水文測驗仪器的研究

Г. В. 热列兹拿柯夫 著

水利出版社

中譯本序言

在俄文版的序言中，已經指出本書所研討的各个問題。

在这里作者想把对進一步改進水文測驗仪器的意見告訴中國的同事們。

研究的主要方向应当是这样的：研究可以在**不破坏水流結構**的条件下測定水流各种特征的仪器和方法。

在应用：电学、無綫电学、超声波、光学、放射性同位素、电子学、立体攝影測量、航空測量、雷达等而按新原理設計水文測驗仪器的構造时，可利用近几十年來在物理和力学方面的巨大成就。

在設計和研究新型水文測驗仪器的同时，还必須根据流体力学的分析不断地改進現有的优良的仪器（流速仪等）。

威廉士莫斯科水利工程学院水文、水文測驗、
徑流調節敎研室主任，敎授，技術科学博士

（Г.В.热列茲拿柯夫）

1957年1月21日

俄文版序言

苏联人民正在勝利地解决着为共產主义社会創造物質——技術基礎的任务。解决这个任务的重要措施是建設巨大的水电站（古比雪夫水电站、斯大林格勒水电站、卡霍夫水电站等），运河（土庫曼大运河，南烏克蘭运河，北克里米亞运河等）以及灌溉系統。偉大的斯大林共產主义建設計划中的第一个——列寧伏尔加-頓运河已經完成了。过渡到新式灌溉系統的工作也在勝利地進行着。斯大林改造自然的計划正在付之实現。

在苏联共產党第十九次代表大会的歷史性的决議中，規定要進一步地开展水利建設事業。

由于上述情况，因而以**水文測驗**的方法來研究苏联的水利資源具有重大的实际意义。

由于巨大水利建設所提出的日益增長的要求，河流水文測驗在不断地發展着。在此必需特别指出，在完成了偉大的共產主义水利建設計划之后，在水利对象上的水文測驗工作的內容將有所改变，而且还要加大它的規模，这是因为要正确地运用水工建筑物、水庫和运渠，需要具有人类活动对水情的影响的知識〔1,2,3〕。

在解决水文測驗問題时必需研究：（1）水文測驗仪器；（2）水文測驗方法。

关于河流水文測驗方法中的某些問題已在作者的論著〔4〕中闡明。在該書中指出，水文測驗方法必需建立在嚴格的水力学基礎上。

水文測驗仪器与其他測量仪器相比，在構造方面較为簡單，但具有复雜的理論。但是因为仪器工作情况（由于水流与仪器的相互作用）的复雜性，在大多数情况下还沒有建立起理論來。水文測驗仪器

的工作情况，由水流与仪器的相互作用而决定。

根据仪器讀数即可对水流結構具有一个明确的概念。因此水文測驗仪器的研究有巨大的科学和实际意义。顯然水文測驗仪器的研究工作的主要內容应該是对**水文測驗仪器的讀数進行流体力学的分析**。根据这种分析就可能：（1）判斷水流資料的可靠程度，这些資料通常由水文測驗仪器測得；（2）正确地設計仪器；（3）制定仪器应用的范圍、方法及技術規范。

本書是作者在苏联水力試驗室和檢定池中多年工作（研究水文測驗仪器）的一个总結。

本書中叙述了几种測量水流流速的水文測驗仪器研究的成果，这些仪器是：流速仪、冷却測速仪及測速采样器。

对水文測驗仪器的讀数進行分析，必須确定仪器的各种参变数。因此書中首先述及計算水文測驗仪器（流速仪）参变数的方法，并提出更为完善的計算方法（第一章）。

在第二章及第三章內探討了各种因素对流速仪讀数的影响：旋槳的水力螺距；滑潤油的粘滯度；水流的紊动等等。在第二章的結尾說明了一种高度灵敏的流速仪的結構。

第一个对流速仪作深入的專門的研究是 H.M. 卜契柯夫(Бочков)〔5〕。

第四章是与 E.B 波里茲尼亞克（Близняк）教授合作寫成的，該章內叙述了苏联某些檢定池的研究結果。

第五章專述冷却測速仪（作者所建議的施測低流速的仪器）的研究工作。由于冷却測速仪的作用建立在正規冷却狀态理論的基礎上，因此在这一章（§23）中簡要地引述了正規冷却狀态的理論；这一理論由斯大林獎金獲得者 Г.М. 康特拉捷夫(Кондратьев)教授所首創。

