

航天器材料及器件地面模拟试验数据库系统设计与实现

李洪普¹, 李兴冀², 杨剑群², 王成¹, 李晓峰³, 李锋³

(1. 中船重工奥蓝托无锡软件技术有限公司, 江苏 无锡 214000;

2. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001;

3. 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214000)

摘要: 针对航天器材料及电器元件地面模拟试验数据资源的汇聚与共享, 提出航天器材料及器件地面模拟试验数据库系统的设计与实现; 根据地面模拟试验数据库系统的业务需求和技术指标制定设计方案, 基于 B/S 架构, 采用 VUE.js、EXT.js、JAVA、Python 等框架或技术语言进行开发; 通过对系统的开发和测试, 实现了数据汇聚、数据组织与存储、数据分析、数据提取、信息共享等功能, 具备展示形式丰富多样化、分析算法自定义以及数据提取智能化等特点, 验证了设计方案的可行性; 地面模拟试验数据库系统满足对航天器材料与电器元件的基本性能参数数据和试验/仿真数据的大批量收录要求, 提升了试验数据服务水平, 对于相关领域的数据库系统设计具有一定的参考价值 and 借鉴意义。

关键词: 航天器材料与器件; 数据库; B/S 架构; 数据分析; 数据提取

Design and Implementation of Database System for Ground Simulation Test of Spacecraft Materials and Devices

LI Hongpu¹, LI Xingji², YANG Jianqun², WANG Cheng¹, LI Xiaofeng³, LI Feng³

(1. Wuxi Orient Software Technology Co., Ltd., Wuxi 214000, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

3. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214000, China)

Abstract: Aiming at the convergence and sharing of data resources of ground simulation test for spacecraft materials and electrical components, the design and implementation of ground simulation test database system for spacecraft materials and components are proposed. According to the business requirements and technical indicators of the ground simulation test database system, the design scheme is developed by using VUE.js, EXT.js, JAVA, Python and other frameworks or technical languages based on B/S architecture. Through the development and test of the system, the functions of data convergence, data organization and storage, data analysis, data extraction, and information sharing are realized. It has the characteristics of diversified display forms, customized analysis algorithm and intelligent data extraction, which verifies the feasibility of the design scheme. The ground simulation test database system can meet the requirements of collecting the basic performance parameter data and test/simulation data of spacecraft materials and electrical components in large quantities, which improves the service level of test data, and has certain reference value and significance for the database system design in related fields.

Keywords: space materials and devices; database; B/S architecture; data analysis; data extraction

0 引言

随着我国航天事业的蓬勃快速发展, 对航天器长寿命、高可靠的要求随之不断增长, 对于航天器材料和电器元件的空间应用可靠性及其保障技术日益受到重视。同时, 由于现代卫星大量使用新型材料和新技术, 环境因素对航天器材料应用的影响不容忽视, 在地面严格控制材料和电器

元件空间应用的性能并掌握基于地面模拟测试的试验数据是研制高品质、长寿命、高可靠航天器的重要手段。

现阶段航天器材料和电器元件特征参数主要来源于地面模拟试验仿真模型数据参数测试、地面模拟试验以及整理收录的部分国内外试验数据。通过汇聚已有航天器材料与电器元件基本性能参数数据和地面模拟试验数据, 并对外提供数据装载、数据管理、数据展示、数据应用、更新

收稿日期: 2022-06-17; 修回日期: 2022-07-15。

作者简介: 李洪普(1991-), 男, 河南洛阳, 硕士, 工程师, 主要从事试验数据管理方向的研究。

李兴冀(1981-), 男, 河北邯郸人, 教授, 博士生导师, 主要从事材料与器件空间环境效应科学与技术方向的研究。

杨剑群(1976-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 教授, 主要从事电子元器件辐射损伤机理及辐射防护技术方向的研究。

引用格式: 李洪普, 李兴冀, 杨剑群, 等. 航天器材料及器件地面模拟试验数据库系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(1): 202-208, 251.

维护等功能, 挖掘航天器材料与电器元件相关数据的潜在价值, 对于缩短航天器材料与电器元件测试周期、降低航天器材料与电器元件研发成本, 进而提升航天器设计与研制水平具有重要的意义。

现如今大部分航天器材料或电器元件数据库系统存在数据参数种类单一、操作功能简单、数据相对孤立等缺点。针对上述缺点, 提出航天器材料与器件地面模拟试验数据库系统(简称“地面模拟试验数据库系统”, 下同)设计, 在满足数据装载、数据管理、数据展示、数据应用以及更新维护等功能基础上新增数据分析功能, 通过集成专用分析算法并提供自定义分析算法接口, 方便用户快速分析测试数据并展示分析结果; 提供多种数据调用接口, 方便其它仿真分析软件调用获取数据, 实现数据的分发与共享; 同时, 基于光学字符识别(OCR, optical character recognition)技术, 自动提取国内外公开试验报告中的数据并纳入本数据库, 显著提升人工录入数据的效率与质量。另外, 本数据库收录的数据也可对相关行业仿真分析领域的数据模型建立、仿真结果分析对比提供参考数据。

