



基于安全视角下仪器共享平台管理模式的探析

陈晓丽, 刘世君, 陈佩丽, 苏秋成

(中国科学院广州能源研究所分析测试中心, 广州 510640)

摘要: 仪器共享平台是依托高校、科研院所建立的集大型仪器设备共享、科研任务、仪器功能和方法开发于一体的特色平台, 平台的安全运行是管理工作中的关键。该文从安全角度分析了仪器共享平台运行现状和主要安全隐患, 分别从平台监督控制管理、仪器共享管理、实验室安全管理、化学试剂管理、安全教育管理和突发事件应急管理等方面初步探讨管理模式, 旨在建立完善的仪器共享管理平台的的安全管理体系, 为仪器共享平台管理提供新的思路。

关键词: 仪器共享平台; 安全管理; 仪器设备

中图分类号: G482

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230628

Analysis on the Management Mode of Instrument Sharing Platform Based on the Security Perspective

CHEN Xiaoli, LIU Shijun, CHEN Peili, SU Qiucheng

(Analysis and Testing Center, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Changzhou 510640, China)

Abstract: The instrument sharing platform is a characteristic platform established by universities and research institutes, which integrates large-scale instrument sharing, scientific research tasks, instrument function and method development. The safe operation of the platform is the key to management. This article analyzes the operating status and main safety hazards of the instrument sharing platform from the perspective of safety, and initially explores management from the aspects of platform supervision and control management, instrument sharing management, laboratory safety management, chemical reagent management, safety education management and emergency management. The model aims to establish a perfect safety guarantee system for the instrument sharing management platform, and to provide new ideas for the management of instrument sharing platform.

Key words: instrument sharing platform; safety management; equipment

仪器共享平台是高校或研究院所依据学科的特点和科研需求, 通过现有的仪器资源优化配置组建而成^[1-2], 是集仪器共享、科学研究于一体的特色明显、功能强大的综合型研究实验平台。仪器共享平台一般具有仪器种类多、使用率高、样品多样化、测试人员流动性强等特点, 造成其危险源头多, 管理难度大^[3-4]。共享仪器平台在测试中不仅涉及易燃易爆、有毒样品, 还有高压、高温、辐射、磁场、强电、真空或者低温等相对危险实验环境, 操作稍有不慎就会发生安全事故,

轻则造成火灾、仪器轻微损坏, 重则造成爆炸、人员伤亡、国家财产的重大损失等, 因此仪器共享平台的安全问题受到越来越多的关注。仪器共享平台的安全运行亟须改善原有的管理漏洞, 及时掌握平台建设和运行过程中的危险源头, 制定和完善相关的管理制度, 构建平台安全管理体系。中国科学院广州能源研究所分析测试中心现有仪器设备价值 8000 多万元, 60 多台套大型仪器, 是研究所的仪器共享平台, 也是中科院所级公共技术中心和中科院广州生命科学大型仪器区

收稿日期: 2024-01-02

基金项目: 中国科学院实验室安全示范建设项目(Y707YM1001); 中国科学院技术支撑人才项目(E329850301)。

作者简介: 陈晓丽, 博士, 正高级工程师, 主要从事科学仪器设备管理、仪器分析方面的研究。E-mail: chenxl@

ms.giec.ac.cn

域中心成员单位。本文以中国科学院广州能源研究所所分析测试中心仪器共享平台运行体系为例,针对平台安全运行管理工作存在的不足进行分析,并结合实际工作开展安全管理体系的探讨。

1 仪器共享平台运行现状及安全隐患要素分析

1.1 实验人员

实验仪器的操作运行需要实验人员不仅具有自身所学专业 and 仪器测试原理的知识,还要具备仪器设备安全运行的相关知识。而现实中许多实验人员的安全意识薄弱,往往只关注测试结果,对仪器设备安全运行的要求缺乏认知^[5-6]。实验人员应急处置能力差,当安全事故发生时,往往手足无措,不能及时处置或自我防护。如某实验人员因操作不慎,石蜡受热溢出到明火电炉上引发火灾^[6]。如果该人员了解相关安全知识,及时采取正确的应急处置,在初期采用灭火器或者其他方式灭火,完全可以避免事故发生。

