

中华人民共和国国家标准

GB/T 43687—2024

电力储能用压缩空气储能系统技术要求

Technical requirements for compressed air energy storage system used for
electrical energy storage

2024-03-15 发布

2024-10-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言 I

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 2

4 总体要求 3

5 系统分类 3

6 系统性能 4

7 压缩储能系统 4

8 储气系统 5

9 储换热系统 5

10 膨胀释能系统 6

11 电气系统 6

12 仪表与控制系统 7

13 系统性能试验 7

附录 A（资料性） 压缩空气储能系统架构 19

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。

本文件由中国电力企业联合会提出。

本文件由全国电力储能标准化技术委员会(SAC/TC 550)归口。

本文件起草单位：华能江苏能源开发有限公司、中盐金坛盐化有限责任公司、清华大学、中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司、南方电网科学研究院有限责任公司、中国科学院工程热物理研究所、中国电力工程顾问集团有限公司、中能建数字科技集团有限公司、西安热工研究院有限公司、国网江苏省电力有限公司、江苏方天电力技术有限公司、沈鼓集团股份有限公司、西安陕鼓动力股份有限公司、东方电气集团东方汽轮机有限公司、哈尔滨汽轮机厂有限责任公司、中国特种设备检测研究院、中盐华能储能科技有限公司、华能南京金陵发电有限公司、中广核风电有限公司。

本文件主要起草人：曹庆伟、梅生伟、陈海生、陈辉、郭祚刚、王国华、李睿、薛志恒、杨宏宇、张华良、倪煜、陈来军、丁辉、王开柱、牛晨晖、蒯通、陈永安、翟璇、赵博、戴强晟、吴斌、刘小明、侯佑松、薛小代、朱学成、王斌、王海涛、梁文军、张春琳、方宇、卢日时、崔艳艳、王伟锋、靳志会、郑天文、张通、刘通、杜云龙、韩月峰、万明忠、邢乐强、张鹏飞、艾宏伟、袁超、顾文、周根标、李峻、李文。

电力储能用压缩空气储能系统技术要求

1 范围

本文件规定了电力储能用压缩空气储能系统的系统性能、压缩储能系统、储气系统、储换热系统、膨胀释能系统、电气系统、仪表与控制系统等技术要求,描述了系统性能试验方法,规定了系统分类要求。

本文件适用于额定放电功率为 1 MW 且额定放电能量为 2 MW · h 及以上的压缩空气储能系统,其他功率及能量的压缩空气储能系统参照执行。

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 150(所有部分) 压力容器
- GB/T 151 热交换器
- GB/T 384 石油产品热值测定法
- GB/T 2624.2 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量 第 2 部分:孔板
- GB/T 7064 隐极同步发电机技术要求
- GB/T 8117(所有部分) 汽轮机热力性能验收试验规程
- GB/T 13609 天然气取样导则
- GB/T 13610 天然气的组成分析 气相色谱法
- GB/T 14285 继电保护和安全自动装置技术规程
- GB/T 18940 封闭管道中气体流量的测量 涡轮流量计
- GB/T 21391 用气体涡轮流量计测量天然气流量
- GB/T 25357 石油、石化及天然气工业流程用容积式回转压缩机
- GB/T 25630 透平压缩机 性能试验规程
- GB/T 31130 科里奥利质量流量计
- GB/T 31464 电网运行准则
- GB/T 36293 火力发电厂分散控制系统技术条件
- GB/T 36572 电力监控系统网络安全防护导则
- GB 38755 电力系统安全稳定导则
- GB/T 40594 电力系统网源协调技术导则
- GB/T 50062 电力装置的继电保护和自动装置设计规范
- GB/T 50063 电力装置电测量仪表装置设计规范
- GB 50251 输气管道工程设计规范
- DL/T 544 电力通信运行管理规程
- DL/T 843 同步发电机励磁系统技术条件
- DL/T 1402 厂站端同步相量应用技术规范
- DL/T 1870 电力系统网源协调技术规范

DL/T 2528—2022 电力储能基本术语
DL/T 5003 电力系统调度自动化设计规程
DL/T 5202 电能量计量系统设计规程
DL/T 5364 电力调度数据网络工程初步设计内容深度规定
DL/T 5506 电力系统继电保护设计技术规范
JB/T 4732 钢制压力容器分析设计标准
JB/T 4734 铝制焊接容器
JB/T 6443(所有部分) 石油、化学和气体工业用轴流、离心压缩机及膨胀机-压缩机
NB/T 10938 绕管式热交换器
NB/T 47004(所有部分) 板式热交换器
NB/T 47006 铝制板翅式热交换器

3 术语和定义

DL/T 2528—2022 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

压缩空气储能系统 **compressed air energy storage system; CAESS**

通过空气介质的压缩和膨胀,实现电能存储和释放的设备组合。

[来源:DL/T 2528—2022,4.3.1.2]

3.2

储气系统 **air storage system**

用于压缩空气充气、存储、放气的压力容器或地质空间及相应的设备组合。

[来源:DL/T 2528—2022,4.3.2.2,有修改]

3.3

空气膨胀机 **air expander**

通过空气膨胀将空气热力学能转化为机械能的设备。

3.4

压缩储能 **compressed energy storage process**

利用电能驱动压缩机获取高压空气,从而储存能量的过程。

3.5

膨胀释能 **expansion energy releasing process**

利用储气系统存储的高压空气,驱动空气膨胀机带动发电机发电的过程。

3.6

储气系统工作压力区间 **working pressure range of air storage system**

储气系统支撑压缩储能和膨胀释能正常工作的压力范围。

3.7

储气系统工作上限压力 **upper limit operating pressure of air storage system**

储气系统运行压力区间的上限值。

3.8

储气系统工作下限压力 **lower limit operating pressure of air storage system**

储气系统运行压力区间的下限值。

3.9

储气系统极限承压压力 **ultimate pressure of air storage system**
引起储气系统发生结构性破坏或者功能失效的承压压力值。

3.10

膨胀机组额定功率 **rated power of air expander unit**
在规定条件下,整套压缩空气储能系统可持续稳定输出的功率保证值。
注:取值为配置的发电机额定功率。

3.11

压缩空气储能系统额定充电能量 **CAESS rated charging power capacity**
空气压缩机组通过向储气系统充入压缩空气,将储气系统由工作下限压力提高至工作上限压力所消耗的电能。

3.12

压缩空气储能系统额定放电能量 **CAESS rated discharging power capacity**
空气膨胀机组利用储气系统释放的高压空气做功,从储气系统工作上限压力膨胀至下限压力所释放的电能。

3.13

压缩空气储能系统循环综合效率 **CAESS comprehensive energy efficiency**
储气系统工作下限压力至上限压力的压力区间内,在一个压缩储能与膨胀释能的完整循环中,压缩空气储能系统输出的冷热电等能量总和与输入的各种能量总和的比值。
注:用百分数表示。

3.14

压缩空气储能系统循环电效率 **CAESS round-trip electrical efficiency**
储气系统工作下限压力至上限压力的压力区间内,在一个压缩储能与膨胀释能的完整循环中,压缩空气储能系统在并网点处输出电能与输入电能的比值。
注:存在电能之外其他能量形式输入的折算成电能合并计算,用百分数表示。

3.15

压缩空气储能系统静置耗电量 **CAESS averaged standing energy consumption**
充电或者发电结束后的系统静置期内,压缩空气储能辅助系统从电网吸收用于维持机组热备用状态而消耗的电量。

4 总体要求

- 4.1 压缩空气储能系统应具备系统调峰、调频、紧急功率支撑、电压控制、跟踪计划曲线、平滑功率输出、电压暂降支撑、备用电源供电中的一种或多种应用功能。
- 4.2 压缩空气储能系统应能接收并执行远方或就地功率控制指令,并网性能满足 GB 38755、GB/T 31464的相关要求。
- 4.3 压缩空气储能系统启停次数应不低于 9 000 次且使用寿命应不少于 30 年。
- 4.4 压缩空气储能系统应在并网发电运行一年内完成性能试验。

