

引用格式:胡齐航,王会芹,李梦洁,张晶晶,武艺,郑刚.在役舞台机械装备安全完整性等级评估技术研究[J].中国传媒大学学报(自然科学版),2024,31(02):27-34.

文章编号:1673-4793(2024)02-0027-08

在役舞台机械装备安全完整性等级评估技术研究

胡齐航¹,王会芹^{1*},李梦洁²,张晶晶²,武艺³,郑刚³

(1.中国传媒大学信息与通信工程学院,北京100024;2.中国传媒大学计算机与网络空间安全学院,北京100024;3.西安爱乐剧院管理有限公司,西安710000)

摘要:近年来,我国的演艺产业正处于快速发展时期,舞台机械装备的大量使用在丰富演出效果的同时,也带来了一系列安全隐患,增加了演出事故发生的可能性。演出安全要求的提高对在役舞台机械装备的使用和维护提出了更高的要求。本文以安全标准ISO 13849为基础,结合安全完整性评估理论,研究了面向在役舞台机械装备的安全完整性评估技术方法。论文采用风险图法对在役舞台升降台进行了风险评估,参照安全标准ISO 13849对某在役舞台升降台的安全回路进行了PL/SIL等级的计算,验证结果表明该在役舞台机械装备的安全回路满足功能安全要求,采用的评估方法可行、有效。

关键词:在役舞台机械;安全完整性;ISO 13849

中图分类号:TH69;TP273 **文献标识码:**A

Research on safety integrity level assessment technology of in-service stage machinery equipment

HU Qihang¹, WANG Huiqin^{1*}, LI Mengjie², ZHANG Jingjing², WU Yi³, ZHENG Gang³

(1.School of Information and Communication Engineering, Communication University of China, Beijing 100024, China; 2.School of Computer and Cyber Sciences, Communication University of China, Beijing 100024, China; 3.Xi'an Philharmonic Theatre Management Company Limited, Xi'an 710000, China)

Abstract: In recent years, the performing arts industry in China has been undergoing rapid development. The widespread utilization of stage mechanical equipment not only enhances performance effects but also brings a series of safety hazards, increasing the possibility of performance accidents. The higher safety requirements for performances impose greater demands on the operation and maintenance of the in-service stage mechanical equipment. Based on the safety standard ISO 13849 and the theory of safety integrity assessment, in this paper technical approaches for evaluating the safety integrity of the in-service stage mechanical equipment were explored. Using the risk graph method, a risk assessment of in-service stage lifts was conducted, guided by safety standard ISO 13849, and specific PL/SIL levels for the safety-related loops of in-service stage lifts was determined. The results indicate that the safety-related loops used meet the safety requirements, and the method proposed here is feasible and effective.

Keywords: stage machinery in service; safety integrity; ISO 13849

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFF0901800)

作者简介(*为通讯作者):胡齐航(2002-),女,硕士研究生,主要研究方向为文化旅游在役装备的安全完整性评估。Email:15271636778@163.com;

王会芹,女,副教授,主要研究方向为舞台设备交互控制及安全评估。Email:hqwang@cuc.edu.cn

1 引言

舞台机械在现代演出中扮演着不可或缺的角色,为实现演出自动换景、演员反常规上下场、演出装备运输等起到重要的作用。舞台机械引起的演出故障或事故,往往严重影响演出效果,甚至对演员、工作人员以及观众的生命安全造成威胁^[1]。近几年来,国内舞台安全事故虽然有限,但仍时有发生,社会不良影响大。因此,舞台安全是娱乐和表演顺利进行的重中之重。其中,舞台机械装备是导致演出安全事故的重要因素之一。特别是在役舞台机械装备,多是机电一体化装备,本身结构较为复杂,对装备操作和维护要求较高;随着使用年限的增加,装备磨损程度逐年增加,可靠性降低。在上述因素影响下在役舞台机械装备危险因素增多,安全性能降低。因此,要保证演出安全,定期对在役装备进行安全评估是十分必要的。

舞台机械装备的安全评估主要从人员安全评估和舞台机械装备评估两个方面考虑。对于在役舞台机械装备而言,其安全性主要通过它的控制系统安全相关部件(Safety-Related Parts of a Control System, SRP/CS)体现,而SRP/CS的安全性主要通过安全完整性等级(Safety Integrity Level, SIL)来衡量,所以在役舞台机械装备的安全评估就是安全完整性等级评估。

