



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

# 数字孪生技术在新能源产业(碳排放) 中的作用

张磊

2025年5月26日

- 一、新能源产业发展趋势
- 二、新能源产业(碳排放)主要技术
- 三、数字孪生技术发展趋势
- 四、数字孪生在新能源产业中的作用



# 一、新能源产业发展趋势

# 1.1 新能源产业快速发展

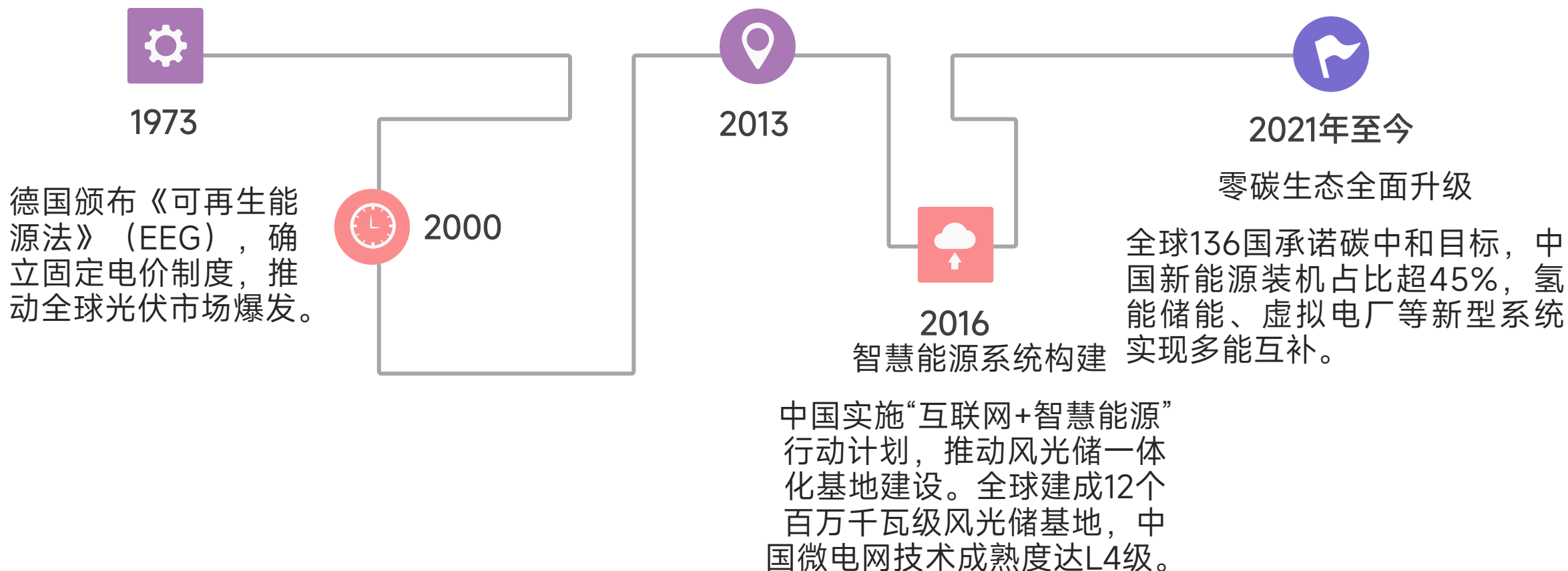


河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

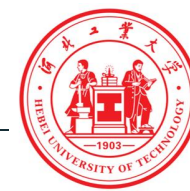
## 石油危机触发变革

全球石油危机爆发，美欧启动太阳能电池、风力发电等替代能源基础研究。

中国光伏装机容量跃居全球第一，全年新增装机12.9GW。



# 1.1 新能源产业快速发展



- 新能源利用理念发轫于欧美农业机械化革命，1887年美国人Charles F. Brush建造了首台12kW自动调节叶片风力发电机，其木质塔架结构为现代水平轴风机奠定原型。丹麦于1891年在Askov建立首个风电研究所，通过4叶片直流发电机组实现乡村供电，至1910年建成100座5-25kW电站，开创分散式能源网络雏形。
- 第三次石油危机触发全球能源重构：美国1978年通过《公共事业管制政策法案》强制电网接纳可再生能源，催生NASA主导的MOD-1兆瓦级风机；欧洲同步推进光伏产业化，德国西门子1975年将多晶硅电池效率提升至10.5%，推动光伏组件成本从100美元/瓦降至20美元/瓦。

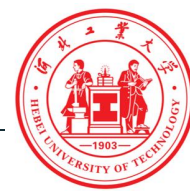
# 1.1 新能源产业快速发展



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

- 全球首个固定电价机制：2000年德国《可再生能源法》确立固定电价制度，推动欧洲光伏装机量年均增长超30%。2001年中国将新能源列入国家“863计划”，启动风电特许权招标，光伏组件年产能突破1GW，尚德、英利等企业崛起。
- 2015年中国将补贴范围扩展至私人消费领域，光伏“领跑者计划”催生PERC电池产业化，风电装机容量跃居全球第一。同年新能源汽车销量达17.7万辆，但微型电动车占比超50%，产品结构单一。

# 1.1 新能源产业快速发展



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

- 2016年中国实施“互联网+智慧能源”计划，建成12个百万千瓦级风光储基地；特高压输电技术突破国际标准壁垒，巴西美丽山项目采用中国方案。与此同时，成本拐点来临，光伏度电成本降至0.3元/千瓦时，陆上风电实现平价上网。
- 2021年136国设定碳中和目标，中国“双碳”战略明确2030年非化石能源占比25%。氢能首次纳入国家能源体系，燃料电池示范城市群启动。2024年中国海上风电单机容量突破18MW，关键部件国产化率达90%。

