

FAO 核心子系统安全完整性等级 评价方法研究

仲伟强¹, 刘超², 黄抗强³, 刘启洋³, 胡妃俨¹, 龚韬懿⁴

(1. 交控科技股份有限公司, 北京 100070; 2. 中铁检验认证中心有限公司, 北京 100081;
3. 深圳市十二号线轨道交通有限公司, 广东深圳 518000; 4. 深圳交控科技有限公司, 广东深圳 518000)

摘 要: 为探究如何更加实际地评价全自动运行(FAO)系统核心子系统功能的安全完整性等级(SIL), 通过研究欧洲电工标准化委员会(CENELEC)标准中风险模型的构造, 给出风险降低因素(RRF)的定义; 通过定义的风险降低因素, 建立可容忍事故率(TAR)与可容忍危害率(THR)的换算关系, 进而评估出 FAO 系统核心子系统功能次级危害的可容忍危害率; 最后通过其与安全完整性等级的对应关系, 得到核心子系统功能的安全完整性等级。应用结果表明: 结合实际的 FAO 工程项目应用成果, 给出风险降低因素中各要素的具体示例, 可供借鉴; 与直接采用可容忍事故率保守估计安全完整性等级的方法相比, 在考虑风险降低因素后评估得到的安全完整性等级更接近实际情况。

关键词: 全自动运行(FAO); 风险降低因素(RRF); 可容忍危害率(THR); 可容忍事故率(TAR); 安全完整性等级(SIL)

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2023)04-0070-05

Evaluation Method for Core Subsystem Safety Integrity Level of the FAO System

ZHONG Weiqiang¹, LIU Chao², HUANG Kangqiang³, LIU Qiyang³, HU Feiyan¹, GONG Taoyi⁴

(1. Traffic Control Technology Co., Ltd., Beijing 100070; 2. China Railway Test & Certification Center Limited, Beijing 100081; 3. Shenzhen Line 12 Rail Transit Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000; 4. Shenzhen Traffic Control Technology Limited, Shenzhen, Guangdong 518000)

Abstract: This study sought to investigate practical methods for evaluating the safety integrity level (SIL) of the core subsystem within the fully automatic operation (FAO) system. After studying the structure of the risk model in the European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC) standard, a definition of the risk reduction factor (RRF) was provided. By applying the defined RRF, we established a conversion relationship between the tolerable accident rate (TAR) and the tolerable hazard rate (THR). Consequently, we evaluated the THR for secondary hazards of the FAO system's core subsystem functions. The SIL of the core subsystem functions was then ascertained via the corresponding relationship between THR and SIL. Results from the FAO engineering project application demonstrated that the SIL estimate, when considering the RRF, was more realistic compared to the conservative method of directly using TAR for SIL estimation. Specific examples of each element within the RRF were provided, drawing from actual project results, for future reference.

Keywords: fully automatic operation (FAO); risk reduction factors (RRF); tolerable hazard rate (THR); tolerable accident rate (TAR); safety integrity level (SIL)

收稿日期: 2022-04-08 修回日期: 2022-06-12

第一作者: 仲伟强, 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事轨道交通功能安全分析技术研究, weiqiang.zhong@bj-tct.com

引用格式: 仲伟强, 刘超, 黄抗强, 等. FAO 核心子系统安全完整性等级评价方法研究[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(4): 70-74.

ZHONG Weiqiang, LIU Chao, HUANG Kangqiang, et al. Evaluation method for core subsystem safety integrity level of the FAO system[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(4): 70-74.

1 研究背景

FAO 系统由信号、车辆、综合监控、通信、站台门等与列车运行相关的核心子系统/设备组成。在进行 FAO(全自动运行)系统层危害分析时,对各核心子系统/设备的功能分配 SIL(安全完整性等级)是工程实施过程安全评估的必要依据,同时,对于 FAO 系统核心子系统/设备设计实现过程中明确所需采用的技术措施,确保达到分配的 SIL 要求具有重要意义。

