

基于 ESB 和 BPM 的计量检定集成平台 关键技术研究与应用

李皓月, 杨平, 张修建, 丁亦嘉

(北京航天计量测试技术研究所 国家市场监管重点实验室(人工智能计量测试与标准), 北京 100076)

摘要: 计量是现代工业发展的基础, 计量检定信息系统是实现工业计量规范化、体系化、数字化目标的重要工具; 面对大量异构的信息系统和数字设备的软件接口、复杂的计量业务流程、频繁变更的需求, 高质量敏捷搭建计量检定系统的难度日益增加; 为解决计量检定系统内外软件接口的高质量集成和软件接口的全生命周期管理, 进行计量检定业务流程驱动的敏捷开发, 采用集成 ESB 和 BPM 平台化的软件架构方法, 不仅实现了大量异构接口的快速接入和全生命周期管理, 也实现了基于计量业务流程的快速低代码开发; 经实际应用提升了软件质量和可靠性, 提升了软件项目开发速度和效率, 满足了大中型企业计量管理的应用需求。

关键词: 计量检定; 软件接口; 敏捷开发; 软件架构; ESB; BPM

Research and Implementation of Key Technologies for Measurement Verification Integration Platform Based on ESB and BPM

LI Haoyue, YANG Ping, ZHANG Xiujian, DING Yijia

(Key Laboratory of Artificial Intelligence Measurement and Standards for State Market Regulation, Beijing Aerospace Institute for Metrology and Measurement Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: Measurement is the foundation of modern industry. Metrological verification information system is an important tool for standardization, systematization and digitalization in the industry; In the face of massive heterogeneous information systems, software interfaces of digital devices, complex measurement business processes, and demand for frequent changes, it is difficult to build a high-quality and measurement verification system agilely. In order to integrate the internal and external software interfaces and realize the full life cycle management of software interfaces, and carry out the agile development driven by the metrological verification business process, the software architecture that integrate the enterprise service bus (ESB) and business process management (BPM) platform is adopted, which not only realizes the rapid access to heterogeneous interfaces and the full life cycle, but also realizes the rapid low code development method based on the metrological business process; the architecture improves the software quality and reliability, and the speed and efficiency of software project development have been improved to meet the application needs of measurement management for large and medium-sized enterprises.

Keywords: metrological and verification; software interface; agile development; software architecture; ESB; BPM

0 引言

计量是工业的“眼睛”, 是实现单位统一、保障量值准确可靠的活动。计量校准是产业链和创新链中的关键环节, 是现代经济发展的技术支持, 是国家质量发展战略的重要基础^[1-2]。近年来, 国家大力推行经济数字化建设, 推动产业数字化变革, 明确提出“发展数字经济, 推进数字产业化和产业数字化, 推动数字经济和实体经济深度融合打造具有国际竞争力的数字产业集群”^[3]。数字化背景下, 数字化制造的趋势日益显现。

数字制造技术的蓬勃发展, 使得数字化计量检测的需求逐渐显现。和传统的技术比较, 现代计量测试技术中测量仪器的作用愈加重要, 新的仪器不断出现^[4]。越来越多

的数字化计量检测系统, 因为与现代计算机技术的结合, 具备了智能化的基础条件。在此基础上, 对仪器设备进行网络接口的开发成为可能。事实上, 已经有众多相关的技术方法研究, 取得了较好的效果。如在一些制造业企业中, 通过计量系统接口程序的软件接口技术, 弥补了企业资源计划(ERP, enterprise resource planning)等系统的缺陷, 在实际生产中得到了充分的应用^[5]。

计量检定系统不仅需要与计量检测设备进行接口集成, 也需要与其他信息系统软件进行接口通讯, 如与实物资产管理系统进行设备资产信息读写的接口需求, 与 ERP 系统进行任务获取结果推送的接口需求。同时考虑到成本等特殊需求, 需要和计量机构的分支实验室或者特殊客户的信

收稿日期: 2022-06-29; 修回日期: 2022-07-29。

作者简介: 李皓月(1992-), 男, 河北张家口人, 硕士, 工程师, 主要从事计量测试软件技术方向的研究。

引用格式: 李皓月, 杨平, 张修建, 等. 基于 ESB 和 BPM 的计量检定集成平台关键技术研究与应用[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(2): 217-222.

