

T/CMEEEA

团 体 标 准

T/CMEEEA XXXX—2026

压缩空气储能电站长周期运维技术要求

Technical requirements for long-cycle operation and maintenance of compressed air
energy storage power stations

(征求意见稿)

2026 - XX - XX 发布

2026 - XX - XX 实施

中国机电设备工程协会 发布

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 总则与基本要求	1
4.1 基本原则	1
4.2 安全性要求	1
4.3 运行可靠性要求	2
4.4 环境与能效要求	2
5 系统结构与功能要求	2
5.1 系统组成	2
5.2 功能分解与接口	2
5.3 关键系统结构要求	3
6 技术要求与过程要求	3
6.1 运行工况与参数控制	3
6.2 设备状态监测技术要求	3
6.3 长周期检修与周期要求	4
6.4 预防性维护与状态检修过程	4
6.5 备品备件与寿命管理	4
7 运维管理与性能要求	4
7.1 运维组织与人员要求	4
7.2 运维数据与信息化要求	4
7.3 性能指标与考核	5
7.4 应急管理 with 事故处置	5
附 录 A（规范性）关键设备性能试验方法	6

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由江苏国信苏盐储能发电有限公司提出。

本文件由中国机电设备工程协会归口。

本文件起草单位：江苏国信苏盐储能发电有限公司、华电电力科学研究院有限公司、中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司、中国科学院广州能源研究所、山东建筑大学、中盐盐穴综合利用股份有限公司、中国长江三峡集团有限公司、北京中研华采技术服务有限公司。

本文件主要起草人：周又可、张东兴、赵珈卉、宋永兴、谢卫炜、谢宁宁、朱乐平、张健、葛艺、陈留平、常勇、刁非、徐孜俊、张国强、郑志美、王兆福、钟声远、乐志斌、夏卫彬。

压缩空气储能电站长周期运维技术要求

1 范围

本文件规定了压缩空气储能电站在长周期运行维护过程中的总则与基本要求、系统结构与功能要求、技术要求与过程要求、运维管理与性能要求等内容。

本文件适用于以压缩空气为主要储能介质、额定功率 5 MW 及以上、设计连续安全运行年限不小于 25 a 的电网并网型压缩空气储能电站的长周期运维活动。其他规模或特殊工况的压缩空气储能装置可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 2888 风机和罗茨鼓风机噪声测量方法
- GB/T 5226.1 机械电气安全 机械电气设备 第1部分：通用技术条件
- GB/T 12325 电能质量 供电电压偏差
- GB/T 15706 机械安全 设计通则 风险评估与风险减小
- GB/T 43687 电力储能用压缩空气储能系统技术要求
- GB 50016 建筑设计防火规范
- GB 50019 工业建筑供暖通风与空气调节设计规范
- GB 50093 自动化仪表工程施工及质量验收规范
- DL/T 499 农村低压电力技术规程
- DL/T 5145 火力发电厂制粉系统设计计算技术规定
- NB/T 47014 机械安全 设计通则 风险评估与风险减小

3 术语和定义

GB/T 43687界定的下列术语和定义适用于本文件。

3.1

压缩空气储能电站 compressed air energy storage power station

利用低谷电能驱动压缩机将空气压缩并储存在地下盐穴、矿井或高压容器中，在需电高峰通过膨胀机/燃气轮机等装置释放压缩空气能量发电的电站。

4 总则与基本要求

4.1 基本原则

- 4.1.1 压缩空气储能电站长周期运维应遵循“安全第一、预防为主、状态检修、全寿命管理”的原则。
- 4.1.2 运维单位应建立覆盖设计、建设、运行、检修、退役全过程的技术档案和数据管理体系，保证运维决策基于可靠数据。
- 4.1.3 运维活动应符合国家有关法律法规、特种设备安全技术规范以及相关国家标准、行业标准。

4.2 安全性要求

4.2.1 储气系统、压力管道、关键旋转机械等应满足 GB/T 15706、NB/T 47014 以及现行特种设备安全技术规范的要求，确保在设计寿命内不发生超压失稳、泄漏或爆裂事故。

