

中小型水电站的 优化运行和管理

鄢建华 张俊华



水利电力出版社

中小型水电站的 优化运行和管理

鄢建华 张俊华

水利电力出版社

内 容 提 要

本书用系统工程最优化观点探讨中小型水电站(群)的优化运行和管理问题,并注重于实际应用。

全书共分八章,内容包括:绪论、水力发电系统、水力发电系统重要因素之一——水电站水头、水电站流量及电力系统中的水电站、水电站内主要运行设备的特性、水电站(群)的最优化运行、水电站建筑物和设备的管理、水库管理、水电站的经济计算和分析方法。书末有两个附录:日本小水电经济分析等效式和考虑复利后各系数 A 值的计算用表。

本书供中小型水电技术人员使用。

中小型水电站的优化运行和管理

鄢建华 张俊华

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 9.75印张 215千字

1985年6月第一版 1985年6月北京第一次印刷

印数0001—8540册 定价2.00元

书号 15143·5698

前 言

本书作者原编教材《中小型水电站的优化运行和管理》，在水利电力部举办的全国小水电运行管理干部训练班多次试用。在此基础上，收集了省内外有关资料和同行的意见，进行了增补和修改后编成此书。

本书主要讲述装机 25000 千瓦以下中小型水电站的优化运行和管理问题，并以实际应用为主。为使相当于中专毕业水平并在水电站和电管局等单位工作的运行、管理人员自学和使用，书中尽可能附上计算实例，对一些繁难而必要的基本公式则进行了较详细推导。此外，还介绍了“水力发电系统工程”这一新兴学科的一些基础知识。本书也可供大专院校师生和科研部门有关同志使用，在解决大中型水电站的优化运行和管理问题时可作参考。

全书共八章，其中第一、二、三章及第七、八章由张俊华同志编写，第四、五、六章由鄢建华同志编写。全书由鄢建华同志修改定稿。

本书由水利电力部成都勘测设计院总工程师杨渭汶同志主审，参加审查的有四川省水电厅副总工程师聂振伟同志，成都勘测设计院工程师周见名、倪定远同志和四川省地方电力管理处工程师黄智隆同志等。四川省地方电力管理处有关同志对本书在编写、审稿等过程中均给予了大力协助。在此一并致谢。

本书不当之处，欢迎批评指正。

编 者

一九八三年五月

目 录

前 言	
绪 论	1
第一章 水力发电系统	4
第一节 水能—电能系统	4
第二节 水力系统	8
第三节 机电系统	10
第二章 水力发电系统重要因素之一——水电站水头	13
第一节 水电站的特征水头	13
第二节 坝后式系统的水头	18
第三节 引水式和混合式系统的水头	28
第四节 水头损失计算	35
第三章 水电站的流量及电力系统中的水电站	55
第一节 来水特性	55
第二节 各部门用水特性及综合用水	56
第三节 各用水部门的设计保证率	61
第四节 电力系统中的水电站	64
第五节 水电站保证出力、多年平均年发电量 及装机容量组成	78
第六节 水电站的流量	82
第七节 当前小水电装机容量方面的一些经验教训	84
第四章 水电站的主要运行设备的特性	91
第一节 水轮机特性曲线	91
第二节 水轮机汽蚀特性	95
第三节 发电机特性	103

第四节	水电站特性曲线	107
第五节	水电站机组段的特性	111
第六节	调速器及其运行	116
第五章	水电站(群)的最优化运行	127
第一节	水电站最优化运行准则	127
第二节	水电站的厂内最优化运行	134
第三节	按等流量微增率原则实现厂内最优化运行的实例	146
第四节	用动态规划法实现水电站厂内最优化运行	155
第五节	电力系统中水电站长期最优化运行方式	168
第六节	以纯水电系统总的发电量最大为准则的长期 最优化运行方式	185
第七节	电力系统中水电站短期最优化运行方式	189
第六章	水电站建筑物和设备的管理	210
第一节	关于挡水建筑物和进水口	210
第二节	关于引水建筑物和拦污栅	214
第三节	关于厂房枢纽建筑物及水击事故问题	222
第七章	水库管理	232
第一节	水库调度图	232
第二节	梯级水电站的合理管理调度	241
第三节	中小型水库水电站的短期预报调度	247
第八章	水电站的经济计算和分析方法	257
第一节	通常采用的经济指标	257
第二节	目前国外通用的经济核算方法简介	259
第三节	财务分析	264
第四节	同期最大(等)积累后效系数判别法简介	265
附录I	日本小水电经济分析等效式	289
附录II	考虑复利后各系数 Λ 值的计算用表	290

