# 第　一　章

# 动力系统中水电厂的合理利用

## 1-1　解算工况问题的基本概念

近十年来，有关动力系统和电厂运行工况的科学有很大发展。尤其是解算基本工况的问题成就显著。许多科学成就已应用于实际，或处于即将应用的阶段。

在综合的工况问题中，还包括了合理生产和动力系统负荷分配的各种工程问题，这些都要考虑它们的经济性和技术特性。解算工况问题有很大的实用和科学价值。现有动力系统的运行经验及大量试验性的计算指出，如工况合理，则能节约大量资金。如以最优化算法带来的平均效益估算，动力系统能节约燃料0.5～1％,每年可节约资金约 2～5 百万卢布。在解算工况问题上富有成效的算法的创建，标志着研究自动控制系统（ACУ）的重要阶段。自动控制系统的数学处理，还包括了动力工况最优化的程序设计。因此，可认为与工况问题有关或有联系的动力系统工程问题的其它方面，也有必要去正确解算。

解算工况问题的方法论特点

系统分析法是研究动力工程的基本方法。当孤立地研究动力对象和各个动力部门如电厂、电网、区域电力系统等时，则其有效控制手段不可能是最经济的。从整个动力系统的角度来研究各种工况问题，在数学上、工程上、以及计算上，都是非常困难的。因为要考虑各种生产工艺、解算动态中的

问题和其它等，以致使得工况问题的范围太庞杂了。为了克服这些困难，在运用基本解算原则和某些假定条件下，研究了方法论上的一系列措施。现将其中主要的几种叙述如下。

工况问题往往作为相互有联系的各个分题的综合体来研究[文献 3、27]。在此情况下，解算问题的算法就是各个分题算法的总和。用统一的算法来描述从动力生产开始，一直到动力耗用的过程（如从燃料开采到国民经济各企业的热能和电力用户），这样考虑是对的。但这样解算问题是非常复杂的，非一般计算手段所能解算出来的。

在拟定各个分题的数学模型和算法总体时，要进行若干容许的简化。用分级形式可以把整个系统分成若干个更为简单的子系统。因此，对整个系统的要求就成为对子系统的必需要求。分级可划分为两种基本形式：时间分级和空间分级。在控制问题中，有时还按情势来分级。

国民经济复杂的规划和控制系统，以及解算工况问题的不同阶段，原始信息的不同的准确程度，这些都制约着时间分级。例如电力用户的负荷在运行阶段时的预测精度为 2～5%，而在设计阶段时则为 20～25%；其经济特性则分别为 1～2%和 10～15%；而其技术特性又分别为 0.5～1%和 10～15%[文献 16]。在某些情况下，信息具有确定性；在其它情况下，具有随机性；而在第三种情况下，则具有不确定性。

利用按时间分级的原则，最优工况可划分为四个独立的水平。

第一阶段　解算15～20年远景的预测问题。在此水平上，工况问题是次要的，因此只要根据一定的动力发展远景水平来解算工况问题。原始信息具有相当大的不确定性的特点。

第二阶段　解算 5～10年的规划问题。在此水平上，工况问题比较现实，在已知的范围内，确定设备和建筑物的技术参数。但部分信息还具有随机性。

第三阶段　解算一年或几年内的近期计划问题。在此水平上，工况问题是很重要的。如果说，前两个阶段是设计问题，那么本阶段所要解算的问题，则是设计和运行问题。故其信息既有随机性，也有确定性。

第四阶段　操作拟定和控制问题。只是几天时间内的预计期，因此工况问题能决定动力系统是否经济。故其信息通常是确定性的。

而空间分级则取决于如何进行控制的、复杂的组织环节。例如动力系统的技术操作控制，具有下列这些环节：国家中央调度控制（ЦДУ）；区域性集中调度控制（ОДУ）；地区性动力系统调度所（ДУ РЭС）；控制对象的调度点（ДП）。

用分级形式来表示动力系统会使精度有所降低，但是工况最优化的问题却成为可以解算的问题了。当然，也可用其它方法，例如从整个综合性的工况问题中取出简化的数学模型，以及其它等等。在以后各章中，讲及某些具体问题时，将更详细地叙述。

