

基于标签的民机气动主题数据库 研究与应用

冯 姣, 杨福军, 唐 怡, 付 眸, 万春明

(中国空气动力研究与发展中心 计算空气动力研究所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 面对民机产业自主创新发展趋势和体系化、标准化、数字化发展的时代要求, 建立公开公认的高权威性的民机气动主题数据库; 根据数据属性和管理需求, 结合文件属性信息和特征信息, 特别是数据产生流程和车次表文件, 制定系统设计方案; 基于 B/S 架构, 采用 LayUI、JQuery、JAVA 等框架和技术语言完成系统开发, 实现数据的统一管理, 保障数据的完整性, 实现数据内容和用户需求的高度匹配, 提升数据应用流程; 民机气动主题数据库借鉴用户文件使用过程, 通过直观的信息表达和统一输出结构, 优化数据操作流程, 助推各类研究所累积的数据信息开放共享, 为我国先进民机产品设计开发提供良好支撑和保障服务。

关键词: 民机; 气动标模; 标签; 数据库

Research and Application on Label-based Aerodynamic Subject Database for Civil Aircraft

FENG Jiao, YANG Fujun, TANG Yi, FU Mou, WANG Chunming

(Institute of Computational Aerodynamics, China Aerodynamics Research and
Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: Faced with the trend of innovative development in the civil aircraft industry and the requirements of the times such as systematic, standardized and digital development, this paper establishes a publicly recognized and authoritative database on civil aerodynamics topic. According to the data attributes and management requirements, combined with file attribute information and characteristic information, especially the data generation process and runs corresponding to the wind tunnel experiment, the system design scheme is completed. Based on B/S architecture, LayUI, JQuery, JAVA and other frameworks and technical languages are used to complete the system development, realize the unified management of data, guarantee the integrity of data, match the data content with user needs, and improve the data application process. The civil aircraft aerodynamic subject database is applied in the user file process, the intuitive information expression and unified output structure are applied to optimize the data operation process, promote the open sharing of data information accumulated by various research institutes, and provide good supports and guarantee services for the design and development of China's advanced civil aircraft products.

Keywords: civil aircraft; aerodynamic standard model; tags; database

0 引言

大型商用飞机的研发是一个国家科技水平和综合国力的集中体现。随着国民经济建设和产业发展, 中国已经成为当今世界上增长最快、潜力最大的民航市场^[1]。面对庞大的民机市场和显示需求, 独立发展我国具有自主知识产权的先进民机迫在眉睫。在国家“十四五”发展规划中, 不仅明确了重点推动 C919 大型科技示范运行和 ARJ21 支线科技系列化发展, 也安排了双通道宽体客机的立项研制, 我国民机产业已经跨入了快速发展的新阶段^[2]。

大型商用飞机的研发, 要求在设计过程中采用成熟、先进的技术, 在预定的时间周期内完成飞机的设计、制造、

试飞和取证, 并投入市场^[3]。在这个气动设计与验证过程中, 风洞试验和计算流体力学 (CFD) 发挥着非常重要的作用, 而在开展风洞试验技术和 CFD 算法研究的过程中, 公开公认的气动验证模型所提供的参考外形和试验数据, 具有评估和验证相关研究成果的准确度和可信度的重要意义^[4]。

自 20 世纪以来, 国内外各大研究机构均进行了气动验证模型试验研究, 并公开发布了一些可共用的气动验证模型。目前, 国外公开标模包括 AGARD 系列标模^[4-5]、ONERA 标模^[4]、DLR 系列标模^[6-9]、NASA CRM 翼/身/平尾组合体标模等^[10-11]。但是, 由于世界航空强国对民机

收稿日期: 2023-12-15; 修回日期: 2024-01-09。

作者简介: 冯 姣(1994-), 女, 硕士, 助理研究员。

通讯简介: 杨福军(1969-), 男, 硕士, 正高级工程师。

引用格式: 冯 姣, 杨福军, 唐 怡, 等. 基于标签的民机气动主题数据库研究与应用[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(6): 269-275.

研制的严密技术封锁，数据开放程度非常有限，无法满足相关研究项目的全部需求^[12-13]。我国民机产业虽然经过 ARJ21 新支线飞机、C919 干线飞机等民机产品的研发，积累了一定的研究经验和研究基础，但尚未建立开放共享的气动主题数据库，严重制约了 CFD 方法校验、风洞试验技术研发、流程品质检查和试验质量控制的研究与发展。

为提高民机设计及评估能力，民机气动主题数据库面向民机气动设计评估技术及试验验证需求，建立数据库软件应用系统，在相关的气动验证模型的几何数模、气动特性及相关设计数据等集合的基础上，通过科学统筹和分层管理，实现气动数据文件的存储、管理和应用，为民机设计、试验、研究单位提供开放共享的数据平台，促进相关技术研究与发展。

