

论文引用格式：周新民，余焕杰.基于动态图卷积与时空注意力的城市交通流量预测模型[J].中国安全科学学报，202?，3?（?）：?-?.

英文引用格式：WANG Xiaoming, LIU Xiangqiang, ZHANG Meili,et al. A BIM-PT-integrated warning system for on-site workers' unsafe behavior[J].China Safety Science Journal,202?，3?（?）：?-?.

基于动态图卷积与时空注意力的城市交通流量预测模型

周新民^{1,2} 教授， 余焕杰³

(1 湖南工商大学 人工智能与先进计算学院, 湖南 长沙 410205; 2 湘江实验室, 湖南 长沙 410205;
3 湖南工商大学 计算机学院, 湖南 长沙 410205)

文章编号：1003-3033 (202?) 00-0000-00; 收稿日期：202? -00-00; 修稿日期：202? -00-00

中图分类号：X948 文献标志码：A DOI: 10.16265/j.cnki.issn 1003-3033.202? .00.000

基金项目：国家社会科学基金资助 (21BGL231) ; 湘江实验室重大项目 (23XJ01001) 。

*通信作者简介：周新民 (1977—)，男，湖南新邵人，博士，教授，博士生导师，主要从事新型智慧城市、商务智能与大数据、人工智能大模型等方面的研究。E-mail: zhouxinmin2699@163.com。

【摘要】为了预防施工安全事故，利用建筑信息模型（BIM）和定位技术（PT），研究工人不安全行为的预警机制。通过对施工现场工人不安全行为的统计分析，探讨工人不安全行为的分类，包括接近危险源、安全用品使用不当、违章操作，分析安全事故预警的信息需求，如工人及机械设备位置信息、工人属性及装备信息、工人及机械设备动作信息等，进而构建集成 BIM 和 PT 技术的工人不安全行为预警系统框架，划分现场不安全区域、工人属性和预警级别，分析系统功能。研究表明：该系统可通过对工人位置信息和行为信息的获取、处理和反馈，实现现场事故的预防（如坠落、碰撞等），从而提高施工现场安全管理水平。

（摘要是对论文内容不加注释和评论的简短陈述，应具有独立性和自明性；目的是让读者尽快了解主要内容，补充题目的不足，同时便于文献检索。摘要中应含有研究的目的、方法、结果和具体的结论，结论应写客观研究成果，不宜自评，总字数 400 字为宜）

【关键词】施工；不安全行为；事故预防；建筑信息模型（BIM）；定位技术（PT）

（请选择能反映论文主要内容或研究方法的词作为关键词；关键词要有检索意义，不应使用太泛指的词，如方法、理论、分析等；数量为 5~8 个,关键词用分号隔开）

【关键词选择方法】：题目中的专业性名词列为关键词；主题性关键词须在正文各章节中出现 5 次以上，非主题性关键词须在正文中出现 3 次以上，出现次数不够的可补充相关叙述。同时，尽量不要选取 2 个字的词。）

A BIM-PT-integrated warning system for on-site workers' unsafe behavior

（除首单词首字母，其余都小写）

WANG Xiaoming¹, LIU Xiangqiang¹, ZHANG Meili¹, LI Qing²

（作者英文翻译中，姓字母全大写，名只是首字母字母大写）

(1 Department of Construction Management, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2 School of Safety Science and Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430070, China)

（顺序为二级单位、一级单位、市、省、邮编、国家，各部分标点请参考模版）

Abstract: In order to prevent construction accidents on site, the warning mechanism for on-site workers' unsafe behavior was studied by integrating BIM and PT. The unsafe behavior of workers on site was analyzed and classified, including approaching dangerous areas, misusing personal protective equipment and violating operating regulations., and the demand of information for accident warning also analyzed, e.g. location, properties and actions. Furthermore, the framework of a BIM-PT-integrated warning system was developed and its initial settings (e.g. unsafe areas, workers' properties, warning levels) and functions also presented. With the information of workers' location and actions, this warning system can identify workers' unsafe status (e.g. falling from height, collision, etc.), automatically send warning messages to relevant workers and managers, and therefore improve the level of safety

