

中文引用格式:戴梦璠,李灵芝,钱宇昕,等.既有民用建筑安全鉴定辅助决策模型及应用[J].中国安全科学学报,2025,35(9):193-201.

英文引用格式:DAI Mengfan, LI Lingzhi, QIAN Yuxin, et al. Decision-support model for safety evaluation of existing civil buildings and its application[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(9): 193-201.

既有民用建筑安全鉴定辅助决策模型及应用^{*}

戴梦璠¹, 李灵芝^{**1}副教授, 钱宇昕², 袁竞峰³教授, 韩晓健¹教授, 赵昌皓¹

(1 南京工业大学 土木工程学院, 江苏南京 211816; 2 南京工业大学

计算机与信息工程学院(人工智能学院), 江苏 南京 211816;

3 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 211189)

中图分类号:X928.9

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.09.1527

基金项目:国家社会科学基金资助(24BGL297)。

【摘要】 为提升建筑安全体检工作效率,基于机器学习(ML)算法,构建既有民用建筑安全鉴定辅助决策模型。首先,从房屋鉴定报告中收集建筑结构安全特征数据;其次,采用相关性分析和交叉验证递归特征消除法构建包含“设计-演变-状态”多维特征的建筑安全鉴定辅助决策指标体系;再次,构建5种ML模型,根据准确率、精确率、召回率等指标测试模型性能;最后,开发既有民用建筑安全鉴定辅助决策平台,以实际工程验证其可操作性。结果表明:相较于设计特征,演变和状态特征更能反映民用建筑的实际情况,其中,建筑年龄、有无改扩建和混凝土梁承载能力是关键特征;决策树在围护系统、上部承重结构、地基基础及鉴定单元安全性评估中表现最佳。

【关键词】 机器学习(ML); 既有民用建筑; 安全鉴定; 辅助决策模型; 指标体系

Decision-support model for safety evaluation of existing civil buildings and its application

DAI Mengfan¹, LI Lingzhi¹, QIAN Yuxin², YUAN Jingfeng³,

HAN Xiaojian¹, ZHAO Changhao¹

(1 College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing Jiangsu 211816, China;

2 School of Computer Science and Technology (School of Artificial Intelligence), Nanjing

Tech University, Nanjing Jiangsu 211816, China; 3 School of Civil Engineering,

Southeast University, Nanjing Jiangsu 211189, China)

Abstract: To improve the efficiency of safety inspections for existing civil buildings, this study develops a decision-support model for safety evaluation of existing civil buildings based on ML techniques. Building safety feature data were first collected from building evaluation reports. Then, a multi-dimensional indicator system integrating "design-evolution-status" features was established through correlation analysis and recursive feature elimination with cross-validation. Subsequently, five ML models were built and evaluated using performance metrics such as accuracy, precision, and recall. Furthermore, a decision-

* 文章编号:1003-3033(2025)09-0193-09; 收稿日期:2025-04-08; 修稿日期:2025-06-30

** 通信作者:李灵芝(1987—),女,山东滨州人,博士,副教授,主要从事建筑安全评估、建筑运维管理、数据挖掘等方面的研究。E-mail: 6370@njtech.edu.cn.

support platform for safety evaluation of existing civil buildings was developed and validated through a real engineering project to examine its practical operability. The results demonstrate that, compared to design features, evolution and status features more effectively reflect the actual safety conditions of civil buildings. In particular, building age, renovation or extension history, and concrete beam load capacity are identified as key features. Among the tested models, the Decision Tree algorithm shows the best performance in evaluating the safety of enclosure system, superstructure, foundation, and individual evaluation unit.

Keywords: machine learning (ML); existing civil buildings; safety evaluation; decision-support model; indicator system

0 引言

近年来,既有民用建筑倒塌事故频发,如长沙“4·29”楼房坍塌、“7·23”齐齐哈尔体育馆坍塌等,暴露出严重的建筑安全隐患。住建部提出通过大规模体检评估城市建筑安全状况^[1]。然而,当前专业安全鉴定机构主要依赖现场数据采集与复杂鉴定规则,效率低、成本高^[2]。因此,探究高效的既有建筑安全评估方法以辅助鉴定决策具有重要意义。

目前,建筑安全评估研究主要聚焦于实时数据监测^[3]、非破坏性检测^[4]、机器学习(Machine Learning, ML)预测^[5]以及多方法集成评估。实时数据监测通过获取局部位移、变形和振动等动态数据评估建筑安全,如周艳兵等^[6]提出通过干涉测量合成孔径雷达(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)区域沉降筛查、无人机智能巡检与物联传感监测技术一体化的监测技术,监测地表沉降、建筑整体形变与构件与节点损伤,实现了既有建筑的高效管控。非破坏性检测广泛采用超声波、红外热成像和激光扫描等手段识别建筑局部缺陷,如VENKATESH等^[7]利用超声波脉冲速度测试和回弹法测试等无损检测技术评估混凝土结构的强度、均匀性及耐久性。部分学者引入ML算法以提高评估效率,如ALAVI等^[8]基于贝叶斯网络综合设计缺陷、构件老化与环境因素等指标预测建筑物的安全状况。此外,DING Zhikun等^[9]提出融合层次分析法、地理信息系统与建筑信息模型的混合方法,以建筑年龄、消防系统等指标综合评估建筑安全性能。综上所述,当前专业鉴定机构鉴定效率较低;而现有研究方法虽然在局部损伤识别与整体性能评估方面取得一定进展,但在特征选取方面存在明显局限。部分方法仅基于当前结构状态,或侧重建筑的非结构性特征,忽略了设计因素与服役过程劣化等动态因素的影响。此外,现有研究多以单一综合评价结果反映建筑结构的整体安全性,难以定位存在安全

