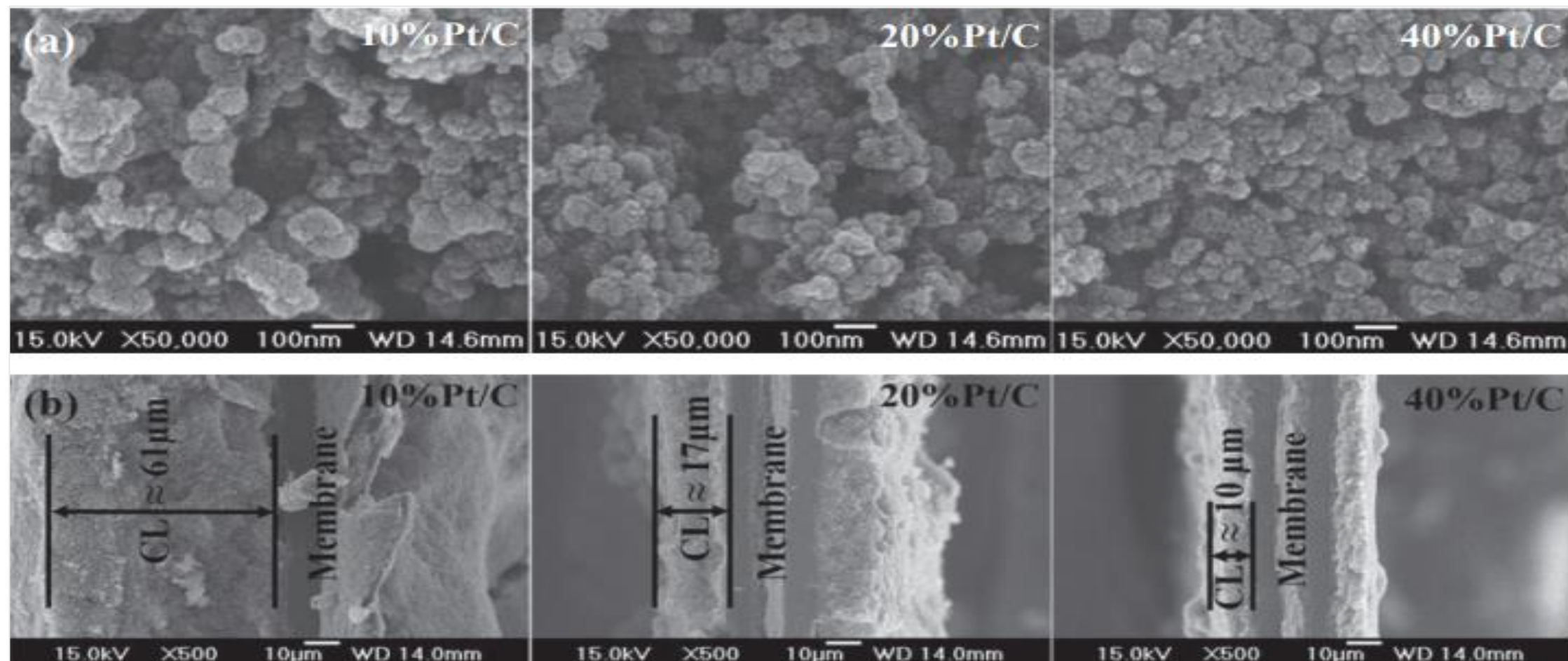
反向扩散

02

水分子从阴极扩散到阳极的过程叫做水的反向

催化剂

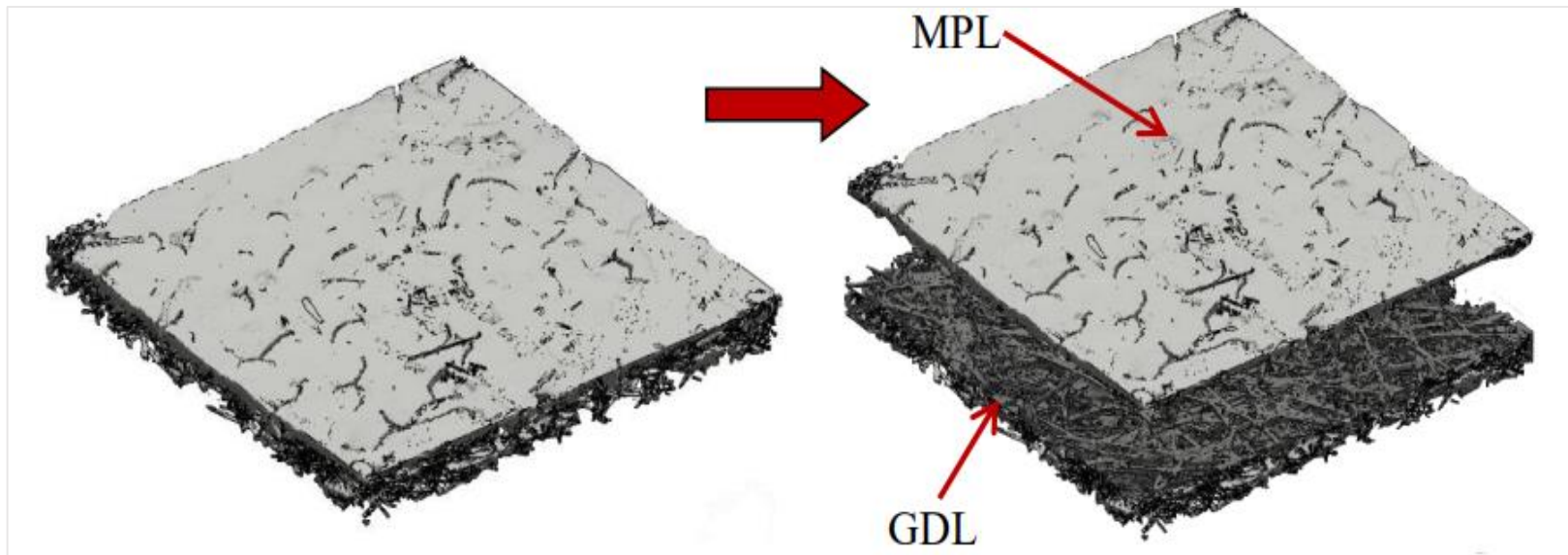
CATALYZER



PT、C、膜溶液不同比例

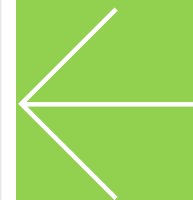
气体扩散层

Gas Diffusion Layer



气体扩散层

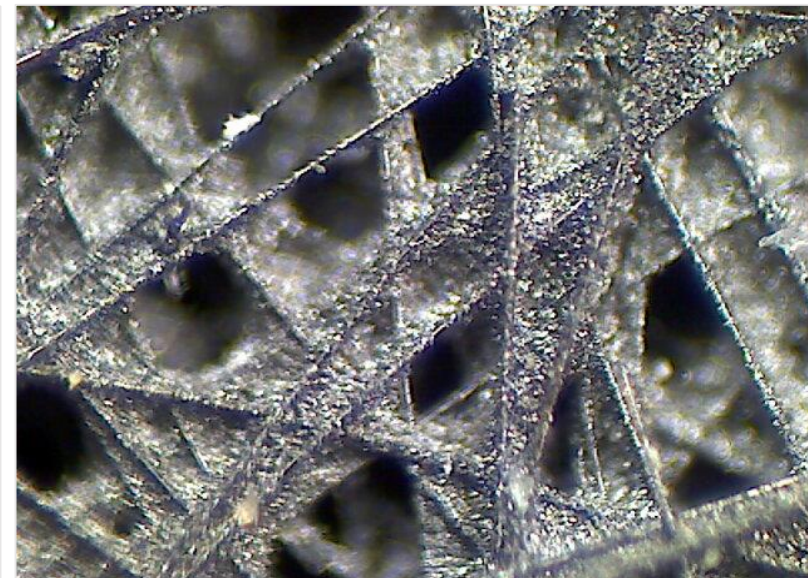
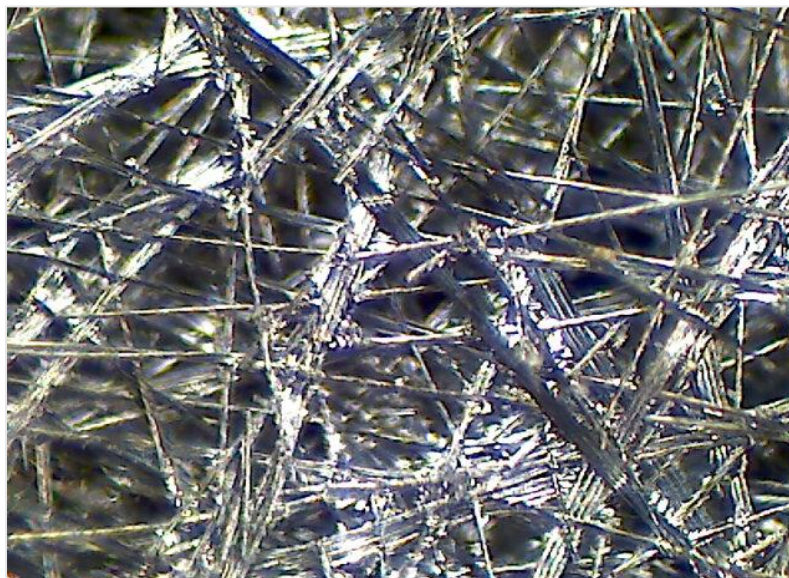
现在基本都使用碳纸制作，GDL的主要作用有
为反应气体从流畅通道到催化剂层提供路径、为产生的水从
催化剂层到流畅通道提供通路、为MEA提供机械支撑、导热
导电。



气体扩散层疏水性处理

阴极和阳极气体扩散介质都会经过PTFE处理，将其浸入到PTFE溶液中，然后进行干燥和烧结。

左图是未经过疏水性处理的碳纸、右图是经过处理的碳纸，需要注意的是过度的疏水性处理可能影响透气性。



MEA整体通透性

MEA PERMEABILITY

01

质子交换膜

MEA整体质子电导率应该是最大限度的接近质子交换膜本身的最大质子电导率



03

气体扩散层

有可能由于阴极侧气体扩散侧效率低、疏水性低导致水分排不出氧气进不来，质子在阴极催化层堆积而没有足够的氧来反应，阳极也有同样的情况，由于阳极水淹阻断氢气来到三相界面催化剂不能提供足够多的质子

