

水 力 發 电 厂

压力水管的水力計算

苏联 B. H. 波波夫著

电 力 工 業 出 版 社

水 力 發 電 厂

压力水管的水力計算

苏联 B. H. 波波夫著

申 震 亞譯

电 力 工 業 出 版 社

內 容 提 要

本書根據紊流理論的半經驗公式，選取水力發電廠輸水管的水力計算，並對應用於輸水管計算的近代紊流理論的成果作了總結。

本書供從事水工建築物的設計與施工的工程師及相應專業的科學工作者之用。

В. Н. ПОПОВ

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ НАПОРНЫХ
ТРУБОПРОВОДОВ ГИДРОСТАНЦИЙ

根據蘇聯國立動力出版社1950年列寧格勒版翻譯

水力發電廠壓力水管的水力計算

申 震 亞 譯

375851

電力工業出版社出版 (北京府右街26號)
北京市書刊出版業營業登記證出字第092號

北京市印刷一廠排印 新華書店發行

編輯：司志民 校對：凌華燁

850×1092 $\frac{1}{32}$ 開本 * 3 $\frac{1}{2}$ 印張 * 85千字

1956年7月北京第1版

1956年7月北京第1次印刷(1—5,100冊)

定價(第10類)0.90元

目 錄

緒 言	3
第一章 管中液体等速流的物理特性	9
第二章 紊流理論	11
§ 1 理論的基本假定	14
§ 2 非完全紊流时管內的水力阻力	17
§ 3 完全紊流时管中的水力阻力	21
§ 4 非完全紊流与完全紊流間水力阻力的过渡区域	22
第三章 实验的研究和材料	25
§ 5 各种实验材料整理的結果	25
§ 6 人工均匀糙率管子的实验	26
§ 7 关于大直径的鑄接管, 焊接管和混凝土管的实验	29
§ 8 糙率不均匀並具有脈动水流的工业用管的实验	30
§ 9 A. П. 齐日达教授的实验	35
§ 10 Г.А. 莫林工程师的实验 (ВТИ)	41
§ 11 根据 P.C. 伏列途的材料所作的实验	44
§ 12 关于半理論公式的結論和对它們的研究	46
第四章 經驗公式	49
§ 13 $\lambda = \lambda_0 + \frac{\beta}{\text{Re}^x}$ 形式的公式	52
§ 14 指数公式	53
§ 15 $\nu = k R P I^q$ 形式的公式	56
§ 16 多項式公式	64
§ 17 关于經驗公式的評論的結論	66
第五章 B. H. 耶甫列亦諾夫公式和 B. H. 耶甫列亦諾夫 —B. H. 波波夫公式	67

§ 18	管中液体的螺旋流	67
§ 19	B.H. 耶甫列亦諾夫教授的公式	72
§ 20	B.H. 波波夫關於 B.H. 耶甫列亦諾夫教授的理論和公式 的补充	75
第六章	根据半經驗公式輸水管水力計算的圖解分析法	82
§ 21	所用的公式及圖表系統	82
§ 22	通用圖表	84
§ 23	Re 和 λ 圖表	86
§ 24	水头損失的諾謨圖	88
第七章	用於水电厂輸水管計算的諾謨圖	96
§ 25	焊接鋼管	97
§ 26	鑄接鋼管	99
§ 27	混凝土管, 钢筋混凝土管 and 水泥管	102
§ 28	石砌管	104
§ 29	木管	104
第八章	旧輸水管的計算	105
§ 30	旧輸水管的一般性質	105
§ 31	管中的沉淀对管的过水能力的影响	106
§ 32	管中沉淀对水力坡度的影响	107
§ 33	旧管中所观察的水头損失	109
§ 34	旧管的計算方法	111
中俄名詞对照表		113
人名表		114

