



同濟大學  
TONGJI UNIVERSITY



土木工程學院  
COLLEGE OF CIVIL ENGINEERING

中国土木工程学会工程防火技术分会

2023年学术交流会·北京

# 基于深度学习的多层钢框架结构 火致倒塌预警关键位移**实时推算**方法

王 尧, 李国强, 朱劭骏\*

\* 报告人: 朱劭骏 助理教授

同济大学土木工程学院 建筑工程系

2023年12月10日

01

问题背景

02

火致倒塌实时预警理论与方法

03

难测物理量实时推算

04

结语

01

问题背景

02

火致倒塌实时预警理论与方法

03

难测物理量实时推算

04

结语

# 1 问题背景

## ■ 多层钢框架结构 Multi-story steel frame structures

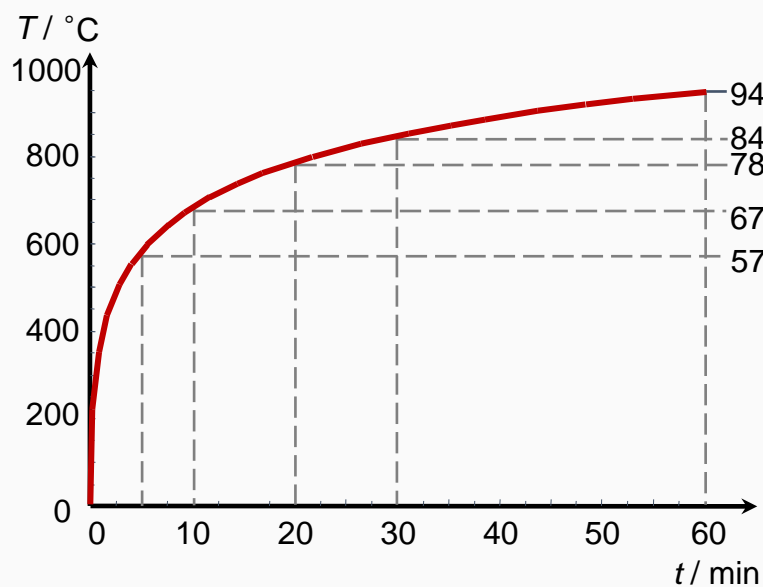
- 承载效率高、抗震性能优越
- 内部空间大、布局灵活、施工速度快
- 广泛应用于**大型商业建筑**



# 1 问题背景

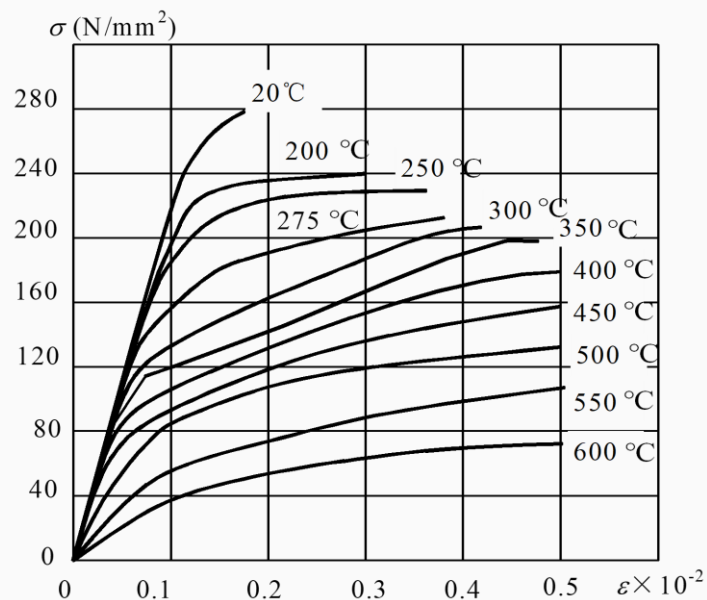
## ■ 钢结构建筑在火灾下易倒塌 Steel structures being prone to collapse in fire

- 室内火灾发生 10 分钟后，温度即高于 **600°C**
- 600°C 下钢材已**丧失大部分强度**



**一般室内火灾温升曲线**

Temperature curve of compartment fire



**高温下钢材本构关系**

High-temperature constitutive model of steel



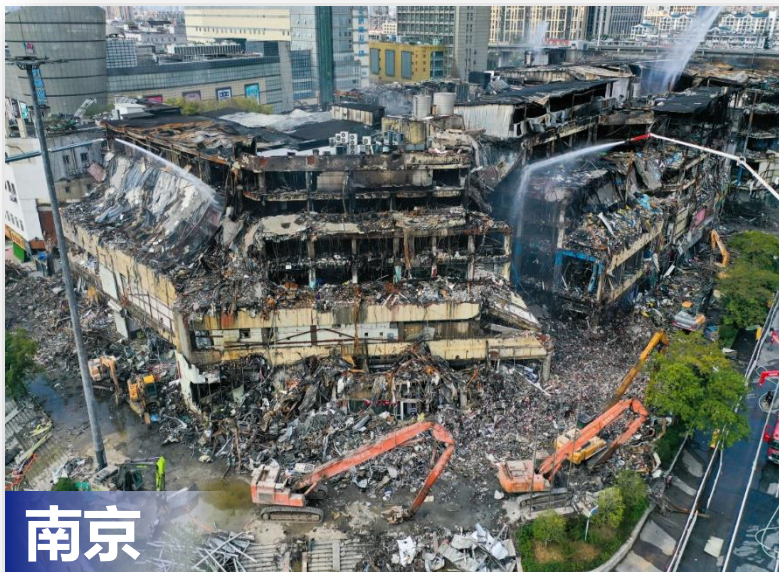
**火灾下倒塌的钢框架结构**

Fire-induced collapse of steel frame structures

# 1 问题背景

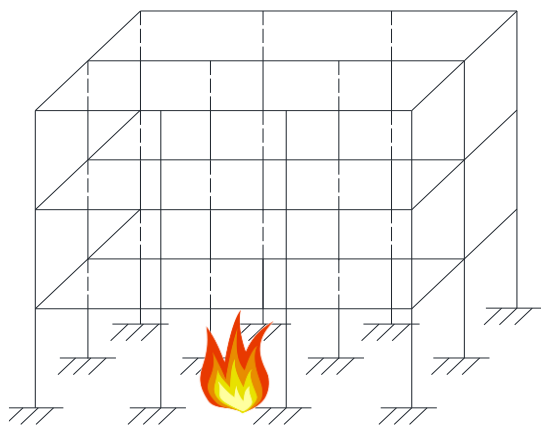
## ■ 多层钢框架结构火致倒塌事故 Fire-induced collapse accidents of multi-story steel frames

- 2022年10月：江苏南京某商场火灾，结构**局部倒塌**，损失超**10亿元**
- 2022年11月：河南安阳某商贸公司火灾，结构**局部倒塌**，**42人死亡**
- 2022年12月：莫斯科某购物中心火灾，**倒塌面积超5000 m<sup>2</sup>**，**1人死亡**，损失超**200亿卢布**



# 1 问题背景

## ■ 建筑火致倒塌预警 Early-warning of fire-induced building collapse



倒塌判别过早

官兵撤退过早



科学倒塌预警

官兵及时撤退



倒塌判别过晚

官兵撤退过晚



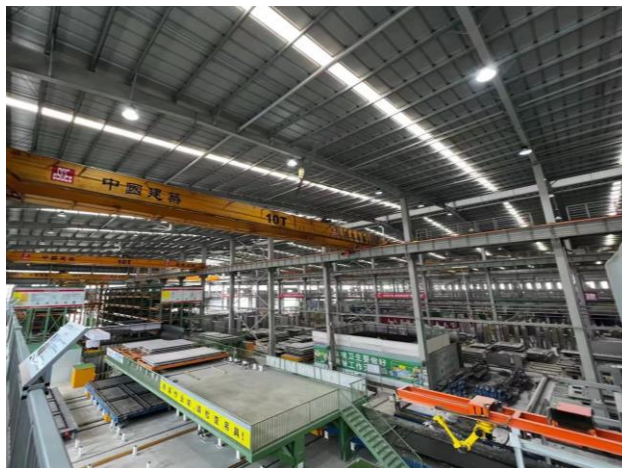
# 1 问题背景

## ■ 理论瓶颈

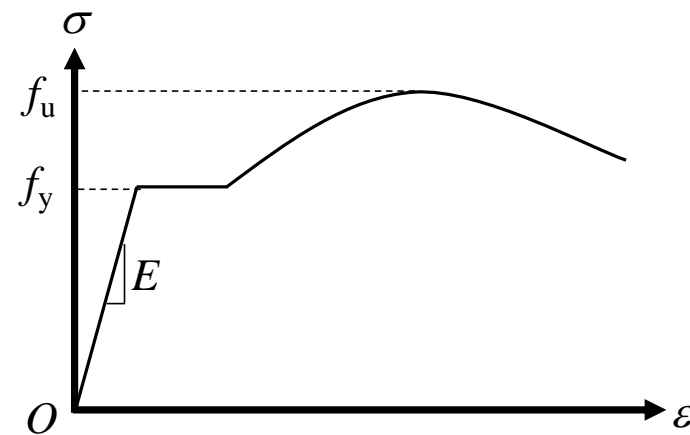
Theoretical bottleneck

### 1 结构抗火致倒塌设计 (确定性)

- 荷载大小及分布使用**设计值**
- 材料力学性能使用**设计值**
- 火灾场景为“**可信最不利**”



