

183-
148510

基本館藏

水电站动力設備的選擇

И. А. 瑞热連柯 著

水利出版社

11
/1243

9

目 錄

導 言.....	(1)
§1. 原始資料及其整理.....	(2)
§2. 按标准產品圖表進行水輪机的選擇.....	(6)
§3. 按对数特性圖選擇水輪机 (H. M. 夏波夫的方法)	(9)
a) 总論.....	(9)
б) 工作点分布圖的繪制.....	(11)
в) 水輪机对数特性曲綫的繪制.....	(15)
г) 对数特性曲綫与工作点分布圖的选置.....	(20)
д) 水輪机安裝高程的确定.....	(24)
§4. 按通用特性曲綫選擇水輪机.....	(27)
§5. 選擇水輪發电机.....	(28)
§6. 設備選擇方案的动能經濟分析.....	(29)
§7. 結 論.....	(31)
附錄 水輪机選擇示例	(33)

導 言

選擇主要的動力設備，是水电站設計中一項重要的任務。因為這個問題解決得正確與否，對水电站的發電量及其預想出力的多寡，以及對以後整個運用時期內水能資源利用效果的高低，都有著很大的影響。

水电站設備的整個選擇過程，基本上就是要先擬定出幾個可能的方案（型式，尺寸與機組數），然後從動能經濟上對這些方案進行比較，最後再從其中選定一個最優的方案。

在初步設計階段，設計者的任務還僅限於粗略地確定廠房的尺寸、以及廠房和設備的價格，這時，利用標準產品的圖表就完全夠用了。但在設計的後期（技術設計，有時也包括初步設計）這些粗略的數據即不夠用了，該時必須過渡到方案的分析。

在進行這種分析時，須對每個擬定的方案求出動能的及經濟的特性，並進行比較。

所謂方案的動能特性，系指在所擬定的每個設備方案中水电站在同樣一些水能原始資料下的年發電量。此外，這方面也涉及到在不同水頭情況下的最大與最小的預想出力。

所謂方案的經濟特性，即指設備自身的價格，以及水电站廠房結構物工程的造價。對於混合式的廠房，廠房與溢流壩段在方案比較計算中是合併進行計算的。

有了這兩個特性，即可能求出各個方案的計算開支，將各方案的計算開支相比，即可選出最優的方案。

當然，同時應考慮到某些不能以數字形式表達的、也無法作經濟比較的技术因素。這樣的因素包括設備在運轉與安裝上的便捷性、製造期限、運輸等等問題。

§1. 原始資料及其整理

選擇水电站的主要動力設備時所需的原始資料包括：1) 水电站預定的裝機容量；2) 一年內水頭與出力變化的情況；3) 水电站代表性的日負荷曲綫圖；4) 與日負荷曲綫圖相應的上游及下游的水位變化；5) 水电站廠房布置地點的地質特征。

上述各項資料，除地質特征外，全得自水能計算，設計者的任務在於正確地分析這些資料。

照例，設備選擇時的動能經濟計算是按電能平均年 (среднеэнергетический год) 進行的，但仍按與設計保證率相應的枯水年及保證率為 5~10% 的多水年進行校核。

有代表性的日負荷曲綫就是系統負荷及水电站工作情況產生季節變化的各月的負荷曲綫。

但當進行有關水电站動力設備選擇的詳細計算時，不應該只局限於利用上述的典型原始資料。

按全年 12 個典型日負荷曲綫進行水电站水輪機工作情況的校核也是必要的。此外，應對春汛的時間，亦即對水庫蓄水，水电站工作且有棄水（如果有水可棄時）的時間，進行詳細分析。這時，不能只局限於三個代表年的資料，而必須對整個設計時期內可能遇到的工作狀況進行校核。研究水电站投入運行後最初幾年的工作狀況，是特別突出重要的問題，因為這時水电站的參數有時與設計時所採用的參數差得很遠。

在大多數情況下，決定所裝設的水輪機型式的主要原始參數是水頭和出力。對大部分水电站這兩個參數都不是固定的；因而，仍需說明其變化範圍。

水頭的變化系決定於下列因素：水庫的工作深度及蓄水高度，

下游水位的变化，通过攔污柵及導水管的水头損失。在全年來說水庫的工作深度与蓄水高度，系按調度圖求出，而在一日內的工作深度及蓄水高度(当水庫很小时)則系按日負荷曲綫逐时的計算确定。下游水位的变化直接按冬、夏季下游水位流量关系曲綫查出，在冬季时仍要考慮到下游各种不同冰冻情况。但这样定出的下游水位仍沒有可能考慮因对水电站進行日調節，下游的不穩定流現象(нестационарные процессы нижнего бьефа)。在設备初选階段，这样完全是允許的。但在最后选定时應該結合着下游的不穩定流現象來進行水电站工作狀況的校算。