隐患的建筑子单元,限制了其在大规模建筑体检中的应用潜力。

鉴于此,笔者拟从大量历史房屋鉴定报告中提取建筑结构安全特征数据,构建融合“设计-演变-状态”特征的既有建筑安全鉴定辅助决策指标体系,以围护系统、上部结构、地基基础以及鉴定单元的安全性作为预测目标,结合重采样技术平衡数据分布,利用ML算法开发高效的既有民用建筑安全鉴定辅助决策模型与平台,以期在城市大规模建筑体检提供技术支撑。

1 安全鉴定辅助决策模型构建框架

基于ML算法,提出一种集成“设计-演变-状态”特征的既有民用建筑安全鉴定辅助决策模型构建框架(图1)。该框架包括4个环节:①数据收集与预处理。从房屋鉴定报告中提取特征指标和预测目标数据,并将其分别作为模型的初始输入变量和输出变量,经预处理获得计算机可以识别的初始数据集。②既有民用建筑安全鉴定辅助决策指标体系构建。通过特征选择确定最优特征集,构建安全鉴定辅助决策指标体系。③基于ML的安全鉴定辅助决策模型构建。根据指标体系,训练、测试ML模型。④安全鉴定辅助决策模型平台开发及应用。基于模型开发既有民用建筑安全鉴定辅助决策平台,并通过实例验证平台的可操作性。

2 鉴定数据收集与预处理

专业鉴定机构依据《民用建筑可靠性鉴定标准》(简称《民标》)^[10],现场采集结构构件的承载能力、构造合理性、位移或变形、开裂,地基沉降、开裂,结构布置、支撑系统状态等大量数据,进行房屋安全鉴定并出具房屋鉴定报告。根据《民标》^[10],房屋鉴定分为3个层级:鉴定单元(最终鉴定对象,评级为 A_{su} 、 B_{su} 、 C_{su} 、 D_{su} (表1)、子单元(如围护系统、上部结构、地基,评级为 A_u 、 B_u 、 C_u 、 D_u)和构件(基本单

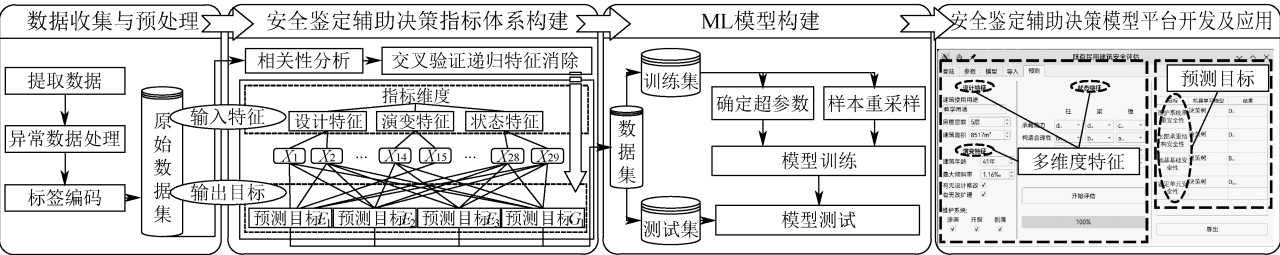


图 1 既有民用建筑安全鉴定辅助决策模型构建框架

Fig. 1 Framework for constructing decision-support model for safety assessment of existing civil buildings

位,评级为 a_u 、 b_u 、 c_u 、 d_u)。

表 1 民用建筑鉴定单元安全性鉴定评级标准

Table 1 Safety appraisal rating standards for civil building evaluation

等级	分级标准(是否影响整体承载)	处理要求
A_{su}	不影响	极少数一般构件应采取措施
B_{su}	尚不显著影响	极少数构件应采取措施
C_{su}	显著影响	极少数构件须及时采取措施
D_{su}	严重影响	必须立即采取措施

框架结构是现代民用建筑的常用形式,因此,以框架结构房屋为例研究民用建筑安全评估方法。共收集 106 份框架结构房屋鉴定报告,鉴定时间为 2020 年,房屋的建造年代分布于 1950—2020 年间。以该 106 栋建筑为研究对象,从其鉴定报告中提取指标数据用于构建既有民用建筑安全鉴定辅助决策模型。具体提取房屋鉴定报告中房屋层数、建筑用途等 29 个特征指标作为 ML 模型的初始输入变量。为挖掘细粒度的 ML 分类预测效果,以鉴定报告中的围护系统、上部结构、地基基础和鉴定单元安全性 4 个鉴定结果作为预测目标。

