

电力产业园大跨度高支模施工风险评价及防控技术研究

郭旭

(中铁十八局集团第二工程有限公司, 河北 唐山 064000)

摘要: 随着电力产业园大跨度高支模施工需求增加, 这类施工不仅风险高, 且相关的针对性研究也相对匮乏。本研究旨在探索电力产业园大跨度高支模工程的施工风险评价方法与防控技术。基于“4M1E”理论框架, 结合文献研究和灰色关联度分析, 构建了包含人员、机械、材料、管理、环境5个准则层、20项指标的风险评价体系; 进而构建了基于结构方程模型(SEM)与云模型的综合评估模型, 其中SEM用于确定指标权重, 云模型用于实现风险等级量化评估。本研究以深汕特别合作区华睿丰盛智慧电力产业园项目为例进行实证分析, 结果表明该项目施工风险等级为中等风险, 管理、机械和环境风险是主要风险因素。针对核心风险, 本研究提出优化管理体系、全流程管控机械、强化环境防控等措施, 可为电力产业园大跨度高支模施工安全与防控提供理论支撑与技术参考。

关键词: 电力产业园; 高支模; 施工安全风险; 结构方程模型(SEM); 云模型

中图分类号: TU755.2

文献标识码: A

Risk Assessment and Prevention Technologies for Large-span High-formwork Construction in Power Industry Parks

GUO Xu

(China Railway 18th Bureau Group Second Engineering Co., Ltd. Tangshan 064000, Hebei, China)

Abstract: With the increasing demand for large-span and high-formwork construction in power industrial parks, such construction not only involves relatively high risks but also lacks sufficient targeted research. This research aims to explore a risk assessment methodology and control technologies for large-span high formwork support projects in power industrial parks. Based on the “4M1E” theoretical framework and integrating literature review with grey relational analysis, a risk evaluation system comprising five criteria layers—Personnel, Machinery, Materials, Management, and Environment—and twenty indicators was developed. Subsequently, a comprehensive evaluation model combining Structural Equation Modeling (SEM) and Cloud Model was established, where SEM was employed to determine indicator weights and the Cloud Model was used for quantitative risk level assessment. A case study of the Huarui Fengsheng Smart Power Industrial Park project in the Shenzhen-Shan Special Cooperation Zone was conducted. Results indicate a moderate risk level for the project, with Management, Machinery, and Environment risks identified as primary contributors. In response to core risks, measures such as optimizing management systems, implementing full-process machinery control, and strengthening environmental protection were proposed. This research provides theoretical support and technical guidance for the safety and risk control of large-span high formwork support construction in power industrial parks.

Key words: power industry park; high formwork; construction safety risk; structural equation modeling (SEM); cloud model

1 引言

随着城市建设的发展和结构复杂度的提升，高大模板支撑系统（简称高支模）在高净空、大跨度混凝土现浇结构中的应用愈发广泛^[1-2]。高支模施工因其涉及多重荷载传递路径、空间构件连接和作业高度，具有较高的安全风险，一旦发生失稳极易引发坍塌事故，造成严重后果^[3]。因此，科学开展高支模风险识别与防控研究具有重要现实意义。

众多学者和研究人员对高支模施工进行了广泛的研究^[4-6]。江新等^[7]结合社会网络分析与系统动力学模型研究发现，高支模施工安全风险演化趋势呈“M”形，风险最高值出现在高排架和模板施工期，次高值出现在拆除期；管理因素对风险初值的敏感性最高，因此需加强管理和环境方面的防控以减少高支模事故的发生。魏欢等^[8]发现基于贝叶斯网络的高支模风险管理模型结合BIM信息技术应用能够更可靠、准确地分析高支模安全风险，并能有效防范事故、提升项目安全管理水平。陈斌等^[9]通过分析20起典型高支模事故案例，采用ABC分类管理法确定了高支模风险的不同因素分级，有助于提升安全管理效率，从而预防和减少高支模施工事故的发生。胡长明等^[2]基于ANSYS分析指出，安装合格的扣件式钢管高支模支架在正常使用荷载下不会连续倒塌；纵横双向设置剪刀撑的支架抗倒塌性能最优，其可改变立杆竖向荷载传递路径，有效防范支架连续倒塌。高欣等^[10]发现斜撑布置方案显著影响高支模的极限承载能力和抗连续倒塌能力，其中螺旋式梅花型方案表现出最佳的抗倒塌性能，但梅花型方案的钢材消耗量增加幅度远大于其极限承载力的提升幅度。宋世军等^[11]建立了一种基于多立杆侧向位移矢量及其轨迹分布距离的高支模坍塌安全报警模型，经实验验证，该模型能在坍塌临界点呈现明显突变特征，可实现对高支模坍塌预警的实时有效监测。上述研究为系统识别和管控高支模施工风险奠定了坚实基础。然

