

大型风洞全链路数据库管理系统研制

王博文^{1,2}, 方亮¹, 马世鹏¹, 高鹏¹

(1. 中国空气动力研究与发展中心 高速所, 四川 绵阳 621000;

2. 华中科技大学 机械科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要: 伴随着信息化、数字化、智能化技术的深入应用, 数据对于风洞等大型工业装备的提质增效作用日益凸显; 针对传统风洞数据管理模式数据同步机制缺失、数据存储分散、实时性不足以及管理功能匮乏等不足, 研制一套大型风洞全链路数据库管理系统, 以此作为该风洞各类数据应用系统的数据中台; 根据系统总体架构设计, 完成了系统硬件设备及网络部署, 形成了基于数据中心机房和风洞现场机房的数据分布式采集、集中式存储的新型架构; 开发的数据采集中间件、数据库集群、数据服务系统、系统管理和安全管理等软件实现了对大型风洞全链路数据的高效采集、存储和管理, 形成了适应技术发展的风洞数据采集管新模式, 为各类数据应用系统提供了有力的数据保障和支撑。

关键词: 风洞; 数字化; 智能化; 数据中台; 集中存储; 实时性

Research on Full-Link Database Management System for Large Wind Tunnels

WANG Bowen^{1,2}, FANG Liang¹, MA Shipeng¹, GAO Peng¹

(1. High Speed Institute China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China;

2. School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: With the in-depth application of information, digital and intelligent technologies, it is of great significance for data to improve the quality and efficiency of large industrial equipment such as wind tunnels. In view of the deficiencies of traditional wind tunnel data management models such as the lack of data synchronization mechanism, dispersed data storage, insufficient real-time performance, and lack of management functions, a large-scale wind tunnel full-link database management system is developed as a data platform for various data application systems in the wind tunnel. According to the overall system architecture design, the system hardware equipment and network deployment are completed, realizing a new architecture based on the data distributed collection and centralized storage in the data center room and wind tunnel field room. The developed data acquisition middleware, database cluster, data service system, system management and security management software realize the efficient acquisition, storage and management of large-scale wind tunnel full-link data, achieving a new mode of wind tunnel data acquisition, storage and management that adapts to technological development, providing powerful data protection and support for various data application systems.

Keywords: wind tunnel; digitization; intelligence; data center; centralized storage; real-time performance

0 引言

风洞作为一种大型工业设备, 其试验准备、运行和日常维护过程中都将产生海量的数据^[1]。在信息化、数字化和智能化迅猛发展的时代背景下, 实现各类数据的全量覆盖、实时更新以及可靠存储, 已成为推动这些方

向发展的关键所在, 其重要性不言而喻^[2-5]。风洞运行通常由多个系统在总控系统的联合统一调度下协调运行^[6-7], 目前的风洞数据的采集和存储多由各个系统独立完成, 数据分布存储在各系统中。这样的数据管理模式虽然具有建设成本低、系统结构简单的优点, 但随着风洞系统复杂程度的提高, 所面临的问题也日益增

收稿日期: 2024-04-16; 修回日期: 2024-05-27。

作者简介: 王博文(1990-), 男, 硕士研究生, 工程师。

引用格式: 王博文, 方亮, 马世鹏, 等. 大型风洞全链路数据库管理系统研制[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(6): 176-184.

多^[8], 主要表现在以下几个方面: 1) 由于各系统独立采集, 缺乏数据时间同步机制, 导致无法在风洞层面对各系统数据关联性进行统一分析; 2) 由于分布式存储, 导致风洞数据应用系统在获取数据时只能从各系统中依次导入所需数据, 数据与应用系统的深度耦合不仅增加了数据接口开发的复杂性, 也会增大后期数据维护的难度^[9-10]; 3) 原有存储系统多采用关系型数据库进行数据存储, 无法满足数据应用系统对数据不断提高的实时性要求; 四是缺乏对实时和历史数据的查看和分析等管理功能, 大量宝贵数据无法得到有效便捷的统计分析。

近年来, 工业实时数据分布式采集、实时数据库及数据可视化管理等技术受到了广泛研究与应用。文献 [11] 设计了一种基于工业数据采集消息队列 (IdcMQ) 架构的分布式工业消息中间件数据采集模型, 用于解决高价值设备数据以及大规模集群设备数据的高可用问题。文献 [12] 通过自主开发一种分布式消息中间件, 构建了一种大规模分布式数据采集和传输系统, 不仅解决了数据的高效、高可靠采集, 也降低了系统建设成本。文献 [13] 提出一种融合 Modbus、Fins 和 IEC104 等多种通用协议的数据采集系统, 实现数据的标准化处理, 提高了数据采集系统的扩展性、实时性和可维护性。文献 [14] 提出一种将关系型数据库和实时数据库中数据表内数据互相导入导出的方法, 实现了不同数据库产品的技术融合。文献 [15] 研发了一种基于 InfluxDB 时序数据库的通用运维管理平台, 提高了数据存储利用率和数据查询管理性能, 提供了针对被监控对象状态信息的可视化展示。

某大型风洞由于系统复杂导致系统运行时数据种类繁多、同时各类数据应用系统所需数据实时性要求高, 因此需开发一套大型风洞全链路数据库管理系统, 实现某风洞设备全域数据在采集、存储、处理、治理、管理与维护各阶段全链路的集中统一, 承担该风洞各类数据应用系统的数据中台功能, 作为各类应用系统的共用数据中心。本文首先对大型风洞全链路数据库管理系统的总计架构进行设计, 随后对系统基于分布式采集、集中存储的硬件及网络架构进行了搭建, 重点对包括基于 InfluxDB 时序数据库的数据采存中间件、数据库集群、数据服务系统、系统管理软件和安全管理系统在内的系统软件架构进行了描述, 通过对系统功能展示和性能测试, 验证了全链路数据库管理系统的全部功能, 形成了风洞数据采集、存储和管理的新模式。