緒 言

關於解決管子的水力計算問題，在科學、技術與工業發展的不同階段，以不同的方法進行。在遠古及古代，水力學問題實際上是以手工業的方法和知識來解決的。中世紀一般說來沒有促進科學與技術的發展。僅僅在文藝復興時代科學觀念才開始提高，水流運動的複雜現象才引起了學者的注意。

在十七世紀，牛頓建立了流動液層的規律性：

$$\tau = \mu \frac{du}{dy},$$

式中 τ ——由於液體的運動所產生的阻力切應力；

μ ——比例係數，稱作粘滯係數；

$\frac{du}{dy}$ ——流速梯度。

十八世紀的特征是工業的蓬勃發展，而伴隨着它也帶來了科學與技術的繁榮。所謂技術水力學的水力學問題，向兩個方向發展——理論的方向和實用的方向。在 1775 年，哲瑟提出了一個任意河道中的液體運動方程式為：

$$v = C \sqrt{RI},$$

式中 v ——平均流速；

$R = \frac{\omega}{p}$ ——水力半徑；

I ——水力坡度；

C ——比例係數。

在十九世紀，對係數 C 作了詳細的研究。在液體運動的性質中已經區分了層流和紊流。建立了 C 隨液體的性質，溫度，流

态，和液体在其中运动的河床的种类而变的关系式。在1883年，雷諾决定了液体等速流的相似准則，其形式为純数 $Re = \frac{vd}{\nu}$ 。

理論的与实验的研究力求深入水流的内部，深入它的結構，以便根据这些來确定各种条件下液体运动的規律。出現了很多理論的以及实验的公式和建議。產生了新的科学——流体力学，它愈來愈深入液体运动的研究（在很多問題上与气体力学結合在一起）。

二十世紀初，積累了如此大量的理論与实验的材料，已經需要把它們系統化並除去其中陈旧的材料。同时也需要對於液体运动这一科学領域过去的各个階段作出总结。

П. Ф. 高尔巴切夫的報告——“水力学計算表”(1933)和“液体运动的速度公式”(1936)就屬於这些著作。

П. Ф. 高尔巴切夫教授研究了水流运动与下列因素的关系：1)内摩擦力，2)河床的摩擦，3)水流横断面上流速的分佈。根据这些情况，他对 C 值提供了这样的[理論的]式子，称之为范式(гидроид)：

$$C = \frac{X}{\sqrt{1 + \frac{Y}{R} + \frac{Z}{\sqrt{R}}}}$$

和

$$C = \frac{a}{\sqrt{e + \frac{b}{t + \frac{\nu}{R}} \cdot k}}$$

式中 X 和 a 与液体的物理力学性質有关； Y ， Z 和 b ——与管壁性質及断面流速分佈有关； k 表示坡度的影响； e 和 t ——純数； R ——水力半徑。

如所週知，系数 C 也可用 λ 表示， λ 为水力阻力系数($\lambda = 4f$ ，

其中 f ——液体与管壁或河床間的摩擦系数):

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} \text{ 或 } \lambda = \frac{8g}{C^2}.$$

f 以及 λ 和 C 的大小表示着切应力 τ 的数值, 某些学者將后者規定为液体黏滯性所產生的应力及其紊流程度的总和^①, 即

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} + \rho l^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2,$$

式中 ρ ——密度; l ——紊流混合路徑的長度。

對於 λ , M.A. 維里克諾夫^② 引出下列公式:

$$\lambda = \alpha + \frac{\beta}{Re},$$

式中 α ——决定水流的紊流程度的一項, 而 $\frac{\beta}{Re}$ 表示粘滯力佔优势的水流运动条件。

由此, 可寫 C 的公式为:

$$C = \frac{\sqrt{8g}}{\sqrt{\alpha + \frac{\beta}{Re}}}.$$

由於原子理論和流体物理学的發展, П.Ф. 高尔巴切夫教授在 1936 年指出了根据对以下問題的研究來建立水力学計算公式的可能性的思想, 这些問題是: 运动着的液体的分子的性質及其与固体壁間的相互关系。П.Ф. 高尔巴切夫教授正式的得到了一种他早先發表了的經驗公式的自己的形式, 但是他所作的假設在公式的正确性上引起了很大的疑問, 因而 П.Ф. 高尔巴切夫教授的这一公式的結論沒有得到進一步的發展。

