

# 石化企业用电负荷安全风险识别及风险分析研究

肖金星, 叶影, 倪俊强, 夏世超

国网上海市电力公司金山供电公司, 上海  
Email: xiao\_jx@sh.sgcc.com.cn, 57384923@qq.com

收稿日期: 2020年11月23日; 录用日期: 2020年12月21日; 发布日期: 2020年12月24日

---

## 摘要

本文针对石油化工企业中发生电弧闪络事故, 提出了一个全面的电气安全计划, 并阐述了如何在多学科操作人员中创建并执行的。针对分散设施的电弧闪络危险评估考虑因素, 开发针对电气和非电气人员培训要求, 技能验证过程, 以及创建和实施新的业务规则(持续过程和相关程序)。最后讨论了如何将当地定制的电气安全方案纳入现有的全球方案之中(包括工作许可程序和能源隔离程序), 在实际操作中实施, 以及如何实现成本效益高的方式。

## 关键词

电弧闪络, 设计安全, 电气安全计划, 培训, 多学科人员, 分散设施, 电气危险评估

---

# Research on Safety Risk Identification and Risk Analysis of Electricity Load in Petrochemical Enterprises

Jinxing Xiao, Ying Ye, Junqiang Ni, Shichao Xia

Jinshan Power Supply Company, State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai  
Email: xiao\_jx@sh.sgcc.com.cn, 57384923@qq.com

Received: Nov. 23<sup>rd</sup>, 2020; accepted: Dec. 21<sup>st</sup>, 2020; published: Dec. 24<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

In this paper, we propose a comprehensive electrical safety plan for arc flashover accidents in

petrochemical companies, and explain how to create and execute it among multidisciplinary operators. For the considerations of arc flashover risk assessment for decentralized facilities, develop training requirements for electrical and non-electrical personnel, skills verification procedures, and create and implement new business rules (continuous processes and related procedures). Finally, it discussed how to incorporate locally customized electrical safety solutions into existing global solutions (including work permit procedures and energy isolation [lock label] procedures) to achieve practical operations, and how to achieve this in a cost-effective manner.

## Keywords

Arc Flashover, Design Safety, Electrical Safety Procedures, Training, Multidisciplinary Personnel, Decentralized Facilities, Electrical Hazards Assessment

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在化工企业中，电气设备与供电系统的安全运行与化工生产活动的正常有效进行关系密切。因此，在实际的化工生产活动中，我们必须落实好化工厂的电气设备和供电系统的安全防护工作，及时消除运行过程中可能存在的隐患。现阶段的企业供电系统为了保证用电安全，供电企业虽然制定了一些对电气设备与供电系统进行定期维修和维护的方法措施，这在一定程度上可以使得化工厂的财产和工作人员的安全得到保证，但为了使得化工厂电力设备与供电系统的运行达到更加安全、高效和节能的目标，这就需要化工厂想出一种科学合理的方法保证供电系统的安全稳定运行，这样才能进一步提高化工厂的生产效率。

化工企业电气设备及供电系统运行安全性与化工企业各项生产生活的正常进行以及生产安全性存在有十分密切联系，化工企业生产过程中，需要保证各项电气设备安全防护工作得到有效落实，将可能出现的安全隐患及时消除，还需要定期对电力线路进行系统全面检查，使供电系统安全稳定运行得到保证。为面对不同的安全挑战，化工企业需要一个具有现实成本效益的解决方案来满足电气安全条例，包括 GB50052-2009《供配电系统设计规范》的要求[1]。根据 HG/T 20664-1999《化工企业供电设计规定》要求，化工企业工作场所的电气危险如果不适当管理[2]，可能会对雇员产生重大伤害或死亡风险。此外，相关专家学者开展了化工企业电气安全方面的研究工作。文献[3]介绍了目前化工企业电气设备与供电系统的基本情况，并阐述了其在运行维护中应该遵循的基本原则，还分析了电气设备和供电系统运行中的管理措施和维护检修措施，指出为确保电气设备的安全稳定运行，需对化工企业中的电气设备与供电系统进行严格的检查和维护。文献[4]针对用电过程中可能产生的电弧、电火花等危险因素，指出这属于安全防范的重要管理内容之一，这些用电线路安装和使用不当、管理不严将极易导致事故发生，需做好临时用电管理，防止或消除火灾爆炸和触电事故发生。文献[5]简单介绍了化工企业电力设备及供电系统保护重要性，针对化工企业电气设备与供电系统的运行维护，提出生产过程中需保证各项电气设备安全防护工作得到有效落实，将可能出现的安全隐患及时消除，还需要定期对电力线路进行系统全面检查，使供电系统安全稳定运行得到保证。

