

高层民用建筑消防给水可靠性分析

张雪峰¹ 余学诚² 张驰³

1 厦门特建投建工集团有限公司

2 厦门市建设工程消防设计审查验收中心

3 福建上若工程技术有限公司

DOI:10.32629/btr.v9i2.5127

[摘要] 针对高层民用建筑消防给水系统易出现分区水力失衡、设备联动失效、运维衰减性故障等实战痛点,突破传统定性分析局限,从全生命周期视角剖析系统失效机理,构建分层可靠性量化评估体系。结合竖向分区供水特性、设备冗余配置及动态运维工况,精准识别隐蔽性薄弱环节,提出差异化冗余优化、水力动态调控、状态闭环监测的创新提升策略。研究可有效解决高层消防给水实战供水不稳、故障预判滞后问题,为高层建筑消防系统提质改造与新建工程优化提供实操参考。

[关键词] 高层民用建筑; 消防给水; 可靠性分析

中图分类号: TU998.1 **文献标识码:** A

Reliability Analysis of Fire Water Supply for High-rise Civil Buildings

Xuefeng Zhang¹ Xuecheng Yu² Chi Zhang³

1 Xiamen Special Construction Investment & Construction Group Co., Ltd.

2 Xiamen Construction Project Fire Design Review and Acceptance Center

3 Fujian Shangru Engineering Technology Co., Ltd.

[Abstract] In response to the practical challenges such as uneven water pressure distribution, failure of equipment interlock, and deteriorating operational performance in the fire water supply systems of high-rise civil buildings, this study breaks through the limitations of traditional qualitative analysis and analyzes the failure mechanisms of the systems from a full life cycle perspective. A hierarchical reliability quantitative assessment system is constructed. By considering the vertical zoning water supply characteristics, redundant equipment configuration, and dynamic operation conditions, hidden weak links are accurately identified. Innovative improvement strategies such as differentiated redundancy optimization, dynamic water pressure regulation, and state closed-loop monitoring are proposed. This research can effectively solve the problems of unstable water supply and delayed fault prediction in high-rise fire water supply, providing practical references for the quality improvement of high-rise building fire systems and the optimization of new construction projects.

[Key words] High-rise civil buildings; Fire water supply; Reliability analysis

引言

高层民用建筑层高跨度大、人员密集、火灾竖向蔓延快,消防给水系统是火灾扑救的主要生命线,其运行可靠程度直接影响到火灾扑救的效果以及建筑消防安全底线。现行规范大多只关注静态设计参数的达标,对于系统长期运维的衰减、高低区水力耦合的干扰、多设备联动的适配性等问题缺少足够的重视,造成大量的建筑消防给水系统在实战中出现设计达标而实际失效的情况。根据可靠性工程理论,结合高层供水工况特点,准确找到系统多维失效的原因,探寻精细化、动态化的可靠性改善途径,对于加强高层建筑消防安全有着十分重要的现实意义。

1 高层民用建筑消防给水系统核心特性

高层民用建筑消防给水系统不同于一般建筑,具有竖向分区层次多、供水压力跨度大、设备联动链路长、工况动态变化快等四个主要特点。建筑高度大于54m的高层住宅、大于24m的高层公建一般都采用临时高压分区供水方式,高低区管网独立设置又局部耦合,静水压力、动水压力差值可达0.5~1.2MPa,极易造成低区超压渗漏、高区压力不足的失衡现象。同时系统包含消防水池、稳压泵、主泵、减压阀、管网、传感器等十几种设备,任何一个节点出现故障都会导致整个系统的供水中断,系统串联失效风险比普通建筑高很多。系统长期处于待机状态,

表 1 准则层指标相关信息表					
评分区间	系统可靠性等级	工程处置建议	权重	准则层指标	核心考核内容
90~100 分	高可靠等级	系统工况稳定,无需改造,维持常规运维即可	35.0%	水力稳定性	高低区压力均衡度、水锤波动幅值、最不利点供水压力/流量达标率、分区水力耦合稳定性
70~89 分	合格等级	存在轻微隐患,针对性整改薄弱点位,强化专项巡检	30.0%	设备联动可靠性	设备联动时序准确率、泵组启停合格率、冗余设备代偿能力、信号传输稳定性
<70 分	低可靠风险等级	系统存在实战失效风险,需立即开展提质改造与全维度检修	20.0%	运维长效性	管网水力衰减速率、设备老化损耗程度、隐患整改闭环率、长期待机稳定性
-	-	-	15.0%	实战适配性	多用水工况适配能力、极端温湿度环境适配性、干湿系统切换稳定性

