机车电传动 2018 年第 3 期 (2018-05-10)
ELECTRIC DRIVE FOR LOCOMOTIVES №3, 2018(May 10, 2018)
文章编号：1000–128X(2018)03–0085–05

基于 HAZOP 及 ALARP 的地铁信号系统安全评估

莫志刚，骆汉宾
（华中科技大学 土木工程与力学学院，湖北 武汉 430074）

摘 要：分析地铁信号系统运营阶段的安全需求，提出在设计阶段基于 HAZOP 及 ALARP 的方法评估与控制信号系统影响行车安全的潜在风险。运用 HAZOP 方法开展系统的风险定性分析，层层分解可能导致事故发生的系统级危险源，结合 ALARP 风险矩阵，采用经验打分法对风险进行定量分析，确定风险等级。并以信号系统 ATC 车载子系统为例，详细阐述了基于 HAZOP 及 ALARP 方法的信号系统风险评估的全过程，并给出风险控制的相关措施。

关键词：信号系统；危险与可操作性研究（HAZOP）；最低合理可行原则（ALARP）；风险矩阵；安全评估
中图分类号：U231^{+}.7 **文献标识码**：A
doi：10.13890/j.issn.1000-128x.2018.03.018

Safety Evaluation of Urban Rail Transit Signal System Based on HAZOP and ALARP Principles

MO Zhigang, LUO Hanbin

(School of Civil Engineering & Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan,Hubei 430074, China)

Abstract: Safety requirements of subway signaling system in operating stage were analysed, the potential risks of evaluating and controlling the signal system based on HAZOP (Hazard and Operability Analysis) and ALARP (as Low as Reasonably Practicable) affecting vehicle safety were proposed at the design stage. HAZOP was used to analyze the system risk qualitatively and locate the risk origin which could lead to a fatal failure, while ALARP risk matrix and experience grading were studied to ensure the risk level involved quantitatively. The ATC (on board) sub-system, as a typical example of signaling, the whole process of signaling system risk assessment based on HAZOP and ALARP was expounded in detail,and the relevant measures of risk control were given.

Keywords: signaling system; HAZOP; ALARP; risk matrix; safety evaluation

0 引言

地铁信号系统的核心作用是保证列车的安全运行，既要排除运营中的安全隐患，又要保证自身系统设备的安全可靠。随着软件开发及通信技术的飞速发展，越来越多先进的技术应用到信号系统的设计和产品制造过程中，使得目前的信号系统功能日渐强大和完善，也使得整个系统及设备在结构上也变得复杂，对其自身潜在的安全风险控制也越来越困难。

为保证信号系统安全、可靠地运行，提高维护性和可操作性，国际电子电工委员会制定了轨道交通安全评估和认证标准 IEC 61508；以此为参考，欧洲电气化标准委员会针对信号系统安全评估制定出标准 EN 50126、EN 50128、EN 50129 等。

关于地铁信号系统的风险评估，国外已经有了非常成熟的理论体系，并成功地运用各种实践之中。铁

收稿日期：2017–12–11；修回日期：2018–03–06
基金项目：国家自然科学基金项目（51765006）

路行业公认的第三方独立机构如英国劳氏质量认证、英国赛瑞国际认证、德国莱茵认证等均面向全世界提供高速铁路、地铁以及运输系统等相关的技术和咨询服务，并在船舶、航空、石油和天然气等工业行业均有业务开展。国内关于信号系统安全评估的研究尚处于起步阶段，因此，研究轨道交通信号系统安全评估，建立我国独立自主的安全认证体系任重而道远。