1 系统总体架构

数据库管理系统整体功能架构可分为环境支

撑层、公共支撑层、系统层和应用层^[16], 系统总体架构如图 1 所示。

其中环境支撑层主要负责保障系统稳定运行, 提供基础资源、安全保障、标准化支撑和技术支持, 建立标准规范体系, 为整个系统的稳定运行和功能实现提供基础支撑和保障, 具体包括操作系统、数据库和其他常用软件。公共支撑层主要负责提供共享服务、用于降低系统耦合度、提高系统可扩展性、统一管理和监控等, 具体包括前后端框架类型及版本。系统层通过集成各个子系统和组件, 实现各种功能模块和逻辑流程, 具体包括采存中间件、数据库集群、系统管理软件、安全管理系统及数据服务系统几个功能模块。应用层作为用户直接交互的部分, 负责实现业务逻辑、处理用户请求和展示数据, 具体包括系统查看、消息提醒和报警处置等功能模块。

2 系统硬件及网络架构

为实现大型风洞全链路数据库管理系统, 在充分融合风洞其他各系统已建立的各类硬件和数据网络的基础上, 需设计能够连接所有风洞系统且性能稳定、连接可靠的系统硬件设备架构和网络通讯链路。

2.1 系统硬件架构

全链路数据库管理系统硬件架构共包含两大部分: 第一部分设备部署于集中建设的数据中心机房, 第二部分部署在风洞现场机房, 两部分之间通过 12 芯光纤进

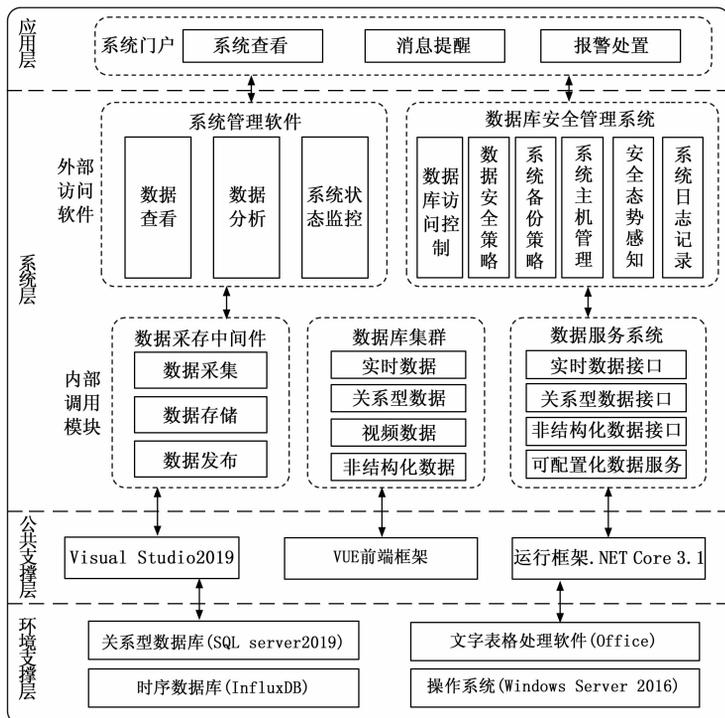


图 1 数据库管理系统总体架构图

行连接，可达到万兆网络的传输速率。系统硬件架构如图 2 所示。

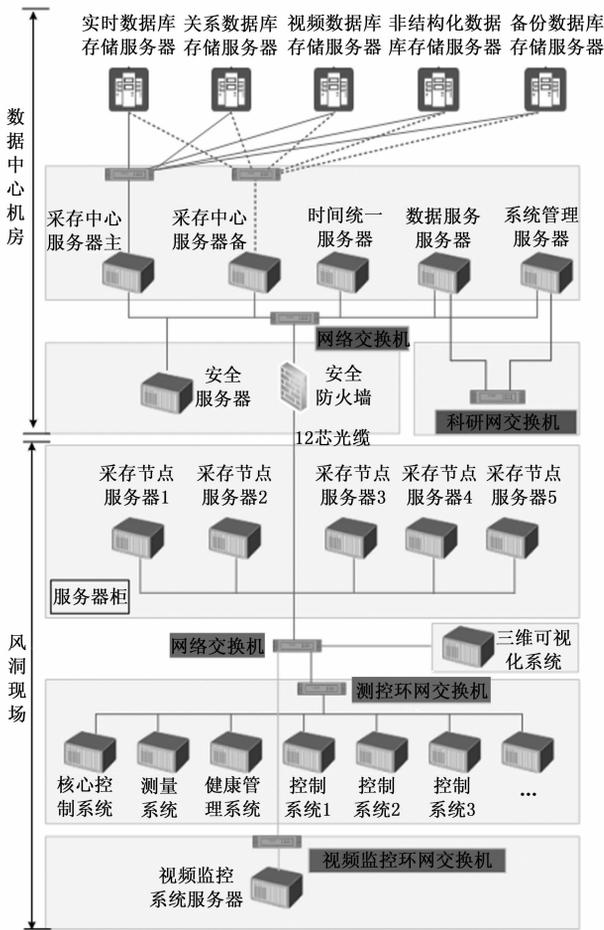


图 2 系统硬件拓扑图

数据中心机房硬件设备主要实现对风洞全量数据的存储和管理，后期具备对其他风洞数据的集中汇聚功能，部署的设备主要包括采存中间件中心服务器、系统管理软件服务器、数据服务器、安全管理服务器、时间统一服务器、防火墙、存储磁盘阵列、交换机等；现场机房硬件设备主要实现对风洞各类数据的采集和转发，部署的设备主要包括采存中间件节点服务器、交换机等，由于系统采用多台节点服务器对风洞不同系统数据进行采集，因此当系统数据采集规模增加时，仅需增加相应服务器即可完成相关数据的采集，具有很高的可扩展性。