将采用不同的最优化准则。根据电厂和系统的运行的技术规程，工况必须满足下列要求：经济性、可靠性、连续性和电能的标准质量［文献35］。事实上，工况问题乃是多准则的问题。由于各种准则在物理上是相互矛盾的，因此对系统工况的解算，也不可能形成单一的算法，只好对工况问题采用不同的最优化准则，进行分割解算。

本书主要研究经济问题，其中的最优化准则，就是那些能直接或间接反映动力系统的运行经济性的量值。而对运行

中的动力系统来说，其最一般性的经济准则，则是运行支出（生产费用）为最小，即

$$\text{И}(R)=\text{И}_{\text{э}}(R)+\text{У}_{\text{э}}(R)+\text{У}_{\text{c}}(R)=\min \qquad (1\text{-}1)$$

式中　$\text{И}$——总的运行支出；

$\text{И}_{\text{э}}$——动力系统的运行支出；

$\text{У}_{\text{э}}$——在可靠性、连续性遭到破坏，以及电能质量降低时所引起电力用户的损失；

$\text{У}_{\text{c}}$——在热能生产、水利枢纽水利综合利用要求等不能保证时，引起国民经济相邻部门的损失；

$R$——工况参数向量。

确定损失值是一个复杂的、独立的、至今还不能解算的问题。例如水电厂运行需水量如果小于下游所要求的需水量，则必然引起一定损失，但要计算损失值就不简单。又如系统的电压，如果偏离额定电压，则将使用户过多地消耗电能，但是要在实际条件下精确地计算损失值，则是不可能的。为了深入分析情况，需要知道损失值的函数，即需要知道损失值与工况参数向量之间的关系。但这有困难。因此，把工况问题分成了以下两大类：

第一类—— 在保证可靠性、连续性和电能质量的要求，以及保证相邻部门要求的条件下，所规定的系统工况。即在这些工况问题中，$\text{У}_{\text{э}}(R)=0$，$\text{У}_{\text{c}}(R)=0$，并且当 $R_{max}\geqslant R\geqslant R_{min}$ 时，最优工况符合下列条件：

$$\text{И}_{\text{э}}(R)=\min \qquad (1\text{-}2)$$

第二类——在可靠性、连续性、电能质量的要求，以及相邻部门的要求遭到破坏时，所规定的系统工况。此时，$\text{У}_{\text{э}}(R)\neq 0$，$\text{У}_{\text{c}}(R)\neq 0$；这种工况或者符合于 $\text{И}(R)=\min$条件；或者多半是下列条件：

$$\left.\begin{aligned} У_{э}(R)+У_{c}(R)&=\min \\ И_{э}(R)&=\mathrm{const}\end{aligned}\right\} \quad (1\text{-}3)$$

