

第2篇

水力发电

第2篇

水力发电

主编单位 电力工业部水利水电规划设计总院
水利工业部长江水利委员会

编写单位 电力工业部水利水电规划设计总院
水利工业部长江水利委员会

主 编 丁学琦 吴鸿寿

编 写 人 丁学琦 刘兰桂 袁 玫 沈义生
史毓珍 黄贤鉴 刘书秋 端润生
张德平 郭晓石 龚本驹 金 峰
岳立夫 李世熙 项慧群 徐恭禄
叶钟黎 李维藩 林碧君 陈道周
胡修谱 吴鸿寿 陈雪英 易卜吉
欧阳华 傅元初

主 审 邴凤山 沈崇刚

常用符号表

A ——水电站出力系数	年平均径流模数
河流集雨面积	M_c ——阻力矩
a_0 ——导叶开度	M_s ——水力矩
B ——宽度	M_g ——动力矩
b_0 ——导叶高度	n_N ——额定转速
C ——电站投资	n_P ——飞逸转速
D_1 ——水轮机转轮直径	n_s ——比转速
D_i ——发电机定子铁心内径	n_{11} ——单位转速
d_B ——水轮机轮毂直径	P ——负荷
d_0 ——水轮机射流直径	功率
E ——水电站年发电量	保证率
弹性系数	P_N ——发电机额定有功功率
$\bar{E}$ ——多年平均年发电量	$\bar{P}$ ——日平均负荷
E_r ——最大负荷日发电量	P' ——电力系统最小负荷
f ——摩擦系数	P^* ——电力系统最大负荷
g ——重力加速度	P_{11} ——单位功率
GD^2 ——飞轮力矩	Q ——流量
H ——水头	无功功率
坝高	Q_{11} ——单位流量
H_B ——尾水管中总真空度	Q_T ——调节流量
$H_{\max}$ ——最大水头	T_s ——机组时间常数
$H_{\min}$ ——最小水头	U ——电压
H_0 ——堰上水头	U_N ——发电机额定电压
$\bar{H}$ ——平均水头	V ——容积
H_{pj} ——加权平均水头	库容
H_r ——额定水头	v ——流速
H_s ——名义吸出高度	V_n ——电站有效库容
h_s ——允许吸出高度（理论值）	X_d ——发电机直轴同步电抗
I ——电流	X'_d ——发电机直轴瞬变电抗
I_N ——发电机额定电流	X''_d ——发电机直轴超瞬变电抗
I_0 ——空载励磁电流	Z_0 ——喷嘴数
K ——系数	S_n ——发电机额定容量
K_0 ——发电机短路比	γ ——日平均负荷率
K_y ——发电机月调节系数	ζ ——压力变化值
L ——长度	η ——效率
L_i ——发电机定子铁心高度	η_s ——发电机效率
M ——流量系数	η_t ——水轮机效率

η_s ——蓄能电站综合效率

β ——日最小负荷率

速度上升率

σ ——水轮机气蚀系数

σ_m ——水轮机模型气蚀系数

τ ——导水机构相对开度

第 1 章 概 论

水力是能源的重要组成。水力发电是把一次能源的开发与二次能源的转换同时完成,即通过水工建筑物集聚河流的水能,通过水轮发电机组将机械能转换为电能。水力发电的能量是由开发河段的落差与该河段的水流流量共同构成(参见本篇第 2 章 2.2 节)。

1 水力资源和水力发电的特点

1.1 水力资源及开发现状

我国水力资源居世界各国之首。据对全国 1 万多条河流进行的量算或查勘汇总,全国水力理论蕴藏量为 6.8 亿 kW,年发电量为 5.9 万亿 kW·h;^[1]其中可能开发的水能资源统计见表 2-1-1 和表 2-1-2 (以上均未计台湾省)。但迄今已开发的仅 10%,水力发电量在全国总发电量中的比例也只有 20%左右,远低于世界有水力资源的发达国家。有些国家水力发电量占本国总发电量的比例达 90%以上(如挪威),有些国家水力资源开发已达 95%以上(如瑞士)。

表 2-1-1 全国分省(区)可能开发的水能资源统计

编号	地区、省(区)	装机容量 (万 kW)	年发电量 (亿 kW·h)	年发电量 占全国的 比 例 (%)
	全 国	37853.24	19233.04	100
I	华北地区	691.98	232.25	1.2
1	京、津、河北	183.71	41.77	0.2
2	山 西	263.98	106.98	0.6
3	内 蒙	244.29	83.50	0.4
II	东北地区	1199.45	383.91	2.0
4	辽 宁	163.34	55.85	0.3
5	吉 林	432.92	109.55	0.6
6	黑龙江	603.19	218.51	1.1
III	华东地区	1790.22	687.94	3.6

(续)

编号	地区、省(区)	装机容量 (万 kW)	年发电量 (亿 kW·h)	年发电量 占全国的 比 例 (%)
7	上海、江苏	9.75	3.10	—
8	浙 江	465.52	145.63	0.8
9	安 徽	88.15	26.09	0.1
10	福 建	705.12	320.20	1.7
11	江 西	510.86	190.54	1.0
12	山 东	10.82	2.38	—
IV	中南地区	6743.49	2973.65	15.5
13	河 南	292.88	111.63	0.6
14	湖 北	3309.47	1493.84	7.8
15	湖 南	1083.84	488.91	2.5
16	广 东	638.99	239.80	1.3
17	广 西	1418.31	639.47	3.3
V	西南地区	23234.33	13050.36	67.8
18	四 川	9166.51	5152.91	26.8
19	贵 州	1291.76	652.44	3.4
20	云 南	7116.79	3944.53	20.5
21	西 藏	5659.27	3300.48	17.1
VI	西北地区	4193.77	1904.93	9.9
22	陕 西	550.71	217.04	1.1
23	甘 肃	910.97	424.44	2.2
24	青 海	1799.08	772.08	4.0
25	宁 夏	79.50	31.62	0.2
26	新 疆	853.51	459.75	2.4

注: 1. 摘自中华人民共和国水力资源普查成果。

2. 本表按 500kW 以上电站统计。

表 2·1-2 全国分水系可能开发的
水能资源统计

编号	水 系	装机容量 (万 kW)	年发电量 (亿 kW·h/a)	年发电量 占全国的 比 例 (%)
	全 国	37853.24	19233.04	100
1	长 江	19724.33	10274.98	53.4
2	黄 河	2800.39	1169.91	6.1
3	珠 江	2485.02	1124.78	5.8
4	海、滦河	213.48	51.68	0.3
5	淮 河	66.01	18.94	0.1
6	东北诸河	1370.75	439.42	2.3
7	东南沿海诸河	1389.68	547.41	2.9
8	西南国际诸河	3768.41	2098.68	10.9
9	雅鲁藏布江及 西藏其他河流	5038.23	2968.58	15.4
10	北方内陆及 新疆诸河	996.94	538.66	2.8