1.2 平台管理

仪器共享平台面向整个科研院所及外部单位开放共享,实验人员相对复杂且流动性较强,测试样品多样化,部分仪器测试任务饱满,经常排队到夜间或节假日进行测试;仪器共享平台相对面积大,存放仪器的房间多且分布范围广,往往涉及多个楼层。诸多因素造成平台分析测试工作缺乏有效的监督和管理。

1.3 仪器设备

仪器共享平台仪器种类及数目多,仪器设备不同,对环境要求、操作注意事项也不同。学生对仪器不熟悉或者错误操作,往往造成仪器的故障或实验室安全事故。如热分析仪器在测试过程中会产生有毒挥发性物质或气体,若实验人员在测试时没有开启通风设备则极易造成室内人员中毒;气相色谱质谱联用仪运行前需检查气源压力以及前进口气体压力状态、真空腔状态等,若漏气或气源压力不够应避免色谱柱加热,否则色谱柱会产生不可逆损坏^[7]。此外,仪器在使用如 H_2 、 CO 、 CH_4 等危险气体时,气体管路的阀门需提前检漏,避免因气体泄露引发的爆炸或者中毒等安全事故。

1.4 化学试剂

仪器共享平台的化学试剂管理与控制存在以

下不足。

1) 平台化学试剂不能完全统一管理

有些学生因为样品的特殊性或者为了个人操作方便等原因,私自携带化学试剂进入公共分析测试平台,造成平台的化学试剂的使用不能有效控制。

2) 平台化学试剂缺乏安全规范化管理

部分平台仪器管理人员和实验人员缺乏对化学试剂尤其是危险化学品的专业认知,造成一些化学试剂在仪器室里随意放置,导致化学试剂在存放和使用过程中存在安全隐患。如乙醇、丙酮、高氯酸以及各种易燃液体或固体等在一定条件下都能够引发火灾或爆炸,因此需要对这些试剂进行严格管理^[8]。

1.5 压力气瓶

压力气瓶是仪器共享平台常用的高危试验设备,用于供给仪器测试用的气体,保障仪器正常运行。由于大部分仪器设备需要反应气、保护气、载气等,造成平台压力气瓶的种类多、数量大,如果气瓶的存放、使用等管理不规范,极易带来重大安全隐患。如学生的不规范操作、部分气瓶未经检测而照常使用、气瓶存放位置不合理、多种气体混合放置等。这些不规范管理的后果轻则造成气体泄漏、仪器故障,重则造成人员伤亡、财产重大损失。如 2015 年某大学实验室研究生在气瓶使用过程中操作不当发生爆炸,引发实验室火灾,造成一人当场死亡^[9]。

1.6 实验废弃物

近年来,国家制定和颁布了多项法律和法规,用于加强对生态的保护,有效管理实验室废弃物成为管理工作的关注点。仪器共享平台是各类实验测试的主要场所,每天的测试实验会产生废气、废液和废弃物,如一次性针头、手套、废旧试剂、剩余样品等。部分学生没有安全风险意识,直接将有毒物品倒入洗手池或者垃圾桶,不仅会造成水、土壤等环境污染,还易引发安全事故^[10-11]。某些废弃物具有易燃性、腐蚀性、反应性等特点,容易和有机物反应引发爆炸和火灾,需要严格按照废弃物处置条例,统一分类回收,再交由具有资质的废弃物处理单位进行集中无害化处置。

2 关于仪器共享平台安全管理体系的研究

近年来的实验室安全事故频发^[12-13],暴露出

实验室在安全教育、管理等方面存在不足。本文结合中国科学院广州能源研究所分析测试中心在仪器共享平台运行管理方面的问题, 从平台安全管理程序、安全教育、测试流程、日常管理和监督方面探讨了构建仪器共享平台安全管理体系的策略, 并提出“六位一体”安全管理的新模式, 如图1所示, 旨在为仪器共享平台的安全管理提供借鉴和参考。单位应建立相应的安全管理机构, 构建平台安全管理体系, 同时还应指定单位领导作为负责人, 实行平台主任安全负责制。平台安全管理体系建立的目的是定期对管理人员和实验人员进行安全教育培训, 同时对平台内的相关危险源进行评价并制定相关措施, 并进一步加强安全风险应急管理。

