

文章编号: 2097-1974(2024)06-0028-08

DOI: 10.7654/j.issn.2097-1974.20240605

# 基于大数据的液体动力试验数据分析系统设计与应用研究

胡海峰, 邓博文, 李晨沛, 周晨初  
(西安航天动力研究所, 西安, 710100)

**摘要:** 为解决液体火箭发动机试验数据分散管理、规范性不足以及分析手段传统等问题, 设计了一种基于大数据的液体动力试验数据分析系统。系统采用先进的大数据架构, 结合数据预处理技术、分布式存储和数据中心建模等手段, 形成了专业化的数据仓库, 优化了数据组织、检索及分析处理能力, 实现对试验数据的全面收集、高效存储、精细管理和直观展示。应用结果表明, 系统不仅实现了试验数据的规范管理和集中存储, 还提供了发动机调整计算等数据分析功能, 极大提高了数据处理效率与分析质量, 为液体动力领域的数字化转型提供了有益的探索和实践, 具有广阔的应用前景。

**关键词:** 大数据; 液体动力; 试验数据; 管理; 分析

中图分类号: V433

文献标识码: A

## Research on the Design and Application of a Big DataBased Analysis System for Liquid Propulsion Test Data

HU Haifeng, DENG Bowen, LI Chenpei, ZHOU Chenchu  
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an, 710100)

**Abstract:** To address the issues of scattered management, lack of standardization, and traditional analysis methods in the data of liquid rocket engine tests, a big data-based liquid propulsion test data analysis system has been designed. The system adopts an advanced big data architecture, combines data preprocessing technology, distributed storage, and data center modeling, forms a specialized data warehouse, optimizes data organization, retrieval, and analysis processing capabilities, and achieves comprehensive collection, efficient storage, fine management, and intuitive display of test data. Application results show that the system not only realizes the standard management and central storage of test data, but also provides functions for data analysis such as engine adjustment calculations, significantly improving data processing efficiency and analysis quality, which provides valuable exploration and practice for the digital transformation in the field of liquid propulsion and holds promising application prospects.

**Keywords:** big data; liquid propulsion; test data; management; analysis

### 0 引言

随着航天科技飞速发展, 液体火箭发动机(即液体动力系统)作为核心动力装置, 其性能的稳定性和可靠性对于整个航天项目的成功至关重要。在液体动力系统的研制过程中, 试验不仅是多维度验证设计方案可行性的关键手段, 更是确保结构可靠性和工艺稳定性的基石, 只有通过全面的实物测试, 才能评估出产品的质量和系统性能<sup>[1]</sup>。随着中国航天工程的加速推进, 发动机产品的迭代周期显著缩短, 技术要求随

之提高。现代设计实践融合了诸如增材制造和集成化设计等理念, 这些先进技术虽显著增强了发动机的性能参数, 但也带来了前所未有的复杂性, 对试验验证的需求提出了更高挑战。在此背景下, 快速且精准的数据分析成为推动产品迭代优化的决定性因素。

在运载火箭总体领域, 围绕试验数据开展的管理平台构建及分析方法研究已经取得了显著的工程实践效果<sup>[2-6]</sup>, 然而在液体动力分系统领域, 仍面临着数据容量与处理效率的双重挑战。以某型液体火箭发动机为例, 其研发周期内需经历多次试验与改进, 每次

试验都会产生包含温度、压力及振动等多维度的海量数据。传统的数据处理方式难以在短时间内对这些庞杂数据进行全面剖析,导致评估发动机性能的准确性和时效性受限。此外,设计团队成员各自保管试验数据的现状,不仅造成了数据孤岛,也严重阻碍了跨项目、跨型号间的数据对比分析,限制了对产品性能规律的深度挖掘。

## 1 技术背景

大数据是指传统数据处理软硬件难以处理或分析的庞大数据集合。大数据分析与传统的数据分析在数据源、处理方式和分析目的等方面存在明显差异。首先,传统数据分析主要依赖于结构化的数据,例如关系型数据库、CSV文件,而大数据分析可以处理非结构化、半结构化和复杂的数据,例如文本、图像、音频、视频等。其次,传统数据分析通常采用SQL查询方法,而大数据分析需要使用大规模数据处理框架,例如Hadoop、Spark等,同时还需要通过数据清洗、数据转换等操作提高数据质量和可用性。最后,传统数据分析主要关注数据的可视化、统计分析和报表等,而大数据分析更加注重挖掘数据中的潜在价值,发现数据背后的关联性和规律<sup>[7]</sup>。

