 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v7i7.11396

Research on Key Technologies for Enhancing Integrated Service Capabilities Based on Modern Railway Information Infrastructure

Shuang Ren Jing Wang Zhimin Niu Minghui Yang Tianyu Liu

China Railway Information Technology Group Co., Ltd., Beijing, 100038, China

Abstract

Addressing challenges such as inadequate protocol support and high orchestration dependency in railway integrated service platforms, while adapting to the rapid advancement of emerging digital technologies like microservices and cloud-native architectures, this paper conducts research on key technologies for enhancing service capabilities. First, a hybrid three-tier architecture of "ESB + API Gateway + iPaaS" is proposed, utilizing formalized routing selection functions to enable robust integration of heterogeneous systems and efficient traffic distribution for cloud-native applications. Second, a low-code visual service orchestration framework is developed based on BPMN 2.0 standards and the Saga pattern, ensuring eventual consistency of distributed transactions. Through core design elements—including adaptive traffic distribution across the hybrid tiers, visual process configuration, and flexible transaction compensation—this approach achieves agile integration of heterogeneous services, flexible scheduling, and eventual consistency of distributed transactions, providing solid technical support for accelerating the digital and intelligent transformation of railway information infrastructure.

Keywords

railway integration platform; service integration; service orchestration; iPaaS; Saga pattern

基于铁路现代信息基础设施的集成服务能力提升关键技术研究

任爽 王静 牛志敏 杨明慧 刘天羽

中国铁路信息科技集团有限公司，中国 · 北京 100038

摘 要

针对铁路集成服务平台协议支持薄弱、编排依赖度高等痛点，适应微服务及云原生等数字化新兴技术的飞速发展，本文开展了服务能力提升关键技术研究。首先，提出“ESB+API网关+iPaaS”混合式三层架构，通过形式化路由选择函数实现异构系统稳健接入与云原生业务高效分流；其次基于BPMN2.0规范与Saga模式开发低代码可视化服务编排体系，保障分布式事务的最终一致性。通过混合三层自适应分流、可视化流程配置及事务柔性补偿等核心设计，实现异构服务的敏捷接入、柔性调度与分布式事务的最终一致性，为加速铁路现代信息基础设施的数智化架构演进提供坚实的技术路线支撑。

关键词

铁路集成平台；服务集成；服务编排；iPaaS；Saga模式

1 引言

随着新一代信息技术的飞速发展，数字基础设施建设已成为推动大型关键基础设施向数智化演进的核心支撑 。集成服务平台作为铁路信息系统横向集成、纵向贯通与数字化协同的核心底座，其技术架构的演进水平直接决定了全路网复杂业务流的协同效率。从国内外建设现状来看，依托云计算提供 API 管理及应用集成已成为主流趋势 [1]。其中，欧美发达国家多采用云原生 API 网关与状态机工作流构建标准化、开放性的集成生态；国内大型科技企业也纷纷推出具有深度行业定制化能力的云原生集成平台。在复杂交通及关键基础设施领域，早期多采用基于 SOA 与 Web Service 的架构来实现各类保障信息系统的业务集成 [2]。由此可见，构建统一、高效、灵活的现代信息基础设施集成服务平台，

【课题项目】中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题《铁路信息基础设施数智化运营体系框架及关键技术研究子课题 1：铁路信息基础设施能力提升关键技术研究》研究成果（项目编号：P2024S003）。

【作者简介】任爽（1987–），女，中国北京人，本科，高级工程师，从事信息技术与项目管理研究。

是实现铁路业务全面协同与跨越式发展的关键。

然而，面对铁路信息系统深度的数智化协同与架构平滑演进要求，既有集成服务平台在技术架构上仍有进一步优化与补强的空间 [3]。一是服务集成缺陷显著，平台对 GraphQL、gRPC、WebSocket 等新兴协议支持薄弱，难以满足高并发应用的无缝接入需求；二是服务编排技术陈旧，高度依赖传统 Oracle ESB 中间件，其 BPEL 与 XSLT 配置过程复杂，不仅面临技术非自主可控的潜在风险 [4]，也极易由于分布式调用中断而引发全局状态死锁因此，既有平台的技术架构亟需进行针对性的升级与设计优化，以更好地契合铁路现代信息基础设施的高质量发展要求。