只有火灾工况启动,设备老化、管网锈蚀、阀门卡滞等隐性故障很难日常排查,造成平时无异常、战时掉链子的安全隐患。

2 高层民用建筑消防给水系统可靠性失效核心机理

2.1 水力耦合失效：分区供水的隐蔽性系统风险

目前大多数高层民用建筑采用竖向分区减压供水方式,普遍存在“单一减压阀控制、无分区水力缓冲”的设计缺陷,也是最容易被忽略的故障原因。常规设计只考虑静态静水压力达标,没有考虑火灾动态供水时水力波动耦合效应。火灾初期稳压泵启动、中期主泵切换、后期多点消火栓/喷头同时开启时,管网会产生瞬时水锤压力,高低区管网压力互相影响,造成高压供水压力突然降低,低压管网超压泄压。从实测数据可知,建筑高度在80—100m的高层公建,在工况切换时,水锤压力可以达到常规工作压力的1.3—1.8倍,容易造成减压阀失灵、管网接口渗漏,直接造成最不利点供水流量不足,不能满足初期火灾扑救的需求。同时部分老旧高层建筑的分区界限不清,没有按照0.8—1.2 MPa的压力阈值进行分区,长期水力失衡使设备不断磨损,造成可靠性逐渐下降。

2.2 设备联动失效：时序适配性故障与冗余缺陷

高层民用建筑消防给水系统是多设备串联联动的体系,可靠性失效不是单一设备损坏造成的,而是由于设备联动时序错位、冗余配置不合理造成的。一方面,稳压泵、主消防泵、电动阀门、压力传感器的联动时序存在毫秒级的偏差,传感器信号延迟、阀门启闭滞后都会造成泵组空转、管网泄压、供水中断等问题。尤其是火灾初期的10分钟黄金处置时间,设备联动滞后3到5秒就会造成初期供水中断,大幅降低灭火成功率。另一方面,目前的冗余配置存在着同质化的缺陷,大部分建筑只设置了双主泵冗余,没有区分出不同的故障类型来实现差异化的冗余,当出现电源波动、信号系统故障等共性诱因的时候,双泵就会同时失效,从而导致冗余防护完全失效。另外高位消防水箱稳压能力差,补水途径单一,不能适应高层高压远距离供水损耗,初期供水可靠性差。

2.3 运维衰减失效：全周期隐性损耗累积风险

与突发故障不同的是,高层民用建筑消防给水系统可靠性衰减主要是由于长期待机状态下隐性的损耗积累所造成的,而

传统研究很少涉及这种长效风险。系统常年处在静置待机的状态下,管网内会因为锈蚀、结垢、微生物的滋生而产生堵塞现象,造成管网通径变小、水力阻力增加,长期运行后最不利点的供水压力、流量逐渐下降,年均衰减率为3%—5%。稳压泵、止回阀这些高频待机设备存在密封件老化、卡滞、泄压等隐性故障,在日常巡检中只能发现表面破裂的问题,不能精确找到微小的损耗。另外,大部分建筑运维只做季度、年度的常规检查,没有对高低区不同工况进行专项检测,高压管网高空运维盲区、地下水池潮湿环境设备损耗等问题一直存在,造成系统实战失效。

2.4 工况适配失效：实战场景与设计参数脱节

现行消防给水设计均以标准稳态工况为依据来计算参数,不能适应高层民用建筑火灾复杂的实战场景,造成设计可靠性和实战需求相脱离。常规设计只考虑固定点位供水工况,没有考虑火灾时多层多点同时供水、风力影响、建筑排烟系统联动干扰等复杂的工况,在实战中多点位同时用水会导致管网水力分配不均,远端点位供水严重不足。严寒、高温等恶劣环境会对管网介质及设备运行参数产生影响,然而缺少相应的动态调节手段,造成系统可靠性降低。部分老旧建筑消防水池有效容积不足、补水途径单一,火灾延续时间内水源补给能力有限,且与市政管网接口缺乏应急切换装置,极端工况下易出现供水断档风险。

3 高层民用建筑消防给水系统可靠性量化评估体系

3.1 评估指标分层构建

打破传统单一指标的评价方式,根据前面的失效机理来建立四级分层量化评价体系,分为目标层、准则层、指标层和实测层。目标层是系统整体供水可靠性;准则层有水力稳定性、设备联动可靠性、运维长效性、实战适配性这四个部分;指标层把分区压力均衡度、水锤波动幅值、设备联动时序准确率、冗余代偿能力、管网衰减速率、极端工况适配度这些指标细分为12个具体的指标;实测层依靠现场实测、设备台账、运维数据、工况模拟来完成指标的量化赋值,彻底解决了传统定性评估模糊、无实操标准的问题。

3.2 量化评分与风险分级标准

用加权赋值法确定各个指标的权重,结合规范阈值和实战

实测数据来确定可靠性等级。水力稳定性权重为35%，主要考察高低区压力偏差、水锤抑制情况、最不利点供水达标率；设备联动可靠度权重为30%，考察设备启停正确率、时序偏差值、冗余故障代偿率；运维长效性权重为20%，考察设备损耗衰减速率、故障隐患整改率；实战适配性权重为15%，考察复杂工况、极端环境适应能力。综合评分按加权求和法计算，将系统可靠性划分为三个等级，同时结合各准则层指标权重与核心考核内容，构建高层民用建筑消防给水系统可靠性量化评级标准，具体如表1所示。

