Design of FPSWizard Intelligent Fall Prevention System for High Altitude Based on CBR-RBR*

YANG Chaoyong*, XIE Zebo, LIU Ziyang, ZENG Fanshen, SHAO Wen, LI Zhifu, ZHANG Yao, TANG Rong
(Guangdong Power Grid Energy Development Co., Ltd., Guangzhou Guangdong 510145, China)

Abstract: During the construction and maintenance of ultra-high towers, personnel falls from heights and falling objects are the primary safety hazards. In complex high-risk work environments where conventional safety measures are insufficient, the active fall prevention system (AFPS) serves as a critical safeguard. To address current challenges in design and selection, the FPSWizard system is proposed, which is a knowledge-supported platform integrating case-based reasoning (CBR) and rule-based reasoning (RBR) to assist in the intelligent design and optimization of AFPS. A case library is constructed based on real-world scenarios and design data, combined with the AFPS Ontology to form a structured knowledge framework, providing personalized recommendations for fall protection for both workers and objects at elevated heights. The system prototype is developed by using the MyCBR workbench and evaluated through leave-one-out cross-validation. Experimental results demonstrate that the hybrid CBR-RBR approach achieves an average positive predictive value (PPV) of 90%, significantly higher than the 76% of the pure CBR method. FPSWizard enhances design accuracy and adaptability, offering an efficient and intelligent fall protection solution for ultra-high tower construction, showcasing promising applications in intelligent safety engineering and knowledge-driven decision-making fields.

Key words: fall protection system, FPSWizard, high-altitude fall, hybrid CBR-RBR, fall protection net
EEACC: 7220 **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2026.03.020

基于 CBR-RBR 的 FPSWizard 智能化高空防坠落系统设计*

杨朝勇*, 谢泽波, 刘梓扬, 曾繁燊, 邵 文, 李志福, 张 耀, 汤 蓉
(广东电网能源发展有限公司, 广东 广州 510145)

摘 要: 超高铁塔施工与维护过程中, 人员高空坠落与物体坠落是主要安全隐患。在复杂高风险作业环境中, 当常规安全措施不足时, 主动防坠保护系统(AFPS)成为重要保障。为解决当前设计与选择困难, 提出 FPSWizard 系统, 为一种融合案例推理(CBR)与规则推理(RBR)的知识支持平台, 用于辅助 AFPS 的智能设计与优化。系统基于实际场景与设计数据构建案例库, 结合 AFPS 本体形成结构化知识体系, 为高空作业人员和物体坠落防护提供个性化推荐。系统原型基于 MyCBR Workbench 开发, 并采用留一交叉验证进行评估。实验结果显示, 混合 CBR-RBR 方法的平均正向预测值(PPV)达 90%, 显著高于纯 CBR 方法的 76%。FPSWizard 提升了设计准确性与适应性, 为超高铁塔施工提供高效、智能的防坠落防护解决方案, 在智能安全工程与知识驱动决策领域展现出良好应用前景。

关键词: 防坠保护系统; FPSWizard; 高空坠落; 混合 CBR-RBR; 防护网
中图分类号: TP182 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2026)03-0619-07

随着城市建设与经济发展的加快, 电力需求逐渐增加, 海上超高电力铁塔的改造建设也日趋增加, 如何保护超高铁塔在建设过程中施工人员安全至关重要。海上超高铁塔由于受到海平面施工平面区域的限制, 在施工过程中无法划分完全无人的施工区域。高空坠落事故不仅会对施工人员的生命安全造成威胁, 还可能导致设备损坏、项目进度延误, 甚至引发环境污染等一系列安全问题[1-3]。因此, 如何有效防范海上超高铁塔施工与维护过程中的高空坠落事故, 成为保障安全、提高效率和降低成本的关键。

