

doi: 10.7690/bgzd.2020.04.017

基于 RIMER 的阵地建设安装工程安全风险评估方法

刘汉增, 陈桂明, 蔺志强, 常雷雷

(火箭军工程大学作战保障学院, 西安 710025)

摘要: 针对阵地建设安装工程安全风险评估的问题, 依据证据推理算法, 提出一种阵地建设安装工程安全风险评估方法。将安全风险影响因素逐级分解至指标层, 并对指标间的相关关系进行梳理, 构建阵地建设安装工程安全风险评估指标体系, 根据风险评估结果, 运用 RIMER (belief rule base inference methodology using evidential reasoning) 方法解决底层输入指标类型多样、评估信息不完全问题。实例分析结果表明: 该方法具有较好的解释性和可追溯性, 对于土建工程和阵地管理中的安全工作具有一定的借鉴意义。

关键词: 阵地建设; 安装工程; 4M1E; RIMER; 安全风险评估方法

中图分类号: TP311.521 **文献标志码:** A

Security Risk Assessment Method for Installation Project of Position Construction Based on RIMER

Liu Hanzeng, Chen Guiming, Lin Zhiqiang, Chang Leilei

(College of Guarantee, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: Aiming at the problem of security risk assessment of the installation project of position construction, according to the evidence reasoning algorithm, a security risk assessment method for the installation project of position construction is proposed. This paper decomposes the security risk factors into indicator layer step by step, and sorts out the correlations between the indicators, then constructs the security risk assessment index system of the installation project of position construction. According to the risk assessment result, RIMER (belief rule base inference methodology using evidential reasoning) is used to solve these problems that the underlying input indicators are diverse and the evaluation information is incomplete. The example analysis results show that the method has good explanatory and traceability, and it also has certain reference significance for the safety work in civil engineering and position management.

Keywords: position construction; installation project; 4M1E; RIMER; security risk assessment method

0 引言

阵地建设是国家为防御外来侵略, 在国土上构筑的永久性军事工程项目建设。战时, 阵地工程建设的成果能为部队创造良好的作战环境和作战条件, 争取战争的主动权^[1]。按照施工项目的性质, 阵地建设可划分为土建工程和安装工程 2 个相对独立的单项工程。阵地建设安装工程涵盖通风、电气、给排水、机装等施工内容, 涉及阵地的伪装、生存和发射等多项性能, 贯穿阵地建设的全过程。工程安装部队常年担负阵地建设任务, 工程建设呈现出时间跨度长、人力和物力投入大、技术标准要求高等特征, 官兵长期承受高分散、高流动、高涉密、高强度、高风险的“五高”施工安全压力; 因此, 在部队建设发展的新时期, 做好安装工程风险评估问题显得越发重要。

安全风险评估是工程建设的重要组成部分, 能

为全面有效落实安全管理工作提供基础资料, 并评估出不同环境或不同时期的安全危险性重点, 有针对性地加强安全管理^[2]。阵地建设安装工程安全风险评估需要解决 2 个关键问题: 1) 如何构建风险评估体系; 2) 如何进行体系的风险评估。在进行安全风险评估时, 其底层指标的输入既有专家经验, 又有检查数据, 如何建立统一的规则并计算出合理结果是研究的难点。

现有的安全风险评估方法在很大程度上依赖于专家主观经验来确定相应指标权重与风险程度, 在具体风险评估中很容易失真。笔者针对评估体系中存在底层指标类型多、整合难度大等问题, 提出一种基于证据推理算法的置信规则库推理方法 (RIMER)。在建立现场管理 5 大要素 4M1E (man machine material method environment) 体系的基础上, 糅合专家意见、历史数据和安全检查结果, 构

