



OpenFC

氢燃料电池

控制系统设计思想及实践

贾杰锋 编著



编者序

氢燃料电池控制系统在整个氢燃料电池系统中的角色就像 BMS (电池管理系统) 在电动车的锂电池系统中扮演的角色一样。但是氢燃料电池控制系统在整个氢燃料系统中的重要性要大于 BMS 在锂电池系统中的重要性。

氢燃料电池控制系统在整个系统中的作用主要有电堆的启动、运行、水热管理、状态监控、报警、提高功率输出、延长电堆寿命、保障电堆在不同环境下的稳态运行、控制电堆在安全区间运行。

氢燃料电池控制系统给电堆赋以智能, 让其能够应对复杂多变的工作环境。空气和氢气的温度湿度, 电堆本身的温度、当前电流电压的大小、空气流量、空气压力等因素影响着电堆的输出功率, 并且在电堆工作的过程中又产生水和热进而又改变了的工作环境, 如果生成的水没有及时排除电堆会造成水淹, 使得电堆功率迅速降低。各种因素都影响着电堆的效率、功率输出、甚至寿命, 各种因素相互影响也相互制约, 控制系统就是要根据各种因素变化合理调节其因素使电堆始终运行在高效状态的系统。

氢燃料电池控制系统未来的发展方向必定会结合人工智能。控制系统要根据众多参数进行计算并且各个参数之间是非线性关系, 这使得在采集完各个数据后计算要控制的参数值变得非常的困难。传统做法根据仿真和实验室数据来决定的计算函数在实际的环境中效果不好, 实验数据始终都是几个工作点的数据、仿真在做的再精细也不是真是的世界。氢燃料电池控制系统结合人工智能, 将采集的传感器数据输入到人工智能的神经网络, 神经网络给出调节参数, 控制系统按着这个参数去调节, 之后再采集各个数据进行对比并反馈给神经网络, 这样神经网络就可以自主学习, 它给出的控制建议将越来越逼近最优解。如果同型号不同工作状态环境下的所有电堆都将采集数据通过网络上传到服务器训练人工智能, 这样人工智能学习速度将加倍, 让同型号的电堆共用一个“大脑”共同学习、共同校正, 这是氢燃料电池控制系统发展的必然趋势。

本书的第一章主要介绍影响电堆性能的主要因素, 控制系统工程师理解这些因素将有利于控制系统的开发工作, 也方便与电堆工程师和 MEA 工程师相互沟通和提出有用建议。

本书的第二章主要介绍控制系统对水、热、气、电的控制, 这几个因数相互制约相互影响, 也是控制系统的控制核心目标。

本书的第三章主要介绍控制系统架构设计, 本章是将控制理论应用的实践的指导, 控制系统架构设计要综合考虑可实现性、可扩展性、成本与代价、技术先进性、系统可靠性等

多种因素，也是由理论通往现实的整体规划。

本书的第四章主要介绍控制系统控制流程、在各个环节中的注意事项，属于控制系统的理论部分。

本书的第五章主要介绍 OpenFC 开源社区的氢燃料电池控制系统 FCS (Fuel Cell Control System)，介绍其软件架构、报文规范、数据处理等多个模块。FCS 遵从本书的设计思想，是本设计思想的参考实现。

本书的第六章主要介绍 FCS 使用人工智能对电堆进行控制，其中包括了人工智能训练、数据分析、寿命预测等内容。

本书假定读者了解基本的氢燃料电池原理和水热管理知识，本书的侧重点是介绍氢燃料电池控制系统的设计思想以及在此设计思想指导下的参考实现。

贾杰锋

2019 年 5 月

目录

| | | |
|-------|-------------------|----|
| 1 | 影响电堆性能的因素..... | 6 |
| 1.1 | 质子交换膜..... | 6 |
| 1.1.1 | 质子交换原理..... | 6 |
| 1.1.2 | 水传输..... | 7 |
| 1.1.3 | PEM 选型一般原则 | 8 |
| 1.2 | 催化剂..... | 8 |
| 1.2.1 | 催化剂作用..... | 8 |
| 1.3 | PT、C、膜溶液比例..... | 8 |
| 1.4 | 气体扩散层..... | 9 |
| 1.5 | MEA 整体通透性 | 11 |
| 1.6 | 双极板..... | 11 |
| 1.6.1 | 不同样式设计 | 11 |
| 1.6.2 | 流道对水、热、气的影响..... | 12 |
| 1.7 | 温度、湿度..... | 13 |
| 1.8 | 气体压力..... | 13 |
| 1.9 | 其他因素..... | 14 |
| 2 | 水、热、气、电控制..... | 15 |
| 2.1.1 | 分布规律..... | 15 |
| 2.1.2 | 可控与不可控因素..... | 15 |
| 2.1.3 | 对水的控制..... | 16 |
| 2.1.4 | 对热的控制..... | 17 |
| 2.1.5 | 对气的控制..... | 18 |
| 2.1.6 | 对电的控制..... | 18 |
| 2.1.7 | 非线性关系..... | 19 |
| 3 | 控制系统架构设计..... | 20 |
| 3.1 | 常规设计..... | 20 |
| 3.2 | 基于人工智能的架构设计 | 20 |
| 3.2.1 | 离线人工智能控制系统..... | 21 |

| | | |
|-------|-----------------|----|
| 3.2.2 | 在线人工智能控制系统..... | 21 |
| 4 | 控制流程..... | 23 |
| 4.1 | 水冷堆控制流程..... | 23 |
| 4.1.1 | 开机流程..... | 24 |
| 4.1.2 | 控制流程..... | 25 |
| 4.1.3 | 排氢流程..... | 27 |
| 4.1.4 | 关机流程..... | 28 |
| 4.2 | 空冷堆控制流程..... | 28 |
| 4.2.1 | 开机流程..... | 29 |
| 4.2.2 | 控制流程..... | 29 |
| 4.2.3 | 排氢流程..... | 30 |
| 4.2.4 | 关机流程..... | 30 |
| 5 | 参考实现..... | 31 |
| 5.1 | FCS..... | 31 |
| 5.2 | 硬件..... | 31 |
| 5.3 | 软件..... | 32 |
| 5.4 | 通讯协议..... | 33 |
| 5.5 | 服务器端数据处理..... | 33 |
| 5.6 | 电堆状态监视..... | 33 |
| 6 | 基于人工智能的控制..... | 34 |
| 6.1 | 智能控制..... | 34 |
| 6.1.1 | 数据预处理..... | 34 |
| 6.1.2 | 分类预测..... | 36 |
| 6.2 | 寿命预测..... | 36 |

1 影响电堆性能的因素

控制系统的核心目标之一是提高电堆的输出功率,在既定硬件条件下最大限度的提高体积比功率、重量比功率,开发人员必须理解影响电堆性能的关键因素才能开发出好的控制系统,本章主要介绍这些关键因素。

1.1 质子交换膜

质子交换膜 PEM (Proton Exchange Membrane) 是氢燃料电池的核心部件,因为只能让质子通过所以这样的燃料电池才叫做“氢”燃料电池。不同厂商 PEM 的不同型号、不同厚度、不同机械性能、不同耐高温性能等特点决定着控制系统的不同控制参数或控制策略。

1.1.1 质子交换原理

质子交换膜本质上是四氟乙烯和不同全氟磺酸单体的共聚物, SO_3H 基是离子键结合在侧链末端实际上是一个 SO_3^- 离子和一个 H^+ 离子, H^+ 离子在水分子充足的情况下可以移动,这种移动是需要 H^+ 和水分子组成水合氢离子 H_3O^+ ,根据平均每个磺酸基周围水分子量的不同 H^+ 的移动方式可分为三种:

第一种,在平均每个磺酸基周围水分子比较少少的情况下, H^+ 在 H_3O^+ 之间迁移。

第二种,在平均每个磺酸基周围水分子比较多的情况下, H^+ 随 H_3O^+ 一起迁移。

第三种,在平均每个磺酸基周围水分子饱和的情况下, H^+ 、 H_2O 、 H_3O^+ 均可自由移动,此时质子电导率最高。

所有离子迁移都是以磺酸基为“基地”, H^+ 或 H_3O^+ 只是从一个“基地”迁移到另一个“基地”,对于磺酸基来说只是自己的一个 H^+ 或 H_3O^+ 被另一个 H^+ 或 H_3O^+ 所交换替代,这就是这种膜被称为“质子交换膜”而不被称为“质子筛选膜”的原因;从宏观的角度来看,就像质子从阳极穿过膜到达了阴极。

质子在阳极催化剂的作用下失去电子,阳极 H^+ 、 H_3O^+ 浓度升高,在浓度梯度和两极电势的作用下在“基地”之间迁移,总趋势是从阳极到阴极。

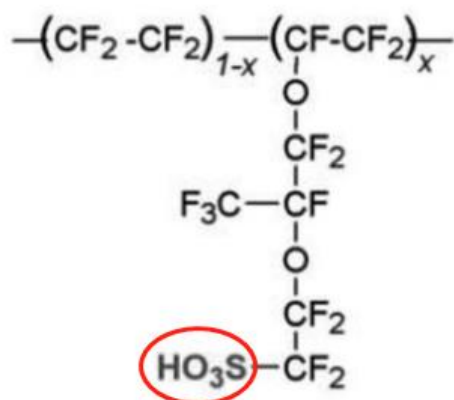


图 1.1 质子交换膜结构

电堆启动过程就是从膜的磺酸基周围水分子比较少少的状态过度到其周围水分子成饱和状态并且膜的温度达到理想温度的过程，这是电堆需要启动的本质原因。

1.1.2 水传输

在质子交换膜的工作过程中水分子有两个方向的运动，一个方向是从阳极“载着”质子向阴极运动，另一个方向是水分子由于浓度差会从阴极扩散到阳极。

电渗迁移： H_2O 和 H^+ 结合成 H_3O^+ 一起从阳极迁移到阴极的过程叫做水的电渗迁移。

反向扩散：水分子从阴极扩散到阳极的过程叫做水的反向扩散。

在磺酸基周围水分子比较多的情况下 H^+ 从阳极到达阴极的主要方式是被水分子“托运”过去的，这种情况下水的电渗迁移率最高，在膜比较厚的情况下水的反向扩散不足以抵消水的电渗迁移，使膜的阳极变得干燥，此时需要在阳极进行增湿操作。

