

装备试验与评价

飞行器环境试验数据管理与预示系统构建研究

石先杰¹, 康甜¹, 张高楠¹, 田志宇²

(1. 中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621999;

2. 中国工程物理研究院 计算机应用研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: **目的** 为飞行器环境试验数据的管理与交互式探索分析提供工具, 并为飞行器环境试验条件设计提供支持。**方法** 环境试验数据管理与预示系统采用 B/S MVC 三层体系架构, 在数据存储层, 采用传统关系型数据库及大数据平台(Hadoop/Spark)相结合的混合存储结构;在数据处理层,主要采用基于 Spring+Hibernate 的轻量级 J2EE 技术框架。使用 Myeclipse 2014 Java 语言编程实现。**结果** 所开发的环境试验数据管理与预示系统, 客户端通过浏览器实现跨平台访问。基于 JavaScript 技术实现数据动态交互展示, 支持 Matlab、C++ 等多种语言算法的集成与动态扩展。**结论** 软件系统适用于环境试验数据的管理与交互式探索分析。

关键词: 飞行器; 预示系统; 环境试验数据库; 试验条件

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.03.012

中图分类号: V416

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)03-0071-07

Construction of Air Vehicle Environment Test Resources Database and Prediction System

SHI Xian-jie¹, KANG Tian¹, ZHANG Gao-nan¹, TIAN Zhi-yu²

(1. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China;

2. Institute of Computer Application, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

ABSTRACT: The paper aims to provide a software tool for environment test data's management and interactive data exploration (IDE) to predict environment test conditions of air vehicle. The B/S MVC schema was adopted for the data management and prediction system of environment test. In data storage layer, the traditional relational database and big data platform (Hadoop/Spark) were used as a mixture storage structure. In data processing layer, the lightweight J2EE framework based on Spring+Hibernate was mainly used. The software was developed by Myeclipse 2014 Java. The data management and prediction system of environment test was developed. The client side can realize cross-platform visiting through web browser. The test data can be interactively displayed based on JavaScript technology. The system supported algorithm integration and dynamics expansion coded by various programming language, such as Matlab, C++ etc. This software can be used for management and interactive data exploration (IDE) of environment test data.

KEY WORDS: air vehicle; prediction system; environment test database; test condition

收稿日期: 2019-09-06; 修订日期: 2019-09-24

Received: 2019-09-06; Revised: 2019-09-24

基金项目: 国防科工局技术基础科研项目 (XXHS2016XXXA001)

Fund: Technical Foundation Program from The Ministry of Industry and Information Technology of China (XXHS2016XXXA001)

作者简介: 石先杰 (1985—), 男, 重庆人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为装备环境条件分析。

Biography: SHI Xian-jie (1985—), Male, from Chongqing, Ph. D., Senior engineering, Research focus: environmental conditions analysis for equipment.

环境适应性是飞行器研制过程中重要的质量特性之一，飞行器对于未来实际服役环境适应能力的高低，直接关系到其使用和作战效能的发挥。为了确保飞行器的环境适应性水平满足未来使用要求，在其研制阶段需要尽可能准确地提出其平台环境条件，并据此开展设计，制定地面环境试验条件，对其进行使用试验验证。环境数据是开展相应环境工程工作的基础，如自然环境数据和运载平台环境数据是确定飞行器环境适应性设计用环境条件的依据。一些自然环境条件数据也是正确部署、贮存和使用飞行器的依据。

美国的 MIL-STD-810 系列、英国的 DEF 00-35 和我国的 GJB 150A 等国内外军用标准均规定：对于一些重要的平台环境（如温度、冲击、振动等）均要求优先使用实测环境数据来制定其环境试验条件。这就要求在制定武器装备的环境试验条件时，应尽可能从装备的实际出发，结合平台实测数据或相似平台实测数据确定^[1-5]。