收稿日期: 2019-12-20; 修回日期: 2020-01-10

作者简介: 刘汉增(1991—), 男, 山东人, 硕士, 从事国防工程与项目管理研究。E-mail: 1158729864@qq.com。

建出置信规则库，将类别不一、涵义各异的底层数据统一转换为服从置信规则库的信度结构，计算底层数据对规则的匹配度，然后按层次进行证据组合，评估出安全风险结果。

1 安全风险评估模型构建

在实战化训练的背景下，阵地建设中新建任务和升级改造任务逐年增多，周期短、频率快和要求高已成为阵地建设的新常态。工程部队官兵长期处于高负荷、高强度的施工状态，机械装备长时间满负荷运转，部队整体安全形势异常严峻，笔者基于 4M1E 原理构建安全风险评估体系^[3]。

1.1 4M1E 方法

阵地建设安装工程安全风险评估体系是安全风险评估的主干，是风险因素与评估方法的桥梁。由于安装工程的风险影响因素复杂繁多且相互交织，根据事故分析和风险源归纳，很难将不同类型的风险因素归纳到相同层次^[4]。以 4M1E 原理为理论依据，将工程施工安全风险影响因素分解到 Man(人)、Machine(机器)、Material(物)、Method(方法/技术)和 Environment(环境)5 个方面，而后进行指标细化，从而涵盖了安装工程安全风险管理的各个方面。同时，根据《施工现场危险源辨识与风险评价实施指南》《地下工程施工安全事故预防与案例分析》以及相关规范和制度，结合安装工程的具体施工内容，遵循目标性、系统性、可操作性的原则实施体系构建。

1.2 建模过程

对安装工程事故和风险源进行分析归纳，在专家知识、历史经验和案例分析的基础上，建立层次结构。如图 1 所示，构建涵盖人员、机械、方法、材料和环境 5 个一级指标，以及 17 个二级指标在内的安全风险体系^[5]。

2 基于 RIMER 的安全风险评估方法

2.1 RIMER 方法

RIMER 方法是在 D-S 证据理论、多属性决策理论、模糊理论和 if-then 专家系统的基础上发展起来的，具有对模糊数据、主观数据、概率型数据及无知信息等进行建模和分析的能力^[6-7]。

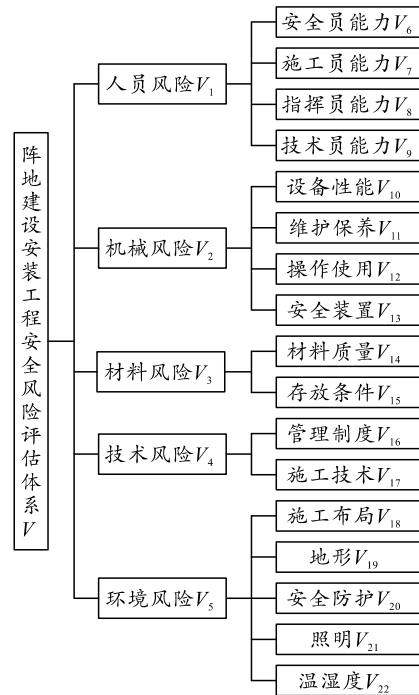


图 1 阵地建设安装工程安全风险评估体系

2.2 基于 RIMER 的安全风险评估

RIMER 评估方法具体包括 5 个步骤：

1) 构造信度规则库。

置信规则库是由“if-then”规则表示，且每条规则的结论具有信度结构^[8]。置信规则库中规则表示为：

$$R_k : \text{if } A_1^K \wedge A_1^K \wedge \dots \wedge A_{T_K}^K, \text{ then } \{(r_1, \beta_{1k}), (r_2, \beta_{2k}), \dots, (r_L, \beta_{Lk})\} \quad (1)$$

其中： T_K 为前提条件的个数； β_{LK} 为第 K 条规则

前提条件成立时结论为 r_i 的信度，且有 $\sum_{i=1}^L \beta_{LK} \leq 1$ 。

2) 输入数据的转换。

$$T(x_i, \varepsilon_i) = \{(A_{ij}, a_{ij}); i = 1, 2, \dots, I, j = 1, 2, \dots, |A_i|\},$$

$$a_{ij} = \frac{\varphi(x_i, A_{ij})\varepsilon_i}{\sum_{|A_i|} \varphi(x_i, A_{ij})} \quad (2)$$