按上述方式所得到的水电站水头值(不計不穩定流)給出了确定水头波动幅度的可能性。計算的結果可以整理成表格形式，或者整理成曲綫。若整理成曲綫，則名之曰水头特性曲綫，它表示水头与流量間的关系(圖1)。

选水輪机所必需的第二个主要参数就是出力。出力与水头一样也帶有变化的特征。

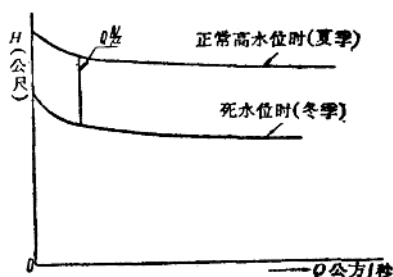


圖1

大多数情况下出力与流量的最小值系由附近的耗用水戶与需用水戶(водопользователи и водопотребители)的要求而定，这些用水戶不允許通过水电站下泄的流量低于限定的数字。属于这类水利綜合利用部門的，首先就是航运与供水。在这种情况下，与最小允許流量相应的負荷就是所設計水电站的最小負荷。

当沒有这种硬性限制时，对具有日調節的水电站，其最小負荷实际上受水輪机無負荷运行所需水量的限制，有时受空蝕条件的限制，并需要在水輪机选择过程中作最后的肯定。

水电站的最大負荷（当沒有重复容量时）系按既滿足冬季日負荷尖峯需要，同时仍保證必要的备用容量的要求來决定的。

为确定水电站之最大引用流量，需預先确定所謂保證出力的計算水头（расчетный по мощности напор），即按電力系統容量的平衡的要求，水电站能保證發出最大值的替换容量及备用容量的最小水头。这个水头平常出現在冬季各月，其时系統之負荷最大，由于水庫部分地放空，上游水位下降，而下游水位上升（見冬季之水位流量关系曲綫）。

对于装机容量中有重复容量的水电站（属于这类水电站的，首先是僅具有日調節或有限制的季調節的水电站），保證出力的計算水头系根据动能經濟計算确定，动能經濟計算也确定重复容量（季節性容量）的大小与利用小时数。如此計算之后即可得到与裝設容量（重复容量）相应的流量与水头数值。这个水头，在該情況下，也將是保證出力的計算水头。在保證出力的計算水头下与水电站最大出力对应的流量，就是水电站最大的泄水能力，所选定的水輪机应能保證具有这样大的泄水能力。

由于水庫工作深度很大，或由于經過堤壩泄洪时下游水位猛然的抬高所引起的水电站水头低于計算水头的下降，將使預想出力也相应地减少。允許出力减少的特征，應該在水輪机選擇的过程中加以肯定并应与系統負荷平衡相符合。

这样，根据上述方法即可定出水电站水头、出力及流量的極限值。

除去确定各極限参数外，研究水电站各种中間的工作状态也是必要的，即水輪机在不同的水头与流量（出力）組合情况下的工作状态。

为此，如本節开头所說的，要進行代表性的日負荷曲綫的研究。

对于水庫工作深度不大的水电站（ $H_{cp} < \frac{1}{4}H$ ）可只考慮3~6个代表性的日負荷曲綫，即假定在其余9~6个月的每个月內，水

电站將按已考慮过的 3~6 个日負荷曲綫之一進行工作。

对于一年內水头变化范围很大且一年內工作状态常变的水电站，应该作出全年 12 个月的代表日負荷曲綫。

水电站負荷曲綫的整理系統按以下方式進行。

对于每个日負荷曲綫，一开始即确定两个出力数值：最大的与最小的。并且分別找出其持續小时数。对于一日內水电站工作的其余時間，可求出平均負荷 $\bar{N}$ (圖 2)：