大数据分析技术有多种常见算法,例如Apriori算法用于发现数据中的关联规律,牛顿迭代法(也称牛顿法)用于迭代求解非线性方程(组)的根,梯度下降法(也称下山法)用于确保迭代过程的目标函数值单调递减。实际应用时牛顿法虽然收敛速度快,但可能出现迭代发散导致无法收敛的情况,因此常与下山法结合,得到牛顿下山法,以确保迭代结果的稳定性。相对于传统算法只能处理有限量的数据,且只能手动、串行处理数据的不足,大数据分析算法能够分析海量数据,处理大规模或复杂模型,可以自动进行数据清洗、数据转换等操作,同时能并行处理数据,从而大幅提高数据处理速度和能力。

大数据分析技术的飞速发展,为试验数据的处理与分析开辟了新途径。大数据分析技术强大的数据处理能力和深度挖掘潜力,适合快速展示、分析和评估试验数据。基于大数据分析平台构建的液体动力试验数据分析系统,支持集中存储和统一管理海量数据,有利于数据组织、检索和分析处理,能够提升发动机的设计优化与迭代能力。

## 2 传统试验数据管理方式的弊端

液体动力研制过程中开展了大量的试验,积累了众多试验数据,但以往的数据管理信息化程度以及对数据深度挖掘的分析能力还需要提升,具体表现如下:

a) 数据管理分散。试验数据有些以光盘形式存放于档案部门,有些以试验报告形式流转于产品数据管理系统,有些保存在数据采集系统中。数据分散,难以快速查找,不同型号之间数据比对困难。

b) 数据规范性不足。部分不同型号间的数据标记方式有待进一步统一。例如,在测试过程中部分相同测试物理量在不同型号中的名称标记不一致,如压力参数,有的型号采用P标记,有的型号则用Q标记;部分测试数据字母的大小写存在多种格式,有待规范。此外,不同测控设备输出的数据格式各异,影响后续的数据分析工作。

c) 试验数据分析手段较为传统。尽管设计人员广泛采用主流数据处理软件进行日常数据分析,但更多停留在传统统计分析层面,未能充分挖掘数据的潜在价值,尤其在整合大数据分析、人工智能等前沿技术方面,应用程度相对不足,产品性能状态检测及评估方法匮乏,难以满足日益增长的数据密集型研究需求。

## 3 试验数据分析系统设计

为了进一步提升液体动力试验数据的利用效率,发挥数据分析结果对设计优化的支撑作用,并推动试验数据管理向更高层次的数字化转型,本文探索构建基于先进大数据架构的液体动力试验数据分析系统,应对海量试验数据的有效管理,显著提高数据处理效率,同时深化数据分析的层次、提升分析质量,从而进一步挖掘数据的内在价值。

### 3.1 系统架构

液体动力试验数据分析系统的主要功能是实现试验数据的收集、存储、管理和分析应用,功能架构可划分为4个层次:数据源层、数据抽取层、数据分析应用层、数据展示层,其具体的架构层次如图1所示。

