

数字孪生技术在智慧电厂安全管理中的应用

刘保力

大唐郓城发电有限公司 山东 菏泽 274000

摘 要：随着智慧电厂安全管理重要性凸显且面临诸多挑战，数字孪生技术成为破局关键。本文详细探讨其在智慧电厂安全管理中的应用，包括构建数字孪生电厂模型、搭建实时监测与预警系统、开展虚拟仿真与故障预测及人员安全管理等方面，分析该技术在提升管理效率、降低风险成本、优化决策响应等方面的显著优势，为智慧电厂安全管理提供新路径。

关键词：数字孪生技术；智慧电厂；安全管理

1 智慧电厂安全管理的重要性

1.1 人员安全与设备安全的双重保障

在智慧电厂的运营体系中，人员安全与设备安全构成了安全管理的核心支柱，二者相辅相成，缺一不可。电厂作业环境复杂，高温、高压、高辐射等危险因素无处不在，稍有不慎，就可能引发严重的人员伤亡事故。因此通过完善的安全管理体系，为工作人员提供全面的安全培训、配备先进的防护装备、制定严格的操作规程，是保障人员生命安全的关键。设备作为电厂生产运行的物质基础，其安全稳定运行直接关系到电厂的经济效益和社会效益。一台关键设备的故障，可能导致整个生产流程的中断，造成巨大的经济损失。以火电厂的汽轮机为例，若因设备故障停机一天，不仅会损失大量的发电量，还可能因无法履行供电合同而面临巨额赔偿^[1]。设备故障还可能引发次生灾害，威胁到人员安全和周边环境。因此对设备进行全生命周期的安全管理，包括日常巡检、定期维护、状态监测等，及时发现并消除设备隐患，确保设备始终处于良好的运行状态，是智慧电厂安全管理的重要任务。

1.2 提高电厂运行的稳定性和可靠性

智慧电厂作为能源供应的重要环节，其运行的稳定性和可靠性对保障社会生产生活用电至关重要。稳定可靠的电力供应，是现代社会正常运转的基础，关系到工业生产、居民生活、公共服务等各个领域。一旦电厂出现故障，导致电力供应中断，将对社会经济造成严重影响。通过加强安全管理，智慧电厂能够有效预防和减少设备故障、操作失误等安全事故的发生，从而提高电厂运行的稳定性和可靠性。先进的安全管理技术和手段，如实时监测系统、故障预警系统等，可以及时发现潜在的安全隐患，并采取相应的措施进行处理，将事故消灭在萌芽状态。完善的应急预案和应急演练，能够在事故

发生时迅速响应，最大限度地减少事故造成的损失，确保电厂能够尽快恢复正常运行，为社会提供稳定可靠的电力供应。

2 智慧电厂安全管理面临的挑战

2.1 设备种类繁多，管理难度大

智慧电厂是一个高度集成的复杂系统，包含了发电设备、输电设备、变电设备、配电设备等多种类型的设备，每种设备又由众多的零部件组成，设备种类繁多、结构复杂。随着技术的不断进步，电厂设备的智能化、自动化程度越来越高，设备之间的关联性和耦合性也日益增强，一台设备的故障可能会引发连锁反应，影响到其他设备的正常运行。设备的全生命周期管理涉及到设备的采购、安装、调试、运行、维护、检修、报废等多个环节，每个环节都需要进行严格的管理和控制。面对如此众多的设备和复杂的管理环节，传统的人工管理方式已经难以满足需求，存在管理效率低、信息传递不及时、决策缺乏科学性等问题，给智慧电厂的安全管理带来了巨大的挑战。

2.2 安全事件频发，应急处理需求高

尽管智慧电厂在安全管理方面采取了一系列措施，但由于其生产环境的复杂性和不确定性，安全事件仍然时有发生。例如，设备老化、操作失误、自然灾害等因素都可能导致安全事故的发生。据统计，近年来，电力行业因设备故障引发的安全事故占比超过40%，因人为操作失误导致的事故占比也高达30%左右。这些安全事件不仅会造成设备损坏、人员伤亡和经济损失，还会对社会稳定和能源供应安全产生严重影响。安全事件的突发性和紧迫性，对智慧电厂的应急处理能力提出了极高的要求。一旦发生安全事件，需要在最短的时间内做出准确的判断和决策，采取有效的应急措施，控制事故的发展，减少事故造成的损失。目前许多智慧电厂在应急处

理方面还存在不足,如应急预案不完善、应急演练不充分、应急资源调配不及时、各部门之间协同配合不够等问题,导致在面对安全事件时,无法迅速有效地进行应对,进一步扩大了事故的影响范围。

