

我国水利和水电可持续发展新途径

——多类型抽水蓄能电站

曹楚生

(天津大学水利系, 天津 300072)

[摘要] 对我国水利水电可持续发展和抽水蓄能发展做了阐述。着重从国内外已建抽水蓄能电站的经验, 提出了修建多种类型抽水蓄能作为常规水电的补充。这种融水利、水电、抽水蓄能于一体, 并结合当地电力系统的综合开发模式, 给水利和水电带来了新的活力。建议今后视各地区各河段水利和水电发展情况, 按上述模式对新建及改扩建工程进行动态规划和设计, 这将为我国水利水电的可持续发展提出新的开发前景。

[关键词] 水利; 水电; 抽水蓄能; 电力系统; 综合开发模式; 可持续发展

1 水利和水电的可持续发展

我国水资源总量虽较丰富, 但人均占有量很小, 且地区分布很不平衡。我国水能资源较为丰富, 理论蕴藏容量为 6.76×10^8 kW, 可开发量为 3.78×10^8 kW, 占世界第一位。

水资源(含水能资源)是可循环再生的, 经开发即可利用, 可以除害兴利, 如不开发, 只能白白付之东流, 还要带来水旱灾害。水利水电枢纽一旦建成, 可以年复一年持续运行下去, 这是水利和水电可持续发展的基本条件。目前, 我国某些地区水资源极其贫乏或已开发殆尽, 再修建新的枢纽就受到限制, 这将影响水利和水电的可持续发展。

水资源和水能资源的开发利用, 关键在于水利和水电工程建设。各工程的建设条件往往差异很大。例如, 长江和珠江干支流、西南地区水资源丰富, 开发条件较好; 黄河流域雨量虽然较少, 但干流源远流长, 集雨面积大, 上游源头雨量较丰, 故其干流的上中游也有利于水电的开发; 其他如淮河、海河干旱缺水, 源近流短, 水量少且不均衡, 水电开发条件不好; 沿海地区雨量和水量虽然较

丰, 但有的地区或缺乏好坝址及兴建水电工程条件, 或由于移民太多, 影响环境生态以及经济指标不好等原因, 水电开发条件也不理想。近年来, 我国水电事业发展很快, 在建和待建水电站星罗棋布。如三峡、二滩、李家峡、万家寨、小浪底等大型工程正在修建; 待建的大工程更多, 如小湾、溪落度、向家坝、天生桥、瀑布沟、拉西瓦、龙滩等等, 它们的装机都在 100×10^4 kW 以上, 最大的达 1820×10^4 kW, 为世界之冠。但是, 这些水电站的地理位置偏重在我国的西南、西北及中部, 华北、东北及沿海地区则较少。如海河流域已建大中小水库约 190 座, 总库容已与全流域年平均径流量相等, 控制了山区流域面积的 83% 和径流的 55%, 在全国各流域居首位。总的看, 我国部分地区如长江和珠江干支流、黄河干流以及西南地区水电开发态势较好, 而华北、东北以及沿海等地区进入 1980 年前后, 水利水电已处于步履维艰的境地。

2 抽水蓄能电站的兴起和发展

工业发达国家常规水电建设在 20 世纪五六十年代先后处于停滞不前地步, 常规水电发展步履维

[收稿日期] 2000-07-31

[作者简介] 曹楚生(1926-), 男, 江苏无锡市人, 中国工程院院士, 天津大学教授

艰。随着经济发展，社会对电力的需要日益增长，电网中各种能源包括煤电、油电、核电、地热发电，以及天然气发电等增加很快。而常规水电因受水能资源的限制，往往不能成比例增长，在电网中所占比例日益减少。这就造成电力系统中可调峰电源短缺，而低谷时又造成电流周波加大，影响送电质量。为此，抽水蓄能电站利用电力系统后半夜低谷剩余电能抽水蓄能转换在尖峰时发电，作为水电补充得到迅速发展。近三四十年来，工业发达国家抽水蓄能电站发展越来越快。迄今有些国家，如美国、日本抽水蓄能电站的总容量已超过 $2\,000 \times 10^4$ kW，不少国家已占常规水电容量的一定比例，日本甚至已近相等。据不完全统计，世界抽水蓄能电

