装备数字化技术专题培训

数字孪生
建模、仿真及运维数字化技术



——基于矿用电机、永磁直驱电机与矿用变频器研发制造一线的工程实践

汇报时间：2026.11.21

CONTENTS

内容导览

01 痛点 与数字化背景
为什么煤机装备必须谈数字化

02 建模 与仿真方法
数字孪生怎么建、建什么

03 案例 与工程实践
四个一线案例验证方法

04 路线 与行动建议
从单点仿真到运维闭环

知识导入

从一台井下设备说起：首要回答三个问题

01 突发停机

设备故障突发停机，直接影响工作面生产进度。

02 检修靠经验

故障判断依赖老师傅经验，判断不准、难以复制传承。

03 改样周期长

设计改样反复，样机验证周期长、试制成本高。



井下采煤成套装备：电机、直驱装置与变频器是核心动力单元

Q1 数字孪生是什么？

数字孪生是为物理实体在数字世界中构建的一个实时同步、双向交互的“活”的虚拟副本。它并非一个静态的3D模型，而是一个能感知、会思考、可推演的数字分身，旨在通过虚拟世界的模拟与优化，来指导和优化现实世界的运行。

Q2 电机和变频器怎么建模、怎么仿真？

电机和变频器的建模需综合物理机理与数据驱动等对象要点，并通过电磁、热、结构、控制这四类仿真技术来实现虚实映射。

Q3 运维怎么数字化？

就是通过实时数据感知与数字孪生模型，将传统的“被动抢修”转变为“主动预测与优化”的闭环管理。

1

为什么必须数字化

不是缺软件，而是缺机电控

数据闭环



痛点 · 现状剖析

安全可靠性要求推进数字化门槛

宁夏装备制造业处于数字化转型窗口期，煤机与矿用电机装备是其中安全要求最严苛的一类。

01

运行环境

采煤机隔爆电机、永磁直驱电机与矿用变频器长期在井下高尘、高湿、受限空间运行，任何过热、退磁或绝缘失效都可能触发停产甚至安全事故。

过热　退磁　绝缘失效

02

数据链跨度

问题往往要到使用环节才暴露。

设计 › 工艺 › 制造 › 检验 › 井下运维

03

单点仿真的局限

传统设计阶段电机、变频器、负载各算各的，系统级耦合风险无法提前评估，难以支撑运维决策。

电机　变频器　负载　各算各的

→ 数字化因此从可选项变为必答题

现状扫描

一线典型痛点集中在五个环节

01 机座加工

焊接与机加工变形直接影响整机装配精度。

02 隔爆电机

薄煤层等特殊场景下，空间与可靠性双重矛盾。

03 永磁直驱

退磁、温升、低速大转矩控制与保护难题并存。

04 矿用变频器

谐波超标、功率器件老化，故障录波数据利用率低。

05 状态监测

电机、变频器与负载数据彼此割裂，运维人员看不全、用不上。

概念认知

给设备在电脑里造一个同步的“数字分身”

通俗比喻

真实设备是“哥哥”，数字模型是“弟弟”：一一对应、跟着同步变化；还能让模型先演练一遍设备还没做过的动作。

01 物理实体

现场真实设备：井下电机、直驱电机、变频器及其负载。

02 虚拟模型

电脑里的模型：几何、物理、行为机理与数据模型。

03 数据连接

传感器与系统把两边双向连起来，状态实时同步。

一句话理解：物理设备与数字模型实时映射，可回看历史、可推演未发生的状态。

概念辨析

孪生不是三维模型、离线仿真或在线监测

对照对象	它做什么	缺什么
三维 CAD 模型	只画外形和装配关系，出工程图纸	不随设备运行状态变化，没有状态与机理
传统离线仿真	给定条件算一次，出设计与选型结果	不接实时运行数据，结论不能滚动更新
在线监测系统	采集并显示数据、触发报警	缺少可推演的设备模型，难定位根因与趋势

