

# 基于 BDD 的装配式建筑施工安全风险评价

常春光,吴 溪

(沈阳建筑大学管理学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘 要:**为了科学高效地对装配式建筑施工安全进行风险评价,运用故障树分析法找出装配式建筑施工过程中存在的部分危险源,并将其故障树转化为二元决策图(BDD)结构。通过遍历 BDD 结构计算出建筑施工安全风险事故率和各基本事件的重要度,安全管理人员可根据计算出的数据对装配式建筑施工过程中存在的薄弱环节和关键影响因素进行把控,实现了安全风险的定性和定量分析。实例证明,相比传统故障树评价方法,引入 BDD 的评价方法可利用计算机编程快速得到装配式建筑施工安全的关键影响因素,且简化了故障树分析过程。

**关键词:**故障树分析;装配式建筑;二元决策图;安全风险

**中图分类号:**TU714      **文献标志码:**A

装配式建筑作为建筑产业化的一种建造形式,因其建造速度快、节约劳动力且可提高建筑质量的优点逐渐成为业界关注的热点,然而我国的装配式建筑发展较晚,相关技术和管理方面不够成熟。近年来,装配式建筑建造伤亡事故频频发生,保障施工人员的人身安全、创造安全施工环境成为现阶段我国装配式建筑施工生产的首要任务。而施工现场的高危性和环境的复杂性给安全管理工作带来了棘手的问题,提高对事故的预测能力是实现“安全生产、预防为主”的关键。很多学者对装配式建筑进行了相关研究,包括装配式建筑的质量<sup>[1]</sup>、技术<sup>[2]</sup>、抗震性<sup>[3]</sup>等方面。陈伟等<sup>[4]</sup>将层次分析法和灰色聚类分析法相结合来构建评价指标体系;田黎<sup>[5]</sup>运用风险矩阵的方法提出适用于工程风险管理的关键构件施工流程安排、施工安全管理体系等规程与手册;部分学者尝

试运用可信测度理论<sup>[6]</sup>、系统动力学<sup>[7]</sup>、模糊综合评价<sup>[8]</sup>等方法来建立安全风险管理 体系。可见,学者们对装配式建筑施工安全管理研究方法不一,各有特点。然而,将故障树分析法(Analysis of Fault Tree,FTA)与二元决策图(Binary Decision Diagram,BDD)相结合,应用于装配式建筑施工安全风险评价中的研究还较少。笔者拟通过引入二元决策论从另一种角度对装配式建筑施工安全进行风险评价。

## 一、相关理论

### 1. 故障树分析法

故障树分析法(FTA)是安全系统工程中评价系统安全性和可靠性的一种重要分析方法,其关键是建立故障树。在故障树中,把研究系统最不希望发生的故障状态作为故障树的顶事件,逐层找出引发顶事件的中间事

件,直到找出故障的基本原因,即故障树的底事件为止。通常顶事件和中间事件用矩形符号表示,底事件用圆形符号表示,事件之间用规定的图形符号(一般用“与门”和“或门”)进行连接。

2. 二元决策图

二元决策图是一种基于 Shannon 分解的有向无环图,图中变量的取值只有 0 和 1,所以称之为二元决策图,即 BDD。BDD 是用来表达 1 个布尔函数的一种数据结构,所用的存储空间较小,可极大地提高模型计算的系统规模。BDD 结构(见图 1)的中节点包括终节点和非终节点,节点间靠 0 和 1 两个分支进行连接。终节点无输出边,终节点为 1 表示该路径导致系统故障;终节点为 0 表示该路径的系统正常。在非终节点中,节点为 1 表示该路径的基本事件发生故障,节点为 0 表示该路径的基本事件正常,每个 BDD 有且只有一个根节点。