# 1.1 新能源产业快速发展



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

2010年

国务院

《关于加快培育发展战略性新兴产业的决定》将新能源列为七大战略性新兴产业。

2016年

能源局

《“十三五”可再生能源发展规划》提出2020年风光装机达4.5亿千瓦目标，建立可再生能源电力配额制。

2021年

国务院

《政府工作报告》首次将“碳达峰、碳中和”写入顶层设计，明确2030年非化石能源消费占比25%。

2013年

财政部

《关于分布式光伏发电补贴政策的通知》明确0.42元/度电价补贴标准，推动户用光伏装机量年增长率超300%。

2020年

工信部

《新能源汽车产业发展规划（2021-2035年）》要求2025年新能源汽车销量占比达20%，推动动力电池能量密度突破300Wh/kg。

2023年

国务院 发改委

《关于加快推进大型风光基地建设的通知》规划第三批455GW风光大基地项目，配套建设特高压输电通道与储能设施。



## 法律法规与政策要求

新能源技术的应用需符合国家战略规划与技术标准，**相关要求**包括：

**标准化建设**：2011年国家能源局发布《风电标准体系框架》，建立覆盖风机制造、并网设计、海上工程的全产业链标准，并推动国产化检测认证体系，解决标准滞后问题。

**行业规范**：2020年修订的《风电场并网安全评价规范》强制要求配置功率预测系统、高/低电压穿越能力及储能设备，海上风电需满足防腐等级C5-M和柔直输电标准，强化全生命周期管理。

**安全与合规性**：风电项目须签订《并网调度协议》，未核准项目不得享受电价补贴。强制实施风电机组低电压穿越检测、防火防雷措施及电缆安全防护，违规企业面临3年投标禁令。

# 1.1 新能源产业快速发展

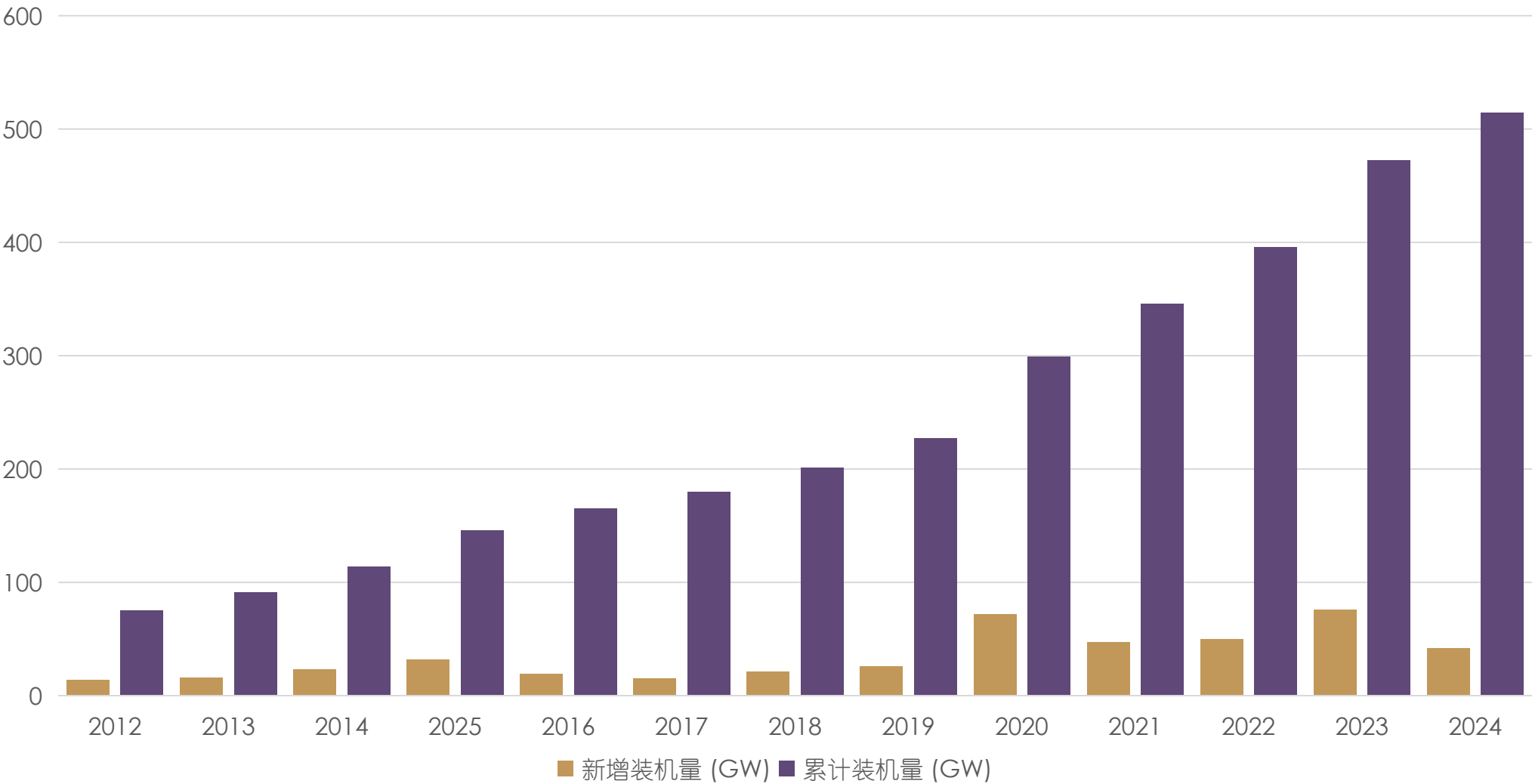
## 中国风电行业发展历程

早期示范阶段 (1986-1993年)	• 这个阶段利用国外赠款及贷款，建设小型示范风电场，政府的扶持主要在资金方面，如投资风电场项目及支持风电机组研制。
产业化探索阶段 (1994-2003年)	• 这个阶段我国首次建立了强制性收购、还本付息电价和成本分摊制度，由于投资者利益得到保障，贷款建设风电场逐渐增多。
产业化发展阶段 (2003-2007年)	• 这个阶段主要通过实施风电特许权招标来确定风电场投资商、开发商和上网电价，通过施行《可再生能源法》及其细则，建立了稳定的费用分摊制度，迅速提高了风产业化发展阶。
大规模发展阶段。 (2003—2007年)	• 在风电特许权招标的基础上，颁布了陆地风电上网标杆电价政策；根据规模化发展需要，修订了《可再生能源法》，制定实施可再生能源发电全额保障性收购制度。
风电补贴退坡阶段 (2019年至今)	• 国家发改委2019年颁布《关于完善风电上网电价政策的通知》，对部分风电项目将风电补贴退坡，不再补贴，且明确2021年是风电平价的起点，风电发展进入补贴退坡阶段。

# 1.1整体光伏风电快速发展



## 2012-2024年中国风电新增装机量及累计装机量统计



# 1.1 新能源产业快速发展



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

2023年，在锚定碳达峰、碳中和的目标下，我国坚持稳中求进，科学统筹能源安全供应和绿色低碳发展。国家发改委、国家能源局等部门不断完善能源政策顶层设计，并推出涉及能源结构转型、开展能源示范工程、扩大绿电交易、绿证覆盖、保障可再生能源消纳以及支持风电健康发展的政策，进一步助力能源高质量发展。

在一系列政策加持下，我国风电市场蓬勃发展，**2024年我国风新增装机量达42.37GW；累计装机量达512.6GW，同比增长8.89%**，未来，在“双碳”目标指引下，我国风电市场将继续保持增长趋势。

## 1.2风电发展趋势



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

全球风电技术正以**大型化、海上化及漂浮式基础**为方向加速革新：单机容量持续突破，推动陆海高效开发；深远海规模化与智能化发展同步推进；漂浮式技术突破深水限制，为清洁能源转型提供核心支撑。

风电作为清洁能源转型的核心力量，正以技术创新驱动全球低碳发展，未来将加速突破深水与成本瓶颈，构建多能协同体系，为能源安全与气候治理提供可持续解决方案。

## 1.2 风电发展趋势



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

近年来，中国大型风电技术持续突破，单机容量和效率显著提升。2023年，国内市场主流风电机组额定功率已普遍超过5兆瓦，最高达14兆瓦，整机效率突破50%，部分高端产品甚至达到55%。例如，金风科技和远景能源等企业通过优化叶片材料和结构设计，成功降低了设备重量并提高了发电效率。2025年，中国风电市场规模预计达400GW，大型化机组占比将进一步扩大，成为市场主导。





## 1.2 风电发展趋势



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

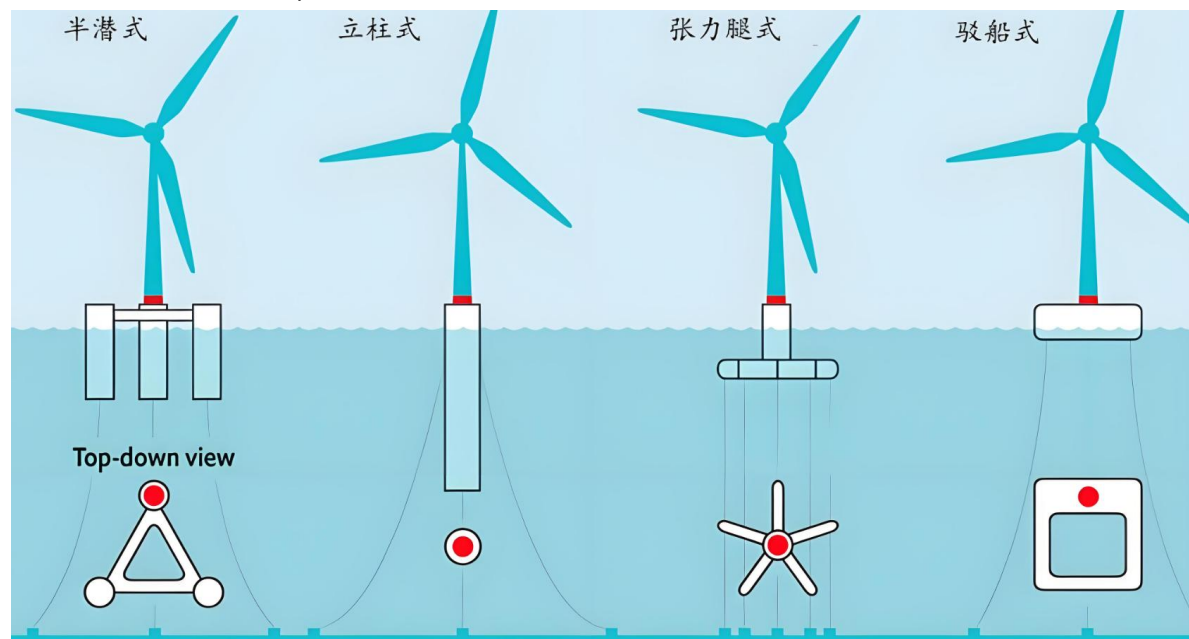
中国海上风电发展迅速，2023年装机容量突破1.5亿千瓦，居全球首位，布局了山东半岛、长三角等五大海上风电基地集群，推动规模化开发并规划到2030年实现4亿千瓦目标。典型案例包括江苏大丰海上风电场（国内首个示范项目）。欧洲同样领跑全球，如英国的伦敦阵列风电场和丹麦维斯特兰项目，均采用固定式基础技术。



## 1.2 风电发展趋势



全球漂浮式风电技术目前仍处于示范验证阶段，成本约为固定式基础的2-3倍，主要受制于浮体材料、动态缆及锚泊系统的高昂投入。该技术尤其适用于50米以上深水海域，此类区域占全球海上风能资源的80%，中国南海、欧洲北海等区域已布局多个示范项目，如法国EoIMed（30MW），验证了半潜式、张力腿式等基础结构的可行性。





## 1.3风电面临的挑战



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

当前风电机组成本持续下降，陆上风电度电成本已降至0.15-0.25元/千瓦时，海上风电成本降至0.35-0.45元/千瓦时，较2019年下降40%。这得益于风机大型化（陆上单机容量达10MW、海上向16-18MW迈进）和供应链国产化的突破。

然而，原材料价格波动（如钢材、碳纤维）及核心部件寿命不足仍是主要瓶颈。未来需聚焦20MW级海上机组研发（预计2026年商用）及轻量化材料（如碳纤维叶片）创新，以进一步降低单位兆瓦制造成本。

# 1.3风电面临的挑战

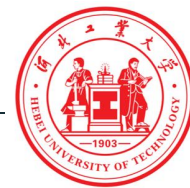


河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

运维成本呈现分化趋势：陆上风电通过智能化改造（如数字孪生技术），每兆瓦年运维成本从1.2-1.6万美元降至1-1.4万美元；而海上风电因环境恶劣（盐雾腐蚀、台风频发）和运维船依赖，成本仍高达16.7万美元/MW。

当前行业通过无人机巡检和预测性维护系统优化效率，但深远海风电场施工窗口期短（年有效作业仅100天左右）及动态缆故障率高的问题仍未解决。未来需加速深远海漂浮式平台（如中国“海油观澜号”项目）和模块化安装技术研发，同时探索“风电+储能”协同运维模式以分摊成本。

## 1.3 风电面临的挑战



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

风电已成为全球减碳主力，2022年实现二氧化碳减排12亿吨，相当于停运2.8亿辆燃油车。中国华能如东海上风电场年减排246万吨，等同植树1.3亿棵。

但行业仍面临生态挑战：退役叶片回收率不足（全球仅德国实现90%金属部件再利用）、鸟类撞击风险（需通过雷达监测降低70%死亡率）。

未来需强化全生命周期管理，推广叶片化学回收技术（回收率突破95%），并依托CCER碳交易机制（绿电价格从18元/吨涨至35元/吨）和“风光储氢”多能互补体系，将风电碳减排效益深度融入新型电力系统。

# 急需数字化智能化转型

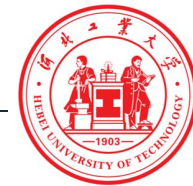
当前风电发展面临多重挑战：在机组端，尽管单机容量大型化推动度电成本下降但原材料波动和部件寿命短板仍制约降本空间；在运维端，海上项目年均运维成本高达16.7万美元/MW，受限于盐雾腐蚀、台风等环境风险及动态缆故障率高等问题；在生态端，叶片回收率不足30%、鸟类撞击风险等矛盾日益凸显。

这些困境倒逼行业向**数字化、智能化加速转型**——需通过数字孪生技术（如上海电气“风云系统”构建30类预警模型）、AI故障预警（如金风科技SOAM系统实现故障处理时间降低）和云边协同平台（如滨海南H3项目实现预防性运维），破解资源开发精细化、设备管理精益化和生态影响可控化的核心难题，推动风电从“规模驱动”向“数据驱动”跃迁。