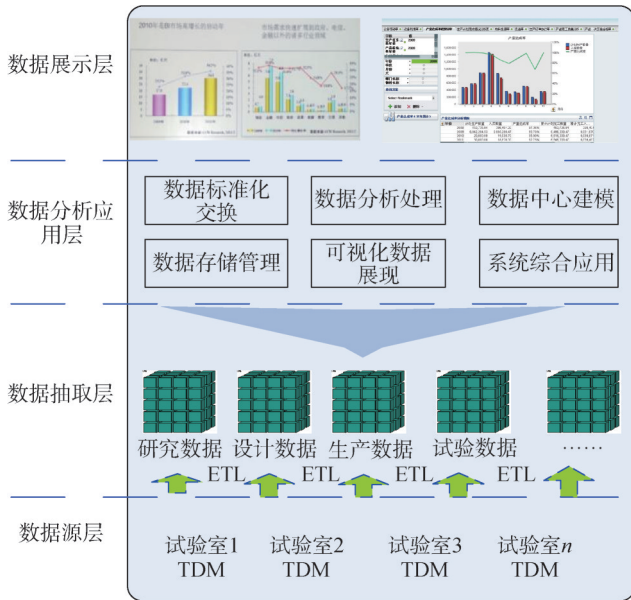


图1 试验数据分析系统功能架构

Fig.1 Framework of test data analysis system

a) 数据源层：试验数据分析系统的数据源层来自于各个试验部门已建设的试验数据采集系统（Test Data Management, TDM）。从试验台采集到的所有测量数据（包括温度、压力、流量、振动等）为原始试验数据，收集和存储原始试验数据的TDM数据库，为基础测试数据源。

b) 数据抽取层：通过数据抽取工具从数据源层中抽取一系列针对特定领域（不同类型的发动机）、专业部门（总体室、组件室等）及目标用户群（设计人员、试验人员等）所需的数据子集，形成高度专业化的数据仓库。通过对数据结构进行汇总和索引，提升数据仓库的访问效率和检索速度；通过对逻辑设计模型进行优化，提升数据仓库的存储容量，丰富查询

种类与分析维度<sup>[8]</sup>。

c) 数据分析应用层：数据分析应用旨在根据数据仓库的结构和特定需求，实现规范化数据组织与管理、高效数据检索、标准化数据交换、精细化数据中心建模、深度数据分析处理以及综合性数据应用服务等功能。

d) 数据展示层：数据展示层即数据驾驶舱，主要利用BI工具，基于多维数据库，根据实际的业务需求，通过交叉表、曲线图、仪表盘等多种数据展现手段，将复杂的试验数据分析结果以清晰易懂的形式呈现，便于用户高效浏览与深入洞察，有效赋能液体动力领域中各项试验业务的管理与决策优化。

### 3.2 试验数据收集

通过数据抽取接口，将分散在各个试验部门TDM系统中的试验数据收集汇总，集中存储到数据仓库中。由于各个数据源在数据格式、内容质量上存在的差异，因此需要针对每个数据源建立独立的抽取流程，并通过标准化通用接口传输到数据仓库内部的数据预处理模块，执行数据清洗与格式转换工作，消除数据不一致性，提升整体数据质量，为后续深度分析奠定基础。

通过ETL(Extract, Transform, Load)技术对复杂异构数据进行预处理，ETL技术包括数据抽取、转换和装载三个核心环节，是建设数据仓库的第一步，其详细工作流程如图2所示。数据从各类数据源中被抽取出来后，先通过预设的清洗算法自动补全空值、修正错误值、剔除重复值、定位异常值，然后人工对异常值进行甄别和更正，再通过转换规则自动适配到统一的数据格式与结构，最后加载至特定的目标数据库中<sup>[9]</sup>。

