|  |  |
| --- | --- |
| ICS | 03.100.01 |
| CCS | A 20 |

|  |
| --- |
| MR |

中华人民共和国市场监管行业标准

XX/T XXXXX—XXXX

**特种设备风险防控知识图谱构建**

**与辅助决策技术框架指南**

**Technical Framework Guide for Knowledge Graph Construction and Decision Aids for Risk Prevention and Control of Special Equipment**

(点击此处添加与国际标准一致性程度的标识)

（征求意见稿）

XXXX - XX - XX发布

XXXX - XX - XX实施

国家市场监督管理总局  发布

目次

[前言 III](#_Toc200107280)

[引言 IV](#_Toc200107281)

[1 范围 1](#_Toc200107282)

[2 规范性引用文件 1](#_Toc200107283)

[3 术语和定义 1](#_Toc200107284)

[4 风险防控知识图谱构建与辅助决策系统 2](#_Toc200107285)

[4.1 系统路径 2](#_Toc200107286)

[4.2 系统活动 4](#_Toc200107287)

[4.3 系统主体 5](#_Toc200107288)

[5 特种设备风险防控范畴界定 7](#_Toc200107289)

[5.1 风险防控框架 7](#_Toc200107290)

[5.2 风险防控链条 7](#_Toc200107291)

[5.3 风险防控要素 7](#_Toc200107292)

[5.4 风险防控流程 8](#_Toc200107293)

[6 特种设备风险防控知识图谱构建与更新 9](#_Toc200107294)

[6.1 概述 9](#_Toc200107295)

[6.2 知识收集 9](#_Toc200107296)

[6.3 本体构建 9](#_Toc200107297)

[6.4 知识抽取 11](#_Toc200107298)

[6.5 知识融合 13](#_Toc200107299)

[6.6 知识存储 13](#_Toc200107300)

[6.7 知识评估 13](#_Toc200107301)

[6.8 知识更新 14](#_Toc200107302)

[7 基于知识图谱的风险防控辅助决策技术设计 14](#_Toc200107303)

[7.1 辅助决策核心原理 15](#_Toc200107304)

[7.2 辅助决策技术基础 16](#_Toc200107305)

[7.3 特种设备风险防控辅助决策痛点 16](#_Toc200107306)

[7.4 特种设备风险防控辅助决策类型 17](#_Toc200107307)

[7.5 特种设备风险防控辅助决策技术 18](#_Toc200107308)

[7.6 特种设备风险防控辅助决策流程 20](#_Toc200107309)

[7.7 特种设备风险防控辅助决策场景 21](#_Toc200107310)

[8 基于知识图谱的风险防控辅助决策系统开发与维护 23](#_Toc200107311)

[8.1 系统整体架构 23](#_Toc200107312)

[8.2 系统核心组件 23](#_Toc200107313)

[8.3 系统关键代码（Python示例） 23](#_Toc200107314)

[8.4 系统集成部署 29](#_Toc200107315)

[8.5 系统优化维护 29](#_Toc200107316)

[8.6 风险防控关键信息及策略 30](#_Toc200107317)

[附 录 A 31](#_Toc200107318)

[附 录 B 33](#_Toc200107319)

[附 录 C 34](#_Toc200107320)

[附 录 D 36](#_Toc200107321)

[附 录 E 37](#_Toc200107322)

[参考文献 39](#_Toc200107323)

1. 前言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由国家市场监督管理总局提出并归口。

本文件起草单位：中国特种设备检测研究院、中国矿业大学（北京）、北京邮电大学、北京信息科技大学、上海市特种设备监督检验技术研究院、福建省特种设备检验研究院、南京市特种设备安全监督检验研究院、中特检验集团有限公司。

本文件主要起草人：略。

1. 引言

基于知识图谱构建、决策方法设计与工作装备研发开展检验监管智能辅助决策。知识图谱构建以“设备-场景-规范”模型构建与表达为基础，运用基于神经网络、映射模型、表示学习等知识抽取、融合、更新方法，建立特种设备检验监管与应急多来源异质知识库。决策方法研究，从问的维度，运用多特征融合的方法建立决策意图与高频问题之间的映射关系，实现决策问题的准确理解；从答的维度，运用注意力机制、图神经网络等方法建立决策意图与知识库数据的关联匹配，实现决策答案的精确推荐。最后，对检验、监管工具进行功能模块化集成，利用传感器感知采集设备信息及环境参数，并自动实现检验监管过程中记录和知识的关联推荐，提高现场工作效率。在特种设备风险防控过程中，基于知识图谱的辅助决策技术是解决人机矛盾突出、基层检验监管人员专业知识和经验严重不足难题的有效路径。本文件面向检验、监管和应急场景的智能决策需求，解决不会干、干不好的问题，支撑异质知识经验数字化与关联匹配推荐。本文件制定为特种设备风险防控“设备-场景-规范”领域知识图谱构建与更新、检验监管辅助决策技术设计与系统开发提供框架指南。

特种设备风险防控知识图谱构建与辅助决策技术框架指南

* 1. 范围

本文件规定了特种设备安全风险防控知识图谱与辅助决策的术语和定义，给出了风险防控知识图谱与辅助决策的整体框架及范畴界定，提供了知识图谱构建与更新、辅助决策技术设计与系统开发、基于知识图谱的风险防控知识服务应用的框架指南。

本文件适用于特种设备安全风险防控知识图谱构建与辅助决策技术系统开发。

* 1. 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 24353-2022 风险管理 指南

GB/T 42131-2022 人工智能知识图谱技术框架

GB/T 42777-2023 基于文本数据的金融风险防控知识图谱构建技术框架指南

GB T 45081-2024 人工智能 管理体系

GB/T 45087-2024 人工智能 服务器系统性能测试方法

IEEE P2807-2022 Standard for Framework of Knowledge Graphs

IEEE P2807.3-2022 Guide for Electric-Power-Oriented Knowledge Graph

IEEE P2807.1-2024 Standard for Technical Requirements and Evaluating Knowledge Graphs

TSG 21-2016 固定式压力容器安全技术监察规程

* 1. 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

实体 **entity**

独立存在的对象。

[来源：GB/T 42131-2022, 3.2]

关系 **relationship**

实体与实体之间在特定时间、特定行为下产生的联系。

注：例如特种设备生产单位与特种设备之间的设计关系、制造关系、安装关系等。

[来源：GB/T 42131-2022, 3.11,有修改]

属性 **attribute**

实体或关系所具有的特性。

注：例如“特种设备生产单位”的属性包括企业名称、企业地址、企业电话等,“安全事故”的属性包括事故名称、事发地点等。

[来源：GB/T 42131-2022, 3.10,有修改]

本体 **ontology**

表示实体类型以及实体类型之间关系、实体类型属性类型及其之间关联的一种模型。

注：例如特种设备风险防控过程中实体类型、实体类型之间关系、实体类型属性类型及其之间关联模型。

[来源: GB/T 42131-2022, 3.8, 有修改]

知识图谱 **knowledge graph**

以结构化形式描述的知识元素及其联系的集合，对客观世界的概念、实体及其关系的结构化描述。

注：“特种设备风险防控知识图谱”指特种设备风险防控全周期过程中涉及的概念、实体及关系的结构化描述。

[来源: GB/T 42131-2022, 3.6, 有修改]

特种设备 **special equipment**

对人身和财产安全有较大危险性的锅炉、压力容器(含气瓶)、压力管道、电梯、起重机械、客运索道、大型游乐设施、场(厂)内专用机动车辆，以及法律、行政法规规定适用《特种设备安全法》的设备。

特种设备安全风险防控 **safety risk prevention and control of special equipment**

对特种设备生产（包括设计、制造、安装、改造、修理）、经营、使用、检验、检测和安全监督管理过程中可能出现的危险和危害因素进行辨识、评估、分级，并采取相应措施进行控制和管理，以降低事故发生概率和减轻事故后果的综合性工作。

风险防控辅助决策 **auxiliary decision-making for risk prevention and control**

在特种设备安全风险防控过程中，运用各种技术手段和方法，对特种设备安全风险进行识别、评估和分析，并基于分析结果为风险防控决策提供支持和建议。

活动 **activity**

特种设备风险防控知识图谱构建与辅助决策的流程节点。

应用程序接口 **application programming interface; API**

基于知识图谱的特种设备风险防控辅助决策系统中，预先定义好的、无需开发者关注服务的设计与实现就能便捷地访问相关服务的一组功能或功能的组合。

[来源: GB/T 42777-2023, 3.6, 有修改]

知识图谱与辅助决策系统供给方 **knowledge graph and auxiliary decision system provider**

基于数据、知识等构建特种设备风险防控知识图谱，基于知识图谱构建风险防控辅助决策系统，并提供风险防控辅助决策系统技术支持与应用服务的组织。

[来源: GB/T 42131-2022, 3.14, 有修改]

知识图谱与辅助决策系统集成方 **knowledge graph and auxiliary decision system integrator**

根据特种设备风险防控与辅助决策知识应用需求，整合风险防控知识图谱与辅助决策系统及技术，提供基于知识图谱的特种设备风险防控辅助决策应用系统及服务的组织。

[来源: GB/T 42131-2022, 3.15, 有修改]

知识图谱与辅助决策系统用户 **knowledge graph and auxiliary decision system user**

使用特种设备风险防控知识图谱辅助决策应用系统及配套服务支持以满足自身需求的组织或个人。

[来源: GB/T 42131-2022, 3.16, 有修改]

其他合作伙伴 **other partners**

为知识图谱与辅助决策系统供给方、集成方和用户提供系统构建和应用所必需的信息基础设施、数据、知识、工具、技术、标准和机制的组织。

[来源: GB/T 42131-2022, 3.17, 有修改]

* 1. 风险防控知识图谱构建与辅助决策系统
     1. 系统路径

特种设备风险防控知识图谱与辅助决策系统以全链条多主体为对象，以数据获取、数据分析、数据库构建、数据开发为主线，系统整体架构包括路径层级、活动层级与主体层级，如图1所示。



**图1 特种设备安全风险防控知识图谱与辅助决策技术整体框架**

按照数据与知识流转方向自下而上，路径层级包含基础层、知识图谱层、辅助决策层与目标层；活动层级包含风险防控范畴界定、风险防控知识图谱构建及更新、辅助决策系统构建及应用；主体层级包含系统供给方、系统集成方、系统用户与系统其他合作伙伴。

基础层

4.1.1.1 数据支撑层

数据支撑层是特种设备风险防控知识图谱与辅助决策系统构建的数据基础，主要包括特种设备全链条多主体内部数据源与外部数据源，数据形态包括结构化数据、半结构化数据与非结构化数据。

4.1.1.2 技术支撑层

技术支撑层是特种设备风险防控知识图谱与辅助决策系统构建的技术基础，主要包括云计算、大数据、物联网、移动互联网、人工智能、区块链、边缘计算、自然语言处理、大语言模型。

知识图谱层

知识图谱层是特种设备风险防控知识图谱与辅助决策系统的活动基础，主要包括知识抽取、知识融合、知识管理、知识挖掘、知识分析。

a) 知识抽取：基于技术支撑层的各类技术方法将数据支撑层的各类型数据通过知识抽取、本体模型构建、实例获取，提取特种设备风险防控相关数据，识别得到满足特种设备风险防控要求的知识要素。

b) 知识融合：基于知识初融合与知识匹配，融合特种设备风险防控知识要素，得到满足特种设备风险防控要求的知识体系。

c) 知识管理：知识管理层将知识抽取与知识融合层形成的知识要素及体系作为输入，基于知识图数据库存储、知识检索引擎、知识属性数据存储、知识元数据管理、知识分类等模块处理，提供特种设备风险防控知识图谱结果有效管理与高效访问路径。

d) 知识挖掘：知识挖掘层基于知识图谱实时查询、知识图谱动态检索、知识图谱离线查询、图形算法、深度学习、强化学习、社会计算等技术，提取得到标准化格式的图数据库挖掘结论，为基于知识图谱的特种设备风险防控辅助决策提供知识阈。

e) 知识分析：知识分析层以知识挖掘层为基础，进一步对知识进行分析整理，为特种设备风险防控辅助决策层提供检验风险点推荐、监察执法案例推荐、应急预案与处置方案推荐、作业智能问答支撑。