现有的研究主要集中在防坠保护系统的设计与优化方面。研究者们尝试通过提升材料强度和智能化程度来改进传统防护设备, 例如使用更加耐用的

项目来源: 广东电网有限责任公司科技项目(GNFT1-24-137)
收稿日期: 2025-04-01 **修改日期**: 2025-06-17

防护绳和带有传感器的智能安全带来实时监控作业人员的状态[4]。然而,这些技术的局限性仍然存在,尤其是在面对复杂的作业条件和动态环境时,传统防护设备往往无法满足多变的安全需求[5]。此外,近年来,针对海上超高铁塔的主动防坠保护系统(Active Fall Prevention System,AFPS)的研究逐步兴起。主动防坠保护系统依赖于传感器、实时监控与智能控制技术,可以在作业人员或物体出现坠落风险时,自动启动防护措施,避免事故发生[6-7]。已有一些研究尝试基于传感器网络和实时数据分析构建自动防护机制,以提高作业安全性[8]。然而,海上超高铁塔的特殊环境使得这一领域的研究面临不少挑战。海上环境的不稳定性,如大风、浪潮、天气变化等因素,使得防坠保护系统的设计更为复杂。同时,超高铁塔的作业环境通常较为复杂,高空作业人员的安全防护和物体坠落的防护往往需要不同的设计策略,这也使得现有的防护方案难以一一覆盖所有风险[9]。

目前,基于人工智能和知识工程的研究也开始为海上超高铁塔防坠保护系统的设计与优化提供新思路。案例推理(Case-Based Reasoning,CBR)和规则推理(Rule-Based Reasoning,RBR)等智能决策方法被引入到防坠保护系统的设计中,通过借助历史数据和专家知识,自动化地为不同作业环境推荐最优的防护方案[10]。例如,某些研究利用基于案例的推理系统,通过构建案例库,将历史设计经验与实时数据结合,为复杂环境下的防护设计提供决策支持[11]。然而,现有研究中,大多数基于 CBR 和 RBR 的方法缺乏综合考虑多工况和动态变化的能力,导致在面对海上超高铁塔这种高度复杂且具有不确定性的作业环境时,系统的推理精度和适应性往往受到限制。

本文提出了一种基于知识支持的智能化解决方案——FPSWizard。该系统结合 CBR 与 RBR,为超高铁塔施工与维护过程提供个性化的防坠保护系统设计与优化建议。FPSWizard 通过构建包含丰富 AFPS 设计数据和实际工作场景的案例库,并利用 AFPS 本体形成结构化的知识体系,不仅能够有效利用历史设计经验,还能基于规则逻辑生成合理的防护方案。FPSWizard 不仅显著提高了 AFPS 设计的效率和精度,也在超高铁塔领域的智能安全工程与管理中实现了重要突破,为超高铁塔施工与维护中的高空坠落防护提供了创新性解决方案。

1 FPSWizard 的设计与开发

1.1 方法学

FPSWizard 结合 CBR 和 RBR 方法,为特定高空作业环境提供合适的 AFPS 推荐,特别针对海上高空铁塔作业中的高空坠落问题。通过从案例库中检索最相似的历史案例,系统遵循 CBR 的“检索、重用、修订、保留”四步循环[12-13],优化防护网设计,提升防护方案的准确性与效率:

①检索:系统将查询案例与历史案例对比,通过索引方案和相似度指标从案例库中提取最相似的案例,为后续提供参考。

②重用:利用检索到的最相似案例的解决方案,作为查询案例的建议方案。

③修订:必要时对建议方案进行评估与修订。

④保留:方案采纳后,可将新的解决经验保存在数据库中。

RBR 是人工智能领域广泛应用的一种推理方法[14]。在自然科学领域,不同问题解决方法与知识表达方式的结合受到了高度关注。最流行的组合之一是 CBR-RBR 集成。将 CBR 和 RBR 结合使用的方法有四种,包括①RBR-first 和 CBR-last,②CBR-first 和 RBR-last,③CBR 和 RBR 并行,以及④RBR 和 CBR 结合。在实际应用中,CBR-RBR 的集成通常用于提升案例检索的性能。例如,在建筑行业,Dzeng 和 Lee 开发了一种时间表指导系统,该系统通过规则发现潜在的时间表错误,并结合 CBR 提供相应的纠正建议。