息系统进行接口集成。因此，计量检定系统的接口需求是复杂的，接口种类是众多的，接口实现方式也是多样的，面对复杂的集成和管理需求，一般的单点开发方式是难以支持的。

计量检定管理系统的软件功能需求较为复杂，专业性较强，不同的用户和机构对功能模块和计量检定管理流程的要求也有差别。一般来说，其基础功能模块包括了计量首页、计量人员管理、标准管理、器具管理、查询统计、计量检定流程管理、证书原始记录管理、计量站点管理等^[6]。计量管理作为质量管理体系的一部分，需要贯彻《中华人民共和国计量法》、《中华人民共和国计量法实施细则》、《中华人民共和国强制检定的工作计量器具检定管理办法》等法律法规和各行业计量领域相关的标准规范，计量检定系统需要对管理要求的变化和细化作出及时响应。因此，敏捷开发是计量检定系统的必由之路。

目前，计量检定管理系统的建设主要以行业为划分，多关注业务功能的实现，针对异构接口和敏捷开发的问题关注较少。本研究是结合面向服务架构（SOA, service oriented architecture）软件设计模式和业务流程管理（BPM, business process management）设计方法，开发大型通用化计量检定软件平台，能够实现计量检定管理系统与丰富接口的集成，并对软件接口进行高效全生命周期管理，实现大型计量检定平台的搭建，实现基于流程的快速开发，对变更的需求进行快速响应。

1 平台总体设计

计量检定集成平台系统的主要使用单位为计量技术机构、计量客户和计量监督管理部门。计量技术机构包含计量实验室、实验室各分支机构及外部加盟实验室，平台可以实现计量检测业务的统一管理，建立协调统一、标准规范和运转高效的计量检测信息化体系^[7]。计量客户功能部分主要体现高质量、高效率、低成本发展理念，构建基于信息化、网络化的质量管理平台，实现了对测量仪器的全生命周期管理，基本完成计量器具从采购、建账、检定、维护、报废的全生命周期数字化管理，进一步提高了计量器具管理的信息化水平、提高计量管理效率^[8]。计量监督管理部分主要是指计量管理部门直接在平台上进行操作或平台开放接口，实现计量管理部门对各类计量器具和计量活动的监督检查。平台的角色用户划分情况如图 1 所示。

应用软件管理系统的总体设计从需要分析开始，系统而全方位地形成系统软件设计的总轮廓，并把应用软件平台划分为多个主要模块，说明各个主要模块间的相互关系。

计量检定集成平台总体的功能分三大部分，分别为计量实验室部分、计量器具管理部分和计量监督管理部分。计量实验室部分的特点是把实验室的仪器设备采用计算机网络连接起来，做到以实验室为中心，进行委托单、样品、库房、环境、证书的管理，以及计量原始数据的收集、传递、计量、展示的全面管理。既能适应外部的日常控制需要，又能确保实验室对分析数据的严格管理与控制^[9]，既

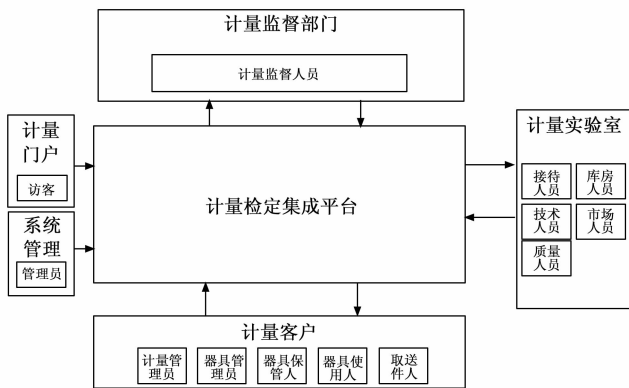


图 1 计量检定平台的角色划分

满足了实验室全流程全要素的便捷管理，也切实贯彻了质量管理体系的管理要求。客户器具管理主要是计量用户进行计量器具的全生命周期管理，实现周检计划、在线送检、在线预约、计量确认、计量技术文件管理等。计量监督管理主要监督计量工作的执行情况，监督周检计划的执行情况，确保送检率、完成率、计量确认率等符合计量管理的要求，通过对计量数据的及时追踪和统计分析，了解计量业务的管理情况。该模块跟踪计量业务系统从信息录入到出具结论，包含仪器设备、原始记录和计量证书流转的全生命周期状态，及时纠正信息录入错误、流转不及时、数据处理不规范、结论出具错误等的情况，对业务操作不规范、技术方法错误等行为进行警告和整改督办。同时，也关注对计量标准器、计量规程规范等状态的监控，及时发现装置故障和标准规范超期情况，以数据监控和统计的方法保证计量服务的优质开展，对出现的问题进行分析^[10]。