## 二、新能源碳排放主要技术

## 2.1 全球减碳趋势

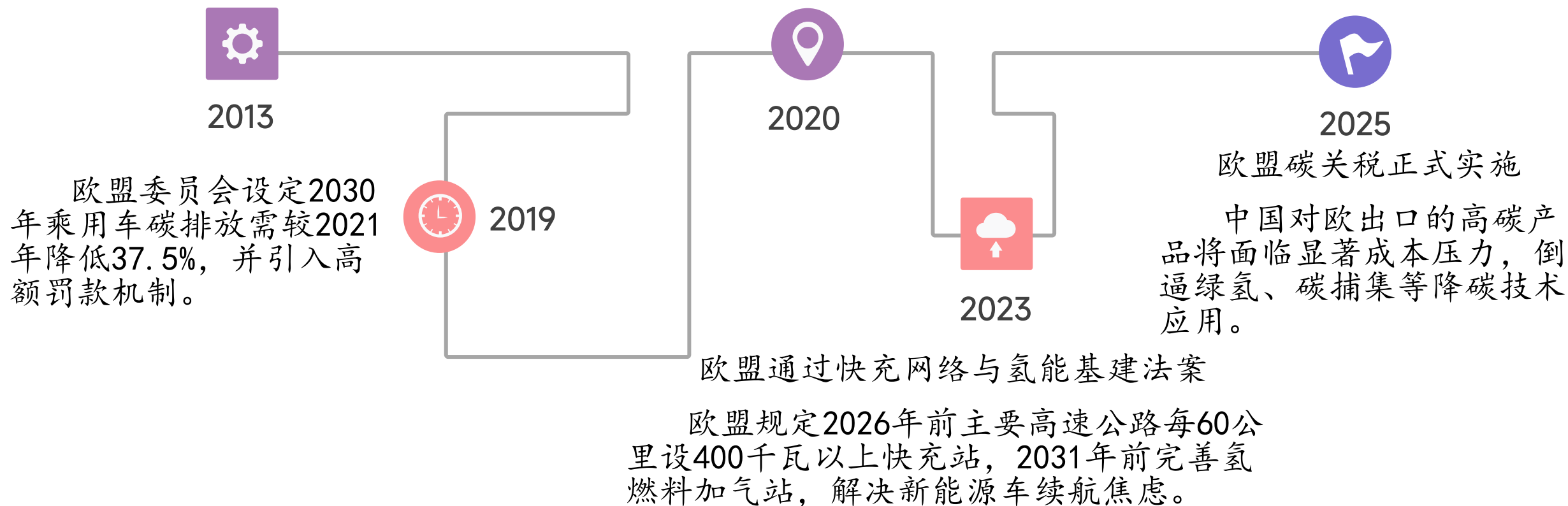


河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

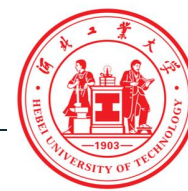
欧盟在《巴黎气候协定》前已制定降低汽车碳排放的中期规划，目标是在本世纪上半叶大幅减少交通领域碳排放。

加州宣布2035年禁售燃油车

美国加州成为全球首个明确燃油车禁售时间表的地区（2035年），推动北美车企向电动化转型



## 2.1 全球减碳趋势



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

新能源领域碳排放相关技术的发展可追溯至全球应对气候变化的紧迫需求、政策法规的驱动、能源结构转型及技术创新竞争。

《巴黎协定》：全球近200个国家达成协议，将温升控制在 $1.5^{\circ}\text{C}$ 以内，推动各国设定减排目标。中国提出“双碳”目标（2030年碳达峰、2060年碳中和），欧盟计划2030年碳排放较1990年减少55%。

欧盟碳边境调节机制：2021年草案提出对进口产品征收碳税，倒逼供应链低碳化，2025年正式实施，覆盖钢铁、铝、氢等行业，推动企业采用绿氢、碳捕集等技术。

## 2.1 全球减碳趋势



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

可再生能源规模化：中国光伏、风电装机容量全球第一，2023年贡献全球可再生能源新增装机的50%以上，推动度电成本下降60%-80%。

电网清洁化：中国清洁电力占比从2010年16%提升至2030年目标25%，欧盟分时电网碳排放因子精细化核算，推动新能源汽车全生命周期减排。



## 2.1 全球减碳趋势



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

氢能技术突破：日本掌握70%氢燃料汽车专利，丰田计划2030年混动和氢能车型占比达70%；中国加速布局电解槽和加氢站，2023年建成428座加氢站全球第一。

技术争议与经济挑战：氢能储运成本高、能量密度低，但被视为规避锂电池竞争劣势的差异化路线，欧盟通过政策补贴弥补短板。

# 2.1 全球减碳趋势



《新能源汽车产业发展规划  
(2021-2035年)》

提出新能源汽车销量占比  
2025年达20%，2035年成为主  
流，并推动全产业链技术创  
新。

《关于推动能耗双控逐步转向碳排  
放双控的意见》

强调从“能耗总量控制”转向“碳  
排放总量与强度双控”，为非化石  
能源发展松绑。

《2024—2025年节能降碳行动方案》

2025年非化石能源消费占比达20%，  
重点行业（如钢铁、石化）需完成  
能效改造，例如钢铁行业2030年电  
炉钢占比提升至15%。

2020年

2023年

2024年

2021年

2024年

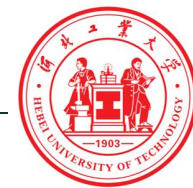
《关于财政支持做好碳达峰碳中和工作的指导意见》

明确通过绿证交易、碳市场机制及科研资金倾斜  
支持新能源技术研发，例如燃料电池汽车示范城市群  
“以奖代补”政策。

《加快构建碳排放双控制度体系工作方案》

2025年前完善核算体系，“十五五”时期（2026-  
2030年）实施碳排放强度与总量控制，碳达峰后强  
化总量约束。

## 2.2 新能源减碳宏观技术



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**新能源领域的碳排放技术**是指通过技术创新、清洁能源替代、全生命周期管理及智能监测等手段，减少或消除新能源产品在生产、使用、回收等环节中的碳排放，以实现低碳或零碳目标的技术体系。



## 2.2 新能源减碳宏观技术



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

短期：风光储一体化、车网互动 —— 提升可再生能源渗透率

利用风光储一体化技术把风力发电、光伏发电与储能系统进行物理集成以及协同控制，以此来解决风电、光伏存在的“间歇性、波动性”这一核心问题，进而提升电力系统对可再生能源的消纳能力。车网互动（V2G）技术利用电动汽车（EV）的车载电池充当分布式储能单元，借助双向充电桩与电网相连，达成“车 - 桩 - 网”能量与信息的双向流动，车辆能够在电网高峰时段放电（V2G），在低谷时段充电（G2V）。

## 2.2 新能源减碳宏观技术



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

### 中期：氢能、CCUS——突破工业领域深度脱碳瓶颈

氢能是清洁能源，对工业深度脱碳很重要。其通过可再生能源电解水制取绿氢几乎无碳排放，在钢铁、化工等行业可替代高碳原料或工艺，还能在交通运输、分布式发电等环节取代传统能源助力脱碳。

CCUS技术含碳捕集、利用、封存三个环节。碳捕集是从高碳排放工业环节废气中分离二氧化碳；碳利用是将其再用于食品、化工等领域变废为宝；碳封存是通过地质方式隔绝二氧化碳，避免其进入大气，共同助力工业突破深度脱碳瓶颈。

### 长期：智能电网与碳市场机制 —— 推动全球能源系统转型

智能电网与碳市场机制将成为推动全球能源系统转型的核心动力。智能电网通过数字化技术构建“源网荷储”协同的灵活电力系统，实现风能、太阳能等可再生能源的高效消纳与跨区域优化配置，解决绿电大规模并网的技术瓶

碳市场机制则通过配额交易、碳税等市场化手段为碳排放定价，将环境成本纳入企业经营决策，倒逼高碳行业加速能源替代与技术升级。

二者形成“技术支撑 + 制度驱动”的协同效应，推动能源体系从化石能源主导的传统模式向零碳电力、氢能等新型能源形态全面转型，最终构建全球低碳、高效、安全的能源新生态。



## 2.3大型风电减碳技术



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

### 高效风机设计与智能控制技术

#### •大型风机迭代

叶轮直径突破230米，扫风面积**提升40%**，捕风效率显著增强；

160米以上超高塔筒技术，有效捕捉高空稳定风资源；

碳纤维主梁叶片**减轻重量30%**，降低结构载荷；

#### •智能感知与控制

激光雷达前馈控制技术实现提前10秒风速预测；

基于数字孪生的动态偏航系统，**发电效率提升3-5%**；

模块化变流器设计使电能转化效率达98.5%；

## 2.3大型风电减碳技术



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

### 低碳制造与循环技术

#### •低碳制造与循环技术

生物基环氧树脂替代率达15%;

永磁电机**稀土用量降低20%**的拓扑优化设计;

塔筒钢结构采用电弧炉短流程工艺, **碳排放减少40%**;

#### •退役装备循环利用

热解回收技术实现叶片GFRP材料95%组分回收;

磁体稀土元素闭路回收系统效率达92%;

混凝土基础破碎再生利用率突破85%;



## 2.3大型风电减碳技术



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

### 系统级减碳集成方案

- 风光储氢多能耦合

配置20%储能实现弃风率<3%;

电解水制氢系统与风电波动功率动态匹配;

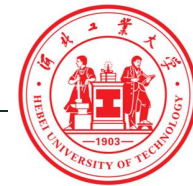
虚拟同步机技术提升电网惯量支撑能力;

- 全生命周期碳管理

基于区块链的碳足迹追溯系统;

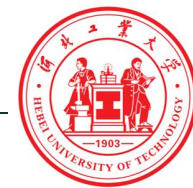
建设期使用生物柴油工程机械减排15%;

运维阶段无人机巡检减少80%人力运输排放;



## 三、数字孪生发展概况

# 3.1 数字孪生发展历程



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

NASA为阿波罗飞船开发地面仿真系统，模拟航天器在太空环境中的状态，成为数字孪生技术雏形。

通用电气（GE）与西门子推动工业数字，技术从理论走向工业实践，成为智能制造核心工具。



20世纪六十年代

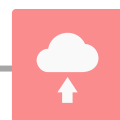
迈克尔·格里夫斯（Michael Grieves）在美国密歇根大学首次提出“Digital Twin”概念，强调物理实体与虚拟模型的全生命周期同步。为工业制造领域的数字孪生应用提供理论框架。



2002



2010



2017

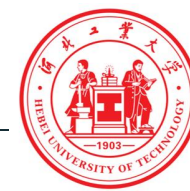
国际标准化组织（ISO）发布首个数字孪生标准化框架（ISO 23247），定义数据模型、接口规范及系统架构。



2020年至今

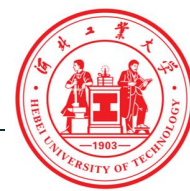
“数字孪生+AI”技术成为实现“双碳”目标的核心支撑，推动能源系统智能化与低碳化。

