

雷诺实验装置改进的探讨

陈文英

(建工系水力学教研室)

摘 要

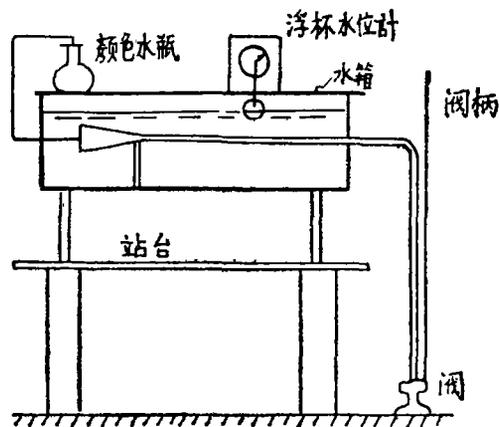
对当前流行的雷诺仪之能否测定下临界雷诺数提出了不同的看法,并试图探索一种既能演示流态变化—从层流转变为紊流,与从紊流转变到层流—又同时能直观地测出上、下临界雷诺数的改进装置。

雷诺实验是判明液体运动存在两种状态——层流与紊流——的实验,这一实验在水力学的发展史上曾起过重大的作用,至今仍是水力学课程中重要教学实验之一,因之,探讨这一实验装置的改进,对提高教学效果是有一定意义的。

I 雷诺实验的原来装置

1880年,雷诺用颜色水注入玻璃管中来判明水流运动状态,所用的实验装置如图1所示⁽¹⁾。

该实验所用的水箱长1.83米(6呎),宽、深各0.457米(18吋),实验用的玻璃管长1.52米(5呎)。内径分三种:2.68厘米,1.527厘米及0.7886厘米。玻璃管进口为长30.5厘米的喇叭口,玻璃管出口连接于相同直径的铁管。实验时,要求水箱中的水处于绝对静止状态,然后慢慢打开阀门,当玻璃管中的颜色水带在靠近玻璃管出口的地方发生散乱时,说明水流中已有旋涡发生,此时的流速称为上临界流速。



图一

该实验所用的颜色液体为苯胺染料液(aniline dye)。对选用颜色水的要求是:颜色水在水中不易自行扩散。为此所用的颜色水的温度、密度需与水箱中的水完全一样。

上述实验装置没有进水设备(是为了保持水箱中的水面处于静止状态)⁽²⁾。因而玻璃管中水流是属于不稳定流。

雷诺当时所用实验装置不能测定下临界速度。所以,在1883年雷诺又利用水头损失与速度的变化关系 $h_f = kV^n$, 用铅管、玻璃管、新铁管、旧铁管在另外的装置上进行实验。实验所用的管径最大达6.15厘米,求出各种情况下的下临界速度⁽³⁾。

本文于1984年9月25日收到

$$V_c = \frac{1}{b} \frac{P}{d}$$

式中： $P = \frac{1}{1 + 0.3368t + 0.000221t^2}$

t ——水的温度（摄氏度）；

b ——常数，对求下临界数 $b = 278$ ；

d ——管径（米）。

1910年，爱克曼（Ekman）又重复雷诺实验，并确认上临界速度不固定，而在同一条件下的下临界速度是定值：

$$V_c = \frac{2000\mu}{\rho d} \quad (2)$$

式中 μ ——水的动力粘滞系数；

ρ ——水的密度；

d ——管径；

μ 、 ρ 、 d 需采用同一的单位制。常数2000称为“下临界雷诺数”

由于水的运动粘滞系数

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{0.000001775}{1 + 0.3368t + 0.000221t^2} \text{ 米}^2/\text{秒}$$

由此，式（1）中的 P 为

$$P = \frac{1}{0.000001775} \cdot \frac{\mu}{\rho}$$

代回（1）式，得

$$V_c = \frac{1}{278 \times 0.000001775} \cdot \frac{\mu}{\rho} = \frac{2026\mu}{\rho d}$$

所以，式（1）与式（2）的实验结果基本是一致的。

此后有许多学者对雷诺实验装置进行了改进。现在的雷诺实验装置，一般是在水箱中设有进水管和溢流堰，以保持箱中水位恒定。但事实上这种演示的实验装置都只能演示层流到紊流的转变，因而如单纯用肉眼观察颜色水线的变化来确定临界雷诺数的话，也只能测得上临界雷诺数。

II、柯惹夫尼可夫对雷诺实验装置的改进

1954年苏联水力学专家柯惹夫尼可夫来我国讲学时，曾设计一种雷诺装置，其特点是用分枝管路，以调节各管路流量的办法来变更管路中流速。其装置如图2所示，调节阀门 K_1 和 K_2 ，可以在 BCK_1 管中得到紊流状态，而在 CK_2 管中呈现层流状态。

