

文章编号:0559-9350(2017)07-0874-08

## 含水生植物河道曼宁糙率系数的试验研究

郑爽, 吴一红, 白音包力皋, 穆祥鹏

(中国水利水电科学研究院, 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

**摘要:** 水生植物是河流生态系统的重要组成部分, 但水生植物的存在使得水流阻力增加, 河道行洪能力降低, 开展含水生植物河道曼宁糙率系数的研究, 对河流生态综合治理具有重要意义。本文基于对含淹没柔性水生植物水流的室内水槽系列试验和量纲分析理论, 分析了植物挺立度、相对淹没高度及相对密植度对河道曼宁糙率的影响, 给出了淹没状态下含柔性水生植物河道的通用等效曼宁糙率系数经验公式。

**关键词:** 柔性水生植物; 植物挺立度; 相对淹没高度; 相对密植度; 等效曼宁糙率系数

**中图分类号:** TV131

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13243/j.cnki.slx.20160899

## 1 研究背景

近年来, 随着环保意识的增强, 世界范围内的河流生态保护和修复技术发展迅速, 越来越多的生态型河道建设工程得以实施<sup>[1]</sup>。水生植物作为河流生态系统的重要组成部分, 已成为生态型河道建设的重要标志<sup>[2]</sup>。水生植物能为生物提供栖息地和食物来源, 抑制泥沙再悬浮, 有效改善水质, 同时岸边植物还能防止水流侵蚀河岸, 维持河床稳定及河流蜿蜒度<sup>[3-5]</sup>。与传统河工型河道相比, 水生植物的存在使得河道水流阻力增加, 行洪能力降低, 极大地改变了河道的水流阻力特性<sup>[6-7]</sup>。因此, 含水生植物河道水流阻力特性的研究对生态型河道防洪能力计算、生态护岸护坡设计及滨河植物景观设计都具有重要意义。

早在20世纪初, 国外就通过室内水槽试验和原型河道试验开始了含植物水流阻力特性的研究, 发现植物阻水特性与水深及植物生长状况有关, 初步研究了水深与植物特性对水流阻力参数的影响。如Chow<sup>[8]</sup>以经验性的 $n \sim VR$ 关系曲线总结了早期的含植物水流糙率系数研究成果。Kouwen<sup>[9-10]</sup>进行了大量含淹没植物的水槽试验, 提出了含淹没柔性植物的水流阻力计算公式。Ursula<sup>[11]</sup>应用泥沙床面阻力研究成果对柔性植物的阻水特性进行了研究。Shucksmith<sup>[12]</sup>研究了芦苇和苔草在不同生长期对水流阻力的影响。Luhar<sup>[13]</sup>通过室内试验和原型观测重点研究了植物特性(如柔韧性和分布形式)对曼宁糙率系数的影响。国内在含植物河道水流阻力特性的研究方面起步较晚, 但近十年来在借鉴国外研究经验的基础上, 也取得了一系列研究成果。黄本胜<sup>[14]</sup>结合珠江流域堤外滩地种植防浪树的实际情况, 进行了多组模型试验, 给出了滩地种树对行洪影响的简单计算方法。李艳红<sup>[15]</sup>将含淹没植物水流垂线流速分布分为三个区域, 提出各区流速经验计算公式, 据此研究了曼宁糙率系数的垂线分布规律。吴福生<sup>[16]</sup>通过研究含淹没柔性植物水流的阻力特性, 得出曼宁糙率系数随相对水深的增大而减小的结论。曾玉红<sup>[17]</sup>利用应力计定量研究了非淹没刚性植被下的流动阻力, 发现雷诺数和能

收稿日期: 2016-08-24; 网络出版日期: 2017-07-13

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20170713.0912.004.html>

基金项目: 中国水利水电科学研究院科研专项项目(水集0822)

作者简介: 郑爽(1989-), 女, 河北唐山人, 硕士生, 主要从事河道生态水力学研究。E-mail: zhshgg1989@163.com

通讯作者: 穆祥鹏(1979-), 男, 天津人, 教授级高级工程师, 主要从事生态水力学、冰水力学研究。

E-mail: swood2002@163.com

坡对阻力系数影响明显。由于水生植物种类、生长密度及分布情况十分复杂，含水生植物河道的水流阻力问题大多偏重于机理性研究，不同学者从不同角度提出的曼宁糙率公式在工程应用上仍存在一定局限性<sup>[18]</sup>。

本文通过含淹没柔性水生植物水流的水槽系列试验和量纲分析，研究了植物挺立度、相对淹没高度及相对密植度对糙率的影响，得出了淹没状态下含柔性植物明渠流的等效曼宁糙率经验公式，为生态型河道行洪能力的设计提供依据。

## 2 含水生植物河道水流阻力理论分析

由于水生植物的存在，含植物河道的水力要素通常是沿程变化的。在恒定流条件下，流经植物段的水流一般为非均匀流，以下对含淹没水生植物明渠恒定非均匀流水流的阻力特性进行分析。

