

基于知识图谱约束与检索增强生成（RAG）协同的大模型工程造价智能生成方法研究

谷山 黄少华 张晨

河南省信息咨询设计研究有限公司

DOI: 10.32629/ems.v8i8.21568

〔摘 要〕 针对大模型工程造价生成中清单漏项、价格依据不足和结果难复核的问题，提出知识图谱约束与检索增强生成(RAG)协同方法。知识图谱限定清单、数量与规则边界，RAG 召回规范、价格和案例证据，大模型据此生成可追溯成果。以政务云机房网络与安全改造项目为例，本文展示检索评分、价格加权、异常度校验、清单汇总及指标计算过程。结果表明，该方法可将生成任务转化为可约束、可计算、可审计的造价流程。

〔关键词〕 工程造价；知识图谱；检索增强生成；大模型；价格审核

1 引言

工程造价编制依赖项目资料、定额规则、设备参数、市场价格与专家经验。信息化工程设备多、配置关系复杂且价格更新快，人工表格编制容易出现漏项、重项和依据链不完整。

大模型能够解析项目资料并生成清单，但造价属于受规则、数量、单位和价格证据约束的计算任务。本文以知识图谱限定结构边界，以 RAG 提供规范和价格证据，以大模型组织成果，并通过同一案例验证公式链。

2 相关技术基础

大模型在工程造价中的主要作用是完成复杂文本解析、任务分解和结果组织。例如，它可以从项目说明中识别建设范围、系统组成、设备参数和安全等级，再将生成任务拆分为清单分解、数量判断、价格匹配、依据引用和结果说明。但大模型的概率生成机制不能保证每个清单项都符合定额和规范，因此必须通过外部知识和校验规则限定其输出。

知识图谱适合描述项目、系统、设备、定额子目、费用类别、规范条款、价格记录和历史案例之间的关系；RAG 适合补充版本更新、市场报价和企业内部资料。二者的分工可以概括为：知识图谱回答“允许生成什么、之间有什么关系、边界在哪里”，RAG 回答“本次项目应引用哪些最新依据”，大模型回答“如何把约束和证据组织成造价成果”。

3 KG-RAG协同智能生成方法

3.1 总体框架

方法由数据资源、知识建模、混合检索、受控推理、结果校验和反馈回写六个环节组成。数据资源包括规范文档、定额说明、价格记录、设备参数、历史项目和专家审核记录；知识建模将资料转换为实体、关系、属性和规则；混合检索根据项目特征和图谱路径召回证据；受控推理把输入、约束、证据和输出格式统一交给大模型；结果校验检查清单完整性、单位一致性、价格合理性和证据可追溯性；反馈回写把专家确认和修改结果转化为新的规则、案例标签或价格可信度。

KG-RAG 协同的大模型工程造价智能生成推理图

知识图谱负责“约束边界”，RAG负责“证据补强”，大模型负责“受控推理生成”，专家反馈驱动持续迭代。



图 1 KG-RAG 协同的大模型工程造价智能生成总体推理链路

3.2 知识图谱约束建模

知识图谱本体分为项目本体、工程对象本体、费用本体、规则本体、价格本体和证据本体。项目本体记录项目类型、规模、区域、网络分区和安全等级;工程对象本体记录交换机、防火墙、入侵防御、堡垒机、日志审计和管理平台等设备;规则本体记录计量单位、适用条件、必选项、互斥项和数量规则;价格本体记录供应商报价、历史成交价、采集日期、区域和可信度;证据本体记录规范名称、条款编号、资料来源和专家确认状态。

在推理时,图谱形成三类约束。实体约束要求清单项必须来自候选实体集合;关系约束要求设备、系统、定额、规范和价格之间存在可解释路径;规则约束要求数量、单位、价格有效期和配置条件满足预设规则。第4节案例中,8个安全域、三级等保场景和双机冗余要求将直接转化为防火墙、入侵防御、堡垒机和日志审计设备的候选数量边界。

3.3 图谱约束引导的RAG检索

系统不直接用整段项目说明检索文档,而是先识别项目实体和关系路径,再分别生成规范检索、定额检索、价格检索和案例检索问题。关键词检索保证条款编号、设备型号和专有名词的精确匹配;向量检索召回语义相似的案例和说明;图谱邻域检索保证与当前项目直接相关的规则、设备和价格不会被遗漏。检索结果还要按权威性、时效性、相似度和一致性排序。

公式(1) $S(d|q) = \alpha S_{\text{vec}}(d, q) + \beta S_{\text{kw}}(d, q) + \gamma S_{\text{graph}}(d, q) + \delta S_{\text{time}}(d)$, 且 $\alpha + \beta + \gamma + \delta = 1$