法国 INTESPACE 开发的商用软件 Dynaworks，主要用于试验数据的采集、管理、共享和分析对比等工作^[6]。美国空军 WRIGHT 实验室构建了 MERIT 系统，主要用于战斗机和强击机所带外挂物的动力学环境预计，其中振动预示模型采用回归分析获得了功率谱密度与动压间的关系^[7]。孙建勇等^[8]研究开发了飞机平台环境数据库系统，确保现有飞机平台环境数据的高效利用。闫少光等^[9]研究构建了卫星动力学环境试验数据库系统，并应用于卫星动力学环境试验中，为动力学环境试验数据的快速分析处理提供工具支持。

目前，多年积累的飞行器环境试验数据和新增的大量外场实测数据很零散、不完全，分散在各个部门和科研人员个人手中，导致数据资源难以共享，数据利用率较低。各部门/单位采集的环境数据文件格式缺乏统一标准，导致数据检索、分析流程繁琐，给数据分析和利用工作带来诸多不便。此外，尚未建立专门的环境数据库来全面统一收集各使用平台的环境数据，这就造成现有飞行器数据资源从数量和应用技术上均难以满足未来飞行器研制的需求。为解决上述问题，有必要构建飞行器环境试验数据管理与预示系统，实现环境试验数据规范统一的存储管理，加强实测环境数据的分析和利用，为飞行器环境工程工作提供数据和软件支撑，将提高飞行器的研制速度和研究水平。

1 需求分析

构建飞行器环境试验数据库及预示系统，需要满足以下数据特征处理和系统管理需求。

1.1 数据特征需求

飞行器的环境试验数据特性主要有以下几点。

- 1) 时序数据：具有时间连续性的特点，自相关性强。
- 2) 数值型：试验数据以数值型为主，具有范围、大小等操作需求。
- 3) 规模大：振动、温度、噪声等数据具有采样频率高，时间长等特点，单组数据规模大，能达到上亿甚至更高的级别。
- 4) 格式多样：涉及不同采集系统采集的数据，格式多样。有 txt 文本型、Excel、PDF 及二进制的数据库。
- 5) 动态数据结构：每一次试验采集的数据参数类型和测点数量通常不一样，产生的试验数据具有行列结构的动态性。
- 6) 此外，还可能包括各种描述性非结构化信息数据（如飞行器基本参数信息和测点信息等）。

1.2 系统管理需求

- 1) 数据库既要满足单组大规模数据的存储和高效检索、分析能力，也要支撑数据日积月累形成的规模存储需求。
- 2) 支持多格式、非固定行列动态数据的入库、存储、管理和分析。
- 3) 试验数据能够按型号、部件、时间、参数等多个维度进行有序的组织 and 导航，支持动态调整组织和导航关系。

2 数据库总体功能设计

飞行器环境试验数据及预示系统主要实现数据管理、数据分析和环境预示三大功能，如图 1 所示。数据管理功能主要指有效读取不同格式环境试验数据，并进行统一规范的存储管理，提供分类查询、显示、可视化功能。数据分析功能是在数据管理的基础上，对用户关注的数据进行可视化、变换计算，以观察和发现数据的特征、异常等信息，进一步指导和优化今后的飞行器设计和试验工作。环境预示功能是基

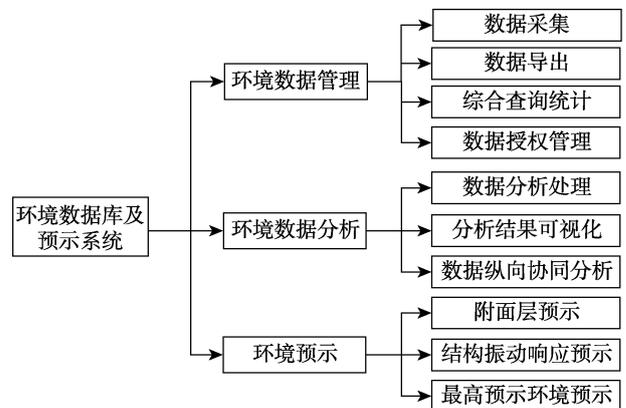


图 1 数据库总体功能

Fig.1 Overall function of database

于相关算法和计算模型，对系统存储的试验数据进行统计归纳，并结合实测数据开展环境预示。主要有附面层预示、结构振动响应预示和最高预示环境预示等功能。

环境试验数据管理与预示系统是基于管理信息系统快速开发中间件研发的，总体系统架构如图 2 所示。系统将采用 B/S 三层体系架构（即 MVC），具体的技术架构如图 3 所示。