本研究采用“CBR 优先,RBR 后置”的方法来检索和学习与防坠保护系统相关的相似案例。CBR 通过计算高空作业场景中的局部(属性层面)和全局(案例层面)的相似性,生成初步的相似案例列表,尤其关注海上高空铁塔中的高空坠落风险。随后,通过将规则集成到 CBR 过程中,动态调整各属性的权重,以提升防护网设计和防坠保护系统推荐的准确性,从而优化解决方案的性能。

1.2 FPSWizard 工作流程

图 1 展示了 FPSWizard 的工作流程。当设计人员需要为当前高空作业问题选择合适的 AFPS 时,可以通过案例查询接口进行操作。设计人员通过为 AFPS 本体中定义的属性列表赋值,来明确问题描述。AFPS 本体部分主要用于定义查询词汇表和案例结构,从而确保为每个高空作业场景提供精准的防坠落防护解决方案,特别是在涉及高空铁塔防护网设计时,能够有效地将防护网与人员坠落防护结

合起来。

查询用例信息通过结合 CBR 和 RBR 的搜索引擎进行处理,计算查询案例与案例库中存储的案例在局部(属性层面)和全局(案例层面)上的相似度,特别关注海上高空铁塔中与高空坠落相关的因素。为了提高检索性能,系统应用一组规则动态调整属性权重,从而优化防护网设计和防坠保护系统的推荐结果。基于相似度,系统从案例库中检索出最接近的历史案例,随后 FPSWizard 为当前高空作业问题推荐最匹配的防护解决方案,确保高空作业人员和设备的安全。

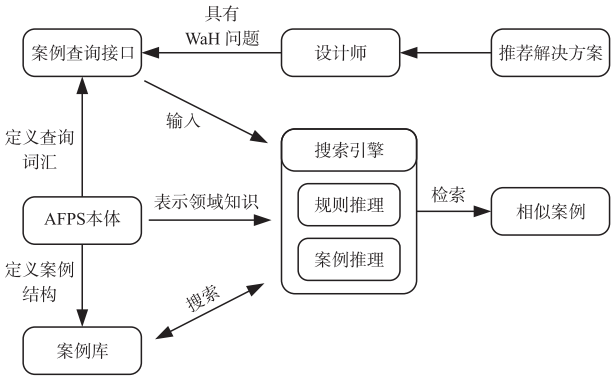

图 1　FPSWizard 工作流程

1.3　案例表示和案例库

课题组从建筑行业收集了 59 个实际的高空工程场景[15-19],特别关注海上高空铁塔中的高空坠落风险,并结合设计师认可的设计案例,依据 GB 6095—2021 设计标准,针对高空作业环境设计了防坠保护系统和防护网解决方案。每个原始设计经过设计师认可后,转化为正式案例,并详细描述了针对高空坠落问题的具体解决方案。

我们使用 AFPS-Ontology 来定义案例报告的结构,重点考虑两个因素。首先,必须明确影响所选 AFPS 类型的关键属性,或称为“深度属性”,以提高检索合适案例的能力。例如,锚点与平台之间的相对位置以及作业平台的移动方向等深度属性,这些在防坠保护系统和防护网的设计中至关重要,并在 AFPS-Ontology 中得到了有效表达。其次,CBR 系统通常针对特定任务执行,过于通用的设计可能会影响系统的检索效率。作为海上高空铁塔防坠保护设计的关键组成部分,AFPS-Ontology 能够识别与高空坠落风险相关的案例信息,并与建筑灾害管理的其他信息形成潜在关联。通过应用这一本体,可以有效提高系统的性能,确保为高空作业和防护网设计提供更精确的推荐。

最终的案例库包含 50 个设计案例。根据 AFPS-Ontology 的结构,每个案例由三部分组成:(Cp,Cc,Cs),其中 Cp 表示案例库中案例 C 的问题描述,Cs 为 AFPS 的解决方案,Cc 是 AFPS 解决方案所依赖的上下文或设计标准。由于所有设计案例均基于相同的设计标准(即 GB 6095—2021)开发,Cc 无法用来区分案例,因此在本文描述的案例检索过程中不包含 Cc 的因素。

图 2 展示了不同 AFPS 类型对应的设计案例数量。在全部 50 个案例中,18%采用 TRS 类型,40%采用 FAS-HLL 类型,20%采用 FAS-VLL 类型,22%采用 FAS-(R)L 类型。