在进行 FAO 系统层向各核心子系统/设备层分配 SIL 过程中,需要先进行危害分析,将系统设备的功能失效模式与导致的事故建立起因果逻辑关系,根据对事故的风险评价结果,来确定核心子系统/设备的 THR(可容忍危害率),再根据 SIL 表格^[1],得到某项功能所应达到的 SIL。这个过程会假设事故发生的概率与功能失效(即危害)发生的概率是等价的^[2],即将 TAR(可容忍事故率)等同于 THR,因此,功能分配的 SIL 会过于保守。为了说明 TAR 不等同于 THR, CENELEC(欧洲电工标准化委员会)在新版 EN 50126: 2017 标准^[1]中,参考 IEC61508: 2010^[3],引入风险模型概念,提出需要采取控制措施降低危害发展成为事故的概率以及事故发展成为更严重后果的概率。国内研究者在研究 CENELEC 及 IEC 标准基础上,提出 SIL 确定方法主要分为 3 大类:定性法、半定量法和定量法。定性法包括后果法、风险矩阵法;半定量法有保护层分析法、半定量 EPC 分析法、SIRF-400 分析法和风险图分析法;定量法有失效模式影响和诊断分析法^[4-6],其中,半定量 EPC 分析法提出采用 EPC 因子法进行 SIL 评估,比较适合自顶向下的 SIL 分配过程^[7-8],但缺少实际应用示例,不便于工程实施过程中参考运用,无法推广至具有多专业的 FAO 系统。

因此,基于标准风险模型,给出 RRF(风险降低因素)的定义,再结合 FAO 系统运行线路及运营场景特点,通过分析事故场景与线路地点及运营场景的关系,给出了 RRF 中各要素的具体示例,以更好地指导 FAO 系统核心子系统/设备功能的 SIL 评估。

2 FAO 系统核心子系统 SIL 评估

在对 FAO 系统核心设备功能进行 SIL 分配过程中,需要先将用户可接受的 TAR,按照致因分析结果,分配至核心子系统/设备层,作为核心设备的边界危害 THR,在分配过程,需要将 TAR 按照如下公式转换成 THR:

$$THR = \frac{TAR}{RRF(E \times P \times C)} \quad (1)$$

式中:THR 为 FAO 核心设备边界危害的可容忍危害率;TAR 为分配给 FAO 核心设备的可容忍事故率; E 为风险群体暴露率因素,用于表示风险群体暴露在风险窗口中的概率因素; P 表示事故发生可能性降低的概率,用于降低危害发展成为事故概率的因素; C 表示事故后果减轻可能性,用于降低事故发展成为更加严重后果的概率的因素。

E 、 P 、 C 因素统称为风险降低因素(RRF)。

FAO 系统核心设备边界危害的 THR 明确后,通过标准中的 SIL 表格^[1]最终确定功能的 SIL。在 FAO 系统风险分析时, E 因素的确定将在 2.1 中给出说明;结合事故致因研究及人的不安全行为研究结果,考虑了个人及组织的不安全因素^[9-10],可以从如下角度识别并确定 P 因素和 C 因素:①运营规则;②其他全自动运行系统核心子系统/设备所具备的技术安全措施。

这些因素可以降低(或防止)危害转变为事故的可能性,也可以降低潜在事故后果的严重程度,但这些因素最终都需要成为安全相关应用条件。

2.1 基于时空占比的风险群体暴露率评估

暴露于危害的可能性 E 表示是否可以保守的假定,风险群体的主体会以一定的概率暴露在危害中,是风险模型中定义的用于表示触发事件发生的频率。

对于 FAO 线路,风险个体暴露在风险窗口中的可能性可以理解:如果假设风险群体暴露在整个 FAO 线路 S (空间/时间)上任意一点的概率是 P ,则在正常运营组织中,风险群体出现在 S 上任意点的可能性是均等的,那么,风险个体出现在特定时空区域 A 的概率 θ 是一种条件概率,但是风险个体是否会出现于时空区域 A 与时空区域 A 是否存在危害是两个独立事件,因此,风险群体暴露在存在危害的特定时空区域 A 的概率可以表示为:

$$\theta = \frac{A}{S} \quad (2)$$

式中: θ 表示风险群体暴露于风险窗口中的可能性; A 表示风险个体以均等概率出现在存在危害的特定空间区域或时间区域; S 表示风险群体以均等概率出现的空间区域或时间区域。