公式（1-3）的意义是系统处于某种极限状态，且其运行支出为常数。但由于一系列电力用户都遭到损失，因此要求总损失为最小。

最优化准则

仅研究在解算经济特性问题时所用的那些准则。即在不同的问题中，采用不同的经济准则和技术经济准则。最常用的有下列那些准则：

$И_{э}\longrightarrow \min$ —— 运行支出最小；

$B\longrightarrow \min$ ——燃料消耗量最小；

$\eta\longrightarrow \max$——效率最高；

$Э\longrightarrow \max$——发电量最大；

$W\longrightarrow \min$ —— 水电厂和其它部门的耗水量为最小。

兹简述上述准则的应用。

准则 $И_{э}\longrightarrow \min$ 是最严格的，并在生产过程、在电能和热能分配的任何水平的分级中，都可以采用。一般形式为：

$$И_{э}=И_{b}(B)+И_{у\cdot п} \quad (1\text{-}4)$$

式中 $И_{b}$ ——燃料耗量；

$И_{у\cdot п}$——常数与工况无关的运行支出。

因此，准则 $И_{э}\longrightarrow \min$和 $И_{b}\longrightarrow \min$ 是一致的。此时

$$И_{b}=\sum_{j=1}^{k}\sum_{t=1}^{m}И_{bjt}+Ц_{jt} \quad (1\text{-}5)$$

式中 $t=1,2,3,\cdots\cdots$，$m$——计算时段的数目；

$j=1,2,\cdots\cdots\cdots$，$k$ ——热电厂的数目；

$Ц_{jt}$ ——燃料价格。

电力系统的运行部门，在很多情况下至今不能迅速而准

确地计算燃料费。通常电厂所燃烧的每吨标准燃料，其价值和价格都是很不相同的。燃料价格至今仍然不能与其实际价值相当。由于不知道燃料价格，因此常常不得不作某些简化，认为电力系统中使用的燃料价格是固定的，所以把标准燃料的消耗量作为一种（经济）准则：

$$B=\sum_{j=1}^{k}\sum_{l=1}^{m}B_{jl}\rightarrow \min \tag{1-6}$$

无论采用什么样的简化，用准则（1-6）公式总是合理的。但是，用钱币来表示的经济准则，就不那么全面的了。通常将准则（1-5）和（1-6）用于整个系统的问题。

一系列的工况问题是属于电厂内部的问题。在必须满足更加一般系统（动力系统或非动力系统）的要求条件下，按其工况和电能生产的规模，这种问题就成为电厂设备和能源的合理利用问题了。

经济准则和技术经济准则适用于电厂内部的工况问题。技术经济准则是比较简单的，因为对此不需要经济信息。

最后，在水电厂水库最优化运行方式问题中也可以应用水电厂发电量最大的准则［文献33］。这个准则相当简单，因为在使用此准则时不需要系统的信息，所以在水电厂的日常运行中，广泛地应用这种准则。

选择最优化准则是很重要的，并且在很多情况下是编制并解算具体工况问题的前提。

## 1-2 动力系统中运行机组组合的选择

进行动力系统正常工况最优化时，要考虑在所有电厂和系统的那些具有瞬时性质的，以及具有累计性质的约束条件

之下，解算电厂运行机组的最优组合的选择问题，以及解算电厂之间和机组之间负荷分配的相互关系问题。动力系统负荷最优分配的效益估计能节约燃料总耗量的0.5～1.5%，而机组最优组合的效益可能还要大好几倍。

负荷最优分配的方法和算法已经相当成熟［文献9、27］，相反，机组组合的选择方法，至今仍是近似计算的方法。这是因为机组组合的最优选择问题是整数的、非线性的、具有高维数的。例如在系统的各类电厂中有 $n$ 台机组，这些机组中的每台机组可能是投入的，也可能是切除的，因此可能的方案数目为 $2^n$。而系统中通常平均有几十台机组，因此，甚至对只有 $n=20$ 台机组的小系统来说，工况问题方案数就有 $1\times10^6$ 个。在一般情况下，为了求解，必须计算和比较机组所有可能的组合而且电厂间和机组之间的负荷分配必须是最优分配。为此，可以对所有可能方案进行简单的排列。但是，在近代巨型动力系统的情况下，要进行这样的排列，甚至采用电子数字计算机也是不可能的。那么用什么方法来修正数学方法，以降低这个问题的维数呢？至今尚未求得，因此采用折衷的（不严格的）解算方法。用下列两种方式来选择机组的组合，是比较成熟的。

方式 1　在给定电厂负荷曲线下，选择机组的组合。

方式 2　在运行机组的台数中，确定机组切除（或投入）的顺序。

在解算第一种方式时，可利用图 1-1（$a$）所示的原理图。由该图可见，选择机组的最优组合，至少求解两个复杂的最优化问题，即绘制电厂最优动力特性曲线（方框 3）的问题和电厂之间负荷最优分配的问题（方框 4）。由于联合解算所有相近问题在计算上有困难，不得不断开从方框 4 到方