实际荷载大小和分布**未知**



实际材料力学性能**未知**

### 2 火致倒塌**实时预警**

- 存在**不确定性参数**
- 难以在火场**实时、准确确定**
- 对倒塌**剩余时间影响显著**  
(必须以合理形式考虑)



实际火源位置**未知**



实际火源参数**未知**

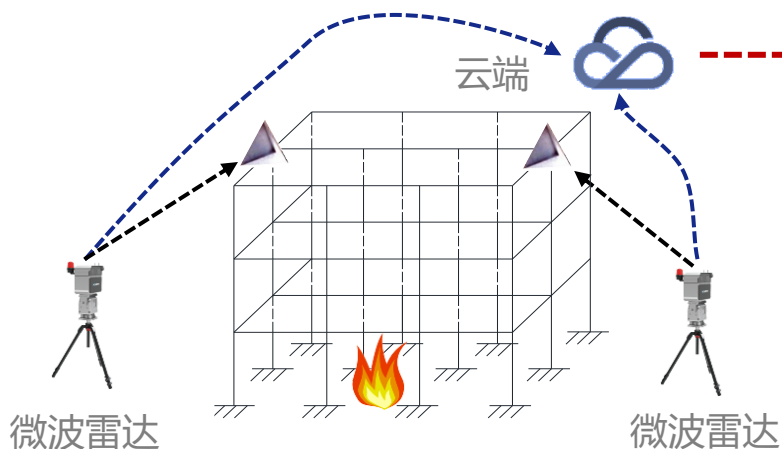
火致倒塌实时预警属**不确定性问题**

# 1 问题背景

## ■ 建筑火致倒塌预警系统

Early warning system of fire-induced building collapse

Step 1 现场实时量测**关键物理量**

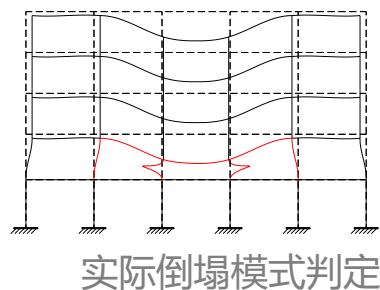


Step 2 无线数据传输

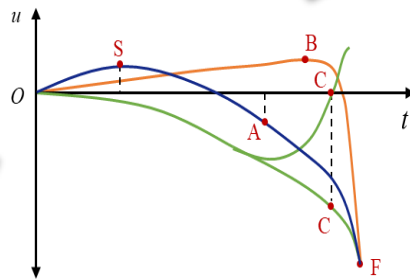


建筑火灾倒塌实时预警系统平台

Step 3 预警算法处理



实际倒塌模式判定



关键物理量演化规律

Step 4 发出预警信号



不同预警等级信号



倒塌剩余时间预报

Step 5 现场决策支持



单兵信号接收



消防救援中心根据预警决策

01

问题背景

02

火致倒塌实时预警理论与方法

03

难测物理量实时推算

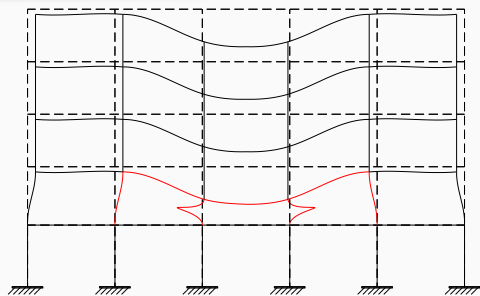
04

结语

# 2 火致倒塌实时预警理论与方法

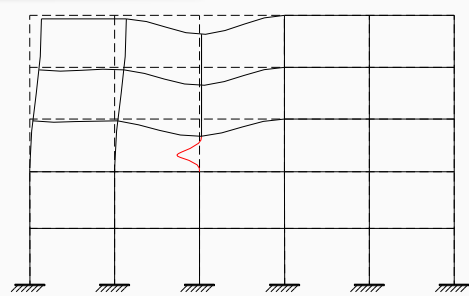
## ■ 多层钢框架结构火致倒塌模式——有限 *Limited collapse modes*