绪 论

目前，我国已建的小型水电站约有九万座，其容量占全国水电装机总容量的 $1/3$ 左右，为全国农业用电量的 37% ，在国民经济中，特别是农村能源中发挥了重要作用。由于中小型水电站的运行管理尚存在一些问题，如建筑物和设备运行管理不佳，机组运行效率低，水头与流量损失大，检修次数多、历时长，甚至出现可以避免的机组或水工等方面的重大运行事故，所以效益未得到充分发挥。

由于电能不能大量储存，故不论大、中、小型水电站，发、输、配、用电是瞬间同时完成的，而且以“用”定“发”。根据这一特点，欲尽可能提高已建电站的效益，首先应积极发展负荷（发展生产），并采用优化发电的方式以保证发出最多、最便宜的电能。同时也应最大限度地减少输、配电损失。这里我们将着重探讨优化发电方式，即水电站的优化运行管理问题，这也是电力部门急待解决的问题。

以湖南省为例，由于改善了管理，售电成本比计划降低 16.2% ，利润比过去同期增加 19% ；发展了季节负荷和电网配套等，使 1980 年小水电平均年利用小时数比 1979 年增加 167 小时；对小水电发、供电设备随时检查并及时解决问题，使小水电发电量超额 24% 。等等。又如广东有个水电站装机 4800 千瓦，仅改善厂房和机组温度一项措施，就使丰水期每年多发电 $100\sim 130$ 万度。再如浙江峡口水库电站采用预报调度后，多年平均发电量增加 372 万度，增长 13.6% ，收

入增加17万元。全国自小水电工作重点转移到抓管理以后，1982年上半年就比去年同期多发电15亿度，增长28.3%。仅据这些不完全统计，说明我国已建成的小型水电站是大有潜力的。如果普遍加强小水电科学管理，积极开展优化运行调度，千方百计降低发电用水的耗水率，必将更充分地发挥我国现有小水电的经济效益。

实现优化运行管理，充分发挥已运行小水电站的潜力，应该采用水力发电系统工程的科学方法。由于水力发电系统工程在国内外尚未形成完整的学科，目前在本书中我们仅引用这种科学的基本观点，着重探讨小型水电站的厂内优化运行问题以及系统优化运行问题，研究如何尽量减小水头损失和流量损失，如何加强建筑物和设备的科学管理，使事故尽可能少发生，检修历时尽量缩短等。为更好解决上述问题，本书也将述及必须具备的一些水能规划和水电站的基本知识。

应该指出，水电站的控制方式与电站的优化运行管理关系极大。在美国五十年代前，水电站是机旁就地手动控制；五十年代开始，由中控室集中控制；六十年代中期，梯级电站采用集中控制和计算机控制；七十年代后期，大型水电站由计算机控制；八十年代初，由分布处理的计算机和微型机控制。美国大中型水电站实现自动化的目的，不是单纯向无人值班的方向发展，而主要是为了提高电站的可靠性、经济性和供电质量。由于电站操作，特别是大型调峰电站的操作和监控任务繁重，人工难以胜任，加之美国工资高，对节省人力比较重视，故五十年代起就有中小型水电站无人值班的运行经验。目前我国小型水电站主、辅设备和基础自动化的稳定可靠性较差，再加上我国人口众多，小型电站实行全厂

综合自动化的要求，暂时不那么迫切。可是对于小河流梯级的多座小型水电站，在其中一座条件好的水电站上集中修建一个中央控制室来集中监控，即使不实行自动化遥控，在运行管理上也将是一个合理方案。

因此，本书只研究人工值班的中小型水电优化站的运行和管理问题。

第一章 水力发电系统

水力发电系统的组成部分一般有：水库系统（储存并配给水能），包括挡水系统，溢水系统和取水系统；引水系统，包括低压或无压引水系统，平水系统（调压井或前池），高压引水系统；发电系统（能量转换系统），包括厂房结构和尾水渠系统，水轮机系统以及发电机系统等等。