针对上述难题，本文开展了铁路集成服务能力提升的关键技术研究。首先，提出一种基于“ESB+API 网关 +iPaaS”的混合式三层服务集成架构，通过形式化路由选择函数实现传统异构系统稳健接入与新兴云原生业务的高效分流；其次，基于 BPMN2.0 规范开发低代码可视化服务编排体系，并引入 Saga 模式作为分布式事务管理机制，保障跨系统业务流程的最终一致性。通过上述混合三层自适应分流、柔性流程配置及事务异步补偿等核心设计，可有效实现服务的敏捷接入与高可靠调度，为铁路现代信息基础设施的技术架构平滑演进提供稳健的技术路线参考。

2 需求分析

为提升铁路集成服务平台的整体协同效益，平台的设计必须聚焦于核心的服务集成能力与跨系统的服务编排能力，重点解决多技术栈融合与分布式环境下的事务控制难题。基于平台的服务底座定位，提炼出以下核心技术需求：

2.1 多源异构服务集成需求

铁路集成平台中，既有系统与新建微服务应用并存，底层通信协议呈现高度异构性。一方面，大量既有系统依赖 SOAP、JMS 等传统的、重载的消息和 Web Service 协议，需要极高传输可靠性与消息持久化能力；另一方面，新建的云原生应用多采用 gRPC、RESTful、WebSocket 等高性能、轻量化协议。集成架构设计必须在不涉及传统底层数据交换的前提下，具备对上述多源异构协议的动态识别、统一模型表述以及自适应路由分流能力。

2.2 跨网域柔性服务编排需求

铁路服务协同往往涉及跨二级网络、跨网域的多个独立子系统间的长链路调用。传统的硬编码或单体工作流模式配置过程复杂、耦合度高，难以适应业务流程的快速调整与柔性动态编排。此外，在分布式环境下，各异构节点缺乏统一的全局锁机制，一旦某一项子服务在执行过程中发生超时或崩溃，极易导致全局状态卡死和数据不一致。因此，服务编排体系必须具备可视化低代码配置能力，并内置高可靠的分布式事务异常控制与自动补偿机制，保障复杂长事务的最终一致性

3 方法概述

针对上述复杂的业务与技术需求，本研究遵循标准化、自主可控与云原生的架构设计原则，提出了一个混合式三层融合集成架构方法。该架构在逻辑上打破了单一技术栈的局限性，将整体服务集成能力划分为稳健层、敏捷层与加速层，形成协同创新的效能增强路径 [5]。其中，稳健层以企业服务总线（ESB）为核心，主要面向铁路异构性强、协议传统的企业级核心遗留系统，提供高可靠的消息持久化、数据格式转换与复杂流程路由支持。敏捷层采用轻量化的 API 网关（API-GW）模式，严格遵循 OpenAPI 规范，负责对内部新构建的微服务进行高性能的访问控制、动态路由与基于分布式限流算法的流量治理。加速层则全面引入集成平台即服务（iPaaS）理念，依托云原生容器化环境，提供数百个预置的低代码连接器，以图形化拖拽方式快速编排并部署 SaaS 应用，从而加速跨云业务与路外协作信息的创新与流通。