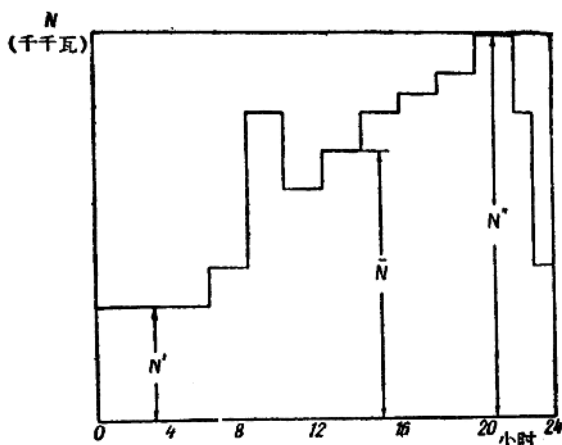


圖 2

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=0}^{24} N_i t_i - (N'' T_{N''} + N' T_{N'})}{24 - (T_{N''} + T_{N'})}$$

式中 $T_{N''}$ ——最大負荷 N'' 的持續時間；

$T_{N'}$ ——最小負荷 N' 的持續時間。

当水电站的日負荷变化很激烈时，平均負荷可以分成几个时段去求，如此，可得到对应于較短时段的数个平均負荷。

將出力換算成流量时，对于水头变化不大的水电站，可認為效

率不变，但对于水头变化很大的水电站，則需针对水庫工作深度的每个中間階段采用一个不变的效率。

如此整理之后，即得到参数为 N 、 H 、 Q 、 T 的一系列点子，可將这些点子列入表內，或画在表示水头变化的曲綫圖中。

此外在选择水輪机时仍应确定加权平均水头，即持續時間最長的水头，加权平均水头按下公式求得：
$$H_{cp} = \frac{\sum H_i t_i N_i}{\sum t_i N_i},$$

式中 t_i ——作用于水电站的各个水头的持續時間。

选择水輪机时应以讓 H_{cp} 之区域与水輪机的最大效率区相适应为原則。这样可保証水輪机在最多的時間內以可能高的效率工作。

选择水輪机时对水輪机自身所需要的原始資料就是制造厂供給的主通用特性曲綫，該曲綫系由相应型号的动輪模型試驗数据整理而得出的結果。

根据不同的水輪机选择方法，这些通用特性曲綫仍要進一步加工，关于这一点在下面还要詳細介紹。

§2. 按标准產品圖表進行水輪机的选择

为便于先行选择水輪机的系列及型式，列寧格勒大林机器制造（ЛМЗ）与全苏水力机械制造科学研究所（ВИГМ）彙編了一个包括所有正常型式与結構水輪机使用范围的总圖表（圖3）。

每个型式与結構水輪机的使用范围都画在这張总圖表上，总圖表的坐标軸各为水头与出力的对数值。每种水輪机使用范围的出力界限系由所采用的最大及最小动輪直徑來确定。每种水輪机適用的水头范围，系根据普通实用上允許的、經濟上合理的吸出高度大致地确定的。該圖表右下部空白的区域是冲击式水輪机的（水斗式）使用范围。

总圖表之外仍有分圖表，分圖表用以确定个别型式水輪机的直

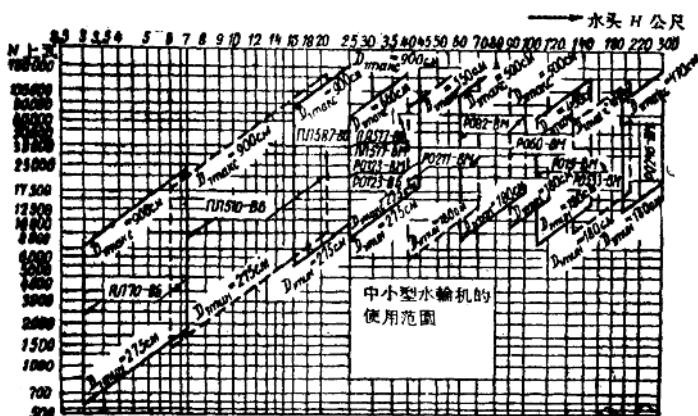


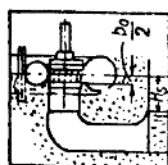
圖 3

徑及其轉數。分圖表的坐标与总圖表一样。分圖表上每条平行四边形成表示每一种标准动輪直径的水輪機的使用範圍。該直径 D_i 的公分數注在每条平行四边形之右上端，平行四边形之上、下边綫系表示該直径的水輪機出力大致的界限。每条平行四边形又由垂直短綫分成几格，每格內并注有与 50 周波發电机同期轉數相应的水輪機最优的轉數值（圖 4）。