平台整体架构利用 BPM 实现敏捷化，对开发、交付、运维进行优化重构，更加快速的实现业务功能迭代。架构引入云原生、低代码、微服务、容器化等技术重构传统的计量检测应用体系，推动敏捷业务的灵活快速发展。平台整体架构（含基础技术栈）如图 2 所示。

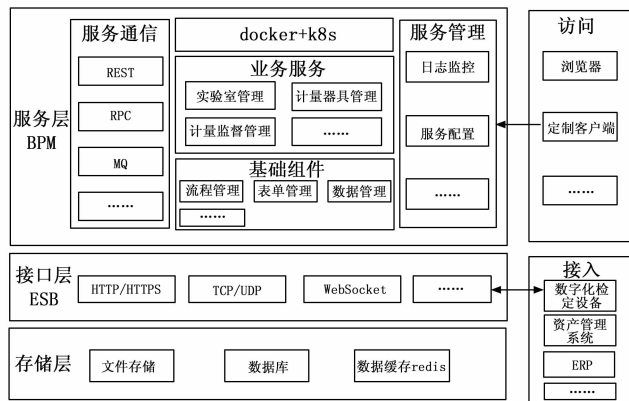


图 2 计量检定平台的整体架构

2 平台软件设计

计量检定综合集成平台的软件设计，应从计量实验室

管理、计量器具管理以及企业计量监督管理工作的实际需要入手, 按照需求分析所确定的信息系统主要功能, 实施软件架构设计、模块功能设计、用户界面设计、业务流程设计, 以形成应用软件平台的具体实施设计方案。

2.1 基于 SOA 的软件架构设计

独立实体在 SOA 中通常被描述为服务单元, 即服务。服务双方使用规定好的协议和接口进行交流, 实现了服务之间的联系。接口和契约具有系统无关性、硬件无关性、语言无关性等特点, 使其不仅能够适应整合各种已有系统, 并具有对未来系统的兼容能力^[11]。不论是微服务架构还是企业服务总线, 理论上都是贯彻了 SOA 的设计理念。SOA 中所定义的服务、接口和契约构成了一个完整的架构。

按照 SOA 的思想, 计量检定业务被分离为多个独立的服务, 通过对这些服务的管理和重组实现原有的业务逻辑, 完成计量检定业务的使用管理需求。SOA 架构以服务为核心的设计思想服务, 根据业务功能、访问压力、接口实现等因素合理划分计量检定服务是优化设计平台架构的重点。

2.2 以 ESB 为中心的接口管理

ESB 实现计量检定集成平台 SOA 架构模式的基础。其本质上是一个基于网络的分布式总线^[12], 能够使不同的软硬件、操作系统、数据库等通过相互联系、协调与配合, 为 SOA 项目提供服务。ESB 还实现了类似的路由、缓冲、信息交换等功能。ESB 包括了以下组件^[13]: 异质消息、动态转换、可配置的路由、消息日志与监控、服务发现、SLA/SLO 支持、策略驱动的安全等功能组件。以 ESB 为中心的软件平台集成架构如图 3 所示。

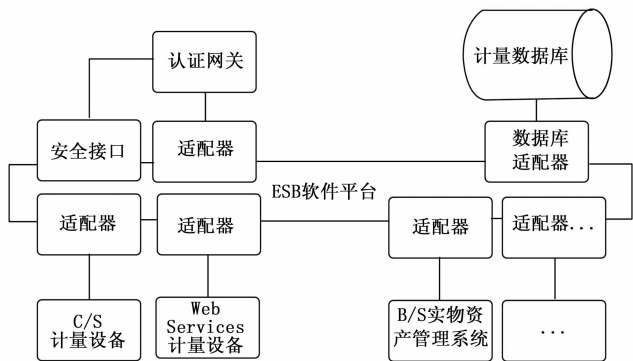


图 3 ESB 软件平台集成架构

ESB 实现了多异构应用的标准资源共享与交互服, 支撑计量技术部门、计量客户与计量监督部门节点间以端对端对等的形式共享 XML 格式的信息, 并可按照信息内容自主分配信息路由, 包括计量任务信息、计量器具信息、计量检定过程记录、原始记录数据等。数据路由技术还能够按照业务规则, 支持动态和灵活的接入。同时, ESB 平台还提供了不同数据格式间的交换, 支持各种数据通信和传输方式, 并提供了数据交换的安全机制, 提供了集中统一部署、监视、追踪、日志记录与检测等功能, 适应了设备集中部署与集中管理的需求。

