

基于FMEA方法的抽水蓄能电站施工质量风险评估研究

汪 鹏

中国水利水电第四工程局有限公司 青海 西宁 810000

摘 要：本文聚焦于抽水蓄能电站施工质量风险评估，引入失效模式与影响分析（FMEA）方法。详细阐述了FMEA方法在抽水蓄能电站施工中的适用性及实施步骤，通过构建风险评估指标体系，结合实际案例进行风险评估与分析，旨在为抽水蓄能电站施工质量控制提供科学依据，降低施工风险，保障电站建设的安全与质量。

关键词：FMEA方法；抽水蓄能电站；施工质量；风险评估

引言

抽水蓄能电站作为电力系统中的重要调节设施，在保障电网安全稳定运行、促进可再生能源消纳等方面发挥着关键作用。其施工过程涉及众多复杂环节，包括大坝建设、地下洞室开挖、机电设备安装等，任何一个环节的质量问题都可能对整个电站的运行安全产生严重影响。因此，对抽水蓄能电站施工质量进行科学有效的风险评估至关重要。

1 FMEA方法概述

1.1 FMEA方法的基本原理

FMEA（Failure Mode and Effects Analysis）方法深深扎根于“预防为主”的先进管理思想土壤之中。在产品或过程的设计、生产及运营等各个阶段，它犹如一位严谨的“质量卫士”，通过对产品或过程的各个组成部分展开细致入微的详细分析，不放过任何一个可能隐藏风险的角落，全力识别潜在的失效模式。失效模式（FM）是产品或过程未能达到预期功能的具体表现形式。例如，在机械制造中，齿轮的齿面磨损导致传动效率降低，这就是一种典型的失效模式；在软件开发里，程序出现死循环使得系统无法正常运行，同样属于失效模式的范畴。失效影响（FE）则聚焦于失效模式对产品或过程性能、安全性、可靠性等多个关键方面所产生的连锁反应。以汽车制动系统为例，若制动盘出现裂纹这一失效模式，其失效影响可能是制动距离变长，严重时甚至会导致制动失灵，直接威胁到乘客的生命安全，同时也会影响汽车整体的可靠性，降低用户对产品的信任度。失效原因（FC）是导致失效模式发生的根源所在，犹如隐藏在水面下的暗礁，需要深入挖掘才能发现。继续以汽车制动盘裂纹为例，其失效原因可能包括制动盘材料质量不佳、制造工艺存在缺陷（如热处理不当）、长期在高温或恶劣环境下使用等^[1]。风险优先数（RPN）是FMEA方法中的核心量化指标，它综合考虑了失效模式

的严重度（S）、发生频度（O）和探测度（D）三个关键因素。严重度（S）衡量的是失效模式一旦发生，对产品或过程造成的损害程度，通常分为1 - 10级，级别越高表示影响越严重；发生频度（O）反映的是失效模式在特定条件下发生的可能性大小，同样分为1 - 10级；探测度（D）则关注在失效模式发生前，能够通过检测手段及时发现它的难易程度，也是1 - 10级，级别越低意味着越容易探测。通过计算公式 $RPN = S \times O \times D$ ，可以得出一个具体的数值，用于衡量风险优先级，为后续的风险决策提供科学依据。

1.2 FMEA方法的实施步骤

FMEA方法的实施是一个系统而严谨的过程，通常包含以下几个关键步骤：第一步，组建跨职能团队。这个团队是FMEA分析的核心力量，成员应广泛涵盖设计、施工、质量、安全等多个领域的专业人员。不同专业背景的人员能够从各自独特的视角出发，为分析提供全面的信息和丰富的经验，确保分析结果的全面性和准确性。例如，在设计人员参与下，能够更好地理解产品的设计意图和潜在设计缺陷；施工人员则可以结合实际施工情况，识别出施工过程中可能出现的风险点；质量人员专注于质量控制标准的把握，安全人员则从安全保障的角度进行风险评估。第二步，确定分析范围和对象。明确需要分析的产品或过程的具体范围是FMEA分析的基础。这有助于团队集中精力，避免分析范围过大导致精力分散，或者范围过小遗漏重要风险。例如，在分析一款新型电子产品的质量风险时，需要明确是分析整个产品的生产过程，还是仅针对某个关键部件的制造过程。第三步，识别潜在的失效模式。这是FMEA分析的关键环节，需要团队成员充分发挥专业知识和经验，通过对历史数据、类似项目经验以及专家判断等多种方式的综合运用，全面梳理可能出现的失效模式。历史数据可以提供过往项目中出现过的失效情况，为识别当前项目的