（英文摘要应尽量与中文相对应（不必完全一致），应包括论文研究目的、方法、结果和具体的结论，可比中文摘要详细。英文的语言请着重润色,注意基本要求：第三人称、被动语态。）

Keywords: construction; unsafe behavior; accident prevention; building information modeling (BIM); positioning technology (PT)

全文叙述尽量避免用“对什么进行什么”的句式。

0 引言

（论文的第1部分为引言，以“0”开始。注意理清引言思路，按逻辑顺序一环一环展开。先介绍为什么要研究论文这个选题；现阶段现状如何，有哪些代表性的成果，存在什么不足，进而突出论文的创新；简要介绍论文将用什么方法具体研究什么问题，预期取得怎么样的成果。）

建筑施工现场环境复杂多变，一方面生产要素密集，涉及大量的工人、机械设备、物料等；另一方面露天作业、高空作业多，作业人员流动性大，且多数为手工操作，同时，大型机械设备的作业也较为集中。这些特点决定了建筑施工现场不可预测因素较多，也是建筑业高事故率且难以控制的主要原因^[1-3]。因此，研究并建立安全事故预防机制，提高施工现场安全管理水平、降低事故率，对建筑业的健康发展具有重要意义（研究意义）。

建筑施工安全事故中由于高处坠落、物体打击、机械伤害和触电导致的伤亡事故多年来一直居高不下，被称为4大伤害。这些安全事故的发生离不开人-机-环这3个方面，即人的不安全行为、物的不安全状态和不安全环境^[4]。其中，人作为生产活动的主体，是安全事故的主要激发因素，由于人的不安全行为导致的安全事故也占安全事故总数的大多数。因此，安全事故的预防应重点针对人的不安全行为进行预测和控制。一般工程建设项目配备安全管理人员进行现场监督与管理，但由于施工现场环境复杂、人员较多，因此，难于有效监督所有工人的作业行为。目前，多是通过安全培训教育提高工人的知识水平和安全意识^[5-6]（文中引用的内容，可以在所引内容最后加文献序号；提及作者的，只写出第一作者的名字，有更多作者的话，应加“等”，格式如：“张三等^[9]发现，LI Si等^[10]提出了...”），建立相关的行政管理手段^[7]，控制加班时间，减轻工人的劳动强度，加强安全监督和管理工作^[8]，并增加施工现场的安全投入，改善硬件条件以营造良好的施工环境^[9]，并通过建立物质激励和精神激励措施，提高工人的安全行为态度^[10]。尽管这些措施在某种程度上提高了安全管理水平，但面对动态的、复杂的施工现场环境及多变的工人行为仍难以控制，且现有安全培训手段很难让工人深入

了解项目中的全部安全隐患。为此一些研究尝试通过信息技术来控制人的不安全行为，如利用无线射频识别（Radio Frequency Identification, RFID）（按我刊要求，文中出现的缩写都应该是含义明确的，首次出现时格式为：有限元分析(Finite Element Analysis, FEA)，格式即中文（英文全拼，英文缩写），之后直接用缩写）技术进行人员和施工资源（机械设备等）的定位^[11-12]，实现人员和施工机械的碰撞事故预防^[13]以及现场管理^[14]（研究现状）。这些研究主要在人-机碰撞方面进行了试验性分析，而对施工现场其他事故成因考虑较少，如高空坠落等（总结研究现状的不足之处）。

因此，笔者拟综合考虑施工现场事故成因（对应研究现状的不足之处，体现论文创新），通过分析施工现场工人的不安全行为，明确工人不安全行为的控制信息需求，结合建筑信息模型（Building Information Modeling, BIM）和定位技术（Positioning Technology, PT），集成工人的不安全行为和现场的不良环境，构建工人不安全行为预警系统，以更好地预防施工事故的发生和提高施工安全管理水平（拟研究方法和内容，及预期成果）。