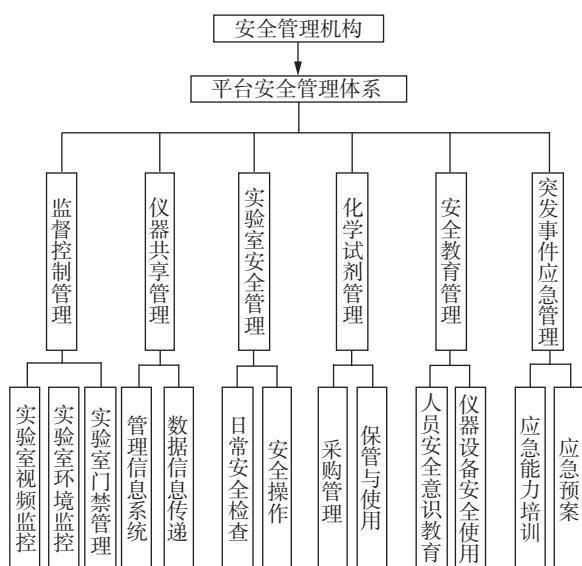


图1 平台安全管理体系框架图

2.1 监督控制管理

1) 实验室视频监控

仪器共享平台具有仪器设备数量多, 实验室面积广, 管理人员少等特点。一个管理人员需要管理的仪器设备往往涉及多个实验室和楼层, 给仪器的管理和监督工作带来极大压力, 也增加了仪器设备的安全使用风险。为解决上述问题, 平台构建了实验室视频监控系统, 管理人员通过监控系统可以同时查看多个实验室里的人员测试活动情况, 提高了工作效率。同时监控系统还可以连接手机, 在非工作日时间段, 管理人员可以通过手机实时查看实验室仪器运行情况, 对于实验室仪器发生的故障或其他错误操作可通过视频回放形式追踪查找具体原因, 极大程度地降低了实

验室安全事故的发生。

2) 实验室环境监控

实验室必须具备适宜的工作环境以保障仪器设备正常运转和其测试数据的准确性, 如红外光谱仪, 要求室温 16~27℃, 湿度 20%~70%。温度过高, 会引起测试数据准确度偏离, 造成实验偏差; 湿度过高会造成仪器故障, 如 KBr 窗片受潮, 检测器损害等。实验室环境监控系统可实时在线获得每个实验室的温、湿度, 当某个实验室温、湿度超出警戒值时, 系统会发出警报信息(短信、邮件等), 如图2所示。管理人员可以通过手机连接该系统, 实时监控每个实验室的环境, 便于及时发现和处理问题, 使得平台实验室的环境变得更加可控, 提升仪器共享平台的安全度。此外, 一些特殊实验会使实验室气体浓度发生变化, 引发生安全事故。如高压差示扫描量热法(HP DSC)实验过程中液氮挥发造成实验室氮气含量偏高, 实验人员易发生缺氧晕厥。实验室环境监控系统应配备气体浓度监测仪, 当氧气含量低于一定浓度时, 检测仪会发出警报提示实验人员尽快离开实验室或开启通风设备。

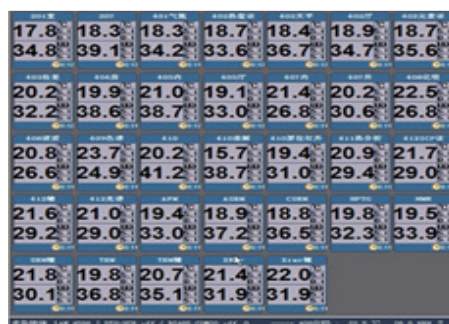


图2 温湿度实时在线监控界面

3) 实验室门禁管理

平台应设置严格的门禁管理系统, 用于管理和控制进出平台的实验人员^[14]。门禁管理流程如图3所示, 实验人员需要经过实验室安全培训和具体测试仪器的安全操作培训, 并通过考试认可后才能获得相应指纹授权, 按测试需求进行相应的门禁授权。指纹授权为每位实验人员指定唯一编号, 通过门禁管理系统可以查看某一指定实验室所有人员的进出记录。门禁授权是根据实验人员申请的具体实验安排某一时间段的授权, 超过该时间段, 门禁授权失效, 实验人员想再次进入该实验室, 需要重新申请门禁授权。通过实验室