5 系统分类

- 5.1 压缩空气储能系统按补充能量方式可分为:
——非补热式压缩空气储能系统,由压缩储能系统、储气系统、储换热系统、膨胀释能系统、仪表与

控制系统、电气系统及其他辅助和附属设施组成,两种典型结构分别见附录 A 的 A.1 和 A.2;
——补热式压缩空气储能系统,由压缩储能系统、储气系统、补热设备与系统、储换热系统、膨胀释能系统、仪表与控制系统、电气系统及其他辅助和附属设施组成,三种典型结构分别见 A.3~A.5。

5.2 压缩空气储能系统按膨胀机组额定功率等级可分为:

- 小型压缩空气储能系统,膨胀机组额定功率小于 10 MW;
- 中型压缩空气储能系统,膨胀机组额定功率不小于 10 MW,且小于 100 MW;
- 大型压缩空气储能系统,膨胀机组额定功率不小于 100 MW。

6 系统性能

6.1 膨胀释能时间

压缩空气储能系统在额定功率下的膨胀释能时间宜不小于 2 h。

6.2 能量

压缩空气储能系统充电能量应不小于额定充电能量,放电能量应不小于额定放电能量。

6.3 循环综合效率

小型压缩空气储能系统循环综合效率宜不低于 55%,中型压缩空气储能系统循环综合效率宜不低于 60%,大型压缩空气储能系统循环综合效率宜不低于 65%。

6.4 循环电效率

小型压缩空气储能系统循环电效率宜不低于 50%,中型压缩空气储能系统循环电效率宜不低于 55%,大型压缩空气储能系统循环电效率宜不低于 60%。

注:不含液态压缩空气储能系统。

6.5 静置耗电量

压缩空气储能系统静置耗电量应不大于额定静置耗电量。

6.6 放电爬坡率

补热式压缩空气储能系统放电爬坡率应不小于每分钟膨胀机组额定功率的 3%,非补热式压缩空气储能系统放电爬坡率应不小于每分钟膨胀机组额定功率的 10%。

7 压缩储能系统

7.1 压缩储能系统应由进气空气过滤系统、压缩机组系统、换热分离系统、放空消音系统以及压缩机组仪表及控制系统组成。

7.2 进气空气过滤系统整体压降应不超过 500 Pa,2 μm 以上颗粒去除率应不低于 99.5%。

7.3 压缩机组系统可采用透平式压缩机组或容积式压缩机组。透平式压缩机组总体性能应满足 JB/T 6443(所有部分)要求,容积式压缩机组总体性能应满足 GB/T 25357 要求。

7.4 压缩机组用电机的额定功率应不低于压缩机额定轴功率的 110%。

7.5 各段压缩机之间的换热分离系统宜设置气水分离器。

7.6 压缩机流量与末级排气压力应与储气系统工作上限压力、充电能量及压缩储能阶段运行时间相

匹配。

7.7 压缩机型式应与空气流量、压比以及储换热系统需求的排气温度等相配合,型式满足以下要求:

- a) 当进气流量小于 $23\,500\text{ m}^3/\text{min}$ 时,宜采用单线压缩模式,压缩机按流量从小至大分别采用容积式压缩机、离心式压缩机和轴流式压缩机;
- b) 当压缩机首段进气流量不小于 $23\,500\text{ m}^3/\text{min}$ 时,首段机组宜采用两台及以上压缩机并联的方案,当选择多线并联时,单线流量满足实际流量的 1.05 倍。

7.8 串联压缩机设备的末级排气压力应基于储气系统工作上限压力确定,末级排气压头余量宜不低于 5%。

8 储气系统

8.1 储气系统应由储气装置(承压设备或者地质空间)、进出口管道、隔断阀、安全阀等设备组成。

8.2 储气系统应根据极限承压压力评估确定储气系统极限承压压力,储气系统工作上限压力应小于储气系统极限承压压力。

8.3 储气系统的容量与工作上限压力应满足压缩空气储能系统的储气容量及压力要求,储气系统工作压力区间内应能安全稳定运行。

8.4 储气系统工作压力区间应满足膨胀释能系统空气入口正常工作要求,且应附加储气系统至膨胀释能系统入口的沿程阻力和各种其他因素引起的压力损失。

8.5 储气系统的储气量应满足一个储能周期内膨胀释能系统运行所需要的压缩空气用量要求,应叠加充放气过程的温度波动影响。

8.6 储气系统应装设紧急泄压管及安全阀,与进气总管、排气总管之间应装设隔断阀。

8.7 储气系统与膨胀释能系统之间宜装设压缩空气杂质脱除装置。

8.8 人造承压设备采用压力容器形式时,设备应满足 GB/T 150(所有部分)要求;采用管道形式时,设备应满足 GB 50251 要求。采用碳素钢和合金钢制造人造承压设备时,许用应力应不高于材料屈服强度的 0.8 倍。人造承压设备的内壁宜进行涂层等防腐蚀处理。

8.9 储气系统宜装设形变、泄漏、可燃易爆气体检测等监测装置,具备在线监测与报警功能。

8.10 充放气流速应校核最大压降率因素,且满足储气系统的允许形变范围及结构稳定性要求。

9 储换热系统

9.1 储换热系统应由换热器、热载体、储热系统、热载体输送泵及相关附属管道等组成。

9.2 换热器的换热能力应满足压缩空气储能系统的温度、压力、流量等要求,换热器可采用钢制、铝制等材料制作,类型可为管壳式、板翅式、板式等。

9.3 钢制换热器耐用性和安全性能应满足 GB/T 150(所有部分)或 JB/T 4732 要求,铝制换热器耐用性和安全性能应满足 JB/T 4734 要求。管壳式耐用性和安全性能应满足 GB/T 151 要求,绕管式耐用性和安全性能应满足 NB/T 10938 要求,板式耐用性和安全性能应满足 NB/T 47004(所有部分)要求,板翅式耐用性和安全性能应满足 NB/T 47006 要求。

9.4 各类换热器的换热面积余量应不小于 10%。

9.5 换热器的换热效率宜不低于 98%。

9.6 热载体可采用软化水、有机热载体、熔融盐等,应具有流动性,其物理化学性能参数应具有长期稳定性。

9.7 热载体储罐容积应不小于热载体最大充装容积的 110%。

9.8 储罐材料应满足热载体特性、温度及压力等要求,罐体厚度与焊接接头在设备使用寿命周期应满

足热载体工作压力、工作温度和耐蚀性等要求。

9.9 储热系统的热损失每天宜不高于 2%。

9.10 冷、热载体输送泵的额定流量应不小于换热器额定流量的 110%。

9.11 冷、热载体输送泵应设有备用,当单台停用时,其余输送泵输送能力应不小于输送系统总流量。

10 膨胀释能系统

10.1 膨胀释能系统应由膨胀机、进气系统、排气系统、发电机、控制系统及相关附属设备组成。

10.2 膨胀释能系统应满足膨胀释能阶段功率与放电能量的要求,并应根据储气系统工作上限压力和下限压力、储气容量确定。

10.3 膨胀机进气管路宜设置压缩空气湿度、粉尘、盐分、颗粒物等杂质监测与脱除装置及可燃易燃气体检测装置。

10.4 膨胀机应根据功率、空气进口压力和温度等因素选用径流式或轴流式。

10.5 排气系统管路应具备防止冷空气倒流入膨胀机的功能。

10.6 发电机和膨胀机的容量应相互匹配,发电机性能应满足 GB/T 7064 要求。

10.7 膨胀机宜具备 30%~100%负荷调节能力。

11 电气系统

11.1 电气系统应由压缩机电气系统、膨胀机电气系统、励磁系统和站用电源系统组成。

11.2 压缩空气储能系统的并网点应安装可闭锁、具有明显开断点、可实现可靠接地功能的开断设备,可就地或远程操作。

11.3 发电机出口断路器或负荷开关以及压缩机电动机断路器的频繁操作特性应与电站的运行工况和寿命相匹配。

11.4 压缩空气储能系统的高压站用电系统,高压站用电的电压宜采用 3 kV~10 kV 中性点不接地方式,并与压缩机电动机额定电压匹配;低压站用电的电压宜采用 380 V 动力和照明网络共用的中性点直接接地方式。

11.5 压缩空气储能系统的直流电源蓄电池组容量应满足以下要求:

- a) 站用交流电源事故停电时间不低于 1 h;
- b) 满足交流不间断电源直流负荷的时间要求。

11.6 压缩空气储能系统的主变压器继电保护应满足膨胀释能发电及压缩储能充电不同工况的要求。

11.7 压缩空气储能系统的继电保护及安全自动装置的配置及技术要求应满足 GB/T 14285、GB/T 40594、GB/T 50062、DL/T 1870 和 DL/T 5506。

11.8 压缩空气储能系统的励磁系统在发电机变压器高压侧短路时能正常工作,其性能应满足 DL/T 843 要求。

11.9 压缩空气储能系统的调度自动化及通信配置应满足 DL/T 5003、DL/T 544 要求。

11.10 压缩空气储能系统的调度数据网络接入设备和网络安全防护应满足 DL/T 5364、GB/T 36572 要求。

11.11 压缩空气储能系统的电气测量仪表可采用直接式仪表测量、一次仪表测量或二次仪表测量,其配置及性能满足 GB/T 50063 要求。

11.12 压缩空气储能系统的电能量计量系统应具备自动采集、处理传输、整理、统计、存储等功能,其性能满足 DL/T 5202 要求。

11.13 压缩空气储能系统的同步相量测量装置应具备机组运行状态监视告警功能,其性能满足

DL/T 1402要求。

12 仪表与控制系统

12.1 仪表与控制系统应具备机组启停控制、正常运行、异常工况下事故处理和紧急停机的功能。

12.2 压缩空气储能系统及辅助车间宜采用全厂集中控制的方式。

12.3 压缩空气储能系统应具备紧急停机功能。在控制盘(台)上应装设独立于任何机组保护系统和机组控制系统的硬接线后备手动操作装置,实现以下功能:

- a) 关闭储气系统出口切断阀;
- b) 膨胀机打闸;
- c) 发电机打闸;
- d) 压缩机组打闸;
- e) 启动主机系统各交流润滑油泵;
- f) 启动主机系统各直流润滑油泵。

12.4 仪表与控制系统宜采用分散控制系统,宜设置机组级顺序控制。

12.5 仪表与控制系统的硬件和软件配置及应用功能应满足 GB/T 36293 相关要求。

12.6 仪表与控制系统监测装置和仪表的设置应符合下列规定:

- a) 能检测主机设备及工艺系统在启动停止、正常运行、异常及事故工况下安全的参数;
- b) 根据危险场所分类,对于装设在爆炸危险区域的仪表和控制装置,选择防爆仪表和控制装置;
- c) 保护系统的检测仪表双重或多重冗余设置,重要模拟量控制回路的检测仪表双重或多重冗余设置。

12.7 压缩空气储能系统的膨胀释能系统机组应具备自动发电控制功能,该功能投入时,机组应能参与电网闭环自动发电控制。

12.8 压缩空气储能系统的分散控制系统、压缩机和膨胀机控制系统及重要的仪表装置,应有两路供电电源且互为备用;其中一路应采用交流不间断电源;两路电源应设置自动电源切投装置,切投时间应不影响仪表与控制系统的运行。

12.9 压缩空气储能系统应至少包含下列测点:

- a) 空气膨胀机进气温度;
- b) 空气膨胀机进气压力;
- c) 空气膨胀机再热进气温度;
- d) 换热器水侧出口温度;
- e) 空气压缩机各段进气温度;
- f) 空气压缩机各段进气压力;
- g) 空气压缩机流量。

13 系统性能试验

13.1 测量设备及测点布置

13.1.1 测量设备

测量设备应满足以下要求:

- a) 所有试验测量设备通过计量检定或校准,并在有效期内;
- b) 所有试验测量设备的测量范围覆盖被测量的测量范围;

- c) 压力、温度、流量、湿度、转速、电能或电功率等测量设备精度满足表 1 要求；
d) 数据采集装置的最大允许误差为 $\pm 0.2\%$ 。

表 1 测量设备量程和精度

测量参数	测量设备	量程	精度
压力	压力变送器	校验范围	$\pm 0.075\%$
	绝对压力变送器	校验范围	$\pm 0.075\%$
温度	铂热电阻温度计	$0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$
		$100\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.2\%$
	热电偶温度计	$\leq 300\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$
		$> 300\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.3\%$
差压	差压变送器	校验范围	$\pm 0.075\%$
流量	标准节流装置或其他流量测量装置	—	$0.75\% \sim 1.5\%$ (流出系数)
	校验过的节流装置或其他流量测量装置	校验范围	$0.2\% \sim 0.4\%$ (流出系数)
湿度	干湿球温度计、电子湿度计	—	$\pm 1.0\%$
转速	通过测量输出功率得到频率	—	$\pm 0.01\%$
	精密电子转数表	校验范围	$\pm 0.1\%$
电能或电功率	电压互感器	—	$\pm 0.2\%$
	电流互感器	—	$\pm 0.2\%$
	电能表、功率表等	—	$\pm 0.1\%$

13.1.2 测点布置

13.1.2.1 电能或电功率

电能或电功率测点应满足以下要求：

- 电能或电功率采用电能表或电功率表进行测量；
- 测量压缩空气储能系统充、放电能量或电功率，以及压缩空气储能系统静置耗电量或电功率的测点布置在变压器高压侧；
- 测量非生产厂用电量或电功率的测点布置在非生产厂用电相应变压器高压侧；
- 测量发电机输出电能或电功率的测点布置在发电机输出接线端，按照 GB/T 8117 (所有部分) 要求进行测量。

13.1.2.2 压力

压力测量应满足以下要求：

- 测量压缩机进、出口空气压力的测点按照 GB/T 25630 规定的方法进行布置；
- 测量膨胀机进气压力的测点布置在主气阀前、靠近进气阀位置；
- 测量膨胀机排气压力的测点布置在流动稳定的排气管道上膨胀机排气接口 2 倍管径位置；
- 测量储气装置进口压力的测点布置在空气压缩系统与储气系统接口管道；
- 测量储气装置出口压力的测点布置在储气系统与膨胀释能系统接口管道；
- 对于采用压力容器的储气系统，测量储气系统压力的取样点位于储气系统本体，同一组相连装

置测点数量不少于 2 个；

- g) 测量换热器进、出口压力的测点位于距换热器进口、出口 10 倍管径以内,与阀门、弯头距离不小于 2 倍管径；
- h) 测量储热装置压力的取样点位置位于储热装置本体；
- i) 测量大气压力的测点布置在压缩机进口附近,距离压缩机进气口不小于 10 m。

13.1.2.3 温度

温度测点应满足以下要求：

- a) 测量压缩机、膨胀机、换热器、储热装置等设备进、出口截面空气温度和其他换热工质温度的测点布置在相应压力测点截面下游附近,且距离压力测点不少于 0.5 倍管径；
- b) 测量大气温度的仪表与大气压力测点处于同一位置；
- c) 用于辅助流量测量的温度测点布置在相应节流装置下游附近,且距离上游压力测点不少于 0.5 倍管径；
- d) 直接参与结果计算的温度测点,布置双重或多重测点。

13.1.2.4 环境湿度

环境湿度测量应满足以下要求：

- a) 采用干湿球温度计或电子湿度计测量环境湿度；
- b) 测量环境湿度的仪表与测量大气压力及大气温度的仪表处于同一位置。

13.1.2.5 流量

流量测点应满足以下要求。

- a) 测量压缩空气系统空气流量的测点布置在储气装置进口管道,安装满足 GB/T 2624.2、GB/T 31130 的相关要求。
- b) 测量膨胀释能系统膨胀机进口空气流量的测点布置在膨胀机进口管道,安装满足 GB/T 2624.2、GB/T 31130 的相关要求。
- c) 测量系统对外供热/供冷工质流量的测点布置在压缩空气储能系统对外供热/供冷的边界附近。
- d) 测量流经换热器的其他工质流量测点布置在换热器进、出口管道。
- e) 测量补热工质流量的测点布置在补热点前的补热工质管道上。采用天然气进行补热的压缩空气储能系统,按照 GB/T 2624.2、GB/T 31130、GB/T 18940 或 GB/T 21391 规定的方法布置测点；采用燃油进行补热的压缩空气储能系统,按照 GB/T 2624.2 规定的方法布置测点。