基于网络接口的集成支持各系统的直接使用, 融合了计量机构、计量客户、计量管理部门的异构环境。用户可以根据自己的需求进行特色开发和界面集成。根据统一接口标准和业务规范, 完成了同质异构计量与应用系统间的衔接, 并进行数据信息封装、交换和数据信息资源共享, 以创造良好的互通性。

2.2.1 数字化检定装置与 ESB 的集成

自微处理器技术尤其是单片微式电子计算机问世至今, 传统单一的测量仪器大大扩大了使用功能, 提升了准确度。尤其是配备了电子计算机的大型数据处理采集系统, 数据处理后的结果即能够用硬盘长时间存放、用打印机打印、用绘图仪绘制曲线, 也能够直接在计算机屏幕上查看。20 世纪末, 国外学者提出了虚拟仪器的概念, 在普通电子计算机上, 可以使用与此计算机系统兼容的板卡和组态应用软件构造带有测量控制功用的设备控制系统^[14]。计算机系统的应用, 尤其是网络技术的应用, 使单点检定测量系统与服务器端信息系统的接口集成可以简易、高效地实现。

数字化检定设备接入 ESB, 主要以面向对象方法的远程过程调度 (RPC, remote procedure call) 和面对消息的单一对象访问协议 (SOAP, simple object access protocol) 两种实现方式。PRC 调用本地服务一样调用服务器的服务, 只是传输数据形式有所不同。SOAP 已经是一种工业规范, 它拥有良好定义的协议, 和一个良好确立的规范, 能够实现对多个发送层或应用层协议的结合, 如 TCP/HTTP/SMTP 等, 在大规模和小型系统中都有广泛应用。不论实现接口采用何种方式, 为了实现统一集成管理, 其基本功能接口列表如表 1 所示。

表 1 检定装置与 ESB 集成的基本接口列表

序号	接口名称	输入参数	输出参数
1	回传设备状态	/	状态码和状态信息
2	下发任务	外部系统任务的唯一标识、任务单及被检仪器设备信息	返回码、返回信息、任务 ID、任务单号和任务流程 ID 等信息
3	停止/暂停任务	外部任务系统的唯一标识、任务流程 ID 列表和备注	返回码和返回信息
4	重启任务流程	外部系统任务的唯一标识、任务流程 ID、及被检仪器设备信息	返回码和返回信息
5	回传检测结果	外部系统任务的唯一标识、任务流程 ID、任务单编号、检测类型等信息	返回码和返回信息
6	获取检测结果	外部系统任务的唯一标识、任务流程 ID	返回码、返回信息、结果信息

计量检定装置的制造厂商、规格型号、数据接口类型等相当繁多, 协议转换过程也可交给经过特殊设计的边缘互联网网关进行完成, 将标准或协议转换成应用于异构装置上的协议, 使各种协议之间实现了互操作。

2.2.2 内外部软件管理系统与 ESB 的集成

目前常用的计量业务信息化模式是：计量机构的门户网站在互联网上部署上，进行具体实验室业务的信息系统则是部署与内部业务网。而内网实验室信息体系随着计量机构组织层级管理、计量学科领域的不同，又建立了相应的垂直管理模式，对计量服务的开展将采取“外网受理，内网办理，外网回复”的模式。建立起由多个系统，多个网络平台、多重架构、多个数据库的多个业务部门互联起来的计量服务检定网络系统。以统一平台对整合这种单一的、异构的、封闭的服务体系将具有重大的意义。随着 ESB 信息技术的蓬勃发展，其面向业务、便于集成异构信息系统和可保护投资的特性为克服这一困难奠定了基石^[15]。

为满足机构整的各项业务运转，OA、CRM、ERP、资产管理等等会在企业中部署。但是各个软件的数据一般都是相互独立的。信息孤岛的产生导致了业务运转的效率大打折扣。计量业务也是需要与其他业务有丰富的信息接口交互的。一些相关的办公业务流程不可避免的需要与 OA 做接口，如计量监督下达的督察督办；与生产相关的不可避免要与生产管理系统如 CRM、ERP 进行接口交互；一些计量器具本身也属于固定资产的一部分，与资产管理系统的交互也是必不可少的。ESB 实现对于消息的控制、传送、分派、解析^[16]，使得能成功地应答并返回相应的数据到上述不同的异构业务系统。改造的改动非常小，成本也很低。