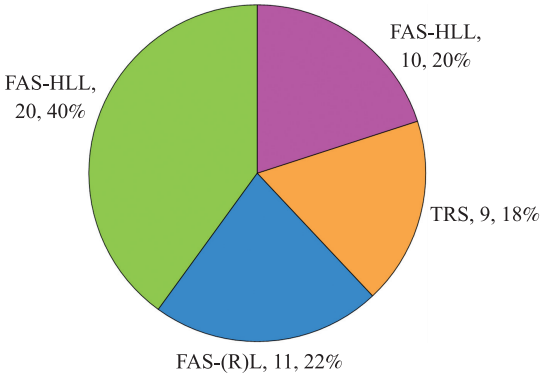

图 2　按 AFPS 类型划分的案例数量

1.4　检索策略和相似度度量

相似度度量旨在量化查询案例与案例库中各个历史案例之间的相似程度,特别是在高空作业和防坠保护系统的设计中。本研究从两个层面计算相似性:局部层面和全局层面。在局部层面,计算每个属性(如防护网类型、平台结构等)的相似度得分;在全局层面,将所有属性的相似度得分整合,计算整个防坠保护系统或海上高空铁塔防护方案的整体相似度。相似度的取值范围为 0 到 1,0 表示完全不相似,1 表示完全相似。这一度量方法帮助精确地匹配高空坠落防护问题的解决方案,并提供最适合的防护设计推荐。

局部相似度函数用于衡量存储案例 j 的属性 i 与查询案例之间的相似度。对于符号值的相似度计算,本研究采用了 Hamming 距离函数,使得:

$$\begin{cases}\text{if } Q(a_i)=C_j(a_i),\\ \text{then } \mathrm{sim}_{ij}(Q(a_i),C_j(a_i))=1;\\ \text{otherwise},\mathrm{sim}_{ij}(Q(a_i),C_j(a_i))=0\end{cases}\tag{1}$$

式中:Q 为查询案例,C 为案例库中已存在的案例,a_i=属性 i,$\mathrm{sim}_{ij}(Q(a_i),C_j(a_i))$ 是查询案例与存储案例 j 在属性 a_i 上的局部相似度。

全局相似度得分表示两个案例之间的整体相似程度,系统可以据此将所有历史案例从最相似到最

不相似进行排序。全局相似度得分通过以下函数计算：

$$\mathrm{SIM}(Q,C_j)=\sum_{i=1}^{n} w_i \mathrm{sim}_{ij}(Q(a_i),C_j(a_i)) \quad (2)$$

式中：Q 为查询案例，C 为存储案例，$\mathrm{sim}_{ij}(Q(a_i),C_j(a_i))$是查询案例与旧案例 j 在属性 a_i 上的局部相似度，a_i = 属性 i，w_i = 属性 i 的权重，n 为属性个数。

2 系统实现

FPSWizard 系统的实现采用了模型-视图-控制器(Model-View-Controller，MVC)架构设计模式，以确保高空坠落防护解决方案的高效实现。MVC 是一种高度可扩展的架构模式，将系统分为三个主要组件：模型、视图和控制器。在防坠保护系统的设计中，这种架构的优势在于，模型和控制器可以独立更新和替换，而不会对其他组件产生影响，从而提高系统的灵活性和可维护性。特别是在处理高空作业防护网和海上高空铁塔防坠落方案时，MVC 架构能够更好地控制系统的质量，并优化各个组件的协同工作。通过优化客户端和服务器端组件，MVC 架构显著提升了 FPSWizard 系统的可用性、可扩展性和防护设计的精确性。FPSWizard 系统的架构设计如图 3 所示。