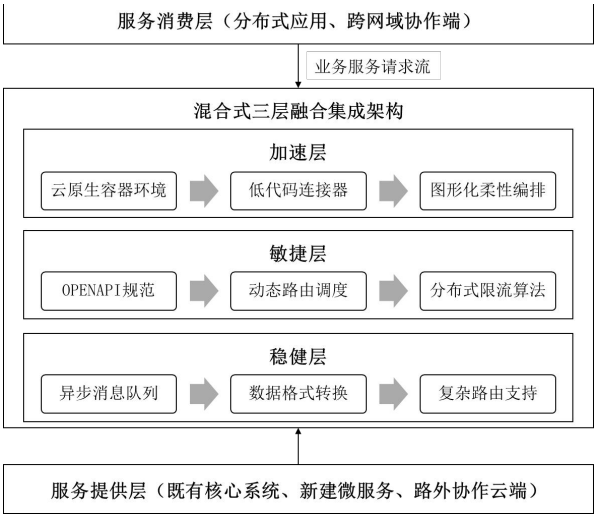


图 1 混合式三层融合集成架构示意图

为了对该三层混合架构的路由适配机制进行科学描述并确保运行期流量调度的确定性，本文对其进行了形式化定义。设所有接入集成平台的源服务请求集合为 S，对于任意服务请求 $s \in S$，其运行期特征属性可由一个三维向量定义为 $T(s)=<P(s), M(s), D(s)>$。其中，$P(s) \in$ {SOAP, JMS, gRPC, RESTful, WebSocket} 表示服务的通信协议类型，用以识别其属于企业级传统协议还是云原生轻量化协议；$M(s) \in$ {High, Medium, Low} 表示业务对高可靠消息持久化、分布式控制及复杂事务支持的依赖程度；$D(s) \in$ {Internal, Cloud, External} 表示服务部署所在的具体网域环境，涵盖了铁路内部服务网、混合云端以及外部协作网。基于上述提取的动态特征属性向量，本文构建了混合架构下的动态路由选择函数 Φ: S → {ESB, API-GW, iPaaS}，其分段映射规则满足如下逻辑：

当符合判定条件 $P(s) \in$ {SOAP, JMS} ∪ M(s) = High 时，表明该服务请求属于 Web Service 的传统重载协议，或者该

业务本身属于对消息高可靠和最终一致性具有极高安全要求的场景 。此时，系统强制调用 ESB 的异步消息队列与持久化重试机制，依靠其深厚的技术中间件积累，为高风险流量提供确定性的安全兜底与流程适配。

当满足逻辑关系 $P(s) \in \{\text{gRPC, RESTful}\} \cap D(s) = \text{Internal}$ 时，服务请求将被引流至基于 API 网关的敏捷层。这表明对于部署在铁路内部网域、采用现代微服务设计且使用高性能、轻量化协议进行通信的新建系统，平台将通过 API 网关的横向扩展能力进行网格内的流量流向治理。利用网关内置的分布式令牌桶限流算法，系统能够实时监控请求频率并在接口层自适应拦截超出阈值的过载冲击，有效防止局部系统的流量异常波及整个铁路基础设施的稳健性。

当触发条件满足 $P(s) = \text{WebSocket} \cup \text{D(s)} \in \{\text{Cloud, External}\}$ 时，请求将被划入基于 iPaaS 的加速层。这主要适配了长连接数据的高时效流式采集汇聚，或者是跨越网络边界的敏捷应用集成。iPaaS 通过其内置的丰富低代码连接器自动处理协议转换与跨多租户的弹性扩展，极大缩短了外部协同及市场化业务应用的开发迭代周期。

上述控制函数通过确切的数理逻辑，不仅在理论上为 ESB+API 网关 +iPaaS 的三层融合集成架构提供了严谨的数理逻辑支撑，确保了流量分发路径的可验证性与科学性。它打破了传统单技术栈对铁路信息基础设施演进的束缚，使平台在面对多网域、强异构、重载荷的数智化洪峰时，具备了可动态平滑上演进的架构弹性和自主可控的系统韧性。

4 关键技术

为攻克铁路集成服务平台的技术演进瓶颈，本章重点阐述智能化服务集成与低代码服务编排两项核心技术。一方面，通过设计异构协议的统一语义转换与自适应路由特征提取，在不涉及传统底层数据交换的前提下实现智能化服务集成；另一方面，通过逆向异常补偿机制实现柔性的低代码服务编排。两项技术横向协同，共同构建起高效、韧性的集成平台基础。

4.1 智能化服务集成

4.1.1 异构协议统一语义管道转换

在运行期，各独立子系统节点的通信协议存在语义阻抗。为消除屏障，集成层设计了内置的多协议连接器与通用语义转换引擎。

其核心机制在于：当异构请求流到达接入管道时，引擎并不对其进行传统的数据交换或落地存储，而是利用流式解析器（Streaming Parser）在内存中对其进行非阻塞式解包。无论是传统的重载协议（SOAP、JMS），还是现代轻量化流式协议（gRPC、WebSocket、HTTP/2），系统均统一将其报文结构降维并物化映射为由“统一元数据头（Unified Metadata Header）”与“泛化载荷体（Generic Payload）”构成的通用标准消息模型（基于 OpenAPI/JSON Schema 规范）。这种抽象语法树（AST）的构建方法，实现多源异构协议在逻辑语义层面的完全互通。

