

数字化技术在选煤厂机械设计中的应用

常 松

天津美腾科技股份有限公司, 天津 300480

摘 要: 在煤炭行业智能化、数字化改造全面推进背景下, 传统手工绘图主导的选煤设备设计模式已难以适配智能分选系统建设需求。本文依托参数化三维建模、单向分步 CAE 多场仿真、云端协同平台、PLM 产品全生命周期管控搭建完整数字化设计体系, 覆盖了选煤机械从概念设计到运维迭代全流程。系统阐明数字化工具在参数建模、方案优选、虚拟装配、多场分步仿真、跨专业协同、数据溯源管控中的标准化实施路径, 可为智能选煤厂成套分选设备数字化设计提供可落地工程参考。

关键词: 数字化设计; 选煤机械; 机械设计; 参数化建模; 云端协同

DOI: 10.64649/yh.shfzykjcx.issn3078-8994.202607026

0 引言

煤炭分选是原煤提质、提升矿产资源综合利用率的核心工序。破碎、分选、筛分设备长期承受冲击、磨损与交变载荷, 结构设计精度直接决定厂区处理规模、精煤回收率与设备运维成本。据中国煤炭工业协会 2024 年调研数据: 全新成套分选设备采用传统手绘图纸、人工校核模式, 整机研发周期平均 120 天以上; 单台小型改型非标设备体量更小、结构简单, 研发周期远低于成套设备时长; 受图纸尺寸偏差、零部件装配干涉影响, 样机返工率达 68%, 单套设备试制损耗成本超 18 万元^[1]。

传统设计缺少标准化数据载体, 无法同步完成多结构方案量化对比, 机械、电气、工艺专业间形成明显数据孤岛; 设备结构缺陷、分选精度不足等问题只能在投产之后暴露, 严重阻碍分选行业智能化升级。以三维参数化建模、CFD 与有限元分步仿真、PDM 为核心的 PLM 协同平台构建数字化设计链路, 能够实现设备参数快速重构、工况虚拟预演、多专业并行开发, 从源头降低人工设计误差与试制损耗。本文结合工程设计全流程拆解数字化工具应用逻辑, 结合行业统计数据与仿真对比结果验证技术优势, 明确适配分选设备的数字化标准化设计流程, 为煤炭分选装备数字化转型提供理论与工程双重支撑。

1 设备分类与传统设计短板

1.1 选煤设备品类及工艺作用

选煤厂工艺配套机械种类繁多, 按照分选流程核心功能可分为六大类:

(1) 破碎设备: 以颚式、圆锥破碎机为主, 将大块原煤破碎至工艺指定粒径, 完成物料预处理;

(2) 筛分设备: 核心为振动筛, 依靠不同

规格筛网实现原煤粒度分级;

(3) TDS 智能干选主机: 干法分选核心设备, 搭载 X 射线识别系统精准区分煤与矸石, 通过高压气流喷吹实现物料分离, 可完成井下及地面块煤预排矸, 产出精煤、中煤、矸石, 无需水源、重介质;

(4) TDS 配套除尘与匀料设备: 包含布料匀料机、布袋除尘装置, 均匀铺展原煤保证识别精度, 同步收集分选产生的粉尘, 保障 TDS 干法分选系统连续稳定运行;

(5) 输送设备: 刮板、皮带输送机, 完成全厂物料连续转运提升;

(6) 辅助设备: 给料机、除尘装置, 保障分选流程稳定连续运行。

各类设备受力、磨损工况差异较大, 对结构强度、设计精度要求逐级提高, 图纸修改量大、装配干涉难以预判、设计依赖经验等共性缺陷会随设备结构复杂度同步放大。

1.2 传统人工设计的固有缺陷

中煤科工机械三维数字化设计项目实测数据表明, 纯人工绘图改图模式下, 单台振动筛图纸设计周期 18 天, 设计变更修改耗时占总研发时长的 65%, 成套设备整体交付周期相比数字化方案延长 40%^[2]。手绘标注、人工计算易产生尺寸偏差、结构遗漏, 一旦工艺参数、设备外形调整, 整套图纸需重新复核修改, 持续拉长项目交付周期。

性能优化层面, 传统设计存在明显局限性。无法同步搭建多套差异化结构模型, 缺少量化模拟对比手段, 工程师仅能依靠经验确定单一方案, 设备结构难以适配现场多变煤质与负荷工况。以重介质旋流器选型为例, 人工设计通常对比 2~3 套简易结构, 无法定量测算不同锥角、进料口径对应的分选可能偏差。