13.1.2.6 液位

液位测点应满足以下要求：

- a) 液位测点采用电站运行仪表；
- b) 液位测点包含储热装置液位、水箱液位、气液分离器液位、冷凝水扩容器液位、冷却水池液位等。

13.1.2.7 时间

时间测点应满足以下要求：

- a) 试验持续时间和观测时间根据公共时间源确定；
- b) 将用于数据记录的计算机时钟和人工读数采用的时钟同步至电站监控系统；

- c) 各个积算式仪表采用各自的秒表或电子计时装置,并保持积算式仪表和计时装置读数同步。

13.1.2.8 转速

转速测点应满足以下要求:

- a) 测量发电机转速采用电能表或功率表的频率测量值进行换算;
- b) 测量压缩机转速采用精密电子转数表在转轴裸露位置进行测量。

13.1.2.9 补热工质热值

补热工质热值测量应满足以下要求:

- a) 补热工质为燃油,按照 GB/T 384 的方法交由第三方实验室对燃油热值进行分析、测定;
- b) 补热工质为天然气,按照 GB/T 13609 的方法对天然气取样,按照 GB/T 13610 的方法交由第三方实验室对其组分及热值进行分析、测定。

13.2 试验准备

13.2.1 方案编制

试验前应编制试验方案,内容应包含试验目的、试验计划、试验方法及试验安全措施等。

13.2.2 空气滤网清洁

试验前宜对空气滤网进行清理。

13.2.3 系统隔离

试验前应对以下阀门、设备及系统进行隔离:

- a) 空气膨胀机的进气旁路阀门;
- b) 管道排地沟阀门;
- c) 管道排空阀门;
- d) 压缩机级间汽水分离器排水阀;
- e) 其他与规定循环无关的进、排气阀门。

13.2.4 系统预热

试验前压缩空气储能系统应按照设计运行状态连续完成 3 次完整的压缩储能、系统静置和膨胀释能循环。

13.2.5 系统状态检查

试验前应确认压缩储能系统、储气系统、储换热系统、膨胀释能系统、电气系统、仪表与控制系统及辅助系统的所有设备运行正常,热力系统无异常。

13.3 试验步骤

13.3.1 系统性能试验

压缩空气储能系统膨胀释能时间、压缩空气储能系统额定放电能量、循环综合效率、循环电效率、额定静置耗电量、放电爬坡率试验等项目的试验,按以下步骤进行。

- a) 按照 13.2.3 关闭、停运与试验热力系统循环无关的阀门和设备。
- b) 启动数据采集装置记录试验数据,其中由数据采集装置自动存储的试验数据记录时间间隔不

大于 10 s/次,人工读数记录时间间隔不大于 5 min/次。记录数据主要包括:

- 1) 大气压力、温度及湿度;
 - 2) 充、放电能量或电功率;
 - 3) 静置耗电量或电功率;
 - 4) 非生产厂用电量或电功率;
 - 5) 发电机输出电功率及发电机功率因数;
 - 6) 补热系统至压缩空气储能系统补热工质热值、流量、压力及温度;
 - 7) 系统对外供热/供冷工质流量、压力及温度;
 - 8) 系统对外供热/供冷返回工质压力及温度;
 - 9) 储气系统压力及温度;
 - 10) 储气系统进/出口压力及温度;
 - 11) 冷却水供/回水压力及温度;
 - 12) 压缩空气系统储能过程空气流量;
 - 13) 各换热器进/出口空气压力及温度;
 - 14) 各换热器进/出口工质流量、压力及温度;
 - 15) 各储热装置工质压力及温度;
 - 16) 各级压缩机转速;
 - 17) 各级压缩机进/排气压力及温度;
 - 18) 各级压缩机级间冷却器进/出口冷却工质流量、压力及温度;
 - 19) 膨胀机主气阀开度;
 - 20) 膨胀机进/排气压力及温度;
 - 21) 膨胀机进口空气流量;
 - 22) 各储热装置液位、水箱、气液分离器、冷凝水扩容器及冷却水池液位。
- c) 调整储气系统压力至工作下限压力,确认储气系统压力在系统静置 10 min 后偏离设计下限压力不超过 $\pm 1\%$,且 10 min 内的压力波动不超过 $\pm 0.5\%$ 。若超过限值,重新调整储气系统压力直至满足条件。
- d) 确认膨胀释能系统处于隔离状态、补热系统停运,启动压缩机及储换热系统,记录压缩储能开始时间 T_1 。系统处于压缩储能过程中确认:
- 1) 各储热装置、水箱、气液分离器及冷却水池液位正常;
 - 2) 各台压缩机转速、流量及进、排气压力及温度正常;
 - 3) 各换热器进、出口空气流量、压力及温度正常;
 - 4) 各换热器进、出口工质流量、压力及温度正常;
 - 5) 压缩空气储能系统对外供热/供冷及返回工质流量、压力及温度满足设计值要求。
- e) 压缩机运行至储气系统工作上限压力,关闭压缩机出口隔离阀、停运压缩储能系统、隔离储换热系统,记录压缩储能结束时间 T_2 。
- f) 按照压缩空气储能系统设计静置时间 ΔT 进行系统静置,确认压缩空气储能系统对外供热/供冷及返回工质流量、压力及温度数据满足设计值要求。
- g) 确认压缩储能系统处于隔离状态,启动膨胀释能系统、储换热系统及补热系统,记录膨胀释能开始时间 T_3 。系统处于膨胀释能过程中确认:
- 1) 各储热装置、水箱、冷却水池液位正常;
 - 2) 各换热器进、出口空气流量、压力、温度正常;
 - 3) 各换热器进、出口工质流量、压力、温度正常;
 - 4) 压缩空气储能系统对外供热/供冷及返回工质流量、压力及温度数据满足设计值要求;

- 5) 空气膨胀机进气流量及进、排气压力及温度正常；
- 6) 在膨胀释能过程开始时、膨胀释能过程进行中间及膨胀释能过程结束时分别对补热工质进行取样,在试验结束后将样品送至第三方实验室进行补热工质组分及热值分析。
- h) 膨胀释能系统运行至储气系统工作下限压力,停运膨胀释能系统、关闭膨胀释能系统进气隔离阀、停运储换热系统,记录膨胀释能结束时间 T_4 。
- i) 重复试验步骤 a)~h) 两次。

13.3.2 放电爬坡率试验

压缩空气储能系统放电爬坡率试验按以下步骤进行:

- a) 确认膨胀释能系统处于隔离状态、补热系统停运；
- b) 启动数据采集装置记录试验数据,记录发电机输出电功率,数据记录时间间隔不大于 5 s/次；
- c) 启动压缩机及储换热系统,系统进入压缩储能过程,直至压缩机运行至储气系统工作上限压力,关闭压缩机出口隔离阀、停运压缩储能系统、隔离储换热系统；
- d) 按照压缩空气储能系统设计静置时间 ΔT 进行系统静置,确认压缩空气储能系统对外供热/供冷及返回工质流量、压力及温度数据满足设计值要求；
- e) 确认压缩储能系统处于隔离状态,启动膨胀释能系统、储换热系统及补热系统,记录膨胀释能开始时间 T_5 ,系统进入膨胀释能过程,监视发电机输出电功率,当发电机输出功率达到膨胀机组额定功率时试验结束,记录结束时间 T_6 。

13.4 试验结果计算

13.4.1 数据处理

13.4.1.1 平均值计算

试验数据应按照以下原则进行平均值计算:

- a) 计算试验有效时间段内每一个测量仪表读数的平均值；
- b) 以线性关系影响测量结果的变量,宜取算术平均值,对于流量测量装置的差压读数,采用读数平方根的算术平均值。

13.4.1.2 平均值修正及换算

由读数的平均值换算到所需单位的计算值时,应对仪表引起的影响进行修正,包括:

- a) 仪表常数和零位；
- b) 校验值；
- c) 仪表读数的基准值(如大气压力、环境温度)。

13.4.1.3 数据相容性检查

在进行试验结果计算前,应按照以下原则对所有测量数据的相容性进行检查。

- a) 对测量数据如压力、温度和流量,在试验结束后进行检查。
- b) 对明显偏离正常值的仪表读数应予以剔除。剔除的数据可由其他仪表的读数、适当的计算值或估算值代替时,该试验数据判定有效。
- c) 如果发现数据存在重大偏差,且对试验结果造成较大影响时,则该试验重新进行。