框1的反馈，或者限制选择最优机组组合的电厂数目。任何其它的途径都会使解的精度降低。

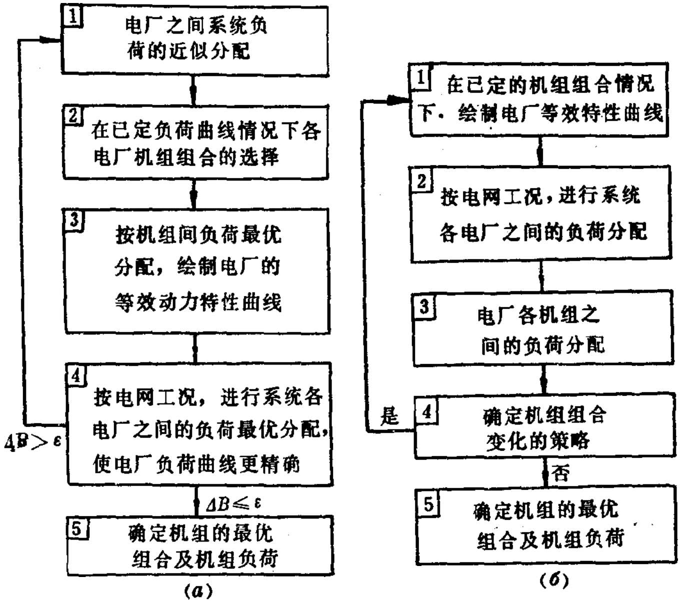


图 1-1 选择动力系统运行机组组合的计算原理图

（a）方案一；（б）方案二

在选择机组投入或切除的顺序时，是将电力系统火电厂出力增加时燃料消耗的相对增量与切除的（或投入的）机组燃料单位耗量进行比较，孰大孰小，以此作为判别准则的。

现以火电厂投入动力系统为例，讨论该问题的解算，在算例中不计电网内的损失，并假定起动耗量很小，可忽略不计[文献37]。因而可对各计算时段单独进行最优化计算。

假定系统的负荷 $P_t$为已知，并假定系统中的所有机组之间是按最优方式分配负荷。并令切除机组的燃料耗量为 $B_j$，其出力为 $N_j$，则由其余机组承担同样的负荷 $N_j$。如果机组出力与系统负荷相比是相当小的，则系统的相对增量 $b_s$ 不变，那时其余运行机组的燃料耗量的增量为 $\Delta B_s = b_s N_j$。

如果 $B_j > \Delta B_s$，切除机组有利，如果 $B_j < \Delta B_s$，则不利。因此，机组的停机准则是条件 $b_s N_j < B_j$，或者令 $b_{yj} = B_j / N_j$，则：

$$b_s < b_{yj} \tag{1-7}$$

当为下列等式时为有利极限值：

$$b_{yj} = b \tag{1-8}$$

将满足条件(1-8）的出力 $N_0$称为经济出力，而相应的单位燃料耗量用 $b_{y0}$来表示。如果所有运行机组和处于空载备用的机组位于经济工况点 $N_0$ 上，则都能降低单位耗量 $b_{y0}$，这样，按所采用方式投入和切除机组的问题，进行解算就比较简单的了。因此，可以根据系统的相对增量，按准则（1-7）来切除或投入机组。

根据机组起动和停机顺序的准则（1-7）,也可以用迭代渐近法来解算机组组合的选择问题。计算过程如下［文献 3、38］：对负荷 $P_t$ 选出动力系统的相对增量值，并按准则（1-8）切除机组（设切除了 $p$ 机组），计算相当于已知动力系统相对增量的机组总出力 $N_p$，校核动力系统的出力平衡。如果 $N_p = P_t$，问题就解决了；但如果 $N_p > P_t$，则系统相对增量降低；如果 $N_p < P_t$，则系统相对增量增加。反复计算，直到得出的计算精度在一台机组功率的范围内为止。

图 1-1（б）是选择机组组合的迭代渐近法原理图。如要求改变机组组合（方框 4，是），则每次都需要按系统已确

定的工况重复进行所有的计算。为了简化计算过程，可以不考虑方框 4 和方框 1 之间的联系，但在此情况下，只能从原理图上得出近似解。此原理图的缺点，是假定机组投入或切除时，系统的相对增量不变。而小的电力系统是不能满足这个条件的，因为在此情况下，当机组必需切除或投入运行时，这台机组的单机功率与系统功率相比是相当大的，为了在小的电力系统内弥补这个缺点，建议相对增量按机组组合变化前后的平均值来确定，尽管平均误差可能达到 10% 或更大。此外，在利用此准则时，机组切除或投入的顺序可以是不同的。在某些问题中，由于电网内功率损失的影响，按此准则进行计算，不可能得出单值解。