1 系统结构及原理

1.1 系统业务架构

要建设成公开共享的、具有权威性的气动验证模型数据库，丰富的数据资源是必不可少的条件。民机气动主题数据库除了常规的基础标模数据外，还涉及不同研究方向下的特色数据。这些数据主要来源于气动标模在气动设计过程中所实施的不同研究领域下的数值计算和风洞试验，数据类型包括几何模型、理论数模、结果数据、修正数据以及数值计算与风洞试验的相关性分析数据等内容。

民机气动主题数据库以数据为导向^[14]，通过对不同研究项目的数据信息特征和关联关系的梳理，系统以研究类别、研究对象、研究项目建立导航对数据进行统一管理，项目下关联具体试验设备和气动文件，文件与文件对应的标签信息形成完整气动结构数据。其中，研究类别以研究内容和研究目标为导向对研究项目进行分类，主要以研究领域作为具体类目；研究对象从气动构型方面对研究项目进行分类，采用模型代号和构型类型的组合进行定义，并根据具体涉及的研究类别进行归纳关联；研究项目作为数据入库管理的最小单元，主要以研究内容作为具体类目，负责不同类型文件的数据分类管理。系统数据模型设计如图 1 所示。

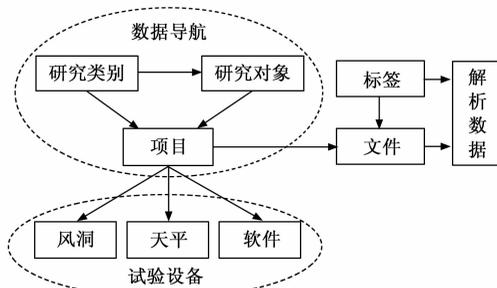


图 1 系统数据模型设计

基于上述数据模型设计，将系统划分为多个子库，各子库下分别存储不同的数据集。在各子库数据集的基础上，系统实现了各类数据标准化入库与管理，为用户提供数据

导航、数据检索、系统管理等应用功能。同时，系统提供数据集成接口，为外部标模数据库和各单位 OA 系统提供的数据交互接口，实现本数据库的开放共享。系统业务架构如图 2 所示。

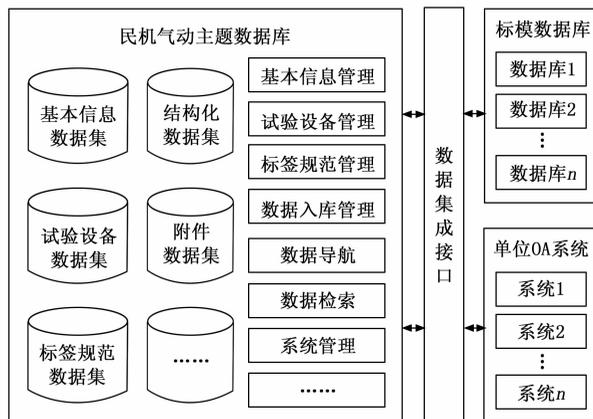


图 2 系统业务架构

各子库数据集涉及基本信息、试验设备信息、标签规范信息、结构化数据和附件。基本信息数据集包括数据导航信息及其关联的数据对象信息；试验设备数据集覆盖项目相关的各风洞信息、天平信息、计算软件信息等设备信息；标签规范数据集是数据描述的校验信息；结构化数据集是解析的数据集合；附件数据集是上传的所有文件的信息集合。

1.2 技术架构

民机气动主题数据库是基于 B/S 架构构建共享气动数据库^[15-16]。该架构将系统功能的核心集中到服务器上，用户只需通过浏览器向 Web 服务器发送请求，由 Web 服务器根据请求，自动分配模块连接数据库服务器查询对应数据进行业务处理，并将处理结果返回到客户端进行渲染展示。系统总体架构自上而下分为运行环境层、数据存储层、服务层和展示层。系统技术架构如图 3 所示。

1) 运行环境层：数据库运行基础环境要求。

2) 数据存储层：汇集系统运行过程中产生的各类数据信息，形成统一的数据管理中心。平台通过采用 MySQL 数据库、Redis 数据库以及文件数据库，对数据分别进行存储并保障试验数据的高效管理。

3) 服务层：负责展示层和数据存储层之间的业务处理，完成数据的交互贯通。接入模块负责与展示层之间的数据交互，包括身份验证、数据转换、HTTP 请求处理等业务。数据访问模块负责访问数据存储层，完成数据的读写操作。中间件负责提供基础性的功能组件，包括日志 (Logback)、工作流 (Activity)、任务调试 (Quartz)、Office 工具 (POT)、序列化 (Jackson)、缓存 (J2Cache) 等。

4) 展示层：基于浏览器渲染的 Web 界面，实现对数据的展示、应用及监控。主要涉及、HTML、CSS、JavaScript 技术，以及 LayUI、jQuery、Echarts 等前端主流框架