在第六章中叙述了測速采样器的研究成果。

在編寫本書时采用了水文測驗学中通用的專門名詞，但力求符合國定全苏标准〔ГОСТ(3951-47)〕上規定的名詞和定义。

謹向 E.B. 波里茲尼亞克教授及 M.И. 馬尔切尔（Марцелль）教授致以深厚的謝意，在整理出版本書时他們提供了一些宝貴的意見。

目　　錄

第一章　流速儀参变數的確定

§1. 流速仪参变数各种計算方法的比較

虽然很早就应用流速仪來測量水流的速度，但其函数

$$u=u(n) \quad (1)$$

（式中 u——水流速度；n——旋槳每秒轉数）的形式的問题，到目前为止尙未獲得理論上的解决[●]。这是因为确定仪器和水流相互作用过程中所產生的机械和水力摩阻是很困难的。甚至以概化的形式來解决这个問題的尝試也还未獲得滿意的結果，因为得出的方程式包含着很多未知参变数，这些未知参变数的物理性質还是不淸楚的。由于希望獲得那怕是部分的解决以滿足水文測驗的要求，于是進行了一系列的試驗研究。研究的結果提出了很多表示（1）式关系的公式，并且提出了很多种方法，以确定各种檢定方程式中的参变数。

我們知道，流速仪工作的机械性質和水动力性質，决定函数（1）应該是非直綫型的方程式，其漸近綫为

$$u=kn,$$

式中　k——旋槳的水力螺距[●]

利用非直綫方程式一則不方便，二則檢定不精确，于是力求將关系式 $u=u(n)$ 表示成下列形式

$$u=u_0+kn. \quad (2)$$

該式一般地講來并不完全符合現象的物理実質，但在很多場合中可以

● 按理 n 是 u 的函数，但通常假定地寫成：$u=u(n)$。

● k 亦可称为流速仪旋槳的常数，是旋槳每轉一圈时水流質点向前推進的距离——譯者注。

适应实际的要求。

有些作者希望利用这个簡單的关系，試圖以二根相交的直綫，或几根直綫，即折綫來替代曲綫 $u=u(n)$。因此，为了以最好的形式去表征流速仪的工作，必需用对数作圖法來表示超过一次方的函数式（1）。至于計算好几个参变数及应用方程式的不方便处，則可应用適当的諾模圖和表格使計算和应用簡化到最低限度。

在本節內將要研究尋求流速仪特性的各种方法的实际运用。同时以具体的实例來解釋这些方法，以便于進行比較。原始資料列如表 1。

表 1　拉古[●] 流速仪的檢定資料

点　　号	L (公尺)	N	t (秒)	u (公尺/秒)	n (1/秒)
1	31.69	25	831.3	0.038	0.030
2	36.29	75	596.2	0.061	0.126
3	32.00	75	297.9	0.107	0.252
4	44.94	125	237.3	0.189	0.527
5	36.12	100	159.3	0.227	0.628
6	35.19	100	108.5	0.324	0.922
7	42.72	125	106.8	0.400	1.170
8	42.77	125	84.3	0.507	1.483
9	25.42	75	40.0	0.636	1.875
10	42.90	125	63.3	0.677	1.975
11	42.27	125	45.7	0.925	2.735
12	42.63	125	42.0	1.015	2.976
13	42.35	125	40.5	1.048	3.086
14	42.25	125	35.3	1.197	3.541
15	25.53	75	19.2	1.330	3.906
16	42.34	125	26.2	1.616	4.770

u 和 n 兩值是如下算出的：用总和法整理計时仪的記錄綫，在整理时考慮到檢定車的起动和停車，在兩端部分則進行插补。这样，相应于流速仪全部轉数 N 的行程 L 可由下列关系确定之：