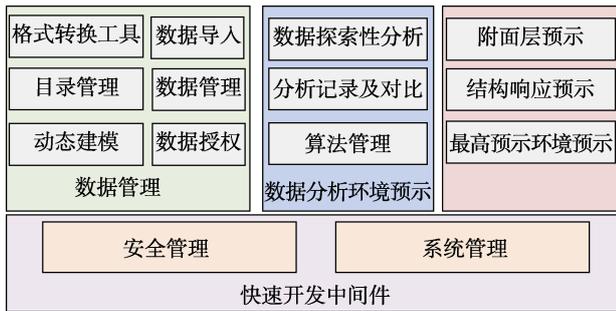


图 2 数据库总体系统框架

Fig.2 Overall system framework of database

由于数据文件的格式多样化、数据结构的多变

性、试验参数的种类繁多等特点，以静态关系表的方式存储很难满足当前系统应用需求的复杂性、灵活性和可扩展性。因此，本系统将采用数据驱动的动态建模技术，即根据输入的数据内容，采用元数据模型方法和动态数据库表创建技术，构建试验数据的动态数据模型，建立动态的数据抽象存储模型、库表、数据关系等。从而在整个数据生命周期内，采用抽象的数据处理技术进行管理和分析处理，其核心的数据架构如图 4 所示。