综上所述，ESB 平台将是计量检定集成平台的核心组成部分，提供分布式的工作环境以及节点间的安全数据传输管理机制。能够将不同环境下的应用系统、数据系统等进行无缝衔接。提供了灵活动态的接入方法和路由机制，在平台的数据格式定义上，形成了统一的各种数据格式集合体，所有应用系统可以根据集合体中的所有各种数据格式，来设定各数据信息格式间的对应关系。由此实现了实物资产管理、在线送检、预约取送、基础主数据推送、计量监督等功能服务的接口集成。在该模型下，开发者可以把 CRM、ERP、OA、实物资产管理、计量检定实验室管理系统、计量器具管理系统、计量监督管理系统等都看成一个挂在总线上的子模块。通过 ESB 可以进行对消息的通知、分配、汇总。当系统在挂接在总线的同时，也注册了响应的触发的事件，在接口调用生效的同时传递 XML 消息给系统总线。系统总线上所有的系统都经过注册，这些消息的数据分配到新注册的系统上，然后每个系统都把消息转换成自身所认识的信息，并存储在系统中进行信息的共享。

2.3 基于 BPM 流程平台的业务实现

业务流程管理经历了三次大发展，其概念起源于 20 世纪 20 年代初期美国 Taylor 的现代管理体系理论。到了 20 世纪 90 年代，James Champy 与 Micheal Hammer 对业务流程理论进行了第二次发展，在《Reengineering the Corporation》一书中提出了对业务流程重组（BPR，business process reengineering）的新定义，并主张利用软件系统对业务流程进行巩固。2003 年，Howard Smith 与 Pete Fingar 对业务流程理论进

行了进一步的发展，清晰详细地论述了现代 BPM 理论，第三代流程管理思想由此出现^[17]。基于 BPM 思想的流程软件平台能帮助企业快速构建业务流程整合的管理模式，是业务流程思想与现代软件工程结合的成功应用。

2.3.1 BPM 流程管理

BPM 的核心思想是将流程作为操作元素，流程成为了一种特殊数据结构，被作为直接编排操作的对象。其数学依据来源于现代数学研究思想中的 Process-Calculi（进程代数），描述交互并发系统、移动和结构变化的 π 演算为其提供了数学框架和理论工具。业务流程可以被形式化的描述、建模实现，业务流程也由此具备了直接被灵活查询、分析、分类、读写的功能。BPM 流程管理确保了流程设计与实际需求的一致性，保证了流程设计的正确性和可靠性，减轻了设计、开发、测试、验证的工作量，对开发者和最终用户具有重要的现实意义^[17]。

BPM 以流程管理为核心的管理模式，支持了计量检定的业务需求流程设计的复杂实现和测试验证，器具送检流程、器具检定流程、器具流转流程、计量确认流程、追溯流程、计量监督流程等多种复杂流程可以被方便地控制和管理，增加了计量检定流程管控的灵活性，增也加了计量业务整体的应变能力^[18]。

2.3.2 基于 BPM 的 SOA 梳理

SOA 思想其本质上是以功能列表的形式充分列举系统应该实现的所有功能，进行合理的功能拆分，合理组成不同的子系统，彼此间进行接口通信，从而成为支持需求实现的系统整体。SOA 更多的注重软件的功能特点，而不是从业务流程的角度出发，在实际实现过程中可能造成与实际业务的脱节，子系统功能散乱分布，彼此通信复杂，维护难度增大。

采用 BPM 来定义业务模块，结合 SOA 的架构体系，可以设计构建出更贴近业务且架构清晰、更加健壮且易于维护的软件系统。如图 4 所示，通过 BPM 驱动的方法来划分计量检定的业务流程，将主要业务流程以图表的方式说明，进而层层划分。这样计量检定过程中需要完成的工作更加清晰明了，需要的业务实现模式也更加容易确定。原有业务系统的功能模块的能够被更加轻松的定位分析，开发者能够判断服务的内容和形式，复用已有的软件模块，开发缺失的服务功能。在更好地完成数据共享的同时，发挥整个系统的最大作用。而对于计量检定业务从业务者，通过对计量业务流程的梳理，也能够更加明确地了解信息系统所提供的功能，了解信息系统对计量检定行业运作的实际价值。