站有 400 余座，总容量 1.0×10^8 kW 以上。

抽水蓄能电站的迅速发展，不仅反映在日益增长的数量上，还反映在它的型式、调节性能等内涵上。这都得益于抽水蓄能电站技术的不断进步。抽水蓄能电站的作用和效益表现在电力系统的运行中，作为水电的补充并有利于水电的可持续发展。

早期抽水蓄能电站既有常规机组又有抽水泵，称混合式蓄能电站。这类电站始建于欧洲。抽水蓄能电站迄今已有近 100 年历史，但开始进展不快，至 20 世纪六七十年代以后才迅速发展。据统计，1970、1980、1990 年总容量分别达到 $1\,604 \times 10^4$ 、 $4\,600 \times 10^4$ 和 $8\,300 \times 10^4$ kW。国外各种类型抽水蓄能电站发展如表 1。

表 1 国外各种类型抽水蓄能电站

Table 1 All types of pumped storage power stations in foreign countries

国别	名称	年份	类型	调节周期 /d	水库容积/ 10^4m^3		满载运行/h		水头/m	装机容量 / 10^4 kW
					上库	下库	发电	抽水		
美	Bath County	1985	纯蓄	7	2 775	2 775	11.3	13.5	380	210
英	Dinorwic	1982	纯蓄	1	670	700	(4.78)	(6.48)	513	180
法	Grand Maisoon	1986	混蓄	7, 90	13 200	1 430			8 219	120
美	Racoon	1978	纯蓄	7	4 480	4 000	20	27	317	160
日	葛野川	1999	纯蓄	1	830	830			751	160
俄	Kaishador	建成	纯蓄	1	9×10^5 kWh		(5.6)		100	160
日	新高瀨川	1980	混蓄	1, 7	1 620	1 620	7	12.2	229	128
日	玉原	1983	纯蓄	1, 7	1 200	3 589	(13)		5274	120
日	新丰根	1972	混蓄	(7)	5 350	20 514	(23)		203	112
南非	Drakensberg	1982	纯(调水)	7	2 749	2 941	27.8			108
日	下乡	1994	纯蓄	1	1 600	4 450			421	104
意	Edelo	1981	混蓄	(7)	1 704	133			1 265	100
美	Rocky Mt.	1995	纯蓄	1, 7	1 510	1 600			186	96
法	Montezic	1982	混蓄	(7)	2 000~3 000	2 000~3 000	12	18	423	90
日	奥矢作 II	1980	纯	2	1 000	6 500	(11.8)		404	82
瑞士	Schaffhausen	1909	混蓄	1, 7	/	/			154	0.2

表 1 列出了 16 座国外建成的主要有代表性的大型抽水蓄能电站。其中，10 座为纯抽水蓄能电站，6 座为混合式蓄能电站。纯和混合式抽水蓄能的区别主要在于上库有无来水。为便于了解抽水蓄能电站的性质，包括形式和调节性能，列出了上下库容和满载运行时间。纯蓄能电站中以日调节居多，满载发电 5 h 和抽水 7 h 左右，故它的上下库容较小。但是，美国的 Bath County、Racoon 和日本的玉原、奥矢作 II 及南非 Drakensberg 等 5 座纯抽水蓄能电站的调节性能均超过日调节，可达周或 2 d 调节。从文献记载，这些工程由于电力系统的调峰要求，以及它们上下库的特殊有利地形，使

上下库容积加大并使发电和抽水满载运行时间达到 10~20 h 左右，大大改善了电站的运用灵活性。混合式抽水蓄能电站一般上库容积较大，可以对天然来水进行调节，下库专为抽水蓄能而设，故一般以日调节居多，发电和抽水满载运行时间仍以 5 和 7 h 左右居多。如表 1 所示，也有一些电站为满足电力系统调峰要求定为周调节，如法国的 Grand Maisoon 和 Montezic，日本的新高瀨川和新丰根，意大利 Edelo 等 5 座为混合式周调节抽水蓄能电站。

从上述国外抽水蓄能发展可以看出，不仅在总装机的数量和容量上日益增加，而且在电站的型式

及调节性能方面向各种不同方向和途径发展,更加提高了抽水蓄能电站在电力系统中的适应性,增加电站的发电量和效益。

我国抽水蓄能起步较早,20世纪60年代即修建了岗南和密云小型抽水蓄能电站,装机容量分别为 1.1×10^4 和 2.2×10^4 kW抽水蓄能机组。混合式蓄能电站共装机 42×10^4 kW,其中蓄能机3台共 27×10^4 kW,常规机1台 15×10^4 kW。1992年