辅助决策层

4.1.3.1 基于知识图谱的特种设备风险防控辅助决策技术设计层

特种设备风险防控辅助决策技术设计层以技术支撑层（4.1.1.2）为基础，围绕特种设备检验场景风险点推荐、监察场景执法案例推荐、应急场景预案及方案推荐、作业智能问答等辅助决策点，建立包含知识图谱、自然语言处理、大语言模型、人工智能、大数据的风险防控辅助决策技术架构。

4.1.3.2 基于知识图谱的特种设备风险防控辅助决策系统构建层

特种设备风险防控辅助决策系统构建层以知识图谱层知识挖掘分析的结果为基础，运用风险防控辅助决策技术架构，建立基于知识图谱的特种设备风险防控辅助决策B/S系统。

4.1.3.3 基于知识图谱的特种设备风险防控辅助决策系统应用层

基于特种设备检验、监察、应急三大场景的实际业务，对基于知识图谱的特种设备风险防控辅助决策系统实践应用。

目标层

基于知识图谱层与辅助决策层实现特种设备风险防控，赋能特种设备安全水平提升，提供基于知识图谱的风险防控辅助决策技术方法开放性接口。风险防控关键点包括区域宏观风险、企业中观风险与设备微观风险。运用基于知识图谱的特种设备风险防控辅助决策系统，通过风险识别、风险关系挖掘、风险预警、风险预测、风险演化、风险管控等全链条处置策略，将风险等级与处理机制规范化供终端、相关系统使用。

* + 1. 系统活动

基于知识图谱的特种设备风险防控辅助决策系统的三类活动概述如下。

特种设备风险防控范畴界定

该组活动主要包括明确风险防控的对象、环节和目标，从而进一步明确风险防控的危险源、风险类型和涉及的重点岗位人员，并对风险控制技术和措施进行研究，形成基于知识图谱的风险防控技术研发方案，确定所需的基础数据、业务数据等数据源和分析结果要求。

特种设备风险防控知识图谱构建与更新

该组活动隶属于系统知识图谱层，知识图谱构建与更新的流程包括但不限于知识收集、本体构建、知识抽取、知识融合、知识存储、知识评估和知识更新。知识图谱构建，根据特种设备安全风险防控应用目标，对收集的数据进行清洗处理；通过多种方法从数据中识别提取实体、事件、关系和属性，将抽取的知识以三元组形式表示。知识图谱更新，为防止已构建的数据库存储知识过时陈旧，需要不断更新和扩充新的知识，在更新过程中还需剔除冗余数据。同时，根据前沿技术对系统运行的模型和性能不断优化。

风险防控辅助决策技术设计与系统开发

该组活动主要包括基于知识图谱形成特种设备安全风险智能防控应用，至少包括故障检测、关联分析、风险预警、模式识别、内容推荐、决策支持等方面。系统开发将应用转化为可以操作使用的软件，主要包括功能需求分析、软件系统设计、图谱数据集成、应用系统开发、系统部署测试等活动过程，最终为用户提供具备人机界面操作的服务，服务可以通过PC端、移动端以及网页页面集成提供，或者提供API访问支持用户二次开发。

* + 1. 系统主体

主体构成

对基于知识图谱的特种设备风险防控辅助决策系统活动的组织参与方进行细分（附录A），活动主要由以下四类参与者执行：

a) 风险防控知识图谱与辅助决策系统供给方：主要执行特种设备风险防控知识图谱与辅助决策系统的构建和提供活动；

b) 风险防控知识图谱与辅助决策系统集成方：主要执行特种设备风险防控知识图谱与辅助决策系统的工具或服务开发和集成活动；

c) 风险防控知识图谱与辅助决策系统用户：主要执行特种设备风险防控知识图谱与辅助决策系统的使用活动；

d) 其他合作伙伴：主要执行特种设备风险防控知识图谱与辅助决策系统开发和使用的支持活动。

每一类参与者有其主要执行的活动，同时可能执行涉及四类活动中的多项活动。

风险防控知识图谱与辅助决策系统供给方

4.3.2.1　系统供给方的输入

系统供给方包括特种设备全链条主体，承担特种设备风险防控知识图谱及辅助决策系统建立的发起及知识数据收集、专家经验标注等任务。风险防控知识图谱与辅助决策系统供给方的输入包括但不限于：

1. 特种设备风险防控知识图谱应用需求；
2. 特种设备风险防控知识图谱构建需求；
3. 特种设备风险防控业务数据；
4. 特种设备风险防控辅助决策技术；
5. 特种设备风险防控辅助决策知识；
6. 特种设备风险防控知识图谱质量指标；
7. 特种设备风险防控辅助决策质量指标。

4.3.2.2　系统供给方的输出

风险防控知识图谱与辅助决策系统供给方的输出包括但不限于：

1. 特种设备风险防控知识图谱构建方案；
2. 特种设备风险防控知识图谱；
3. 特种设备风险防控知识图谱基础工具；
4. 特种设备风险防控辅助决策系统构建方案；
5. 特种设备风险防控辅助决策系统；
6. 特种设备风险防控辅助决策系统技术支持；
7. 风险防控辅助决策系统应用服务。

风险防控知识图谱与辅助决策系统集成方

4.3.3.1　系统集成方的输入

系统集成方主要承担特种设备风险防控知识图谱知识建模、关系抽取、数据库部署与辅助决策应用系统开发等职责。风险防控知识图谱与辅助决策系统集成方的输入包括但不限于：

1. 特种设备风险防控知识图谱用户提供的输入：风险防控知识图谱需求、数据、知识、信息等；
2. 特种设备风险防控知识图谱供给方提供的输入：风险防控知识图谱基础工具、技术服务与应用服务等；
3. 特种设备风险防控知识图谱其他合作伙伴提供的输入：风险防控知识图谱应用系统开发与集成所需的支撑性数据、知识、技术和服务等；
4. 基于知识图谱的特种设备风险防控辅助决策系统用户提供的输入：风险防控辅助决策系统需求、数据、知识、信息等；
5. 基于知识图谱的特种设备风险防控辅助决策系统供给方提供的输入：风险防控辅助决策系统基础工具、技术服务与应用服务等；
6. 基于知识图谱的特种设备风险防控辅助决策系统其他合作伙伴提供的输入：系统开发与集成所需的支撑性数据、知识、技术和服务等。

4.3.3.2　系统集成方的输出

风险防控知识图谱与辅助决策系统集成方的输出包括但不限于：

1. 向特种设备风险防控知识图谱辅助决策系统用户提供的输出：应用系统、服务支持（如咨询服务、运维服务、应用服务、系统支持）等；
2. 向特种设备风险防控知识图谱辅助决策系统供给方提供的输出：风险防控知识图谱构建需求、风险防控辅助决策系统构建需求、行业知识、质量指标等。

风险防控知识图谱与辅助决策系统用户

4.3.4.1　系统用户的输入

特种设备风险防控知识图谱与辅助决策系统用户主要是基于知识图谱的特种设备风险防控辅助决策系统终端使用人员，以及利用API进行二次开发的行业组织。

a) 风险防控知识图谱与辅助决策系统使用者的输入包括但不限于：风险防控知识图谱与辅助决策应用系统的知识单元、推理决策模块及其他知识决策应用服务模块等；

b) 风险防控知识图谱与辅助决策系统维护者的输入包括但不限于：风险防控知识图谱与辅助决策应用系统的知识单元、推理决策模块、系统稳定性与安全性控制等。

4.3.4.2　系统用户的输出

a) 风险防控知识图谱与辅助决策系统使用者的输出包括但不限于：风险防控知识图谱与辅助决策系统应用与服务需求等；

b) 风险防控知识图谱与辅助决策系统维护者的输出包括但不限于：风险防控知识图谱与辅助决策系统应用过程新增、更新、备份或恢复后的知识单元、推理决策模块及其他知识决策应用服务模块等。

风险防控知识图谱与辅助决策系统其他合作伙伴

4.3.5.1　系统其他合作伙伴的输入

其他合作伙伴为基于知识图谱的特种设备风险防控辅助决策系统建设提供硬件和软件技术服务支持，包括但不限于IT服务基础设施、图数据库、开源框架、平台与软件开发等。其他合作伙伴的输入包括但不限于：风险防控知识图谱与辅助决策系统供给方、集成方和用户在活动执行过程中的支撑需求等。

4.3.5.2　系统其他合作伙伴的输出

其他合作伙伴的输出包括但不限于：

a) 风险防控辅助决策技术产品：用于支撑风险防控知识图谱与辅助决策系统构建的数字基础设施产品、技术工具和数据知识资源等，如图数据库、业务数据库或知识库等；

b) 风险防控辅助决策技术服务：用于支撑风险防控知识图谱与辅助决策系统构建的相关支持技术，如自然语言处理、社会计算、模式识别等技术，以及风险评估技术服务；

c) 风险防控辅助决策技术方案：用以指导基于知识图谱的特种设备风险防控辅助决策产品开发、系统部署、平台运营和资质维护等技术方案。

* 1. 特种设备风险防控范畴界定
     1. 风险防控框架

特种设备安全风险防控涉及设备全生命周期各环节信息，包括生产（材料及零部件、设计、制造、安装、充装、修理）、使用、检验、监督管理、报废等环节，通过对全链条数据进行抽取形成设备完整寿命周期的知识图谱，据此进行辅助决策。特种设备全链条风险防控框架如图2所示，主要数据类型和来源见附录C。



**图2 特种设备全链条风险防控框架**

* + 1. 风险防控链条

5.2.1**政府监管**。政府通过立法、政策和行政手段对特种设备领域进行规范和监督管理，以确保符合法律法规和公共利益。

5.2.2**行业监察**。特种设备领域的监察机构或第三方监察机构对特种设备和从业企业、人员的行为进行监督检查，以确保法规和规范得到遵守。

5.2.3**技术检验**。对特种设备设计制造过程以及在用设备进行科学和技术评估，以验证其是否符合特定的技术标准和要求。

5.2.4**企业管理**。特种设备相关企业内部管理活动，包括战略规划、财务管理、人员管理、生产规划等，以确保企业生产高效运作和可持续发展。

5.2.5**设备管理**。对企业使用的特种设备进行操作、维护、保养、报废的管理过程，以确保设备的正常运行和安全生产。

* + 1. 风险防控要素

5.3.1**人员风险**。特种设备从业人员相关的风险，包括人员素质、心理、行为及技能等方面，尤其是不安全行为容易引起设备损坏和安全事故。

5.3.2**设备风险**。特种设备本身的风险，包括设备设计制造及运行过程中产生的缺陷，以及随着设备的老化安全装置和控制措施失效风险，均能引起事故和增加危害程度。