关键差异：双向映射、持续更新、能够模拟推演；现有图纸、监测、仿真都是孪生的基础构件，多数单位已有底子，不必从零开始。

核心观点

缺的不是软件，而是数据闭环

01 现象

单点仿真做得多，系统闭环分析做得少

03 结果

模型停在报告里，决策靠经验

02 归因：机电控数据长期各自为政

电机本体　永磁体　变频器　负载传动　运维数据

仿真结论没有反哺工艺参数、控制策略和运维阈值

04 必须走向机电控一体化的数字孪生

物理装备 ⇄ 互相印证 虚拟模型 ⇄ 持续迭代 运行数据

让三者在同一套逻辑下互相印证、持续迭代，形成完整数据闭环

知识地图

建模—仿真—运维：一条递进主线，三类对象贯穿

01 建模

把设备数字化

设备在电脑里长成什么样、遵循什么规律、当前状态如何。

→

02 仿真

在模型上试验推演

不拆样机、不下井，先在虚拟试验台上把问题找出来。

→

03 运维数字化

用模型和数据管好设备

从坏了再修，到按状态提前预防，数据反哺设计制造。

三类对象贯穿全程

矿用电机　永磁直驱电机　矿用变频器

模块关系：模型是底座，仿真是手段，运维是落脚点；模型越准确仿真越可信，数据越积累诊断越有依据。

数字孪生怎么建

模型为决策服务，不为展示服务



建模对象

建模之前，先把三类对象看明白



矿用电机

隔爆 / 三相异步电动机

驱动输送机、泵站等设备；理清结构组成、关键部件、运行工况与受关注的性能指标。



永磁直驱电机

低速大转矩直驱

减少或取消减速器；取消缓冲环节后直接承受冲击负载，关注转矩波动、振动与永磁体工况。



整流 · 滤波 · 逆变 · 控制 · 散热

矿用变频器

配套调速驱动装置

与电机配套，承担调速、软启动与保护；自带大量运行数据，是现成、低成本的数据来源。

建模前提：先理清每类对象的结构组成、关键部件、运行工况和最受关注的性能指标；结构和工况没搞清，模型就是空中楼阁。

认知框架

三要素支撑四层架构

三要素 概念骨架

物理实体 + 虚拟模型 + 数据连接

四层架构 落地方案

01 感知层
采集温度、振动、电流等状态量

02 数据层
完成清洗与治理

03 模型层
承载几何、物理、行为与退化模型

04 应用层
面向设计验证、工艺优化与运维决策

「模型为决策服务，不为展示服务」

模型分层

四层模型：由浅入深描述一台设备

01	02	03	04
几何模型	物理模型	行为 / 机理模型	**数据模型**
外形、尺寸、装配关系	材料、额定参数、性能边界	运转规律、输入输出、故障机理	实时状态、历史数据、维修档案
长什么样	什么材质、能扛多大	怎么动、为什么出问题	现在怎样、过去发生过什么

通俗类比：人像照片 → 体检档案 → 行为习惯 → 实时定位，四层由浅入深。

起步建议：多数企业先做几何模型与数据模型，机理模型靠试验和运行经验逐步积累，不必一开始就追求完整。

建模体系

五类模型补齐机电控对象

五 五类模型，各管一段

01 **几何 / 物理模型**
描述结构与机理

02 **行为模型**
刻画动态响应

03 **规则模型**
沉淀工艺与运维经验

04 **控制 / 退化模型**
支撑寿命与故障推演

两 两类装备，各有专用模型

永磁直驱电机
补 永磁体热—退磁模型 与控制模型

变频器
补 功率模块热模型 与故障退化模型

建模关键不在堆模型数量，而在让每类模型对应明确的工况输入与决策输出，形成可追溯的映射关系。

建模流程

模型不是一次建成，而是随数据积累越用越准

01	02	03	04	05	06
需求界定	图纸与参数	几何建模	机理标定	数据接入	模型校验
解决什么问题	图纸、铭牌、试验数据	结构与装配关系	运转规律与参数	传感器、系统接入	与实测对比、修正参数