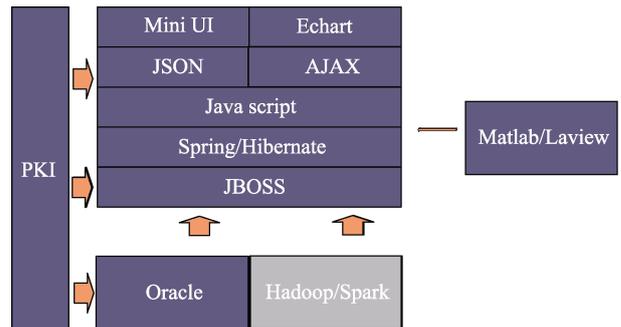


图 3 数据库系统总体技术架构

Fig.3 Overall technical architecture of database system

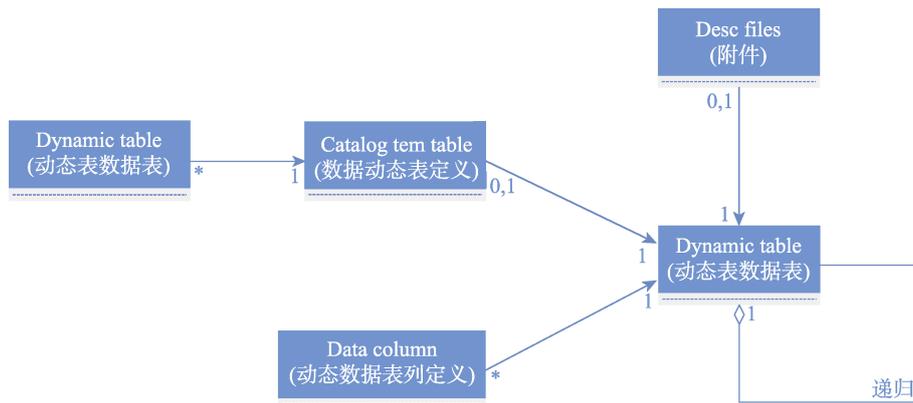


图 4 环境数据动态结构模型

Fig.4 Dynamic structure model of environmental data

当产生一组试验数据时，用户首先创建一个挂载该组数据的目录（Data Calatlog），当用户向系统导入试验数据文件，系统会自动解析试验数据的行列结构，并生成一组数据的列定义（Data Column），接着分配一个数据库动态表的表名（Catalog Tem Table），系统根据表名和列定义信息创建一个存储试验数据的动态数据库表（Danymic Table）。所有后期的数据管理和分析都通过目录进行导航，并根据目录对应的试验数据表的元数据（表名信息和列定义信息）进行动态界面的创建和交互处理等。另外每个目录可以关联一组附件（Desc Files），当用户在进行试验数据分析处理的同时，可以查看相关的附件文档。

环境试验数据管理与预示系统部署在数据服务器区，数据库客户端的计算机通过网关的认证服务完成与数据库的连接认证，网络部署拓扑图如图 5 所示。

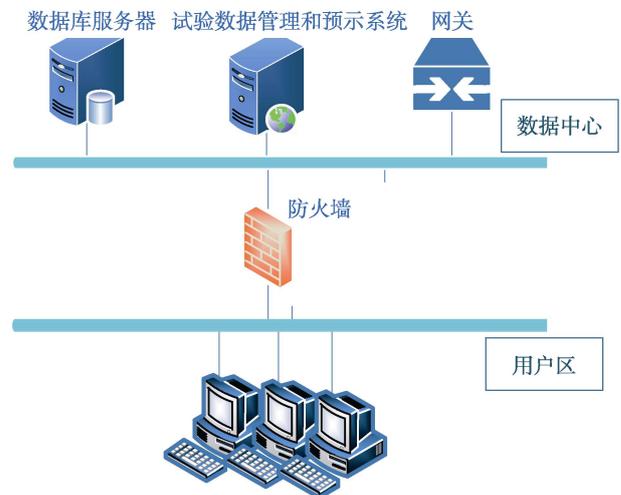


图 5 环境数据管理和预示系统网络部署

Fig.5 Network deployment diagram of environmental data management and predictive system

3 数据库系统模块设计

3.1 数据存储模块设计

数据存储模块主要包括数据录入、检索、可视化、格式化导出等功能，并根据不同试验数据对用户进行访问授权。数据库系统授权和访问控制关系如图 6 所示。

与传统的管理信息系统不同，数据并不是根据业务流程来组织的，而是根据数据的属性进行分类组织管理的。例如根据数据所属的飞行器型号、试验的项目/时间、参数类型等。同时，随着数据积累，规模不断扩大，分析挖掘需求的不断发展，数据的组织方式也随之调整。因此，数据库系统需要提供能够不断调整和重构的灵活组织方式。本系统中采用了树形结构的数据组织和导航方式，如图 7 所示。