其中， a_{ij} ($a_{ij} \in [0, 1]$) 为输入 x_i 匹配能力 c_i 的第 j 个取值 A_{ij} 的程度。根据指标类型和特点的不同， $\varphi(x_i, A_{ij})$ 的选取有以下 2 种情形。

① 前提属性为离散数值。

规则库中能力 c_i 的取值 A_{ij} 为 $\{A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_i|A_i|\}$ 。不失一般性，数列单调递增，有：

$$\varphi(x_i, A_{ij}) = \begin{cases} \frac{A_{i(k+1)} - x_i}{A_{i(k+1)} - A_{ik}} & j = k(A_{ik} \leq x_i \leq A_{i(k+1)}) \\ \frac{x_i - A_{ik}}{A_{i(k+1)} - A_{ik}} & j = k + 1 \\ 0 & j = 1, 2, \dots, |A_i|, j \neq k, k + 1 \end{cases} \quad (3)$$

② 输入值为专家主观经验判断, 则

$$a_{ij} = \varepsilon_i \quad (4)$$

3) 输入数据的转换。

由式(2), 设输入对应于第 k 条规则依次转换成 $(A_1^k, \alpha_1^k), (A_2^k, \alpha_2^k), \dots, (A_{T_k}^k, \alpha_{T_k}^k)$ 。当所有前提条件都用“ \wedge ”连接时,

$$\alpha_k = \prod_{i=1}^{T_k} (\alpha_i^k)^{\bar{\delta}_{ki}}, \text{ 其中 } \bar{\delta}_{ki} = \delta_{ki} / \max\{\delta_{ki}\} \quad (5)$$

其中, α_k 为输入匹配第 k 条规则的程度。由式(5)知, $\bar{\delta}_{ki} \in (0, 1], \alpha_i^k \in [0, 1], \alpha_k \leq \min_{i=1, 2, \dots, T_k} \{\alpha_i^k\}$ 。

将式(5)计算转换后的数据对第 k 条规则归一化的激活程度:

$$\omega_k = \theta_k \alpha_k / \sum_{i=1}^L \theta_i \alpha_i \quad (6)$$

其中: θ_k 为第 k 条规则的相对权重; α_k 为输入匹配第 k 条规则的程度。

4) 构造基本可信数。

基本可信数的构造如下式所示:

$$\left. \begin{aligned} m_{l,k} &= \omega_k \bar{\beta}_{lk}, \quad l = 1, 2, \dots, L; k = 1, 2, \dots, K \\ m_{R,k} &= 1 - \omega_k \sum_{l=1}^L \bar{\beta}_{lk} \\ \bar{m}_{R,k} &= 1 - \omega_k \\ m_{R,k} &= \omega_k (1 - \sum_{l=1}^L \bar{\beta}_{lk}) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中 $m_{l,k}$ 是第 k 条规则第 l 个结论分配的基本可信数。

5) 证据组合。

假设前 S 条规则被激活, 其中, β 为由输入值(风

险评估体系的指标参数)得到结果值(安全风险评估等级)的信度。 $m_l, \bar{m}R, \tilde{m}R$ 为综合前 k 条规则的结果,

$$\left. \begin{aligned} m_l &= k \left[\prod_{i=1}^s (m_{l,i} + \bar{m}R, i + \tilde{m}R, i) - \prod_{i=1}^s (\bar{m}R, i + \tilde{m}R, i) \right], n = 1, \dots, N \\ \tilde{m} &= k \left[\prod_{i=1}^s (\bar{m}R, i + \tilde{m}R, i) - \prod_{i=1}^s \bar{m}R, i \right] \\ \bar{m}R &= k \left[\prod_{i=1}^s \bar{m}R, i \right] \\ K &= \left[\sum_{n=1}^N \prod_{i=1}^s (m_{l,i} + \bar{m}R, i + \tilde{m}R, i) - (N-1) \prod_{i=1}^s (\bar{m}R, i + \tilde{m}R, i) \right]^{-1} \\ \beta_l &= m_l / (1 - \bar{m}R) \\ \beta_R &= \tilde{m}l / (1 - \bar{m}R) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