一线配合事项
整理设备台账、补齐试验数据、合理选择测点；模型随数据积累和实际使用不断校准、越用越准。

实施路线

按价值难度选点，按五步推进

选点看三维

- 价值
- 难度
- 数据可得性

优先试点

永磁体 | 转子 | 轴承 | 冷却 | 变频器功率模块 | 母线电容 | 故障录波

五步推进

1 痛点选择 > 2 数据准备 > 3 部件仿真 > 4 整机与机电控孪生 > 5 运维闭环

成熟度四级

L1 单点仿真	L2 部件孪生	L3 整机与机电控孪生	L4 运维闭环

> 先用一个部件跑通闭环，不追求大而全

建模要点

两类装备，各有关注的部件、参数与联动关系

电机与直驱电机

- 关键部件：定子、转子（含永磁体）、绕组、轴承、机座与冷却结构、防爆结构。
- 关键参数：额定功率、转矩、转速、效率、温升、绝缘等级、防护等级。
- 直驱特点：转速低、转矩大，取消减速器后直接承受冲击负载，关注转矩波动、振动与永磁体工况。
- 数据来源：设计计算、出厂试验、运行监测。

矿用变频器

- 主要环节：整流、滤波、逆变（功率模块 / IGBT）、控制单元、散热系统。
- 建模关注：输出电压电流、谐波、功率模块温度、保护逻辑。
- 联动关系：驱动—负载耦合，变频器输出影响电机运行，电机负载反作用于变频器。
- 数据优势：自带大量运行数据，是现成、低成本的数据来源。

数据与思路

数据质量决定模型可信度，工程上多用灰箱路线

数据从哪来

设计图纸与计算 | 出厂 / 型式试验 | 铭牌参数 | 运行传感器数据 | 检修与故障记录

白箱

按物理机理推导

像按配方一步步做，机理清楚但建模成本高。

黑箱

靠数据统计规律

像照着成品反复试，依赖样本量，机理不透明。

灰箱

机理 + 数据结合

工程上最常用：既有配方，又不断按口味调整修正。

可信度关键：测点是否合理、数据是否完整、标定是否及时，直接决定模型可信度；模型靠实测持续标定，不必追求一次精确。

仿真技术

在虚拟试验台上先试一遍：离线打基础，在线让模型活起来

离线仿真

设计阶段给定条件算一次，出结果指导设计与选型；样机试制前先预判风险。

在线孪生仿真

模型接入实时运行数据，滚动推演当前与未来状态，随设备运行持续更新。

电磁仿真

磁场分布、转矩、效率、永磁体工作点

热仿真

温升、散热路径、冷却效果

结构与振动噪声

刚度、共振、振动烈度

控制与系统仿真

调速、负载响应、驱动—电机联动

侧重分工：电机偏电磁、热、结构；变频器偏电路与控制；直驱电机重点关注低速大转矩与振动。

仿真应用

先把问题描述清楚，再选仿真手段，结论回到实测校验

典型用法与排查思路

- 方案对比与选型：电磁负荷、冷却余量、材料等级的选取边界。
- 参数优化：在模型上调整方案，减少样机反复。
- 风险预判：样机试制前先把可能的问题找出来。
- 复盘排查：现场问题回到模型上定位原因。

排查举例

- 温升偏高 → 查热仿真与冷却
- 振动异响 → 查结构与转子平衡
- 效率偏低 → 查电磁参数与负载匹配

在线孪生仿真

- 数据驱动：实时数据接入模型，模型不断更新对齐。
- 趋势推演：温度、振动、绝缘按当前状态如何发展。
- 偏差比对：当前状态与正常基线对比，及早发现异常。
- 回传建议：推演结果转为运维建议，连接研发仿真与现场运维。