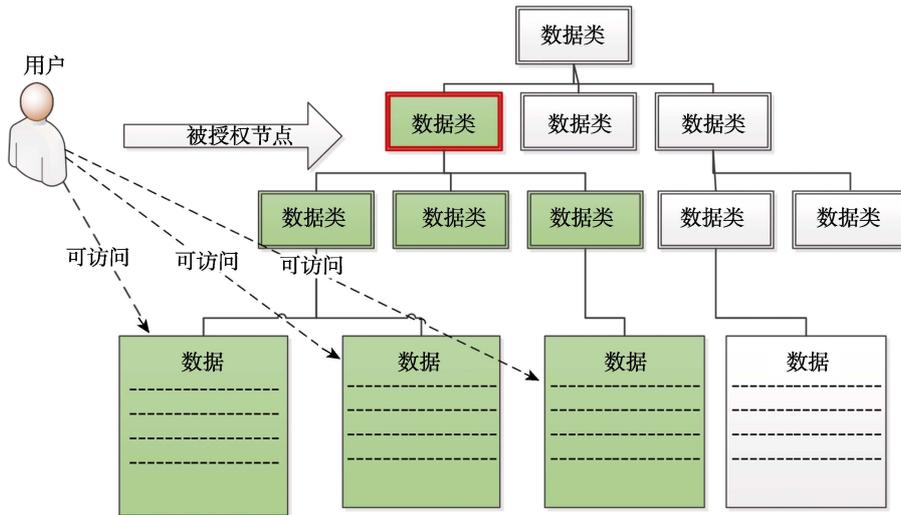


图 6 试验数据授权和访问控制模型

Fig.6 Schematic diagram of test data authorization and access control model

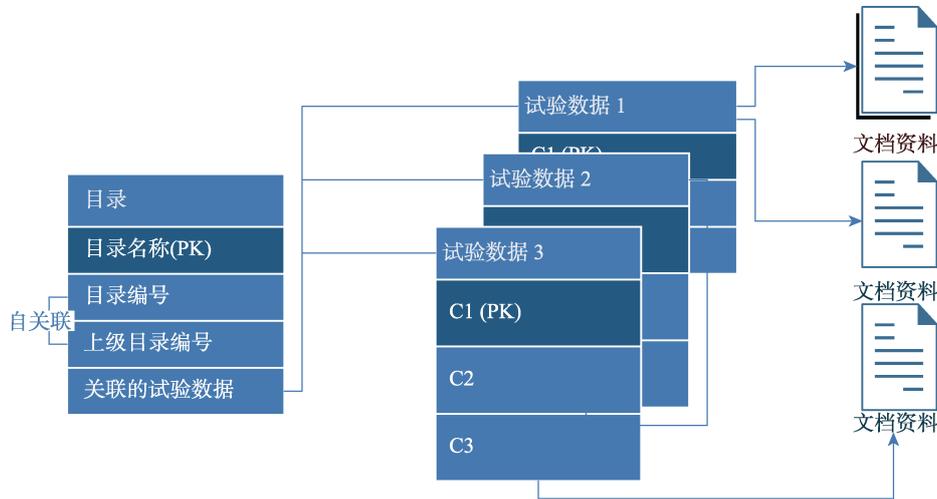


图 7 树形的试验数据组织模型

Fig.7 Organization model of tree-shaped experimental data

“目录”是一个自关联，无极递归的数据库对象。每一个“目录”上可以关联一组试验数据，每一组试验数据可以挂载多个非结构化的数据（附件文档资料等），通常是辅助理解试验数据的相关资料，例如测点信息、环境描述等。像文件系统的目录一样，“目录”可以灵活地重组，但无论“目录”被重组到任何其他“目录”下，其关联的试验数据不会改变。

试验参数种类繁多等特征，以静态关系表的方式存储已经很难满足应用需求的复杂性、灵活性和可扩展性。本系统将采用数据驱动的动态建模技术（如图 8 所示），即根据输入的数据内容，动态建立数据的抽象存储模型、库表、数据关系等。

此外，数据存储模块还采用动态建模技术。由于环境数据要具有文件格式多样化、数据结构多变性、

数据导入包括试验数据和附件两种类型的文件。试验数据导入是将格式化后的试验数据文件上传到系统，并调用动态建模服务，完成数据的动态建模和数据存储。附件文件（包括试验方案、试验标准、试