在每个分圖表旁有一个計算最大允許的吸出高度 h_s 的圖。由这个圖可按水头查出 h_s ， h_s 表示在海平面处标准大气压力下的吸出高度。对于轉叶式及旋槳式水輪機 h_s 圖內有兩条綫。此时查 h_s 值时，要看水輪機出力的点子落在分圖表上平行四边形的內的位置而定，若点子落在上边綫上，則 h_s 采用 h_s 圖內上边一条綫，若落在下边綫上則 h_s 采用 h_s 圖內下边一条綫，若落在平行四边形的上、下边綫之間，則需定出該点距上下边綫距离之比值，并按相同的比值在 h_s 圖的上、下二綫之間定出 h_s 值。

为求得允許的最大吸出高度 H_s ，尙应对 h_s 加上两个修正数，其中一个是为計入拔海高程影响的修正数，另一个是为了求得水輪机導水裝置二等分平面与下游水位之高差而加上的相应的修正数。后一个修正数可自相应型式水輪机轉輪的尺寸示意图（圖 5）上查得。

在使用水輪机标准產品圖表时，应注意，对于某个水头 H ，不可把水輪机的出力定得大于圖表上所示的数值，但可定得



此处： $H_s = h_s - \frac{v}{g} + \frac{b_2}{2}$
 n_s - 查自 h_s 圖
 $b_2 = 0,2 D_1$
 v - 水輪机的海拔高程(公尺)

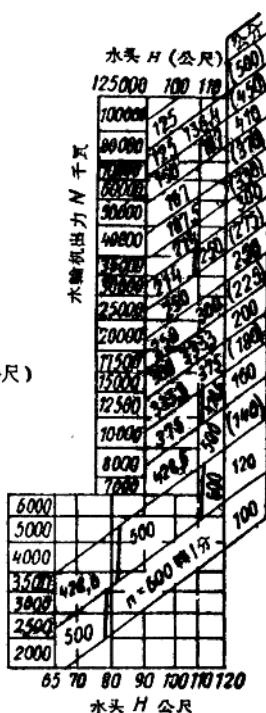
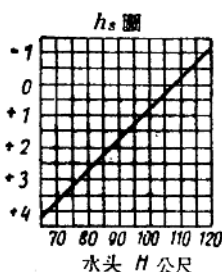


圖 4

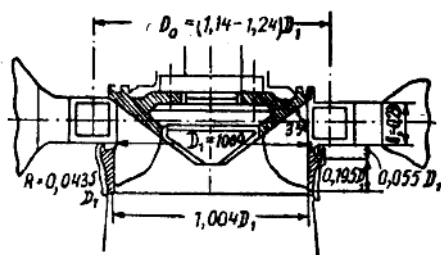


圖 5

小些，一直到小于尺寸小一級的水輪机的最大出力。

若对于給定的水头及出力，在总圖表上有数种型式結構的水輪机可选时，則应根据各方案的水輪机轉輪直徑、轉数、吸出高程進行比較，以便确定到底采用哪种型式結構的水輪机比較合理；各方案中的轉輪直徑、轉数、吸出高程等系自各相应的分圖表上查得。

但应当再一次地指出，按标准產品圖表進行水輪机的选择，僅用在設計的草算階段，該时关于水輪机型式結構以及机組数选择的效能經濟論証尚未進行。

§3. 按对数特性圖选择水輪机 (H.M. 夏波夫的方法)

a) 总 論

1932年氏根巴哈所建議的，后經夏波夫教授补充与發展的对数特性圖法是一种極其便利、又一目了然的方法。对数特性圖法使得我們有可能对許多方案進行分析与比較。对数特性圖法的基本原則如下。

对数坐标系有这样一個特点，即將画在其上的任何曲綫放大或縮小时（如將曲綫上各点之橫坐标值放大 β 倍，縱坐标放大 α 倍），該曲綫的形狀与大小均不改变，而僅改变了它在对数坐标格紙上的位置（如在前述变化中，曲綫僅沿橫坐标軸綫移动 $\log \beta$ ，沿縱坐标軸移动 $\log \alpha$ 的距离）。