最终得到的 β_l 即是安全风险等级(一般、中等、高危)的置信度值。当决策者需要得到归一化的结论, 如归一化的评估得分 U 时, 也可以按照下式进行计算:

$$U = \sum_{n=1}^N u(D_n) \beta_n \quad (9)$$

其中 $u(D_i)$ 表示结论为第 n 个等级的效用值。

3 实例分析

3.1 安装工程安全风险评估计算

笔者以担负-63工程3个安装分队为研究对象, 对各分队安装工程风险进行分析讨论。首先, 根据图2, 由工区安全管理机构对3个分队现阶段的安全管理情况进行综合检查考评, 获取安全风险评估指标体系最底层指标的检查考评值如表1所示。

表1 安全检查考评结果

指标	1 分队	2 分队	3 分队	指标	1 分队	2 分队	3 分队
安全员能力 V_6	96	79	64	存放条件 V_{15}	(0.65,0.35)	(0.45,0.55)	(0.85,0.15)
施工员能力 V_7	89	75	66	管理制度 V_{16}	(0.9,0.1,0)	(0.5,0.2,0.3)	(0.2,0.2,0.6)
指挥员能力 V_8	92	80	63	施工技术 V_{17}	(0.85,0.1,0.05)	(0.45,0.2,0.35)	(0.15,0.2,0.65)
技术员能力 V_9	94	77	76	施工布局 V_{18}	(0.8,0.2)	(0.7,0.3)	(0.2,0.8)
设备性能 V_{10}	(0.85,0.1,0.05)	(0.6,0.2,0.2)	(0.2,0.2,0.6)	地形 V_{19}	(0.5,0.5)	(0.8,0.2)	(0.8,0.2)
维护保养 V_{11}	(0.9,0.1)	(0.6,0.4)	(0.2,0.8)	安全防护 V_{20}	(0.7,0.3)	(0.8,0.2)	(0.8,0.2)
操作使用 V_{12}	(0.85,0.15)	(0.65,0.35)	(0.15,0.85)	照明 V_{21}	(0.5,0.5)	(0.7,0.3)	(0.5,0.5)
安全装置 V_{13}	(1,0)	(0.5,0.5)	(0.3,0.7)	温湿度 V_{22}	(0.5,0.5)	(0.55,0.45)	(0.55,0.45)
材料质量 V_{14}	(0.7,0.3)	(0.6,0.4)	(0.8,0.2)				

1) 计算人员风险因素(以1分队为例)。

已知输入为: $V_1 = \{V_6=(96,1), V_7=(89,1), V_8=(92,1), V_9=(94,1)\}$ 。

① 构造置信规则库见表2, 由输入 V_6, V_7, V_8, V_9 知, 激活了规则库中 $R_{16}, R_{18}, R_{19}, R_{20}, R_{22}$, 相应的规则如表3所示。

② 输入数据转换，将输入值 V_6 、 V_7 、 V_8 、 V_9 分别代入式(3)可得， $\varphi_1(96,100)=0.8$ ， $\varphi_1(96,80)=0.2$ ， $\varphi_{20}(89,100)=0.45$ ， $\varphi_{20}(89,80)=0.55$ ， $\varphi_3(92,100)=0.6$ ， $\varphi_3(92,80)=0.4$ ， $\varphi_4(94,100)=0.7$ ， $\varphi_4(94,80)=0.3$ 。

③ 利用式(5)、式(6)计算转换后数据对第 k 条规则归一化后的激活程度可得： $\omega_{16}=0.375$ ， $\omega_{19}=0.1071$ ， $\omega_{18}=0.4583$ ， $\omega_{20}=0.0268$ ， $\omega_{22}=0.0328$ ， $\mu_{16}=\mu_{18}=\mu_{19}=\mu_{20}=\mu_{22}=1$ 。

④ 构造基本可信数，利用式(7)构造基本可信数如表 4 所示。

表 2 带有信度结构的风险评估规则库(部分)

