

成都工学院图书馆
基本馆藏

299630

高等学校交流讲义

水电站运行

上册

厂内运行

华中工学院水力发电厂教研室编著

仅限学校内部使用



中国工业出版社

高等学校交流讲义



水电站运行

上册

厂内运行

华中工学院水力发电厂教研室编著

中国工业出版社

本书論述水力发电站运行的基本原理、方法和应用等問題。全书分为上、下二册出版，本书上册为厂内运行，下册为水电厂在电力系統中运行。上册共八章，主要内容包括水电站的基本特性，生产过程，厂内有功負荷、无功負荷和备用容量的合理分配，机組投入次序及工作台数的确定，厂内最优运行方式的制定等。书中并搜集了一些国内外水电站运行管理方面的經驗和資料。

本书可作高等工业院校水力动力装置专业教材之用，同时还可供从事水力发电站設計、电力系統調度及水电厂运行的技术管理人员参考使用。

水 电 站 运 行

上 册

厂 内 运 行

华中工学院水力发电厂教研室編著

水利电力部办公厅图书編輯部編輯(北京阜外月坛南書房)

中国工业出版社出版(北京佟麟閣路丙10号)

(北京市书刊出版事业許可証出字第110号)

中国工业出版社第二印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印張 $10\frac{1}{2}$ ·字數248,000

1963年3月北京第一版·1963年3月北京第一次印刷

印數0001—1,120·定价(10-5)1.30元

統一書号：K15165·1238(水电-207)

序 言

随着我国水力发电事业的发展，日益众多的水电站投入运行。因此，如何組織与計劃水电站的运行，挖掘設備潛力，改善設備性能，合理制定厂內运行方式，以及有效地選擇梯級水电站之間、水电站羣之間、電力系統中水火电站之間的运行方式，以达到充分地最大限度地利用水能的目的，便具有巨大的政治与經濟意义。

根据这种要求，我国几个主要水电站和電力系統都先后注意和开展了这一方面的工作和研究。高等学校有关专业也設置了相应的課程，以培养在水电站設計及运行时考虑最优运行問題和判定水电站及其在電力系統中最优运行方式方面的技术干部。为此，我們編写了这本有关水电站运行方面的教材。

本书在內容选择方面，力求理論联系我国实际。根据理論发展的需要，生产中当前和长远的需要，确定本书內容取舍和主次要内容的安排。一方面适当反映我国生产部門积累的經驗，另一方面也参考外国的一些研究成果，特别是苏联学者在这方面的研究成果。苏联水电站运行专家謝福拉同志(Д.О.Сейфулла)于1958~1959年度来我院讲学，曾編有“水电站运行”讲义，本书上册內容部分采自該讲义，我們在此表示衷心的感谢。

本书分上、下两册，上册共分八章，主要闡述水电站厂內运行問題；下册主要闡述水电站在電力系統中的运行問題，分短期运行和长期运行二部分。

使用本书时，如感時間不足，根据具体情况，可将第三章中的后面几节和第七章全部省略，而只讲授其余部分。

参加本书編写工作的教师是黎猷勇(第一、二章)、李子祥(第三章)、瞿继恂(第四、五章)、張勇傳(第六、七章)、王烈君(第八章)等同志。邓家祺、梁年生、陈云年、范訥、龔嗣芬等同志协助校核、繪图和謄正等工作，本书在編輯加工工作中水利电力部办公厅图书編輯部尙忠昌同志曾大力协助，在此表示感谢。

我們深知編写一本适合我国具体情况的教材是一个艰巨复杂的任务，需要一个长期努力和逐步提高的过程。限于我們的思想水平和业务水平，而且編写時間十分仓卒，所以书中不論在处理問題的原則和方法上都一定存在許多缺点或錯誤。我們恳切希望使用本书的同志，对本书体系和內容各个方面，提出意見，以便再版时修正。

华中工学院水力发电厂教研室

1961年12月于武昌

目 录

| | | | |
|--|----|---|-----|
| 序言..... | 1 | 比較..... | 82 |
| 第一章 緒論..... | 3 | §4-6 机組并列布置形式复杂情况下, 固定数目机組間的負荷分配..... | 84 |
| §1-1 水电站的生产特点..... | 3 | §4-7 对于固定数目机組間最优負荷 分配所用微分指标的分析..... | 89 |
| §1-2 水电站的生产过程..... | 4 | 第五章 机組投入次序及最优工作 台数的确定..... | 94 |
| §1-3 电力系统中水电站最优运行的 意义..... | 9 | §5-1 基本原则和方法..... | 94 |
| 第二章 水电站的动力特性..... | 14 | §5-2 机組間的負荷分配对确定机組 投入次序、最优組合及工作 台数的影响..... | 100 |
| §2-1 动力平衡及研究动力平衡的基 本动力指标..... | 14 | §5-3 机組漏水和出力限制对确定机 組投入次序、最优組合及工 作台数的影响..... | 102 |
| §2-2 水电站的水头特性..... | 17 | 第六章 水电站最优运行方式分析..... | 106 |
| §2-3 水电站典型动力特性曲綫..... | 23 | §6-1 各种型号机組段的特性及其分 析..... | 106 |
| §2-4 典型动力特性曲綫特征工作点 的推求..... | 32 | §6-2 各种类型机組段微增率特性比 較..... | 117 |
| §2-5 水电站的其它特性曲綫..... | 37 | §6-3 厂内最优运行方式的某些特点..... | 120 |
| 第三章 动力特性曲綫的繪制..... | 40 | 第七章 无功負荷和随机負荷的合 理分配..... | 128 |
| §3-1 绝对指标和单位指标特性曲綫 的繪制..... | 43 | §7-1 研究机組間无功負荷最优分配 的意义..... | 128 |
| §3-2 机組微分指标特性曲綫的繪制..... | 46 | §7-2 机組段的无功特性及其微分特 性..... | 130 |
| §3-3 根据水輪机綜合特性曲綫繪制 机組的特性曲綫..... | 51 | §7-3 有功及无功負荷在机組間最优 分配的理論基础..... | 134 |
| §3-4 机組段特性曲綫的繪制..... | 54 | §7-4 随机負荷在机組間的最优分配..... | 140 |
| §3-5 繪制微分指标特性曲綫时特征 工作点的应用..... | 57 | 第八章 水电站綜合运行图及其 应用..... | 151 |
| §3-6 繪制微分指标曲綫各种方法的 比較..... | 59 | §8-1 水电站綜合运行图及其任务..... | 151 |
| §3-7 机組特性曲綫不規則时微分特 性曲綫的繪制..... | 60 | §8-2 水电站綜合运行图的繪制..... | 152 |
| §3-8 繪制机組动力特性曲綫的誤差 分析..... | 61 | §8-3 水电站綜合运行图在实现水电 站厂内最优运行方式时的应 用..... | 156 |
| 第四章 机組間有功負荷的最优分 配..... | 64 | §8-4 关于水电站机組效率試驗..... | 157 |
| §4-1 最优負荷分配准則..... | 64 | §8-5 水电站机組段特性曲綫的誤差对 其厂内最优运行方式的影响..... | 159 |
| §4-2 用绝对指标及单位指标特性曲 綫进行固定数目机組間的負 荷分配..... | 65 | | |
| §4-3 用微分指标特性曲綫进行固定 数目机組間的負荷分配..... | 72 | | |
| §4-4 用綜合法进行固定数目机組間 的負荷分配..... | 78 | | |
| §4-5 对各种負荷分配方法的分析与 | | | |