上述研究表明化工企业为了维持电气设备的安全稳定运行，避免设备遭到破坏，必须要做好对电气

设备和供电系统的保障，但关于安全运行未形成较完整的管理体系。本文以某石化企业为例，对带有中低电压装置的分散设施进行了冲击和电弧闪络危险评估，该企业主要从事石油炼制及石化产品的加工生产和销售，主营业务炼油可追溯至上世纪五十年代，是大型原油加工基地和最大的清洁汽油、航煤生产企业，在华东及沿江地区石化产业布局中占有重要位置。针对中游和下游设施创建了电气安全程序设计方法，图 1 所示为电气安全计划(ESP)设计方案图。

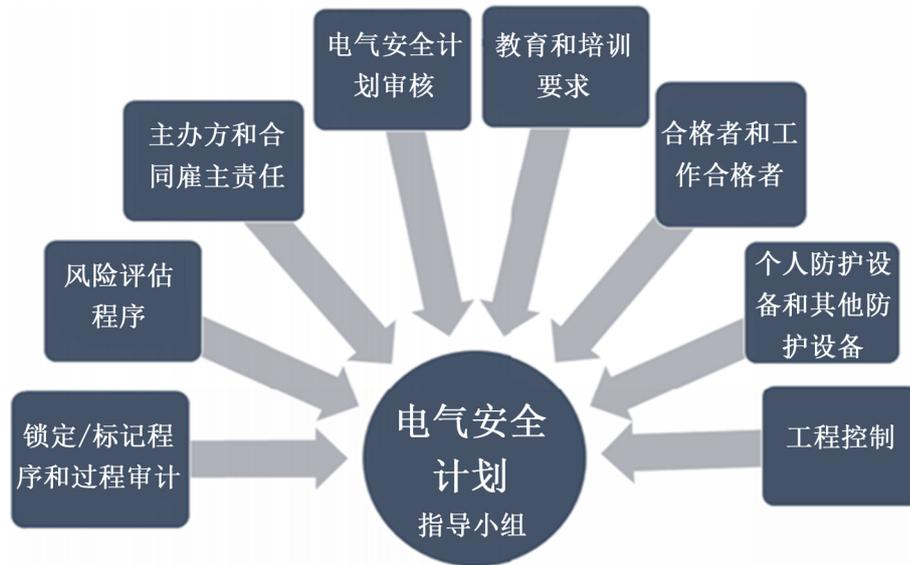


Figure 1. Electrical safety plan  
图 1. 电气安全计划

## 2. 背景介绍

### 2.1. 基础设施

中游和下游设施代表着两种不同的业务类型，图 2 所示为石化生产链示意图，上游包括了勘探和生产，勘探出来的天然气和石油，需要经过多重处理，比如脱水、脱硫、脱碳等净化过程，中游包括运输和交易，对于石化企业都可以用管道和船运，下游从液化气重新气化后，可用于生产石化用品，而石油必须经过再次提炼获得例如发动机燃料、航空油以及润滑油、沥青等等[6]。中游设施包括几个压缩站和一个天然气处理厂，能源需求从 5 兆伏安到 40 兆伏安，以及低压到中压系统，下游设施的能源需求不超过 3 兆伏安，它们只使用低压系统，所有上游配电系统都属于为这些设施提供服务的公用事业公司。

### 2.2. 操作、故障排除和维护

中游设施中的操作、故障排除和维护角色比上游设施中的操作、故障排除和维护角色简单，涉及的不同角色较少。对于中游设施，操作活动(包括开关和远程装卸断路器)完全由操作人员(雇员)进行。对于断路器跳闸、中压变频驱动(VFD)跳闸和仪表故障等事件，由 I&E 技术人员进行故障排除。I&E 技术人员还执行电机、面板开关设备和仪表预防性维护(PM)的维护活动。一些电气承包商执行维护活动，如变压器 PM 和纠正维护，电机的预维护(PRM)，以及面板开关设备的热像扫描。对于上游设施，480 V 的故障排除由 I&E 技术人员执行，但 120 V 以下的故障排除可以由多个角色执行，如表 1 所示。