第一台机组投入运行,1993年全部建成。经多年运行,削峰填谷对华北电力系统起到了显著的作用,对我国大型抽水蓄能电站的建设发展起到一定的促进作用。最近,广州抽水蓄能电站建成,总装机 240×10^4 kW,为世界之冠。此外,十三陵、羊卓雍湖和天荒坪等已相继建成。安徽响洪甸在原有常规电站的基础上近扩建抽水蓄能机组,成为混合式开发。我国抽水蓄能电站见表2。

表2 我国各种类型大型抽水蓄能电站表

Table 2 All types of large pumped storage power stations in China

名称	年份	类型	调节周期 /d	水库容积/ 10^4 m ³		满载运行/h		水头/m	装机容量 / 10^4 kW
				上库	下库	发电	抽水		
潘家口	1992	混蓄	1	195 000	1 000	5.0~7	7~10	85~36	42 (27可逆15常规)
广州一期	1993	纯蓄	1	700	750	5.43	7.16	537	120
十三陵	1995	纯蓄	1	380	8 100	4.13	7.02	430	80
羊卓雍湖	1996	纯蓄	1	大	小			840	9
溪口		纯蓄	1	大	小			276	8
天荒坪	1998	纯蓄	1	805	805			560	180
广州二期	1999	纯蓄	1	1 400	1 450	5.43	7.16	537	120
响洪甸	1999	混蓄	1	大	440	/		64	12 (8可逆4常规)
明湖		纯蓄	1	14 200	740	5.8	7.7	316	100
明潭		纯蓄	1	14 200	1 200	6.7	7.8	380	100

表2共列出我国10座抽水蓄能电站,其中,混合式2座,余8座为纯抽水蓄能电站。据1993年统计,我国大陆抽水蓄能电站容量为 120×10^4 kW,占世界第12位;近年来发展飞跃,容量已达 555×10^4 kW,预计居世界位次当可提前。这10座抽水蓄能电站均为日调节,发电和抽水时间为5 h和7 h左右。潘家口混合式蓄能电站下池库容虽留有余地(从 700×10^4 m³扩大至 $1 000 \times 10^4$ m³),还是不能满足周调节要求,但从调度灵活性上已留了一些余地。还应该指出,台湾省的明湖和明潭抽水蓄能电站的上库均为著名的日月潭水库,容积很大,达 1.42×10^8 m³,且有明显的天然来水,故这两座蓄能电站表中列为纯抽水蓄能电站,但实际上也可认为它们与已有常规水电厂大观一厂共同构成混合式抽水蓄能电站,3个电站具有1座共同的很大的上库,这对抽水蓄能电站的运行是非常有利的。它们的年运行时间高达5 000 h以上。潘家口混合式抽水蓄能电站经几年运行,实际发电量及运行小时数超出原设计值。从国内及国外运行资料看,一般日调节纯抽水蓄能电站实际运行的年发电量及运行小时数常达不到设计值,故混合式在这方面有一定的优越性。

3 抽水蓄能电站的类型和适应性

抽水蓄能电站具有2个明显的特点:一是需要水但基本上不耗水,故抽水蓄能的规模不像常规水电那样决定于所在站址的来水流量和落差,而主要决定于上下池容积和落差,更主要的是决定于所在电网可供低谷时抽水的电量;二是电站形式很多,适应性强,可视情况选定。在山区、江河梯级和平原均可修建抽水蓄能电站。

1) 在山区,根据地形,往往选择高水头,一般水头 H 为100 m~600 m居多,当然水头越高越经济,上下池之间距离则越近越有利。日本关西电力公司对抽水蓄能选点要求, $H \geq 500$ m, $L \leq 3$ km,而东京电力公司条件则放松,对水头无规定。这说明只要地形许可,水头高一些是有利的,但还要视具体情况定。

2) 河流梯级水电站需要时可考虑抽水蓄能混合式开发,一般以中低水头为多,即相邻梯级电站除常规发电机组外可设置几台可逆式机组,如潘家口蓄能电站。也可考虑在某一河流梯级水电站下游另建下池,如安徽响洪甸蓄能电站。总之,如蓄能机组(即可逆机组)和常规机组的水都来自同一上