注：1. 摘自中华人民共和国水力资源普查成果。

2. 本表按 500kW 以上电站统计。

我国可能开发的水力资源分布不均衡。一是在地区上，半数以上的资源集中在西南四省（区），西北、中南两个地区约占 1/4，东部沿海地区，多以中小型资源为主。二是在单站规模上，全国可能开发的 1.1 万座水电站中，250MW 以上大型水电站近 200 座，占总站数的 2%，其装机容量占 80%；其中 2000MW 以上的巨型水电站有 33 座，仅占总站数的 0.3%，但装机容量却占 50%，这些巨型电站多数尚未开发。由于资源分布上的不均衡，要加速水电的开发，必须有强大的国力作基础，还要求巨型水工建筑、大容量机组和大容量远距离输电等技术能同步发展与提高。

1·2 水力发电的特点及作用

水力发电的特点是：（1）水能取之河川水流，大气循环周而复始，取之不尽，用之不竭，誉之为“白

煤”，属清洁能源；（2）运行灵便，机组起动快，开停机迅速，平均效率高；（3）发电成本低，能量转换环节少，不需燃料，运行人员少；（4）在发电的同时，水资源可综合利用。缺点是：（1）出力不均，受河流天然流量制约，有水库调节时可有不同程度的改善；（2）水电站多处于边远山区，输电距离较远；（3）建站投资较多，但其他形式电站如计入一次能源的开发、运输和环保费用，则与水电站大致相等或更多；（4）有水库淹没损失和移民问题，大型水库问题更为突出。

水力发电除可供应廉价电力、电量外，在电力系统中尚可发挥调峰、调频、调相，以及负荷和事故备用等作用，可以与其他类型电站互补互济；水电站之间也可利用库容和地区水文条件的差异，相互补偿调节；抽水蓄能电站还能起调峰填谷双重作用，这些都可提高系统的供电质量和经济效益，使火电厂、核电厂等能高效、稳定而经济地运行。小型水电站可就地取材，独立作战，对于大电力网到不了的山区，是农村物质文明和精神文明发展的基础。

2 水力资源开发

2·1 水力资源开发的原则

水力资源开发的原则是：

1. 全面规划，综合利用 根据条件和需要，按发电、防洪、灌溉、航运、供水、养殖、旅游等分清主次，尽可能统筹兼顾。
2. 梯级开发 使上、下游梯级电站相辅相成，以最大限度地满足需要，提高经济效益。
3. 建设调节水库 特别是上游龙头水库，以调节天然河流洪枯流量的不均。
4. 最佳经济效益 应优选河流（河段），优选梯级，优先开发富矿，同时要从设计和机电设备采购上为提前发电创造条件。
5. 大、中、小型并举 大型水电站是骨干，中小型水电站投资少，投入快。
6. 尽量减少水库淹没 在有条件时也可适当采取库区防护工程措施，切实做好移民安置。

2·2 水力资源开发方式

水力资源开发受自然和社会条件的制约较多，开发方式应因地制宜，按不同范畴分类，见表 2·1-3 及如图 2·1-1～图 2·1-4 所示。

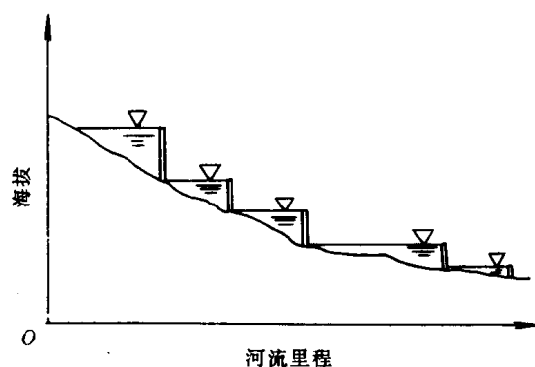


图 2-1-1 流域梯级开发纵剖面图

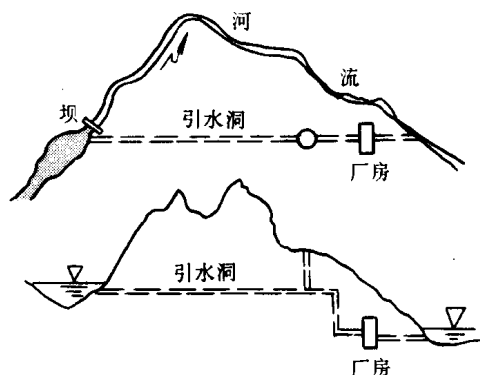


图 2-1-3 引水式开发示意图

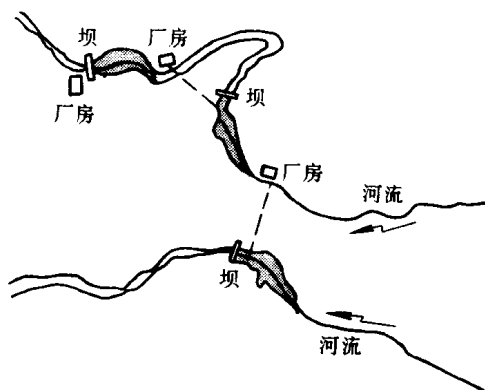


图 2-1-2 跨河流开发平面示意图

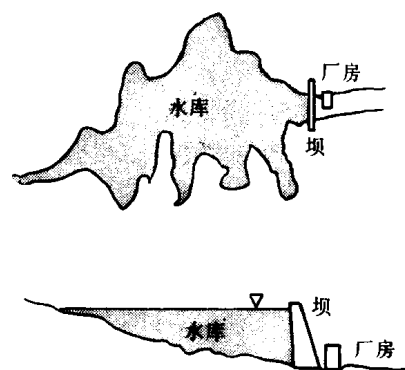


图 2-1-4 堤坝式开发示意图

表 2-1-3 水力资源开发方式综合

分类范畴	开发方式	说 明
按河流规划	梯级开发 跨河流开发	梯级开发可起到上下梯级互补作用。跨河流开发往往可以更有效地集中水量和落差，且有时可以达到避开不利淹没并简化梯级的经济效果
按发电性质	常规水电站 抽水蓄能电站	常规水电站水库也是一种蓄能，但只靠天然流量蓄能。抽水蓄能电站是利用电力网中负荷低谷时的多余电量，抽水提蓄至上库蓄存，在负荷需要时发电，起到平衡电力系统调峰填谷的作用（参见本篇第 11 章 1~3 节）
按集能方式	堤坝式 混合式 引水式	堤坝式开发是利用拦河筑坝以壅高水位，在坝下建厂发电。引水式开发是利用底坡平缓的引水渠（洞）集中优势落差（利用河段陡坡、截直河湾或跨河引水等），在低处建厂发电。混合式开发为两者兼而有之
按调节性能	无调节水库 有调节水库 日（周）调节 年（季）调节 多年调节	无调节性能的电站只拦河引水而不蓄水，靠河流的天然径流经水库调节后发电（参见本篇第 2 章 2.1 节）
按厂房型式	河床式 地面式 地下式	发电厂房直接挡水、构成拦河坝的组成部分称为河床式电站，是低水头径流式电站。地面式厂房建于坝后或岸边，安装间以上处于地面。地下式厂房则全部埋设于岩体之内（参见本篇第 3 章 6 节）