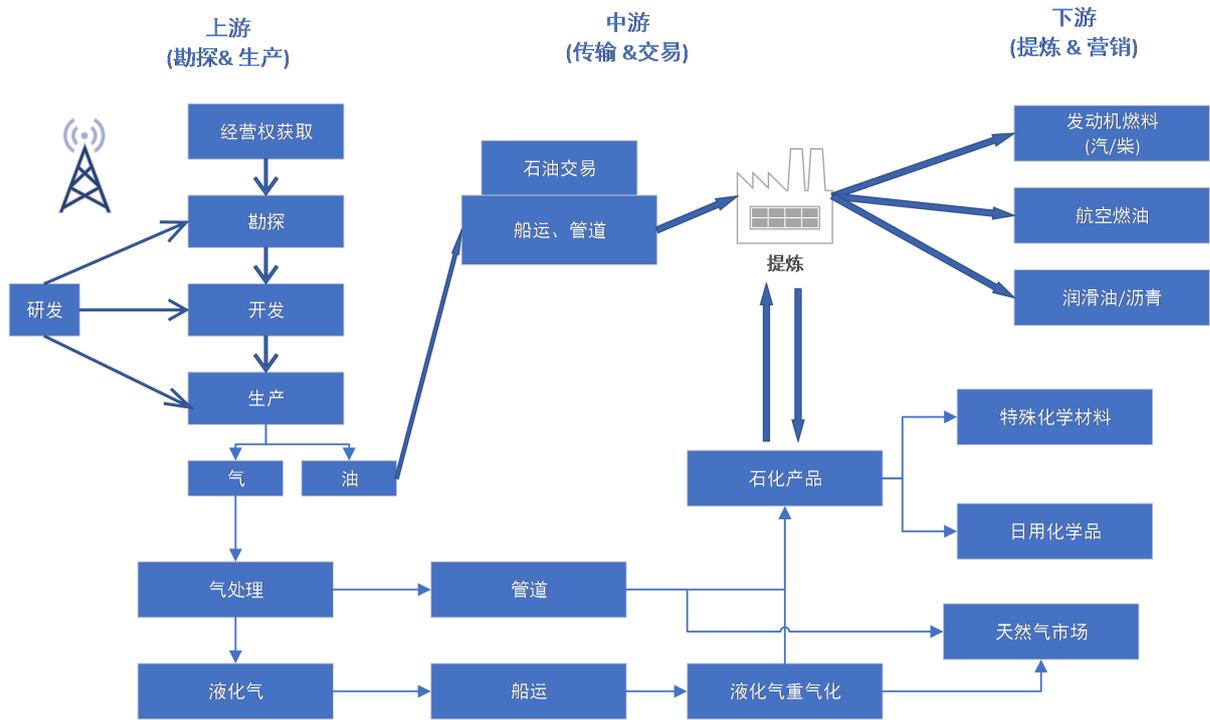


Figure 2. Global gas and oil value chain

图 2. 石化产业链示意图

Table 1. Operation, troubleshooting and maintenance

表 1. 操作、故障排除和维护

角色	中游				
	操作		排除故障		维修
	打开/关闭断路器和断开(正常情况) 装进装出断路器		复位/打开/关闭断路器 (120 V 以下, 为操作员重置 VFD)		
	MV	LV	MV	LV	MV/LV
操作员	是	是	否	是	否
I&E 技术员	否	否	是	是	是
机械师	否	否	否	否	否
机械承包商	否	否	否	否	否
电气承包商	否	否	是	是	是
上游					
	操作		排除故障		维修
	开启/关闭断路器并断开		复位/打开/关闭断路器, (120 V 以下, 重置 VFD)		
	LV		LV		LV
操作员	是		是		否
I&E 技术员	是		是		是
机械师	是		否		否
机械承包商	是		否		否
电气承包商	是		是		是

注意: 操作者只需远程上架和出架。

### 3. 风险评估

ESP 只关注电气危险。作为 ESP 的一部分, 根据 HG/T 20664-1999 《化工企业供电设计规定》对所涉及的所有角色进行了冲击风险评估, 表 2 按角色列出了风险评估[7]。

