

基于分布式架构的工程造价大数据采集与预处理技术的研究

蔡莹 黄永安^(通讯作者) 孙婉超 邓燕青 许雅思 李志龙^(通讯作者)

公诚管理咨询有限公司, 广东广州, 510660;

摘要: 针对传统工程造价数据采集范围有限、预处理效率低、多源数据融合难等问题, 结合工程造价咨询行业数字化转型需求, 设计并开发基于分布式架构的工程造价大数据采集与预处理系统。系统采用 Hadoop 分布式文件系统 (HDFS) 存储海量工程数据, 通过 Flume 与 Kafka 构建多源数据实时采集通道, 依托 Spark 框架实现数据清洗、标准化、融合等预处理操作, 并创新性引入工程造价领域特征词典优化数据解析精度。经测试验证, 系统可支持 200+并发数据源接入, 单批次 100GB 工程数据 (含图纸、清单、合同等) 采集延迟 $\leq 5\text{min}$, 预处理准确率达 98.7%, 较传统集中式系统效率提升 3.2 倍, 有效解决了工程造价数据“采不全、处理慢、用不好”的行业痛点, 为后续造价分析、智能清标等应用提供高质量数据支撑。

关键词: 分布式架构; 大数据采集; 数据预处理; Spark; HDFS; 工程造价

DOI: 10.69979/3029-2727.25.07.077

1 引言

1.1 研究背景

在建筑行业数字化转型浪潮中, 工程造价咨询行业面临“数据爆炸”与“数据价值挖掘不足”的双重矛盾。据《2024年中国工程造价咨询行业发展报告》统计, 单个大型工程项目全生命周期产生的数据量可达 TB 级, 涵盖工程图纸 (CAD/BIM 格式)、工程量清单 (Excel/XML 格式)、合同文本 (PDF/Word 格式)、材料价格数据 (API 接口实时更新) 等多类型、多来源数据。传统集中式数据处理系统受限于存储容量与计算能力, 存在三大核心问题:

1) 采集范围有限: 传统系统主要处理结构化数据 (如 Excel 清单), 对非结构化数据 (如 PDF 合同)、半结构化数据 (如 BIM 模型属性) 的采集与解析能力弱, 有效采集覆盖率不足 60%;

2) 预处理效率低: 单批次 10GB 数据清洗耗时超 2h, 且人工干预率达 35%, 难以满足工程造价“时效性分析”需求 (如投标阶段清标需 24h 内完成数据准备);

3) 数据质量差: 多源数据标准不统一 (如“混凝土强度等级”在不同地区清单中表述差异达 15 种), 导致后续造价分析误差率超 8%。

分布式架构凭借“横向扩展、并行计算”优势, 成为解决海量工程造价数据处理难题的关键技术路径。

1.2 研究意义

本系统开发的核心价值体现在技术与行业两个维度:

1) 技术维度: 突破“非结构化工程造价数据分布式采集”“领域特征驱动的数据标准化”等技术难点, 形成可复用的分布式数据处理架构, 填补工程造价领域大数据预处理技术空白;

2) 行业维度: 将数据采集覆盖率提升至 95%以上, 预处理效率提升 3 倍以上, 数据准确率提升至 98%以上, 直接支撑后续清标自动化 (如算术性检查、报价合理性分析)、造价趋势预测等应用, 助力工程造价咨询行业从“人工经验驱动”向“数据智能驱动”转型。

1.3 国内外研究现状

国外方面, 美国 Cost Engineering 协会开发的 CostOS 系统采用分布式存储架构, 可实现材料价格数据的实时采集, 但对非结构化合同文本的处理仍依赖人工标注; 英国 RICS (皇家特许测量师学会) 推出的 BIM-QS 系统支持 BIM 模型数据与造价清单的关联, 但预处理环节未实现并行计算, 效率难以提升。

国内方面, 部分学者提出基于 Hadoop 的工程造价数据存储方案, 但未涉及多源数据采集通道设计; 另外在通信工程造价软件中引入 Spark 清洗模块, 但仅针对结构化数据, 且未建立领域数据标准词典。现有研究均未形成“采集-存储-预处理”一体化的分布式解决方案, 本系统在此基础上实现技术整合与创新。