1 系统架构和原理

1.1 系统业务架构

本系统涉及的航天器材料和电器元件特征参数主要来源于仿真模型数据参数测试、地面模拟试验以及整理收录的部分国内外试验数据。数据来源途径不同, 数据类型及格式多样, 通过对地面模拟试验各类试验数据信息和数据关系进行充分梳理, 提炼其中共性特征, 梳理各自的差异特征, 从而制定出多源异构数据的数据库模型及导入规范, 通过数据集成接口实现数据的标准化入库。

根据地面模拟试验数据库系统特性, 将整个数据库划分为多个子库, 各子库下分别存储不同的基础信息、地面模拟试验数据以及第三方文档资料, 并针对各类型数据提供数据装载、数据管理、数据展示、数据应用、系统管理和接口管理等功能。同时集成与仿真分析软件数据接口, 实现与仿真分析软件的数据交互, 整个数据库系统的业务架构如图 1 所示。

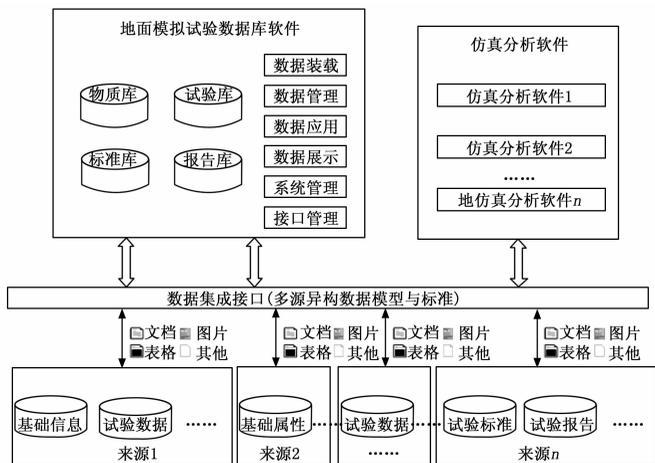


图 1 系统业务架构

1.2 系统技术架构

地面模拟试验数据库系统基于典型的浏览器/服务器(B/S, browser/server)架构进行开发, B/S 是典型的浏览器/服务器体系, 即在浏览器一端采用交互式 Web 页面, 服务器端连接数据库服务, 构成浏览器/服务器模型, 其模式相较于传统的客户端/服务器模式具有降低硬件配置、减少软件安装、缩减部署代价、提高可维护性和可扩展性等优势。整体的技术架构包含客户端、服务器端(包含模型层、控制层、业务逻辑层、持久层、基础层和数据库)两个角色, 各角色的功能定位如下。

1.2.1 客户端

提供用户访问 web 服务的一个平台, 用户通过浏览器实现发送数据请求、接收服务器返回的数据、解析服务器所传回来的数据。使用到的技术框架包括 VUE.js、EXT.js 等。

1.2.2 服务器端

服务器端负责运行及发布 web 应用服务, 承担着响应客户端请求、执行业务逻辑、访问数据库以及反馈请求数据等功能, 使用到的技术框架或路线包括 Struct2、Hibernate、Spring 等。

1.3 数据库选型

出于可靠性、稳定性以及弹性可扩展等因素的考虑, 本系统采用传统的 Oracle 数据库作为底层的数据库软件,

Oracle 数据库是以高级结构化查询语言(SQL, structured query language)为基础的大型关系型数据库, 方便逻辑管理并操纵大量有规律数据的集合, 具有可移植性好、使用方便、功能强大等诸多优点, 能在所有主流平台上运行(包括 Windows、Linux 等), 对开发商全力支持。

2 地面模拟试验数据库设计

2.1 系统组成

系统的整体组成主要包括 4 个层级: 门户层、功能层、服务支撑层、硬件层, 各层级内容如下。

1) 展示层: 本系统通过系统门户, 展示地面模拟试验数据相关, 并提供各项业务功能的快速入口。

2) 功能层: 本系统通过功能层, 提供各项具体功能, 满足各类数据使用人员对地面模拟试验数据的入库、管理、查询、应用的需求, 并通过集成接口, 实现与仿真分析系统的数据传输。

3) 服务支撑层: 本系统的服务支撑层主要提供基础性的功能组件, 分为服务器端组件。服务器端组件提供平台事务处理、数据接口、数据缓存、工作流引擎、报告生成和检索引擎等, 能够为系统读取和提交服务器端的数据提供连接和访问服务。

