

煤矿通风系统可靠性评估与冗余设计优化方法

余大铃

贵州豫能投资有限公司黔西分公司 贵州毕节

【摘要】煤矿通风系统的可靠性直接关系到矿井安全生产与作业效率。针对现有通风系统在高负荷运行中存在的设备故障率高、冗余设计不足等问题，提出了一种基于可靠性评估与冗余设计优化的综合方法。首先，利用故障树分析与马尔科夫模型对通风系统的关键部件进行可靠性建模，量化系统在不同工况下的失效概率；其次，通过多目标优化方法对风机、风道及控制系统的冗余配置进行调整，在降低故障风险的同时平衡投资成本；最后，通过仿真验证优化方案的有效性，结果表明该方法能显著提升系统稳定性与安全性。

【关键词】煤矿通风系统；可靠性评估；冗余设计；优化方法

【收稿日期】2025年7月14日

【出刊日期】2025年8月12日

【DOI】10.12208/j.jer.20250359

Reliability evaluation and redundancy design optimization of coal mine ventilation system

Daling Yu

Guizhou Yuneng Investment Co., Ltd. Qianxi branch, Bijie, Guizhou

【Abstract】 The reliability of coal mine ventilation systems directly impacts production safety and operational efficiency. To address issues such as high equipment failure rates and insufficient redundancy design in existing systems during high-load operations, this study proposes an integrated approach combining reliability assessment with redundancy design optimization. First, reliability modeling is conducted for key components using fault tree analysis (FTA) and Markov models to quantify failure probabilities under various operating conditions. Second, multi-objective optimization methods are employed to adjust redundancy configurations for fans, air ducts, and control systems, balancing investment costs while reducing failure risks. Finally, simulation results validate the effectiveness of the optimized solution, demonstrating significant improvements in system stability and safety.

【Keywords】 Coal mine ventilation systems; Reliability assessment; Redundancy design; Optimization methods

引言

煤矿作业环境复杂，通风系统是保障人员安全和设备稳定运行的核心环节。随着开采深度增加和矿井规模扩张，通风系统的结构逐渐趋于复杂，系统故障风险显著上升。单一冗余设计已难以满足高效安全的生产需求，可靠性评估与冗余优化的结合成为提升系统性能的关键。基于定量分析的可靠性建模和优化策略，可在降低风险的同时兼顾经济性，为矿井通风系统设计提供更具针对性和可行性的解决方案。

1 煤矿通风系统可靠性问题与安全风险分析

煤矿通风系统在矿井安全生产中发挥着至关重要的作用，其可靠性水平直接决定了作业环境的稳定性和人员生命安全。随着矿井开采深度的不断增加，通风系统的运行环境日益复杂，空气压力、瓦斯浓度及温湿度的动态变化使系统承受更大的运行负荷^[1]。风机、电

控装置、风门等核心设备在高强度连续运转下易出现性能衰减，若缺乏科学的可靠性管理，可能导致风量分布不均、瓦斯积聚或有害气体排放异常等安全隐患。设备老化、维护不当及系统设计缺陷叠加，进一步加剧了通风效率下降与安全风险上升的矛盾，矿井事故的潜在概率随之增加。

在复杂的井下作业条件下，通风系统的可靠性问题不仅表现为单一设备故障，更涉及系统性风险的累积。风机、风道及传感器等关键环节相互关联，任何一个部件的失效都可能引发连锁反应，导致整个通风网络功能紊乱。高瓦斯、高湿、高粉尘等极端环境加速了设备磨损与失效速率，且突发性停机、控制系统故障、传感器数据偏差等问题都会降低系统稳定性。由于多数矿井仍依赖传统的定期维护策略，缺乏基于数据驱动的故障预测与实时监测技术，导致隐蔽性故障无法

及时发现，增加了安全风险的不可控性。

随着矿井规模扩张和生产能力提升，现有通风系统设计在应对突发故障与环境变化方面的局限性日益显现。单一冗余风机或备用风道在高负荷运行状态下无法完全满足风险控制需求，系统抗扰动能力不足，安全裕度有限。可靠性问题的根源在于缺乏对系统失效机理的全面评估与对运行工况的动态响应策略^[2]。通过引入故障树分析、马尔科夫过程建模等可靠性工程方法，可对关键设备及系统整体运行状态进行定量化分析，为制定针对性的风险控制措施提供科学依据。结合智能监测技术与多源数据融合分析，将为通风系统设计优化和安全运行策略提供理论支撑与实践路径。