**Table 2.** Conduct electric shock risk assessment by role  
**表 2.** 按角色进行触电风险评估

严重性	活动	评级	角色	
			操作员/机械师/机械承包商	I&E 技术人员/电气承包商
轻微	开/关断路器 600 V 以下(正常状态)/复位断路器(120 V 以下)/复位 VFD	1B	基本个人防护用品: 安全眼镜、安全帽、防静电手套、皮鞋、防电弧服	基本个人防护用品: 安全眼镜、安全帽、防静电手套、皮鞋、防电弧服
	在操作电表开关时读取面板电表	1B		
次要的	在限制进场边界外进行红外热成像和其他非接触检查	2C	禁止	基本个人防护用品: 安全眼镜、安全帽、防静电手套、皮鞋、防电弧服
危急	安装、维修和维护电气元件和/或工业设备(低压)	3D	禁止	需要基本的个人防护用品和防震用品:(防震用品: 面罩、带皮革保护套的绝缘(橡胶)手套。)
	拆除有螺栓或无螺栓的盖板(露出裸露的带电导体和电路部件)	3D		
	在 120 V 以上 600 V 以下带电导体和电路部件外露的控制电路上工作中低压电气测试和检查	4C 3C		
灾难性	在通电状态下安装、维护、保养电气元件和/或工业设备	5E	禁止	禁止

根据 HG/T 20664-1999 《化工企业供电设计规定》, 对中游和下游设施完成了电弧闪络风险评估。电弧闪络风险评估是针对员工队伍中的每一个角色定制的, 制定了共同解决方案来减轻风险, 如表 3 所示。其目的是将电弧闪络暴露能量降低到 1.2 卡/平方厘米以下或容忍最多 8 卡/平方厘米。

**Table 3.** Arc flashover risk assessment  
**表 3.** 电弧闪络风险评估

严重程度		次要的		危急	灾难性
卡尔/cm <sup>2</sup>		0~1.2	1.2~8	8~40	40~XX
评级		2B	3D	4E	5E
中游	经营者	解决方案 1	解决方案 2	解决方案 3	解决方案 3
	I&E 技术人员/电气承包商	解决方案 1	解决方案 2	解决方案 3 或 4	解决方案 3 或 4 (仅供操作)
上游	经营者	解决方案 1	解决方案 2	禁止	禁止
	I&E 技术人员/电气承包商	解决方案 1	解决方案 2	解决方案 4	解决方案 3 或 4 (仅供操作)
	机械师/机械承包商	解决方案 1	解决方案 2	禁止	禁止

风险评估引发了对中游和下游电气系统的进一步分析, 目的是加强最近项目的工作, 以消除或减少设计方面的风险, 这是最好的选择。此外, 还考虑了降低操作复杂性和成本效益高的解决办法。风险评估分析确定了两个不同的角色, 第一个角色, 称为“合格者”, 涉及自然核心电气活动典型的 I&E 技术人员。第二个角色被称为“工作合格者”, 是为了授权非电气人员执行特定的电气活动, 如断路器操作、机架进/出断路器或其他独立的电气任务, 该业务被认为可以由训练有素的操作人员完成。

## 4. 风险控制方法和可持续性

遵循风险控制方法的层次结构，以最大限度地减少风险，将电弧闪速降低到  $8 \text{ cal/cm}^2$  以下，并提供风险预防策略。首选的风险控制选项是减少电弧闪络，但由于操作或施工的复杂性，这是不可行的，因此采用了远程设备执行器(RDA)。根据电弧闪络现场图的研究结果和风险控制层次方法的应用，创建并实现了针对新的基础设施的设计标准，以通过设计满足安全需求。风险层次结构推动了最低个人防护设备(个人防护装备)要求、审查和培训，如表 4 所示。

**Table 4.** The hierarchy of risk control methods

**表 4.** 风险控制方法的层次结构

风险控制方法的层次结构	
(1) 消除	在公用变压器后和断电前安装断路器，以减少电弧闪络。 协议 A: 要求公用事业公司在主机公司对其进行锁闭标示程序之前，对其一侧有 $40 \text{ cal/cm}^2$ 以上电弧闪络的设备进行除电。
(2) 替代	N/A
(3) 工程控制	遥控开关操作器&执行器设备
(4) 认识	正规培训，SWI*培训，更新电气设备上的电弧闪络标签
(5) 行政管制	电气安全计划，业务规则，操作人员和工控人员的 SWI。
(6) 个人防护设备	个人防护装备业务规则：操作员-I/E 技术员操作电气设备时附加个人防护装备。

SWI 被定义为标准作业指导书。

### 4.1. 个人防护装备的选择和意识(电弧闪络能级)

电弧闪络计算采用“入射能量分析方法”，并按规定安装电弧闪络和冲击危险警告标签。图 3 是电弧闪络和冲击警告标签。指导小组决定将电弧防护设备标准化，电热性能值最低为  $8 \text{ cal/cm}^2$ 。