门禁管理系统, 实现了人员进出控制, 保障了实验室的安全运行。

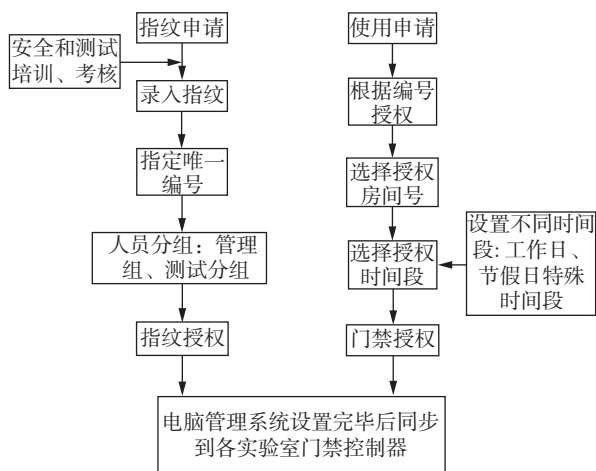


图 3 门禁管理流程图

2.2 仪器共享管理

1) 仪器共享管理信息系统

随着网络信息时代的到来, 实验室管理信息化迎来了新的契机, 通过互联网技术来实现大型精密仪器的管理, 已成为高效管理实验仪器、提高其利用率的新方法, 同时也是提高平台管理水平、服务能力以及开放共享的有效途径^[15]。分析测试中心采用的是“中国科学院仪器设备共享管理平台”, 通过该系统可以进行仪器设备的预约(电脑或手机)、测试、数据处理、仪器维护和维修等管理。实验人员可以通过“仪器共享管理”信息系统查阅相应仪器设备的介绍和功能说明, 并进行测试预约。管理人员可以通过“仪器共享管理”信息系统查看仪器设备的测试预约单和安排仪器的测试、维护等, 实现有序合理的实验安排, 减少仪器故障发生率, 提高仪器的使用效率。

2) 数据信息传递

在当今大数据时代, 个人相关信息泄露、科研数据窃取事件时有发生报道, 电子信息领域数据安全问题也日益突显^[16], 因此, 平台亟须加强科研保密意识, 采取有效措施防止测试数据信息泄露。平台需要建立相应的测试数据管理系统对测试数据进行管理, 实验数据通过测试数据管理系统进行传递下载, 同时严禁外带 U 盘、光盘、移动硬盘等可存储设备, 仪器电脑禁止上网和数据拷贝等。管理员可根据测试委托人、测试仪器、测试单号、测试项目、样品名和研究分组等信息把测试数据上传到数据管理系统相应区域,

每一个测试预约单仅对应一组测试数据, 实验人员输入个人账号和密码登录测试数据管理系统查看和下载测试数据, 每位实验人员仅能查看和拷贝自己对应预约单的测试数据, 有效地防止了科研数据的泄露。

实际运行中, 仪器共享管理信息系统和测试数据管理系统偶尔发生运行不稳定, 存在无法登录、显示不正常、功能不可用等问题, 后续将通过系统升级调整、服务器更新等手段进一步改进。

2.3 实验室安全管理

1) 日常安全管理

平台安全由平台主任负责, 每间实验室均需指定安全责任人并安排专人进行日常安全检查, 及时查找安全隐患。平台日常安全应严格按照《实验室的安全规章制度》执行, 严禁在实验室内和走廊堆放木箱等易燃物, 安全管理员需每周定期对实验室水、电、气路进行安全检查。仪器管理员应每天检查实验室的环境、仪器的运维和仪器所用废旧试剂的回收处理等。

废弃物和气瓶的管理是日常安全管理工作的重头戏, 平台需制定《实验室安全管理办法》, 严禁将实验产生的有毒废液和废弃物乱放或随意抛弃。实验室的废液、危险废弃物需严格按照规定分类放入回收桶内并贴好标签, 标签的名称数量应与容器内实物的名称数量完全一致, 同时定期对废液、危险废弃物集中收集, 最后统一交由具备相应处理能力的单位进行无害化处置。平台还应加强对气瓶采购、使用、回收采用全流程管理, 如图 4 所示, 通过气瓶管理系统可实时查看仪器共享平台整体的气瓶数量、种类及分布等情况, 实现平台整体气瓶的控制和管理。