2.3.3 BPM 与 ESB 的集成

面向实时计量检定业务的 SOA-BPM 组合框架分为四层，降低了服务之间的耦合关系实现了更有效的服务管理^[19]。各层的主要作用及相互之间的关系如下：

1) 计量检定业务资源层：该层主要包括计量检定行业现有系统、数据库服务器和需要数据交互的信息系统。上

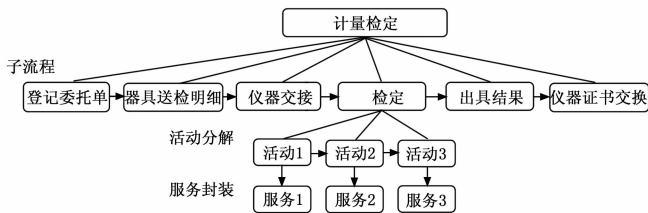


图 4 BPM 划分计量检定的业务流程示意图

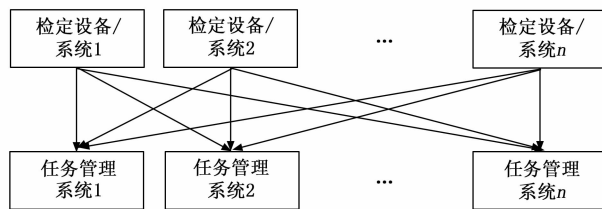


图 5 手动开发接口连接情况

述应用系统已经在计量检定行业发挥了必要的基础性作用^[20], 在计量检定行业仍将广泛应用。但是, 由于系统之间缺乏通信能力, 数量和能力无法复用。

2) SOA 层: SOA 层在计量检定服务资源层的基础上, 按照 2.3.2 节的功能梳理和确定方法, 合理的封装功能服务, 由 BPM 层进行调用合并, 形成业务流程。ESB 总线实际就是 SOA 层的一种标准实现形式, 将计量检定的功能接口连接到 ESB 总线上, BPM 层对业务进行管理响应。

3) BPM 层: BPM 层的作用是对计量检定的基础业务流程进行管理、维护与操作。以送检流程为例, BPM 层对整体的流程节点、流转规则进行控制, SOA 层提供服务实现仪器状态更改、送检单生成等功能。SOA 层以 Web 业务等主要的操作对象, BPM 通过对操作对象的整合与编排建立其完整业务流程。

4) 界面层: 界面层是最终呈现给计量管理人员、计量技术人员的功能页面或桌面进程。一般提供良好的 GUI 接口为使用者服务, 方便使用人员进行操作。目前丰富的前端框架和图表插件等使得界面层的构建更加方便。

通过 SOA 层对资源层中的各种功能实行了服务封装, 并把流程、业务规则等单独抽取到 BPM 层中加以管理, 大大提高了对现有体系的使用率^[21], 进一步完善了流程的概念, 也提高了计量检定业务实现的灵活性和效率。

3 实验结果与分析

3.1 业务功能实现分析

软件平台的设计通过利用 BPM 进行软件需求研究, 确定了软件需求的无二义性、可视化、高准确性、可更改性、可追踪性, 以及易使用性。通过 ESB 实现 SOA 的高内聚、低耦合的模块化设计, 计软件模块采用简化设计原则, 模块接口为单入单出结构, 提高了模块的独立性。

与传统单点接口开发接口的模式方法进行对比, 基于 ESB 和 BPM 集成平台的实现方式极大减少了单点接口开发的工作量。以异构系统间的检定任务推送为例, 传统的人工手动开发形式如图 5 所示, 需要在不同的系统间多次开发。集成平台只需要进行接口的字段匹配和动态消息路由等工作, 即可实现异构系统间的接口集成。在年设计调试 10 台设备(系统)的条件下, 以单个设备接口开发 10 人/天计算, 接口调试的工作量为 100 人/天, 随着设备、系统数量的增加, 接口开发和管理的难度也随之持续增长。

基于 ESB 和 BPM 的软件平台可以将此过程的开发开成本压缩至最低, 如图 6 所示, 通过字段转换和消息路由,

订单任务可以经过配置推送至多个信息系统。同时设备缺乏统一的管理平台也会存在相当量的维护操作成本, 在集成平台上进行统一管理可以大大节省管理的难度。经实际效果验证, 本平台的设计开发工作可解决单独开发调试的时间和经济成本, 同时提高对整体检定业务的管理效率。