文献 [1] 研究了信号系统安全评估的过程及步骤，为建立评估体系、规范安全评估提供思路。文献 [2] 介绍了采用 HAZOP 与 FMEA 相结合的方法对北京地铁亦庄线信号系统进行独立安全评估。文献 [3] 基于 FTA-ETA 建立了信号系统的运营安全分析模型，研究了基于贝叶斯网络的安全风险定量计算模型，并采用专家经验与模糊推理方法来获得相关概率。文献 [4] 对信号系统的网络安全风险评估进行了研究，采用层次分析法建立了树状模型的信息安全评估指标体系。文献 [5] 针对信号系统提出了一种基于德尔菲法的风险矩阵的定性分析方法，并将 HAZOP 危害识别方法和基于德尔菲的风险矩阵法应用于信号系统的微机化自动站间闭塞系统中。文献 [6] 将 Petri 网理论引入信号系统进行脆弱性研究，提出了结合 Petri 网的脆弱性攻击路径搜索算法。文献 [7] 采用故障树分析法及层次分析法分析研究信号系统的风险，并将主要故障分为五大类，分析总结后得出 38 种风险因素，通过故障树对底层事件进行排序。文献 [8] 利用模糊集的证据推理算法对信号系统安全证据链进行评估，以信号系统安全证据为研究对象，建立了安全证据链的评价案例，验证了模糊集的证据推理算法的可行性。文献 [9] 应用 HAZOP 方法分析列车 ATP 系统每个功能的设计思路可能存在的偏差，而后使用风险评价矩阵确定危害偏差的风险水平。文献 [10] 介绍了 ALARP 在应用中存在的困难，指出了 ALARP 原则在工程应用中的难点。文献 [11] 将 ALARP 应用在工业系统风险分析过程中，根据相应的标准来判断系统的风险可接受的程度，以及是否需要采取进一步的安全措施。文献 [12] 说明了在应用 ALARP 降低风险时，要综合考虑成本的因素。文献 [13] 阐述了风险矩阵应用的合理性及合法性，给出了应用于技术系统的风险矩阵的相关建议。文献 [14] 对风险矩阵法的基本原理进行介绍，并应用于铁路危险货物运输的风险分析中。

本文提出基于 HAZOP 原则对信号系统 ATC 子系统进行定性风险识别，得出主要的风险事件后，基于 ALARP 原理结合风险矩阵，对信号系统的主要风险进行定量分析，并考虑降低后续风险的措施。

1 HAZOP 方法简介

危险与可操作性研究（Hazard and Operability Analysis，HAZOP）利用专业人才团队智慧的分析方法，通过头脑风暴收集不同专业知识背景的人员的观点和看法，是一种具有系统性、创造性的分析方法。HAZOP 比较适用于信号系统的风险识别，能够较为全面地识别危害。HAZOP 分析流程如图 1 所示。

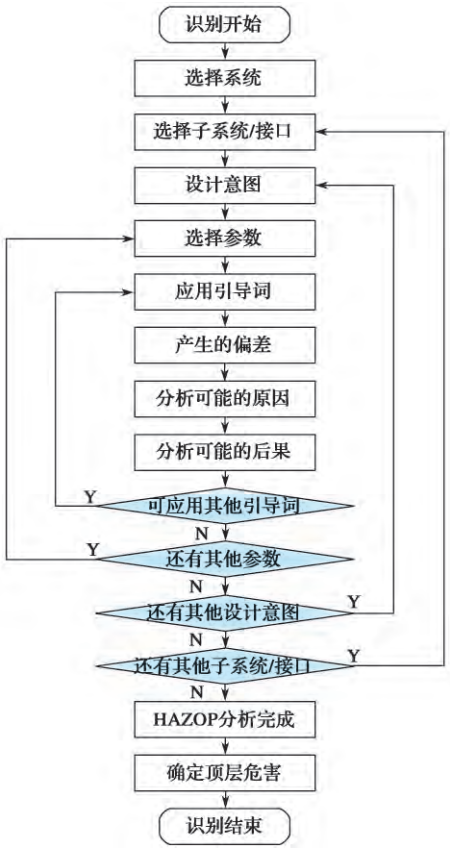

图 1 HAZOP 分析流程图

HAZOP 实施全过程分为以下 6 个主要阶段：

①对系统进行定义，确定系统的范围及目的，确定责任界定划分，选择合适的专业团队；

②收集系统危害及损失的数据，安排好分析流程的计划，为接下来的研究工作做好准备；

③将整个系统划分为相关的子系统，选择其中一个子系统，定义其设计的本质和意图，为每个关键要素用引导词区分以便识别偏差，而后分析识别原因和结果，识别是否有重大的危害事件存在，识别保护、检测和表示机制；