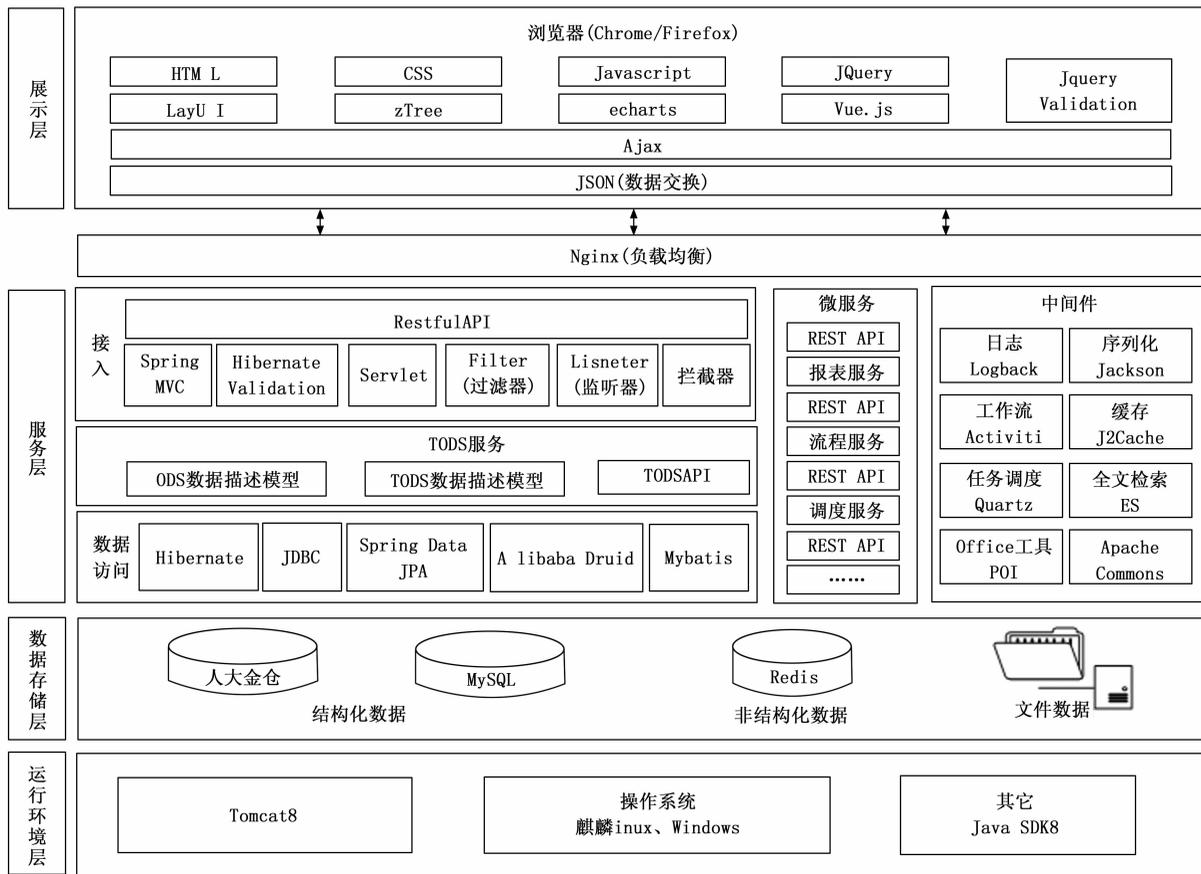


图 3 系统技术架构

及组件。

2 民机气动主题数据库设计

2.1 功能设计

考虑数据操作流程、数据安全和系统安全，经综合分析合理规划，建立数据导航、基本信息管理、数据检索、系统管理、信息咨询 5 个主功能模块。数据导航功能负责研究类别、研究对象、研究项目的数据管理服务，包括各类文件和数据的出入库功能；基本信息管理负责标模、试验设备、标签规范、数据信息项等维护系统运行的基础信息管理；数据检索功能针对项目和文件提供块数检索、属性组合检索、进一步检索等服务；系统管理负责实现系统安全监控、划分数据资源使用权限；信息咨询负责系统数据信息、版本信息、联合单位信息的维护。系统功能架构如图 4 所示。

2.2 数据标签体系设计

在研究项目节点下，数据主要以文件为载体进行管理与应用。此时大量的文件汇集，单靠简单的文件分类和文件名称，无法完全满足用户对数据准确识别和利用的需求。为了解决数据汇集在数据库中难以定位的问题，需要对文件信息进行更多的描述，形成文件标签用作数据资源组织、管理和应用的基础。