4) 资源层: 资源层提供支撑本系统运行的软硬件平台。

2.2 系统功能设计

根据业务需求, 地面模拟试验数据库提供数据装载、数据管理、数据应用、数据展示、系统管理和接口管理等

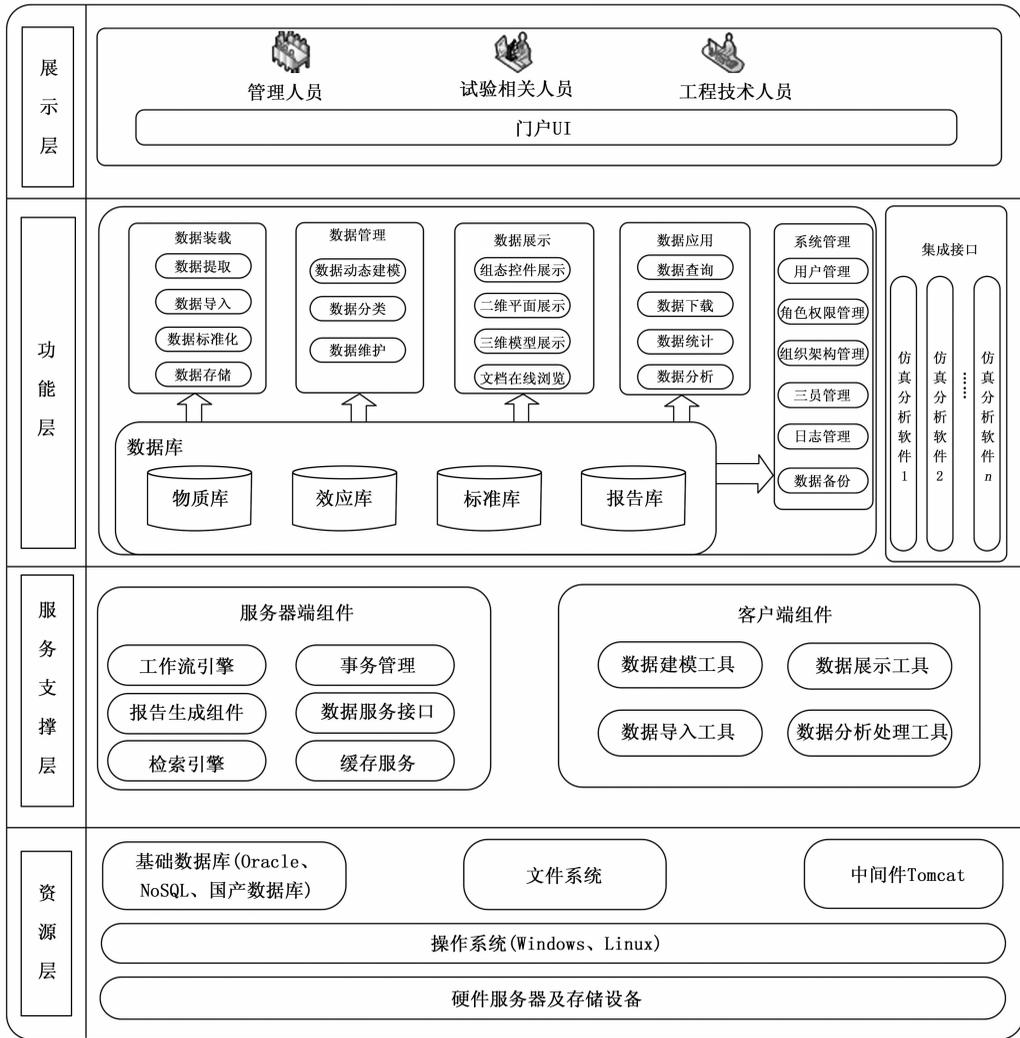


图 2 系统应用分层设计

功能模块, 各功能模块又包含不同的子功能点, 整个系统的功能模块划分如图 3 所示。

2.3 数据库设计

本系统目前采用世界上流行的 Oracle 数据库, 该数据库可移植性好、使用方便、功能强, 适用于各类大、中、小微机环境。它是一种高效率的、可靠性好的、适应高吞

吐量的数据库方案。

根据业务需求, 地面模拟试验数据库共包含物质库、试验库、标准库和报告库共四大类库, 四大类库存储表单按照存储对象不同共分为物质基础信息表、地面模拟试验记录表、地面模拟试验工况表、地面模拟试验结果表、试验标准记录表、试验报告记录表以及系统表 6 大类。

2.4 数据处理流程

在系统中, 基本性能参数数据、地面模拟试验数据、试验标准与报告会通过人工整理或软件自动提取成符合入库数据规则的标准数据, 在数据导入阶段进行数据校准与录入, 系统根据数据性质进行分类存储和管理, 系统所存储的数据将通过 WEB 界面、分析工具、统计报表、数据统计等形式展示, 涵盖了二维、三维展示以及文档在线浏览。