4.1.2 路由特征向量提取与自适应调度执行

语义转换完成后，路由执行器负责对接并运行所构建的自适应控制函数 $\phi(s)$。具体处理机制为：转换引擎在将报文标准化的同时，会同步触发特征提取算子，通过动态实时解析报文头，精确抽取出当前服务请求 s 的运行期特征属性。算子将协议类型 $P(s)$、业务依赖度 $M(s)$ 以及部署网域拓扑 $D(s)$ 封装为标准三维特征属性向量 $T(s)$，并作为入参即时传递给路由选择函数 $\phi(s)$。路由协调器依据函数输出的映射断言结果（ESB、API-GW 或 iPaaS），通过动态总线适配器直接将该服务流精准引流至对应的运行层（稳健层、敏捷层或加速层）。整个调度过程完全在内存管道中以自适应方式完成，在保障全路网服务集成柔性与确定性的同时，确保了路由决策的极低时延开销。

4.2 低代码服务编排

4.2.1 柔性流程拓扑的低代码语义解析机制

为了降低跨协议、跨系统复杂分布式业务流程的配置开销，平台设计了完全基于国际标准 BPMN 2.0 规范的可视化编排逻辑模型 。

在服务编排功能的重构设计中，突破以往 Oracle ESB 中繁琐、易错且必须手动编写大量 XML 配置文件的传统编排模式，全面构建了全新的低代码可视化服务编排体系。该体系的底层完全基于国际标准的 BPMN 2.0（业务流程建模与标注）语言规范，提供功能完备的 Web 化可视化流程设计器。开发人员或业务管理人员只需通过前端基于 Canvas/WebGL 高效渲染的设计界面，进行原子服务组件（如数据库查询、HTTP 调用等接口）的拖、拉、拽等操作与逻辑连线，即可快速完成跨协议、跨系统的复杂分布式业务流程配置。

在此基础上，底层的元数据描述引擎会自动激活图元转译算子，将可视化的有向图拓扑非阻塞式地实时解析并转换为标准格式的流程控制元数据 。该机制不仅在运行期支持在线单步调试、断点续跑与服务全链路的深度智能监控，更在理论层面实现了控制流与具体执行实体的完全解耦 。

4.2.2 基于 Saga 模式的分布式事务最终一致性控制

为了在分布式微服务环境下保障铁路核心业务流程的最终一致性与事务稳定性，本体系引入了 Saga 模式作为服务编排的异常补偿与分布式事务管理机制。在 Saga 机制中，一个复杂的跨系统串联业务流程被形式化定义为一个由一系列本地子事务组成的有序任务链：$T = \{t1, t2, \cdots, tn\}$。在此基础上，设计器强制要求为每个正向的原子本地事务 ti 动态配置一个反向的逆向补偿动作 $c_i \in C$。当编排引擎按序调度执行子事务时，其状态转移流满足如下确定性逻辑。设当前系统状态为 S，初始状态为 $S0$：$i \in [1, n]$, $Si = ti\ (Si\text{-}1)$。若在执行到某一中间任务 tm $(1 < m\ n)$ 时发生超时或调用失败（即 $tm \rightarrow$ Fail），编排引擎将立即中断正向任务链的推进，并自动触发异常隔离与反向回滚机制。引擎将严格按照逆序方向，依次调用已执行完毕任务的补偿动作，即触发补偿链：

$$\mathscr{R}_m = \sum_{j=m-1}^{1} c_j(S_j)$$

例如，在行车指挥与智能运维的联动协同场景中，若正向流程为 t_1: 机务系统登记故障→ t_2: 调度系统修改列车运行线→ t_3: 车站系统调整站停股道。一旦在执行 t_3（股道调整）时遭遇失败，Saga 编排引擎将自动逆序执行补偿动作，即先调用 c_2 自动回滚调度系统中的列车运行线状态，随后执行 c_1 撤销机务系统的故障登记，从而使全网异构子系统的状态最终平稳回退至初始一致状态 S_0，有效避免了由于分布式调用中断而导致的数据状态不一致与业务流程卡死风险。

5 架构特性分析与技术对比

为了验证本文提出的铁路集成服务平台架构设计在理论层面的可行性与优越性，本节脱离特定的现网物理环境与业务数据，从自适应路由的计算开销、分布式事务的收敛韧性以及系统演进的柔性度等核心维度，展开顶层设计的定性分析与机理推导。

5.1 形式化路由选择函数的开销与确定性分析

本文在第二节与第三节中所推导的形式化路由选择函数 $\phi(s)$，其核心目的在于解决异构流量流向的自适应治理。在计算复杂度层面，该设计具有极高的确定性与极低的运行期开销：