在磺酸基周围水分子饱和的情况下 H^+ 从阳极到达阴极的主要方式是 H^+ 自己“游泳”过去的，就像水溶液中自由氢离子但会受到磺酸基影响，此时水分子电渗迁移到阴极的数量会减少，水分子反向扩散足以抵消电渗迁移作用使得阳极不易干燥，甚至有液态水生成。

| 膜厚度\膜含水量 | 不饱和状态 | 完全水合状态 |
|----------|------------|-----------|
| 厚膜 | 阳极容易干燥，需增湿 | 阳极不易干燥 |
| 薄膜 | 阳极不易干燥 | 阳极易水淹，需排水 |

表 1.1

控制系统对于阳极的控制主要有三种情况：

第一种，启动工况，首先要排出杂质气体或水蒸气，然后尽量提升阳极水含量直到饱和，虽然 MEA 主要决定着电堆的启动速度，但是如果控制系统如配合得当可以使得电堆启动速

度更快。

第二种，正常运行工况，定期排水或者增湿，这主要根据膜和 MEA 的特性决定。

第三种，关机操作，主要排水除湿防止冬季结冰夏季发霉从而损坏 MEA。

关于对阴阳极水的管理我们在后面的章节里会详细讨论。

1.1.3 PEM 选型一般原则

在机械强度、可靠性、耐久性、耐高温性等都能达到要求的情况下质子交换膜的厚度越薄越好，但大多数情况都不能都如愿，薄的膜质子更容易通过能提供大的电流密度但容易破损，耐久度会低；厚的膜机械强度好，耐久性也好，但质子不容易通过，阳极容易干燥，电流密度一般不高，输出功率响应性也低。

现实中都是在各个特性间进行取舍与平衡，不同厂商不同型号膜的特性各不相同，在膜的选型中要知道控制系统能够弥补膜那些特性的不足或者能够增强那些特性，是否能够满足整个氢燃料电池系统的设计目标和使用场景。

1.2 催化剂

1.2.1 催化剂作用

催化剂在阳极表面将氢气催化为两个质子，质子再经催化失去电子成为 H^+ 便可以通过膜，催化剂在阴极将氧气催化为氧原子，再结合电子和膜传递过来的质子生成水。在电堆的水热管理中其中一个重要的目标就是防止液态水在阴阳两极汇聚，否则将阻断阳极和氢气、阴极和氧气的接触进而中断化学反应，使电堆功率、电压急剧下降。

1.3 PT、C、膜溶液比例

催化剂、碳颗粒、膜溶液按比例混合经过静电喷涂才固定到质子交换膜的两侧的，阳极和阴极使用的催化剂量也不相同，这直接影响着催化效率和质子传递性能。

催化剂、碳颗粒、膜溶液配比数据各个厂商不尽相同并作为商业秘密大多不予公开。不过催化层的厚度应该尽量薄，这样能提高电堆性能，但是催化层太薄 PT 颗粒和 C 颗粒容易脱落使得 MEA 耐久性降低。

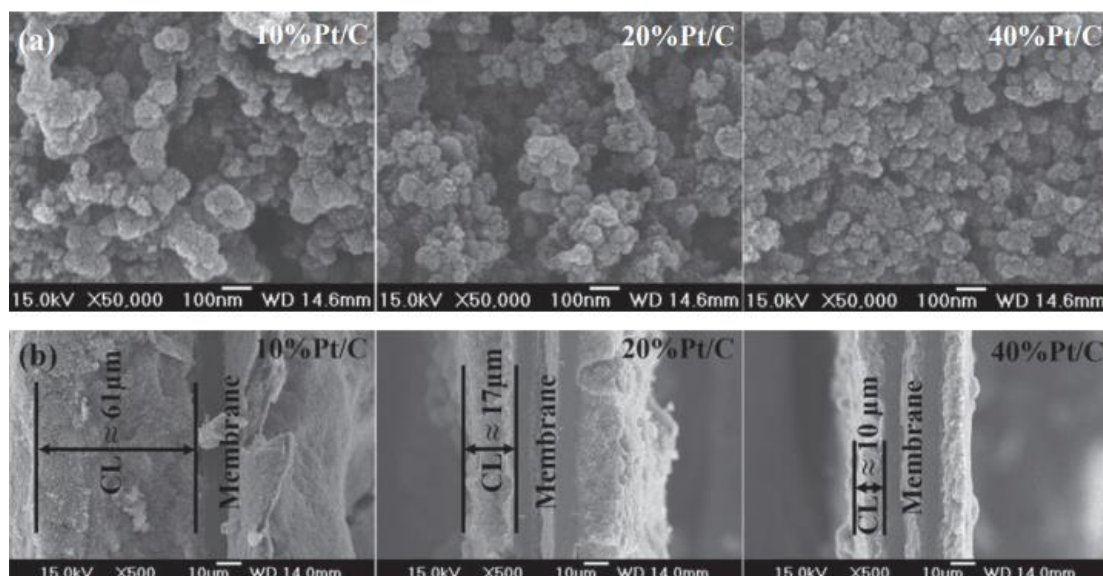


图 1.2 不同 Pt 比例的催化层

各个厂商制作催化层的技术水平也不尽相同，下图是不同厂商的带催化层的膜在光学显微镜下的图像，左图催化剂层比较细腻、右图可以看到金光闪闪的铂金颗粒。

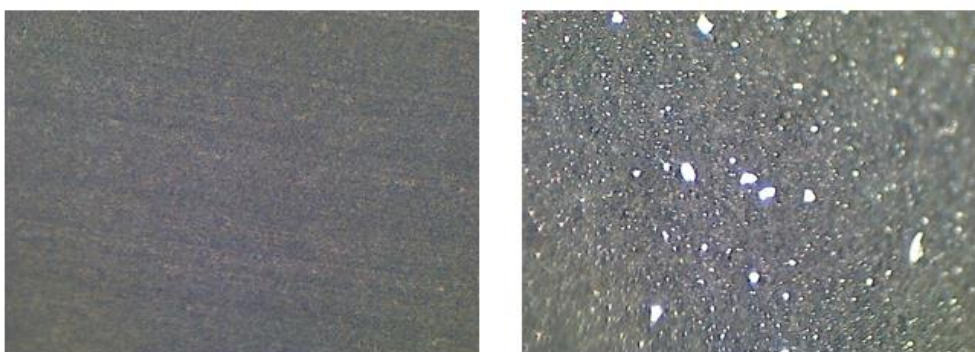


图 1.3 不同厂商 CCM 比较

1.4 气体扩散层

气体扩散层 GDL(Gas Diffusion Layer)，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。

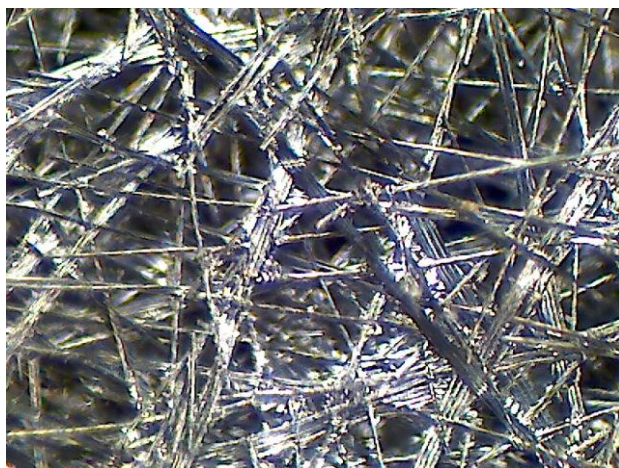


图 1.4 气体扩散层

GDL 在和催化剂接触面上还有微孔层，主要用来保证电接触良好和水进出扩散层的高效传输。

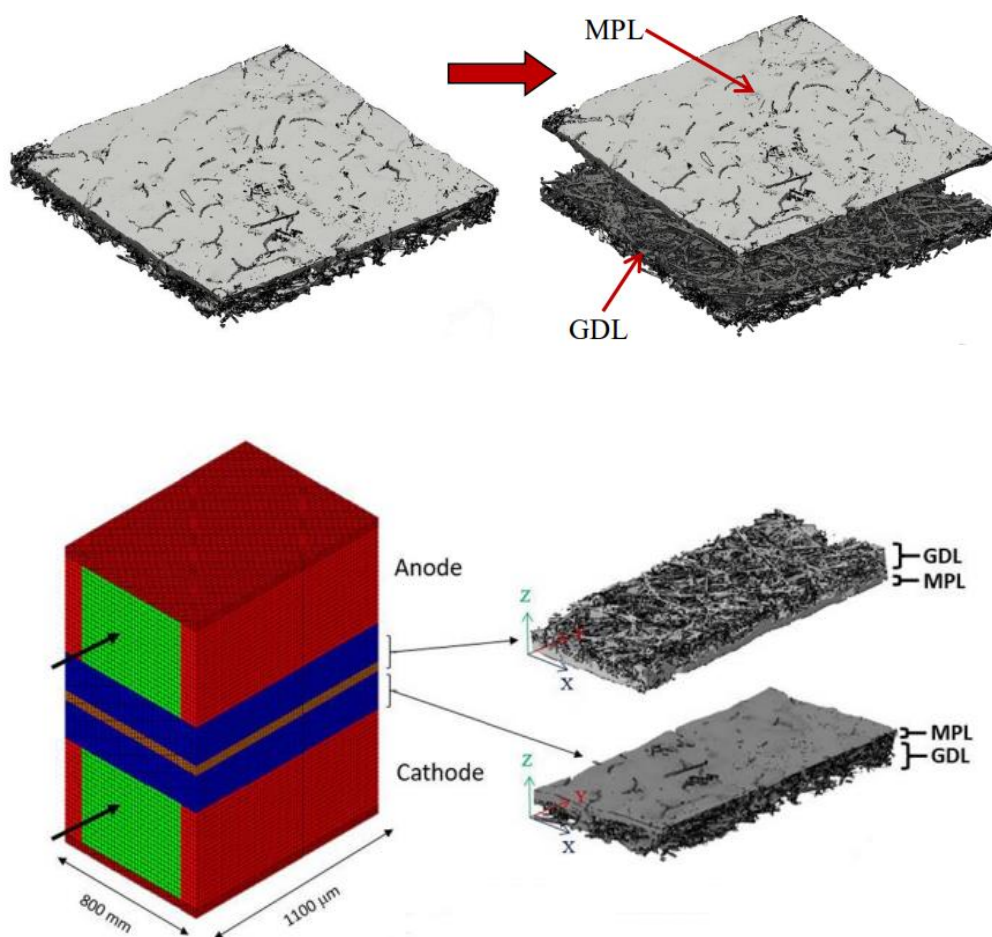


图 1.5 气体扩散层和微孔层

在能提供高效导电、导热、水传输效率和机械支撑的情况下气体扩散层的孔隙率约大越

好，这样比较容易进行气体交换（水蒸气换出、氧气进入或氢气进入、水蒸气换出），不容易造成水淹，对控制系统的设计要求会减低很多。

双极板的流道设计也要考虑到气体扩散层的特性，气体在流道中成滚流或涡流的方式前进更有利于排水、增湿、气体交换，这样流道中的气体流量或流速就可以降低，能为水热管理留下更大的操作余度。