2 系统总体设计

2.1 设计原则

结合工程造价数据特性与分布式技术特点，系统设计遵循以下原则：

1) 兼容性：支持 12 种以上数据格式采集（覆盖工程造价主流类型），并预留 API 接口可扩展至未来新型数据（如数字孪生模型数据）；

2) 实时性：结构化数据采集延迟 $\leq 1\text{min}$ ，非结构化数据采集延迟 $\leq 5\text{min}$ ，满足投标清标、成本动态监控等场景需求；

3) 可靠性：数据存储采用 3 副本机制，计算节点

故障时自动切换，保障系统可用性 $\geq 99.9\%$ ；

4) 可扩展性：支持计算节点、存储节点按需扩展，单集群最大可扩展至 100 个节点，存储容量无上限；

5) 领域适配性：基于《建设工程工程量清单计价标准》《通信工程费用定额》等行业规则，设计工程造价专属数据预处理规则与领域特征词典，避免通用大数据系统“水土不服”问题。

2.2 系统架构

系统采用“分层分布式架构”，自上而下分为：采集层、存储层、预处理层、服务层 4 个核心层级，架构如图 1 所示。

| | | | |
|------|--|---|--|
| 采集层 | 结构化数据采集 ERP系统 材料价格数据库 | 非结构化数据采集 Flume Agent 批量采集 Tika文本提取 | 半结构化数据采集 Redis高频数据 BIM模型解析 缓存实时数据 |
| 存储层 | HDFS 原始工程数据 安全策略保障 | HBase 半结构化数据 列族存储高频读写 | MySQL 结构化配置数据 主从库读写 |
| 预处理层 | Spark Core 数据清理 删除重复清单 历史均值补缺 | Spark SQL标准 化结构化数据 统一清单计量单位 | Spark MLlib 自然语言处理 NLP模型识别 词典精度提升 |
| 服务层 | 数据查询接口 | 数据推送接口 | Flink 实时数 据流处理 边采集边预处理 动态造价监控 |
| | | | 监控预警接口 |

图 1：分层分布式架构图

2.2.1 采集层

负责多源工程造价数据的“全面接入”，核心组件包括：

1) 结构化数据采集模块：通过 JDBC/ODBC 接口连接企业 ERP 系统、材料价格数据库（如广材网 API），采用定时增量采集策略（默认 5min/次），避免全量采集占用带宽；

2) 非结构化数据采集模块：采用 Flume Agent 部署在各数据源头（如造价咨询部门服务器、施工企业文档库），支持 PDF 合同、CAD 图纸的批量采集，通过 Tika 工具提取文本内容与元数据（如图纸版本、合同签订时间）；

3) 半结构化数据采集模块：开发 BIM 模型解析插件（支持 Revit、Bentley 格式），提取模型中“构件类型、工程量、材质”等造价相关属性；实时数据采集模块通过 Kafka 消息队列缓存施工现场材料消耗量等动

态数据，避免峰值流量冲击。

2.2.2 存储层

基于 Hadoop 生态构建分布式存储体系，解决“海量数据存储”问题：

1) HDFS（Hadoop 分布式文件系统）：存储原始工程数据（如 CAD 图纸文件、PDF 合同），采用分块存储（默认块大小 128MB），支持数据副本策略（默认 3 副本），保障数据安全性；

2) HBase：存储半结构化数据（如 BIM 构件属性、实时材料价格），采用列族存储方式，适合高频读写场景（如材料价格每小时更新 1 次）；

3) MySQL（主从架构）：存储结构化配置数据（如采集任务调度规则、预处理规则库），主库负责写操作，从库负责读操作，提升查询效率。

2.2.3 预处理层

基于 Spark 框架实现数据“清洗-标准化-融合”全

流程处理，是保障数据质量的核心环节：

1) Spark Core：负责数据并行清洗，如删除重复清单条目、修复缺失的材料价格数据（基于历史均值填充）；

2) Spark SQL：实现结构化数据标准化，如将不同地区清单中的“计量单位”统一为“平方米、立方米”等国标单位；

3) Spark MLlib：引入自然语言处理（NLP）模型，对合同文本进行实体识别（如提取“合同金额、工期、付款方式”等关键信息），结合工程造价领域特征词典优化识别精度；