随着社会的不断进步和工业规模的不断增长,安全问题已成为各行业关注的焦点,为保障人员和装备安全提供重要的支持和保障。安全完整性评估理论从最初的提出发展到现在,呈现出多样化、跨学科、标准化的特点。安全完整性等级评估是以相关安全标准为依据展开的评估,目前国际上关于安全功能相关标准主要包括ISO 13849^[2](对应国标GB/T 16855)、IEC 61508(对应国标GB/T 20438)和IEC 62061。这些标准不仅关注硬件的安全性能,还强调软件和系统整体的一致性安全。这些标准为系统和设备的功能安全确定与评估提供了较为系统的方法和流程,帮助组织和专业人员开展系统的安全功能设计和评估工作。通过遵循这些标准,制造商和使用者可以确保工业系统在设计、实施和操作阶段都符合高水平的安全标准,从而降低事故风险,确保工作环境的安全性和可靠性。其中,IEC 61508是功能安全的通用标准,适用于所有电气/电子/程序性的系统。IEC 62061是IEC61508在机械系统中的修改与应用,主要面向机器

领域安全相关的电气电子、可编程电子控制系统的安全功能,适用于电气系统领域。ISO 13849面向控制系统机器安全相关部件的安全功能设计。它与IEC 62061类似,都是针对机械系统的安全标准,但是它的应用范围更广泛,不仅适用于电气系统,液压、气动、机械系统等也适用。

段慧文^[3]深入探讨了安全完整性等级的概念和应用,详细介绍了SIL在工程领域的重要性以及与安全相关的概念和标准,为理解SIL在舞台机械装备安全评估中的应用提供了重要参考。通过对SIL的研究,为舞台机械装备的安全性能评估提供了一种科学方法,有助于确保设备在各种情况下能够有效地保护相关人员免受潜在危险的影响,为国内舞台机械专业的发展提供了重要的思路和启示。

文献[4]探讨了演出活动中的安全对策。通过分析演出活动中可能存在的安全隐患和风险,该论文提出了一系列安全对策,旨在提高演出活动的安全性,保障工作人员和观众的安全。这些安全对策包括事前的风险评估、安全培训、设备维护等方面,为演出行业的安全管理提供了实用的建议。

文献[5]着重探讨了舞台机械装备中的风险因素和相应的安全防范措施。通过对舞台机械的安全性进行分析,该论文提出了一些有效的安全防范措施,以降低潜在的安全风险,确保演出过程中的安全运行。

此外,关于舞台安全标准的文献[6]详细介绍了舞台SIL3安全标准的制定背景、内容和应用范围,旨在提供一个更高级别的安全标准,以确保舞台机械装备在设计和运行中达到更高的安全性能要求。这一标准的制定为舞台机械装备的安全性能提升提供了重要的指导,有助于推动演出行业的安全管理水平不断提升。

由于在役舞台机械装备投入使用年限不同,装备设计时安全要求标准并不一致,所以其SRP/CS的设计方案和元件构成存在差异,系统构成有可能包含液压类部件,ISO 13849标准更贴近舞台机械的实际情况,能够更全面地考虑到机械系统的安全性。

本文以ISO 13849标准为依据,采用“风险分析——SIL定级——SIL评估”为主线的定量计算法,对舞台升降台的安全相关回路安全完整性等级评估技术进行研究,旨在实现对在役舞台机械的安全完整性评估。

2 安全评估相关理论

根据 ISO 13849 相关理论进行安全完整性评估,主要是根据性能等级(Performance Level, PL)与 SIL 之间的对应关系,先计算 SRP/CS 的 PL 值。PL 值则由平均危险失效时间(Mean Time to Dangerous Failure, $MTTF_D$)、平均诊断覆盖率(Average Diagnostic Coverage, DC_{avg})、共因失效(Common Cause Failure, CCF)、结构类别(Category, Cat.)相关参数决定,这些参数的具体含义如下:

(1) 平均危险失效时间 $MTTF_D$

$MTTF_D$ 是决定系统可靠性的主要因素之一,系统内各要素的可靠性叠加得到系统的整体可靠性,单位为年。

计算参数 $MTTF_D$ 时,查阅数据应按照下述先后顺序进行:①装备制造商提供的数据;②具体公式的估算;③根据经验进行选取,一般按照行业经验给定。具体评价 $MTTF_D$ 值的大小应参照 ISO 13849 表 4 的规定。

(2) 平均诊断覆盖率 DC_{avg}

DC_{avg} 是构成 SRP/CS 的各系统的自我诊断能力的平均值。整个系统的 SRP/CS 的 DC_{avg} 是决定 PL 值的因素,为被检测到的危险失效率与全部危险失效率之间的比值。

计算参数 DC_{avg} 时,查阅数据应按照下述先后顺序进行:①装备制造商提供的数据;②具体公式的估算;③根据经验进行选取,一般按照行业经验给定。平均诊断覆盖率范围参照 ISO 13849 表 5 的规定。

(3) 共因失效 CCF

CCF 是由单一事件引发的不同产品安全功能的失效,失效的安全功能之间没有因果关系。

对于防止 CCF 的措施的打分和量化过程可参 ISO 13849 中附表 F.1 的规定。

(4) 结构类别 Cat.

SRP/CS 的结构对 PL 具有十分重要的影响,根据结构形式及其构成元件的性能,将 SRP/CS 分为图 1 所示五类架构:

①B类,它的级别最低,每个通道的 $MTTF_D$ 为中等水平,无 DC_{avg} ,不考虑 CCF,可达到 PLb 等级;

②1类,结构同B类,选择经过验证的合适的元器件,采用实际广泛应用的或根据安全要求设计的可靠性高的元件来构建(经验证的安全原则)SRP/CS,提高了抗故障能力。每个通道的 $MTTF_D$ 高且大于B类,无 DC_{avg} ,不考虑 CCF,可达到 PLc 等级;

③2类,除了满足“经验证的安全原则”外,还具有

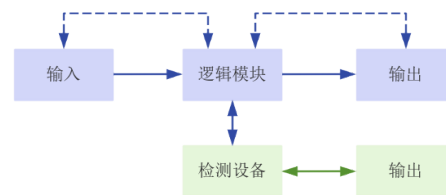
定期功能检查诊断功能,每个通道的 $MTTF_D$ 高低可选择, DC_{avg} 中或低取决于要求的 PL 值,应采取防止 CCF 的措施,可达到 PLd 等级;

④3类,除了满足“经验证的安全原则”外,具有冗余结构和单一故障检测功能,任何单一故障都不会导致安全功能丧失,每个通道的 $MTTF_D$ 高低可选择,每个通道的 DC_{avg} 中或低取决于要求的 PL 值,应采取防止 CCF 的措施;

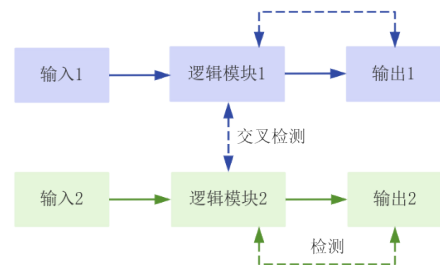
⑤4类,等级最高,可靠性更高,除了满足“经验证的安全原则”外,具有冗余结构和任意部件单一故障检测功能,且能保证系统安全功能不会因未检测到故障的累积作用而丧失。每个冗余通道的 $MTTF_D$ 为高等水平, DC_{avg} 为高,应采取防止 CCF 的措施。



(a) B类和1类指定架构



(b) 2类指定架构



(c) 3类和4类指定架构

图1 SRP/CS 5类指定架构

(5) 性能等级 PL

PL 描述了 SRP/CS 在可预见条件下执行安全功能并实现预期风险减小的能力。根据每小时危险失效概率范围不同,PL 分为 a 级到 e 级,级别越高,安全功能越强。PL 的确定可以分为定性方法和定量方法两种形式,具体如图 2 所示。判定过程中都有一部分可量化的指标,也有一些系统能力要求无法量化。在具体的安全功能性能判定过程中,需要根据不同的标准对不同的限定条件进行验证,判断是否符合标准^[4]。