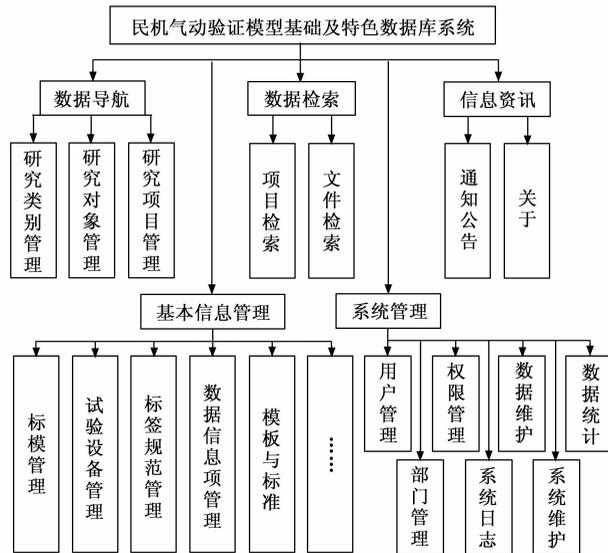


图 4 系统功能架构

文件标签来自文件特征信息，通过不同角度对文件资源进行关键词分类、信息描述、注释等操作，实现用户对文件分类组织、浏览、检索的业务需求^[17]。在标签获取的过程中，车次表作为试验结果文件的描述信息，因此试验

结果文件的标签文件以车次表为基础进行部分必要信息扩展，其他附件文件通过梳理、提炼文件特征建立标签文件。

2.2.1 标签元数据

附件标签和试验结果文件标签虽然有所不同，但因为两类标签的概念、关系和规则相同，因此对应的标签元数据相同，主要包括标签分类、标签名称、标签值、标签定义、标签符号、标签备选值。

1) 标签分类：根据业务需求细化拆分得到的标签类目，如试验属性、试验条件、模型状态。

2) 标签名称：标签的具体名称，如试验内容、试验类型、试验风洞、模型组成、飞机构型、吹气方式以及各种模型状态和试验条件信息。

3) 标签值：标签名称对应的具体信息。

4) 标签符号：标签名称包括一部分术语，用于记录标签对应符号表示。

5) 标签单位：统一标签对应单位。

6) 标签描述：标签类目说明，明确标签含义。

7) 标签备选值：可选择的标签值，为有限定取值范围或特定要求的标签提供指定的值。

2.2.2 附件标签

附件标签主要来源于文件属性信息和特征信息。属性信息是由数据维度映射的可量化的独立标签，用于描述业务对象的基本属性^[18]。属性信息一般来自文件自身信息，如对于参考文献，属性信息包括作者、关键字、文件来源等信息。特征信息是与部分属性标签对应的规则类标签，如根据流动参数变化，文件时域属性可分为定常、非定常。

民机气动主题数据库存储文件覆盖多种试验类型，不同试验类型产生的文件各有不同，所需建立的标签体系也将根据相应业务需求进行动态扩展，以支持民机气动设计评估技术及试验验证的数据使用需求。随着标签体系的不断扩充，标签数据量也将不断增长，将散乱的标签根据不同层级和分类建立管理规则，形成体系化管理，能够为文件浏览、检索提供更加清晰的业务逻辑，更好地实现数据服务结果和用户需求的高度匹配。以数值计算试验为例，标签体系可按照文件类型进行细化分类，可分为网格文件、几何文件、计算结果等，如表 1 所示。

表 1 附件文件标签类目示例

文件类型	示例标签类目
网格文件	网格类型、网格块数、网格节点数、网格单元数
几何文件	模型几何缩比、参考展长、参考弦长、参考面积
计算结果	马赫数、总压、总温、雷诺数、攻角
参考文献	作者、文件类型、关键字

2.2.3 试验结果文件标签

试验结果文件作为气动主题数据库存储管理的重要数据，由气动模型在不同试验状态和模型状态下经过多次试验产生，并以文件的形式进行保存。为了便于对这些文件进行识别，通常利用产生文件的试验条件和模型状态对其

进行记录存储。记录主要依赖车次表将试验条件信息与试验结果文件关联，形成试验结果文件清单。用户查阅车次表，便可了解试验规划，根据试验条件定位目标文件。车次表通常在左侧记录试验约束信息，右侧以组合序号记录文件对应的车次。车次信息上方为该车试验对应的分组信息，如马赫数。借由上方和左侧的试验信息形成二维网格，交叉定位每一车试验对应的车次，如图 5 所示。

		示例项目									
序号	试验项目	模型组成	升降舵偏角	滚转舵偏角	方向舵偏角	雷诺数	迎角	侧滑角	马赫数		
									0.5	0.6	0.7
1	部件拆组	WB	0	0	0	5×10 ⁶	0	0	20214215	-	20214220
		WH				5×10 ⁶	-4~12	0	20214216	-	20214219
		WBN				5×10 ⁶	-4~12	-5~12	20214217	-	20214235