潜在失效模式提供参考；类似项目经验能够帮助团队借鉴其他项目的成功做法和失败教训；专家判断则凭借专家的丰富经验和敏锐洞察力，发现一些不易察觉的潜在风险。第四步，分析失效影响和原因。针对每个识别出的失效模式，团队需要深入详细地分析其对产品或过程的影响以及导致失效的根本原因。这需要运用科学的方法和工具，如因果图、故障树分析等，帮助团队系统地梳理失效模式与影响、原因之间的逻辑关系。例如，通过因果图可以清晰地展示出导致某个失效模式的各种因素及其相互关系，从而找出根本原因。第五步，评估严重程度、发生频度和探测度。根据预先制定的详细评估标准，对每个失效模式的这三个因素进行量化评估。评估标准的制定需要充分考虑产品或过程的特点、行业规范以及企业的实际情况，确保评估结果的客观性和准确性。第六步，计算风险优先数并确定风险优先级。根据 $RPN = S \times O \times D$ 公式，精确计算每个失效模式的风险优先数，并按照RPN值从大到小进行排序。RPN值越高的失效模式，意味着其风险越大，需要优先关注和改进。通过这种方式，团队能够明确风险防控的重点，合理分配资源和精力^[2]。第七步，制定风险应对措施。针对高风险的失效模式，团队需要制定切实可行的预防和改进措施。这些措施应具有针对性、可操作性和有效性，能够从根本上降低风险发生的可能性和影响程度。第八步，跟踪和验证措施的有效性。在实施风险应对措施后，团队需要对措施的有效性进行持续跟踪和严格评估。通过定期的质量检测、数据分析以及现场检查等方式，验证措施是否达到了预期的效果。

2 FMEA方法在抽水蓄能电站施工质量风险评估中的适用性分析

2.1 抽水蓄能电站施工特点与风险复杂性

抽水蓄能电站施工具有工程规模大、技术复杂、施工周期长、受地质条件影响大等特点。施工过程中涉及多个专业领域的交叉作业，如土木工程、机械工程、电气工程等，各专业之间的协调配合难度较大。同时，抽水蓄能电站通常建设在山区，地质条件复杂，地下洞室开挖、边坡支护等施工环节存在诸多不确定性因素，如岩爆、突水、塌方等地质灾害风险，这些因素增加了施工质量的控制难度和风险复杂性。

2.2 FMEA方法的优势与适应性

FMEA方法具有系统性、前瞻性和量化的特点，能够很好地适应抽水蓄能电站施工质量风险评估的需求。其系统性体现在能够对施工过程中的各个环节进行全面分析，识别出潜在的失效模式及其相互关系，避免

遗漏关键风险因素；前瞻性则表现在通过提前识别潜在的失效模式和风险，采取预防措施，将风险消除在萌芽状态，降低质量事故发生的可能性；量化评估则使得风险比较更加客观、准确，能够为风险决策提供科学依据。此外，FMEA方法强调跨职能团队的参与，能够充分发挥不同专业领域人员的优势，提高风险评估的全面性和准确性。

3 基于FMEA方法的抽水蓄能电站施工质量风险评估指标体系构建

3.1 指标体系构建原则

构建基于FMEA方法的抽水蓄能电站施工质量风险评估指标体系应遵循科学性、系统性、全面性、可操作性和动态性原则。科学性原则要求指标的选取和定义应基于科学理论和实践经验，确保评估结果的准确性和可靠性；系统性原则强调指标体系应涵盖施工过程中的各个方面，反映施工质量的整体状况；全面性原则要求指标能够充分考虑各种潜在的风险因素，避免遗漏重要信息；可操作性原则要求指标数据易于获取和量化，便于实际评估操作；动态性原则则要求指标体系能够根据施工进展和实际情况进行动态调整和更新，以适应不断变化的风险环境。

3.2 指标体系框架

基于上述原则，构建了包含多个层次的施工质量风险评估指标体系。一级指标包括人员因素、材料因素、机械设备因素、施工方法因素和环境因素等五个方面，这些因素是影响施工质量的主要方面。二级指标则是对一级指标的进一步细化，例如人员因素包括施工人员技能水平、质量意识、责任心等；材料因素包括材料质量、材料供应及时性等；机械设备因素包括设备性能、设备维护保养情况等；施工方法因素包括施工工艺合理性、施工组织设计科学性等；环境因素包括地质条件、气候条件、施工现场环境等。三级指标则是对二级指标的具体量化描述，如施工人员技能水平可通过考核成绩、培训记录等进行量化评估。

