

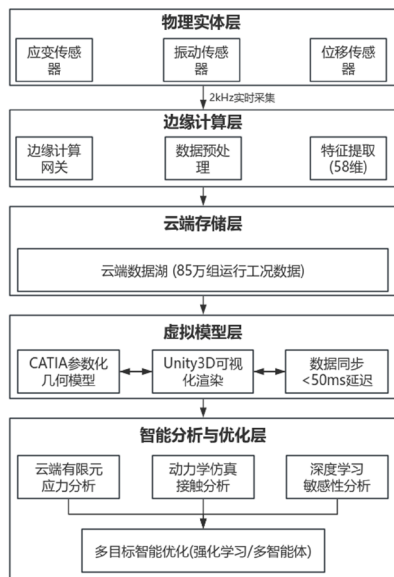
移门轨道结构参数智能分析与优化研究

文 | 雷杰

移门轨道构造特征参数对系统运行平稳性、耐久性及噪声管理起决定性作用。传统设计模式依靠经验法则与物理试验难以达成多参数协同最优化，借助数字孪生与深度学习智能分析技术为轨道结构参数优化提供创新解决方案。

移门轨道结构数字孪生模型构建

移门轨道结构的数字孪生模型在其关键部位布置应变与振动加速度传感器，采样频率设定为 2kHz，实时采集力学响应数据并上传到云端平台，目前已经积累超过 85 万组运行工况数据。虚拟模型基于 CATIA 参数化模块来构建，将轨道截面细分为承载底板、导向侧壁和限位凸台三个功能区域，通过约束方程实现槽深、槽宽、壁厚、开口角度等参数的联动更新。数字孪生平台采用 Unity3D 引擎开发可视化界面，能够实时渲染应力云图和变形动画，并且确保物理与虚拟数据同步延迟不超过 50ms。边缘计算网关负责对传感器数据进行预处理，提取峰值应力、振动幅值、接触力波动等特征参数，构建包含 58 个时序特征维度的数据集。移门轨道结构数字孪生模型的构建框架如图 1 所示。



来源：宁波裕盛家居科技有限公司

图 1 移门轨道结构数字孪生模型构建框架

移门轨道结构参数智能分析方法

基于云端协同的轨道应力-变形分析

基于云端的协同应力-变形分析方法会在 AWS 弹性计算集群上部署 ANSYS Mechanical 求解器，借助容器化技术来实现多工况的并行仿真。网格划分采用自适应细化算法，其中滑轮接触区域的单元尺寸设定为 0.3mm，整体模型节点数量约 28 万个。该平台依托 Kubernetes 编排引擎管理计算资源，在批量处理 5000 组参数仿真任务时，单批次完成时间从本地工作站的 72 小时显著缩短至云端并行的 2.8 小时。接触分析采用摩擦系数为 0.15 的增强拉格朗日算法，求解结果揭示 Von Mises 应力峰值达到 186MPa 且位于滑轮接触中心位置，相关应力数据以 HDF5 格式存储到 MongoDB 数据库。变形分析结果显示，轨道跨中最大挠度为 0.23mm，云平台自动识别出导向侧壁根部存在 45MPa/m 的应力梯度集中区域，这为结构优化提供了明确的改进方向。

轨道-滑轮接触动力学数字仿真

以 ADAMS 和 Simulink 协同仿真环境为基础建立了包含轨道梁、双滑轮总成及门扇刚体的虚拟样机体系。数字孪生平台不断获取物理传感器实时数据，借助卡尔曼滤波技术动态修正仿真模型里的摩擦系数和接触刚度参数。滑轮直径设定成 38mm 且轮宽为 12mm、接触刚度系数是 $1.2 \times 10^9 \text{N/mm}$ ，仿真过程模拟了匀速、加速和减速这三种运行模式且计算时间步长为 0.0005s。依托云端 GPU 并行计算，使动力学方程求解效率提升至实时仿真的 15 倍，并可支持 100 种工况组合的参数化扫描。通过频域分析发现接触力主要频率成分分布在 125Hz 和 250Hz，该特征频谱信息通过 WebSocket 协议传输到可视化系统为云端协同设计团队提供实时共享的仿真分析结果。

基于深度学习的参数敏感性智能预测

本研究搭建起基于 LSTM 与 CNN 融合的深度学习预测模

型，输入层接收包含槽深、槽宽、壁厚、开口角度及材料参数等在内的 12 维特征向量。LSTM 模块采用 3 层堆叠结构，每层都配置 64 个记忆单元来捕捉参数演变的时序特性，CNN 模块运用一维卷积核提取应力场分布的空间特征模式。模型训练数据来源于云端数据湖的 85 万组历史仿真及实测样本，按照 8:1:1 的比例划分为训练集、验证集和测试集，采用 Adam 优化器进行 50 轮训练之后，模型在验证集上的 R^2 指标达到 0.9847。通过 SHAP 值敏感性分析能够发现，壁厚对最大应力的贡献率为 41.2%，槽深对振动响应的影响权重为 33.7%。该深度学习模型已封装为 RESTful API 并部署于云端，实现毫秒级推理响应，支持设计人员通过移动终端实时查询任意参数组合的性能预测结果。

