

事故树分析法在高空坠落事故中的应用

Application of Fault Tree Analysis to Fall from Height Accidents

万启东 李泽锋

Qidong Wan Zefeng Li

中广核核电运营有限公司 中国·广东 深圳 518214

China Nuclear Power Operation Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518214, China

摘要: 高空坠落造成的伤害严重威胁着电力检修行业作业人员的生命安全。事故树分析法广泛应用在各种事故分析中,借助事故树分析法可以对系统的危险源进行辨识和分析,分层次地找出导致事故发生的根本原因和潜在原因,同时将结果以树状图的形式直观地展现出来,并根据分析结果提出针对性的安全措施,预防事故的发生。

Abstract: Injuries caused by falls from height pose a serious threat to the lives of operators in the power maintenance industry. The fault tree analysis method is widely used in the analysis of various accidents. With the help of the fault tree analysis method, the hazards of the system can be identified and analysed, the root causes and potential causes of accidents can be identified in a hierarchical manner, and the results can be visualised in the form of a tree diagram, and targeted safety measures can be proposed according to the analysis results to prevent accidents.

关键词: 事故树; 高空坠落; 危险源辨识

Keywords: fault tree; fall from height; hazard identification

DOI: 10.12346/peti.v5i2.8033

1 事故树分析法基本理论及应用

事故树分析法(Accident Tree Analysis, 简称FTA)是安全系统工程中重要的分析方法,既可定性分析,也可定量分析^[1]。首先确立顶事件,通过自上而下的演绎,列出中间事件和基本事件,结合布林逻辑组合,不仅可以分析事故的直接原因,还能确定导致事故发生的根本原因和潜在原因,并且以直观的形式展现出来,该方法主要应用于安全工程领域,了解系统失效的原因,并以此来降低风险。

2 高空坠落概述

JGJ80—2016《建筑施工高处作业安全技术规范》中明确,凡是在坠落高度基准面2m及2m以上有可能坠落的高处进行施工作业均称为高处作业^[2]。高处作业根据作业人员所处的环境不同,可分为临边作业、洞口作业、攀登作业、悬空作业、操作平台作业和交叉作业。在电力检修作业中,可涉及多种高处作业类型,如若未进行防护或者防护不当,作业人员从高空坠落造成的事故叫作高处坠落。

3 高空坠落事故原因分析

事故的发生往往是由多种原因导致,但基本都可以从人的因素和物的因素两个角度去考虑,其中人的因素包括人的不安全行为和管理缺陷,物的因素包括物的不安全状态和不良环境。根据事故致因理论,人的不安全行为、物的不安全状态和不良环境属于事故的直接原因,管理缺陷则是造成事故的根本原因。针对高空坠落事故,人是活动的主体,人员的心理和生理状况以及其具备的基本安全知识,都决定着事故的发生与否。高处作业一般涉及安全带、防护网、防护栏等实体的安全防护,防护是否到位决定着事故是否发生以及事故发生后所造成的严重程度。人员的活动是参与到不同环境中的,不同的环境具有不一样的风险,比如户外高处作业,受制于当时的天气状况,恶劣的风雨雪天气对高空作业影响巨大。室内高处作业也受限于照明和作业空间大小的影响,尤其电力检修时设备间距较小时,人员站位受限,影响作业。同时,电力检修现场也离不开安全管理,安全管理可以从不同维度出发,比如现场巡检和教育培训的安排等,科学有效

【作者简介】万启东(1992-),男,中国广东深圳人,硕士,助理工程师,从事安全管理研究。

的安全管理可以更大程度地较少现场安全事故发生的概率。

4 事故树分析方法的步骤

①前期准备：首先确定分析的事故系统，并详细了解该事故系统，可以通过该系统分析出事故的相关原因。

②事故树的编制：在了解整个事故系统的基础上，确定事故树的顶事件，并根据上下原因的逻辑关系分析出与顶事件相关联的事件，进而绘制该事故的事故树图形。

③事故树的分析和结论：绘制完成事故树的图形后，采用相关的分析方法，对结果进行评价和总结，同时注重找出事故的预防措施，减少现场作业事故发生的频率，对于电力检修整个系统安全性的提升具有重要的意义。

5 建立高处坠落事故树

根据以上分析，将最不希望发生的作业人员“高处坠落”确立为顶事件 T，分析出造成高处坠落事故的基本因素，即基本事件，并根据系统内的逻辑关系，最后自上而下的绘制出高处坠落事故树。表 1 为事故树中不同符号代表的含义，由表 1 可以看出，导致高处坠落事故出现的基本原因有 20 个，分别用 X1、X2、X3、X4……X18、X19、X20 表示，这些是高处坠落事故的隐患，但引发高处坠落的并非隐患同时发生引起的，当一部分基本事件发生时，就会导致顶事件的发生。图 1 为高处坠落事故树，在事故树中 T 代表顶事件，事故树逻辑图以逻辑与门和逻辑或门逐步开展，以 T、M1、M2 为例，与门代表 M1 和 M2 同时发生才能引起顶事件 T 的发生，以 M2、M5、M6 为例，或门代表 M5 或者 M6 发生都可以导致 M2 的发生。