2.3 法规要求严格,合规性压力大

随着社会对安全生产的重视程度不断提高,国家和地方政府出台了一系列严格的安全生产法规和标准,对智慧电厂的安全管理提出了更高的要求。同时,相关部门还会定期对电厂进行安全检查和执法监督,对不符合法规要求的企业进行严厉处罚,包括罚款、停产整顿等。智慧电厂需要投入大量的人力、物力和财力来满足法规要求,确保企业的合规运营。这不仅增加了企业的运营成本,还对企业的管理水平和执行能力提出了挑战^[2]。企业需要不断完善安全管理制度,加强人员培训,加大安全投入,提高安全管理的信息化水平,以确保各项工作符合法规标准。法规和标准还在不断更新和完善,企业需要及时了解和掌握最新的法规要求,调整和优化安全管理策略,这进一步加大了企业的合规性压力。

3 数字孪生技术在智慧电厂安全管理中的应用

3.1 数字孪生电厂模型的构建

数字孪生技术是一种将物理实体与虚拟模型相结合的技术,通过对物理实体进行数字化建模,实现对其全生命周期的实时映射和仿真。在智慧电厂安全管理中,构建数字孪生电厂模型是应用数字孪生技术的基础。构建过程首先需要收集电厂各类设备的详细信息,包括设备的设计图纸、技术参数、运行数据、维护记录等,这些数据是构建精确数字模型的关键。利用三维建模软件和大数据分析技术,将收集到的数据进行整合和处理,构建出与实际电厂高度一致的虚拟模型。该模型不仅能够直观地展示电厂的整体布局和设备结构,还能模拟设备的运行状态和性能变化。例如,在数字孪生电厂模型中,可以精确地呈现锅炉的内部结构、汽轮机的转子运动、电气设备的电路连接等,为后续的安全管理和决策提供了一个可视化的平台。同时数字孪生电厂模型还会与实际电厂的传感器网络实时连接,实现数据的实时交互和同步更新,确保虚拟模型能够准确反映实际电厂的运行情况。

3.2 实时监测与预警系统

基于数字孪生电厂模型,构建实时监测与预警系统是数字孪生技术在智慧电厂安全管理中的重要应用。在电厂的各个关键设备和区域部署大量的传感器,如温度传感器、压力传感器、振动传感器、电流传感器等,实时采集设备的运行参数和环境数据,并将这些数据传

输到数字孪生模型中。通过对这些数据的实时分析和处理,数字孪生系统能够实时监测设备的运行状态,一旦发现设备运行参数超出正常范围或出现异常变化,系统将立即发出预警信号。例如,当锅炉的温度或压力超过设定的阈值时,系统会及时发出高温、高压预警,并通过可视化界面以醒目的颜色和图标提示管理人员。系统还会对预警信息进行智能分析,判断故障的类型和严重程度,为管理人员提供相应的处理建议。另外,实时监测与预警系统还可以对电厂的环境参数进行监测,如空气质量、噪声水平、有害气体浓度等,当环境参数不达标时,及时发出预警,保障工作人员的身心健康和电厂的安全运行。

3.3 虚拟仿真与故障预测

数字孪生技术的虚拟仿真功能为智慧电厂的故障预测和分析提供了有力的工具。通过对数字孪生电厂模型进行模拟仿真,可以重现设备的故障过程,分析故障发生的原因和影响因素,预测设备未来的运行状态和故障发展趋势。例如,通过对汽轮机的数字孪生模型进行仿真,可以模拟汽轮机在不同工况下的运行状态,分析叶片磨损、轴承故障等常见故障的发生机理和发展过程,提前预测设备可能出现的故障,为设备的维护和检修提供科学依据^[3]。利用机器学习和人工智能算法,对大量的设备运行数据和故障案例进行分析和学习,建立设备的故障预测模型。该模型能够根据设备当前的运行状态和历史数据,预测设备在未来一段时间内发生故障的概率和时间,实现设备的预测性维护。虚拟仿真与故障预测功能的应用,使智慧电厂能够从传统的事后维修模式转变为事前预防模式,提高设备的可靠性和使用寿命,降低维修成本和安全风险。

3.4 人员安全管理

在智慧电厂的人员安全管理方面,数字孪生技术同样发挥着重要作用。通过数字孪生电厂模型,可以对电厂的作业环境进行三维可视化展示,让工作人员更加直观地了解作业现场的布局和潜在危险。同时,利用虚拟现实(VR)和增强现实(AR)技术,为工作人员提供沉浸式的安全培训体验。例如,通过VR技术模拟电厂的各类事故场景,让工作人员在虚拟环境中亲身体验事故发生的过程和后果,学习正确的应急处理方法和逃生技能,提高工作人员的安全意识和应急能力。数字孪生系统还可以对工作人员的行为进行实时监测和管理。通过在工作人员身上佩戴智能终端设备,如智能安全帽、智能手环等,实时采集工作人员的位置、生命体征等信息,并传输到数字孪生模型中。当发现工作人员进入危