Mode A



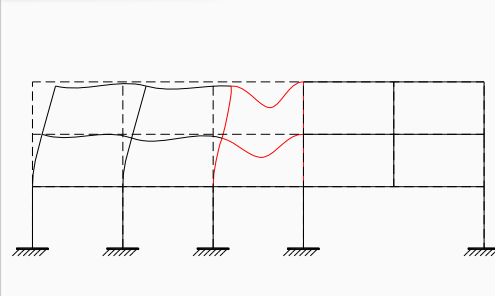
常规向内倒塌

Mode B



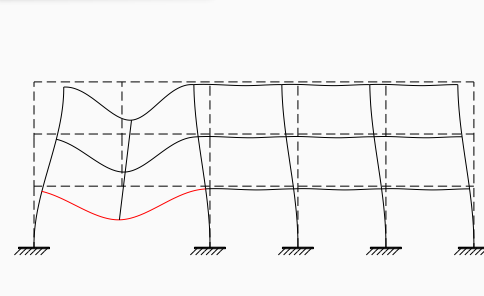
再平衡倒塌

Mode C



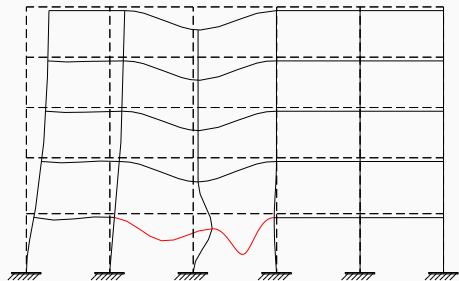
局部侧向倒塌

Mode D



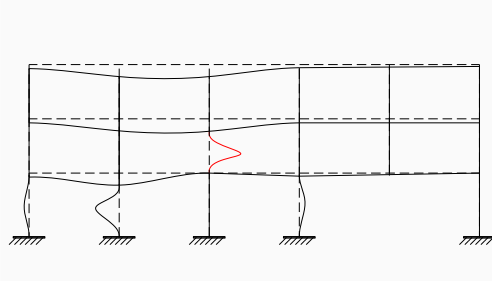
大跨梁受火内倾倒塌

Mode E



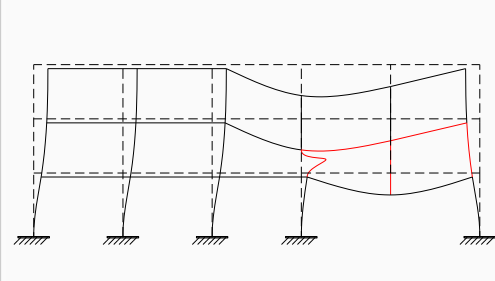
约束失效倒塌

Mode F



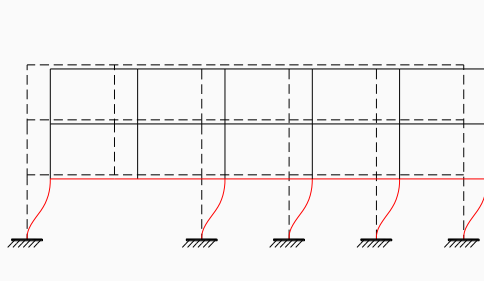
整体向下倒塌

Mode G



大跨梁未受火内倾倒塌

Mode H

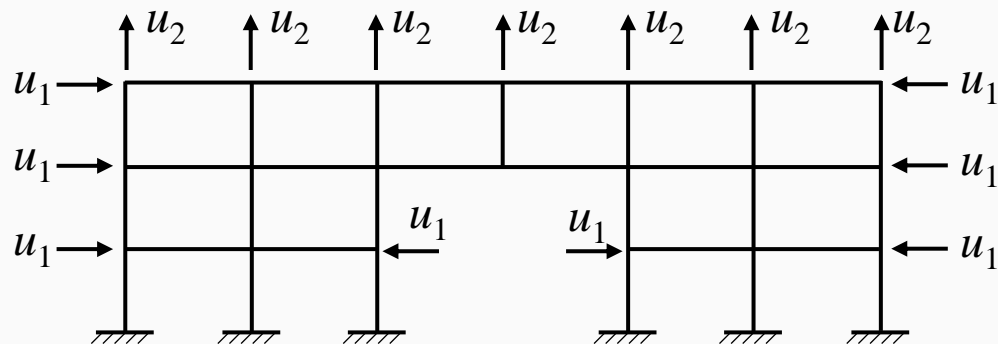


整体侧向倒塌

## ■ 关键物理量 *Key physical parameters*

### ➤ 选取原则

- 1 表征建筑**倒塌过程**与**倒塌临界状态**
- 2 反映实际受火建筑的**不确定性状态参量**
- 3 火灾现场**易于实时获取**



### 关键物理量选取

Selection of key physical parameters

### ➤ 量测要求

- 1 高**测量精度**
- 2 环境**适应性强**
- 3 适用于**火灾烟气和高温条件**

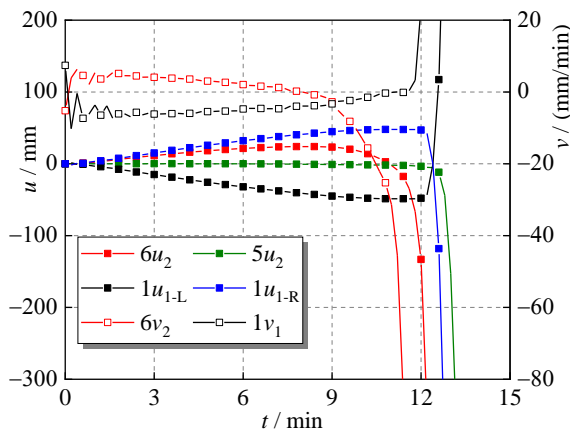


### 关键物理量测量方法

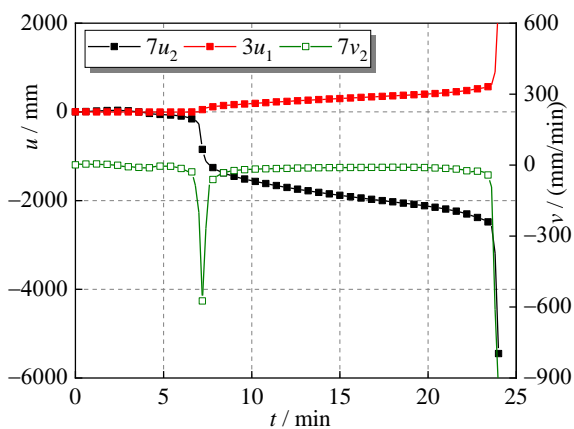
Measurement of key physical parameters in real fire