第一章 緒 論

§1-1 水电站的生产特点

为了研究改进或提高水电站运行工作，正确而合理地解决水电站的运行问题，首先应了解水电站的生产特点和它与电力系统的关系。水电站是属于国民经济部门的一种特殊生产企业。它的产品是电能，在生产形式和方法上它与一般工矿企业有很大的不同。

水力发电是目前认为最经济的一种能源。它比较火力发电和原子能发电具有独特的优点。例如它比火力发电成本低，比原子能发电投资省而技术安全，设备结构也较简。

电力工业发展的结果，把单个的电站供电联合起来，组成联合电力系统。电力系统的生产过程是从各个发电站获得电能，然后分配和利用电能。它的特点是电能的生产、输送、分配和利用是同一时间内进行的。它要求生产的电能应等于电力系统需要的电能，即要满足电力电量的要求，也就是发电与用电的平衡。若电能供应不足或中断，便会破坏电力系统的正常工作，直接影响国民经济各部门或使生产停顿与影响人民生活。建立了混合电力系统以后，可以充分发挥动力资源，水、火电站间互相配合，使水能与热能得到充分利用；减少电力系统的装机容量，节省投资；提高供电的可靠性和运行的经济性。

水电站利用的能源是自然界不断循环的水能。水能与水电站在生产上的特性和条件，可以归纳为下列几点：

一、水能可以循环利用

由于蒸发、降水、渗透、径流等水文现象，自然界的水是不断地循环和恢复的。因此在河流各个地点都蕴藏有一定量的水能资源，可以供我们利用。水电站不象火电站，它不必为了供给燃煤而经常花费大量资金、运输设备和劳动力。水电站的能源是水，人们叫它做“白煤”，只要建造水库蓄得水量，集中一定的水头，建成水电站后就可以经常生产一定数量的电能。而火电站的燃煤，原子能电站用的放射性原料，在使用后都是无法恢复还原的。而且若采矿或运输方面发生障碍，将直接影响这些电站的正常生产。

二、水能可以调节储蓄

电能是不能贮藏的，而水电站可以借助水库对河川径流进行调节和大量储蓄起来，这样不仅可以增加河川的水能利用程度，调节盈亏，而且可以看作贮备了巨大的能量（水能），根据需要随时可以提取运用。它比火电站更具灵活性，能够解决电力系统极为重要的问题，即提高供电的可靠性和经济性。

三、水电站生产的可逆性

在水电站中，水能可以通过水轮发电机组转变为电能，另一方面又可以通过水泵机组把电能转变为水能。前者就是通常的水力发电站，后者叫做抽水蓄能电站。这种抽水蓄能电站人为地恢复具有一定水能的带能体，利用它又可以生产电能。当然在转变能量过程中，它的一部分能量是消耗了，但是这个特性对于电力系统中能源的积蓄贮藏，合理的分配和利用，提供了极为有利的条件。它可以调节电力系统发电量与用电量不相协

調的缺陷，可以利用低負荷时期多余的电能进行抽水蓄能，在高負荷时用来发电，滿足用戶的要求。

四、水电站生产受水文影响很大

水电站的生产，完全取决于天然的水能。它不象火电站，在設備容量允許情况下，可以借助补充开采和运输燃料来增加发电量。河川的徑流是随水文情况而变化的，虽然我們可以用人工方法把它积蓄起来，进行調节利用，把水量在時間上的分布情况改变，但是它的总量是不变的。河川水文的基本特性和变化規律，在原则上是可以为人們所掌握的，但是由于它的多变性和不重复性，对水电站和电力系统的最优运行也带来一定的影响，特别是水电比重較大的混合电力系统。

水电站的实际发电量，一方面取决于天然来水量的多寡，另一方面取决于生产过程中引起的能量損失，例如有时为了泄洪，使下游水位陡漲，水头降低，減少了电站的出力。因此我們要經常研究分析河川水文情况，充分認識与掌握它的特性，对于提高水电站运行效益，具有重要的意义。

五、水电站效率高而成本低

水电站动力設備比較火电站和原子能电站都要简单，附属設備較少，一般不易发生事故。由于机組轉速較低，它本身消耗的动力也較省。它不需要应付高温和防止放射性影响的裝置。管理运行人員只及火电站的十分之一至二十分之一。它容易实现完全自动化遙远控制或无人管理。水电站的年管理維持費用是很省的，一般发电成本只有火电站的四分之一至八分之一。火电站的热能效率只有百分之二十五至三十五左右，而水电站的水能效率可达百分之八十五以上。