指出流体物理学領域內的一些著作是必要的, 这些著作力求揭露在液体內發生的現象的本質, 例如, 3. H. 富蘭克尔教授的

① Б.А. 巴哈米捷也夫, 紊流力学, 國立建筑出版社, 1939年。

② 河床水流动力学, 水文气象出版社, 1946年, 170頁。

“液体的运动理論”。但是这些成果还不能实际应用于輸水管的計算。

很多研究者認為水流的紊流結構具有很大的意义。考慮水流結構的例子有：我國的B.H.耶甫列亦諾夫教授關於水流的螺旋結構的理論。根据B.H.耶甫列亦諾夫教授的理論，水力阻力系数 λ 为兩部分所組成，即 $\lambda = \lambda' + \lambda''$ 。

第一項 $\lambda' = \frac{A}{Re_k}$ 与 $\frac{\beta}{Re}$ 相似，而第二項 λ'' 是流速分佈(在 λ'' 中引入了卡尔諾里斯数)，相对光滑度，管壁的適宜流动性以及由於在管壁处形成的渦旋而產生的能量损失的函数。B.H.耶甫列亦諾夫教授的公式，加上作者所作的补充之后是可以应用于各种水流及各种不同的运动条件的。

B.H.耶甫列亦諾夫—B.H.波波夫公式——該公式对所有区域都是一样的——以下僅用于均匀的同一种类的糙率的管子(以水泥抹面的管子)，因为还没有關於其他材料管子的实验材料。

在近几年(1945—1949)的著作^①中，水管的水力計算，在很多情形下，即当管壁具有均匀的顆粒或与它相接近的糙率时，都是以半理論公式作为基礎的。这些公式包含有雷诺数，相对等价糙率和純数的实验系数。

在本書中介绍了水电厂压力水管在紊流状态下的水力計算方法，这些方法是屬於形式为 $\lambda = f\left(\frac{r}{k}, Re\right)$ 的半理論公式的系統

① A.A.薩巴涅也夫，關於粗糙系数的实验公式的应用范围，ВНИИГ 通报，卷39, 1947。

A.A.薩巴涅也夫，粗糙系数的通用公式，ВНИИГ 通报，卷39, 1947。

B.H.耶甫列亦諾夫，水力学，河出版社，1947。

B.Г.盧巴也夫教授：輸水管網及渠道網的水力計算圖表，公用事業出版社，Москва, 1948。

Г.А.莫林，鋼管的水力阻力，ВТИ通报，1949。

П.С.伏列途，輸水管的水力計算，國家技術出版社，1949。

的，这种公式具有某些理論基礎並已为实验所証实。

为了决定这些公式中的参数值，只要可能，都将利用直接的实验材料，而对于没有这些实验材料的輸水管，則在其正确性的範圍內和与水动力学相似理論相符合的範圍內利用經驗公式。

紊流时液体运动的阻力在三个基本規律性中被研究着：光滑管区域，过渡区域及粗糙管区域。

过渡区域为一連結光滑管区域与粗糙管区域的光滑的曲綫。

由於半理論公式的数学表示式的复雜性，所以为了实用，提供了一个建立相应諾謨圖的圖解分析法。

在选择水管的尺寸和管壁材料时，除了以前發表的著作外，也利用了近代的著作^①。

對於水电厂压力輸水管的水力計算，被研究的管子是最常应用的管子——鉚接鋼管，焊接鋼管，混凝土管，鋼筋混凝土管，磚管，在岩石中鑿成的管道和木管。

为了滿足不僅是小的，同时也包括巨型的水电厂的需要，輸水管直徑採用 0.5 到 10.0 公尺的範圍。

對於旧輸水管的計算，在自來水管的實踐中，各个作者所作的建議基本上都是根据相对糙率尺寸的变化。但是管子陈旧条件的多样性使得所有这些建議都与局部的，特殊的条件有关。这种情况 A.H. 布德尼柯夫在他的研究中特別清楚的指出了。在那里，他提議在計算旧管以前，对它進行技術的和水力学的实验以确定等价糙率。