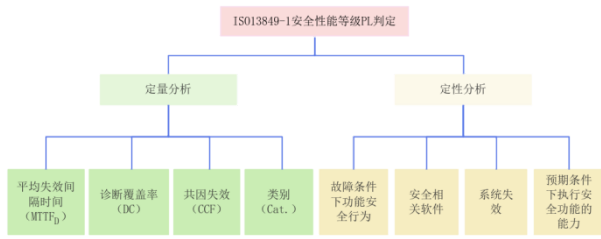


图2 ISO 13849安全完整性SIL等级判定

对于定量方法,若结构类别Cat、平均危险失效时间 $MTTF_D$ 、平均诊断覆盖率 DC_{avg} 这三个因素已知,可以采用如图3所示的关系图确定SRP/CS的PL。

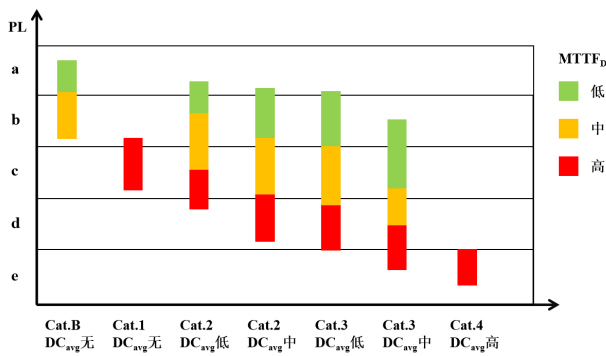


图3 PL和Cat、 DC_{avg} 、 $MTTF_D$ 之间的关系

(6) PL和SIL的关系

IEC 61508中定义了安全完整性等级SIL;而ISO 13849则提出了性能等级PL的概念。二者判定的都是安全相关系统执行安全功能的可靠性。

SIL和PL皆表示SRP/CS执行安全功能的能力,为了在不同标准和环境下进行安全相关系统安全完整性等级的评价工作,可以将SIL和PL进行转化。两者对应关系见表1。

表1 SIL/PL对应关系

性能等级(PL)	安全完整性等级(SIL)
PLa	无对应等级
PLb	SIL1
PLc	SIL1
PLd	SIL2
PLe	SIL3

3 舞台机械装备的安全完整性评估

舞台机械装备的安全完整性评估流程包括三个环节:风险分析、SIL定级和SIL验证。

在役舞台机械装备的风险分析是一项复杂而关键的过程,要求对舞台机械装备的结构和运行原理有深入了解。通过分析这些装备可能存在的危险及其

根源,可以识别潜在的安全风险,并评估可能发生的危险事件对人员、装备和环境的影响。同时,确定危险事件可能的后果和影响,有助于建立有效的风险管控措施,以减少事故发生的可能性。

在风险分析过程中,首先需要辨识出与安全相关的功能和其相应的回路。这些安全相关功能在装备运行中起着至关重要的作用,保障系统在面临故障或异常情况时能够安全可靠地运行。通过准确识别这些功能和回路,可以为随后的SIL定级和SIL验证做好充分准备,确保系统的安全性能符合预期标准。

对于需要通过设计安全相关控制回路来降低其风险等级的危险事件,安全相关回路对应的期望SIL值由风险期望降低的程度决定。由风险降低的程度确定安全相关回路SIL值的过程,就是SIL的定级。

SIL验证是针对不同安全相关回路,确定其硬件系统的结构、每个通道的 $MTTF_D$ 以及 DC_{avg} ,计算出该回路的实际PL值,再根据PL和SIL对应关系,得到实际的SIL值,然后将实际SIL值与期望SIL值进行比较,来确定实际系统的SIL和期望SIL值是否一致。

图4为在役舞台机械装备的整个安全完整性评估流程,其中经过风险因素识别、保护措施识别、安全相关系统识别等环节,得到实际的SIL值。如果实际SIL值和期望SIL值一致,则满足要求。如果实际SIL值大于等于期望SIL值,对于在役装备而言,可以对装备提出提高安全性的要求或整改措施。