第一节 水能—电能系统

一、水流的能量

水流能量的大小，可由“自由落体的能量”等于“落体重量与其重心下降高度的乘积”这一物理公式算出，即：

$$E_0 = \gamma WH$$
$$= 1000WH \text{ (公斤} \cdot \text{米)} \quad (1-1)$$

式中 E_0 ——水体能量（公斤·米）；

γ ——水的单位体积重量 = 1000（公斤/米³）；

H ——毛水头（米），如图 1-1 所示；

W ——水量（米³）。

在单位时间（秒）内所作的功，即所谓功率，常称出力或容量，即：

$$N_0 = 1000 \frac{W}{T} H$$
$$= 1000QH \text{ (公斤} \cdot \text{米/秒)} \quad (1-2)$$

式中 Q ——流量 (米³/秒)。

因 1 千瓦 = 102 公斤·米/秒, 则河中水流理论出力:

$$\begin{aligned} N_0 &= \frac{1000}{102} QH \\ &= 9.81QH \text{ (千瓦)} \end{aligned} \quad (1-3)$$

河中水流能量:

$$\begin{aligned} E_0 &= \frac{1000WH}{102} \times \frac{1}{3600} \\ &\approx \frac{WH}{367} \text{ (千瓦·小时或度)} \end{aligned}$$

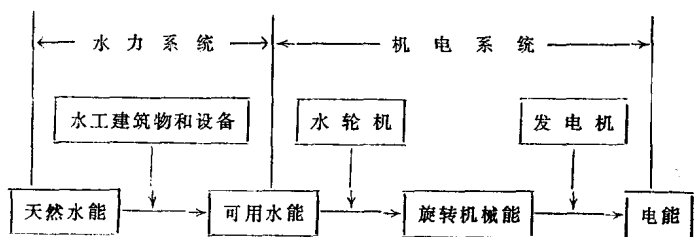
或 $\approx 0.00272WH$ (千瓦·小时或度) (1-4)

天然河道水流均具有能量, 这种天然水能如果没有人为的有效改造, 不可能由水能自然地转换为电能。

二、水能—电能系统

如果在天然河道上修建水工建筑物, 把沿河分散的天然落差集中起来, 如图 1-1 所示, 并让降落的水流通过水轮机, 使水轮机转动将水能变为旋转机械能, 再由水轮机带动发电机旋转, 就可产生电能。

水能转换为电能的过程图或系统图如下:



由于水流在流经水工建筑物如进水口、管道时, 会产生水头损失 ΔH , 故能够利用的只是净水头 $H_{\text{净}}$, 且 $H_{\text{净}} = H - \Delta H$; 又由于水流必须经过水轮机带动发电机转动而发

电，一般实发出力和电能比理论值要小，若用机组效率 η 来计及这种损失，则水电站实际出力：

$$N = 9.81 QH_{\text{净}} \eta \quad (\text{千瓦}) \quad (1-5)$$

水电站实际电能：

$$E = \frac{WH_{\text{净}}}{367} \eta \quad (\text{度})$$

$$= 0.00272 WH_{\text{净}} \eta \quad (\text{度}) \quad (1-6)$$

$$= \eta_{\text{水机}} \eta_{\text{传}} \eta_{\text{电}} \quad (1-7)$$

式中 $\eta_{\text{水机}}$ ——水轮机效率，中小型水轮机效率约为 78~93%；

$\eta_{\text{传}}$ ——传动装置效率，当无传动装置即水轮机和发电机同轴或直接传动时，取 $\eta_{\text{传}} = 1.0$ ；

$\eta_{\text{电}}$ ——发电机效率，单机 500 千瓦以下时 $\eta_{\text{电}}$ 约为 0.86~0.92，单机 500 千瓦以上时 $\eta_{\text{电}}$ 约为 0.91~0.96。

在公式(1-5)中取 $9.81\eta = K$ ，则：

$$N = KQH_{\text{净}} \quad (\text{千瓦}) \quad (1-8)$$

初步估算时， K 值可参考下列数据选取：

水电站出力在 500 千瓦以下，取 $K = 6 \sim 7$ ；

水电站出力为数千千瓦，取 $K \approx 7.5$ ；

大、中型水电站，取 $K = 8 \sim 8.5$ 。

对于 K 值的选取，各国也不同。对小水电，法国取 $K = 8.0$ ；苏联取 $K = 7.4 \sim 7.9$ 。显然，机电制造水平高、效率高者， K 值可取大些。

[例 1-1] 在某河段上建水电站，毛水头为 103 米，净水头为 100 米，发电引用流量为 $5 \text{米}^3/\text{秒}$ ，分别求理论出力及电站实际出力。

[解]