2) 安全操作

仪器共享平台是实验人员进行分析测试活动的主要场所, 实验人员不正确的实验操作往往会引发仪器故障, 如高温高压同步热重系统实验条件苛刻, 操作不慎极易引发一连串的恶性事故。有研究对行业事故统计, 发现人为因素引发的事故占 90% 以上^[17], 因此, 实验人员进行相应的测试前必须经过仪器设备使用安全培训, 这也是仪器共享平台安全运维的前提和保障。平台仪器均需旁边的明显位置张贴仪器操作指南和注意事项, 有些复杂的操作还应专门录制讲解的视频, 方便实验人员及时掌握相关操作规程。同时

实验室需设立危险警示牌和警示线, 张贴危险提示, 使得平台实验人员可以快速、方便地获取仪器设备的相关信息, 提升仪器安全使用的有效性。最后, 平台还需加强相关安全设施的配备,

进一步降低实验操作的安全风险, 如液氮在人工分装过程中极易发生喷溅而导致实验人员冻伤, 平台专门购置离心液氮泵, 操作过程简便且分装过程更加可控, 杜绝上述危险情况的发生。

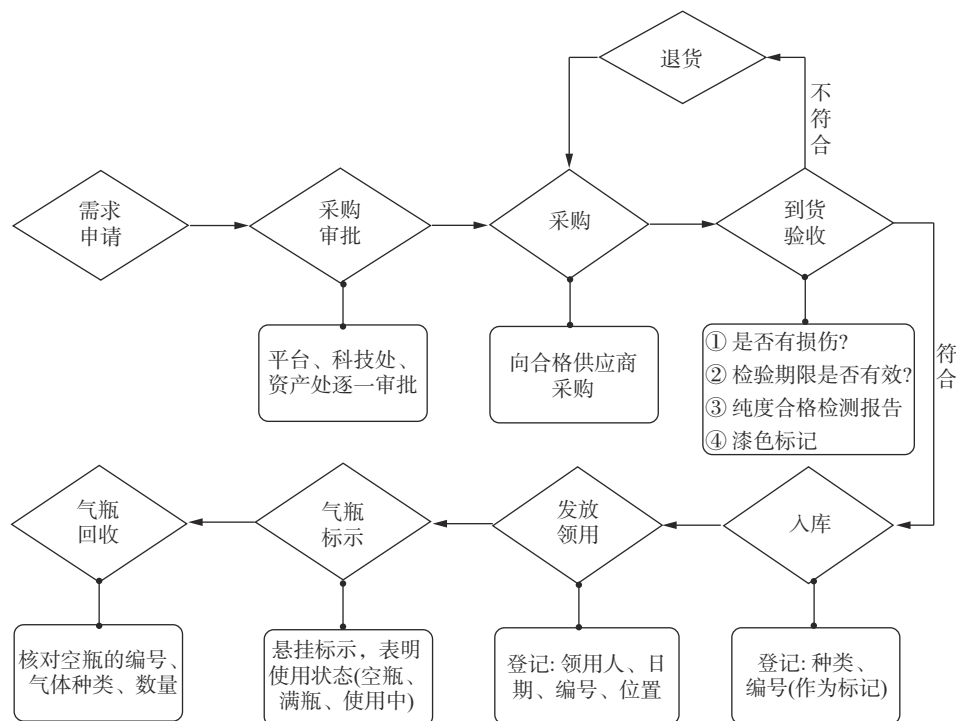


图4 压力气瓶全流程管理图

2.4 化学试剂管理

平台化学试剂品种多、消耗快, 以溶剂类为主, 具有腐蚀性、易挥发和易燃等特点, 因此, 化学试剂规范化管理可以有助于在萌芽阶段消灭安全隐患^[18]。

1) 化学试剂采购管理

化学试剂按危险性分为易制毒、易制爆化学品和常规化学品。单位需要建立化学品管理工作小组, 成员包括: 各相关管理部门、仪器共享平台管理人员、相关课题组等, 同时制定《易制毒化学品管理办法》《易制爆危险化学品管理暂行办法》, 加强化学试剂的采购管控, 严防危险化学品事故发生。易制毒、易制爆化学品采购按照公安部门相关要求执行, 按要求申报并取得相关化学试剂购买的资质, 采购流程如图5所示。化学试剂由管理人员根据平台实验需求进行采购, 首先在“采购申请审批系统”申请, 经平台、科技、资产等管理部门审批后, 按照公安机关的相关要求向有销售易制毒、易制爆化学品资质的合格供应商进行采购。常规化学品参照易制毒、易

