

某抽水蓄能电站总排风竖井设计方案的对比分析

张旭佳¹ 石雅珊² 张佳伟³

1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司；

2. 浙江水晶光电科技股份有限公司；3. 广东优力普物联科技有限公司

DOI:10.32629/jpm.v7i6.8962

[摘要] 抽水蓄能电站深埋式地下厂房通风系统直接决定地下机电设备运行环境、人员作业舒适度与火灾疏散安全，总排风竖井作为全厂永久排风与事故排烟的核心竖向通道，其断面尺寸、竖井数量组合方案直接影响通风阻力、风机装机容量、长期运行能耗与工程综合造价。本文以4台300MW机组抽水蓄能电站为工程依托，从通风效果、机电设备初投资、全生命周期运行能耗、噪声环境影响多维度开展技术经济比选。结果表明：多竖井小直径方案井内风速偏高、系统风阻显著增大，风机装机与常年电费成本大幅上升，且竖井出口噪声超标风险更高；单井大直径方案通风阻力小、风机配置简洁、长期运维成本最低，综合技术经济性最优。研究结论可为国内同类型深埋抽蓄电站总排风竖井通风系统优化设计提供理论依据与工程参考。

[关键词] 抽水蓄能电站；地下厂房；总排风竖井；反井钻机；技术经济对比

Comparative Analysis of Design Schemes for the Main Exhaust Vertical Shaft of a Pumped Storage Power Station

Zhang Xujia¹ Shi Yashan² Zhang Jiawei³

1. China Electric Power Construction Group East China Survey and Design Institute Co., Ltd.;

2. Zhejiang Crystal Optoelectronics Technology Co., Ltd.;

3. Guangdong Youlipu Internet of Things Technology Co., Ltd.

[Abstract] The ventilation system of deep-buried underground powerhouse in pumped storage power stations directly determines the operating environment of underground mechanical and electrical equipment, personnel comfort during operations, and fire evacuation safety. As the core vertical passage for permanent exhaust and emergency smoke discharge throughout the plant, the cross-sectional dimensions and shaft configuration of the main exhaust vertical shaft significantly influence ventilation resistance, fan installation capacity, long-term operational energy consumption, and overall project cost. Based on a pumped storage power station with four 300 MW units, this study conducts a technical and economic comparison across multiple dimensions—including ventilation performance, initial investment for mechanical/electrical equipment, lifecycle operational energy consumption, and noise environmental impact. Results indicate that the multi-shaft, small-diameter scheme exhibits higher internal wind speeds, significantly increased system resistance, substantially elevated fan installation costs and annual electricity expenses, and greater risks of noise exceedances at shaft outlets; whereas the single-shaft, large-diameter scheme offers lower ventilation resistance, simpler fan configuration, lowest long-term operation and maintenance costs, and optimal overall technical and economic performance. These findings provide theoretical foundations and engineering references for optimizing ventilation system designs of main exhaust vertical shafts in similar domestic deep-buried pumped storage power stations.

[Key words] pumped storage power station; underground powerhouse; main exhaust vertical shaft; reverse well drilling rig; technical and economic comparison

1.引言

1.1 研究背景与工程意义

新型电力系统建设背景下，抽水蓄能电站作为电网调峰、调频、备用的核心储能载体，国内在建、待建项目数量持续增长。依据《抽水蓄能电站设计规范》（NB/T 10072-2018）^[1]要求：地下厂房及其附属洞室的布置设计应按照“一洞多用”，尽可能的减少洞室数量的原则做好统一规划设计。

地下厂房总排风竖井一般兼顾通风与排烟功能。竖井竖向高差大、风道管路长，气流沿程阻力与局部阻力叠加效应显著，竖井断面风速是决定系统风压、风机选型、运行能耗的核心参数；若竖井断面偏小、数量过多，井内气流流速超标，通风阻力呈平方级增长，直接抬高风机装机容量与全生命周期电费，同时竖井出口高速气流引发的空气动力噪声会对山体周边环境造成噪声污染。