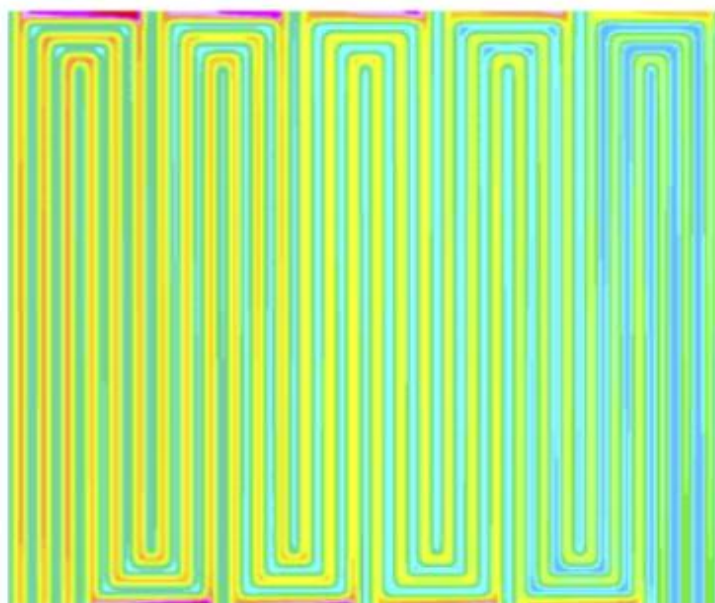
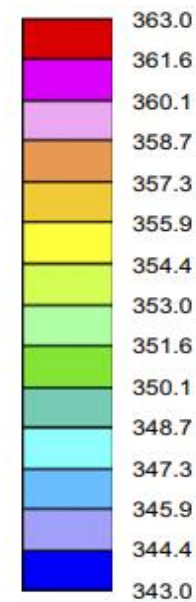
02

催化剂层

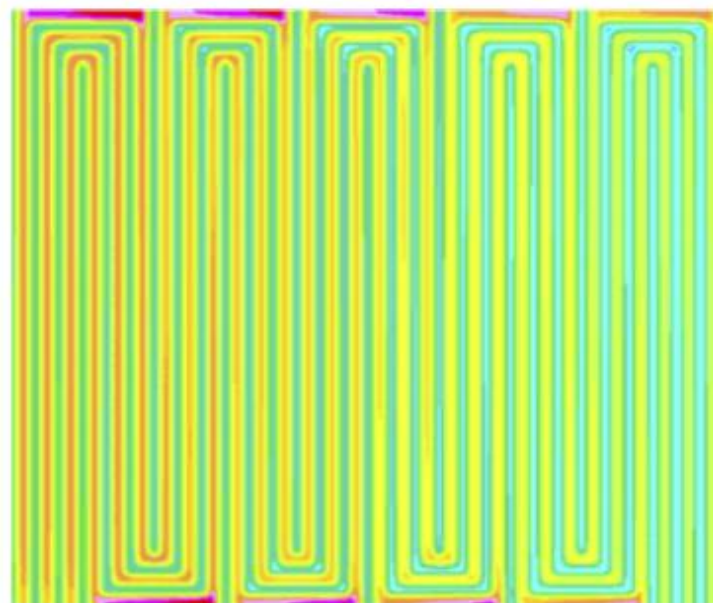
有可能由于催化层喷涂太厚，催化层质子电导率要小于膜的质子电导率，这就浪费了膜电导率潜力

双极板

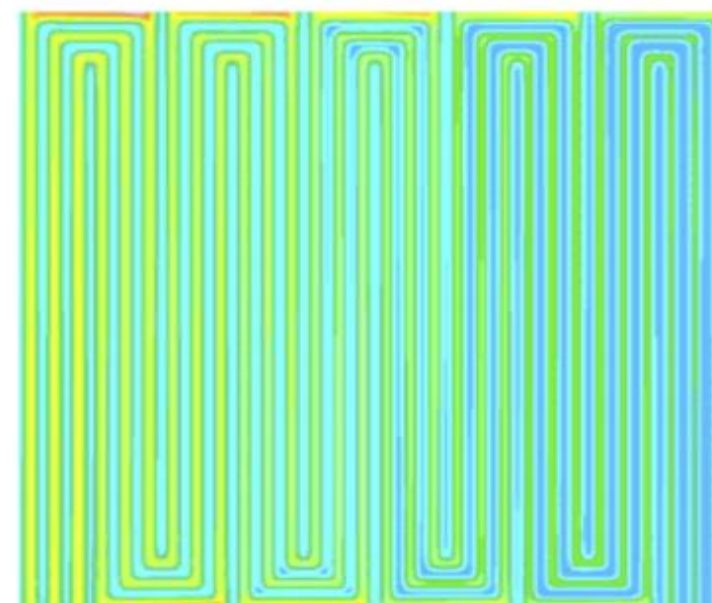
BIPOLAR PLATE



Base case 0.9 mm/0.9 mm
 $T_{avg} = 351.99\text{K} (78.99\text{C})$



Channel wide 1.0 mm/0.7 mm
 $T_{avg} = 351.99\text{K} (78.99\text{C})$

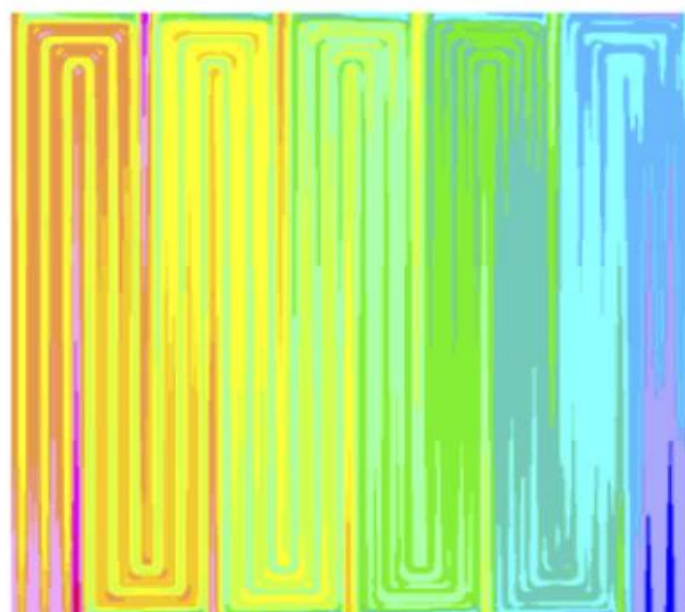


Channel narrow 0.7 mm/1.0 mm
 $T_{avg} = 351.99\text{K} (78.99\text{C})$

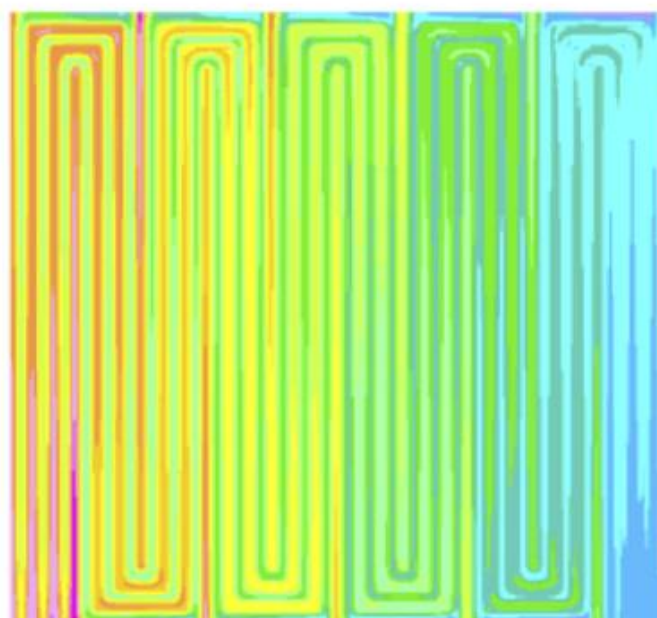
不同流道宽度下阳极膜表面温度($i_{avg} = 1.2 \text{ A/cm}^2$)

双极板

BIPOlar PLATE



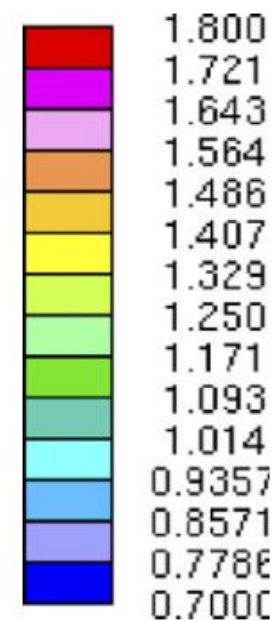
Base case 0.9 mm/0.9 mm
 $V_{cell} = 0.521 \text{ V}$



Channel wide 1.0 mm/0.7 mm
 $V_{cell} = 0.522 \text{ V}$



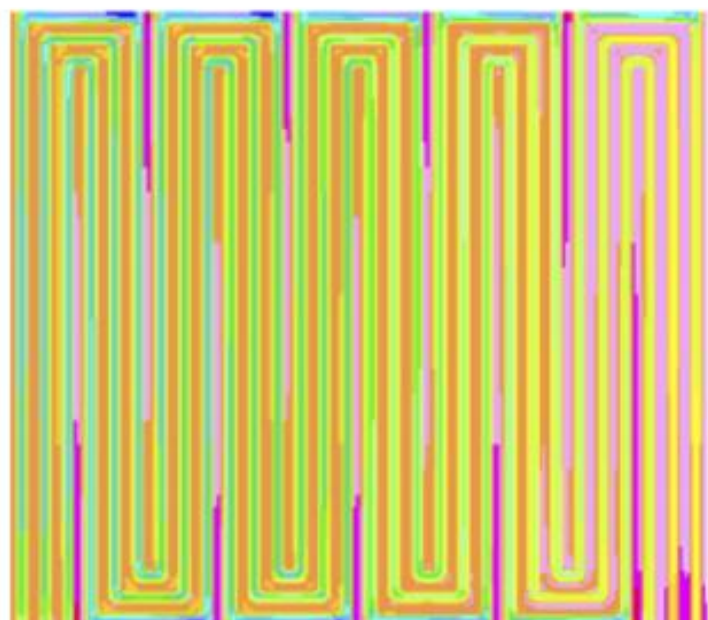
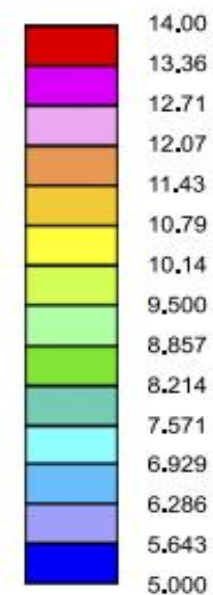
Channel narrow 0.7 mm/1.0 mm
 $V_{cell} = 0.5365 \text{ V}$



