

10th
ANNIVERSARY
辉煌十年

中国抽水蓄能成套设备自主化 十年历程与成就

本书编委会 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

10th
ANNIVERSARY
辉煌十年

中国抽水蓄能成套设备自主化 十年历程与成就

本书编委会 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书系统介绍了我国抽水蓄能成套设备自主化进程,展示了所取得的跨跃式发展和丰硕成果。全面总结了我国抽水蓄能机组及成套设备自主化的实践经验。

全书共分6章,分别为:抽水蓄能电站概述、中国抽水蓄能设备自主化决策背景、中国抽水蓄能设备自主化历程、中国抽水蓄能设备自主化技术成果、中国抽水蓄能设备自主化效益、经验与展望。

本书可供水电和储能相关领域的工程技术人员、研究人员、管理人员和大中专院校相关专业的师生阅读、参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国抽水蓄能成套设备自主化十年历程与成就 / 《中国抽水蓄能自主化十年历程与成就》编委会编. —北京:中国电力出版社, 2015.12

ISBN 978-7-5123-8635-8

I . ①中… II . ①中… III . ①抽水蓄能水电站—设备—中国 IV . ①TV743

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 290179 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 12 月第一版 2015 年 12 月北京第一次印刷

880 毫米 × 1230 毫米 16 开本 8 印张 138 千字

印数 0001—1000 册 定价 85.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



编委会名单

名誉主编：刘琦

名誉副主编：郑宝森 林铭山

主 编：史立山

副 主 编：高苏杰

编 委：熊敏峰 周思刚 吴毅 李继宝 陈锡芳 唐数理
梁廷婷 胡清娟 姜海军 魏伟 王国海 郑小康
李正 陈顺义 吴维宁 覃大清 郭春平 骆林
李定中 郑新刚 王涛 刘观标 付之跃 邵宜祥
许其品 张泽明 唐健 陈兆文 衣传宝 徐东海
吴卫东 卢玉林 蔡卫江 郭自刚 傅新芬 章存健
孙廷昌 高崖 魏显著 王光 陈元林 高欣
胡万飞 杜方勉 杨志峰 叶宏 佟德利 胡忠启
傅诚 孟繁聪 牛翔宇 王威 刘登峰 张弓



序

抽水蓄能是集多种高新技术于一体、运行灵活、反应迅速的大容量储能方式。抽水蓄能电站是一种特殊电源，具有调峰填谷、调频调相、事故备用及黑启动等多种功能，是保障电网安全、稳定、经济运行的重要手段。抽水蓄能电站建设始于十九世纪八十年代，已有130多年的历史，现已成为电力系统的重要组成部分。到目前为止，全球抽水蓄能发电装机已超过1.4亿千瓦。

抽水蓄能电站机组设备技术含量高，制造难度大。长期以来，我国不掌握抽水蓄能电站设备制造技术，到上世纪末，我国大型抽水蓄能电站建设所需的机组设备全部从国外引进，不仅建设成本高，后期服务难度大，而且不利于我国高端装备制造业的发展。进入新世纪以来，为了适应我国抽水蓄能电站大规模建设需要，提高我国电站机组设备的制造能力，我国以抽水蓄能电站工程建设为依托，采取统一招标和技贸结合的方式，在引进、优化国外技术的基础上，通过自主创新和示范应用，在大型抽水蓄能机组及成套设备设计、制造及调试运行等方面，研发了一批具有自主知识产权的关键技术，实现了大型抽水蓄能机组及成套设备自主化目标和任务。

目前，以开发利用风能和太阳能等新能源发电为主要特征的能源转型正在全球迅速发展，风能和太阳能资源的随机和间隙特性对电力系统运行的灵活性提出了更高的要求，加快抽水蓄能电站建设是大势所趋。抽水蓄能机组



设备制造的自主化为我国抽水蓄能电站更快发展提供重要的技术支撑。《中国抽水蓄能成套设备自主化十年历程与成就》以中国抽水蓄能机组及成套设备自主化为主线，全面梳理了各有关单位在国家发展和改革委员会、国家能源局的组织和协调下，认真贯彻落实国家决策和部署，在抽水蓄能机组及成套设备自主化过程中取得的成就，回顾了我国抽水蓄能机组设备及成套设备自主化的决策过程和实践历程，认真总结了我国抽水蓄能机组及成套设备自主化经验，对促进我国抽水蓄能事业健康和可持续发展，以及对今后类似行业自主化工作，实现我国由制造大国向制造强国转变的战略目标，具有重要参考意义。