3 水电站的构成

1. 水工建筑物 是集聚河流水能的土建系统。每个工程因综合利用需要和自然条件不同，建筑物构成也不相同。一般有拦河坝（闸）、泄水（溢洪）道、引水系统、过坝设施、发电厂房和变电所等。

2. 发电设备 是将水能通过机械能转化为电能的主辅机设备。一般有水轮发电机组及其辅助设备，包括调速、励磁、启闭、检修，以及油、水、气、风系统等。

3. 电气一次系统 是汇集、升压、分配和输出电能的电气一次设备。一般包括升压站、开关站和厂用电等的电气一次设备。

4. 电气二次系统 是对电气一次设备等进行监测、控制和保护的电气设备。一般包括自动化、监测、控制、保护、信号和通信等系统。

5. 金属结构 一般包括钢管、过坝机械、泄水、引水、船闸和电厂的闸门及启闭设备，以及电厂拦污清污设备等。

4 水力发电发展远景及对机电设备的要求

4.1 发展远景

由于煤炭受开采增长速度和运输条件的制约，从我国能源平衡和电力工业发展的总体上来看，大力开发水电站势在必行。一些巨型水电站的建设必将提到日程。西藏雅鲁藏布江上的墨脱水电站，据近年查勘估算，可装机4380万kW，平均年发电量2360亿kW·h，是世界罕见的巨型水电资源。正在兴建的长江三峡工程，装机为1820万kW，居当今世界之首。除已建正建的一些大型水电站外，已开展一定前期工作，并可能于2000年前后分批建设的巨型水电站见表2·1-4。随着国民经济的发展，并为调动各方办电的积极性，中型水电站、径流式水电站和抽水蓄能电站的开发速度也相当迅速。因此，必然对机电设备提出更高的新的要求。

表 2·1-4 近期可能建设的巨型水电站

工程名称	所在河流	建设地点	装机容量 (MW)	利用落差 (m)
白鹤滩	金沙江	四川 云南 宁南 巧家	8300	227
溪落渡	金沙江	四川 云南 雷波 永善	10080	226

(续)

工程名称	所在河流	建设地点	装机容量 (MW)	利用落差 (m)
向家坝	金沙江	四川 云南 屏山 盐津	5000	113
锦屏二级	雅砻江	四川 盐源	3200	312
瀑布沟	大渡河	四川 汉源	3300	172
构皮滩	乌 江	贵州 余庆	2000	200
拉西瓦	黄 河	青海 共和	3720	220
小 湾	澜沧江	云南 凤庆	4200	250
糯扎渡	澜沧江	云南 思茅	5000	210

4.2 发展水电对机电设备的要求

水电站的机电设备应广泛采用现代技术和参数，达到高效、优质、灵便、耐用，并逐步实现产品的系列化。还有以下一些课题需要予以大力开发、发展和突破。

1. 要突破单机500MW级以上大容量水轮发电机组的制造技术关 近期将开发的巨型水电站装机容量都达几千、甚至上万兆瓦（如三峡、溪落渡）。这些水电站多位于大流量河流的上游，山高谷窄，发电、泄洪、通航的规模巨大，枢纽布置十分拥挤，采用特大型发电机组以减少装机台数，将有利于枢纽布置和降低造价。

2. 急需开发抽水蓄能机组 单站装机千兆瓦级及中型的抽水蓄能电站正在兴起，但抽水蓄能机组国内基本不能制造，急需引进开发，并应进而优化，以达到国际水平。

3. 加速开发贯流式机组 沿海及江河下游地区经济发达，有些地区河网纵横，急需开发径流式中型甚至大型水电站。国内贯流式机组制造远不能适应实际需要，应提高单机容量和制造水平。

4. 同步发展超高压远距离输电技术 随着水电建设的发展，西电东送势在必行。西部一些巨型水电站要向1000~2000km外送1000MW电力，必需进一步提高输电电压等级，发展远距离输电的技术及其设备。

5. 开发大容量高行程过坝设备 水电站的建设带来河道渠化的效益，但坝高百米、数百米的过坝设施，要求发展大容量、高行程、安全稳定的过坝升船机及其电气设备。

第2章 水能规划

为了经济合理地制定河流、湖泊的水能开发方式,选择水电站的规模和确定它的技术经济指标,都需进行水能规划。水能规划必须遵循国家能源产业政策,统筹兼顾各部门各地区对流域开发的要求和利益。为此,必须研究河流或湖泊的水文特性、水库的径流调节和综合利用、电力系统的负荷特性及电源结构,计算水电站的能量指标,选择水力开发地址、水库的特征水位及电站的装机容量与机组机型。

现代的水能规划,往往要以河流开发方案和水电站群为基础进行研究分析,即单一水电站的规划设计,既要考虑它在河流梯级开发中的地位和作用及上下游水电站的相互影响,还要考虑同一电力系统中不同河流上各个水电站在径流补偿和电力补偿的相互影响和作用。一个大的电力系统的电源往往包括水电站、火电厂和核电厂,由于这些电厂的技术经济特性各不相同,水能规划应考虑它们联合运行,优势互补,取得最佳效益。

因此,水能规划涉及范围广,影响因素多,但基本概念、原理和计算分析方法,不论单一水电站还是水电站群,大体相同。本章着重介绍单一水电站的水能规划。

1 水资源的综合利用

水资源是人类生存的重要自然资源。建设水电站,必须贯彻综合利用原则,并获得最佳的综合效益。兼顾防洪、灌溉、航运漂木、供水、渔业等方面的现状和发展,同时应保护生态环境。根据国内外的实践经验,水资源的综合利用,有时影响着水能资源的开发规模、方式和水电站的运行工况。

1.1 对综合利用的一般要求

1.1.1 防洪

利用水库调节洪水,是防治洪水的一项有效措施。修建水电站所形成的水库,在使用上要本着兴利与除害相结合的原则,兼顾下游防洪的需求。防护对象的防洪标准,一般根据防护对象的重要性、历次洪水灾害情况,以及工程措施的难易和经济合理性进行选择。各种

防护对象的防洪标准,可按照国标 GB50201—94《防洪标准》选用。

1.1.2 水力发电

水力发电常是河流开发的主要任务和电力系统的重要组成部分。电力系统对其要求一般包括:(1)有调节性能较好的水库,调节性能愈高愈好;(2)有良好的供电质量,发电量年内分布较均匀,保证率较高;(3)有机动灵活的调峰、调频和事故备用功能。水电站的保证率用其正常发电总时段与计算总时段相比的百分率表示。各水电站设计保证率,常根据电力系统中水电容量的比重,参照《水利水电工程水利动能设计规范》的规定选择。水电比重小于25%的,水电站(群)的设计保证率为80%~90%;水电比重在50%以上的,设计保证率应为95%~98%。