制爆化学品管理, 直接在“采购申请审批系统”申请, 经审批后再向合格化学品供应商采购。

2) 化学试剂的保管与领用

平台应专门设置化学试剂室, 配备排风、防火、防爆等安全措施, 并有专人管理。按“双锁双人”管理原则, 化学试剂室需设两把锁, 由专人(两人)分别保管钥匙, 在领用药品时需两人同时在场, 管理人员和领用人同时在使用登记本上登记确认。平台同时设立化学试剂管理台账, 包括流水账和分类账, 详细记录化学试剂入库、出库、领用人、用途及剩余量等信息^[19]。

2.5 安全教育管理

近年来, 科研单位对实验室的安全管理逐步加强, 但安全事故还时有发生, 因此平台的安全教育管理尤为重要。通过安全教育管理为实验室的安全保驾护航, 充分体现了“关注安全, 关爱生命”的教育理念, 也符合当今时代仪器共享平台发展的需求^[20]。

人是平台各项活动的主体, 通过分析近年来实验室发生的各类安全事故, 发现人为因素居

多, 其中安全意识薄弱是仪器共享平台安全管理中存在的突出问题。因此, 必须坚持“安全第一, 预防为主”方针, 通过多样化的教育形式提升平台实验人员安全意识。平台通过系列实验室

安全教育培训, 如现场演练、演讲、海报、会议交流等多种方式对平台人员进行思想、意识和行为的教育, 提高了人员自我安全意识, 树立正确的实验安全意识和责任感。

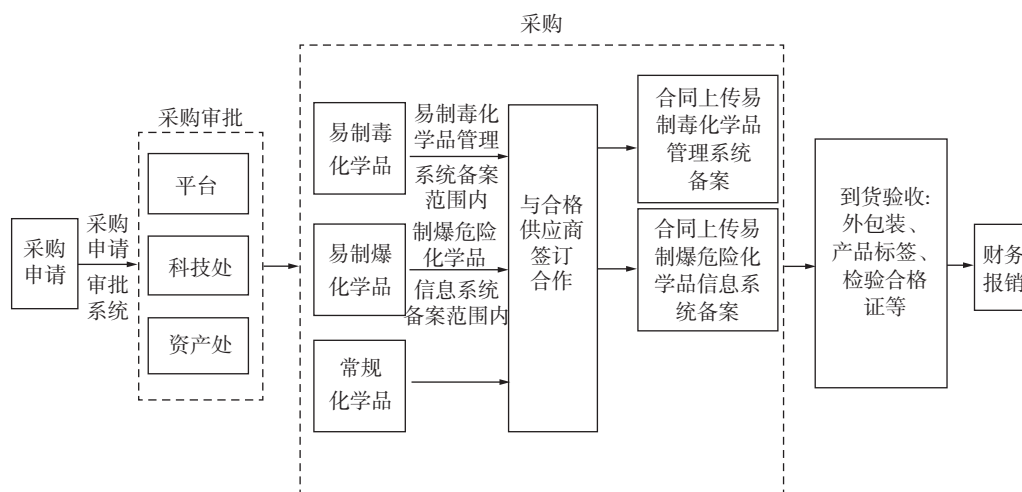


图 5 化学试剂采购流程图

2.6 突发事件应急管理

突发事件应急处理是平台安全管理建设不可缺少的一部分, 平台需要制定“实验室突发事故应急预案”, 同时进一步完善平台安全应急组织架构, 提高平台安全风险预防和管理的水平^[21]。