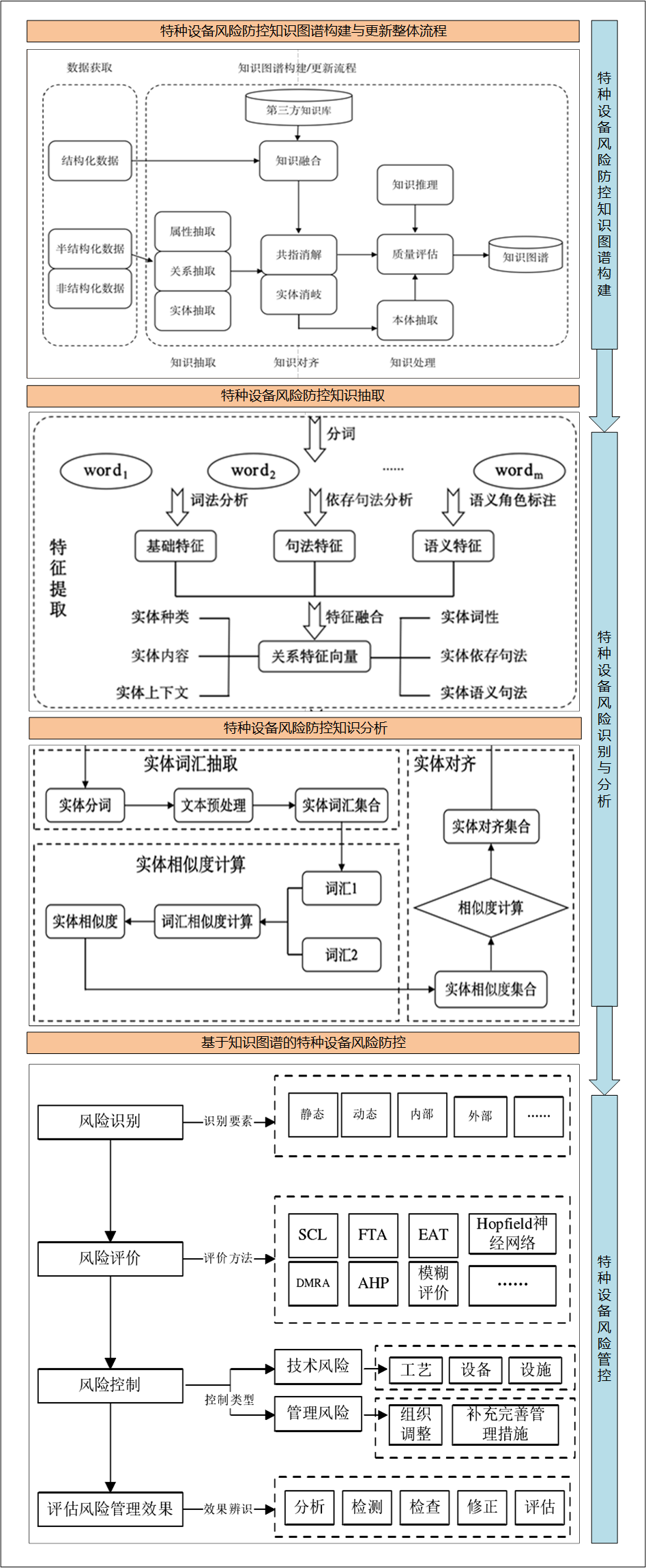
5.3.3**技术风险**。特种设备生产过程中选取技术方法的风险，包括技术标准、验收标准、操作指导书、流程作业书、作业规程等是否与实际相适应，技术方法的正确性与否直接关系设备的生产和运行质量。

5.3.4**管理风险**。特种设备相关企业的安全管理风险，包括管理制度漏洞、现场管理漏洞等风险，以及安全检查、生产工序、维护保养、持证上岗等质量风险控制措施是否得当。

5.3.5**环境风险**。不利于设备正常运行的环境，包括所处的自然环境，如温度、湿度、风载、雷击等，以及设备运行的介质状况、动力稳定性等因素，不利的环境因素也是导致事故的原因。

* + 1. 风险防控流程

根据“风险识别—风险评估—风险预警—风险管控”的风险防控链条，构建基于知识图谱的特种设备风险防控流程，如图3所示。



**图3 基于知识图谱的特种设备风险防控流程**

* 1. 特种设备风险防控知识图谱构建与更新
     1. 概述

特种设备风险防控领域知识图谱构建流程见图4。



**图4 特种设备风险防控知识图谱构建流程**

特种设备风险防控知识图谱构建具体步骤如下：

a) 本体构建：为标准知识获取环节提供具体抽取规则，需满足特种设备风险防控知识图谱应用方的需求；

b) 知识获取：基于构建完成的本体，从信息源中抽取与既定本体相匹配的知识内容，实现特种设备风险防控知识图谱构建；

c) 知识融合：对构建的特种设备风险防控知识图谱的实体对齐和知识合并，构建满足应用需求范围的特种设备风险防控知识图谱；

d) 知识存储：对构建完成的特种设备风险防控知识图谱进行存储，确立存储内容、存储方式及存储技术功能要求。

e）知识评估：对构建完成的特种设备风险防控知识图谱进行评估，保障知识图谱的知识的质量。

f）知识更新：对特种设备风险防控知识图谱中的内容进行定期或实时的修改和补充，以确保知识图谱能够反映最新的信息和数据。特种设备风险防控知识图谱的更新包括实体、属性及关系的更新。

* + 1. 知识收集

知识收集流程

知识收集流程包含但不限于：

a）需求分析：确定知识图谱构建的目标和需求以及明确需要收集的数据类型和数据源。

b）数据源识别：识别和列出所有可能的数据源以及数据源的类型，包括内部数据库、互联网、合作伙伴以及结构化、半结构化和非结构化数据类型。

c）数据采集：根据数据源的类型制定相应的数据收集策略。

d）数据预处理：对收集到的数据进行清洗，去除噪声和不一致性。

知识收集方法

知识收集方法包含但不限于：

a）数据库查询：直接从组织内部的数据库中查询和提取结构化数据，使用数据库查询语言，根据预定义的查询条件获取数据。

b）网络爬虫：开发或使用现有的网络爬虫工具，自动从互联网上抓取特种设备相关的数据，对抓取的数据进行解析，提取出有用的信息。

c）API接口和数据文件交换：通过API接口从合作伙伴或其他外部系统获取数据，接收通过数据文件（如CSV、JSON、XML等格式）传输的数据，并进行相应的解析和处理。

d）传感器和设备接口：直接从物理设备或传感器收集数据。这可能涉及到实时数据流的收集，如物联网（IoT）设备生成的数据。

* + 1. 本体构建

本体构建流程

特种设备风险防控领域本体模型构建流程见图5。



**图5 特种设备风险防控领域本体构建**

本体构建流程步骤包括但不限于：

a）确定特种设备风险防控领域本体范围；

b）收集特种设备风险防控领域数据；

c）列出本体核心要素及其概念；

d）确定现有可复用本体；

e）明确特种设备风险防控知识体系；

f）构建特种设备风险防控本体模型（附录B）。

知识建模方法

本体构建宜采用以下3种方法：

6.3.2.1自顶向下法。特种设备风险防控本体模型通常由特种设备专业技术人员与风险防控专家依据特种设备风险防控使用方的需求进行人工构建。从最顶层的概念开始构建顶层本体,然后细化实体属性类型和实体间关系类型，形成结构良好的本体模型。

6.3.2.2自底向上法。对已有的特种设备风险防控关键词进行归纳整合，定义实体属性类型和实体间关系类型，形成底层本体，明确层级关系，然后逐渐向上抽象形成顶层概念，构建顶层本体。

6.3.2.3混合法。将自顶向下法和自底向上法相结合，双向开展特种设备风险防控知识建模。

特种设备风险防控的本体模型

特种设备风险防控领域本体模型示例如图6。



**图6 特种设备风险防控领域本体模型**

特种设备风险防控本体模型应包含但不限于：

a）根危险源：可能直接或间接引发后续风险事件的根源性因素。

b）安全风险因素：在特种设备运行环境中，促使根危险源转化为安全风险事件的各种条件或因素。

c）安全风险事件：由根危险源和安全风险因素的共同作用而实际发生的不良事件。

d）安全风险防控措施：针对根危险源、安全风险因素和安全风险事件所制定的一系列预防、控制和应急措施。

* + 1. 知识抽取

实体抽取

#### 6.4.1.1　实体抽取流程

实体抽取流程应包含但不限于：

a) 根据特种设备风险防控领域本体模型中的实体分类体系构建实体标签集合；

b) 利用标注工具对已处理标准数据进行标注，形成风险防控数据集；

c) 设计符合具体任务需求的实体抽取算法并搭建实体抽取模型；

d) 进行实体抽取模型训练；

e) 利用训练完成的实体抽取模型进行推理，预测标准实体标签结果；

#### 6.4.1.2　实体抽取方法

实体抽取方法包括但不限于：

a) 基于规则的方法：使用手工编写的规则和预定义的模式来匹配实体。

b) 基于机器学习的方法：利用支持向量机、决策树等机器学习算法构建实体抽取模型，利用标注的风险防控数据集来训练模型，识别风险防控领域文本中的特征并进行实体识别。

c) 基于深度学习的方法：利用循环神经网络、大语言模型等深度学习算法构建实体抽取模型，利用标注的风险防控数据集来训练模型，识别风险防控领域文本中的特征并进行实体识别。

关系抽取

#### 6.4.2.1　关系抽取流程

关系抽取流程如下：

a) 根据特种设备风险防控领域本体模型中的关系分类体系构建关系标签集合；

b) 对已处理标准数据进行关系标注，关系与对应实体的链接标注；

c) 基于本体模型，人工专家分析不同关系类型的上下文特点，根据不同关系类型的上下文，针对性地设计关系获取方法；

d) 进行关系获取模型训练，可以与实体抽取模型进行联合训练，也可以在实体抽取模型的基础上进行流水线式训练；

e) 基于实体获取模型的结果，利用训练完成的关系获取模型进行推理，得到预测标准关系标签结果。

#### 6.4.2.2　关系抽取方法

关系抽取方法包括但不限于：

a) 基于规则的方法：基于依存句法树的结构，定义规则或模式，然后利用预定义的规则或模式来识别关系；

b) 基于机器学习的方法：基于标注好的数据集，采用支持向量机、决策树、逻辑回归等机器学习算法进行关系分类及预测。

c) 基于深度学习的方法：基于标注好的数据集，采用卷积神经网络、循环神经网络等捕捉上下文信息来抽取关系。

#### 6.4.2.3　关系抽取结果

特种设备风险防控知识图谱关系抽取示例如表1所示。

**表1 特种设备风险防控关系示例**

|  |  |
| --- | --- |
| 序号 | 关系名称 |
| 1 | 包含 |
| 2 | 应该 |
| 3 | 涉及 |
| 4 | 不安全行为是 |
| 5 | 不安全状态是 |
| 6 | 管理缺陷是 |
| 7 | 风险事件原因是 |
| 8 | 人员预防措施是 |
| 9 | 设备预防措施是 |
| 10 | 组织预防措施是 |

属性抽取

#### 6.4.3.1　属性抽取流程

属性抽取流程如下：

a) 根据特种设备风险防控本体模型中的属性分类体系构建属性标签集合，同时需要确定属性值的数据类型；

b) 对已处理标准数据进行标注，在实体标注的基础上对实体对应属性的类型、数值进行标注；

c) 设计符合需求的属性获取算法并搭建实体获取模型；

d) 给定数据集以及其对应的实体抽取结果，进行属性获取模型训练；

e) 基于实体获取模型的结果，利用训练完成的属性获取模型进行推理，获得风险防控领域实体的属性及其属性值。

#### 6.4.3.2　属性抽取方法

属性抽取方法包括但不限于：

a) 基于规则的方法：如将属性类型作为槽的槽填充算法、根据属性类型的文字特点进行文本聚类，筛选可能成为答案的词汇列表等；

b) 基于深度学习的方法：如利用序列标注同时在文本中标出属性类型以及属性值、针对不同属性类型及其值的特点使用提示学习进行针对性抽取等。

#### 6.4.3.3　属性抽取结果

特种设备风险防控知识图谱属性抽取示例如表2所示。

**表2 特种设备风险防控属性示例**

|  |  |
| --- | --- |
| 类别 | 属性名称 |
| 组织属性 | 企业名称 |
| 单位类型 |
| 企业资质 |
| 组织机构代码 |
| 企业地址 |
| 人员属性 | 人员姓名 |
| 人员类型 |
| 人员性别 |
| 人员代码 |
| 人员资质 |
| 设备属性 | 设备类别 |
| 设备型号 |
| 设备注册代码 |
| 制造时间 |
| 设备使用地点 |
| 环境属性 | 温度 |
| 湿度 |
| 作业环境 |
| 道路环境 |
| 人口密度 |

