

基于数字孪生技术的列车系统平台架构

文 ◆ 中车青岛四方机车车辆股份有限公司 崔玉龙 孙可心 朱耿明

引言

数字列车系统平台以列车健康监控及故障预测为核心，基于海量列车运行状态数据，运用数字孪生技术，立体可视化地呈现列车及各部件运行时状态、姿态与故障情况，为列车安全健康运行提供保障，为列车检修调度、检修决策提供数据支撑。本文简要介绍了数字列车系统平台的架构组成，并分别从载入列车数据、引入虚拟模型、虚实数据轻量设计等方面，阐述了数字列车系统平台的具体设计思路。通过动态获取列车的各项数据，开展列车运行状态的数据信息分析；根据列车运行机理，创建相应的模型；利用模型分析方法及时发现和处理故障问题，大幅提高列车故障判断的准确率，提高故障检修调度的效率。

1 系统架构

1.1 整体架构

数字列车系统采取自下而上的系统设计方法，包括数字孪生仿真应用层、模型轻量化层、数字孪生模型构建层以及原始数据资料获取层，系统整体架构设计如图 1 所示。

(1) 数字孪生仿真应用层。

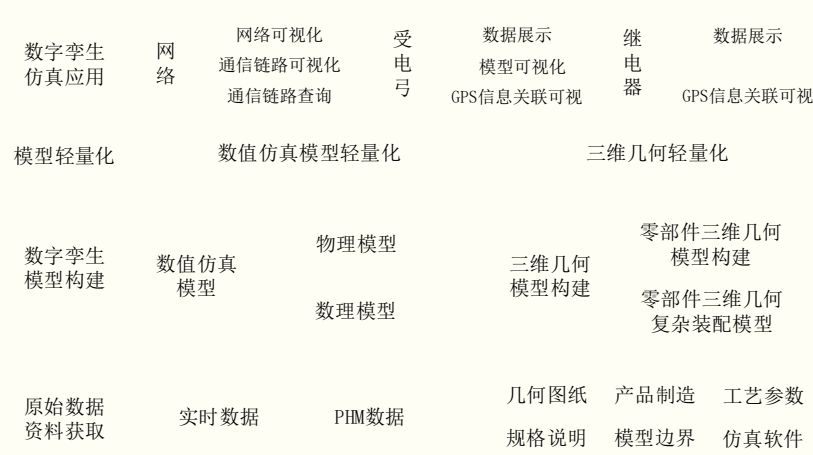


图 1 系统整体架构设计

利用可视化界面，动态展示列车实时状态、故障信息、故障预警、列车数字孪生状态等各类信息。(2) 模型轻量化层。对三维模型开展轻量化处理，去除无用的三角面，保证列车和子系统的主体结构，合理降低模型体量。(3) 数字孪生模型构建层。机理模型方面，在采集系统各类数据后，构建列车预警机理模型，实现列车故障预警。三维模型方面，在数字空间内构建数字列车模型、核心子系统模型，实现列车以及子系统的数字孪生呈现。(4) 原始数据资料获取层。主要包括列车设计数据、列车实际运行数据。