而，这些研究多集中于一般建筑工程领域，针对电力产业园大跨度高支模施工的研究相对较少。

电力产业园在布局与功能上具有高度工业化的特征，其建筑结构往往呈现大跨度、高净空、承载集中等特点，以满足大型设备安装、电缆桥架布设等特殊作业要求。这类结构特征导致高支模系统需承受更为复杂的施工荷载与动态扰动，叠加工序交叉、工期紧张等组织因素，风险等级显著提升。

为应对上述挑战，本研究聚焦电力产业园大跨度高支模施工，基于现场调研与实测数据，构建结构方程模型（SEM）以识别关键风险因子，并融合云模型进行不确定性风险等级评判。相较于模糊综合评价、贝叶斯网络等方法，SEM在因果路径建模方面逻辑更清晰；云模型则在处理主观判断与模糊性风险信息时具备较高稳定性，二者结合有助于实现风险因素的结构建模与等级识别的统一，为后续风险控制提供更具操作性的分析框架。

2 施工安全风险指标体系构建

2.1 施工安全风险指标识别

本研究采用文献研究法，在中国知网（CNKI）数据库进行检索。鉴于“电力产业园”相关研究数量有限，研究进一步扩展检索范围，通过“产业园”“高支模”“施工风险”等关键词组合检索，共获取相关期刊论文及硕博学位论文210篇。借助Citespace 6.3.R1软件对所获文献进行关键词共现，参数设置为：时间切片=1年、节点类型=Keyword、剪枝方式=Pathfinder，用分析结果生成高频关键词簇（图1）。

进一步结合电力产业园大跨度高支模工程的结构特点和施工风险，基于“人、机、料、法、环（4M1E）”理论框架，对风险因素进行分层归类，经梳理整合构建如表1所示的具有5个准则层、27项指标层的风险评价体系。

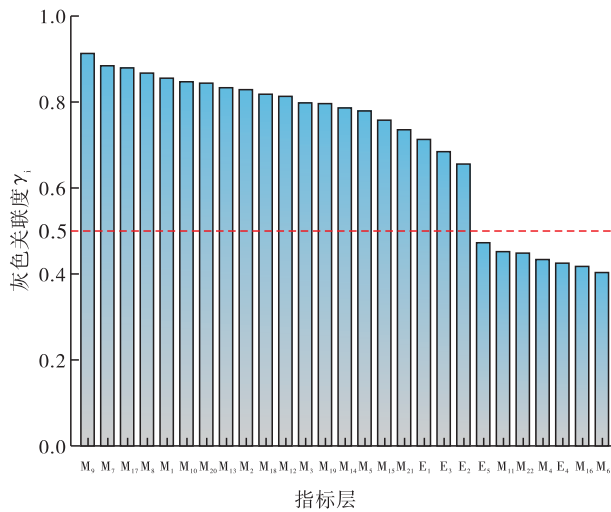


图2 指标层灰色关联度统计

由图2可知，E₅、M₁₁、M₂₂、M₄、E₄、M₁₆、M₆这7项评估指标的灰色关联度低于0.5，排除这些指标后，构建最终的电力产业园高支模施工风险评价体系如图3所示。需要说明的是，这些指标的剔除主要基于在灰色关联度分析中，其与所在准则层其他指标的关联性较高，并非否定其实际风险意义。

具体而言，“周边设施干扰 E₅”虽被剔除，但泄洪区、溪流贯穿等相关影响已整合至“现场作业环境 E₁”的评估范畴；将“设备维护保养情况 M₁₁”融入“高支模设备性能 B₁”的指标评价中，重点关注设备日常运维对性能稳定性的影响；“专项施工把控情况 M₂₂”的管控要求已体现在“施工方案合理性 D₁”和“施工顺序规范性 D₃”中；“施工人员健康状况 M₄”通过“施工人员培训情况 A₃”进行补充；“材料储存条件 M₁₆”的关键要求已纳入“材料进场验收情况 C₄”的后续管理环节；“施工人员交流沟通情况 M₆”的重要性则通过“施工人员专业素质 A₁”中团队协作能力的考核得以体现。