● 拉古（ЛАГУ）系莫斯科水力机械試驗室之俄文簡寫。

$$L=l\left(\frac{p_1'}{p_1}+m+\frac{p_2'}{p_2}\right),$$

式中　l——兩次接触之間的行程長度；

p_1', p_2'——計时仪从相当于旋槳整轉数的綫（沿垂直方向的）至最近接触点之間的行程長度；

p_1, p_2——計时仪在开始和終了时兩接触点之間的行程長度（在檢定車等速运动时 $p_1=p_2$）；

m——接触点之間的全部間隙数目。

流速仪潛沒深度为 0.6 公尺，渠槽深度为 1.3 公尺，寬度为 2.5 公尺。在下面結合被采用的檢定曲綫的方程式，來研究流速仪檢定方程式中参变数的計算方法。

I　一次方的檢定方程式

方程式

$$u=kn \tag{3}$$

实际上只对于超过臨界速度（$\bar{u}_k$）的流速是正确的，在这一流速区域內它十分符合試驗关系式 $u=u(n)$。

所謂流速 u_k 即是指大于这种流速时，机械阻力实际上不影响函数 $u=u(n)$ 的形式。

問題就归結为根据檢定資料去求 k，这时可以应用下列方法。

1.选点法　借助塑膠板（或拉緊的綫）自坐标为 $u=0$，$n=0$ 的点子找一根直綫使这些点子对称地分布于該直綫的兩側。然后按直綫讀出几对相应的 u 和 n 值（距坐标原点愈远者愈好），或者只簡單地从檢定表上尋取位于直綫上的点的 u 和 n 值。在这里我們取下的是表 1 中的第13点（圖 1）：

$$k=\frac{1.048}{3.086}=0.3396\text{ 公尺}^{●}$$

2.算術平均法　在这种方法中实驗測点对計算直綫的偏离的代数

● 为了实际工作，k 值計算到 0.001 公尺，n 計算到 $0.01\frac{1}{秒}$ 已足夠精确。

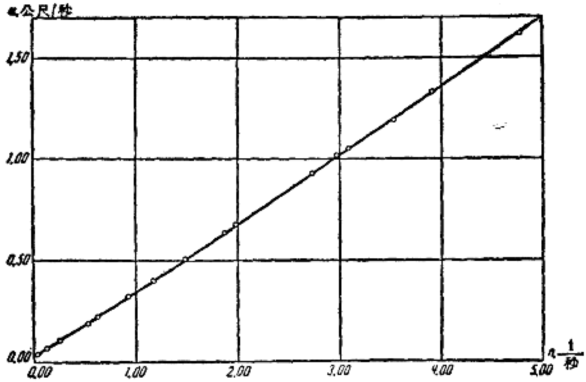

圖 1　以 u 和 n 为坐标的流速仪檢定曲綫

和应等于零，即

$$\sum(u-kn)=0,$$

由此
$$k=\frac{\Sigma u}{\Sigma n}. \tag{4}$$

則上例中之 k 值等于:

$$k=\frac{8.444}{24.864}=0.3396 \text{ 公尺}.$$

鑒于在小流速范圍內，該綫有彎曲，故应选用位于臨界流速 u_k 以上的点子（从表 1 中的第 8 点开始）。确定 u_k 的方法，將于 §2 內論述。

3. 最小二乘法　在这种方法中，必需使偏离的平方的总和为最小，亦即

$$\sum(u-kn)^2=\text{最小}.$$

由上式可導出下列的条件:

$$\frac{d}{dk}\sum(u-kn)^2=0, \text{ 或 } \sum n(u-kn)=0,$$

由此
$$k=\frac{\Sigma un}{\Sigma n^2}. \tag{5}$$

它的数值等于:

$$k=\frac{29.208}{80.021}=0.3395 \text{ 公尺}.$$

un 和 n^2 的相应值列于表3。

綜合研究这些方法后，必須指出下列各点：第一种方法是最簡單而粗糙的方法，因为选定的“較好”的綫和点，甚至于同一个工作者重复求 k 数次，也將得出不同的結果來。如由不同的人來做，其結果可能更为懸殊。但由于这个方法簡單明了，在精度要求不高，以及使用者具有相当丰富的經驗时，則它还是可采用的。第二种方法和第三种方法并不要求預先繪制直綫。最后一种方法是最精确的方法，但同时也是最麻煩的方法。第二种方法有足够的精确度，并且計算工作量較少，所以可將它列在第一位。現在我們來研究如下形式的流速仪檢定方程式中各参变数的各种計算方法

$$u=u_0'+k'n. \qquad (6)$$

这一方程式被用作適应于整个流速范圍 u 或者不同旋槳轉数的局部流速范圍的檢定曲綫的方程式。此处 u_0' 及 k' 加上一撇，是要区别于实际的 u_0 及 k；u_0 及 k 通常較 u_0' 及 k 为大。这样，問題即归結为尋求 u_0' 及 k'，这可以采用下列的方法。