验描述、通道测点描述、音频、视频、设计模型等) 上载以后关联到相应的数据目录。

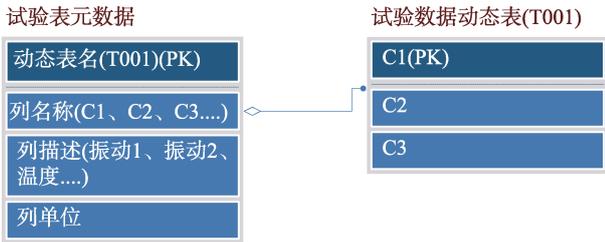


图 8 试验数据存储动态建模

Fig.8 Dynamic modeling for experimental data storage

3.2 数据分析模块设计

数据分析模块主要是根据系统集成的相关算法对实测环境数据进行分析处理, 为研究环境特征及相关规律提供数据支撑。主要的功能如下所述。

1) 探索性分析。以算法驱动的一组或多组数据连续性可视化分析功能。包括原始数据可视化、分析算法动态加载与交互、计算中间数据的缓存和流转控制、输出数据的可视化、多分枝分析路径管理和分析回溯。本系统构建的灵活、可扩展的可视化探索分析模型如图 9 所示。

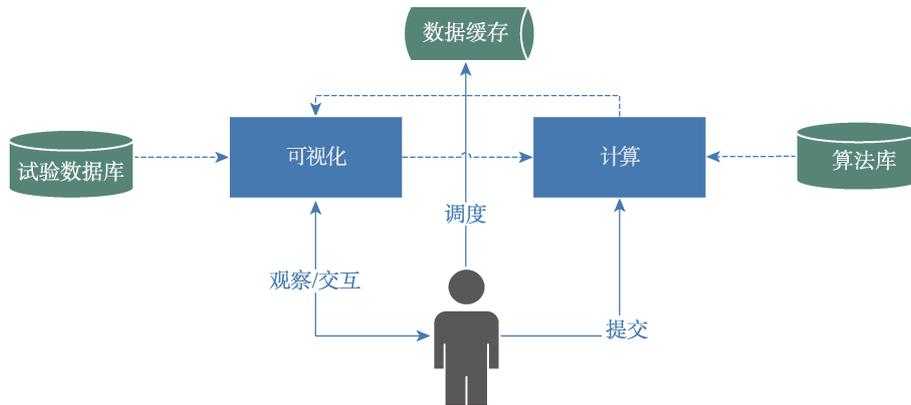


图 9 可视化探索分析模型

Fig.9 Model of visual exploration analysis

在一次分析周期内, 系统记录每一次计算的数据、算法、参数, 用户可以在任意一次中间计算结果基础上重新改变分析路径和计算参数, 提供探索性分析功能, 以获取最佳分析结果。分析结果可以导出成

Matlab 绘图脚本 (.m 文件), 用于生成.fig 格式的图形, 这样便能在 Matlab 中进行编辑, 以满足报表专有格式的可视化。结合本系统的软件技术架构和产品体系, 探索性分析软件功能框架设计如图 10 所示。

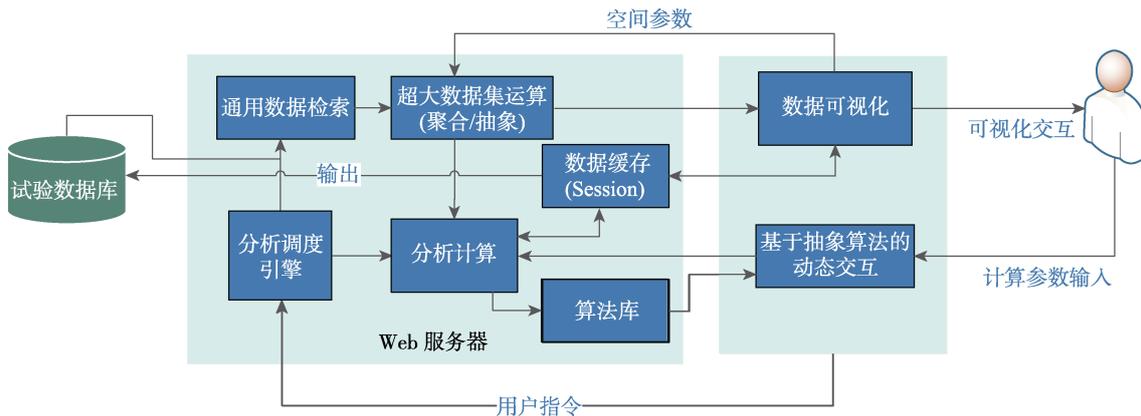


图 10 探索分析功能框架

Fig.10 Functional framework of exploratory analysis

2) 分析记录与对比。分析结果入库, 提供历史分析结果查询和可视化, 提供多个分析结果的对比可视化展示, 环境试验数据分析界面如图 11 所示。该模块可以检索可视化探索分析中产生的分析结果记录, 选取多个分析结果在同一个坐标系内重新绘