将 106 份框架结构房屋样本数据通过箱型图方法进行预处理^[11],得到 87 份有效样本。根据数据类型,指标分为连续型和离散型(无序或有序)数据。为便于计算机处理,采用标签编码数字化处理离散指标,建筑安全数据属性详见表 2。

3 安全鉴定辅助决策指标体系构建

通过特征工程,从原始指标体系中筛选出关键特征集,有利于降低数据维度以提高模型性能。有研究发现,建筑面积、年代、楼层数、使用用途等设计因素可能与建筑安全性存在关联^[12]。建筑服役过程中,会出现材料性能退化、构件损伤,使用条件也可能改变,这些都会直接影响结构安全^[13]。此外,专业鉴定机构依据结构承载能力和裂缝等特征评估

建筑安全性。因此,为深入解析特征指标与建筑安全性能的关系,将影响建筑结构安全的指标分为设计特征、演变特征以及主要结构构件的状态特征 3 个维度。设计特征涵盖建筑物初始设计的空间参数(X_1 — X_7 , X_{12})、功能定位(X_{10})和结构形式(X_{11}),共同影响结构构件的受力分布和荷载传递路径等;演变特征聚焦建筑在时间维度上经历的物理老化(X_8)、人为干预(X_{13} — X_{14})以及环境侵蚀(X_{15} — X_{17}),间接反映了建筑结构性能退化过程;状态特征包含构件的承载力(X_{18} — X_{20})、几何稳定性(X_{24} — X_{26})和损伤程度(X_{27} — X_{29}),直接表征构件层级的安全性能。

3.1 基于相关性分析的鉴定特征筛选

通过相关性分析检验输入特征与预测目标之间的相关性,剔除与预测目标不显著相关的特征。根据数据类型,将特征分为连续型和有序离散型数据组以及无序离散型数据组,前者采用斯皮尔曼相关系数检验^[14],后者采用卡方检验和克莱姆相关系数检验^[15]。

斯皮尔曼相关系数适用于判定连续变量或有序变量间的单调性关系。该方法通过秩次转换样本值计算秩差,并据此得出相关系数 ρ :

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

(1)

式中: d_i 为第*i*个样本在 2 个变量中的秩次差;*n*为样本数。

ρ 的取值范围为 $[-1,1]$,其中, -1 、 0 、 1 分别表示完全负相关、无相关性与完全正相关。若结果的显著性水平高于 0.05,认为变量间不具有显著相关性。斯皮尔曼相关系数计算结果如图 2 所示,其中,叉号表示 2 个变量间显著性水平低于 0.05,即不具有显著相关性。例如,预测目标 G_1 与 X_1 ,相关系数为 0.8,说明显著相关,而 G_1 与 $X_3 \sim X_6$ 、 X_{24} 和 X_{25} 相关性不显著。

表 2 建筑安全数据属性
Table 2 Safety data attributes of buildings

变量类型	变量名称	取值说明	示例	数据类型
输入变量	房屋层数 X_1 /层	1~12	2	连续型
	建筑面积 X_2 /m ²	1~22 000	1 817	
	房屋长度 X_3 /m	1~190	41.6	
	房屋宽度 X_4 /m	1~60	24	
	底层层高 X_5 /m	1~6.7	3.4	
	标准层层高 X_6 /m	1~6.5	3.45	
	房屋总高 X_7 /m	1~50	10.3	
	建筑年龄 X_8 /a	1~45	17	
	最大倾斜率 X_9 /‰	0~9	0.96	
	建筑使用用途 X_{10}	商业建筑=0;教学建筑=1;住宅=2; 敬老院=3;医院=4;其他=5	1	无序离散型
	楼屋盖形式 X_{11}	平屋面=0;坡屋面=1	1	
	平面形状 X_{12}	矩形=0;多边形=1;L形=2;环形=3;其他=4	1	
	有无设计修改 X_{13}	否=0;是=1	1	
	有无改扩建 X_{14}		1	
	围护系统渗漏/开裂/脱落 X_{15} — X_{17}		0/1/0	
	混凝土柱/梁/板承载能力 X_{18} — X_{20}	$a_u=1;b_u=2;c_u=3;d_u=4$	1/1/2	
	混凝土柱/梁/板构造合理性 X_{21} — X_{23}		1/1/1	
	混凝土柱/梁/板位移或变形 X_{24} — X_{26}		1/1/1	
	混凝土柱/梁/板开裂损伤 X_{27} — X_{29}		1/1/1	
输出变量	围护系统承重安全性 E_1	$A_u=1;B_u=2;C_u=3;D_u=4$	2	有序离散型
	上部承重结构安全性 E_2		2	
	地基基础安全性 E_3		2	
	鉴定单元安全性 G_1	$A_{su}=1;B_{su}=2;C_{su}=3;D_{su}=4$	2	