1.1.3 灌溉

根据水源高于或低于农田的情况,灌溉可分为自流灌溉和提水灌溉两类。针对水库与灌区的相对位置,有上游取水和下游取水两种情况。从水电站上游引水使发电量减少,如直接从水库引水,在灌溉季节水库水位要满足其引水高程的要求。下游地区的灌溉用水,对发电量影响较少,而水电站的年内出力分配常受灌溉用水时间上的制约。灌溉保证率常以灌溉用水全部获得满足的年数与计算总年数相比的百分率表示。其设计保证率一般可参照《水利水电工程水利动能设计规范》中的规定选用。

1.1.4 航运漂木

按照国家《水法》规定,在通航漂木或者修建闸坝后可以通航、漂木的河流,修建闸坝的同时要同时修建过船过木设施,使之保持通航条件。航运用水的基本要求是保持水电站上下游具有一定的水深,水电站放流比较稳定,最大流速在允许范围之内。通航保证率按航运全年中正常通航的天数与年总天数的比值百分率表示,可参照国标 GBJ139—90《内河通航标准》^[3]的规定确定。

1.1.5 供水

主要是城镇居民生活用水和工业用水。大多数情况,要求水库的供水量相对不大,但要求水质符合规定标准并连续均匀供应,保证率达到95%~98%。有的情况除有供水量要求外,还有引水高程上的要求。如果从水库内引水,水库运行水位要满足其引水高程的要求;如果从下游河道引水,要求水电站经常下放一定流量。

1.1.6 渔业、旅游、环保

这些方面常要求水库运行水位较高,使水面开阔,水体清澈,并尽量避免长时间出现浅水区。

1.2 水资源综合利用的协调途径

各部门对水资源的利用要求,有共同一致的方面,也有矛盾不一致的方面。矛盾主要表现在使用库容、水量、水位三者时空上的差别,因而要寻求协调的途径。一般要从如下几个方面加以分析研究:(1)分清主次关系和各部门要求可能变化的范围及发展过程;对于供水,应尽可能予以满足;(2)寻求替代措施,进行方案比较,以求经济合理;(3)尽量使防洪库容与兴利库容重叠使用,即分析洪水发生的时间规律和径流年内分布特性,做到在主汛期留出较多库容拦洪,而在主汛期之后允许水库及时多蓄水,以备兴利部门在枯水期使用;(4)采取其他相应的工程设施,如水电站进行日调节下泄流量未能满足航运、灌溉、供水等方面的要求时,则在本电站下游修建反调节水库。

2 径流调节和水能计算^[2]

2.1 径流调节类型

河流径流具有时空分布的随机性和不均匀性,为使之适应用水的需要,宜修建水库进行调节。有调节水库的称为蓄水式水电站,无调节水库的称为径流式水电站。径流调节是按照用水部门的需要,把进入水库的天然径流在时间上进行重新分配。根据水库对天然径流可能调节的程度,常分为日、周、季、年和多年调节等类型。

日调节是把一昼夜间比较均匀的入库流量按照电力系统日负荷的变化重新分配。在高峰负荷时加大流量,低负荷时减小流量。进行日调节所需的库容,一般选择典型日负荷图按保证出力(日发电量)进行电力

电量平衡所确定的发电用水过程而求得,常为设计日来水量的30%~50%。

周调节是按照周内各日的电力负荷变化,重新分配各日的来水量。例如,在工作日增大流量,而在节假日相应减少流量。

季、年调节是使年内天然径流进行重新分配。水库容积只能在丰水期拦蓄部分多余水量供枯水期使用的称为季调节。水库能将年径流量进行全均匀重新分配的称为年调节。由于河流各年径流量差别甚大,其水库能否进行季或年调节,一般按设计枯水年的来水量而定。

多年调节是将丰水年部分水量调剂到枯水年份使用。

具有季、年调节能力的水库同时可以进行日、周调节,具有多年调节能力的水库同时可以进行季、年调节。

此外,还有补偿调节和反调节两种特殊类型。补偿调节是因一个电力系统内若干座水电站,各具有不同的径流特性和水库调节性能而采取的一种相互补偿的调节方式。进行补偿调节有利于提高水电站群的供电质量和增加发电量。反调节如前所述,是利用工程设施协调综合利用各部门在用水方面要求的一种措施。

水电站具有何种调节类型,可根据其库容系数 β 做出判断。库容系数是水库有效容积与其控制的多年平均年径流量的比值。据我国实际运行资料分析, β 值在0.025~0.20之间,可进行季调节; β 值在0.25~0.35之间,可进行年调节; β 值大于0.30,可进行多年调节。对于梯级水电站, β 值的计算,可将本电站有效库容加上上游各水电站有效库容再与本电站的多年平均年径流量相比。如黄河刘家峡水库单独运行时, β 值为0.15,只能进行季调节,而与上游龙羊峡水电站联合运行时, β 值增为0.85,转为很强的多年调节。故在规划河流梯级开发方案时,尽可能将大的水库布置在最上游,形成“龙头”水库。

水库调节程度的高低,还可用调节系数 α 来判断。 α 值系设计枯水期调节流量与多年平均流量的比值,它的大小随 β 值大小而变化。但 β 值可大于1,而 α 值总是小于1。

一座水电站的水量利用率 η (发电年用水量与多年平均年径流量之比),除与其装机容量有关外,也与 β 值有一定关系。据设计统计资料,径流式水电站的 η 值常在0.60~0.70之间,而多年调节水电站的 η 值常在0.90以上。

2.2 水能计算

主要是求水电站的保证出力、年发电量两项水能指标和它的水头特征值,以及研究制定经济合理的水库和水电站的运行调度方式。

2.2.1 水能计算的基本公式

$$N = 9.81 (H_g - \Delta h) Q \eta_g = A H_N Q$$

$$E = H_N W \eta_g / 367.2$$

式中 N ——水电站的出力 (kW);

E ——水电站年发电量 (kW·h);

H_g ——毛水头 (m);

H_N ——净水头 (m);

Δh ——水头损失 (m);

Q ——通过水电站机组的流量 (m³/s);

W ——通过水电站机组的水量 (m³);

η_g ——机组效率,由水轮机和发电机的效率相乘求得,以百分率表示;

A ——出力系数,一般可采用 8.0~8.5。

2.2.2 水能计算方法

1. 基本资料

(1) 径流系列。用长期实测水文资料,一般不宜短于 20~30 年。

(2) 水库水位与面积、容积关系曲线,一般要用实测的精度不低于万分之一的地形图量绘。

(3) 下游水位与流量关系曲线,由实测资料绘制。

(4) 水头损失与引水流量关系曲线,用水力学方法计算绘制。

(5) 水库水量损失资料包括蒸发、渗漏、结冰等水量损失,分别根据当地气象和地质资料进行估算。

(6) 各综合利用部门对坝址上下游用水量和水位的要求。

2. 径流调节计算 径流调节成果是水能计算的基础。径流调节计算方法的采用取决于水库的调节类型、各用水部门的需水状况,以及设计阶段的深度要求。计算方法有时历法、数理统计法和随机过程法。由于时历法简单直观、实用性强,获得广泛应用。时历法是以实测径流系列为基础,按历时顺序逐时段进行水库水量蓄泄平衡计算,具体用图解、列表或计算机进行。计算时段对于径流式水电站,一般用日平均流量;对于蓄水式水电站,一般在汛期用旬或日平均流量,枯水期用月平均流量。计算的水文年限,通常按长系列或