## ■ 多层钢框架结构火灾倒塌关键物理量演化规律 *Evolution laws of key physical parameters*

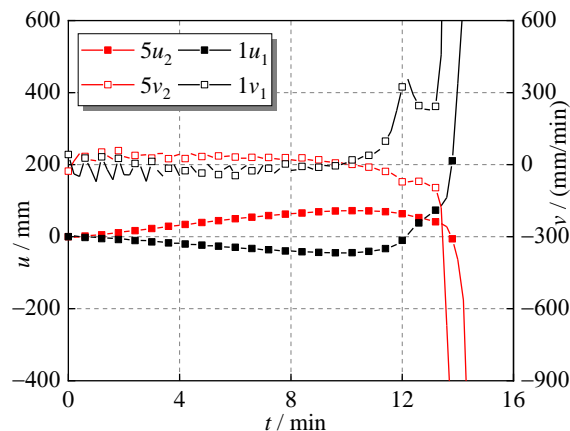
➤ 倒塌模式A



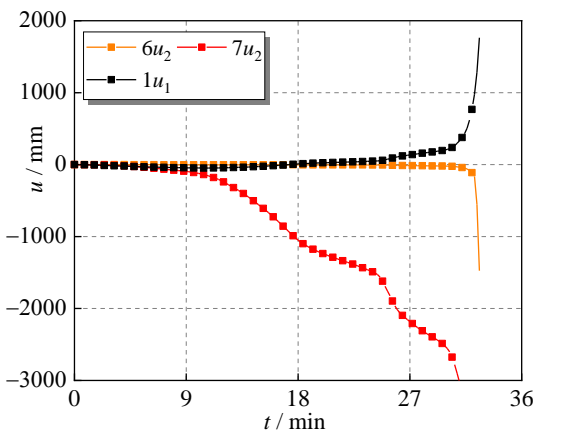
➤ 倒塌模式B



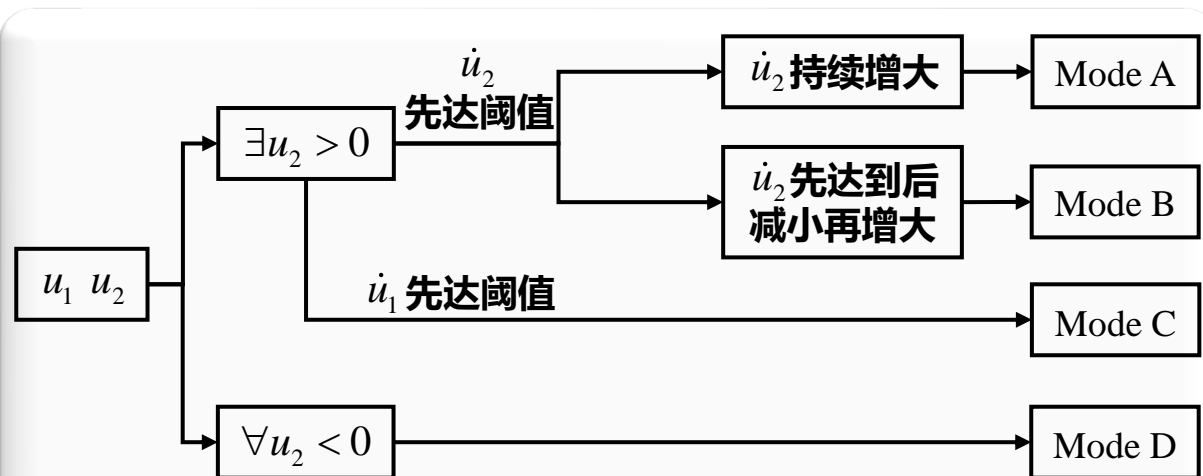
➤ 倒塌模式C



➤ 倒塌模式D



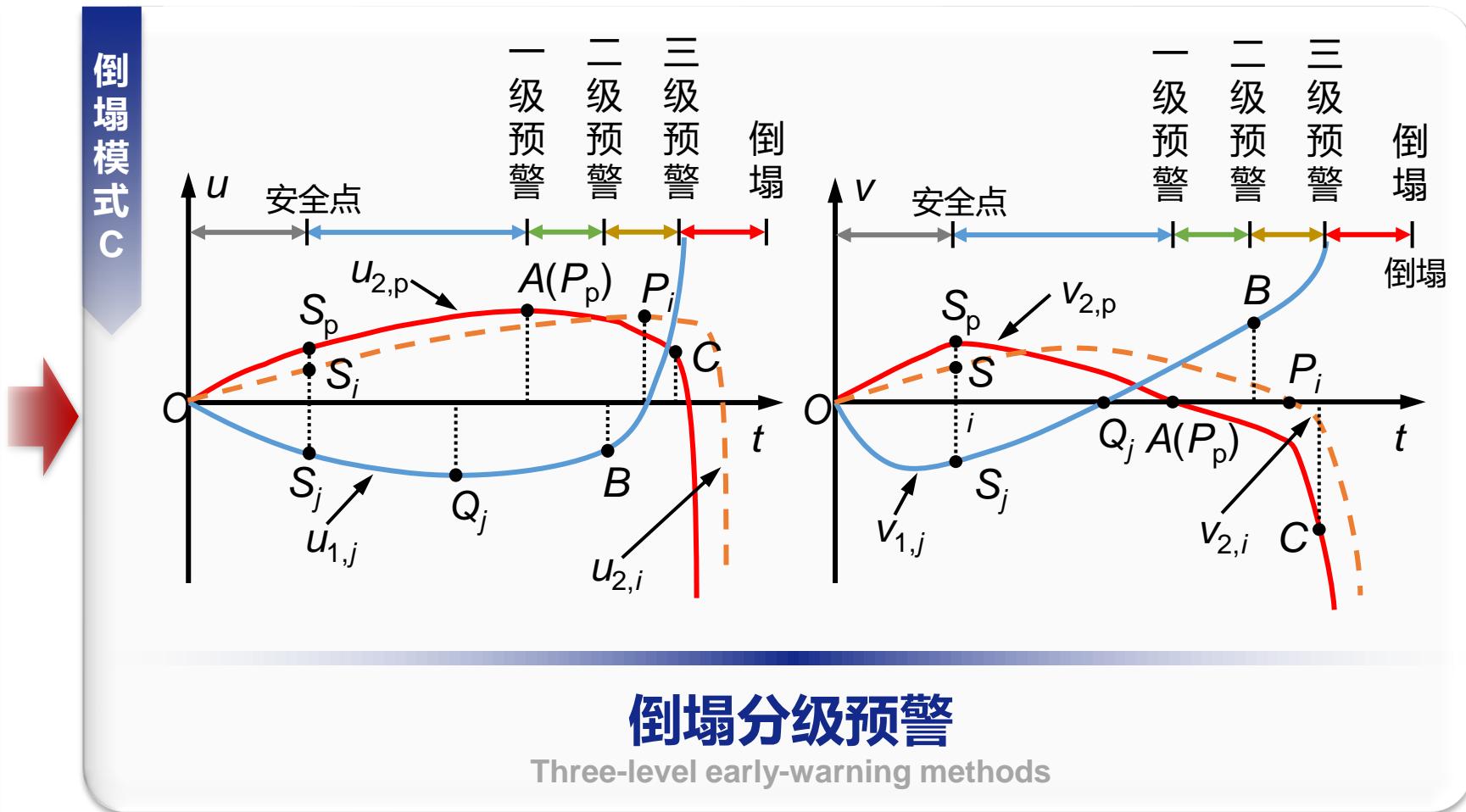
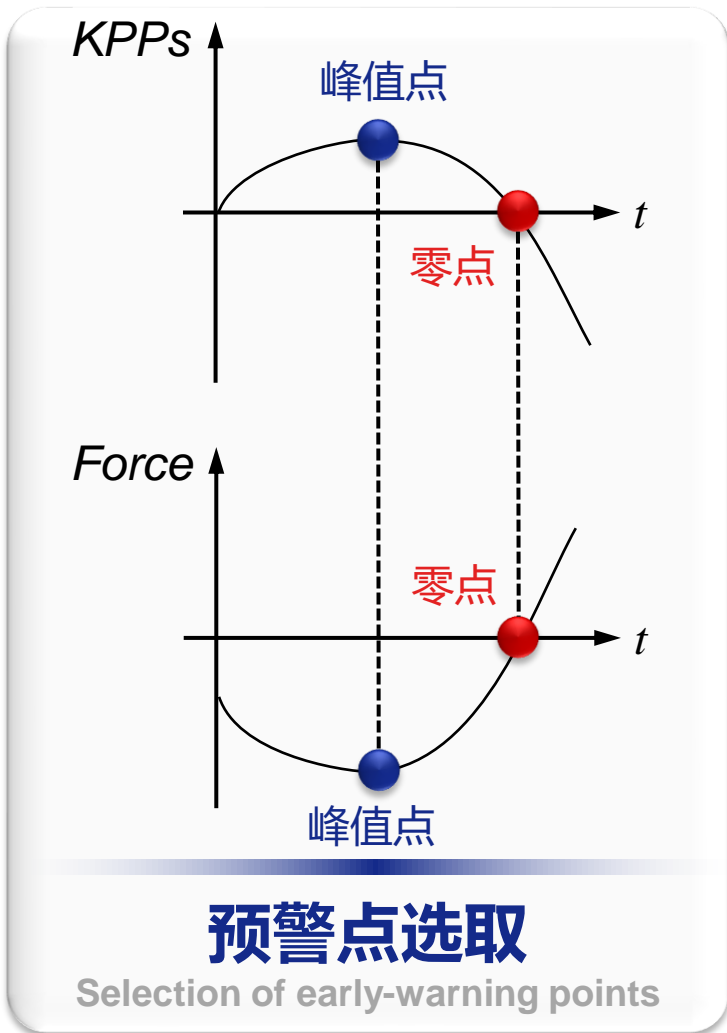
- 1 特定倒塌模式下关键物理量具有**特定演化规律**
- 2 可通过关键物理量的**演化规律**进行倒塌预警
  - 判断**真实倒塌模式**
  - 确定**倒塌状态** (倒塌进程)



### 真实倒塌模式判定方法

Selection of key physical parameters

## ■ 多层钢框架结构火灾倒塌分级预警方法



01

问题背景

02

火致倒塌实时预警理论与方法

03

难测物理量实时推算

04

结语

# 3 难测物理量实时推算

## ■ 研究难点 Research difficulties

1 部分难测点位于结构内部

2 钢框架拓扑型式多样



基于图神经网络 (GNN) 的  
难测关键物理量时空特征提取方法

● 易测点 easy-to-measure joints

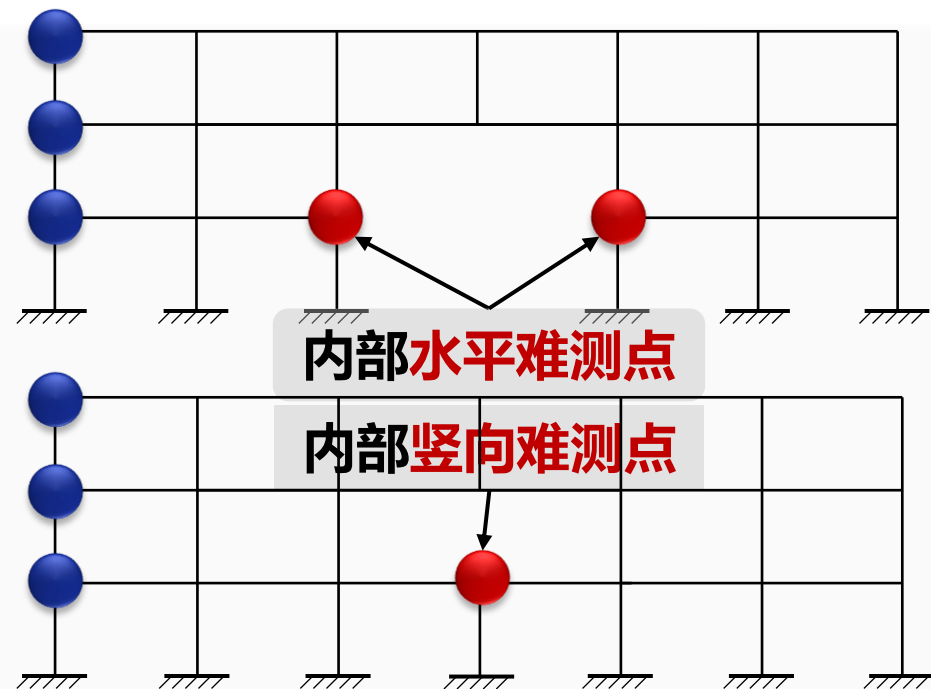
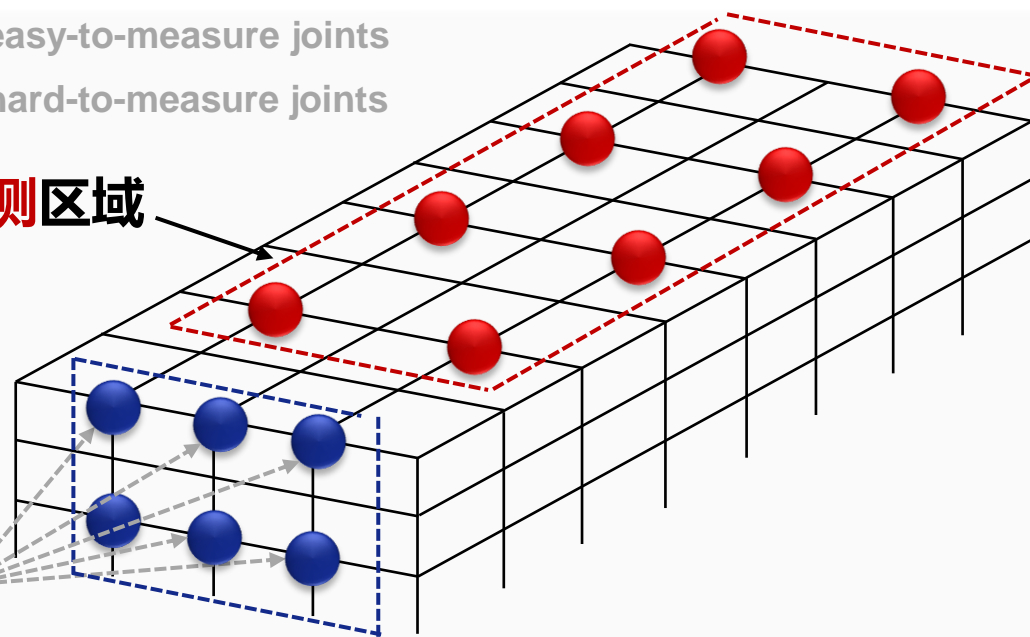
● 难测点 hard-to-measure joints