制和对比。既可实现一个组数据不同计算参数的分析对比, 也可以实现不同批次试验(或者理论和实测数据)的两组数据在相同计算参数下的分析对比功能等。

3) 算法管理。系统提供灵活的算法扩展功能。

系统在运行态,用户可以根据分析需求独立开发和动态加载算法,算法遵循严格的接口规范,系统自动完成算法的加载和交互功能。算法管理主界面如图 12 所示。当前使用分析算法的最大特点是多样性。算法

来源有的是用户独立开发,有的来自第三方。其呈现形式主要为 Matlab 脚本文件、dll 动态链接库,相应的集成方案分别如图 13 和图 14 所示。各算法的输入、输出参数也不尽相同,依据具体算法而定。

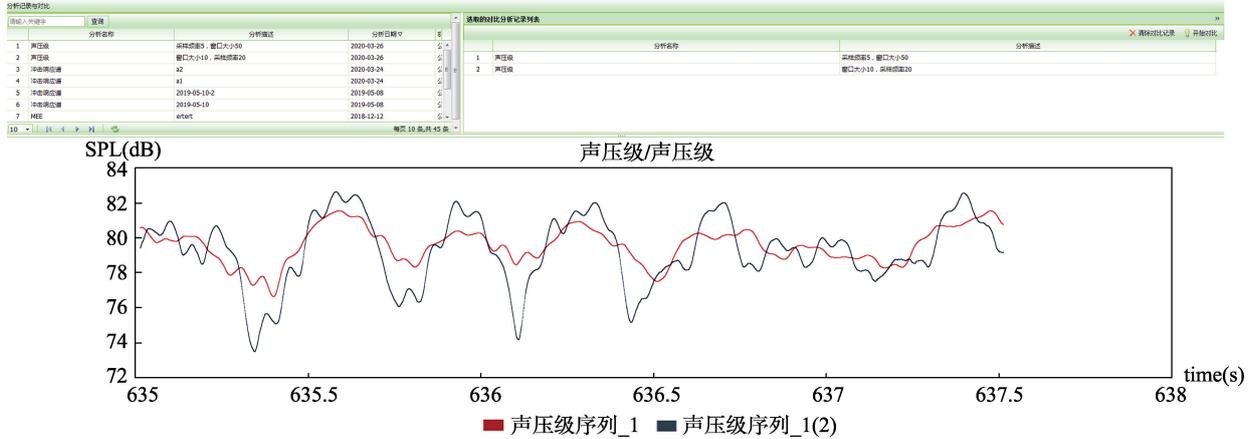


图 11 分析记录及对比主界面
Fig.11 Main interface for analysis record and comparison

数据管理			
序号	算法名称	算法类	算法描述
1	描述统计	com.swcc.dist.algthm.service.im...	统计值, 输出包括最大值, 最小值, 平均值, 中位数, 方差, 标准...
2	倍频程	com.swcc.dist.algthm.service.im...	倍频程算法, 处理频域数据来自 Matlab
3	冲击响应谱	com.swcc.dist.algthm.service.im...	冲击响应谱算法来自 Matlab
4	声压级	com.swcc.dist.algthm.service.im...	声压级谱计算来自 Matlab
5	分段RMS	com.swcc.dist.algthm.service.im...	分段求RMS 自编算法
6	两曲线插值作差	com.swcc.dist.algthm.service.im...	两条曲线插值作差
7	振动分析dll	com.swcc.dist.algthm.service.im...	用作振动算法测试dll
8	MP匹配跟踪算法	com.swcc.dist.algthm.service.im...	贪婪算法的一种典型
9	功率谱密度	com.swcc.dist.algthm.service.im...	功率谱密度求解