**Figure 3.** Arc flash and shock tags

**图 3.** 弧闪和冲击标签

因为工人(电气和非电气工人)已经穿了额定为  $8 \text{ cal/cm}^2$  的电弧闪络服装，个人防护设备符合 NFPA 70E 和 NFPA 2112，因此不需要更换或增加服装。根据 NFPA 70E 的表 130.5(C)，交流和直流系统发生电弧闪络事件的可能性，来确定需要个人防护设备的行动。指导小组采取了一种保守的做法，将正常运作作为需要额外个人防护设备的活动的一部分。

四种操作既需要基本的个人防护设备，以及额外的个人防护设备，分别为：复位、开启和关闭断路器；安装、修理和维护电气元件和/或工业设备；工作在有裸露，通电的导体和电路部件的控制电路上；在低压(LV)和中压(MV)条件下进行电气测试和检查。额外的个人防护设备定义为一个面罩、兜帽，以及非电气工人的弧形闪光手套，如图 4 所示。对于电气工人，附加的个人防护装备包括面罩、绝缘安全鞋

和带皮革保护的绝缘(橡胶)手套。电弧闪络风险评估的解决方案包括基本个人防护装备、附加个人防护装备、远程开关设备执行器(RDA)和与辐射能量匹配的电弧闪络防护服,如表 5 所示,对每个角色的期望都作为解决方案的一部分建立起来。



Figure 4. Typical good practice  
图 4. 典型的良好操作规范

Table 5. Personal protective equipment solutions  
表 5. 个人防护装备解决方案

解决方法 1	解决方法 2	解决方法 3	解决方法 4
不需要额外的电弧闪络个人防护设备	额外的个人防护装备: 面罩、巴拉克拉法帽(或兜帽), 弧形闪光手套	遥控开关执行器(RDA)系统操作	与辐射能量匹配的电弧闪络防护服(面罩、安全帽、安全眼镜、护目镜、听力保护、带皮革保护的绝缘手套、等等)

#### 4.2. 设计和其他工程控制来保证安全

设施的电气操作设备(如断路器和断线)按角色和电弧闪络水平进行规划,以评估整个操作区域的一致性。该地图使小组能够在中游和下游设施中建立减少风险的模式并确认适当的风险缓解战略。在现有的中游设施中观察到的操作和施工复杂性使得很难将电弧闪络降低到  $8 \text{ cal/cm}^2$  以下,因此决定采用 RDA 作为工程控制解决方案。上游设施则出现了相反的情况,在那里使用 RDA 是不实际的,但可以通过设计[8]消除风险。

所有中游基础设施的规划都是为了可视化热点的数量和特征,从而促进安全、经济的解决方案。在分析了可能的解决方案之后,决定加入 RDA,如表 6 所示,选择 RDA 是因为其他解决方案相关的操作复杂性和成本。对于现有设施,最具成本效益的解决方案是采用主断路器或带有电子单元的馈线断路器,以减少电弧闪络水平在  $8 \text{ cal/cm}^2$  以上的地方的电弧闪络。

#### 4.3. 工作许可证和现场风险评估

对工作安全分析进行审查和修改,以包括工作合格者的角色,并为合格者提供更准确的检查。主办公司的一般政策是,除非经所在地主管部门签字批准,否则不得对外露、通电的导体或部件进行维护或安装工作。创建了一个现场风险评估工具,以减少新电气任务的人为错误,解决不清楚的角色、压力、时间压力、不确定时停止、同行检查等问题。此模板便于现场风险评估,以确保采取所有适当的预防措施。

**Table 6.** Midstream RDA requirements**表 6.** 中游 RDA 要求

严重程度	次级的		危急	灾难性
cal/cm <sup>2</sup>	0~1.2	1.2~8	8~40	40~XX
评级	2B	3D	4E	5E
操作者活动	额外的个人防护装备	额外的个人防护装备	RDA	RDA
I&E 技术员/电气承包商	额外的个人防护装备	额外的个人防护装备	RDA 或个人防护装备的额定值为 40 cal/cm <sup>2</sup>	RDA 或个人防护装备的额定值为可接受的事故能量。

新的电气工作人员,被整合到能量隔离(锁定/标记)要求。由于主办公司审查标准工作说明(SWIs)时,其中包含电气要求,适当的环境、健康和安全(EHS)要求的要点被添加进去,以指定 ESP 所要求的每项任务的资格和培训。