大直徑的电厂輸水管中的污垢对水力阻力的影响較小並可以用这样的方法計算，这种方法是用于旧管分开工作的状态的。根据这种方法，需要合理的使用輸水管，即按时的清洗管子，这对于大直徑的輸水管來說是沒有困难的。

① Ф.Ф.古宾，水电厂圖解，國立动力出版社，1946。

A.A.莫洛佐夫，水能利用，國立动力出版社，1948。

在所採用的水電廠壓力水管的水力計算的解法的基礎上，後面將對近代的關於選擇公式的參數值的理論觀點和實驗材料作些非常簡要的基本敘述。

用於水力計算的諸謨圖給出了關於某種類型的管子的例子。用於所有類型的管子 and 它們的管壁的不同情況的諸謨圖，可以按其需要，利用本書中所建議的方法作成。

第一章 管中液体等速流的物理特性

近代的研究和实验认为管中液体运动的形式是这样的：当液体速度很小或当管径很小时，或者说当相似准则 $Re = \frac{vD}{\nu}$ 中的雷诺数 Re 很小时，液体质点的运动将与管壁平行，形成与管壁成同心圆的液层。这样的运动称为平行流，或叫层流。

运动着的液层之间或液层与管壁之间存在着摩擦力。与管轴平行的液体摩擦切应力在水管横断面上按直线比例分布，管壁处切应力最大，而在管轴处为零。

水管横断面上的流速是这样分布的：水管中心的速度最大而在管壁处为零。断面中流速分布曲线成抛物线形。每断面的平均流速 v_{cp} 与其最大流速 v_{max} 之间的关系为： $v_{max} = 2v_{cp}$ 。

管中液体的平行流的发生是由于粘滞力的影响。当雷诺数 $Re \leq Re_k = 2000$ 时，不论水流在管子进口处受到如何猛烈的扰动，即不论是不是紊流，但流经进口段相当距离之后，在促使水流稳定的粘滞力的影响下，终是要变为平行的。假若在水管进口处液体足够安定，并且液体进入水管时并不与进口断面的边缘脱离，则在 $Re > 2000$ 时液体也还可能保持着平行流的。在雷诺(1883)的实验中，预先将水盛入箱中使得到安定，并且将管子的进口作成光滑的漏斗形；在这种条件下，直至 $Re \leq Re'_k = 13\,000$ 时，平行流才遭破坏而过渡到紊流。

后来学者们的校核实验证明：低临界值 $Re = 2000$ 是一个分界的准则，低于该数值时水管中只能是稳定的平行流；但同时又指出：如果特别注意使水管进口前和进口处的水流安定，则其高

臨界值 Re' 可增為 25 000 或更大些，當達高臨界值時，水管中的液流將一定是穩定的紊流了。

這樣，只有低臨界值 $Re_k = 2000$ 是一個天然的準則；在 $Re \leq Re_k$ 時，管中液體只可能是穩定的層流。

由於上臨界值 Re_k' 的不確定性，所以不能準確地用數字指出這樣的一個雷諾數，超出該值時，慣性力的擾動作用已經大於粘滯力的穩定作用因而只可能是穩定的等速紊流。

水流進入所觀察的管段的進口狀況對於層流轉入紊流的自然過渡（在 $Re = Re_k$ 時）具有重大影響。進口段愈短，水流愈不安定，則這種過渡發生得愈早，愈劇烈而突然。進口水流很安定時，則層流向紊流過渡就不是突然的而將是很平穩的。顯然，在任何一種情況下，通常的管壁糙率對過渡的性質沒有重大的影響，因為在層流中以及層流續向紊流的過渡中，水頭損失完全決定於 Re 數而與相對糙率無關。