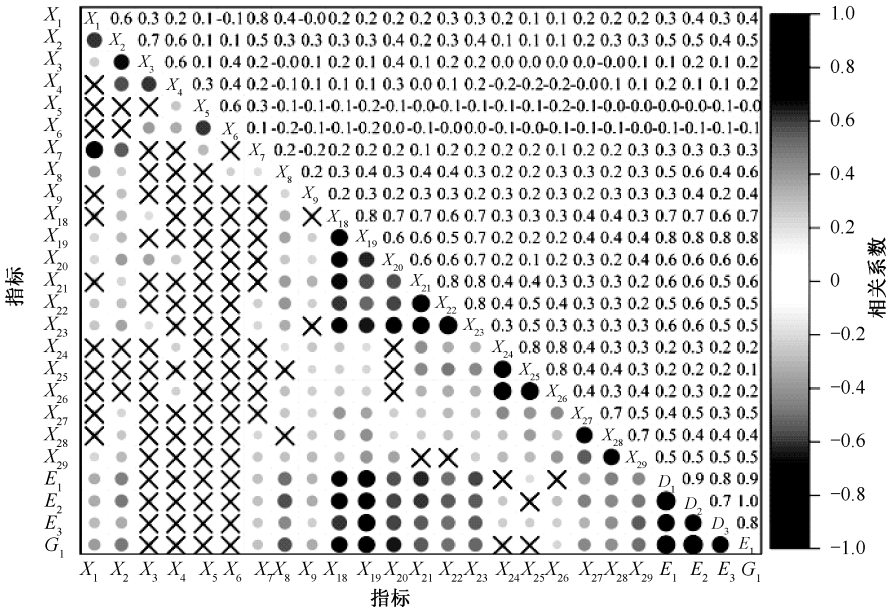


图 2 斯皮尔曼相关系数热力图

Fig. 2 Heat map of Spearman's correlation coefficient

采用卡方检验法判断无序变量之间的关联关系。其原假设为变量间相互独立,统计检验列联表中观测频数与期望频数的差异,计算卡方统计量 χ^2 :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \frac{(o_{ij} - \mu_{ij})^2}{\mu_{ij}} \quad (2)$$

式中: o_{ij} 为观测频数; μ_{ij} 为期望频数; r 和 c 分别为 2 个变量的类别数。

χ^2 统计量服从卡方分布,若显著性检验结果 $p < 0.05$,则拒绝原假设,认为变量之间存在显著关联。然而,卡方检验无法衡量关联强度。因此引入克莱姆相关系数 $V, V \in [0, 1]$,其值越大表示变量间的关联越强。

$$V = \sqrt{\frac{\chi^2}{N(\min(r-1, c-1))}} \quad (3)$$

式中 N 为样本总数。

卡方检验和克莱姆相关系数计算结果见表 3,其中, X_{11} 和 X_{12} 与预测目标间的相关性较弱。由图 2 和表 3 可知:设计特征中房屋长度(X_3)、房屋宽度(X_4)、底层层高(X_5)、标准层层高(X_6)、平面形状(X_{12})与预测目标均不相关,需剔除。此外,在围护系统承重安全性评估中,剔除楼屋盖形式(X_{11})、混凝土柱和板的位移或变形特征(X_{24} 、 X_{26});在上部承重结构安全性评估中,剔除楼屋盖形式(X_{11})以及混凝土梁的位移或变形特征(X_{25});在地

基基础安全性评估中,剔除楼屋盖形式特征(X_{11});在鉴定单元安全性评估中,剔除混凝土柱和梁的位移或变形特征(X_{24} 、 X_{25})。

表 3 卡方检验与克莱姆相关系数分析结果

Table 3 Results of chi-square test and Cramer's V analysis

指标	E_1	E_2	E_3	G_1
X_{10}	0.435	0.405	0.351	0.412
X_{11}	不显著	不显著	不显著	0.301
X_{12}	不显著	不显著	不显著	不显著
X_{13}	0.476	0.461	0.412	0.483
X_{14}	0.612	0.579	0.618	0.599
X_{15}	0.520	0.480	0.372	0.466
X_{16}	0.461	0.486	0.417	0.479
X_{17}	0.492	0.536	0.438	0.528

3.2 基于递归特征消除的鉴定特征筛选

在相关性分析的基础上,基于 Scikit-learn Python 库中 sklearn.feature_selection.RFECV 功能,采用交叉验证递归特征消除法,考虑特征组合效应,移除不重要的特征。最终筛选出对预测目标显著影响的最优关键特征集见表 4。

表 4 既有民用建筑安全鉴定辅助决策指标体系

Table 4 Decision-support indicator system for safety evaluation of existing civil buildings

预测目标	设计特征			演变特征							状态特征									
	X_1	X_2	X_{10}	X_8	X_9	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	X_{18}	X_{19}	X_{20}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	X_{26}	X_{27}
E_1	√	√	√	√	√	√	—	√	√	√	√	√	√	√	√	√	—	√	—	√
E_2	√	√	—	√	√	√	√	—	√	√	√	√	√	√	√	√	√	—	√	√
E_3	—	√	—	√	√	√	√	—	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
G_1	√	√	—	√	√	√	√	—	√	√	√	√	√	√	√	√	—	—	√	√