4.2.2 电站消防设计和运维管理应满足 GB 50016 及相关消防规范要求。关键机电室、变压器室、油系统区域应配置自动灭火系统或快速手动灭火设施。

4.2.3 控制系统应具有紧急停机（ESD）、联锁保护和 safety 仪表系统（SIS）功能，重要回路应具备冗余设计。

4.3 运行可靠性要求

4.3.1 电站在设计运行寿命期（不小于 25 a）内，其等效可利用率应不低于 95 %。

4.3.2 年度非计划停机次数不宜超过 3 次，单次非计划停机时间宜不超过 8 h。

4.3.3 储气系统年平均泄漏率应不大于 0.1%（以储气额定容积计）。

4.4 环境与能效要求

4.4.1 噪声排放应符合 GB/T 2888、GB 50019 等标准对厂界噪声限值的规定，夜间噪声不应超过 55 dB(A)，昼间不应超过 65 dB(A)。

4.4.2 电站的年平均循环回路能量效率（ $E_{\text{round-trip}}$ ）应不低于 50%；采用余热回收和热管理优化后的电站，年平均能量效率宜达到 60%~70%。

4.4.3 运行产生的润滑油、冷却液、废水等应按国家环境保护标准分类收集和处理。

光致变色材料在特定波长和强度的光作用下，其分子结构会发生变化，导致对光的吸收峰值改变，从而发生颜色变化，且这种变化一般是可逆的。本文件光致变色材料分为无机光致变色材料、有机光致变色材料：

a) 无机光致变色材料：变色机理通常可用双电荷注入/抽出模型或小极化子模型解释。以 WO_3 为例，在紫外光照射下，价带中电子被激发到导带中，产生电子空穴对，光子电子被 W(VI) 捕获，生成 W(V) ，同时光子空穴氧化薄膜内部或表面的还原物种，生成质子 H^+ ，注入薄膜内部，与被还原的氧化物结合生成蓝色的钨青铜 H_xWO_3 。

b) 有机光致变色材料：变色则通常伴随着价键异构、顺反异构、键断裂等光化学反应。偶氮苯类化合物变色机理是由于含有 $-\text{N}=\text{N}-$ 基团，形成顺反异构结构所引起的。

本文件通过测量材料在特定光照条件下的变化，量化评价其光致变色性能。

5 系统结构与功能要求

5.1 系统组成

压缩空气储能电站一般由以下子系统组成：

- 进气与预处理系统；
- 压缩机系统及其驱动装置；
- 储气系统（盐穴、矿井、压力容器等）；
- 热管理与余热回收系统；
- 膨胀机/发电机系统；
- 电气与并网系统；
- 控制与保护系统（DCS、SIS、监测诊断平台等）；
- 辅助系统（冷却、润滑、消防、供配电、空压机房通风等）。

5.2 功能分解与接口

表1给出了压缩空气储能电站典型系统功能分解与运维关注点。

表1 系统功能分解及运维关注点

子系统	主要功能	关键设备	运维关注指标
进气预处理	空气过滤、除尘、除湿、消音	进气滤网、滤筒、消音器	压降 $\Delta p < 500 \text{ Pa}$ 、过滤效率 $\geq 99\%$
压缩机系统	多级压缩空气，提高压力	多级离心/螺杆压缩机	等熵效率 $\geq 80\%$ ，振动 $\leq 4.5 \text{ mm/s}$

储气系统	储存高压空气	盐穴/矿井/压力容器	年泄漏率 $\leq 0.1\%$ ，内压稳定、形变可控
热管理系统	余热回收及温度控制	换热器、蓄热罐	换热效率 $\geq 85\%$ ，温度稳定性 $\pm 3\text{ }^\circ\text{C}$
膨胀与发电	膨胀做功驱动发电机	膨胀机、发电机组	总效率 $\geq 90\%$ ，起停成功率 $\geq 99\%$
电气并网	电能变换、调压并网	主变压器、开关柜	电压偏差符合 GB/T 12325 要求
控制保护	监测、控制、保护及联锁	DCS、SIS、PLC	系统可用率 $\geq 99.95\%$ ，时间同步误差 $\leq 1\text{ }\mu\text{s}$
辅助系统	冷却、润滑、排水、消防等	水泵、风机、油泵	关键参数满足设备技术说明书要求