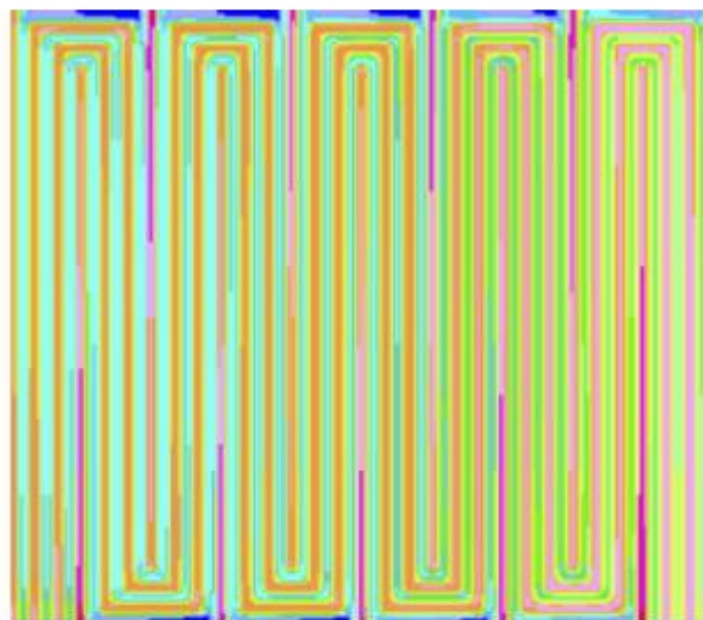
不同流道宽度下电流密度($i_{avg} = 1.2 \text{ A/cm}^2$)

双极板

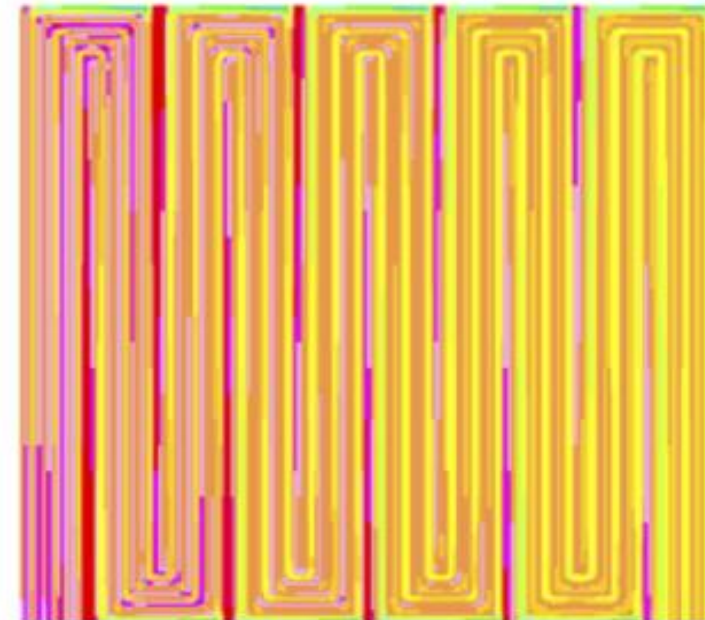
BIPOLAR PLATE



Base case 0.9 mm/0.9 mm
 $\lambda_{\text{avg}} = 10.30$



Channel wide 1.0 mm/0.7 mm
 $\lambda_{\text{avg}} = 9.714$



Channel narrow 0.7 mm/1.0 mm
 $\lambda_{\text{avg}} = 11.26$

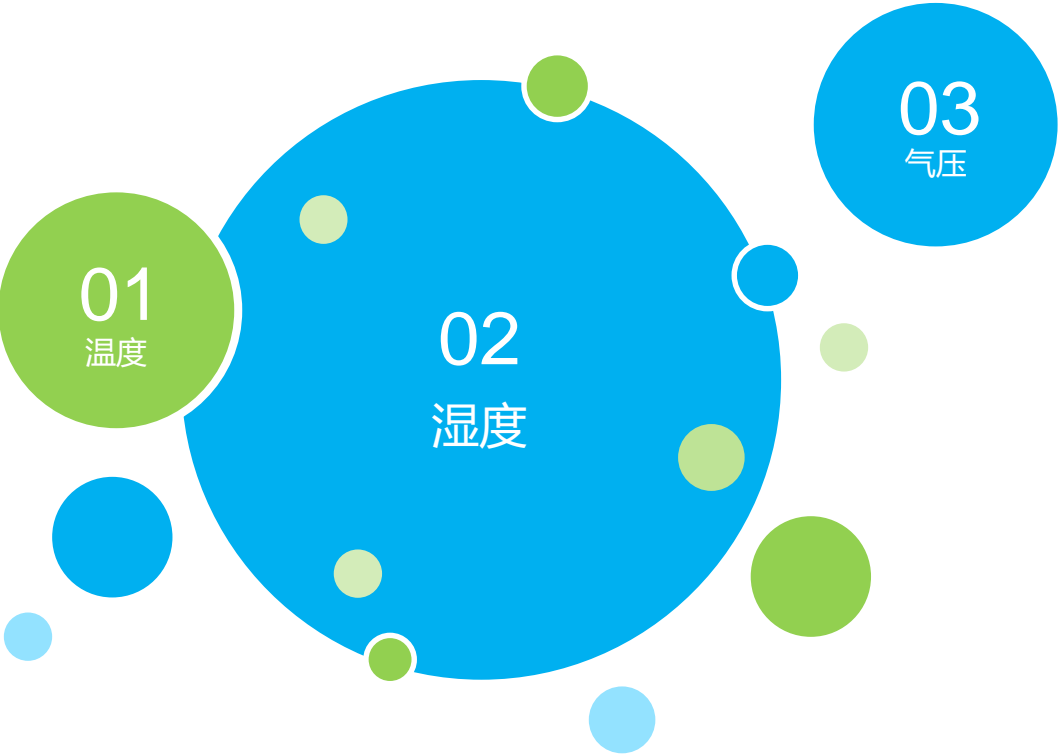
不同流道宽度下膜本身含水量($i_{\text{avg}} = 1.2 \text{ A/cm}^2$)

温度、湿度、气压

TEMPERATURE AND HUMIDITY

质子交换膜温度

温度控制的本质是主要调节质子交换膜的温度，只有交换膜的温度达到最佳要求才能将电堆性能发挥到最佳，温度也会影响到排水



质子交换膜湿度

调节湿度的本质是调节质子交换膜的含水量，质子交换膜的湿度到达完全水合态才能具有最大质子电导率，湿度大小同样影响排水难易

阴阳极气体压力

阴极阳极两侧气体压力、气体压差对质子电导率也产生直接影响，在阳极闭口的系统中排氢操作会引起阳极气压降低，造成电压下降，阴阳两侧压差变化，严重的情况下会造成交换膜物理损坏