由公式(1-3)计算理论出力值为:

$$\begin{aligned} N_0 &= 9.81QH \\ &= 9.81 \times 5 \times 103 \\ &= 5052.5 \text{ 千瓦} \end{aligned}$$

根据出力范围,可取 $K=7.5$,则水电站实际出力为:

$$\begin{aligned} N &= 7.5QH_{\text{净}} \\ &= 7.5 \times 5 \times 100 \\ &= 3750 \text{ 千瓦} \end{aligned}$$

我们知道,水电站的流量和水头是随季节、时间而变化的,水电站各时段实际平均出力 N 和发电量 $\Delta E=NT$ (T 为时段如一日、一月等的小时数)也是变化的。水电站的装机容量为 $N_{\text{水装}}$,是该电站全部装机额定容量的总和,是一个固定不变的数值。水电站各时段实际出力 N 的变化必须满足 $N \leq N_{\text{水装}}$;而年内各时段(如月)发电量的总和,即

$\sum_1^{12} \Delta E = \sum_1^{12} N \cdot T$,就是水电站全年的发电量,称为年发电量。

从上述基本公式看出,要获得电力必须有流量和水头,水头是集中落差形成的。除少数瀑布外,落差都是分布在天然河道上的。为了获得集中的落差,就必须利用各种水工建筑物,如大坝、渠道、隧洞和管道等。图1-1是利用大坝将分布在长 L 河段上的落差集中起来,形成可利用水头 H 。这种把天然水能变为可用水能的建筑物、设备和运行管理人员组成的系统,称为水力系统。

第二节 水 力 系 统

人为地使天然来水通过建筑物和设备，把天然水能变为可用水能的水力系统，以水流为其流通质，输入为水流动能，而输出则为水流压能和动能（也是机电系统的输入）。从组成的一系列水工建筑物的角度而言，这种系统可分为：坝式系统，引水式系统和混合式系统。

一、坝后式系统

包括坝后式与河床式，均以大坝挡水形成水库系统。但因地形、地质条件、坝的高低和库容大小的不同，而具备不同的水量调节能力和溢洪型式，并形成高低不同的发电的水头，图 1-1 为坝后式系统示意图。水流经过坝式取水口及其设备、管道而进入厂房内的水轮机室。

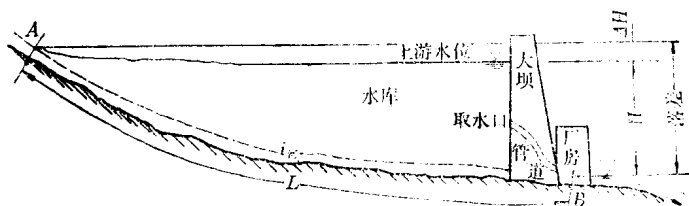


图 1-1 坝后式系统示意图

在此系统中，发电流量是经过水库调节后的，并由水轮机导叶来控制其大小；水头数值则随上游水库水位及下游尾水位的变化而定。

二、引水式系统

包括有压引水式和无压引水式。在此系统中，水流经过取水闸及其设备、低压或有压（隧洞、管道）或者无压（明

渠)引水系统,再经平水系统(调压井或前池)、高压引水系统(压力管道及其设备)进入厂房内水轮机室或机壳。无坝时在系统内没有水库系统,低坝时在系统内只有不起调节作用的很小的水库系统。

如图1-2用渠道引水形成水头时, $L(i_{河}-i_{渠})$ 的大小大体上决定了水头的数值,减小库水位与前池水位差 ΔH ,将会增大已形成的可用发电水头。通过此系统的发电流量,将随天然来水而变化,并由水轮机导叶或针阀来控制引用流量的大小。

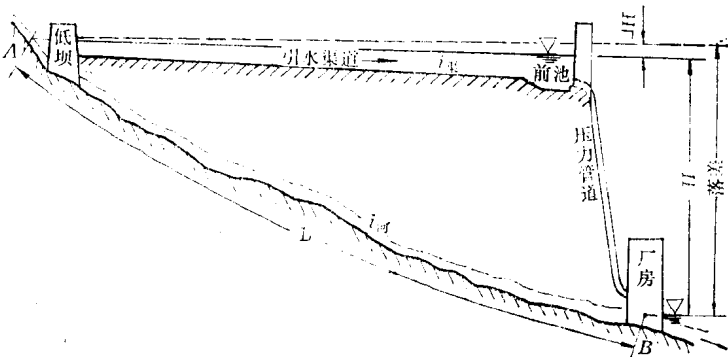


图1-2 引水式系统示意图

三、混合式系统

由挡水坝形成部分水头并形成一定水量调节能力的水库系统,水流经过坝式或隧洞式取水口及其设备,通过低压(管道、隧洞)引水系统、平水系统(调压井)、高压引水系统而进入厂房内水轮机室。另一部分水头由有压引水系统形成,如图1-3所示。天然来水量可由水库进行调节,由水轮机导叶来控制引用流量的大小,水头则由调压室水位和下

