



西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY

氢燃料电池寿命预测 关键技术研究

西北工业大学自动化学院电气工程系

华志广，教授/博导



□ 个人信息

华志广，教授，博导，**国家级青年人才**；

研究方向为燃料电池寿命预测、新能源变换器、永磁同步电机等；

主持国家级军口纵向项目2项、国家自然科学基金项目1项、其他省部级项目4项；

累计发表论文35篇，以第一作者发表一区TOP期刊论文8篇，授权专利12项；

参与研制太阳翼展开机构电机，成功应用于空间站“梦天”实验舱并收到总体单位感谢信。



□ 教育背景与工作经历

时间	单位	学位/经历
2011.09 - 2015.07	西安理工大学	学士
2015.09 - 2018.06	西北工业大学	硕士
2018.11 - 2021.12	勃艮第-弗朗什孔泰大学/ 法国燃料电池国家重点实验室	博士
2021.12 - 2022.05	勃艮第-弗朗什孔泰大学/ 法国燃料电池国家重点实验室	博士后
2022.08 - 2023.10	启元实验室	科研工作
2023.11 - 至今	西北工业大学	教授/博导

报告提纲

01

氢燃料电池系统简介

02

氢燃料电池寿命预测

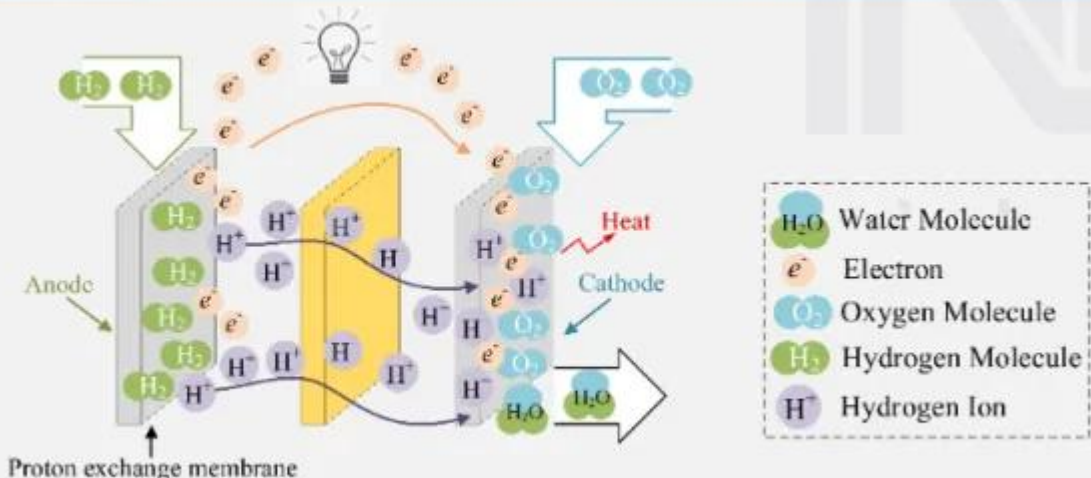
03

研究团队介绍

□ 燃料电池：是一种将燃料中的化学能直接转变为电能的设备

种类	氢燃料电池	碱性燃料电池	磷酸燃料电池	熔融碳酸盐燃料电池	固体氧化物燃料电池
优点	低操作温度、 高功率重量比	无需贵金属催化剂、 高效率	对CO不敏感、 技术成熟	无需贵金属催化剂、 对CO不敏感	无需贵金属催化剂、 对CO不敏感
缺点	对CO敏感、 需贵金属催化剂	电解液泄漏危险、对 CO ₂ 敏感	需贵金属催化剂、 不能低温启动	不能低温启动、 电解液泄漏危险	密封性问题、 抗高温问题
应用场所	交通运输、便携设备、 备用电源	载人航天、潜艇	热电联供、 分布式能源	军用电力、 分布式发电	辅助动力装置、 微型热电联供

□ 氢燃料电池：是一种将氢气和氧气中的化学能直接转变为电能的装置



Proton exchange membrane

阳极和阴极化学反应方程式

$$\begin{cases} \text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \text{ (Anode)} \\ \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O} \text{ (Cathode)} \end{cases}$$

总反应方程式

$$\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{electricity} + \text{heat}$$

□ 氢燃料电池在陆海空领域的应用



Toyota Mirai 2020



Alstom Coradia Ilint Train



宇通氢燃料电池客车



TGX 18.520H2



三峡氢舟1号



IESE Hydroxy 3000 Boat



Water-Go-Round



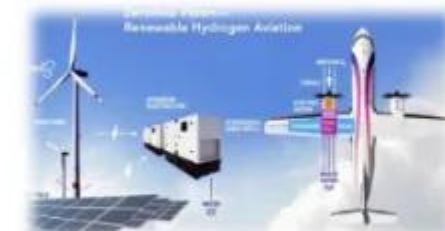
Sea Change



ZeroAvia Hydrogen-Electric
Aircraft M350



MMC HYDrone-1800
Unmanned Aerial Vehicle

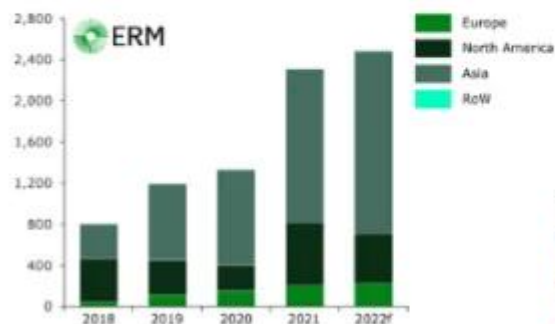


ZeroAvia Vision-Renewable
Hydrogen Aviation

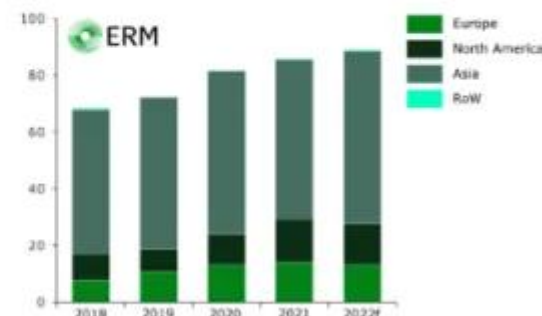


飞跃一号

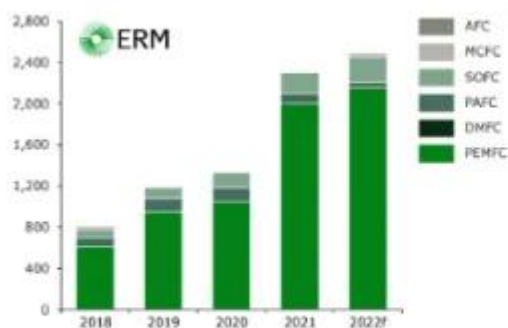
氢燃料电池应用情况



按地区划分的应用兆瓦数(MW)

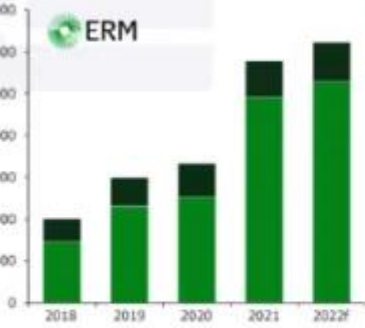


按地区划分的出货量(1,000台)

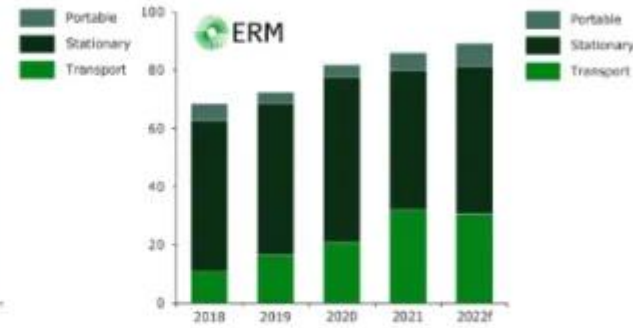


按各燃料电池类型的应用兆瓦数(MW)

按各燃料电池类型的出货量(1,000台)