B.H. 耶甫列亦諾夫教授根據臨界雷諾數的性質引出了這樣的見解：隨著管中液流速度的增加，水管斷面上的流速分佈圖也跟着改變。在層流中，流速分佈曲綫為拋物綫形。管壁處的切應力 τ 系由關係式 $\tau = \mu \frac{du}{dy}$ 所決定。當在管壁處形成渦漩且使其離開管

壁進向流核時的臨界值 τ_{kp} 相應於管壁處的某種流速 $u_* = v \frac{\sqrt{\lambda}}{\sqrt{8}}$ 。

此時層流遭到破壞，流速分佈的拋物綫規律發生變化，水流開始變為紊流。

為了解釋由層流突變為紊流的雷諾數範圍，B.H. 耶甫列亦諾夫教授轉而考查公式 $v = C \sqrt{RI}$ 中係數 C 研究的歷史。

最初，當人們用很小的流量進行實驗時，水流形式與層流近似，所得到的 C 值與過渡到紊流時的一點接近。這時認為 C 的平均值是 50。

根据公式 $\lambda = \frac{8g}{C^2}$ 当 $C=50$ 时, $\lambda=0.032$, 代入公式 $\lambda = \frac{64}{Re}$ 中得雷諾数 $Re=2000$, 該值是符合於大多数研究者的实验結果一低臨界雷諾数 Re_{κ} 的。

對於雷諾数高臨界值, B.H. 耶甫列亦諾夫教授对管徑由 100 厘米到 500 厘米, 糙率 k 由 0.5—1.0 厘米的水管作了一个 Re'_{κ} 的表。設 $k=0.5$ 厘米, 則對於不同的 $\frac{r}{k}$ 值將有以下的 Re'_{κ} :

$\frac{r}{k}$	100	150	200	250	300	400	500
Re'_{κ}	7000	7333	7667	8000	8333	8667	9000

作者把 $\frac{r}{k}$ 和 Re'_{κ} 值画在对数座标紙上, 所有的点都位於一条直綫上, 該直綫在縱軸上的截距为 $\lg 3250$, 对橫軸的傾斜度为 0.157。所以 $\frac{r}{k}$ 和 Re'_{κ} 的关系式为:

$$\lg Re'_{\kappa} = \lg 3250 + 0.157 \lg \frac{r}{k}.$$

或

$$Re'_{\kappa} = 3250 \left(\frac{r}{k} \right)^{0.157}.$$

表 1 为根据該公式对各种 $\frac{r}{k}$ 所算出的 Re'_{κ} 的值。其中还列有 $\lambda' = \frac{64}{Re'_{\kappa}}$ 之值。

管壁表面及其糙率对管中紊流的性質具有重大的影响。糙率分为下列几种基本形式: 齒狀(尖头的)的, 粒狀的和波浪形的; 每一种的分佈情况可能是均匀的或非均匀的。此外, 管壁上也可能形成隆起, 小粒和个别的斑点。

表 1

$\frac{r}{k}$	Re'_k	λ'	$\frac{r}{k}$	Re'_k	λ'
100	7 000	0.00915	11 000	15 300	0.00417
250	8 000	0.00800	12 000	15 600	0.00408
500	9 000	0.00713	13 000	15 800	0.00405
1000	10 300	0.00620	14 000	16 000	0.00400
2500	12 000	0.00533	15 000	16 200	0.00395
5000	13 400	0.00478	17 000	16 400	0.00390
7500	14 500	0.00441	19 000	16 700	0.00382
10 000	15 100	0.00423	20 000	16 800	0.00380

如下面将要看到的，每一种糙率形式对于管中液体的紊流都有其独特的影响。波浪形的糙率对管中液体流动的影响最为明显。波浪形糙率的突出部分为液体成层而连续地绕过。其水头损失与 Re 的关系式和光滑管中相应的关系式相似。