### 3.1.1 数字孪生发展背景

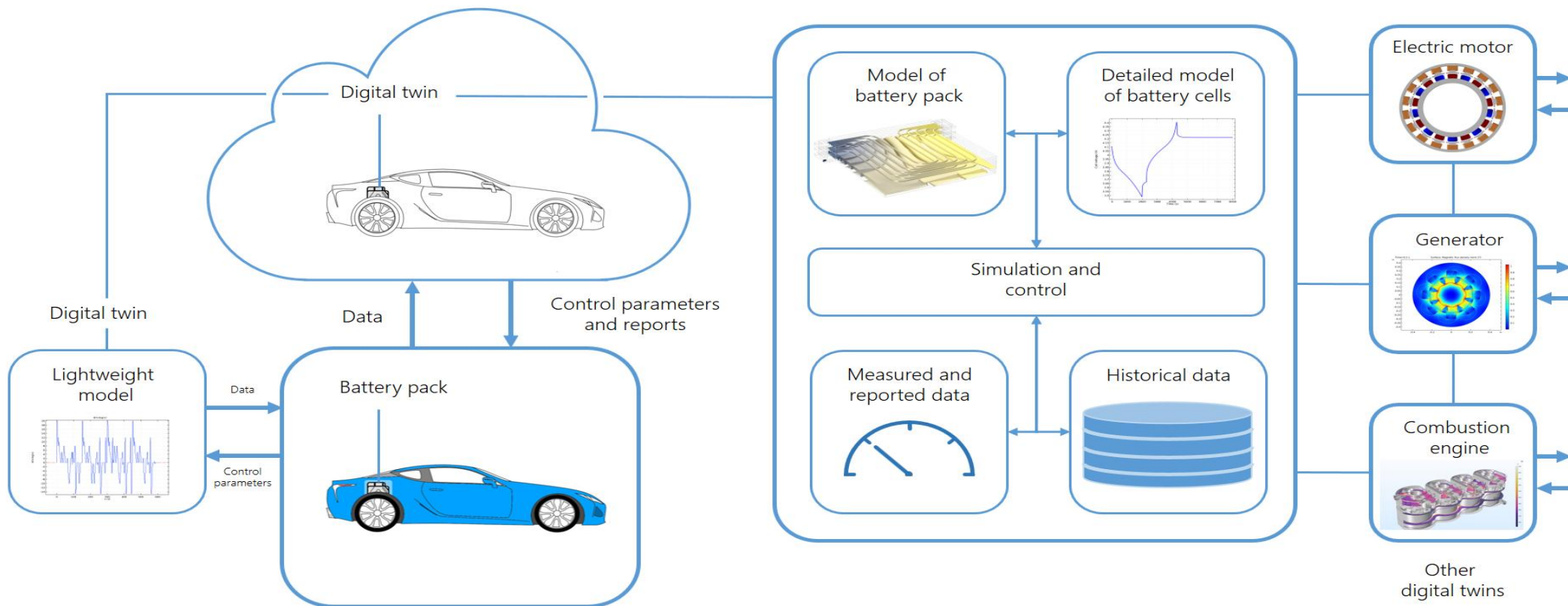


- 数字孪生技术的雏形可追溯至1960年代美国国家航空航天局（NASA）的**阿波罗计划**。这一阶段的实践虽未明确提出“数字孪生”概念，但已体现**虚实映射**的核心思想。
- 2002年，美国密歇根大学教授迈克尔·格里夫斯（Michael Grieves）首次提出“数字孪生”术语，强调**物理实体**与**虚拟模型**的**全生命周期同步**，为技术理论化奠定了基础。

### 3.1.1 数字孪生发展背景



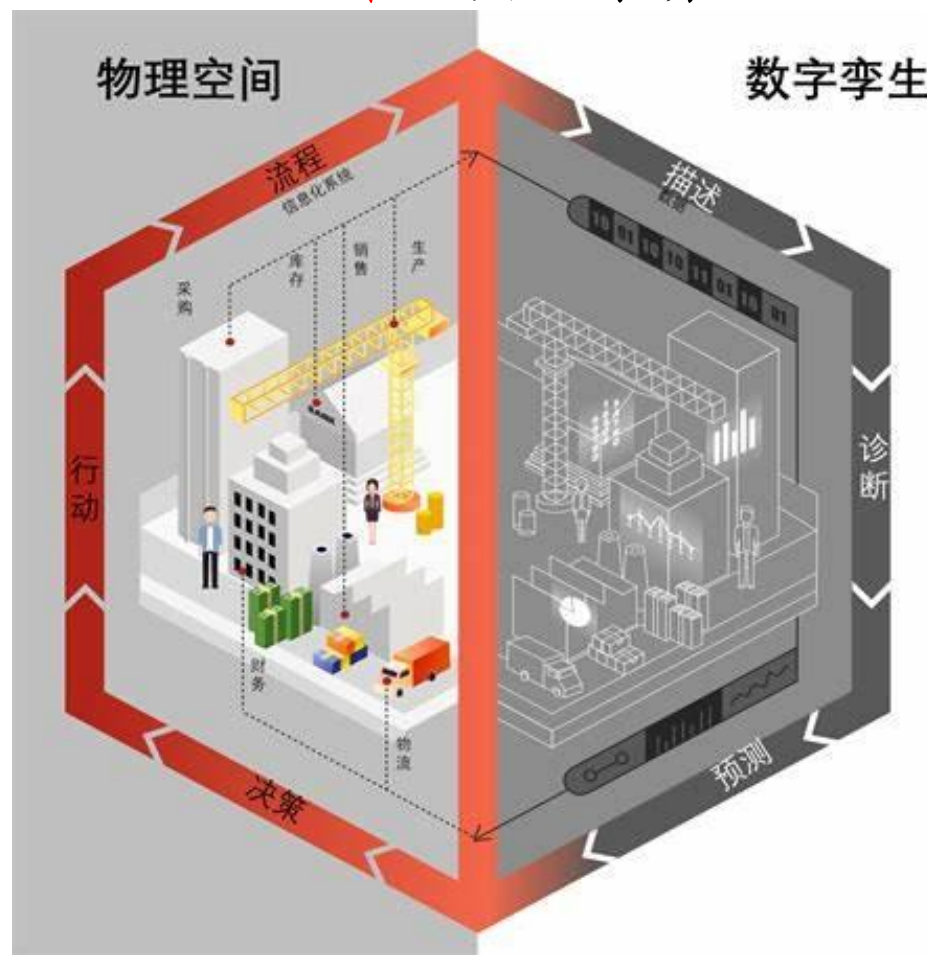
- 定义：利用物理模型，使用传感器获取数据的仿真过程，在虚拟空间中完成映射，以反映相对应的实体的全生命周期过程。