真正能够克服上述困难，是将整个问题按分题的综合体来进行解算，而不同的算法则会有不同的分题组合。

选择水电厂机组组合的问题，主要是用第一种方案（图 1-1 a）来解算，由于改换机组组合是如此频繁，以致使第二种方案（图 1-1 б）没有什么优点了。

如图 1-1 a 所示，原理图用来确定在一般情况下的机组组合和机组工况，其适应性至今还缺乏理论论证。因此，在所有实际情况下，只能根据具体计算得出结论。

可以把合理控制机组组合和机组工况的所有问题分为三类：

1.在给定的电厂电能生产规模和工况下，如何节约能源的问题。在此情况下，对于每一计算时段 $t=1, 2, \cdots\cdots, m$ 而言，在所需出力 $N_t$ 已给定的情况下，求解输入功率 $N_{\text{П}t}$ 最小的问题，即

$$\left.\begin{aligned} N_t &= \text{const} \\ N_{\text{П}t} &= \min \end{aligned}\right\} \qquad (1\text{-}9)$$

这种条件表征水电厂是按强制工况来运行， 例如，在非常枯水年运行。

2．与此相反，在给定的输入功率的情况下， 如何使各水电厂达到最大出力的问题。即

$$\left.\begin{aligned} N_t &= \max \\ N_{IIt} &= \text{const} \end{aligned}\right\} \tag{1-10}$$

这种问题可能发生在来水量有多余的时期，有水灾或有弃水时，水电厂根据水量或其他情况按强制工况运行。

第一类和第二类的问题，可按水电厂设备的厂内最优工况的算法来解算，即应用厂内最优化技术准则和按在给定的出力曲线或流量曲线的条件下进行电厂的运行。解算厂内工况问题的方法将在第二章阐述。

3．按标准燃料耗量最小的准则，电力系统水电厂如何合理利用水能的问题。进行这类问题最优化时，给定水电厂用水量的约束条件为

$$W_i = \sum_{t=1}^{m} Q_{it}\,\Delta\tau_{it} \tag{1-11}$$

第三类问题的解，遇到了方法上和计算上的困难，这是由于这类问题的维数很高和目标函数很复杂。为了克服这些困难，不得不对图 1-1 *a* 所示的原理图作不同方式的简化。多半是这样简化的，即假定水电厂同型机组的特性曲线相同，绘制出电厂的等效特性曲线。同时，假定所有机组组合的条件是等价的，机组之间负荷是均匀分配的，这样就可近似地解算水电厂最优机组数的问题。这种特性曲线还将在系统负荷最优分配时运用，以确定电厂的负荷曲线。在最后的计算阶段中，仅在电厂内部按给定的负荷曲线确定机组的组合。在这里，原则上也可以用迭代渐近法的原理来确定最优工况，

但是由于迭代循环计算太繁杂，通常不采用此种计算法。

## 1-3 动力系统中负荷最优分配

动力系统电厂之间的负荷最优分配的方法和算法是相当成熟的[文献 3、8、27、37、44]。而在本节仅简述一下水电厂所具有的某些特点。

要实现水电厂的最优工况，必须考虑径流量的约束条件。例如，给定日、周、月，甚至年流量（如果所讨论的是具有多年径流调节的水电厂）。在这样的条件下，最优化期必须等于径流调节期，但这样会使问题很复杂。为此，计算分两步完成。第一步，在调节期间，进行水电厂水能利用最优化。其结果是确定水库放水和蓄水的合理运行方式。第二步，是考虑在相应于水库放水和蓄水水量的约束条件下，进行一天内的动力系统工况最优化。一昼夜期间内的工况参数是相互有关的。