代表系列,有时也可选择丰、平、枯典型年计算。

3. 保证出力计算 水电站的保证出力是相应于设计保证率枯水期 (日) 的平均出力。

a. 径流式水电站保证出力的计算 用已掌握的径流系列日平均流量按大小次序排队、统计,并按下式算出各组流量的保证率 P ,绘制日平均流量历时曲线,即 $Q-P$ 曲线,如图 2·2-1 所示

$$P = \frac{m}{n+1} (\%)$$

式中 n ——统计的日平均流量总个数;

m ——大于等于相应 P 的日平均流量个数。

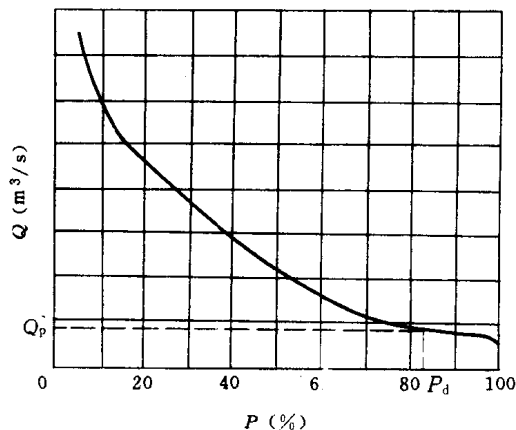


图 2·2-1 日平均流量历时曲线

用选定的设计保证率 P_d ,从图 2·2-1 查得相应的日平均流量 Q_p ,据此从下游水位与流量关系曲线查得下游水位 Z_2 ,在已知上游水位 Z_1 的情况下,即可用水能计算公式算出保证出力 N_p 。(水头损失按实际计算,出力系数可根据经验采取)。

对于低水头径流式水电站,常在汛期因下游水位抬高,水头减小,出力降低,这时应先逐日求出日平均出力,绘制日平均出力历时曲线,即 $N-P$ 曲线,而后按选定的保证率求得保证出力 N_p 。

b. 蓄水式水电站保证出力的计算 通常先对长水文系列进行径流调节,求出各调节时段的平均出力 N ,再按各时段平均出力大小依次排队,算出各组出力的保证率 P ,绘制出力保证率曲线如图 2·2-2 所示,用选定的设计保证率 P_d ,从该图可查得保证出力 N_p 。

4. 年发电量计算 年发电量通常采用多年平均年发电量。各年发电量的计算也按不同的调节性能而采用不同方法。

a. 径流式水电站 可直接将图 2·2-1 日平均流量历时曲线,通过水能计算转换为日平均出力历时曲线,如图 2·2-3 所示。将该曲线的横坐标划分为若干区间,

并以装机容量 N_z 为上限, 算出各区间的平均出力 N_i , 再按下式求得多年平均年发电量 $\bar{E}$:

$$\bar{E} = 8760 \sum_{i=1}^n \left(\frac{N_{i-1} + N_i}{2} \right) \Delta P_i \quad (\text{kW} \cdot \text{h})$$

对于低水头水电站汛期常因下游水位抬高, 而使电站的水头大为降低, 迫使电站出力随之减少。在此情况下, 要按电站机组可能发出的预想出力计算发电量。

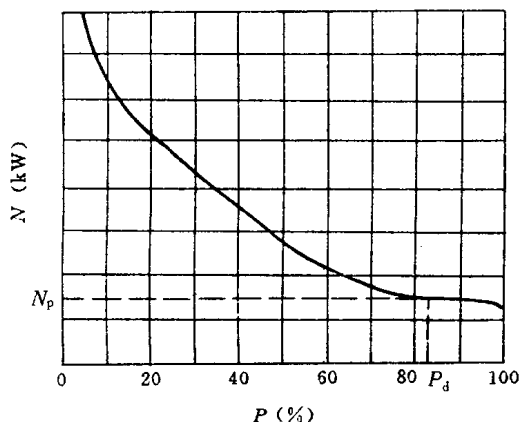


图 2-2-2 出力保证率曲线

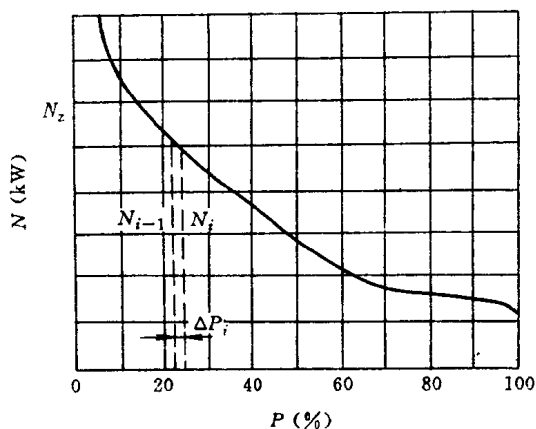


图 2-2-3 日平均出力历时曲线

b. 蓄水式水电站 可按长水文系列, 逐年计算而后将各年发电量相加, 除以计算年数而得。从各年发电量的差别, 可以看出该水电站的发电量质量。

一座水电站的多年平均年发电量, 可分为保证发电量和季节性发电量两部分。保证发电量常以其保证出力乘以年小时数 8760 求得。多年平均年发电量减去保证发电量即为季节性发电量。

5. 特征水头的计算 水电站水头随着上下游水位的升降而变化, 故通常以其最大水头 $H_{\max}$ 、最小水头 $H_{\min}$ 、平均水头 $\bar{H}$ 及加权平均水头 H_{pj} 等特征水头, 表明其概况和作为引水建筑物设计及机组机型选择的依据。实践表明, 水电站的水头越高, 经济性越好。通

常常将水头大于 200m 的称为高水头水电站, 40m 以下的称为低水头水电站, 其间的称为中水头水电站。

(1) 最大水头。通常由水库(或压力前池)正常蓄水位与电站最小出力时下游尾水位之差确定。一般其最小出力不宜低于半台机组容量。

(2) 最小水头。通常由水库死水位与此水位电站可能最大出力时的下游尾水位之差确定。低水头水电站的最小水头, 多数出现在汛期, 有的甚至因这时水头过小而停止发电。

(3) 平均水头。为水能计算各时段水头的算术平均值。

(4) 加权平均水头。系以发电出力为权数, 按下式求得的平均水头:

$$H_{pj} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i H_i}{\sum_{i=1}^n N_i} \quad (\text{m})$$

式中 N_i ——水能计算中各计算时段的出力 (kW);