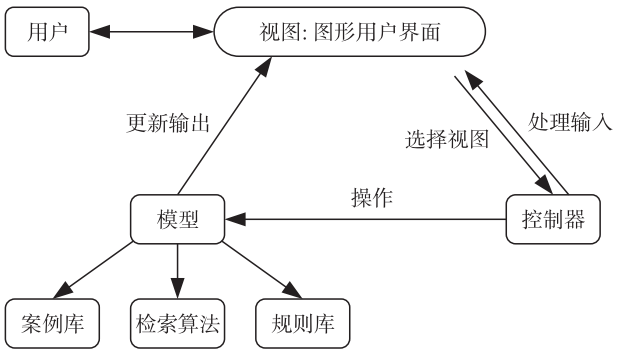

图 3 FPSWizard 系统架构

①视图模块

视图负责处理输出，基于 Bootstrap 框架开发了应用程序的用户界面。

②控制器

控制器处理用户输入，调用模型计算并输出至界面，实现系统交互逻辑。

③模型

模型组件管理应用领域的行为和数据，提供对案例库、检索算法和规则库的访问。它包含了所有与数据相关的逻辑部分，确保系统能够有效处理和管理数据。在 FPSWizard 中，模型组件封装了所有计算参数，并将其组织到类中，负责处理系统的核心业务逻辑和数据操作。

④View-Controller-Model 之间的交互

控制器将用户的命令传递给模型，以更新模型的状态。例如，当用户在界面中输入“任务类型”的值时，控制器将该命令发送给模型，并更新“任务类型”的状态。控制器还可以向其关联的视图发送命令以改变视图的显示(例如，点击“下载”按钮下载检索到的案例)。模型存储了控制器命令下所需的所有数据、规则和算法，并根据控制器的指令进行相应的操作和更新。视图根据模型的变化为用户生成新的输出(例如，检索到的案例列表)。基于 MVC 设计模式，用户可以通过浏览器在 Internet 上访问系统。程序设计语言 Java 用于连接数据库服务器、web 服务器和 GUI。主要开发工具有 Java JDK1.5、JavaScript 1.5、JSP2.0、asp.net、Tomcat5.5、Oracle10，在 Windows Server 2022 环境下开发。

3 评估

3.1 案例库评估

考虑到现有案例中可能存在错误，这可能会影响防护网设计和防坠保护系统的检索性能，因此评估的第一步是确保所有设计案例都具有合适的解决方案，特别是在针对高空坠落防护和海上高空铁塔设计时。这一验证过程是确保 FPSWizard 能够提供精准推荐的关键前提，只有在确认所有案例的有效性后，系统才能保证在后续的案例检索中提供准确和安全的解决方案。

3.2 评估方法及检索性能指标

本研究在 MyCBR Workbench 平台上构建并测试 FPSWizard 原型系统。MyCBR 是一个开源的基于 Java 开发的案例推理工具，支持用户自定义相似度度量函数、属性权重设置及案例库管理等功能，适用于小规模知识推理系统的快速原型验证。实验平台运行环境包括 Windows 10 操作系统，Java JDK 1.8，Tomcat 9 服务器与 MySQL 8.0 数据库，系统界面采用 JSP + Bootstrap 框架开发，后端使用 Spring MVC 结构构建。

仿真过程中，采用 MyCBR 的内置相似度建模工具定义属性相似度函数，并配置三类 CBR 模型(3/5/10 属性)用于比较检索性能。CBR 模型通过设置局部属性相似度函数(主要使用 Hamming 距离)，并结合全局加权聚合策略计算整体相似度得分，系统自动推荐最优 AFPS 设计方案。此外，为提升检索精度，系统引入 RBR 规则引擎，通过 IF-

THEN 语句动态调整属性权重,实现混合 CBR-RBR 推理过程。仿真实验共设计 50 组测试用例,并采用留一交叉验证方式进行全面评估。

本研究采用留一交叉验证方法评估 FPSWizard 在高空坠落防护系统设计中的检索性能。在验证过程中,系统会轮流将每个存储的案例用作测试或查询案例,并计算其与其他存储案例(例如海上高空铁塔防护网设计案例)之间的相似度得分。随后,从最相似的案例中提取适用的解决方案,作为系统推荐的防护设计方案。通过两个实验,本研究验证了 FPSWizard 在高空作业环境中的检索性能,特别是防坠保护系统的应用。第一个实验探讨了属性数量对纯 CBR 方法检索性能的影响,重点评估了防护网设计和高空坠落防护的关键属性对推荐结果的精准度和有效性的作用。