由于在数据中心机房为数据库管理系统配置了一台时间统一服务器，以此作为整个风洞数据采集和存储的时间基准，确保各系统数据的时间同步性，为实现跨系统数据综合分析提供了可能。

2.2 系统网络架构

本单位已建成基于企业级知识平台（EKP, enter-

prise knowledge platform) 框架的科研网络信息化平台，可通过数据接口为各类信息化系统提供人员基础信息、业务流程处理等基础网络服务^[7]，同时风洞各系统为实现各自功能已建立了相应的数据传输网络。数据库管理系统作为某大型风洞全量数据的汇聚中心，需充分融合和打通现有各类数据网络，利用 EKP 平台基础服务，实现对风洞数据的有效采集、存储和管理，设计系统网络架构如图 3 所示。

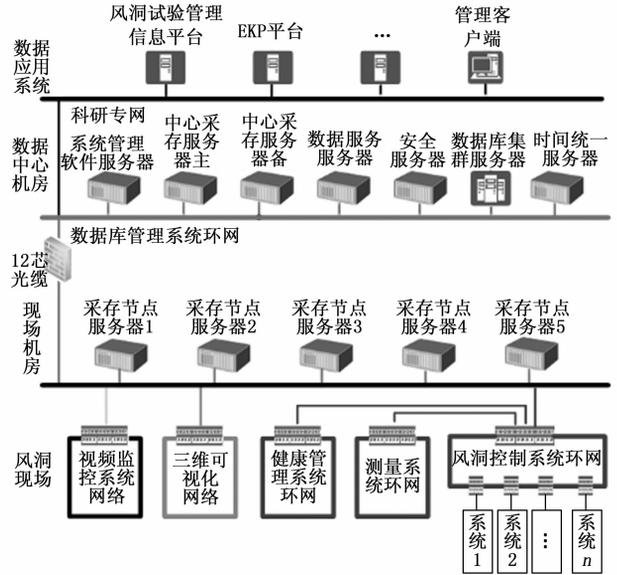


图 3 系统网络架构拓扑图

数据库管理系统需搭建和利用的网络主要包括：

- 1) 数据库管理系统环网：作为数据库管理系统内部主干环网，用来连接本系统部署的所有硬件设备，实现系统内任务下达、逻辑执行、状态反馈、系统管理、数据服务等功能。其中风洞现场机房 5 台采存节点服务器到中心机房两台采存中心服务器，网络传输速率为万兆带宽；中心机房系统管理软件服务器、数据服务服务器、安全管理服务器通过千兆电口接入网络。
- 2) 科研专网：数据库管理系统作为本单位信息化系统建设和数据管理的重要组成部分，需打通系统与单位已建设的科研专网之间的网络连接。通过将系统管理软件服务器、数据服务服务器、采存中间件中心服务器三台服务器接入科研专网，用以实现系统管理软件集成到 EKP 单点登录和科研网调用实时数据接口等功能。
- 3) 风洞控制系统环网：通过将风洞现场机房交换机连接风洞控制系统环网交换机，实现对各类控制系统数据采集功能。
- 4) 测量系统环网：通过将风洞现场机房交换机连接测量系统环网交换机，实现对测量系统数据采集功能。

5) 健康管理系统环网: 通过将风洞现场机房交换机连接健康管理系统环网交换机, 实现对健康管理系统数据采集功能。

6) 视频监控系統网络: 通过将风洞现场机房交换机连接视频监控系統交换机, 用以实现视频监控文件截取回传功能和实时数据获取功能。

7) 三维可视化网络: 三维可视化系統作为风洞众多数据应用系統之一, 主要用于对风洞各类运行状态进行实时显示, 通过中心机房交换机连接三维可视化系統交换机, 用以完成数据从数据库管理系统到三维可视化系統的传递, 从而实现实时数据订阅和历史数据回放等功能。

3 系統软件架构及功能展示

系統软件设计为分布式多线程采集架构, 支持风洞分布式节点部署和大批量实时数据采集, 实现风洞全量数据从分布式采集、集中存储到实时发布的全数据链管理。具体由数据采存中间件、数据库集群、数据服务系統、系統管理软件和安全管理软件组成。

3.1 数据采存中间件

数据采存中间件主要实现对风洞实时数据的采集、存储和发布全流程管理。为保证数据获取、存储的可靠性, 实时数据采存中间件采用“5+2”分布式架构, 分布式采存架构如图2所示。其中风洞现场部署5套节点采存软件, 配置不同数据源; 中心机房部署两套中心采存软件, 双节点采存软件采集的数据将同时写入实时数据库的存储服务器。节点采存软件和中心采存软件均基于InfluxDB实时数据库进行定制化开发。