4) Flink：处理实时数据流（如施工现场实时消耗量），实现“边采集边预处理”，满足动态造价监控需求。

2.2.4 服务层

提供数据服务接口，支撑后续应用：

1) 数据查询接口：通过 Solr 搜索引擎实现工程数据的全文检索（如按“项目名称、合同编号”查询相关数据）；

2) 数据推送接口：将预处理后的高质量数据推送至造价分析系统（如智能清标模块、成本预测模块），支持 JSON/XML 格式输出；

3) 监控预警接口：实时监控采集任务状态、预处理成功率，当数据异常（如采集失败率超 5%）时触发邮件/短信预警。

2.3 核心技术选型

系统核心技术选型充分考虑“成熟度、性能、领域适配性”，具体如表 1 所示。

表 1：系统核心技术选型表

| 技术层级 | 核心组件 | 选型理由 | 性能指标 |
|------|--------------|----------------------------|----------------------------|
| 采集层 | Flume 1.11.0 | 支持多源数据采集，可定制拦截器(如过滤无效图文数据) | 单 Agent 最大吞吐量 100MB/s |
| 采集层 | Kafka 3.5.0 | 高吞吐、低延迟，适合缓存实时数据 | 单分区吞吐量 10000+条/秒，延迟≤10ms |
| 存储层 | HDFS 3.3.4 | 分布式存储成熟方案，支持横向扩展 | 单集群最大存储容量 PB 级，读写带宽 GB 级 |
| 存储层 | HBase 2.4.17 | 适合半结构化数据存储，支持高频读写 | 随机读延迟≤10ms，写吞吐量 10000+条/秒 |
| 预处理层 | Spark 3.4.0 | 并行计算能力强，支持 SQL 与 MLlib 集成 | 单节点处理速度 10GB/小时，并行度可扩展 |
| 预处理层 | Flink 1.17.0 | 实时计算性能优，适合流数据预处理 | 流处理吞吐量 100000+条/秒，延迟≤100ms |
| 服务层 | Solr 9.3.0 | 全文检索效率高，支持复杂查询条件 | 单索引查询响应时间≤500ms |

3 关键模块详细设计

3.1 多源数据采集模块设计

3.1.1 结构化数据采集流程

以“工程量清单 Excel 文件”采集为例，流程如下：

1) 任务配置：用户在 MySQL 配置库中创建采集任务，设置“文件路径、采集频率、字段映射规则”（如将“清单编号”映射为标准字段“BOQ_ID”）；

2) 定时触发：Azkaban 调度器按配置频率触发采集任务，调用 JDBC 接口读取 Excel 文件；

3) 数据校验：通过预设规则过滤无效数据（如“工程量为负数”的条目），校验通过后写入 Kafka 队列；

4) 状态反馈：将采集结果（成功/失败条数）写入 MySQL 状态表，异常时触发预警。

3.1.2 非结构化数据采集优化

针对 PDF 合同文本采集，传统 Flume 仅能采集文件

本身，无法提取关键信息，本系统设计“采集-解析”一体化方案：

1) Flume 拦截器定制：在 Flume Agent 中添加“PDF 解析拦截器”，通过 Apache PDF Box 工具提取合同文本内容；

2) 领域实体识别：调用基于 Spark MLlib 部署的 BERT 模型（经工程造价领域语料微调优化），识别“合同金额、工程范围、违约责任”等 12 类核心实体，识别准确率达 92.3%；