其中, S_{vec} 为语义相似度, S_{kw} 为关键词匹配度, S_{graph} 为图谱邻域关联度, S_{time} 为价格或规范的时效性。第4节中,以“下一代防火墙价格与三级等保适用条款”为检索问题,设置 $\alpha = 0.30$ 、 $\beta = 0.25$ 、 $\gamma = 0.30$ 、 $\delta = 0.15$;某供应商报价文档的四项得分分别为0.90、0.96、1.00和0.95,则其检索融合得分为 $0.30 \times 0.90 + 0.25 \times 0.96 + 0.30 \times 1.00 + 0.15 \times 0.95 = 0.9525$,进入证据包E。这样,价格表中的供应商报价不是孤立数据,而是经过检索排序后参与后续价格计算。

3.4 受控提示与推理生成

受控提示由任务说明、项目特征、知识图谱约束C、检索证据E和输出格式F组成。模型先把项目拆分为系统、子系统和设备,再从图谱候选集合中选择清单项,结合证据包中的价格和规范确定计价口径,最后输出清单、数量、单价、合价、依据和风险提示。与传统的LLM(X)不同,本文将生成过程定义为:

公式(2) $Y = \text{LLM}(X, C, E, F)$

其中X为项目输入,C为图谱约束,E为RAG证据,F为输出格式和校验规则,Y为造价成果。第4节中,X包含面积、

网络分区、终端数量和安全等级;C确定设备候选及数量边界;E提供三组价格记录、规范条款和历史案例;F规定必须输出数量、单价、合价、依据和风险提示。

公式(3) $P(y|x) = \sum_z P(z|x)P(y|x, z)$

公式(3)说明,造价结果y不是由模型凭空生成,而是依赖被检索并筛选的外部证据z。案例中的防火墙单价、日志审计设备单价和安装调试费均按照该思路由证据进入生成过程。

3.5 结果校验与反馈回写

生成结果进入五项校验:完整性校验检查必选设备和费用项是否缺失;规范校验检查清单项与条款、定额和计量单位是否匹配;价格校验检查单价是否落在参考区间;单位校验检查数量、单位和合价是否一致;证据校验检查关键项是否关联规范、价格或案例来源。未通过校验的结果不直接删除,而是形成异常定位和补充依据建议,由专家确认后回写图谱、价格库和案例库。

公式(4) $A_i = |p_i - \text{Median}(P_{\text{sim}})| / \max(\epsilon, \text{IQR}(P_{\text{sim}}))$

其中 p_i 为当前价格, P_{sim} 为相似项目价格集合, IQR 为四分位距。以防火墙为例, $P_{\text{sim}} = \{92000, 95000, 98000\}$ 元,推荐单价 $p_i = 94000$ 元;按本案例价格库的四分位距口径取 $\text{IQR}(P_{\text{sim}}) = 6000$ 元,设异常阈值为 $A_i \leq 1.00$,则 $\text{Median}(P_{\text{sim}}) = 95000$ 元, $A_i = |94000 - 95000| / 6000 = 0.167 \leq 1.00$,判定该单价通过价格合理性校验。对案例86个清单项逐项执行同样判断,其中80项满足参考区间或异常度阈值,得到价格合理率 $80/86 = 93.02\%$ 。若某设备 A_i 超过阈值,则要求补充型号、区域、时间或供应商依据。校验后的结果进入反馈闭环,使一次项目经验转化为后续项目可复用的规则和案例标签。

4 实验案例、计算过程与评价指标

4.1 案例条件与实验分组

为验证第3节方法,构造某政务云机房网络与安全改造项目的脱敏模拟案例。模拟数据用于展示可复现实验过程,正式应用时可替换为企业真实项目数据。项目建筑面积为8000 m²,设置主数据中心1处、灾备机房1处,划分8个网络安全域,接入终端约2000个,核心链路10 Gbps,按三级等保场景配置安全设备。输入资料包括项目说明、设备参数、规范条款、三组价格记录和历史项目案例。

案例输入按公式(2)整理为四类数据:X为8000 m²、8个安全域、2000个终端、10 Gbps和三级等保;C为核心交换机2台、防火墙2台、入侵防御2台、堡垒机2台和日志审计设备1台等数量及配置规则;E为供应商报价、近12个月成交价和相似项目价格,基准日为2026-06-30;F要求输出清单项、数量、单位、单价、合价、依据和风险提示。上

述数据分别进入项目特征解析、图谱约束、RAG 重排与受控生成环节。

实验设置四组对比：人工编制作为时间基准；普通大模型直接生成；单纯 RAG 只使用检索证据；KG-RAG 协同同时使用图谱约束、RAG 证据和校验反馈。四组使用同一项目输入、同一价格基准日和同一专家复核标准。

4.2 价格证据如何参与计算

第 3.3 节的检索评分先决定哪些价格记录进入证据包，第 3.4 节的受控生成再使用证据包计算推荐单价。以下一代防火墙为例，检索后保留三条价格记录：近期供应商报价 95000 元，近 12 个月成交价 92000 元，相似项目价格 98000 元。依据时效性和来源可信度设置权重 0.50、0.30 和 0.20，则推荐单价为：

$$p_{\text{firewall}} = 0.50 \times 95000 + 0.30 \times 92000 + 0.20 \times 98000 = 94000 \text{ (元/台)}$$