④对其他子系统进行分析，重复上述步骤；

⑤确定产品设计、生产制造方案；

⑥跟踪方案的实施，做好过程记录，最后输出分析报告。

2 基于 ALARP 的风险矩阵分析方法

最低合理可行原则（As Low As Reasonably Practicable，ALARP）是在轨道交通信号领域风险分析最具代表性的风险接受原则，在 ALARP 中的风险被分为三大类：一是大到不可接受的风险；二是小到可以忽略的风险；三是介于两者之间的风险。对于第 3 种风险，必须采取合理可行的方法，使其达到可以接受

的最低程度。

采用 ALARP 原则时主要基于以下 3 个要素：生命至上、经济效益、风险接受标准，综合考虑风险对社会影响大小、产生多大的经济损失以及对环境的影响，制定相应的风险接受标准。若接受风险的标准较低，风险频发，容易引起社会的质疑和不满，若接受条件较高，为一个极不可能发生的风险投入过多，容易造成资源浪费，提高了行业的整体成本。

风险矩阵是用于确定系统的安全完整性等级 (Safety Integrity Level，SIL) 的风险分析方法。风险矩阵的横轴为事件后果的严重程度，纵轴为事件发生的概率，该概率为系统完全没有采取任何风险降低措施情况下的概率，矩阵中间的空格为事件的 SIL 值，每一危险源的风险取决于发生频率及其严重程度。基于 ALARP 结合风险矩阵方法，接受标准可分为：

R1(不可接受的)：风险不可接受，必须消除或控制危险源；

R2(不期望的)：在合理可行的情况下，将进一步采取措施将风险降低至实际可行水平；

R3(可忍受的)：风险可以忍受，但若有合理可行的措施，则进一步采取措施降低风险；

R4(普遍可接受的)：风险可接受，不需要采取其他行动。

风险矩阵采用符合 EN 50126 标准要求的风险矩阵，所有子系统供应商在提供需输出到系统层的危险源时，需按照该风险矩阵进行评估。如图 2 所示。

				后果				
				5	4	3	2	1
				轻微事故	严重事故	危急事故	重大事故	特别重大事故
	安全		死亡数目			<3人	3至49人	50人或以上
			重伤数目		<3人	3至49人	50人或以上	
			轻伤数目	<3人	3至49人	50人或以上		
概率	A	每周发生数次或更多	≥100	R1	R1	R1	R1	R1
	B	每月发生数次	≥10~<100	R1	R1	R1	R1	R1
	C	每年发生数次	≥1~<10	R2	R1	R1	R1	R1
	D	10年内发生数次	≥1E−1~<1	R2	R1	R1	R1	R1
	E	100年内发生数次	≥1E−2~<1E−1	R3	R2	R1	R1	R1
	F	不大可能出现	≥1E−3~<1E−2	R3	R3	R2	R1	R1
	G	非常不可能出现	≥1E−4~<1E−3	R4	R3	R3	R2	R1
	H	发生可能性极小	≥1E−5~<1E−4	R4	R4	R3	R3	R2
	I	不可能发生	≥1E−6~<1E−5	R4	R4	R4	R3	R3
	J	难以置信的	<1E−6	R4	R4	R4	R4	R3

图 2　符合 EN 50126 标准要求的风险矩阵

根据上述风险矩阵，ALARP 可以用图 3 简要表示。对于风险等级为 R1 的危险源，不予以接受，须从设计阶段着手，将危险源消除或降至 R4 等级；对于风险等级为 R4 的危险源，其风险均在可接受范围内。在正常情况下，不需要采取额外的风险降低或控制措施。对于风险等级为 R2 和 R3 的危险源，需根据降低风险的成本、时间等资源结合风险的大小将风险控制在低至合理而可接受的范围。对于风险等级为 R2 的危险源宜在设计阶段着手处理，将危险源消除或降至 R4 等级。在没有可行设计方法的情况下，或降低风险的设计成本无法接受，则需召开专家评审会议，专家组通过对风险的后果以及降低风险的成本综合讨论，并考虑采用运营、维修程序或为运营及维修员工提供训练等方法来使风险降至 R3 等级。R3 等级的危险源一般可以忍受，若有可行的措施，则仍会寻求机会将该类危险源降至 R4 等级。项目可以通过召开专家组会议评审的方式来选择接受风险等级为 R3 的危险源事项，保证此危险源的风险接受结果符合 ALARP 原则。