1 基于 STMAT 模型的城市交通流量预测

充分挖掘城市道路交通流量的时空耦合特性、多尺度关联特性与动态演化规律，是提升复杂场景下流量预测精度与泛化能力的核心前提。STMAT模型主要通过以下3个维度强化特征表达与预测性能：①针对交通流量在时间维度上的多尺度异质性，融合近期、周期、趋势三类时间特征，构建以多时间步长为索引的输入数据集；同时引入邻接矩阵的拉普拉斯标准化，精准捕获路网空间拓扑关联，实现时空特征的初步解耦与对齐。②基于模块化设计思想，构建双分支时空编码模块，在模块内部集成动态邻接矩阵生成机制与时空注意力机制：通过LSTM层捕捉时序依赖，结合空间注意力与时间注意力动态加权特征权重，引入切比雪夫图卷积挖掘复杂空间关联，并以残差连接与层归一化缓解梯度消失，增强特征的深度提取与传递能力。③设计多尺度特征融合与输出解码单元，对不同时间尺度卷积层的输出进行自适应加权融合，同时耦合多时间尺度特征的全局关联，最终生成兼具局部精准

性与全局一致性的交通流量预测结果。STMAT 预测模型框架如图 1 所示。

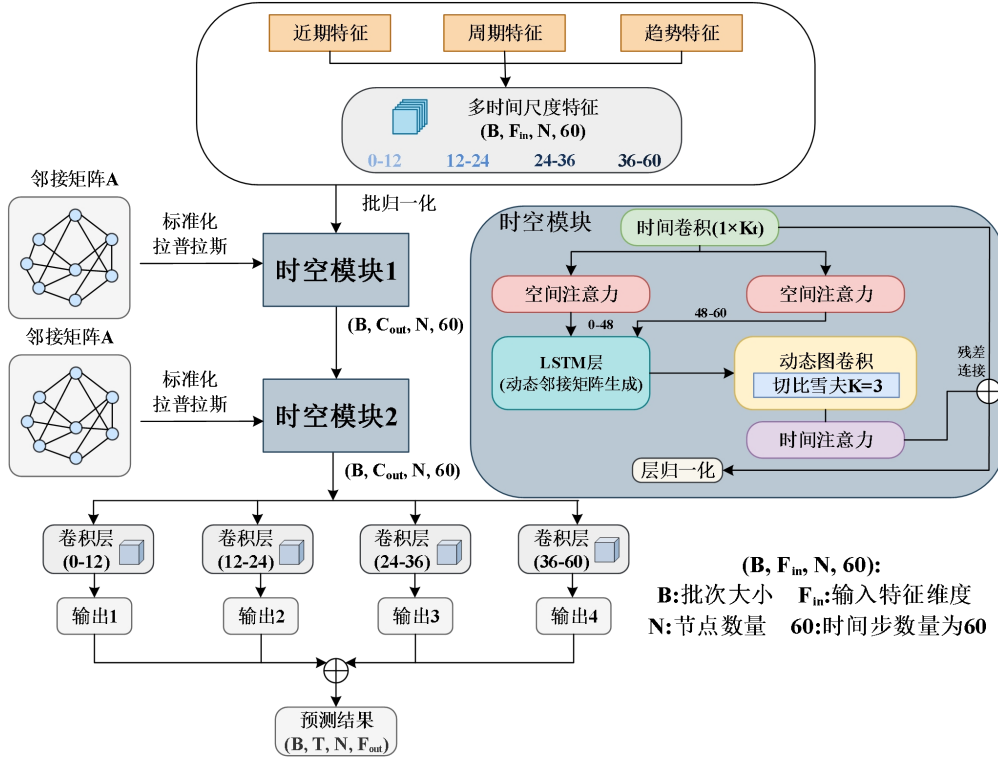


图 1 STMAT 预测模型框架

Fig.1 Framework of STMAT prediction model

1.1 动态图卷积增强模块

针对大规模路网下静态图卷积计算复杂度高、无法适配动态时空关联的问题，本研究设计动态图卷积增强模块，核心思路是通过切比雪夫多项式近似图卷积，在降低计算复杂度的同时实现时空特征的耦合提取。传统图卷积直接基于拉普拉斯矩阵 L 计算，复杂度为 $O(N^2)$ (N 为路网节点数)，当 N 达到 800 以上时计算效率显著下降。为解决这一问题，模块采用 K 阶切比雪夫多项式对标准化拉普拉斯矩阵 \tilde{L} 进行近似，其递推关系为：

$$\begin{aligned} T_0(\tilde{L}) &= I, \\ T_1(\tilde{L}) &= \tilde{L}, \\ T_k(\tilde{L}) &= 2\tilde{L}T_{k-1}(\tilde{L}) - T_{k-2}(\tilde{L}) \end{aligned} \quad (1)$$