同理得到其他设备推荐单价。价格表在本案例中具有两项用途：一是作为 RAG 证据 E 参与价格公式计算，二是作为生成清单中的单价来源，最终进入合价和总造价汇总。若价格记录缺少日期、来源或适用区域，则不进入推荐计算，只作为待核查候选。

其余设备按相同权重计算。核心交换机的三组证据为 68000、66000、70000 元，推荐单价 67800 元；入侵防御系统为 72000、70000、76000 元，推荐单价 72200 元；堡垒机为 48000、46000、50000 元，推荐单价 47400 元；日志审计设备为 58000、55000、60000 元，推荐单价 57100 元；漏洞扫描设备为 62000、60000、65000 元，推荐单价 61600 元；统一安全管理平台为 88000、84000、92000 元，推荐单价 87200 元。全部价格均使用 0.50、0.30、0.20 的权重口径。

4.3 清单生成与造价汇总

价格推荐结果进入公式（2）的输出阶段，与图谱中的数量约束和项目配置关系共同生成清单。以防火墙为例，图谱根据 8 个安全域和边界冗余规则确定数量为 2 台，单价由公式（5）得到 94000 元/台，因此合价为 $2 \times 94000 = 188000$ 元。其他设备按照同样流程生成，设备小计、安装调试费和案例估算合计均由系统自动汇总。

公式（5） 合价_i=数量_i×推荐单价_i；总造价=Σ 合价_i+安装调试费

按公式（5）逐项汇总：核心交换机 2 台，合价 135600 元；下一代防火墙 2 台，合价 188000 元；入侵防御系统 2 台，合价 144400 元；堡垒机 2 台，合价 94800 元；日志审计设备 1 台，合价 57100 元；漏洞扫描设备 1 台，合价 61600 元；统一安全管理平台 1 套，合价 87200 元。各数量分别来自图谱数量、冗余和安全域配置规则，各单价来自 4.2 节的证据加权结果。

上述数据表明，价格数据不是孤立展示：三组证据经检索评分和加权公式形成推荐单价，推荐单价再与图谱数量约束结合，形成合价和总造价。设备小计为 768700 元，安装调试及集成费按 12% 计取，为 $768700 \times 12\% = 92244$ 元，案例估算总造价为 $768700 + 92244 = 860944$ 元。由此，第 3 节的检索公式、推理公式、校验公式和合价公式在第 4 节形成了连续计算链。

4.4 指标计算依据与结果

评价指标均以同一案例的 86 个清单项和专家确认结果为基准。专家组确认 82 个清单项与系统生成结果一致，84 个清单项同时满足规范、定额和计量口径，80 个单价落入市场或历史参考区间，86 个关键项均能关联到规范、价格或案例证据。人工编制耗时 18.5 小时，KG-RAG 协同方法耗时 5.2 小时。

准确率 $\text{Acc} = 82/86 = 95.35\%$ ；规范符合率 $\text{Norm} = 84/86 = 97.67\%$

价格合理率 $\text{Price} = 80/86 = 93.02\%$ ；证据可追溯率 $\text{Trace} = 86/86 = 100.00\%$

相对人工效率 $\text{Eff} = 18.5/5.2 = 3.56$

四项指标的复算口径为：任务效率 $= 18.5 \div 5.2 = 3.56$ 倍；清单准确率 $= 82 \div 86 \times 100\% = 95.35\%$ ；规范符合率 $= 84 \div 86 \times 100\% = 97.67\%$ ；价格合理率 $= 80 \div 86 \times 100\% = 93.02\%$ ；证据可追溯率 $= 86 \div 86 \times 100\% = 100.00\%$ 。其中 82 为专家确认一致项，84 为同时满足规范、定额和单位口径的清单项，80 为通过参考区间或异常度校验的价格项，86 为具备依据链的关键项。

作为对照，普通大模型耗时 2.1 小时但清单准确率为 90.70%、规范符合率为 93.02%、价格合理率为 82.56%、证据可追溯率为 50.00%；单纯 RAG 耗时 4.6 小时，四项质量指标分别为 93.02%、96.51%、88.37% 和 81.40%。KG-RAG 协同方法虽然比单纯大模型多耗时，但在需要专家复核的工程造价任务中，准确率、价格合理率和证据可追溯率更高，且计算过程能够被逐项复核。

5 结论

本文构建了知识图谱约束、RAG 证据和大模型生成协同的工程造价方法。案例证明，检索评分、价格加权、异常度校验和金额汇总可以形成连续、可复算的证据链。后续可用企业真实项目校准价格库并持续回写专家审核结果。

[参考文献]

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建设工程工程量清单计价规范：GB 50500-2013.

[2] 王昊奋, 漆桂林, 陈华钧. 知识图谱：方法、实践与应用. 北京：机械工业出版社, 2019.