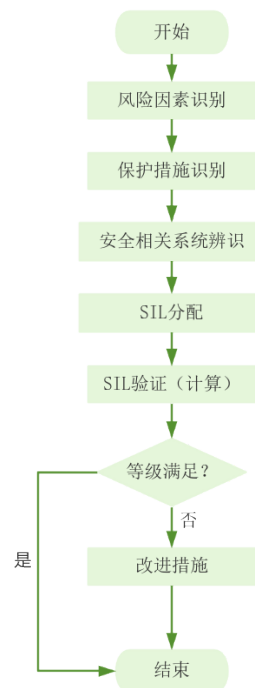


图4 安全完整性评估流程

4 舞台机械装备安全完整性评估方法

4.1 舞台机械的安全要求

舞台机械必须在实现规定的功能同时保证安全性功能。安全性要求是确保舞台机械安全运行的关键条件^[6-7]。常见的安全功能包括预防意外启动、保持装备在安全参数范围内运行、对安全参数进行自动监控等。通过各种类型的安全装置,这些功能确保舞台机械在规定技术参数和条件下运行,避免了装备损伤和人员伤害。安全功能的实现是为了确保演艺场所的安全,预防潜在的事故和损害。

舞台机械包含台上机械和台下机械,不同机械装备的安全功能有不同的要求,对应不同的安全装置,如吊杆卷扬机需要行程和超行程保护、钢丝绳松绳保护、过载保护、防钢丝绳脱槽(或叠绳)以及速度误差保护等。台下装备则需具备防剪切、防挤压、防跌落、行程及超行程保护等功能。控制系统中包括防止意外启动、运行指示、急停、参数自动监控、操作盘授权与互斥、安全显示、故障诊断等功能。

4.2 风险分析

通过风险分析,可以根据不同的安全要求识别可能产生安全事故的危险源。在审视剧场舞台机械系统装备的安全问题时,需要从舞台机械操作人员、舞美监督、演职人员等多个角度进行全面考量。与控制系统相关的危险源有许多种,可能涉及到操作失误、装备故障、设计缺陷等多方面因素。通过深入的风险分析,可以有效地识别这些潜在危险,从而采取相应的控制措施和安全预防措施,确保舞台机械系统装备在运行过程中能够安全可靠地运行,保障工作人员和演出人员的安全^[8]。

本文研究的主要内容是台下机械中的舞台升降装备,根据调研结果^[9-10],舞台升降台可能存在的安全风险有:

(1)存在升降台体失控下降造成高空坠物、工作人员进入非作业区域引起伤害、安全防护距离不够导致伤人、误解锁滑落砸伤等安全隐患,可能造成物体打击事故;

(2)舞台产品中的中央升降台、倾斜板所使用的卷扬机构在运行过程中存在松绳、乱绳引起的重物坠落伤害风险,可能造成起重伤害;

(3)舞台升降台中的供配电系统在工作过程中,因存在接地系统设计缺陷、绝缘下降、接地不良等问

题而达不到安全用电标准,可能会造成操作人员的触电伤害;

(4)舞台控制系统的控制器--可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)在运行过程中存在装备失效导致系统失控的安全隐患,可能会造成人员装备事故;

(5)舞台控制产品中所使用的材料、控制间配件、配电室配件等材料存在内饰材料不阻燃、填充材料不阻燃、基体材料不阻燃、静电防护不到位;

(6)舞台升降台动作过程中对演员及相关人员存在机械挤压、剪切风险,可能造成物体打击事故。

针对事故类别和安全故障模式所识别出的相关风险总结如表2所示。

表2 舞台升降台装备风险源识别

舞台升降台装备					
故障类型	火灾	触电	断电	失控	失效
供电系统	1、导线过热 2、接线端子接触不良 3、发热器件异常 4、过热、散热缺少检查制度或者缺乏隔热措施	1、用电设备无接地或接地不良 2、电线绝缘层失效 3、静电反应	1、用电设备无接地或接地不良 2、电线绝缘层失效 3、电路回路断路	1、电源系统不稳定 2、跳闸	1、电压系统不稳定 2、电器元件失效,导致电路系统故障
装备系统	操作不当、操作不当导致升降台装备与可燃物距离过近	-	-	操作失误	1、控制信号异常 2、操作系统死机
通信系统	-	1、传输线路意外损坏 2、接插件破损	1、传输线路意外损坏 2、接插件破损	-	-
传输系统	-	1、传输线路意外损坏 2、接插件破损	1、传输线路意外损坏 2、接插件破损	-	控制信号异常