库，水量可在同一上库中调节，2种机组互为备用，互为补充，即丰水期可逆机组可按常规机组只作发电运行，而枯水期常规机组也可利用可逆机组所抽的水进行发电，这样可以增加工程效益。最近，安徽利用淠河磨子潭和佛子岭上下2座已成水库进行佛磨抽水蓄能电站的设计，这样上下库都很大，对满足电力系统运行需要十分灵活。

3) 平原及沿海地区低水头水电站和潮汐电站的蓄能运行，可利用电力系统低谷电抽水而在尖峰时发电会给这些电站带来显著效益。法国、英国、荷兰及我国都有采用可逆式贯流机组并进行蓄能运行的经验。此外，近年来国外在平原地区已有修建地下下池（专门开凿隧洞群或利用弃置的矿井），而上池可利用地面河、湖或另行修建。上下池之间落差可视需要确定，水头往往可达500~600 m，甚至更高。这样就为平原地区创造了修建高水头蓄能电站的条件。

综上所述，抽水蓄能电站基本上不受地形和来水流量的限制，也不受当地水能资源蕴藏量的限制。在各种地形条件下，在山区、平原等均有条件修建抽水蓄能电站，关键在于因地制宜择优选择。

4 多种抽水蓄能电站的可持续发展

我国可持续发展的战略已经确立：要在各种资源的可持续开发利用和良好的生态环境的基础上，不仅要保持经济的高速增长，还要谋求社会的稳定与发展。水电除了要满足自身的可持续性外，还要满足环境、经济和社会的可持续发展。

众所周知，在电网的各种能源构成中，水电具有较好的调峰性能，可改善电网中火电机组的发电状况，减少有害气体（CO₂等）的排放量，既可改善电网中电的质量，又可改善地区的环境。

近年来几座大型抽水蓄能电站相继投入运行，它的优越性逐渐被社会所认识，主要优点如下：

抽水蓄能电站本身虽不能生产电能，但可利用低谷电能（即剩余电能）抽水，在尖峰时发电，既可调峰又可填谷，还可调频和事故备用，在电力系统中具有能量储存转换和改善优化的功能；

抽水蓄能与煤电和油电比，跟踪负荷性能好、开停机灵活，节煤节油，调峰灵活，与常规水电比还具有填谷功能，其调峰功能为水电的2倍；

一般认为，抽水蓄能电站的工程量比常规水电站少得多，但可逆机组目前国内还无成熟制造经

验，需要从国外引进，其价格较高。即便如此，抽水蓄能电站单位容量投资一般仍比常规水电为低，同时施工期限亦短。

此外，还应该指出，在水利水电枢纽中补充了抽水蓄能功能，有利于水资源（含水能资源）的进一步开发，更大地发挥水利水电等综合效益，有时可大大改善工程的有关指标和枢纽在系统中的作用，使原来指标差、效益低的项目改观，增加工程的开发价值，给水利水电工程带来新的开发前景。

目前，全国水利水电和电力建设形势对抽水蓄能的发展非常有利，主要表现在以下几方面：

1) 各地区和各流域，常规水电发展很不平衡，有的水能资源储量贫乏或已开发殆尽，不得不发展抽水蓄能以补水电所占电网中比重不足，如华北、东北、及东南沿海地区。

2) 有些地区水电比重虽不低，但多径流水电如四川、湖南、江西、湖北亦需建抽水蓄能电站。

3) 我国煤炭资源不均衡，运煤困难，发展坑口电站，相应带来北电南送。目前我国西部大开发在即，而水电西南西北多，又将实现西电东送。随着三峡建成，我国东西南北输电网形成。这些输电对平衡全国各地电力有好处，但有时由于某地区为了接受上述几种送入的电又必须视送入电的情况，增建一些调峰能力强的抽水蓄能电站。

4) 我国核电已在浙江、广东投入运行并将在江苏、山东兴起，也需相应增建抽水蓄能电站。

目前，我国抽水蓄能电站的建设和规划设计工作正在全国范围内蓬勃展开。从我国已建和在建的抽水蓄能电站看，它们各具特色，有高、中、低水头的，有大型也有小型的，为我国抽水蓄能电站建设走出了第一步，并取得了宝贵的经验。由于上述4个原因，预计抽水蓄能电站建设将在华北、东北、东南沿海地区以及华中、中南等地迅速展开。在今后设计建设中，抽水蓄能电站的运行将逐渐改善其调节性能，逐渐向双日或周季调节过渡。