当紧靠管壁的液层流经管壁上的隆起与小粒处时，通常不是连续而成层的绕过，这些隆起与小粒将破坏液体层而为液体的流动造成了某些特殊的条件。

管壁上糙率分佈的不均匀可能在水流中引起各种不同的现象。纵向糙率分佈的不均匀，其所产生的现象可能与在波浪形的糙率情况下所产生者相似。断面圆周上糙率不均匀，产生横流与横向环流，后者将导致液体的螺旋运动。在一般情况下，这两者是可能同时发生的。

在紊流中应区别其边层与流核。紧靠管壁的边层是由层流的薄层与紊流的边层所组成。理论上认为：以管径的百分数所表示的层流边层的厚度是随着雷诺数的增加而连续减少的。当层流向紊流过渡时，在普通的糙率情况下，层流边层大大超过管壁糙率的突出高度；糙率的尖端淹没在层流边层内部而为液体成层地而挨着的绕过。此时，与层流相似，糙率对水头损失不发生影响，

水头损失僅与 Re 数或黏滯力有关。

粗糙管中紊流的这种第一个区域通常称作水力光滑管流区域，或管中液体的光滑流区域。在这个区域中，對於液流結構起决定性影响的是液体的粘滯性；由於水管的糙率已淹沒在層流边層的内部，所以实际上不發生任何影响；在粗糙管中光滑流的範圍内的水头损失僅与 R 值有关，正如在光滑管中一样。

当 Re 值更進一步增加时，層流边層的厚度減小到低於糙率突起高度，層流边層开始繞过糙率突起的尖端，脱离了它們的背面。这时，液体的粘滯性和管壁的糙率對於液流結構都發生影响。在这样的过渡区内（由光滑流到粗糙流）水头损失与 R 有关，也与相对糙率有关。

当 Re 值甚大时，層流边層的厚度变为小得不見了，糙率的尖端沒入於紊流流核中；液流結構僅僅決定於管壁糙率，这时摩擦水头损失將僅与相对糙率有关，而实际上不受 Re 值的影响，即不与液体的粘滯性有关。

液流結構及水头损失为管壁糙率所决定的这一紊流区域，通常称为粗糙管流区域，或管中液体的粗糙流区域。

前述的各种管中液体流动区域中，層流区域对电厂輸水管來說是沒有实际意义的。我們只是在作諾謨圖时用它作为水力光滑管流区域的边界。

水电厂輸水管中的液体流动是屬於紊流区域中的，這將在下面加以研究。

第二章 紊流理論

§ 1 理論的基本假定

这样的液流可以認為是紊流，在这种液流中連續的發生着液体質点的混合。

紊流的結構分为流核与边層，后者又由紊流边層与層流边層所組成(見圖 1 及圖 2)。

为了确定如此复雜的水流的規律性，曾經作了一些假定。所有这些假定都是力求确定液体的脈动、液体的物理性質和液体質点的运动軌跡，而來查明液体質点动量交換的規律。

若以 u' 和 v' 表示平面 xy 上的脈动分速，則它們的形成就在液体介質中引起了切应力 τ_{xy} 。

在 u' 、 v' 和 τ 的关系上作了一些假定，並且其中的某些假定並未預先知道液体运动的任何模样。

關於渦漩所引起的动量交換的假定沒有实验的研究，它導引出一些公式，其中某些关系沒有为实验所确定。

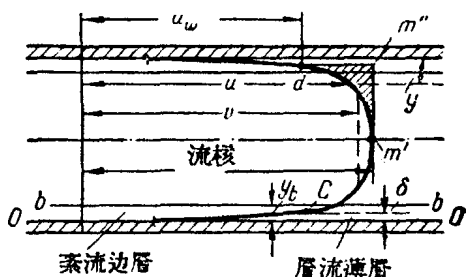


圖 1 關於紊流理論的示意圖

由於液体質点的混合所引起的动量交換成直綫关系的这种假