其中 I 为单位矩阵， $k = 2, 3, \dots, K-1$ 。经近似后，图卷积的计算复杂度降至 $O(KN)$ ，本研究中取 $K = 3$ ，在保证空间关联捕捉能力的同时，将计算量降低约两个数量级。在此基础上，模块进一步将空间图卷积与时间卷积协同设计：首先通过爱因斯坦求和将输入特征与切比雪夫多项式序列融合，得到多阶空间特征 $X_{spatial}$ ；随后应用 $1 \times K_t$ ($K_t = 3$) 的时间卷积核，对空间特征进行局部时间卷积，提取时间维度的局部依赖，最终输出时空耦合特征。这一设计可适配 300s/900s 不同时间粒度的交通数据，例如在 SZ_TAXI 数据集（900s 粒度）中，时间卷积核可有效捕捉 3 个连续时间步的流量变化关联，

而在 PEMS3 数据集（300s 粒度）中则适配更精细的时间依赖。

1.2 分层时空注意力模块

交通流的时空特征具有显著的时段异质性，具体表现为在平峰时段空间关联较弱且变化平缓，而在高峰时段空间关联强且波动剧烈；同时时间维度存在邻近性与周期性的双重依赖。针对这一特性，分层时空注意力模块采用双分支结构实现精准特征提取。空间注意力子模块基于时段异质性设计分时段处理逻辑：将输入的 60 时间步特征划分为前 48 步（长时段，平峰/缓峰）与后 12 步（短时段，高峰），分别通过 1×1 卷积降维得到特征分支 F_1 与 F_2 ，再经爱因斯坦求和计算节点间的动态关联权重：

$$S_{att} = \text{sigmoid}(F_1 \otimes F_2) \quad (2)$$

其中 \otimes 为爱因斯坦求和操作。为避免局部特征过载，权重经 *LayerNorm* 归一化后输出，确保不同时段的空间关联特征得到均衡捕捉。时间注意力子模块则针对时间周期性设计区间掩码机制，构建 60×60 的掩码矩阵 M ：

$$M_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{若时间步 } i, j \text{ 属于同周期} \\ -10^{13}, & \text{否则} \end{cases} \quad (3)$$