1.选点法 类似于前述，我們拟定一根位置最適合的直綫。并算出二点的坐标。在我們的实例中，可采用第8点及第15点(表1)，代入(6)式寫成

$$0.507=u_0'+k'1.483,$$
$$1.330=u_0'+k'3.906.$$

求解有 u_0' 和 k' 兩个未知数的联立方程式，得

$$u=0.0033+0.3397n.$$

2.中点法 此法又可分为兩个方法：

(a)在这一方法中选取一系列具有如下坐标的点子：

$$(u_1,\ n_1),\ (u_2,\ n_2),\ (u_3,\ n_3),\ (u_4,\ n_4);$$

將它們代入(6)式：

$$u_1=u_0'+k'n_1; \qquad u_3=u_0'+k'n_3;$$
$$u_2=u_0'+k'n_2; \qquad u_4=u_0'+k'n_4.$$

在第1法和第2法中，僅考慮檢定曲綫的上部。从上列的方程式中可得：

$$u_1+u_2=2u_0'+k'(n_1+n_2);$$
$$u_3+u_4=2u_0'+k'(n_3+n_4).$$

解具有二个未知数的联立方程式，得所求的兩个参变数：

$$k'=\frac{(u_1+u_2)-(u_3+u_4)}{(n_1+n_2)-(n_3+n_4)},\tag{7}$$

$$u_0'=\frac{(n_1+n_2)(u_3+u_4)-(n_3+n_4)(u_1+u_2)}{2[(n_1+n_2)-(n_3+n_4)]}.\tag{8}$$

对所給的实例，則

$$k'=\frac{(0.400+0.677)-(1.015+1.330)}{(1.170+1.975)-(2.976+3.906)}=0.3393\text{ 公尺},$$

$$u_0'=\frac{(1.170+1.975)(1.015+1.330)}{2[(1.170+1.975)-(2.976+3.906)]}-$$
$$-\frac{(2.976+3.906)(0.400+0.677)}{2[(1.170+1.975)-(2.976+3.906)]}=0.0050\text{公尺/秒}.$$

故可寫出方程式

$$u=0.0050+0.3393n.$$

（6）A. И. 克雷洛夫法（A. И. Крылов）〔6〕。將全部屬于选出的直綫段上的点分为二組：

$$\begin{Bmatrix}n_1'+n_2'+n_3'+\cdots\\ u_1'+u_2'+u_3'+\cdots\end{Bmatrix}\qquad\qquad \begin{Bmatrix}n_1''+n_2''+n_3''+\cdots\\ u_1''+u_2''+u_3''+\cdots\end{Bmatrix}$$

然后計算每一組中点的坐标

$$n_{\text{II}}'=\frac{\Sigma n'}{m'},\qquad u_{\text{II}}'=\frac{\Sigma u'}{m'},$$
$$n_{\text{II}}''=\frac{\Sigma n''}{m''},\qquad u_{\text{II}}''=\frac{\Sigma u''}{m''}.$$

則
$$k'=\frac{u_{\text{II}}'-u_{\text{II}}''}{n_{\text{II}}'-n_{\text{II}}''}\tag{9}$$

$$u_0'=\frac{u_{\text{II}}'(n_{\text{II}}'-n_{\text{II}}'')-n_{\text{II}}'(u_{\text{II}}'-u_{\text{II}}'')}{n_{\text{II}}'-n_{\text{II}}''}\tag{10}$$

为了說明这种方法，我們將檢定方程式以二根相交的直綫表示。

在表 2 中列出表 1 中各点的中点坐标。

表2　中点坐标

点　　号	1,2,3	4,5,6	7,8,9,10,11	12,13,14,15,16
$u_{\text{Ц}}$,公尺/秒	0.069	0.247	0.629	1,241
$n_{\text{Ц}}$,1/秒	0.136	0.692	1.848	3,656