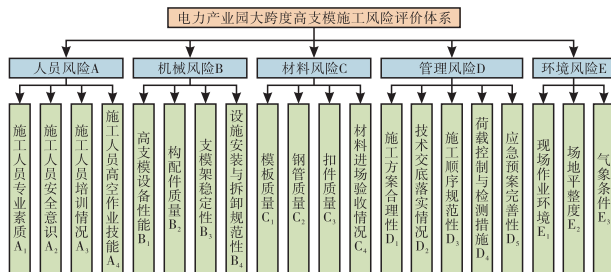


图3 电力产业园大跨度高支模施工风险评价体系

3 施工安全风险评估模型

3.1 基于 SEM 与云模型的安全风险评估模型

本研究构建了基于 SEM 与云模型的综合评估模型，基于 SEM 与云模型的电力产业园大跨度高支模施工的安全风险评估流程如图4所示。相较于层次分析法依赖主观判断构建判断矩阵这一局限，SEM 能清晰解析各风险因素间的关系，将难以直接观测的高支模施工风险概念通过具体指标进行量化表达^[12]；而云模型能实现定性概念与定量数值间的相互转换，能够更贴切地反映专家认知差异与实际施工条件波动带来的风险不确定性^[13]。

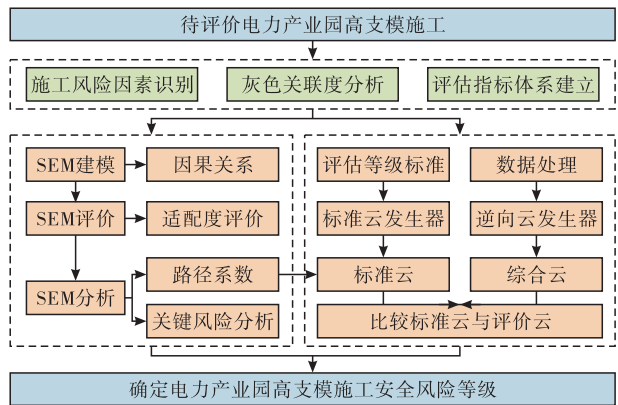


图4 安全风险评估流程

3.2 SEM 确定评价指标权重

3.2.1 模型构建

依据优化后的风险评价体系，将5个准则层作为潜变量，将筛选后的20项指标层作为观测变量，构建如下结构方程模型：

$$\eta = B\eta + \Gamma\xi + \zeta \tag{1}$$

式中， η 为内生潜变量； ξ 为外生潜变量； B 为内生潜变量间的影响效应系数； Γ 为外生潜变量对内生潜变量的路径系数； ζ 为内生潜变量误差项。

测量模型的表达式如下：

$$Y = A_Y\eta + \varepsilon \tag{2}$$

$$X = A_X\xi + \delta \tag{3}$$

式中， Y 、 X 分别为内生、外生观测变量指标组成的向量； A_Y 、 A_X 为对应的因子载荷矩阵； ε 、 δ 为观测误差项。

3.2.2 数据收集与评价

为了获取用于 SEM 分析的基础数据，本研究基于优化后的风险评价体系，设计并发放了基于 Likert 五点量表的调查问卷。该问卷要求受访者

对各评价指标与高支模施工风险的相关程度进行打分(1~5分),分值越高表示风险越高。在收集到足够数量的问卷后,对回收数据进行严格筛选,使用 IBM SPSS Statistics 26 软件对有效数据进行信度和效度检验,以确保数据质量。通过检验后,将一级指标设为潜变量、二级指标设为观察变量,使用 Amos Graphics 软件建立结构方程模型并导入问卷数据进行计算。成功拟合模型后,获取各评价指标的路径系数,为后续权重计算提供数据支撑。

3.2.3 权重提取

通过模型计算,并结合每个评价指标所对应观察变量的路径系数 λ_i ,可进一步计算每个指标的权重 w_i ,计算公式如下:

$$w_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (4)$$

3.3 云模型综合评估

3.3.1 云模型生成

本文在总结相关文献、规范及专家经验的基础上,将施工风险水平划分为5个等级(I~V级),并据此构建标准云模型,定义了各等级对应的云数字特征,包括期望(Ex)、熵(En)和超熵(He)。在此基础上,运用Likert五点量表收集专家对各评价指标的评分数据,通过逆向云发生器计算,得到20项指标具体的云数字特征,从而量化其风险状态。

3.3.2 风险评估

结合各评价指标的权重 w_i 及其云模型数字特征,计算综合云的数字特征(即Ex, En, He)。计算公式如下:

$$\begin{cases} Ex = \sum_{i=1}^n (Ex_i \cdot w_i) \\ En = \sqrt{\sum_{i=1}^n (En_i^2 \cdot w_i)} \\ He = \sum_{i=1}^n (He_i \cdot w_i) \end{cases} \quad (5)$$