13.4.1.4 变量转换

根据直接测量参数,将测量数据进行下列变量转换。

- a) 采用功率表对压缩空气储能系统充、放电功率及静置耗电功率进行测量,应按照公式(1)、公式(2)及公式(3)将3次压缩空气储能系统性能试验测量的电功率分别按照压缩储能、系统静置和膨胀释能持续时间独立进行积分,得到单次充电能量 E_{Ci} 、单次放电能量 E_{Di} 及单次静置耗电量 E_{sti} :

$$E_{Ci} = \int_0^{T_2-T_1} P_{Ci} dt \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$E_{Di} = \int_0^{T_4-T_3} P_{Di} dt \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$E_{sti} = \int_0^{\Delta T} P_{sti} dt \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

E_{Ci} ——单次充电能量,单位为千瓦时(kW·h);

T_1 ——单次试验的压缩储能开始时间,单位为小时(h);

T_2 ——单次试验的压缩储能结束时间,单位为小时(h);

P_{Ci} ——单次试验的系统充电功率,单位为千瓦(kW);

E_{Di} ——单次放电能量,单位为千瓦时(kW·h);

T_3 ——单次试验的膨胀释能开始时间,单位为小时(h);

T_4 ——单次试验的膨胀释能结束时间,单位为小时(h);

P_{Di} ——单次试验的系统放电功率,单位为千瓦(kW);

E_{sti} ——单次静置耗电量,单位为千瓦时(kW·h);

ΔT ——压缩空气储能系统设计静置时间,单位为小时(h);

P_{sti} ——单次试验的系统静置耗电功率,单位为千瓦(kW)。

- b) 根据3次测量得到的压缩空气储能系统对外供热工质流量、压力及温度,以及外供热返回工质压力及温度,分别按照公式(4)计算得到单次试验系统对外供热量 Q_{hoi} :

$$Q_{hoi} = \int_0^{T_4-T_1} F_{hoi} \times (h_{hoi} - h_{hori}) dt \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中:

Q_{hoi} ——单次试验系统对外供热量,单位为千瓦时(kW·h);

F_{hoi} ——单次试验的系统对外供热工质流量,单位为千克每秒(kg/s);

h_{hoi} ——单次试验的系统对外供热工质焓,利用工质压力、温度确定,单位为千焦每千克(kJ/kg);

h_{hori} ——单次试验的系统对外供热返回工质焓,利用工质压力、温度确定,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

- c) 根据3次测量得到压缩空气储能系统对外供冷工质流量、压力及温度,以及外供冷返回工质压力及温度,分别按照公式(5)计算得到单次试验系统对外供冷量 Q_{coi} :

$$Q_{coi} = \int_0^{T_4-T_1} F_{coi} \times (h_{coi} - h_{cori}) dt \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中:

Q_{coi} ——单次试验系统对外供冷量,单位为千瓦时(kW·h);

F_{coi} ——单次试验的系统对外供冷工质流量,单位为千克每秒(kg/s);

h_{coi} ——单次试验的系统对外供冷工质焓,利用工质压力、温度确定,单位为千焦每千克(kJ/kg);

h_{cori} ——单次试验的系统对外供冷返回工质焓,利用工质压力、温度确定,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

- d) 利用3次测量得到的补热系统至压缩空气储能系统补热工质流量、压力、温度及组分,以及补

热工质热值,分别按照公式(6)计算得到单次试验补热系统至储能系统补热量 Q_{gii} :

$$Q_{gii} = \int_0^{T_4-T_1} F_{gii} \times (h_{gii} + h_{gisi}) dt \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中:

Q_{gii} ——单次试验的补热系统至储能系统补热量,单位为千瓦时(kW·h);

F_{gii} ——单次试验的补热系统至储能系统补热工质流量,单位为千克每秒(kg/s);

h_{gii} ——单次试验的补热系统至储能系统补热工质化学热能,由第三方实验室分析得到,单位为千焦每千克(kJ/kg);

h_{gisi} ——单次试验的补热系统至储能系统补热工质显热能,利用工质压力、温度确定及组分确定,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

13.4.2 膨胀释能时间

按照公式(7)、公式(8)计算压缩空气储能系统膨胀释能时间:

$$T_{Di} = T_{4i} - T_{3i} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\overline{T_D} = \frac{T_{D1} + T_{D2} + T_{D3}}{3} \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中:

T_{Di} ——单次试验的膨胀释能时间,单位为小时(h);

T_{3i} ——第*i*次试验的膨胀释能开始时间,单位为小时(h);

T_{4i} ——第*i*次试验的膨胀释能结束时间,单位为小时(h);

$\overline{T_D}$ ——额定膨胀释能时间,单位为小时(h);

T_{D1} ——第1次试验的膨胀释能时间,单位为小时(h);

T_{D2} ——第2次试验的膨胀释能时间,单位为小时(h);

T_{D3} ——第3次试验的膨胀释能时间,单位为小时(h)。

13.4.3 额定充、放电能量

按照公式(9)、公式(10)分别计算试验状态下的压缩空气储能系统额定充电能量 $\overline{E_C}$ 、压缩空气储能系统额定放电能量 $\overline{E_D}$:

$$\overline{E_C} = \frac{E_{C1} + E_{C2} + E_{C3}}{3} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\overline{E_D} = \frac{E_{D1} + E_{D2} + E_{D3}}{3} \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中:

$\overline{E_C}$ ——压缩空气储能系统额定充电能量,单位为千瓦时(kW·h);

E_{C1} ——第1次试验的压缩空气储能系统充电能量,单位为千瓦时(kW·h);

E_{C2} ——第2次试验的压缩空气储能系统充电能量,单位为千瓦时(kW·h);

E_{C3} ——第3次试验的压缩空气储能系统充电能量,单位为千瓦时(kW·h);

$\overline{E_D}$ ——压缩空气储能系统额定放电能量,单位为千瓦时(kW·h);

E_{D1} ——第1次试验的压缩空气储能系统放电能量,单位为千瓦时(kW·h);

E_{D2} ——第2次试验的压缩空气储能系统放电能量,单位为千瓦时(kW·h);

E_{D3} ——第3次试验的压缩空气储能系统放电能量,单位为千瓦时(kW·h)。

13.4.4 循环综合效率

按照公式(11)~公式(13)计算储能系统补热量、余热补热系统至储能系统补热量、系统对外供热量

及系统对外供冷量平均值,按照公式(14)计算压缩空气储能系统的循环综合效率:

$$\overline{Q_{gi}} = \frac{Q_{gi1} + Q_{gi2} + Q_{gi3}}{3} \dots\dots\dots(11)$$

$$\overline{Q_{ho}} = \frac{Q_{ho1} + Q_{ho2} + Q_{ho3}}{3} \dots\dots\dots(12)$$

$$\overline{Q_{co}} = \frac{Q_{co1} + Q_{co2} + Q_{co3}}{3} \dots\dots\dots(13)$$

式中:

- $\overline{Q_{gi}}$ —— 补热系统至储能系统补热量平均值,单位为千瓦时(kW·h);
- Q_{gi1} —— 第1次试验补热系统至储能系统补热量,单位为千瓦时(kW·h);
- Q_{gi2} —— 第2次试验补热系统至储能系统补热量,单位为千瓦时(kW·h);
- Q_{gi3} —— 第3次试验补热系统至储能系统补热量,单位为千瓦时(kW·h);
- $\overline{Q_{ho}}$ —— 系统对外供热量平均值,单位为千瓦时(kW·h);
- Q_{ho1} —— 第1次试验系统对外供热量,单位为千瓦时(kW·h);
- Q_{ho2} —— 第2次试验系统对外供热量,单位为千瓦时(kW·h);
- Q_{ho3} —— 第3次试验系统对外供热量,单位为千瓦时(kW·h);
- $\overline{Q_{co}}$ —— 系统对外供冷量平均值,单位为千瓦时(kW·h);
- Q_{co1} —— 第1次试验系统对外供冷量,单位为千瓦时(kW·h);
- Q_{co2} —— 第2次试验系统对外供冷量,单位为千瓦时(kW·h);
- Q_{co3} —— 第3次试验系统对外供冷量,单位为千瓦时(kW·h)。

$$\eta_e = \frac{\overline{E_D} + \overline{Q_{ho}} + \overline{Q_{co}}}{\overline{E_C} + \overline{Q_{gi}}} \times 100\% \dots\dots\dots(14)$$