注:√表示该指标被作为相应预测目标的评估依据。

不同预测目标对应的特征存在差异,但总体而言,建筑安全受初始设计特征影响较小,更多受到建筑使用过程中动态变化的演变特征影响,并与建筑当前表现出的状态特征密切相关。这一特征符合建筑物安全性通常在其生命周期中受环境变化、使用程度增加以及维护管理缺乏等因素影响而动态变化的实际情况。此外,斯皮尔曼相关系数结果表明:演变特征和状态特征中最能反映建筑安全的特征分别是建筑年龄(X_8)和混凝土梁承载能力(X_{19}),克莱姆相关系数结果表明:最能反映建筑安全的演变特征是有无改扩建(X_{14})。

4 基于 ML 的安全鉴定辅助决策模型构建

特征筛选后获得 4 组数据集,分别对应 E_1 、 E_2 、

E_3 和 G_1 等 4 个预测目标,每组数据集共 87 条样本数据。分别从每组数据集中随机均匀划分出 30% 的测试集,剩余 70% 作为训练集,样本分布见表 5。为提高并准确评价 ML 模型的性能,采用网格搜索与分层 5 折交叉验证确定最优超参数,结合过采样技术平衡训练集数量,并选用多种 ML 算法训练模型,通过模型测试结果比较选取性能最优的模型,具体流程如图 3 所示。

4.1 ML 算法选择

常见的 ML 分类模型有 K 最近邻(K-Nearest Neighbor, KNN)、朴素贝叶斯(Naive-Bayes, NB)、决策树(Decision Tree, DT)、随机森林(Random Forest, RF)和支持向量机(Support Vector Machine, SVM)等。选择以上 ML 算法构建既有建筑安全鉴定辅助决策模型,并根据后续测试结果确定最优模型。

表 5 样本分布情况
Table 5 Distribution of samples

预测目标	样本数量(总样本/初始训练集样本)				
	$A_{(s)u}$	$B_{(s)u}$	$C_{(s)u}$	$D_{(s)u}$	合计
E_1	47/33	18/13	10/7	12/8	87/61
E_2	46/32	17/12	11/8	13/9	87/61
E_3	60/42	12/8	9/6	6/4	87/60
G_1	46/32	16/11	11/8	14/10	87/61

注: $A_{(s)u}$ 指 A_u 或者 A_{su} 。当预测目标为 E_1 、 E_2 和 E_3 时,其鉴定评级为 A_u ;当预测目标为 G_1 时,评级为 A_{su} ,其他同理。

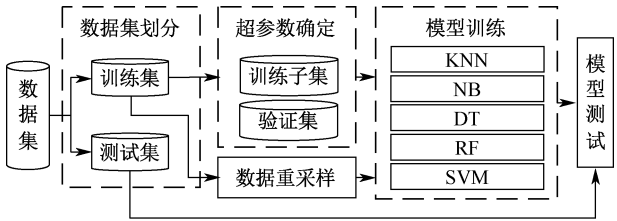


图 3 既有民用建筑安全鉴定辅助决策模型构建流程

Fig. 3 Decision-support model construction process for safety evaluation of existing civil buildings

4.2 ML 模型超参数确定

为使模型达到最佳性能,调整模型的超参数至关重要。由于样本数据不平衡可能引起预测偏差,因此采用网格搜索与分层 5 折交叉验证策略确定超参数。分层 5 折交叉验证是将训练集划分为 5 个不同的折,保持每个折中的样本类别分布与原数据集相同。以 1 个折作为验证集,其余 4 个折合并为训练子集,循环 5 次,以 5 次验证结果的平均值作为该次训练的得分。通过 GridSearchCV 函数,以平均准确率作为每组超参数的得分,遍历后确定最佳超参数组合。各 ML 模型的主要超参数取值见表 6。

表 6 ML 模型的主要超参数取值

Table 6 Key hyperparameter values for ML models

模型	主要超参数	超参数取值			
		E_1	E_2	E_3	G_1
KNN	k	5	7	9	7
NB	α	0.1	0.1	1.5	0.1
DT	criterion	entropy	entropy	gini	gini
	max_depth	8	10	10	6
	min_samples_split	2	2	5	5
	max_features	log2	log2	sqrt	sqrt

续表 6

模型	主要超参数	超参数取值			
		E_1	E_2	E_3	G_1
RF	criterion	entropy	gini	entropy	gini
	n_estimators	5	50	5	5
	max_depth	5	5	3	3
	max_leaf_nodes	16	8	16	8
	min_samples_split	2	2	4	4
	min_samples_leaf	2	1	2	1
	max_features	sqrt	sqrt	log2	log2
SVM	gamma	0.000 1	0.1	0.01	0.1
	c	1	10	10	100

4.3 鉴定数据重采样

由于样本类别分布不平衡,因此,采用过采样技术平衡样本分布。为克服传统过采样算法的随机性导致的噪声扩散问题,选用改进的边界过采样算法^[16],仅对决策边界附近的危险少数类样本进行过采样,从而提升模型对少数类样本的泛化能力。合成样本生成公式如下:

$$x_w = x_i + \lambda(x_{i,n} - x_i) \tag{4}$$

式中: x_w 为生成的合成样本; x_i 为少数类中处于边界区域的第 i 个样本; $x_{i,n}$ 为从 x_i 的 k 近邻中随机选择的少数类样本; λ 为区间 $[0,1]$ 内的随机数。