3.1.1 关键技术研究

3.1.1.1 多源数据实时采集、存储与发布

风洞试验过程产生的数据类型繁多, 针对多种不同类型的数据来源, 需要兼容多种类型数据协议; 同时数据的采集周期一般为毫秒级, 如何提高数据读写、处理与存储速率十分必要; 另外越来越多的数据应用系統对数据的实时性要求越来越严苛。因此本文设计了针对多源数据的多模块多线程数据实时采集、存储与发布模式, 主要通过节点服务和中心服务来实现。其中节点服务主要用于实现大批量数据的并行采集, 中心服务主要用于数据汇总及处理保存。

节点服务设计为多线程数据处理模块, 满足大批量数据并发采集场景, 实现大批量数据的并行采集存储。功能模块具体分为驱动接口模块、采集控制模块、数据缓存模块和数据发送模块几个部分。通过多模块的结构实现不同功能的调用, 节点服务内部模块调用顺序如图4所示。

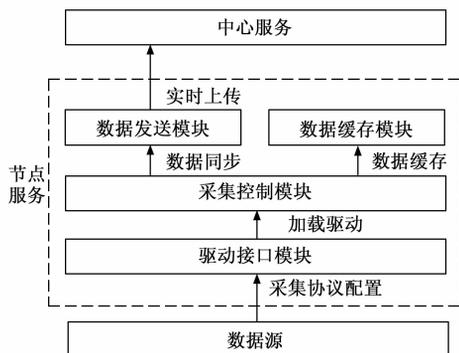


图4 节点服务模块调用顺序

1) 驱动接口模块将不同协议视作一个驱动来适应多种采集协议。通过定义抽象驱动基类, 不同的采集协议实现不同的类, 继承该基类, 并实现具体函数来达到统一驱动。驱动用针对目标设备的专用协议, 生成网络数据请求包, 并向目标设备发送请求包, 目标设备返回结果数据值。

2) 采集控制模块实现加载驱动, 按配置进行数据获取, 响应中心服务的调整控制命令, 进行采集过程的控制等功能。该模块包含:

- (1) 主线程: 分发收到的各类消息及界面输入、输出处理;
- (2) 数据同步线程: 驱动数据发送模块的工作;
- (3) 数据保存线程: 驱动数据缓存模块的工作;
- (4) 数据采集线程: 用于控制驱动接口模块, 读取采集源数据, 为了保证采集的低时延, 以及采集吞吐量, 采集按多线程采集方式进行设计, 每个线程管理一个目标设备的采集工作;
- (5) 主消息接收线程: 驱动通讯基础模块接收从中心服务发来的通讯消息;
- (6) 备消息接收线程: 驱动通讯基础模块接收从备份中心服务传来的通讯消息。

3) 数据缓存模块实现获取数据在本地进行缓存, 把采集到的数据分为保存用和实时上传两个队列, 其中保存用数据队列中的数据被本模块保存到本地缓存数据库中, 保证数据上传失败时不会丢失数据。

4) 数据发送模块实现节点服务采集数据向中心服务的发送, 通过实时上传队列同步数据。

中心服务的功能模块具体分为通讯模块、采存控制模块、历史数据模块、实时数据模块和数据发布模块几个部分, 通过多模块的结构实现中心服务中不同功能的调用, 中心服务内部模块调用顺序如图5所示。

1) 通讯模块是中心服务和节点服务共同实现相互通讯的模块, 用于完成各模块的内部消息通讯。通讯

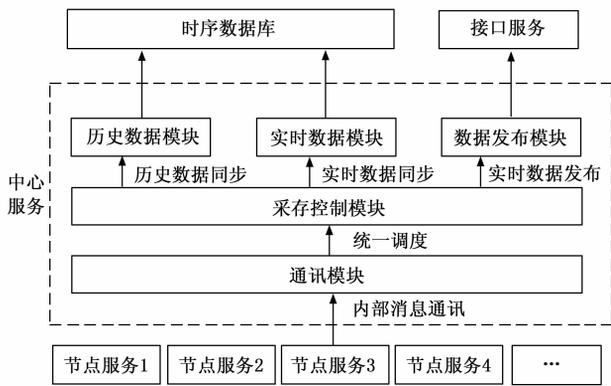


图 5 中心服务模块调用顺序

模块基于 TCP 网络设计，中心服务建立端口，节点服务进行登录连接，然后传递数据。通讯模块设计为多线程方式，采用一个个消息包的形式进行通讯。通讯模块定义网络数据缓冲对象、网络数据流对象，以及网络消息对象等 3 种对象来抽象通讯要素，实现网络通讯。

2) 采存控制模块完成对中心服务的统一调度、调控信息计算、主备服务器切换同步控制等工作，同时实现中心服务内各模块协调工作。该模块包括：

(1) 主线程：用于分发收到的各类消息及界面输入、输出处理；

(2) 主备切换线程：存在于备份中心服务中，用于检查主中心服务是否在线，在主中心服务故障时，触发备份切换；

(3) 服务侦听线程：在配置的服务端口侦听并处理从节点服务或备份中心服务来的连接请求；

(4) 消息接收线程：每个连接节点服务一个线程，用于接收该被连接方发送来的消息。

3) 历史数据模块实现历史数据的处理及数据库保存。历史数据模块的功能包括导入历史数据文件内容到数据库，以及返回导入结果给节点服务。由于缓存数据量较大，导入过程采用单独线程处理。

4) 实时数据模块实现实时数据的处理及内部保存。该模块把收到的数据缓存于数据缓存对象中，调用数据缓存对象的相关功能，实现数据的转换、保存。通过建立在内存中的实时采集树，来查询目标点。并发送数据至内存中的目标节点中，为后续的数据发布工作做准备。