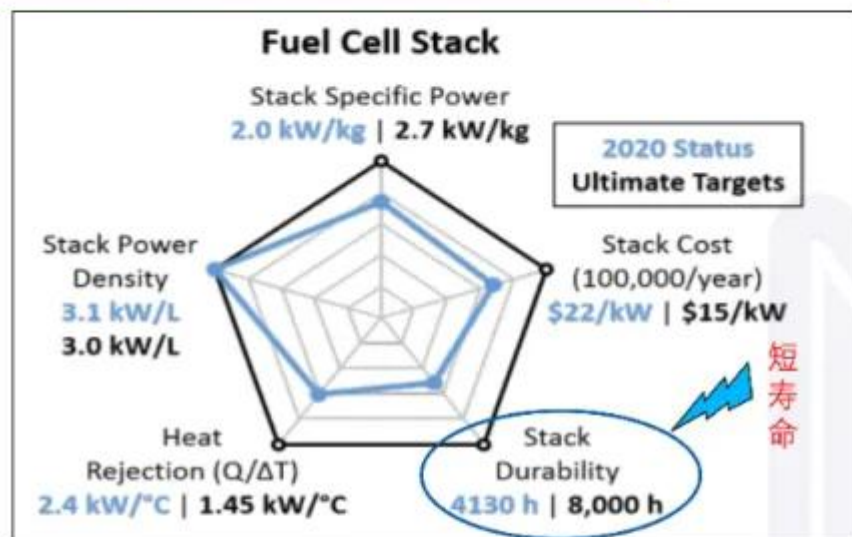
按场景划分的应用兆瓦数(MW)



按场景划分的出货量(1,000台)

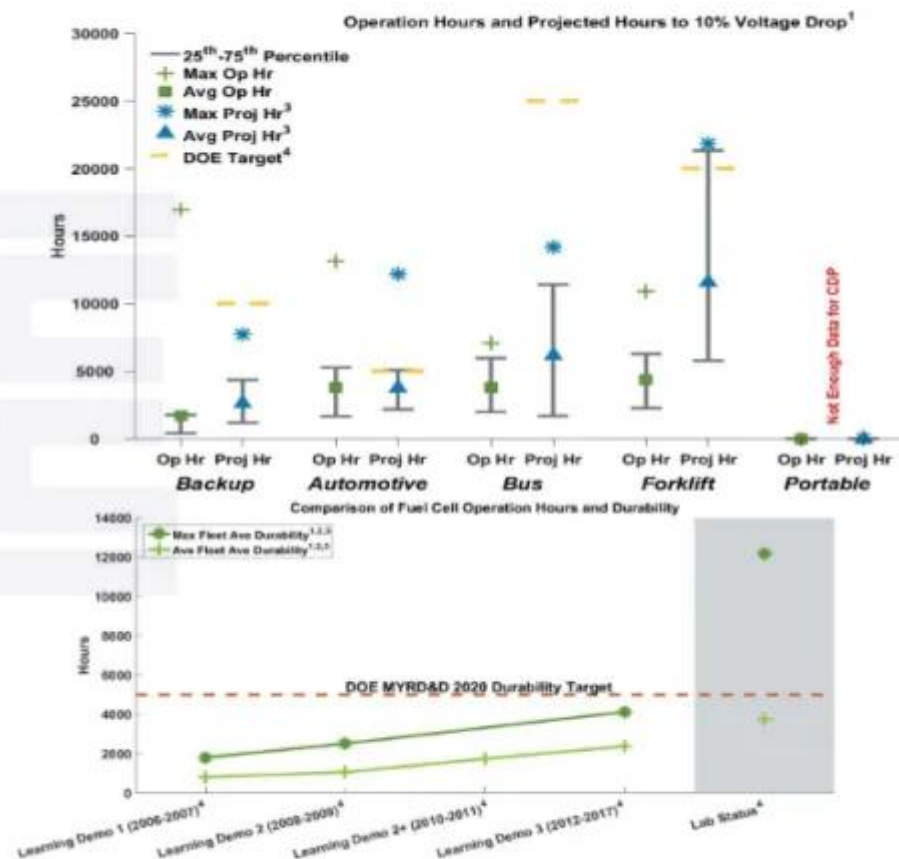
*数据来源：《The Fuel Cell Industry Review 2022》

氢燃料电池当前应用情况与期望目标



相关规定:

- 与初始功率相比, 功率下降10%作为**寿命阈值**;
- **负载电流**是额定电流的55% - 65%;
- 10%的**功率阈值**不作为真实寿命结束阈值;
- **测试过程中**不包含严重的电堆事故。



*数据来源: 《A. Kongkanand, et al. Recond#2005, U.S. DOE.》

*数据来源: 《State-of-the-Art Fuel Cell Voltage Durability and Cost Status》

报告提纲

01

氢燃料电池系统简介

02

氢燃料电池寿命预测

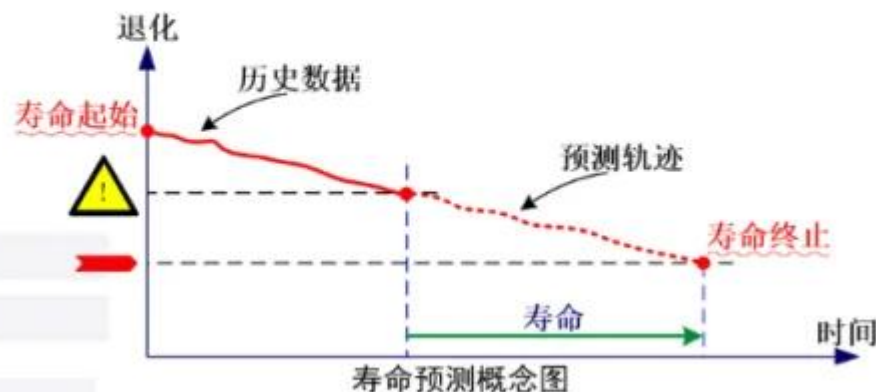
03

研究团队介绍

□ 定义与作用

- **寿命**: 当前时刻与到达一定退化阈值的时间间隔
- **寿命预测**: 在寿命区间内用不同的方法来预测退化趋势
- **寿命预测的作用**: ① 估计健康状态; ② 及时更换燃料电池; ③ 避免致命事故; ④ 提供退化信息; ⑤ 延长寿命。

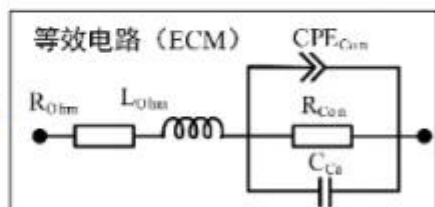
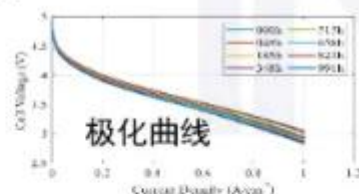
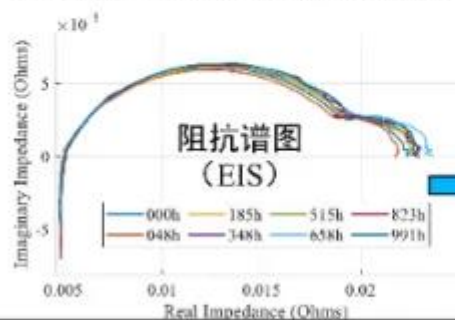
□ 预测方法: 模型驱动、数据驱动、混合驱动



基于模型的方法

优点: 揭露物理机理

缺点: 依赖模型精度; 非线性、多时间尺度的退化建模困难。



基于数据的方法

优点: 工作原理像一个“黑箱”; 无需物理模型; 历史数据用于构建非线性退化关系。

缺点: 很难反应物理机理; 依赖大量历史数据。



2.2 实验平台介绍

□ 实验平台



氢燃料电池重卡汽车



氢燃料电池汽车 (MobyPost)