按第一对和最末一对中点，列出公式(9)及(10)，并求解，得：

$$n<1.15;\qquad u=0.0251+0.3201n,$$

$$n>1.15;\qquad u=0.0039+0.3385n.$$

3.B.**伏拉得昌斯基**(B.Владычанский)**法**〔7〕　檢定方程式是兩根用最小二乘法定出的直綫。但是用解析法來代替圖解法去估計曲綫 $u=u(n)$ 上点的分散性。

由下列关系式計算 k'_{cp}

$$k'_{\text{cp}}=\frac{u_2-u_1}{n_2-n_1},$$

式中　u_1 和 n_1——高流速的平均点的坐标；

u_2 和 n_2——低流速的平均点的坐标。

用类似的方法去求中間各点的 k' 值，然后計算对平均值的离差百分数。在計算中，应选用偏离直綫最少的点子。

4.**最小二乘法**　如所周知，最小二乘法根据下列条件式推導而來：

$$\sum_1^m(\delta_u)^2=\sum_1^m(u-k'n-u'_0)^2=\text{最小}.$$

这就是說，k' 和 u'_0 应該这样选擇，要使：

$$\frac{\partial\Sigma(\delta_u)^2}{\partial u'_0}=0\quad\text{和}\quad\frac{\partial\Sigma(\delta_u)^2}{\partial k'}=0,$$

由此得一組正規方程式：

$$mu'_0+k'\sum n=\sum u,$$

$$u'_0\sum n+k'\sum(nn)=\sum(un),$$

解之，則得

$$u_0'=\frac{\Sigma(nn)\Sigma u-\Sigma(un)\Sigma n}{m\Sigma(nn)-\Sigma n\Sigma n}, \tag{11}$$

$$k'=\frac{m\Sigma(un)-\Sigma u\Sigma n}{m\Sigma(nn)-\Sigma n\Sigma n}, \tag{12}$$

式中　m——方程式数目。

計算应当按下列表式進行（表3）。

表3　按最小二乘法計算 u_0' 和 k' 的数据

点　号（按表1）	u 公尺/秒	n 1/秒	nn 1/秒^2	un 公尺/秒^2
7	0.400	1.170	1.3689	0.4680
8	0.507	1.483	2.1993	0.7519
9	0.636	1.875	3.5156	1.1925
10	0.677	1.975	3.9006	1.3371
11	0.925	2.735	7.4802	2.5299
12	1.015	2.976	8.8566	3.0206
13	1.048	3.086	9.5234	3.2341
14	1.197	3.541	12.5387	4.2386
15	1.330	3.906	15.2568	5.1950
16	1.616	4.770	22.7529	7.7083
Σ	9.351	27.517	87.3930	29.6760

將表（3）中的总和及 $m=10$ 代入方程式（11）及（12）后，我們求得 u_0' 和 k'；于是檢定方程式可寫成：

$$u=0.0053+0.3379n.$$

5.圖解解析法　若假設 u_0 值已由作圖确定，則 k' 的計算將大大地簡化。計算 k' 的公式如下：

$$k'=\frac{\Sigma u-mu_0'}{\Sigma n}. \tag{13}$$

取 $u_0'=0.0050$（按圖），得

$$u=0.0050+0.3380n.$$

6.順点法〔8〕　引用上面提到的实例（§1）來說明这个方法。

將方程式（ 6 ）改寫成：

$$u_0'+nk'-u=0, \tag{14}$$

并自第 7 点开始（按表 1 ）分别地寫出各点的方程式：

$$u_0'+1.170k'-0.400=0;$$
$$u_0'+1.483k'-0.507=0;$$
$$u_0'+1.875k'-0.636=0;$$
$$u_0'+1.975k'-0.677=0;$$
$$u_0'+2.735k'-0.925=0;$$
$$u_0'+2.976k'-1.015=0;$$
$$u_0'+3.086k-1.048=0;$$
$$u_0'+3.541k-1.197=0;$$
$$u_0'+3.906k-1.330=0;$$
$$u_0'+4.770k-1.616=0.$$

結果我們得到一束穿过坐标为 u_0' 及 k' 的点子的直綫。如果轉化为平行座标（параллельный координат）幷取相应的 u_0' 及 k'，則方程式（ 14 ）將为測点的方程式；同时問題便归結为在一根直綫上尋求上列方程式（以平行坐标系統表示时）所确定的点子。