3) 元数据关联：将提取的实体信息与文件元数据（如文件大小、修改时间）关联，生成结构化记录后写入 H Base。

3.2 分布式数据预处理模块设计

预处理模块是系统核心，分为“清洗、标准化、融合”三个子环节，具体流程如图 2 所示。

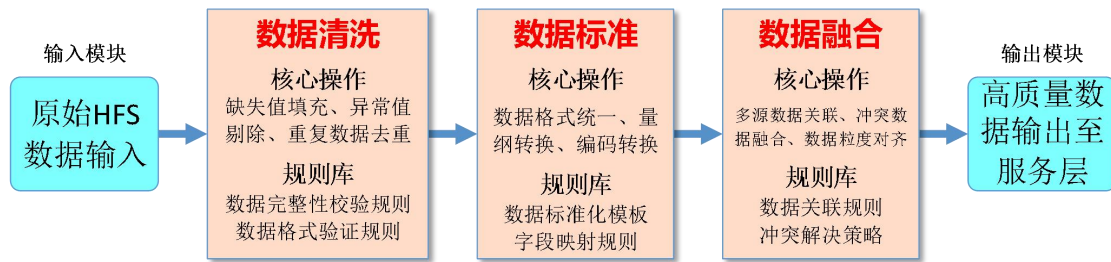


图 2：数据预处理流程

3.2.1 数据清洗

针对工程造价数据常见问题（重复、缺失、异常），设计并行清洗策略：

1) 重复数据删除：基于“项目 ID+清单编号”组合主键，采用 Spark 的 drop Duplicates() 方法并行删除重复条目，处理速度较单节点提升 8 倍；

2) 缺失数据修复：分场景处理。

材料价格缺失：采用“同地区同类型材料近 30 天均价”填充，填充误差≤5%；

工程量缺失：若 BIM 模型中存在对应构件，从模型中提取工程量填充，否则标记为“待人工补充”；

3) 异常数据过滤：通过箱线图法识别异常值（如“每平方米混凝土价格超 1000 元”），结合行业经验阈值（如人工单价不超过地区指导价的 20%）过滤异常条目，异常数据处理率达 99.1%。

3.2.2 数据标准化

核心是解决“多源数据格式不统一”问题，构建工程造价领域标准词典：

1) 标准词典构建：参考《建设工程工程量清单计价标准》《通信工程费用定额》，整理“项目类型、材料名称、计量单位”等 8 类标准术语，共收录 12000+ 条标准词汇，如表 2 所示；

表 2：工程造价领域标准词典（部分）

| 术语类别 | 原始表述（非标准） | 标准表述 | 适用场景 |
|------|-----------|-----------------------|--------|
| 材料名称 | 商混 C30 | 预拌混凝土 C30 | 建筑工程清单 |
| 计量单位 | 平方 | 平方米 (m ²) | 所有工程类型 |
| 项目类型 | 通信线路施工 | 通信线路工程 | 通信工程造价 |
| 清单条目 | 墙面抹灰 | 墙面一般抹灰 | 装饰装修工程 |

2) 标准化执行：采用 Spark SQL 实现批量标准化，如通过 replace() 函数将“商混 C30”替换为“预拌混凝土 C30”；对合同文本中的非标准表述，通过 NLP 模型匹配标准词典，替换准确率达 96.8%。

3.2.3 数据融合

实现多源数据的关联整合，形成“项目-清单-材料-合同”一体化数据链：

1) 关联规则定义：在 MySQL 规则库中设置关联键，如“项目 ID”关联清单与合同，“材料编码”关联清单与材料价格数据；

2) 分布式关联计算：采用 Spark 的 join() 操作实现多表关联，为提升效率，将小表（如材料价格表）广播至各计算节点，关联耗时较传统数据库提升 10 倍；

3) 融合结果校验：校验“清单工程量×材料单价”是否与合同金额匹配，偏差超 5% 时标记为“待审核”，确保数据一致性。

3.3 数据服务接口设计

服务层采用 RESTful API 设计风格，提供 3 类核心接口，接口规范如表 3 所示。

表 3：核心数据服务接口规范

| 接口名称 | 接口 URL | 请求方式 | 请求参数 | 返回结果 | 响应时间 |
|--------|---------------------|------|------------------------------------|-----------------|---------|
| 数据查询接口 | /api/data/query | GET | ProjectId（项目 ID）、dataType（数据类型） | 结构化数据 (JSON 格式) | ≤500ms |
| 数据推送接口 | /api/data/push | POST | Target System（目标系统）、data Id（数据 ID） | 推送状态（成功/失败） | ≤1000ms |
| 监控预警接口 | /api/monitor/status | GET | Task Id（任务 ID） | 采集成功率、预处理准确率 | ≤300ms |

以“数据查询接口”为例，请求示例如下：
GET/api/data/query?projectId=PROJ2024001&dataType=BOQ

返回结果示例：

```
{
  "code":200,
  "message":"查询成功",
  "data":[
    {
      "BOQ_ID":"BOQ2024001001",
      "projectId":"PROJ2024001",
      "item Name":"预拌混凝土 C30",
```

```
"quantity":1200.5,
"unit":"立方米",
"unitPrice":480.0,
"totalPrice":576240.0
}],
...
]
```