H_i ——与出力同计算时段的水头 (m);

n ——计算总时段。

3 水电站水库特征水位的选择

水库特征水位包括正常蓄水位、死水位、汛限制水位、防洪高水位、设计洪水位和校核洪水位。正常蓄水位是水库在正常运用情况下, 为满足设计的兴利要求在开始由水库供水时蓄到的高水位。死水位是在正常运用情况下, 允许水库消落到的最低水位。汛限制水位, 又称防洪限制水位, 是在汛期允许水库兴利蓄水的上限水位, 也即水库在防洪运用时的起调水位。防洪高水位是水库遇到下游防护对象的设计标准洪水时, 可达到的最高水位。设计洪水位和校核洪水位分别是大坝在设计洪水和校核洪水标准时达到的最高水位。相应水库容积也被分为若干部分, 如图 2-2-4 所示。由于正常蓄水位、死水位、汛限制水位均直接同水电站的规模和效益有关, 以下着重介绍这三个特征水位的选择。

3.1 正常蓄水位的选择

水电站正常蓄水位的选择, 常分三个步骤进行。

1. 分析各项因素, 拟定比较方案

a. 河流开发规划 一般上下游梯级之间的水位尽可能衔接, 并稍有重叠, 以充分利用水能资源, 或满足通航、漂木要求。同时, 要注意本电站在梯级中的作用和位置。

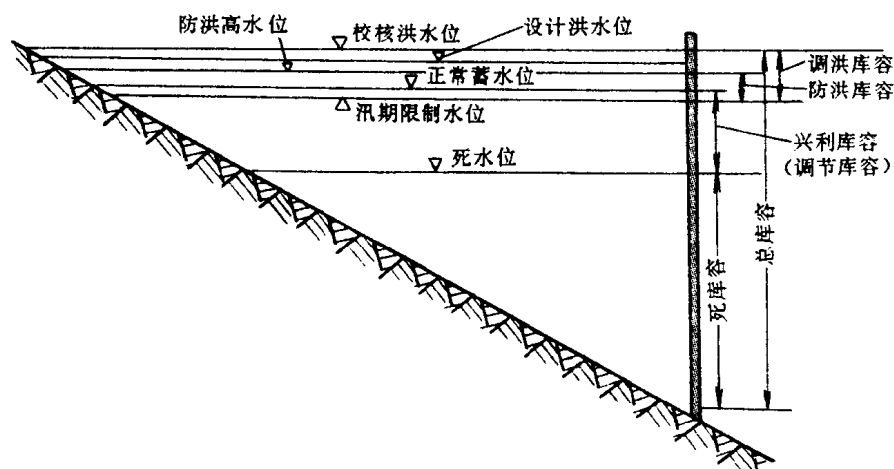


图 2-2-4 水库特征水位与库容示意图

b. 综合利用的要求 水库容积宜大一些,有利于协调各用水部门的关系。如果有从水库内引水的要求,水位上要予以满足。

c. 电力系统的要求 电力系统要求水电站有良好的调节性能,增大保证出力和提供优质电能,并有较高的水量利用率。

d. 水库淹没的限制 由于我国人多地少的矛盾日益尖锐,水库淹没损失和移民人数的多少,已成为选择正常蓄水位的制约因素。因此,要查明不同水库水位的淹没情况,对当地社会经济的影响和移民搬迁安置的环境容量。当涉及重要城镇、工矿企业和大片农田时,尤要慎重。根据以往经验,在许多情况下,水库正常蓄水位的上限方案,取决于淹没损失的容许程度。

e. 生态环境的影响 随着社会的进步,环境意识愈来愈受到人们的重视。水利水电工程对生态环境的影响更引起了人们的关注。水库的兴建在兴利的同时,除前述淹地移民外,还有对局部气候、水温水质、陆生生物、水生生物、人群健康以及景观与文物等方面的影响,往往有利有弊。因此,在选择水库正常蓄水位时,要从生态环境角度给出评价。

f. 工程建设的条件 诸如坝址的地形地质、河流的径流泥沙、建筑物和机电设备的技术要求、施工的难易,以及工程量与投资的规模、建设工期的长短等。

g. 技术经济指标的优劣 诸如单位千瓦投资、单位电能投资、发电成本、上网电价、按期还贷能力及内部收益率等是否优良及符合国家有关政策规定,以及节约矿物燃料的作用和效果。

在分析上述各项因素后,拟定正常蓄水位的上限和下限,并在上下限之间增列 2~3 个水位方案,以资

比较。

2. 算出各项指标,进行经济比较 具体计算,见表 2-2-1。表中各项指标原则上都要针对本方案合理求得,唯死水位、装机容量等特征值,可先凭经验或估算一个初步数据参与比较。由于水电站各项特征值互有关系,它们的选择常需采用循环试算方法。各水位方案不仅要比较各项指标的绝对数值,而且要比较它们之间的差值。因各方案都宜同等满足国民经济的需要,方案之间的需求差别,常用其他等效措施填平补齐,以比较其效益。对发电而言,多以火电厂作为水电站的替代电站。水位方案的经济评价以费用最小者为优。

如前所述,现代水电站群可联合运行的情况下,在选择其中主要水库的正常蓄水位时,常需考虑它给所在河流梯级开发和所在电力系统中水电站群带来的能量效益。如在选择我国黄河上游“龙头”水库龙羊峡水电站正常蓄水位时,就考虑了它对刘家峡、盐锅峡、八盘峡和青铜峡四座水电站增加的保证出力和多年平均年发电量。这四座水电站装机容量共为 1830MW,原来保证出力共为 680MW,多年平均年发电量共为 88.5 亿 kW·h。在龙羊峡水库建成后,它们的保证出力可增加到 1020MW,多年平均年发电量可增加到近 100 亿 kW·h。

3. 进行综合分析,选定合理方案 主要从修建本电站任务的满足程度、水库淹没的可行性、水资源综合利用的合理性、工程建设的可能性、经济指标的优越性等方面加以评价。有的水库因淹没损失大,为了合理利用水能资源,采取了“一次设计、分期建设”或“一次建成、分期蓄水”的措施。总之,需要全面考虑,认真分析,实事求是,慎重决策。

表 2-2-1 正常蓄水位选择比较表 (示例)

正常蓄水位 (m)	260	262	264	备 注
死水位 (m)	258	260	262	本例为一径流式低水头水电站, 表内只为主要指标, 不同正常蓄水位, 对装机容量差别甚小, 故采用同一数值。按年费用最小原则, 推荐选用 262m 方案
汛期限制水位 (m)	257	257	257	
总库容 (万 m ³)	11880	13870	16050	
调节库容 (万 m ³)	1180	1990	2180	
装机容量 (MW)	180	180	180	
保证出力 (MW)	60	61	61	包括上游梯级电站在内
多年平均年发电量 (亿 kW·h)	12.72	12.91	12.97	
加权平均水头 (m)	26.0	27.03	28.05	
水轮机型	ZZ500-LH-610	ZZ500-LH-600	ZZ500-LH-600	
淹没耕地 (ha) ①	317	440	357	
移民人数 (人)	6735	6805	6878	
总投资 (万元)	16424	16864	17338	未包括工程相同部分
年费用 (万元)	2849	2767	2808	