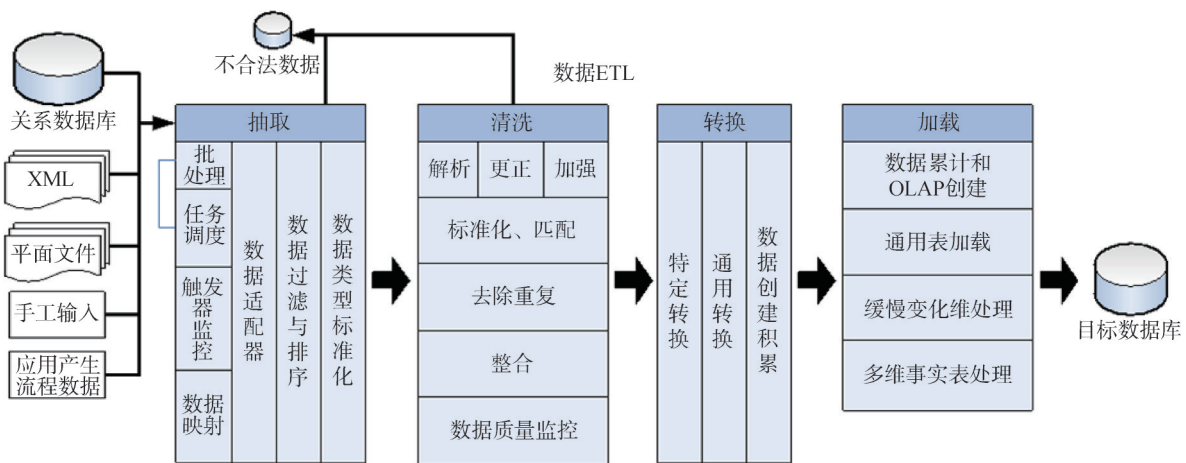


图2 数据ETL工具详细流程

Fig.2 Detailed flowchart of data ETL tool

### 3.3 试验数据存储

#### 3.3.1 试验数据存储模式选择

液体动力试验数据涉及原始数据、结果数据、试验报告、图片、视频等众多数据类型，针对不同类型的数据，采用适合其特点的存储模式，包括分布式文件存储、列式存储、图数据库存储等，以实现高效存取与检索性能。

针对试验后生成的试验报告、原始数据、视频等非结构化数据，选择HDFS分布式文件存储系统进行高效存取管理。HDFS作为一种专为海量非结构化数据设计的分布式存储系统，具有出色的扩展性和容错性，能够确保试验数据的安全存储与快速访问。

针对经过结构化解析的试验结果数据，选择HBase列式存储进行高效存取<sup>[10]</sup>。HBase作为一种可扩展的列式数据库，不仅支持高并发的随机读写操作，还提供了实时查询功能，适合存储结构化的海量试验结果数据。

针对试验过程中形成的图片数据，选择GraphX图数据库进行高效管理。GraphX支持高效的图序列化，提供丰富的图数据建模功能，满足对图片数据进行高效存取与精准分析处理的要求。

#### 3.3.2 多维数据模型选择

在多维数据处理领域，选择合适的组织与存储模型是提升数据处理效能的关键。多维数据模型主要包括星型模型与雪花模型两种。星型模型由一个中心的事实表与分布四周的多个维度表相关联组成，事实表存储业务过程的量化指标，维度表存储描述性信息。雪花模型是星型模型的扩展，以星型模型的某些维度表为中心，再继续扩展连接新的维度表构成<sup>[11]</sup>。

星型模型查询性能好，但数据冗余多导致存取效率低，而雪花模型的优缺点则正好相反。液体动力试验领域的多维数据处理需求以检索、分析为主，数据一旦入库后很少更改，因此本研究选择星型模型作为数据仓库的组织与存储方法。

#### 3.3.3 数据中心建模

数据建模是构建数据存储中心的核心环节。数据标准模型是指针对各种类型的数据，制定的一套用于数据集成和交换的标准规范，基本内容包括要素类、域、关系、属性和规则等。建立液体动力试验数据标准模型的目的是对发动机试验测试过程中产生的大量数据进行规范化治理。通过数据建模，围绕常温、低温等不同领域的发动机产品，以及温度、压力、振动等不同测试类别的数据进行统一规划和管理，从而理

清发动机试验业务逻辑的数据规范。

例如，采用星型模型对试验数据建模可分多个维度展开，其中在产品维度，通过所属领域、产品代号等，可以系统性透视产品概况与特性；在试验维度，通过试验类型、试验序号等，可以了解试验的具体细节；在数据维度，通过测试类别、数据类型等，可以全面掌握数据的采、存情况；在时间维度，通过年度、季度及月度等时间切片，可以动态观察试验数据的变化趋势等，如图3所示。多个维度相互关联、相互影响，共同构成试验数据的全貌<sup>[12]</sup>。