编号	前提条件(If)	结论(Then)
1	$(V_1=A) \wedge (V_2=A) \wedge (V_3=A) \wedge (V_4=A) \wedge (V_5=A)$	$V=\{(A,1)(B,0)(C,0)\}$
2	$(V_1=A) \wedge (V_2=A) \wedge (V_3=A) \wedge (V_4=A) \wedge (V_5=B)$	$V=\{(A,0.9)(B,0.1)(C,0)\}$
3	$(V_1=A) \wedge (V_2=B) \wedge (V_3=A) \wedge (V_4=B) \wedge (V_5=A)$	$V=\{(A,0.8)(B,0.2)(C,0)\}$
4	$(V_1=A) \wedge (V_2=A) \wedge (V_3=C) \wedge (V_4=A) \wedge (V_5=B)$	$V=\{(A,0.7)(B,0.3)(C,0)\}$
5	$(V_1=A) \wedge (V_2=B) \wedge (V_3=A) \wedge (V_4=A) \wedge (V_5=B)$	$V=\{(A,0.7)(B,0.2)(C,0.1)\}$
6	$(V_1=A) \wedge (V_2=B) \wedge (V_3=A) \wedge (V_4=B) \wedge (V_5=A)$	$V=\{(A,0.5)(B,0.2)(C,0.3)\}$
7	$(V_1=B) \wedge (V_2=A) \wedge (V_3=B) \wedge (V_4=A) \wedge (V_5=A)$	$V=\{(A,0.4)(B,0.3)(C,0.3)\}$
8	$(V_1=B) \wedge (V_2=A) \wedge (V_3=B) \wedge (V_4=B) \wedge (V_5=B)$	$V=\{(A,0.2)(B,0.2)(C,0.6)\}$

表 3 输入激活规则

编号	前提条件(If)	结论(Then)
16	$(V_6=100) \wedge (V_7=100) \wedge (V_8=100) \wedge (V_9=100)$	$V_1=\{(A,1)(B,0)(C,0)\}$
18	$(V_6=100) \wedge (V_7=100) \wedge (V_8=80) \wedge (V_9=80)$	$V_1=\{(A,0.7)(B,0.3)(C,0)\}$
19	$(V_6=100) \wedge (V_7=80) \wedge (V_8=100) \wedge (V_9=100)$	$V_1=\{(A,0.6)(B,0.4)(C,0)\}$
20	$(V_6=80) \wedge (V_7=100) \wedge (V_8=80) \wedge (V_9=80)$	$V_1=\{(A,0.5)(B,0.5)(C,0)\}$
22	$(V_6=80) \wedge (V_7=80) \wedge (V_8=80) \wedge (V_9=80)$	$V_1=\{(A,0.3)(B,0.7)(C,0)\}$

表 4 基本可信数结果

基本可信数	结果
$(m_{1,16}, m_{2,16}, m_{3,16}, m_{R,16}, \bar{m}_{R,16}, \tilde{m}_{R,16})$	(0.375 0, 0, 0, 0.625 0, 0.625 0, 0)
$(m_{1,18}, m_{2,18}, m_{3,18}, m_{R,18}, \bar{m}_{R,18}, \tilde{m}_{R,18})$	(0.085 7, 0.021 40, 0, 0.892 9, 0.892 9, 0)
$(m_{1,19}, m_{2,19}, m_{3,19}, m_{R,19}, \bar{m}_{R,19}, \tilde{m}_{R,19})$	(0.275 0, 0.183 3, 0, 0.541 7, 0.541 7, 0)
$(m_{1,20}, m_{2,20}, m_{3,20}, m_{R,20}, \bar{m}_{R,20}, \tilde{m}_{R,20})$	(0.013 4, 0.013 4, 0, 0.973 2, 0.973 2, 0)
$(m_{1,22}, m_{2,22}, m_{3,22}, m_{R,22}, \bar{m}_{R,22}, \tilde{m}_{R,22})$	(0.009 84, 0.022 96, 0, 0.967 2, 0.967 2, 0)