过采样后,预测目标 E_1 、 E_2 、 E_3 和 G_1 的样本数量分别为 132、128、168、104。

4.4 安全鉴定辅助决策模型训练

基于 Python 环境,从 Scikit-learn 库中选择 KNN、NB、DT、RF 和 SVM 算法,设定相应超参数并载入数据训练安全鉴定辅助决策模型。

4.5 安全鉴定辅助决策模型测试

模型在测试集上的预测结果体现模型性能。以测试集中某栋教学楼建筑为例,模型得出的预测结果以及鉴定报告提供的真实结果见表 7。每个预测模型对案例样本的围护系统、上部承重结构、地基基础和鉴定单元安全性分别作出了预测,与专业鉴定结果相比,KNN 和 NB 模型预测偏差较大,RF 和 SVM 模型个别结果预测不准确,DT 模型预测结果与专业鉴定结果一致。

通常通过混淆矩阵对比展示测试集内所有样本的真实值和预测值,混淆矩阵将预测样本分为真阳性(TP,正确预测的正类别样本)、真阴性(TN,正确预测的负类别样本)、假阳性(FP,错误地将负类别样本预测为正类别)和假阴性(FN,错误地将正类别样本预测为负类别)。与二分类问题不同,建筑安

表 7 某案例样本的模型预测结果与专业鉴定结果

Table 7 Model predictions and professional evaluation results for certain case samples

预测目标	模型预测结果					专业鉴定结果
	KNN	NB	DT	RF	SVM	
围护系统安全性(E_1)	B_u	C_u	D_u	D_u	D_u	D_u
上部承重结构安全性(E_2)	B_u	C_u	D_u	D_u	C_u	D_u
地基基础安全性(E_3)	A_u	A_u	B_u	D_u	D_u	B_u
鉴定单元安全性(G_1)	B_{su}	D_{su}	D_{su}	D_{su}	C_{su}	D_{su}

全性等级预测有 4 种结果,属于 4 类分类问题,混淆矩阵从 2×2 矩阵变成 4×4 矩阵。例如:以安全等级 A_u 为正类别样本时,其余结果视为负类别样本,如图 4 所示。

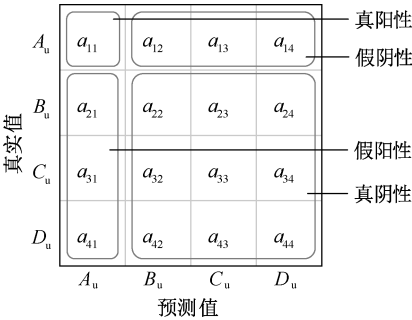


图 4 混淆矩阵(4×4 矩阵)

Fig. 4 Confusion matrix (4×4 matrix)

根据混淆矩阵计算准确率 (Accuracy, A)、精确率 (Precision, P)、召回率 (Recall, R)、 F_1 值 (F_1

Score, F_1) 和曲线下面积 (Area Under the Curve, AUC) 等评价指标评价模型^[17]。由于将不安全房屋误评为安全房屋可能导致严重后果,需要关注模型在少数类样本上的表现。因此,采用宏平均法计算评价指标,确保各类别在模型评价指标中的贡献相等。评价指标的公式如下:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^M TP_i + \sum_{i=1}^M TN_i}{\sum_{i=1}^M TP_i + \sum_{i=1}^M TN_i + \sum_{i=1}^M FP_i + \sum_{i=1}^M FN_i} \quad (5)$$

$$P = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{TP_i}{TP_i + FP_i} \quad (6)$$

$$R = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{TP_i}{TP_i + FN_i} \quad (7)$$

$$F_1 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M 2 \times \frac{Pr_i \times Re_i}{Pr_i + Re_i} \quad (8)$$

$$AUC = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M AUC_i \quad (9)$$

式中 M 为样本类别数, M 取 4。

准确率指所有预测结果中预测正确的样本比例;召回率指样本中正类别样本被正确预测的比例;精确率指预测正类别的样本中被正确预测的比例;AUC 表示模型区分正负类别样本的能力。模型测试结果见表 8,评价指标计算结果如图 5 所示。

表 8 模型测试结果混淆矩阵

Table 8 Confusion matrices for model test results

预测目标	KNN	NB	DT	RF	SVM
围护系统安全性(E_1)	$\begin{bmatrix} 11 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 10 & 0 & 3 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 13 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 14 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 2 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 12 & 2 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 3 \end{bmatrix}$
上部承重结构安全性(E_2)	$\begin{bmatrix} 5 & 4 & 5 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \\ 1 & 0 & 0 & 2 \\ 1 & 3 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 5 & 7 & 2 & 0 \\ 3 & 0 & 1 & 1 \\ 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 14 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 13 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 4 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 13 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 3 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 3 \end{bmatrix}$
地基基础安全性(E_3)	$\begin{bmatrix} 8 & 6 & 4 & 0 \\ 1 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 5 & 2 & 11 & 0 \\ 1 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 17 & 1 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 18 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 17 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
鉴定单元安全性(G_1)	$\begin{bmatrix} 9 & 3 & 0 & 2 \\ 0 & 4 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3 & 10 & 0 & 1 \\ 2 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 14 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 14 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 13 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 3 & 1 \end{bmatrix}$