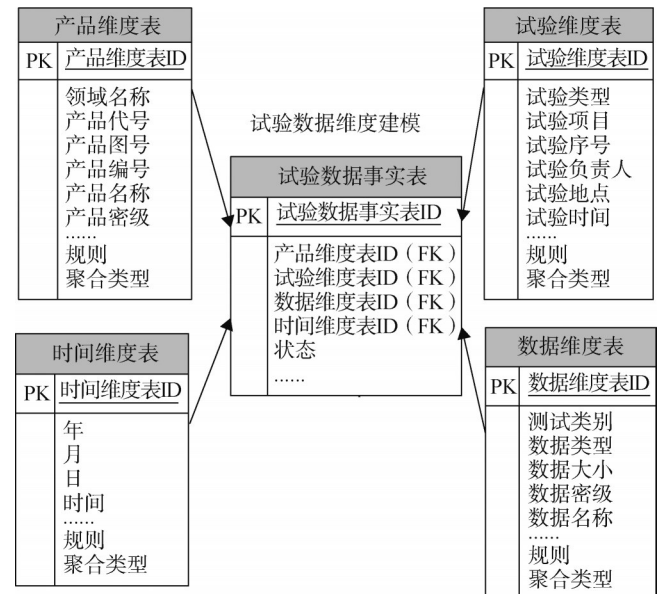


图3 数据建模设计

Fig.3 Data modeling design

### 3.4 试验数据管理

液体动力系统根据测试目的的不同选择相应的试验项目，有些项目为整机测试性质，数据量较大，如高空试验、地面点火试验、力学试验等；有些项目为组合件测试性质，数据量较小，如液流试验等；有些项目为检查性质，数据量也较小，如产品检测数据包。试验项目的多样性导致各类试验在数据格式、参数定义以及测点名称等方面存在显著差异。

通过以上分析，为实现对试验数据的规范化管理，本文从高到低4个层次对试验数据进行分类、组织、存储和管理，旨在构建一个标准的、统一的数据管理体系：

a) 试验数据分类规范化。根据试验后数据组织形式是否存在较大差异的分类原则，将液体动力系统所有试验项目分为5大类：高空试验、地面点火试验、力学试验、液流试验和产品检测数据包，每个试

验类型对应固定的数据组织模式。

b) 试验数据组织规范化。对于某一类型试验,其产生的试验数据(数据集、录像、照片、测点信息、报告等)以固定的目录结构进行组织,从而满足统一管理要求。

c) 试验数据格式规范化。对产生的各类试验数据文件在存储格式、编码、命名等方面提出规范化整编要求,从源头管控数据的标准化,从而为系统自动结构化解析试验数据奠定基础。

d) 试验数据标识规范化。对试验数据的描述性元数据如测点代号、工况表达式等提出规范化整编要求,从而提供标准化的描述方法,便于不同人员、不同单位之间的信息交流,有利于不同系统之间数据共享与流转<sup>[13]</sup>。

### 3.5 试验数据分析应用

#### 3.5.1 数据检索分析

试验数据入库之后,可控、方便、快捷检索是首要需求。

系统基于统一的权限控制手段提供数据检索服务,用户无法检索未授权的试验数据。同时系统提供多种数据检索能力,包括:a) 目录树检索,用户可通过选择目录树节点,迅速定位符合特定条件的数据记录;b) 组合检索,用户可根据一个或多个组合条件,精确筛选出符合条件的数据记录;c) 全文检索,通过对文件内容的深度分析,实现对试验报告的全面检索。

#### 3.5.2 数据多维分析

系统可从产品、试验、数据、时间等不同维度对产品状态信息进行多维分析。多维分析手段包括:钻取、切片、切块、旋转,其分析过程如图4所示。

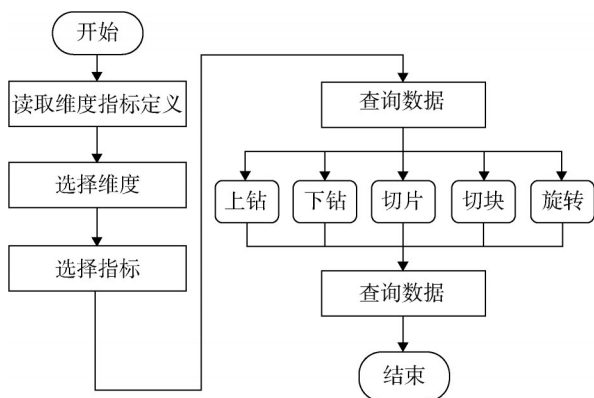


图4 多维分析过程示意

Fig.4 Schematic diagram of multidimensional analysis process

a) 钻取:分为上钻和下钻,上钻即从分项数据向上追溯到汇总数据进行分析的过程;下钻则是从汇总数据深入到分项数据进行分析的过程。

b) 切片:按某一个维度的限定值对原有数据进行分析的过程。

c) 切块:对多个维度中的每一个维度都限定一个取值范围,然后按取值范围对原有数据进行分析的过程。

d) 旋转:变换一个维度的顺序和方向或交换两个维度的位置,然后按新维度对原有数据进行分析的过程<sup>[14]</sup>。

#### 3.5.3 数据展现分析

在数据多维分析基础上,针对不同的数据对比条件和内容展示需求提供相应的数据展现方案,通过多样化的数据可视化控件,生动、详实地呈现数据分析及统计内容,控件包括瀑布图、色谱图、散点图、柱状图、饼状图等。