### 3.1.1 数字孪生发展背景

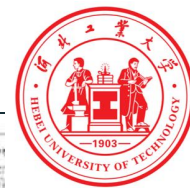


- 目前广为接受的**业界定义**是：数字孪生是基于传感器所建立的某一物理实体的数字化模型，可模拟**物理世界**的具体事务。





# 3.1.1 数字孪生发展背景



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



2003  
美国Dr. Michael Grieves第一次提出了数字孪生概念



2010

NASA定义未来飞行器数字孪生范例



2012

美国空军研究室应用到战斗机维护

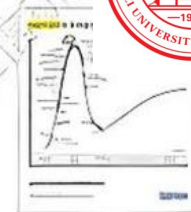
2014

西门子等工业企业相继应用数字孪生技术



2017

被Gartner列为未来十大先进技术之一



2019

数字孪生  
发展历程

1、概念发展期

2、应用于航天行业

3、向其他行业拓展

1、PLM、仿真等工业软件为数字孪生概念提出奠定基础

2、航天行业最早建设基于模型的系统工程，伴随物联网的发展，数字孪生得到初步应用

3、工业互联网在多行业的应用普及，为数字孪生应用范围拓展提供保障

PDM

PLM

MBD

MBE

智能制造/工业互联网蓬勃发展

1960

CAD软件诞生

1970

有限元技术兴起，以ANSYS为代表的CAE公司相继成立

1980

1990

CAE企业适应计算机软硬件技术的发展

2003

2007

云计算、大数据等新一代信息技术不断发展

2010

物联网技术兴起

2013

工业4.0概念提出

2020

数字化信息  
技术对工业  
的变革

## 3.1.2 中国数字孪生发展



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

2019.10

发改委

《产业结构调整指导目录》

将物联网、数字孪生、  
CIM等设立为鼓励产业。

2020.6

工信部

强调要前瞻性部署一批  
数字孪生等应用标准。

2021

工信部 住建部

《物联网新型基础设施建设三年行  
动计划（2021-2023年）》指出加快  
数字孪生技术研发与应用。

2020.4

住建部

2020年九大重点任务提出“加  
快构建”部、省、市三级CIM平  
台建设体系。出台《城市信息  
模型CIM技术导则》。

2020.9

国务院

将数字孪生写入《“十四五”规  
划》提出加快数字化发展，建设  
数字中国，探索数字孪生城市。

2023.9

国务院

建设数字孪生国家骨干  
水网，基本建成数字孪  
生南水北调中线。



# 技术定义与核心要素

数字孪生 (Digital Twin) 是一种通过多源数据融合、物理-数据混合建模及实时仿真，在虚拟空间中构建与现实世界实体或系统完全镜像的数字化模型技术。

其核心要素包括：

**数据驱动**：依赖物联网传感器实时采集物理实体的动态数据（温度、压力、位置）。

**虚实交互**：通过虚拟现实（VR/AR）、3D可视化等技术实现物理实体与数字模型的实时同步与双向反馈。

**全生命周期管理**：覆盖设计、制造、运维到退役的全过程动态仿真与优化。

**多技术融合**：集成BIM、GIS、AI、云计算等技术，支撑复杂系统的模拟与决策。

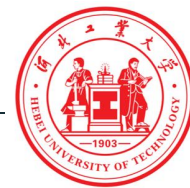
# 法律法规与政策要求

数字孪生技术的应用需符合国家战略规划与技术标准，**相关要求**包括：

**标准化建设**：参考国际标准ISO 23247及国内《数字孪生城市白皮书》，推动跨行业技术通用性。

**行业规范**：中国《“十四五”数字经济发展规划》明确将数字孪生列为智慧城市、智能制造的核心技术，要求遵循绿色低碳与伦理规范。

**安全与合规性**：2024年《水利部关于推进水库、水、蓄滞洪区运行管理数字孪生的指导意见》强调数据安全保护与国产化技术应用。



## 智慧城市与城市治理

### 核心技术：

BIM（建筑信息模型）+ GIS（地理信息系统）：构建城市三维数字孪生体，模拟交通、管线、人口流动等场景。

实时数据融合：整合物联网传感器、摄像头、卫星遥感数据，实现动态监测与应急响应。

### 典型应用：

北京城市副中心：通过数字孪生优化交通微循环，降低高峰拥堵率20%；

上海临港新区：模拟台风、洪涝等灾害场景，提升应急管理效率。

### 3.1.3 中国应用广泛的数字孪生技术



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## 工业制造与智能制造

#### 核心技术：

产品全生命周期管理（PLM）：从设计、生产到运维的全流程孪生仿真；

AI驱动的预测性维护：利用机器学习预测设备故障，降低停机时间。

#### 典型应用：

宁德时代：构建电池生产数字孪生平台，单电池碳足迹精准追踪至49 kgCO<sub>2</sub> eq/kWh（千克二氧化碳当量/千瓦时）；

三一重工：通过工厂数字孪生优化产线布局，生产效率提升30%。



## 能源管理与“双碳”转型

### 核心技术：

电网-储能协同仿真：动态优化新能源消纳与储能调度；

碳足迹追踪：区块链+数字孪生实现全产业链碳排放透明化。

### 典型应用：

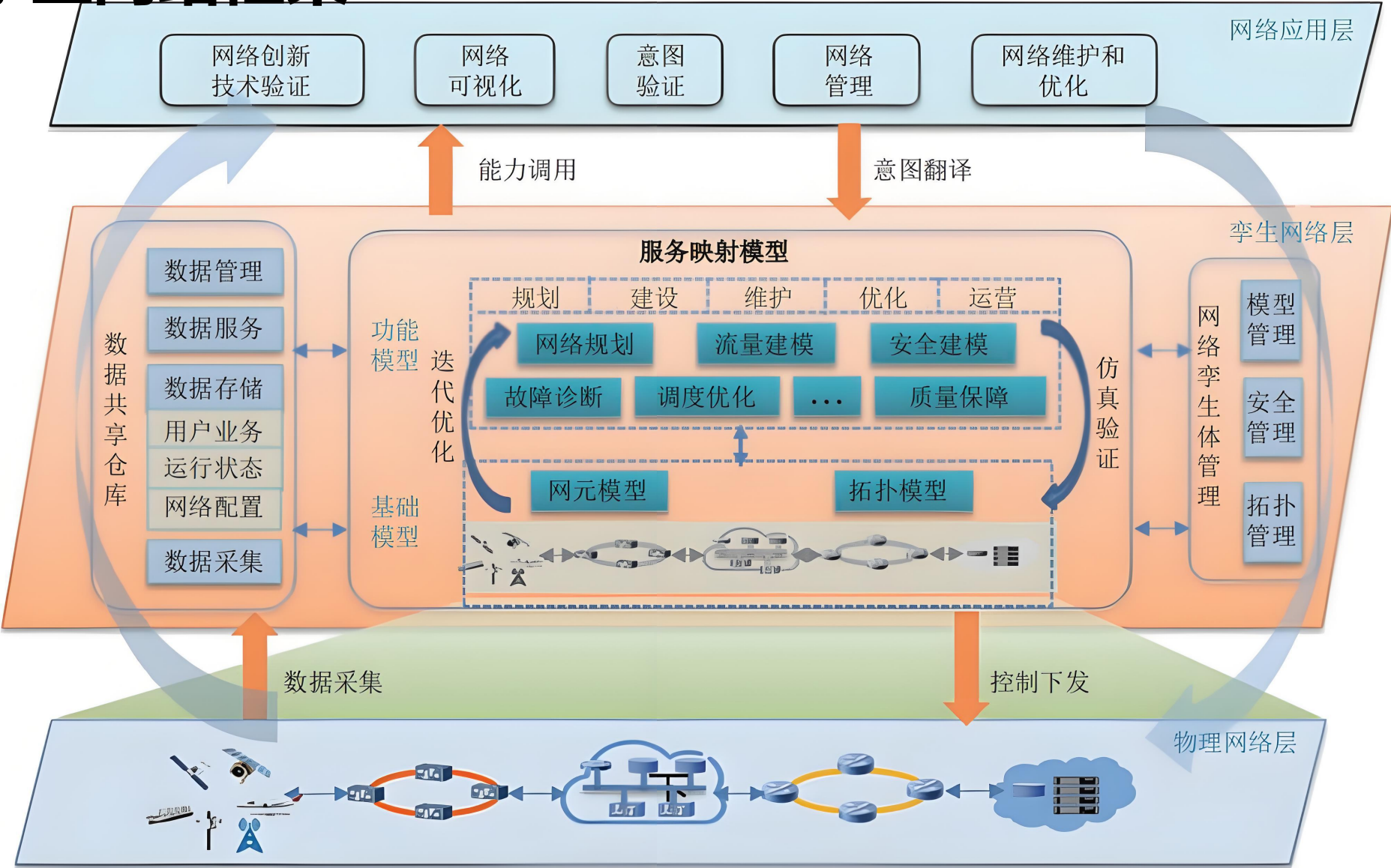
国家电网：数字孪生电网减少弃风弃光率超15%；

南方电网：虚拟电厂模型提升区域电力调峰能力。

# 3.2 数字孪生技术框架



## 数字孪生网络框架



# 数字孪生网络框架

### 物理网络层

作为**底层硬件基础**，由**基站、服务器及物联网设备**构成，负责实时数据采集与控制指令下发。其核心作用是将物理世界的运行状态转化为数字信号，为上层提供原始数据支撑，确保网络运行的实时性与可靠性。

### 孪生网络层

基于**物理层**构建，通过数据共享仓库实现模型管理、仿真验证与网络安全管控。该层对物理网络进行数字化映射，支撑网络规划与动态优化，并为服务映射模型层提供标准化数据接口。



# 数字孪生网络框架

## 服务映射模型

整合基础模型与功能模型，实现意图翻译与能力调用。该层将物理层数据与孪生层模型结合，支持网络全生命周期管理，例如通过拓扑分析优化资源配置，为上层应用提供技术验证与决策依据。

## 网络应用层

面向用户与业务需求，提供可视化界面、意图验证、技术验证及智能化管理功能。该层利用下层能力实现创新技术落地、运行状态监控与动态策略调整，最终驱动网络的智能化运营与闭环优化。

# 传感器网络与物联网集成

物联网传感器网络作为数字孪生技术在物理网络层的核心支撑，通过多源异构数据采集与智能感知，为智能工厂、智慧农业、风电领域等场景提供高精度实时数据，助力设备互联与业务优化。

### 传感器：

环境类：如温湿度传感器（智慧农业用于温湿度+光照传感器优化温室能耗）；

设备类：如振动传感器（智能工厂用于振动监测预警设备故障）；

视觉类：如工业相机（智能工厂用于产品合格率检测并基于此动态调整生产策略）。

# 传感器网络与物联网集成

当部署的传感器网络连接物联网平台后可实现每秒数万次高频数据采集，可大幅度减少工程成本。

例如：

在山东半岛南U场址海上风电项目中（装机容量150万千瓦，177台风机），MindSphere实现了海量设备数据实时采集，包括风速、功率、机组状态等参数，并通过66千伏集电系统优化数据传输效率；