5) 数据发布模块实现内部实时数据以 MQTT 和 WebAPI 方式对外发布。数据发布模块依赖于实时数据模块提供的实时采集树，并从该树上查找数据值，然后发布各采集点的数据。

3.1.1.2 实时数据双采双写

风洞现场实时数据作为重要的数据资产，如何在遇到数据库系统故障、网络异常等情况下确保数据的可靠采集和存储显得尤为重要，为此设计了针对实时数据的双采双写模式，保证采集数据由节点到中心汇聚的稳定性。

如图 2 所示，在数据中心两台服务器上部署两套中心采存软件，两套中心采存服务同时调用现场节点采存软件，将数据写入实时数据库服务器磁盘阵列，如果其中一个数据库写入失败，根据失败记录日志，将主备服务相互同步数据，保持数据一致性。主备服务之间的切换和同步由主备切换线程完成。

针对主备数据库的时间和数据同步问题，利用 InfluxDB 数据库引擎在数据写入时可根据时间戳、数据标识、数据值对数据进行过滤，避免数据重复写入的特点^[18]，因此将本地数据写入数据库时可以同时写入主备数据库。通过使用异步写入方式，可以在基本不增加写入时间的前提下，实现数据双写备份功能，有效提高数据采集和存储的可靠性，确保数据安全。

3.1.1.3 实时数据压缩存储

针对风洞运行海量实时数据存储占用硬盘资源多的问题，为提高数据存储利用效率，降低系统建设成本，对实时数据进行压缩存储。实时数据存储采集到的全部实时数据都会存入 InfluxDB 实时数据库中，其内嵌的高效数据压缩算法，可将实时数据压缩后进行存储^[19]，根据不同的数据类型选用不同的压缩算法，其中整形数据使用 delta 编码 + simple8b 算法编码压缩；浮点数采用 facebook 的 Gorilla 算法压缩；布尔值使用简单的 bit pack 方式编码，每个值使用 1 位；字符串使用 Google 的 snappy 算法进行编解码压缩。

3.1.1.4 节点数据缓存

为了应对网络中断、中心机房服务器升级或维护需要离线等情况，保证实时数据采集的高可靠性，每个节点采存软件具有数据缓存的功能，数据缓存时间大于 12 小时（2 000 点数据 10 次/s 全量存储）。

采存中间件写入失败数据暂存在运行数据采存软件的本地服务器上，信息分成数据和日志两部分，日志保存为日志文件，数据存储在本地的 InfluxDB 时序数据库中。利用一个专门的后台服务处理这些信息，服务程序定时读取未处理的写入失败日志，发现有写入失败数据时，尝试将这些数据写入数据中心的主备数据库，如果写入成功则删除日志或将日志状态变为已处理，如果写入失败则不进行操作，等待下一次处理，写入失败数据处理流程如图 6 所示。

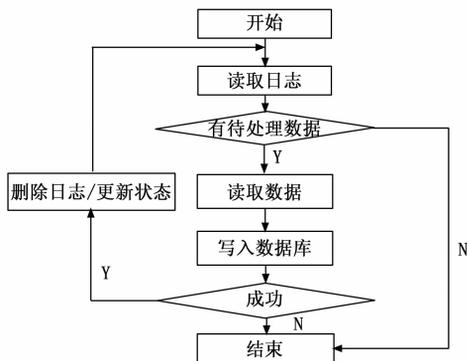


图 6 节点数据写入失败处理流程图

3.1.2 数据采集配置

数据采集配置模块主要实现对风洞各系统全量数据的采集配置, 根据风洞各类数据源硬件及网络实际架构, 建立基于通道-设备-采集点 3 个层级的数据采集模式, 通过确定采集协议, 划分逻辑设备, 进行数据点相关参数设置, 形成可执行的采集配置文件。其中通道配置主要完成特定网络链路和通讯协议的选择, 设备配置主要完成各通道上一个或者多个风洞硬件设备对应的 PLC、数据库、上位机软件等多种数据源的配置, 采集点配置主要完成各设备中所有点位采集参数配置。

在数据点位配置完成后, 数据采集配置还可对数据点位进行自定义分组配置, 可实现数据物理分组到逻辑分组的映射, 数据自定义分组配置如图 7 所示。其中物理分组树是根据采集配置中对通道、设备、采点等的配置结果自动确定的采集点物理分布树形图示, 代表各采集点的实际连接方式。逻辑分组(用户自定义分组)则是根据用户的习惯或需求, 对各采集点按所需业务逻辑进行重组的结果, 便于后续数据的应用和管理。



图 7 数据自定义分组配置图

3.1.3 实时数据采集状态监控

实时数据采集状态监控模块主要实现对各采存中间件所属服务器、各数据采集通道、设备和采集点的采集状态的监控和统计, 模块界面如图 8 所示。通过树形结构进行点选, 可实现对采存中间件各个采集维度运行状态的实时查看, 便于对系统整体运行情况把控和异常情况的及时处置。



图 8 实时数据采集状态监控界面图

3.1.4 数据发布管理

数据库管理系统作为风洞各类应用系统的共用数据中心, 承担着数据中台功能。为适应不同应用系统软件的数据使用需求, 提高数据库管理系统数据支撑能力, 采存中间件开发可配置的数据发布接口, 实现数据接口的可视化自定义配置。数据发布管理界面如图 9 所示。