章节
Part 02

水、热、气、电控制

水、热、气、电控制

WATER HEAT GAS AND ELECTRICITY

01



分布规律

02



对水的控制

03



对热的控制

对气的控制



04

对电的控制



05

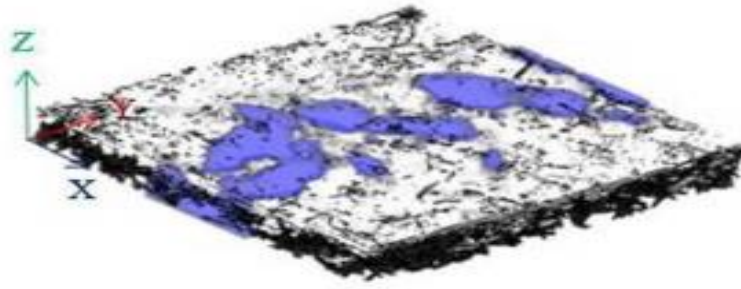
非线性关系



06

分布规律

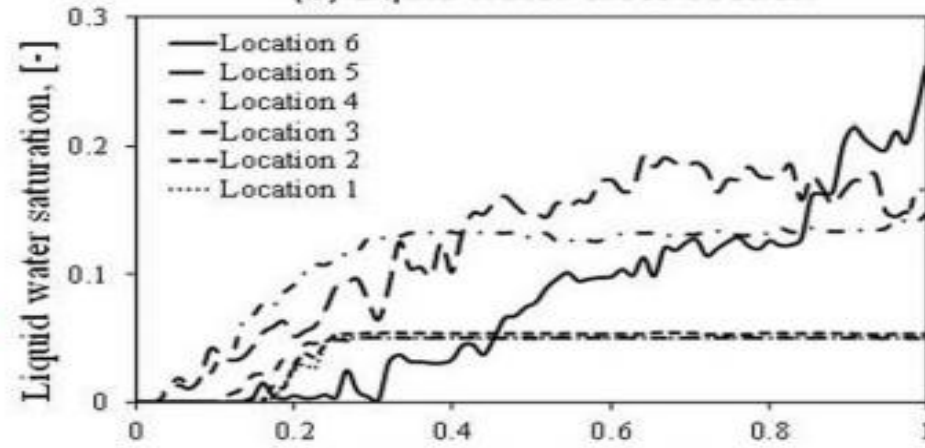
REGULARITIES OF DISTRIBUTION



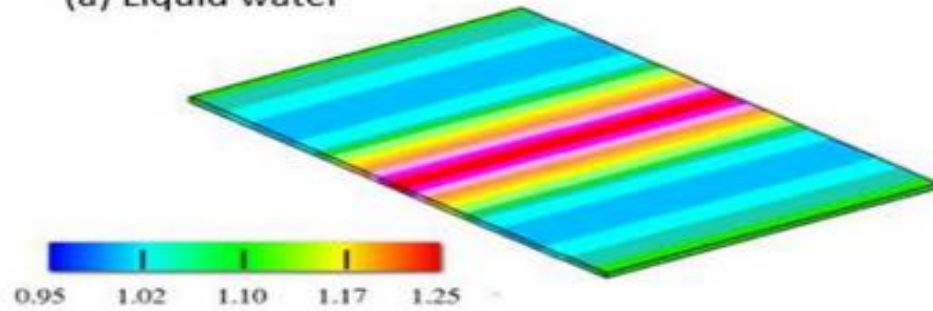
(a) Liquid water



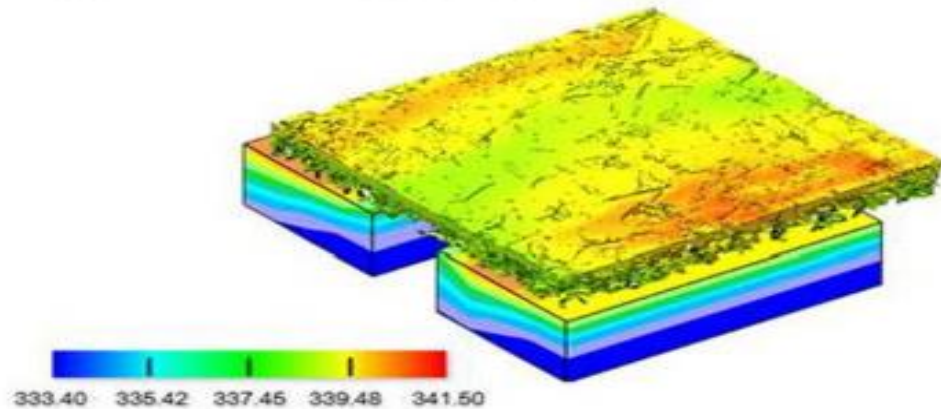
(b) Liquid water cross-section



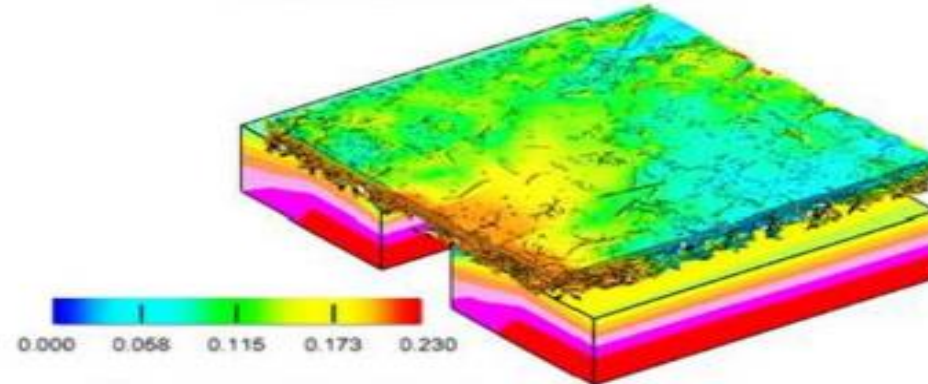
(c) Liquid saturation profiles



(d) Current density (A/cm²)



(e) Temperature (K)



(f) Oxygen mass fraction

对水的控制

WATER CONTROL

确保膜完全水合

01

为确保交换膜的含水量，在电堆刚启动的时候在能保证供氧量的情况下应该降低空气流道流速尤其是空气干燥的时候，水冷堆一般有空气加湿装置相对容易控制

避免水淹

02

水淹又分三种催化剂表面水淹、空气扩散层水淹、气体气流道水淹

在正常运行的情况下一般需要阴极排水，就是让多余的空气带走反应水，阴极保湿调节还是排水调节往往取决于空气湿度、电堆输出功率、空气流道设计等多种因素

对热的控制

HEAT CONTROL

质子交换膜温度控制

质子交换膜不能超过它的安全温度否则会使膜内水分丧失并能造成膜损伤。
一般情况下控制系统尽力将交换膜的温度控制在50—80度之间



低温环境下保温操作

对于空冷堆来说，刚启动时要做保温操作，在空气侧能保证氧气供应量的前提下尽力减少空气流量，但是还要防止水淹的产生



运行过程中散热操作

在电堆正常运行过程中，只要能控制电堆温度不要超过最高温度即可，空冷堆冷却电堆的方式主要靠加大空气流量，水冷堆除了加大空气流量还可以使用冷却液循环降温



对气的控制

GAS CONTROL

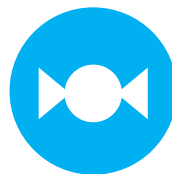


压力控制



维持阴阳极适当的压力有利于提高气体分子密度，增加MEA效率

压力差控制



为了避免压力差过大采取两种做法，一种是在排氢操作是适当减低空压机转速，使阴极和阳极气压同步下降，这样能避免膜损伤但是不能避免电压波动，另一种做法是在打开氢气出口电磁阀是同时增加电堆氢气入口压力在排氢过程中基本保持电堆氢气侧压力不变，这样既能避免膜损伤又能降低电压波动