六、可以綜合利用和梯級开发

水力发电站的建設，不仅解决了国民經济建設所需要的动力来源，而且可以实现水力資源的綜合利用，使发电、防洪、灌溉、航运、給水、养殖等任务得到綜合的解决，从而促进整个地区国民經济的全面发展，改造大自然的面貌，为人民福利服务。这种綜合效益生产特点是任何其他能源所做不到的。对于同一河流，它又可以进行梯級开发；从上游到下游，逐段加以利用开发。水流通过水电站的水輪机由尾水道排回原河，水量本身是沒有損失的，流至下游仍然可以再度利用和收到效益，这也是水能具有的独特优点。

七、操作迅速灵活性大

水电站的水輪发电机組从靜止状态可以在一分钟内启动和投入工作。它不象火电站的汽輪发电机組要求鍋炉經常处于热备用状态，而且要花一小时左右才能从靜止状态达到帶滿負荷。水电站可以随时增加或減少它的負荷，以适应电力系統的負荷变化，不致发生困难。当机組全部停止运行，它没有什么損失。机組运转操作是非常机动灵活的，因而担任电力系統的負荷备用和事故备用机組是很有利和方便的，这样也就增加了电力系統的安全可靠性。

§1-2 水电站的生产过程

了解水电站的生产特点以后，我們进一步分析它的生产过程。只有对水电站全部生产过程熟悉和掌握它的特性，才有可能采取措施改进和提高水电站的运行工作。

按水电站生产的主要过程的顺序，可以把它划分为四个阶段(图1-1)：

第Ⅰ阶段——集中能量，即取得河川的径流。

第Ⅱ阶段——输入能量，即集中水头并输送水能至水电站。

第Ⅲ阶段——变换能量，即将水能转变为电能。

第Ⅳ阶段——输出能量，即变换电能的参数送到用户。

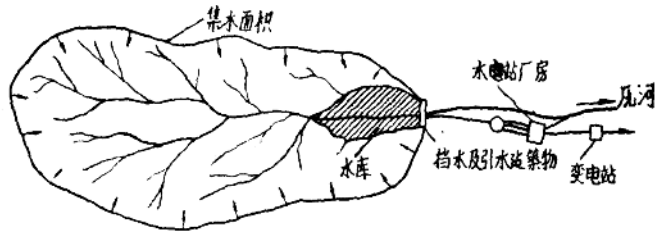


图 1-1

具体地说，集水面积组成第Ⅰ阶段；水工建筑物(坝及引水道等)组成第Ⅱ阶段；厂房及动力设备组成第Ⅲ阶段；变电站等组成第Ⅳ阶段。各阶段有它自己的动力特性，以下我们将从动力平衡的观点来分析水电站生产过程的每个阶段。

一、水电站生产过程第Ⅰ阶段

河川径流是由集水面积、降水量及其它影响径流的因素综合决定的；它们决定了水电站的水文特性：如年径流量、径流利用效率、径流的年内分布等。第Ⅰ阶段决定了水电站的输入能量(水能)的多寡。

对运行工作人员而言，集水面积不仅是地理面积，而是能源，相当于火电站的采煤和运煤。所以集水面积内一切变化，例如各取水用水部门的情况，径流量及流量的变化等，都很重要，必须经常了解研究。水电站运行人员的第一个任务就是研究集水面积内的所有情况及其可能发生的变化。要了解河川各支流的情况，各支流径流量及其汇水时间，以及其它影响径流的因素等。

在第Ⅰ阶段，水电站尚未获得水头，而引入水工建筑物的流量是河川的天然流量与流量损失的差值。即

$$Q_{\text{水电站}}^{\times} = Q_{\text{河川}} - \sum \Delta Q \quad (1-1)$$

式中 $Q_{\text{水电站}}^{\times}$ ——水电站水工建筑物的输入流量；

$Q_{\text{河川}}$ ——河川的天然流量；

$\sum \Delta Q$ ——各种流量损失的总和。

流量损失包括：

- 1) 水库及坝等处的渗漏损失；
- 2) 水库的蒸发损失；
- 3) 综合利用各部门在上游的取水；
- 4) 水电站本身的技术用水，如冲砂、排冰用水及机组用水等；
- 5) 弃水，包括汛期泄洪时不可避免的弃水和由于运行方式不合理或调度不当所引起的弃水。

因此，水电站的流量损失为：

$$\Sigma \Delta Q = \Delta Q_{\text{渗漏}} + \Delta Q_{\text{蒸发}} + \Delta Q_{\text{综合}} + \Delta Q_{\text{技术}} + \Delta Q_{\text{乘水}} \quad (1-2)$$

第 I 阶段流量损失中有一部分是与其它阶段有关的。这些流量损失决定了流量利用效率：

$$\eta_{\text{流量}} = \frac{Q_{\text{水电站}}^{\lambda}}{Q_{\text{河川}}} = 1 - \frac{\Sigma \Delta Q}{Q_{\text{河川}}} < 1.0 \quad (1-3)$$

流量损失有些是不随人们的意志而改变的，而且无法减少；另一部分是可以设法减少的；例如某些水工建筑物中的渗漏损失及水库蒸发损失就很难减少；综合利用部门的用水（灌溉及航运用水）就有可能减少一部分。由于水电站运行方式不合理所造成的损失更应设法减少。

流量损失的减少就意味着流量利用效率的增大。流量利用效率在一年期间是变化着的。可能有时流量损失大于天然流量，例如灌溉季节中可能灌溉用水需要特多，因此决定流量利用效率时，要考虑到水电站的具体工作条件和各综合利用部门用水的情况。除了不可改变的流量损失外，其它流量损失都应尽量设法减少，最好使流量利用效率大于或等于 0.95。