为了便于计算 THR,根据 θ 的计算结果, E 因素按照表 1 取保守值^[11]。

表 1 E 因素取值定义
Table 1 E factor value definition

E	定义	取值
E1	$0.1 < \theta \leq 1$	1
E2	$0.01 < \theta \leq 0.1$	0.1
E3	$\theta \leq 0.01$	0.01

在进行危害分析过程中，既可以在时间维度提出降低风险群体暴露在风险窗口中概率的措施，也可以从空间维度提出控制措施，甚至两者兼而有之。

表 2 在时间维度上从不同的 FAO 场景给出了 E 因素的示例。表 3 在空间维度上从不同的 FAO 线路地点给出了 E 因素的示例。

表 2 时间维度上的 E 因素示例
Table 2 Examples of E factor in the time dimension

编号	运营场景	暴露于危害的可能性因素(时间维度)	E 取值
1	唤醒	列车在唤醒过程中存在电击或碰撞的风险，因此，列车唤醒期间为风险窗口期，风险窗口期与列车运营时间的比例为风险群体暴露在风险窗口期的概率；	$\theta = \text{列车唤醒时间} / \text{列车运营时间}$
2	轨道车运行	轨道车运行期间存在碰撞轨旁物体或人员的风险，因此，轨道车运行期间为风险窗口期，风险窗口期与列车运营时间的比例为风险群体暴露在风险窗口期的概率；	$\theta = \text{轨道车运行时间} / \text{列车运营时间}$
3	上下客	上下客期间乘客存在被夹伤、踩踏的风险；因此，上下客期间为风险窗口期，风险窗口期与列车运营时间的比例为风险群体暴露在风险窗口期的概率；	$\theta = \text{乘客上下客时间} / \text{列车运营时间}$
4	站台发车	列车站台发车期间存在碰撞站台跌落人员的风险，因此，列车站台发车期间为风险窗口期，风险窗口期与列车运营时间的比例为风险群体暴露在风险窗口期的概率；	$\theta = \text{站台发车时间} / \text{列车运营时间}$
5	折返	列车折返期间存在脱轨的风险，因此，列车折返期间为风险窗口期，风险窗口期与列车运营时间的比例为风险群体暴露在风险窗口期的概率；	$\theta = \text{列车折返时间} / \text{列车运营时间}$
6	救援/疏散	救援/疏散期间存在踩踏、跌落的风险，因此，乘客救援/疏散期间为风险窗口期，风险窗口期与列车非运营时间的比例为风险群体暴露在风险窗口期的概率；	$\theta = \text{救援或疏散时间} / \text{列车运营时间}$
⋮	⋮	⋮	⋮

表 3 空间维度上的 E 因素示例
Table 3 Examples of E factor in the spatial dimension

编号	线路地点	暴露于危害的可能性因素(空间维度)	E 取值
1	停车列检库	列车在库内运行存在碰撞行人等风险，因此，库内行车区域为风险窗口区域，风险窗口区域与整个全自动场段区域的比例为风险群体暴露在风险区域的概率；	$\theta = \frac{\Sigma \text{停车列检库区域}}{\text{全自动运行场段区域}}$
2	洗车线	列车在洗车过程中存在碰撞等风险，因此，洗车库区域为风险窗口区域，风险窗口区域与整个洗车线区域的比例为风险群体暴露在风险区域的概率；	$\theta = \frac{\Sigma \text{洗车库区域}}{\text{洗车线区域}}$
3	试车线	列车在试车过程中存在脱轨或碰撞人员等风险，因此，试车线行车区域为风险窗口区域，风险窗口区域与整个试车线区域的比例为风险群体暴露在风险区域的概率；	$\theta = \frac{\Sigma \text{试车线行车区域}}{\text{试车线区域}}$
4	人防门	列车在人防门运行存在碰撞风险，因此，人防门区域为风险窗口区域，风险窗口区域与整个线路区域的比例为风险群体暴露在风险区域的概率；	$\theta = \frac{\Sigma \text{人防门区域}}{\text{区间正线区域}}$
5	区间行车区	列车在曲率半径大的区域运行不一定会超速脱轨，因此，整个线路曲率半径大的区域为风险窗口区域，风险窗口区域与整个线路区域的比例为风险群体暴露在风险区域的概率；	$\theta = \frac{\Sigma \text{曲率半径大区域}}{\text{区间正线区域}}$
6	岔区	列车在道岔区域运行不一定会脱轨，因此，整个线路道岔区域为风险窗口区域，风险窗口区域与整个线路区域的比例为风险群体暴露在风险区域的概率；	$\theta = \frac{\Sigma \text{道岔区域}}{\text{区间正线区域}}$
⋮	⋮	⋮	⋮