对电的控制

ELECTRICITY CONTROL

电压下降 原因

每片最低电压，电堆最低电压 水淹可能性

控制系统要保障电堆的最低电压，只有大于这个电压才可以对外输出电能，低电压大电流对催化剂不利
电堆电压急剧降低也是控制系统判断电堆水淹的依据之一

最小电压 断电保护

减轻排水负担、保护MEA

电压降低后判断是否排氢造成，如果不是判断是否水淹造成，如果是就采取排水控制，如果电压还是不能恢复就要考虑切断电堆的对外输出，降低排水负担

对电的控制

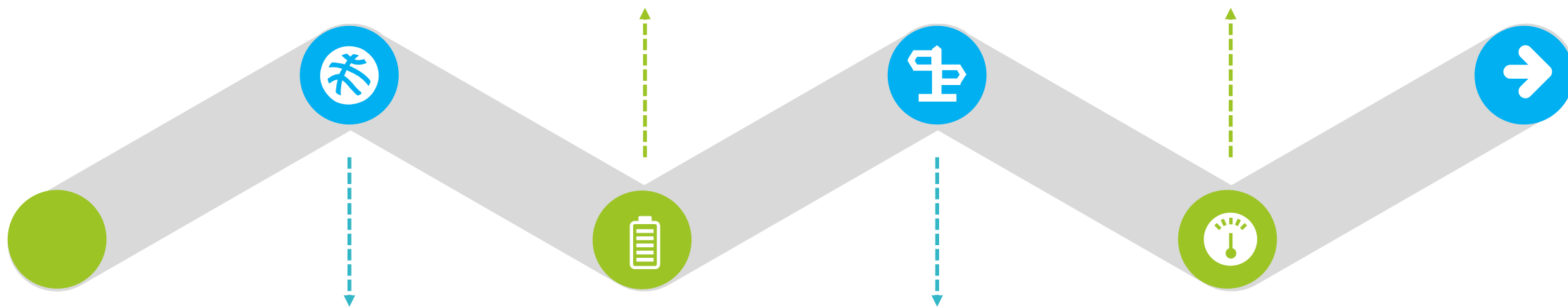
ELECTRICITY CONTROL

最小电压—单片、整堆

电堆中每片电池电压应该基本相同，在电堆运行的过程中应该检测每片电池的电压变化，但是多数情况只能检测整个电堆电压，不能检测每片电池电压，空冷堆更是如此

快速回复电压

控制系统的目标是在负载电阻不变的情况下，尽力保持最大电压值，在负载电阻值不变负载功率直接和电压正相关，快速回复电压是提高电堆输出能量的必要办法



电压下降原因--排氢、水淹

控制系统要保障电堆的最低电压，只有大于这个电压才可以对外输出电能，低电压大电流对催化剂不利
电堆电压急剧降低也是控制系统判断电堆水淹的依据之一

断电目的—减轻排水负担、保护MEA

电压降低后判断是否排氢造成，如果不是判断是否水淹造成，如果是就采取排水控制，如果电压还是不能恢复就要考虑切断电堆的对外输出，降低排水负担

非线性关系

NON-LINEAR RELATIONSHIP

质子交换膜厚度

01

催化剂层-配比、厚度

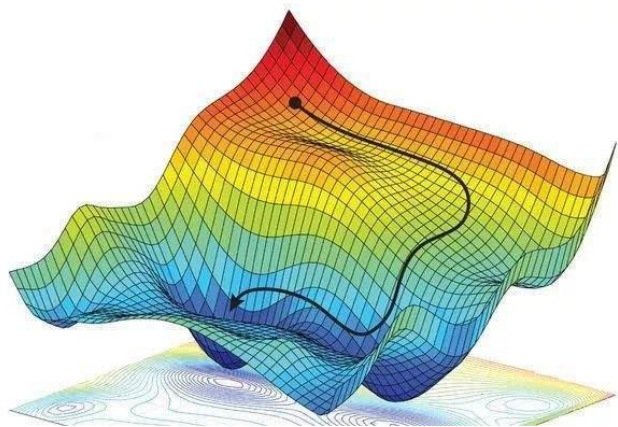
02

GDL--微孔层厚度、孔隙率

03

GDL—孔隙率、疏水性

04



05

双极板流道形状

06

进口气体温度湿度

07

空压机转速

08

水泵转速

章节
Part 03

控制流程

控制流程

CONTROL FLOW

01



开机控制

02



运行控制

排氢控制



03

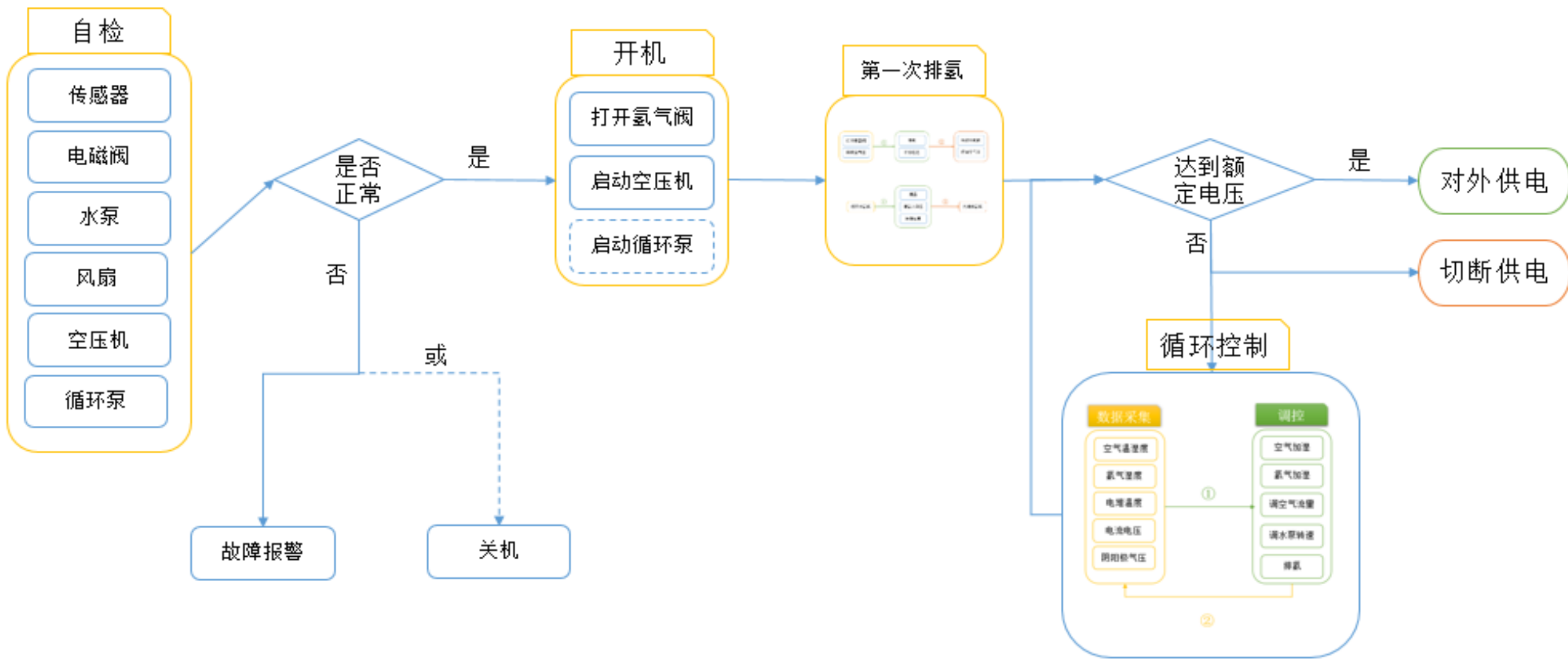
关机控制



04

开机控制

CONTROL FLOW



运行控制

CONTROL FLOW

运行控制

控制系统的核心工作就是采集数据->计算->调控->采集数据这样的循环反复工作，中间的计算过程比较困难，采用机器学习的办法能降低很大的难度

数据采集

空气温湿度

氢气湿度

电堆温度

电流电压

阴阳极气压

空气流量

调控

空气加湿

氢气加湿

调空气流量

调水泵转速

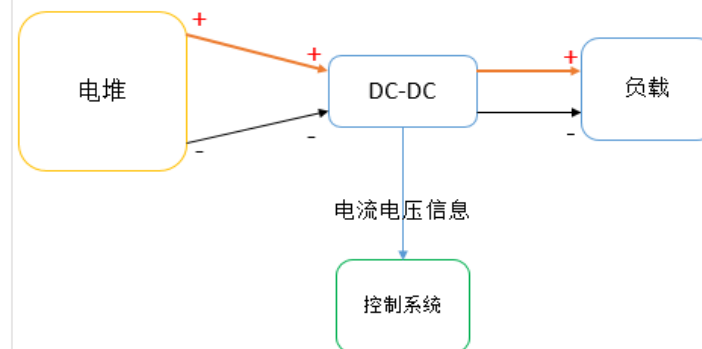
调循环泵

排氢

①

②

对于电堆最低电压的保护操作有两种方式，一是DCDC设备可设置最低输入电压，低于这个电压就不工作，二是控制系统可以控制DCDC设备，可以使其切断对负载的供电和接通对负载的供电

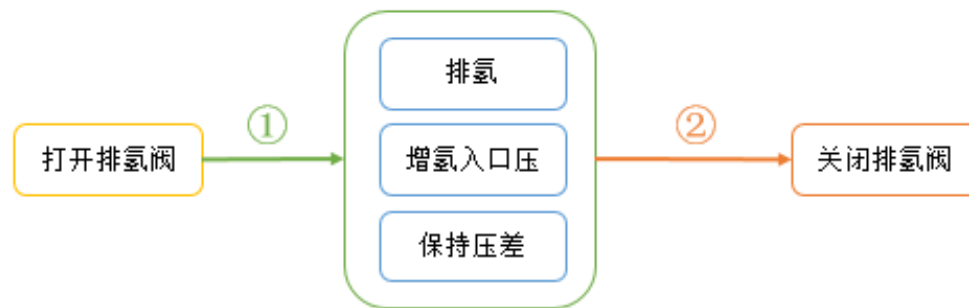
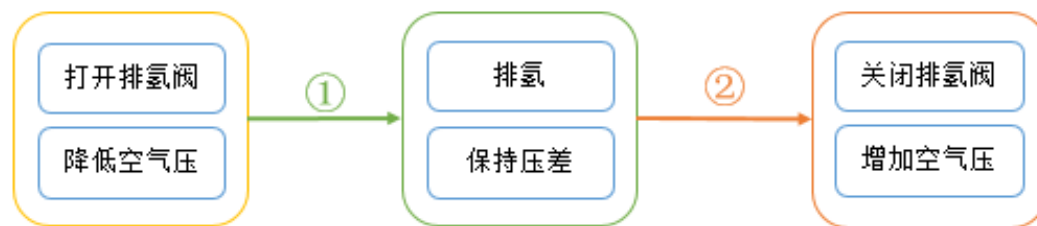


排氢控制

CONTROL FLOW

排氢操作

排氢操作有两种方式
第一种是氢气侧压力降低、空气侧也压力降低
第二种是保持氢气侧压力不变



第一种操作方式，打开排氢阀的同时适当降低空气侧压力，使氢气侧和空气侧的压力差尽力保持不变。使用这种方式电堆电压由于气体压力变小电压会下降。在排氢完成后关闭排氢阀时也要增加空气侧压力，目的还是保持压力差不变。

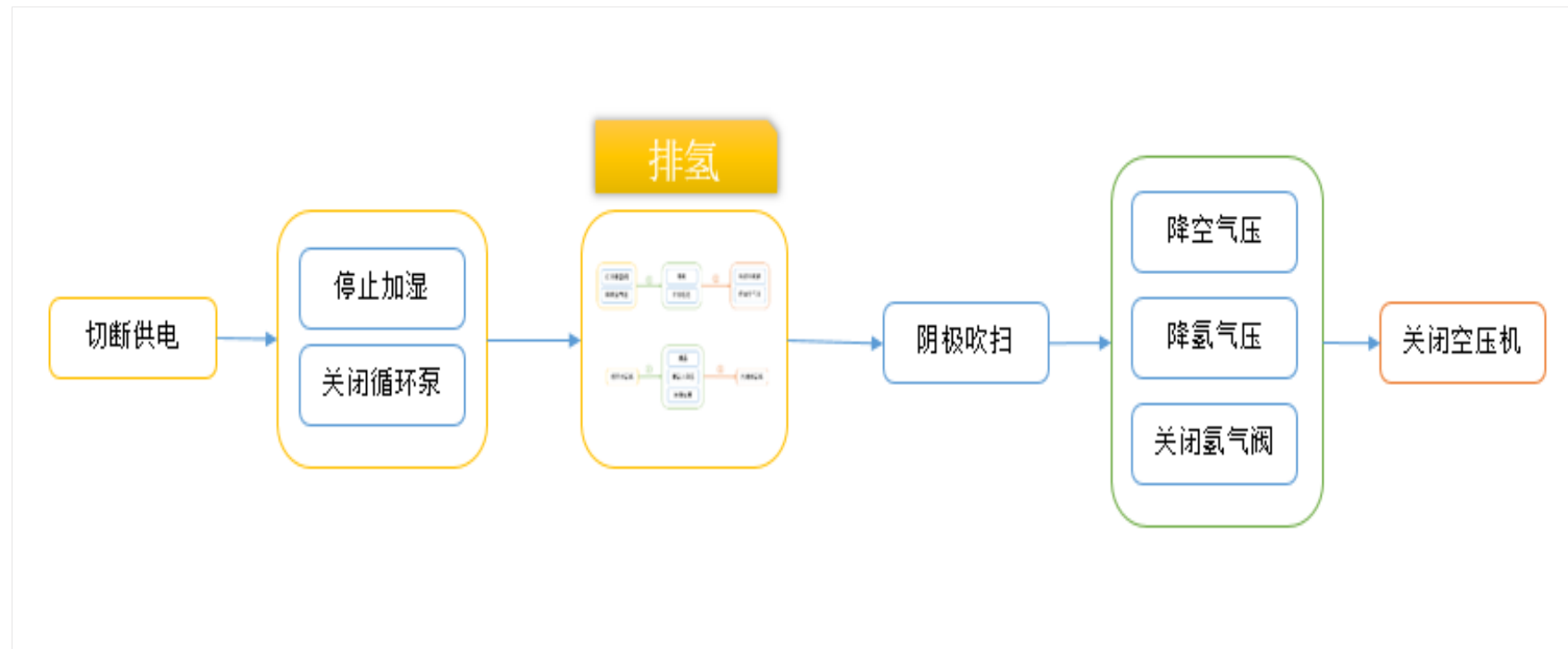
第二种操作方式，在打开排氢阀的同时适当加大氢气入口压力作为排氢操作压力损失的补偿，使氢气侧压力基本不变，氢气侧和氧气侧压力差也基本保持不变。氢气完成直接关闭排氢阀即可。

关机氢控制

CONTROL FLOW

关机操作

关机过程中首先要能切断对DCDC的供电或者控制系统可以告知DCDC不要对外负载，之后要关闭加湿器 做一次排氢操作(排除水分) 阴极吹扫，排氢和阴极吹散的目的是排除水分防止阴阳极发霉、冬季结冰等，之后就可以同步降低空气压和氢气压直到关闭氢气阀，之后关闭空压机，最后记录关机时间