* + 1. 知识融合

特种设备风险防控概念层知识融合

概念层的特种设备风险防控知识融合应包括：

a) 本体对齐：对齐不同概念系统中的等效本体；

b) 关系对齐：对齐不同概念系统中的等效关系，对关系进行合并；

c) 属性对齐：对齐不同概念系统中的等效属性，合并本体属性类型和取值空间等。

特种设备风险防控实例层知识融合

实例层的特种设备风险防控知识融合应包括：

a) 识别等效实体：识别特种设备风险防控中等效实体，并将实体归属关系和属性进行合并；

b) 在实体之间建立链接：根据融合后概念体系，对融合后的实体建立实体间关系链接；

c) 识别等效属性/关系：识别特种设备风险防控中的等效和冗余属性，进行删减和融合；

d) 检查冲突，消除歧义。

* + 1. 知识存储

存储内容

特种设备风险防控知识存储内容包含但不限于：

a) 本体模型及建模流程输出的内容；

b) 特种设备风险防控领域知识抽取、知识融合输出的内容；

c) 特种设备风险防控知识图谱的版本和时间信息。

存储方式

标准知识存储方式包括不限于：

a) 基于表结构的存储：利用二维的数据表对特种设备风险防控知识图谱中的数据进行存储,如三元组表、类型表、关系数据库；

b) 基于图结构的存储：利用图的方式对特种设备风险防控知识图谱中的数据进行存储，如图数据库。

* + 1. 知识评估

评估内容

知识评估内容包含但不限于：

a）知识的正确性：评估知识图谱中信息的准确性，确保所有数据和事实都是正确的。

b）知识的时效性：检查知识图谱中信息的最新性，确保数据是最新的，反映当前的状态。

c）知识的覆盖率：评估知识图谱中信息的全面性，包括它覆盖的实体、属性和关系的广度。

d）知识的质量：综合考虑知识的正确性、时效性、覆盖率以及结构的稳定性，确保知识图谱的整体质量。

评估方法

评估的方法包含但不限于：

a）规则评估方法：通过预设的规则和标准，自动检测知识的正确性和时效性，完成知识格式、知识时效性以及知识覆盖领域等方面的验证。

b）人工评估方法：利用知识标注平台，由特种设备风险防领域专业人员对知识进行人工审核和评估，完成知识准确性、完整性以及相关性的审查。

c）智能评估方法：运用机器学习和自然语言处理等技术，对知识进行智能分析和评估，完成知识的准确性和稳定性验证。

* + 1. 知识更新

更新条件

更新条件包括但不限于：

a) 数据源变化；

b) 数据源质量提升；

c) 用户需求变化；

d) 用户使用反馈；

e) 实体变化；

f) 关系属性变化。

更新方法

#### 6.8.2.1　实体属性更新

特种设备风险防控知识图谱实体属性更新方法包括但不限于：

a) 识别需要新增的实体、属性；

b) 修改需要调整的实体、属性；

c) 删除已废止或不再需要的实体、属性；

d) 更新相关注释、约束和元数据；

e) 执行一致性、完整性检查，以确保模型质量。

#### 6.8.2.2　实体关系更新

特种设备风险防控知识图谱实体关系更新方法包括但不限于：

a) 自动推理和验证：利用推理引擎来自动检测和修复特种设备风险防控知识图谱中关系的不一致性或错误。

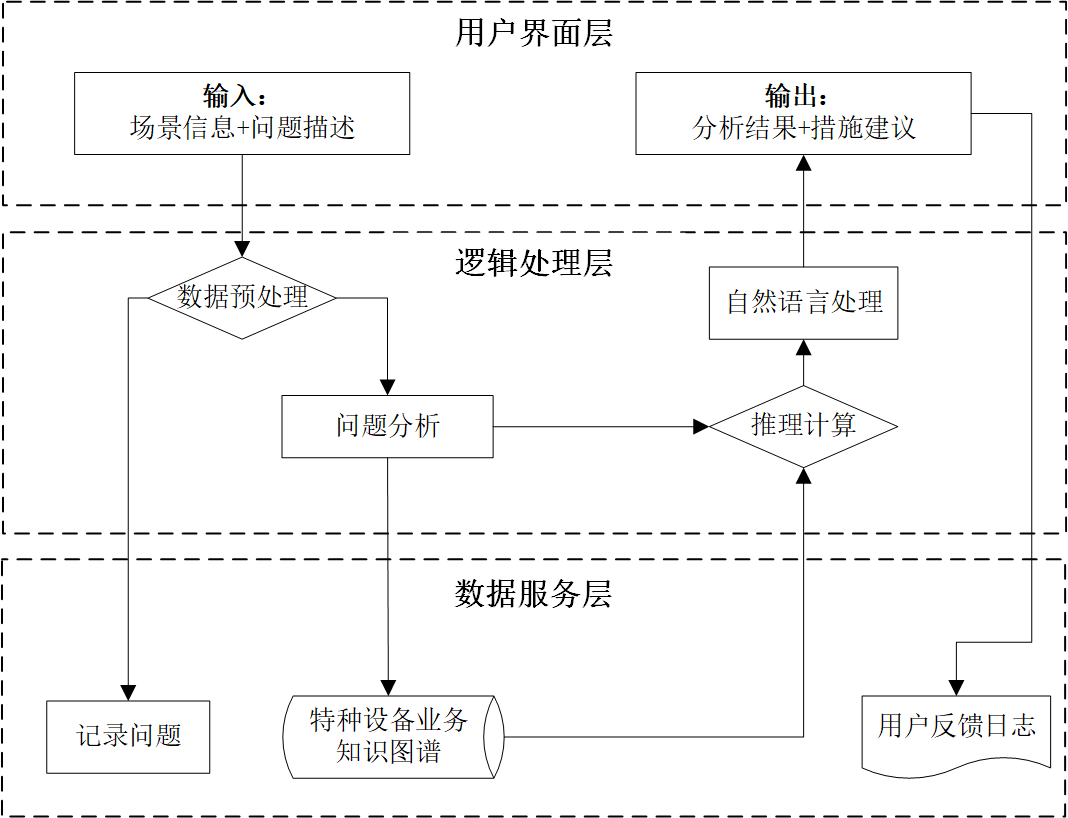
b) 基于机器学习的关系更新：利用机器学习算法（如实体链接、关系抽取等）来自动抽取新的实体和关系。

c) 人工编辑：允许用户通过界面提交新的实体、关系或修正错误的信息。

d) 接口更新：提供API接口，允许合作方或系统集成商通过程序利用API接口进行更新。

* 1. 基于知识图谱的风险防控辅助决策技术设计

辅助决策整体流程如图7所示。



**图 7 辅助决策整体流程**

* + 1. 辅助决策核心原理

基于知识图谱的特种设备风险防控辅助决策的核心原理是通过结构化关联多源异构数据，构建动态风险知识网络，实现风险因素的智能推理与预警。其核心原理可分为以下四个层次：

知识建模与融合层

a) 基于本体建模技术（如RDF、RDFS、OWL）构建特种设备领域本体，定义设备实体（如压力容器、起重机械等）、风险要素（如腐蚀、疲劳裂纹等）、环境等参数（如温度、压力等）间的语义关系；

b) 融合多模态数据：结构化数据（如检验检测报告、台账）、非结构化数据（如维修保养记录文本）、时序数据（如传感器数据流），通过自然语言处理（NLP）和时序分析抽取实体关系，形成三元组知识库。

动态风险图谱构建层

a) 基于图数据库（如Neo4j）实现拓扑存储，节点包括设备实体、故障模式、法规标准等，边关系包含“导致”“触发”“关联”等风险传导路径；

b）基于时序图计算技术对传感器数据进行实时图更新，动态反映设备状态变化（如焊缝应力值突变自动触发子图重构）。

风险要素推理引擎层

a) 应用图神经网络（GNN）进行风险传播建模，通过消息传递机制模拟故障沿设备关联网络的扩散过程；

b) 基于规则推理（SWRL规则）与概率推理（贝叶斯网络），实现“裂纹扩展率超阈值→潜在爆管概率上升”等混合推理。

决策生成与反馈层

a) 基于图嵌入技术（如TransE）计算风险相似度，匹配历史案例库中的处置方案；

b) 构建决策路径推荐模型，通过随机游走算法在知识图谱中生成多阶段防控策略（如“停机检查→材质分析→焊接工艺优化”链路）。

* + 1. 辅助决策技术基础

知识图谱与专家系统

**7.2.1.1 知识图谱作为专家系统的知识库**。传统专家系统的知识库通常基于规则（IF-THEN）或逻辑表示，而知识图谱提供更灵活的结构化知识表示方式，增强专家系统的语义理解和推理能力。

**7.2.1.2** **互补性**。专家系统依赖高质量知识，知识图谱可自动化构建或扩展知识库（如从文本中抽取实体关系），减少人工构建成本。

知识图谱与AI智能体

**7.2.2.1** **知识图谱为智能体提供背景知识**。智能体需理解环境或用户意图，知识图谱可作为其内部“记忆”或“常识库”。

**7.2.2.2** **动态知识更新**。智能体在交互中可动态更新知识图谱（如从对话中学习新知识），形成闭环学习系统。

专家系统与AI智能体

**7.2.3.1 专家系统作为智能体的子模块**。智能体可集成专家系统处理特定任务（如诊断、规划），而其他模块（如感知、学习）由不同技术实现；

**7.2.3.2** **智能化升级**。传统专家系统缺乏学习能力，而智能体通过机器学习动态优化知识库或推理策略。

* + 1. 特种设备风险防控辅助决策痛点

面向特种设备检验

面向风险防控，在特种设备检验场景下，通过技术手段识别设备潜在缺陷或风险，确保其安全运行。基于知识图谱、机器学习与专家系统，风险防控辅助决策关键点包括但不限于：

a) 缺陷检测与评估：基于历史数据或专家知识，判断检测到的裂纹、腐蚀、变形等缺陷是否达到风险阈值。例如：利用图像识别（AI）分析超声检测结果，自动标注高风险区域；

b) 检验周期优化：根据设备使用频率、环境腐蚀性、历史故障率等动态调整检验周期（如从固定周期改为状态监测触发）；

c) 检验方法选择：针对不同设备类型（如承压设备、机电设备）推荐最优检验方法（射线检测、声发射检测等）；

d) 剩余寿命预测：结合材料退化模型和实时传感器数据，预测设备剩余使用寿命，辅助更换或维修决策。

面向特种设备监管

面向风险防控，在特种设备监管场景下，通过宏观管控降低区域、行业、企业特种设备整体风险。基于大数据分析（如风险聚类）、知识图谱（如法规条款关联）与GIS（地理空间可视化），风险防控辅助决策关键点包括但不限于：

a) 风险分级与分类监管：根据设备类型、使用单位历史违规记录、事故统计等，划分风险等级（红/黄/绿区），差异化分配监管资源；

b) 动态预警：整合多源数据（检验报告、投诉记录、物联网传感器），识别异常模式并触发预警（如某区域电梯故障率骤升）；

c) 合规性审查：自动核对企业提交的自检报告与国家标准的一致性，标记潜在虚假申报；

d) 资源调度优化：在有限人力下，智能推荐最优监管对象和路线（如优先排查高风险化工企业压力管道）。

面向特种设备应急

面向风险防控，在特种设备应急场景下，快速响应突发事件，最小化事故损失。基于数字孪生（如事故模拟）、专家系统（如预案推理）与多智能体协同（如救援资源调度）。风险防控辅助决策关键点包括但不限于：

a) 事故根因分析：基于实时传回的事故现场数据（温度、压力、视频），快速推断可能的原因（如操作失误、材料疲劳）；

b) 应急预案匹配：根据事故类型（泄漏、爆炸、机械断裂）和设备特性，自动推荐应急预案（如疏散范围、堵漏技术）；

c) 资源调配决策：计算最优救援路径、就近应急队伍和物资储备点，考虑实时交通和天气条件；

d) 次生灾害预测：模拟事故连锁反应（如化学品泄漏后的扩散范围），辅助疏散和封锁决策。

辅助决策应用场景见附录D。

* + 1. 特种设备风险防控辅助决策类型

特种设备风险防控辅助决策系统通过整合知识图谱、专家系统和人工智能智能体等技术，能够实现多层次、动态化的风险识别与防控。特种设备风险防控系统可实现从“被动响应”到“主动预防”的范式转变，显著提升工业安全水平。特种设备风险防控辅助决策类型包括但不限于：