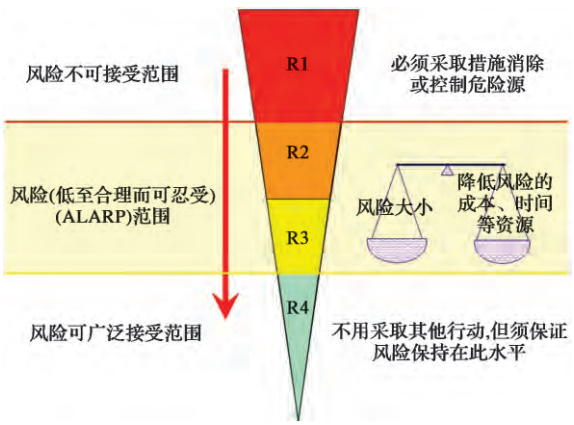

图 3　ALARP 示意图

3　基于 HAZOP 及 ALARP 的信号系统安全评估

3.1　基于 HAZOP 的信号系统定性风险识别

由 HAZOP 评估流程可知，对信号系统进行安全评估的第一步是要识别产生风险的危害分析。危害分析的首要内容是分析信号系统最初的设计意图及理念，以控制风险为目的进而设计相应的防止和避免危害发生的功能。

3.1.1　确定识别对象

危害分析首先需要确定危害识别的范围和对象，明确信号系统的边界，从而确定危害的识别范围。地铁信号系统框图如图 4 所示。整个信号系统由列车自动监控子系统 ATS、数据传输子系统 DCS、列车自动控制子系统 ATC、维护支持子系统 MSS、计算机联锁子系统 CI 等组成。以信号系统中列车自动控制 ATC 子系统为例，ATC 系统由车载控制器（Carborne Controller，简称 CC）、线路编码单元（Line Encoder Unit，简称

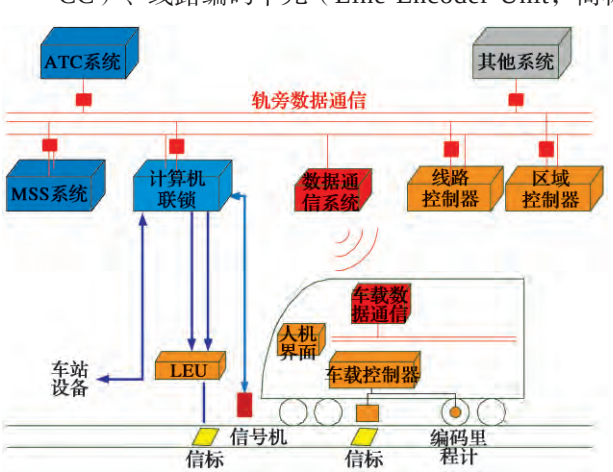

图 4　信号系统结构框图

LEU）、线路控制器（Line Controller，简称 LC）、区域控制器（Zone Controller，简称 ZC）、司机显示单元 DMI、编码里程计及信标天线等设备组成。其中，车载控制器 CC、司机显示单元、信标天线、编码里程计为车载设备，车载设备结构图如图 5 所示。

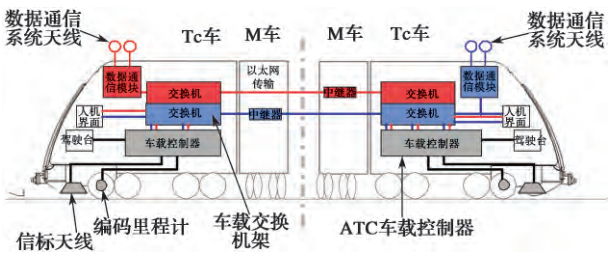

图 5　信号车载设备结构图

在识别范围内进一步确定危害识别对象。以信号系统 ATC 子系统的危害分析为例，其主要的识别对象为 ATC 的功能及参与实现功能的各个设备和接口。

3.1.2　风险识别

了解功能需求后，即可开展子系统设备和接口的功能识别工作。设计引导词和偏差确定方法是 HAZOP 方法中的关键，假设的偏差包括了 ATC 系统会发生各种功能实现错误或无法实现而造成的情况，如表 1 所示。