该掩码仅允许同周期时间步（如昨日 8 时与今日 8 时）交互，强化时间邻近性与周期性特征。在

此基础上，通过双卷积分支提取时间-节点特征，结合可学习参数矩阵计算注意力得分，经 *Softmax* 与掩码约束生成时间注意力权重，最终对特征进行加权增强。

1.3 时空融合块

时空融合块是模型的核心计算单元，其设计目标是实现“静态路网拓扑+动态交通关联”的深度融合，并提升模型训练稳定性。模块首先基于空间注意力权重生成动态邻接矩阵：以空间注意力权重为输入，通过 LSTM 学习路网关联的时序变化，得到动态邻接矩阵 $A_{dynamic}$ ，随后将其与静态拉普拉斯矩阵 \tilde{L} 加权融合：

$$A_{fusion} = A_{dynamic} \odot \tilde{L} \quad (4)$$

其中 \odot 为哈达玛积。这一融合策略既保留了路网的固有拓扑结构，又能适配不同时段交通流动态变化，例如在早高峰时段，动态邻接矩阵会强化主要干道的节点关联，而静态拉普拉斯矩阵则维持路网的基础连接。为缓解深层网络的梯度消失问题，模块引入门控与残差机制：将动态图卷积的输出拆分为特征过滤分支 *Filter* 与门控分支 *Gate*，通过 *sigmoid* 激活实现特征的选择性增强：

$$X_{filtered} = \text{sigmoid}(Gate) \cdot \text{LeakyReLU}(Filter) \quad (5)$$

随后通过残差连接将模块初始输入与过滤后的特征相加：

$$X_{residual} = X_{filtered} + X_{input} \quad (6)$$

最后经 *LayerNorm* 归一化处理，适配多数据集的特征分布差异，提升模型泛化能力。

1.4 模型适配与优化

为消除原始代码中硬编码对输入维度的限制，本研究从输入维度与超参数两方面进行适配优化。输入维度自适应方面，模块不再依赖固定的 60 时间步硬编码，而是基于 *config.json* 配置文件动态解析时间步长度与时段划分规则，例如在 SZ_TAXI 数据集(900s 粒度)中解析为 60 时间步，在 PEMS3 数据集(300s 粒度)中则根据配置调整为 48 时间步，同时通过 1×1 卷积动态调整输入特征维度，兼容仅含流量特征或同时含流量、速度特征的数据集。超参数自适应调整方面，针对不同数据集的点位数量与样本量，动态优化图卷积阶数 K 与时间卷积核 K_t ：例如在小规模数据集中取 $K=2$ 以减少计算量，在大规模数据集中取 $K=3$ 以保证空间关联捕捉能力；同时在注意力模块与图卷积模块中嵌入 Dropout 层，抑制过拟合，提升模型在跨场景下的泛化能力。这些优化使得模型可适配不同城市规模、路网密度的交通场景，为多源数据集的统一预测提供了高效解决方案。

2 预测模型试验与分析

2.1 数据集信息及试验设置

试验所用的五个数据集如表 1 所示。所选用的数据集覆盖不同城市、时间粒度、区域规模与样本量，确保实验的全面性。

表 1 试验数据集信息

Table 1 Information of experimental datasets

数据集	时间间隔/s	区域/点位数量	可训练样本量	时间范围
SZ_TAXI	900	156	2964	2015-01-01—2015-01-31
PEMSD3	300	358	26196	2018-09-01—2018-11-30
PEMSD4	300	307	16980	2018-01-01—2018-02-28
PEMSD7	300	883	28212	2017-05-01—2020-08-31
PEMSD8	300	170	17844	2016-07-01—2016-08-31

2.2 数据预处理

试验所用数据集都处理成如表 2 所示的原子文件格式。

表 2 数据集文件及内容

Table 2 Datasets files and contents

文件	内容	示例
.geo	存储地理实体属性信息	geo_id, type, coordinates
.rel	存储实体间的关系信息	rel_id, type, origin_id, destination_id
.dyna	存储交通状态信息	dyna_id, type, time, entity_id, location_id
.json	用于补充描述各表信息	{"geo": {"including_types": ["Point"], "Point": {}}}

2.3 评估指标定义

针对不同属性的工作人员以及所处的不安全区域，系统可以实现工人位置实时监测、装备佩戴监测、重要机械设备操作监测等功能。同时，结合对施工现场车辆等机械设备的位置实时监测，还可以实现碰撞事故预防。在施工开始之前，根据施工