基于知识图谱的风险关联分析与推理（KG）

**7.4.1.1 技术核心**

知识图谱通过结构化存储特种设备领域实体（如设备类型、部件、故障模式、法规标准等）及其关系，构建语义网络，支持复杂关联推理。

**7.4.1.2 决策类型**

基于知识图谱的风险关联分析与推理，支持跨数据源（如IoT数据、维修日志）的语义关联，突破传统数据库的线性查询局限。决策类型包括但不限于：

a) 风险溯源与根因分析:通过图谱遍历分析设备故障与设计、制造、运维等环节的关联性。例如在锅炉爆炸事故中，图谱可关联材料缺陷、焊接工艺违规、检验记录缺失等多维度因素，快速定位根本原因。

b) 多模态风险预警：融合设备传感器数据、历史事故案例、环境参数等，触发基于规则的预警（例如“高温+压力波动→可能蠕变失效”）。

c) 合规性自动核查：将法规标准映射为图谱中的约束规则，自动校验设备检测记录是否合规。

基于专家系统的规则驱动型决策（ES）

**7.4.2.1 技术核心**

专家系统通过编码领域专家（如检验工程师、安全评估师）的经验，形成“IF-THEN”规则库或模糊逻辑模型。但是需要依赖人工规则维护，难以应对新型风险（如氢能设备新兴故障模式）。

**7.4.2.2 决策类型**

基于专家系统的规则驱动型决策类型包括但不限于：

a) 故障诊断与处置建议

- 规则示例：IF 起重机械钢丝绳断丝率>10% THEN 建议立即停用并更换；

- 结合不确定性推理（如贝叶斯网络）处理模糊信息（如“腐蚀程度：中度”）。

b) 风险评估分级：基于规则量化风险值（如RPN=频率×严重度×检测难度），划分红/黄/绿风险等级。

c) 应急响应预案生成：匹配事故类型（如压力容器泄漏），自动推送处置流程（隔离、泄压、人员疏散等）。

基于AI智能体的自适应动态决策（AI Agent）

**7.4.3.1 技术核心**

AI智能体通过强化学习（RL）、多智能体协同（MAS）等技术，实现环境感知-决策-反馈的闭环优化。

**7.4.3.2 决策类型**

基于AI智能体的自适应动态决策具备在线学习能力，可适应设备老化、环境变化等非稳态场景，决策类型包括但不限于：

a) 动态风险调控：智能体实时学习设备运行状态（如振动、温度时序数据），调整检测频率或运行参数。例如基于深度Q网络（DQN）优化电梯维保周期，平衡安全性与成本。

b) 多智能体协同防控：部署分布式智能体分别监控设备、环境、人员行为，通过协商机制（如拍卖算法）分配应急资源。

c) 风险预测与模拟：基于LSTM或Transformer预测剩余寿命（RUL），结合数字孪生模拟不同维护策略的效果。

融合型决策（KG+ES+AI Agent）

融合型决策包括但不限于：

a) 知识图谱增强的强化学习：将图谱中的领域知识（例如“焊接缺陷易导致疲劳裂纹”）作为强化学习的奖励函数约束，加速训练收敛；

b) 专家系统与智能体的协同：专家系统处理已知风险（规则覆盖），智能体探索未知风险（例如异常检测模型识别新型故障模式）；

c) 可解释性决策：结合图谱的语义推理路径与AI模型的SHAP值分析，生成人类可理解的决策依据（例如“建议停机的80%权重源于历史相似故障”）。

基于知识图谱、专家系统与AI智能体的辅助决策技术对比与适用场景：

**表3 融合型决策技术对比与适用场景**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 辅助决策类型 | 技术优势 | 典型应用场景 | 可解释性 |
| 1 | 知识图谱推理 | 跨域关联、可解释性强 | 事故调查、合规审计 | 高（可视化路径） |
| 2 | 专家系统 | 规则透明、响应快速 | 标准化故障诊断、风险评估 | 极高（规则追溯） |
| 3 | AI智能体 | 自适应优化、处理非线性关系 | 动态调度、预测性维护 | 低（需XAI增强） |

* + 1. 特种设备风险防控辅助决策技术

在特种设备风险防控辅助决策中，基于知识图谱、专家系统和人工智能智能体三种技术视角，可构建多层次、动态化的智能决策支持体系。风险防控智能辅助决策技术包括但不限于：

知识图谱视角：风险知识的结构化建模与推理

**7.5.1.1 本体构建与知识融合**

a) 建立特种设备领域本体（如锅炉、压力容器、电梯等）：整合设备属性、故障模式、事故案例、法规标准等异构数据（如传感器数据、检测报告、历史维修记录），采用OWL、RDF等标准实现语义化建模，解决数据孤岛问题。

b) 多源数据融合：整合设备检验报告（结构化）、维修记录（半结构化）、行业案例（非结构化），通过实体对齐（如BERT-EM）和关系抽取（如REBEL算法）构建动态更新的知识库

**7.5.1.2 动态关系推理**

a) 路径推理：基于图神经网络（GNN）或概率图模型（如贝叶斯网络）挖掘设备状态参数与风险事件的隐含关联（如"温度异常→材料疲劳→焊缝开裂"的因果链），支持风险传播路径预测。

b) 时序知识图谱：结合设备生命周期数据（设计、制造、使用等），利用T-GAP模型预测老化引发的风险演变趋势。

**7.5.1.3 知识增强的表示学习**

使用TransE、KG-BERT等嵌入方法将设备知识转化为低维向量，结合LSTM或Transformer模型实现风险预警（如通过嵌入相似性匹配历史相似故障案例）。例如：构建"设备-缺陷-环境-人员"多维关联图谱，当检测到某压力容器壁厚数据异常时，自动关联同类设备在相同腐蚀环境下的历史失效模式，推荐针对性检测方案。

专家系统视角：规则驱动的风险诊断与决策

**7.5.2.1 混合规则引擎**

a) 确定性规则：编码标准规范中的硬性条款（例如“安全阀校验周期≤1年”）。

b) 不确定性推理：采用D-S证据理论/模糊逻辑（Fuzzy CLIPS）处理“轻微泄漏”“中度磨损”等定性描述，处理传感器数据的不完备性,定义隶属度函数量化风险等级。

**7.5.2.1基于案例推理（CBR）**

基于相似度算法（如改进的KNN）检索历史事故案例库，复用已有处置方案。例如，通过特征加权匹配当前电梯困人事件与过往案例的相似情境，输出处置建议。

**7.5.2.1 可解释性架构**

可解释性：通过决策树（DT）可视化规则触发链条，采用反向链推理（Backward Chaining）生成风险判定依据的推理链，满足监管合规要求（如特种设备安全技术规范对决策透明性的要求）。例如，当起重机载荷传感器超限时，系统依次触发"超载保护规则→结构应力计算规则→应急预案匹配规则"，输出分级处置建议并解释逻辑路径。

人工智能智能体视角：自主协同的风险防控

**7.5.3.1 多智能体系统（MAS）架构**

**a) 感知层智能体**：物联网设备代理（如声发射传感器Agent）实时采集数据，通过联邦学习共享局部模型（保护隐私）。

**b) 决策层智能体**：采用强化学习（PPO算法）动态优化检验策略，平衡“停机成本”与“风险损失”。

**c) 多元综合智能体**：部署设备监测Agent（实时数据分析）、风险评估Agent（动态概率计算）、决策优化Agent（多目标权衡）等，通过联邦学习实现分布式协同。例如，燃气管道多个监测节点Agent局部建模后全局聚合风险模型。

**7.5.3.2 强化学习策略优化**

构建以"风险损失最小化+维护成本最低"为奖励函数的RL框架，训练智能体在设备停机检测与持续运行间做出最优决策（如基于DQN的预防性维护策略）。

**7.5.3.3 人机协同机制**

采用对话式AI（如大语言模型）构建自然语言交互接口，将专家经验反馈纳入智能体策略迭代（Online Learning），形成闭环学习系统。在化工厂压力管道群监测中，多个智能体自主协商决策：局部腐蚀Agent提议停机检修，而生产调度Agent建议降负荷运行，最终通过拍卖算法达成帕累托最优解。

**7.5.3.4自适应学习机制**

**a) 在线学习**：基于数字孪生的仿真环境（如Ansys+Python协同）训练智能体，模拟极端工况下的决策效果。

**b) 人机协作**：通过逆强化学习（IRL）从专家操作中反推风险偏好，修正奖励函数（如将“保守维保”设为高权重）。

融合视角

**7.5.4.1 风险识别。**知识图谱提供先验约束，提升深度学习模型在小样本场景下的泛化能力（如Few-shot Learning用于罕见故障识别），抽取设备关联隐患（如“某型号电梯门锁故障率上升”），触发ES规则库生成初步预警。

**7.5.4.2 动态知识更新。**通过智能体实时交互数据自动触发知识图谱的增量更新（如Neural Theorem Provers修正过时规则）。

**7.5.4.3 风险评估。**智能体调用蒙特卡洛模拟计算失效概率，KG提供关联法规要求（如GB 7588-2003），综合输出风险等级。

**7.5.4.4 决策生成。**ES推荐标准处置流程，智能体基于实时数据动态调整。

**7.5.4.5 反馈优化。**处置结果反哺KG，形成闭环学习。

**7.5.4.6 装备部署。**轻量化知识图谱部署在边缘设备（如电梯物联网终端），复杂推理交由云端专家系统，实现低延迟响应。

辅助决策典型技术栈：

**表4 典型技术栈**

|  |  |
| --- | --- |
| 技术层级 | 可选工具/算法 |
| 知识构建 | Neo4j, Apache Jena, Protegé |
| 规则引擎 | Drools, CLIPS, TensorFlow Lattice |
| 智能体框架 | ROS, Microsoft Autogen, RLlib |
| 多模态融合 | GraphSAGE, Transformer-XH (跨模态注意力) |

* + 1. 特种设备风险防控辅助决策流程

融合知识图谱（KG）、专家系统（ES）与人工智能智能体（AI Agent）的特种设备风险防控辅助决策流程为“数据→知识→决策→反馈”的闭环，分为决策层级、决策流程与关键技术：

决策层级

**7.6.1.1 知识图谱层**

a) 结构化知识库构建：整合设备参数（如压力容器材质、设计寿命）、历史事故案例、法规标准、环境数据（温湿度/腐蚀性）;

b) 动态关系挖掘：通过图神经网络（GNN）分析设备失效链（如“腐蚀→壁厚减薄→破裂”）;

c) 行业知识融合：接入第三方数据库（如化学品腐蚀特性库）。

**7.6.1.2 专家系统层**

a) 规则引擎：基于IF-THEN规则（如IF 检测到裂纹长度>5mm THEN 触发停机检查）;

b) 不确定性推理：采用模糊逻辑处理传感器噪声数据（如振动值“偏高”的模糊判定）;

c) 案例推理（CBR）：匹配历史相似案例（如某化工厂反应釜超压事故处置方案）。

**7.6.1.1 AI智能体层**

a) 检验检测智能体：实时分析传感器数据（声发射、红外热成像）；

b) 预测预警智能体：使用LSTM预测剩余寿命（输入：历史应力数据+腐蚀速率）；

c) 决策分析智能体：基于强化学习（RL）动态优化检修策略（平衡停机成本与风险）。

决策流程

**7.6.2.1 知识图谱构建**

a) 本体设计：

- 定义核心实体类（设备、部件、风险、法规等）

- 建立实体间关系（"导致"、"预防"、"关联"等）

b) 知识抽取：

- 结构化数据直接映射

- 非结构化数据使用NLP技术（实体识别、关系抽取）

- 专家经验人工录入

c) 知识融合：

- 实体对齐（消除歧义）

- 冲突消解（解决知识矛盾）

- 质量评估（置信度计算）

d) 知识存储：

- 采用图数据库（Neo4j、Nebula等）

- 建立多维度索引

**7.6.2.2 数据感知阶段**

a) 物联网设备实时采集数据（压力、温度、振动等），通过边缘计算节点进行异常检测（如孤立森林算法）;