系统提供专为海量数据优化的显示引擎,确保经过结构化解析的海量数据以列表的形式快速展现。

数据回放功能通过视频显示与帧数据播放控件,实现时间序列历史数据的动态复现,帮助用户深入理解试验执行过程,辅助故障诊断以及性能分析。

对于试验任务,系统以目录树的展示方式进行分层的展现,便于用户高效浏览与管理。

## 4 系统实现

液体动力试验数据分析系统以大数据分析平台为基础,结合平台上开发的试验数据管理分析模块构建实现。

大数据分析平台全面收集了发动机研制及生产过程中产生的各类数据,不仅实现液流、力学、地面点火以及高空等试验数据的集中存储,还打通设计数据、生产工艺数据、质量检验数据和试验数据的信息传递链路。该平台由源数据层、数据存储层和数据处理分析层三个层次构成,分别负责数据的抽取、采集和预处理工作,以确保数据分析的准确和高效<sup>[15]</sup>,平台功能架构如图5所示。

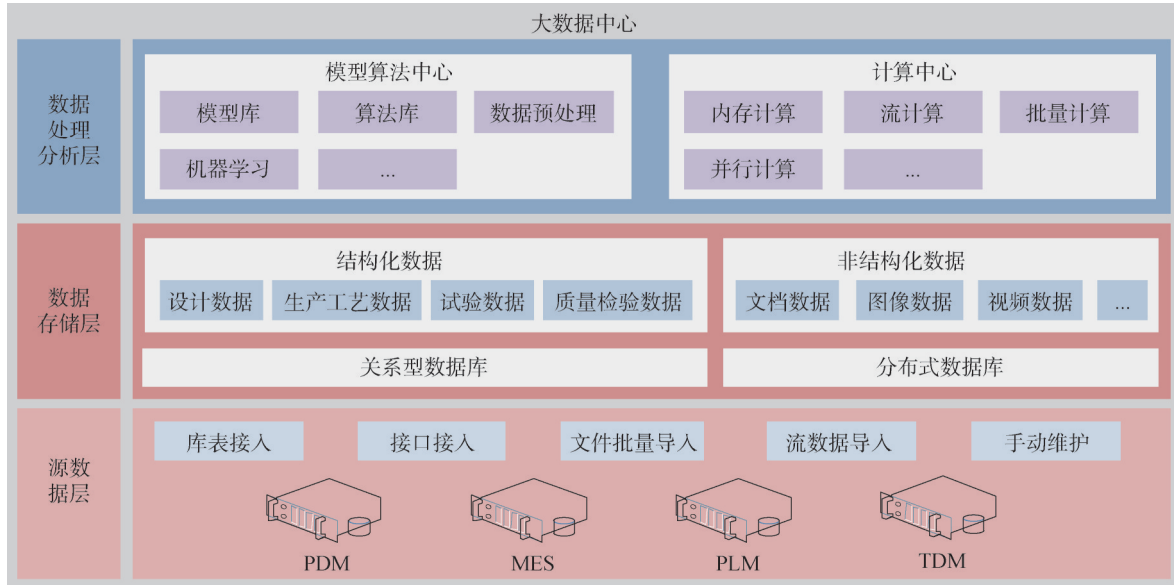


图5 大数据基础平台功能架构

Fig.5 Functional architecture of big data base platform

大数据分析平台采用“自研管理平台+开源大数据组件”模式建设，通过自研管理平台能够集成主流开源生态中的各类大数据组件，通过大数据组件可以对试验数据管理分析模块提供相应的大数据服务能力。