本研究开发了一个基于 MyCBR Workbench 的原型,这是一个基于相似度的开源检索工具。MyCBR 工作台支持相似性度量的初步建模以及检索过程的模拟。模型 1 包含三个基本属性,分别是(a_1)任务类型、(a_3)平台类型和(a_{10})IFC 构建元素。模型 2 计算五个属性的相似性,分别为(a_1)任务类型、(a_3)平台类型、(a_5)平台坡度、(a_7)可能的锚地以及(a_{10})IFC 建筑元素。模型 3 涵盖了所有 10 个属性。如表 1 所示,三个模型在案例检索过程中使用了相同的相似性度量和属性权重。

表 1　三种基于纯 CBR 方法的检索模型

模型	属性	相似性度量	属性权重
1	3 个属性:a_1;a_3,a_{10}	式(1)和式(2)	1
2	5 个属性:a_1,a_3,a_5,a_7,a_{10}	式(1)和式(2)	1
3	10 个属性:a_1,a_2,a_3,a_4,a_5,a_6,a_7,a_8,a_9,a_{10}	式(1)和式(2)	1

在具有分类任务的 CBR 研究中,常用的评估指标包括阳性预测值(Positive Predictive Value,PPV)(或精度)和真阳性率(True Positive Rate,TPR)(或召回率)。它们的定义如下:

$$PPV=\frac{\text{number of true positives}}{\text{number of true positives+number of false positives}} \tag{3}$$

$$TPR=\frac{\text{number of true positives}}{\text{number of true positives+number of false negatives}} \tag{4}$$

在本研究中,“真正”指的是测试过程中成功预测并提供合适高空坠落防护解决方案的事件,即最相似的存储案例为查询案例提供了有效的防坠保护系统设计,特别是在海上高空铁塔的防护网应用中;“假阳性”表示推荐了不适用的方案,“假阴性”则为未能检索出合适方案。

虽然 PPV 和 TPR 都是衡量 CBR 检索性能的有用指标,但在本研究中,PPV 比 TPR 更为重要。PPV 反映了系统认为查询用例提供合适解决方案的检索用例占所有检索用例的比例,而 TPR 则衡量了所有具有合适解决方案的用例中成功检索到的比例以及未检索到的用例。因此,PPV 更能直接反映系统在实际应用中提供合适解决方案的能力。对于 FPSWizard 来说,避免提供错误的案例(高 PPV)比检索所有合适的解决方案(高 TPR)更为重要。错误的解决方案可能对用户的决策产生负面影响,导致无效甚至不安全的 AFPS。因此,在评估检索性能时,重点关注 PPV,而不是 TPR。由于高 PPV 通常伴随低 TPR,因此本研究仅选择 PPV 作为衡量标准。在每一轮测试中(基于模型 1、2、3 和混合方法),有 50 个独立的测试或查询用例和 49 个存储用例。使用式(3)计算每个单独测试的 PPV。然后计算每轮测试的平均 PPV。

3.3　实验结果

图 4 展示了三种模型及 CBR-RBR 方法的检索性能。模型 1 和模型 2 的精度较低,分别为 54% 和 72%,主要是因为这两个模型未能有效捕捉到对高空作业安全具有较强判别能力的关键属性。在实际应用中,未能准确识别关键特征会导致模型对问题描述的理解不够全面,从而影响推荐结果的准确性。随着属性数量增加到 10 个(即模型 3),检索精度相较于模型 2 提高了 5%,这表明更多的属性能够帮助模型更好地捕捉与高空作业安全相关的多维特征,提升了检索结果的相关性。尽管属性数量的增加有所改善,