2.5 关键功能设计

在地面模拟试验数据库系统中, 基于系统特性设计数据录入、数据展示、数据提取、数

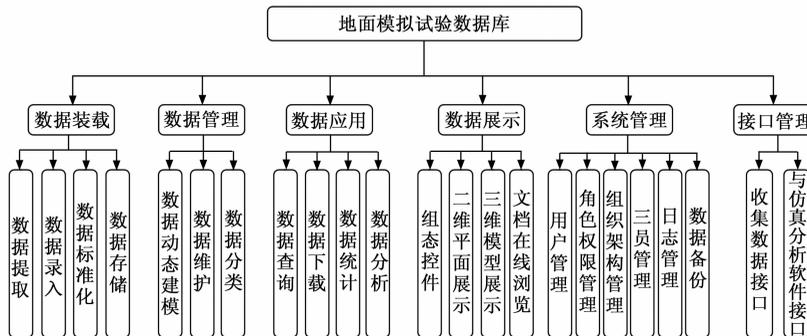


图 3 系统功能模块划分

据分析、系统管理等功能。

2.5.1 数据录入

数据录入功能用于实现包括物质基本信息、仿真数据、试验数据等的录入, 根据数据特性创建数据录入界面。地面模拟试验物质基本信息应包括名称、型号、生产厂家、批次等信息; 地面模拟试验数据包括地面模拟试验和仿真计算数据, 文件包括第三方机构公开的 pdf 格式的试验标准文件和试验报告文件, 录入数据时, 系统会根据业务规则对录入的数据进行校验, 只有符合业务规则的数据才能够正确存储到指定的数据库中, 否则将提示录入失败。

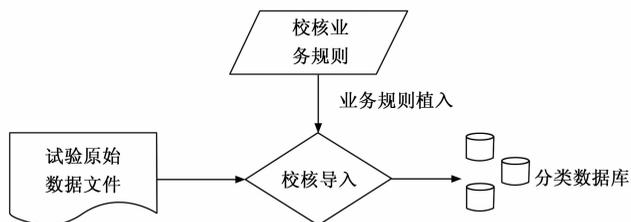


图 4 数据录入校验流程

2.5.2 数据展示

数据展示功能分为组态控件展示、二维平面展示、三维模型展示以及文档在线浏览等, 通过不同形式的控件工具实现对地面模拟试验物质基本信息、仿真试验数据以及标准报告文档的展示。

1) 组态控件展示。

组态控件展示分为两个部分: 服务器端和浏览器端。为配合系统使用, 服务器端采用 Java 进行开发, 封装成独立 jar 包, 配合 visualization.properties 文件进行参数配置以适应特定运行环境。浏览器端封装 js 库 visualization.js, 根据不同请求动态产生不同元素(图片放大器、视频播放器和 ActiveX)进行展示。

2) 二维平面展示。

二维平面展示主要采用基于 JavaScript 的开源可视化库 ECharts 实现将地面模拟试验物质特征参数以及试验和计算分析结果进行展现, 方便专业技术人员能够准确了解物质自身情况以及试验过程数据, 进而更加直观地分析试验效果。

ECharts 是由百度推出的一款基于 JavaScript 实现的可视化图表库, 可向用户提供直观、形象、交互性强、可个性定制的数据可视化图表。该图表库支持运行在通用计算机或移动终端上, 兼容市面上大多数浏览器(如谷歌、火狐、Safari、IE 等), 底层基于轻量级矢量图形库 ZRender 来实现, 提供常规的柱状图、条形图、饼图、折线图、玫瑰图、地图、热力图等多种展现样式, 同时支持多图表混合以及多维度堆积展现。

3) 三维模型展示。

三维模型展示采用 Jmol 控件实现航天器组成材料内部分子结构的模型展示, 以直观的方式动态呈现出物质内部

组成元素的三维结构。

Jmol 是一个基于 Java 语言编写的分子三维模型显示工具库, 用于分子模型的编辑和浏览。该工具库具有以下特点: ①开源, 支持跨平台, 兼容多种浏览器, 支持多种语言; ②支持常见的图片格式, 支持读取来源于量子化学程序导出的文件格式, 以及量子程序导出的包含多帧动画的文件以及普通数学模型; ③兼容多种分子格式, 如 CIF、mmCIF、GAMESS、CML、Ghemical、Gaussian 94/98/03 等 40 多种格式, 支持用程序自动解压缩 gzip 压缩的文件。

4) 文档在线浏览。

本系统提供文档在线浏览功能, 提升数据展示丰富性。通过 JS 库封装的 pdf.js 插件实现, 该插件是由 Mozilla 主导推出的, 主要用于 HTML5 平台上在线阅读 PDF 文档。它通过查找项目中相对路径下存放的文档, 加载显示在页面中供用户查阅。Pdf.js 框架的主要特性是不依赖于本地插件, 不转换为 flash, 纯粹基于前端语言。基于该插件, 可以实现在 pdf 浏览页面文档缩放、标记、打印、下载等功能。

2.5.3 数据提取

数据提取用于实现 pdf 格式的试验报告文档中表格数据的提取功能, 即主要对文件中的数据进行识别提取, 扩充地面模拟试验数据库的数据来源, 丰富系统数据种类。该功能主要对国内外的资料文献进行识别, 通过扫描整篇文档获取表格数据和关键词, 通过人为筛选判断从而提取有用数据进行展示和存储。