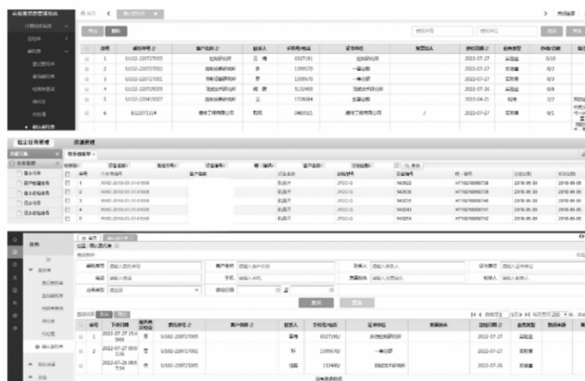


图 6 通过集成平台向多异构系统推送信息

3.2 平台可靠性分析

对比传统单体架构的开发模式, 基于 ESB 和 BPM 集成平台围绕设计、运维两大周期, 加强了接口和功能的安全、稳定、可管理, 实现了基于接口的实时监控和全生命周期管理。配合相应的计量检定业务逻辑和流程, 整合诸多 API, 形成了功能完整, 运行可控的软件平台。通过日志监控、容灾备份、加密安全认证等技术方法, 计量业务系统的稳定更加运行, 给用户和技术人员带来更良好的服务体验。

同时, 集成平台软件的存储量、吞吐能力及处理时序同硬件更加匹配, 在满足需求的情况下有近 20% 的余量。系统保证 7×24 小时不间断稳定运行, 出现故障能够及时告警。能够在非工作时间对系统进行局部维护, 不影响业务连续性。针对故障发生有应对机制, 不仅能够及时恢复系统的正常运行, 而且可以降低因系统故障对平台造成的损失。具有完整的数据备份机制, 通过增量和全备份相结合, 文件数据和数据库数据全异地容灾备份的方式, 保障了平台的安全可靠。

4 结束语

计量检定集成平台, 采用 ESB 和 BPM 平台化的软件架构方法, 不仅实现了大量异构接口的快速接入和全生命周期管理, 也实现了基于计量业务流程的快速低代码开发; 经实际应用提升了软件质量和可靠性, 提升了软件项目开发速度和效率, 满足了大中型企业计量管理的应用需求。

平台实现了计量实验室“人、机、料、法、环”五位一体的管理模式，建立了动态高效的计量器具全寿命周期管理方法，为管理者和使用人员提供了实时动态的信息支撑。建立了全覆盖的信息化计量监督检查机制，大幅度提高了日常计量业务工作效率。实现了计量管理标准化、业务规范化、资源共享化、数据可视化，推动了计量管理工作的转型升级。实现了计量管理体系与信息化数字化的深度融合的目标，达到了以计量业务管理促进质量管理的重要战略目的。

参考文献:

- [1] 苏敬, 关增建. 中、日、美国家计量管理体系比较研究 [J]. 科学, 2002, 54 (3): 40-42.
- [2] 张修建, 杨平, 张鹏程. 基于大数据的新兴产业计量校准服务平台研究 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (6): 104-107.
- [3] 牛立军, 董华林. 基于设计方驱动的 BIM 应用模式及效益评价研究 [J]. 华北水利水电大学学报 (社会科学版), 2022, 38 (2): 9-14.
- [4] 叶声华, 秦树人. 现代测试计量技术及仪器的发展 [J]. 中国测试, 2009, 35 (2): 1-6.
- [5] 戴洁, 曹翀, 刘强. ERP 接口技术的实施 [J]. 山东理工大学学报 (自然科学版), 2007, 21 (6): 67-70.
- [6] 樊靖, 赵瑾, 白东丰. 浅谈长庆油田原油流量计量管理信息系统的构建 [J]. 石油工业技术监督, 2014, 30 (8): 57-59.
- [7] 杨平, 孙刚, 弯天琪, 等. 集团化实验室信息管理系统中台建设实践 [J]. 宇航计测技术, 2020, 40 (5): 98-102.
- [8] 李美琦. 计量器具管理系统的设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2021.