水电站的输入功率（输入能量）决定于输入流量及输入水头，即

$$N_{\text{水电站}}^{\lambda} = 9.81 \cdot H_{\text{水电站}}^{\lambda} \cdot Q_{\text{水电站}}^{\lambda} \cdot \eta_{\text{流量}} \quad (1-4)$$

式中 $H_{\text{水电站}}^{\lambda}$ —— 水电站的净输入水头；

$Q_{\text{水电站}}^{\lambda}$ —— 水电站的净输入流量；

$\eta_{\text{流量}}$ —— 因引水道额外损失所引起的流量利用效率，一般在 0.95 至 0.98 范围内。

二、水电站生产过程第 II 阶段

这个阶段主要是研究如何集中水头，如何维持最高限度的上游水位及输送水流等问题。

水头损失包括各种水力损失及上下游水位变化造成的损失，构成总水头损失（ $\Sigma \Delta H$ ）。因此输送到水电站机组前的水头为：

$$H_{\text{机组}}^{\lambda} = H_{\text{水电站}}^{\lambda} - \Sigma \Delta H \quad (1-5)$$

由此式可以决定水电站生产过程第 II 阶段的水头利用效率：

$$\eta_{\text{水头, II}} = \frac{H_{\text{机组}}^{\lambda}}{H_{\text{水电站}}^{\lambda}} = 1 - \frac{\Sigma \Delta H_{\text{II}}}{H_{\text{水电站}}^{\lambda}} = f(Q) \cong f(N) \quad (1-6)$$

由于总水头损失与引用流量有关，所以 $\eta_{\text{水头, II}}$ 是流量 Q 的函数，也即是功率的函数。各不同类型的水电站的 $\eta_{\text{水头, II}}$ 值不同，一般为 0.90 至 0.98。引水道式水电站此值较小。

水流输送到水电站，沿途有各种损失。例如在引水管、闸门等处的漏水；厂内技术用水；在引水道上的冲砂排冰用水等。有时导叶构造不良，它的漏水流量可能达到水轮机的空转流量，以致停机困难。

第 II 阶段的流量利用效率为：

$$\eta_{\text{流量, II}} = \frac{Q_{\text{机组}}^{\lambda}}{Q_{\text{水电站}}^{\lambda}} = 1 - \frac{\Sigma \Delta Q_{\text{II}}}{Q_{\text{水电站}}^{\lambda}} = 1.0 \sim 0.95 \quad (1-7)$$

式中 $Q_{\text{机组}}^{\lambda}$ —— 机组输入流量;

$Q_{\text{水电站}}^{\lambda}$ —— 水电站总输入流量;

$\Sigma \Delta Q_{\text{II}}$ —— 第 II 阶段总流量损失。

当引水建筑物构造不良时, $\Sigma \Delta Q_{\text{II}}$ 值可能达到水电站总输入流量百分之十, 而使 $\eta_{\text{流量, II}}$ 小于 0.95。

$\Sigma \Delta H_{\text{II}}$ 和 $\Sigma \Delta Q_{\text{II}}$ 综合起来决定了水电站的功率损失 ΔN_{II} 。因此水电站净得的(有效的)输入功率, 即机组的输入功率为:

$$N_{\text{机组, II}}^{\lambda} = N_{\text{水电站}}^{\lambda} - \Sigma \Delta N_{\text{II}} \quad (1-8)$$

式中 $\Sigma \Delta N_{\text{II}}$ —— 第 II 阶段总功率损失,

它由两部分组成: $\Sigma \Delta N_{\text{II}} = \Delta N_{Q, \text{II}} + \Delta N_{H, \text{II}} \quad (1-9)$

式中 $\Delta N_{Q, \text{II}}$ —— 第 II 阶段由于流量损失所引起的功率损失;

$\Delta N_{H, \text{II}}$ —— 第 II 阶段由于水头损失所引起的功率损失。

第 II 阶段的功率效率值可用下式求得:

$$\eta_{\text{功率}} = \frac{N_{\text{机组}}^{\lambda}}{N_{\text{水电站}}^{\lambda}} \quad (1-10)$$

式中 $N_{\text{机组}}^{\lambda} = 9.81 \cdot Q_{\text{机组}}^{\lambda} \cdot H_{\text{机组}}^{\lambda}$

$N_{\text{水电站}}^{\lambda} = 9.81 \cdot Q_{\text{水电站}}^{\lambda} \cdot H_{\text{水电站}}^{\lambda}$

因此,

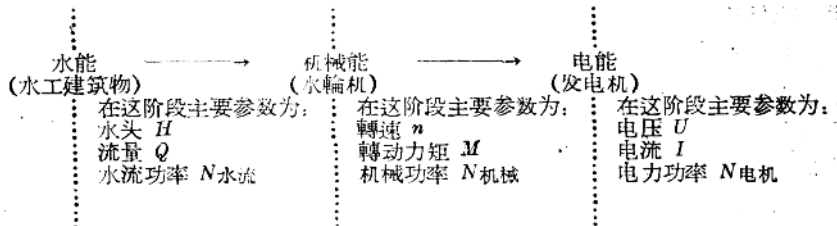
$$\eta_{\text{功率}} = \frac{Q_{\text{机组}}^{\lambda}}{Q_{\text{水电站}}^{\lambda}} \cdot \frac{H_{\text{机组}}^{\lambda}}{H_{\text{水电站}}^{\lambda}} = \eta_{\text{流量, II}} \cdot \eta_{\text{水头, II}} \quad (1-11)$$

引水道式水电站的 $\eta_{\text{功率}}$ 值, 可能小于 0.6 至 0.7, 即引水建筑物的总效率为 0.6 至 0.7, 这是最不利情况下的数值。由此可见水工建筑物对水电站的运行有极大的影响。上述决定了可能引入机组的能量, 这是水电站运行生产过程中主要水能问题之一。