1.5 MEA 整体通透性

膜电极 MEA(Membrane Electrode Assemblies)，在设计之初就决定了它是为空冷堆还是水冷堆而生的。

一种设计良好的 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。而在现实中往往质子交换膜的性能没有被完全发挥出来，比如在膜完全水合状态下，膜温度也是最佳温度，此时膜的性能最佳能够传递更多的质子，但是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，假设催化层喷涂不厚质子电导率和膜接近，但是由于阳极催化剂量不够或者催化剂颗粒表面积不够不能催化出足够多的质子这同样制约着 MEA 的整体通透性。再假设催化剂能够提供足够多的质子，还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。

一种设计良好的 MEA 应该是尽可能的发挥质子交换膜的质子电导率，最大限度的节省催化剂（pt、pt/ru）使用量。

同样的道理，一个设计良好的控制系统也应该能最大限度的发挥 MEA 整体质子电导率，避免电堆水淹、缺氧、缺压，保持膜的最佳温度和湿度。

1.6 双极板

1.6.1 不同样式设计

双极板的流道设计样式繁多，双极板流道的作用主要有为反应气体提供通道、散热、排水等。

流道结构分为：直通道、十字交叉通道、蛇形单通道、蛇形多通道、混合蛇形通道、仿生通道等等。

1.6.2 流道对水、热、气的影响

如果流道设计的窄而长，氢气侧水（液态或气态）、杂质气体容易在出口端聚集，随着氢气的反应消耗，临近出口的气体压力会降低，这是压降现象。如果使用氢循环泵排水问题可以解决但是压降问题还是会存在；氧气侧由于空气在流道中边经过边反应，流道过长、空气流速过低的话就会造成空气还没有经过整个流道其氧气便消耗殆尽，浪费了剩余流道的资源也就是变相降低了质子交换膜有效表面积。

空冷堆一般采用阳极闭口阴极开口的设计，氢气侧一般采用电磁阀直接排氢，目的是排水、排杂质气体，对于窄而长的流道设计，这种情况下控制系统应该提高排氢频率减少单次排氢时长，排氢口应该检测湿度形成闭环控制，阳极排水、排杂质会造成一定的氢气浪费，为了减少浪费可以在氧气侧加大空气流量，让空气带走阴极更多的水这样反扩散到阳极的水得到一定程度减少，从而降低阳极排氢负担，但是如果阴极空气流量太大也会带走更多的热量可能会造成温度达不到最佳温度，这不仅考验双极板的设计能力也考验控制系统的控制策略。

流道不同形状、宽度、长度的设计对散热或保持温度都有影响，反应气体在刚进入流道时氧气含量高、温度低、湿度低，在向出口流动的过程中湿度增加、热量汇聚、氧含量降低。

| 气体\流道 | 流道初段 | 流道中段 | 流道末端 |
|--------|-----------|-----------|--------------|
| 阴极(开口) | 氧气含量高、湿度低 | 湿度增加、温度增加 | 湿度高、温度高、氧含量低 |
| 阳极(闭口) | 湿度低 | 湿度增加 | 湿度高、杂质气体累积 |

表 1.2

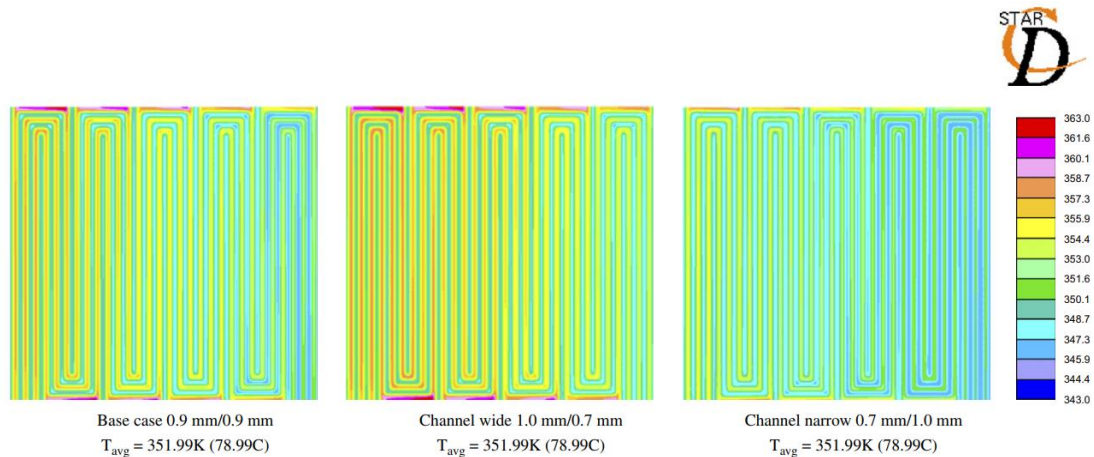
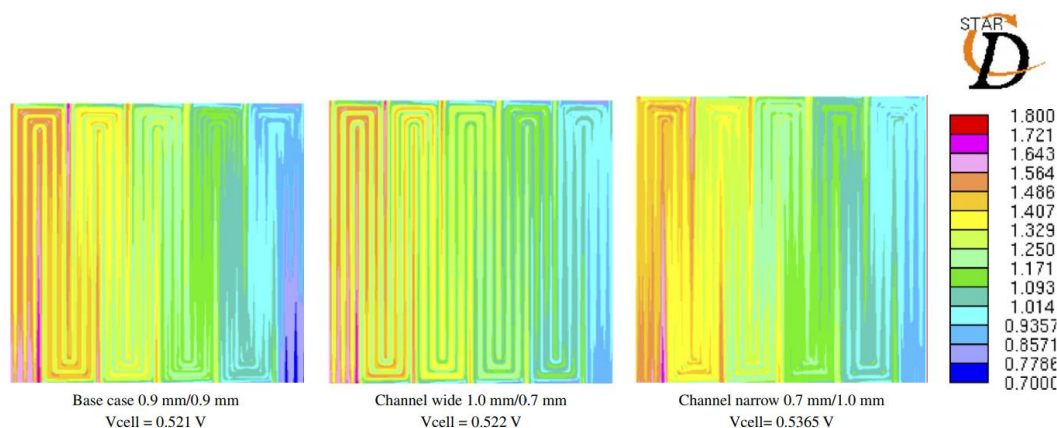
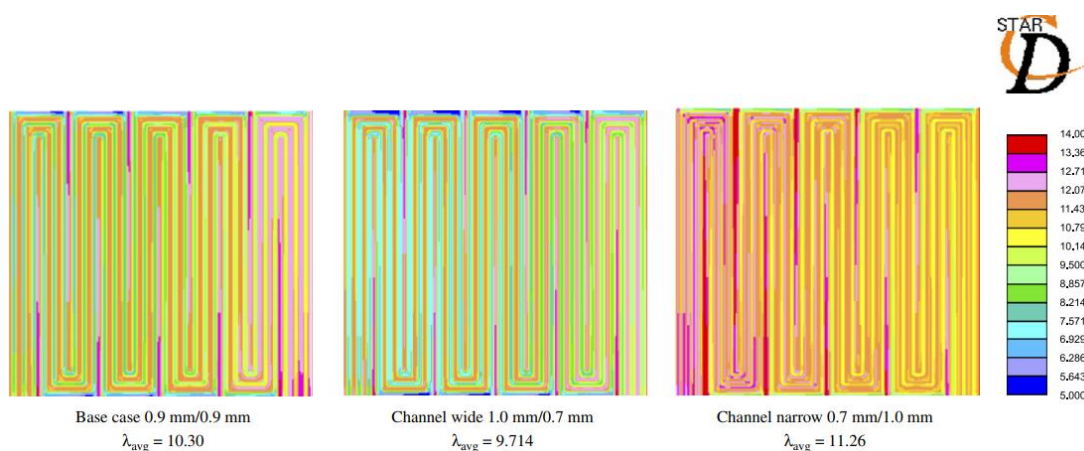


图 1.6 不同流道宽度下阳极膜表面温度($i_{avg} = 1.2 \text{ A/cm}^2$)

图 1.7 不同流道宽度下电流密度($I_{avg} = 1.2 \text{ A/cm}^2$)图 1.8 不同流道宽度下膜本身含水量($I_{avg} = 1.2 \text{ A/cm}^2$)

1.7 温度、湿度

电堆的温度、湿度控制也叫做电堆的水热管理，是控制系统的核心工作，但是要注意的是控制系统要调控的温度、湿度是质子交换膜的的温度和含水量，只有保证质子交换膜在最佳的温度和含水量下才能确保电堆的输出功率，因为在实践中质子交换膜的的温度和含水量不易检测才通过间接的方式等价或换算取得。

在实践中经常拿电堆的温度当做质子交换膜的的温度，用阴极流道出口湿度来换算质子交换膜本身的含水量（水合程度），不同型号的电堆、不同型号的质子交换膜换算公式不同，这需要和电堆工程师或 MEA 工程师沟通。

1.8 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。控制系统要设法避免或减弱这种压力变化和压差变化。

1.9 其他因素

一氧化碳等有害气体会使催化剂中毒降低催化效率,在这个氢燃料电池系统中应考虑这个问题,解决的办法有在空气侧安装过滤装置或者控制系统检测到有害气体会将电堆暂停工作,这主要取决于电堆的使用环境和成本控制。

电堆的装配中紧固压力对 MEA 和双极板之间电接触和电堆内阻有直接关系,控制系统对这种情况无能为力。

2 水、热、气、电控制

2.1.1 分布规律

在电堆内部不同区域的水分（液态、气态）、热、氧含量、电流密度分布不同，将视角转移到阴极一个流道处我们分析一下水、热、气、电的分布规律。

液态水比较容易集中在流道正对着的气体扩散层中(小图 a)，在气体扩散层中微孔层中的液态水最先聚集。

热量比较容易集中在扩散层和双极板接触的区域(小图 e)，这个区域不是电流最大的区域，也不是产生热量最大的区域之所以温度高是因为流道中的空气不容易带走这个区域的热，更容易带走流道上下方的热量。