表 1　ATC 子系统设备和接口功能偏差

引导词	功能参数	偏差
没有	执行紧急制动	没有执行紧急制动
错误	执行紧急制动	错误执行紧急制动
延迟	执行紧急制动	延迟执行紧急制动
没有	列车定位	没有列车定位信息
错误	列车定位	列车定位错误
延迟	列车定位	列车定位信息延迟

以紧急制动触发功能为例，建立车载控制器实现紧急制动触发功能的故障树，以紧急制动触发失效为顶事件，将触发条件向下分解为通信传输、指令计算、制动控制 3 个环节，然后每个环节再根据 ATC 的数据关系进行分析，最后确定出设备的设计意图。对紧急制动触发功能失效考虑通信传输失效、指令计算失效、制动控制失效 3 个环节，其中任意一个环节失效均导致紧急制动触发失效事件发生。紧急制动触发功能的故障树如图 6 所示。

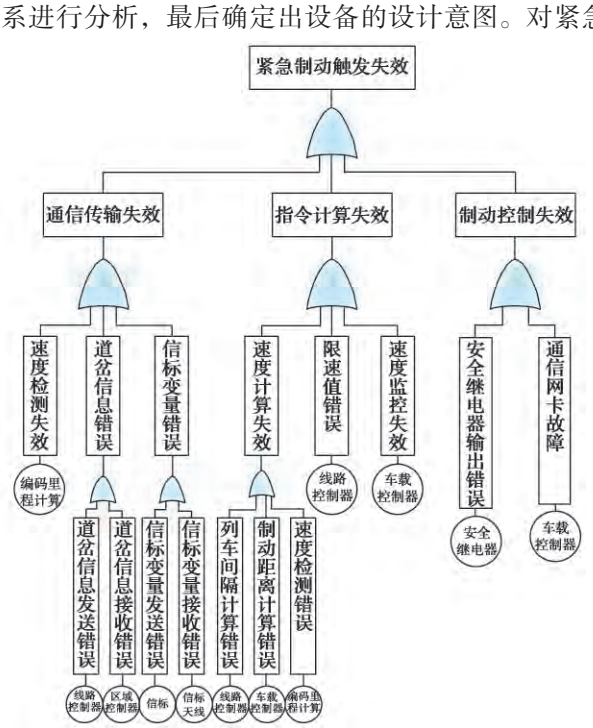

图 6　紧急制动触发功能的故障树

以第一个中间事件为例进行分析，“数据通信失效”是 ATC 系统内部各设备检测的，向下分为 3 个分支，分别是“速度检测失效”、“道岔信息传输错误”、“信标变量错误”。其中，速度检测为车载设备编码里程计（odometer）的功能，且编码里程计已是 ATC 设备中不可再往下拆分的设备，即可作为底层事件的危险源，即可令“速度检测失效”为底层事件。同理，信标变量的产生为线路编码单元 LEU 的功能，信标变量的接收为信标天线 Beacon 的功能，所以“信标变量传输错误”可向下分解为“信标变量发送错误”和“信标变量接收错误”2 个底层事件，分别对应 LEU 和 Beacon 2 个不可拆分的设备，而 LEU 为降级模式下使用，正常情况下可不考虑其故障情况，仅考虑 Beacon 故障情况。实现“道岔信息传输”的 ATC 设备为线路控制器 LC，LC 将道岔信息发送给区域控制器 ZC，所以可向下分解为“道岔信息发送错误”和“道岔信息接收错误”2 个底层事件。由此可知，中间事件“数据通信失效”最终分解为 5 个底层事件，对应 ATC 系统中的不可拆分的设备。同理可对“指令计算失效”和“制动控制失效”进行分析，得出其底层事件。根据建造的紧急制动触发功能故障树图及上述分析得出的底层功能事件涉及到的设备情况，可以得出每个不可拆分设备的功能划分，其功能划分统计如表 2 所示。