式中, i 为风险评价指标编号($i=1, 2, \dots, 20$), Ex_i, En_i, He_i 分别为第 i 项指标的期望值、熵和超熵。

通过对比综合云与标准云的特征,确定电力产业园大跨度高支模施工项目整体的安全风险等级,实现对施工项目风险的量化评估,为施工安全管理提供决策支持。

4 工程应用

4.1 工程概况

深汕特别合作区华睿丰盛智慧电力产业园项目,位于深汕特别合作区鲘门高铁站片区,工程总建筑面积为73 572.11 m²,该项目采用钢筋混凝土框架结构,使用年限为50年、抗震设防烈度为7度。场地地处山前冲洪积平原,地质条件复杂。其北侧紧邻泗马岭水库泄洪区,东侧有泗马岭溪贯穿;同时,受亚热带海洋性气候影响,年均降水量为2 389.5 mm且多台风,施工环境风险显著。工程特点突出表现为:施工场地紧张、劳动力密集、垂直运输压力大,且涉及大跨度高支模(最大跨度15.9 m、层高11 m)、多工序交叉作业等高风险环节,高支模布置示意图如图5所示。

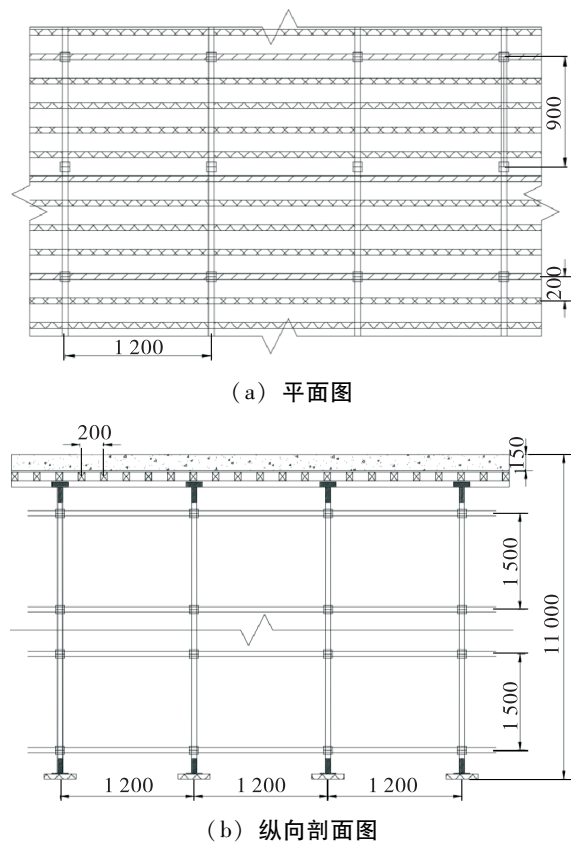


图5 高支模布置示意图

4.2 评价指标权重确定

依据图3所示的风险评价体系,设计包含各项评价指标的结构化调查问卷;采用线上线下相结合的方式,面向高支模施工项目相关的施工技术人员、项目管理人员、安全监督人员及行业专家发放。问卷旨在征求其对各指标与施工风险相关程度的评分(采用5分制,分值越高表示风险

越高)。此次共计发放问卷 300 份，回收 264 份，问卷回收率为 88.0%。经严格筛查，剔除存在答题不完整、评分异常等无效问卷后，最终获得有效问卷 220 份，有效率为 73.3%。

本研究使用 Spss 软件对回收的有效问卷数据进行信效度分析。信度分析结果显示，问卷的克隆巴哈系数为 0.875，表明数据信度良好，所测变量间具有较好的内在一致性。效度分析方面，KMO 值为 0.850，大于 0.6，可认为变量间的相关性较强，适合进行因子分析；Bartlett 球形度检验结果小于 0.001，拒绝了相关矩阵为单位矩阵的假设，达到显著水平，进一步说明变量间存在共同因子，数据具有良好的结构效度。同时，5 个潜在变量的信度系数均高于 0.6（见表 2），处于容许范围内，为后续结构方程模型的构建及权重计算提供了可靠的数据基础。

表 2 问卷信效度检验结果

潜变量	可观测变量数量/个	克隆巴哈系数
人员风险 A	4	0.851
机械风险 B	4	0.870
材料风险 C	4	0.852
管理风险 D	5	0.784
环境风险 E	3	0.837

使用 Amos 软件对问卷数据进行 SEM 分析，以准则层 5 个指标作为潜变量，筛选后的 20 项指标层作为观测变量，构建二阶结构方程模型。通过软件运算，得到模型拟合结果如图 6 所示，其中 $e_7 \sim e_{28}$ 是测量模型的误差项，对应公式 (2) 中的 ε ，图中所有路径系数均来源于 220 份有效问卷，通过 Amos 软件采用最大似然估计法进行拟合计算得到标准化路径系数。拟合分析发现模型的拟合指标中的卡方自由度比为 $2.157 < 3$ ，比较拟合指数 (CFI) = $0.914 > 0.90$ ，塔克-刘易斯指数 (TLI) = $0.905 > 0.90$ ，近似误差均方根 (RMSEA) = $0.063 < 0.08$ 。上述指标均满足拟合优度建议值，表明模型与数据适配良好。