采用模块化预装式设计的海上升压站与陆上集控中心，通过MindSphere的云平台完成远程监控与数据分析，缩短工期70天。

# BIM/CAD集成与物联网设备建模

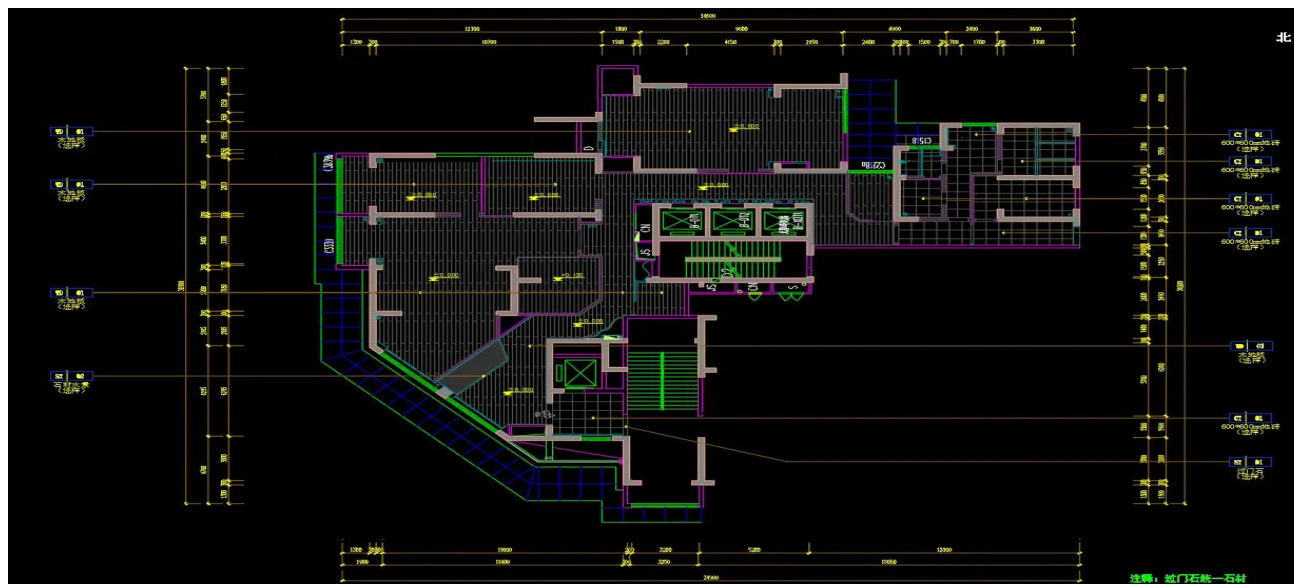
### 技术实现：

通过BIM/CAD与物联网的深度融合，实现建筑、机械设备的全生命周期数字化映射，支撑高精度仿真与动态管理。

**BIM：**基于三维模型集成建筑几何、材料、施工进度等全要素信息，实现设计-施工-运维一体化管理。

# BIM/CAD集成与物联网设备建模

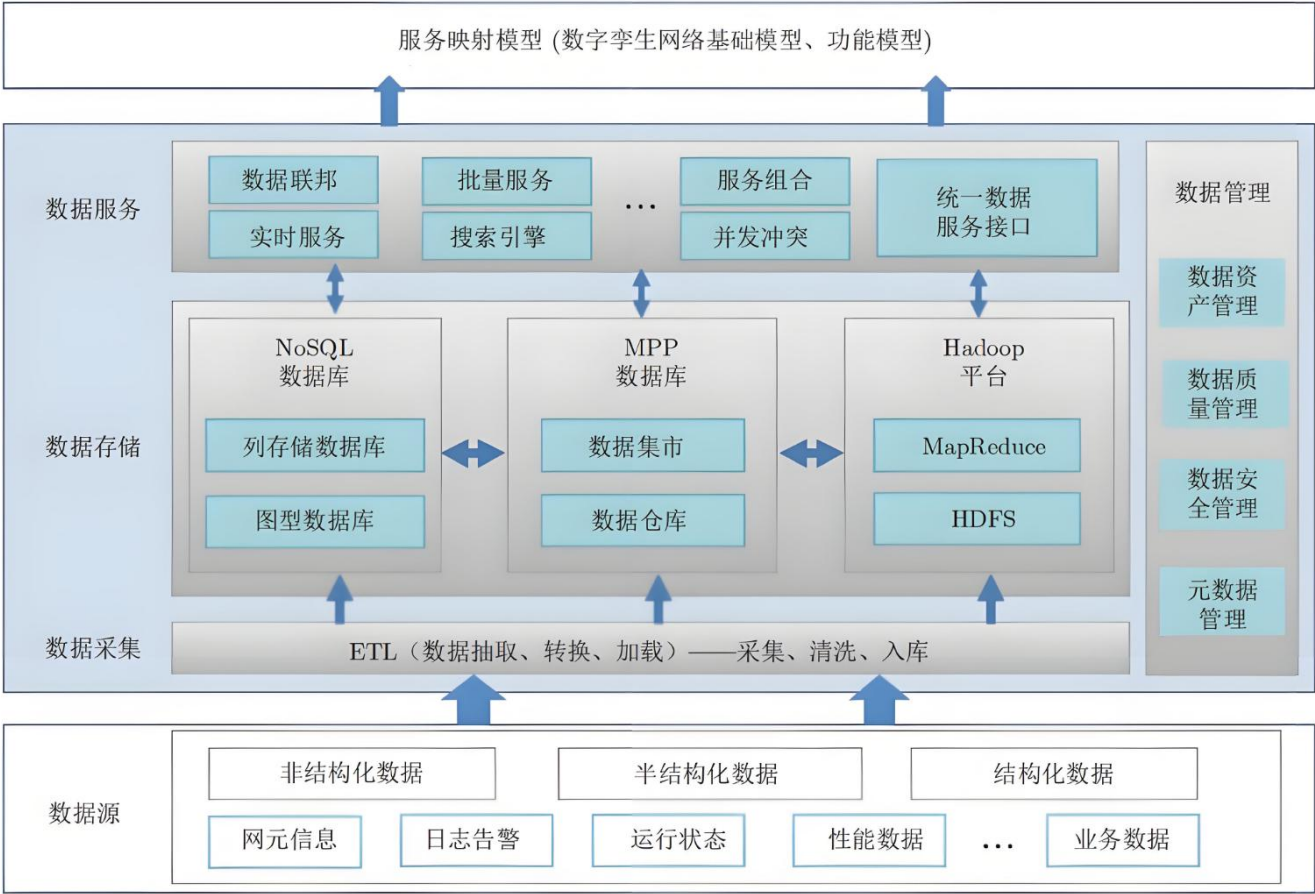
CAD：通过计算机辅助设计机械、电气等设备参数，支持工程图纸生成与仿真分析。



这两种建模方式都可通过IFC标准转换中间件（达索3DEXPERIENCE平台）实现多软件数据互通。

# 孪生网络层

孪生网络层通过数据共享仓库存储多源数据，管理网元模型与拓扑模型，并基于仿真验证优化网络配置。



# 数据共享仓库

### 技术实现：

数据存储：采用分布式数据库（MongoDB）存储多源异构数据，支持结构化数据（网元配置表）与非结构化数据（视频监控流）的混合存储；

数据服务：通过标准化接口，支持服务映射层的“网络规划”“流量建模”等功能模型调用实时数据；

模型优化：基于历史数据训练设备退化曲线（风机轴承寿命预测模型），动态更新孪生层参数。



# 模型管理

### 技术实现：

网元模型：定义设备物理属性，支持参数化配置与动态校准；

拓扑模型：基于图数据库（Neo4j）构建网络连接关系，支持动态更新；

网络孪生体管理：整合网元与拓扑模型，生成与物理层1:1映射的虚拟孪生体，支撑“网络维护”“优化”等场景。



# 仿真验证

### 技术实现：

网络配置验证：通过硬件在环（HIL）模拟物理控制器信号，验证孪生层配置与物理层兼容性；

多场景仿真：支持极端天气、流量峰值等场景推演，生成“网络规划”“安全建模”的优化策略；

算法迭代：将仿真结果反馈至服务映射层，驱动AI模型优化。



# 安全管控

### 技术实现：

零信任架构（ZTA）：基于X.509证书实现设备-平台双向认证，动态调整访问权限；

数据加密：采用加密传输通道与存储数据；

威胁防御：通过行为基线分析实时检测异常流量，联动防火墙自动阻断。

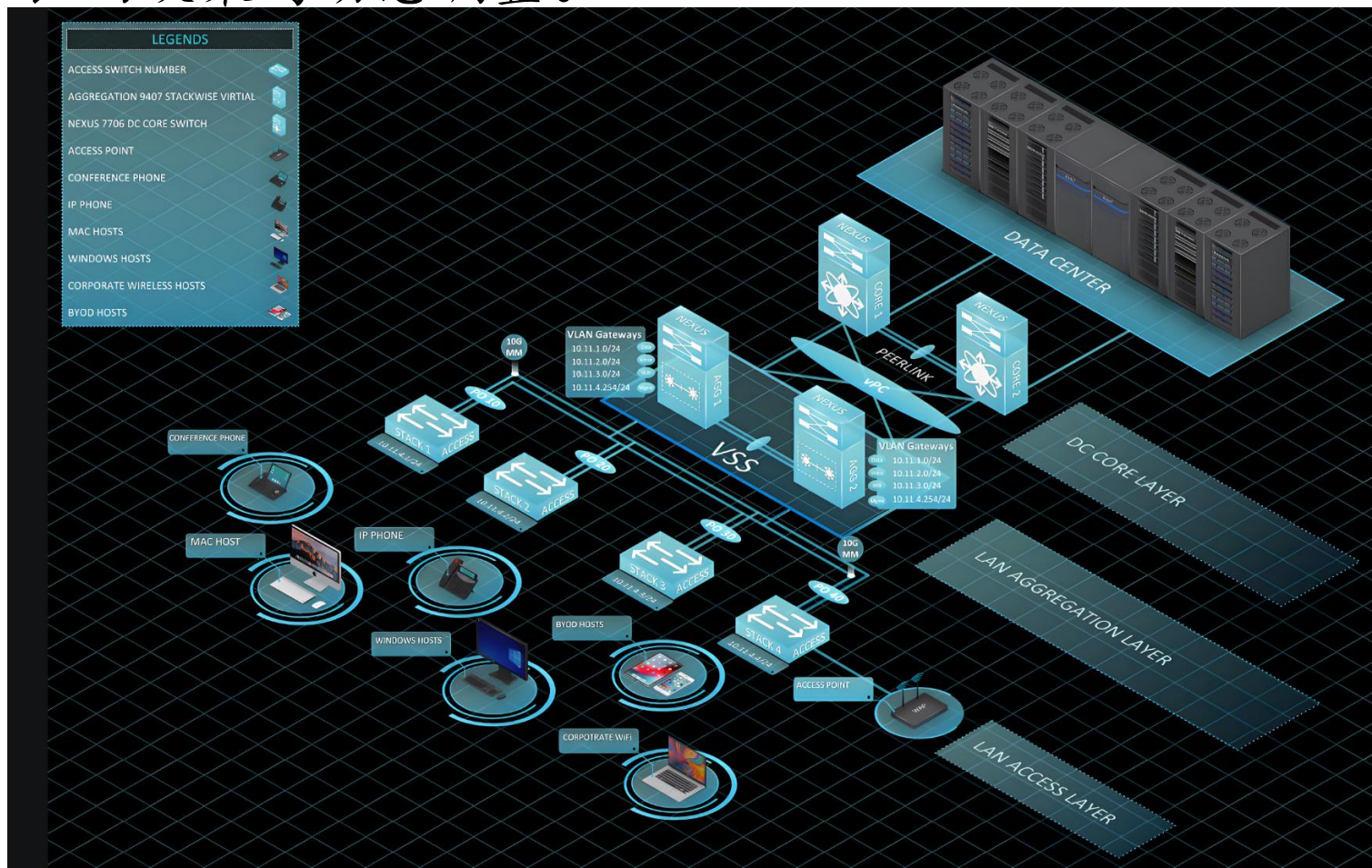
## 3.2.3服务映射模型层



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

### 服务映射模型层

服务映射模型层整合网络规划、流量建模、安全建模等功能，驱动业务场景（如网络维护）的决策与动态调整。





## 网络规划与流量建模

### 技术实现：

资源调度算法：基于历史负载与实时流量预测，优化网络资源配置；

数字线程集成：贯通孪生层网元模型与拓扑数据，生成网络部署方案。

算法预测：通过深度学习方法（如LSTM模型）分析历史流量峰值（如山东电商平台双十一数据），预测带宽需求；

动态路由策略：基于仿真结果调整流量路径。

## 安全建模与管理

技术实现：

风险评估模型：量化网络攻击潜在损失；

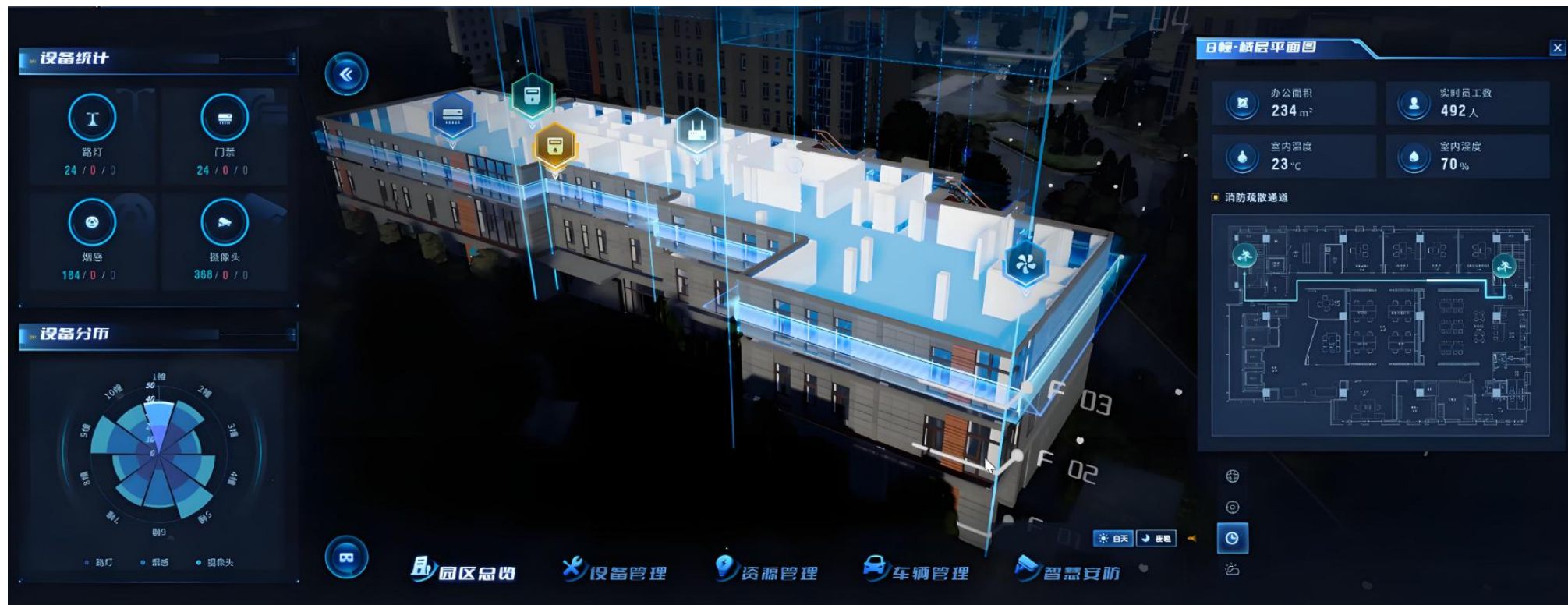
策略联动引擎：联动孪生层安全管控模块，自动下发防火墙规则。

能碳优化：基于设备能耗模型（宁德时代电池产线碳足迹追踪），动态调整运行参数。



# 网络应用层

网络应用层面向用户与业务需求，提供可视化界面、意图验证、技术验证及智能化管理功能（如网络维护、能效优化）。该层利用下层能力实现创新技术落地、运行状态监控与动态策略调整，最终驱动网络的智能化运营与闭环优化。