顶部难测区域

易测区域

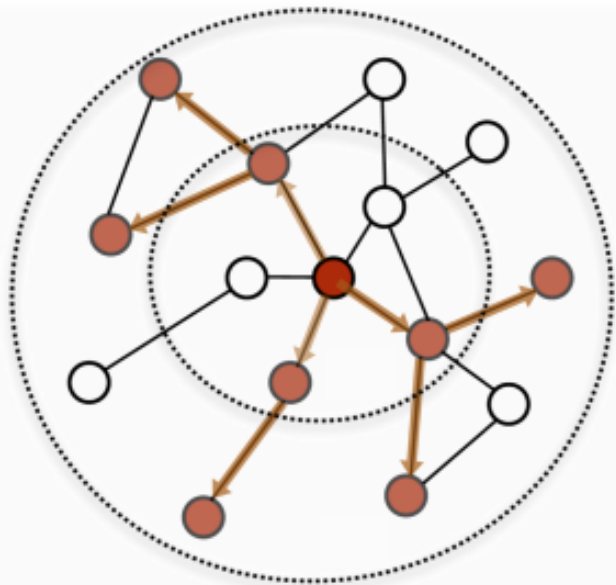


微波雷达

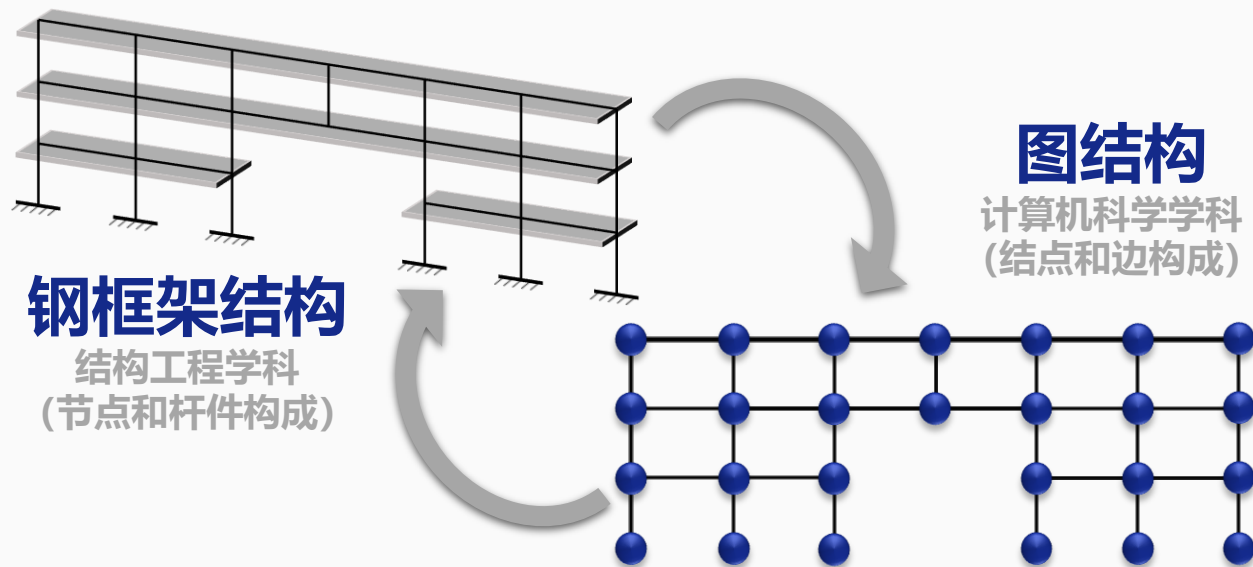


## ■ 钢框架结构的图表征 *Graph representation of steel frame structures*

- 1 图的**结点和边**可分别表示钢框架结构的**节点和梁/柱杆件**
- 2 图神经网络 (Graph Neural Networks, GNNs) 可通过**信息传递**获取局部或全局特征



**图神经网络信息传递**  
GNN information transmission

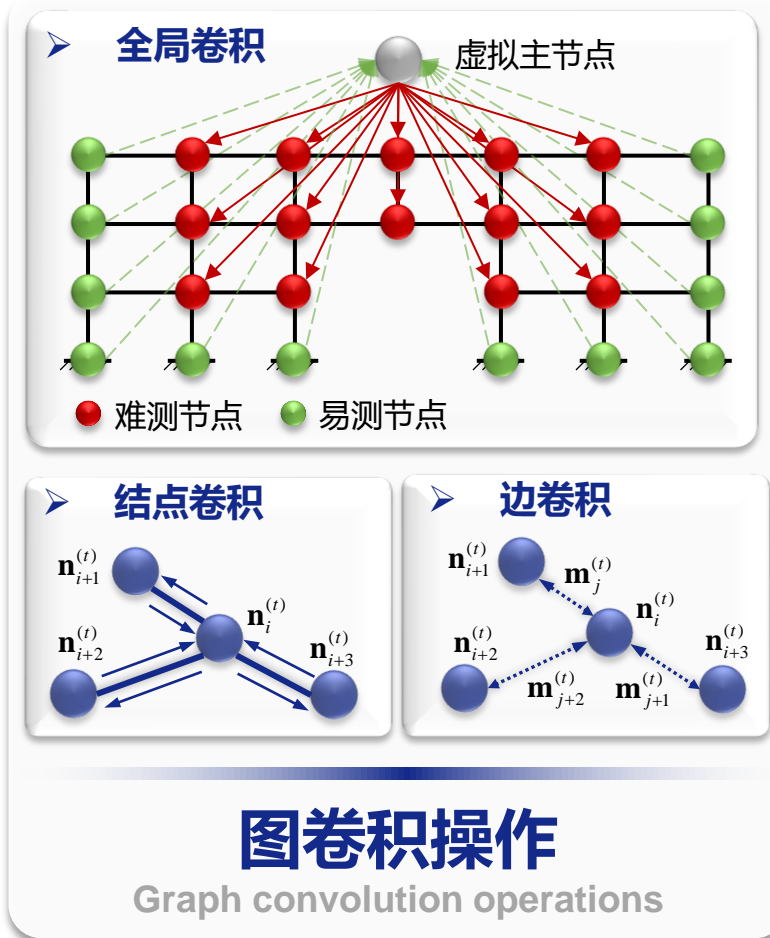
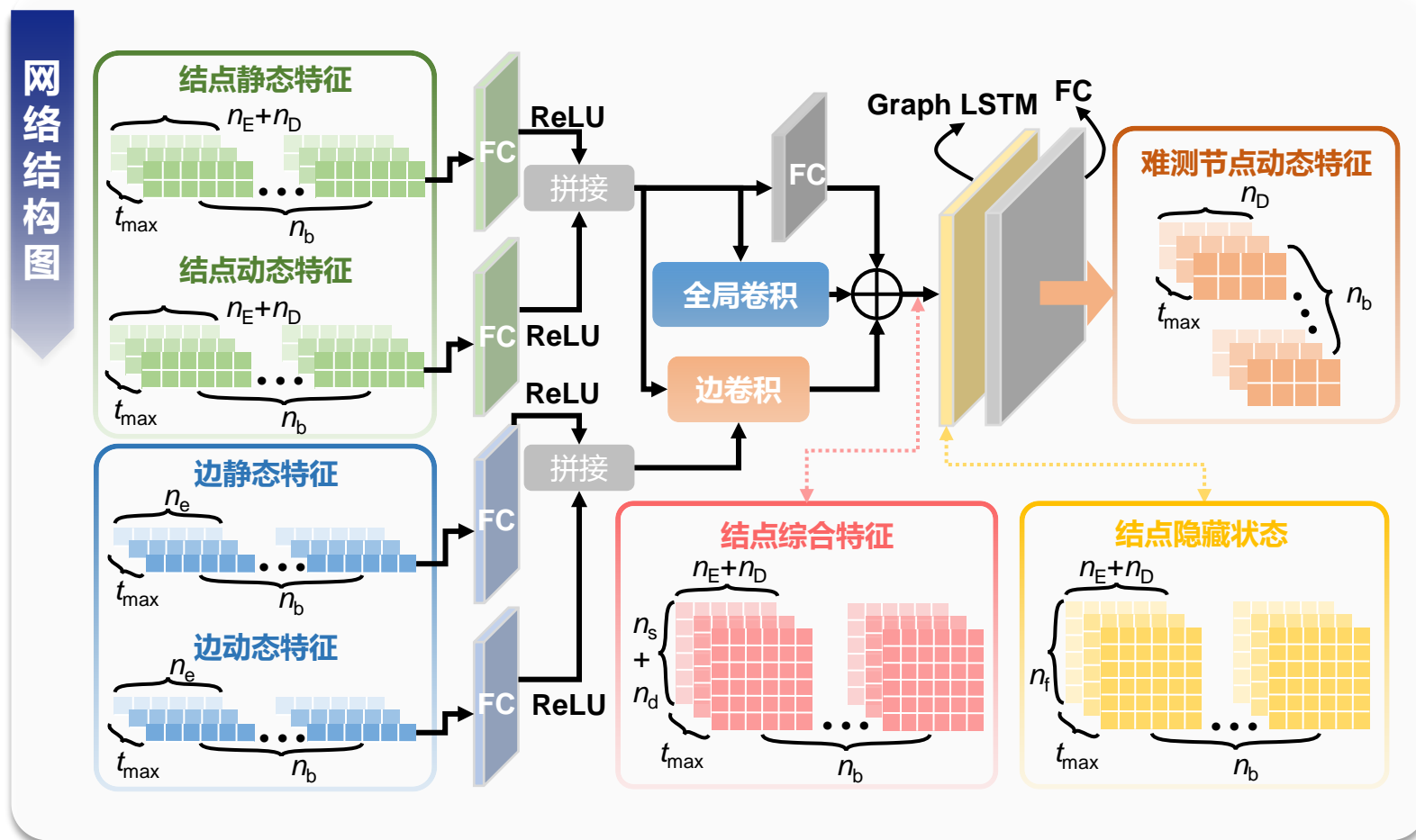