章节
Part 04

基于人工智能的控制

基于人工智能的控制

ARTIFICIAL INTELLIGENCE

01



人工智能原理

02



电堆共同学习

03



技术架构

离线智能控制



04

实时监控



05

参考实现



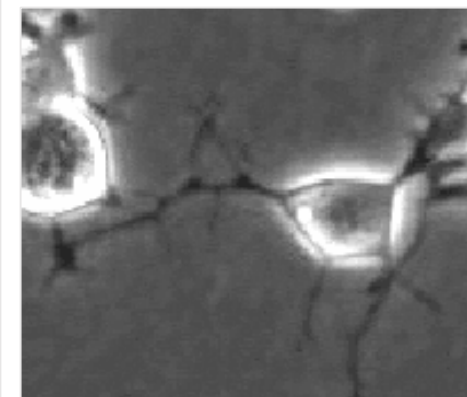
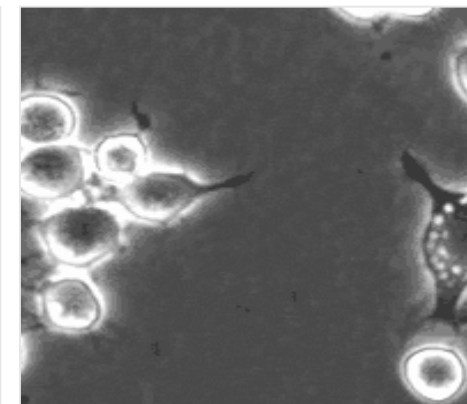
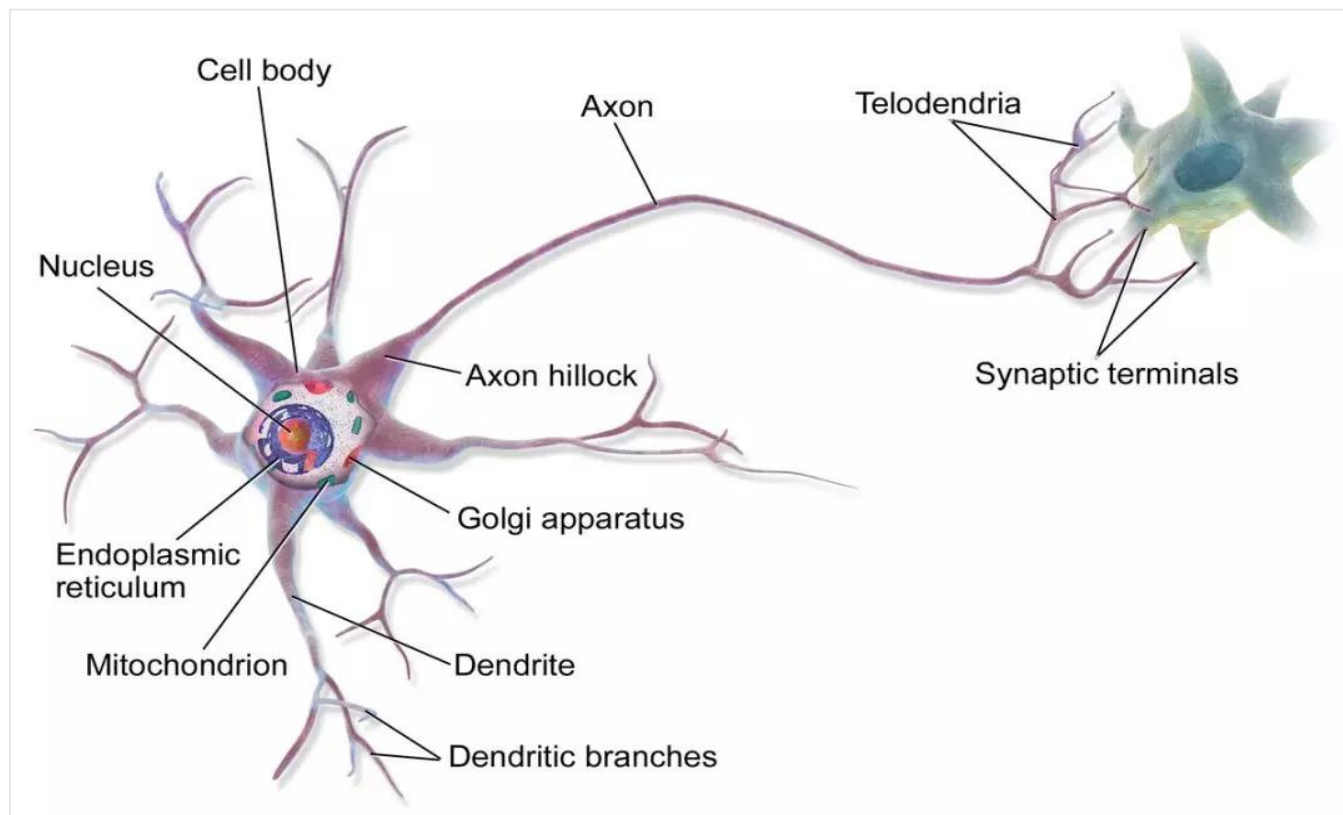
06

人工智能原理

PRINCIPLES OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

生物神经细胞

人脑中存在大量的神经元细胞，人体所有的感知信息都是通过神经元来传递的。神经元细胞有两个重要的部分。一个是分叉树状的突起，称为树突，用于接收多个其它神经元传入的信息。一个是细长的轴突，用于向其它神经元发送信息

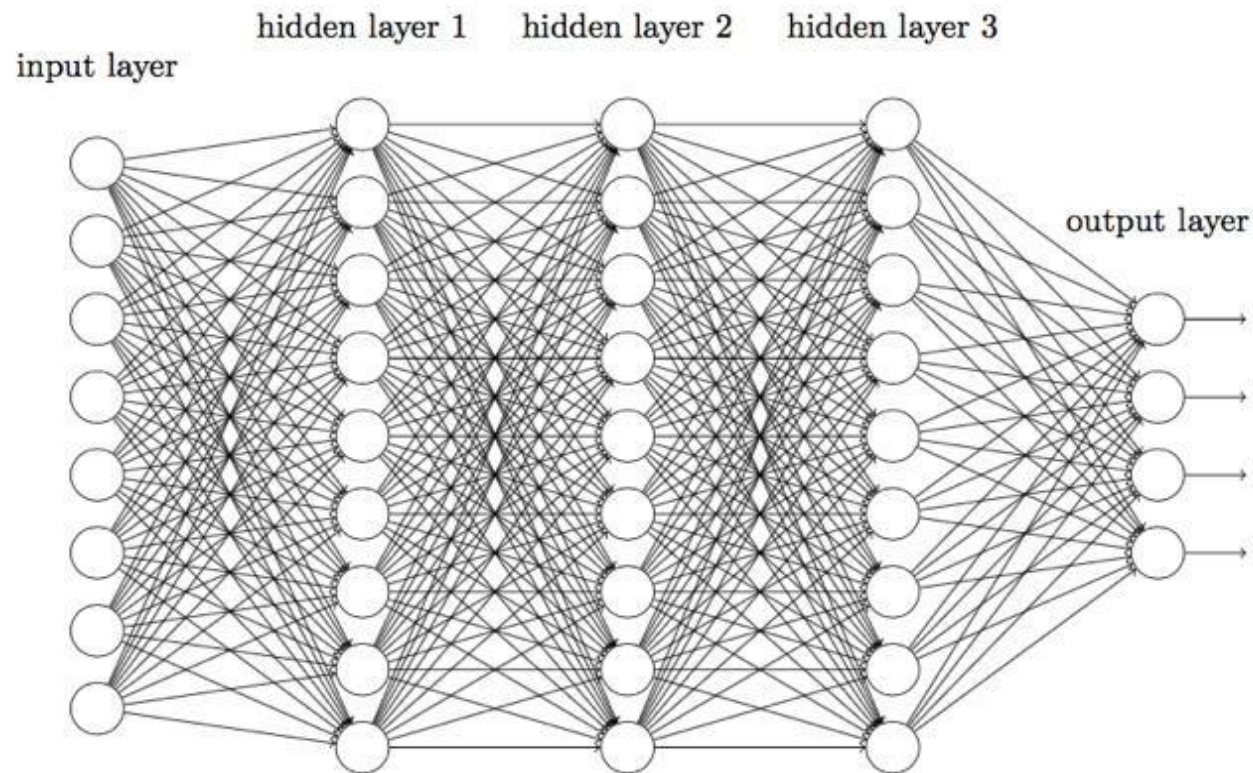


深度学习

DEEP LEARNING

人工模拟神经网络

人工模拟神经网络，计算机模拟简化的多个神经元和多个神经元之间的连接，各个神经元之间设计权值，单个神经元将所有的连接来的节点的数据进行加权求和，之后传给下一层的神经元，依次向前传播
有监督的神经网络在最后一层节点一般使用梯度下降算法向后更新各个节点的权值