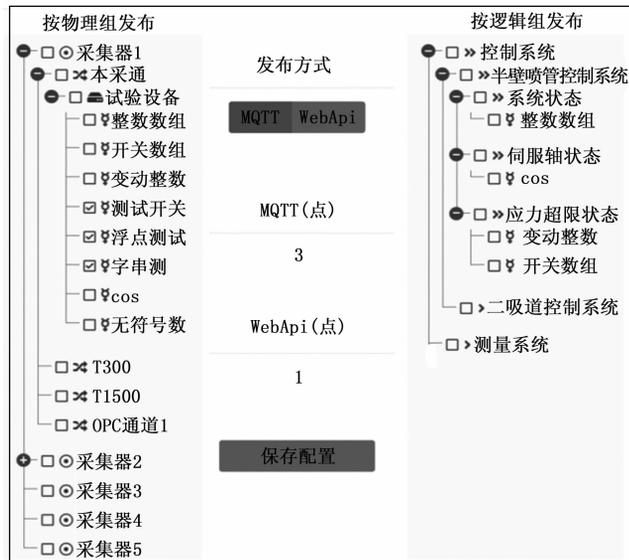


图 9 数据发布管理界面

数据发布管理采用勾选的方式确定要发布的采集点, 可根据应用需求定制化配置数据发布点位, 具有配

置灵活的特点。发布管理界面左侧提供一个采集点的物理分组树，右侧提供一个用户自定义的逻辑分组树，用于进行勾选操作。界面中部为发布方式选择区，可对数据接口的发布类型进行配置，包括 MQTT 和 WebAPI 两种协议。

3.2 数据库集群

针对风洞各类数据特点，综合应用时序数据库、关系数据库，分布式文件系统（DFS）等不同产品的技术特点和性能优势，设计开发相应的数据存储模式，完成实时数据库、关系数据库、视频数据库等结构化数据库群和文本、图片、图纸等非结构化数据库群、备份数据库群研制，形成适应风洞特点的数据库集群。

其中实时数据采用 InfluxDB 时序数据库进行存储，数据库支持数据二次过滤和数据压缩，数据存储效率高、磁盘占用空间小，恢复精度高，针对时间戳、布尔量、整型值、浮点数和字符串等类型数据存储时，可根据不同的数据类型来选择不同的压缩算法，综合数据压缩率大于 40 倍^[20]；关系型数据采用 SQL Server 关系型数据库存储，数据主要包括风洞运行管理数据、非结构化数据索引等；视频数据采用文件存储系统加索引数据的方式进行存储；非结构化数据采用文件存储系统加索引数据的方式进行存储，包括风洞试验管理、装备管理、科研管理中的文本、图片及图纸等数据；备份数据库对实时数据、关系型数据、视频数据及非结构化数据进行完全备份。

3.3 数据服务系统

数据库管理系统可对外部系统和系统用户提供服务。外部系统方面，可与三维可视化系统、视频监控系统等各类数据应用系统完成实时数据接口和历史数据接口对接，提供数据接口调用方法，实现实时数据的低延时传输和历史数据的按条件回放，达到数据信息互联互通。系统用户方面，可为用户提供采集状态数据、标准层级数据及数据统计分析等。数据接口服务调用方式如图 10 所示。

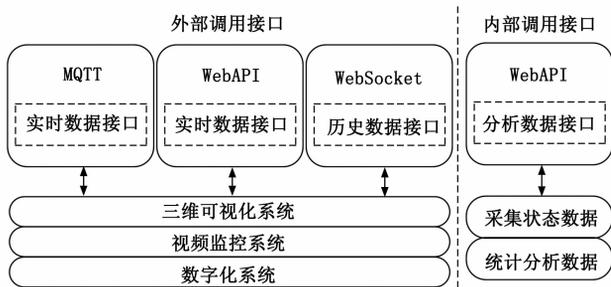


图 10 数据接口服务调用图

针对风洞各类数据特点配置不同的数据接口调用模

式。实时数据接口包括 MQTT 和 WebAPI 两种调用方式，MQTT 实现单点位 MD5 订阅，WebAPI 实现单点位 MD5、物理逻辑树、业务逻辑树各层次多种调用方式，可根据用户需要自行选择调用方式，从数据获取到转发时间小于 200 ms；关系型数据采用 WebAPI 服务接口提供数据服务，采用标准的 JSON 数据格式通信；视频数据通过 EKP 界面查询和回放指定时间、指定场所、指定摄像头、指定试验车次的视频，并支持按配置同时显示多路视频；非结构化数据通过 EKP 界面查询、上传、下载。

3.4 系统管理软件

系统管理软件作为数据库管理系统的前端数据应用，主要实现历史/实时数据查看、数据分析和系统状态监控等功能。为便于用户操作使用，将该软件前端界面与 EKP 平台界面进行集成，提高用户软件使用的便捷性。

3.4.1 数据查看

数据查看主要实现对所有历史数据的查询和实时数据的在线监控。通过选择待查询的单个或者多个数据点位，设置待查询的数据时间区间和查询频率，可对相应点位历史数据或实时数据进行查询，并提供数据导出功能用于下载对应查询的历史数据。风洞实时数据显示界面如图 11 所示。