险区域、违规操作或出现身体不适等情况时,系统会及时发出警报,并通知管理人员进行处理。例如,当工作人员未按规定佩戴防护装备进入高辐射区域时,系统会立即发出警报,提醒工作人员采取相应的防护措施,保障工作人员的人身安全。

4 数字孪生技术在智慧电厂安全管理中的优势

4.1 提高安全管理效率与精准度

传统的智慧电厂安全管理主要依靠人工巡检和经验判断,存在管理效率低、信息滞后、准确性差等问题。而数字孪生技术的应用,实现了安全管理的数字化和智能化,大大提高了安全管理的效率和精准度。通过实时监测与预警系统,能够对电厂的设备和环境进行全方位、实时的监测,及时发现潜在的安全隐患,避免了人工巡检的局限性和主观性。数字孪生系统能够对海量的监测数据进行快速分析和处理,准确判断故障的类型和位置,为管理人员提供精准的决策支持。例如,在设备故障诊断方面,传统方法可能需要技术人员花费大量时间进行现场检查和分析,才能确定故障原因;而利用数字孪生技术,系统可以在故障发生的瞬间,通过对设备运行数据的分析和虚拟仿真,快速准确地找出故障根源,为维修人员提供详细的维修方案,缩短了故障处理时间,提高了设备的可用性。数字孪生技术还可以实现对安全管理流程的优化和自动化,减少人为操作环节,提高管理效率,降低管理成本。

4.2 降低事故风险与运营成本

数字孪生技术的虚拟仿真和故障预测功能,能够提前发现设备的潜在故障和安全隐患,使电厂能够采取预防性维护措施,避免事故的发生,从而降低事故风险。通过对设备运行状态的实时监测和分析,及时调整设备的运行参数,优化设备的运行工况,延长设备的使用寿命,减少设备的维修次数和维修成本。例如,某智慧电厂应用数字孪生技术后,设备的故障率降低30%,维修成本减少25%。数字孪生技术还可以帮助电厂优化能源消耗,提高能源利用效率。通过对电厂生产过程的仿真和分析,找出能源浪费的环节和原因,制定合理的节能措施,降低能源消耗成本。在应急管理方面,数字孪生系统能够为应急预案的制定和演练提供虚拟平台,提高应

急响应的效率和准确性,减少事故造成的损失。

4.3 优化决策支持与应急响应

在智慧电厂的安全管理中,决策的科学性和及时性至关重要。数字孪生技术为管理人员提供了一个直观、准确的决策支持平台。通过数字孪生电厂模型,管理人员可以全面了解电厂的运行状态和设备情况,对各种安全管理方案进行虚拟仿真和评估,选择最优的决策方案^[4]。例如,在制定设备检修计划时,管理人员可以通过数字孪生系统模拟不同的检修时间和检修方案对电厂运行的影响,从而制定出既不影响生产又能保证设备安全的最佳检修计划。在应急响应方面,数字孪生技术能够在事故发生时,迅速为应急指挥人员提供准确的现场信息和决策支持。通过实时更新的数字孪生模型,应急指挥人员可以直观地了解事故的发展态势、受影响的区域和设备、人员的分布情况等信息,制定科学合理的应急救援方案。同时利用虚拟仿真功能,对应急救援方案进行模拟演练,评估方案的可行性和有效性,及时调整和优化方案,提高应急救援的成功率,最大限度地减少事故造成的损失。

结束语

数字孪生技术为智慧电厂安全管理带来了革命性变革,有效解决了传统管理模式的难题,提升了电厂的安全性和运营效益。然而技术应用仍有优化空间。未来,需进一步深化数字孪生技术与智慧电厂安全管理的融合,探索更多创新应用场景,加强技术研发与人才培养,持续提升智慧电厂安全管理水平,保障电力行业稳定发展。

参考文献

- [1]茹铭.电力工程建设数字化发展提升优化策略研究[J].电力与能源,2021,42(06):706-708.
- [2]黄文雯,韩璐,孙萌,安培秀,陈新鹏.基于数字孪生的数字电网建设[J].电子技术与软件工程,2021(22):215-217.
- [3]王建翔,胡蔚.BIM技术在智慧城市“数字孪生”建设工程的应用初步分析[J].智能建筑与智慧城市,2021(01):94-95+98.
- [4]申振姜,爽,聂麟童.数字孪生技术在水利工程运行管理中的分析与探索[J].东北水利水电,2022,40(08):62-65.