基于第 2.2 节构建的 SEM 模型，通过 Amos Graphics 软件对问卷数据进行拟合，得到了各指标层相对于其准则层的标准化路径系数。本模型中，内生潜变量为 5 个准则层，分别关联 20 项指标层：人员、机械、材料风险各关联 4 项指标，管理风险关联 5 项，环境风险关联 3 项。各指标对准则层的影响通过路径系数 λ 进行量化，继而依据式 (4) 计算各指标的权重及综合权重，最终结果整理如表 3 所示。表 3 中材料风险权重最

低 (0.175)，这一结果与材料风险在实际施工中的可控性密切相关。在本工程高支模施工中，钢管、扣件等材料的质量虽对稳定性至关重要，但这类材料的质量风险更多体现在进场验收和过程管控环节。本项目施工时严格执行材料进场“双检制”，对钢管的壁厚、屈服强度，扣件的抗滑性能等关键指标进行 10% 抽样检测，同时规范材料储存条件，避免因潮湿、锈蚀导致性能衰减，从源头降低材料本身的风险。

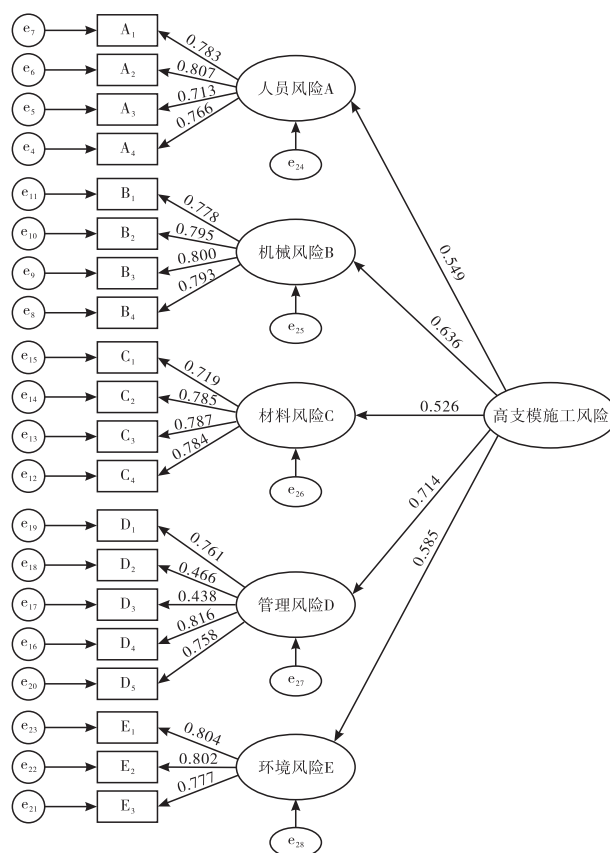


图 6 结构方程模型拟合

表 3 施工安全风险指标权重

准则层	指标权重	指标层	标准化路径系数	指标权重	综合权重
A	0.182	A ₁	0.783	0.255	0.046
		A ₂	0.807	0.263	0.048
		A ₃	0.713	0.232	0.042
		A ₄	0.766	0.250	0.046
B	0.211	B ₁	0.778	0.246	0.052
		B ₂	0.795	0.251	0.053
		B ₃	0.8	0.253	0.053
		B ₄	0.793	0.250	0.053
C	0.175	C ₁	0.719	0.234	0.041
		C ₂	0.785	0.255	0.045
		C ₃	0.787	0.256	0.045
		C ₄	0.784	0.255	0.045

续表

准则层	指标权重	指标层	标准化路径系数	指标权重	综合权重
D	0.238	D ₁	0.761	0.235	0.056
		D ₂	0.466	0.144	0.034
		D ₃	0.438	0.135	0.032
		D ₄	0.816	0.252	0.061
		D ₅	0.758	0.234	0.055
E	0.194	E ₁	0.804	0.337	0.065
		E ₂	0.802	0.337	0.065
		E ₃	0.777	0.326	0.063

4.3 云模型风险评估结果

本研究基于相关文献、规范及专家经验，将电力产业园大跨度高支模施工的风险水平划分为5个等级（I~V级），并定义各个风险等级对应的云模型参数，包括期望值（Ex）、熵（En）和超熵（He），具体如表4所示。

表4 施工安全风险云模型参数

风险等级	描述	评分区间	Ex	En	He
I	低风险	[0, 20]	10	3.333	0.5
II	较低风险	(20, 40]	30	3.333	0.5
III	中等风险	(40, 60]	50	3.333	0.5
IV	较高风险	(60, 80]	70	3.333	0.5
V	高风险	(80, 100]	90	3.333	0.5