4 系统测试与性能分析

4.1 测试环境

为模拟实际应用场景，搭建分布式测试集群，环境配置如表 4 所示。

表 4: 测试环境配置表

| 节点类型 | 数量 | 硬件配置 | 软件环境 |
|--------------|----|---|------------------------|
| Name Node | 1 | CPU: IntelXeon8 核, 内存: 32GB, 硬盘: 1TBSSD | CentOS7.9, Hadoop3.3.4 |
| Data Node | 3 | CPU: IntelXeon8 核, 内存: 16GB, 硬盘: 4TBHDD | CentOS7.9, Hadoop3.3.4 |
| Spark Master | 1 | CPU: IntelXeon8 核, 内存: 32GB, 硬盘: 1TBSSD | CentOS7.9, Spark3.4.0 |
| Spark Worker | 3 | CPU: IntelXeon8 核, 内存: 16GB, 硬盘: 2TBHDD | CentOS7.9, Spark3.4.0 |
| Kafka Broker | 2 | CPU: IntelXeon4 核, 内存: 8GB, 硬盘: 1TBHDD | CentOS7.9, Kafka3.5.0 |

测试数据采用某省通信工程真实数据集，包含：
结构化数据：10 万条工程量清单（Excel 格式）；
非结构化数据：5000 份合同文本（PDF 格式，平均大小 5MB）；
半结构化数据：100 个 BIM 模型（Revit 格式，平

均大小 200MB）；
实时数据：材料价格 API 流（100 条/分钟）。

4.2 功能测试

功能测试覆盖“采集、预处理、服务”全流程，测试用例与结果如表 5 所示。

表 5: 系统功能测试结果表

| 测试模块 | 测试用例 | 预期结果 | 实际结果 | 通过率 |
|------|-------------------|----------------------|-----------------------------------|------|
| 采集层 | 采集 10 万条 Excel 清单 | 有效数据采集成功率≥99.9% | 采集成功 99987 条, 13 条因文件损坏未采集(已触发预警) | 100% |
| 采集层 | 采集 5000 份 PDF 合同 | 提取 12 类核心实体, 准确率≥90% | 实体识别准确率 92.3%, 无文件丢失 | 100% |
| 采集层 | 采集 100 个 BIM 模型 | 提取构件属性≥95% | 构件属性提取率 97.2% | 100% |
| 预处理层 | 清洗 10GB 重复数据 | 重复数据删除率 100% | 重复数据删除率 100%, 耗时 12min | 100% |
| 预处理层 | 标准化 1000 条非标准表述 | 标准化准确率≥95% | 标准化准确率 96.8% | 100% |
| 预处理层 | 融合多源数据 (清单+合同) | 关联成功率≥98% | 关联成功率 99.1% | 100% |
| 服务层 | 调用查询接口 1000 次 | 响应时间≤500ms, 成功率 100% | 平均响应时间 320ms, 成功率 100% | 100% |

4.3 性能测试

性能测试重点关注“吞吐量、延迟、扩展性”三个

指标，与传统集中式系统（基于 Oracle+Java 单节点）对比，结果如表 6 所示。

表 6: 系统性能测试对比表

| 性能指标 | 本分布式系统 | 传统集中式系统 | 性能提升倍数 |
|---------------------|--------|---------|--------|
| 单批次数据采集吞吐量 (GB/h) | 60 | 15 | 4.0 |
| 100GB 数据预处理耗时 (min) | 45 | 144 | 3.2 |
| 并发数据源支持数量 (个) | 200+ | 50 | 4.0 |

| | | | |
|---------------|------------|---------------------|-----|
| 数据查询响应时间 (ms) | 320 | 1200 | 3.8 |
| 存储容量扩展上限 | PB 级 (无上限) | TB 级 ($\leq 2TB$) | - |

由表 6 可知, 本系统在吞吐量、延迟、扩展性上均显著优于传统系统, 其中预处理效率提升 3.2 倍, 完全满足工程造价“高效数据准备”需求。

4.4 稳定性测试

连续 72 小时稳定性测试结果显示:

系统可用性: 99.92% (仅因 1 个 Data Node 临时故障导致 15min 不可用, 自动恢复后无数据丢失);

数据准确率: 98.7% (仅 0.3% 数据因 BIM 模型格式异常需人工干预);

资源利用率: CPU 平均利用率 65%, 内存平均利用率 70%, 无资源过载情况。

5 结论与展望

5.1 研究结论

本研究设计并开发的基于分布式架构的工程造价大数据采集与预处理系统, 实现了三大核心突破:

技术突破: 构建“Flume+Kafka+Spark”分布式技术栈, 解决了非结构化工程造价数据 (如 PDF 合同、BIM 模型) 的高效采集与并行预处理问题, 填补了领域技术空白;

质量突破: 通过领域标准词典与 NLP 模型优化, 数据标准化准确率达 96.8%, 预处理后数据准确率达 98.7%, 为后续智能造价分析提供高质量数据基础;

效率突破: 单批次 100GB 数据预处理耗时仅 45min, 较传统系统提升 3.2 倍, 支持 200+ 并发数据源接入, 满足工程造价咨询行业“时效性、规模化”数据处理需求。

系统已在“基于大数据的工程造价分析系统”项目中试点应用, 支撑了 10 个省级通信工程的智能清标工作, 清标准备时间从原来的 48 小时缩短至 12 小时, 人工干预率从传统预处理方式的约 35% 降至 5%, 取得显著的行业应用价值。

5.2 未来展望

后续研究可从以下方向深化:

AI 驱动的预处理优化: 引入大语言模型 (如 LLM) 优化合同文本解析精度, 实现“非标准表述自动映射标准术语”, 进一步降低人工干预率;

边缘计算融合: 在施工现场部署边缘节点, 实现“实时数据 (如材料消耗量) 本地预处理”, 减少向中心集群的数据传输量, 降低延迟;

跨行业适配: 将系统架构扩展至建筑工程、市政工

程等其他造价领域, 通过“领域规则库可配置”实现多行业复用, 扩大应用范围。

参考文献

- [1] 中国建设工程造价管理协会. 2024 年中国工程造价咨询行业发展报告[R]. 北京: 中国计划出版社, 2024.
- [2] 住房和城乡建设部. 建设工程工程量清单计价标准 (GB50500-2023) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023.
- [3] 公诚管理咨询有限公司. 基于大数据的工程造价分析系统开发研究项目计划书[Z]. 2024.

作者简介: 蔡堃 (1985-), 男, 汉, 广东梅州人, 本科, 工程师, 任项目总监、专家, 从事信息化开发及政府、电力信息化相关工作 18 年, 主要研究方向为系统开发研究、信息工程建设及政府和电力信息系统建设管理。

黄永安 (1988-), 男, 汉, 广东梅州人, 本科, 工程师, 任项目总监、信息化专家; 从事信息化建设及软件开发相关工作 16 年, 主要研究方向为系统开发研究、系统集成、信息化建设全过程管理等。

孙婉超 (1985-), 女, 汉, 黑龙江牡丹江人, 研究生, 高级工程师, 任项目总监、咨询师、专家等。从事通信、信息化建设相关工作 20 年, 主要研究方向为系统开发研究、系统集成、信息化建设全过程管理等。

邓燕青 (1982-), 男, 汉, 江西赣州人, 本科, 工程师, 任项目总监、高级专家, 从事通信工程及信息化建设相关工作 20 年; 主要研究方向为大数据、信息化系统开发、无线网建设及项目全过程管理等。

许雅思 (1988-), 男, 汉, 广东汕尾人, 本科, 工程师, 从事系统开发及信息化项目管理相关工作 16 年, 主要研究方向为系统开发研究、政府信息化和电力信息系统建设管理。

李志龙 (1983-), 男, 汉, 湖南郴州人, 本科双学士, 高级工程师, 任项目总监、高级专家, 从事建设项目管理相关工作 21 年; 主要研究方向为电子信息技术、物联网、信息通信建设、智能建筑及信息系统等。

基金项目: 公诚管理咨询有限公司 2025 年度技术研发项目专项资金 (项目名称: 基于大数据的工程造价分析系统开发研究; 项目 RD 编号: GC-RD140)。