① 1ha=10⁴m²

3.2 死水位的选择

选择水库的死水位, 即选择其消落深度 h_z 时, 需要进行方案比较。在一定正常蓄水位时, 降低死水位, 一方面可增加调节库容及发电水量, 另一方面减少了发电平均水头, 如对假设的几个死水位进行水能计算, 则可绘出 h_z 与 N_p 、 $\bar{E}$ 的关系曲线, 如图 2-2-5 所示。为取得年发电量最大, 应取 h_{z1} ; 为取得更大的保证出力, 以选取 h_{z2} 为好。此外, 在比较方案时, 还应考虑以下几点:

- (1) 本电站在河流梯级开发规划中的位置, 如下游有梯级水电站, 在绘制图 2-2-5 时, 应将这些电站的水头计算在内。
- (2) 死水位的高低同本电站预想出力的关系。当死水位过低时, 往往因水头减少而使水轮发电机组出力受阻。
- (3) 死水位的高低同水库内通航水深及灌溉引水高程的关系。
- (4) 水库泥沙淤积对进水口高程的影响。
- (5) 进水口闸门制造及启闭机能力的限制。
- (6) 环保的要求与限制。

根据经验, 河床式低水头水电站水库的 h_z 约为其 $H_{\max}$ 的 5%~10%, 堤坝式水电站的 h_z 则约为 20%~40%, 有的水电站的 h_z 在 40% $H_{\max}$ 以上。同时, 当所设计水电站的下游还有梯级水电站时, 它的消落深度

往往要更大一些。

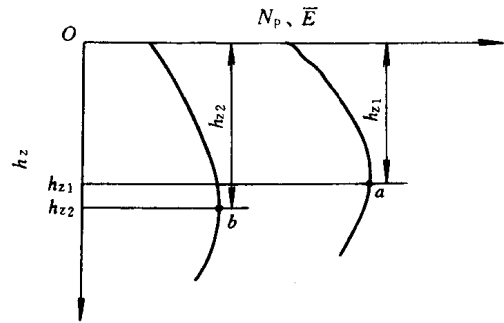


图 2-2-5 水库消落深度 h_z 与保证出力 N_p 、多年平均年发电量 $\bar{E}$ 的关系曲线

3.3 汛期限制水位的选择

汛期限制水位的确定, 一般取决于防洪的要求, 但应兼顾除害兴利两个方面, 使汛期限制水位至正常蓄水位之间的容积, 既可用于防洪, 又可用于兴利, 成为共用库容。为此要从分析河流洪水出现的规律和径流年内分布特性入手。如有的河流的汛期长达 4~5 个月, 但出现最大洪水的主汛期只在某一二个月内。在此情况下, 可以分期设置不同的汛期限制水位, 即在主汛期留有较多的防洪库容, 主汛期过后即分期逐渐蓄水, 以使汛末达到正常蓄水位。

有的水库的汛期限制水位是为了减轻库尾的泥沙淤积或减少淹没损失而设置的, 也要进行具体分析计算而进行选择。

4 水电站装机容量的选择

4.1 选择装机容量的依据

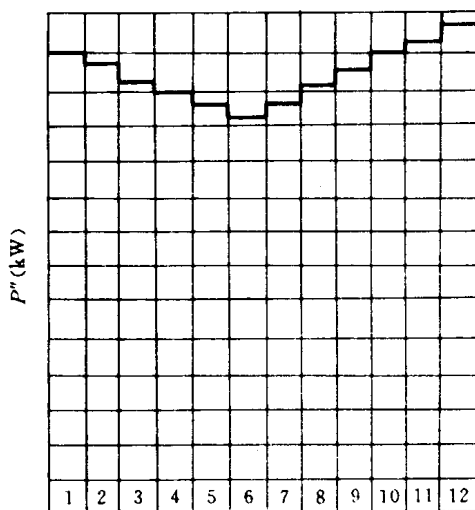
1. **水能指标** 包括如前所述的保证出力和多年平均年发电量及其在年内的分配, 以及选用的设计保证率。

2. **设计水平年** 据以预测电力系统负荷的发展水平和电源结构组成。一般水电站的设计水平年采用第一台机组投入后的5~10年, 并尽可能与国民经济五年计划的年份相一致。对于大、巨型水电站的设计水

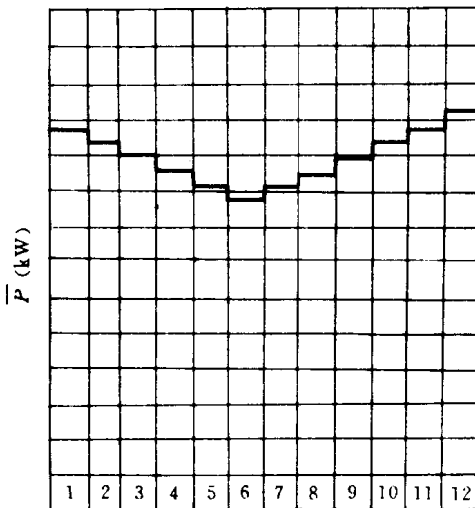
平年, 要进行专门论证。

3. **供电范围** 一般根据设计水电站的规模 and 作用、所在电力系统的能源与电源结构及负荷发展状况, 进行论证确定。

4. **负荷特性** 为充分发挥水电站的容量和电量作用, 必须掌握电力系统设计水平年的各月最大负荷、平均负荷和具有代表性的周、日负荷特性, 如图2-2-6、图2-2-7所示。



a)



b)

图2-2-6 年负荷图

a) 年最大负荷图 b) 年平均负荷图

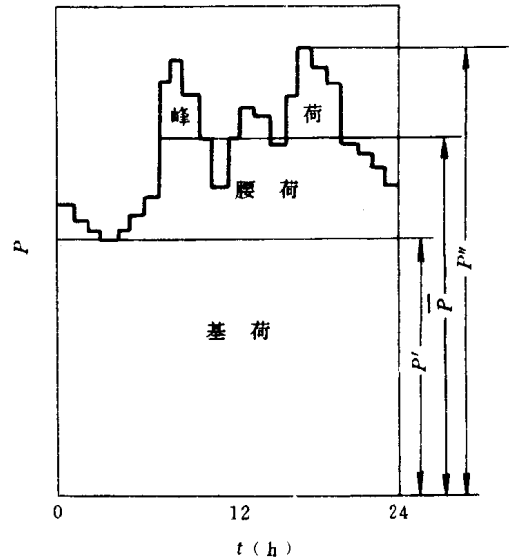


图2-2-7 日负荷示意图

日负荷特性以日平均负荷率 γ 和日最小负荷率 β 表示。以 P^* 、 $\bar{P}$ 、 P' 分别代表日最大负荷、日平均负荷、日最小负荷, 则 $\gamma = \bar{P} / P^*$ 、 $\beta = P' / P^*$ 。日负荷图常以小时平均负荷绘制。 P' 以下称为基荷, $P' \sim \bar{P}$ 之间为腰荷, $\bar{P}$ 以上称为峰荷或尖峰。我国现在多数电力网中 γ 值为0.80~0.85, β 值为0.65~0.70。