5.3 关键系统结构要求

5.3.1 储气系统结构要求

- a) 盐穴储气应符合相关盐穴储气设计与运行规范，顶板厚度、围岩强度系数应满足长期稳定条件，安全系数一般不小于 1.5。
- b) 压力容器储气系统的设计、制造、检验与使用应符合 NB/T 47014 及现行特种设备安全规范，设计压力 P_{design} 应不小于 1.1 倍的最高工作压力 P_{max} 。
- c) 储气管道应设置足够的放空、泄压和防爆设施，布置应便于检修和泄漏检测。

5.3.2 压缩机/膨胀机结构要求

- a) 转子应做动平衡试验，其残余不平衡量应符合相关机械标准，机座振动速度宜小于 4.5 mm/s(rms) 。
- b) 轴承选用寿命 L_{10} 不小于 100 000 h 的轴承或等效结构，润滑系统应具备在线颗粒度监测能力。
- c) 重要壳体、转子等受压部件应有可实施定期无损检测的结构预留（探伤口等）。

5.3.3 控制与监测系统结构要求

- a) 控制系统宜采用分层分布式结构，现场采集层、控制执行层、监控管理层相对独立。
- b) 对储气系统压力、温度、流量等关键参数应设置冗余测点（至少 2oo3 架构），确保安全联锁逻辑可靠。
- c) 长周期运维需配置状态监测与故障诊断平台，具备趋势分析、寿命评估和预警推送等功能。

6 技术要求与过程要求

6.1 运行工况与参数控制

典型压缩空气储能电站主要运行参数宜满足表 2 要求（示例值，具体数值应根据设计文件确定）。

表 2 典型运行参数控制要求

参数	符号	典型范围	控制要求
储气压力	P_s	6 MPa~12 MPa	波动范围不大于 $\pm 0.5\text{ MPa}$
储气温度	T_s	$10\text{ }^\circ\text{C}\sim 50\text{ }^\circ\text{C}$	升温/降温速率 $\leq 5\text{ }^\circ\text{C/h}$
压缩机出口温度	$T_{c, \text{out}}$	$80\text{ }^\circ\text{C}\sim 160\text{ }^\circ\text{C}$	应低于材料允许温度 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 以上
膨胀机入口压力	$P_{t, \text{in}}$	5 MPa~10 MPa	不得低于设计值的 90 %
膨胀机入口温度	$T_{t, \text{in}}$	$500\text{ }^\circ\text{C}\sim 650\text{ }^\circ\text{C}$ （燃烧型）	偏差应在设计值 $\pm 15\text{ }^\circ\text{C}$ 内
流量波动	ΔQ	—	稳态运行时波动不大于 $\pm 3\%$
电站升负荷速率	dP/dt	$2\%\sim 10\%\text{ Pn/min}$	稳态运行时波动不大于 $\pm 3\%$
机组启停次数（年）	$N_{\text{start/yr}}$	200~1000 次	实际不宜超过设计值

6.2 设备状态监测技术要求

6.2.1 旋转机械（压缩机、膨胀机、辅助风机等）应配置振动在线监测系统，测量点至少包括：轴承座水平、垂直、轴向三个方向，采样频率不低于 10 kHz。

6.2.2 应建立基于 ISO 或相关标准的振动等级评价表，并结合设备特点设定报警值和停机值。

例如：报警值：4.5 mm/s (rms)；停机值：7.1 mm/s (rms)。

6.2.3 关键压力容器和管道应采用定期无损检测（UT、RT、MT、PT 等），无线泄漏监测或光纤监测作为辅助手段，以评估裂纹扩展及腐蚀情况。

6.3 长周期检修与周期要求

根据设备重要程度分为 A 类（关键）、B 类（重要）、C 类（一般），并制定相应检修周期。示例如表 3。

表 3 典型检修周期建议（示例）

设备类别	典型设备	例行点检周期	预防性检修周期	大修周期
A	主压缩机、主膨胀机、主变压器、储气容器	每日~每周	1 a~2 a	5 a~8 a
B	辅助风机、水泵、油泵	每周~每月	2 a~3 a	6 a~10 a
C	一般电缆、照明、非关键管道	每月~每季度	3 a~5 a（视状态调整）	10 a~15 a（或需时）

注：具体周期应结合 DL/T 499、DL/T 5145、设备制造商技术文件和运行经验优化。

6.4 预防性维护与状态检修过程

6.4.1 运维单位应建立同一设备“缺陷—点检—状态评价—检修决策—检修执行—效果评估”的闭环流程。

6.4.2 对于储气系统、主机设备等 A 类设备，应优先采用状态检修（condition-based maintenance）策略，配合在线监测和健康指数（HI）模型定期评估。