对上述风险进行分析,辨识出需要通过SRP/CS降低的风险为:

(1)卷扬机构在运行过程失控导致松绳、叠绳事故;

(2)装备失效而引起的超程事故(超过正常的行程范围);

(3)舞台升降台动作过程中发生剪切事故。

为了进一步降低安全风险,在役舞台机械装备通常会设立急停控制回路,这样即使整个安全回路无法正常运作时,仍有额外的安全保护措施。急停控制回路的设置旨在提供一种紧急情况下的快速干预手段,

以确保在可能出现危险情况时能够迅速停止设备运行,保障工作人员和观众的安全。

风险等级的评定通常由三个参数决定:伤害严重程度S、遭遇危险的频率和/或暴露于危险中的时间F、避免危险的可能性P。这些参数通过专家评分后,可以确定不同危险因素对应SRP/CS的最终性能级别PL。这一过程通过综合考虑不同因素的影响,为舞台机械装备的安全设计和运行提供了科学依据,确保系统在各种情况下能够有效地保护相关人员免受潜在危险的影响。这种系统化的安全评估方

法有助于提高舞台机械装备的安全性能,保障演出活动的顺利进行。

随着安全领域的不断发展,安全完整性评估的方法论也在不断创新和完善。除了传统的定量分析方法外,还出现了基于风险图、模糊推理、可靠性建模等新的评估方法,以更全面、准确地评估系统的安全性能。

本文使用风险图法来确定上述危险因素对应的风险等级以及安全相关回路的PL。对应关系如图5所示。

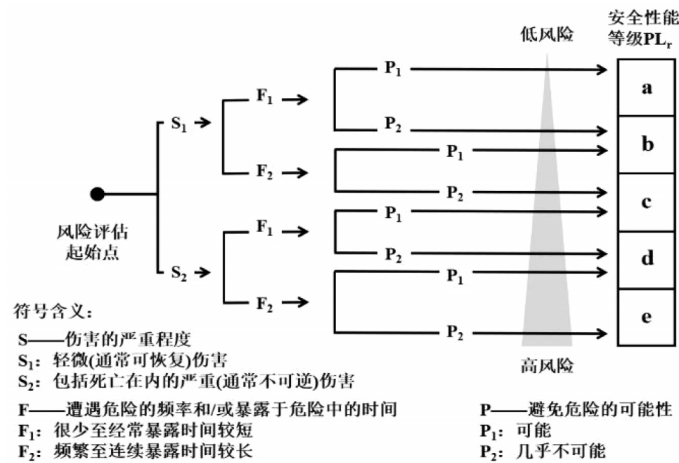


图5 风险图法进行SIL等级分配

针对上述风险,对舞台机械的风险等级进行评估^[11-12],其伤害的严重程度应为包括死亡在内的严重伤害,为S₂;频繁至连续暴露时间较长,为F₂;几乎不可能避免危险,为P₂。因此舞台机械控制系统所需的安全性能等级必须达到SIL3,对应PL_e。

4.3 SIL验证

首先对升降台的SRP/CS进行分析并从中辨识出安全回路。该系统来自大型体育赛事的临建场馆案例,在相关安全功能中,这里主要以限位控制回路、安全型急停控制回路为例进行分析。

4.3.1 限位控制回路SIL计算

对于限位控制回路而言,当升降台不受控运行时,会触发限位开关,触发信号传到逻辑子系统中,逻辑子系统接收信号,发出停止信号送入变频器安全停止端(如STO),使电机停止运行。图6为简化的控制框图,图中I为输入元件,这里是限位开关,图中虚线框中的L_DI、L_CPU、L_DO分别对应表示逻辑控制子系统的输入接口、CPU模块和输出接口,O为输出

元件,这里对应变频器。

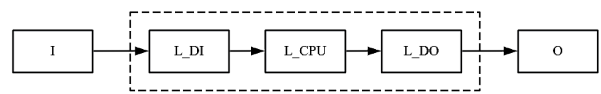


图6 限位控制回路简化图

根据本文的安全完整性评价方法,应先确定安全回路的可靠性指标,如MTTF_D值、DC_{avg}、CCF等参数。可靠性指标量化值首先来自于制造厂商提供的数据,其次是参考ISO 13849-1的附录C进行选取,最后则是通过经验数据的相关计算。