表 1 事故树中不同符号的含义

符号	含义	符号	含义
T	高处坠落	X5	安全意识不足
M1	人的因素	X6	注意力不集中
M2	物的因素	X7	突发疾病
M3	人的不安全行为	X8	疲劳作业
M4	管理缺陷	X9	注意力不集中
M5	物的不安全状态	X10	监管不到位
M6	不良环境	X11	教育培训不到位
M7	违章作业	X12	技术交底不到位
M8	操作失误	X13	安全带设计缺陷
M9	人员状态不佳	X14	安全带制造缺陷
M10	安全带缺陷	X15	脚手架不合格
M11	安全防护设施缺陷	X16	固定护栏缺陷
X1	未系安全带	X17	狭窄空间
X2	作业中私自脱离安全带	X18	照明不良
X3	走捷径	X19	标志缺失
X4	技能不足	X20	不良天气

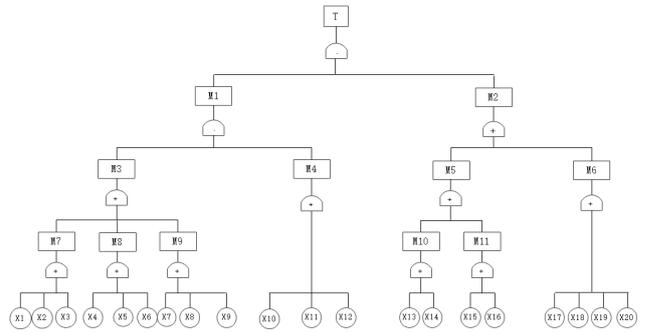


图 1 高处坠落事故树

6 高处坠落事故树定性分析

6.1 最小割集

最小割集，是指能够使顶事件发生的最少的基本事件的集合^[3]。通过最小割集，可以显示事故发生的可能的路径，可以为预防事故的发生找出可行性的办法。一般的求解方法分为布尔代数法、最小路径法、结构法，以下通过最为常用的布尔代数法进行求解。

根据图 1 的高处坠落事故树，通过布尔代数法进行顶事件的函数表达式： $T=M1M2=M3M4(M5+M6)=(M7+M8+M9)M4(M10+M11+M6)=(X1+X2+X3+X4+X5+X6+X7+X8+X9)(X10+X11+X12)(X13+X14+X15+X16+X17+X18+X19+X20)$ 。通过计算可得，该高处坠落事故的最小割集共计 216 个。

6.2 最小径集

当事故树中某些基本事件不发生，顶事件就不会发生，这些基本事件的集合称为径集。最小径集，是指顶事件不发生所必需的最低限度的基本事件的集合。最小径集是最小割集的对偶，因此利用对偶性，将事故树中的与门换成或门，将或门换成与门，并将全部事件加上“'”，变成事件补的形式，就可以得到一个新的防止高处坠落的成功树，并求成功树的最小割集，再利用对偶变化就可以得到原事故树的最小径集。

在此基础上，再次根据布尔代数法，可以得到成功树的最小割集是： $T'=M1'+M2'=M3'+M4'+M5'M6'=M7'M8'M9'+M4'+M10'M11'M6'=(X1'X2'X3'X4'X5'X6'X7'X8'X9')+(X10'X11'X12')+(X13'X14'X15'X16'X17'X18'X19'X20')$ 。

通过对偶性，可得到原事故树的最小径集有 3 个，分别是 $\{X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7, X8, X9\}$ 、 $\{X10, X11, X12\}$ 、 $\{X13, X14, X15, X16, X17, X18, X19, X20\}$ 。

6.3 结构重要度

在事故树中，结构重要度是指在假设各基本事件的发生的概率相等的情况下，描述各基本事件对顶事件的影响的重要度的体现。每个基本事件对顶事件影响的程度不一样，可以通过以下的计算公式计算：

其中， k 是事故树中包含的最小径集的数目， m 是包含第 i 个基本事件最小径集的数目，是包含第 i 个基本事件的第

j 个最小径集的基本事件数目。通过该式计算可得到基本事件的结构重要度分别为： $X_{10}=X_{11}=X_{12}=0.111$ ， $X_{13}=X_{14}=X_{15}=X_{16}=X_{17}=X_{18}=X_{19}=X_{20}=0.042$ ， $X_1=X_2=X_3=X_4=X_5=X_6=X_7=X_8=X_9=0.037$ 。因此，高处坠落事故树的结构重要度排序为： $X_{10}=X_{11}=X_{12} > X_{13}=X_{14}=X_{15}=X_{16}=X_{17}=X_{18}=X_{19}=X_{20} > X_1=X_2=X_3=X_4=X_5=X_6=X_7=X_8=X_9$ 。

$$I_{\varphi(i)} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^m \frac{1}{R_j} (j \in k_j)$$