根据各风险等级的云模型参数，利用MATLAB R2024a软件中的正向云发生器代码，绘制出各级风险对应的标准云图，如图7所示。

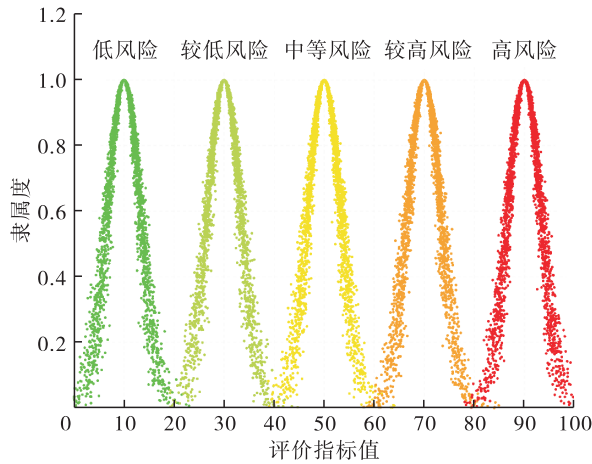


图7 施工风险评估标准云图

对于构建的风险评估指标体系，另外邀请10位在产业园高支模施工领域具有丰富经验的专家，对施工风险体系的20项二级指标进行评分，评价指标施工风险越大给分越高。受邀专家均具备高级工程师或教授职称，且具有丰富的大型电力工程或复杂高支模项目实践经验，为确保评估视角的专业性和多维覆盖，受邀专家分别来自设计院（2位）、大型施工单位（3位）、专业监理

公司（3位）及高校科研机构（2位）。

汇总整理专家的打分结果，通过MATLAB R2024a逆向云发生器得到施工安全风险评估各项指标的云模型数字特征，如表5所示。

表5 指标云模型数字特征

指标	(Ex, En, He)
施工人员专业素质 A ₁	(50.4, 4.763, 0.645)
施工人员安全意识 A ₂	(48.0, 5.264, 0.906)
施工人员培训情况 A ₃	(49.6, 4.512, 1.367)
施工人员高空作业技能 A ₄	(50.4, 2.055, 1.429)
高支模设备性能 B ₁	(50.4, 3.108, 1.310)
构配件质量 B ₂	(49.3, 4.963, 1.989)
支模架稳定性 B ₃	(48.3, 4.362, 1.193)
设备安装与拆卸规范性 B ₄	(50.0, 4.011, 0.867)
模板质量 C ₁	(70.0, 5.013, 1.640)
钢管质量 C ₂	(71.8, 4.512, 0.634)
扣件质量 C ₃	(49.1, 4.161, 1.664)
材料进场验收情况 C ₄	(50.6, 4.211, 0.895)
施工方案合理性 D ₁	(72.6, 3.610, 1.008)
技术交底落实情况 D ₂	(51.5, 3.384, 1.809)
施工顺序规范性 D ₃	(49.7, 5.740, 1.778)
荷载控制与监测措施 D ₄	(49.4, 5.264, 1.290)
应急预案完善性 D ₅	(51.1, 5.164, 1.734)
现场作业环境 E ₁	(50.4, 4.612, 0.572)
场地平整度 E ₂	(54.3, 4.888, 0.751)
气象条件 E ₃	(53.5, 3.635, 1.136)

结合SEM模型计算出来的各个指标的权重值，通过式（5）计算得到电力产业园大跨度高支模施工风险的综合云数字特征为（53.471, 4.439, 1.196），绘制对应的综合云如图8所示。由图8可知，综合云的云滴分布主要集中在（40, 60]评分区间，且期望值53.471更接近中等风险（III级）的中心值50，表明该电力产业园大跨度高支模施工风险等级为中等风险。将该评估结果与深汕特别合作区华睿丰盛智慧电力产业园项目的高支模施工安全管理实践结果对比可知，评估结论与项目实际情况一致。