2 通风系统关键部件可靠性建模与评估方法

通风系统中关键部件的可靠性建模是煤矿安全工程中的核心问题，科学的建模方法能够为风险评估和设计优化提供坚实的理论支撑。通风系统涉及主扇风机、局部通风机、风道、风门及自动化控制装置等多个环节，每一类设备的性能稳定性都会对整体系统运行状态产生直接影响。为了准确刻画系统在不同工况下的失效机理，需要将部件的寿命分布、故障模式和维修策略纳入可靠性分析框架^[3]。通过引入失效率函数和寿命概率分布模型，可对关键部件在高温、高湿、高粉尘等极端环境中的性能退化过程进行定量描述，为后续的冗余设计和动态维护计划提供数据支撑。

在建模方法上，故障树分析与马尔科夫过程是煤矿通风系统可靠性研究中应用较为广泛的技术手段。故障树分析通过将系统失效分解为部件失效的逻辑组合，能够识别关键失效路径并量化各类风险事件的发生概率。而马尔科夫模型则适用于描述设备状态在不同工况之间的动态转移规律，包括正常运行、降级运行、故障停机及修复等多种状态。通过对风机、传感器及风道的多状态建模，可有效预测在长期运行中设备性能的动态变化特征，进而评估在特定工作负荷和环境条件下系统的可靠性指标，如平均无故障时间（MTBF）和可靠度函数 $R(t)$ ，为提高系统稳定性提供理论依据。

在评估过程中，结合实时监测数据与历史故障记录，可进一步提高建模结果的准确性和适应性。基于多源传感器的运行参数采集与大数据分析技术，可以实时捕捉风量、风压、瓦斯浓度、温湿度等关键指标，建立与实际工况高度一致的动态可靠性评估模型。通过对关键部件失效率的趋势分析和剩余寿命预测，可实现对潜在隐患的提前预警与风险分级管理^[4]。同时，基于评估结果的优化策略能够为冗余配置、检修周期调

整和设备更新计划提供定量化决策支持，从而显著提升煤矿通风系统的安全性与经济性，确保在高强度生产条件下保持系统长期稳定运行。

3 基于多目标优化的通风系统冗余设计策略

在煤矿通风系统的设计与运行中，冗余配置是保障系统可靠性和安全性的重要手段。随着矿井生产规模的不断扩大和开采深度的增加，单一冗余设计模式已难以适应复杂的工况需求。基于多目标优化的冗余设计策略，通过在安全性、可靠性与经济性之间寻求平衡，能够实现系统资源的最优配置^[5]。针对主扇风机、局部通风机、风道以及控制装置等关键部件，建立多目标优化模型，将可靠度指标、建设成本、运行能耗等多维因素引入优化框架，使系统在满足安全要求的前提下实现资源利用效率最大化。该策略不仅考虑设备数量和冗余比例，还兼顾不同工作状态下的能效比与维护便利性，确保设计方案在实际生产条件下具有可操作性与高适应性。

多目标优化方法中，常采用基于遗传算法、粒子群优化和多目标线性规划的混合求解技术，对不同冗余配置方案进行仿真与比较。通过设置可靠性约束条件，将系统失效率、风量稳定性和通风压力波动力学作为优化目标函数的重要参数，能够在多种冗余方案中筛选出最优设计解。对于主扇风机等关键设备，需综合考虑单风机容量、并联与串联系统模式、备用比例及切换策略的耦合关系；对于风道与风门设计，则需兼顾气流分布均衡性与阻力最小化的双重要求。通过这种基于数据驱动的优化方法，可以有效避免传统经验设计中存在的冗余不足或资源浪费问题，显著提升系统在高负荷运行工况下的稳定性。