含氧量比较高的区域是通过流道和气体扩散层最容易达到的区域(小图 f)。

电路密度分布最集中的地方是和空气流到最近的区域(小图 d)。

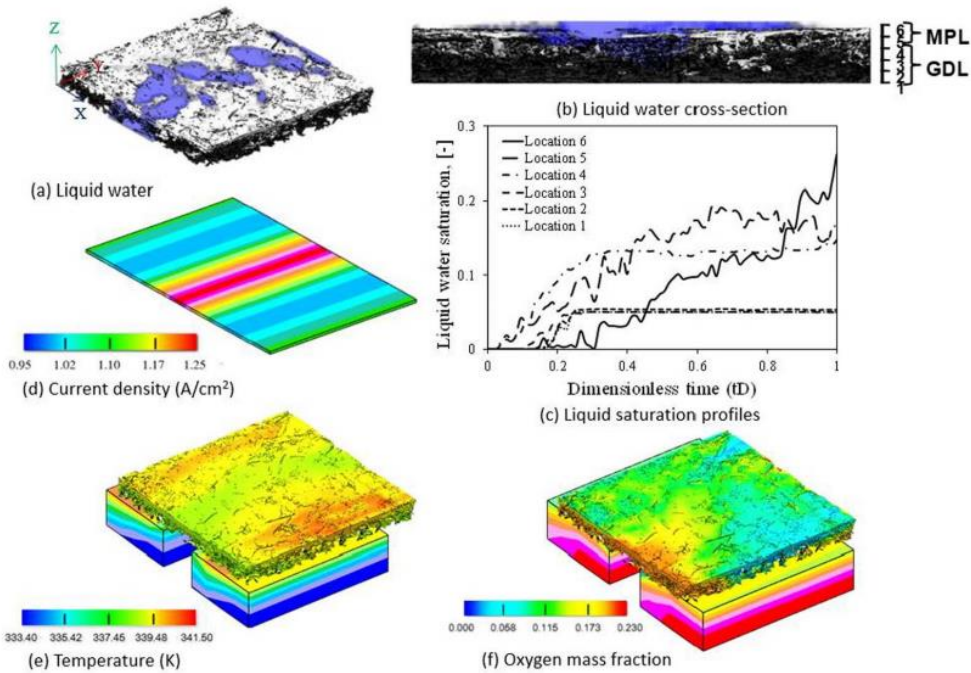


图 2.1 水热气电分布规律

2.1.2 可控与不可控因素

控制系统的核心任务是调节交换膜的工作温度和水合性、防止阴阳极水淹，而这个调节目标一般是通过调节氢气、空气湿度和流量来间接达到的。控制系统能够掌控的资源一般有

空气加湿装置、空气流量控制装置（风扇、空压机）、散热水泵（水冷堆）、排氢电磁阀、氢循环泵等。

对于整个氢燃料电池系统在整个规划初期控制系统工程师、电堆工程师、MEA 工程师等应该多沟通，确保电堆在测试台上需要的各种工作条件在现实装机后通过控制系统的调节也能达到相同的工作条件，很多时候在测试台上的测试结果很好，但在装机后真正的工作条件即使在控制系统的调节下也很难达到在测试台上的工作条件比如合适的空气湿度和温度、适当的空气压力。尤其是空冷堆，尽凭空气流量控制在很多时候难以满足既能给电堆排水又能保持电堆的最佳工作温度。设想一下一个空冷堆在南方冬季湿冷的环境下仅用调节空气流量的方式就比较捉襟见肘。所以在氢燃料电池系统的规划初期就要各个部门充分沟通，讨论电堆的使用环境、工作特点、控制系统能够为电堆提供的最大调节帮助等，这样也能帮助 MEA 工程师或催化工程师改变催化层配方、选取更适合该电堆的质子交换膜的型号，也能帮助电堆工程师设计更适合该电堆的双极板（包括双极板的尺寸厚度、流道宽度、流道长度、流道形状等）。

有一些比较重要的资源有可能会划归给电池控制系统管理，比如氢气进口开关（或电磁阀）、电堆系统对外电流电压输出等。氢气进口开关和排氢电磁阀联合使用可降低或减弱氢气压力波动也就是可以消除降低电堆电压波动。电堆在低于某个电压对外输出电流时会对交换膜造成损伤，所以如果控制系统能够有权限切断对外输出无疑会保证电堆的安全运行。

2.1.3 对水的控制

控制系统对水的调节控制有两个目标，一是确保膜的水含量最高（完全水合），二是避免水淹，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（包括空气流道和氢气流道）。

为确保交换膜的含水量，在电堆刚启动的时候在保证供氧量的情况下应该降低空气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。

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，比如空气流道过长就容易在流道后段聚集大量的水容易造成水淹，在流道设计最糟糕的情况下甚至会出现流道前段膜干燥流道后段被水淹的情况。

判断阴极侧是需要排水还是需要保湿是制定控制计划的依据，常用的判断依据有空气进

出口湿度差、氢气侧湿度、电堆输出功率等，而且这几个依据要联合使用才能判断准确。这些判断因素的数据是多少也是根据不同型号的电堆、不同交换膜、不同气体扩散层而定的，也需要一些测试台数据，要和电堆工程师、MEA 工程师、测试工程师一起确定。

假定经过上一步的判断认为空气侧需要排水，控制系统可以使用的常用手段有空气侧加大空气流量、降低电堆功率输出、水冷堆空气侧停止增湿。

加大空气流量是排水的必备手段，空气的湿度小于反应界面的湿度，因为有湿度差反应界面的水分子会扩散到空气中被带走，即使外界空气湿度 100%，加大空气流量也可以加大空气对流道液态水的吹扫作用。

如果控制系统能控制电堆的对外功率输出，降低对外功率输出也可以为排水减轻负担，总比水淹后再从水淹中恢复要更加有利。但是控制系统的职责是尽力保证电堆可以最高功率持续输出，降低输出功率似乎与控制系统设计目标不符。

提高电堆温度对于阴阳极排水都有很大的好处。控制系统应该尽力维持电堆的工作温度，在不超过交换膜安全工作温度的情况下尽力提高电堆温度，电堆温度较高的情况下，空气流道不易生成液体水、空气扩散层不易水淹、催化层表面更容易排出水分子，总之水分更容易以气态形式存在方便被空气带走。

阳极排水（氢气侧），水冷堆一般配备氢循环泵相对容易控制，我们讨论空冷堆的阳极排水方法。

空冷堆一般采用阳极闭口的设计，在氢气出口有常闭电磁阀，常用做法是阳极脉冲排氢的方式来排水，排氢时间间隔和排氢时间长度要经过计算和调整，在确保氢气侧不水淹的情况下尽力减少对氢气的浪费，可以在排氢口增加湿度传感器，如果探测到氢气湿度过高就增加排氢频次或增加排氢时间，增加排氢时间一般会引起氢气侧气压降低进而引起电堆电压下降，这两者需要权衡。

2.1.4 对热的控制

质子交换膜在温度比较高的情况下才能发挥好的性能，一般的质子交换膜的理想工作温度是 50℃—80℃。高温质子交换膜可工作在 100℃ 以上，所有的水分都以气态形式存在，阴阳极排水基本没有难度。

但是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℃ 之间。

对于水冷堆来说，电堆启动过程中为了温度能够快速提升一般不会开启散热水泵，也不会等电堆温度达到最高点后才开启散热水泵，一般做法是在温度比较高是比如 50℃ 时开启水泵并且使冷却液低速循环，目的是加热整个管路的冷却液让所有冷却液均匀加热，否则当开启水泵快速运转时电堆外部的冷却液温度过低导致电堆温度突然下降造成电堆的电压波动。

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。

无论空冷堆还是水冷堆，在电堆上安装温度传感器是必要的，靠进气温度和出气温度差来计算电堆温度或交换膜温度是极其不准确的。

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。

2.1.5 对气的控制

电堆阴阳两极气体压力和压力差对电堆性能也至关重要，维持阴阳极气体压力以及压力差也是控制系统的重要调控目标。

对于水冷堆来说，在电堆启动时氢气侧压力要和空气侧压力同步缓慢等差增加，避免阴阳两侧压差过大造成交换膜机械破损或膜穿孔。水冷堆无论是否有氢循环泵，阳极都需要排氢操作，排氢操作势必引起阴阳侧压差变化和阳极侧压力下降，造成电堆电压波动或者膜损伤，为了避免这种情况可供采取两种做法，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。

对于空冷堆来说，空气侧压力即使大气压力，控制系统无法干预，氢气侧也需要排氢操作，打开氢气出口电磁阀同样会引起氢气侧气压降低和电堆电压波动，为了降低影响可以加大电磁阀排氢频次、缩短每次打开时时间，但是如果电磁阀每次打开时间过短对于排除液态水效果不佳，这个需要综合权衡。

2.1.6 对电的控制

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。电堆电压降低可以由多个原因引起,比如阴极空气流量减少导致供氧不足、阳极氢气杂质气体过多导致供氢不足、阴极出现水淹或阳极出现水淹、排氢操作导致阳极气压降低等。

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。

控制系统要做的就是控制电堆电压不能低于某个电压值。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,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。

控制系统在不同的燃料电池总系统中有的有权限切断电堆的对外输出,有的需要通知给上位机。

2.1.7 非线性关系

控制系统所面临最大难点是所有可控因素和不可控因素之间存在着非线性关系,给制定控制计划和计算具体数值带来巨大困难。

控制系统面对的所有可调节的因素都是非线性的。比如,为了空气流道的空气流量,空压机或风扇(空冷堆)转速提高一倍就可以了吗?不一定;为了使风扇转速提高一倍 PWM 占空比提高一倍就可以了吗?不一定,风扇也有可能轴承润滑问题随着时间推移相同工作电压下转速在变慢;同样道理,水泵转速提高一倍,电堆内部冷却液流速基本不会提高一倍;阴极排水也一样,空气流速提高一倍排水速度不一定提高一倍;散热也一样,空气流量提高一倍空气带走的热量也不定提高一倍。

氢燃料电池控制系统和航空发动机控制系统有相似之处,为了一个调节目标可以使用多个调节路径,制定多个控制计划。对于氢燃料电池控制系统来说降低控制难度主要从两个方面着手,一是尽量闭环控制,空气入口空气出口都要安装温湿度传感器、风扇或空压机转速要采集、空气压力要采集,电堆温度要采集、排氢口湿度要采集等;二是指定控制计划,是以控制目标为导向的控制计划,不是以调节手段为导向的,有了控制计划控制策略也要精心安排。