原则：方法重于软件；所有仿真结论都要回到实测数据上验证，不能只信模型输出。



案例一· 仿真落地

机座加工质量提升案例

问 问题

采煤机电机机座加工质量长期波动，变形超差、装配返工频发。

法 做法

以机座为对象建立结构仿真模型，分析加工过程与工艺参数对残余应力及变形的影响，定位关键工序的敏感参数。

果 结果

调整装夹与加工顺序，形成新工艺窗口与检验重点，质量波动明显收窄。

启 启示

仿真只有落到工艺参数层，才能真正改善加工质量。

对比数据已脱敏，可复用 「对象 — 工况 — 指标 — 决策」 路径至其他结构件。

案例二 · 结构与安全协同

薄煤层隔爆电机结构优化案例

01 矛盾起点

薄煤层采煤机空间狭小，高压隔爆电动机须在有限体积内同时满足强度、散热与隔爆三重约束。

02 做法与验证

先做结构优化设计，再仿真验证强度与热性能，同时对照隔爆安全要求核查壁厚、间隙与防护措施。

03 结果

优化方案可靠性通过验证，相关实践获科技进步奖认可。

结构仿真必须与隔爆规范同屏考察——只优化性能而忽视安全边界，方案就无法落地。

案例三 · 结构与安全协同

永磁直驱电机研发与运维案例

01 优势兑现

取消减速机，1000kW级产品实现低速大转矩直驱，效率与维护性显著提升。

02 必须回答的问题

退磁　温升　控制保护　隔爆适应

03 建模应对

针对永磁体建立热—退磁模型，结合整机与控制仿真，划定低速大转矩下的安全运行边界。

04 运维落地

永磁体温度　退磁风险　低速转矩

配置三类监测，覆盖运行风险。

> 电机、负载与变频器必须放在同一连接关系下看，优势才能兑现为可靠运行。

案例四 · 结构与安全协同

矿用高压变频器数字化案例

1250 kW　3300 V

矿用高压变频器 · 承担职能

调速　软启动　保护　故障录波

1 长期痛点

- 功率模块热管理
- 谐波治理
- 绝缘防护

2 建模与联动

建立功率模块热模型与故障退化模型

统一纳入母线电压、IGBT 温度、输出频率、故障码与录波数据

与电机孪生联动，实现机电一体状态推演

价值转变　数据 = 事后排障记录 → 提前识别器件老化与谐波风险的依据

经验总结

六个可复制经验

四个案例指向六条共同经验，也是判断数字孪生项目能否走远的标准。

01 从痛点出发

数字化不能脱离真实问题，必须从现场痛点切入。

02 选对试点

先在小对象上跑通闭环，再逐步扩展。

03 模型与试验互证

仿真结论必须能被实测修正，不能只信模型。

04 机电控一体化

割裂分析说不清系统风险，必须整体建模。

05 数据反哺源头

运维数据要回到设计与工艺环节，驱动改进。

06 复合型人才

既懂电机与变频器，又懂建模与数据分析。

工程实例

一体机井下长期运行：数据是最有说服力的验证

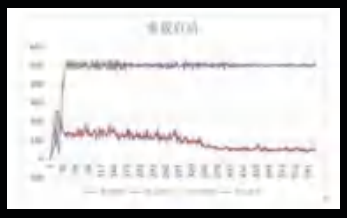
运行情况（脱敏案例）

· 应用机型：YJVFT3-500M1-4（1000/3300）两台、YJVFT-500S1-4（700/3300）一台。

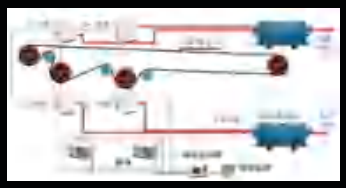
· 交付运行：地面安装调试、无故障交付；8 月 25 日在石槽村煤矿采煤工作面正式运行。