拉格朗日待定乘数法广泛地应用来解算负荷分配问题。在此情况下，假定系统的各电厂都提供了等效特性曲线，解算关于机组组合及其利用方式的问题。

大多数水电厂担任负荷曲线的峰荷，同时进行径流的日调节，因而大多数水电站的下游水位变化很大。因此，水电站是在变水头之下运行的，而其动力特性也是各不相同的。考虑到下游是不稳定流，故用双曲线型微分方程来描述下游水位的变化，但这种方程没有解析解。由于解此方程式很复杂，所以，在进行最优化时，不得不假定水头是不变的，来解决水电厂之间在所有可能情况下的负荷最优分配问题。在许多具体情况下，这种假定是正确的，例如高水头水电厂和下游为壅水河段的某些水电厂。

兹述当水头不变，在进行最优化时，电厂之间负荷最优分配［文

献 8、27]。设系统内拥有等效的火电厂和 $j=\alpha,\ \beta,\ \cdots\cdots,\ d$ 等数座水电厂。在进行最优化时，给定各水电厂水量的约束条件为

$$W_j=\sum_{t=1}^{m}Q_{jt}\,\Delta\tau_t \tag{1-12}$$

式中　$t=1,\ 2,\cdots\cdots,k,\cdots\cdots,m$ —— 计算时段的号码；

$Q_{jt}$——在历时为 $\Delta\tau_t$ 的时段 $t$ 内第 $j$ 座水电厂的流量。

按给定的准则，不仅在每个时段 $t$ 内，而且对整个最优化进行期间，都要在水量约束条件下解算工况问题

由有功功率的平衡方程式确定的约束条件为

对 $t=1$

$$P_1=N_{T1}+N_{\alpha 1}+\cdots\cdots+N_{d1}-\Delta P_1$$

对 $t=k$

$$P_k=N_{Tk}+N_{\alpha k}+\cdots\cdots+N_{dk}-\Delta P_k$$

独立变数为水电厂和火电厂的总出力，而拉格朗日函数为

$$\begin{aligned}\phi=&(B_1+B_2+\cdots\cdots+B_m)+\lambda_1P_1+\cdots\cdots+\lambda_kP_k\\&+\cdots\cdots+\lambda_mP_m+\lambda_\alpha W_\alpha+\lambda_\beta W_\beta+\cdots\cdots+\lambda_dW_d\end{aligned} \tag{1-13}$$

对 $N_{Tt},\ N_{\alpha t},\cdots\cdots,N_{dt}$ 取偏导数，并使其为 0，解此方程式就可得出最优化条件：

$$\begin{aligned}&\frac{\dfrac{\partial B_{T1}}{\partial N_{T1}}}{1-\dfrac{\partial(\Delta P_1)}{\partial N_{T1}}}=\cdots\cdots=\frac{\dfrac{\partial B_{Tm}}{\partial N_{Tm}}}{1-\dfrac{\partial(\Delta P_m)}{\partial N_{Tm}}}=\lambda_\alpha\frac{\dfrac{\partial Q_{\alpha 1}}{\partial N_{\alpha 1}}}{1-\dfrac{\partial(\Delta P_1)}{\partial N_{\alpha 1}}}=\cdots\cdots\\&=\lambda_\alpha\frac{\dfrac{\partial Q_{\alpha m}}{\partial N_{\alpha m}}}{1-\dfrac{\partial(\Delta P_m)}{\partial N_{\alpha m}}}=\cdots\cdots=\lambda_d\frac{\dfrac{\partial Q_{dm}}{\partial N_{dm}}}{1-\dfrac{\partial(\Delta P_m)}{\partial N_{dm}}}\end{aligned} \tag{1-14}$$

如简写之，则得下式：

$$\begin{aligned}&\frac{b_1}{1-\sigma_{T1}}=\cdots\cdots=\frac{b_m}{1-\sigma_{Tm}}=\lambda_\alpha\frac{q_{\alpha 1}}{1-\sigma_{\alpha 1}}=\cdots\cdots=\lambda_\alpha\frac{q_{\alpha k}}{1-\sigma_{\alpha k}}\\&=\cdots\cdots=\lambda_\alpha\frac{q_{d1}}{1-\sigma_{d1}}=\cdots\cdots=\lambda_d\frac{q_{dm}}{1-\sigma_{dm}}\end{aligned} \tag{1-15}$$