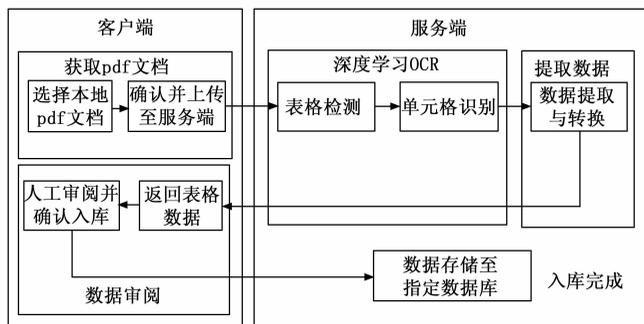


图 5 数据自动识别与提取

针对航天器材料与器件地面模拟试验报告(大多数为 pdf 格式)中的数据识别与提取功能, 需要通过光学字符识别(OCR, optical character recognition)技术来实现, 具体过程包含 3 个步骤: 图像预处理、图像分割、字符识别。传统 OCR 文本检测技术所依赖的浅层次的图像处理或图像分割方法往往局限于成像清晰、背景干净、字体简单而又排列规整的文档图像。相较于传统 OCR 文本检测技术, 深度学习 OCR 在精度和检测速度上具有极大的优势。因而采用基于深度学习 OCR 算法的 pdfplumber 库工具进行 pdf 表格数据的识别和提取。

2.5.4 数据分析

数据分析用于实现对仿真数据和试验结果数据的分析

处理。数据分析功能主要包括定制分析和自定义分析，针对多源异构地面模拟试验数据，集成专用标准分析处理算法，快速进行分析处理相关试验数据。

1) 定制分析功能主要通过通过对仿真数据或试验结果数据进行特定公式的计算得到分析结果，最后绘制出分析曲线。部分分析结果在绘制曲线时纵坐标需要用到取对数运算，结合系统前端开发语言采用 ECharts 工具库实现。

2) 自定义分析功能主要提供对仿真数据或试验结果数据进行自定义公式的计算以此得到分析结果，自定义公式主要包含四则运算以及绝对值计算。该功能利用 JavaScript 提供的 eval 函数来进行运算，eval 函数会对一个给定的包含 JavaScript 代码的字符串进行评估，并尝试执行隐含在字符串里的表达式或正确合法的 JavaScript 语句。然后 eval 函数会把最后一条语句或表达式所包含的引用或参数值作为返回值反馈给调用方。由于系统服务器端所采用的 JAVA 语言具有跨平台性，从而通过调用基于 JVM 语言的 javax.script 包内的 ScriptEngineManager 类去执行脚本语言 eval 函数以实现公式计算。

2.5.5 系统管理

1) 用户管理。

用户管理功能支持对使用人员的账号基本信息及所属部门信息进行管理，其中所属部门信息支持提前预设，也支持自定义修改。系统管理员可以对用户信息进行必要的新增、修改、删除等操作。

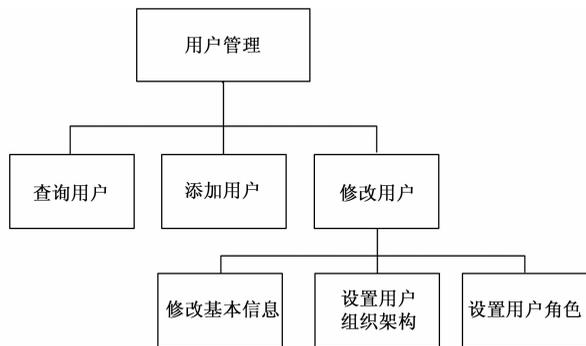


图 6 用户管理用例分解图

2) 三员管理。

本系统提供“三权分立”的权限管理机制（参见下图），包括以下主要的管理角色。

- 系统管理员：负责系统维护和数据库维护等工作；
- 安全管理员：负责用户角色管理和权限分配等工作；
- 审计管理员：负责审计系统日志，检查异常操作行为。

3 系统实现

地面模拟试验数据库系统根据上述系统设计方案进行搭建。本章围绕系统的关键功能，重点描述一下系统实现的效果。

3.1 数据录入

在数据录入时，在导入数据窗口填写地面模拟试验基

本信息如测试对象分类、细分类型、试验单位、试验人员、试验时间、来源、国别、类别以及数据文件，其中物质分类分为材料和器件两类，细分类型中材料包括金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料和复合材料四大类，器件类型包括晶体管、光电器件、只读存储器 and 闪存、RAM/ROM、AD/DA 转换器、FPGA、线性器件、逻辑器件、MOSFET 等类型，其他信息依据实际情况填写，导入数据窗口界面如 7 图所示。



图 7 地面模拟试验数据导入

数据文件的格式为 zip 压缩包，通过客户端浏览器上传至后台服务器端进行解压缩和文件解析。数据文件内容在保存前会依据入库标准进行校验，试验数据的入库标准为以树结构组织数据、描述材料、电器元件及其仿真与试验的层次关系，不符合入库的标准的数据则以弹窗等形式告知用户错误原因并提醒用户重新检查整理数据包。