# 网络可视化与管理

### 技术实现：

多维度数据映射：基于WebGL与Unity引擎构建2D/3D可视化界面，实时渲染网络拓扑、设备状态。

交互式操作：支持拖拽缩放、路径高亮、告警筛选等操作。

自动化编排：基于YAML/JSON模板定义设备配置（防火墙规则），通过配置工具批量下发。

能效优化：结合数字孪生模型预测能耗峰值（数据中心PUE值），动态调整设备功率。



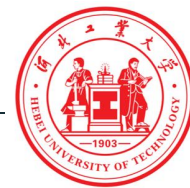
# 意图验证

技术实现：

策略合规性校验：基于自然语言处理（NLP）解析用户意图（优先保障视频会议带宽），生成网络配置规则并验证逻辑冲突。

动态风险扫描：通过强化学习模拟策略执行后果（新路由规则是否引发环路）。

### 3.3 典型数字孪生案例（非新能源）



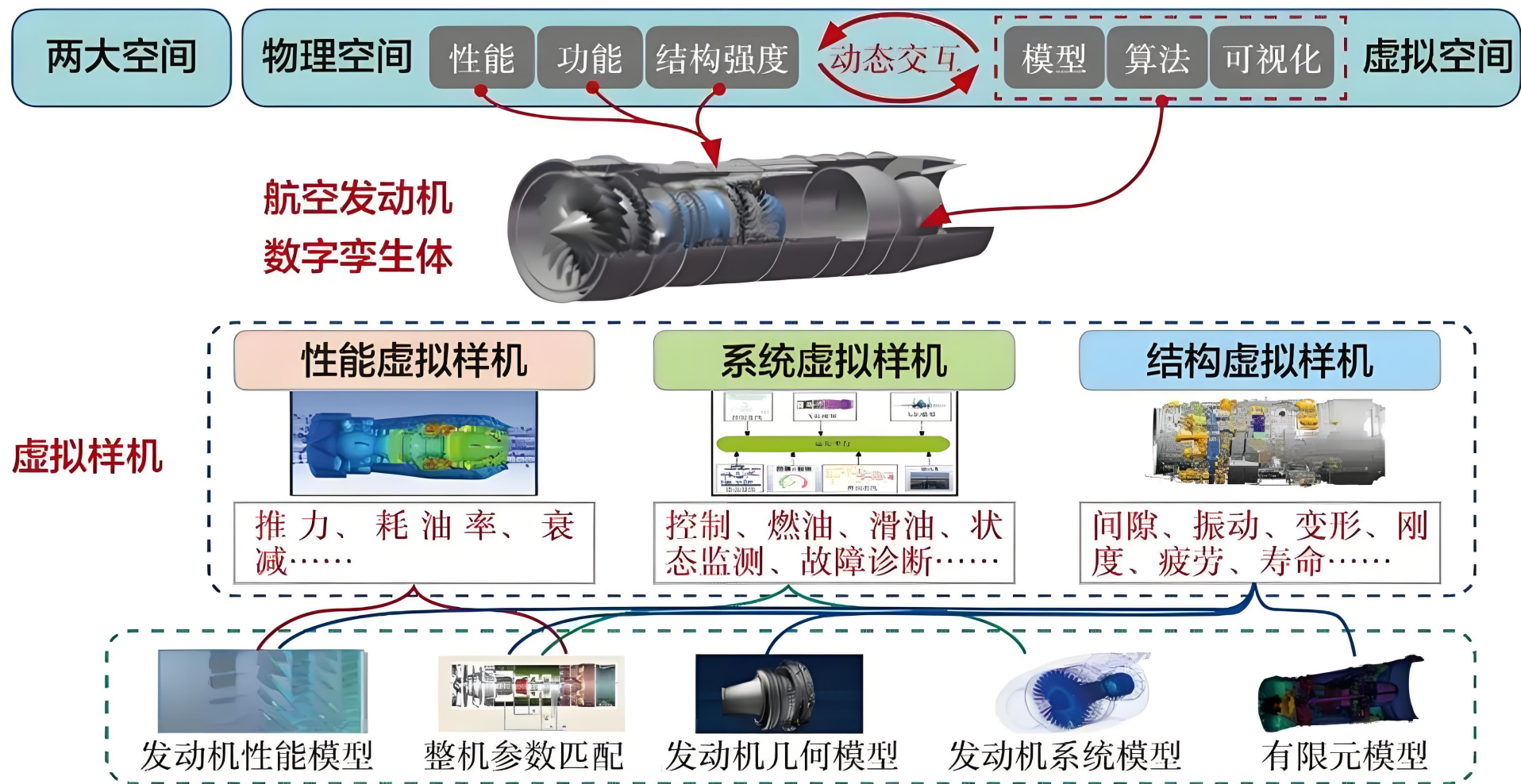
河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## 通用电气（GE）航空发动机数字孪技术

通用电气（GE）航空发动机数字孪生是一种基于物联网（IoT）、多物理场仿真和人工智能（AI）的虚拟化技术，通过实时映射物理发动机的运行状态和性能特征，构建高保真、动态更新的数字模型。

通用电气（GE）航空发动机数字孪生技术核心是通过传感器数据驱动、物理模型与机器学习融合的方式，实现对航空发动机全生命周期的监控、预测与优化。

技术框架



### 3.3.1 通用电气（GE）航空发动机数字孪生技术框架



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

#### 物理空间与虚拟空间动态交互：

物理空间：聚焦发动机实体性能（推力、耗油率）、功能（控制逻辑）和结构强度（振动、疲劳寿命），通过传感器实时采集运行数据（温度、压力、振动等）。

虚拟空间：基于多维度模型构建数字孪生体，实现与物理空间的双向数据同步与反馈优化。

#### 多层次模型构建：

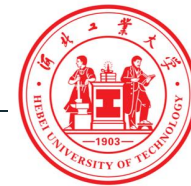
发动机性能模型：分析整机参数匹配（如气动效率、燃烧稳定性），预测推力衰减趋势和燃油经济性。

发动机几何模型：高精度三维建模还原叶片形状、流道结构，支持性能仿真。

发动机系统模型：涵盖燃油系统、滑油系统等子系统逻辑，模拟控制策略和故障传播路径。

有限元模型：计算关键部件（如涡轮叶片、轴承）的振动、变形、疲劳寿命等结构响应。

### 3.3.1 通用电气（GE）航空发动机数字孪生技术框架



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

#### 虚拟样机分类与功能：

性能虚拟样机：聚焦推力、耗油率等核心指标，模拟不同飞行高度、速度下的发动机性能衰减。

系统虚拟样机：集成控制逻辑、状态监测与故障诊断算法（如滑油压力异常预警）。

结构虚拟样机：分析叶片间隙、刚度变化及疲劳寿命，预测材料裂纹风险。



### 关键技术

#### 多学科模型融合

气动热力学（性能模型）：CFD（Computational Fluid Dynamics）模拟推力/耗油率，优化燃烧室气流，预测高空效率损失。

控制工程（系统模型）：集成燃油/滑油控制逻辑，构建故障传播路径（如燃油泵失效→振动加剧）。

结构力学（有限元模型）：FEA（Finite Element Analysis）分析叶片振动/热应力/寿命，识别裂纹风险（如涡轮蠕变）。

协同闭环：性能模型温度→结构模型变形→反向修正气动流道，提升设计精度（LEAP客机发动机燃油效率+2%）。



### 3.3.2 通用电气（GE）航空发动机数字孪生关键技术



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

#### 实时数据驱动校准

传感器网络：光纤光栅（应变）、压电式（振动）、红外测温（燃烧室），毫秒级采集。

动态修正：卡尔曼滤波校准热力学参数。

模型自进化：贝叶斯网络优化气动模型，以适应发动机性能退化的问题。

#### 可视化与智能算法

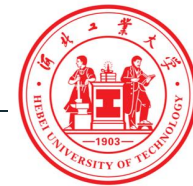
智能诊断：随机森林分析振动频谱（12kHz→轴承剥落），保持高准确率。

寿命预测：LSTM融合工况/疲劳数据，监测叶片寿命误差。



## 四、数字孪生在新能源产业中的作用

## 4.1 案例一：基于数字孪生技术的风电运维



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

### 案例一：基于数字孪生技术的风电运维

在全球“双碳”目标(碳达峰、碳中和)驱动下的能源变革浪潮中，**风力发电**作为新能源体系的重要支柱，其装机规模持续扩大带来显著减排效益的同时，传统运维模式在效率、成本和碳排放管理等方面的局限性也愈发突出。

面对新能源产业高质量发展要求，数字孪生技术的深度应用正在重构风电运维体系，通过构建虚实映射的智能运维平台，不仅提升了机组全生命周期管理效率，更为风电行业实现低碳化、智能化运维提供了关键技术支撑，有力推动了新能源产业与数字技术的深度融合创新。

## 4.1 案例一：基于数字孪生技术的风电运维



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

### 案例一：基于数字孪生技术的风电运维

**基于数字孪生技术的智慧风机模型**，不仅精准复现了风电机组的机械构造与运行参数，更深度融合了风电场地理环境、气象动态等**多元数据**。通过实时同步物理机组运行数据与数字模型，构建起覆盖“设备-场站-环境”的全息映射系统，有效解决了**传统人工巡检模式下数据采集碎片化、碳排放精细化管理能力薄弱**等问题，为新能源行业践行“双碳”目标提供了数字化基础设施。