这些点的坐标可由下列关系式求得：

$$x=\frac{n}{1+n}p, \tag{15}$$

$$y=\frac{u}{1+n}, \tag{16}$$

式中 p——各根軸間的距离。

鑒于 u_0' 及 k' 的数値頗小，以及为了作圖方便起見，我們將 u_0' 增大 100 倍，k' 增大 10 倍。为了保持（ 14 ）式不变，必需改寫如下：

$$0.01(100u_0')+0.1n(10k')-u=0. \tag{17}$$

若取 $p=10$ 公分幷考慮（ 17 ）式，則公式（ 15 ）及（ 16 ）变为下列形式：

$$x=\frac{0.1n}{0.01+0.1n}10=\frac{10n}{0.1+n};$$

$$y=\frac{u}{0.01+0.1n}=\frac{10u}{0.1+n}.$$

x 及 y 之計算結果列入表 4。

表 4　按順点法計算 u_0' 及 k' 的数据

点号（按表 1）	x	x_1	x_1^2	y	y_1	y_1^2	x_1y_1
7	9.212	−0.373	0.139129	3.150	−0.111	0.012321	0.041403
8	9.368	−0.217	0.047089	2.203	−0.058	0.003364	0.012586
9	9.494	−0.091	0.008281	3.220	−0.041	0.001681	0.003731
10	9.518	−0.067	0.004489	3.263	0.002	0.000004	−0.000134
11	9.647	0.062	0.003844	3.263	0.002	0.000004	0.000124
12	9.675	0.090	0.008100	3.300	0.039	0.001521	0.003510
13	9.686	0.101	0.010201	3.289	0.028	0.000784	0.002828
14	9.725	0.140	0.019600	3.288	0.027	0.000729	0.003780
15	9.750	0.165	0.027225	3.320	0.059	0.003481	0.009735
16	9.795	0.210	0.044100	3.318	0.057	0.003249	0.011970
Σ	95.870	—	0.312058	32.614	—	0.027138	0.089533

参变数 u_0' 及 k' 按下式确定（考慮到 u_0' 增大了 100 倍及 k' 增大了 10 倍）：

$$u_0'=\frac{y_c-x_c\operatorname{tg}\alpha}{100}, \tag{18}$$

$$k'=\frac{y_c+(p-x_c)\operatorname{tg}\alpha}{10}, \tag{19}$$

式中　x_c 及 y_c——中点的坐标：

$$x_c=\frac{\Sigma x}{m},\qquad y_c=\frac{\Sigma y}{m}.$$

应用到上述的实例中：

$$x_c=\frac{95.870}{10}=9.587,$$

$$y_c=\frac{32.614}{10}=3.261;$$

$$\alpha = \frac{\operatorname{arctg} \dfrac{2\Sigma x_1 y_1}{\Sigma x_1^2 - \Sigma y_1^2}}{2}. \tag{20}$$

其中

$$x_1 = x - x_c,\ y_1 = y - y_c\text{（表 4）}.$$

將表 4 中的数据代入公式（20），我們得

$$\alpha = 16°6',$$

于是 $$u_0' = \frac{3.261 - 9.587 \cdot 0.289}{100} = 0.0049\ \text{公尺/秒},$$

$$k' = \frac{3.261 + (10 - 9.587)0.289}{10} = 0.3391\ \text{公尺}.$$

檢定方程式可寫成:

$$u = 0.0049 + 0.3391n.$$

在表 5 中列出以各种不同方法算出的方程式（6）的参变数。

表 5　参变数 k' 及 u_0' 值表

方　　法	1	2a	2б	4	5	6
u_0 公尺/秒	0.0033	0.0050	0.0039	0.0053	0.0050	0.0049
k' 公尺	0.3397	0.3393	0.3385	0.3379	0.3380	0.3391

由表 5 的数据可見，用各种不同方法算出的参变数 u_0' 及 k' 是有差別的，但这种差別并無实际的意义。

应該指出，第 5 种方法在檢定站進行日常的标准控制檢定时是適合的。

在特殊工作的場合，应当采用第 4 和 6 法，这兩个方法是最嚴密的。

应用最小二乘法來推求流速仪方程式（6）中参变数的方法，最先是 Д.И.柯契林（Д.И.Кочерин）〔9〕根据速度的相对偏差的平方总和应为最小的条件而提出的。