3.2 数据展示

数据展示方便用户查看地面模拟试验物质的基本信息，包括物质的内部分子结构、基本信息、力学、热学、电学、磁学、光学等维度的相关属性。在信息界面中包括二维平面图、三维动态结构图、基本属性的展示，其中二维平面图主要呈现物质相关图片信息，三维动态结构图基于 Jmol 呈现物质组成分子内部结构模，实际界面效果如图 8 所示。

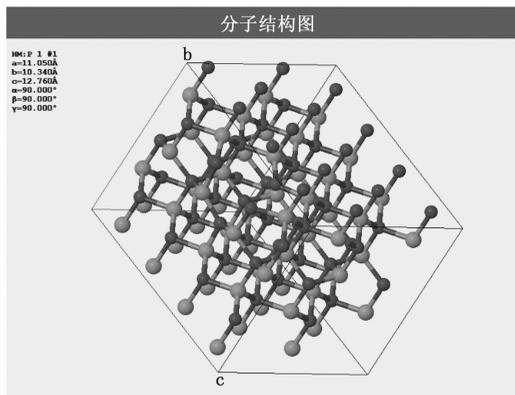


图 8 三维展示

在地面模拟试验数据界面中，试验工况信息和试验结果数据以表格形式进行展示，用户通过勾选不同工况即可在界面上加载出对应工况下的试验数据。

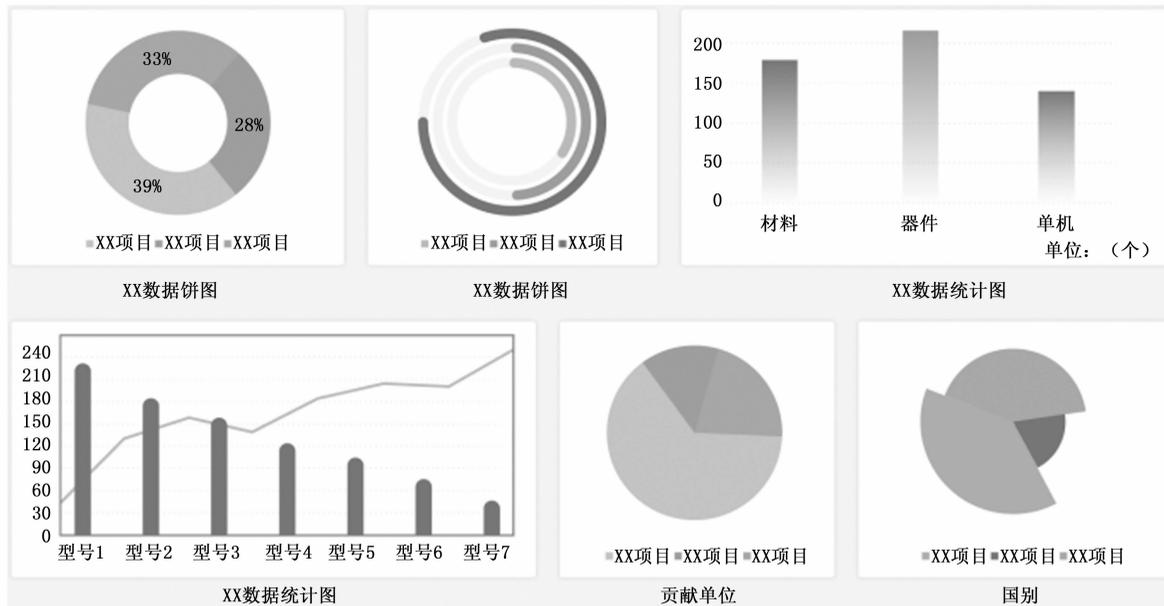


图 9 二维平面展示

3.3 数据统计

数据统计主要基于 ECharts 部分控件, 根据航天器材料与器件的生产厂商、相关的试验数量、试验来源、试验国别、试验时间以及试验单位进行统计展示, 展示形式以 ECharts 图表控件为主, 通过柱状图、环形图和饼图等空间较为直观形象的展示统计数据, 统计效果如 9 图所示。

3.4 数据提取

首先通过导入界面上传 pdf 格式的文件, 浏览器上传文件至后台服务器端进行扫描解析, 将识别出来的表格信息存储在一个 Excel 文件中, 最终以 Tab 页的形式展示文件中所有的表格信息, 试验数据导出前后的对比效果如图 10 所示。