试验条件信息

车次

图 5 车次表文件示例

车次表中的车次与文件名关联，往往在确定某一试验的某一车次后，即可以根据该车次对应的试验结果文件。因此，民机气动主题数据库在车次表的基础上，对产生试验结果文件的信息进行扩展和分类，形成试验结果文件标签。扩展信息根据具体业务需求进行扩展，比如飞机构型、转捩形式、支撑形式等标签。扩展标签要求相互独立，但彼此之间并不孤立。系统根据标签描述文件信息的类型对散乱的标签进行分类，以便于在管理标签的同时，能够更有针对性地指定标签文件并为业务需求服务。如表 2 所示，试验结果文件标签分类包括试验属性、模型状态、试验条件等类目，试验属性标签分类下包括试验内容、试验类型、试验风洞等标签；模型状态标签分类下包括模型组成、升降舵偏角、副翼偏角、扰流片偏角、方向舵偏角等标签；试验条件标签分类下包括雷诺数、攻角、侧滑角、马赫数等标签。

表 2 试验结果文件标签类目示例

文件类型	示例标签类目
试验属性	试验内容、试验类型、试验风洞
模型状态	模型组成、升降舵偏角、副翼偏角、扰流片偏角、方向舵偏角
试验条件	雷诺数、攻角、侧滑角、马赫数
文件类型	示例标签类目

2.3 数据应用流程

民机气动主题数据库以气动数据文件为核心，通过对研究类别、研究对象、研究项目、试验设备、标签体系、数据文件、文件标签等数据的管理和维护，为用户提供数据导航、数据检索、系统基本信息以及信息资讯业务功能，如图 6 所示。

其中，标签体系是对文件标签的描述，包括标签分组信息和标签信息，为标签录入提供校验解析入库的依据。数据导航功能根据数据统一管理的关系建立导航菜单，

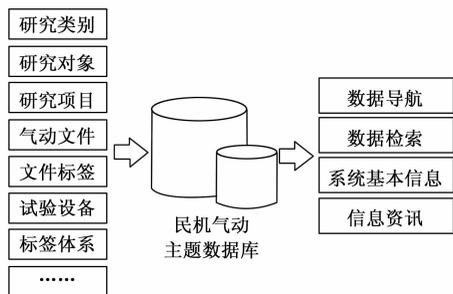


图 6 系统主要应用流程示意

为用户行为进行操作引导。数据检索功能以标签体系作为检索依据, 为用户提供数据文件定位。系统基本信息提供各种试验设备信息、标签体系各类标签信息等项目关联数据对象查看。信息资讯主要提供数据和系统的更新信息。

数据导航是整个系统最重要的数据应用功能模块, 负责对外提供关于存储数据文件的浏览应用。该模块按层级关系以研究类别、研究对象、研究项目建立导航菜单, 并在研究项目下按不同数据来源提供不同类型的文件展示模块。以风洞试验类型项目为例, 研究项目下文件分类展示功能包括试验模型、安装信息、车次表、试验结果、照片/视频、文献/报告; 车次表分类下实现了标签展示、数据对比和数据查看功能, 如图 7 所示。标签展示借鉴车次表的数据组织方式进行信息展示, 并在车次信息区域, 利用表格单元格的选中操作, 支持用户通过选中或取消单元格, 指定操作数据集, 为数据查看、数据对比功能提供灵活的数据源。

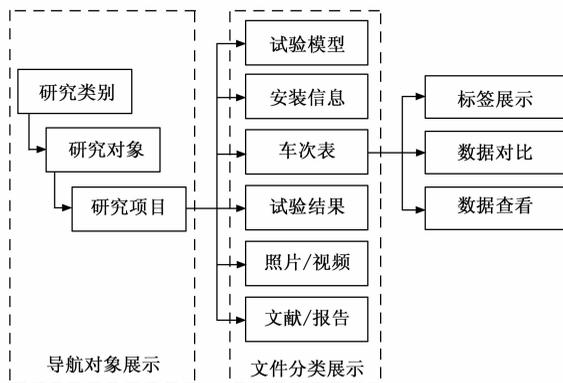


图 7 风洞试验类型下数据导航功能示例

2.4 数据库设计

在数据库设计中, 民机气动主题数据库核心数据表结构以研究项目表为中心存储, 主要实体关系涉及结构化和非结构化数据, 如图 8 所示。项目相关的所有数据文件以非结构化数据的形式上传到文件库中后, 对应的文件信息存储在附件表中。标签文件的解析结果根据文件类型分别存储在附件标签表和试验结果文件标签动态表中, 试验结果文件解析结果存储在试验结果数据动态表。动态表存储