#### 4.4. 承包商职责

为了帮助承包商满足主办公司对 ESP 的要求,承包商、雇员、分包商和任何承包服务必须遵守通过主板公司 ESP 所需的所有安全规定,承包商负责提供 ESP 中描述的个人防护装备、培训和工具。主办公司培训人员可选择为被确定为公司特定 SWIs 服务团队的“领班”的个人提供初步培训。我们鼓励承包公司有自己的电气安全计划。

承包公司有责任维护记录,跟踪人员的资质、工具和个人防护装备的维护。主办公司可要求承包公司随时提供工具和个人防护装备的培训、测试或检查记录。

#### 4.5. 审查

作为 ESP 的一部分实施了三种不同类型的审查。审查的目的是核实 ESP 的要求是否得到在外地工作的雇员的遵守,第一次审查由电力主管部门在中游、上游和地方技术当局进行。这项审查每年进行一次,建立一个清单,以涵盖检查电气基础设施、工具和人员的细节。每次审核可包括但不限于安装检查,人员访谈(各级),技能验证;第二次是每月领导安全现场参观的一部分,重点是个人行为 and 知识。

对 ESP 的第三次是在 3 年周期内对所有公司设施进行,也是全面的审查,实施这项审查是为了审查过程和程序、个人绩效和安装条件的审查。所有确定的问题都有记录,并制定修复或补救计划,以弥补任何差距,具体由指导小组或一名合格的外部顾问[9]进行。

#### 4.6. 培训

对人员的教育主要有两种形式:正式培训和社会福利机构。两者都是为电气任务和能量隔离过程中所涉及的每一个角色开发的。教育战略确定了四次正式课堂培训和几次在职培训。正式培训包括:低压合格人员:这项培训是为从事定期电气和仪表活动的技术人员(中游和下游技术人员)提供的);中压合格人员:本次培训针对中游技术人员;低压任务合格人员:这项培训是为非电气工人(如操作员和机械师)建立他们的技能,以识别,减少或消除在工作场所的电气危险。(技能包括了解电弧闪络标签、工业操作的良好做法等。);中等电压任务合格人员:这项培训是为中游操作人员建立他们的技能,以识别,减少或消除在工作场所的电气危险。(技能包括了解电弧闪络标签、工业操作的良好做法等。)每次培训后,参与者必须参加考试,并获得 80% 的最低分数,才能完成培训所涵盖的任务。标准工作说明的实施是一项动手的现场培训,涵盖非电气人员执行的所有电气任务。

## 5. 总结

本文提出的电气安全计划首先通过收集与员工角色、设备、地点、电气任务、操作复杂性和风险(如电弧闪络水平和冲击)有关信息,对形势及其复杂性有一个清晰的认识;其次开展必不可少有效培训,能够明确使用新程序、设备和个人防护装备的条例和框架的原因,在职培训(包括 SWI 使用)为每个人提供了一个实践机会,将正式培训应用于实地工作,有助于理解每项任务;最后明确开展定期审查,通过季度、年度、三年等不同层次的审查确认整个计划是有效的,从而确保持续改进的可能和 ESP 的成熟度。本文研究考虑了电气安全计划的所有方面,以确保员工建立电气安全价值观,为石化企业保持强大的电气安全文化提供参考,研究案例结果表明,一个全面的电气安全计划有助于创建一个强大和吸引整个组织的电气安全文化,理解并实施正确的步骤是创建有效计划的关键。

## 参考文献

- [1] 供配电系统设计规范, GB50052-2009 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
- [2] 化工企业供电设计规定, HG/T 20664-1999 [S]. 北京: 中国工业与信息化部, 2013.
- [3] 张涛. 浅谈化工企业电气安全[J]. 建材发展导向, 2019, 17(9): 360.
- [4] 秦丽明. 浅谈石化企业临时用电中的安全管理[J]. 石油化工安全环保技术, 2008, 24(4): 25-26.
- [5] 张猛, 李全亮, 谭伟. 浅谈化工企业电气设备与供电系统的运行维护措施[J]. 中国化工贸易, 2018, 10(16): 186.
- [6] 李艳艳. NFPA 发布电气安全认证计划[J]. 消防科学与技术, 2015(8): 1046-1046.
- [7] 李良双. 中小型化工企业的用电负荷分级和供电方案设计的几点体会[J]. 化工安全与环境, 2014(15): 10-11.
- [8] 蔡衍, 周捷, 陈杰, 等. 电静液执行器双向远程控制的位置跟踪精度研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(5): 710-715.
- [9] Hall, B. and Kershner, J. (2018) NFPA 70E Six Steps to Compliance. American Society of Safety Professionals, Des Plaines, 23.