试验数据管理分析模块在大数据分析平台上开发，旨在为用户提供定制化的试验数据管理与分析应用。模块采用微服务开发框架构建，具备出色的灵活性和可扩展性，可以随着业务和管理需求的变化，不断开发新的功能应用以满足实际需求，并与业务发展保持同步。目前模块已成功实现了一系列业务分析应用功能，包括试验数据规范管理及集中存储、发动机调整计算等。

## 5 系统应用

### 5.1 试验数据规范管理与集中存储

系统对液体动力试验数据的分类、组织、格式和标识进行了规范化管理，将液体动力试验分为5大类（高空试验、地面点火试验、液流试验等），并通过试验任务信息（领域、代号、图号等）构建了导航树用于检索数据。针对每类试验提供了固定的目录结构（数据集、录像、照片等）进行组织；针对符合规范的试验结果数据进行了结构化解析，数据直接保存到大数据分析平台中；按照规范对试验数据中的测点名标记等信息进行校验，保证了数据的一致性。

同时系统打通了与地面点火、液流等试验数据采

集系统的数据对接，能自动接收各试验单位试后回传的数据，减少了之前人工传递数据的人力和时间，为接下来的各类数据分析和综合应用奠定基础。

试验结果数据以文本为主，具有列数少、行数多的特点，高频采样的数据容量往往在1 GB以上，大数据分析平台突破了海量数据处理的难题，以1 GB大小的文本数据为例，从导入、结构化解析到入库总时间不超过5分钟，比传统技术节省时间超过80%。

### 5.2 发动机调整计算

液体火箭发动机调整计算是指在设计过程中，根据试验结果和设计目标的差异，通过数学建模方法，对各个部件的关键参数进行计算和优化，从而得到各种工况下的组件调整结果，目标是确保发动机能在各种工况下达到最佳性能。

调整计算模型为包含上百个变量的非线性方程组，采用具有较快收敛速度和较好数值稳定性的牛顿下山法求解，通过反复迭代使方程解逐渐逼近真实解。以往调整计算的痛点在于设计人员每次需要从大量的数据文档和资料中查找并换算，才能得到上述变量的数值，然后代入求解，通常耗时4小时左右才能完成。

使用试验数据分析系统后，设计人员第一步先在“工艺试车工况”中确认各种工况参数；第二步点击“试验数据获取”按钮，系统根据组件生产序号自动在大数据分析平台中检索生产数据中的相关配套信息，然后读入各个组件的相关结构化试验数据和非结

构化试验报告，从中提取试验参数及性能指标到页面上供设计人员确认；第三步点击“确定”按钮，系统将各项数据代入到调整计算模型中求解，最后生成调整计算报告、阀门角度锁紧要求等文档。其操作过程

及输出结果如图6所示。系统节省了人工查找及换算时间，提高了计算准确性，通过三步操作2分钟内即可完成调整计算工作，实现分析效率与质量的大幅提升。



图6 调整计算功能页面

Fig.6 Adjustment calculation function page

## 6 结束语

本文探讨了利用大数据分析技术构建高效液体动力试验数据分析系统的可行性，然后详细描述了试验数据收集、存储、管理及分析应用等系统功能实现方法，通过实例分析展示了系统在试验数据规范管理和发动机调整计算的效果和优势，证明能够有效提高数据处理效率和分析质量，为液体动力领域的数字化转型提供了有益的探索和实践。

按照当前IT技术的发展趋势，系统将进一步探索与数字孪生、仿真试验等方向的交叉融合，走出液体动力试验特有的数字化转型路线。

### 参 考 文 献

[1] 陈卓, 汪灏, 平佳伟, 等. 面向火箭数据分析和故障诊断的数据仓库设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(1): 51-56.  
CHEN Zhuo, WANG Hao, PING Jiawei, et al. Data warehouse