b) 自然语言处理（NLP）解析维修报告文本（如“法兰密封泄漏”→实体链接至知识图谱）。

**7.6.2.3 风险评估阶段**

a) 知识图谱推理：定位当前设备状态节点（如“反应釜R-101”→关联“高温氢腐蚀”风险）；

b) 专家系统评分：根据规则计算风险值（失效概率×后果严重度）；

c) 智能体模拟：如通过数字孪生仿真极端工况下的失效路径。

**7.6.2.4 智能体分工**

a) 监测智能体：

- 实时数据流处理

- 异常检测（使用LSTM、CNN等模型）

- 初级预警生成

b) 诊断智能体：

- 故障模式识别

- 根本原因分析

- 风险概率计算

c) 决策智能体：

- 多目标优化（安全性、经济性、合规性）

- 方案生成与排序

- 不确定性处理

d) 学习智能体：

- 在线学习（适应新风险模式）

- 经验积累（案例库扩充）

- 模型优化（参数自动调整）

**7.6.2.5 决策生成阶段**

a) 多目标优化：AI智能体生成候选方案（如“立即停机”“降压运行”“72小时内复检”），评估经济性/安全性/合规性权重；

b) 专家系统验证：检查方案是否符合检规标准等；

c) 人机协同决策：向管理员推送Top 3方案（附解释性分析，如“方案2可降低风险87%但增加成本15万元”）。

**7.6.2.6 反馈学习阶段**

a) 记录实际处置效果，通过在线学习更新知识图谱，如新增“某型号安全阀在pH>8时故障率上升”；

b) 强化学习智能体调整决策策略（如发现某类误报频繁，则提高传感器阈值）。

关键技术

**7.6.3.1 知识推理技术**

知识推理技术包括但不限于：

a) 基于规则的推理（RBR）；

b) 基于案例的推理（CBR）；

c) 基于本体的推理（OBR）；

d) 混合推理机制。

**7.6.3.2** **风险预测技术**

风险预测技术包括但不限于：

a) 时序预测（Prophet、Transformer）；

b) 故障预测与健康管理（PHM）；

c) 图神经网络（GNN）用于风险传播分析。

**7.6.3.2 决策优化算法**

决策优化算法包括但不限于：

a) 多目标优化（NSGA-II）；

b) 博弈论方法（多方利益平衡）；

c) 不确定性决策算法（模糊逻辑、粗糙集）。

应用示例：锅炉爆炸风险防控

a) 数据输入：红外检测发现炉管局部温度达600℃（正常值≤550℃）;

b) 知识图谱查询：关联到“材料12CrMoVG在600℃时抗拉强度下降40%”;

c) 专家系统触发：匹配GB/T 16507.4条款要求紧急停炉;

d) 预测智能体：剩余强度仅够维持4小时（95%置信度）;

e) 决策智能体：推荐“30分钟内逐步降压停炉”方案（比立即停炉减少热冲击损伤）。

* + 1. 特种设备风险防控辅助决策场景

宏观场景

风险防控辅助决策宏观应用场景包括但不限于表5所示内容。

**表5 典型风险防控应用场景**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 应用场景 | | 输入项 | 计算逻辑 | 输出可应用结果 |
| 风险智能识别 | 区域风险 | 企业所在地区信息 | 通过企业所在地区等资料收集，检索出重点监管区域 | 输出需要重点关注的地区、风险值的大小 |
| 企业风险 | 企业日常记录、行政处罚记录 | 通过企业日常记录、企业监管记录等资料，建立企业风险评价模型 | 输出需要重点关注的企业、企业黑名单、企业风险因素 |
| 设备风险 | 设备故障信息 | 通过设备信息及相关的关联关系进行分析，对设备进行全面的分析评估，发现潜在风险 | 输出设备关键风险因素、设备监察重点 |
| 人员风险 | 人员信息、人员违规记录 | 通过人员信息及相关的关联关系进行分析，对设备进行全面的分析评估，发现潜在风险 | 输出人员相关的因素、重点关注人群信息 |
| 风险智能预警 | 监控名单 | 设备风险信息、人员风险信息、企业风险信息 | 通过知识图谱挖掘技术，确定出重点监控名单 | 输出企业重点监控名单、设备重点监控名单、人员重点监控名单 |
| 事故应急处置 | 阈值管理 | 设备风险信息、人员风险信息、企业风险信息 | 通过图分析与图挖掘技术对历史风险值进行分析，完成阈值的确定 | 输出风险管控阈值 |
| 关联分析 | 事故案例信息 | 通过知识图谱挖掘分析表面上没有实质关联关系的风险因素，挖掘潜在风险关联关系 | 输出风险关联信息 |
| 预防管控 | 事故应急预案信息、事故案例信息 | 通过图分析与图挖掘技术对历史风险的预防控制措施进行分析，形成风险的控制措施 | 输出预防控制措施 |
| 应急救援 | 应急预案信息 | 利用图相关技术，完成应急救援方案的推荐 | 输出应急救援的流程 |

微观场景

风险防控辅助决策模型微观应用场景包括但不限于表6所示内容。

**表6 典型风险防控应用场景**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 场景名称 | 输入项 | 决策逻辑 | 输出项 |
| 企业资源条件有效性监测 | 企业/自然人标识信息 | 通过对企业属性及所拥有人员、设备、资料及经营情况进行了解，对企业是否持续满足资源条件进行全方位分析，发现潜在的风险，给出风险防控措施。 | 企业属性资源条件符合性、风险防控措施。 |
| 企业重大隐患风险监测 | 企业/自然人标识信息 | 通过对企业人员持证、设备检验检测情况、设备使用维护记录、企业管理状况等了解，对企业是否存在重大隐患进行分析，发现潜在的风险，给出风险防控措施。 | 企业存在重大隐患情况、风险防控措施。 |
| 设备风险分析 | 设备标识信息 | 根据设备销售、生产、监督检验、定期检验/检测、日常使用维护保养、运行监测等信息进行了解，对该设备存在风险的等级进行分析，给出风险防控措施。 | 设备风险状况、防控措施。 |
| 作业人员风险分析 | 自然人标识信息 | 根据人员持证条件，了解人员被聘单位、被聘岗位、专业技术等情况，对作业人员存在的风险行为进行分析，给出防控措施。 | 人员风险行为、防控措施。 |

* 1. 基于知识图谱的风险防控辅助决策系统开发与维护
     1. 系统整体架构

数据层

收集特种设备相关的多源异构数据，包括设备基本信息、检验报告、法规标准、事故案例等，通过数据清洗、预处理等操作，构建知识图谱所需的数据基础。

知识图谱层

利用命名实体识别、关系抽取等技术，从数据中提取实体、关系和属性，构建特种设备知识图谱，包括设备本体、检验机构、使用单位、事故原因等实体以及它们之间的关联关系。

专家系统层

将特种设备领域的专家经验、规则知识进行形式化表示，建立规则库和推理机。根据输入的设备状态信息或问题，通过匹配规则库中的规则，进行推理和判断，给出相应的风险评估结果或决策建议。

人工智能智能体层

基于深度学习和强化学习等技术，训练智能体模型，使其能够理解自然语言问题，与知识图谱和专家系统进行交互，实现对复杂问题的自动解答和决策支持。

应用层

开发用户界面，提供风险查询、决策建议、知识浏览等功能，使用户能够方便地使用系统进行特种设备风险防控的辅助决策

* + 1. 系统核心组件

风险防控辅助决策系统的核心组件：

**a) 知识图谱系统**：存储设备、风险因素、法规标准等实体及其关系;

**b) 专家规则系统**：基于行业专家经验的风险评估规则库;

**c) 智能决策引擎**：综合知识图谱和专家规则进行风险评估;

**d) 智能体协调器**：管理多个专业智能体的协作;

**e) 数据接口层**：与设备监测系统、企业ERP等数据源对接。

* + 1. 系统关键代码（Python示例）

知识图谱构建

风险防控辅助决策系统知识图谱构建代码示例：

from py2neo import Graph, Node, Relationship

class EquipmentKnowledgeGraph:

def \_\_init\_\_(self, uri, user, password):

self.graph = Graph(uri, auth=(user, password))

def create\_equipment\_node(self, equipment\_id, equipment\_type, properties):

equipment = Node("Equipment",

id=equipment\_id,

type=equipment\_type,

\*\*properties)

self.graph.create(equipment)

return equipment

def create\_risk\_node(self, risk\_id, risk\_name, risk\_level):

risk = Node("Risk",

id=risk\_id,

name=risk\_name,

level=risk\_level)

self.graph.create(risk)

return risk

def create\_relationship(self, node1, node2, rel\_type, properties=None):

relationship = Relationship(node1, rel\_type, node2, \*\*properties or {})

self.graph.create(relationship)

return relationship

def query\_related\_risks(self, equipment\_id, depth=2):

query = """

MATCH (e:Equipment {id: $equipment\_id})-[\*1..%d]-(r:Risk)

RETURN r

""" % depth

return self.graph.run(query, equipment\_id=equipment\_id).data()

# 示例用法

kg = EquipmentKnowledgeGraph("bolt://localhost:7687", "neo4j", "password")

boiler = kg.create\_equipment\_node("EQ001", "Boiler", {"manufacturer": "ABC", "install\_date": "2020-01-01"})

corrosion\_risk = kg.create\_risk\_node("RK001", "Corrosion", "High")

kg.create\_relationship(boiler, corrosion\_risk, "HAS\_RISK", {"probability": 0.3})

专家系统构建

class Expert Rule System:

def \_\_init\_\_(self):

self.rules = self.\_load\_default\_rules()

def \_load\_default\_rules(self):

return [

{

"name": "high\_temperature\_risk",

"conditions": [

{"field": "temperature", "operator": ">", "value": 300},

{"field": "pressure", "operator": ">", "value": 2.5}

],

"output": {"risk": "Overheating", "level": "High", "action": "Immediate shutdown"}

},

{

"name": "corrosion\_risk",

"conditions": [

{"field": "corrosion\_rate", "operator": ">", "value": 0.1},

{"field": "age", "operator": ">", "value": 10}

],

"output": {"risk": "Corrosion", "level": "Medium", "action": "Schedule inspection"}

}

]

def evaluate(self, equipment\_data):

matched\_rules = []

for rule in self.rules:

is\_matched = True

for condition in rule["conditions"]:

field\_value = equipment\_data.get(condition["field"])

if not self.\_compare(field\_value, condition["operator"], condition["value"]):

is\_matched = False

break

if is\_matched:

matched\_rules.append(rule["output"])

return matched\_rules

def \_compare(self, actual, operator, expected):

if actual is None:

return False

if operator == ">":

return actual > expected

elif operator == "<":

return actual < expected

elif operator == "==":

return actual == expected

elif operator == ">=":

return actual >= expected

elif operator == "<=":

return actual <= expected

elif operator == "!=":

return actual != expected

return False

# 示例用法

rule\_system = ExpertRuleSystem()

equipment\_data = {"temperature": 320, "pressure": 2.6, "corrosion\_rate": 0.05, "age": 8}

results = rule\_system.evaluate(equipment\_data)

print(results) # 输出匹配的规则结果

智能决策引擎

class RiskDecisionEngine:

def \_\_init\_\_(self, kg\_conn, rule\_system):

self.kg = kg\_conn

self.rule\_system = rule\_system

self.risk\_thresholds = {

"High": 0.7,

"Medium": 0.4,

"Low": 0.1

}

def assess\_equipment\_risk(self, equipment\_id, realtime\_data):

# 从知识图谱获取设备基本信息

equipment\_info = self.\_get\_equipment\_info(equipment\_id)

if not equipment\_info:

raise ValueError(f"Equipment {equipment\_id} not found")

# 获取相关风险因素

related\_risks = self.kg.query\_related\_risks(equipment\_id)

# 应用专家规则

combined\_data = {\*\*equipment\_info, \*\*realtime\_data}

rule\_results = self.rule\_system.evaluate(combined\_data)

# 计算综合风险

risk\_scores = self.\_calculate\_risk\_scores(rule\_results, related\_risks)

# 生成报告

report = self.\_generate\_report(equipment\_id, risk\_scores, rule\_results)

return report

def \_get\_equipment\_info(self, equipment\_id):

# 实际应用中从知识图谱获取详细信息

return {"type": "Boiler", "age": 5, "last\_inspection": "2023-01-15"}

def \_calculate\_risk\_scores(self, rule\_results, related\_risks):