0~20km环境模拟箱



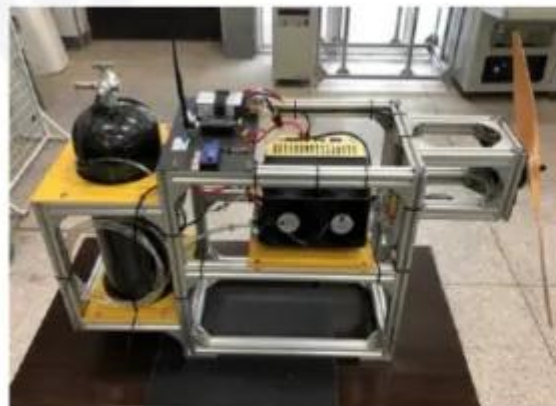
燃料电池半物理仿真平台



PEMFC小功率测试平台



PEMFC大功率测试平台



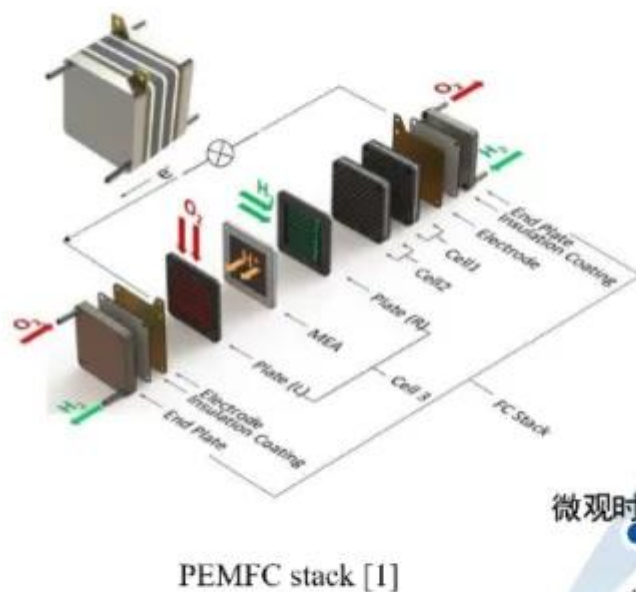
燃料电池电推进系统



燃料电池供气系统

□ 多时间尺度特征

➤ 多时间尺度、多空间尺度、多变量、多子系统



PEMFC stack [1]

微观时间尺度

- 电化学反应动力学
- 离子和电子传输

短时间尺度

- 瞬态响应
在启动、停止或负载变化时的瞬态响应，影响电池的动态性能和稳定性

中等时间尺度

- 堆积响应
(如积碳)，可能影响电极表面的活性，需要周期性的维护和清理

长时间尺度

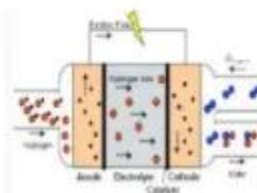
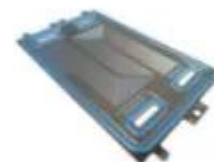
- 寿命和稳定性
包括电池组件的降解机制、材料的耐久性、气体和液体传输通道的稳定性等