这种实验装置曾在北京地质学院等高校的水力学实验室使用过。由于分枝管局部扰动的影响未能消除，所以实验结果的下临界雷诺数离应有的值（2000）较远。这种实验装置在我国各大学没有得到广泛采用。

III、目前流行的雷诺实验装置

目前各校所习用的雷诺实验演示流态变化的装置，不论为水平管式或立管式，基本都出

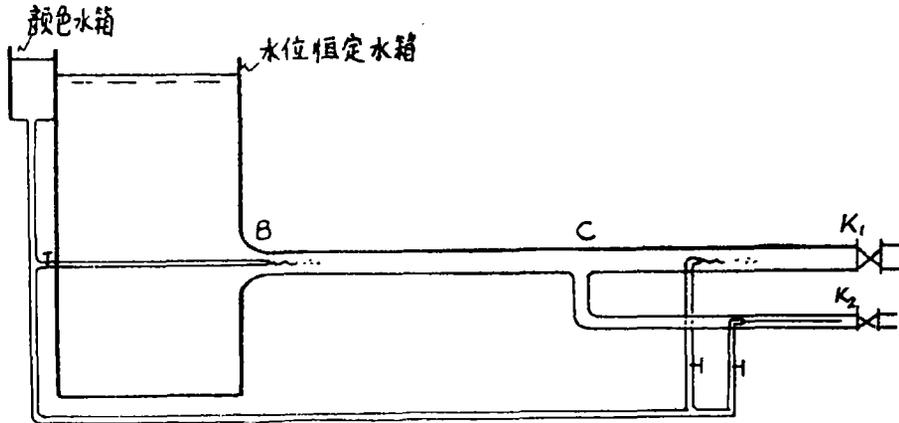


图 2

于同一图式。即由稳压水箱引出一等径的玻璃管，在管子入口处经针头注入颜色水，通过调节出水阀门大小来控制管中流速，从而观察流态。当流速很小时玻璃管中呈现清晰的颜色水平滑直线。随着阀门逐渐开大，管中颜色水线由平直转为波动继而扩散，说明水流已由层流转变为紊流。通过测定流量，即求得相应于层流开始转变为紊时的上临界雷诺数。并且，在一些水力学教科书⁽⁴⁾⁽⁵⁾传统观点的指导下，认为：“当试验以相反程序进行，则观察到的现象将以相反的次序而重演，流态由紊流变为层流”，有人就简单地用目测到颜色水线重新变直时的流速来定出下临界雷诺数。

如新近出产的成都科技大学与四川新津教学仪器厂共同研制的RB—1型雷诺仪的使用说明书中，明确写着：“下临界雷诺数的测定——当试管内达到充分紊流，然后再逐步把尾阀关小，直到其针尖出口段保持层流，该管尾段为轻度紊流时，即为下临界状态。此时观察并记录流量计读数，即可标出雷诺数”，

事实上，上述装置并不能直接演示紊流转变为层流的下临界状态，因而也难以用目测颜色水线变化来确定下临界雷诺数。因为下临界雷诺数的含义是：当由任何扰动所引起的紊流都能被粘性所阻滞而转变为层流时所相应的雷诺数⁽⁶⁾。当水箱出流的水原为层流时，如出水阀门由小开大，使水流进入玻璃管后的流速增大到某一数值，以致达到了形成紊流的条件，表现为颜色水线开始抖动，这时测得的雷诺数诚然为上临界雷诺数。但当玻璃管中出现紊流之后，再把出水阀门由大逐渐关小，到一定程度时，由水箱出流的层流水进入玻璃管后达不到形成紊流的条件，于是进入玻璃管的水流仍保持为层流状态。表现为管口新注入的颜色水随着新流入管中的水流呈直线前进，迅速取代了原为紊动的颜色水线。当我们观察到全管出现清晰而略有抖动的直的颜色水线时，意味着原处于紊流状态的水流已全部由管中排出，而为新的层流水所取代了，这说明：通过对上述装置出水阀门的逐渐关小，只能体现管中新流入的层流水对原来紊流水的取代，却未能体现原为紊流状态的水在粘滞力作用下由紊流到层流的转变。

因而，随着阀门逐渐关小，重新出现清晰但略有抖动的颜色水线时相应测得的雷诺数，只能说是又恢复到了原上临界雷诺数，而不能由此定为下临界雷诺数。实验证明了这一点。

现以近几年出产的华南工学院R₁-1型雷诺仪（立管式）的实验说明书中所附实验结果来分析：

表 1

序号	流量	雷诺数	颜色水线形状
4	112	1900	 直线
5	151	2550	 中部以后有波动
6	191	3200	 全部有较大波动
7	302	5100	 下部散开
8	461	7780	 完全紊流
9	600	10120	 — v —
10	151	2550	 中部以后有波动
11	112	1900	 直线