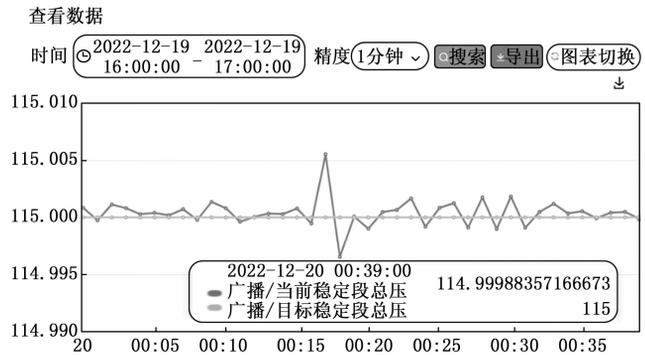


图 11 实时时序数据显示界面图

3.4.2 数据分析

数据分析主要实现对历史/实时数据的统计分析。可对检索的历史/实时数据执行均方差、累计总和、平均数、中位数等统计分析计算。同时可根据实时数据和历史数据生成数据分析报告。可按照时间范围、数据点，采用层次化时间框架或彼此关联的时间段对报告进行配置。报告可保持所有数据原有的准确性，提供针对数据的全面审计追踪功能和用户安全性修改的功能，支持通过版本管理功能消除错误、使报告与任务同步、为业务工作提供支持，经授权的用户可以通过 Web 服务在线访问报告。

3.4.3 系统状态监控

系统状态监控模块主要实现对系统所属服务器、数据库运行状态和端口服务的监控。其中服务器状态监控可对所有服务器的 IP、运行时间、进程数等硬件总体资源、CPU 使用率、内存使用率、网卡网络详情和磁盘读写详情等进行展示。数据库运行状态监控可对 InfluxDB 数据库和 SQLServer 数据库的运行情况进行监控。端口服务监控主要对系统运行的前后端各类接口运行状态进行实时展示。

3.5 安全管理系统

为加强数据库管理系统的防护, 开发安全管理系统, 具体包括的模块如图 12 所示。



图 12 数据库系统安全管理系统

硬件设备方面, 在数据中心机房网络交换机和现场机房网络交换机之间增设一台绿盟 NFNX3 防火墙, 作为对包含本文数据库系统的数据中心的边界防护。防火墙可实现 VPN、入侵防御、防病毒、数据防泄漏、带宽管理、上网行为管理等功能, 具有部署简洁的优点, 提高了安全管理效率。

安全管理软件方面, 主要功能如下:

1) 数据库访问权限认证: 系统可对所有的接口访问进行权限认证, 权限控制可通过可视化配置, 权限验证方式分为 IP 地址验证和用户名密码两种, 其中针对服务器采用 IP 地址验证, 针对个人用户可采用 IP 地址和用户名密码相结合的方式验证。

2) 数据安全策略: 数据安全策略主要包括对数据库中数据进行管理和查看权限的控制以及对数据库加密。

数据管理和查看权限控制利用从 EKP 平台获取的单位人员组织架构等基本信息, 实现对系统用户和角色权限的划分和控制。系统后端采用 Base64 加密算法对时序数据库和关系型数据库用户名、密码、token 及连接地址进行加密, 确保数据库访问安全。

3) 敏感数据安全保护: 敏感数据安全保护主要实现对数据库中敏感数据的安全保护。该模块根据包含规则名称、脱敏数据库、设备、点位、脱敏算法及应用范围等选项在内的数据脱敏规则, 可实现对相应敏感数据的安全保护。

4) 数据备份保护: 为防止数据由于误操作或系统

故障导致的丢失, 系统提供全量定时自动备份和界面手工备份两种机制, 手工备份可选择对应的备份数据库以及需要进行备份的时间区间。

4 系统性能测试验证

在完成数据库管理系统硬件搭建和软件开发后, 对系统主要性能指标进行测试。

4.1 数据采存中间件采存性能测试

测试目标: 数据采存中间件支持多数据源大数据量的数据采集和存储, 可实现对风洞不同系统不少于 10 000 点的实时数据存储, 存储频率不低于 10 Hz, IOPS 大于 10 万。

测试方法: 现场 5 台采存节点服务器分别对风洞不同的控制系统数据进行采集, 采集点位数分别为 1 996、2 132、2 003、2 126、1 835 点, 合计 10 092 点位, 数据采集频率设置为 10 Hz。

测试结果: 采存中间件中心服务记录整体点位的入库延时、发布延时、每秒采集点数等数据, 采存中间件中心服务打印信息如图 13 所示, 从图中可以看出采存中间件每秒采集数据量最终稳定在 100 900 点 (正负偏差 50 点), 达到了不少于 10 000 点 10 Hz 的实时采集和存储效率, IOPS 大于 10 万。