多个因素的非线性关系使得控制策略极其复杂,难以维护,随着人工智能普及和发展其必将在控制系统中发挥巨大的作用。

3 控制系统架构设计

3.1 常规设计

氢燃料电池控制系统通常的设计是设计人员将所有的控制逻辑和相关参数统一预先存储到控制系统中，在整个运行周期内不需要联网可以独立运行。

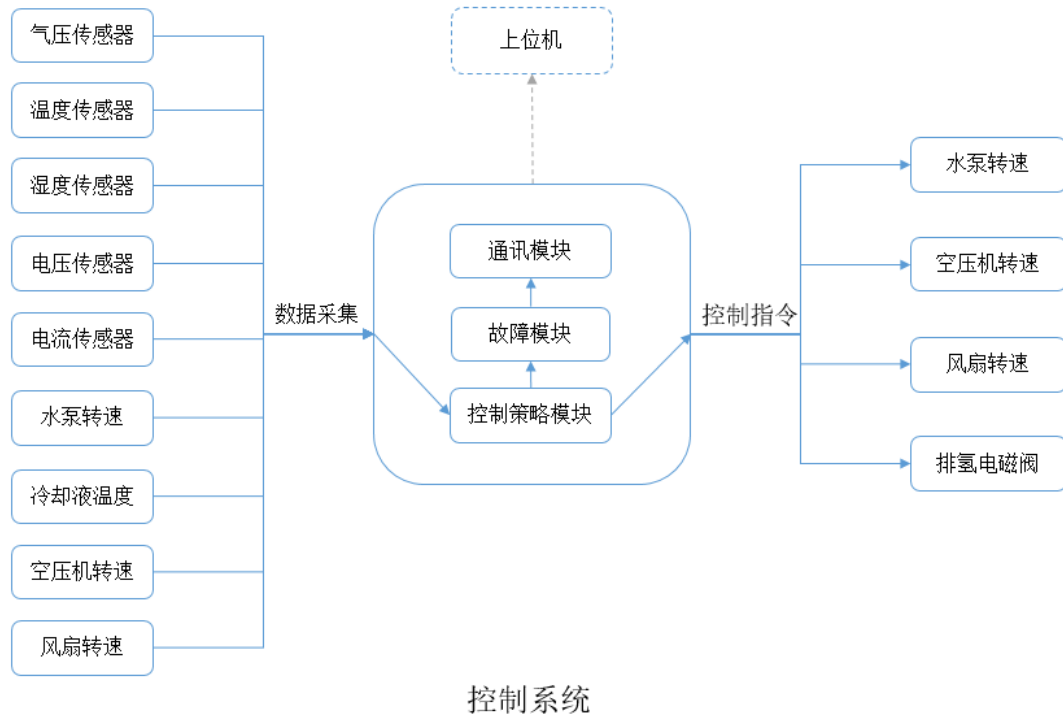


图 3.1 控制系统常规架构

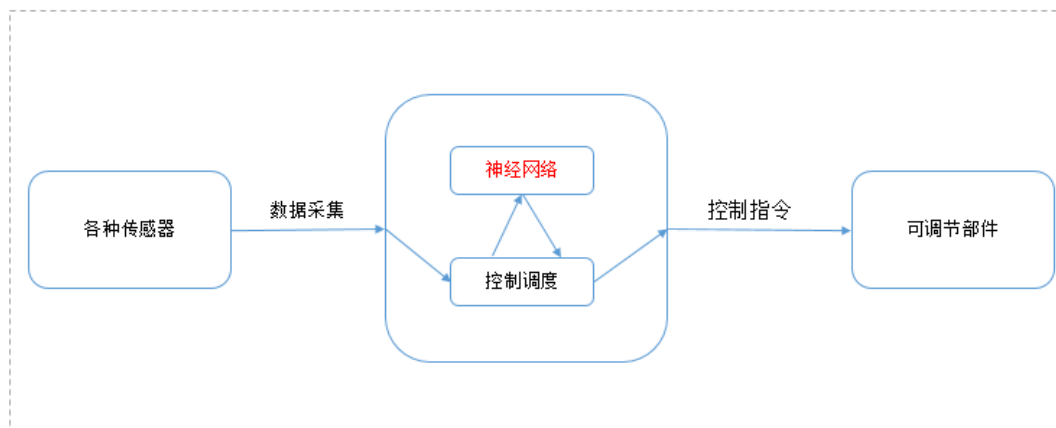
这种传统的控制系统特点是设计简单、系统独立、安全性高、不依赖网络，不过对于氢燃料电池厂商来说能够收据更多的运行数据无疑是对以后的研发设计有重大的作用，燃料电池的使用寿命和各个部件的损坏程度这样的数据对厂商来说也特别珍贵。氢燃料电池不同于机械机构的内燃机的长寿命，电堆和交换膜在使用的过程中性能和锂电池一样会衰减，在交换膜不同的衰减程度情况下控制策略不应该一成不变。

3.2 基于人工智能的架构设计

由于影响电堆的性能多个因素的非线性关系使得控制系统的计算相当复杂，即使计算出结果也未必最佳结果，这样的计算往往是根据理论公式和仿真数据但终究不是真实环境下的计算方法。由于人工智能领域中的深度学习技术进一步发展，在控制系统的开发中可以省略掉复杂的计算过程。

3.2.1 离线人工智能控制系统

离线人工智能控制系统不需要联网，需要将预先训练好的神经网络植入到控制系统中，控制系统采集到各个传感器的数据输入到神经网络、神经网络给出控制办法、控制系统控制动作设备。



离线人工智能控制系统架构

图 3.2 架构

这样的控制系统不能在线更新神经网络，多个电堆的控制系统不能共同学习，同时也会为控制系统的硬件设计增加成本和复杂性，因为有神经网络的存在就需要高性能的 SOC、需要安装操作系统。这种架构一般在比较特殊的应用场景下使用，如不能联网、需要无线电静默等。

3.2.2 在线人工智能控制系统

在线人工智能控制系统分为多个部分，有电堆终端部分、服务器端神经网络部分、服务器端数据处理部分等。电堆终端部分采集各个传感器温度，然后将这些数据通过网络传输到服务器端，在服务器端的神经网络给出控制指令，控制终端执行控制操作。

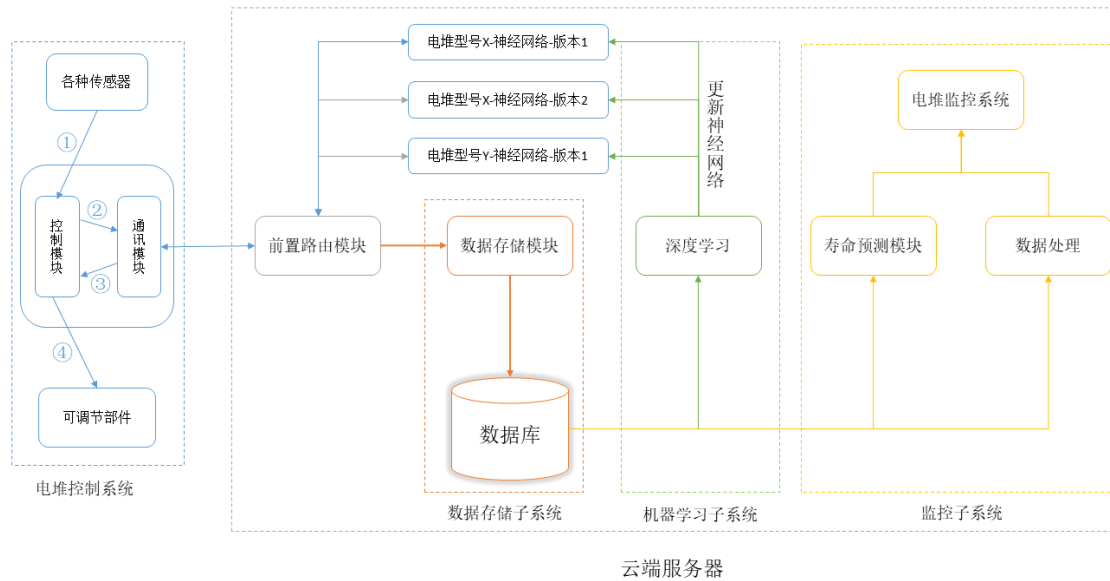


图 3.3 整体架构

电堆控制系统采集数据通过发送给服务器，服务器前置路由模块根据电堆的型号、电堆所在的地区（气候条件）、天气情况等选择合适的神经网络版本，由神经网络给出控制“指令”，电堆控制系统根据该“指令”调节各个部件完成一次调节控制。

前置路由模块在转发控制系统发来的请求的同时也将这些数据通过数据存储模块存储到数据库供机器学习系统学习使用，机器学习使用这些数据能够更进一步优化神经网络形成这个机器学习的闭环系统，这个系统能不断进化升级。

服务器端的监控子系统同时可以利用这些数据做实时监控，如果有问题可以实时触发故障报警。也可以这些数据给每个电堆做寿命预测，给运维提部门提供可靠的支撑。

在这个系统中，电堆控制系统只是一个终端设备，可以设计的特别简单，只需要数据采集模块、指令执行模块和通讯模块，像计算、决策、报警、监控等功能模块都在服务器端完成，这样的好处是系统升级只需要升级服务器端模块就行。

人工智能的一个特点是数据越多训练的神经网络越好，如果有更多的燃料电池系统参与到这个系统中来，服务器能够得到更多的数据，这样训练的神经网络越好。不同的氢燃料电池系统所运行的工况不同、所在的地区气候不同、天气（温湿度）不同、海拔不同等，多样性的数据能够让训练出来的神经网络更具有适应性。

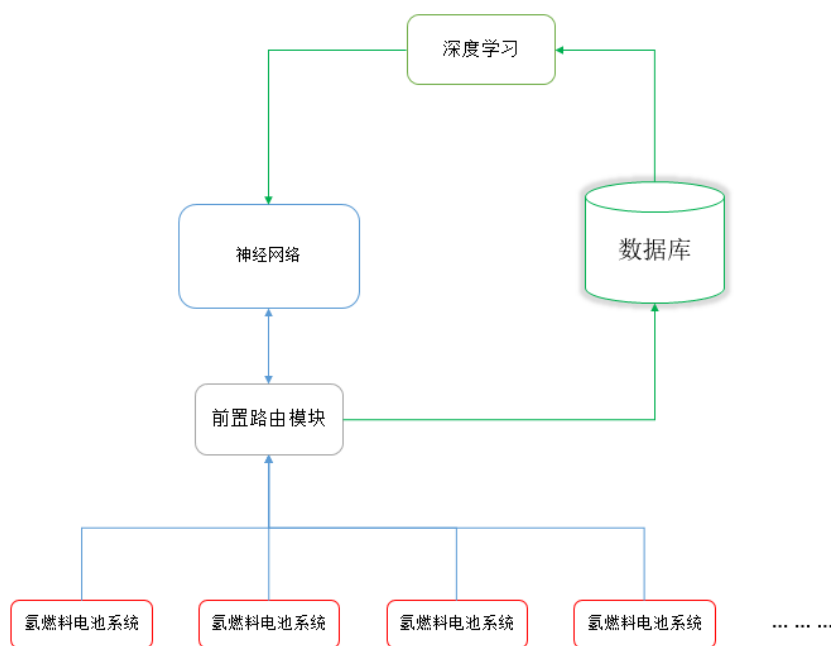


图 3.4 多电堆共同学习架构

基于人工智能的控制系统在空冷堆上能够实现更大的价值，首先空冷堆可供调节的设备比较少，其主要靠控制空气流量来调节温度、湿度的，而常规的控制系统又很难计算在特定的条件下空气的流量数据，基于人工智能的控制系统能够避免这种复杂的计算问题。空冷堆的简单可靠性相比水冷堆要高很多，也是最容易降低成本的，如果在控制系统的帮助下提高体积比功率和重量比功率空冷堆的整体优势将很高，也就能应用到更多的使用场景中。