2.2 降低危害发展成为事故因素的确定

事故发生可能性降低的概率 P 表示是否可以保守地假定，从危害到事故的发展是否可以通过额外的保护或环境得到控制，是风险模型中定义的用于降低危害发展成为事故概率的因素。

为了将此规定推广至包含多系统/设备的 FAO 系统，对 P 因素取值的定义规定如表 4 所示^[11]。

在不同的 FAO 线路地点，从运营规则、全自动运行系统核心子系统/设备技术安全措施方面给出了确定 P 因素的示例(见表 5)。

表 4 P 因素取值定义
Table 4 P factor value definition

P	定义	取值
P1	不存在独立于产生危害的系统/设备的防护措施，可以用于保守地估计能够降低危害发展为事故的概率	1
P2	存在 1 项独立于产生危害的系统/设备的防护措施，可以清楚地表明能够降低一项特定危害发展为事故的概率	0.1
P3	存在 2 项独立于产生危害的系统/设备的且为相互独立的防护措施，可以清楚地表明能够降低一项特定危害发展为事故的概率	0.01

表 5 P 因素示例

Table 5 Examples of P factor

编号	线路地点	可以降低事故发生可能性的因素	P 取值
1	停车列检库	库内设有 SPKS 装置, 人员进入库内作业时打开 SPKS, 可降低库内列车碰撞行人的概率;	0.1
2	洗车线	运营对洗车设备进行周期维修检查, 可以降低洗车臂发生故障碰撞列车的概率;	0.1
3	试车线	运营对试车线制定相应试车要求, 仅允许一辆车在试车线进行测试, 可以降低列车发生车车相撞的概率;	0.1
4	人防门	人防门状态受综合监控系统或信号系统或安防系统监视, 如果人防门不在关闭位置, 可以报警给运营或信号系统, 可以降低列车与人防门碰撞的概率;	0.1
5	区间行车区	运营制定轨道设备维修规则, 防止轨道维修后遗留油污等能够降低轨道黏着系数的杂质, 可以降低因列车制动力不足导致脱轨或碰撞的概率;	0.1
6	岔区	运营制定相应的道岔强扳或手摇规则, 可以降低道岔表示错误致列车脱轨的概率;	0.1
...	...	...	...

2.3 事故后果减轻可能性因素的确定

事故后果减轻可能性 C 表示是否可以保守的假定, 风险群体是否可以避免受制于危害, 或相当程度地降低潜在损失, 是风险模型中定义的用于降低事故发生成为更加严重后果的概率因素。

为了将此规定推广至包含多系统/设备的 FAO 系统, 对 C 因素取值的广义规定如表 6 所示^[11]。

表 6 C 因素取值定义

Table 6 C factor value definition

C	定义	取值
C1	不存在独立于产生事故的系统/设备的防护措施能够使得风险群体避免/降低 1 项特定危害发展成事故所造成的损失	1
C2	存在 1 项独立于产生事故的系统/设备的防护措施, 可以合理地说明此项措施能够使得风险群体避免/降低 1 项特定危害发展成事故所造成的损失	0.1
C3	存在 2 项独立于产生事故的系统/设备的防护措施, 可以合理地说明此 2 项措施能够使得风险群体避免/降低 1 项特定危害发展成事故所造成的损失	0.01

在不同的 FAO 线路地点, 分别从运营规则、全自动运行系统核心子系统/设备技术安全措施方面确定 C 因素的示例(见表 7)。

3 应用示例

为了确保 RRF 中各因素在本示例中都能得到说明, 选取了 FAO 系统中的“人员在列车上窒息的风险场景”。针对这一风险场景, 致因分析结果表明, 车辆系统的空调新风设备故障导致供风不足是可能存在的