三、水电站生产过程第 III 阶段

水电站生产过程第 III 阶段, 也是最重要的一个阶段。以前的两个阶段好象是这个阶段的准备阶段, 它们的作用是造成可以利用水能的条件, 而在第 III 阶段中是要把水能转变为电能。

从水能转变为电能的过程如下所示:



在水电站生产过程的第 III 阶段中, 主要是研究 H 、 Q 、 n 、 M 等参数间的相互关

系。在分析机组工作稳定或者不稳定时，可以利用力矩特性曲线进行研究。但在水能计算中，却不用 n 、 M 这两个量，而是直接由水能转换为电能，即直接由 H 、 Q 转换为 N 电机的关系。

能量转变的过程中，在提高第Ⅲ阶段的效率方面，水能工作者过去做了不少工作，已经获得很大的成果，但对于提高前两个阶段的效率注意不够，今后应使输入水能的过程更加完善。

从动能的观点来看，机组段的效率可看作是：

$$\eta_{\text{机组段}} = \eta_{\text{引水}} \cdot \eta_{\text{水机}} \cdot \eta_{\text{电机}} \quad (1-12)$$

一般水轮机的效率 $\eta_{\text{水机}}$ 和发电机的效率 $\eta_{\text{电机}}$ 是可以比较固定地求得的，但是引水建筑物的效率 ($\eta_{\text{引水}}$) 则随着水电站布置方式的不同而有很大变化。

当决定了输入机组的水头、流量与效率后，就可以决定机组的出力。机组段的效率是不能分开的，因为水工建筑物、水轮机、发电机三者效率之间是互有联系的。

以上只是讨论一台机组段的能量转换过程，如果是研究整个水电站的能量转换过程，就要考虑整个水电站的动力布置方式，亦即须计及引水道各部分的效率。

水电站动力单元各部分的效率值一般在下列范围之内：

$$\text{引水建筑物} \quad \eta_{\text{引水}} = 0.96 \sim 0.98$$

$$\text{水轮机} \quad \eta_{\text{水机}} = 0.85 \sim 0.94$$

$$\text{发电机} \quad \eta_{\text{电机}} = 0.96 \sim 0.98$$

水轮发电机组的效率决定于制造材料、制造技术和机组容量的大小，上列数值系指在较好的情况下的数值。

水电站的布置方式对于引水建筑物的效率有很大影响，例如苏联的列宁-伏尔加水电站(原名古比雪夫水电站)，由于将拦污栅改造成一个整体的，因而减少了水头损失，使 $\eta_{\text{引水}}$ 值提高到 0.99。此外，水电站在运行时的条件，例如调节方式的不同，对于引水建筑物的效率也可能引起很大的变化。这样，机组段的效率值大致为：

$$\eta_{\text{机组段}} = 0.8 \sim 0.9$$

若考虑水电站在生产过程第Ⅲ阶段内整个的效率，则须计及机组并联工作时相互之间的影响。整个水电站的效率可认为等于第Ⅲ阶段的效率，大致为：

$$\eta_{\text{水电站}} \approx \eta_{\text{III}} = 0.6 \sim 0.9$$

生产过程第Ⅲ阶段的特点是：出现了动力单元机组间的并联工作，而在前两个阶段中，动力生产过程是顺序(串联)连接的。在第Ⅲ阶段中，由于出现了这种情况，因此就产生了在各台机组之间分配负荷 N 和流量 Q 的问题。只有在各台机组之间最优的分配负荷，才能使第Ⅲ阶段的效率 (η_{III}) 达到最高。负荷分配如果不是最优的，则水电站的总效率可能只达到 0.6，效率的降低超过 10% 以上。

四、水电站生产过程第Ⅳ阶段

水电站生产过程的第Ⅳ阶段，包括从发电机发出来的电能，经过输、变、配电，最后送出的整个过程。与前三个阶段不同的是，在第Ⅳ阶段中没有能量转换的过程，只不过是改变电能的参数而已。

电能的参数改变是按照输电的要求来决定的。在输变电过程中，各部分的效率大致如下：

1) 发电机

主要参数: 频率 $f = \text{常数}$;

电压 $U_{\text{电机}}$;

电流 $I_{\text{电机}}$ 。

效率值: $\eta_{\text{电机}} = 0.96 \sim 0.98$ 。

2) 升压变电站

主要参数: 电压 $U_{\text{变压器}}$;

电流 $I_{\text{变压器}}$ 。

效率值: $\eta_{\text{变压器}} \approx 0.98$ 。

由此可见, 在生产过程第IV阶段中, 参数改变时, 对于效率的影响不大, 但在第III阶段能量转换过程中参数改变时, 效率的变化较大。

如上所述, 水电站生产过程的四个阶段, 在不同的水电站布置方式下, 是有区别的。通过分析生产过程的四个阶段, 我们就可以对一个水力枢纽的总效率加以研究。有些人在研究水电站的运行问题时, 常只考虑第III阶段的效率, 这是不够全面的, 必须把四个阶段连系起来, 当作一个整体来看待。而且在任何一个阶段中的损失, 应当看作都是国民经济损失的一部分, 我们都应该竭力设法避免或减少。

水电站整个生产过程的效率决定于第I阶段水电站的输入功率和第IV阶段输出功率之比。可以看作是各个生产过程阶段效率的乘积, 即

$$\eta_{\text{水电站}} = \eta_1 \cdot \eta_{\text{II}} \cdot \eta_{\text{III}} \cdot \eta_{\text{IV}} \quad (1-13)$$

式中 $\eta_{\text{水电站}}$ ——整个水力枢纽的总效率;