现阶段国内抽蓄电站竖井施工已全面普及反井钻机工艺，不同型号钻机可成型 2.4m~7m 多种直径竖井，设计阶段可灵活调整竖井数量与单井直径组合，形成多套通风方案。但现有工程设计中，多数项目仅依靠经验选取竖井尺寸，缺乏多方案量化技术经济对比，易出现竖井方案选型保守、长期运行能耗偏高的问题。因此，针对 4 台 300MW 标准机组抽蓄电站开展多规格排风竖井方案对比分析，具备较强工程应用价值。

1.2 本文研究内容与技术路线

本文依托某 4×300MW 深埋抽水蓄能电站，选取 5 组不同竖井直径、数量组合方案。技术路线：1) 阐述地下厂房洞室布局、总排风竖井兼顾通风与排烟功能，明确通风系统气流组织形式；2) 梳理通风阻力、风机功率、年运行能耗、噪声计算理论公式，确定计算边界条件；3) 定量计算各方案通风断面、风速、系统风压、风机功率、设备投资、年电费、出口噪声；4) 从通风效果、设备初投资、长期能耗、噪声环境、施工可行性多角度对比各方案优劣；5) 综合机电通风专业结论，结合土建施工风险、工期、投资给出最优推荐方案，总结通用设计建议。

2.抽水蓄能电站地下厂房总排风竖井功能与通风系统架构

2.1 地下厂房洞室群布置概况

本工程为 4 台单机容量 300MW 抽水蓄能电站，地下厂房采用深埋平行洞室群布置，核心洞室分为三大功能分区，分区之间通过母线洞、尾闸交通洞连通：1) 主厂房；2) 主副厂房；3) 主变洞区。配套交通与通风洞室：进厂交通洞（全厂主进风通道）、通风兼安全洞（分隔为进风侧与排风侧）、总排风竖井、500kV 出线洞。

2.2 总排风竖井两大核心功能

2.2.1 正常运行工况：排风功能

依据《水力发电厂供暖通风与空气调节设计规范》（NB/T 35040-2014）^[2]，地下厂房各洞室需持续通入新鲜空气，带走

设备散热，控制洞内温度。本工程采用直进直排气流组织：室外新鲜空气通过进厂交通洞送入主厂房、主变洞、尾闸洞，带走主要区域的热量及污浊气体，经排风平洞汇至风机房，由总排风机加压后通过总排风竖井排至室外。

2.2.2 火灾事故工况：机械排烟

地下厂房为密闭受限空间，一旦发生火灾，高温烟气会快速填充洞室，遮挡疏散视线、产生有毒气体，严重威胁人员逃生与消防救援。依据《建筑防烟排烟系统技术标准》（GB51251-2017）^[3]及抽蓄电站专项规范，地下厂房火灾时需切换至排烟模式，3 台总排风机满负荷运行，高温烟气全部通过总排风竖井排出地面，竖井断面尺寸需同时满足正常排风与火灾排烟双重风量需求。

2.3 全厂通风系统完整气流路径

1) 新风路径：室外大气→进厂交通洞→主厂房发电机层、主变洞主变层、尾闸洞→各层设备夹层；2) 污浊气体汇集路径：主厂房中间层、主变洞通风设备层、尾闸洞排风侧→通风兼安全洞排风廊道→全厂总排风平洞→排风竖井下平洞风机房；3) 排风出口路径：风机加压→总排风竖井→山体地表排风出口。