1.2 技术架构

技术架构设计如图 2 所示。

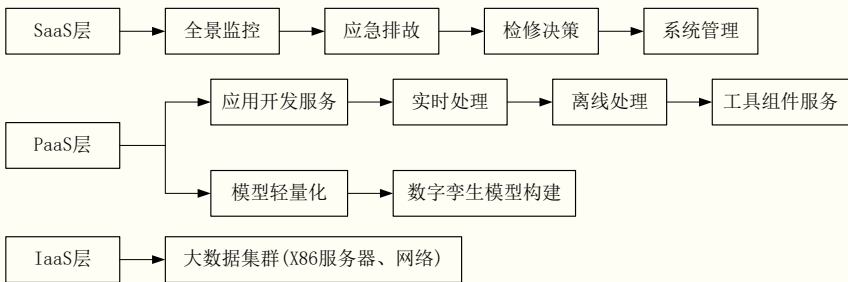


图 2 技术架构设计

【作者简介】崔玉龙（1983—），男，山东日照人，硕士研究生，正高级工程师，研究方向：控制理论与控制工程、数字列车。

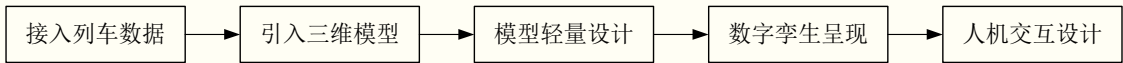


图 3 数字列车系统详细设计

(1) SaaS 构建全图监控、应急排故、检修决策、系统管理 4 个模型，用于满足车辆数字孪生、状态监控、健康检测、故障预警等功能，从而有效支撑运维业务。(2) PaaS 层数字列车系统使用微服务架构进行前后端分离开发，实现系统复杂逻辑计算。利用大数据集群能力实现列车数据实时处理与离线处理。通过模型轻量化以及数字孪生模型构建，实现列车与子系统数字孪生状态实时呈现和数据绑定。(3) IaaS 层数字列车系统基于大数据集群，开发数据接收和解析程序，实现列车数据接收落地。

2 数字列车系统详细设计

数字列车系统根据整体架构设计，自下而上开展，共划分为 5 个核心步骤（见图 3）。

2.1 接入列车数据

数字列车系统的底层基础是列车运行数据采集，列车数据采集需要保证数据的实时性、安全性和稳定性，通过配置与列车通信的 IP 地址与端口，编写适配于相应型号列车的数据解析协议，将列车数据实时接收并解析存储到地面数据库服务器。列车数据落地后，通过大数据平台对列车数据开展数据清洗、转换等处理，并将其存储于数据库内，数据处理过程中整合各子系统、各类型数据，最终根据前端页面需求和数字孪生展示需求回传至前端，实现数字列车系统的前端展示。

2.2 引入三维模型

数字列车项目建设前期需要根据系统功能架构和功能规划编制三维模型清单。编制三维模型清单过程中需要将三维模型与实车子系统、部件等一一对应，并编制特定编码规则对模型进行编码，形成模型的唯一标识，从而在后期项目开发过程中，实现虚拟模型与数据的双向绑定。

2.3 模型轻量化设计

2.3.1 模型轻量化

由于本项目三维模型源文件为工程模型，故本系统模型拥有系统组成复杂、构件较多的特点，为保障系统展示效果，保证页面展示以及三维模型展示流畅度，需要对三维模型进行轻量化处理，从而降低模型体

量，提高页面加载速度。由于本项目所用的模型为层次化结构模型，不同层次的模型可以满足相应的显示精度要求，而且支持对数据信息的层次化分析。从模型的结构上来看，本项目秉承了轻量化的原则，采用轻量化存储和加载模式，并根据具体的层次关系及名称，对模型进行了定位。整体来看，本项目在模型构建上采用了结构树的架构，凸显了层次化的特点，且此种结构模式支持模型的层次化分解，借此支持各层次子系统的构建^[1]。层次化模型图如图 4 所示。

根据动车组三维模型上述划分方案，可以针对不同层次，设置对应的精度要求，并结合实际精度要求，设置相应的轻量化操作方案，以提高信息网络传输速度以及文件显示效率，同时不干扰模型文件的应用与查询。

2.3.2 模型轻量化过程分析

(1) 存储方式转换。本项目的轻量化处理对象以工程模型为主。在此过程中，需先采用 CATIA 工具，利用其转化功能，将 CATIA 模型转变为 STP 模型，再继续转换成 OBJ 模型，借此达到一个轻量化处理的效果。经过上述轻量化处理后，模型数据量会被有效降低，且不会对其显示精度造成损害。(2) 层次化存储、显示设置。在本项目中，引入了装配文件来构建模型的存储和显示体系，并通过装配文件中记录模型间的装配关系来降低模型规模。当模型需要更新时，直接更新装配文件及配套的模型文件即可完成更新，这在很大程度