游尾水位的变化决定。

不难看出，混合式系统是坝式系统和引水式系统的一种组合形式。

上述三种系统，经过发电系统中的机电系统转换能量之后的水流，将直接排入下游河道或通过尾水渠系统排入下游。

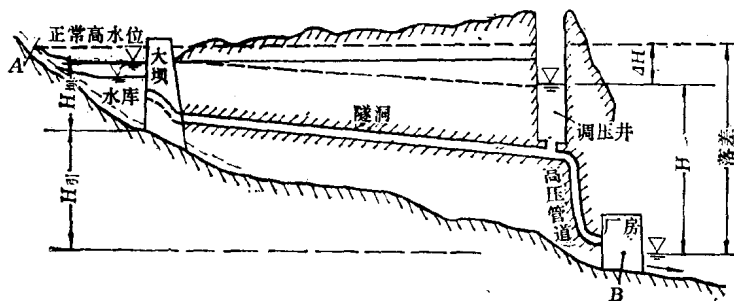


图1-3 混合式系统示意图

第三节 机电系统

机电系统是由水轮机、发电机和附属设备，蜗壳、尾水管和机墩等以及运行人员组成的系统，其功能为：输入水流压能和动能，经过机电系统处理后，输出电能。

以水力发电系统的观点看问题，必须注意各组成部分（子系统）之间及组成部分与总体之间的密切联系和相互作用，不能只保持各组成部分的局部优化，应尽可能追求系统总体优化。

由公式（1-5）和（1-6）可知，水电站发出的出力和电能，除受水头和流量（或水量）两因素影响外，机组效率 η 也有重要影响。前两因素主要决定于水力系统，后一因素主

要决定于机电系统，三者又是相互联系和相互影响的。

机电系统输出的出力和电能，受到水轮机和发电机的类型、特性和工况的影响。显然，在同样的水头和流量（或水量）下，机组效率 η 愈大时输出的出力和电能也愈大。

我们知道，仅当常规机组单机容量小于120~130千瓦，才采用间接传动方式。当采用平皮带传动时， $\eta_{传}$ 可达0.93~0.95；当采用三角皮带传动时， $\eta_{传}$ 可达0.95~0.97。单机容量约2~3万千瓦以下的中小型贯流式机组，有时采用齿轮增速装置传动以减小发电机直径， $\eta_{传}$ 可达0.96~0.98。当采用齿轮传动使机组所降低的效率值小于因灯泡外壳减小而改善过流条件所增大的效率值时，便可考虑采用齿轮增速装置传动。可能时一般都采用直接传动，即 $\eta_{传}=1.0$ 。

由公式（1-7）的说明可知，水轮机效率 $\eta_{水机}$ 的变化大于发电机效率 $\eta_{电}$ 的变化，这里我们主要分析如何保持水轮机的高效率。因为 $\eta_{水机}=\eta_{水}\eta_{容}\eta_{机}$ ，而且：

$$\eta_{水} = \text{水力效率} = \frac{\text{水轮机的工作水头} - \text{蜗壳进口经转轮至尾水管出口的沿程和局部水头损失}}{\text{水轮机的工作水头}}$$
$$\eta_{容} = \text{容积效率} = \frac{\text{水轮机的输入流量} - \text{水轮机的漏损流量}}{\text{水轮机的输入流量}}$$
$$\eta_{机} = \text{机械效率} = \frac{\text{水轮机转轮功率} - \text{因机械摩擦损失的功率}}{\text{水轮机转轮功率}}$$

对已运行的水电站，欲提高机械效率，必须注意经常保持油封和轴承等正常运行；欲提高容积效率，必须注意保持止漏装置良好和转轮间隙正常；欲提高水力效率，应尽可能减小蜗壳进口经转轮至尾水管出口整个流程的水头损失，减小汽蚀和泥沙磨损，使水轮机的运行工况尽可能符合设计工