字段由具体内容决定, 一个研究项目对应一个试验结果文件标签动态表和试验结果数据动态表, 在动态表单记录表中记录项目与动态表的关系。

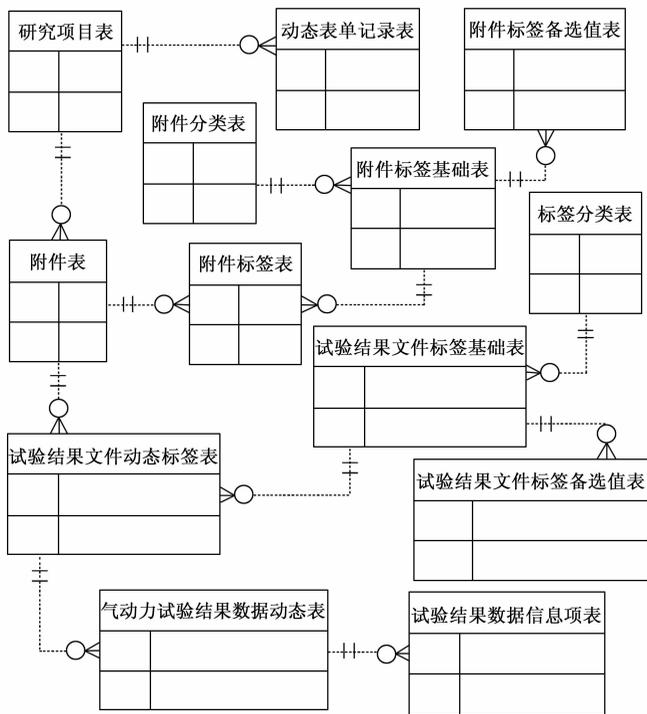


图 8 民机气动主题数据库主要实体关系

随着系统的使用, 标签也将不断增长, 标签管理和维护成为必不可少的工作。附件标签基础表、试验结果文件标签基础表以及试验结果数据信息项表中, 主要存储对应文件可入库的所有字段的中文名称和多种符号, 用于映射和校验入库的字段名称和符号, 解决如马赫数符号化表达有 M、Ma、Mach 这样描述多样化问题。附件标签备选值表和试验结果文件标签备选值表主要存储可枚举的标签信息, 解决生成标签文件时因个体对信息的主观理解和认知不同所产生的歧义和冗余, 实现入库数据标准化、规范化要求。

2.5 关键功能设计

2.5.1 文件入库流程

数据导航功能中, 文件分类展示以文件入库为基础, 标签展示以文件标签解析数据为基础, 数据对比和数据查看功能以解析获得的气动数据为基础。要实现上述功能, 民机气动主题数据库提供合理的入库流程, 将原始文件集进行统一分类标识存储, 对标签文件和结果文件进行解析读取, 并进行必要的标准化处理, 统一参数表示。

系统提供文件入库工具, 将原始文件集中存储在文件服务器中。文件入库过程中需根据系统预置的文件分类、版本、权限信息, 设置文件类型、版本状态、可见范围, 建立文件与文件信息的关联关系, 包括文件名称、类型、版本、权限、地址等, 如图 9 所示。

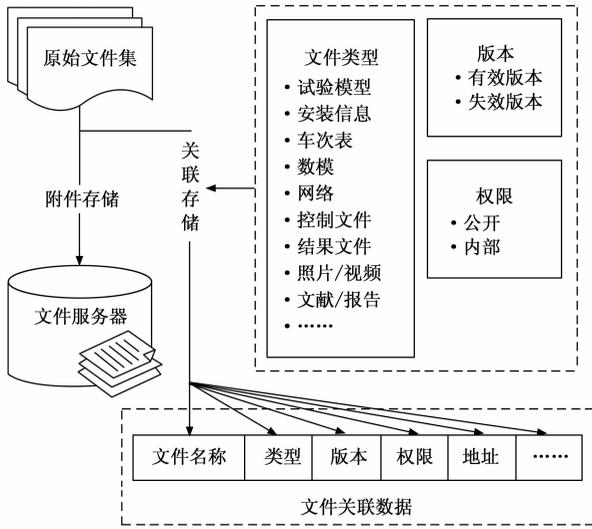


图 9 数据文件流程示意

2.5.2 标签数据解析流程

标签文件的来源主要是研究人员对于某一文件的描述，受到个人理解和认知不同的影响。因为这种语义的模糊性和描述的多样性，不同标签文件所含的信息难免存在歧义和冗余。系统根据标签体系和具体数据情况，建立标签基础库，包括标签名称和标签备选值。标签名称约束可以入库的标签项，备选值约束能够枚举的标签对应标签值，标签基础库覆盖所有可能标签项和枚举值，入库标签名称和能够枚举的标签的对应值必须包含在其中，否则需要预先增加或修改成对应信息。标签文件通过解析读入后，依次校验标签信息在标签基础库中的入库情况，符合标签基础库要求的数据才允许入库，如图 10 所示。