表 2　设备实现功能划分统计

序号	ATC 系统设备	功能
1	编码里程计 Odometer	速度检测
2	区域控制器 ZC	道岔信息记录和传输
		发送授权距离
3	线路控制器 LC	道岔信息发送
		计算列车间隔
		输出限速值
4	车载控制器 CC	列车速度计算
		列车速度监控
		输出制动指令
5	信标天线 Beacon	接收信标变量
6	安全继电器 Switch	传输制动指令

由表 2 可知，ATC 系统设备均各自执行不同的功能，接下来将以各功能为参数，并为其设计合适的引导词，采用 HAZOP 方法详细地分析各个设备产生风险的识别过程。具体以“编码里程计”为例进行分析。

编码里程计仅有一个功能，即速度检测。速度检测功能是快速、正确地检测出列车的速度，速度值和传输时间是该功能实现的 2 个参数。在速度值方面，可以采用“无”、“偏大”、“偏小”3 个引导词来定义其准确度。“没有速度值”、“速度值偏大”、“速度值偏小”为速度值检测的 3 个偏差情况，其中“没有速度值”偏差将导致数据通信失效，速度值偏大或

偏小将引起速度计算错误，该 3 个偏差均造成紧急制动触发失效危害后果。在传输时间方面，可采用“偏长”、“偏短”作为引导词，构成“传输时间偏长”、“传输时间偏短”2 个偏差情况。通常情况下，传输速度越快越好，传输时间越短越好，因此，“传输时间偏短”对功能实现不构成危害。而“传输时间偏长”将引起 CC 速度计算误差，构成风险。由上述分析可知，速度检测的偏差分别为“没有速度值”、“速度值偏大”、“速度值偏小”以及“传输时间偏长”。

3.2　基于 ALARP 原理的信号系统风险分析

通过采用 HAZOP 方法对信号系统 ATC 子系统进行风险识别，找出其功能执行的危害事件，再对该危害事件进行风险分析，确定危害的风险等级，并采取措施将系统风险降到合理的范围内。

采用经验打分法对 ATC 系统危害原因及后果进行分析，确定危害发生概率和后果的严重度。通过借助行业资深专家的技术经验，向专家征询风险危害的打分情况，经过反复几次的意见征询，得到较为稳定的专家意见反馈，从而得到对风险等级的打分结果。

根据上节的风险矩阵，将危害发生的概率依次由大到小分为 A~J 共 10 个等级，A 的概率最大，为每周发生数次或更多，J 的概率最小，为难以置信的。将危害发生的后果严重程度分为 5 个等级，等级 1 为死亡人数 50 以上的特别重大事故，等级 5 为轻伤人数小于 3 人的轻微事故。根据 HAZOP 风险识别结果，征询专家对每个危害的发生概率及严重性进行打分。

根据“紧急制动触发失效”危害发生概率专家打分表和功能失效的严重性打分表，结合风险矩阵中对应的风险等级 R1~R4，可得出功能失效危害的风险等级。由功能失效严重性表可知，“列车未达到紧急制动条件触发紧急制动”的严重性为 5 级，即轻微事故，该情况下仅会导致列车在安全的环境下紧急制动，并不会造成列车超速、追尾等严重事故，而从危害发生概率表可知，表中所危害概率为 C~F 等级，从而可得出导致“列车未达到紧急制动条件触发紧急制动”风险等级为 R2~R3。“列车达到紧急制动条件未触发紧急制动”严重性为 3 级，为危急事故，会造成列车超速、出轨、追尾等严重事故，将导致人员伤亡和财产损失，导致其产生的危害概率为 C~F 等级，从而得出导致“列车达到紧急制动条件未触发紧急制动”风险等级为 R1~R2。