4 控制流程

4.1 水冷堆控制流程

氢燃料电池在开机、运行、关机过程中都需要相应的动作，在调节的各个环节要考虑周到仔细才能使电堆高效运行。由于氢燃料电池各自的是总体设计不同，控制流程也不尽相同，本章节讨论控制系统一般控制流程。

控制系统的最主要的工作是在运行的过程中根据采集的传感器数据判断电堆运行状态、调整可控部件使电堆运行在高效的区间。

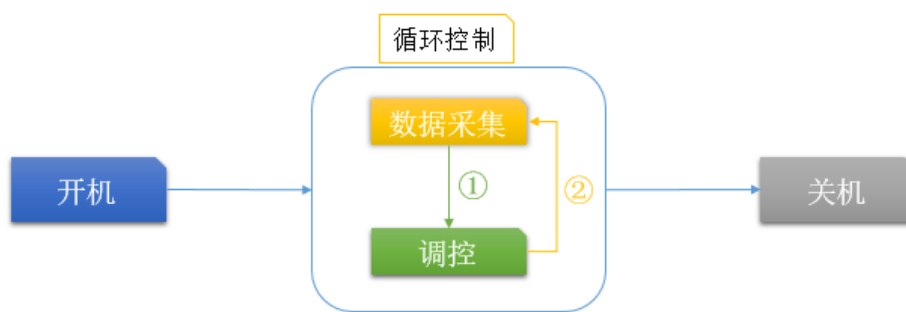


图 4.1 控制流程

4.1.1 开机流程

开机之前首先要做自检操作，检查传感器、电磁阀、水泵、风扇、空压机、循环泵等是否可用或者是否全部可用。一般情况下空气进出口温湿度传感器是有冗余设计的，进口和出口的温湿度取自多个传感器的均值，如果当其中一个传感器不可用应当故障报警，如果进口或者出口温湿度传感器全部不可用则开机失败或者进入安全运行模式，这取决于控制策略。其他的关键部件也要保证可用，否则应该通知开机失败。

自检完成后，打开氢气阀或增加氢气侧压力（取决于硬件设计）、启动空压机，这一步需要注意氢气压力和空气压力要等比例增加并保持好压差，防止交换膜破裂等损伤。

在开机时燃料电池系统有可能长期处于关机状态，阳极会积累杂质气体和水分所以要做排氢操作，如果控制系统记录了上次的排氢时间，在短时间多次启动时可以省略排氢操作以减少氢气浪费，排氢操作后面详细讨论。

在第一次排氢操作完成之后电堆基本能够达到额定电压，但此时电堆的温度一般不是最佳工作温度、膜含水量一般也不是理想状态，稍加负荷电压下降应该比较快，这时需要根据电堆状态进行适当调节，这是“循环控制”部分，后面详细说明。经过反复几次电堆能够达到最理想状态，可以对外“供电”，需要注意的是每个型号的电堆都有最低电压要求，低于这个电压就不允许对外供电“供电”，是否对外供电的控制有可能做在了连接电堆的 DCDC 上，这样会减轻控制系统的负担。

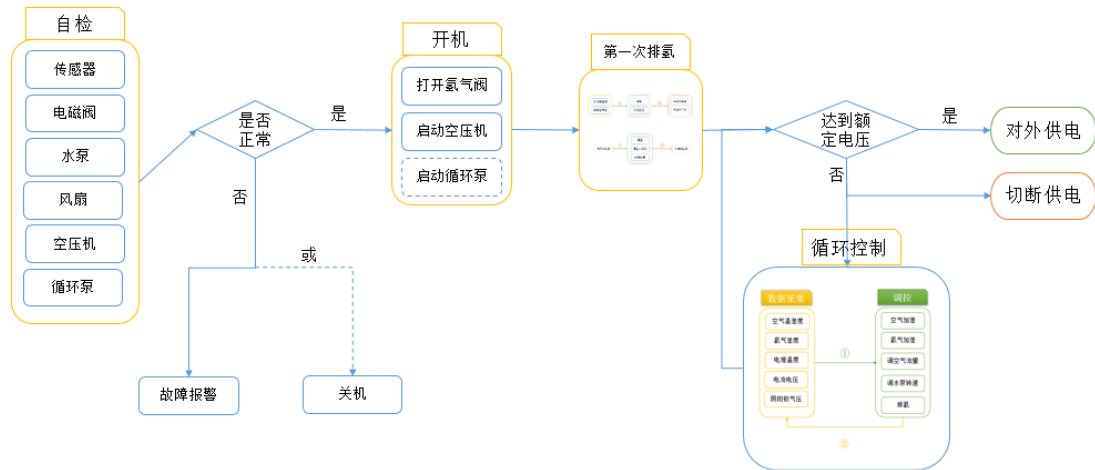


图 4.2 开机流程

4.1.2 控制流程

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，关于机器学习在后面的章节会讨论。

在这个过程中要注意的事项：

采集空气温度和湿度，需要采集空气进口的温度和湿度、空气出口的温度和湿度，如果有条件可以采集空气出口的氧含量。采集空气进口温度和湿度应该使用多个传感器做冗余取平均值，进口的空气温度和湿度可以近似等同于环境空气温度和湿度，据此可以辅助判断当地的天气、气候或季节。空气出口的湿度过高就要考虑有水淹的可能。

采集氢气湿度，在电堆的氢气出口如果湿度过高可能阳极正在或将要水淹，考虑要排氢操作，什么时候进行排氢操作，间隔多长时间最好不要是固定值，应该动态变化，尤其是在没有循环泵的空冷堆上，在排氢操作的章节详细讨论。

采集电堆温度，电堆的设计不同导致电堆温度的采集点也不同，水冷堆一般以冷却液的温度来间接反映电堆的温度或者在电堆上装温度传感器，空冷堆通过空气进口和出口的温度差来计算电堆的温度极不准确，在空冷堆上装的电堆比较好些。无论空冷堆还是水冷堆，堆的内部温度是不均匀的，电堆的温度一般都小于膜的温度，但最终要换算成交换膜的温度，控制交换膜的温度是控制系统最终目标，如何换算成交换膜的温度，不同电堆的双极板材质不同、厚度不同等所以换算方法也不同，也需要依靠实验数据来确定。

采集电流电压，电堆的电压和电流数据是衡量电堆状态的重要依据，一般情况下电堆电

压和电流的数据采集是交给 DCDC 设备来做的，控制系统只需要和 DCDC 设备通讯取数据就行。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。无论哪种方式都是为了避免电堆在最低电压下工作，否则会损坏 MEA。

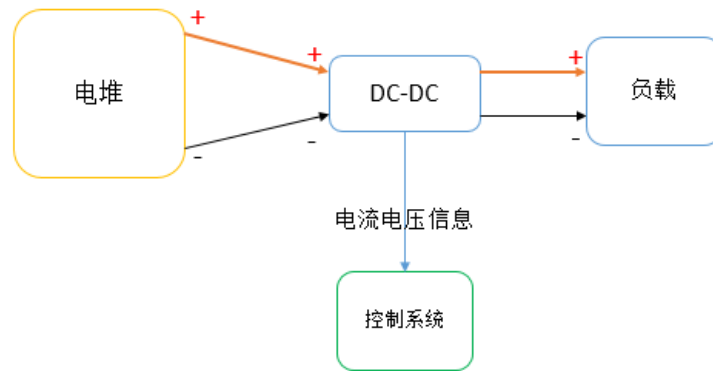


图 4.3 DC-DC

采集气体压力，电堆中空气压力和氢气压力的稳定是电堆能够运行在高效区间的重要保障，空气压力和氢气压力只差也需要保持稳定，压差过大会损坏交换膜。

采集空气流量，在阴极排水操作中空气流量要达到一定的数值才能实质上起到作用。在没有氧传感器的情况下，根据空气流量、电流可以大致算出阴极供氧是否充足。在开机后的初期在能保证供氧充足的情况下适当降低空气流量对于保湿保温有积极的作用，能让电堆更快速的达到最佳工作温度。

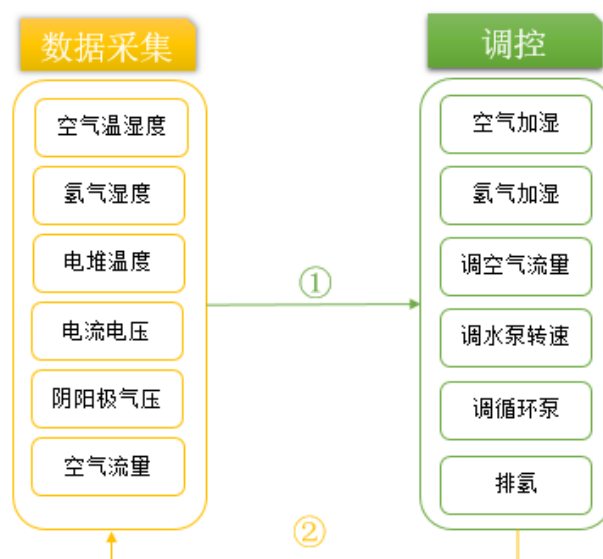


图 4.4 循环控制

4.1.3 排氢流程

电堆经过长时间工作阳极内部就会积累杂质气体、水蒸气导致氢气分压相对减少影响电堆的性能，电堆长时间工作阳极也可能需要排水（液态水、气态水）。

阳极通过将部分氢气排除电堆的方式来排除杂质气体和多余的水，有循环泵的电堆也需要排氢，以排出部分氢气为代价来让其带走杂质气体和水。控制系统要做的是减少氢气的浪费，减低排氢过程中由于气体压力变化对电压造成的波动，更要避免电堆氢气侧和空气侧压力差超过最大值造成交换膜损坏的情况。