由上表数据可见，不论阀门由小逐渐开大还是由大逐渐关小，相应于一定紊动状态的雷诺数则是相同的。例如把第5次测得的 $R_c = 2550$ 定为上临界雷诺数的话，那在第10次测得的颜色水线重新呈现略有抖动的直线时的雷诺数又是2550，正好说明是它又恢复到了原上临界雷诺数值。但还是有人习惯于把后者定为下临界雷诺数。

从我们所组装的仪器的测试过程也得到了如上情况，即于层流变紊流后，随着出水阀门继续开大，雷诺数逐渐增大，紊动强度也逐渐增强。如将阀门再逐渐关小，与紊动程度相应的雷诺数也基本上按原来增长的顺序逐次降低，一直恢复到原来的上临界雷诺数值（见表2）。

所以，如果我们把上述装置的阀门关小至目测到恢复层流时所求得雷诺数定为下临界雷诺数的话，那么，这样测得的下临界雷诺数总是和上临界雷诺数相等，而体现不出“紊流变层流时临界流速要比层流变紊流时为低”⁽⁴⁾⁽⁵⁾这一论点。

而且，如设法减少仪器装置中对水流的扰动，提高上临界雷诺数到3000以上是完全可能的。如果我们把阀门关小到恢复层流时所测得的相应雷诺数（与阀门由小开大时测得的上临界雷诺数相同）定为下临界雷诺数的话，那就意味着下临界雷诺数也与上临界雷诺数一样是个不固定的值了。这与真实的实验结果是相违背的。

IV 对雷诺实验装置的改进

1) 原理分析与构造

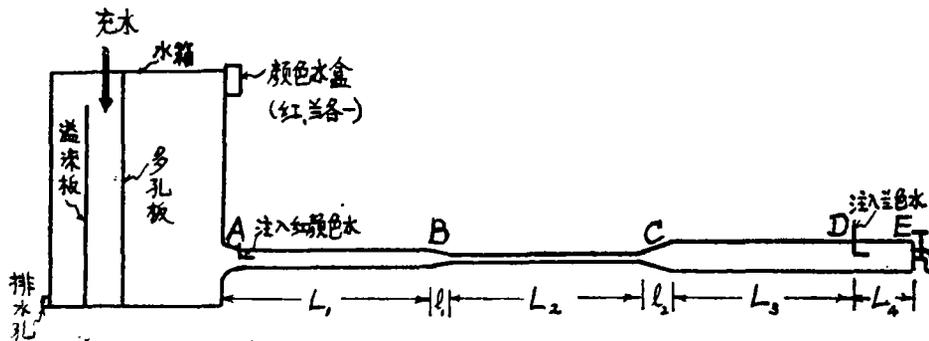
从对下临界雷诺数的定义，我们可以得出这样的理解：在这个雷诺数下，液体所具有的粘性力已达到一定程度，这时，即便有扰动使水流状态成为紊流，但在此粘滞作用下最终还是会形成层流（所以下临界雷诺数是个固定值）。因此，为了能演示出紊流变层流的下临界状态，并用目测颜色水线的变化来确定下临界雷诺数，应使来水为紊流，并能体现出受扰动的水在粘滞作用下由紊流到层流的转变。

$$\text{由 } R_e = v \cdot d / \nu = \frac{Q}{\pi d^2 / 4} \cdot d / \nu = 4Q / \pi \nu d, \text{ 可见在同一流量下, 管径愈大雷诺数愈小。}$$

这样，同等流量的水如在粗管中处于层流状态而在细管中则可能处于紊流状态。于是我们采用了不同管径的串联管路，借助管径的变化来变更管中水流的雷诺数，以观察在同一流量下由层流转变为紊流和由紊流转变为层流的两种现象。装置简图如图 2 所示。

由于BC管和CE管之间有渐扩管相连，等于给了进入CE管的水流一局部扰动。因而即便当水流进入CE管雷诺数已降低到可以形成层流，但CE管前部水流仍以紊流形式出现。所以CE管中针头置于渐扩出口端L₃的距离处，以观察经扰动的水流至此能否最终成为层流。

如细管的紊流水进入粗管后，先经受了渐扩扰动，但经L₁距离后还是出现了层流，即说明在此雷诺数下水流的粘性已足以阻滞任何扰动引起的紊流而转变成了层流。这样就比较形象地体现出紊流变层流的下临界状态，由此也可简便地通过目测颜色水线的变化来确定下临界雷诺数。



(1) 由“AB段层流、BC段层流”开始转变为“AB层流、BC紊流”时，测BC管段的R_e是上临界值。

(2) 由“BC紊流、CE紊流”开始转变为“BC紊流、DE层流”时，测CE管段的R_e是下临界值。

图 3

实物装置如图 4 照片。

2) 实验结果：见表 2

3) 实验结果分析

对照表 2 图示中颜色水线形状，可见序号 3 测得的R_{e2} = 2662（及序号 29 的R_{e2} = 2734）为层流变紊流的上临界雷诺数。而序号 19 测得的R = 1933 及（序号 14 测得的R_{e3} = 1946）应为紊流变层流的下临界雷诺数。两次出现的上临界雷诺数值（及下临界雷诺数值）未