其中每个子系统的MTTF_D值计算公式如式(1):

$$\frac{1}{MTTF_D} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{MTTF_{Di}} \quad (1)$$

其中N指每个子系统内的元件个数,MTTF_{Di}是子系统第i个元件的平均危险失效时间。

每个子系统的DC可确定为被检测到的危险失效的失效率与全部危险失效的失效率之间的比率,根据这个定义可通过式(2)估计平均诊断覆盖率:

$$DC_{avg} = \frac{\frac{DC_1}{MTTF_{D1}} + \frac{DC_2}{MTTF_{D2}} + \dots + \frac{DC_N}{MTTF_{DN}}}{\frac{1}{MTTF_{D1}} + \frac{1}{MTTF_{D2}} + \dots + \frac{1}{MTTF_{DN}}} \quad (2)$$

CCF参数值可通过查表获得。这样输入、逻辑和输出子系统构成元件对应参数已知,则可通过上述方法得到其对应的参数值。

根据查阅PDS手册(元件失效率手册),获得各部件数据。参照IEC 13849-1附录E.1选取输入输出元件的DC值,设 $DC_i=99%$, $DC_o=99%$,参考CCF选取表格得到 $CCF=65$ 。

(1)输入子系统可靠性参数计算

输入子系统只有一个限位开关,子系统的 $MTTF_D$ 值就等于元件的 $MTTF_D$ 值,通过查阅PDS手册,已知限位开关 $MTTF_D$ 是143年,所以

$$MTTF_{D-input} = 143(\text{年})$$

(2)逻辑控制子系统可靠性参数计算

按制造厂商提供的经验数据可知,该子系统性能等级可达到PLe,类别为Cat.4。

(3)输出子系统可靠性参数计算

输出子系统只有一个变频器构成,所以输出子系统的对应参数值就是变频器的参数值,具体如下:

$$MTTF_{D-output} = 143(\text{年}) \quad DC_{D-output} = 99\%$$

由此,该检测系统总的 $DC_{avg}=99%$, $MTTF_D=143$ 年,即 $MTTF_D$ 为高,CCF=65,结构类别为Cat.4。通过查询图2可知,该控制系统的PL等级为PLe,对应SIL值为SIL3,说明回路满足要求。

4.3.2 安全型急停控制回路SIL计算

安全型急停控制回路的工作原理:当发生升降台急停等危急情况时,工作人员按下急停按钮,将信号传到逻辑控制系统,逻辑控制系统发出指令控制变频器做停止动作,从而让整体装备停止运行。图7为简化的控制框图,其中I为急停开关,选用安全型PLC作为逻辑子系统,如虚线框中的所示,其中L_DI1、2, L_CPU1、2, L_DO1、2分别为逻辑控制子系统的安全输入模块(L_DI)、安全逻辑模块(L_CPU)和安全输出模块(L_DO),O仍为变频器。

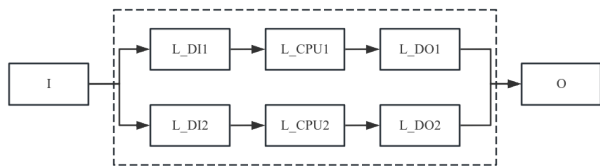


图7 安全型急停控制回路简化图

在急停按钮无法直接获得 $MTTF_D$ 值的情况下,考虑用参数B10d(10%的元件发生故障的平均循环次数)、每年平均操作次数 n_{op} (Number of Operations)值求解 $MTTF_D$ 值。

根据在役舞台机械装备的运行特性可知,平均每天操作的小时数 $hop=2h$,平均每年操作的天数 $dop=200d$, $t_{cycle}=130s/cycle$,则有:

$$n_{op} = \frac{d_{op} \times h_{op} \times 3600}{t_{cycle}} = \frac{200 \times 2 \times 3600}{130} = 11077 \quad (3)$$