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。

空冷堆排氢的主要目的是排水，为了减少氢气浪费排氢时间要动态的来调节。一般的闭口空冷堆排氢步骤为，打开排氢口排氢→采集排氢口湿度→不断采集排氢口湿度直到湿度达到预定值→关闭排氢口。根据第一次采集的湿度和最后一次采集的湿度、本次排氢时长、上次排氢时间和时长计算下次开始排氢时间点，做到在水淹之前就排氢。

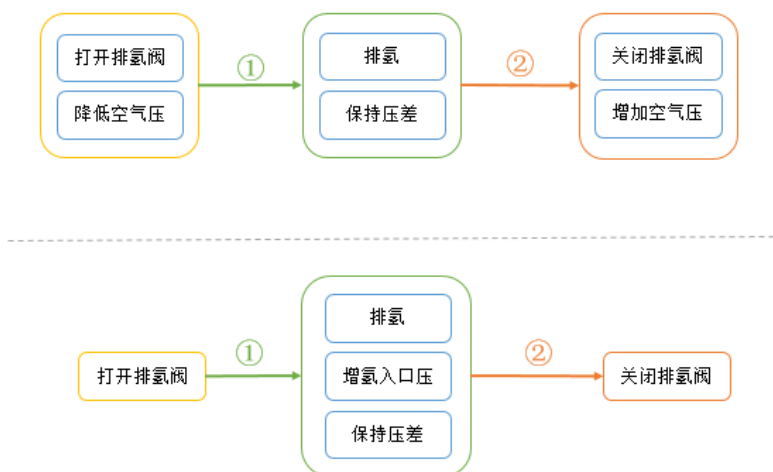


图 4.5 排氢操作

4.1.4 关机流程

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，排氢和阴极吹扫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，这个时间在下次开机时可以根据这个时间判断是否有必要进行排氢操作，如果没有必要就可以减少一次排氢浪费。

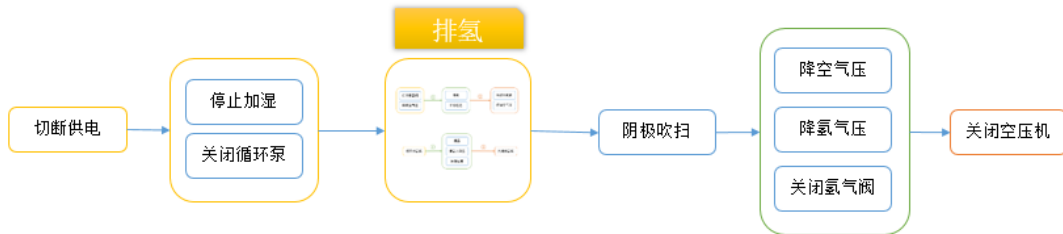


图 4.6 关机流程

4.2 空冷堆控制流程

空冷堆相对于水冷堆结构简单、重量轻、成本低、功率密度低，其可用的控制手段比较少所以控制难度其实要大于水冷堆。空冷堆没有冷却水道、空压机、循环泵、加湿器等设备，只靠空气流量来调节水热，也就是说只能靠空气流速一个变量来兼顾温度、湿度、空气氧含量三个变量。空冷堆的空气侧气体压力是环境压力，氢气侧的压力一般都在 0.5 个大气压左右这是空冷堆功率密度不如水冷堆的重要原因之一。如果在一些应用场景下空冷堆能够配备加湿器将是对控制系统有莫大的帮助。

| 设备 | 空冷堆 | 水冷堆 |
|---------|-----|-----|
| 冷却水道、水泵 | × | √ |
| 空压机 | × | √ |
| 氢循环泵 | × | √ |
| 加湿装置 | × | √ |
| 排氢阀 | √ | √ |

表 4.1 空冷堆和水冷堆比较

4.2.1 开机流程

空冷堆开机操作比较简单，首先自检，检查传感器是否正常、检查排氢阀是否正常、检查风扇是否正常(开环控制除外)。自检完成后做排氢操作，排氢的目的是排除液态水和杂质气体。空冷堆的控制系统有的不能控制对外是否供电，这个时候只能通过空气流量来调节，刚启动的电堆温度较低、湿度较低在供氧充分的情况下尽量降低空气流量帮助温度和湿度上升，在环境湿度比较的情况下要防止水淹。

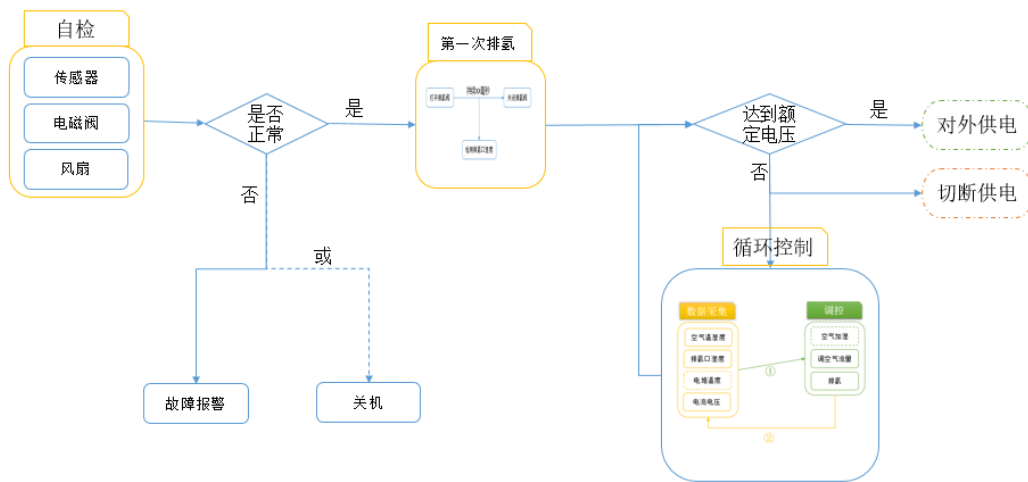


图 4.7 开机流程

4.2.2 控制流程

在空冷堆中能采集到数据有进出口空气温湿度、排氢口湿度、电压电流，电堆温度有可能都采集不到，可以控制的有调节空气流量，做排氢操作，空冷堆大多没有加湿器。

空冷堆控制系统的主要作用就是在这个阶段持续调节空气流量、适时做排氢操作是电堆能够提供最大的功率。

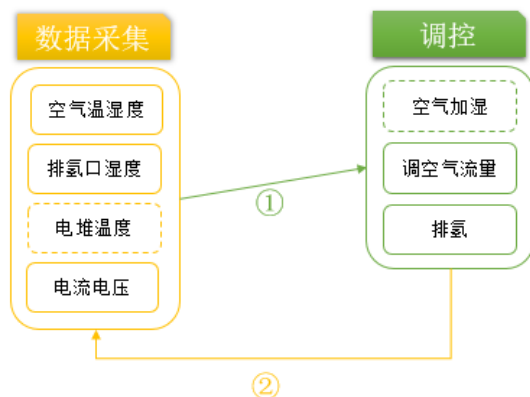


图 4.8 循环控制

4.2.3 排氢流程

空冷堆一般没有氢气循环泵，大多采用阳极闭口的方式，排氢的目的是排出阳极水分和气体杂质使氢气分压最大化。

在排氢的过程中要检测排氢口的湿度，在湿度达到一定数值后关闭排氢阀，根据排放的时间长度来计算下次排氢时间点。

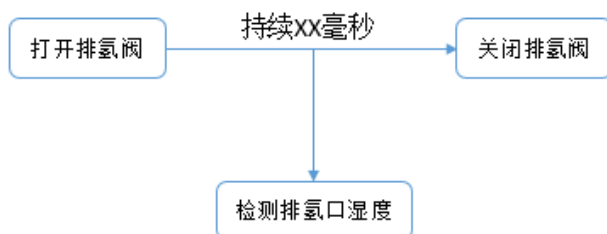


图 4.9 排氢操作

4.2.4 关机流程

空冷堆的关机操作同样比较简单，排氢和阴极吹扫是为了防止冬季结冰和夏季发霉，排氢操作和阴极吹扫操作可以同时进行，经常启动的电堆可以省去排氢操作以减少氢气浪费。

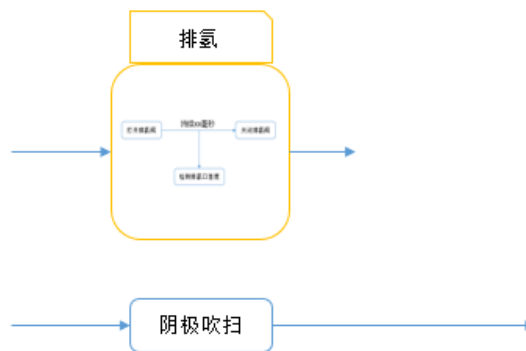


图 4.10 关机

5 参考实现

5.1 FCS

FCS(Fuel Cell Control System,燃料电池控制系统)是 OpenFC (Open Fuel Cell, 开源燃料电池)的一个子项目，FCS 的目标是建立氢燃料电池控制系统的开放标准。FCS 项目包括多个子模块如下：

| 模块名称 | 主要用途 | 开发语言 |
|-------------|------------|----------------|
| FCS | 控制板端控制程序 | C 语言 |
| FCS-Router | 服务器端路由程序 | Java 语言 |
| FCS-Store | 服务器端存储程序 | Java 语言 |
| FCS-AI | 服务器端人工智能程序 | C 语言、Python 语言 |
| FCS-Monitor | 服务器端电堆状态监控 | Java 语言 |

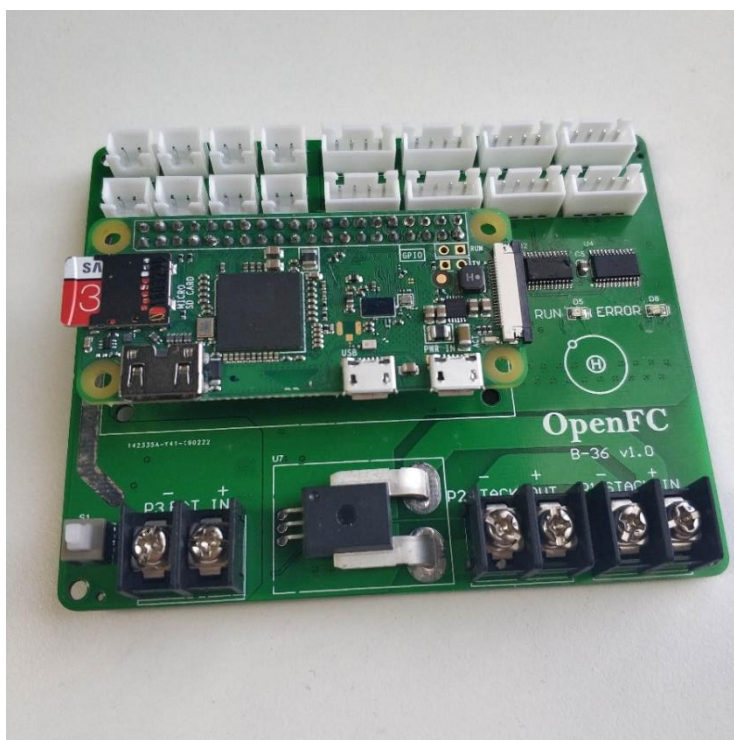
FCS 项目所有相关的文档和代码均可以在这里 <https://github.com/open-fc> 找到。