上述特点可証明如下。

若从对数坐标上画的任意圖形上取任意兩点，其橫坐标为 x_1 与 x_2 ，縱坐标为 y_1 与 y_2 ，則該兩点間直綫的長度为：

$$\sqrt{(\log x_2 - \log x_1)^2 + (\log y_2 - \log y_1)^2}.$$

当二点之橫坐标的数值放大或縮小 a 倍，縱坐标值改变 b 倍，該二点間的距离变为：

$$\begin{aligned}
& \sqrt{(\log ax_2 - \log ax_1)^2 + (\log by_2 - \log by_1)^2} \\
&= \sqrt{(\log a + \log x_2 - \log a - \log x_1)^2 + (\log b + \log y_2 - \log b - \log y_1)^2} \\
&= \sqrt{(\log x_2 - \log x_1)^2 + (\log y_2 - \log y_1)^2}.
\end{aligned}$$

由上式可見兩點間的距离仍保持不变。該直綫对坐标軸的傾斜角也保持不变；因此，可以看出，圖形的形狀与大小均未改变，只是移动到坐标紙上的另一个位置上去了。

但对于画在普通坐标上的圖形，当其縱横坐标值按不同的比例放大或縮小时，則圖形不僅改变了位置，而且其形狀与大小也变更了，这一点可从圖 6 的右圖上看出。

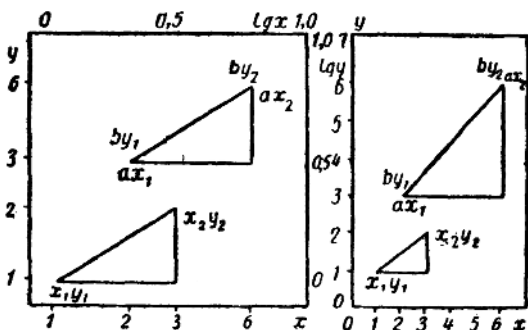


圖 6

对数坐标的这个特性用于选择水輪机时，可以省去將水輪机通用特性曲綫变为以 H 与 Q 作坐标軸时的大量換算工作。在進行各方案的动能經濟比較时，对于不同的直径与轉数的組合，只需將水輪机的特性曲綫在以 $\log Q$ 与 $\log H$ 为坐标的紙上变动其位置，而不用進行上述之換算。但利用对数特性曲綫法选择水輪机时，需要作下列的准备工作：即繪制將水电站的工作点分布圖及將拟用的水輪机的特性曲綫改制成对数坐标。

以下將逐步叙述按对数特性圖法选择水輪机的方法。

6) 工作点分布圖的繪制

水电站的工作点分布圖(Режимное поле)就是以 $\log Q$ 与 $\log H$ 为坐标的格紙,其上并繪有水輪机的各种标准轉輪直徑 D_1 ,及同期轉數 n 的等值綫,而且注有表示所設計的水电站可能的工作狀況的工作点。

本書中所附的对数格紙系取自 A. A. 莫洛佐夫所編的“水輪机設備”手冊,該格紙系以 $\log Q$ 与 $\log H$ 为坐标軸,并繪有 D_1 与 n 的等值綫。这样的格紙每个設計者自己也可以画得出。为此可以用合適的对数比例尺,沿縱坐标上注明水头值,沿橫坐标注明流量。最方便的比例尺就是普通計算尺(長度为 25 公分)中滑尺的上側(即 B 綫—譯注)刻度。所画格紙的范围应与所設計的水电站水头与流量变化范围相適應。

然后在該格紙上应繪出 D_1 , n 的等值綫。各等值綫的位置可按前述对数坐标系的特性定出。

再將水輪机的通用特性曲綫改画在以 $\log Q$ 与 $\log H$ 为坐标的对数格紙上,改画时可选定任意的 D_1 与 n 值。

如此,通用特性曲綫上每一个点即相应于一种 H 与 Q 的組合。

今將 D_1 与 n 值变为 D_{1x} 与 n_x 。根据相似律的公式將水头与流量以下列公式表示出:

$$H_x = H \left(\frac{n_x D_{1x}}{n D_1} \right)^2 \text{ 及 } Q_x = Q \left(\frac{D_{1x}}{D_1} \right)^3 \left(\frac{n_x}{n} \right),$$