# 简化的风险计算逻辑

risk\_scores = {"High": 0, "Medium": 0, "Low": 0}

for result in rule\_results:

risk\_scores[result["level"]] += 0.3 # 规则匹配基础分

for risk in related\_risks:

if risk["r"]["level"] == "High":

risk\_scores["High"] += 0.2

elif risk["r"]["level"] == "Medium":

risk\_scores["Medium"] += 0.1

return risk\_scores

def \_generate\_report(self, equipment\_id, risk\_scores, rule\_results):

# 确定最高风险等级

max\_risk = "Low"

if risk\_scores["High"] >= self.risk\_thresholds["High"]:

max\_risk = "High"

elif risk\_scores["Medium"] >= self.risk\_thresholds["Medium"]:

max\_risk = "Medium"

# 生成建议

if max\_risk == "High":

action = "Immediate shutdown and inspection required"

elif max\_risk == "Medium":

action = "Schedule maintenance within 2 weeks"

else:

action = "Continue monitoring"

return {

"equipment\_id": equipment\_id,

"risk\_level": max\_risk,

"risk\_scores": risk\_scores,

"matched\_rules": rule\_results,

"recommended\_action": action,

"timestamp": datetime.datetime.now().isoformat()

}

# 示例用法

kg = EquipmentKnowledgeGraph("bolt://localhost:7687", "neo4j", "password")

rule\_system = ExpertRuleSystem()

engine = RiskDecisionEngine(kg, rule\_system)

realtime\_data = {"temperature": 320, "pressure": 2.6, "vibration": 4.5}

report = engine.assess\_equipment\_risk("EQ001", realtime\_data)

print(report)

智能体协调器

import asyncio

from typing import Dict, List, Any

class AgentCoordinator:

def \_\_init\_\_(self):

self.agents = {}

self.task\_queue = asyncio.Queue()

self.result\_queue = asyncio.Queue()

def register\_agent(self, agent\_name: str, agent):

self.agents[agent\_name] = agent

async def dispatch\_task(self, task\_type: str, task\_data: Dict):

# 根据任务类型选择合适的智能体

if task\_type == "data\_collection":

agent = self.agents.get("data\_collector")

elif task\_type == "risk\_assessment":

agent = self.agents.get("risk\_assessor")

elif task\_type == "decision\_making":

agent = self.agents.get("decision\_maker")

else:

raise ValueError(f"Unknown task type: {task\_type}")

if not agent:

raise ValueError(f"No agent registered for {task\_type}")

# 执行任务并获取结果

result = await agent.execute(task\_data)

await self.result\_queue.put((task\_type, result))

return result

async def coordinate\_workflow(self, initial\_data: Dict):

# 定义工作流程

workflow = [

("data\_collection", {}),

("data\_validation", {"depends\_on": "data\_collection"}),

("risk\_assessment", {"depends\_on": "data\_validation"}),

("decision\_making", {"depends\_on": "risk\_assessment"})

]

results = {}

for step in workflow:

task\_type, params = step

dependencies = params.get("depends\_on", [])

if isinstance(dependencies, str):

dependencies = [dependencies]

# 等待依赖项完成

for dep in dependencies:

while dep not in results:

completed\_type, result = await self.result\_queue.get()

results[completed\_type] = result

# 准备任务数据

task\_data = {\*\*initial\_data}

for dep in dependencies:

task\_data.update(results[dep])

# 分发任务

await self.task\_queue.put((task\_type, task\_data))

result = await self.dispatch\_task(task\_type, task\_data)

results[task\_type] = result

return results

# 示例智能体基类

class BaseAgent:

def \_\_init\_\_(self, name):

self.name = name

async def execute(self, task\_data: Dict) -> Dict:

raise NotImplementedError

# 示例数据采集智能体

class DataCollectorAgent(BaseAgent):

async def execute(self, task\_data):

print(f"{self.name}: Collecting data for equipment {task\_data.get('equipment\_id')}")

await asyncio.sleep(1) # 模拟耗时操作

return {

"temperature": 320,

"pressure": 2.6,

"vibration": 4.5

}

# 示例风险评估智能体

class RiskAssessorAgent(BaseAgent):

def \_\_init\_\_(self, name, decision\_engine):

super().\_\_init\_\_(name)

self.engine = decision\_engine

async def execute(self, task\_data):

print(f"{self.name}: Assessing risk for {task\_data.get('equipment\_id')}")

await asyncio.sleep(1.5)

return self.engine.assess\_equipment\_risk(

task\_data["equipment\_id"],

task\_data

)

# 示例用法

async def main():

# 初始化组件

kg = EquipmentKnowledgeGraph("bolt://localhost:7687", "neo4j", "password")

rule\_system = ExpertRuleSystem()

engine = RiskDecisionEngine(kg, rule\_system)

# 创建协调器

coordinator = AgentCoordinator()

# 注册智能体

coordinator.register\_agent("data\_collector", DataCollectorAgent("DataCollector"))

coordinator.register\_agent("risk\_assessor", RiskAssessorAgent("RiskAssessor", engine))

# 执行工作流程

initial\_data = {"equipment\_id": "EQ001"}

results = await coordinator.coordinate\_workflow(initial\_data)

print("Final results:", results)

# asyncio.run(main())

* + 1. 系统集成部署

技术栈

a) 知识图谱：Neo4j 或 Nebula Graph;

b) 规则引擎：Drools 或自定义规则系统;

c) 智能体框架：Microsoft Autogen 或 LangChain;

d) 数据处理：Apache Spark/Flink 用于批量/流处理;

e) API服务：FastAPI 或 Spring Boot;

f) 前端展示：Vue.js/React + ECharts。

部署架构

a) 数据采集层：IoT设备/监测系统；

b) 处理分析层：Spark/Flink/规则引擎；

c) 应用服务层：API服务/决策引擎；

d) 数据存储层：Neo4j/PostgreSQL；

e) 用户界面层：Web/移动端。

* + 1. 系统优化维护

知识图谱维护

a) 实现动态知识更新机制；

b) 增加语义推理能力；

c) 融合多源异构数据。

专家系统维护

a) 开发规则学习算法自动提取规则；

b) 实现规则冲突检测与消解；

c) 建立规则版本管理机制。

智能体系统维护

a) 引入强化学习优化智能体协作；

b) 开发智能体通信协议；

c) 实现智能体能力评估机制。

决策模型维护

a) 融合机器学习预测模型；

b) 开发多目标优化算法；

c) 实现决策解释功能。

* + 1. 风险防控关键信息及策略

风险防控信息库

风险信息库是根据法院涉诉信息、各种处罚信息等风险内容进行整合，形成对应的风险集合。风险信息库包括但不限于：

a) 处罚信息库；

b) 失信信息库；

c) 涉诉信息库；

d) 舆情信息库；

e) 风险事件库；

f) 检验信息库；

g) 事故信息库；

h) 应急处置库。

风险防控策略库

全链条多主体风险防控策略模型包括但不限于：

a) 阻断类：在风险触发时，直接消除风险因素；

b) 提醒类：在风险触发时，进行告警提醒，同时采取对应的风险应对措施；

c) 上述类型的风险防控策略模型应用于特种设备生产（包括设计、制造、安装、改造、修理）单位、经营单位、使用单位、检验机构、检测机构和特种设备安全监督管理部门日常业务管理过程，进行全面风险防控。

基于知识图谱的风险防控策略

基于知识图谱的风险防控策略包括但不限于：

a) 针对特种设备风险防控，基于所构建的系列图谱，根据相关风险关键数据的加工结果，采用知识库中的逻辑实现规范风险排除的辅助决策建议；

b) 知识推理在风险防控图谱中反映为相关转供路径寻优、风险类型确定和风险源定位等同级推理，以及风险控制中故障影响范围确定等的上下级推理；

c) 针对特种设备风险，知识推理的目标就是最终给出一个最优的决策，辅助人工去消除风险；

d) 在故障处置过程中，机器必须要对相关信息进行“解读”，确定性推理通过知识库中正确的知识，推理出准确的风险成因与解决方案；

e) 海量特种设备检验、监管、应急场景资料内往往呈现相似特征,采用归纳推理对场景资料进行事实演绎，决策系统根据案例库中的历史案例处理评价,给出最优方案。

附 录 A

（资料性）

建设组织方及专业技术人员类型

四类系统建设参与主体可进一步划分为子主体，概念层级和定义见表A.1。

**表A.1 特种设备知识图谱系统组织方**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 主体 | | 描述 |
| 提供方 | 发起建设方 | 知识图谱辅助决策系统建设运营需求方，也即系统项目甲方。 |
| 知识内容提供方 | 根据知识图谱辅助决策应用的具体场景，整理提供相关数据和知识的参与方。 |
| 系统运维方 | 知识图谱系统后期运行服务方，承担知识添加、更新、删除、备份和恢复以及知识质量管理任务等运维服务。 |
| 集成方 | 知识整理方 | 提供符合质量要求的数据结构化服务方，包括知识建模、知识表示、知识提取、知识融合、知识存储和知识计算等服务。 |
| 数据库部署方 | 提供知识图谱数据库的开发服务方，包括知识数据的导入、数据库可视化、数据库查询接口等服务。 |
| 应用开发方 | 基于知识图谱数据提供知识推理、风险分析、智能预测等特定辅助决策场景应用的算法开发服务方。 |
| 用户 | 知识使用人员 | 特种设备从业人员，利用系统终端获取知识、案例与分析、预测等服务。 |
| 二次开发方 | 利用开发的知识图谱辅助决策系统进行二次应用或网页嵌入开发的参与方，而无需新建知识图谱。 |
| 其他合作伙伴 | IT基础设施提供方 | 为知识图谱系统构建和运营提供所需的硬件和软件基础设施的供应方，例如硬件设备、云服务资源、大数据存储计算平台等。 |
| 平台与软件开发方 | 为知识图谱系统知识服务提供相关软件和平台开发等软件开发支持业务方。 |
| 数据库工具提供方 | 为知识图谱数据管理提供数据库相关工具的数据库供应方。 |
| 评估与认证服务方 | 为知识图谱系统应用产品、服务、流程以及安全等方面提供评估与认证的组织方。 |
| 合规审查方 | 为基于知识图谱开展的知识产品和服务提供合规性审查服务方，以确保符合相应法律法规的要求。 |

根据技术活动的内容将相关技术人员分为以下类别，见表A.2。

**表A.2 特种设备知识图谱系统技术人员类型**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 技术人员类型 | | 描述 |
| 特种设备领域技术人员 | 设计人员 | 从事特种设备产品设计，可提供设备材料、部件、结构、校核等设计知识和经验。 |
| 操作人员 | 从事特种设备生产运行操作，可提供设备运行操作知识和经验。 |
| 修理人员 | 从事特种设备维护和修理，可提供设备故障原因判断、部件判废以及设备修理维护操作等知识和经验。 |
| 检验人员 | 从事特种设备监督和定期检验，可提供设备检验检测项目内容、作业规范以及检验发现常见问题等知识和经验。 |
| 监管人员 | 从事特种设备安全监督管理，可提供监管政策、执法事项以及常见违法处罚情形等知识和经验。 |
| 事故调查人员 | 从事特种设备事故调查与处置，可提供安全风险、事故应急、事故案例以及常见事故发生原因等知识和经验。 |
| 特种设备知识处理与分析人员 | 知识数据分析人员 | 设计数据转换方案的人员，分析特种设备相关环节数据结构，定义数据与知识图谱的映射关系。 |
| 知识数据标注人员 | 根据特种设备相关环节专业经验，对有关知识数据的概念、实体、关系、属性等形成统一的词汇表，建立标注方案。 |
| 知识数据转换人员 | 依据数据转换和标注方案，完成数据结构转换的人员。 |
| 知识图谱技术人员 | 知识建模人员 | 根据应用需求设计构建知识图谱模型并拓展模型的人员。 |
| 知识存储人员 | 利用图存储系统设计、集成和安排与知识处理相关的链接，以形成完整的知识生产和消费过程。 |
| 模型维护人员 | 维护知识图谱的更新、升级和版本的人员。 |
| 知识质量审查人员 | 分析和监控知识图谱数据质量的人员，包括其数量、完整性、准确性、可靠性和及时性等。 |
| 自然语言处理人员 | 知识抽取人员 | 利用机器学习等方法从非结构化数据抽取实体、关系的人员。 |
| 知识推理人员 | 利用机器学习等方法实现知识计算和推理的人员。 |
| 答案生成人员 | 利用知识图谱计算推理的结果生成可读性文本的人员。 |
| 系统开发人员 | 系统设计人员 | 根据知识图谱存储、计算等需求，选择合适的架构设计开发支持系统。 |
| 系统维护人员 | 跟踪监控系统运行稳定性和响应速度，与知识图谱技术人员进行实时反馈。 |
| 应用设计及服务人员 | 应用设计人员 | 分析知识图谱在特种设备领域应用价值和模式的人员 |
| 服务设计人员 | 分析设计知识图谱系统的人机交互模式与功能的人员 |