国家能源局副局长

刘琦

2015年9月



前言

2011年12月26日，我国首台自主研发、自主设计和自主制造的具有自主知识产权的安徽响水涧抽水蓄能电站机组正式投入商业运行，标志着我国抽水蓄能机组关键技术及成套设备自主化取得重大突破，实现了大型抽水蓄能机组及成套设备的自主化目标，这在我国抽水蓄能发展进程中具有里程碑意义。

大型抽水蓄能机组及成套设备被公认为是发电设备领域的高端装备。我国大型抽水蓄能机组及成套设备自主化工作起始于21世纪初。2003年以前，我国还不掌握抽水蓄能机组及成套设备的关键技术，不具备大型抽水蓄能机组及成套设备的研发、设计、制造和供货能力，抽水蓄能机组及成套设备市场为国外企业所垄断，严重阻碍了我国抽水蓄能事业的发展。随着我国经济社会的发展和电网容量的扩大，电力系统的调峰填谷调频调相要求不断增加，迫切需要建设更多的抽水蓄能电站，尽快实现抽水蓄能电站机组及成套设备自主化显得十分必要。在国家发展和改革委员会（简称国家发展改革委）、国家能源局的领导下，国家电网公司、中国南方电网有限责任公司、中国机械工业联合会、哈尔滨电机厂有限责任公司、东方电机有限公司、水电水利规划设计总院、中国水电工程顾问集团公司、国网新源控股有限公司、南方电网调峰调频公司、南瑞集团有限公司以及国内各有关抽水蓄能电站业主单位、有关设计院等单位通力合作，采取统一招标和技贸结合的方式，经技术引进、掌握优化、自主创新三个阶段，采用基础研究、设备研制、系统集成、试验验证、工程应用相结合的技术路线，实现抽水蓄能成套设备关键技术自主化。



第一阶段为技术引进阶段。2003年3月，国家发展改革委批准以河南宝泉、广东惠州和湖北白莲河抽水蓄能电站（后增加）为依托工程，采用统一招标和技贸结合的方式，以市场换技术，开启了我国大型抽水蓄能机组及成套设备自主化之路。

第二阶段为掌握优化阶段。2005年5月，为全面掌握和优化已引进的技术，巩固技术引进的成果，国家发展改革委又批准辽宁蒲石河、内蒙古呼和浩特和湖南黑麋峰抽水蓄能电站作为抽水蓄能机组及成套设备自主化后续工作的依托工程，机组设备采用议标方式在国内两大制造厂商之间进行采购，并由两大制造厂商作为主包方，国外公司为技术支持方，以实现抽水蓄能机组及成套设备技术的掌握和优化。

第三阶段为自主创新阶段。2007年，为加快实现抽水蓄能机组及成套设备自主化，国家发展改革委决定安徽响水涧、福建仙游、江苏溧阳、浙江仙居等抽水蓄能电站作为抽水蓄能设备自主化依托工程，机组设备采用议标方式在国内两大制造厂商之间进行采购，由我国厂家独立进行机组及相关控制设备的设计和制造，对核心技术进行自主研发和创新，全面实现抽水蓄能机组及成套设备的自主化，以提高我国抽水蓄能机组及成套设备的核心竞争能力。

为掌握核心技术，在十多年的自主化过程中，国内有关企业和科研机构共同开展了抽水蓄能机组及成套设备的关键技术研究，在水泵水轮机、发电电动机、计算机监控系统、静止变频系统、调速系统、励磁系统、继电保护系统及调试、运行等方面取得全面突破，研发出一批具有自主知识产权的关键技术，实现了中国抽水蓄能产业的技术跨越，显著提升了中国高端装备制造业的自主创新能力和国际竞争力。



为全面总结中国抽水蓄能机组及成套设备自主化经验与成果，在国家能源局领导下，由国家电网公司牵头，会同国内有关单位编写了《中国抽水蓄能成套设备自主化十年历程与成就》。该书旨在记录我国抽水蓄能机组及成套设备自主化的历程，总结自主化过程所取得的成功经验，以期更好地促进中国抽水蓄能事业健康和可持续发展，对今后类似行业自主化工作起到示范、指导和借鉴作用。本书共分6章，第1章，主要介绍抽水蓄能电站的工作原理、作用以及抽水蓄能技术与其他储能技术相比所具有的优势；第2章，介绍2003年前中国抽水蓄能总体状况及抽水蓄能机组及成套设备自主化决策背景；第3章，阐述在国家发展与改革委员会、国家能源局的领导下，各有关单位认真贯彻国家决策和部署，克服困难，实现抽水蓄能机组及成套设备自主化的十年历程；第4章，介绍我国抽水蓄能机组及成套设备自主化取得的重大技术突破；第5章，介绍我国抽水蓄能机组及成套设备自主化十年来所取得的经济与社会效益；第6章，总结我国抽水蓄能机组及成套设备自主化的主要经验，展望未来抽水蓄能技术发展趋势。