在策略实施过程中，结合实时监测系统与动态风险评估模型，可以进一步增强冗余设计的智能化与自适应能力。通过采集风量、风压、瓦斯浓度、设备状态等关键运行参数，利用多源数据融合技术实现对系统工况的动态建模与实时评估，为冗余设计提供持续优化依据。当运行环境或设备状态发生变化时，优化模型能够快速调整冗余策略，确保系统可靠性维持在安全阈值内^[6]。同时，通过对不同冗余方案的生命周期成本分析，可实现从设计、建设到运行维护全流程的经济性评估，最大限度降低运营成本。该冗余设计策略能够在复杂矿井通风系统中实现高效、安全、低耗的目标，为提升煤矿生产的安全保障能力提供坚实技术支撑。

4 通风系统冗余设计优化方法的仿真验证与应用效果

基于煤矿通风系统冗余设计优化方法的仿真验证，是评估设计方案可行性和有效性的重要环节。通过建立高精度仿真模型，对主扇风机、局部通风机、风道及控制系统等关键部件的冗余配置进行多工况模拟，可以量化优化方案在不同运行条件下的性能表现^[7]。采用计算流体力学(CFD)方法对井下风流分布、风压变化及气体浓度动态特征进行建模，结合可靠性分析模型，对系统在正常运行、设备失效和高负荷工况下的安全性与稳定性进行评估。仿真结果能够清晰反映出不同冗余策略对风量均衡性、通风效率及系统故障恢复能力的影响，为优化方法的科学性提供直观依据。

在仿真过程中，针对冗余设计方案的性能参数进行多维度对比分析，通过调整备用风机数量、风道结构及控制策略等关键因素，综合评估优化方案的适应性与可靠性。通过引入多目标优化算法，将系统可靠度、能耗水平、气流稳定性和经济成本作为核心评价指标，能够有效揭示不同冗余配置对通风系统整体性能的影响。仿真结果显示，基于优化方法的冗余设计在设备失效情况下仍能保持稳定的风量供应，显著降低因单点故障引发的系统性风险。与此同时，通过冗余资源的合理分配，可减少不必要的备用设备投入，在保证安全裕度的前提下实现经济性与安全性的双重平衡。

在应用验证阶段，将优化后的冗余设计策略应用于实际矿井通风系统中，通过实时监测风量、风压、瓦斯浓度及设备状态等关键运行参数，对比分析优化方案实施前后的性能差异。结果表明，基于优化方法的冗余设计能够显著提升通风效率与系统稳定性，降低设备故障率，并有效延长关键部件的使用寿命。同时，配合大数据监测平台和智能控制系统，实现了通风系统的动态管理与自适应调节，使得在多变工况下依然保持可靠运行^[8]。仿真与应用结果的高度一致性证明了该优化方法的有效性，为煤矿通风系统设计、运行与维护提供了可复制的技术路径和实践经验。

5 结语

煤矿通风系统的可靠性与冗余设计优化在保障矿井安全生产中具有关键意义。基于可靠性建模、故障分析及多目标优化方法，能够系统性识别影响通风性能的风险因素，并提出更具针对性的设计策略。仿真验证与实际应用结果显示，优化后的冗余配置不仅显著提升了通风效率和系统稳定性，还有效降低了设备故障率与运行成本。该方法为复杂矿井环境下通风系统的安全设计和高效管理提供了科学依据和可行路径，具有较强的工程推广价值。

参考文献

- [1] 宋之豪,彭文川. 电驱动系统功能安全中冗余设计的作用与实现方法[J].汽车知识,2025,25(09):91-93.
- [2] 张松阳. 基于有线无线融合的煤矿多链路冗余通信系统设计[J].煤矿机械,2025,46(08):34-38.
- [3] 王宾. 既有建筑结构加固改造的可靠性评估与技术创新[J].中华建设,2025,(08):90-92.
- [4] 刘侠. 电气自动化控制系统的可靠性分析与提升策略研究[J].中国井矿盐,2025,56(04):28-29.
- [5] 王青如. 煤矿通风系统优化及其对煤尘控制的影响分析[J].内蒙古煤炭经济,2025,(13):142-144.
- [6] 雷崇,夏继豪,梅方晨,等. 基于竞争失效辨识的地铁潜污泵可靠性评估[J].液压气动与密封,2025,45(07):59-65.
- [7] 马忠涛. 矿井通风阻力影响因素分析及通风系统优化研究[J].内蒙古煤炭经济,2025,(12):10-12.
- [8] 高建峰. 基于物联网技术的煤矿矿井通风系统节能与安全控制[J].能源与节能,2025,(06):101-103.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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