系统级时间尺度

生命周期分析

- 维护周期
包括定期的检查、清理和替换元件的时间表

- 整个寿命周期分析
包括制造、运行、维护和处置，涉及多年的运行和使用

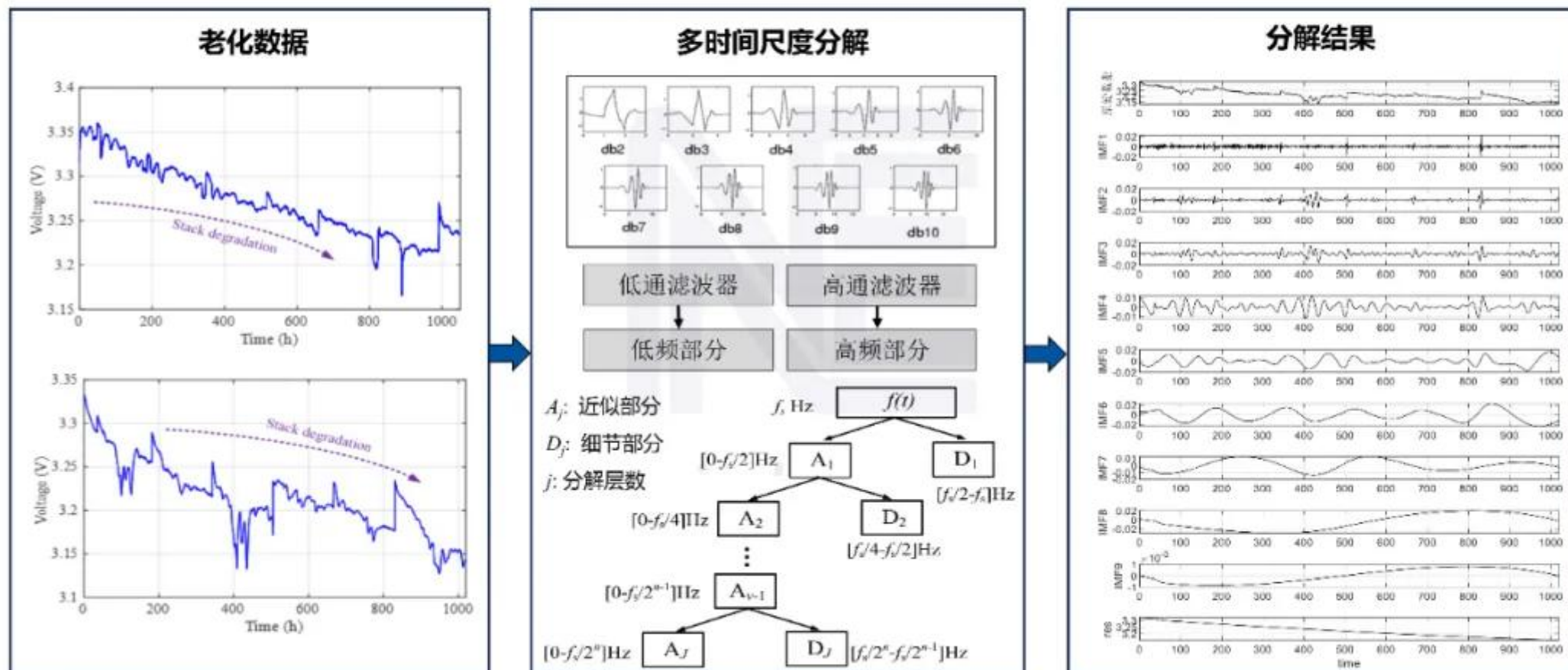


*数据来源: 《Y.K.Chen et al. Journal of Applied Mechanical Engineering, 2016.》

*数据来源: 《C. Robin et al. International Journal of Hydrogen Energy, 2013.》

多时间尺度分解

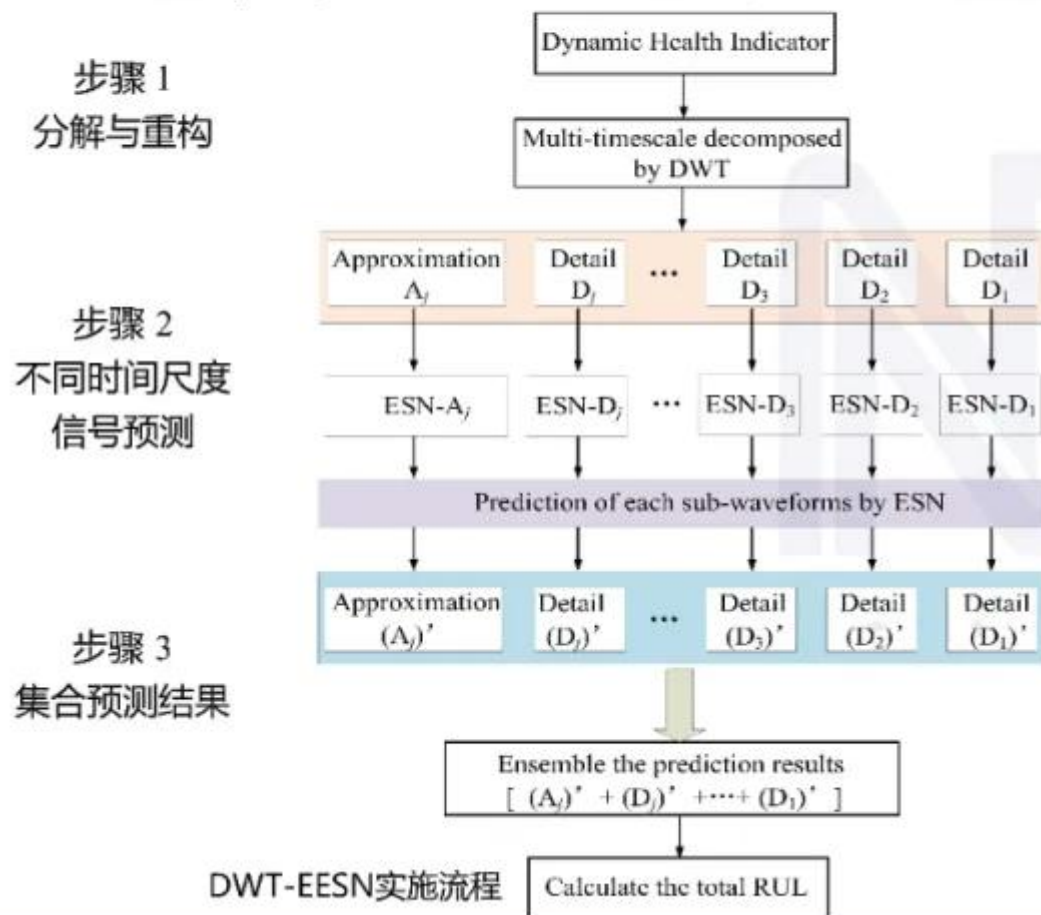
离散小波变换 (DWT) 是一种通过数据的伸缩与平移实现特征分析的数据变换技术



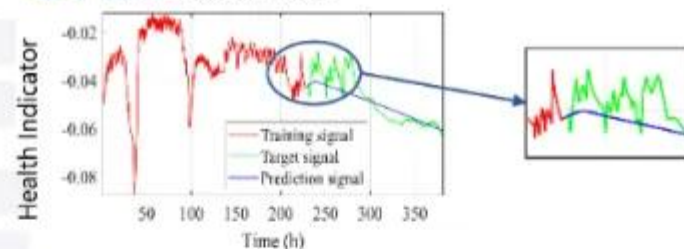
多时间尺度预测

➤ 回声状态网络 (ESN) 是一种新型递归神经网络, 由输入层、蓄水池、输出层组成。

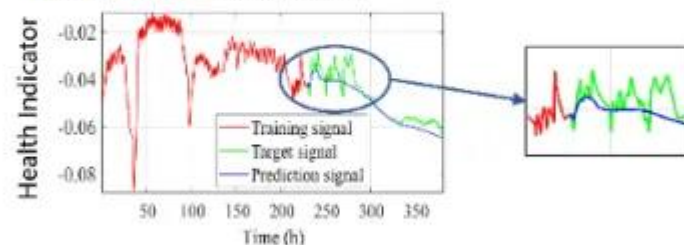
- **当前方法:** 单ESN不能处理多时间尺度特性
- **存在问题:** 动态健康指标包含不同时间尺度信息
- **解决方案:** 处理不同时间尺度信息, 提升预测精度。



单个 ESN 的预测结果:

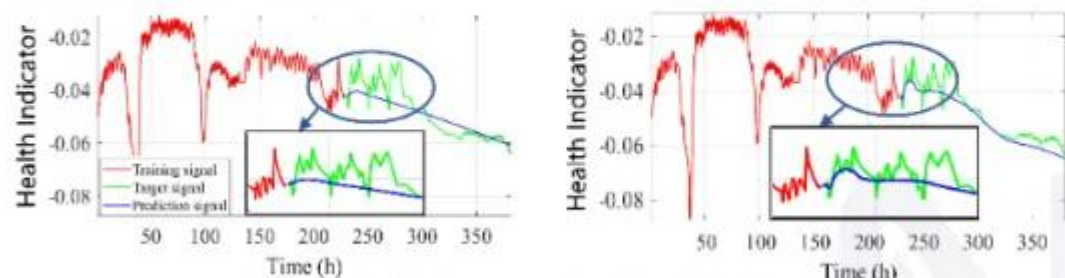


DWT-EESN 的预测结果:

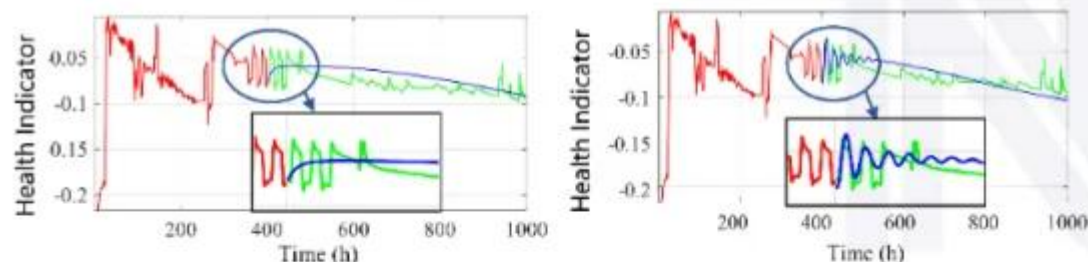


*数据来源: 《Z.Hua, et al, 2021.》

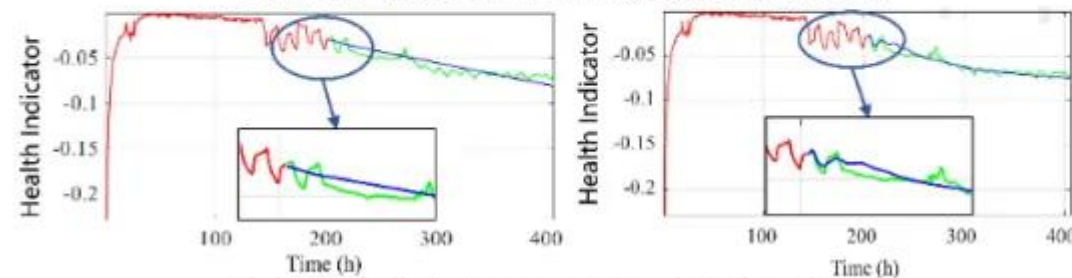
□ 动态案例1-案例3



单个ESN与集合ESN60%训练长度的结果对比图



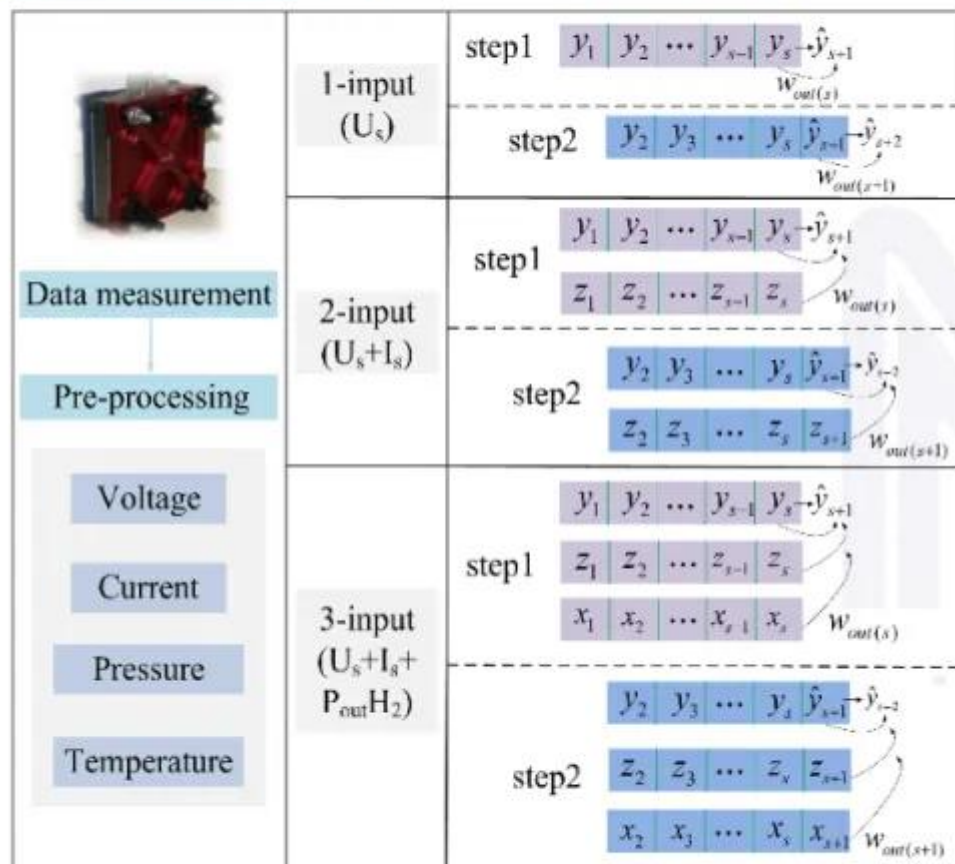
单个ESN与集合ESN40%训练长度的结果对比图



单个ESN与集合ESN50%训练长度的结果对比图

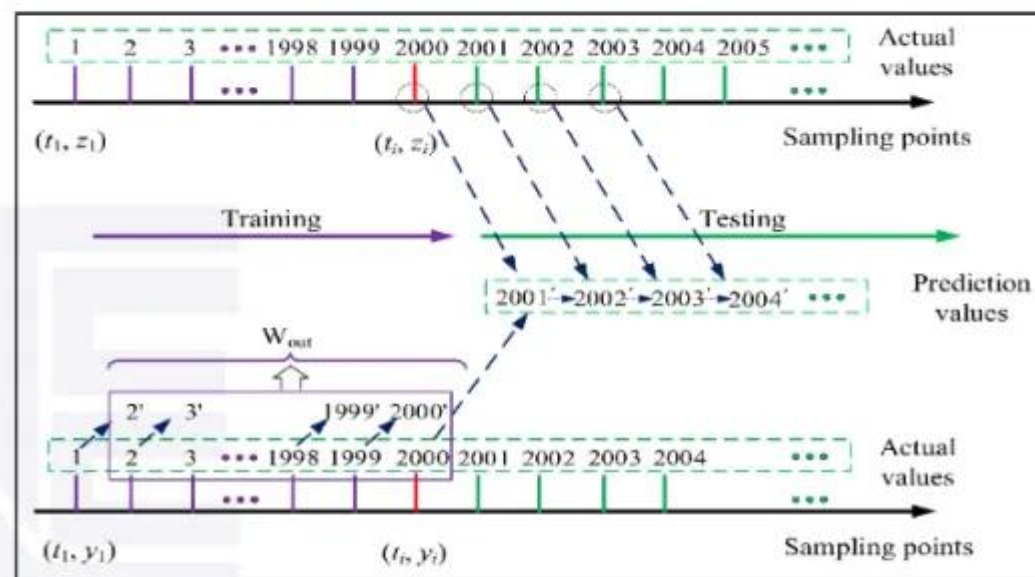
案例	方法	训练长度	RMSE	MAPE
动态案例 1	单个 ESN	40%	0.00727	0.14628
		50%	0.00737	0.13677
		60%	0.00529	0.08451
	DWT-EESN	40%	0.00526 (↑27.64 %)	0.10597 (↑27.56 %)
		50%	0.00494 (↑32.96 %)	0.08927 (↑34.73 %)
		60%	0.00416 (↑21.34 %)	0.06438 (↑23.82 %)
动态案例 2	单个 ESN	40%	0.01173	0.15735
		50%	0.00911	0.10657
		60%	0.00717	0.08006
	DWT-EESN	40%	0.00977 (↑16.68 %)	0.11464 (↑27.14 %)
		50%	0.00756 (↑17.04 %)	0.07260 (↑31.88 %)
		60%	0.00555 (↑22.67 %)	0.07027 (↑12.23 %)
动态案例 3	单个 ESN	50%	0.00622	0.10488
		60%	0.01623	0.14310
		70%	0.00488	0.05449
	DWT-EESN	50%	0.00415 (↑33.39 %)	0.06411 (↑38.87 %)
		60%	0.00667 (↑58.91 %)	0.08575 (↑40.07 %)
		70%	0.00265 (↑45.80 %)	0.03245 (↑40.45 %)

多输入实施步骤



单输入与多输入ESN的结构框图

*数据来源: 《Z.Hua, et al, 2020.》

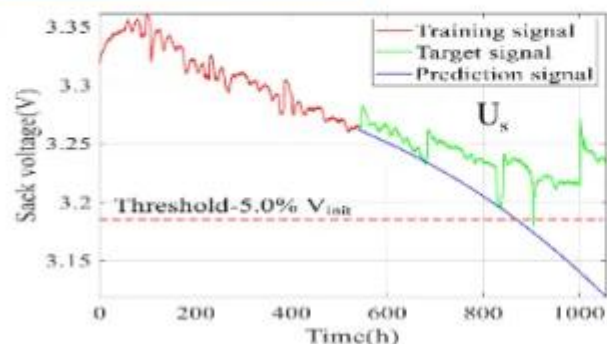


多输入ESN (2 inputs and 1 output)的预测结构

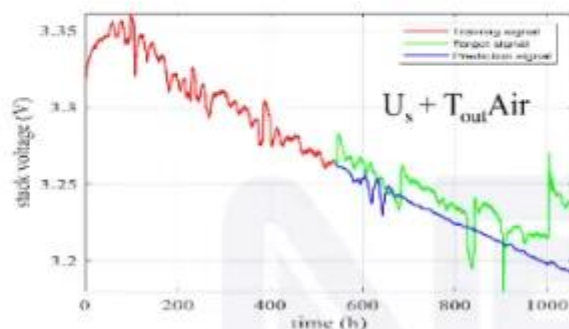
$\hat{y}_{s+1}, \hat{y}_{s+2}$ predicted voltage at time t_{s+1} and t_{s+2}
 z_i represents the I_s at time t_i
 y_i represents U_s at time t_i
 x_i represents $P_{out}H_2$ at time t_i

- **当前方法:** 单输入ESN将历史电压作为输入, 未来电压作为输出。
- **存在问题:** 操作参数中含有退化信息
- **解决方案:** 定量分析不同操作参数的影响, 提升预测精度。

□ 稳态案例



基于1-input ESN的寿命预测波形



基于2-input ESN的寿命预测波形

➤ 1-input ESN

输入变量仅为电堆电压(U_s)。

➤ 2-input ESN

输入变量是 U_s 和其他1个因子的组合。

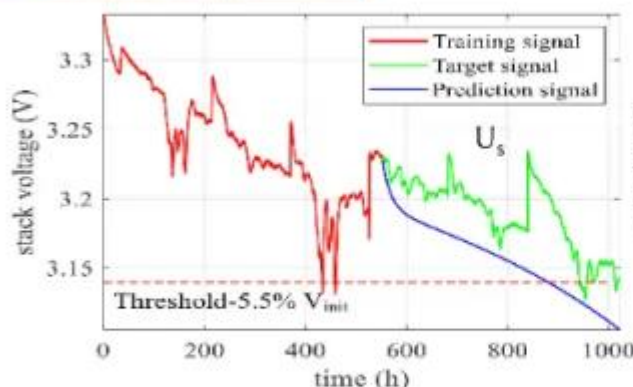
电堆电压 U_s 和 C_{11}^1 , 11种组合。

➤ 3-input ESN

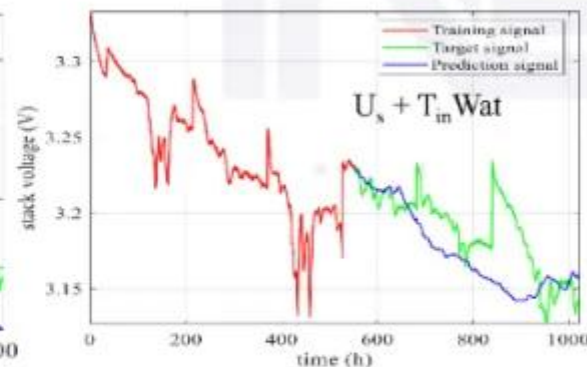
输入变量是 U_s 和其他2个因子的组合。

电堆电压 U_s 和 C_{11}^2 , 55种组合。

□ 准动态案例



基于1-input ESN的寿命预测波形



基于2-input ESN的寿命预测波形

不同案例	输入个数	阈值 (* V_{init})	RMSE	MAPE
稳态案例	1-input (U_s)	-5.0 %	0.02710	0.00709
	2-input ($U_s + T_{outAir}$)	-5.0 %	0.01339 (↓50.59%)	0.00375 (↓47.11%)
准动态案例	1-input (U_s)	-5.5 %	0.03789	0.01078
	2-input ($U_s + T_{inWat}$)	-5.5 %	0.02921 (↓22.90%)	0.00700 (↓35.1%)

□ 稳态案例和准动态案例的 2-input ESN 组合结果

稳态案例			准动态案例		
输入	RMSE	Improvement (%)	输入	RMSE	Improvement (%)
U_s	0.02710	--	U_s	0.03789	--
$U_s+T_{in}Wat$	0.01106	59.20	$U_s+T_{out}Air$	0.02495	34.15
$U_s+P_{in}H_2$	0.01168	56.90	$U_s+T_{in}Wat$	0.02921	22.90
$U_s+P_{out}H_2$	0.01236	54.37	$U_s+T_{in}Air$	0.03023	20.21
$U_s+T_{in}Air$	0.01260	53.51	$U_s+T_{out}H_2$	0.03039	19.79
$U_s+P_{in}Air$	0.01265	53.31	U_s+I_s	0.03231	14.74
$U_s+T_{in}H_2$	0.01294	52.24	$U_s+T_{in}H_2$	0.03242	14.43
$U_s+P_{out}Air$	0.01336	50.71	$U_s+P_{out}Air$	0.03292	13.13
$U_s+T_{out}Air$	0.01339	50.59	$U_s+T_{out}Wat$	0.03587	5.34
$U_s+T_{out}H_2$	0.01380	49.08	$U_s+P_{in}H_2$	0.03589	5.30
$U_s+T_{out}Wat$	0.01440	46.84	$U_s+P_{in}Air$	0.03715	1.96
U_s+I_s	0.01532	43.47	$U_s+P_{out}H_2$	0.03783	0.16