本书编撰工作得到国家发展与改革委员会、国家能源局、国家电网公司、中国南方电网有限责任公司、各制造厂商、电站业主、设计院等单位的大力支持，在此一并表示感谢。

由于时间仓促，书中不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

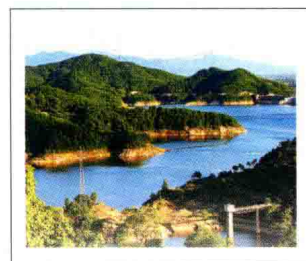
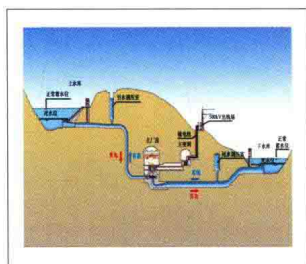
本书编委会

2015年9月

目录

序

前言



第 1 章 抽水蓄能电站概述..... 1

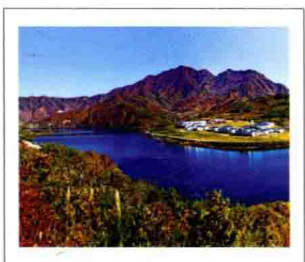
- 1.1 抽水蓄能电站原理..... 1
- 1.2 抽水蓄能电站作用..... 2
- 1.3 抽水蓄能电站优势..... 4

第 2 章 中国抽水蓄能设备自主化决策背景..... 7

- 2.1 自主化前概况..... 7
- 2.2 抽水蓄能成套设备自主化必要性..... 9
- 2.3 抽水蓄能设备自主化决策..... 10

第 3 章 中国抽水蓄能设备自主化历程..... 13

- 3.1 技术引进阶段..... 13
- 3.2 掌握优化阶段..... 31
- 3.3 自主创新阶段..... 49



第4章 中国抽水蓄能设备自主化技术成果..... 67

- 4.1 水泵水轮机..... 67
- 4.2 发电电动机..... 75
- 4.3 自动控制系统..... 83
- 4.4 机组系统集成..... 90
- 4.5 试验平台..... 97

第5章 中国抽水蓄能设备自主化效益..... 101

- 5.1 经济效益..... 101
- 5.2 社会效益..... 102

第6章 经验与展望..... 109

- 6.1 主要经验..... 109
- 6.2 抽水蓄能新技术展望..... 110

参考文献..... 113

第1章 抽水蓄能电站概述

1.1 抽水蓄能电站原理

电能，是现代人类生活和经济社会发展的必需品。随着社会经济的不断发展和人们生活水平的日益提高，对电能的需求越来越大，对电能质量的要求越来越高。由于电力供需的实时平衡特性及发电和用电之间的不平衡性，电能的存储成为人类急需破解的难题。100多年来，人类发明了各种储能方式和方法，经过大量技术研究和实践表明，抽水蓄能是目前世界上唯一经济、可靠并商业化运行的超大规模物理储能方式。

抽水蓄能电站（工作原理见图 1-1）利用兼具抽水和发电两种功能的抽水蓄能机组，来实现储能的目的。在电力系统负荷高峰时作水轮机运行，从上水库向下水库放水发电，将水的势能转换为电能；在电力系统负荷低谷时作水泵运行，用电网剩余电能从下水库向上水库抽水，将电能转换为水的势能储存起来，堪称巨型“蓄电池”。