KNN 和 NB 对应 4 个预测目标的 ML 模型准确率均小于 60%,效果明显较差,因此,重点比较 DT、

RF、SVM 的测试结果。在围护系统安全性(E_1)预测模型中,SVM 的准确率较低(65.38%),且其他指

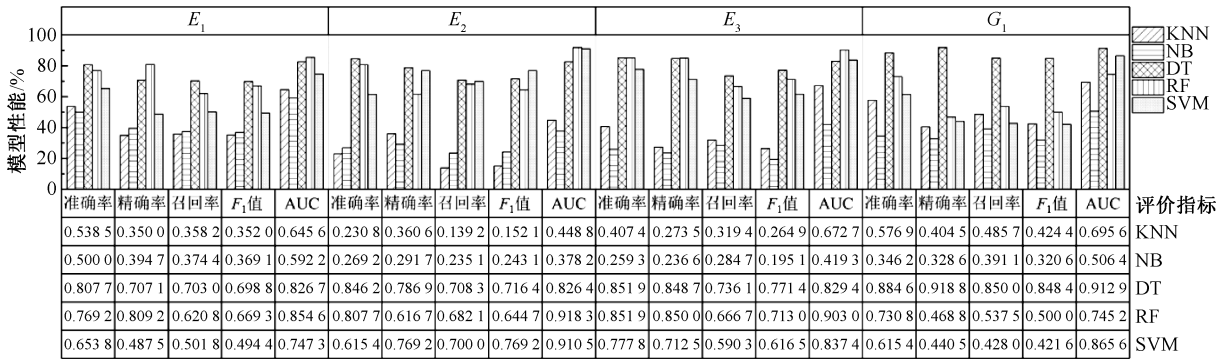


图 5 既有民用建筑安全鉴定辅助决策模型评价指标计算结果

Fig. 5 Indicator calculation results of decision-support model for safety evaluation of existing civil buildings

标均低于 DT 和 RF。DT 和 RF 的 AUC 都超过 80%，意味着 DT、RF 具有较好的分类效果。虽然 DT 的精确率低于 RF，但准确率、召回率、 F_1 值均高于 RF，能更好地识别出围护系统承重存在安全问题的样本，因此，DT 表现相对较好。在上部承重结构安全性(E_2) 预测模型中，通过比较 DT、RF 和 SVM 发现，SVM 的准确率只有 61.54%，RF 的精确率只有 61.67%，而 DT 的各指标均超过 70%，DT 表现最好。在地基基础安全性(E_3) 预测模型中，DT、RF 表现较好且相似，准确率、精确率均在 85% 左右，AUC 也高于 80%，但 DT 的召回率 (73.61%)、 F_1 值 (77.17%) 优于 RF，DT 模型能更好地识别出地基基础存在安全问题的样本，且在处理精确率和召回率之间的平衡上做得更好。因此 DT 表现更佳。在鉴定单元安全性(G_1) 预测模型中，DT 模型的各项指标均优于 RF、SVM，表现最佳。总的来说，DT 在各预测目标中表现均最好。

5 安全鉴定辅助决策平台开发及应用

基于安全鉴定辅助决策 ML 模型，使用 Python 开发框架结构既有民用建筑安全鉴定辅助决策平台，并通过 Qt Designer 设计界面。平台操作流程

为：①登录。用户登录。②参数。自定义输入特征的参数类别和数据转换规则。③模型。选择预测目标和 ML 算法。④导入。上传样本数据文件，导入数据；⑤预测。录入建筑特征进行预测。在平台中输入某教学楼的特征以测试其功能。平台运行结果显示，该楼围护系统为 D_u 级，地基基础为 B_u 级，上部结构为 D_u 级，鉴定单元为 D_{su} 级，平台预测该建筑整体安全性较差，须立即采取措施。平台运行结果与安全鉴定报告一致，验证了该平台的可靠性。

6 结 论

- 1) 通过相关性分析发现，建筑安全鉴定应重点关注建筑演变特征和状态特征。其中，建筑年龄、有无改扩建和混凝土梁承载能力对建筑安全的影响较大，可以作为待鉴定建筑的初步分类依据。
- 2) KNN、NB、DT、RF 和 SVM 等 5 种 ML 算法和 4 个预测目标构成的安全鉴定辅助决策模型中，DT 表现最佳，能够较准确且全面地预测出有安全风险的建筑。
- 3) 安全鉴定辅助决策模型重点针对框架结构建筑，限制了其在其他结构类型中的应用，未来需要扩展数据集，涵盖更广泛的结构类型。

参 考 文 献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 住房和城乡建设部关于全面开展城市体检工作的指导意见[EB/OL]. (2023-11-29). https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202312/content_6918797.htm.