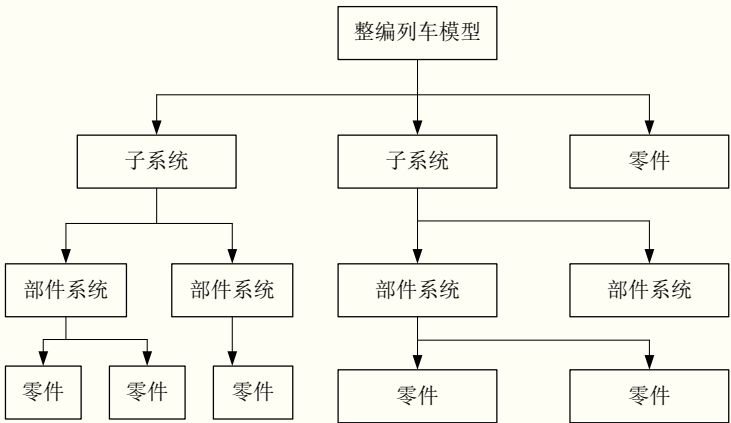


图 4 层次化模型图

上降低了模型的运维成本，同时也可以有效保证模型运行的安全与稳定。此外，上述存储、显示的轻量化设置，也适用于精度要求较高的零件级模型。（3）三角面片的优化设置。对于仅用于概览而不涉及精确信息查询的模型层级，如部件系统、子系统，考虑其显示文件属于非精确几何信息类，因此可使用三角面优化模式，实现轻量化处理。其中，三角面优化是指通过将原模型的曲面分解为多个三角面，以实现三角面密度调节，从而达到模型简化效果的处理模式。采用这种处理模式，可以让原始模型进一步轻量化，但此种方式会引起模型的失真问题，故不能将其用于有精度要求的模型。

2.3.3 三维模型优化策略

优化策略主要包含 3 个步骤。（1）抑制零部件、模型抽壳。（2）模型的表面处理。（3）对零件模型予以模型抽壳处理实现轻量级改进。在此流程中，对轻量级模型的装配处理操作，可以通过减少细节信息的量，对模型结构的复杂度予以弱化，让模型能够更

好地支持文件交互，达到轻量化的转变效果^[2]。

2.4 数字孪生呈现

2.4.1 模型调用

三维模型经过轻量化处理完成后，将存储于服务器内，同时系统会将模型编码、名称以及存放路径等信息存储于大数据平台中，供数字列车系统前端调用。当模型调用成功后，系统在计算过程中需要保证建模输入参数与实时计算输入参数一一对应，通过抽数脚本，根据输入参数配置文件，将数据抽取到本地，供模型计算使用。

2.4.2 三维模型效果制作

根据系统设计需求，基于轻量化三维模型进行进一步效果开发制作，实现复杂场景三维模型呈现与交互。

（1）模型数据效果制作。将完成 UV 制作和材质球赋予后的模型导出为不带重复结构的 .fbx 格式文件，并将该文件导入 Substance Painter 中进行模型效果制作。对于新导入的模型，需要进行烘焙操作，此操作主要为制作三维模型的各种信息文件，从而为制作最终效果而服务。（2）三维模型效果输出。将导出的材质贴图反贴至 3Dmax 中轻量化三维模型中，并复制出重复结构，对模型进行最终的分类归纳总结，得到整车以及各子系统附带材质贴图模型，并通过 blender 导出最终的 .gltf 文件与贴图文件。

2.5 人机交互设计

首先，通过载入第三方 js 和 .gltf 模型，创建相机、场景、照明等要素。其次，实现了模型动画功能，通过个性化配置字段展示形式，在动态数据库内获取实时数据，回传至三维模型，使实时数据与三维模型相互绑定。最后，利用渲染技术处理模型，使用 HTML 页面展示列车三维模型，并基于三维模型编号实现三维模型的交互及数据绑定。通过与三维模型的交互，可直观立体地呈现列车及子系统的部件运动姿态及相应状态数据。

结语

本项目利用数字孪生模型，创建了动车组数字列车系统。采取三维轻量化操作，有效降低三维模型体量，确保系统的流畅度和可用性，实现了常态化监控列车运行状态、运行故障的功能，从而保证列车运行安全。利用数字孪生技术立体呈现列车、核心部件的三维立体模型，便于运维人员快速定位故障部件。动态监控故障信息，有助于提升运维效率，确保运维决策准确。■

引用

[1] 樊孟杰,江海凡,丁国富,等.基于数字孪生的地铁列车性能评估系统[J].计算机集成制造系统,2022,28(8):2318-2328.
[2] 樊孟杰.面向性能评估的地铁列车数字孪生系统研究[D].成都:西南交通大学, 2021.