图 12 算法管理主界面
Fig.12 Main interface for algorithm management

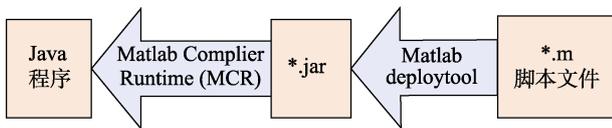


图 13 Matlab 算法集成方案
Fig.13 Integration scheme of Matlab algorithm



图 14 dll 动态库集成方案
Fig.14 Integration scheme for dll dynamic library

3.3 环境预示模块设计

结合飞行器环境数据库能够有机、高效地管理和利用大量环境数据的优势,建立具有分析和预示功能的模块。该模块主要包括环境数据统计归纳、环境载荷预计等分析功能。

环境载荷预计功能主要包括喷流噪声预计、冲击源预示、湍流边界层预示、低频振动预示、随机振动预示等功能。根据文献[10-11], 正态容差极限 (NTL) 的统计包络界面如图 15 所示。

4 结语

飞行器环境试验数据管理与预示系统不仅实现了对试验数据进行存储、处理、变换、分析、管理及再利用的功能,同时提供对数据进行比较、分析等功能,为飞行器设计人员、试验人员、环境工程师开展产品性能分析、试验分析等工作提供了通用、直观、方便的集成环境,为此该系统具有较大的实际应用价值。后续还将进一步加强飞行器环境预示系统的开发与完善,确保环境数据能够得到高效应用,为新型号研制的环境工程工作提供技术及软件支撑。



图 15 NTL 统计包络界面

Fig.15 NTL statistical envelope interface

参考文献：

- [1] MIL-STD-810G, Environment Engineering Consideration and Laboratory Test[S].
- [2] DEF-STAN 00-35, Environmental Handbook for Defense Material[S].
- [3] GJB 150A—2009, 军用设备环境试验方法[S], 2009. GJB 150A—2009, Laboratory Environmental Test Methods for Military Material[S].
- [4] MIL-HDBK-340A, Test Requirements for Launch, Upper-stage and Space Vehicles: Application Guidelines[S].
- [5] GJB 1027A—2005, 运载器、上面级和航天器试验要求[S]. GJB 1027A—2005, Test Requirements for Launch, Upper-stage, and Space vehicles[S].
- [6] THOMAS V C. A Vibr^oacoustic Database Management Center for Shuttle and Expendable Launch Vehicle Payloads[J]. The Journal of Environmental Sciences, 1987, 30(6): 24-26.
- [7] HEATON P, CZUCHNA J. Prediction of Dynamic Environments for Airborne External Stores during Aircraft Straight and Level Flight[J]. Journal of the Institute of Environmental Sciences, 1996, 39(4): 28-32.
- [8] 孙建勇, 张建军, 常海娟. 飞机平台环境数据库及预计系统构建研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(3): 77-82. SUN Jian-yong, ZHANG Jian-jun, Chang Hai-juan. Construction of Airplane Environment Resource Database and Prediction System[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(3): 77-82.
- [9] 闫少光, 门昱, 周彬文, 等. 卫星动力学环境试验数据库系统的设计与实现[J]. 航天器环境工程, 2005, 22(6): 322-326. YAN Shao-guang, MEN Yu, ZHOU Bin-wen, et al. Design and Construction of Dynamic Environment Test Database System[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2005, 22(6): 322-326.
- [10] NASA-HDBK-7005, Dynamic Environmental Criteria[S].
- [11] GJB/Z 181—2015, 动力学环境数据采集和分析指南[S]. GJB/Z 181—2015, Guidelines for Dynamic Environmental data Acquisition and Analysis[S].