· 运行成效：连续运行约 10 个月，工作面推进约 1100 米，出煤量约 170 万吨，一体机未出现自身运行或硬件故障。

· 一次异常：通讯模组倍福 EL1008 供电模块接口故障，更换后恢复正常运行。



重载启动转矩—转速曲线



一体机供电与传动布置示意

现场长期运行数据，是对建模与仿真结论最直接的验证；模型标定越贴近实测，运维推演越可信。

说明：案例依据一线实践归纳，数据已脱敏；具体功率等级与参数以实际产品型谱为准。



运维数字化

从救火到预防：检修节奏跟着设备状态走

01

事后维修

坏了再修，被动救火

故障发生后才停机处理，停机损失难以控制。

02

定期检修

按周期拆检，容易过度维修

到点就拆，不管设备实际状态，常造成过度检修。

03

状态修 / 预测性维护

按实际状态决定何时修

依据状态数据与模型推演，提前安排检修。

预测性维护价值

减少非计划停机 · 避免过度检修 · 延长部件寿命 · 支撑备件计划

统一接入 · 运维架构

四类对象统一接入运维架构

数据安全与权限贯穿四层

感知层 L1

∨

边缘接入 L2

∨

平台 L3

∨

应用 L4

01 矿用电机 温度 振动 电流 绝缘

02 永磁直驱电机 增加永磁体温度 退磁风险 低速转矩 轴承状态

03 矿用变频器 母线电压 IGBT 温度 输出频率 故障码 录波数据

04 冷却与负载系统 纳入统一接入

各表数据不各看各的，最终进入同一平台做联合诊断，才能拼出完整工况

状态诊断

先测关键量，按特征量比对基线判断故障

常见监测量

温度 振动 电流 / 电压 绝缘电阻 转速 负载率

采集链路：现场测点 → 边缘采集 → 上传平台；先测关键量、关键部位，不必一次铺满。

电机典型故障

- 轴承损坏、绕组绝缘老化
- 转子断条 / 笼条故障、永磁体退磁
- 过热过载、振动超标

变频器典型故障

- 功率模块 / IGBT 损坏、过热
- 滤波回路异常、谐波与尖峰应力
- 保护动作、故障码与录波异常

诊断思路：采集特征量 → 与正常基线和历史趋势比对 → 判断故障部位与严重程度 → 评估剩余寿命；现场经验与数据规律结合判断。

诊断闭环

三层诊断驱动数据反哺闭环

- 三层推进，逐级加深

01 规则诊断

承接现场经验，先兜底已知故障

02 模型诊断

依托机理推演，定位参数偏差

03 数据驱动诊断

从海量运行数据中发现异常模式

告警分流，落到动作

告警按等级分流，检修决策落到具体动作，避免只监不诊、只报不修。

诊断之后，再走一步

运维数据反哺

设计选型　永磁体保护策略　变频器控制参数　工艺参数

备件检修计划

责任表里明确：谁看数据 · 谁做决策 · 谁负责闭环

监测、诊断、改进，连成一条可执行的闭环

运维平台

把状态、告警、诊断和处理记录串成一条线

平台典型功能

· 设备孪生看板：三维模型 + 实时状态

· 实时映射与告警：状态变化与越限及时提示

· 故障诊断与原因提示：结合模型与历史数据定位

· 维修建议与工单联动：建议落地到检修流程

· 历史回溯与趋势分析：回看过程、研判趋势

打通对象：设备台账、检修记录、MES / 生产系统。

从修设备到管资产

· 观念转变：经验驱动 → 数据驱动；被动救火 → 主动预防；单台维修 → 机组 / 产线整体管理。

· 数据反哺：运行数据沉淀后反过来优化设计和制造。

· 闭环落地：形成“设计—制造—运行—反馈”闭环。

责任到人：谁看数据、谁决策、谁负责闭环，要在制度上明确；全生命周期数据管起来，才成为企业资产。

落地路径

按基础分步走，先见效再扩展，不追求一步到位

第一步

数字化打基础

设备台账电子化、关键数据可采集、记录可追溯。

第二步

单机建模与状态监测

选典型设备建模型、上监测与诊断，先解决痛点最突出的设备。

第三步

机组孪生与预测维护

多设备联动、在线推演、预测性维护。

起步建议：中小企业可低成本单点切入，先见效再扩展；落地要结合自身规模、基础和人才。先把台账和基础数据理顺，再谈模型和平台，避免反过来做。

风险提醒

避免重建设、轻应用：每个系统都要对应一个具体问题

常见误区	更稳妥的做法
重买软件、轻理数据和流程	先理数据与流程，再上系统
模型贪大求全，一开始就想覆盖所有设备	先选痛点最突出的单点跑通
为孪生而孪生，脱离实际痛点	围绕要解决的具体问题建模
忽视井下现场安全、数据安全与保密	数据分级管理，按岗位授权使用
只上系统、不培养人、不配套制度	同步培养骨干，配套制度与责任

提醒：数字化是长期工程，既需要工具平台，也需要组织、人才和制度配套。

总结答疑

三句话回顾，落到岗位上能先做的一件小事

01 **孪生是设备的数字分身**

靠数据把物理设备与虚拟模型双向连起来。

02 **建模—仿真—运维是一条递进主线**

模型是底座，仿真是手段，运维是落脚点。

03 **落地从打基础、选痛点、小步快跑开始**

先理顺台账与数据，再逐步扩展模型和平台。

思考：结合本岗位，想一件能先做起来的小事——比如先完善一台关键设备的台账和运行记录。

备答要点：预算有限先理台账、用好自带数据；模型靠实测持续标定；井下传输差先边缘处理再上云；本课与 MES、工业互联网各有分工、数据互通。