design for rocket data analysis and fault diagnosis[J]. Computer Measurement and Control, 2024, 32(1): 51-56.  
[2] 王晓君, 梁宇坤, 高玲玲. 新一代运载火箭数据处理子系统设计[J]. 导弹与航天运载技术(中英文), 2023(2): 122-125.  
WANG Xiaojun, LIANG Yukun, GAO Lingling. Design of the data processing subsystem for a new generation carrier rocket[J]. Missile and Space Vehicle, 2023(2): 122-125.  
[3] 陈镡迪, 欧阳李青, 马玉璘, 等. 基于SpringBoot的运载火箭信息交互指挥平台[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(3): 247-254.  
CHEN Kaidi, OUYANG Liqing, MA Yulin, et al. Carrier rocket information interaction command platform based on SpringBoot[J]. Computer Measurement and Control, 2023, 31(3): 247-254.  
[4] 宋征宇. 新一代运载火箭的数据驱动快速测试技术[J]. 宇航学报, 2015, 36(12): 1435-1443.  
SONG Zhengyu. Data-driven rapid testing technology for the new generation of carrier rockets[J]. Journal of Astronautics, 2015, 36(12): 1435-1443.

- [5] 赵振杰, 闫月晖, 秦绪国, 等. 基于大数据的航天试验数据管理系统建设与应用[J]. 智能制造, 2023(5): 73-76.  
ZHAO Zhenjie, YAN Yuehui, QIN Xuguo, et al. Construction and application of aerospace test data management system based on big data[J]. Intelligent Manufacturing, 2023(5): 73-76.
- [6] 郑小鹏, 张丽晔, 彭健, 等. 航天试验数据管理系统的设计与应用[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(12): 4154-4156.  
ZHENG Xiaopeng, ZHANG Liye, PENG Jian, et al. Design and application of aerospace test data management system[J]. Computer Measurement and Control, 2014, 22(12): 4154-4156.
- [7] 董西成. 大数据技术体系详解: 原理、架构与实践[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.  
DONG Xicheng. Detailed explanation of big data technology system: principles, architecture and practice[M]. Beijing: China Machine Press, 2018.
- [8] 董冬, 朱成亮, 胡瑛, 等. 试验数据管理平台设计研究[J]. 火箭推进, 2014, 40(4): 67-72.  
DONG Dong, ZHU Chengliang, HU Ying, et al. Design of test data management platform[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2014, 40(4): 67-72.
- [9] 何龙祥, 葛继成, 王轻, 等. 基于数据仓库的医疗数据可视化系统的设计与实现[J]. 软件, 2021(1): 104-106+123.  
HE Longxiang, GE Jicheng, WANG Qing, et al. Design and implementation of medical data visualization system based on data warehouse[J]. Software, 2021(1): 104-106+123.
- [10] 董冬, 乔江晖, 朱成亮, 等. 浅谈液体火箭发动机试验数据解析入库技术[J]. 火箭推进, 2015, 41(4): 105-108.  
DONG Dong, QIAO Jianghui, ZHU Chengliang, et al. Discussion of analytic technique for LRE test data storage[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2015, 41(4): 105-108.
- [11] 张英. ERP环境下基于数据仓库技术的产品质量管理[J]. 大众科技, 2012, 14(1): 78-79.  
ZHANG Ying. Product quality management based on data warehouse technology in ERP environment[J]. Popular Science and Technology, 2012, 14(1): 78-79.
- [12] 魏申. 民用航空器安全隐患分析系统设计与实现[D]. 北京: 北京工业大学, 2017.  
WEI Shen. Design and implementation of potential safety hazard analysis system for civil aircraft[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017.
- [13] 西安航天动力研究所. 一种试验数据管理方法[P]. 中国: CN202310767242.2, 2023-06-25.  
Xi'an Aerospace Propulsion Institute. A method of test data management[P]. China: CN202310767242.2, 2023-06-25.
- [14] 梁磊. 网格软件日志分析系统的设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.  
LIANG Lei. Design and implementation of grid software log analysis system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [15] 朱进云, 陈坚, 王德政. 大数据架构师指南[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.  
ZHU Jinyun, CHEN Jian, WANG Dezheng. Guide for big data architects[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016.

#### 作者简介

- 胡海峰 (1986—), 男, 研究员, 主要研究方向为液体火箭发动机系统仿真、MBSE设计。
- 邓博文 (1983—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为液体火箭发动机试验数据治理、分析应用。
- 李晨沛 (1992—), 女, 工程师, 主要研究方向为液体火箭发动机系统仿真。
- 周晨初 (1990—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为液体火箭发动机系统仿真、MBSE设计。