年、月负荷特性以年负荷率 ρ 和月负荷率 σ 表示。年负荷率 ρ 是用年内各月最大负荷的平均值除以年最大负荷求得, 月负荷率 σ 是用全月平均负荷除以月最大负荷日平均负荷求得。 ρ 、 σ 值都是表示年、月负荷的不均衡性的。

4.2 装机容量的组成和选择方法

水电站装机容量常按工作容量、备用容量、重复容量三部分逐一进行选择, 而后加以综合。

1. **工作容量的确定** 工作容量是水电站按保证出力运行时对电力系统所能担负的发电容量。通常按设计水平年电力系统最大负荷日负荷图, 进行电力电量平衡所求得的工作位置确定。无日调节水电站的工作位置只能在基荷, 其工作容量即等于保证出力。日调

节水电站的工作位置，要按本设计水电站与已建和同期建设的水电站在日负荷图上统一平衡求得，原则上要优先发挥已建水电站装机容量的作用。日调节水电站的日发电量 $E_r = K_y N_p \times 24 \text{ kW} \cdot \text{h}$ (K_y 为水电站月调节系数，一般采用 $1.05 \sim 1.10$)。具体作法如图 2·2-8 所示。根据经验，日调节水电站的工作容量，常为其保证出力的 3~5 倍，甚至更大。

2. 备用容量的确定 备用容量通常由负荷、事故和检修三部分组成。负荷备用容量是为担负电力系统

频繁变动和计划外的负荷而设置的。事故备用容量是为电网中发电机组或输电线发生意外事故时能保证正常供电而设置的。按专业设计规范规定，前者可为年最大负荷的 2%~5%，后者可为年最大负荷的 10% 左右，一般大系统用小值，小系统用大值。而后在电力系统中按照水、火电站工作容量比例进行分担。一般调节性能好靠近负荷中心的大型水电站，适宜于多承担负荷及事故备用容量。

检修备用容量是因电力系统利用年内低负荷季节

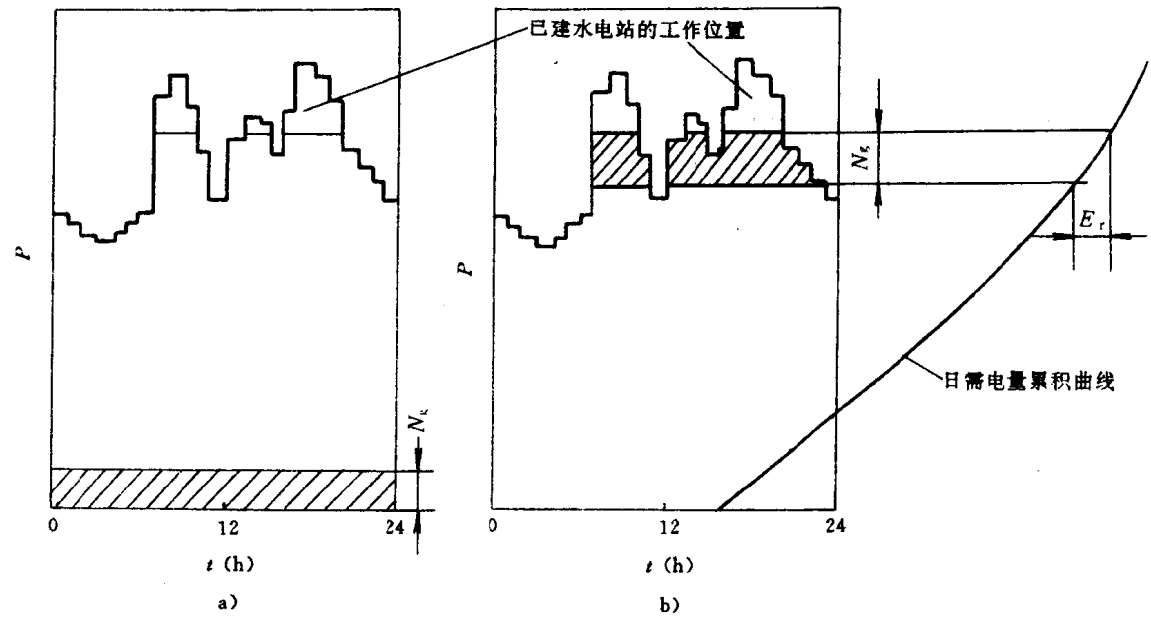


图 2·2-8 水电站不同工作位置时的工程容量示意图

a) 当水电站无调节时，承担基荷 b) 当水电站能调节时，承担调峰

注：阴影部分表示设计水电站日保证发电量。

未能安排全部发电机组计划检修而必须增设的容量。是否需要设置检修容量，要计算电力网年负荷下降部分面积 A (见图 2·2-9) 和机组检修必要面积 B 才能确定。按规范规定，机组年计划检修必要面积 B ，可按水电平均 30 天、火电平均 45 天、核电平均 60 天考虑，即 $B = 1 \times \text{水电装机容量} + 1.5 \times \text{火电装机容量} + 2 \times \text{核电装机容量}$ ($\text{kW} \cdot \text{月}$)。如果 $A < B$ ，则系统需增设检修备用容量，并应满足 $B - A$ 面积的需要。增设的检修备用容量放在水电站或火电厂，一般要通过方案比较及具体分析确定。

3. 重复容量的确定 重复容量是指不能替代火电容量而只是为了多发汛期季节性电能而增设的发电容量。径流式及调节性能差的水电站，往往要安装重复容量，提高水量利用率。装设重复容量与否，一要看增发的季节性电量能否为电力系统所吸收；二要看是否

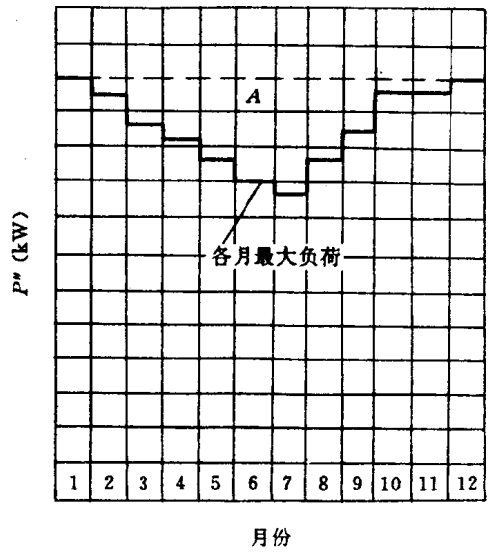


图 2·2-9 年负荷下降检修面积示意图