在此问题中，未知数的数目为：水电厂的出力 $md$，火电厂的出力 $m$，拉格朗日乘数 $d$。而方程式的数目为：由最优化条件得出的 $md$ 个方程式；$m$ 个出力平衡方程式； $d$ 个水量平衡方程式。由此可见，未知数的数目和方程式的数目是相等的。

符号意义： $N_{Tt}$——火电厂出力； $N_{jt}$——水电厂出力；$\Delta P_t$——电网内有功功率损失；$\lambda_a, \cdots\cdots, \alpha_d$——拉格朗日待定乘数；$B_t$——火电厂燃料耗量。此外，还采用下列简化符号：

$b_{Tt}=\frac{\partial B_{Tt}}{\partial N_{Tt}}$——火电厂出力变化时燃料相对增量（火电厂相对增量）；$q_{jt}=\frac{\partial Q_{jt}}{\partial N_{jt}}$——水电厂出力变化时耗水量的相对增量（水电厂相对增量）；$\sigma_{Tt}=\partial(\Delta P_t)/\partial N_{Tt}$、$\sigma_{jt}=\partial(\Delta P_t)/\partial N_{jt}$——分别为火电厂和水电厂的出力变化时，电网有功功率损失的相对增量（电网相对增量）。

假使在进行最优化时，水电厂水头不变，此时如能满足下列条件，则为最优工况：

$$\lambda_\alpha=\mathrm{const},\ \lambda_\beta=\mathrm{const},\ \cdots\cdots \tag{1-16}$$

而在变水头情况下，负荷最优分配的条件如下式［文献 8］：

$$\lambda_{ja}-\Delta\lambda_{ja}-\Delta\lambda_{jab}=\lambda_{jb}-\Delta\lambda_{jb} \tag{1-17}$$

式中　下标 $a$、$b$——分别表示最优化期间的开始和终了；

$\Delta\lambda_{ja}$、$\Delta\lambda_{jb}$——计及下游水位变化时，系数 $\lambda_{ja}$和 $\lambda_{jb}$的变化值；

$\Delta\lambda_{jab}$——计及上游水位变化时，系数 $\lambda_{jab}$ 的变化值。

在这些计算中，水电厂提供了两组特性曲线：流量特性曲线，按此曲线确定是否满足条件（1-12）；相对增量特性曲线，按此曲线进行负荷分配。这些特性曲线取决于机组组合和水电厂厂内负荷分配。绘制水电厂特性曲线的问题，在一般情况下是十分复杂的，只有引用一定的数学方法和应用电子数字计算机才有可能解算。

最后，还要涉及另一特点。水电厂相对增量特性曲线在机组投入点处连续性中断。因此，一个相对增量值可以对应电厂的几个出力。以致使负荷分配的问题成为不确定的了，为了避免不确定性，采用了消除特性曲线连续性中断的专门方法[文献 9]。此时，电厂微分特性曲线的精度问题就非常重要。

只要简要地分析一下负荷最优分配问题，就能得出如下结论：在电力系统中，水力机组组合最优化和负荷分配最优化的问题是相互关联的。

## 1-4 动力系统中水力机组工况最优化效益

由上节所述可见，在一般情况下，动力系统中的水力机组组合是用简化法来选择，而且大都采用两种简化法：第一种是根据水电厂的近似特性曲线进行系统各电厂之间的负荷分配；第二种是根据厂内准则确定水电厂机组组合。兹举下例，对此种简化计算进行定量分析。