通过该量化分级体系，可将消防给水系统的可靠性由定性的、模糊的评价转变为定量的、具体的判定。当综合评分在90分及以上时判定为高可靠等级，70~89分为合格等级，低于70分则判定为低可靠风险等级并需立即开展提质改造。该体系可准确识别系统的薄弱环节，为靶向优化、运维整改、改造升级提供直观、可落地的数据支撑，有效解决了高层建筑消防给水系统评价缺乏细化标准、风险判定不准的行业问题。

4 高层民用建筑消防给水系统可靠性优化的创新策略

4.1 水力动态调控：分区耦合平衡优化

为了克服高低区水力耦合失效的问题，提出分级减压、水锤缓冲和动态调压相结合的一种新的优化方案，即一种新型的分层减压控制方法。在高低区分区主干管上设置智能调压阀组和微型水锤缓冲装置，可以有效地抑制工况切换瞬间的压力波动，使水锤波动幅值控制在常规工作压力的1.1倍以内。根据建筑高度准确划分供水分区，80m以下的建筑为二级分区，80m—120m的建筑为三级分区，严格控制单区压力差值。同时安装水力动态监测模块，对管网压力、流量进行实时监测，根据用水工况变化自动调节供水压力，解决静态调节不能适应动态火灾工况的问题，保证全时段高低区供水平衡稳定。

4.2 差异化冗余配置：破解联动失效难题

打破传统同质化双泵冗余的局限，创建“设备冗余+链路冗余+电源冗余”三重差异化的冗余架构。设备上主泵和备用泵采用不同的型号、不同的启动方式的差异化配置来避免共性故障同时失效的情况；链路方面布设双路独立供水管网、双信号传输链路，防止单点链路中断造成整个系统失效；电源上除了常规的双市电冗余之外，还增加了微型应急储能模块，以应对瞬时电压波动、短时断电工况。另外对设备联动时序程序进行优化，利用数字化调试校准各个设备的启闭时差，使联动时序误差控制在1秒之内，保证火灾初期供水不出现断层现象，极大提高了系统的应急容错能力。

4.3 全周期闭环运维：抑制可靠性衰减

创建与常规巡检不一样的全生命周期精细化运维体系，对

隐性损耗的积累进行有针对性的解决。制订分层差异化的运维计划，对高区高空管网执行季度水压试验加年度管网冲洗除垢作业，地下设备区增加防潮防腐检测设备。采用状态预判的方式，利用历年运维数据来建立设备损耗衰减模型，对管网锈蚀、设备老化进行准确的预测，从而达到提前预警、及时维修的效果。创建智慧监测平台，对设备的运行状况以及管网的水力参数实施实时采集，构建“监测—分析—预警—整改—复核”的闭环运维流程，从根源上阻止系统可靠性持久衰减。

4.4 实战工况适配优化：缩小设计与实战偏差

根据高层民用建筑火灾复杂的实战环境，对系统的设计以及控制逻辑进行改进，提高在极端情况下系统的适应性。设计阶段采用多工况水力模拟计算，把多层同时用水、环境干扰等实战场景加入进来，对管网供水承载力及压力稳定性加以校核。为了解决高低区湿式、干式系统衔接的难题，对切换控制程序进行优化，使干湿系统可以无缝切换，同时又能起到冗余的作用。极端环境下启动自适应调节模式，低温工况调整管网泄压及稳压参数，防止静压积聚导致管件疲劳损伤，高温工况改进泵组散热和压力调节功能，从根本上解决了传统系统工况匹配度低、实战可靠性差的问题。

5 结论

本文以高层民用建筑消防给水系统实战痛点为出发点，打破传统表层设计分析的局限，从水力耦合、设备联动、运维衰减、工况适配四个方面入手，对系统可靠性隐性失效机理进行深入剖析，创建起分层量化可靠性的评价体系，提出三维差异化冗余、动态水力调节、全周期闭环运维等新的优化途径。研究主要针对系统的动态可靠性和实战适应性进行研究，从而有效地解决由于设计达标而造成的实战失效问题。相关分析结果可以直接应用于高层民用建筑消防给水系统新建设计、提质改造和运维管理，提高系统的全生命周期运行可靠性，给高层建筑消防安全防控提供有力的技术支持。

[参考文献]

- [1]祁永东.高层民用建筑中消防给水系统的安装要点及其应用[J].水上安全,2024,(10):118-120.
- [2]千庆增,戴立远.高层民用建筑消防给水系统设计探讨[J].水上安全,2023,(2):122-124.
- [3]况东.超高层建筑消防给水监控系统的设计及设计[J].现代建筑电气,2023,14(2):52-56.
- [4]何江,王凌燕.高度大于250m民用建筑消防给水竖向供水方式探讨[J].给水排水,2022,58(8):82-86.

作者简介：

张雪峰(1977--),男,汉族,江西高安人,本科,高级工程师,研究方向：建设工程机电安装及消防工程技术质量管理。