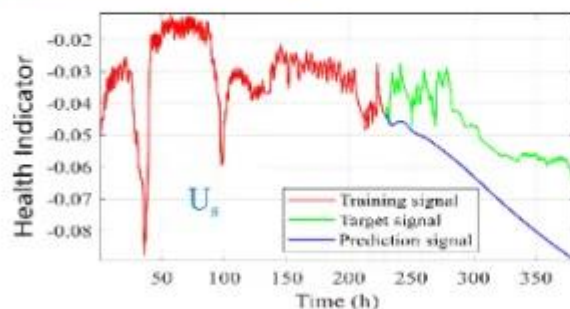
输入参数分析

- 操作参数对预测精度有**积极**的影响；
- **可规划参数**（例如 I_s ）更有意义；
- 除了 I_s ，其他参数**很难提前规划**；
- 在微型热点联供 (μ -CHP) 系统中, 电堆电流 (I_s) 是能够预先规划；
- **进一步分析2-input ESN** (U_s 和 I_s) 在三组动态测试 (μ -CHP 应用) 中的影响。

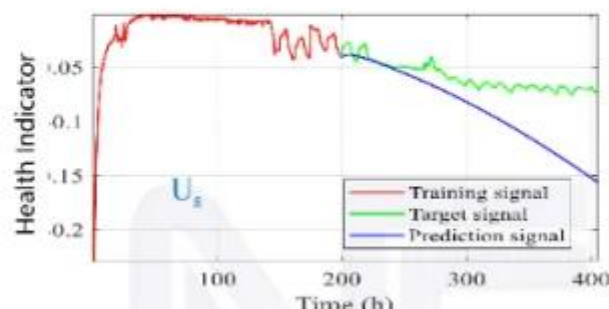
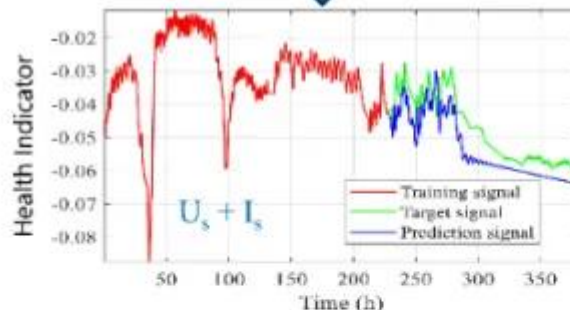
稳态案例: 与1-input ESN相比, 2-input ESN一般情况下能够提升预测精度 $\geq 40\%$ ；

准动态案例: 与1-input ESN相比, 2-input ESN (特别是温度和 I_s) 能够提升预测精度 $\geq 10\%$ 。

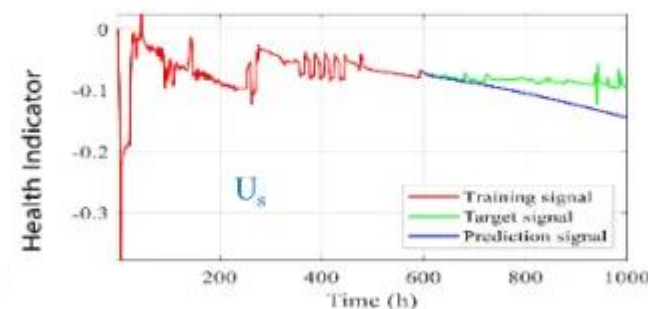
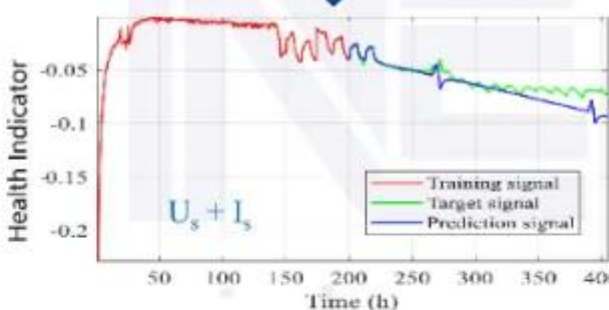
□ 动态案例1-案例3



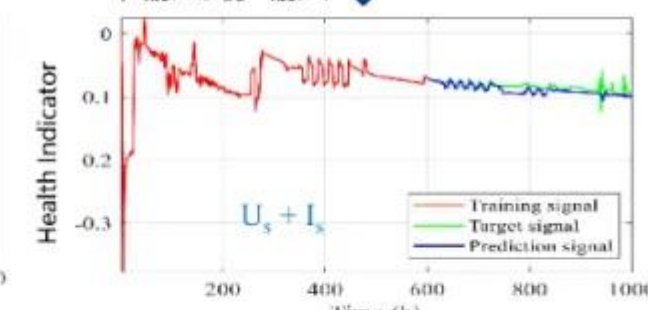
单输入到多输入 ↓



单输入到多输入 ↓

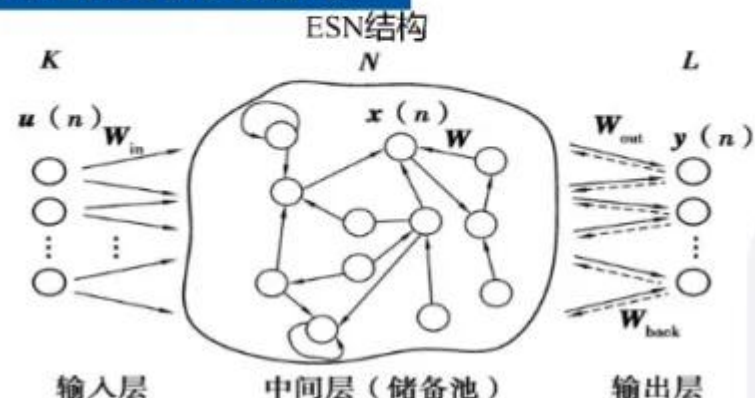


单输入到多输入 ↓



测试	动态案例1		动态案例2		动态案例3	
输入	1-input (U_s)	2-input ($U_s + I_s$)	1-input (U_s)	2-input ($U_s + I_s$)	1-input (U_s)	2-input ($U_s + I_s$)
RMSE	0.01867	0.00650 (↑65.18%)	0.02819	0.00810 (↑71.27%)	0.03396	0.01199 (↑64.69%)
MAPE	0.26439	0.11326 (↑57.16%)	0.19113	0.06666 (↑65.12%)	0.26779	0.11355 (↑57.60%)

□ 不确定性分析实施步骤

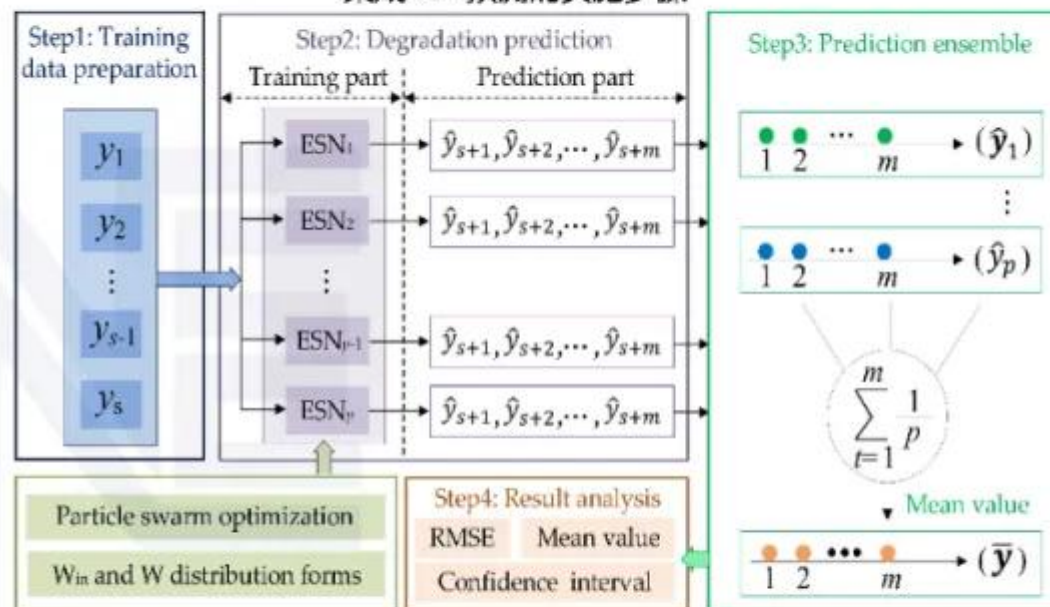


泄露率: 调整神经元状态的更新速度, 改变动态特性, 影响网络对输入数据的响应方式;