1) 突发事件应急能力培训

在事故发生初期采取及时、正确、科学的应对方式, 可以极大程度降低财产损失和人员死亡率。有些实验人员不懂如何使用灭火器, 当有火灾事故发生时, 即使第一时间拿到了灭火器, 只能束手无策。平台应针对近年来各类实验室发生的安全事故进行应急管理培训, 通过突发事故应急能力培训, 使管理和实验人员掌握基本的实验室安全知识, 了解事故现场基本处理程序, 进一步增强管理和实验相关人员的应急和自救能力, 提高自我安全风险防范意识。

2) 突发事件应急预案

针对实验室可能发生的爆炸、火灾、人员伤亡及仪器故障等突发事件, 单位应成立由单位领导、各管理部门相关负责人等组成的应急工作小组, 制定《实验室突发事件应急预案》, 应急工作领导小组负责突发事件的管理和处置。应急工作领导小组应明确人员岗位, 落实责任, 突发事件发生时, 领导小组要第一时间启动应急预案, 快速反应, 紧张有序地组织人员和物力进行应对, 如第一时间通过喷洒水龙头、灭火器等进行

应急处置, 并保持应急通道畅通, 便于实验人员及时撤离^[22]。领导小组要保障紧急处置结果的有效性, 根据事故发展调整相应的处置方案, 防止事态的恶化和财产损失的进一步扩大, 为平台平稳运行筑牢安全防线。

3 结束语

仪器共享平台的安全管理是高校和研究所安全管理工作中的重要组成部分, 平台的安全运行是保障仪器有效使用和充分共享的前提, 而实验人员安全意识淡薄、现有管理模式不健全、管理人员不足等诸多因素制约着平台的安全运行。本文从监管体系、准入制度、教育培训、应急管理等多角度探索, 优化完善仪器平台管理模式, 有效提高实验室安全管理效率, 对提升科研院所和高校的仪器共享平台安全管理水平具有一定的借鉴意义。此外, 仪器共享平台的安全管理水平还受学校的重视程度、经费保障、政策支持等多方面因素影响, 仪器平台应建立激励、考核奖罚等配套措施, 保障实验安全有序开展, 为科研工作提供有力支撑和保障。

参考文献

- [1] 蔡晚控. 国家一流学科背景下大型仪器开放共享平台建设[J]. *实验科学与技术*, 2023, 21(1): 152-156.
- [2] 张哲娟, 洪家祺, 聂耳. 综合性高校大型仪器共享问题

- 与推进策略[J]. *实验科学与技术*, 2023, 21(3): 145-149.
- [3] 朱敏, 王耿, 白艳红. 高校化学实验室安全管理研究现状及展望[J]. *实验室科学*, 2023, 26(5): 183-187.
- [4] 毕嘉益, 夏焕章, 刘岩峰, 等. 高校仪器共享平台安全管理研究[J]. *实验科学与技术*, 2020, 18(5): 156-159.
- [5] 王海燕, 张旭. 高校实验室的安全管理途径[J]. *化工管理*, 2023(32): 119-122.
- [6] 易琼. 关于对某高校实验室安全事故的原因剖析及后续改进的建议[J]. *广东化工*, 2020, 47(24): 185-186.
- [7] 刘世君, 陈晓丽, 付娟, 等. 裂解器-气相色谱质谱联用仪的使用技巧及故障处理[J]. *分析测试技术与仪器*, 2020, 26(3): 179-186.
- [8] 王丹凤. 高校实验室化学试剂管理存在的问题及建议[J]. *化学工程与装备*, 2023(2): 291-292.
- [9] 高鹏. 实验厂房气瓶的安全管理[J]. *化工管理*, 2020(33): 76-77.
- [10] 李群良, 李艳琳, 鲁浩远. 化学实验室废弃物安全管理与处置的探索和思考[J]. *广州化工*, 2019, 47(6): 158-159.
- [11] 徐伟, 蒋芸. 高校实验室危险废弃物安全管理的研究[J]. *实验室科学*, 2023, 26(5): 191-193.
- [12] 王利. 高校实验室消防安全风险因素及管理建议[J]. *化工安全与环境*, 2023, 36(10): 15-16.
- [13] 叶元兴, 马静, 赵玉泽, 等. 基于 150 起实验室事故的统计分析安全管理对策研究[J]. *实验技术与管理*, 2020, 37(12): 317-322.
- [14] 陈雪梅, 黄强, 丁雨, 等. 综合医院科研公共平台入室人员管理规范[J]. *实验室科学*, 2021, 24(4): 191-194.
- [15] 詹美燕, 李春明. “互联网+” 高校大型分析测试仪器开放共享的管理探索与实践: 以华南理工大学材料平台公共分析测试中心为例[J]. *科技管理研究*, 2020, 40(4): 127-131.
- [16] 李凯, 周丽娟, 吴驰. 高校实验室信息安全机制探索与实践[J]. *实验技术与管理*, 2021, 38(7): 286-290.
- [17] 付净, 刘虹, 刘文博. 高校实验室火灾爆炸事故原因分析及管理对策[J]. *吉林化工学院学报*, 2018, 35(5): 87-92.
- [18] 宿艳, 戴岳, 杨金辉, 等. 高校化学实验室安全体系的构建与实践[J]. *实验科学与技术*, 2021, 19(3): 142-145.
- [19] 尹梦云. 高校化学实验室危险化学品的安全管理研究[J]. *广州化工*, 2020, 48(15): 239-241.
- [20] 方瑾, 谈国凤, 权力涛, 等. “一式、两化、四推进” 实验室安全教育体系的建设实践[J]. *实验室研究与探索*, 2021, 40(1): 293-299.
- [21] 蔡毅飞. 化学实验室事故应急处理保障体系建设的探讨[J]. *科技资讯*, 2019, 17(25): 227.
- [22] 王船英, 桑蕾, 邾枝花, 等. 医学院校化学实验室常见安全事故的防范与应急处理[J]. *安徽医学学报*, 2022, 21(5): 24-26.