3.3 指标权重确定

为了准确反映各指标对施工质量风险的影响程度，需要确定各指标的权重。本文采用层次分析法（AHP）确定指标权重。层次分析法是一种将定性定量相结合的决策分析方法，通过构建层次结构模型，将复杂问题分解为多个层次，然后通过两两比较确定各层次元素的相对重要性，进而计算出各元素的权重。具体步骤如下：一是构建层次结构模型，将施工质量风险评估指标体系分为目标层、准则层和指标层；二是构造判断矩

阵,邀请专家对同一层次各元素相对于上一层次某一元素的重要性进行两两比较,并给出相应的判断数值,构建判断矩阵;三是计算权重向量,通过求解判断矩阵的特征值和特征向量,得到各元素的权重向量;四是进行一致性检验,由于专家判断存在主观性,可能导致判断矩阵不一致,因此需要对判断矩阵进行一致性检验,确保权重计算的合理性^[3]。

4 基于 FMEA 方法的抽水蓄能电站施工质量风险评估案例分析

4.1 项目概况

以某抽水蓄能电站上水库大坝施工为例,该大坝为混凝土面板堆石坝,坝高约80m,坝顶长度约300m,工程量较大,施工难度较高。施工过程中涉及土石方开挖、填筑、混凝土浇筑等多个环节,质量风险因素众多。

4.2 FMEA分析过程

4.2.1 组建跨职能团队

团队成员包括项目经理、技术负责人、质量工程师、安全工程师、施工班组负责人等,确保团队具备丰富的施工经验和知识。

4.2.2 确定分析范围和对象

本次分析的范围为上水库大坝施工全过程,包括基础处理、坝体填筑、面板浇筑等关键环节。

4.2.3 识别潜在的失效模式

通过对施工图纸、施工方案、历史项目经验以及现场实际情况的分析,识别出多个潜在的失效模式,如坝基处理不彻底导致坝体沉降不均、坝体填筑压实度不足影响大坝稳定性、面板混凝土裂缝影响防渗性能等。

4.2.4 分析失效影响和原因

针对每个失效模式,详细分析其对大坝施工质量、安全性和可靠性的影响。例如,坝基处理不彻底可能导致大坝在运行过程中出现不均匀沉降,引发坝体裂缝,甚至影响大坝的整体稳定性;而导致该失效模式的原因可能包括地质勘察不准确、清基不彻底、灌浆施工工艺不当等。

4.2.5 评估严重度、发生频度和探测度

根据预先制定的评估标准,对每个失效模式的严重度、发生频度和探测度进行量化评估。严重度评估主要考虑失效模式对大坝安全、功能和寿命的影响程度,分为1-10级,级别越高影响越严重;发生频度评估主要考

虑失效模式在施工过程中发生的可能性,同样分为1-10级;探测度评估则考虑在施工过程中能够及时发现失效模式的难易程度,分为1-10级,级别越低越容易探测。

4.2.6 计算风险优先数并确定风险优先级

根据 $RPN = S \times O \times D$ 公式计算每个失效模式的风险优先数,并按照RPN值从大到小进行排序。例如,坝体填筑压实度不足这一失效模式的严重度评估为8级,发生频度评估为6级,探测度评估为5级,则其RPN值为 $8 \times 6 \times 5 = 240$,在所有失效模式中排名靠前,属于高风险失效模式,需要优先关注和改进。

4.2.7 制定风险应对措施

针对高风险的失效模式,制定相应的风险应对措施。对于坝体填筑压实度不足的问题,采取的措施包括加强施工过程质量控制,严格按照施工规范进行压实作业,增加压实度检测频率;对施工人员进行培训,提高其操作技能和质量意识;优化施工工艺,选择合适的压实设备和参数等。

4.2.8 跟踪和验证措施的有效性

在实施风险应对措施后,对措施的有效性进行跟踪和验证。通过定期的质量检测和评估,发现坝体填筑压实度得到了有效提高,满足设计要求,说明采取的风险应对措施是有效的。

结束语

虽然本文在基于FMEA方法的抽水蓄能电站施工质量风险评估方面取得了一定的研究成果,但仍存在一些不足之处,需要在未来的研究中进一步完善。例如,风险评估指标体系的动态调整机制还需要进一步研究,以更好地适应施工过程中的变化;可以结合大数据、人工智能等新技术,提高风险评估的准确性和效率;加强对风险应对措施实施效果的长期跟踪和评估,不断优化风险防控策略。未来的研究可以围绕这些方面展开,为抽水蓄能电站施工质量管理提供更加科学、有效的支持。

参考文献

- [1]罗新星,伍志刚.信息化与企业竞争力[J].企业技术开发,2004,23:30-33.
- [2]高苏杰.抽水蓄能的责任[J].水电与抽水蓄能,2016,1(1):1-6.
- [3]彭康,吕本富,胡新爱.企业信息化水平测试的思考[J].科学研究,2013,21:226-229.