新西伯利亚水电厂的例子可以说明机组组合对系统各电厂之间负荷分配的影响。为此，利用水电厂相对增量特性曲线

$$q = q(N, H, A)$$

式中 $q$ ——电厂出力变化时耗水量的相对增量；

$H$ ——水头；

$A$ —— 机组组合向量。

事先研究了下列五种特性曲线的形式：

a）按机组组合中电厂效率较高，来绘制的特性曲线 $q_a = q_a(N, H, A_a)$；

б）按电厂效率较坏的机组组合，来绘制的特性曲线 $q_x = q_x(N, H, A_x)$；

в）按电厂效率为一般的机组组合，来绘制的特性曲线 $q_c = q_c(N, H, A_c)$；

г）相应于较好特性曲线上部包络线的条件特性曲线 $q'_д = q'_д(N, H, A_д)$；

д）相应于较坏特性曲线下部包络线的条件特性曲线 $q'_x = q'_x(N, H, A_x)$。

在其它条件相同的情况下，上述这些特性曲线的差值在 3～5% $q$ 的范围内。特性曲线 б～д 大都是非单调增加的，从而需要对其取平均值，其平均误差为 1～3%。特性曲线的比较指标用百分比来表示，列于表 1-1 中。曾研究了最少机组数 $Z_{min}$、最多机组数 $Z_{max}$、平均机组数 $Z_{cp}$ 的比较指标：

$$\Delta q'' = \frac{q'_д - q_д}{q_д}, \qquad \Delta q' = \frac{q'_x - q_x}{q_x}$$

$$\Delta q''_c = \frac{q_c - q_д}{q_д}, \qquad \Delta q'_c = \frac{q_c - q_x}{q_x}$$

表 1-1　　机组组合对新西伯利亚水电厂相对增量的影响（当水头 $H$ = 12米时，%）

| 比 较 指 标 | $Z_{min}$ | $Z_{max}$ | $Z_{cp}$ |
|---|---|---|---|
| $\Delta q''$ | 2.03 | 0.2 | 1.21 |
| $\Delta q'$ | −1.40 | −1.21 | −1.112 |
| $\Delta q''_c$ | −0.4 | −1.63 | −0.51 |
| $\Delta q'_c$ | 1.83 | 1.32 | 0.102 |

由表 1-1可见，特性曲线（$\Delta q''$，$\Delta q'$）的绘制精度，与机组组合对特性曲线（$\Delta q''_c$，$\Delta q'_c$）的影响，是可以相互比较的。同样从依尔库茨克和布拉茨克的水电厂也得出类似的数据。。由于这些电厂的设备型式、动力和水能参数都是各不相同的，因此，可以对这些结果做出一般性的结论。

在系统负荷最优分配时，如只根据计算中的误差值，得出了必须考虑机组组合的结论，则可认为计算所采用的数量级是完全可用的。此结论的根据是：很多作者的结论认为在相对增量特性曲线中允许有 5％的误差。但是特性曲线的形状是很不一样的，因此只能按燃料超耗量与最小（最优）耗量 $B_0$ 之比进行最终判别。

新西伯利亚系统60种工况的计算结果指出，燃料超耗量的平均值 $\Delta B_1 \doteq 0.8\% B_0$。在所引用的例子中，曾研究了只有一个水电厂，而且在系统平衡中水电比重约为20～30％ 的小系统。而对于大系统，水电厂的电厂特性曲线的误差对最优化结果的影响是很小的 [文献34]。

负荷分配出现的“亏损”，可以在机组组合最优化时得到部分补偿，并且，所节约的燃料为：

$$\Delta B_2 = \Delta N_t(\Delta \eta_t) b_t \Delta \tau_t$$

式中 $\Delta \eta_t$ —— 由于机组最优组合而提高的水电厂效率；

$\Delta N_t$ —— 水电厂的附加出力；

$b_t$ —— 在时段 $\Delta \tau_t$ 内，系统中的燃料单位耗量。

在此例中，$\Delta B_2$ 值平均约为 $0.7\% B_0$。

由此可见，根据原理图 1-1（a）完成的分段计算，表明 $B_0$ 是与亏损有关，其百分数为：

$$\Delta B = \Delta B_1 - \Delta B_2 = 0.8\% - 0.7\% = 0.1\%$$

在个别工况中，超耗量增大到 $0.3\% B_0$。由上述结果，就可作出以上所采用的原理图是合理的结论，但是应在系统最优工况的总的算法中，必须包括水电厂厂内机组最优组合的计算。

最后，还要谈谈在进行最优化时，满足水电厂水量平衡的条件。显然，水量取决于水电厂的出力和水电厂的机组组