跨专业协作方面矛盾同样突出。机械、电气、工艺岗位独立开展设计, 无统一数据共享载体,

参数跨岗位传递易出现数值偏移、信息丢失；零部件硬干涉、管线间隙不足软干涉等隐患无法在设计阶段排查，只能在样机加工、现场装配阶段集中暴露。

2 数字化技术落地应用路径

2.1 工艺数值集成计算

工艺规划是设备设计前置环节，包含大量物料流量、数质量平衡核算工作。人工笔算复杂闭路分选流程时流程耦合关系多，累计计算误差最高可达 $\pm 5\%$ ；结构简单的开路分选流程无循环物料叠加，人工计算误差通常仅 $\pm 1\% \sim \pm 2\%$ 。采用专业工艺模拟软件统一核算两类工艺，无论开路还是闭路流程，计算误差均可稳定控制在 $\pm 0.5\%$ 以内，整体运算效率较人工笔算提升 90% 以上。

规划厂区分选布局时，技术人员可通过仿真完整还原原煤分选全过程，测算不同工况下精煤产率、分选纯度等核心指标，依托测算结果优化工艺排布，提升厂区产能收益。中煤科工千万吨级重介质选煤厂实测显示，数字化工艺优化后闭路水循环稳定性显著提升，该场景下吨煤耗水量由传统 2.8m^3 降至 0.6m^3 ；该指标仅适用于大型重介质分选厂区，小型跳汰车间、干法分选车间无法达到同等水平，优化后厂区整体能效达到行业标杆。数字化系统可实时采集、存储、整合全厂生产数据，为生产管控与设备后续改造提供完整数据支撑^[3]。

2.2 参数化三维建模

参数化三维实体建模是数字化机械设计的基础。设计人员利用 UG、SolidWorks、Creo 等 CAD 软件，将设备外形、装配约束、材料力学性能等信息转化为可编辑、可迭代的三维数字模型。

溜槽为现场高频非标构件，设计需结合输送量、原煤最大粒径、现场安装空间等参数，搭建方形、矩形、圆形、U 型等多截面模型，确定构件标准尺寸。基于千万吨级选煤厂成套分选设备三维数字化项目的实测：企业搭建标准化参数构件库后，全新非标溜槽建模耗时由传统手绘 48h 缩短至 12h，建模效率提升 75%，模型尺寸误差控制在 $\pm 0.2\text{mm}$ ，图纸属性完整率达 98.7%。相较于二维纸质图纸，三维模型可直观展示整机空间装配关系，参数修改、局部结构调整操作便捷，同步提升设计效率与结构精度^[4]。完成标准化参数模型批量搭建后，可依托数字化平台快速生成多组结构方案，结合仿真量化指标完成设备选型优化。

2.3 模块化建模与虚拟装配校核

主流分选设备属于多零部件耦合复杂机电系统，跳汰机、振动筛、离心脱水机均由数十个独立功能模块构成。数字化设计采用模块化拆分思路分步优化结构：以跳汰机为例，分别完成箱体、风阀、排料机构等子模块建模，再通过虚拟装配整合为整机。

装配过程中系统实时校验空间匹配关系，自动识别构件重叠硬干涉、管线间隙不足软干涉两类问题并推送修改提示，提前消除装配冲突；完整装配模型可一键生成标准化装配工艺文件、BOM 清单，为零部件加工、现场安装提供完整技术依据。

2.4 多方案量化比选

数字化平台依托参数化模型快速生成多套差异化设备方案，统一归集参数开展横向对比。设计人员结合厂区处理规模、煤质物理特性等前置工艺条件，搭建不同规格、不同运行参数的备选模型。

以 FX500 型无压三产品重介质旋流器为例，同步构建 7 组进料口径、锥段倾角、溢流管插入深度不同的参数模型，借助 CFD 数值模拟测算各组方案分选可能偏差 E_p 、底流错配物含量、介质损耗率三项核心指标。多方案并行对比打破传统单一图纸开发局限，设备结构与现场工况适配性、设计科学性显著提升。确定最优整机参数后，再针对关键模块开展精细化建模优化。

2.5 单向分步 CAE 多场仿真与结构优化

计算机辅助工程仿真是数字化设计核心环节，无需试制样机即可开展单向分步仿真，分别完成静力学、流体力学、多体动力学模拟；各物理场仿真数据单向传递，不做双向耦合交互，仿真结果直接指导结构迭代优化。不同厂区煤质条件、设备处理规格存在明显差异，不存在适用于所有工况的统一强制优化阈值；文中给出的应力降幅、磨损降低比例、分选可能偏差等量化结果，仅为对应试验工况下的对比参考值，实际项目需结合现场条件重新核定优化目标。