6.4 结果分析

通过绘制出的高处坠落事故树可以看出，共有 20 个基本事件影响着事故的发生。其中涉及人的因素和物的因素的最小基本事件分别是 12 个和 8 个。一般事故的发生不仅仅是一件基本事件的结果，而是多个基本事件的相互影响。

通过以上计算可知，高处坠落事故树的最小割集共 216 个，最小径集有 3 个。最小割集代表着导致事故发生的最小集合，最小径集代表着事故不发生的最小集合，可以通过最小径集来预防事故的发生。因此，可以得出导致高处坠落事故发生的途径共计 216 条，而预防事故发生的途径有 3 条，3 条预防事故发生的径集中 2 条是对于人的因素的预防，因此在考虑预防事故的发生时需着重预防人的不安全行为和管理上的缺陷。

通过结构重要度的计算，不难看出 X_{10} 、 X_{11} 、 X_{12} 所对应的管理缺陷的重要度排在前列，也对应了事故致因理论中管理缺陷的根本原因。人的不安全行为和物的不安全状态的结构重要度接近，基本事件的结构重要度不是基本事件发生的概率，需要同步关注。

7 应对措施

高处坠落危害严重到威胁到作业人员的安全，加强现场作业的安全管理尤为重要。根据上述分析，从人的不安全行为、管理缺陷、物的不安全状态和不良环境四个角度采取针对性的措施，将有效地提升现场作业的安全性，保障作业人员的人身安全。

①提升安全管理。安全管理覆盖了现场作业的安全监管、技术交底以及对作业人员脱产后的教育培训。安全监管不只是去现场走走而已，而需要深入到作业班组，一方面细致观察作业人员的行为规范性，一方面参加作业班组的班前会或工前会，了解技术交底是否渗透到每个作业人员，作业人员是否知道自己的主要职责、作业的风险和安全防范措施。同时，加大安全管理人员的管理力度，增加现场巡检的时间，以时间成本换取规范安全的现场。除此之外，加强作业人员

的教育培训是作业人员安全意识形成的基石，教育培训可以采取理论教学和实景操作相结合的形式。理论教学从现场作业的角度出发，并根据培训内容进行考核，考核合格方可进行实景操作。实景操作需要模拟现场作业环境，管理人员需时刻关注操作过程，并实时给予打分和指导。

②减少人的不安全行为。人是作业活动的主体，现场安全的控制应是以控制人的行为为主。违章作业是现场活动的忌讳，可将违章行为分为主观违章和无意识违章。针对主观违章的，需要设置一定的惩罚机制，严重的给予退出现场的处罚。对于无意识的违章是作业人员缺乏对现场作业危险性的感知，一方面是管理层未对作业人员进行专业的安全培训或者走过场的安全培训，一方面是在班前会或工前会技术交底不到位，可以结合上述对安全管理提升的做法进行改进。操作失误在技能不足中的体现可以通过实操训练和技能比武的形式在日常进行加强和提升。对于人员状态的改善，定期开展体检活动，对于身体指标不合格的，比如患有心脏病、恐高症和高血压的不安排高处作业，同时每天进行血压的测量和健康的申报，精神状态不佳的进行轮休或安排工作强度低的作业。

③减少物的不安全状态。严格把控安全带的来源和质量，选择信誉度较好的厂家，增加安全生产设施的投入，并定期对于安全带进行质量检测，贴上合格的标签，并可以根据标签对检测人员的溯源，有效地管控检测流程。同时对于脚手架的搭设严格执行审查流程，组建专业的脚手架评价小组对现场脚手架签字验收，脚手架上悬挂不同颜色的许可证，绿色代表验收合格，黄色代表待验收，红色代表不合格。固定护栏的缺陷需要专业的维护团队定期开展巡视检查，有问题的及时上报和维修，并在维修完善前设立禁止靠近的区域。

④改善作业环境。严禁在大风、大雨、大雪等恶劣的天气情况下进行高空作业，在恶劣天气过后，安全管理人员对室外存在损坏、滑跌的设备设施和区域进行检查，并通知专业人员进行维护。对于狭窄空间的作业，人员站位受限，结合现场情况，提前制定安全管理方案，并在作业前再次进行技术交底，确保作业人员知晓安全措施。现场存在的照明不良和标志缺失的情况，一方面是现场作业人员及时申报；另一方面安全管理人员增加现场巡视的次数和时间主动发现隐患，及时安排专人进行维护，确保现场作业环境处于良好的状态。

参考文献

- [1] 周波.安全评价技术[M].北京:国防工业出版社,2014.
- [2] JGJ 80-2016 建筑施工高处作业安全技术规范[S].
- [3] 张景林,崔国璋.安全系统工程[M].北京:煤炭工业出版社,2004.