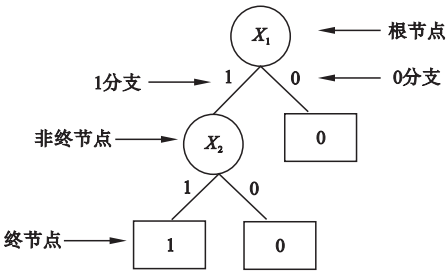


图 1 BDD 实例

二、基于 BDD 的装配式建筑施工安全风险

BDD 作为布尔函数的一种数据结构表达方式,可由布尔变量的输入值直接获得布尔函数值。若能将故障树转化为仅含底事件的 BDD 结构,不仅可以获取系统的所有故障模式和传播途径,还可以直接通过底事件的输入值获得系统的输出值,极大地提高了计算模型的效率。因此,对多风险因素进行定性和定量分析时,基于 BDD 的故障树较传统故障树的分析方法更为精确简便,其评估过程大致分为 3 个步骤。

1. 规范故障树

若故障树中存在较复杂的关系,一般将

其转化为只含与、或、非 3 种逻辑门的规范故障树。如果规范化故障树的中间事件含有非门,则用摩根规则把非门化去,使得只有底事件上有非门,这样的规范化故障树便于处理。

2. 故障树向 BDD 结构的转换

A. RAUZY<sup>[9]</sup>首先提出了将故障树转化为 BDD 的方法,根据 Shannon 分解原理,在 BDD 中每个结点对应一个 ite (if-then-else) 结构。定义为  $ite(X, F_1, F_2) = XF_1 + \bar{X}F_2$ ,其中,  $ite(X, F_1, F_2)$  是指若 X 成立,则  $F_1$  成立,否则  $F_2$  成立。其转化的递归思路为:从故障树最底层的门事件开始,用底事件对门事件进行置换,逐层向上进行,置换的同时按 ite 结构对置换进行编码,以此类推,直到将所有门事件全部用底事件替换后,便可得到顶事件的 BDD 结构。

在构建 BDD 过程中,首先对故障树底事件进行排序,然后再对每个门事件进行 BDD 转化,利用 ite 结构将故障树转化为 BDD 时遵循 2 个运算规则:

若在故障树基本事件排序中,  $i$  排在  $j$  前面,即  $i < j$ ,  $i$  与  $j$  排在相同位置,即  $i = j$ ; 设  $J = ite(x_i, F_1, F_2)$ ,  $H = ite(x_j, G_1, G_2)$ ,  $x_i, x_j \in \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , 则

$$J \langle op \rangle H = \begin{cases} ite(x_j, F_1 \langle op \rangle H, F_2 \langle op \rangle H), & i < j \\ ite(x_i, F_1 \langle op \rangle G_1, F_2 \langle op \rangle G_2), & i = j \end{cases}$$

其中,假定故障树底事件对应的布尔变量为  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ,其指标顺序关系式满足  $x_1 < x_2 < \dots < x_n$ ,  $\langle op \rangle$  为故障树逻辑门。

3. 风险事故率和 Birnbaum 重要度分析

基于 BDD 的装配式建筑施工安全风险评估分为 2 个部分:装配式建筑施工安全风险事故率分析和 Birnbaum 重要度分析<sup>[10]</sup>,这 2 项数据的计算通过故障树和 BDD 结构实现。

(1) 装配式建筑施工安全风险事故率分析。顶事件发生率取决于故障树的结构和各基本事件的不可靠度,在确定所有事故发生概率后,根据相关递归公式可求出顶事件发生率,即装配式建筑施工安全风险事故率,得

到的数据可作为衡量风险大小的依据。递归公式为

$$F_{bdd}(O_{bdd}(T)) = \begin{cases} 0, & T=bddfalse \\ 1, & T=bddtrue \\ P(x_k=0) \times F_{bdd}(O_{bdd}(T)|x_k=0) + P(x_k=1) \times F_{bdd}(O_{bdd}(T)|x_k=1), & others \end{cases} \quad (1)$$