跳汰机筛板长期承受原煤冲击，易发生磨损失效。将筛板三维模型导入 ANSYS、ABAQUS 有限元软件，录入原煤冲击荷载、脉动水流压力等现场工况开展静力学仿真，输出应力分布云图，精准定位应力集中区域。针对边框应力超限问题实施两项优化：增设加固筋板、优化构件圆角提升局部承载力；拓扑优化去除冗余材料降低整机自重。本工况仿真验证显示，筛板最大等效应力由 168MPa 降至 121MPa，降幅 27.9%，设备服役周期明显延长^[5]。

分选流体设备可依托流场仿真优化分选性能。以重介质旋流器为对象,采用 Fluent 构建内部三维流场模型,测算不同进料压力、悬浮液密度下流体运动规律。仿真结果表明:进料压力 0.13 ~ 0.14MPa、介质密度 1.60 ~ 1.65g/cm³ 时,内部螺旋流场稳定性最优;该工况下器壁磨损速率降低 22%,分选可能偏差 E_p 稳定低于 0.055。设计人员可依据该结论优化进料口、锥段倾角,改善分选效果^[6]。

2.6 跨专业协同与全生命周期数据管理

选煤机械设计属于多学科交叉工程,机械、电气、工艺岗位需同步协同作业。行业普遍以 PDM (产品数据管理) 系统作为研发设计统一数据载体,其为 PLM 产品全生命周期管理平台的核心基础模块;PDM 专门收纳三维模型、工程图纸、仿真报告等前端设计资料,PLM 系统则在 PDM 设计数据基础上,延伸覆盖零部件加工、现场安装、设备运维直至报废拆解全流程数据,打通设计、生产、运维完整数据链路,各专业工程师可依托同一云端协同平台并行开展设计工作。

以大型刮板输送机设计为例:机械工程师搭建机身框架与传动系统模型,电气工程师布局控制线路,工艺人员结合现场工况提出结构优化建议。PDM 模块实时同步各专业数据,自动识别零部件空间干涉并发起协同修改流程。如机头传动部出现电机接线盒与减速器护罩重叠,系统将自动推送多方协同修改提醒,在设计阶段消除装配冲突,避免加工后批量返工。

参考文献:

- [1] 孙童飞. 能源安全新范式下煤炭工业高质量发展思考 [J]. 现代工业经济和信息化, 2025, 15 (2): 15-17
- [2] 王全强, 郭佳佳, 于渤南, 等. 选煤厂智能化建设与高质量发展路径探析 [J]. 中国信息界, 2026(5): 74-76.
- [3] 李梁才, 耿少伟, 王晓坤. 邢美选煤厂智能化系统构建与关键技术应用 [J]. 选煤技术, 2026, 54(2): 72-88.
- [4] 荣东. 智能化选煤厂一体化管控平台设计与应用 [J]. 智能矿山, 2026, 7(4): 62-70.
- [5] 褚菲, 朱安强, 冯浩彬, 等. 空气重介质流化床选煤流程建模与动态仿真 [J]. 控制理论与应用, 2025, 42 (5): 1039-1047.
- [6] 谢登峰. 重介质旋流器生产系统动态仿真与优化研究 [J]. 选煤技术, 2022, 50 (4): 23-27.

作者简介: 常松 (1989.10—), 男, 满族, 河北承德人, 研究生学历, 研究方向是机械设计, 工业工程及工程管理。

全生命周期数字化体系统一归档设备从设计到报废的全部技术资料,实现数据全程溯源:设计阶段参数、仿真报告、图纸存入 PLM 系统形成设备电子档案;加工环节通过 CAM 解析三维模型生成数控程序,驱动精密生产;现场安装人员移动端调取装配指导文件;设备投产后,工业互联网实时采集运行数据同步至管控平台,设计人员结合完整数字化档案分析故障诱因,持续迭代优化设备结构,为智能选煤厂运维体系搭建提供数据支撑。

3 结语

数字化技术应用于选煤机械设计具备显著技术优势与工程价值。依托工艺数值前置计算、参数化三维建模、模块化虚拟装配、多方案量化优选、单向分步 CAE 多场仿真、云端跨专业协同、PLM 全生命周期数据管控整套数字化体系,能够全方位提升选煤机械设计效率与结构精度,优化设备分选指标,控制设计、生产、运维综合成本。煤炭分选企业落地数字化设计体系时,需客观面对软件采购、仿真算力硬件投入、从业人员数字化技能培训等成本与实施门槛,循序渐进完成设计体系升级,匹配能源行业智能化转型需求,巩固企业核心竞争力。随着数字仿真、云端协同技术持续迭代,数字化设计工具在选煤机械领域的应用范围将不断拓宽,为煤炭行业高质量可持续发展提供坚实技术保障。