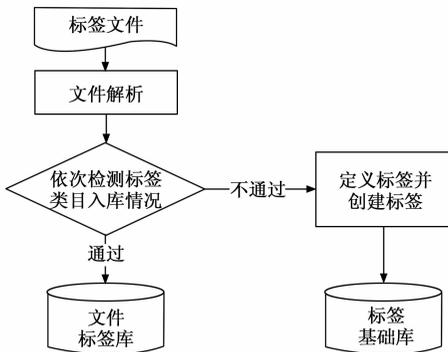


图 10 文件标签解析入库流程示意

2.5.3 试验结果解析流程

对于结果文件，由于气动试验结果数据具有数据量大、来源广泛、高维且复杂的特征，文件组织情况复杂多样。部分文件包括试验条件参数、变量名和结果数据，部分文件可能仅包含结果数据，需要补齐试验条件参数，指定变量名，以保障数据的完整性与数据可读性。由于实际的操作过程中并不能完全确定试验结果文件的具体组织格式，系统针对结果数据建立数据项基础库，建立映射关系，统

一输出表达方式，结果文件解析入库流程如图 11 所示。结果文件经过数据解析后，校验本次解析结果的所有数据对应符号是否在数据项基础库中，是则进行数据入库，否则输出错误提示，提示用户在数据入库前，提前在数据项基础库中建立对应信息。

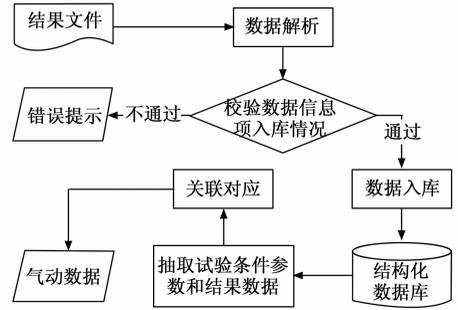


图 11 结果文件解析入库流程示意

车次与试验结果之间往往是一一对应的关系，标签与车次一一对应，通过车次，可以匹配车次和试验结果之间的关联关系。系统在标签中抽取试验条件参数和结果数据后，通过关联对应关系，可得到完整有效的气动力数据集。

3 系统实现与应用

为了更加贴近系统的实际需求和应用场景，采用原型化开发模式，通过主要的系统管理员和目标用户对原型系统的评价，进一步明确需求，推动系统的快速开发。目前数据库已上线投入使用，收录数据覆盖气动力、测压、射流、PIV、结冰等多种试验类型数据，实现数据的有效管理与应用，为民机研究领域提供统一、全面的数据支持。

系统提供数据管理、数据导航、数据检索、信息资讯、系统管理以及外部数据集成等功能，如图 12 所示。数据管理功能向数据管理员开放，提供基本信息管理、试验设备管理、标签管理和数据录入等功能，以项目为核心对数据

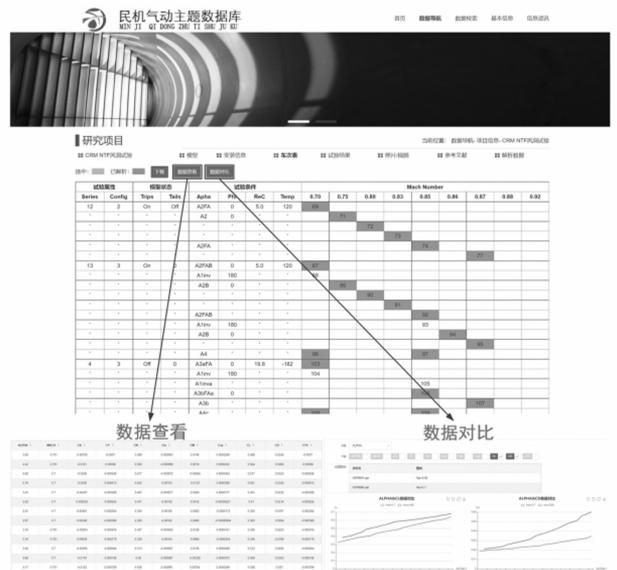


图 12 NASA CAR 标模风洞试验演示项目

信息进行整理录入。数据导航、数据检索、信息资讯等功能向普通用户开放, 提供不同维度、不同类型的数据服务。系统管理功能向系统管理员开放, 包括人员权限设置、数据备份等功能, 保证系统数据文件的安全访问和应用。外部数据集成负责向其他外部系统提供统一的数据接口, 实现系统的公开共享。

4 结束语

民机气动主题数据库面向民机气动设计评估技术及试验验证需求, 通过分析数据管理需求, 建立数据管理模型, 分析系统标签体系, 并在标准化、规范化标签基础上, 通过对标签数据的直观表达和操作, 优化数据操作流程, 统一输出数据信息, 实现气动数据的可靠管理和高效应用。

随着气动验证模型体系建设的日益完善, 数据应用系统将不断深化完善, 除了高质量数据增长外, 数据功能服务上还需进一步提升, 增加项目间关联关系描述, 丰富数据分析方式, 提升数据共享能力, 为我国民机产品设计技术验证、CFD 方法校验、风洞试验技术研发、流场品质检查、试验质量控制提供更高效可靠的基准数据支撑平台。

参考文献:

[1] 本刊综合. 国产大飞机铸梦起航 [J]. 发明与创新: 大科技, 2015 (12): 6.