式中: $F_{bdd}$ 为装配式建筑施工安全风险事故率; $O_{bdd}(T)$ 为故障树  $T$  的对应的 BDD 结构; $P(x_k=1)$  为第  $k$  个底事件发生时的概率; $P(x_k=0)$  为第  $k$  个底事件不发生时的概率; $O_{bdd}(T)|x_k=1$  为第  $k$  个底事件发生时的

$$F_{im}(O_{bdd}(T), i) = \begin{cases} 0, & O_{bdd}(T) = bddfalse \\ 1, & O_{bdd}(T) = bddtrue \\ F_{im}(O_{bdd}(T)|x_k=1) - F_{im}(O_{bdd}(T)|x_k=0), & i=j(0 \leq i < n) \\ P(x_j=1) \times F_{im}(O_{bdd}(T)|x_k=1) - P(x_k=0) \times F_{im}(O_{bdd}(T)|x_k=0, i), & i \neq j(0 \leq i < n) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $F_{im}(O_{bdd}(T), i)$  为第  $i$  个底事件的重要度。

通过计算机编程易实现 BDD 结构及式(1)、式(2)的计算,进一步提高了装配式建筑安全风险评估的准确度和效率。BDD 结构算法伪代码如下:

```
% 计算某基本事件发条件下 BDD 的函数
function BDD_v_true(bdd_graph)
% 计算某基本事件不发生条件下 BDD 的函数
function BDD_v_false(bdd_graph)

% 计算风险事故率的函数,参数为二元决策图
function risk = BDD_Risk(bdd_graph)
p_v = probability_of_node_v
if bdd_graph == True
risk = 1
elseif bdd_graph == False
risk = 0
else
bdd_v_true = BDD_v_true(bdd_graph)
bdd_v_false = BDD_v_false(bdd_graph)
risk = p_v * BDD_Risk(bdd_v_true) +
```

BDD 结构, $O_{bdd}(T)|x_k=0$  为第  $k$  个底事件不发生时的 BDD 结构, $bddfalse$  代表逻辑假, $bddtrue$  代表逻辑真。

(2) Birnbaum 重要度分析。重要度是评价一个系统的割集失效时对顶事件产生影响大小的尺度,事件的重要度越大表明该事件所处的环节越薄弱。Birnbaum 重要度物理意义是系统处于基本事件为关键部件状态的概率,在确定系统需要把控的关键部位、改善系统的设计方面有重要作用。安全管理人员可通过分析 Birnbaum 重要度,找出影响施工安全的关键影响因素。计算公式为

```
O_bdd(T) = bddfalse
O_bdd(T) = bddtrue

(1 - p_v) * BDD_Risk(bdd_v_false)
end
return

% 计算事件重要程度的函数
function importance = V_Imp(bdd_node)

p_v = probability_of_node_v
if bdd_node == True
importance = 1
elseif bdd_node == False
importance = 0
else
bdd_v_true = BDD_v_true(bdd_graph)
bdd_v_false = BDD_v_false(bdd_graph)
if v == bdd_var(bdd_node)
importance = V_Imp(bdd_v_true) - V_Imp(bdd_v_false)
else
importance = p_v * V_Imp(bdd_v_true) - (1 - p_v) * V_Imp(bdd_v_false)
end
end
return
```

三、装配式建筑危险源识别

装配式建筑的建造过程涉及预制构件的运输、组装、关键部位的处理和吊装等方面。相对于传统的建筑施工风险,装配建筑施工安全风险大多发生在与预制构件有关的物品方面。笔者对高处作业、安全防护体系、预制构件及相关设备 4 个方面存在的一些危险源进行分析。

1. 高空坠物

高处作业受到恶劣自然环境影响较大且工作面狭窄不利于施工,极易产生高空坠物危险源(基本事件  $X_1$ )。

2. 安全防护体系的不安全状态

临时支撑体系等安全防护措施不牢固(基本事件  $X_2$ ),安全防护用品质量不合格(基本事件  $X_3$ )及脚手架搭接不规范(基本事件  $X_4$ )等都会留下一系列施工安全隐患。例如,在吊装过程中,若施工人员在未安装临时支撑体系前随意操作会导致构件滑落、失稳等事故。若缺少严格的施工防护用品质量验收程序,一些施工单位为节约资金将假冒伪劣防护用品引进到施工现场,会对从业人员的安全和健康构成极大的危害。脚手板搭设不严或脚手架的封闭措施不到位都会导致施工人员在脚手架坠落。