式中:

- η_e —— 循环综合效率;
- $\overline{E_D}$ —— 额定放电能量,单位为千瓦时(kW·h);
- $\overline{Q_{ho}}$ —— 系统对外供热量平均值,单位为千瓦时(kW·h);
- $\overline{Q_{co}}$ —— 系统对外供冷量平均值,单位为千瓦时(kW·h);
- $\overline{E_C}$ —— 额定充电能量,单位为千瓦时(kW·h);
- $\overline{Q_{gi}}$ —— 储能系统补热量平均值,包含补热系统与余热补热系统,单位为千瓦时(kW·h)。

13.4.5 循环电效率

13.4.5.1 非补热式压缩空气储能系统循环电效率

非补热式压缩空气储能系统的循环电效率按照公式(15)计算:

$$\eta_p = \frac{\overline{E_D}}{\overline{E_C} + \overline{E_{st}}} \times 100\% \dots\dots\dots(15)$$

式中:

- η_p —— 非补热式压缩空气储能系统循环电效率,%;
- $\overline{E_D}$ —— 额定放电能量,单位为千瓦时(kW·h);
- $\overline{E_C}$ —— 额定充电能量,单位为千瓦时(kW·h);
- $\overline{E_{st}}$ —— 平均静置耗电量,单位为千瓦时(kW·h)。

13.4.5.2 补热式压缩空气储能系统循环电效率

补热式压缩空气储能系统的循环电效率按照公式(16)计算：

$$\eta_{eh} = \frac{\overline{E_D}}{\overline{E_C} + \overline{E_{st}} + \overline{Q_{gi}} \times \eta_{gi} + \overline{Q_{hi}} \times \eta_{hi}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (16)$$

式中：

- η_{eh} ——补热式压缩空气储能系统循环电效率，%；
- $\overline{E_D}$ ——额定放电能量，单位为千瓦时(kW·h)；
- $\overline{E_C}$ ——额定充电能量，单位为千瓦时(kW·h)；
- $\overline{E_{st}}$ ——平均静置耗电量，单位为千瓦时(kW·h)；
- $\overline{Q_{gi}}$ ——补热系统至储能系统补热量平均值，单位为千瓦时(kW·h)；
- η_{gi} ——相近容量等级的燃机或内燃机单循环的热转电效率；
- $\overline{Q_{hi}}$ ——余热补热系统至储能系统补热量平均值，单位为千瓦时(kW·h)；
- η_{hi} ——相近容量等级的余热利用发电机组的热转电效率。

13.4.6 额定静置耗电量

按照公式(17)计算试验状态下的压缩空气储能系统额定静置耗电量：

$$\overline{E_{st}} = \frac{\overline{E_{st1}} + \overline{E_{st2}} + \overline{E_{st3}}}{3} \quad \dots\dots\dots (17)$$

式中：

- $\overline{E_{st}}$ ——额定静置耗电量，单位为千瓦时(kW·h)；
- $\overline{E_{st1}}$ ——第一次试验额定静置耗电量，单位为千瓦时(kW·h)；
- $\overline{E_{st2}}$ ——第二次试验额定静置耗电量，单位为千瓦时(kW·h)；
- $\overline{E_{st3}}$ ——第三次试验额定静置耗电量，单位为千瓦时(kW·h)。

13.4.7 放电爬坡率

按照公式(18)计算压缩空气储能系统放电爬坡率：

$$\Delta P = \frac{1}{T_6 - T_5} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (18)$$

式中：

- ΔP ——放电爬坡率，单位为%/分(%/min)；
- T_5 ——膨胀释能开始时间，单位为分(min)；
- T_6 ——膨胀释能过程开始后，发电机输出功率达到膨胀机组额定功率的时间，单位为分(min)。

13.4.8 修正计算

13.4.8.1 修正项目

压缩空气储能系统应对以下参数进行修正：

- a) 功率因数；
- b) 环境温度；
- c) 环境湿度；
- d) 大气压力；
- e) 冷却水温度；

f) 辅助输入能量。

13.4.8.2 计算方法

修正计算应按照机组设计特性曲线进行计算,压缩空气储能系统修正系数的符号见表 2 和表 3。

表 2 压缩空气储能系统修正项目(一)

序号	修正项目	对循环综合效率的修正系数	对非补热式压缩空气储能系统循环电效率的修正系数	对补热式压缩空气储能系统循环电效率的修正系数
1	功率因数	f_1	g_1	h_1
2	环境温度	f_2	g_2	h_2
3	环境湿度	f_3	g_3	h_3
4	大气压力	f_4	g_4	h_4
5	冷却水温度	f_5	g_5	h_5
6	辅助输入能量	f_6	g_6	h_6

表 3 压缩空气储能系统修正项目(二)

序号	修正项目	对额定充电能量的修正系数	对额定放电能量的修正系数	对额定静置耗电量的修正系数
1	功率因数	α_1	β_1	λ_1
2	环境温度	α_2	β_2	λ_2
3	环境湿度	α_3	β_3	λ_3
4	大气压力	α_4	β_4	λ_4
5	冷却水温度	α_5	β_5	λ_5
6	辅助输入能量	α_6	β_6	λ_6

按照公式(19)、公式(20)和公式(21)计算压缩空气储能系统循环综合效率、非补热式压缩空气储能系统循环电效率修正值和补热式压缩空气储能系统循环电效率的修正值:

$$\eta_{e,c} = \frac{\eta_{e,m}}{\prod_{i=1}^6 f_i} \dots\dots\dots (19)$$

$$\eta_{p,c} = \frac{\eta_{p,m}}{\prod_{i=1}^6 g_i} \dots\dots\dots (20)$$

$$\eta_{eh,c} = \frac{\eta_{eh,m}}{\prod_{i=1}^6 h_i} \dots\dots\dots (21)$$

式中:

$\eta_{e,c}$ ——压缩空气储能循环综合效率修正值, %;

$\eta_{e,m}$ ——压缩空气储能循环综合效率试验值, %;

f_i ——循环综合效率的修正系数;

$\eta_{p,c}$ ——非补热式压缩空气储能循环电效率修正值, %;

$\eta_{p,m}$ ——非补热式压缩空气储能循环电效率试验值, %;

g_i ——非补热式压缩空气储能系统循环电效率的修正系数;

- $\eta_{eh,c}$ —— 补热式压缩空气储能循环电效率修正值, %;
- $\eta_{eh,m}$ —— 补热式压缩空气储能循环电效率试验值, %;
- h_i —— 补热式压缩空气储能系统循环电效率的修正系数。

按照公式(22)、公式(23)和公式(24)计算压缩空气储能系统额定充电能量、额定放电能量、额定静置耗电量的修正值:

$$\overline{E_{C,c}} = \frac{\overline{E_{C,m}}}{\prod_{i=1}^6 \alpha_i} \dots\dots\dots (22)$$

$$\overline{E_{D,c}} = \frac{\overline{E_{D,m}}}{\prod_{i=1}^6 \beta_i} \dots\dots\dots (23)$$

$$\overline{E_{st,c}} = \frac{\overline{E_{st,m}}}{\prod_{i=1}^6 \lambda_i} \dots\dots\dots (24)$$

式中:

- $\overline{E_{C,c}}$ —— 额定充电能量修正值, 单位为千瓦时(kW·h);
- $\overline{E_{C,m}}$ —— 额定充电能量试验值, 单位为千瓦时(kW·h);
- α_i —— 额定充电能量的修正系数;
- $\overline{E_{D,c}}$ —— 额定放电能量修正值, 单位为千瓦时(kW·h);
- $\overline{E_{D,m}}$ —— 额定放电能量试验值, 单位为千瓦时(kW·h);
- β_i —— 额定放电能量的修正系数;
- $\overline{E_{st,c}}$ —— 额定放电能量修正值, 单位为千瓦时(kW·h);
- $\overline{E_{st,m}}$ —— 额定放电能量试验值, 单位为千瓦时(kW·h);
- λ_i —— 额定静置耗电量的修正系数。

13.5 性能试验报告

性能试验报告应包含以下内容:

- a) 摘要;
- b) 试验概况;
- c) 机组容量;
- d) 机组储能容量;
- e) 储能系统的类型、操作方式和测试系统框架;
- f) 机组投产日期;
- g) 试验目的;
- h) 设备设计性能参数表;
- i) 试验仪器和仪表;
- j) 试验数据汇总表;
- k) 试验结果计算汇总表;
- l) 试验结果分析, 包括与设计值的对比、运行优化建议;
- m) 试验测点布置简图;
- n) 试验性能修正公式(或图);
- o) 试验结论;
- p) 重要试验数据原始记录表复印件。

附录 A
(资料性)
压缩空气储能系统架构

A.1 非补热式压缩空气储能系统 I

在压缩储能阶段,通过电能驱动空气压缩机做功,输出高压力的压缩空气气流并在储气设施内进行储存;与此同时,将空气压缩过程产生的压缩热通过换热器传递给换热介质并传送至压缩热储热罐进行储存;在膨胀释能阶段,释放压缩空气,采用压缩热储热罐内储存的压缩热加热压缩空气,压缩空气完成吸热升温后,进入膨胀机做功,驱动发电机输出电能;在每一台膨胀机之前,可根据需要分别布置换热器提升压缩空气的温度。非补热式压缩空气储能系统 I 架构见图 A.1。

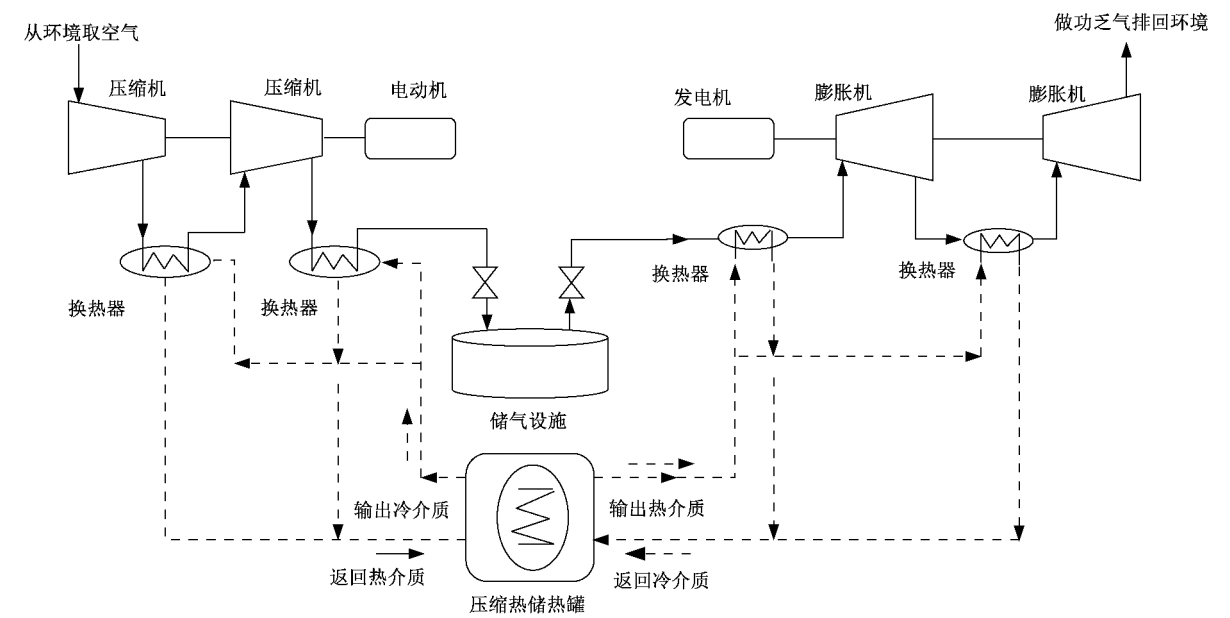


图 A.1 非补热式压缩空气储能系统 I 的构架

A.2 非补热式压缩空气储能系统 II

在压缩储能阶段,通过电能驱动空气压缩机做功,输出高压力的压缩空气气流经过低温膨胀机进行液化,液化后的空气在液态储气设施内进行储存;与此同时,将空气压缩过程产生的压缩热通过换热器传递给换热介质并传送至压缩热储热罐进行储存;在膨胀释能阶段,液态空气经过加压泵升压,再气化之后,进入后续换热器,采用压缩热储热罐内储存的压缩热加热压缩空气,压缩空气完成吸热升温后,进入膨胀机做功,驱动发电机输出电能;在每一台膨胀机之前,可根据需要分别布置换热器提升压缩空气的温度。非补热式压缩空气储能系统 II 架构见图 A.2。

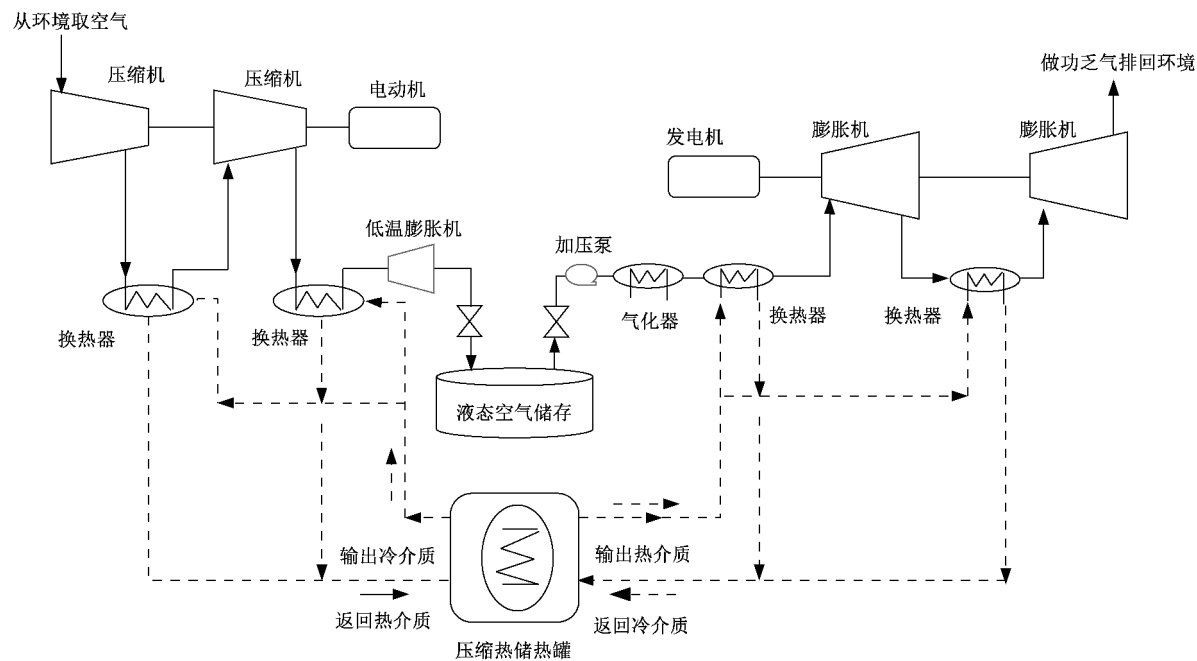


图 A.2 非补热式压缩空气储能系统 II 的构架

A.3 补热式压缩空气储能系统 I

在压缩储能阶段,通过电能驱动空气压缩机做功,输出高压力的压缩空气气流并在储气设施内进行储存;与此同时,将空气压缩过程产生的压缩热通过换热器传递给换热介质并传送至压缩热储热罐进行储存;在膨胀释能阶段,释放压缩空气,首先采用压缩热储热罐内储存的压缩热加热压缩空气,然后通过“带压补/换热系统”进行升温后,进入膨胀机做功,驱动发电机输出电能;“带压补/换热系统”由膨胀机抽气系统、补热器、换热器以及喷射器系统组成,“带压补/换热系统”的带压力烟气再经喷射器系统回注至膨胀机,完成带压力烟气的余热与余压回收。补热式压缩空气储能系统 I 架构见图 A.3。