ID	Sample	Ion	Date	Angle	Eff. LET	Run Time	Eff. Time	Flux	TID per Sample	Fluence
ID No	ID No	ID No		°	Mev/mg/cm ²	sec	sec	P/cm ² /sec	Rads (Si)	P/cm ²
R00003	04	40-Ar	12/06/99	0	14.1	120	102	4.17 E+02	3.39 E+01	5.00 E+04
R00004	04	40-Ar	12/06/99	0	14.1	503	457	3.98 E+02	7.91 E+01	2.00 E+05
R00005	04	40-Ar	12/06/99	45	19.94	464	401	1.29 E+02	9.82 E+01	6.00 E+04
R00006	04	40-Ar	12/06/99	60	28.2	684	660	7.31 E+01	1.21 E+02	5.00 E+04
R00022	02	40-Ar	12/06/99	0	14.1	117	-	1.46 E+03	3.87 E+01	1.71 E+05
R00023	02	40-Ar	12/06/99	0	14.1	546	-	1.83 E+03	2.65 E+02	1.00 E+06
R00024	02	40-Ar	12/06/99	0	14.1	153	116	3.27 E+02	2.76 E+02	5.00 E+04
R00025	02	40-Ar	12/06/99	45	19.94	258	253	1.94 E+02	2.92 E+02	5.00 E+04

ID	San Ion	Date	Angle	Eff. LET	Run Time	Eff. Time	Flux	TID per Samp	Fluence
ID No	L	ID No	null	°	sec	sec	P/cm ² /sec	Rads (Si)	P/cm ²
R00003	04	40-Ar	12/06/99	0	120	102	4.17 E+02	3.39 E+01	5.00 E+04
R00004	04	40-Ar	12/06/99	0	503	457	3.98 E+02	7.91 E+01	2.00 E+05
R00005	04	40-Ar	12/06/99	45	464	401	1.29 E+02	9.82 E+01	6.00 E+04
R00006	04	40-Ar	12/06/99	60	684	660	7.31 E+01	1.21 E+02	5.00 E+04
R00022	02	40-Ar	12/06/99	0	117	-	1.46 E+03	3.87 E+01	1.71 E+05
R00023	02	40-Ar	12/06/99	0	546	-	1.83 E+03	2.65 E+02	1.00 E+06
R00024	02	40-Ar	12/06/99	0	153	116	3.27 E+02	2.76 E+02	5.00 E+04
R00025	02	40-Ar	12/06/99	45	258	253	1.94 E+02	2.92 E+02	5.00 E+04

图 10 pdf 识别前后对比

3.5 数据分析

在地面模拟试验数据展示页面中, 通过勾选不同试验工况加载器对应条件下试验结果数据, 同时, 勾选航天器

组成器件具体的结号进行常用 5 种定制分析算法的处理, 定制分析结果支持缩放、下载等操作, 具体效果如图 11 所示。

在图 11 中通过点击添加图标打开自定义分析处理窗口。在该窗口中, 用户可选择其中任意一种工况的数据进行处理。界面提供 X 轴参数和 Y 轴参数, 以下拉框的形式方便用户选择, 选择后自动关联当前工况下指定的参数数据, 当参数选择完成后, 分别在 X 轴表达式和 Y 轴表达式输入框中进行自定义公式填写, 目前支持的计算符号涵盖加、减、乘、除以及绝对值, 填写完成后点击窗口上的“确定”按钮即可在后台启动自定义数据分析任务, 任务结束后分析效果在前端页面自动展示。

自定义分析处理后的数据展示形式与定制分析保持一致, 采用 ECharts 的折线图控件进行展示, 并且支持缩放和下载。

3.6 系统管理

系统设置三员管理, 系统管理员负责系统维护和数据库维护等工作; 安全管理员负责用户角色管理和权限分配等工作; 审计管理员负责审计系统日志, 检查异常操作行为, 各管理员功能分工明确, 各司其职。

4 结束语

本文主要介绍了地面模拟试验数据库系统以及系统中包含的物质库、试验库、标准库、报告库这 4 个子库, 基于上述模块设计了一套面向航天器材料与器件的地面模拟试验数据库系统, 同时基于 VUE、EXT、JAVA、Python 等编程语言或技术, 实现了该地面模拟试验数据库系统, 具体内容总结如下:

- 1) 简要介绍地面模拟试验数据库系统的业务架构和数

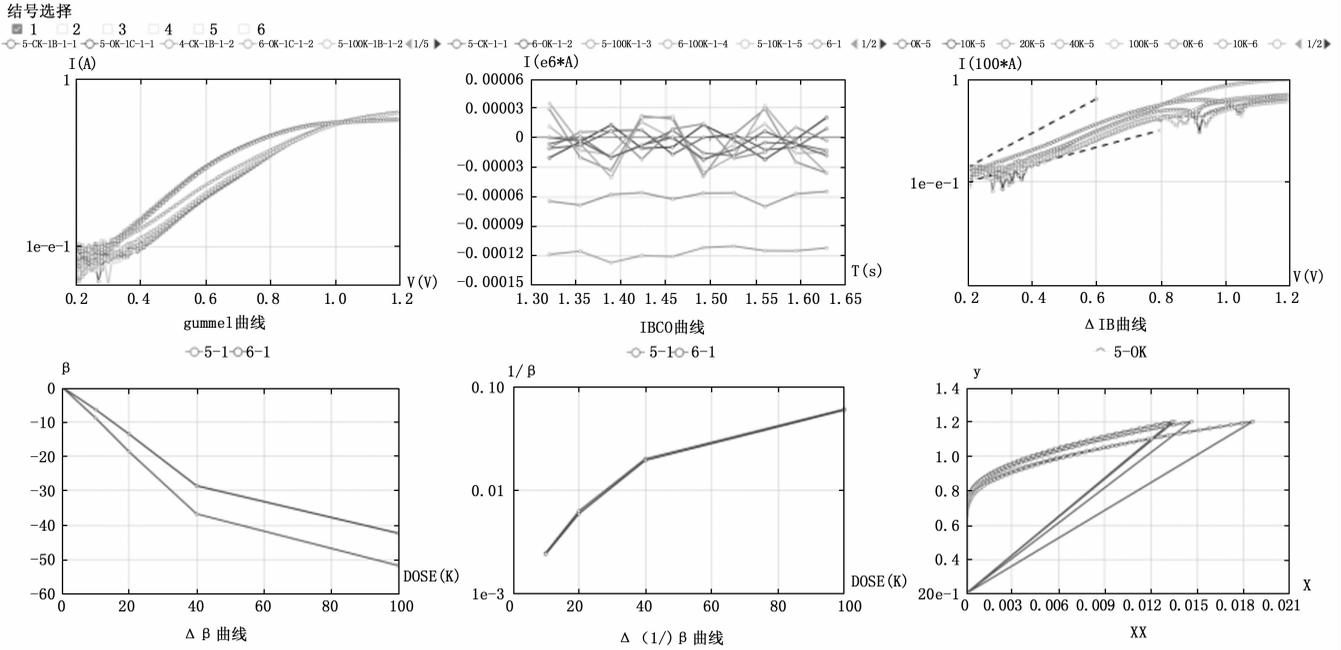


图 11 定制分析



图 12 自定义分析

据流程。

2) 重点阐述地面模拟试验数据库系统的关键功能设计。

3) 详细展示整体系统的实现过程和功能演示效果。

在实际运行过程中，所设计的数据录入、数据展示、数据提取、数据分析和系统管理等功能正常，达到预期目标。其中，数据分析功能集成专用标准分析处理算法，快速分析相关试验数据，通过图表形式更为直观的展示分析处理结果，并且提供输入自定义算法，灵活处理试验数据。数据提取功能针对 pdf 格式文档借助文字识别、图像处理等技术实现自动提取表格数据，解决传统人工提取数据存在的耗时长、出错率高等弊端。对于相关领域的数据库系统设计具有一定的参考价值 and 借鉴意义。

该系统仍有改进优化的方面：

1) 随着深度学习与 OCR 领域的结合，针对 pdf 文档的识别提取能够更为全面和智能，不但是表格数据更能进行关键词搜索、曲线识别等。

2) 提高自定分析算法所涵盖的运算难度，添加更多的运算符号与运算规则。

3) 当系统随着使用年限的增加，数据库存储的数据量也将随年增长，因而结合大数据技术优化数据库存储和查询效率。

参考文献：

[1] 张 岩. 基于 Oracle 的高速公路收费系统数据库设计及应用 [D]. 南京: 东南大学, 2017.

[2] 林乐杰. 科研管理信息系统中数据库的设计与实现 [D]. 北京: 北京化工大学, 2006.

[3] 崔爱菊, 王建村, 苏天赞. 海洋地球物理数据库设计与实现 [J]. 海洋科学, 2015, 39 (3): 116 - 121.

[4] 时宁国, 杨永平, 姚国伟. 基于 GIS 的路面管理信息系统数据库设计与实现 [J]. 计算机工程与设计, 2004 (12): 2305 - 2307.

[5] 张如意, 杜福洲, 王庆有. 飞机复合材料构件工程数据库设计与实现 [J]. 航空制造技术, 2014 (Z2): 90 - 92.

[6] 张卓勇, 宋 月. 基于 BS 结构的太赫兹光谱数据库的设计与实现 [J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35 (9): 2469 - 2472.

[7] 姬 鹏, 王中根, 夏 军, 等. 区域水系统多源信息数据库设计与实现 [J]. 地理科学进展, 2010, 29 (11): 1345 - 1349.

[8] 杨 敏, 徐晓梅, 周鸿斌, 等. 基于 Oracle 和 ArcSDE 的滇池北岸数据库设计与应用 [J]. 环境科学与技术, 2013, 36 (7): 168 - 171, 194.

[9] 聂蓉梅, 郑东升, 罗 军. 运载火箭大型试验数据库系统设计方法 [J]. 导弹与航天运载技术, 2008 (1): 23 - 28.

[10] 翟虹霞. 基于综合矿山地质工程的数据库系统设计及应用 [J]. 世界有色金属, 2019 (11): 244 - 246.

(下转第 251 页)