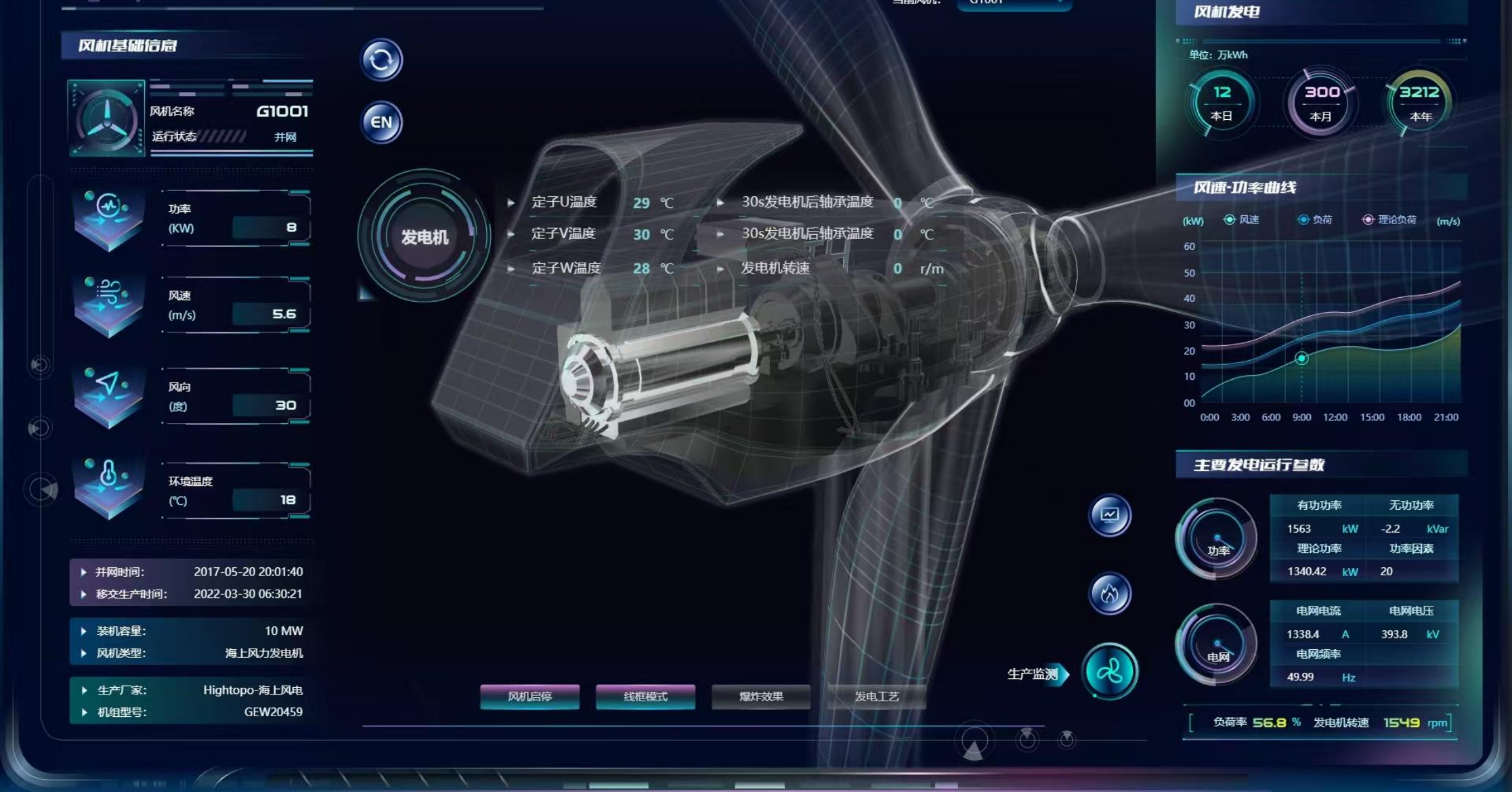
该系统集成机组振动、温度、转速等20余类运行参数，结合功率输出强度的关联分析，使运维人员能够穿透物理屏障，精准识别叶片结冰、齿轮箱磨损等潜在故障。相较于依赖离散传感器数据的传统模式，这种全要素感知能力不仅提升了新能源设备运行可靠性，更降低了单位发电碳排放强度，为构建“数据驱动、低碳运行”的风电运维体系提供了关键技术支撑，助力新能源行业智能化升级。

# 4.1 案例一：基于数字孪生技术的风电运维



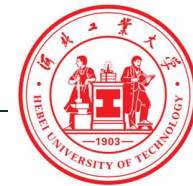
河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## 案例一：基于数字孪生技术的风电运维





## 4.1 案例一：基于数字孪生技术的风电运维



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

### 案例一：基于数字孪生技术的风电运维

通过建立 多维故障预测模型，系统可提前识别齿轮箱油温异常波动、振动频谱畸变等潜在故障特征，结合历史故障图谱与自学习算法，精准预判齿轮磨损、轴承疲劳等机械损伤风险，为新能源场站实现预防性维护提供科学决策依据。

当故障发生时，系统基于实时数据流与数字孪生模型的虚实交互，可迅速完成故障根源定位。例如，针对齿轮箱异常振动案例，系统通过比对虚拟模型中传动链动态响应曲线与实际监测数据，可精确识别故障源为第3级行星齿轮偏心磨损，同时生成碳排放损失评估报告，指导运维团队采取最优检修策略。

# 4.1案例一：基于数字孪生技术的风电运维

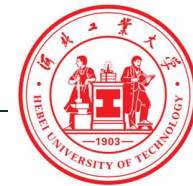


## 案例一：基于数字孪生技术的风电运维





## 4.1 案例一：基于数字孪生技术的风电运维



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

### 案例一：基于数字孪生技术的风电运维

#### 案例分析：

数字孪生技术可以与人工智能、大数据等技术相结合，实现风机运维监测的智能化和自动化。通过对大量运行数据的分析和挖掘，系统可以自动学习风机的运行规律和故障模式，提高故障诊断和预测的准确性。

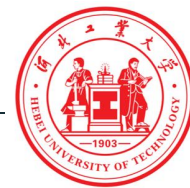
同时，智能化的运维决策支持系统可以为运维人员提供更加科学、合理的运维建议，促进风电行业的智能化发展。数字孪生技术在智慧风机运维监测中具有重要的应用价值和广阔的发展前景。



### 案例二：数字孪生智能微电网

在全球积极推进“双碳”目标的大背景下，**智能微电网**作为实现能源高效利用与绿色转型的关键技术，正受到越来越多的关注。数字孪生技术凭借其强大的可视化与智能化能力，为智能微电网的发展注入新的活力，在双碳智慧园区建设中发挥着至关重要的作用。

**智能微电网**是一个小型的电力网络，它能够实现电力的自发自用、余电上网，涵盖了分布式电源（如太阳能、风能等）、储能装置、负荷以及监控和保护系统等多个部分。然而，传统的智能微电网管理方式在面对复杂的能源流动和设备运行状态时，往往存在信息获取不及时、决策缺乏准确性等问题



### 案例二：数字孪生智能微电网

数字孪生技术在智能微电网中的应用，主要基于其先进的可视化引擎和数据集成能力。首先，通过部署在智能微电网各个关键节点的传感器，如分布式电源的发电功率传感器、储能装置的电量传感器、负荷的用电传感器等，实时采集海量数据。这些数据通过网络传输到数据中心后，将被进行清洗、整合和分析。利用其强大的图形渲染能力，将智能微电网的各个组成部分，包括能量路由器、分布式电源、储能设备、负载等，以三维可视化的形式呈现出来。

在图扑双碳智慧园区可视化监控平台中，我们可以清晰地看到基于能量路由器的新一代交直流混合配电网的实时运行状态，各个设备的位置、连接关系一目了然。

# 4.2案例二：数字孪生智能微电网



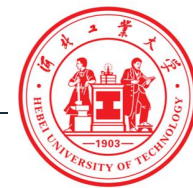
河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## 案例二：数字孪生智能微电网





## 4.2案例二：数字孪生智能微电网



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

### 案例二：数字孪生智能微电网

构建的虚拟场景中，**智能微电网**的运行状态实现了全方位**实时展示**。以能量路由器为例，通过数字孪生模型，能够实时监测其直流输出功率、交流输出功率、噪音水平、母线电压等关键参数。如在图中我们可以看到能量路由器 A 的直流输出为 5kW，噪音小于 60dB 等信息。同时，分布式电源的发电情况，如当日太阳能板的光照时长、辐照度以及光伏发电量等数据也能实时呈现，帮助管理者及时掌握能源生产状况。



## 4.2案例二：数字孪生智能微电网



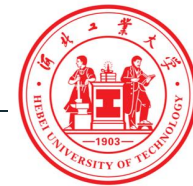
河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

### 案例二：数字孪生智能微电网

建立设备运行的正常模型后，一旦某个设备的运行参数偏离正常范围，系统能够及时发出预警。例如，当储能装置的电池温度异常升高、充放电次数接近寿命极限时，系统会迅速提醒运维人员进行检查和维护。同时，基于故障历史数据和实时监测数据的对比分析，能够快速定位故障点，缩短故障修复时间，提高智能微电网的可靠性。



## 4.2案例二：数字孪生智能微电网



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

### 案例二：数字孪生智能微电网

智能微电网中多种能源形式并存，如何实现能源的最优分配是关键问题。应用数字孪生技术后，根据不同时段的电价、能源供需情况，系统可以自动生成最优的能源调度方案，如在低峰时段利用低价电对储能装置进行充电，在高峰时段利用储能放电满足部分负荷需求，降低用电成本，提高能源利用效率。





## 4.2案例二：数字孪生智能微电网



河北工业大学  
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

### 案例二：数字孪生智能微电网

#### 案例分析：

随着技术的不断进步，**数字孪生技术**在**智能微电网**领域的应用前景将更加广阔。未来，它有望与人工智能、区块链等技术深度融合，进一步提升智能微电网的智能化水平和安全性。例如，利用区块链技术实现能源交易的去中心化、透明化，通过人工智能算法实现更加精准的能源预测和调度。数字孪生技术为智能微电网的发展提供了强大的技术支撑，在双碳智慧园区建设中发挥着不可替代的作用。通过实时监测、智能预警、优化调度等功能，它推动着智能微电网向更加高效、可靠、绿色的方向发展，为实现能源领域的碳中和目标贡献力量。

谢谢聆听