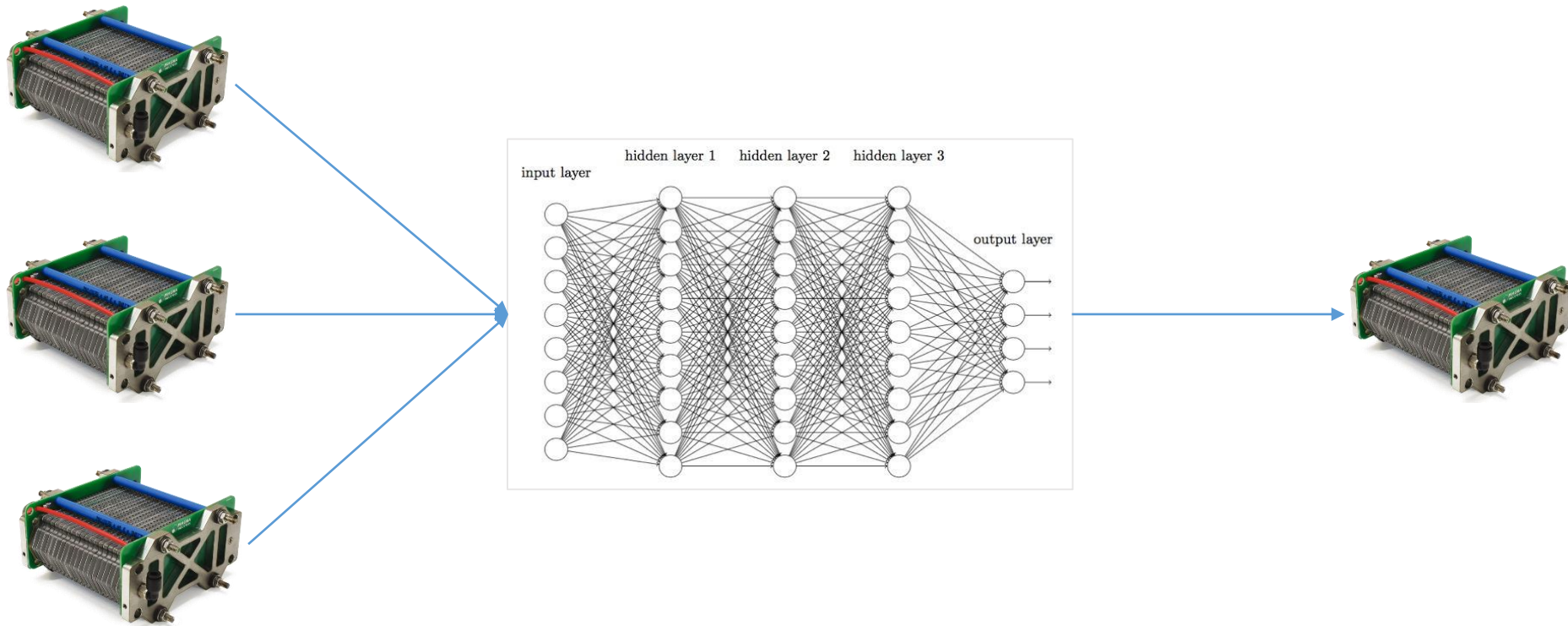


3 6 0 5 0 1 1 3 9 3 1 5 0 9 0 8 7 1
2 5 6 9 8 8 4 1 4 4 6 4 5 3 3 4 3 4
0 4 3 7 7 5 0 5 4 2 0 9 8 1 2 4 9 3 5
1 1 1 7 4 7 7 2 6 5 1 8 2 4 1 1 5 6 5
7 0 9 5 6 3 2 6 6 7 7 1 5 2 3 2 3 5 6
0 0 2 0 8 1 4 0 9 7 9 3 6 9 3 4 3 1 8
2 7 6 7 5 6 6 5 8 1 6 8 7 1 0 5 3 8 2
2 3 9 6 3 0 4 5 8 0 0 4 0 4 6 6 6 9 3
4 1 1 4 1 3 1 2 3 4 8 1 5 5 0 7 9 4 8
3 6 0 3 0 1 1 3 9 3 1 5 0 4 9 6 8 7 1
2 5 6 9 8 8 4 1 4 4 6 4 5 3 3 4 3 4
0 4 3 7 7 5 0 5 4 2 0 9 8 1 2 4 9 3 5
1 1 1 7 4 7 7 2 6 5 1 8 2 4 1 1 5 6 5
7 0 9 5 6 3 2 6 6 7 7 1 5 2 3 2 3 5 6