编辑 王燕

(上接第 94 页)

因此不仅要在技术上实现突破, 还要让产品具备应对市场竞争、政策环境等多重挑战的能力。国产化替代不仅仅是技术的竞争, 更是国家创新能力和自主发展的体现, 正是因为这类软件的存在才能让国家对专业人才的培养更加便捷、更加高效、更加出色。

参考文献

- [1] 康迎曦, 唐北平. 混合式金课教学模式的信息研究与实践: 以《电工电子技术》课程为例[J]. *软件*, 2021, 42(9): 38-41.
- [2] 梁占红, 廖晓辉, 胡玉霞, 等. 基于虚实结合的电路实验混合式教学探索与实践[J]. *实验科学与技术*, 2022, 20(6): 89-92.
- [3] 曹显莹, 曲阳, 郭春来. 基于虚拟仪器的 RLC 谐振电路实验系统研究[J]. *大学物理实验*, 2019, 32(6): 96-99.
- [4] 李宗平. RLC 串联谐振实验的 Multisim 仿真教学法[J]. *大学物理实验*, 2009, 22(4): 84-86.
- [5] 权建军, 刘文杰. Proteus 软件在 RLC 串联谐振电路教学中的应用[J]. *自动化与仪器仪表*, 2017(1): 215-216.
- [6] 陈雪. 二阶串联谐振系统 MATLAB/Simulink 仿真[J]. *长春工业大学学报(自然科学版)*, 2011, 32(3): 243-246.
- [7] 刘小艳, 金平, 杨毅. RLC 并联谐振电路的实验研究[J]. *实验科学与技术*, 2015, 13(2): 18-22.
- [8] 张海军, 邓斯达, 陈湛, 等. RLC 串联谐振电路的幅频特性研究[J]. *物理实验*, 2020, 40(10): 17-21.
- [9] 王楠, 钱浩媛, 闫凤, 等. RLC 串联谐振电路中总损耗电阻的一种估算方法[J]. *大学物理实验*, 2021, 34(6): 40-44.
- [10] 潘杰, 刘晓文, 陈桂真. RLC 电路并联谐振理论与仿真分析[J]. *实验科学与技术*, 2016, 14(5): 21-25.
- [11] 黄冬梅, 马乐, 王树鑫, 等. MATLAB 仿真软件在《电力电子技术》教学实践中的应用[J]. *软件*, 2022, 43(3): 10-12.
- [12] 陈险朝, 孔维宾, 方忠庆, 等. 阵列天线方向图仿真系统设计与研究[J]. *软件工程*, 2022, 25(5): 44-49.
- [13] POZAR D M. *Microwave engineering*[M]. 3rd ed. New York: Wiley, 2005.

编辑 张俊