若令

$$\nu = \frac{n_x}{n} \text{ 及 } \delta = \frac{D_{1x}}{D_1}$$

則得

$$H_x = H \nu^3 \delta^3 \quad (1)$$

及

$$Q_x = Q \nu \delta^3 \quad (2)$$

系数 γ 与 δ 是 H 与 Q 的坐标比例尺变换系数 (圖 7)。

但因为我們采用的是对数坐标系, 为了闡明由 D_1 与 n 換以 D_{1x} 与 n_x 后所引起的变化, 需对公式 (1) 及 (2) 取对数:

$$\log H_x = \log H + 2 \log \nu + 2 \log \delta$$

$$\log Q_x = \log Q + \log \nu + 3 \log \delta$$

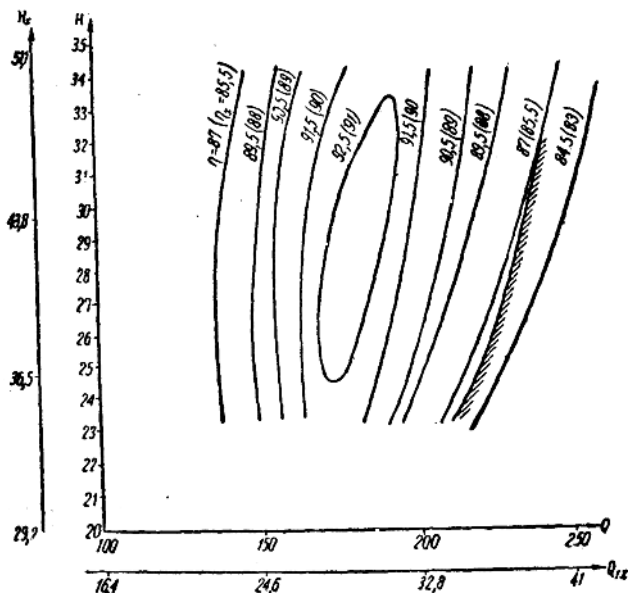


圖 7

由此可見, D_1 与 n 变换的結果是使特性曲线上各点產生位移, 即平行縱坐标移动 $2 \log \gamma + 2 \log \delta$ 平行橫坐标移动 $\log \gamma + 3 \log \delta$ 。这是与对数坐标系的基本特性相符合的。

現若取轉数 n 不变, 則 $\gamma = 1$, 如此顯然可見此时特性曲綫各点將在 “ $\log Q, \log H$ ” 坐标上沿着一條斜綫移动, 該斜綫与橫坐标的夾角为 α , α 角的正切为:

$$\tan \alpha = \frac{2 \log \delta}{3 \log \delta} = \frac{2}{3}.$$

由此可見，在 $\log Q$, $\log H$ 格紙上轉數的等值綫是一系列直綫，其對 Q 坐標軸的斜率為 $\frac{2}{3}$ (圖 8-a)。又若假定直徑不變，則 $D=\text{常數}$ 的等值綫是一條傾斜角為 β 的直綫 (圖 8-6)。

$$\tan \beta = \frac{2 \log \nu}{\log \nu} = 2.$$

載在前述水輪機手冊中的對數格紙是這樣繪制出來的，即 $D_1 = 2$ 公尺及 $n = 250$ 轉/分二等值綫的交點通過以 $Q = 10$ 秒公方和 $H = 40$ 公尺為坐標值的點。這樣組合的格紙在使用時，對於各種不同比速的水輪機都是最方便的 (詳細解釋見下)。