3. 预制构件的不安全状态

构件安装人员不具备专业资质、未按照正确步骤组装构件(基本事件  $X_5$ )及关键部位处理不当(基本事件  $X_6$ )易引起构件脱落、断裂。我国预制构件的生产尚处于起步摸索阶段,缺乏一套详细明确的构件制作及质量验收标准的实施细则,构件的出厂质量没有一定的保障(基本事件  $X_7$ )。例如,在实际的施工现场中,构件的预留尺寸、位置不够精确时,会增加施工难度甚至影响结构整体稳定性;构件的出厂尺寸与实际施工所需尺寸不符合,在拼装时容易造成缝隙过大或不均匀等现象。预制构件的长度较长、体积较大,在运输过程中若支撑不牢固则构件容易发生颠覆(基本事件  $X_8$ )。此外,构件的堆放对周围

环境有一定要求,若存放区域的地面不平整容易引起构件侧移,排水设施与存放方法不当等也容易造成构件被腐蚀,从而影响构件质量(基本事件  $X_9$ )。

4. 相关设备的不安全状态

吊装设备的选型、布置是装配式建筑施工一个重要环节,若设备选型、布置不合理会影响整个施工过程的施工安全、质量与进度(基本事件  $X_{10}$ ),例如当起重机的承载能力小于吊装构件重量时,易出现起吊吃力,构件发生倾覆、滑落等现象。设备的定期检查、维护落实不到位易造成设备老化(基本事件  $X_{11}$ ),机械设备的超负荷使用(基本事件  $X_{12}$ )引起设备故障,从而造成机械伤人事故;机械设备从业人员安全意识较低,对灌浆设备、垂直运输设备等存在违章操作现象(基本事件  $X_{13}$ ),现场用电设备布置、使用不合理易造成触电事故(基本事件  $X_{14}$ )。

四、实例分析

笔者对装配式建筑现场情况进行调研,对所搜集的类似工程相关事故资料和数据进行分析,以“物品的不安全状态导致的安全事故”作为该故障树的顶事件进行风险评估,逐层寻找引发顶事件的各种原因和事件,建立了故障树图(见图 2)。

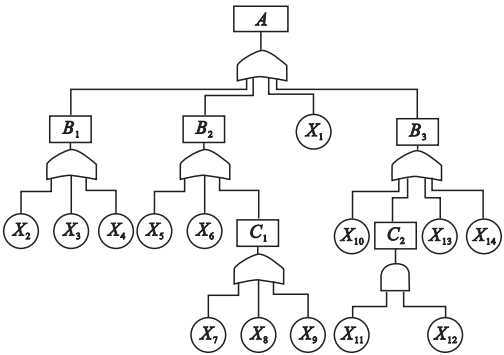


图 2 物品不安全状态导致的安全事故的故障树

图 2 中,根事件 A 是“物品的不安全状态导致的安全事故”,有 3 个中间事件  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  及一个基本事件  $X_1$ 。 $B_1$  表示安全防护体系的不安全状态, $B_2$  表示预制构件的不安全状态, $B_3$  表示相关设备的不安全状态,4



个事件任意一个发生都会导致根事件发生,其中, $T_A = B_1 + B_2 + B_3 + X_1$ ;

中间事件  $B_1$  包含 3 个基本事件  $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ ,其中, $B_1 = X_2 + X_3 + X_4$ ;