3.总排风竖井通风计算基础理论与计算边界条件

3.1 通风阻力核心计算公式

通风系统总阻力由沿程阻力与局部阻力两部分组成，计算公式分别如下：

$$\Delta P_f = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v^2}{2}$$

式中： ΔP_f 竖向沿程摩擦阻力；

λ 井壁摩擦阻力系数，反井钻机成型光滑井壁取 0.022；

L 竖井竖向长度，320m；

D 竖井净直径，m；

ρ 空气密度，常温取 1.2kg/m³；

v 竖井内气流平均风速，m/s。

$$\Delta P_l = \varepsilon \cdot \frac{\rho v^2}{2}$$

式中： ΔP_l 局部摩擦阻力；

ε 局部阻力包含平洞转竖井弯头、竖井出口扩散损失，综合局部阻力系数取 1.8；

ρ 空气密度，常温取 1.2kg/m³；

v 竖井内气流平均风速，m/s。

3.2 风机功率、年用电量、电费计算方法

$$\text{风机轴功率计算公式：} N = \frac{Q \cdot P}{3600 \cdot \eta}$$

式中： Q 单台风机风量，m³/h；

P 系统总风压，Pa；

η 风机综合效率，取 0.82。

年运行总电量计算公式： $W=3 \cdot N \cdot t$

t ：2920h（机组年均等效运行小时数）

年电费： $C=W \cdot s$

工业电价 $s=0.288$ 元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$

3.3 计算统一边界条件

- 1) 全厂设计总排风量恒定 60 万 m^3/h , 5 套方案风量不变;
- 2) 地下风机房统一配置 3 台总排风机, 同时运行;
- 3) 竖井竖向高度 320m, 下部排风平洞长度 1095m;
- 4) 反井钻机成型竖井内壁光滑, 摩擦系数统一取值;
- 5) 室外环境、空气温度、空气密度统一按常温 20℃计算;
- 6) 风机设备造价、噪声值依据国内水电通风设备厂商通用报价与实测数据取值。

3.4 经济风速选取依据

行业工程经验表明: 抽水蓄能电站永久排风竖井经济断面

风速控制在 4~5m/s 区间。风速低于 4m/s 时, 竖井断面过大, 土建开挖、衬砌投资上升; 风速高于 5m/s 后, 通风阻力随风速平方快速增长, 风机装机与常年电费显著增加, 同时高速气流产生高噪声, 需增设消声器, 进一步抬高设备投资。本文 5 套方案风速覆盖 2.4m~6.6m, 可完整对比风速偏离经济区间带来的负面影响。

4.5 五种总排风竖井设计方案量化对比分析

结合市场反井钻机标准成型直径, 设置 5 组“竖井数量+单井直径”对比方案, 方案一为单井大直径方案, 方案二、三、四为双井、三井中等直径方案, 方案五为多井小直径方案, 全部方案总排风量统一 60 万 m^3/h , 各项指标计算结果汇总见表 1。

表 1 五种排风竖井方案技术经济指标对比表

序号	对比指标	方案一单井 $\phi 7\text{m}$	方案二双井 $\phi 4\text{m}$	方案三三井 $\phi 4\text{m}$	方案四双井 $\phi 5\text{m}$	方案五八井 $\phi 2.4\text{m}$
1	全厂总排风量 / 万 m^3/h	60	60	60	60	60
2	单井净直径 /m	7	4	4	5	2.4
3	竖井总断面面积 / m^2	38.5	25.1	37.7	39.3	36.2
4	竖井平均风速 /(m/s)	4.3	6.6	4.4	4.2	4.6
5	系统总风压 / Pa	550	750	600	570	720
6	单台风机额定功率 /kW	55	75	55	55	75
7	年度总耗电量 /(kW·h)	48.2×10^4	65.7×10^4	48.2×10^4	48.2×10^4	65.7×10^4
8	年度通风电费 / 万元	13.9	18.9	13.9	13.9	18.9
9	竖井出口噪声 /dB	105	110	106	106	106
10	3 台风机总设备投资 / 万元	64.5	84	64.5	64.5	84

4.1 通风效果与流体阻力对比分析

1) 方案二总通风断面仅 25.1 m^2 , 为 5 套方案最小, 井内风速达到 6.6m/s, 远超 5m/s 经济风速上限。该方案系统总风压高达 750Pa, 高出方案一 200Pa。高风压下风机气流扰动剧烈, 竖井内部易产生涡流、气流分离, 火灾排烟工况下烟气排出速度受限, 排烟效率下降, 存在洞内烟气滞留风险, 通风性能最差。