⑤ 证据组合，根据式(8)计算可得： $\beta_1=0.5789$ ， $\beta_2=0.3105$ ， $\beta_3=0.1106$ ，即人员风险等级(一般，中等，高危)的信度值为(0.5789, 0.3105, 0.1106)，利用式(9)进行归一化得： $U_{1,VI}=0.5789 \times 100 + 0.3105 \times 80 + 0.1106 \times 60 = 89.336$ 。

2) 计算其余各因素和总安全风险等级信度。

同理，可计算 1 分队、2 分队和 3 分队各因素风险等级如表 5 所示。

表 5 3 个分队安全风险等级

指标	1 分队	2 分队	3 分队
人员风险	0.578 9, 0.310 5, 0.110 6	0.369 7, 0.537 8, 0.092 5	0.201 7, 0.285 1, 0.513 2
机械风险	0.576 2, 0.314 6, 0.109 2	0.468 8, 0.357 1, 0.174 1	0.297 4, 0.361 5, 0.341 1
材料风险	0.574 3, 0.203 4, 0.222 3	0.494 4, 0.202 4, 0.303 1	0.641 2, 0.195 4, 0.163 5
方法/技术风险	0.867 9, 0.110 1, 0.022 1	0.494 3, 0.233 7, 0.272 0	0.239 0, 0.269 0, 0.492 0
环境风险	0.436 4, 0.275 6, 0.287 9	0.459 0, 0.270 2, 0.270 7	0.380 9, 0.310 2, 0.308 9
总体安全风险	0.502 1, 0.298 4, 0.199 6	0.422 7, 0.317 2, 0.260 1	0.336 1, 0.310 7, 0.353 2

将式(9)归一化，得到各因素风险评估结果如图 2 所示。

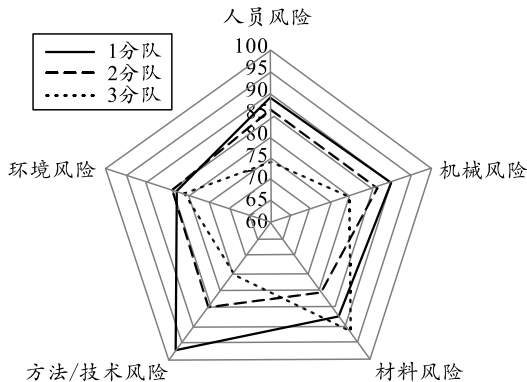


图 2 3 个分队安全风险因素评估结果

同理，利用式(9)，得到总体安全风险评估结果如图 3 所示。

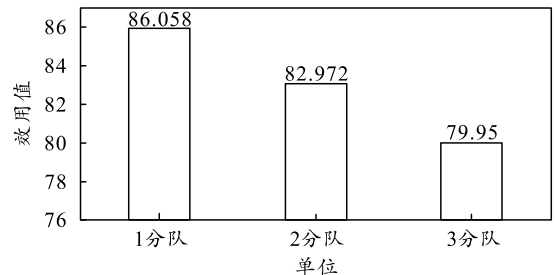


图 3 3 个分队总体安全风险评估结果

3.2 风险评估结果分析

1 分队长期担负施工任务，人员经验丰富，部

队管理正规有序，在方法和技术方面安全性较高，同时因分队材料仓库拆迁，材料安全的危险性增加；2 分队因任务调整，正处于施工适应期，各方面得分相对中等；3 分队为编制调整而抽组新建的单位，人员处于磨合期，施工经验欠缺，部队正规化管理有待加强，且机械装备处于更新换代阶段，在人员、方法/技术和机械风险方面的危险度较高，风险评估得分较低。评估结果符合部队实际情况。

通常，阵地建设以成建制的分队为基础单位。在对 1、2、3 分队进行安全风险评估后，既可以从总体风险角度把握单位的安全管理水平，又能从人员、机械、材料和技术方法等方面查找出高危的风险因素，针对性地加强安全管理，通过该方法能够实现多个分队安全风险伴随式评估监测。