**钢框架结构的图结构表征**  
Graph representation of steel frame structures

# 3 难测物理量实时推算

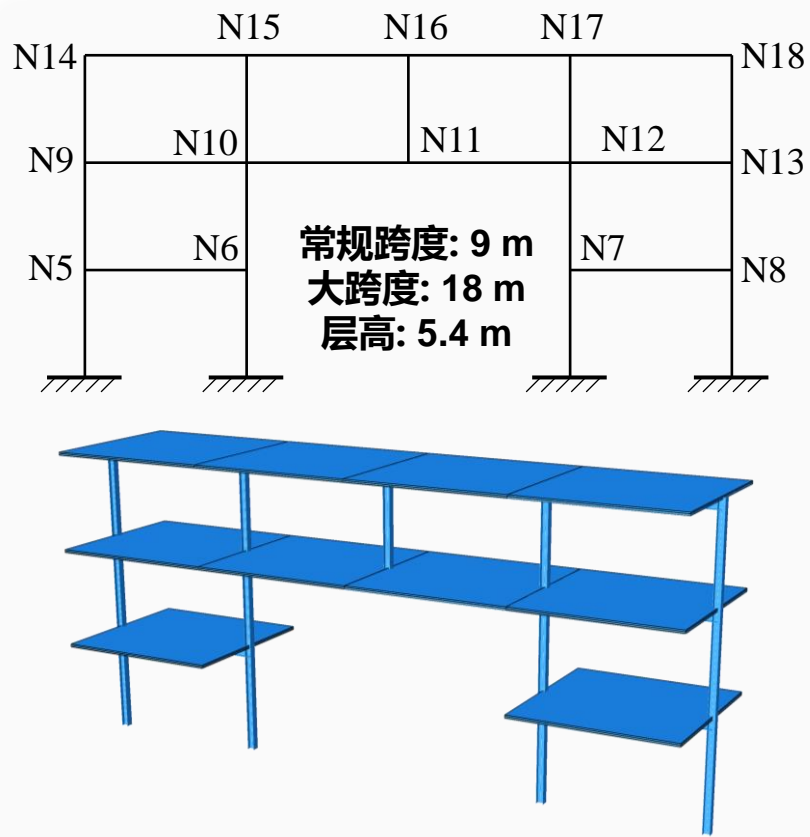
## ■ 多层钢框架结构关键物理量快速识别网络 FRAME-Net

FRAME-Net (Fire Risk Assessment and Monitoring for Early-warning of steel frames Net)



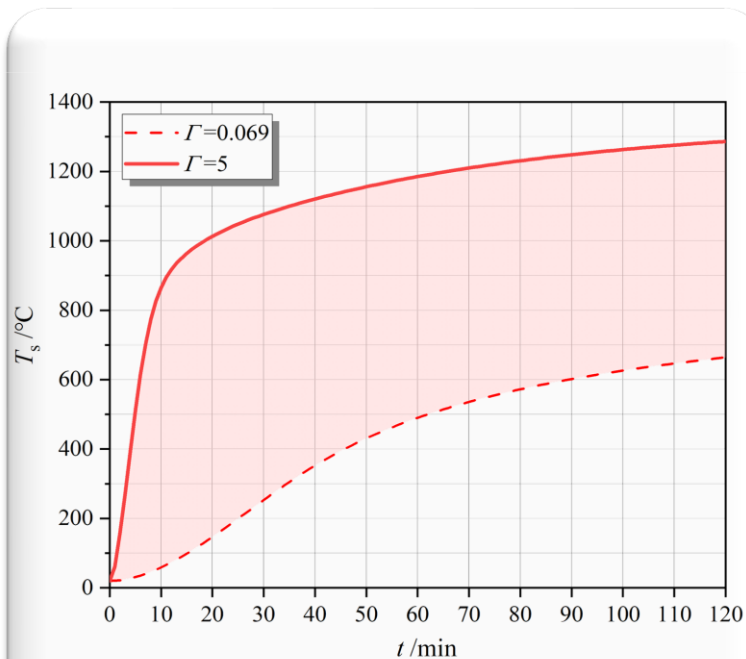
# 3 难测物理量实时推算

## ■ 训练集——3×3大跨度平面钢框架 Training dataset: 3×3 large-span planar steel frame



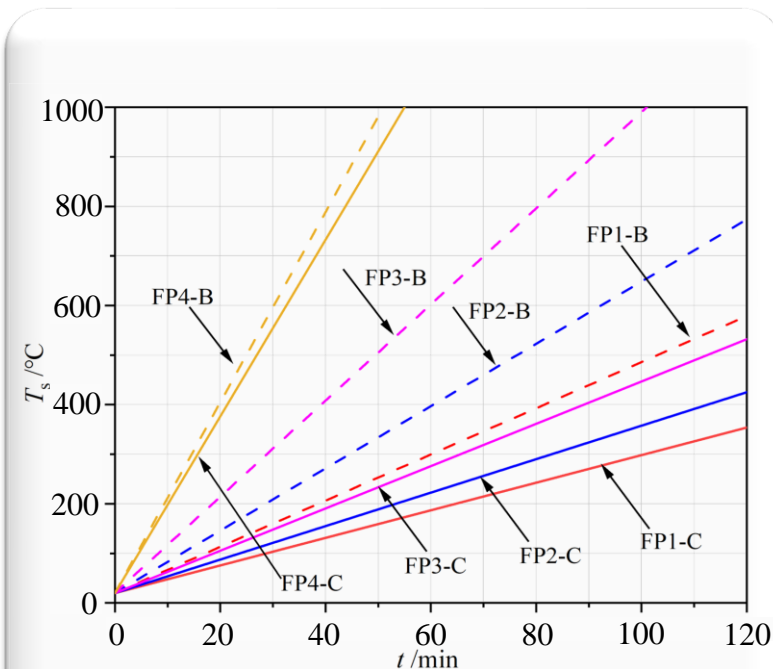
### 训练钢框架参数

Training steel frame parameters



### 随机升温曲线

Random temperature curve



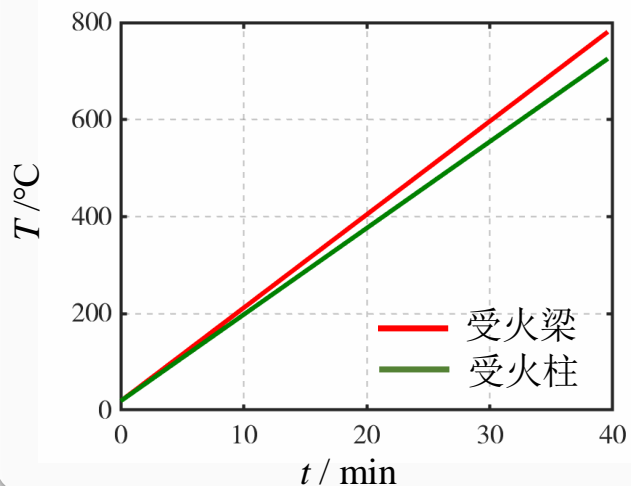
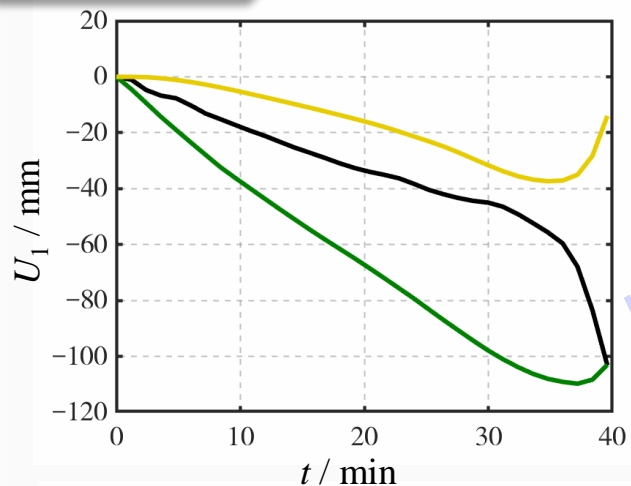
### 随机防火保护条件