5.2 硬件

控制系统的硬件也是开放的，我们以 B-36 型号的控制板为例做介绍，B-36 控制板主要用来做空冷堆原型验证用而不是投产版本，B-36 可以做离线人工智能控制系统，也可以做在线人工智能系统，也可以用作传统的控制系统，我们在第三章控制系统架构有过详细介绍。

控制板 B-36 主要参数如下：

| 名称 | 参数 | 备注 |
|--------------|---------------------|--------------------|
| 核心板 | Raspberry Pi Zero W | 详情 |
| 风扇(电磁阀) 插口 | 8 个 | 两路 PWM |
| I2C 温湿度传感器插口 | 6 个 | |
| 电流测量范围 | 0—50A | |
| 电压测量范围 | 0—50V | |

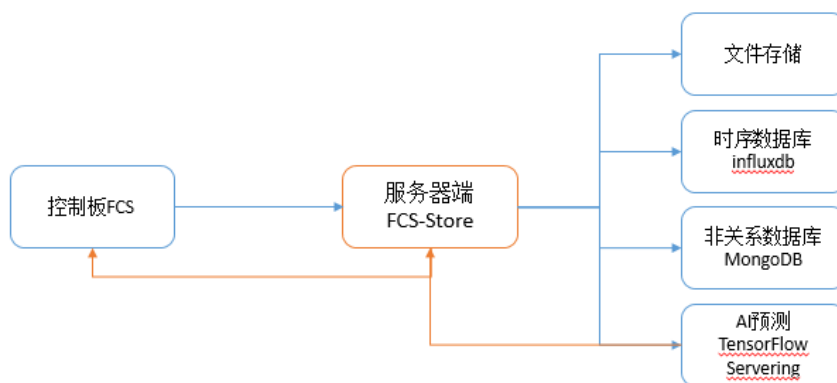


OpenFC 控制板

5.3 软件

FCS 是控制系统的控制程序，是基于 Raspberry Pi Zero W 的核心板，各个传感器的控制使用开源的库 WiringPi，与服务器之间的通讯协议目前支持 UDP，以后会支持 TCP、HTTP 协议。

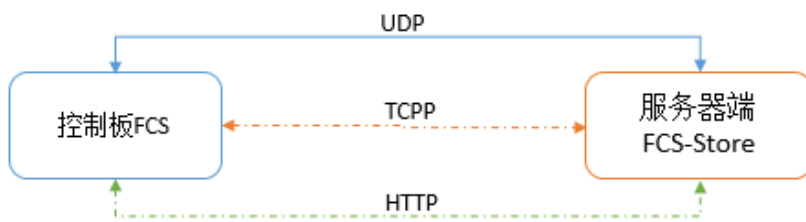
FCS-Store 是服务器端程序，主要负责将 FCS 的请求数据存储、访问 AI 模块得到预测结果返回给控制系统。



服务器端程序

5.4 通讯协议

控制系统和服务器端的通讯目前采用 UDP 协议，以后会逐渐支持 TCP 和 HTTP 协议。



通讯协议

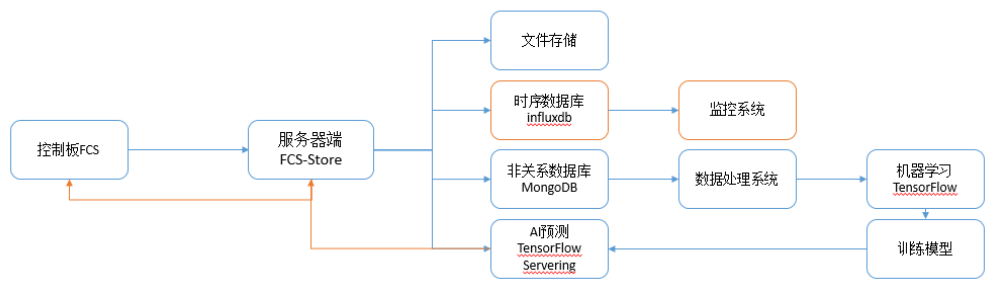
5.5 服务器端数据处理

服务器端数据处理为两个目的，一个是为监控系统提供数据，要求实时性，另一个是为人工智能训练提供数据，要求数据有标签。

除此之外还要能够提供原始数据，这要能够将数据提供给非本体系的系统使用。

5.6 电堆状态监视

服务器端电堆状态监控要求具有实时性延时不能超过 1 秒钟，在监控子系统中使用时序数据库 InfluxDB 能够满足大数据量实时性要求。服务器端程序在接收到控制板数据并解析之后同步存入时序数据库，监控页面即刻展现实时状态。



监控子系统



监控界面

6 基于人工智能的控制

6.1 智能控制

6.1.1 数据预处理

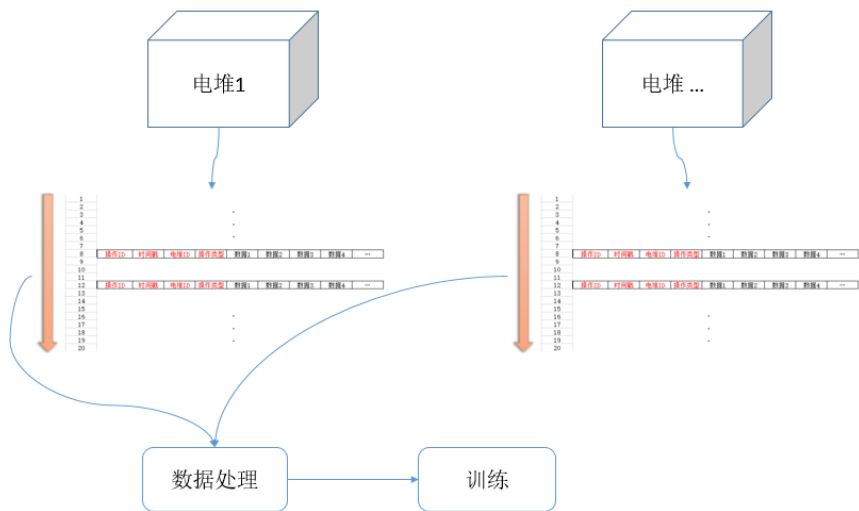
人工智能是需要数据来训练的，在训练之前需要进行预处理，经过与处理打过标签的数据可以更好的训练人工智能。所以控制电堆时需要将控制操作按顺序编号，这样整个控制系统所做的操作可以根据序号串联起来，并且每个操作操作都有时间戳。



控制操作数据链

电堆控制系统操作 ID 是将整个操作场景还原的重要依据，也是问题追溯的重要依据，可以根据操作 ID 将整个操作过程串联起来，控制操作的时间戳也同样重要，用来计算在两次操作的时间间隔，也是根据两个操作时间来判断上次控制操作效果和作用的依据。

在控制系统操作数据链中根据本次采集的数据一般是输出功率或者电压来判断上次控制操作的是否起作用，然后在上次数据上打标签，这条数据就可以用来训练人工智能了。将多个电堆的数据都打标签后汇总到一起训练人工智能，这就相当于多个电堆“共同学习”。

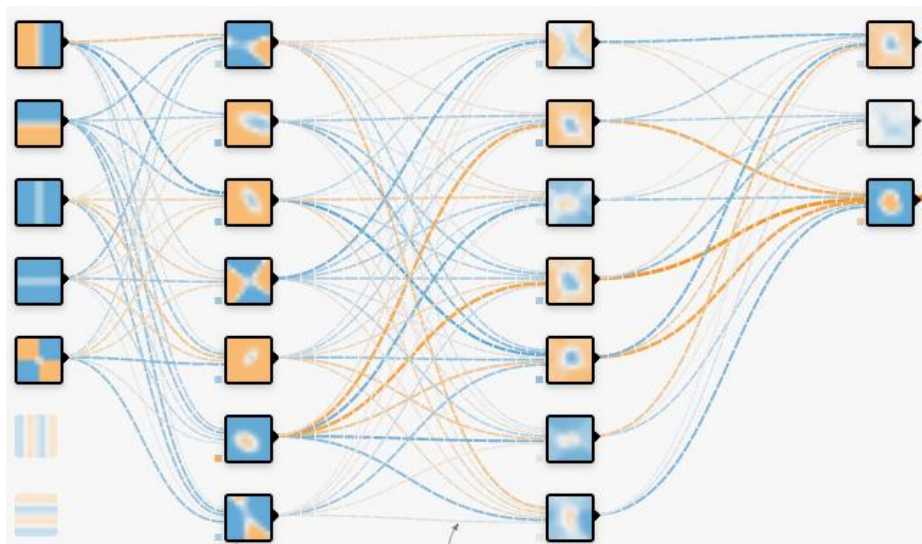


控制数据预处理

6.1.2 分类预测

分类预测是根据输入的数据来判断是那个分类,在控制系统业务中分类预测是根据输入的数据来判断风扇或空压机是应该提高转速或者降低转速或者保持不变。

在预处理数据时将操作数据打标签为提高转速、降低转速、保持不变。用这样经过标记的数据来训练人工智能,人工智能在输入传感器的数据后就能给出预测结果。



神经网络示意图

6.2 寿命预测

经过大量的数据积累,同一个型号电堆的数据经过处理后,可以训练人工智能,让其判断新电堆的寿命这是可行的。

通常情况下,电堆中单片电池,在理想的条件下电压低于某个值被认为电池已经接近寿命终点,这个电压值根据不同的 MEA 都不相同,使用人工智能预测电堆寿命并不困难。

寿命预测对于大规模使用电堆是有重大作用的,寿命预测的准确性对降低线下运营成本至关重要。可以想象一下未来的出行方式,自动驾驶+氢燃料电池以互联网的方式来提供出行服务,电堆的寿命预测和状态监控对于运营来说就非常必要了。