参照IEC 13849-1附录E.1选取输入输出元件的DC值。 $DC_i=99%$, $DC_o=99%$,参考CCF选取表格得到 $CCF=65$ 。

(1)输入子系统可靠性参数计算

$$MTTF_{D-input} = \frac{B_{10d}}{0.1 \times n_{op}} = \frac{50000}{0.1 \times 11077} = 45 \quad (4)$$

(2)逻辑控制子系统可靠性参数计算

逻辑控制子系统由两套PLC系统构成,分别计算每个PLC的 $MTTF_D$ 后,然后带入式(1)可得到逻辑控制子系统的 $MTTF_D$ 。

$$MTTF_{DPLC1} = \frac{B_{10d}}{0.1 \times n_{op}} = \frac{1000000}{0.1 \times 11077} = 903(\text{年}) \quad (5)$$

$$MTTF_{DPLC2} = \frac{B_{10d}}{0.1 \times n_{op}} = \frac{1000000}{0.1 \times 11077} = 903(\text{年})$$

$$MTTF_{D-PLC} = \frac{2}{3} \times \left[\frac{MTTF_{DPLC1} + MTTF_{DPLC2}}{\frac{1}{MTTF_{DPLC1}} + \frac{1}{MTTF_{DPLC2}}} \right] = 903(\text{年}) \quad (6)$$

(3)输出子系统可靠性参数根据制造厂商提供的经验数据得到: $MTTF_{D-output}=143$ 年, $DC_{avg-output}=99%$ 。

由此,该检测系统总的 $DC_{avg}=99%$, $MTTF_D$ 为高,CCF=65,结构类别为Cat.4。通过查询图2可知,该控制系统的PL等级为PLe,对应SIL值为SIL3,说明回路满足要求。

5 结论

本文针对在役舞台机械装备的安全完整性等级评估技术与方法进行了研究,以ISO 13849的相关理论为基础,以舞台升降台为主要研究对象,确定了舞台机械装备中安全完整性评估流程,并从风险分析、SIL确定和SIL验证等方面进行了详细阐述,为在役舞台机械装备的风险评估及安全功能的评定提供了有效的技术方案。本文建立了系统性的评估框架,为舞台机械装备的安全性评估提供了重要参考,为演出行业和相关领域提供了指导,推动了安全标准与实际

操作之间的融合,有助于提高演出装备的安全性能。本文研究结果不仅对演出装备的安全性能有益,也对整个行业的可持续发展产生深远影响。

参考文献(References):

- [1] 段慧文. 安全完整性等级(SIL)杂谈(一)[J]. 演艺科技, 2018(07): 36-42.
- [2] 全国机械安全标准化技术委员会. GB/T16855.1-2018/ISO13849-1. 2015 机械安全控制系统安全相关部件第1部分: 设计通则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [3] 段慧文. 安全完整性等级(SIL)杂谈(二)——兼议舞台机械专业国内外差距[J]. 演艺科技, 2018(08): 56-59.
- [4] 段慧文. 浅谈演出安全对策[J]. 演艺科技, 2020,(Z1): 55-61.
- [5] 王晓丹, 李江鹏, 胡开佳. 浅谈舞台机械的风险因素及安全防范措施[J]. 演艺科技, 2023(01): 57-60.
- [6] 吉恩-马利·舒尔茨, 奥利弗·布吕克. 舞台 SIL3 安全标准[J]. 演艺科技, 2013(12): 34-39.
- [7] 段慧文. 舞台机械的安全性、可靠性与安全防护装置[J]. 演艺设备与科技, 2006(06): 46-50.
- [8] 火照晶. 舞台机械的风险因素及安全防范措施[J]. 工程机械文摘, 2023(01): 26-29.
- [9] 张向文, 王子涵, 杨卫杰. 北京冬奥会开幕式地面舞台机械系统安全设计[J]. 演艺科技, 2022(S1): 21-27+54.
- [10] 孙军, 胡彬, 于盟. SIS 系统安全完整性等级的定量计算与评估[J]. 中国仪器仪表, 2017(09): 55-59.
- [11] 褚卫中. 安全控制技术和安全产品在奥运舞台项目中的应用[J]. 中国仪器仪表, 2008(04): 31-33.
- [12] 王岸杨. 乐池升降台的设计和研发[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2020.

编辑:赵志军