Random fire protection

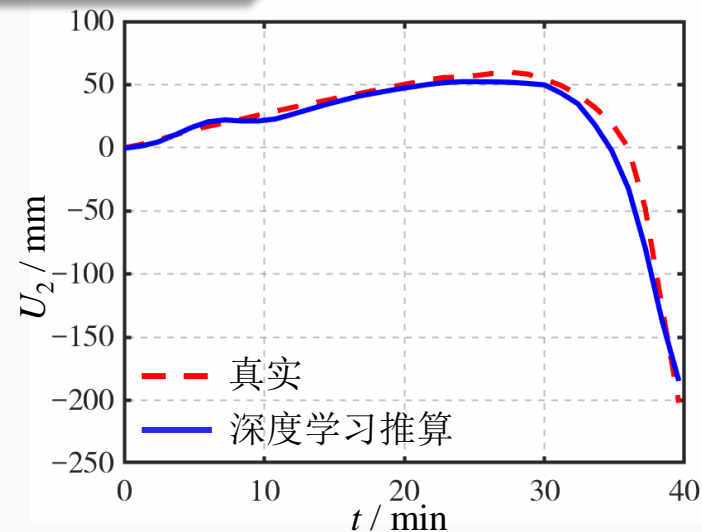
# 3 难测物理量实时推算

## 模型性能评估

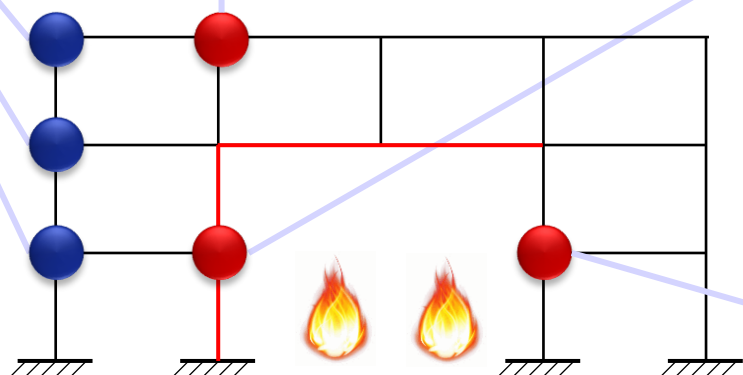
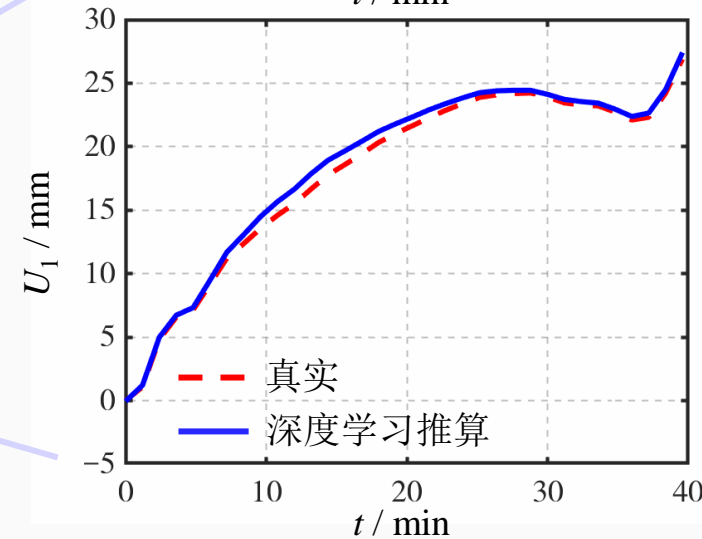
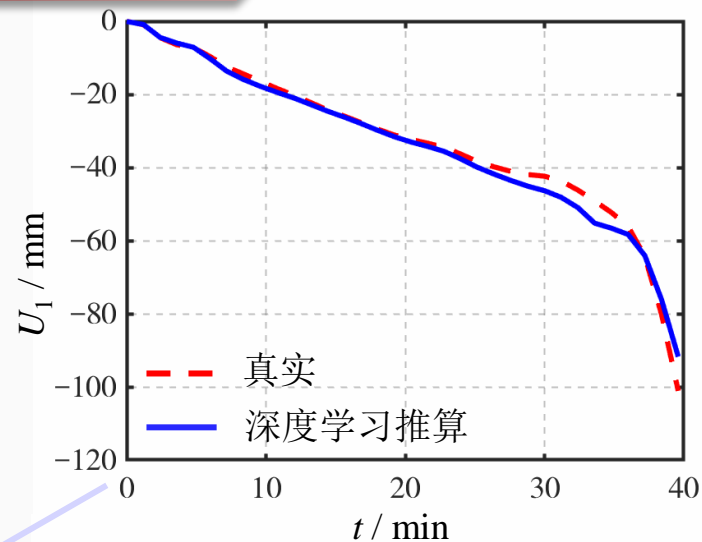
### 实测物理量



### 推算物理量



### 推算物理量

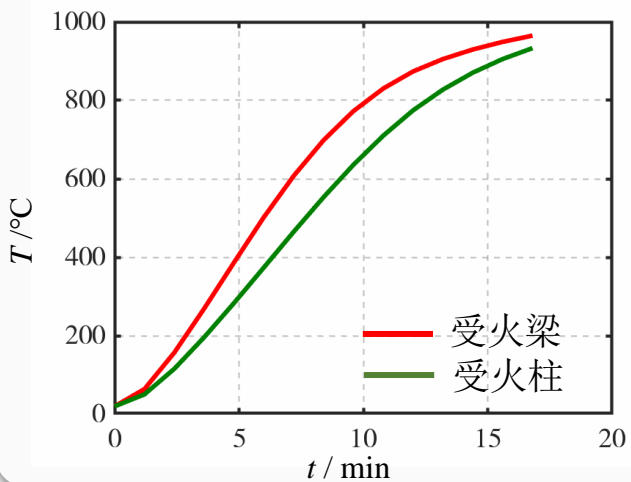
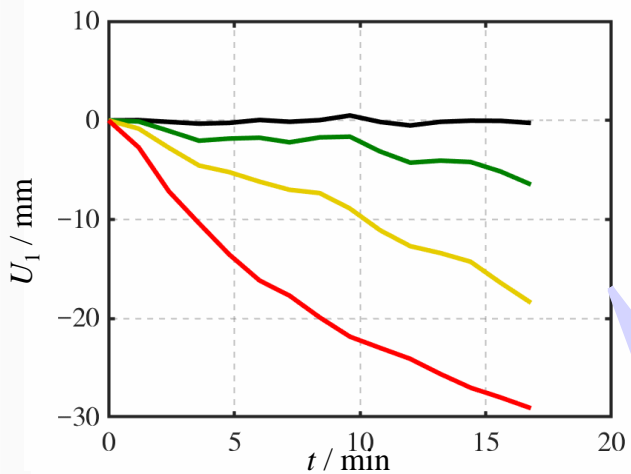