一种原因。

表 7 C 因素示例

Table 7 Examples of C factor

编号	线路地点	可以减轻事故后果可能性的因素	C 取值
1	停车列检库	列车具备碰撞吸能装置, 列车在库内跳跃时发生与车挡或列车碰撞事故后, 可以降低碰撞导致的人员伤亡概率;	0.1
2	洗车线	洗车机设有急停装置, 在洗车过程中洗车臂与列车发生严重刮碰时, 可以通过急停装置暂停洗车臂, 降低洗车臂对列车的进一步碰撞损坏;	0.1
3	试车线	运营对试车线列车制定相应不载客要求, 可以降低列车发生脱轨或碰撞事故后, 人员严重伤亡的概率;	0.1
4	人防门	列车具有碰撞吸能装置, 区间发生列车与人防门碰撞事故后, 可以降低碰撞导致的人员伤亡概率;	0.1
5	区间行车区	列车设有车门紧急解锁装置, 当信号故障无法开启车门时, 可以人工手动打开车门用于应急疏散, 可以降低火灾事故导致人员严重伤亡的概率;	0.1
6	岔区	运营对岔区制定相应行车限速要求, 可以降低列车发生脱轨或掉道导致人员伤亡的概率;	0.1
⋮	⋮	⋮	⋮

确定车辆系统的空调新风设备功能的 SIL 步骤如下。

1) 步骤 1。评估暴露于危害的可能性 E 因素。列车在站间运行时发生空调新风设备故障导致供风不足缺氧, 乘客出现身体不适时可以在下一站下车, 因此, 确定风险群体暴露于风险窗口中的可能性 θ =本线路最长站间距离/本线路全自动运行线路总长度。假设本线路最长站间距离为 2 km, 本线路全自动运行线路总长度为 40 km, 参考公式(2)得出:

$$\theta = \frac{A}{S} = \frac{2}{40} = 0.05$$

因此, 参考表 1 得到 E 因素取值为 0.1。

2) 步骤 2。评估事故发生可能性降低的概率 P 因素。车厢内设有通信设备, 乘客发现列车空调新风停止工作时, 可以通过此设备与中心联系进行应急处理; 此通信设备与车辆空调新风设备是两个相互独立的设备, 彼此故障不会相互影响。因此, 参考表 4 的定义, 存在 1 项独立的防护措施可以降低危害发展成为事故的概率, 因此, P 因素取值为 0.1。

3) 步骤 3。评估事故后果减轻可能性 C 因素。车厢内设有逃生锤, 在车厢内缺氧紧急情况时, 乘客可以击碎车窗进行通风, 此措施可以降低缺氧事故发展成为更加严重的后果, 参考表 6 的定义, 存在 1 项独立

的防护措施可以降低事故的严酷度等级,因此,C因素取值为0.1。

4) 步骤4。计算空调新风设备THR。假设FAO系统层危害分析结果表明,分配给车辆空调新风设备的 $TAR=1\times 10^{-7}/h$;则根据公式(1),可以得到车辆系统的空调新风设备的THR:

$$THR = \frac{TAR}{E \times P \times C} = \frac{1 \times 10^{-7} / h}{0.1 \times 0.1 \times 0.1} = 1 \times 10^{-4} / h$$

根据上述计算结果,空调新风设备边界危害的 $THR=1\times 10^{-4}/h$ 。查询SIL表格,可以得到SIL分配结果为基本完整性,如果采用后果法^[5],简单根据分配的 $TAR=1\times 10^{-7}/h$,参考SIL表格得到的SIL分配结果为SIL2,但这种保守的方法显然没有考虑实际的客观情况,即RRF因素。采用风险矩阵法^[5,12]需要先判断事故的严重性和发生的可能性来确定完整性等级。针对上述案例,车辆系统的空调新风设备故障导致供风不足,最不利导致车上人员窒息,事故的严重性为大范围的;但导致大范围人员窒息的风险发生的可能性就比较低了,因此结合二维风险矩阵表,可知系统功能需要达到SIL2。这种评估方法显然比较粗糙,没有充分考虑其他可以缓解风险严重性及发生频率的客观措施。