谱半径: 决定ESN的记忆能力, 不确定性来源于蓄水池内部连接权值的随机性;

正则化因子: 影响网络的记忆能力和动态性, 控制网络结构的不确定性。

集成ESN预测的实施步骤



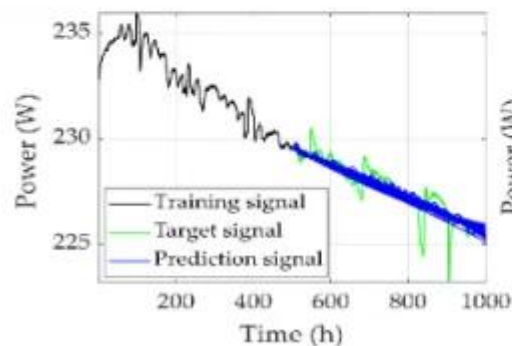
y_i represents U_s at time t_i

$\hat{y}_{s+1}, \hat{y}_{s+2}$ predicted voltage at time t_{s+1} and t_{s+2}

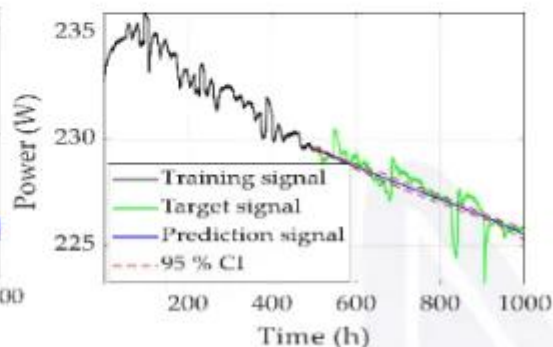
- **当前方法**: 单输入ESN将历史电压作为输入, 未来电压作为输出。
- **存在问题**: ESN中随机生成的输入矩阵和内部权重矩阵具有不确定性。
- **解决方案**: 从统计学的角度分析随机矩阵的影响, 建立集成ESN结构, 提供预测结果的平均值和95%置信区间。