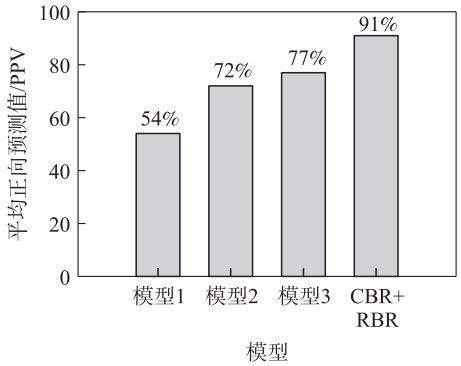

图 4　不同检索策略下的平均 PPV

纯 CBR 方法的精度仍较低,特别是在 FPSWizard 系统的目标是为高空作业提供精准、安全的解决方案时,较低的精度可能导致推荐结果的不准确或不安全,进而影响决策质量。因此,在实际应用中,结合 CBR 与 RBR 方法,动态调整属性权重并进一步优化模型,能够显著提升系统的安全性与推荐准确性,确保为高空作业提供更加可靠的防护设计。

模型 3 的低精度主要源于未能充分识别不同情况下某些属性之间的相关性。例如,在高空作业环境中,当“平台类型”设置为“支柱”且“可能的锚固”也设置为“支柱”时,“锚固与平台之间的相对位置”属性在确定防坠保护系统的解决方案时起到了关键作用。如果“锚固与平台的相对位置”为“锚固在平台之上”,则解为 FAS-L(防坠保护系统);而若“锚固与平台相邻”,则解为 FAS-HLL(防护网)。这种属性间的相关性未被充分考虑,导致模型精度较低。与此相比,当系统采用混合 CBR-RBR 方法时,精度显著提高,达到了 91%。这表明,结合案例推理和规则推理的方法能够更有效地捕捉属性之间的相关性,从而提高高空坠落防护系统的检索精度,尤其在海上高空铁塔的防护网设计中,能够提供更准确、可靠的解决方案。

按 AFPS 类型划分的平均 PPV 如图 5 所示。纯 CBR 方法(模型 3)产生的 AFPS 类型的 PPV 相对较低,FAS-HLL 为 86%,FAS-(R)L 为 80%,TRS 为 79%,FAS-VLL 仅为 60%。低 PPV 值的原因在于纯 CBR 方法无法动态调整不同场景中属性的相关性。因此,该方法在面对不同解决方案的情况时,无法根据应用相同权重的属性来有效区分这些情况。由于属性之间的相关性未能得到充分考虑,系统的检索性能受到限制。

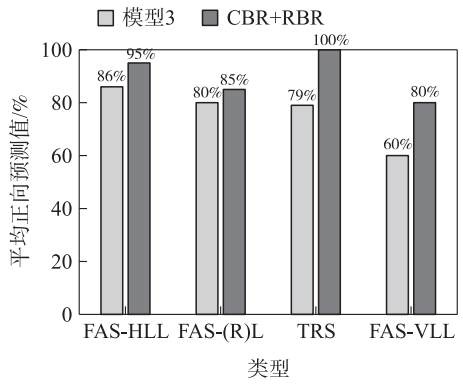

图 5 不同类型 AFPS 的平均 PPV

通过结合使用 CBR 和 RBR 方法,系统能够更好地捕捉不同高空作业场景中属性之间的相互关系,从而显著提高了检索准确防坠保护系统案例的能力。混合方法在处理具有复杂约束条件的高空作业系统时表现最佳,特别是在设计海上高空铁塔的防护网时,达到了 100%的 PPV。这表明,在复杂的高空坠落防护需求中,CBR-RBR 方法能够提供既准确又有效的解决方案,确保高空作业人员的安全防护系统设计更加精确和可靠。

对于 CBR-RBR,FPSWizard 对 FAS-HLL、FAS-(R)L 和 FAS-VLL 的增益分别为 9%、5%和 20%。混合 CBR-RBR 方法的平均阳性 PPV 为 90%(四种 AFPS 的平均值)。相比之下,纯 CBR 方法的平均 PPV 为 76%。

4 结论

本文提出并开发了 FPSWizard 系统,一种基于 CBR 和 RBR 的知识支持系统,用于支持超高铁塔 AFPS 的设计与优化。通过构建包含 50 个实际工作场景和设计案例的案例库,并结合 AFPS 本体形成结构化知识体系,FPSWizard 能够为高空作业场景提供精准的防护设计支持。实验结果表明,混合 CBR-RBR 方法在案例检索中的正向 PPV 平均达到 90%,显著优于纯 CBR 方法的 76%。此外,通过动态调整属性权重,系统在区分不同场景下防护系统需求方面表现出更高的适应性。例如,对于防护类型为 FAS-VLL 的情况,混合方法的 PPV 较纯 CBR 方法提升了 20%。这些结果充分验证了混合方法在提高检索精度和适应复杂工况需求方面的优越性。