[2] 张鑫, 李安起, 赵考重. 建筑结构鉴定与加固改造技术的进展[J]. 工程力学, 2011,28(1):1-11,25. ZHANG Xin, LI Anqi, ZHAO Kaozhong. Advances in assessment and retrofitting of building structures[J]. Engineering Mechanics, 2011,28(1):1-11,25.

[3] 李俊杰, 葛德, 孙文. 基于结构健康监测系统的某办公建筑运营期结构响应分析[J]. 建筑结构, 2023,53(21):107-111. LI Junjie, GE De, SUN Wen. Structural response analysis of an office building during operation based on structural health monitoring system[J]. Building Structure, 2023,53(21):107-111.

[4] 蒋维乐, 姚坤, 林启敬, 等. 结构健康监测系统在木结构古建筑中的应用[J]. 传感技术学报, 2024, 37(8): 1 295–1 306.
JIANG Weile, YAO Kun, LIN Qijing, et al. Application of structural health monitoring system in wooden-structure ancient buildings[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2024, 37(8): 1 295–1 306.

[5] 黄永, 鲍跃全, 李惠. 结构状态识别与评估的机器学习方法研究进展[J]. 力学进展, 2023, 53(4): 774–792.
HUANG Yong, BAO Yuequan, LI Hui. Research advances in machine learning for structural state identification and condition assessment[J]. Advances in Mechanics, 2023, 53(4): 774–792.

[6] 周艳兵, 施钟淇, 金典琦, 等. 天空地一体化监测技术在既有建筑安全管控中的应用和展望[J]. 建筑结构, 2022, 52(增 2): 1 893–1 897.
ZHOU Yanbing, SHI Zhongqi, JIN Dianqi, et al. Application and prospect of integrated spaceborne, airborne and terrestrial monitoring technology in safety management and control of existing buildings[J]. Building Structure, 2022, 52(S2): 1 893–1 897.

[7] VENKATESH P, ALAPATI M. Condition assessment of existing concrete building using non-destructive testing methods for effective repair and restoration: a case study[J]. Civil Engineering Journal, 2017, 3(10): 841–855.

[8] ALAVI H, BORTOLINI R, FORCADA N. BIM-based decision support for building condition assessment[J]. Automation in Construction, 2022, 135: DOI: 10. 1016/j. autcon. 2021. 104117.

[9] DING Zhikun, NIU Jindi, LIU Shan, et al. An approach integrating geographic information system and building information modelling to assess the building health of commercial buildings [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 257: DOI: 10. 1016/j. jclepro. 2020. 120532.

[10] GB50292—2015, 民用建筑可靠性鉴定标准[S].
GB50292—2015, Standard for appraisal of reliability of civil buildings[S].

[11] 汪明元, 陈松庭, 陈彪, 等. 考虑数据预处理和特征选择的静力触探参数研究[J]. 浙江工业大学学报, 2025, 53(1): 15–21.
WANG Mingyuan, CHEN Songting, CHEN Biao, et al. Study on parameters of cone penetration test considering data pre-processing and feature selection[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2025, 53(1): 15–21.

[12] 段在鹏, 李帆, 郭进, 等. 城市易涝区房屋结构安全集成预警模型[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(7): 173–180.
DUAN Zaipeng, LI Fan, GUO Jin, et al. Integrated warning model for structural safety of buildings in urban waterlogged area[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(7): 173–180.

[13] 刘立渠, 彭立新, 赵振红, 等. 既有建筑结构安全性鉴定中分项系数的调整研究[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(4): 247–253.
LIU Liqu, PENG Lixin, ZHAO Zhenhong, et al. Research on adjusting partial factors in safety appraisal of existing building structure[J]. Journal of Building Structures, 2024, 45(4): 247–253.

[14] SEDGWICK P. Spearman’s rank correlation coefficient [J]. British Medical Journal, 2014, 349: DOI: 10. 1136/bmj. g7327.

[15] 李显, 焦宇, 陈文涛, 等. 船舶修造企业火灾事故特征挖掘与致因分析[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(3): 29–38.
LI Xian, JIAO Yu, CHEN Wentao, et al. Feature mining and causative analysis of fire accidents in ship repair and building enterprises[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(3): 29–38.

[16] HAIRANI H, WIDIYANINGTYAS T, PRASETYA D D. Addressing class imbalance of health data: a systematic literature review on modified synthetic minority oversampling technique (SMOTE) strategies[J]. JOIV: International Journal on Informatics Visualization, 2024, 8(3): 1 310–1 318.

[17] LI Huixia, NYIRANDAYISABYE R, DONG Qiming, et al. Crack damage prediction of asphalt pavement based on tire noise: a comparison of machine learning algorithms[J]. Construction and Building Materials, 2024, 414: DOI: 10. 1016/j. constrbuildmat. 2024. 134867.

作者简介： 戴梦璠 （2000—）,女,江苏徐州人,硕士研究生,主要研究方向为数据挖掘、既有建筑安全评估、城市更新。E-mail:dmfw2000@163.com。