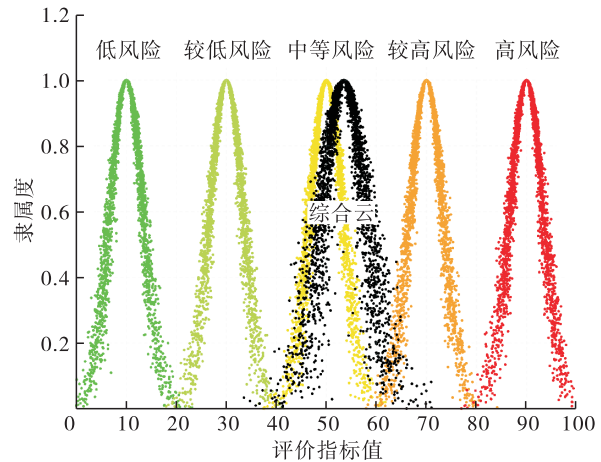


图8 施工风险评估综合云图

5 高风险防控措施

5.1 管理风险防控措施

从施工方案、技术交底、流程管理和风险控制等方面强化系统管理。优化专项施工方案，组织专家联合评审，细化荷载计算与支撑布置，确保方案科学可行；落实技术交底，结合 BIM 三维可视化模拟向施工人员动态演示风险控制点，通过现场实操考核确保交底有效；规范施工顺序，建立工序验收台账，明确关键工序的验收标准；在高支模关键节点布设应力传感器与位移监测设备，通过物联网平台实时预警超载或变形隐患，并制定应急预案定期演练。结合多工序特点，建立跨部门协调机制，动态管控进度，保障管理措施覆盖全周期。

5.2 机械风险防控措施

构建覆盖采购、安装、使用到维护的全流程管理体系。高支模设备须经第三方检测，严格控制钢管、扣件、模板等构配件质量，杜绝不合格材料进场；安装与拆卸由专业持证人员操作，严格按规范执行，架体完工后逐项检测垂直度和扣件力矩，确保支模架稳定性；日常采用“巡检—维保—验收”闭环管理机制，及时更换磨损严重的构配件；结合电力产业园大跨度结构特点，优先选用抗倒塌性能优异的支撑体系，结合 ANSYS 仿真分析优化架体布置，提升整体稳定性。

5.3 环境风险防控措施

落实差异化防控措施，面对台风频发和暴雨，建立气象预警机制，在台风、暴雨来临前对高支模架体进行加固，必要时暂停施工并撤离人员；场地整平方面，采用全站仪测量标高，对软弱地基进行换填或深层压实处理，设置排水系统防止积水导致地基沉降；合理规划材料堆放区与运输通道，确保高支模作业面照明充足、通风良好，临边部位设置防护栏杆与安全网；考虑水库泄洪和溪流影响，在场地周边设置水位监测装置，制定洪水应急预案，避免突发水文灾害对高支模施工造成冲击。

通过本项目的安全管理实践，上述防控措施的实施成效已得到验证。根据该项目年度安全季度报告统计，管理风险防控中技术交底合格率提升至 98%；机械风险全流程管控使设备故障率同比下降 75%，扣件力矩抽检合格率保持 100%；环境风险防控体系在台风季成功规避 3 次暴雨引

发的架体沉降风险，灾害停工损失减少 90%。综合来看，项目高支模施工事故率较防控措施实施前同期下降 82.5%，隐患整改率由 87.3% 提升至 98.6%，表明系统性防控策略对核心风险的控制效果显著。

6 结语

(1) 本研究针对电力产业园大跨度高支模施工的高风险特点，通过文献分析和灰色关联度筛选，构建了包含 5 个准则层、20 项指标的风险评价体系，搭建了系统的风险识别框架，为施工安全管理提供理论基础。

(2) 基于 SEM 与云模型方法，构建了高支模施工风险的综合评估模型。该模型能有效量化风险等级，实证应用表明其评估结果与实际项目风险等级一致，验证了模型的准确性。

(3) 针对核心风险，提出优化管理体系、全流程管控机械、强化环境防控等措施。研究成果为电力产业园大跨度高支模施工提供了风险评价方法与风险防控技术，对保障施工安全与效率具有实际参考作用。

(4) 虽然本研究在构建电力产业园大跨度高支模施工风险评价体系与综合评估模型方面取得了一定成果，但在实际应用与推广过程中仍存在一定的局限性。首先，受研究条件与数据获取范围的限制，所选案例主要集中于华东地区的电力产业园项目，样本来源具有一定地域集中性，可能影响模型在其他地区或不同气候、地质条件下的适用性。其次，所构建的评估模型虽能较好地识别静态风险因素，但对施工过程中由天气突变、设备故障、人为操作失误等引发的动态风险演变及突发事件响应能力尚显不足，难以实现实时风险预警与动态调控。

(5) 未来研究可从以下几方面进一步深化与拓展：一是扩大样本覆盖范围，收集更多来自不同地区、不同类型产业园区的高支模施工数据，验证并优化模型的普适性与鲁棒性；二是探索将应力、位移、环境参数等实时监测数据与动态风险评估方法相结合，构建具备自适应与预警功能的动态风险感知系统，提升对施工过程中风险变化的响应能力；三是深度融合物联网、BIM、人工智能等智能化施工技术，推动风险识别、评估与防控策略的闭环管理，形成覆盖高支模施工全周期的智能风险管控体系，为类似工程的安全管理提供更加科学、系统的技术支撑。