用于训练的钢框架S1

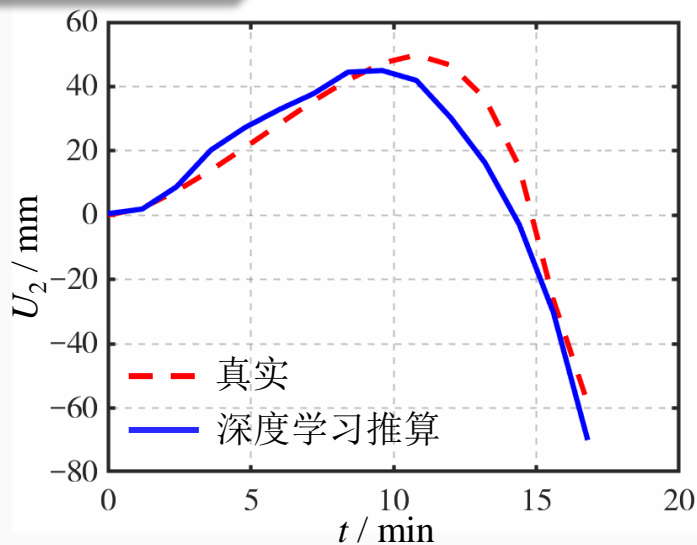
# 3 难测物理量实时推算

## 模型性能评估

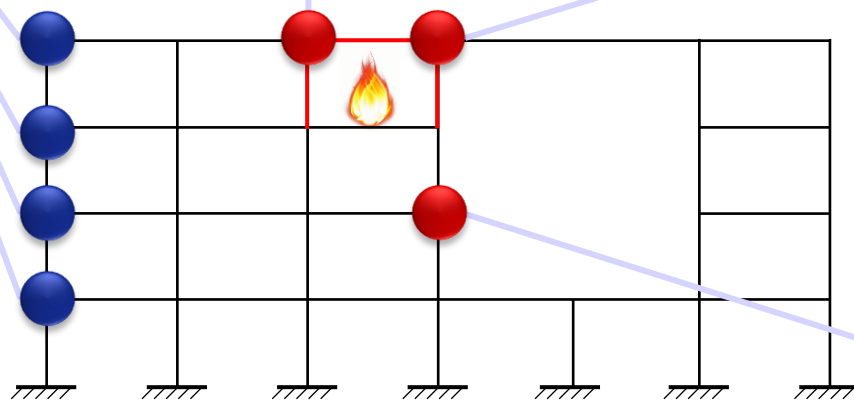
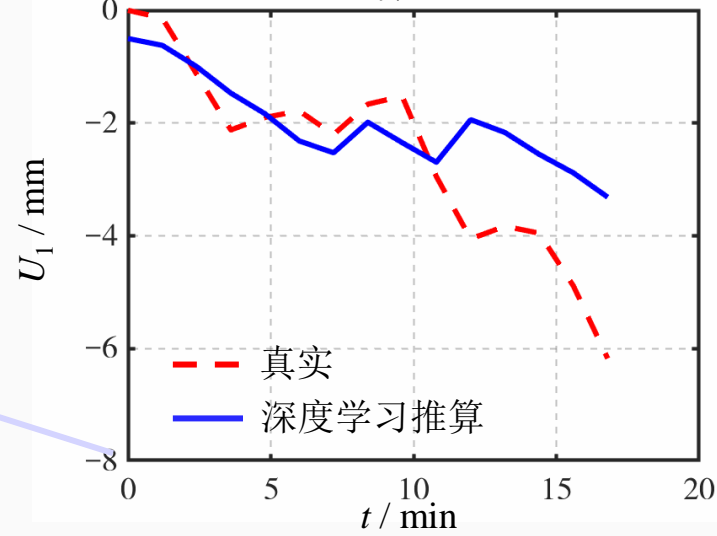
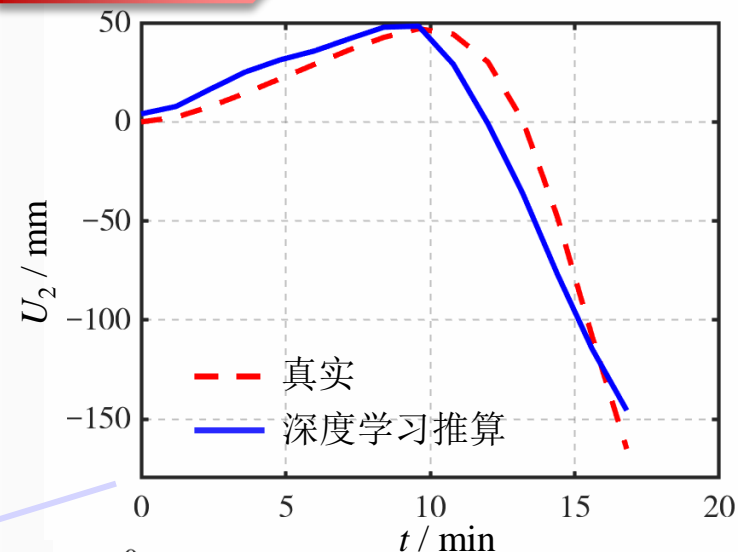
### 实测物理量



### 推算物理量



### 推算物理量

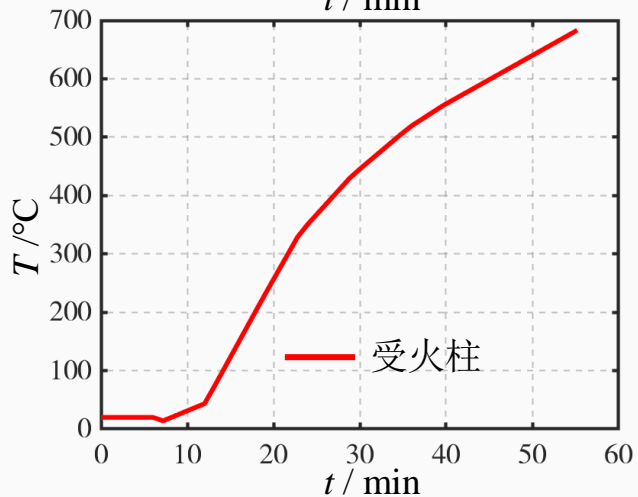
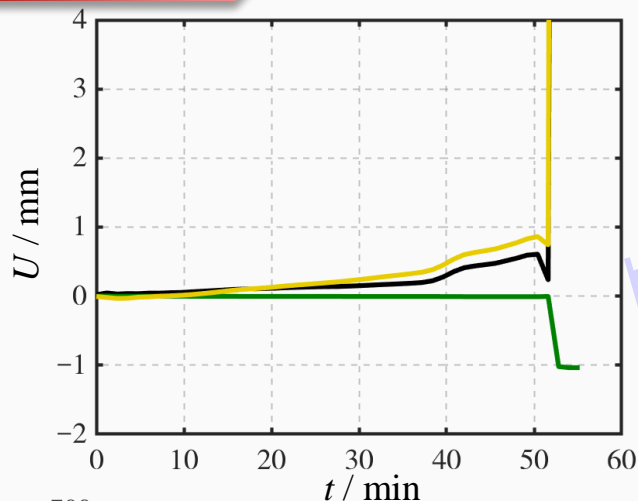


非训练复杂钢框架S2

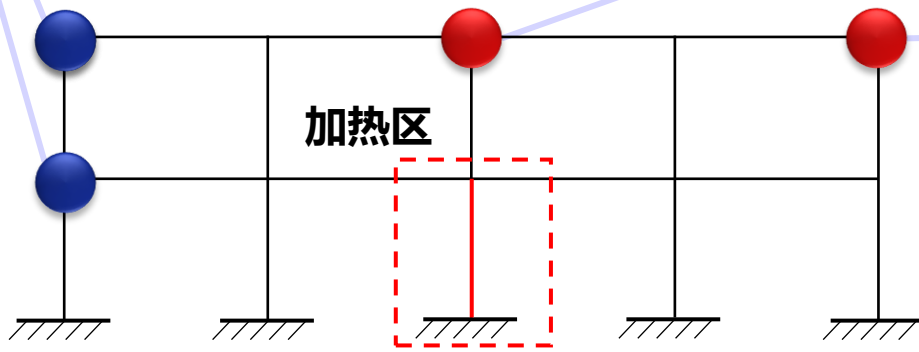
# 3 难测物理量实时推算

## 模型性能评估

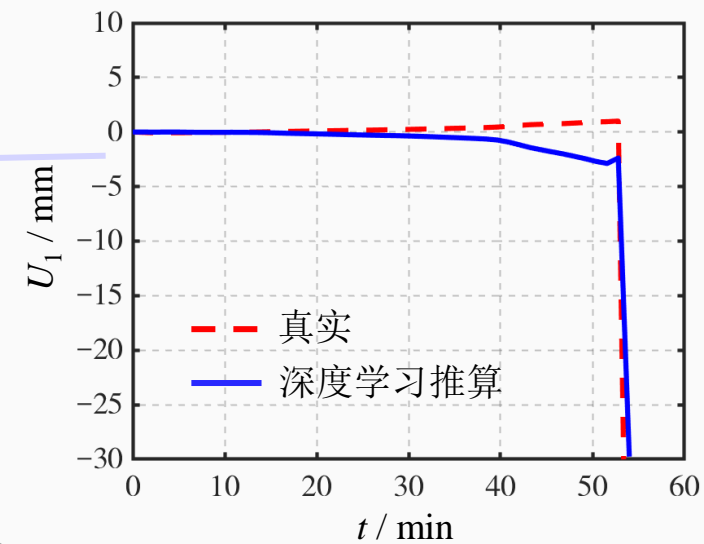
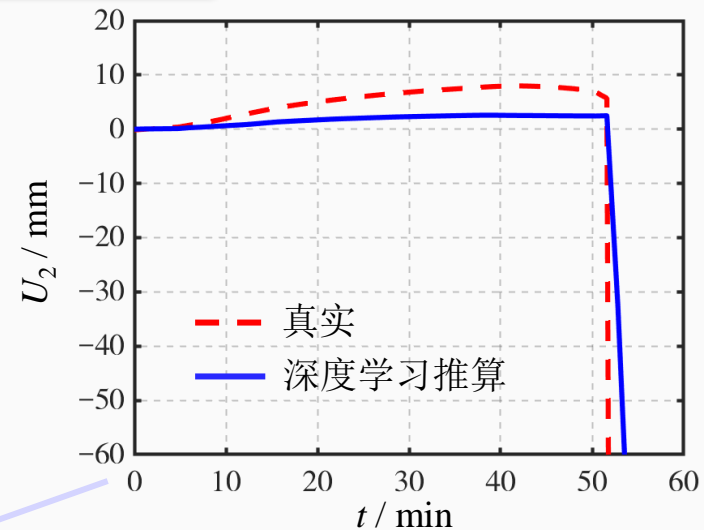
### 实测物理量



### 平面钢框架火灾倒塌试验 (未参与训练)



### 推算物理量



01

问题背景

02

火致倒塌实时预警理论与方法

03

难测物理量实时推算

04

结语

# 4 结语

## ■ 建筑火致倒塌实时预警

### 1 与结构抗火致倒塌设计不同

- 存在荷载、材料、火源等不确定性参数
- 不确定性参数未知且难以在火场实时、准确确定

### 2 可基于在火场实时感知的关键物理量突破上述瓶颈

## ■ 钢框架结构火致倒塌实时预警关键物理量感知

### 1 内部和顶部关键物理量难以直接量测

### 2 基于深度图循环神经网络的 Frame-Net 可实时推算

- 对于不同结构型式和任意真实火灾场景无需重训练
- 所推算的关键物理量精度可达到预警算法的理论要求



[www.zhushaojun.com](http://www.zhushaojun.com)



[zhushaojun@tongji.edu.cn](mailto:zhushaojun@tongji.edu.cn)

[zhushaojuntj@gmail.com](mailto:zhushaojuntj@gmail.com)