η_1 、 η_{II} 、 η_{III} 、 η_{IV} ——分别为第I、II、III、IV阶段的效率。

水电站总效率一般在0.6至0.9之间。水电站运行人员和设计人员的任务, 就在于如何把水电站总效率提高到最大限度。

§1-3 电力系统中水电站最优运行的意义

电力系统中水电站运行方式的优劣, 在很大程度上决定了整个电力系统的动能经济效益。在供电比较紧张的情况下, 它甚至会对该地区产生政治影响。关于制定电力系统中水电站最优运行方式的准则, 本来是一个已经基本解决的问题, 但是过去我们认识它是经过几个阶段的。最初人们只看到和水电站并列运行的火电站一天不停地消耗着大量宝贵的煤, 为保证火电站的正常工作, 不得不花很大的精力去组织和保证煤的按计划供应, 而认为水电站却是耗用不费钱的自然界的水, 用多少无所谓, 这是认识的第一个阶段。

后来从水电站运行实践中知道用水问题并非那么简单, 水对水电站与煤对火电站同等重要, 要使水能变为电能需要建造各种水工建筑物, 如挡水、引水、排水建筑物和厂房, 以及装置机电设备等, 需要大量的投资和时间的, 因而开始注意如何经济和合理地利用水, 使有限量的水能够发出最多的电能。这样, 注意水电站的经济运行以求获得最大的电能, 这是认识的第二个阶段。

但是, 使水电站发出最多的电能的准则对电力系统不一定是最有利的。在目前电能尚不能大量贮存的情况下, 电力系统的发电和用电要求平衡(任一瞬间), 因而, 如果水电站只顾它本身运行方式最优, 往往使得火电站处于不利的运行状态下, 以致增加了煤

耗；这部分附增的煤耗有时可以抵销了水电站按最大电能方式运行所获得的附加电能效益，甚至是全部抵销或超过（即不利）。由此可见，一方面水电站要求按最大电能方式运行，另一方面火电站要求以最低煤耗运行，因此电力系统中水、火电站的运行方式便产生了矛盾。怎样才能解决这个矛盾呢？人们想出从整个电力系统出发，找出一个这样的运行方式，使得水、火电站按这个运行方式运行的结果能使整个电力系统的支出费用最小。如果除去支出费用中与运行方式无关的部分（如工资、折旧、检修费用等），且各火电站所用的煤价格相同，则电力系统支出费用最小的准则和电力系统总耗煤量最小的准则是一致的。这是一般电力系统目前采用的准则，这是认识的第三个阶段。

电力系统支出费用最小准则虽较前述准则完善了些，但并非一般性的准则，譬如在供电比较紧张或是在水电站遇到枯水年（电力系统可能引起破坏）等情况下，这个准则不能采用。因为此时电力系统支出费用最小的准则并不全面和完善地反映国民经济效益。

水电站的运行密切与天然来水情况相关，在目前科学水平下，我们只能从时间上对水量进行重新分配（径流调节），但不能改变天然来水址（水电站是有限输入能量的电站）；就是来水量和它的分配规律也不能事先较长期的准确地知道，只能作统计性的水文预报（对长期预报言），亦即仅能判定各种可能来水情况的机率或来水情况的大致范围值。这样再加上水文的多变性和不重复性，使得制定水电站的运行方式复杂化。运行方式应该考虑到各种可能来水情况。现就电力系统动力平衡观点来分析下列两种的不同来水情况：

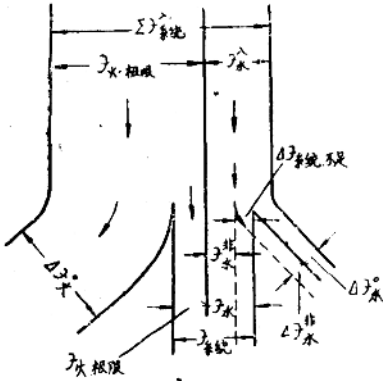


图 1-2

1) 当天然来水量相当于设计水文情况时

因为火电站的电能生产受其装机容量限制，故要满足电力系统的电能要求（已定量），水电站必须发出一定量的电能（保证电能 $E_{水}$ ），才能维持电力系统的正常工作，如图（1-2），此时

$$E_{系统} = E_{火, 极限} + E_{水} \quad (1-14)$$

式中 $E_{系统}$ ——电力系统所需电能（瓦·时）；

$E_{火, 极限}$ ——火电站的极限发电量（瓦·时）；

$E_{水}$ ——水电站的发电量（瓦·时）。

当水电站为最优（最有利）运行方式时，

$$E_{水} = E_{水}^{\wedge} - \Delta E_{水}^0 \quad (1-15)$$

式中 $E_{水}^{\wedge}$ ——水电站输入能量（已定，瓦·时）；

$\Delta E_{水}^0$ ——水电站在最优运行方式时的损失能量（瓦·时）。

当水电站非最优运行方式时，

$$E_{水}^{\text{非}} = E_{水}^{\wedge} - \Delta E_{水}^0 - \Delta E_{水}^{\text{非}} \quad (1-16)$$

式中 $E_{水}^{\text{非}}$ ——非最优运行方式时水电站的输出电能（瓦·时）；

$\Delta E_{水}^{\text{非}}$ ——由于水电站非最优运行方式所引起的附加损失（瓦·时）。

由(1-15)及(1-16)二式可知

$$Q_{水}^{非} < Q_{水}$$

这样, 由于水电站按非最优运行方式运行所引起的附加损失 ($\Delta Q_{水}^{非}$), 不仅影响电力系统附增耗煤量, 而且还会导致正常供电的破坏, 因为当火电站的极限发电量加水电站的 $Q_{水}$ 刚等于电力系统负荷要求, 此时, 如果水电站有 $\Delta Q_{水}^{非}$, 那么

$$\Delta Q_{系统, 不足} = \Delta Q_{水}^{非} \quad (1-17)$$

式中 $\Delta Q_{系统, 不足}$ ——电力系统的不足电能(瓩·时)。

在这种情况下便不得不限制(或停止)一部分用户的用电, 这就相应地影响了各个国民经济部门的生产。

2) 当天然来水量小于设计水文情况时

此时电力系统必然要受破坏, 即可认为

$$\Delta Q_{系统, 不足} = \Delta Q_{系统, 不足}^0$$

式中 $\Delta Q_{系统, 不足}^0$ ——由于水文情况不佳所引起的不可避免的不足电能(瓩·时)。

此时如果水电站按非最优运行方式运行, 则将加深电力系统的破坏程度。

$$\Delta Q_{系统, 不足} = \Delta Q_{系统, 不足}^0 + \Delta Q_{系统, 不足}^{非} \quad (1-18)$$

式中 $\Delta Q_{系统, 不足}$ ——电力系统不足电能(瓩·时);