(上接第 189 页)

- [5] BAO C, ZHANG S C. Algorithm-based fault tolerance for discrete wavelet transform implemented on GPUs [J]. Journal of Systems Architecture, 2020, 108.
- [6] IKUZAWA, et al. Reducing memory usage by the lifting-based discrete wavelet transform with a unified buffer on a GPU [J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2016: 44-55.
- [7] STOKFISZEWSKI K, WIELOCH K, YATSYMIRSKYY M. An efficient implementation of one-dimensional discrete wavelet transform algorithms for GPU architectures [J]. The Journal of Supercomputing, 2022, 78 (9): 11539-11563.
- [8] 程润伟, 马克思·格罗斯曼. CUDA C 编程权威指南 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [9] ERIK L, JOHN N, STUART O, et al. NVIDIA Tesla: a unified graphics and computing architecture [J]. IEEE Micro, 2008, 28 (2): 39-55.
- [10] 朱道恒, 李志强. 最大互信息系数的并行计算方法研究 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (34): 14625-14633.
- [11] 谢生龙. C 语言结构体内存对齐问题浅析 [J]. 信息通信, 2016 (4): 1-3.
- [12] 胡倩. 基于线程调度和资源管理的 GPU 性能优化方法 [D]. 武汉: 武汉纺织大学, 2021.

- [9] 王英军. 澳大利亚实验室信息管理系统及计量工作概论 [J]. 中国计量, 2005, 11 (12): 43-44.
- [10] 杨帅, 赵丹, 熊德智, 等. 采用信息化平台的计量专业化监督管理 [J]. 大众用电, 2014, 29 (12): 42-44.
- [11] 黄传华. BPM 在基于 SOA 架构的 IT 规划项目中的应用研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [12] 曾文英, 赵跃龙, 齐德显. ESB 原理、构架、实现及应用 [J]. 计算机工程与应用, 2008, 45 (25): 225-228.
- [13] JIANG J C, GAO M. Enterprise service bus and an open source-implementation [C] //2006 International Conference on Management Science and Engineering, Wuhan, 2006: 926-930.
- [14] 王化祥. 自动检测技术 [M]. 第三版. 北京: 化学工业出版社, 2018.
- [15] 李晓东, 杨扬, 郭文彩. 基于企业服务总线的数据共享与交换平台 [J]. 计算机工程, 2006, 32 (21): 217-219.
- [16] 蔡昭权. 基于 ESB 的异构系统集成实现 [J]. 计算机应用, 2008, 28 (2): 538-540.
- [17] SMITH H, FINGAR P. Businessprocessmanagement: thethirdwave [M]. Tampa: Meghan Kiffer Press, 2003.
- [18] 王辉, 邵贝恩. 用 SOA 和 BPM 组合架构实现实时企业 [J]. 计算机应用研究, 2007, 24 (6): 220-223.
- [19] 李绍飞, 汤朝波, 茅海泉. 基于 SOA 的海量准实时数据服务平台接入/访问研究 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (4): 250-253.
- [20] 吴留生. 计量器具检定业务管理信息系统设计方法 [J]. 中国计量, 2020, 26 (5): 107-109.
- [21] 邓子云, 杨晓峰, 黄婧. 基于 ESB 的 SOA-BPM 系统集成平台关键技术研究及实现 [J]. 科学技术与工程, 2010, 09 (3): 798-803.
- [13] 张发荣. 面向算法的 SIMD 计算机数学模型及其应用 [J]. 电子技术, 2022, 51 (3): 48-49.
- [14] 曾绍华, 魏延. 共享存储器多处理器并行计算编译及调度机制 [J]. 重庆师范大学学报 (自然科学版), 2006 (1): 27-30, 38.
- [15] 关雪梅. 小波变换图像处理技术研究 [J]. 沧州师范学院学报, 2019, 35 (1): 44-46, 73.
- [16] 周传万. 基于全局访存特征的混合内存空间布局研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [17] 冯林安, 戴亮. 任意初等行列混合变换求化实对称矩阵为对角矩阵的正交矩阵 [J]. 贵阳学院学报 (自然科学版), 2017, 12 (4): 10-14.
- [18] 吴艳婷, 方贤进. 数据在计算机内存中的存储形式及实验验证 [J]. 安庆师范学院学报 (自然科学版), 2016, 22 (4): 152-154.
- [19] 浅析虚拟内存与虚拟存储的区别 [J]. 计算机与网络, 2011, 37 (Z1): 71.
- [20] 邓林. 单芯片多核处理器存储优化技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- [21] 谢胜军. 基于动态数据调度的网络数据并行传输系统设计 [J]. 信息与电脑 (理论版), 2021, 33 (17): 174-176.