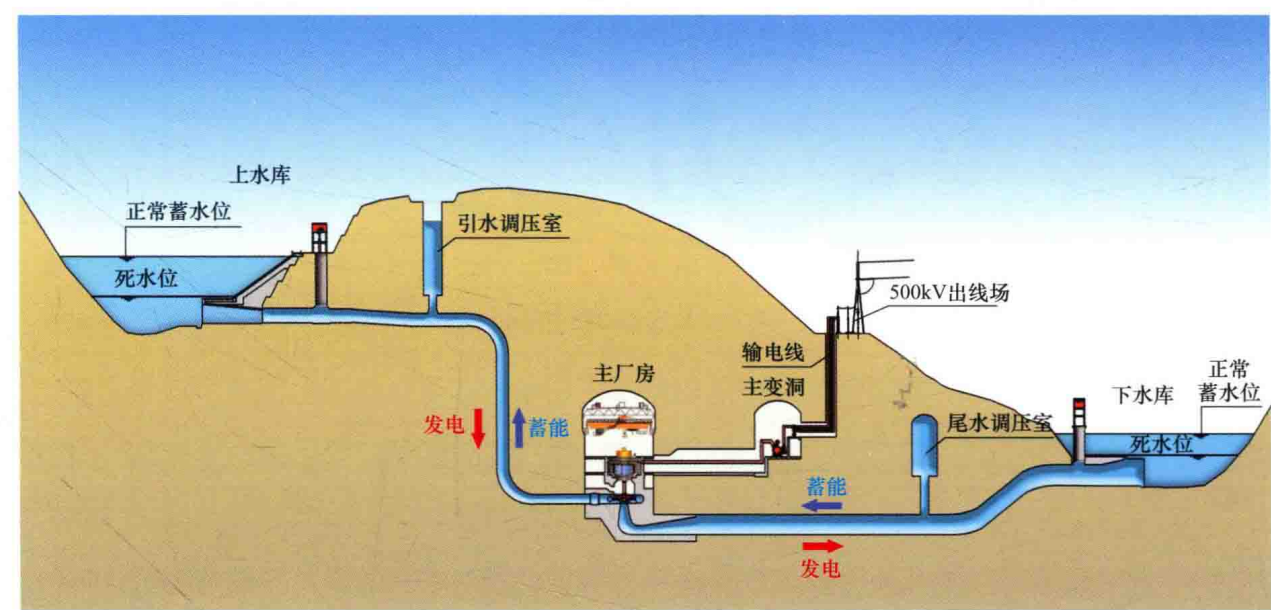
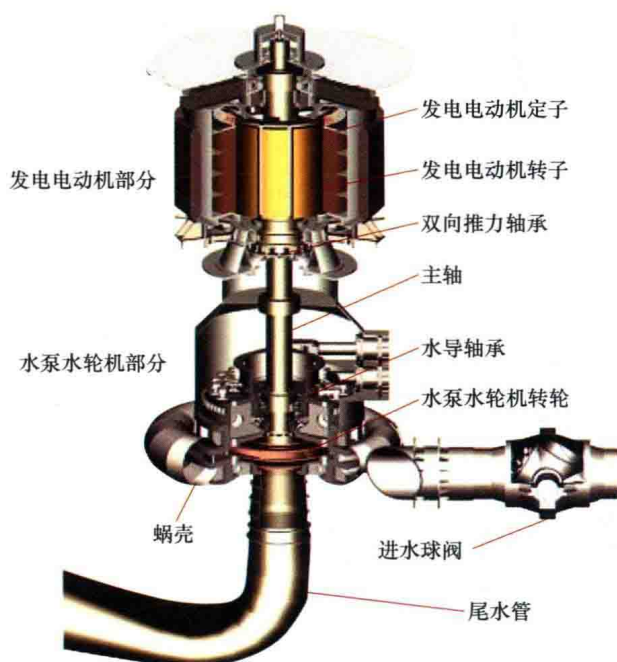


图1-1 抽水蓄能电站工作原理示意图

世界上第一座抽水蓄能电站于 1882 年诞生在瑞士的苏黎世，至今已有 130 多年的历史。早期的抽水蓄能电站使用的是单独的水泵机组和水轮机组，即水泵配电动机，水轮机配发电机，形成四机式机组。后来随着电机技术的进步，出现了将发电功能与电动功能相结合的发电电动机，从而出现了将水泵、水轮机及发电电动机联接在一起的三机式机组。这种机型较四机式机组工程投资小，且水泵和水轮机都向同一方向旋转，在切换工况时不需要停机，机组调节的灵活性大幅增加，因此，四机式机组逐渐淡出历史舞台。

20 世纪 30 年代末，随着水力机械技术的进步，出现了水泵和水轮机两种功能合为一体的可逆式水泵水轮机。1937 年在巴西安装的佩德拉机组和 1954 年在美国安装的弗拉特昂机组，是最早的两机式抽水蓄能机组（即机组由发电电动机和水泵水轮机两部分组成，如图 1-2 所示）。到 20 世纪 60 年代，可逆式机组已成为抽水蓄能电站使用的主要机型，得到广泛的应用，三机式机组几乎不再应用。