6.4.3 检修过程中的拆卸、检测、复装应严格执行 GB/T 5226.1、GB 50093 等相关施工与验收规范，确保电气、防爆、安全连锁功能不被破坏。

6.5 备品备件与寿命管理

6.5.1 应根据设备重要性和采购周期设定合理的备件储备策略，如关键轴承、密封件、控制模块等应维持 1~2 套的安全库存。

6.5.2 对寿命敏感件（如橡胶密封圈、蓄能器囊体、滤芯等）应建立批次管理和到期预警制度，并根据厂家寿命数据和现场环境适当折减使用期限。

7 运维管理与性能要求

7.1 运维组织与人员要求

7.1.1 运维单位应设立专门的压缩空气储能运维管理机构，配备具有动力工程、电气工程、自动化、地质与岩土、压力容器等专业背景的技术人员。

7.1.2 值班人员应取得相应的特种设备作业、压力容器操作、电工上岗资格证书，并定期进行安全和技术培训。

7.1.3 应建立岗位责任制和运维工作标准，每个岗位应有明确的工作内容、操作规程和考核指标。

7.2 运维数据与信息化要求

7.2.1 运行数据采集周期包括下列要求：

- a) 普通过程量采集周期宜不大于 1 min；
- b) 关键安全量采集周期宜不大于 1 s；

c) 振动、冲击等快速信号应设置波形记录和事件触发功能。

7.2.2 运行数据应至少保存 10 a，以支持寿命评估和长周期趋势分析。

7.2.3 建议采用统一的数据平台，将 DCS、SIS、EMS、环境监测及第三方诊断系统进行数据集成，实现多维度可视化和智能分析。

7.3 性能指标与考核

典型关键性能指标要求见表4。

表 4 关键性能指标 (KPI) 要求 (示例)

指标名称	符号	评价周期	指标要求
等效可利用率	EAF	年	$\geq 95\%$
非计划停机率	UFOR	年	$\leq 3\%$
储气系统泄漏率	L_s	年	$\leq 0.1\%$ (按储气容积计)
循环能量效率	η_{cycle}	年	$\geq 50\%$, 先进机组 $\geq 60\%$
机组启停成功率	P_start	年	$\geq 99\%$
设备完好率	A_equip	年	$\geq 98\%$
安全事件发生率	S_rate	年	严重及以上人为责任事故为 0

7.4 应急管理 with 事故处置

7.4.1 应编制覆盖储气系统泄漏、设备爆裂、火灾、电气故障、控制系统失灵等场景的应急预案，并至少每年组织一次综合应急演练。

7.4.2 发生重大设备故障或安全事故后，应立即启动应急预案，完成事故隔离、人员疏散、环境监测，并在 24 h 内完成初步事故报告。

7.4.3 应建立事故调查与经验反馈机制，将事故原因分析、整改措施纳入运维管理体系持续改进。

附录 A (规范性) 关键设备性能试验方法

A.1 总则

A.1.1 本附录规定了压缩空气储能电站在长周期运维中的关键试验项目、试验条件、测试步骤和数据处理方法，用于验证本标准所规定指标的满足情况。

A.1.2 试验应尽量在不影响机组安全和电网稳定的前提下进行，必要时应与调度机构协调。

A.2 运行效率与能量效率试验

A.2.1 目的

验证电站在典型工况下的循环能量效率 η_{cycle} 是否符合第4.4.2 与表 4 要求。

A.2.2 试验原理

η_{cycle} 定义为一个完整充放电循环中输出电能与输入电能之比：

$$\eta_{\text{sys}} = \frac{W_{\text{out}}}{W_{\text{in}}} \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

其中：

W_{in} ：充气时电站从电网吸收的电能（kWh）；

W_{out} ：放气发电时向电网输出的电能（kWh）。

A.2.3 试验条件

- a) 试验应在环境温度 0℃~35℃、电网电压偏差符合 GB/T 12325 的条件下进行；
- b) 储气系统初始状态应稳定，压力、温度接近设计值；
- c) 计量装置应经过校准，电能表精度等级不低于 0.5 级。