$\Delta Q_{系统, 不足}^0$ ——由于水文情况不佳所引起的不可避免的不足电能(瓩·时);

$\Delta Q_{系统, 不足}^{非}$ ——由于水电站非最优运行方式所引起的附加不足电能(瓩·时)。

由此可见, 水电站运行方式的好坏不仅关系到电力系统供电经济性(这是重要的一方面), 而且关系到其它生产部门, 有时还影响到其它综合利用部门的正常工作。这样按供电最经济的准则(例如电力系统支出费用最小或电力系统煤耗最小等准则)是不够全面的。显然, 应该以国民经济效益最大或费用最小作为水电站最优运行的准则。

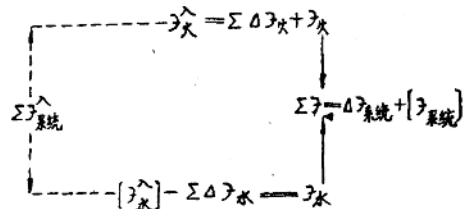


图 1-3

下面就用这个准则来分析电力系统中水电站最优运行方式的意义。

图1-3是电力系统电能平衡图。

- 其中
- $Q_{系统}$ ——电力系统需要的发电量;
 - $Q_{水}$ ——电力系统中水电站的发电量;
 - $Q_{火}$ ——电力系统中火电站的发电量;
 - $Q_{水}^{入}$ ——水电站的输入能量;
 - $Q_{火}^{入}$ ——火电站的输入能量;
 - $\Sigma\Delta Q_{水}$ ——水电站的总能量损失;
 - $\Sigma\Delta Q_{火}$ ——火电站的总能量损失;

$\Sigma \mathcal{E}_{\text{系統}}^{\lambda}$ —— 電力系統的輸入能量;

$\Delta \mathcal{E}_{\text{系統}}$ —— 電力系統的總能量損失。

水電站的輸入能量(水能)因受自然條件的限制是一定的, 由於運行方式不恰當使它的能量損失 $\Sigma \Delta \mathcal{E}_{\text{水}}$ 增加了, 相應地水電站的發電量 $\mathcal{E}_{\text{水}}$ 便減少。為了滿足電力系統需電的要求, 保持電力系統的電能平衡, 電力系統中的火電站就要增加發電量。如前所述, 一般火電站的效率約為0.25至0.35, 它比較水電站的效率(0.60~0.90)小得多。所以在電力系統中, 如果水電站少發一度電, 火電站需要多消耗的燃料將不是相當於一度電的熱能燃料, 而是相當於三至四度電的熱能燃料, 才能抵償水電站少發一度電的損失。因此水電站運行工作做得不好, 使火電站消耗燃料大為增加, 直接影響整個電力系統的經濟性, 還可能導致供電的可靠性問題。

水電站最優運行方式的效益, 從數字上看是可觀的。例如日最優運行方式的效益為1%, 季調節以上運行方式可達3~5%, 甚至有達10%的。下面舉某混合電力系統中水電站的實際運行情況為例:

$$\text{水電站出力比重} \quad x_N = \frac{N_{\text{水電站}}}{N_{\text{系統}}} = 20\%;$$

$$\text{水電站發電量比重} \quad x_{\mathcal{E}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{水電站}}}{\mathcal{E}_{\text{系統}}} = 10\%;$$

$$\text{電力系統最大負荷} \quad N_{\text{系統}}^* = 2500 \text{ 千瓩};$$

$$\text{水電站出力} \quad N_{\text{水}} = 500 \text{ 千瓩};$$

$$\text{火電站出力} \quad N_{\text{火}} = 2000 \text{ 千瓩}.$$

電力系統中水電站的運行方式, 可以採用下列三種:

1) 水火電站綜合考慮的最優運行方式;

2) 對火電站最有利的運行方式;

3) 對水電站最有利的運行方式。

如用第1)種運行方式, 其結果如下:

$$\mathcal{E}_{\text{系統}} = 49,590 \text{ 千度}; \quad \eta_{\text{水}} = 86.1\%;$$

$$\mathcal{E}_{\text{水}} = 5,855 \text{ 千度}; \quad \eta_{\text{火}} = 29.2\%;$$

$$\mathcal{E}_{\text{火}} = 43,735 \text{ 千度}; \quad \eta_{\text{系統}} = 31.7\%;$$

$$\mathcal{E}_{\text{系統}}^{\lambda} = 156,440 \text{ 千度}; \quad B_1 = 0.421 \text{ 公斤/度};$$

$$\mathcal{E}_{\text{水}}^{\lambda} = 6,940 \text{ 千度}; \quad -\Delta G_1 = 0.$$

$$\mathcal{E}_{\text{火}}^{\lambda} = 149,500 \text{ 千度};$$

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{線路}} = 110 \text{ 千度};$$

$$\Sigma \Delta \mathcal{E}_{\text{水}} = 975 \text{ 千度};$$

$$\Sigma \Delta \mathcal{E}_{\text{火}} = 105,765 \text{ 千度};$$

由上可見, 採用這種運行方式由於水電站效率高達86.1%, 而火電站效率只29.2%, 損失很大, 電力系統採用這種運行方式時, 它的附加燃料損失為零。

如採用第2種運行方式, 其結果如下:

$$\Sigma \Delta \mathcal{E}_{\text{水}} = 1,270 \text{ 千度}; \quad \eta_{\text{水}} = 82.0\%;$$

$$\begin{aligned} \Delta \beta_{\text{线路}} &= 256 \text{千度}; & \eta_{\text{火}} &= 29.4\%; \\ B_1 &= 0.419 \text{公斤/度}; & \eta_{\text{系统}} &= 31.6\%; \\ & & -\Delta G_2 &= 137 \text{吨}. \end{aligned}$$