[2] 陈迎春, 郭传亮, 李晓勇. 大型商用飞机风洞试验需求及技术展望 [J]. 气动研究与试验, 2023, 1 (4): 25-30.

[3] 刘红阳, 周 铸, 余永刚, 等. 宽体客机气动标模 CHN-T2 设计 [J]. 空气动力学学报, 2023, 41 (10): 15-29.

[4] 战培国, 罗月培. 飞行器风洞试验标模体系研究初探 [J]. 标准科学, 2011 (11): 28-31.

[5] GAO C Q, LIU X, ZHANG W. Mechanism on the dispersion of the flutter boundary of the AGARD 445. 6 wing huanqiang [C] // Abstracts of the 8th International Conference on Vibration Engineering (ICVE 2021). Northwestern Polytechnical University, 2021: 1.

[6] REDEKER G, MÜLLER R. A comparison of experimental results for the transonic flow around the DFVLR-F4 wing body configuration [Z]. GARTEUR/TE-018, DFVLR-IB 129-83/71, 1983.

[7] GAO Y, XIE P, HUA W, et al. Improve the performance of LSM-Tree based key-value via multiple immutable memtables [C] // USA: IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science. IEEE, 2021, 223-227

[8] ZHANG H, LIM H, LEIS V, et al. Surf: practical range query filtering with fast succinct tries [C] // Proceedings of the 2018 International Conference on Management of Data, 2018: 32.

[9] WU X, XU Y, SHAO Z, et al. LSM-trie: an LSM-Tree-based ultra-large key-value store for small data [C] // USA: USENIX Conference on Usenix Annual Technical Conference,

[7] LAVY D W, VASSBERG J C, WAHLS R A, et al. Summary of data from the first AIAA CFD drag prediction workshop [C/OL] // 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, AIAA-2002-0841, 2002. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20030007848/downloads/20030007848.pdf>.

[8] ROSSOW C C, GODARD J L, HOHEISEL H, et al. Investigations of propulsion integration interference effects on a transport aircraft configuration [J]. Journal of Aircraft, 1994, 31 (5): 1022-1030.

[9] LAFLIN K, BRODERSEN O, RAKOWITZ M, et al. Summary of data from the second AIAA CFD drag prediction workshop (invited) [C] // 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada. Reston, Virginia: AIAA, 2004.

[10] ASSBERG J, DEHAAN M, RIVERS M, et al. Development of a common research model for applied CFD validation studies [C] // 26th AIAA Applied Aerodynamics Conference, Honolulu, Hawaii. Reston, Virginia: AIAA, AIAA, 2008.

[11] VASSBERG J C, TINOCO E N, MANI M R, et al. Summary of the fourth AIAA computational fluid dynamics drag prediction workshop [J]. Journal of Aircraft, 2014, 51 (4): 1070-1089.

[12] 钟 敏, 华 俊, 孙侠生, 等. 空气动力学验证模型与 CFD-风洞数据相关性 [J]. 航空科学技术, 2020, 31 (1): 1-16.

[13] 华 俊, 钟 敏, 郑 遂. CAE-AVM 标模巡航构型的设计和数据库应用 [J]. 空气动力学学报, 2022, 40 (4): 133-147.

[14] 卫军朝, 张春芳. 国内外科学数据管理平台比较研究 [J]. 图书情报知识, 2017 (5): 97-107.

[15] 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.

[16] 徐鹏宇, 刘华锋, 刘 冰, 等. 标签推荐方法研究综述 [J]. 软件学报, 2022, 33 (4): 1244-1266.

[17] 唐 怡, 杨福军, 付 晔, 等. CFD 验证与确认数据库平台数据结构设计与应用 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (2): 173-177.

[18] 刘辰昀, 刘 佼, 储昭武. 上海市公共数据标签管理体系研究及应用 [J]. 中国标准化, 2022 (7): 106-112.

[18] CAO Z, DONG S, VEMURI, et al. Characterizing, modeling, and benchmarking RocksDB key-value workloads at Facebook [C] // USA: USENIX Conference on File and Storage Technologies (FAST' 20), 2020: 209-222.

[19] MATSUNOBU Y, DONG S, LEE H, et al. MyRocks: LSM-Tree database storage engine serving facebook's social graph [J]. Proceedings of the VLDB Endowment, 2020, 13 (12): 3217-3230.

[20] CHAN H, LI Y, LEE P P C, et al. Hashkv: Enabling efficient updates in {KV} storage via hashing [C] // USENIX Annual Technical Conference. USA, 2018: 1007-1019.

（上接第 268 页）