FPSWizard 不仅为超高铁塔施工与维护中的高空坠落问题提供了全面的解决方案,也为智能安全工程和管理的应用拓展了新方向。它通过模拟专家设计行为,为工程师和安全专业人士提供决策支持,有效减轻了认知负担并提高了设计效率。此外,该系统作为一个基于网络的工具,促进了领域知识的共享和传递,对于提升行业整体安全管理水平具有重要意义。

参考文献:

[1] 郭嵘,昌国际,吉顺暘,等. 基于无人机的高空安保绳智能遥控悬挂系统的实现[J]. 自动化与仪器仪表,2024(10):206-209.

[2] 成连华,贺晨. 建筑施工项目安全风险评价体系构建及应用[J]. 科学技术与工程,2021.21(27):11882-11889.

[3] 刘军涛,孟鑫桐,张立佳,等. BIM 技术在大型钢结构建筑施工安全管理中的应用[J]. 建筑技术,2021,52(6):679-683.

[4] 庞宁. 基于深度学习的输电线杆塔鸟巢检测与识别[J]. 自动化与仪器仪表,2020(4):195-198,204.

[5] 郭家田,金永兴. 纯电动高空作业车操纵稳定性优化设计[J]. 中国工程机械学报,2020,18(3):253-257,263.
[6] 袁梦超,沈小军,杜勇. 超特高压输电铁塔倾斜度数字化智能测量算法门[J]. 高电压技术,2022,48(8):3001-3011.
[7] Tixier A J,Hallowell M R,Rajagopalan B,et al. Application of Machine Learning to Construction Injury Prediction[J]. Automation in Construction,2016,69:102-114.
[8] 王豪,纪爱敏,张磊,等. 高空作业平台臂架变幅振动特性研究[J]. 振动与冲击,2020,39(8):40-46.
[9] 马国庆,杨绍元,卢耕儒. 登塔防护的半封闭结构装置设计[J]. 集成电路应用,2022,39(12):272-273.
[10] 张金龙,莫钜槐,朱朋辉,等. 螺旋状绝缘型安全带防坠落保护平安环设计[J]. 设备管理与维修,2024(20):163-165.
[11] 邵瑞影,王洪军,于晓,等. 基于 AMESim 的矿井罐笼常闭式液压防坠器系统特性研究[J]. 机床与液压,2022,50(1):66-69.
[12] 李沛然,李星涛,张福永,等. 基于 TRIZ 理论高压电塔防坠保护装置的设计与分析[J]. 机械工程师,2025(1):149-152,156.
[13] 魏凯,周聪,徐博. 跨海桥梁高桩承台波浪冲击荷载概率模型[J]. 工程力学,2020,37(6):216-224.
[14] Guo B H, Yiu T W, González V A. Predicting Safety Behavior in the Construction Industry:Development and Test of an Integrative Model[J]. Safety Science,2016,84:1-11.
[15] 周翔,赵婷,张静思,等. 基于被动红外传感器的室内人行为机器学习模型[J]. 同济大学学报(自然科学版),2022,50(3):446-454.
[16] 吴家栋. 电力系统高空作业人员坠落风险与防控[J]. 通讯世界,2015(23):151-152.
[17] 王宁,王一臻,赵渊昉. 对高空作业坠落防护装备及其技术措施的研究[J]. 中国设备工程,2019(9):52-53.
[18] 杨宇轩,鲁义,李敏,等. 高空防坠落装置的使用现状及改进措施[J]. 安全,2021,42(3):51-54.
[19] 方登洲. 架空电缆线路杆塔防坠落装置分析与应用[J]. 电力安全技术,2016,18(4):33-34.

杨朝勇(1993—),男,广东惠州人,工程师,学士学位,主要从事电网建设技术的研究和管理工作,849017075@qq.com。