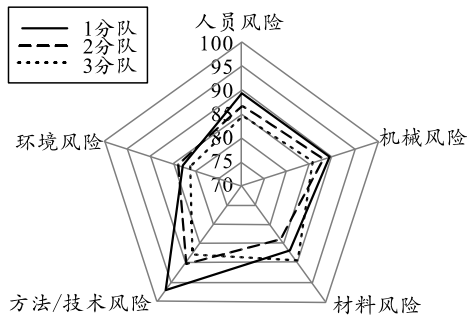


图 4 优化后安全风险因素评估结果

通过指标优化，2 分队的整体安全风险评估由 82.972 提升到 84.368，3 分队的整体安全风险评估由 79.95 提升到 83.922，与 1 分队风险评估 86.058 之间差距逐步缩小。通过优化 7 个底层安全指标，降低局部安全风险等级，提高工区的总体安全管理水平。

4 结束语

运用笔者设计的评估模型和算法，既可对担负相同施工任务的多个单位进行安全风险评估对比，又可以对多个单位整个施工周期进行安全风险跟踪评估。在应用 RIMER 方法进行安全风险评估时，关键是如何构造信度规则库。针对信度规则库的优化和可信度问题需要作进一步研究。

参考文献：

[1] 谭可可, 曲恩东, 田庆龙, 等. 导弹阵地工程建设大辞

3.3 安全风险评估方案优化

为有效管控风险，提高工区整体安全管理水平，优化个别风险指标以达到降低整体安全风险的目的，对 2 分队和 3 分队开展为期 1 月的安全教育整顿，采取措施如表 6 所示。

表 6 安全教育整顿内容措施

序号	重点方面	采取措施
1	安全员能力	开设安全员培训班，实行“一对一”帮扶训练
2	指挥员能力	加强指挥员理论学习，组织指挥员实地见学
3	设备性能	加快老旧设备更新速度，配齐配套施工机械
4	操作使用	开设机械操作培训班，落实“五定”责任制
5	安全装置	开展装备安全性能排查，更换损坏安全装置
6	管理方法	完善安全管理制度，加强安全管理体系建设
7	施工技术	实行“以老带新”帮扶，提高人员施工技术

通过教育整顿，2 分队和 3 分队弱项指标得到优化，优化后评估结果如图 4、图 5 所示。

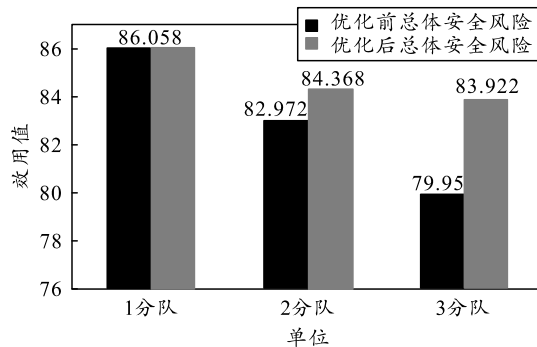


图 5 优化前后总体安全风险评估对比

典[M]. 北京：第二炮兵司令部工程部，2011：41-42.

[2] 交通运输部工程质量监督局. 公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估制度及指南解析[M]. 北京：人民交通出版社，2011：78-80.

[3] 曹金绪, 种道辉. 地下工程施工安全事故预防与案例分析[M]. 西安：火箭军参谋部，2016：1-12.

[4] 中国建筑股份有限公司. 施工现场危险源辨识与风险评价实施指南[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2008：10.

[5] 平自要, 李玉梅. 基于 OWA-BP 神经网络的公路隧道施工风险评估[J]. 筑路机械与施工机械化, 2018, 35(4): 118-121, 126.

[6] 周志杰, 杨建波, 胡昌华, 等. 置信规则库专家系统与复杂系统建模[M]. 北京：科学出版社，2011：3.

[7] CHEN Y W, YANG J B, XU D L, et al. On the inference and approximation properties of belief rule based systems[Z]. Information Sciences, 2013: 234.

[8] 盛景军, 侯立峰, 朱海洋. 基于证据推理的飞行保障安全系统效能评估模型[J]. 兵工自动化, 2011, 30(5): 7-10.