这样说明虽然采用第2种运行方式火电站煤耗减少了，但电力系统总的附加燃料消耗了137吨。

如采用第3种运行方式，其结果如下：

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta \beta_{\text{水}} &= 850 \text{千度}; & \eta_{\text{水}} &= 87.8\%; \\ \Delta \beta_{\text{线路}} &= 15 \text{千度}; & \eta_{\text{火}} &= 28.9\%; \\ B_1 &= 0.426 \text{公斤/度}; & \eta_{\text{系统}} &= 31.4\%; \\ & & -\Delta G_3 &= 181 \text{吨}. \end{aligned}$$

这样说明采用第3种运行方式使电力系统附加的燃料损失更多，为181吨。

这个实例表明水电站运行方式对电力系统整个经济性的影响是很大的。上例数字只是就电站一昼夜运行所增加的燃料计算(日运行方式)，整个电力系统长期运行，它的数值就更巨大了，可能达到年发电量的2~4%。

因此火电站或水电站的最优运行方式并不等于电力系统的最优运行方式。在设计或运行水电站时，如只比较第2或第3种运行方式是不恰当的，我们必须从整个电力系统出发，研究各种电站的运行方式，使获得国民经济最大的效益。

为了把电力系统中每一电站进行比较，我们可以采用下列几个指标：

1. 电力系统效率

$$\eta_{\text{系统}} = \frac{\beta_{\text{系统}}}{\beta_{\text{水}}^{\wedge} + \beta_{\text{火}}^{\wedge}}$$

2. 电力系统单位耗水率

$$q_{\text{系统}} = \frac{\beta_{\text{水}}^{\wedge}}{\beta_{\text{水}}} \text{ 或 } \frac{W}{\beta_{\text{水}}}$$

3. 电力系统煤耗率

$$B_{\text{系统}} = \frac{\beta_{\text{火}}^{\wedge}}{\beta_{\text{火}}} \text{ 或 } \frac{G}{\beta_{\text{火}}}$$

式中 W ——化为一米标准水头时的耗水量；

G ——标准煤耗量(吨)。

本章讨论了电力系统中水电站最优运行的重要性和它的经济性，并由此得出结论：应采用电力系统的总指标，从整个电力系统出发来衡量水电站的运行方式的政治和经济意义。

第二章 水电站的动力特性

§2-1 动力平衡及研究动力平衡的基本动力指标

水流的能量以及利用水流能量的水电站具有自己的特点，因而研究和分析水电站的生产过程的方法也具有其特点，在我们所进行的各种动力过程的计算中，所用的方法和计算方程式都是基于动力平衡的原则而建立起来的。例如分析能量在水电站生产过程中的变化及损失特性，研究水电站在电力系统中的最优运行方式时都是采用动力平衡的方法。

动力平衡的基本内容为电能平衡及出力平衡，而水头(H)和流量(Q)是电能和出力平衡的组成部分。

出力平衡的基本方程式为：

$$N^{\wedge} = N + \Delta N \quad (2-1)$$

电能平衡的基本方程式为：

$$9^{\wedge} = 9 + \Delta 9 \quad (2-2)$$

式中 $N^{\wedge}, N, \Delta N$ ——水电站的输入功率、输出功率及水电站动力过程中的功率损失；

$9^{\wedge}, 9, \Delta 9$ ——为水电站的输入能量、输出能量及水电站动力过程中的能量损失。

水电站动力过程的动力平衡可用图来表示，如图2-1。

采用动力平衡的方法，对动力过程每个阶段的能量损失进行研究分析的结果，可以绘制动力过程每个阶段的动力特性曲线，及整个动力过程的动力特性曲线。

如上所述动力平衡是研究水电站生产过程中能量的转换及其特性的，而任何能量的转换及其特性描述都表现为一定的数量关系，为了具体的对动力过程进行分析，便于我们来比较某一动力平衡方式的优劣，从而确定出最优的运行方式，我们一般采用某些动力指标来作为分析比较的工具。

动力指标中有以下三类最基本最常用的，称为基本动力指标：绝对动力指标；单位动力指标；微分动力指标。

在实际的运用中，以上每一类基本动力指标又可表为四种不同的形式，现以绝对动力指标为例来加以说明。

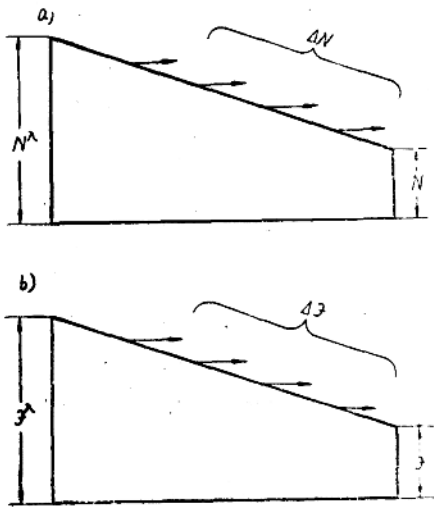


图 2-1.

一、绝对动力指标

用绝对数值来表示量的大小称为绝对动力指标，它可分别用以下四种形式表示：

1. 一般动力指标：

这种动力指标都采用同一的单位，例如 $N^{\wedge}, N, \Delta N$ 的单位都采用(瓦)， $9^{\wedge}, 9, \Delta 9$