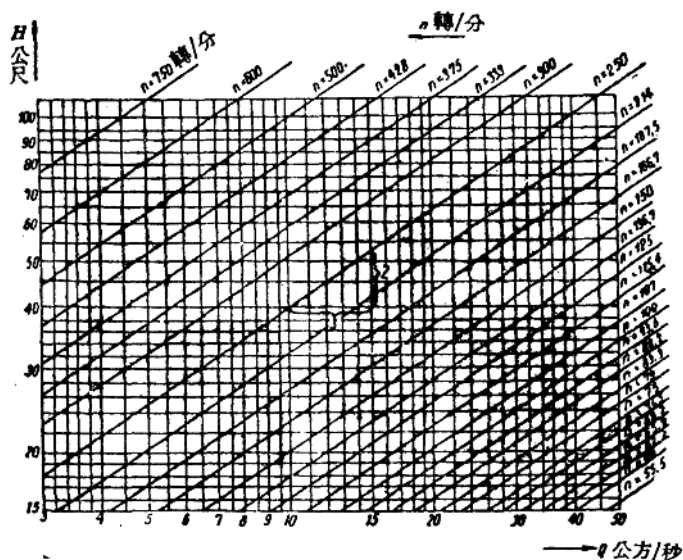


圖 8-a

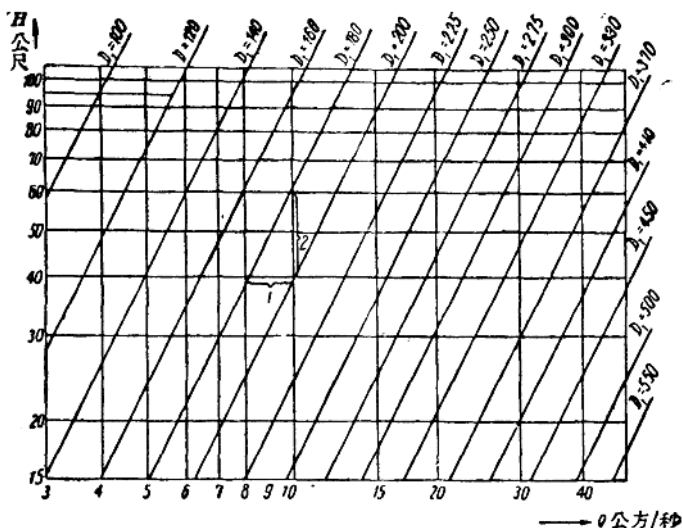


圖 8-6

但原則上 D_i 与 n 等值綫構成的網格可以在对数坐标紙上任意移动，只要保持其前述的傾斜角即可。为了在所制就的格紙上画出工作点分布圖，仍需以水电站各个具体的工作状态标注出水电站的工作范围，为此則需利用整理出來的水能計算成果。

首先要在格紙上画出对应于 $\nabla_{\text{HПГ}}$ (正常高水位) 与 $\nabla_{\text{ГМО}}$ (死水位) 的水头特性曲綫 $H=f(Q)$ ，这种曲綫能够很明顯地示出所設計的水电站的水头变化范围。

此外尚要画出与水电站各种工作条件相对应的工作点。其中每一个工作点都具有 N_i 、 H_i 、 Q_i 、 T 等参变数值 (見 § 1)。

为便于將工作点画在格紙上，可先画出下述的輔助綫：

1) 除前述的兩条水头特性曲綫外，在格紙上再画一系列的水头特性曲綫，这些曲綫分别对应于各月上游的平均水位：

2) 对于計算中所采用的 η 值, 画 N 的等值綫。 N 的等值綫是一系列与橫坐标軸成 135° 的直綫, 这一点可由將公式 $N = KQH$ 取对数后看出,

$$\log N = \log K + \log Q + \log H.$$

当 $N = \text{常数}$, $K = \text{常数}$ 时, 上式可寫作

$$\log Q + \log H = \text{常数},$$

亦即說明等出力綫是一系列直綫, 其与 Q 坐标軸的夾角为 135° 。 N 的等值綫画好后, 任意工作点 N 、 H 即可直接画在格紙上, 用不着再換算成 Q 、 H (該換算是以試算法進行的)。

各工作点所表示的工作时数之总和應該等于水电站全年的工作小时数。这样, 算出的發電量將代表水电站的年發電量。

圖 9 就是一个画有工作点的工作点分布圖。

в) 水輪机对数特性曲綫的繪制

在本節第 a 段里曾說过, 当利用对数法选择水輪机时, 除要画工作点分布圖外, 仍需要有画在对数坐标上的水輪机通用特性曲綫。与 A. A. 莫洛佐夫所編的“水輪机設備”手冊一样, 本書后面也列出了已改制好的对数特性曲綫。但苏联水輪机制造業的發展速度总走在任何手冊出版之前, 因此, 所述已改制成的对数特性曲綫不能完整地包括全部已有的和已設計的轉輪型号。

因此, 为了在选择水輪机时能利用水輪机制造業方面最新的成就, 每个設計者應該掌握將水輪机通用特性曲綫改制成对数特性曲綫的方法。

將水輪机通用特性曲綫改制成以 $\log Q$ 、 $\log H$ 为坐标的对数特性曲綫时, 所用的比例尺應該与画工作点分布圖所用的完全一样。改制的方法可以采用將通用特性曲綫上 η 的等值綫上各点的 Q_i 、 η_i 坐标值, 以任意假定的 D_i 与 n 值組合, 換算到 $\log H$ 、 $\log H$ 的坐标上。但这种方法非常麻煩而且需要很多時間。

下面介紹曲綫改制的圖解法。