附 录 B

（资料性）

全链条事项属性本体

特种设备全生命周期各环节可以拆分为系列子事项进行描述，根据子事项的共同点提出以下通用环节事项属性。环节事项属性本体包括环节名称、子事项、主体、标准、设备、参数、工具、方法、流程、人员、行为、状态、描述、安全、质量、档案。



**图B.1 生命周期各子项**

附 录 C

（规范性）

风险防控主要数据类型及来源

特种设备全链条风险数据包括基础信息和业务信息两大类。基础信息包括设备（含材料及零部件）信息、单位信息、人员信息；业务信息包括许可信息、设计制造信息、安装修理信息、使用管理信息、检验检测信息、监督检查信息、事故调查信息等。



**图C.1 特种设备全生命周期数据信息类型**

## C.1基础信息

（1）设备信息。包括设备主要技术参数、材料参数、零部件参数，主要技术参数包括产品名称、产品规格、产品编号、制造日期、安装日期、安装位置、设计使用年限等基础信息，材料参数包括材料名称、牌号、规格尺寸、力学性能、热处理状态、合格证等参数；零部件参数包括零部件名称、制造标准、材料牌号、规格型号、性能参数、额定压力、额定温度、质量等级、合格证等。

（2）单位信息。包括单位名称、统一社会信用代码、注册地址、注册资本、经营范围、法定代表人、安全管理负责人、登记日期、批准机关、联系电话等，除此外，年度报告、设备资料、制度文本等也能反应单位信息。

（3）人员信息。包括人员基本信息、考试信息、持证信息等。基本信息包括姓名、出生年月、性别、教育程度、专业、职称、培训记录、电话等信息；考试信息包括考试项目、考试日期、考试成绩、作弊情况、补考情况等信息；持证信息包括证书编号、项目名称、发证机关、发证日期、有效期、级别、聘用记录、处罚情况、证据吊销情况等信息。此外，设计资料、测试报告等资料也能反映人员情况。

## C.2业务信息

（1）行政许可信息。包括许可证编号、许可项目、许可参数级别、发证日期、有效期、发证机关、鉴定评审机构、评审结论等信息。信息通常以行政许可证书、鉴定评审记录、行政许可事项文件等载体载明。

（2）设计制造信息。包括设计制造单位、制造批次、制造日期、结构参数（尺寸）、工艺参数、性能参数、质量参数、热处理参数、表面处理参数、公差误差参数等信息。信息通常以委托合同、执行标准规范、设计文件、工艺文件、操作指导书、制造档案、出厂随附资料等资料载体载明。

（3）安装修理信息。包括施工单位、施工告知单编号、施工内容、施工人员、竣工日期、支撑结构与强度等级、工艺参数、验收质量等级、试运行情况、监督检验等信息。通常以委托合同、施工方案、技术档案、施工工艺、监督检验资料、自检文件、试运行资料等载体载明。

（4）使用管理信息。使用管理信息应包括使用登记、充装、运维等信息，条件允许的情况下还可以包括运行监测信息。使用登记信息包括登记证编号、登记机关、登记审查情况、登记日期、变更登记情况、停用注销日期、报废情况等信息；充装信息包括充装单位、充装证书编号、充装日期、充装介质、充装数量以及充装过程信息（充装压力、温度、时间、流量等）；运维信息包括检查记录、维保记录、使用操作记录、操作维护人员及持证、停机记录、故障问题记录、工作时间等信息。通常以使用登记证书、充装记录和运行记录等使用管理信息系统等载体载明，与使用管理维护信息化管理程度有关。

（5）检验检测信息。包括检验类别、检验机构、检验人员、检验日期、下次检验日期、检验报告编号、检验项目、检验不合格项、检验不合格项描述、检验结论等信息，通常以检验标准、检验规程、作业指导书、检验记录与报告、检验意见书等载体载明。

（6）监督检查信息。包括执法检查和行政处罚信息，执法检查信息包括检查类别、起止日期、检查机构、检查人员、被检查单位、被检查设备、检查内容、发现问题、整改情况等信息，通常以执法检查记录、整改通知单等文书载体载明。行政处罚信息包括处罚机关、处罚文书号、处罚日期、被罚单位、处罚依据、违法描述、处罚类型、处罚内容等信息，通常以行政处罚文书为载体载明。

（7）事故调查信息。包括事故编号、发生时间、发生地点、设备名称、设备编号、发生环节、事故经过、伤亡人数、经济损失、责任单位、事故影响、事故原因、事故结论、处置意见等信息，通常以事故调查报告为载体载明。

此外，还包括信用信息、社会评价信息、奖励信息以及媒体新闻等信息。

附 录 D

（规范性）

辅助决策应用场景

将特种设备知识图谱系统在实际业务环节的使用情景称为场景，场景描述了知识图谱技术如何被应用来解决特定问题或满足特定需求。

## D.1按功能效果分类

按照解决特定问题的功能效果，将场景分为以下类别：

a）知识查询。增强数据管理，将传统的标准规范和设备运维数据转化为知识图谱，结合检索技术与语言模型，帮助用户快速获取所需知识或信息，提高数据获取效率，减少查找时间。

b）风险分析。利用知识图谱进行安全风险管理，结合大数据等分析技术，建立智能风险分析与管控模型，通过关联与推理完成风险识别、影响范围分析和缓解措施建议等，及时对事故风险进行预警，对可能发生的安全事故做出及时而迅速的预防。

c）智能预测。利用同类型设备模拟运行和设备历史数据，以及关键部件的状态监控数据，对设备的运行状态、故障风险、性能退化趋势、剩余寿命、健康度和维护检查等进行预测，以此为基础对设备进行健康管理和预测性维护，有效提高运维效率、降低设备运行成本，并合理延长寿命提高经济生产效益。

d）模式识别。利用知识图谱对设备数据中缺陷、损伤和异常、故障等模式规律进行识别和归因分析。通过缺陷和损伤记录，对设备缺陷和损伤进行智能诊断及处置辅助建议；通过监控设备的温度、振动、压力等数据，及时识别出不正常的工作状态；通过运维数据构建故障现象与故障根因关联矩阵，实现对故障原因的推断。

e）案例推荐。利用知识图谱对特种设备检验案例、处罚案例和事故案例进行建模，根据用户的需求和实际问题描述，从而推荐相似案例或解决方案，提高问题解决的针对性和效率。

f）决策支持。结合知识图谱与学习推理算法，通过对决策问题进行解析，进行一定的逻辑推理提供决策分析工具，来解决比如资源配置、路径优化、调度优化等复杂的决策问题，辅助用户做出更合理的决策，以提高决策质量。

## D.2按表现形式分类

按照满足特定需求的表现形式，将场景分为以下类别：

a）工作助手。利用知识图谱对常见工作任务数据资料进行处理，通过学习相关资料模式，并根据用户提供的关键信息或指令，可以将大量非结构化信息转化为规范的结构化信息；同时结合生成式人工智能，自动生成流畅、准确的报告、文案及其他文本，辅助完成相关工作。

b）任务模拟。利用知识图谱集成大量的特种设备及各环节业务知识、数据，从而增强辅助决策智能问答系统，并解析和学习用户给出的任务示例模式，通过检索已有知识来模仿相似任务的处理过程，并按照示例格式返回相应的结果。

c）教学培训。利用知识图谱存储大量特种设备及业务知识，除能够快速响应使用者的查询检索外，还能够结合人工智能应用开发个性化的交互式学习平台，帮助用户生成学习计划、提供课程内容、模拟考试训练和可视化展示知识点的关系等，提供个性化学习路径和实时反馈，帮助从业人员快速掌握有关知识。

d）智能监控。知识图谱能够识别特种设备风险防控场景中的各类实体，通过关联整合状态参数、合规要求与应对措施等数据，形成一个完整的监控网络，通过分析快速发现设备运行参数波动等异常情况，并及时发出预警信号或自动停车、自动调节流速压力等智能措施。

附 录 E

（规范性）

系统性能测试推荐要求

## E.1知识图谱构建性能要求

特种设备知识图谱构建应满足系列过程支持功能与性能要求，为辅助决策奠定应用性能基础。至少需要评价知识图谱的本体数量与完备性、一致性，数据量（含实例、关系、属性等），查询响应时间、查询准确率等指标。



**图E.1 知识图谱性能质量要求**

相关指标的解释与基准要求：

1. 本体数量。模型中实体、关系、属性与事件类型本体的总数不少于300个。
2. 本体完备性。完备性可通过抽样测试，衡量模型是否能够完整表达给定样本的术语本体，平均完备性不应低于90%。

其中：T—抽取样本的完整本体数；ni—抽取样本模型定义本体数。

1. 本体一致性。一致性可通过抽样测试，衡量模型是否能够正确且一致地呈现对象和信息，即所给出的定义是否存在冲突，平均一致性不应低于95%。

其中：—抽取样本的完备本体与模型定义本体的冲突计数。

1. 数据量。数据量可由知识图谱实体数、关系数、属性数以及事件数来衡量，以及以此为基础的三元组个数和MRR、MR、Hits@k等延伸评分指标。

其中，—三元组个数，—第i个三元组的评分排序。

1. K跳查询响应时间。可通过设置K参数进行查询模拟测试，衡量知识图谱查询响应性能。

其中，—第i次查询收到结果的时间；—第i次查询请求的时间；

—K跳查询超时时间阈值；—第i次查询的响应时间；—第i次查询的、超时时间。

1. 查询准确率。通过构建测试样本集检测知识图谱查询正确率，衡量知识图谱响应检索的知识正确性。查询正确率不应低于80%。

其中，TP—查询值与理论值一致的数量；FP—查询响应不正确的数量

## E.2辅助决策应用性能要求

基于知识图谱的特种设备安全风险防控辅助决策系统需要满足响应性、友好性、可靠性、兼容性、安全性以及场景扩展性等要求，以便于满足实际应用需求，并不断改进服务质量。至少需要评价系统回答正确率、推荐采纳率、界面友好性、系统稳定性等指标。



**图E.2 辅助决策系统性能质量要求**

相关指标的解释与基准要求：

a）回答正确率。通过构建标准数据集进行测试，衡量辅助决策系统正确理解问题语义并能给出合适答案的性能。回答正确率不应低于80%。

其中，C—回答正确的问题数；T-测试集总问题数。

b）推荐采纳率。运行一定时间内决策系统推荐总数中剔除未被采纳数的占比，相对衡量决策系统的可用性。

其中，T—运行时间内推荐总数；R—运行时间内推荐被拒绝数。

c）界面友好性。利用从用户开始使用直到最后一次反馈结束所花费的时间来衡量，时间越短表示系统越能被用户理解和操作。

其中，t—用户i完成一次多轮问答所花费时间；—用户i多轮问答的反馈数。

d）系统稳定性。用运行一定时间内的系统故障次数来衡量，单位时间内故障次数越少系统越稳定。

其中，—系统运行时间内故障次数；—系统运行时间。

参考文献

1. 中华人民共和国特种设备安全法
2. 《知识图谱互联互通白皮书》
3. 特种设备安全监管信息资源数据规范（试行）（2022年10月11日市场监管总局特种设备局发布）
4. T/CPASE M 014.2—2021 电梯产品追溯 第2部分 信息与数据格式（团体标准）