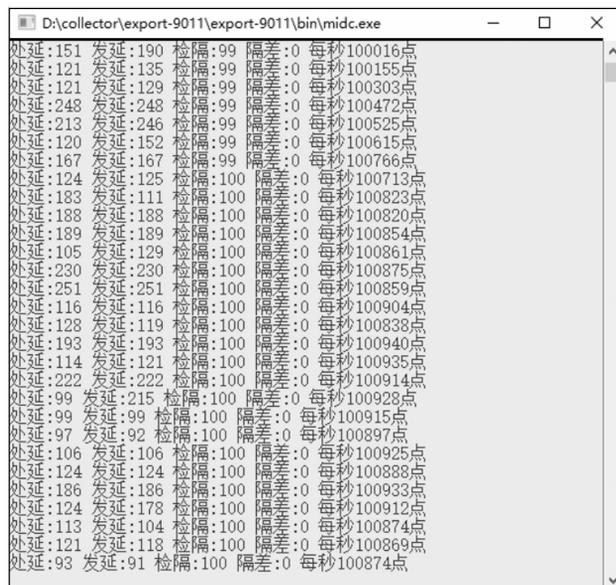


图 13 采存中间件中心服务打印信息

4.2 实时数据发布性能测试

测试目标: 实时数据从采集到发布延时不超过 200 ms, 从而满足数据应用系统对数据的实时性要求。

测试方法: 采存中间件内置阶段时延计算程序, 可通过终端打印每个阶段所用时间, 包括采集时延、入库时延、转发时延, 并通过日志文件记录。

测试结果: 查看采存中间件中心服务日志, 日志如

图 14 所示。从图中可以看出，实时数据入库延时（处延）和转发延时（发延）均小于 200 ms，满足指标要求。

时间	处延/ms	发延/ms	每秒
2023/3/15 12:34:04	140	137	每秒22313点
2023/3/15 12:34:14	129	124	每秒22315点
2023/3/15 12:34:24	128	123	每秒22298点
2023/3/15 12:34:34	129	127	每秒22277点
2023/3/15 12:34:44	136	132	每秒22266点
2023/3/15 12:34:54	134	128	每秒22304点
2023/3/15 12:35:04	135	131	每秒22304点
2023/3/15 12:35:14	135	126	每秒22283点
2023/3/15 12:35:24	132	135	每秒22276点
2023/3/15 12:35:34	127	129	每秒22310点
2023/3/15 12:35:44	140	136	每秒22269点
2023/3/15 12:35:54	129	122	每秒22303点
2023/3/15 12:36:04	132	134	每秒22257点
2023/3/15 12:36:14	131	131	每秒22272点

图 14 采存中间件中心服务日志

上述性能测试表明数据库管理系统作为某大型风洞的数据中台，可实现对风洞各系统海量实时数据的统一采集、存储和发布管理。目前实时数据发布功能已应用于包括风洞三维可视化系统、数字化系统及视频监控系统等在内的多个数据应用系统中，为风洞信息化和数字化的能力提升提供了有力支撑。

5 结束语

针对风洞试验数据存储分散，难以满足信息化、数字化和智能化发展需求的实际难题，结合某大型风洞实际情况，研制一套风洞全链路数据库管理系统。完成了包括环境支撑层、公共支撑层、系统层和应用层在内的系统总体架构设计。通过数据中心机房和风洞现场机房建设，深度融合风洞各系统数据传输网络，构建了分布式采集、集中式存储的硬件及网络体系架构。完成了系统软件架构开发，开发了基于多模块多线程的多源数据实时采集、存储与发布数据采存中间件，数据发布接口可根据数据使用需求进行可视化自定义配置，提升了系统的适用性；充分发挥整合时序数据库、关键数据库、DFS等各类产品技术优势，实现了海量数据的高效存储；通过与EKP办公平台深度融合，实现了对数据的便捷有效管理。该系统的建设为某大型风洞构建了新的数据采存管模式，也具有较强的可扩展性和适用性，可为后续其他风洞或同类场景应用提供技术参考。

参考文献:

[1] 廖云鹏. 某型风洞控制软件系统的设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
 [2] 廖达雄, 孙运强, 吴静怡, 等. 大型风洞设备的数智化初步研究 [J]. 实验流体力学, 2022, 36 (1): 1-10.

[3] AL-FUQAHA A, GUIZANI M, MOHAMMADI M, et al. Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17 (4): 2347-2376.
 [4] HERSENT O, BOSWARTHICK D, ELLOUMI O. The Internet of things: Key applications and protocols [M]. Hoboken, N.J, USA: John Wiley & Sons, 2012: 10-15.
 [5] 国务院. 关于深化“互联网+先进制造业”发展工业互联网的指导意见 [J]. 中华人民共和国国务院公报, 2017, (34): 12-20.
 [6] 何苗. 风洞运行管理系统设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
 [7] 李良民. 高超声速风洞数据采集与监控系统的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
 [8] 郑娟, 康金锋, 汤瀑. 风洞设计管理一体化平台研发 [J]. 中国管理信息化, 2019, 22 (2): 173-175.
 [9] 何福, 罗昌俊, 马永一, 等. 基于CPS的气动试验研究体系全链路数据融合研究 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (7): 269-273.
 [10] 何福, 徐涛, 王小飞. 基于MSF的风洞试验分布式数据库系统同步设计 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (9): 3192-3194.
 [11] 谢鹏志, 杨威, 司守钰. 分布式高可用工业消息中间件数据采集模型 [J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29 (2): 372-384.
 [12] 张志强, 徐泉, 刘文庆, 等. 分布式实时数据采集与传输系统的研究 [J]. 控制工程, 2020, 27 (9): 1582-1588.
 [13] 刘禄恒. 一种通用多协议数据采集系统的设计与实现 [J]. 物联网技术, 2015, 5 (6): 32-33.
 [14] 湛锋, 陆鑫, 孙超. 关系数据库到层次结构实时数据库数据下装实现方案 [J]. 工业控制计算机, 2018, 31 (9): 24-25.
 [15] 张世贤, 张少春, 谢晓东. 基于InfluxDB的监控设备通用运维管理平台 [J]. 计算机系统应用, 2021, 30 (12): 123-127.
 [16] 罗军舟, 金嘉晖, 宋爱波, 等. 云计算: 体系架构与关键技术 [J]. 通信学报, 2011, 32 (7): 3-21.
 [17] 何福, 杜铁焜, 徐涛, 等. 以信息化思维驱动风洞装备保障智慧化变革——基于EKP的装备信息化平台规划、设计与建设 [J]. 兵工自动化, 2017, 36 (10): 17-20.
 [18] 周帆. InfluxDB时序数据库性能优化技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
 [19] 朱晓祥. 基于InfluxDB的时序数据库优化研究与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
 [20] 徐化岩, 初彦龙. 基于influxDB的工业时序数据库引擎设计 [J]. 计算机应用与软件, 2019, 36 (9): 33-36.