(下转第 52 页)

- Engineering and System Safety, 2007, 92(4): 530-534.
- [4] 齐群, 熊律, 严世开, 等. 基于混合维修机制的动车组多设备系统维修策略优化[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(10): 200-206.
- [5] 侯大立, 赵淞, 成凡, 等. 输气管网设备维修策略优化方法研究[J]. 机械设计与制造, 2024(4): 81-89.
- [6] 陈磊, 温小明, 郭金妹, 等. 基于改进 FMECA 与维修性的数控机床可靠性分配方法[J]. 机床与液压, 2024, 52(11): 231-236.
- [7] 于涵, 张和生. 基于模糊综合评价的动车组牵引传动系统改进 FMECA [J]. 铁道学报, 2022, 44(9): 33-41.
- [8] 黄志宇, 袁卫华, 王海清, 等. 成组维修策略下加氢站预防性维修策略优化[J]. 太阳能学报, 2025, 46(5): 37-43.
- [9] 伊成山, 王红. 考虑 RAMS 的动车组部件预防性维修策略[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2025, 46(2): 309-319.
- [10] 熊律, 齐彦昆, 宁善平, 等. 基于两级维修机制的动车组设备预防性维修优化策略[J]. 铁道运输与经济, 2023, 45(9): 119-124.
- [11] 黎家靖, 张宁. 基于环境影响的城轨设备预防性维修方法研究[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(11): 184-192.
- [12] 熊律, 王红. 风险视角下的动车组部件多级非完美维修策略[J]. 中国机械工程, 2021, 32(4): 399-406.
- [13] 李冀晖, 林志健, 梁丽莎, 等. 考虑节能减排的生产系统多级机会维修策略[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2024, 49(5): 214-224.
- [14] ZHENG X. All opportunity-triggered replacement policy for multiple-unit systems [J]. IEEE Transactions on Reliability, 1995, 44(4): 648-652.
- [15] 王红, 熊律, 何勇, 等. 考虑故障风险的动车组部件机会维修优化策略[J]. 铁道学报, 2019, 41(3): 79-85.
- [16] 朱湘. 基于寿命周期费用和可靠性评估的动车组维修策略优化[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2023.

(上接第 47 页)

参考文献:

- [1] 王涛, 乔杨, 郭永兴, 等. 基于光纤光栅传感器的高支模安全监测[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2024, 56(2): 311-316.
- [2] 胡长明, 王娟, 梅源, 等. 扣件式钢管高大模板支架抗连续倒塌分析[J]. 建筑钢结构进展, 2019, 21(3): 50-55.
- [3] 李航宇, 龚杰, 陶玉菲, 等. 基于轻量化多目标视觉感知的高大模板系统位移监控[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(7): 69-79.
- [4] 张永春, 秘红丹, 师宝禄, 等. 高大模板支架施工技术关键问题分析及处理[J]. 铁道建筑, 2016(9): 54-56.
- [5] 聂荣, 赵灿. 高架支模施工技术在石化冷却塔中的应用[J]. 人民长江, 2021, 52(S2): 196-200.
- [6] 梅源, 胡长明, 周正永, 等. 高大模板支撑体系在结构施工期内所受荷载统计分析[J]. 工业建筑, 2010, 40(2): 42-46.
- [7] 江新, 简丽, 彭佳雨, 等. 基于 SNA-SD 的高支模施工安全风险演化规律研究[J]. 人民长江, 2025.
- [8] 魏欢, 张辉. 基于 BIM 技术的高支模安全风险管理研究[J]. 项目管理技术, 2024, 22(2): 105-110.
- [9] 陈斌, 汪京辉, 龙海涛. 基于 ABC 分类管理法的高支模体系施工风险分析与防控[J]. 建筑安全, 2022, 37(10): 53-56.
- [10] 高欣, 何舰, 兰春光, 等. 斜撑布设方案对高支模抗倒塌性能的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54(6): 1657-1664.
- [11] 宋世军, 芦继忠, 牛山, 等. 高支模坍塌安全监测模型研究[J]. 中国工程机械学报, 2018, 16(5): 453-456, 461.
- [12] 邓聚龙. 灰色系统综述[J]. 世界科学, 1983(7): 1-5.
- [13] 方俊, 郭佩文, 朱科, 等. 基于结构方程模型-模糊认知图的矿山地铁隧道施工安全风险分析[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(7): 2191-2202.
- [14] 王连广, 姚博, 高海洋, 等. 基于云模型改进 AHP 的桥梁施工风险评估[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2025, 46(2): 118-125.