4　风险控制的措施

经过 ALARP 结合风险矩阵分析，在信号 ATC 系统未采取任何风险降低的措施和手段的情况下，其危害产生的风险等级均在 R1~R3 之间。根据 ALARP 原则，对于风险等级为 R1 的危险源不予接受，须从设计阶段着手，将危险源消除或降至 R4 等级；对于风险等级为 R2 和 R3 的危险源需要根据降低风险的成本、时间等资源结合风险的大小将风险控制在低至合理而可接受的范围。风险降低的过程是一个不断探讨重复循环的过程，从系统最初的功能定义设计阶段就开始着手。风险降低主要是为了降低危害的概率，主要从系统设备的软件、硬件、功能等因素考虑。

①在硬件方面主要有以下改进措施：采用冗余设计，提高系统的可靠性；提高设备箱体抗干扰等级，优化板卡电子元件布局，增强系统的抗电磁干扰能力；使用质量更好、安全等级更高的电子器件，减小设备故障概率。

②在软件方面主要有以下改进措施：采用更先进的算法，提高运算速度和精度；增强误差校正能力；提高软件的可靠性，避免软件跑飞现象产生。

③在功能方面主要有以下改进措施：增加功能判断条件，增加事件记录功能，改善功能执行条件。

被评估为“不可接受的”或“应避免的”风险等级的所有危害事项，将尽快通过设计方法，将风险减轻至“可忍受的”或“可忽略的”等级。仅在设计实在无从下手的情况下，方可考虑通过运营管理、维修规程、增强操作人员意识等方法来实现风险等级的降低。

5　结语

本文研究了基于风险理论的地铁信号系统安全评估，提出 HAZOP 及 ALARP 分别对信号系统的风险进行定性识别和定量分析的方法，在信号系统设计之初用 HAZOP 方法开展系统的风险分析，将可导致事故发生的系统级危险源进行层层分解，直至将系统的危险源定位到最小不可分割的设备，之后通过 ALARP 结合风险矩阵，采用经验打分法定性危害的风险等级，并给出相关风险降低的措施。

信号系统是一个包含调度指挥、安全防护、速度控制及自动驾驶的功能完善、层次分明的复杂安全苛求系统，具有实时性、复杂性、随机性、高可靠性、高可用性、高可维护性等特征，其中的安全功能达到最高安全完整性水平 SIL4，信号系统的 RAM 活动都是以安全评估为前提。信号系统的安全评估对整个系统的设计具有指导作用，并给可用性、可靠性及可维护性需满足的条件提供重要参考。

参考文献：

[1] 燕飞，郜春海，唐涛 . 轨道交通安全相关系统评估方法 [J]. 中南大学学报（自然科学版），2003，34（增刊 1）：230–233.

[2] 孙华平，张艳兵 . 北京地铁亦庄线信号系统工程独立安全评估 [J]. 城市轨道交通研究，2013，16(1)：1–5.

[3] 齐晓坤 . 高速铁路信号系统运营安全风险建模研究 [D]. 北京：北京交通大学，2017.

（下转第 95 页）

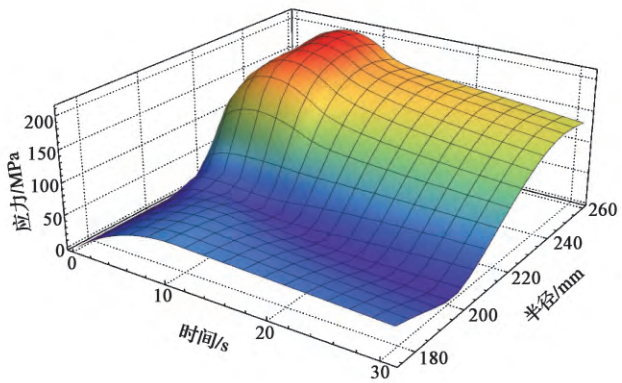

图 15　制动盘内盘面应力沿径向变化时间历程

可以看出，在半径为 200~220 mm 的范围内，制动盘热应力较小，但是制动盘整体沿时间的变化趋势还是先升高后降低。

5　结语

制动盘在整个制动过程及冷却过程中，其温度较高位置出现在摩擦环区域内，在制动盘的裙面以及帽面部分，其温度并未发生较大改变。散热筋在制动过程中对制动盘盘面温度在圆周分布上有影响，使温度沿圆周方向的分布出现波动。对于制动盘热应力的分布其大体趋势与温度分布相同，但是在过渡环面内的热应力反而小于制动盘内外环面。最大热应力出现在制动盘盘面边缘，此位置相对于其他位置更容易因热应力而出现损伤。制动盘内面与裙面相连，所以强度相对于外表面更大。本文对于制动盘的温度场及热应力的分析计算结果，可为制动盘整体强度的研究提供一定的参考和借鉴。