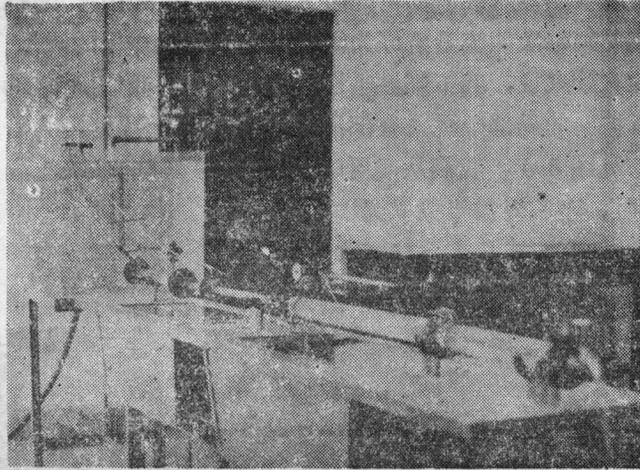


图 4

表2

序号	阀门操作方式	Re			颜色水线形状				
		AB管段 Re1	BC管段 Re2	CE管段 Re3	A	B	C	D	E
1	阀门由小开大	1088	2104	701	—	—	—	—	—
2		1288	2490	830	—	—	—	—	—
3		1377	2662	887	—	—	—	—	—
4		1577	3048	1016	—	—	—	—	—
5		1977	3821	1274	—	—	—	—	—
6		2043	3950	1317	—	—	—	—	—
7		2154	4165	1388	—	—	—	—	—
8		2199	4254	1417	—	—	—	—	—
9		2354	4551	1517	—	—	—	—	—
10		2488	4809	1603	—	—	—	—	—
11		2687	5195	1732	—	—	—	—	—
12		2732	5281	1760	—	—	—	—	—
13		2851	5539	1846	—	—	—	—	—
14		3020	5839	1946	—	—	—	—	—
15		3148	6085	2028	—	—	—	—	—
16		3315	6408	2136	紊动	—	—	—	—
17	阀门由大关闭小	3109	6011	2003	—	—	—	—	—
18		3065	5925	1975	—	—	—	—	—
19		2998	5796	1932	—	—	—	—	—
20		2954	5710	1903	—	—	—	—	—
21		2887	5582	1860	—	—	—	—	—
22		2754	5324	1774	—	—	—	—	—
23		2710	5238	1746	—	—	—	—	—
24		2510	4852	1617	—	—	—	—	—
25		2221	4294	1431	—	—	—	—	—
26		2043	3950	1317	—	—	—	—	—
27		1777	3435	1145	—	—	—	—	—
28		1575	3045	1015	—	—	—	—	—
29		1414	2734	911	—	—	—	—	—
30		1288	2490	830	—	—	—	—	—

能绝对相等，是由于观察颜色水线波动情况时目测的误差，还由于用量筒测量流量，当阀门由大关小时，难以控制到每次的流量恰好为阀门由小开大时变化的流量。

对无局部扰动的直管来说，其下临界雷诺数应为2000，我们测得的下临界雷诺数为1932，这是由于“渐扩”的局部干扰未全部消除所致。如CD段管径为 d_3 ，该管中针头离渐扩出口端距离为 L_3 （见图3），我们从变更 L_3/d_3 值，曾测得

当 $L_3/d_3 = 15.5$ 时，下临界雷诺数仅为 $R_{Fe,3} = 1100$

当 $L_3/d_3 = 37$ 时， $R_{Fe,3} = 1600$

当 $L_3/d_3 = 67.2$ 时， $R_{Fe,3} = 1932$

可见，如进一步消除“渐扩”影响（如可减小渐扩角度，或进一步提高 L_3/d_3 值），则可望测到下临界值为2000。

（陈鹏同志参加了本试验仪器的组装）

参 考 文 献

- [1] O. Reynolds: An Experimental Investigation of the Circumstances Which Determine Whether the motion of Water Shall be Direct or Sinuous and of the Law of Resistance in Parallel Channels.
Phil. Trans. Roy. Soc. of London Vol. 174. 1883
- [2] H. Rouse: Elementary Mechanics of Fluid, 1946
- [3] Gibson: Hydraulics and its Application, 1924
- [4] 天津大学水力学及水文教研室编：水力学，人民教育出版社，1980
- [5] 成都科技大学水力学教研室：水力学，人民教育出版社，1979
- [6] Alan Mironer: Engineering Fluid Mechanics, 1979