中间事件  $B_2$  包含 2 个基本事件  $X_5$ 、 $X_6$  和 1 个中间事件  $C_1$  构件质量不合格, $C_1$  包含 3 个基本事件  $X_7$ 、 $X_8$ 、 $X_9$ ,其中, $B_2 = C_1 + X_5 + X_6$ , $C_1 = X_7 + X_8 + X_9$ ;

中间事件  $B_3$  包含 3 个基本事件  $X_{10}$ 、 $X_{13}$ 、 $X_{14}$  及 1 个中间事件  $C_2$  设备故障, $C_2$  包含 2 个基本事件  $X_{11}$ 、 $X_{12}$ ,其中  $B_3 = X_{10} + C_2 + X_{13} + X_{14}$ , $C_2 = X_{11} \cdot X_{12}$ 。

将该故障树根据模型所述方法转化为 BDD 结构并进行风险评估,BDD 结构如图 3 所示,事故发生率和基本事件重要度分析结果如表 1 所示。其中,各基本事件的发生率根据搜集到的历史数据进行确定,各 Birnbaum 重要度和装配式建筑安全事故发生率则通过所构建的风险评估模型进行计算得到。

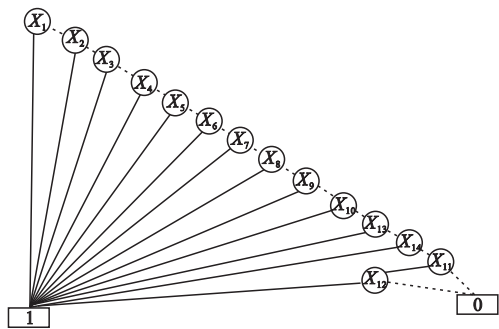


图 3 实例 BDD 结构图

表 1 BDD 结构事故发生率和基本事件重要度

基本事件	事故发生率	Birnbaum 重要度
$X_1$	0.003 60	0.969 01
$X_2$	0.000 79	0.966 29
$X_3$	0.000 58	0.966 09
$X_4$	0.002 50	0.967 95
$X_5$	0.008 80	0.974 10
$X_6$	0.008 80	0.974 10
$X_7$	0.000 95	0.966 44
$X_8$	0.000 37	0.965 88
$X_9$	0.000 91	0.966 41
$X_{10}$	0.003 60	0.969 01
$X_{11}$	0.000 47	0.000 90
$X_{12}$	0.000 93	0.000 45
$X_{13}$	0.000 48	0.965 99
$X_{14}$	0.003 60	0.969 01

通过计算可得该装配式建筑安全事故发生率为 0.034 47,由表 1 可知,Birnbaum 重要度大小排序为

$$X_5 = X_6 > X_1 = X_{10} = X_{14} > X_4 > X_7 > X_9 > X_2 > X_3 > X_{13} > X_8 > X_{11} > X_{12}$$

基本事件重要度排序越靠前说明对事故发生的影响越关键。

在本案列中,基本事件  $X_5$ 、 $X_6$  的重要度值排在最前面,说明在施工过程中安全管理人员应将这 2 个因素作为重点进行把控。例如,在进行预制构件的组装时,应聘请具有专业知识的技术人员进行操作,避免因构件组装不合格导致构件搭接不牢固而引起安全事故;对施工人员应进行上岗前安全培训。预制构件关键部位的处理也尤为重要,构配件间及钢筋的搭接合理程度、混凝土浇筑强度是否达标等都会影响施工质量,若关键部位处理不当则会留下一系列的安全隐患。基本事件  $X_1$ 、 $X_{10}$ 、 $X_{14}$  以同样的次序紧接着排在基本事件  $X_5$ 、 $X_6$  后面,说明管理者也需对高空坠物,吊装设备的选型、布置以及现场用电设备的布置是否合理这 3 方面多加关注。在装配式建筑施工中,施工人员在临边洞口和脚手架处进行高处作业和安装、拆卸垂直运输设备过程中存在很多个分项工程的垂直交叉作业,极易发生高空坠物安全事故,若防护措施不完善则会埋下较大安全隐患,建议工程总承包单位结合各专业分包施工单位的实际情况,编制具有针对性的有效防坠施工方案,合理选择和布置建筑外围的临边防护措施,若因施工条件限制无法做到全封闭防护时应严格制定防坠措施。对吊装设备选型时,其型号应该满足最大幅度处和最重构件的吊装要求,并根据施工现场的建筑平面图和构件的运输位置等确定吊机的安装位置,尽可能靠近起重重量最大区域,尽量覆盖全部施工区域。另外,装配式建筑施工过程中需要大量的用电作业,现场常会放置临时电箱和电线,而临时用电的工作场所不固定且露天作业较多,加之施工人员安全用电意识较差,施工现场易发生触电事故。因此,应加