*数据来源: 《Z.Hua, et al, 2022.》

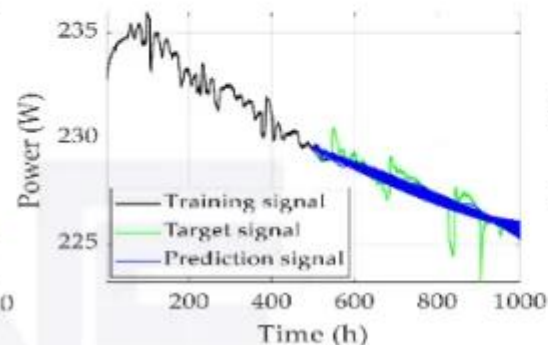
□ 稳态案例



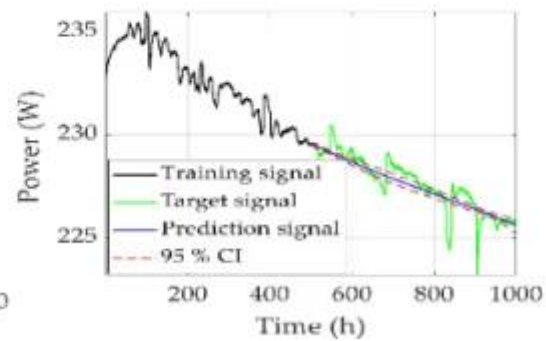
高斯分布下预测结果



高斯分布下95%置信区间预测结果

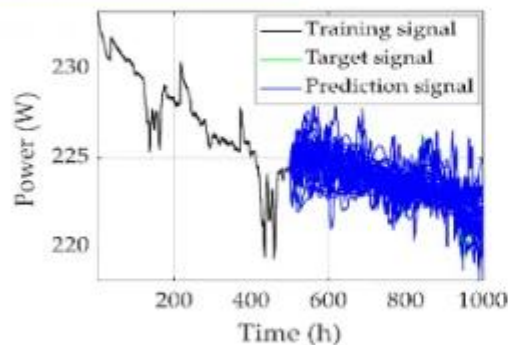


随机均匀分布下预测结果

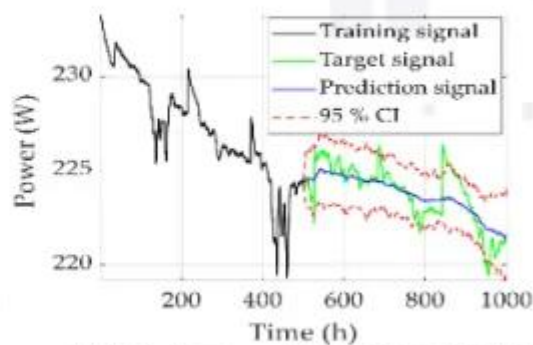


随机均匀分布下95%置信区间预测结果

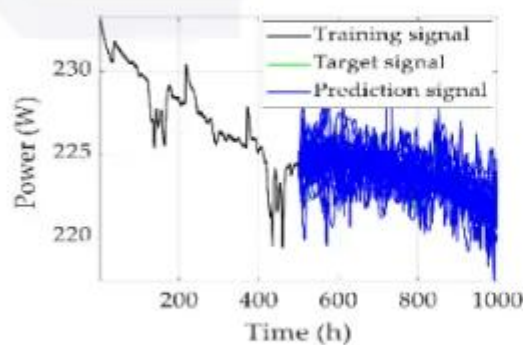
□ 准动态案例



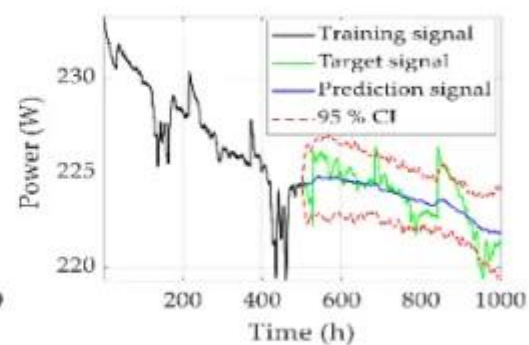
高斯分布下预测结果



高斯分布下95%置信区间预测结果

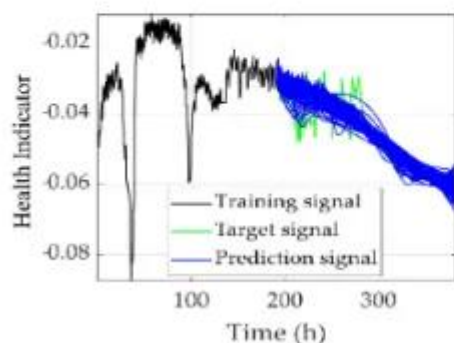


随机均匀分布下预测结果

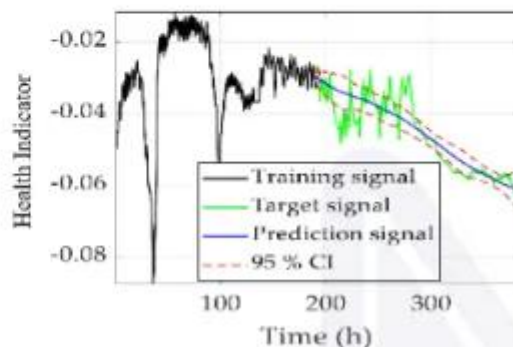


随机均匀分布下95%置信区间预测结果

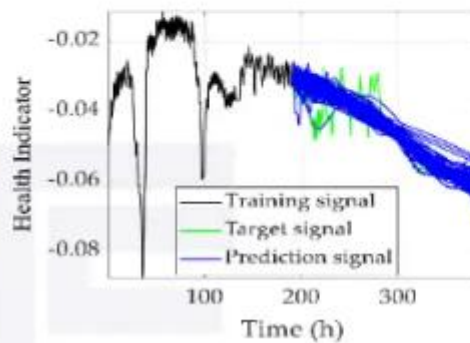
□ 动态案例



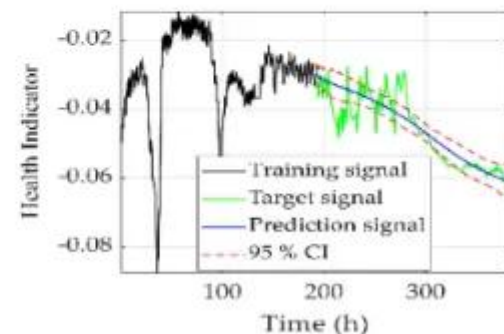
高斯分布下预测结果



高斯分布下95%置信区间预测结果

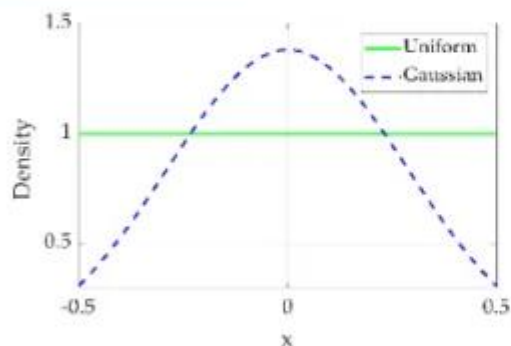


随机均匀分布下预测结果

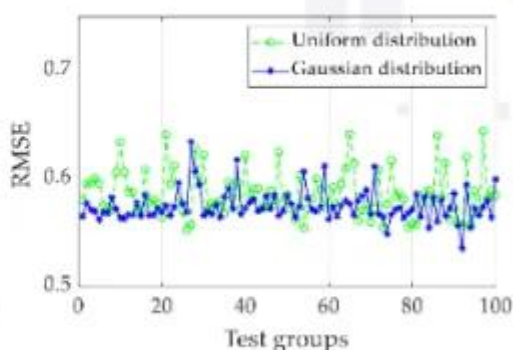


随机均匀分布下95%置信区间预测结果

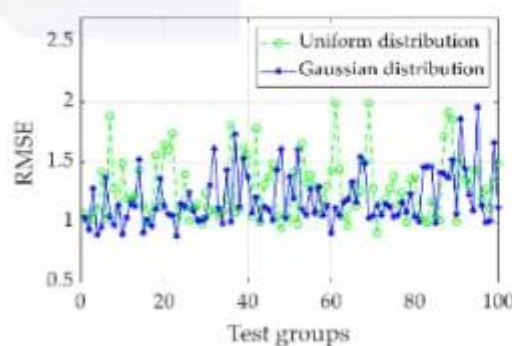
□ 误差分析



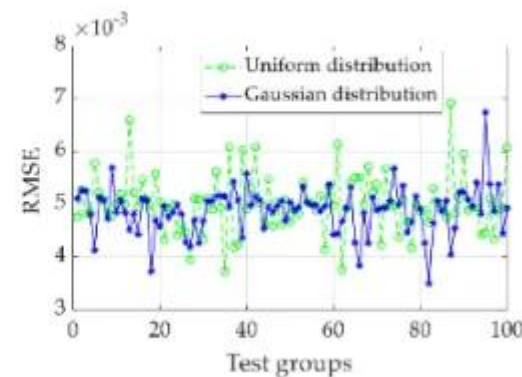
均匀分布和高斯分布的概率密度函数



稳态工况下100组ESNs的RMSE



准动态工况下100组ESNs的RMSE



动态工况下100组ESNs的RMSE

2.6 寿命预测发展方向

□ 氢燃料电池寿命预测未来研究的方向

方向一

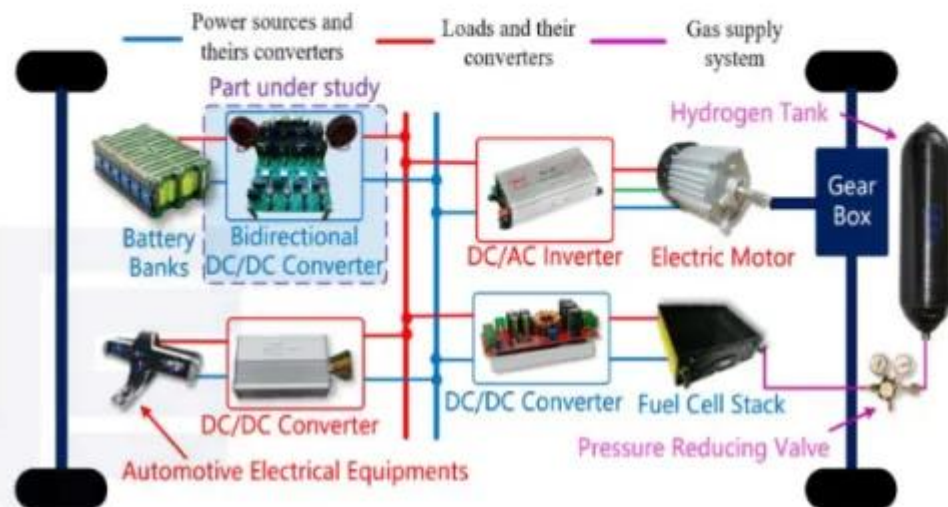
- 寻找更高效的健康指标;
- 电流影响使静态HI的单调下降趋势不明显, 需寻找更高效的动态HI。

方向二

- 提升预测精度 (传感器噪声、运行参数、环境因素、用户操作);
- 需要准确提取老化相关信息, 寻找抗干扰方法。

方向三

- 实现在线预测 (构建数学模型、“黑箱”关系);
- 短时间内实现中长期预测, 与在线预测结合。



燃料电池汽车动力系统



Toyota Mirai 2 代氢燃料汽车



西门子氢能列车Mireo Plus H

*数据来源: 《Huangfu, et al, 2019.》

➤ 氢燃料电池在无人机领域的应用

优势

- 低温性能好
- 加速迅捷
- 供气时间短
- 污染小

劣势

- 成本高
- 寿命短
- 储氢困难
- 体积大



➤ 极端环境下的空中运输



新创氢翼第二代氢动力无人机

➤ 更大的有效载荷容量，便于携带设备（传感器、摄像头、通讯设备）



美国“离子虎”无人机



西工大“鸿鹄”eVTOL飞行器

报告提纲

01

氢燃料电池系统简介

02

氢燃料电池寿命预测

03

研究团队介绍

智能驱动研究团队



窦满峰, 1967
教授/博导、主任/副所长

从事航空航天特种电机研究, 为**平流层飞艇、载人空间站、运20、风云系列卫星**等提供特种电机。承担**973重点项目1项, 国家科技攻关项目4项, 国家863项目6项**, 承担型号任务十余项, 获**国家发明二等奖1项**, 省部级科技奖励11项, 立部级三等功1次, 发表论文100余篇, 专利40余项。



赵冬冬, 1985
教授/博导、副主任

法国贝尔福-蒙贝利亚技术大学博士, 陕西省青年人才托举工程, 中法新能源与混合动力联合实验室副主任, “微特电机及驱动技术”陕西省重点实验室副主任, 主持自然科学基金面上项目、青年项目、国家级军口纵向项目等, 发表SCI论文20余篇, 获**国防技术发明二等奖1项(排1)**、国防科技进步二等奖1项。



汪远林, 1988
副教授/博导

德国慕尼黑联邦国防军大学博士、博士后, 主要研究足式仿生机器人关节电机及其驱动器。主持**自然科学基金青年项目、国家级军口纵向项目**等, 参与奥迪X型电动汽车主驱动电机、临近空间浮空平台、高空飞行器燃油泵电机等多个重点项目研发。发表SCI论文20余篇, 获国防技术发明二等奖1项。



华志广, 1990
教授/博导

国家级青年人才, 法国勃艮第-弗朗士孔泰大学博士、博士后, 启元实验室科研助理, **主持国家军口纵向项目2项, 自然科学基金青年项目1项**, 其他省部级项目4项。发表SCI一区TOP期刊13篇, 授权专利12项。zhiguang.hua@nwpu.edu.cn

工业和信息化部“航空航天电机系统技术”国防科技创新团队

教育部航空航天稀土电机系统技术工程研究中心

陕西省稀土永磁电机及控制系统工程技术研究中心

陕西省微特电机及驱动技术重点实验室

全国稀土永磁电机协作网副理事长单位

陕西中-法新能源与混合动力国际科技合作基地





西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY

请各位专家批评指正！

汇报人：华志广