时空复杂度恒定：路由提取算子在解析到达的服务请求 s 时，仅通过流式解析器动态读取报文头的特定字段，即可快速封装出三维特征属性向量 $T(s)=\{P(s), M(s), D(s)\}$。由于向量维度固定且有限，映射函数 $\phi(s)$ 的分段逻辑判断在计算上属于 $O(1)$ 的常数级时间复杂度。这意味着无论全路网并发流量如何随时间呈指数级增长，路由调度的判定延迟在理论上均保持恒定，有效避免了传统中心化路由表因条目膨胀而导致的线性检索性能劣化。

内存非阻塞机制：由于平台在设计上不涉及传统底层数据的落盘交换，异构协议的语义转换与向量提取完全在内存管道中以非阻塞流的形式完成。这种纯服务流控制的轻量级特征，从根本上压低了网络边界处的计算重载，确保了核心调度设计的低延迟特性。

5.2 基于 Saga 柔性补偿的系统韧性定性评估

针对跨网域分布式长事务控制，本文设计的基于有向无环图（DAG）演进的 Saga 模式，与传统的分布式事务处理机制（如两阶段提交 2PC、三阶段提交 3PC）相比，在基础设施协同中展现出更高的系统韧性与柔性。为了清晰展现本设计在纯技术路线上的优势，表 1 从多个分布式控制维度进行了定性对比分析。

表 1 核心事务控制机制技术特性对比分析表

评估维度	传统两阶段提交机制 (2PC)	传统单技术栈中心化总线机制	本文提出的混合三层与 Saga 补偿设计
全局锁依赖	强依赖全局强锁，在所有节点提交前锁定资源	依赖中心化总线队列排队，易引发单点阻塞	完全无全局锁依赖，各子系统节点本地事务独立提交
跨网域抗分区能力	极弱。若跨网络边界发生网络分区，系统立刻卡死	较弱。跨越网络边界时缺乏柔性控制路由	极强。允许中间状态不一致，网络分区时触发异步柔性补偿
数据底座干扰	强。必须对底层异构数据库有强读写和事务控制权	中。通过数据管道强行进行底层数据交换	零干扰。在不涉及底层数据交换的前提下，纯靠服务信令对冲
信创环境泛化性	差。严重依赖特定商业数据库的分布式事务组件	差。高度依赖特定国外大型中间件厂商	极佳。逆向补偿逻辑完全解耦，完美兼容全栈信创生态

6 结论

本文针对铁路数字化转型需求，设计了 ESB+API 网关 +iPaaS 混合式三层集成服务架构。第一，设计了“ESB+API 网关 +iPaaS”混合式三层融合集成架构。通过推导形式化路由选择函并设计统一语义管道转换机制，在不涉及传统底层数据交换的前提下，将异构重载协议与现代轻量化协议统一收敛为 OpenAPI/JSON 规范，在架构底层实现了铁路既有遗留系统与新兴云原生服务的平滑解耦接入与自适应确定性分流。第二，构建了基于 BPMN2.0 规范与 Saga 分布式事务模式的低代码可视化柔性服务编排技术体系。通过逆向异常补偿机制，有效保障了跨网域复杂长事务的最终一致性，规避了分布式调用中断引发的流程死锁风险。顶层架构特性分析与定性对比表明，本设计体系各项关键功能与理论性能指标均能有效适配服务等级协议（SLA）要求，具有常数级的低路由决策开销、极高的抗分区韧性以及全栈信创生态兼容性。未来研究将聚焦于无状态编排协调器的性能边界拓宽，以及基于大模型赋能的智能化意图编排机制，持续推动铁路现代基础设施技术架构的高质量演进。

参考文献

[1] 王同军.智能铁路总体架构与发展展望[J].铁路计算机应用,2018,27(07):1-8.

[2] 王瑞,李青,赵倩.基于SOA与Web Service的飞机保障信息系统集成[J].计算机工程,2018,44(01):91-97.

[3] 马小宁.铁路大数据应用实践及展望[J].铁路计算机应用,2019,28(04):8-13.

[4] 周志明.凤凰架构[M].机械工业出版社:202106:713.

[5] Chandwani S. B2B Integration Patterns in the Chemical Industry[J]. Frontiers in Computer Science and Artificial Intelligence, 2026, 5(6): 13-21.

[6] 范文星.基于Oauth2.0协议的跨域互信身份认证研究与应用[D].北京交通大学,2019.