►图1-2 可逆式抽水蓄能机组结构示意图

1.2 抽水蓄能电站作用

抽水蓄能电站是电网电源结构与负荷需求发展到一定阶段的产物，具有调峰填谷、调频调相和事故备用等多种功能，可改善和平衡电力系统负荷，提高电力系统供电质量和经济效益。

益,是电力系统运行管理的重要工具,是确保电力系统安全、经济、稳定运行的支柱,是电网的稳定器、调节器、平衡器,其主要作用如下。

(1) 提高电力系统的稳定性。不断扩大的电网规模增大了电力系统安全稳定运行的风险,大型抽水蓄能电站启停的高度灵活性、负荷调节响应快和大幅度调节电力系统负荷的能力,能有效维护电力系统的稳定性,保证电网安全。

(2) 调峰填谷作用。抽水蓄能机组运行灵活,是系统内唯一的大规模调峰、填谷电源,具有双倍调峰容量,与常规水电机组和火电机组相比,其调峰能力具有很大优势,是电力系统重要的调峰工具。

(3) 调频、调相作用。当电网的频率下降至设定值时,抽水蓄能机组可自动从水泵工况、调相工况和停机状态转为发电工况,向电网输送电量,使电网的频率自动调整,保证电网的频率质量。抽水蓄能机组在发电工况、水泵工况、发电调相工况和水泵调相工况等 4 种工况下,均可以向电网输送无功以提高电网的电压,也可以从电网中吸收无功以降低电网的电压,从而保证电网的电压质量,起到调相作用。

(4) 大幅提高消纳新能源的能力。目前新能源中的风电和太阳能光伏发电以可再生、清洁低碳而得到迅速发展,但风电和太阳能具有随机性、间歇性和波动性等特点。抽水蓄能电站具有良好的调节性能和快速负荷跟踪能力,在电力系统中配置一定的抽水蓄能机组,就可以安全稳定地实现这些新能源的消纳,有效减少风电场等新能源并网运行对电网造成的冲击,提高风电场、光伏发电并网运行的协调性和安全稳定性。

(5) 负荷跟踪作用。抽水蓄能机组可以随时将出力变幅调整在额定出力的 50% ~ 105% 或更大的范围内,以适应电网的负荷需要。电网调度无须频繁地调度火电机组出力,使火电机组的负荷相对稳定,优化火电机组运行条件,从而节省火电厂的运行费用。

(6) 事故备用。现代电力系统一般储备一定量的备用容量,包括检修备用容量和紧急事故备用容量,以应付不可预见的负荷需要。抽水蓄能机组可以完全代替空转的热备用火电机组,节省火电机组的启动费用和空运转费用。

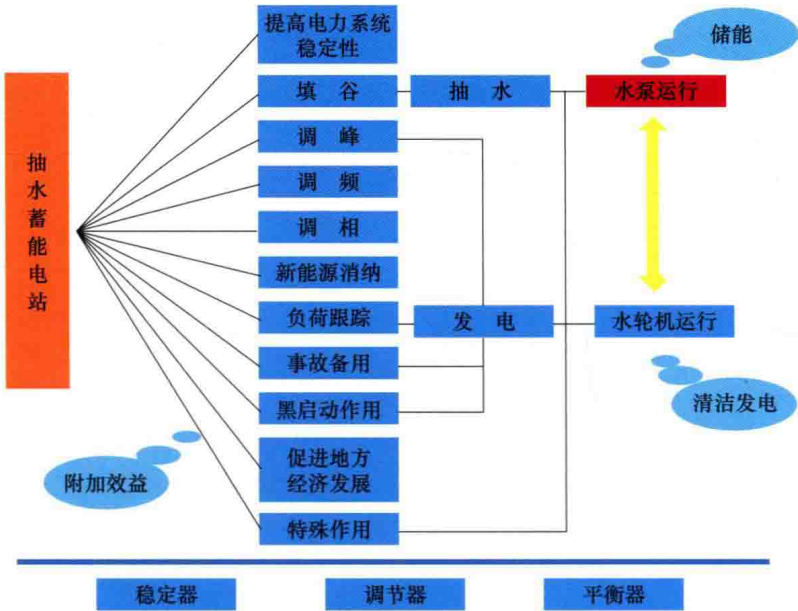
(7) 黑启动作用。黑启动是电网崩溃后系统恢复正常运行的重要措施之一,抽水蓄能电站可以在无外界帮助的情况下迅速自启动,并通过输电线路输送启动功率带动其他机组,从而使电力系统在最短时间内恢复供电能力。