2) 方案五总断面 36.2 m^2 , 风速 4.6m/s 略高于经济风速上限, 出口局部阻力, 局部阻力叠加效应明显, 系统风压 720Pa, 排风阻力显著高于单井方案, 多条竖井气流分配不均, 易出现部分竖井风量偏小、排烟短路问题。

3) 方案一、三、四总断面面积接近, 风速稳定在 4.2~4.4m/s, 处于最优经济风速区间, 气流平顺、涡流少, 系统风压 550~600Pa, 正常排风与火灾排烟工况下气流组织稳定, 通风效果优良。

4.2 机电设备初投资对比

风机设备投资与风机额定功率直接相关: 1) 方案二、五单台风机功率 75kW, 风机总投资 84 万元, 高出其他方案

19.5 万元, 设备一次性投入成本增加明显; 2) 方案一、三、四风机功率均为 55kW, 设备总投资 64.5 万元, 机电初投资最低。

4.3 全生命周期运行能耗与年度电费对比

电站设计运行周期 60 年, 长期电费是方案选型核心控制指标: 1) 方案二、五年耗电量 65.7 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 年电费 18.9 万元; 方案一、三、四年电费仅 13.9 万元, 每年节约电费 5 万元, 60 年运营周期累计节约电费 300 万元, 全生命周期节能优势突出; 2) 高功率风机常年满负荷运行, 设备磨损速度更快, 风机轴承、电机检修频次提升, 运维人工、备件更换成本同步增加, 多竖井方案还需定期渗水分段检修, 运维工作量大幅上升。

4.4 竖井出口噪声环境影响分析

竖井出口高速气流空气动力噪声随风速升高显著增大, 工程竖井出口一般位于山体边坡, 且临近生态保护区域, 噪声限值要求 $\leq 108\text{dB}$: 1) 方案二风速 6.6m/s, 出口噪声 110dB, 超出环保控制标准, 必须增设大型多级消声器, 进一步抬高设备投资与竖井土建尺寸; 2) 方案一风速 4.3m/s, 噪声 105dB,

满足环保限值, 仅配置基础消声装置即可, 噪声治理成本最低; 3) 方案三、四、五噪声 106dB, 虽达标, 但多条竖井多点噪声源叠加, 山体周边噪声影响范围更广, 环境协调难度更大。

4.5 多竖井方案土建施工短板补充分析

仅从机电通风维度可直接排除方案二、五, 若结合竖井土建开挖、衬砌、支护、施工风险综合分析, 多竖井方案仍存在多重劣势: 1) 征地与边坡开挖: 多条竖井需在山体顶部开辟多个施工平台, 边坡开挖范围扩大, 山林征地、边坡防护工程量成倍增加; 2) 施工工期: 多竖井需多台反井钻机同步进场, 设备投入量大, 单钻机施工则需分期开挖, 总工期延长 30% 以上; 3) 围岩稳定风险: 山体顶部多条竖井近距离并行开挖, 洞室群围岩应力叠加, 断层、节理裂隙发育区域易出现围岩变形、垮塌, 支护工程量加大; 4) 衬砌与防渗: 每条竖井均需防渗排水系统, 竖井数量越多, 土建总投资显著高于单井方案。

5. 方案综合比选与最优方案推荐

5.1 各方案优劣汇总定性分析

1) 方案二: 井内风速超标、通风阻力最大, 风机功率、初投资、年电费、噪声全部指标最差, 通风与排烟可靠性不足, 直接排除;

2) 方案五: 虽总断面满足风量需求, 但竖井数量过多, 系统局部阻力叠加、风机装机偏大、长期能耗高、多点噪声污染, 土建施工复杂、风险高, 不予推荐;

3) 方案三: 通风风速、风压、风机能耗指标与方案一接近, 但三条竖井同步开挖, 土建平台、边坡支护、衬砌工程量大幅增加, 土建投资、施工工期、围岩风险均高于单井方案, 综合经济性弱于方案一;