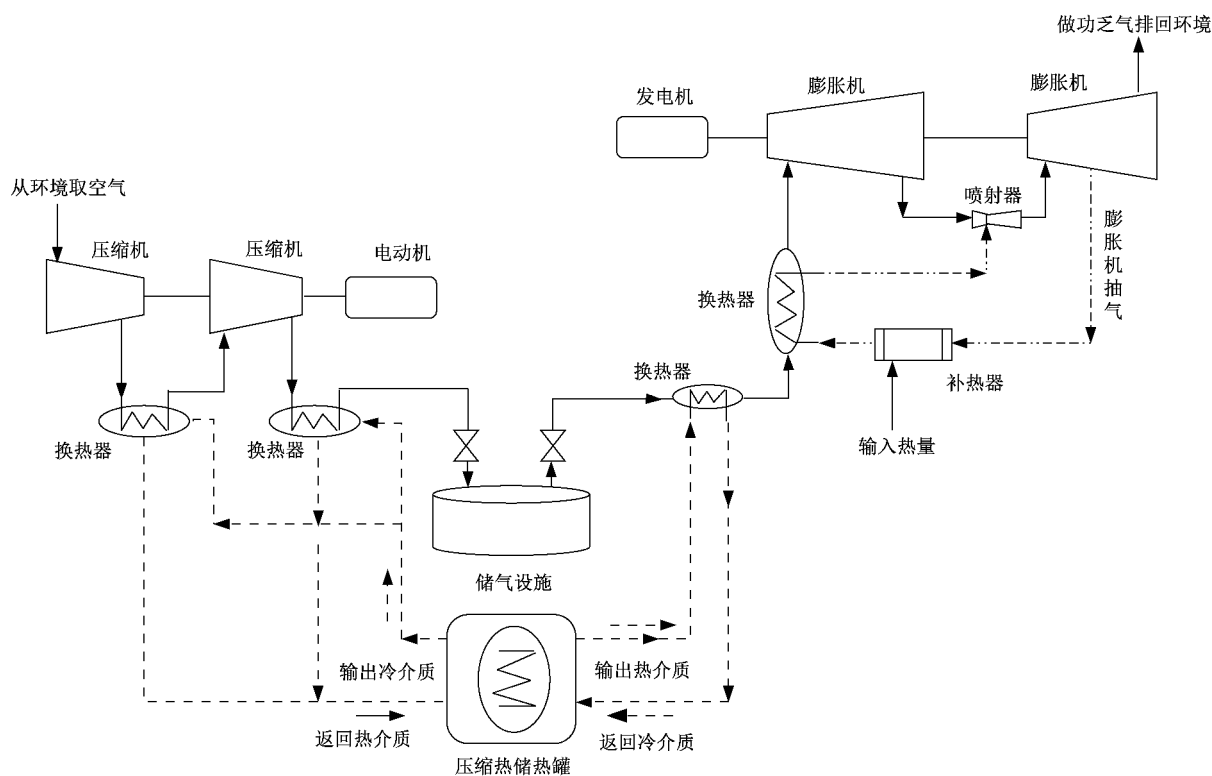


图 A.3 补热式压缩空气储能系统 I 的构架

A.4 补热式压缩空气储能系统 II

在压缩储能阶段,通过电能驱动空气压缩机做功,输出高压力的压缩空气气流并在储气设施内进行储存;在膨胀释能阶段,释放压缩空气,经定制的燃气-空气换热器加热后,进入空气膨胀机做功,驱动发电机输出电能。加热压缩空气的热源来源于燃气发电机组的乏气,燃气发电机组从空气中吸取空气并首先加压,和输入的天然气混合后生成高温高压烟气进入燃机膨胀机做功并输出电能,燃机膨胀机排气进入燃气-空气换热器将余热放给压缩空气。补热式压缩空气储能系统 II 架构见图 A.4。

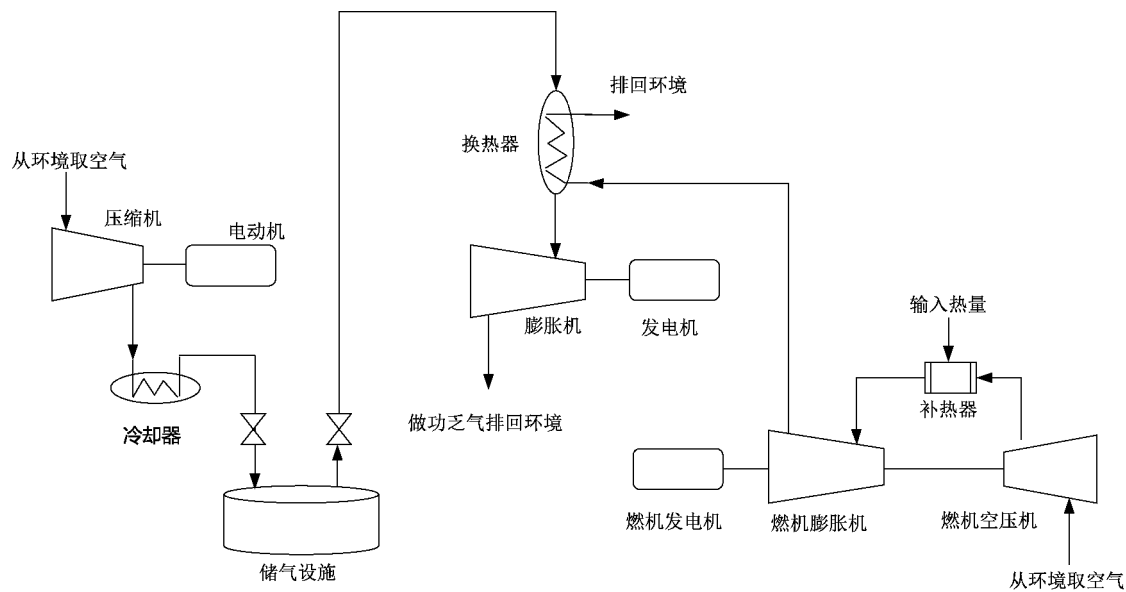


图 A.4 补热式压缩空气储能系统Ⅱ的构架

A.5 补热式压缩空气储能系统Ⅲ

在压缩储能阶段,通过电能驱动空气压缩机做功,输出高压力的压缩空气气流并在储气设施内进行储存;在膨胀释能阶段,释放压缩空气,经定制燃烧器进行燃料燃烧补燃与吸热升温后,进入膨胀机做功,驱动发电机输出电能。该工艺流程在膨胀释能阶段的吸热热量全部来自燃料的燃烧热。补热式压缩空气储能系统Ⅲ架构见图 A.5。

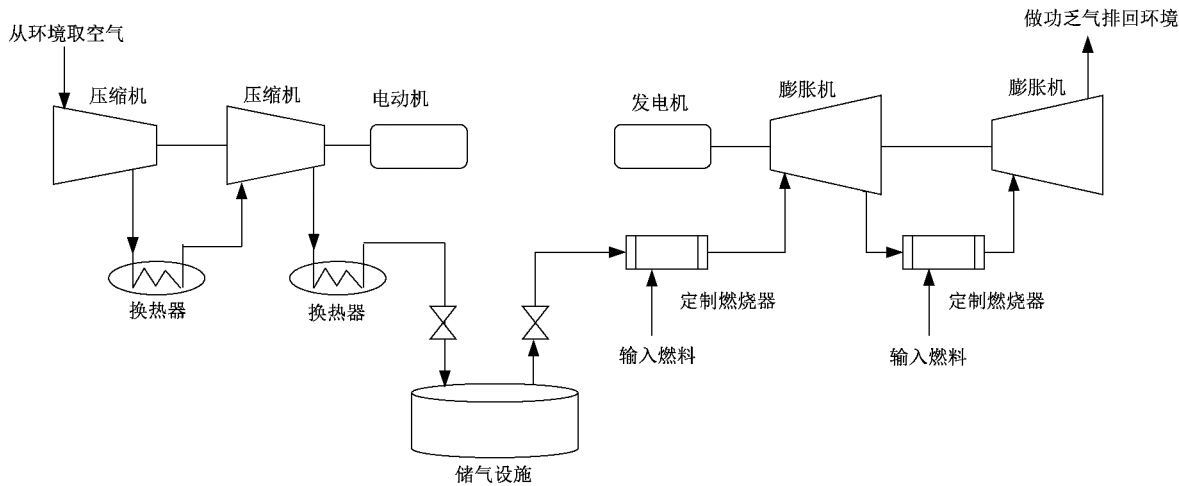


图 A.5 补热式压缩空气储能系统Ⅲ的构架