(8) 促进地方经济社会发展。抽水蓄能电站的建设、运行,可以充分利用当地丰富的资源优势,带动电站所在地区其他工业、旅游业及其相关产业的发展,给地方政府带来可观的

财税收入，为当地富余劳动力提供新的就业机会，对促进地区经济发展、城镇化建设、改善当地居民生活水平起到积极作用。

（9）特殊作用。由于抽水蓄能机组既可以作为电源又可以作为负荷，为电网或大火电机组的调试投产提供负荷作用，保证电网或火电机组调试的顺利进行，避免电网或大火电机组甩负荷时对电网造成冲击。

综上，抽水蓄能电站的功能可用图 1-3 表示。



►图1-3 抽水蓄能电站功能

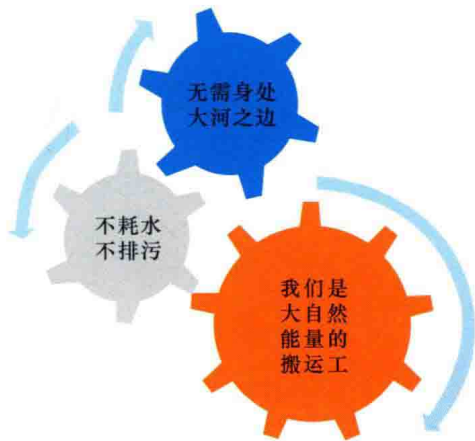
1.3 抽水蓄能电站优势

目前世界上的储能技术主要分为物理储能（抽水储能、压缩空气储能、飞轮储能等）、化学储能（如铅酸电池、氧化还原液流电池、钠硫电池、锂离子电池等）和电磁储能（如超导电磁储能、超级电容器储能等）三大类，其中大规模的储能以抽水蓄能技术最为先进、可靠。其优势表现如下。

（1）储能规模大、运行时间长。抽水蓄能技术在功率和储能容量等规模上可以满足大规模新能源基地的储能要求。抽水蓄能电站可以按照容量需要建造，机组单机容量可在几兆瓦到几百兆瓦之间，储存能量的释放时间可以从几小时到几天，能量转换效率稳定，不存在衰减问题，机组主机设备设计寿命 30 ~ 50 年以上，主要水工建筑物设计寿命 100 年以上，这

些均是其他储能技术所不可比拟的。

(2) 清洁、无污染，附加环境效益突出。抽水蓄能电站以水为介质，利用水能与机械能的转换完成储能，循环利用水资源，除蒸发渗漏外不耗水；工程运行期不产生污染物，不破坏资源和景观，工程运行对环境基本没有不利影响，不存在电池储能的回收等问题（见图 1-4）。抽水蓄能不仅自身清洁，而且具有一定的环境效益。抽水蓄能电站与风电、太阳能、大型火电、核电、水电相配合，加大了对新能源的消纳，减少大型核电、火电低效率运行时间，相应减少了污染物排放及其治理费用，具有良好的附加环境效益。



►图1-4 “能源搬运工”

(3) 技术先进、可靠、经济。抽水蓄能技术不断发展，至今已有 130 多年历史，技术先进、可靠，是电力系统中应用最为广泛的一种储能技术。截至 2014 年底，全球储能累计装机容量为 141.2GW，抽水蓄能占 99%，这一规模也是目前其他储能技术无法达到的。

抽水蓄能电站投资较低，单位千瓦造价 0.5 万元左右，在抽水电价合适的情况下，建设抽水蓄能电站进行储能，将弃电量转换为电网优质电能的经济效益显著。

(4) 与其他电源联合运行的优势明显。当前技术条件下，与风电、太阳能实现联合运用的储能系统仅有抽水蓄能、钠硫电池和液流电池等储能装置。与钠硫电池和液流电池等储能装置相比，抽水蓄能电站具有单位千瓦投资低、环境友好、运行寿命长和储能容量大的特点。抽水蓄能可以实现与风电、太阳能联合运行，如西班牙为了开发利用 EI Hierro 岛、Canary 岛的风能资源，建设了相应的抽水蓄能电站与之联合运行。在德国、丹麦、美国等风能利用发达国家，都不乏这样的工程实例。