4 结语

结合标准风险模型,给出了FAO系统RRF的定义并结合工程应用经验给出了可供借鉴的示例,与直接采用TAR保守估计SIL的方法相比,在考虑RRF后评估得到的SIL更符合客观实际;采用的时空占比方法给出了RRF中E因素的量化评估思路,并根据FAO特点分别在线路层(空间)和场景层(时间)给出了E因素的具体示例;结合事故致因及人的不安全行为研究结果,考虑了个人及组织的不安全因素,给出了选取P因素和C因素的例子,这些例子已在某FAO线路系统危害分析中进行了验证,具有一定工程实用价值。

参考文献

- [1] Railway Applications-The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS)-Part 2: Systems Approach to Safety: DS/EN 50126-2: 2017[S]. Danish Standards, 2017.
- [2] 刘芳, 杜玉峰, 张彦华. 风险图分析法在轨道交通车辆SIL确定中的应用研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2021, 44(2): 66-69.
LIU Fang, DU Yufeng, ZHANG Yanhua. Application of risk chart analysis in SIL determination of rail transit vehicles[J]. Electric locomotives & mass transit vehicles, 2021, 44(2): 66-69.
- [3] IEC61508-2010, Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems, International Electrotechnical Commission[S].
- [4] 李葛亮, 刘明, 吕远斌. 城市轨道交通列车关键子系统的安全完整性等级分析[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(7): 98-101.
LI Gelang, LIU Ming, LYU Yuanbin. Analysis on safety integrity level of urban rail transit train key subsystems[J]. Urban mass transit, 2021, 24(7): 98-101.
- [5] 俞杭华, 胡宗福, 薛小平. 城市轨道交通信号系统安全完整性研究[J]. 大连交通大学学报, 2008, 29(6): 34-39.
YU Hanghua, HU Zongfu, XUE Xiaoping. Research on safety integrity of the signal system in urban rail transit[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2008, 29(6): 34-39.
- [6] 张帆, 步兵, 赵骏逸. 列车运行控制系统信息安全风险评估方法[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(S1): 172-178.
ZHANG Fan, BU Bing, ZHAO Junyi. Risk assessment method for information safety of train operation control system[J]. China safety science journal, 2020, 30(S1): 172-178.
- [7] 杨娟, 张小林. 基于EPC因子的有轨电车信号系统安全完善度等级(SIL)评估[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(4): 57-60.
YANG Juan, ZHANG Xiaolin. Evaluation of tram signal system SIL based on exposure-probability-consequence factors[J]. Urban mass transit, 2018, 21(4): 57-60.
- [8] 白春光. 基于安全完整性级别分析的全自动驾驶地铁列车安全功能设计[J]. 铁道技术监督, 2021, 49(4): 53-57.
BAI Chunguang. Safety function design of full automatic metro train based on safety integrity level analysis[J]. Railway quality control, 2021, 49(4): 53-57.
- [9] 左博睿, 帅斌, 黄文成. 基于ISM-24Model的重大铁路事故组织致因研究[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(10): 47-54.
ZUO Borui, SHUAI Bin, HUANG Wencheng. Research on deep organizational cause analysis of serious railway accidents based on ISM-24Model[J]. China safety science journal, 2020, 30(10): 47-54.
- [10] 王如冰, 万欣, 毛鹏, 等. 乘客不安全行为与地铁事故关联性的fsQCA[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(7): 152-158.
WANG Rubing, WAN Xin, MAO Peng, et al. Relevance study between unsafe behaviors of passengers and metro accidents based on fsQCA[J]. China safety science journal, 2020, 30(7): 152-158.
- [11] European Commission. Analysis of safety requirements for MODsafe continuous safety measures and functions [EB/OL] (2011-1-21)[2019-06-01]. http://www.modsafe.eu/fileadmin/documents/deliverables/DEL_D4_2_UITP_WP4_110121_V2_0.pdf.
- [12] Mohamed Sallak, Christophe Simon, Jean-Francois Aubry. A Fuzzy Probabilistic Approach for Determining Safety Integrity Level[J]. IEEE TRANSACTIONS ON FUZZY SYSTEM, 2008, 16(1): 26-30.
- [13] SALLAK M, SIMON C, AUBRY J F. A fuzzy probabilistic approach for determining safety integrity level[J]. IEEE transactions on fuzzy systems, 2008, 16(1): 239-248.

(编辑: 傅依萱)