5 结语及建议

当前，全国水利水电和电力建设形势对发展抽水蓄能极为有利，在过去已取得成绩的基础上，除进一步完善已建和在建抽水蓄能电站的管理运行和建设外，还要认真做好抽水蓄能规划选点工作。如上所述，在抽水蓄能方面除一般应注意因地制宜选择合适的电站形式和布置外，有条件的站站

还要注意选择上下池的有利地形以取得较大的容积,以改善其调节性能并增加工程效益;在混合式蓄能电站方面,有条件时要注意选择较高水头并适当加大下池容积,以改善性能并提高电站效益。此外,我国目前有许多已建成的水电站,电站设计规模水平年早已过时,电站容量显得不足,亟待增容扩建。因此,在有条件时可考虑增建抽水蓄能机组成为混合式开发,作为常规水电的补充,其效益当会显著增加。这种融水利、水电、抽水蓄能于一体,并结合当地电力的综合开发模式将给水利和水电带来新的活力。据国外经验(见表1),法国在新建 Grand Maisoon 和 Montezic 时即按上述综合开发模式考虑,前者设有 120×10^4 kW 可逆机组和 60×10^4 kW 常规机组,而后者只采用 90×10^4 kW 可逆机组。日本新高瀨川混合式日/周调节,原河段有5座常规电站,原总装机仅 4×10^4 kW,后按上述综合开发,改建为 128×10^4 kW 的抽水蓄能电站。美国著名 Grand Coulee 电站几经改建,先后增水泵和可逆机组,总容量达 888×10^4 kW。我国潘家口、响洪甸、佛磨、双沟以及天堂等均采用这种混合式抽水蓄能电站。这种开发模式不仅改善了水利水电枢纽的功能,还大大改善了工程的指标,使原来效益差,指标差的工程改观,增加了工程开发价值,给水利水电工程带来新的开发前景。为此,建议今后视各地区,各河段水利水电发展情况以及当地电力情况按上述模式对新建、扩建、改建工程进行动态规划和设计。

水利水电(含抽水蓄能)和电力相结合的开发

模式,水利水电与电力相辅相成,通过电力(电网)的支持提供了抽水电力,倒过来也为电网增加了调峰和填谷能力,改善供电质量,为电力的发展提供水源等条件。因此,多种形式的抽水蓄能作为水电的补充,对水利水电的可持续发展大有好处,扩大了水电的内涵,将抽水蓄能也补充入内。

这种混合式开发改变了过去“以水定电”性质,即只能在需要供水时发电,不供水时不能发电。如今可以完全按照电力系统要求进行抽水或发电调度,同时对水库的原有供水等功能也有好处。此外,这种综合考虑水利水电与电力相结合的模式,还可在发展核电、风能发电以及调水等工程中发挥作用。

考虑多种类型的抽水蓄能作为常规水电的补充,可以引入电力(电网)的参与,这种跨行业(即水利水电和电力行业)的模式对各种资源的综合开发、利用,可以达到较高水平,有利于水利和水电的可持续发展,并提供新的开发前景。

参考文献

- [1] 陆佑楣,潘家铮.抽水蓄能电站[M].北京:水利电力出版社,1992
- [2] 中国电力企业联合会,能源部北京设计院.抽水蓄能电站工程实例[M].1990
- [3] 黄河水利委员会设计院.抽水蓄能电站图集
- [4] 曹楚生.抽水蓄能电站发展前景[A].1993年抽水蓄能技术经济讨论会文集[C].1994
- [5] 曹楚生.从水利水电工程看海河流域水资源的开发前景[J].水利规划,1994,(3)

The New Approach to the Sustainable Development of Water Conservancy & Water Power in China

Cao Chusheng

(Tianjin University, Tianjin 300072, China)

[Abstract] The sustainable development of water conservancy and water power and the pumped storage are described. Now in some areas in China the water resources are scant or nearly and further development will be restricted. The construction of different types of pumped storage as the supplements of the ordinary water power are favorable to the sustainable development of water conservancy and water power. This new approach which combines water conservancy, water power and pumped-storage and links with the local electrical development mode will give the original water conservancy and water power new vigor, hence will create a quite new prospect of the sustainable development of the water conservancy and water power(including pumped storage)in China.

[Key words] water conservancy; water power; pumped storage; electrical system; combined development mode; sustainable development.