方案，还可以进行重要部位施工方案模拟，供工作人员进行操作培训和学习。系统的工作流程，如图2所示。

2.4 试验结果分析

表 3 各数据集上不同模型的 MAE 和 MAPE 值
Table 3 MAE and MAPE values of different models on various datasets

模型	SZ_TAXI		PEMSD3		PEMSD4		PEMSD7		PEMSD8	
	MAE	MAPE	MAE	MAPE	MAE	MAPE	MAE	MAPE	MAE	MAPE
HA	8.77	12.5	31.58	33.78	38.03	27.88	45.12	24.51	34.86	27.88
ARIMA	7.80	11.2	35.41	33.78	33.73	24.18	38.17	19.46	31.09	22.73
VAR	5.62	9.82	23.65	24.51	24.51	17.24	50.22	32.22	19.19	13.10
FC-LSTM	5.83	10.13	21.33	23.33	26.77	18.23	29.98	13.20	19.19	13.10
DCRNN	2.98	8.64	17.99	18.34	21.22	14.17	25.22	11.82	17.86	11.45
GraphWaveNet	3.02	8.95	19.12	18.89	24.89	17.29	26.39	11.97	18.28	12.15
ASTGCN	3.01	8.78	17.34	17.21	22.92	16.56	24.01	10.73	18.25	11.64
MSTGCN	2.91	8.43	19.54	23.86	23.96	14.33	29	14.30	19.00	12.38
STSGCN	2.96	8.26	17.48	16.78	21.19	13.90	24.26	10.21	17.13	10.96
STFGNN	2.92	7.94	16.77	16.30	20.48	16.77	23.46	9.21	16.94	10.60
STSGRU	2.91	7.64	15.45	15.85	20.11	13.86	21.5	9.08	15.68	10.67
AGCRN	3.06	7.43	15.98	15.23	19.83	12.97	22.37	9.12	15.95	10.09
DSTAGNN	<u>2.85</u>	<u>6.98</u>	<u>15.57</u>	14.68	<u>19.30</u>	<u>12.70</u>	<u>21.42</u>	<u>9.01</u>	<u>15.67</u>	<u>9.94</u>
本文模型	2.68	6.44	15.23	<u>14.83</u>	18.65	12.39	20.56	8.42	14.71	9.45