4) 方案四: 通风性能、能耗、设备投资与方案一基本持平, 但两条竖井需两套独立检修设施, 土建附属工程量高于单井, 无明显优势;

5) 方案一: 竖井风速处于经济最优区间, 系统风阻最低, 风机装机容量小, 设备初投资、年度运行电费最低, 竖井仅 1 处地面出口, 噪声治理简单, 土建仅需单个施工平台, 开挖、衬砌、边坡防护工程量最小, 施工工期短、围岩扰动风险低, 通风、机电、土建多专业协同最优。

5.2 最优方案确定

综合通风流体计算、机电设备经济指标、噪声环保、土建施工风险、全生命周期成本五大维度, 推荐方案一: 单根总排风竖井, 净直径 7m。

6. 结论与工程设计建议

6.1 主要研究结论

1) 对于 300m 级深埋抽水蓄能电站总排风竖井, 竖井断面风速是决定通风系统综合性能的核心指标, 风速控制在 4~5m/s 可实现通风阻力、设备投资、运行能耗三者最优平衡; 风速超过 6m/s 时, 工程综合效益大幅下降。2) 多竖井小直

径组合方案虽总通风断面可满足风量需求, 但多条竖井带来大量局部阻力叠加、多点噪声源、土建工程量激增、运维难度上升等连锁问题, 仅在单井开挖地质条件极恶劣、无法布置大直径竖井的特殊工况下才可考虑。3) 反井钻机施工工艺适配 2.4m~7m 全规格排风竖井, 大直径单井方案施工工序更少、井壁成型质量更好, 通风沿程摩擦阻力低于多竖井组合, 是常规地质条件下深埋抽蓄电站排风竖井首选形式。4) 从全生命周期成本视角, 不能仅依靠竖井土建一次性投资判断方案优劣, 需叠加风机设备采购、60 年运行电费、运维检修、噪声治理等综合成本, 单井大直径方案长期节约能耗产生的经济效益远高于土建小幅增量投资。

6.2 同类工程通用设计建议

1) 方案比选阶段必须建立多尺寸、多数量竖井组合模型, 通过通风阻力量化计算, 同步对比机电、土建、环保多专业指标, 杜绝仅依靠经验选取竖井断面; 2) 总排风竖井优先采用单根大直径布置, 断面风速严格控制在 5m/s 以内, 若地质条件受限无法布置单井, 可采用 2 根中等直径竖井, 严禁采用 3 根及以上小直径竖井方案; 3) 竖井施工优先选用反井钻机工艺, 利用其井壁光滑、成型规整优势降低通风沿程阻力, 设计阶段结合钻机标准成型直径匹配竖井尺寸, 避免非标断面增加施工成本; 4) 竖井出口同步开展噪声专项计算, 风速超过 5m/s 时需提前预留消声器安装空间, 从源头控制气流噪声对周边生态、居民区的影响; 5) 通风系统设计需同步校核火灾排烟工况, 竖井断面、风机风压必须满足高温烟气排放需求, 正常通风与事故排烟共用一套竖井系统, 不单独增设排烟竖井控制土建投资。

6.3 研究不足与展望

本文仅针对固定总排风量 60 万 m^3/h 、竖井高度 320m 的 4×300MW 标准抽蓄电站开展对比, 后续可依托 CFD 数值模拟建立三维气流场模型, 细化竖井内部涡流、烟气分层流动规律; 同时可拓展不同埋深、不同装机容量、不同围岩条件下竖井方案对比, 形成成套标准化选型曲线, 为行业设计提供更完善的量化参考依据。

[参考文献]

[1] 国家能源局. NB/T 10072-2018 抽水蓄能电站设计规范 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2019.

[2] 水电水利规划设计总院. NB/T 35040-2014 水力发电厂供暖通风与空气调节设计规范 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2014.

[3] 住房和城乡建设部. GB 51251-2017 建筑防烟排烟系统技术标准 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.

[4] 李学良. 抽水蓄能电站极硬岩多层反井钻井施工技术 [J]. 建井技术, 2026, 47 (1): 27-31.