参考文献：

［1］陈翰芹 . ULF197 型超低地板城市轻轨车辆［J］. 机车电传动，1996(2)：43.

［2］Belhocine A, Abu Bakar A R, Bouchetara M. Thermal and structural analysis of disc brake assembly during single stop braking event［J］. Australian Journal of Mechanical Engineering, 2016，14(1)：26–38.

［3］Yevtushenko A A, Grzes P, Adamowicz A. Numerical analysis of thermal stresses in disk brakes and clutches (a review)［J］. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 2015，67(2)：170–188.

［4］顾磊磊，左建勇，朱剑月，等 . 基于有限元法的动车组制动盘制动能力分析［J］. 机车电传动，2009(5)：7–9.

［5］姚萍萍 . 高性能粉末冶金制动摩擦材料［M］. 长沙：中南大学出版社，2015：278–281.

［6］陈德玲，张建武，周平 . 高速轮轨列车制动盘热应力有限元研究［J］. 铁道学报，2006(2)：39–43.

作者简介：戴鑫亮（1992–），男，硕士研究生，主要研究方向为城市轨道车辆设计与理论。

（上接第 89 页）

［4］付淳川 . 高速铁路信号系统网络安全风险评估方法研究［D］. 成都：西南交通大学，2017.

［5］肖女娥 . 风险评估技术在铁路信号系统中的研究与应用［D］. 成都：西南交通大学，2009.

［6］王亚涛 . 基于 Petri 网的城市轨道交通信号系统脆弱性研究［D］. 北京：北京交通大学，2016.

［7］胡晓 . 城市轨道交通信号系统安全风险评价［D］. 成都：西南交通大学，2012.

［8］万千 . 高速铁路信号系统安全证据链可信性评价方法研究［D］. 北京：北京交通大学，2016.

［9］李洋 . 列控系统车载 ATP 的功能安全评估技术研究与应用［D］. 杭州：浙江大学，2013.

［10］Melchers R E. On the ALARP approach to risk management［J］. Reliability Engineering & System Safety, 2001, 71(2)：201–208.

［11］吴煜，李从东 . 二拉平原则 (ALARP) 应用分析——以工业系统风险评价为例［J］. 山东财政学院学报，2005(3)：47–49.

［12］Bowles D S. ALARP EVALUATION: USING COST EFFECTIVENESS AND DISPROPORTIONALITY TO JUSTIFY RISK REDUCTION［J］. Proceedings of the Us Society on Dams Annual Lecture, 2003（1）：1–17

［13］Braband J. On the Justification of a Risk Matrix for Technical Systems in European Railways［C］//FORMS/FORMAT 2010. Berlin：Springer Berlin Heidelberg, 2011：185–193.

［14］Jia X Y, Niu H M. Study of Railway Dangerous Freight Safety Transport Based on Risk Analysis［J］. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2009，28（6）：132–136.

作者简介：莫志刚（1974–），男，博士研究生，高级工程师，主要从事工程管理研究。

动态消息

《机车电传动》编辑部声明

为顺应网络环境下期刊出版的新要求，推进期刊网络出版传播，凡向本刊投稿并被本刊录用，在著作权法的框架内，该论文的复制权、发行权、信息网络传播权、翻译权、汇编权等权利在全世界范围内转让给本刊及本刊授权的相关数据库。凡被本刊录用的稿件将同时通过因特网、手机等进行网络出版或提供信息服务，根据本刊编辑部稿酬标准一次性支付作者著作权使用报酬（即稿费，包含印刷版、光盘版和网络版等各种使用方式的报酬）。

《机车电传动》编辑部