A.2.4 测试步骤

测试步骤应按照下列要求执行：

- a) 记录储气起始压力 P_{s0} 、温度 T_{s0} ；
- b) 按正常运行方式进行一次完整充气过程，记录充气阶段电能表读数增量 ΔW_{in} ；
- c) 储气压力达到设定值后，稳定 0.5 h，记录 P_{s1} 、 T_{s1} ；
- d) 启动发电阶段，按设定功率曲线放气发电，记录发电阶段电能表读数增量 ΔW_{out} ；
- e) 记录循环结束时储气压力 P_{s2} 、温度 T_{s2} 。

必要时可通过对储能状态变化进行修正：

$$W_{\text{in,eff}} = W_{\text{in}} - \Delta U_{\text{storage}} \dots\dots\dots (2)$$

其中 $\Delta U_{\text{storage}}$ 为储能状态变化引起的能量增量。

A.2.5 数据处理

按 A.2.2 计算 η_{cycle} 。若连续进行 3 个循环试验，则取其算术平均值作为评定值。当 $\eta_{\text{cycle}} \geq$ 标准规定值时，视为满足本标准能量效率要求。

A.3 储气系统泄漏率试验

A.3.1 目的

评估储气系统在长周期运行中的密封性能，验证年平均泄漏率 L_s 是否满足 $\leq 0.1\%$ 的要求。

A.3.2 试验方法

试验方法可采用“停注气稳压法”或“平衡差量法”，具体要求如下：

a) 停注气稳压法：在不注入新空气且不放气的条件下，记录一定时间内储气压力变化，通过状态方程推算泄漏量；

b) 平衡差量法：统计一定周期内的注气量与放气量差值，并与储气状态变化修正后计算泄漏量。

A.3.3 主要步骤

稳压法主要步骤按照下列要求执行：

a) 选择机组停运或仅维持安全运行的时间段，确保无进出气流量；

b) 记录初始时刻储气系统压力 P_0 、温度 T_0 ；

c) 经过时间 Δt （如24h），记录储气压力 P_1 、温度 T_1 ；

d) 按气体状态方程计算储气量变化 Δm ，并换算为标准状态下体积 ΔV ；

e) 年度泄漏率计算公式（3）：

$$L_g = \frac{\sum \Delta V}{V_{rated}} \times 100\% \dots \dots \dots (3)$$

其中：

V_{rated} ：系统额定储气体积（标准状态下）；

$\sum \Delta V$ ：年内通过多次试验汇总的泄漏量。

若 $L_s \leq 0.1\%$ ，则认为储气系统密封性能满足要求。

A.4 设备振动与状态监测验证试验

A.4.1 振动测量

设备振动测量按照下列方法执行：

a) 按 GB/T 2888和相关振动测量标准，在压缩机、膨胀机轴承座和机座处布置测点；

b) 在额定转速和典型负荷下，连续测量10min以上，记录振动速度有效值；

c) 按 6.2.2 的振动等级和报警/停机值判定。

A.4.2 状态监测系统功能试验

设备振动监测系统功能试验按照下列方法执行：

a) 模拟超限信号，检查在线监测系统是否形成报警、是否推送至值班员工作站；

b) 检查趋势曲线、频谱分析和报警记录功能是否正常；

c) 对比手持仪表测量结果与在线系统数据，误差不应超过 $\pm 5\%$ 。

A.5 运维数据完整性与可追溯性证实方法

运维数据完整性与可追溯性证实方法按照下列方法执行：

a) 抽取近1a的运行和检修记录，检查是否至少包括：运行日志、检修记录、故障记录、参数趋势和报警记录；

b) 抽查不少于10个故障或异常事件，检查其记录是否包含时间、原因分析、处理措施和结果；

c) 抽查5项以上设备检修项目，验证资料是否与现场状态一致。

当运维数据完整性 $\geq 95\%$ ，且抽查记录真实有效时，可判定数据管理满足本标准要求。

A.6 性能指标统计与验收

性能指标统计与验收按照下列方法执行：

a) 电站应至少连续运行1a进行运行统计；

b) 按表4对等效可利用率、非计划停机率、循环效率、启停成功率等指标进行统计和计算；

c) 若所有关键指标均满足本标准要求，且安全事件满足7.3和7.4的规定，则可判定电站长周期运维性能达标。