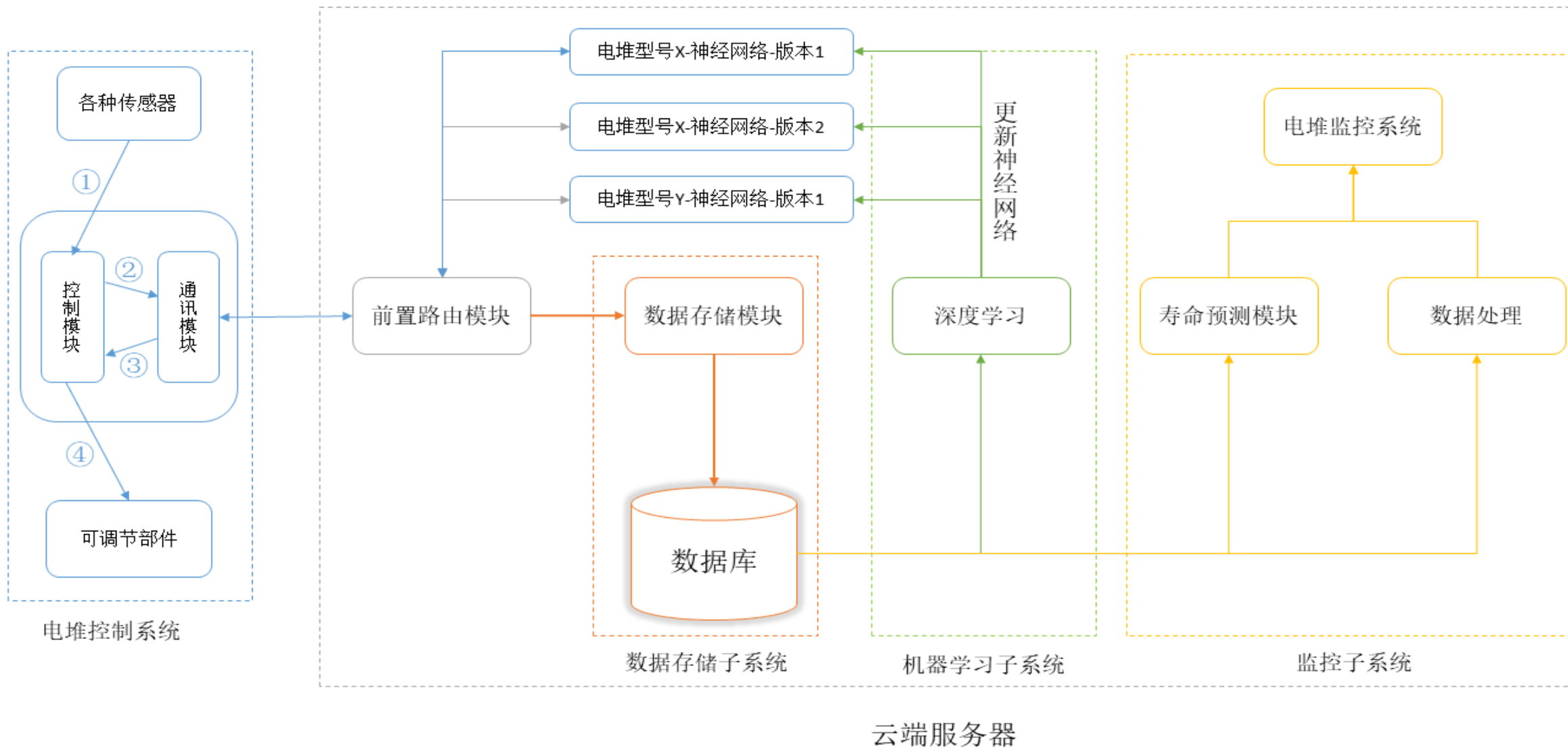
电堆共同学习

STACK LEARNING TOGETHER



技术架构

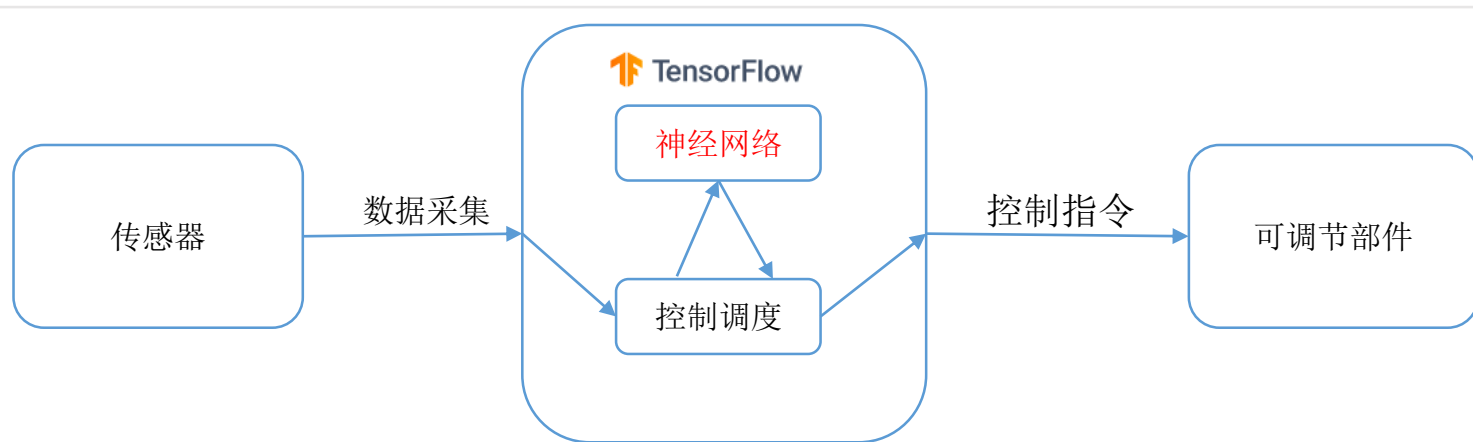
TECHNICAL ARCHITECTURE



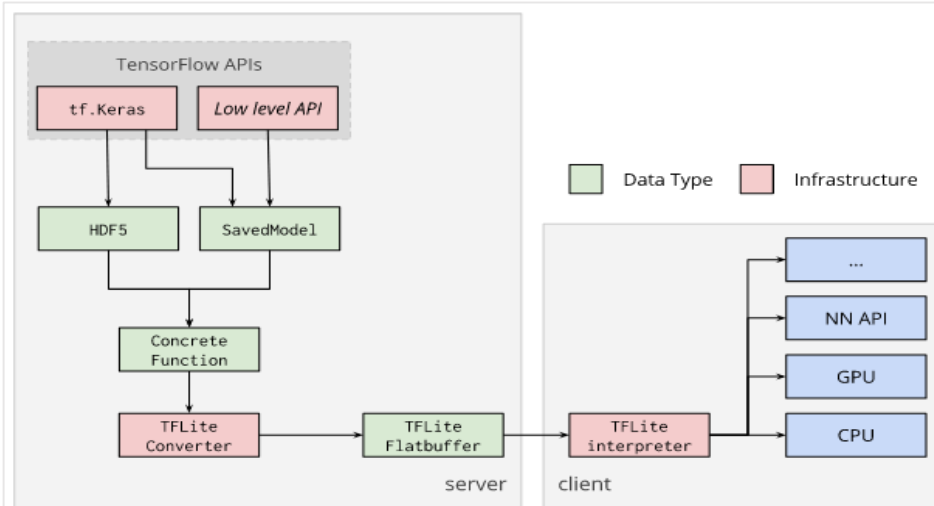
离线人工智能控制

OFF LINE TECHNICAL ARCHITECTURE

TensorFlow Lite



IOT



TensorFlow Lite for iOS

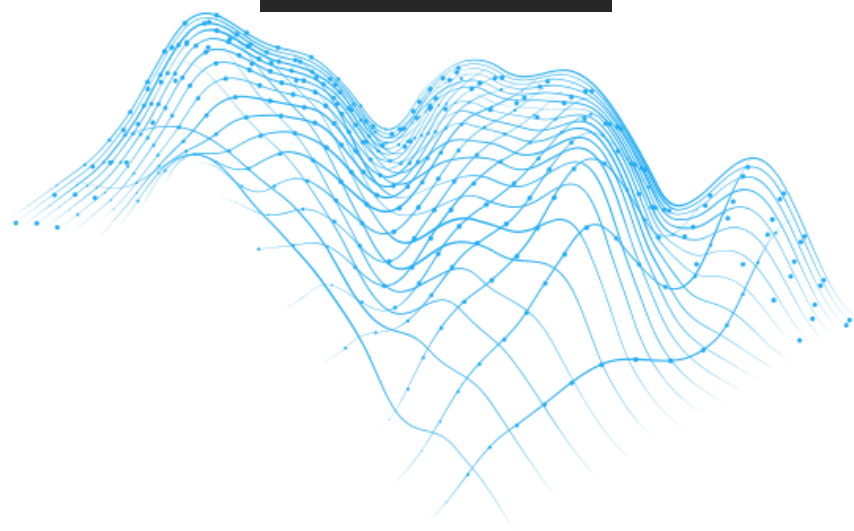
TensorFlow Lite for ARM64 boards

TensorFlow Lite for Raspberry Pi

TensorFlow Lite for Microcontroller

实时监控

REAL TIME MONITORING

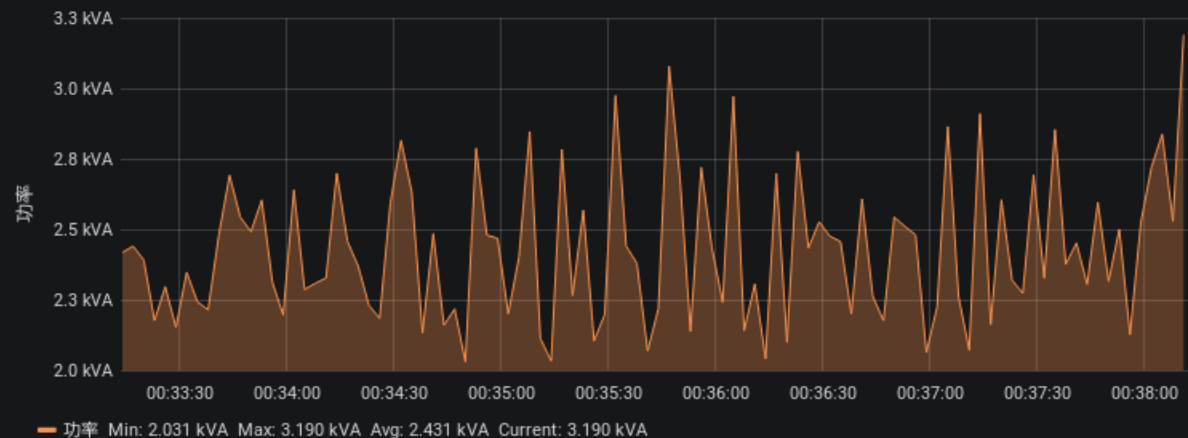


+

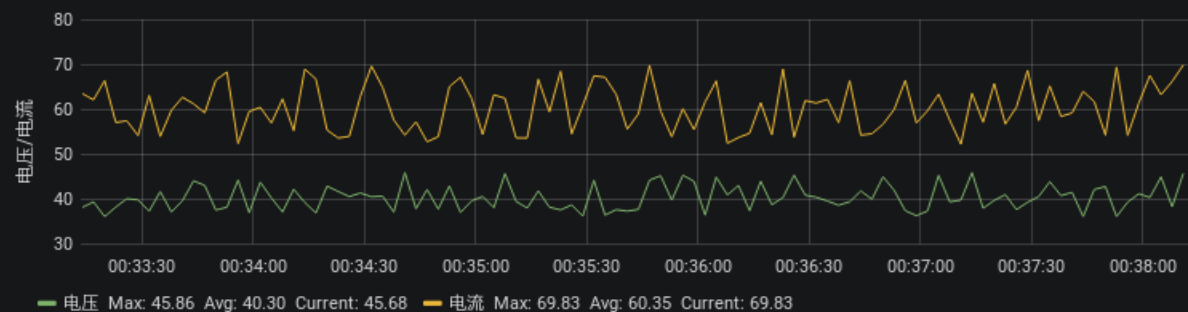




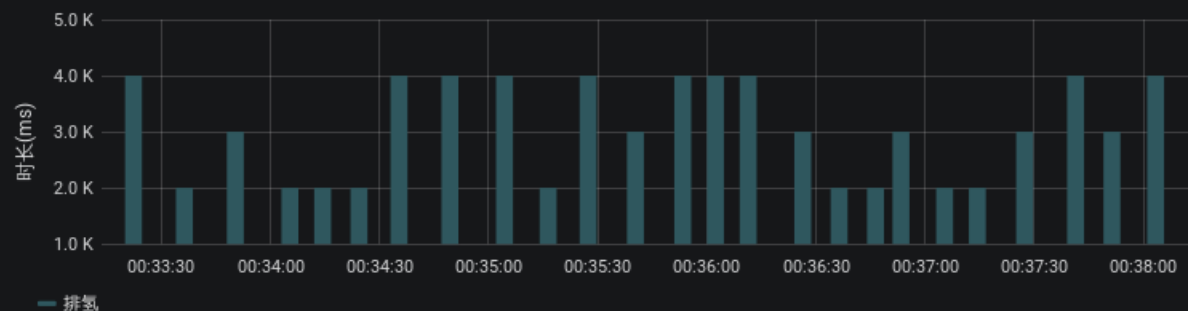
功率输出



电压电流



排氢



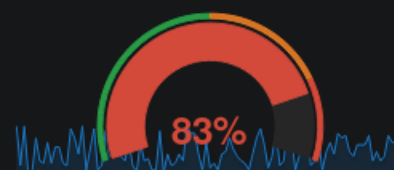
空压机转速



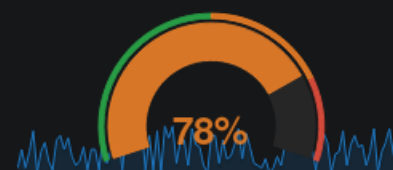
水泵转速



空压机PWM



水泵PWM



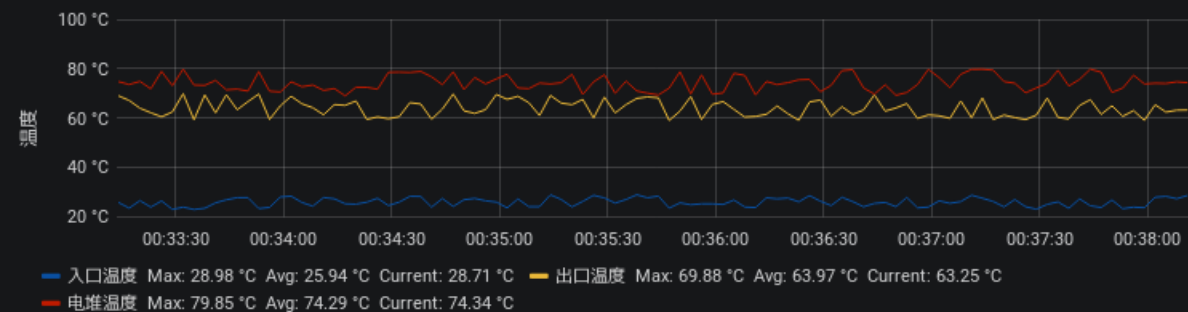
运行模式

AUTO

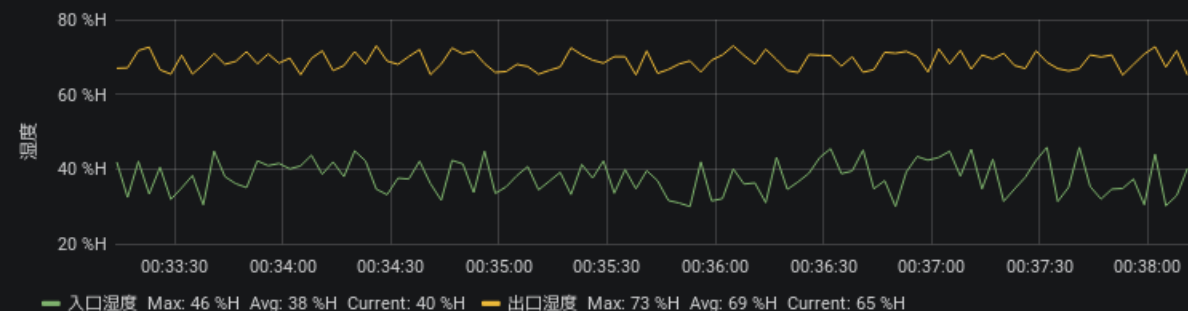
输出偏好

B级

温度



湿度



氢燃料电池

控制系统设计思想及实践

贾杰锋 编著



参考实现

REFERENCE IMPLEMENTATION



氢燃料电池控制板 B-36

B-36主要作为技术验证性的控制板，不建议商用，控制板使用raspberry pi zero W 作为核心板，控制程序为fcs采用C开发

数据处理系统 fcs -store

Fcs-store主要负责服务器端数据处理包括报文解析、数据存储、监控数据入库、人工智能预测等功能

监控系统 fcs-monitor

Fcs-monitor主要提供电堆的实时监控功能，使用fcs-store存入时序数据库中的数据

机器学习系统 fcs-ai

Fcs-ai主要是对电堆运行数据进行学习，更具控制板采集的数据给出预测结果，知道控制板的控制行为



THANK YOU