2.5 消融实验对比分析

2.6 预测结果可视化分析

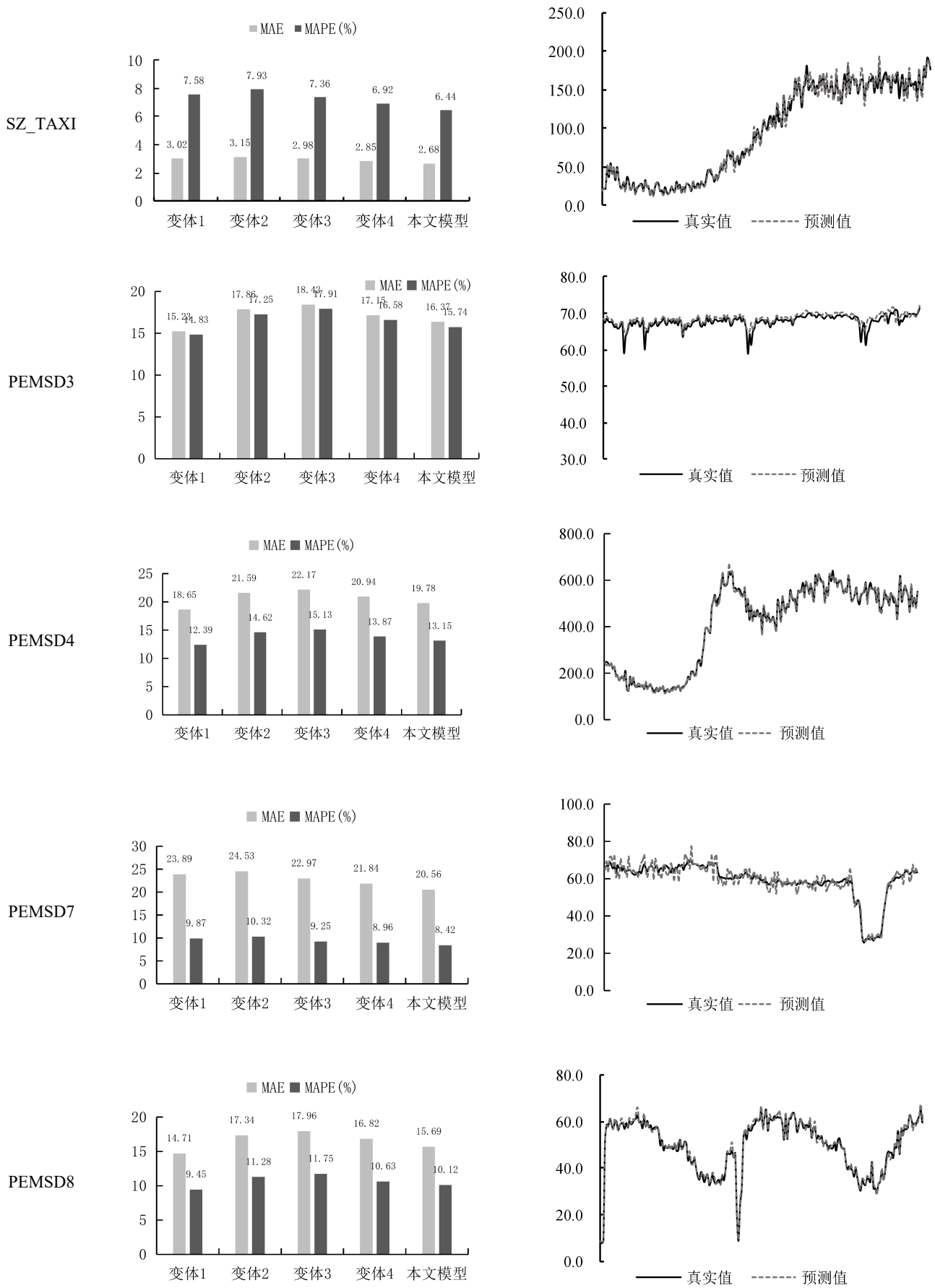


图 2 消融实验结果（左）与预测结果可视化（右）

Fig.2 Visualization of ablation experiment results (left) and predicted outcomes (right)

4 结 论

（论文的最后一部分是“结论”，不要写成“结语”或别的什么名字。结论是对研究结果和论点的提炼和概括，不要写成总结或与摘要内容重复，应客观、准确、精练、完整。结论需归纳成条，除了研究取得的主要成果，也可说明研究的不足及今后的研究方向）

1) 从行为控制的角度构建的施工现场工人不安全行为分类方法，即接近危险源、安全防护用品使用不当和违章操作，有利于对现场不安全行为进

行分级处理与控制。

2) 结合 BIM 技术和 PT 技术构建的安全行为预警平台，集成了人的不安全行为和现场的不安全环境，实现了工人位置识别、机械操作监测、碰撞事故预防等功能，有利于对建筑施工安全行为进行实时监控，并及时反馈预警信息，防止事故的发生。

3) 研究重点在工人及机械设备等位置和属性信息的监测与分析，而在工人及机械微观行为监控方面，仅进行了初步探讨，在未来需要进行深入研究。

参 考 文 献

- [1] 王颖, 胡双启, 池致超, 等. 建筑安全事故成因分析及预警管理的研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2011,7(7):112-115.
WANG Ying, HU Shuangqi, CHI Zhichao, et al. Cause analysis of construction safety accident and early-warning research [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2011,7(7):112-115.