强对施工现场临时用电的管理,加大对各类用电人员的安全培训,严禁用电人员无防护操作。

五、结 语

笔者在故障树的基础上引入二元决策图对装配式建筑施工安全进行评估。通过实例证明,该算法在提高计算精度和运算效率方面具有独特优势,节省了大量运算时间和储存空间,从定性和定量相结合的角度有效地分析了装配式建筑施工安全的风险程度,为装配式建筑施工安全的可靠性分析提供了一条新的途径。在故障树领域中,大多的 BDD 排序算法都是基于 Bryant 提出的约束进行的,即在转化过程中底事件采用统一的固定排序。这种方式尽管得到的 BDD 结构是惟一的,但并不能保证得到的 BDD 结构是最优的,因此,还有待进一步的研究探索与改进。

参考文献:

[1] 苏杨月,赵锦锴,徐友全,等. 装配式建筑生产施工质量问题与改进研究[J]. 建筑经济, 2016(11):43-48.

[2] 陈建伟,苏幼坡. 预制装配式剪力墙结构及其连接技术[J]. 世界地震工程,2013(1):38-48.

[3] ERCOLINO M, MAGLIULO G, MANFREDI G. Failure of a precast RC building due to Emilia - Romagna earthquakes [ J ]. Engineering structures,2016,118:262-273.

[4] 陈伟,付杰,熊付刚,等. 装配式建筑工程施工安全灰色聚类测评模型[J]. 中国安全科学学报,2016,26(11):70-75.

[5] 田黎. 预制装配式住宅现场施工技术与安全风险[ J ]. 住宅科技,2014(6):91-96.

[6] 张文佳,李慧民,赵地. 基于可信性测度理论的装配式建筑施工过程风险性评估[J]. 工业安全与环保,2017,43(8):13-17.

[7] 汤彦宁. 基于系统动力学的装配式住宅施工安全风险研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2015.

[8] 齐宝库,李长福. 装配式建筑施工质量评估指标体系的建立与评估方法研究[J]. 施工技术,2014(15):20-24.

[9] RAUSY A. New algorithms for fault tree analysis[ J ]. Reliability engineering and system safety,1993,40(3):203-211.

[10] 杨莉琼. 基于二元决策图的建筑施工安全风险[ J ]. 系统工程理论与实践,2013,33(7):1889-1897.

Safety Risk Assessment of Prefabricated Construction  
Based on BDD Method

CHANG Chunguang, WU Xi

( School of Management,Shenyang Jianzhu University,Shenyang 110168,China)

**Abstract:**In order to assess safety risk of prefabricated construction(PC) scientifically and efficiently,the fault tree analysis method is introduced to find out some dangerous sources. The fault tree is transformed into the binary decision diagram(BDD) structure while the safety risk accident rate and the importance degree of all basic events are calculated. Safety managers can control the weak links and key factors based on the calculated data. The safety risk is qualitatively and quantitatively analyzed on this basis. The example proves that the introduction to the BDD-based method can use computer programming to get the key factors that influence the safety of assembly building,and simplify the process of fault tree analysis in comparison with traditional fault tree evaluation method.

**Key words:**analysis of fault tree (FTA);prefabricated construction (PC);binary decision diagram (BDD);safety risk