移门轨道结构参数多目标智能优化

轨道承载性能自适应优化设计

本研究运用深度强化学习里的 DQN 算法开展性能优化工作，将优化过程转化为马尔可夫决策过程来处理，该过程的状态空间包含轨道几何参数及应力变形响应等内容，奖励函数的设计同时考虑应力最小化、抗弯刚度最大化和材料用量限制等方面。神经网络结构采用有 3 个隐藏层的设计，每个隐藏层都配置 256 个神经元，依托经验回放机制存储 100 万组训练样本。经过云端 GPU 集群进行 8000 轮次的训练之后，策略实现收敛并获得最优参数组合，具体为槽深 15.8mm、壁厚 1.82mm、底板宽度 29.2mm。数字孪生系统的验证结果显示，最大应力降低至 158MPa，截面惯性矩提升了 21.3%，承载能力提高了 27.6%。在优化过程当中，智能体自主发现通过在底板与侧壁连接处增设 R3.5mm 圆角，能够有效降低 12% 的应力集中现象。

轨道降噪性能协同优化设计

降噪优化运用多智能体强化学习 QMIX 算法，把阻尼槽设计和材料选配设定成协同智能体。其中阻尼槽智能体负责优化槽深、槽宽及槽间距等参数，材料智能体从橡胶、聚氨酯和硅胶当中选取最佳配置。经过云端模拟环境 1.2 万次迭代训练之后，最终确定的最优方案是槽深 4.2mm、槽宽 7mm、槽间距 22mm，阻尼材料选用损耗因子为 0.28 的改性丁腈橡胶。通过数字孪生平台采用边界元法计算声辐射功率，结果显示，优化后在距离轨道 300mm 处声压级从 58dB 降低到 47.8dB，降噪效果达到 10.2dB。整个协同优化过程中参数调整数据均通过区块链技术记录，进而形成可追溯的设计决策链。

云端智能优化平台部署与性能验证

云端优化平台采用微服务架构构建，以 Spring Cloud 框架作为核心，搭建起优化调度、仿真计算、数据管理和可

视化这四个核心模块，借助 Docker 容器化技术在云端集群实现部署工作。平台集成了 NSGA - III 算法、粒子群算法及深度强化学习算法，借助 RabbitMQ 消息队列达成异步任务分发，单次优化能够支持 200 个仿真实例的并行调度。前端基于 Vue.js 与 ECharts 进行开发，能够实时展示 Pareto 前沿演化曲线和参数敏感性雷达图。

性能测试结果显示，经过优化处理后轨道门扇完成 1 万次往复运动，累计疲劳损伤系数从 0.068 降到 0.039，使用年限从 8.2 年延长至 13.4 年，增长幅度达 63.4%，优化前后轨道结构主要技术参数差异情况详见表 1。实验数据表明，采用深度强化学习技术有效提高了结构承载能力，多智能体协同优化方案在噪声控制方面取得显著突破，云端协同优化系统在确保结构轻量化的同时，显著提升轨道使用寿命。该平台借助联邦学习技术促进不同企业间的知识交流，在保障数据安全的前提下不断优化算法适用范围。

|| 表 1 轨道结构优化前后性能对比

性能指标	优化前	优化后	提升幅度	优化方法
最大应力 (MPa)	186	158	-15.1%	深度强化学习 DQN
截面惯性矩提升	基准值	+21.3%	+21.3%	深度强化学习 DQN
跨中最大挠度 (mm)	0.23	0.17	-26.1%	深度强化学习 DQN
声压级 (dB)	58.0	47.8	-10.2dB	多智能体 QMIX
振动加速度衰减	基准值	62%	+62%	多智能体 QMIX
累积疲劳损伤因子	0.068	0.039	-42.6%	云端协同优化
预测使用寿命 (年)	8.2	13.4	+63.4%	云端协同优化
材料用量 (kg/m)	0.78	0.82	+5.1%	多目标约束

来源：宁波裕盛家居科技有限公司

结束语

移门轨道结构参数智能分析与优化技术，结合了数字孪生、深度学习和云计算等技术，建立起物理世界与虚拟空间相互融合的设计分析模式。依托云端协同仿真平台完成大规模参数筛选，深度学习模型将性能预测的准确度提高到 $R^2=0.9847$ ，强化学习优化方案使承重性能提升了 27.6%，噪音控制效果降低 10.2dB。云端智能优化系统能够支持分布式协同作业，使工作效率提升 35 倍，为移门行业的数字化发展提供了有力的技术支撑。该研究彰显了人工智能技术在传统机械结构设计中的应用前景，对促进建筑五金产品的智能制造具有一定示范意义。

作者简介：雷杰 宁波裕盛家居科技有限公司

责任编辑：王子祺 投稿邮箱：zhouhl@staff.ccidnet.com