如图1所示，沿流向取两个控制断面之间长度为 $L$ 的植物段水体为控制体，建立直角坐标系，则控制体所受外力沿 $x$ 方向满足动量定理：

$$P_1 + F_G - F_{Vad} - F_0 - P_2 = \rho Q (U_2 - U_1) \quad (1)$$

式中： $P_1$ 、 $P_2$ 为控制体上下游断面所受动水压力； $F_G$ 为控制体所受重力沿 $x$ 方向的分量； $F_{Vad}$ 为控制体所受水生植物的附加阻力； $F_0$ 为无植物时原河床阻力； $\rho$ 为水体密度； $Q$ 为流量； $h_1$ 、 $h_2$ 和 $U_1$ 、 $U_2$ 分别为控制体上下游断面的水深和平均流速。

(1)控制体沿流向的重力分量 $F_G$ 。由于水面线是沿程变化的，取植物段内长为 $dx$ 的微元水体，水深为 $h(x)$ 。考虑植物所占水体体积，则微元水体所受重力分量为： $dF_G = \rho g i [Bh(x)dx - V_V MBdx]$ 。试验植物段内水深沿流程基本呈线性变化，则 $h(x) = h_1 + (h_2 - h_1)x/L$ 。对整个控制体进行积分，则控制水体所受重力沿流向 $x$ 的分量为：

$$F_G = \rho g i B \left[ \int_0^L h(x) dx - V_V ML \right] = \rho g i B L \left( \frac{h_1 + h_2}{2} - V_V M \right) \quad (2)$$

式中： $i$ 为水槽底坡； $B$ 为水槽宽度； $L$ 为控制体长度； $V_V$ 为单株植物所占水体的体积； $M$ 为单位面积内植物株数，则 $BLV_V M$ 为控制体内植物所占水体总体积。

(2)上下游断面所受动水压力 $P_1$ 和 $P_2$ 分别按静水压力分布考虑，则：

$$P_1 = \rho g B \frac{h_1^2}{2}, \quad P_2 = \rho g B \frac{h_2^2}{2} \quad (3)$$

(3)控制体受植物及原河床影响的等效阻力 $F_V$ 为植物附加阻力 $F_{Vad}$ 和无植物河床阻力 $F_0$ 之和，即

$$F_V = F_{Vad} + F_0 = (\tau_{vad} + \tau_0) \chi L = \tau_v \chi L \quad (4)$$

式中： $\tau_v = \tau_{vad} + \tau_0$ 为水生植物及原河床边界综合作用在河床上的等效剪应力； $\tau_{vad}$ 和 $\tau_0$ 分别为植物附加剪应力和无植物时河床的剪应力； $\chi = B + 2h$ 为矩形过水断面湿周。

将式(2)、式(3)和式(4)代入动量方程(1)，即得等效剪应力 $\tau_v$ 的表达式：

$$\tau_v = \rho g \left( \frac{B}{\chi L} \frac{h_1^2 - h_2^2}{2} + i \frac{B}{\chi} \left( \frac{h_1 + h_2}{2} - V_V M \right) + \frac{Q}{g \chi L} (U_1 - U_2) \right) \quad (5)$$

含水生植物河道的水流一般为充分发展的紊流，且多属阻力平方区，水流对含水生植物河床边界的摩擦阻力作用的大小，可由摩阻流速 $U_*$ 表示，其表达式为<sup>[19]</sup>：

$$U_* = \sqrt{\tau_v / \rho} = \sqrt{g R J} \quad (6)$$

由于 $\tau_v$ 是定义为作用在河床边界的等效剪应力，所以可近似应用均匀流的关系式： $\tau_v = \rho g R J$ ，

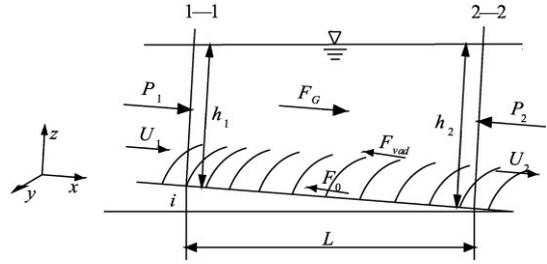


图1 含淹没植物水流受力分析

$n_v = R^{2/3} J^{1/2} / U$ ，从而得到与含水生植物河床边界阻力相对应的等效曼宁糙率系数 $n_v$ 表达式：

$$n_v = \sqrt{\tau_v R^{1/3} / \rho g U^2} \quad (7)$$

式中： $n_v$ 为含水生植物河道的等效曼宁糙率系数； $g$ 为重力加速度； $R$ 和 $U$ 为控制体的平均水力半径和平均流速。本文试验研究的目的，即确定含淹没柔性水生植物河道的等效曼宁糙率系数 $n_v$ 。

### 3 试验方法及试验成果

**3.1 试验装置及模型植物** 试验采用矩形顺直循环水槽，该水槽长20 m，宽0.6 m，高0.6 m，槽底坡度0.3%。水槽上游连接水箱，通过上水管阀门控制流量，下游尾端布设尾门以调节水深，水流经尾门跌入水池，流经稳水设施及消能渠段后，接矩形量水堰测量流量。水槽沿程布置5个水位测站(1#—5#)(见图2)，水位由精度0.1 mm的测针测量。模型植物由低密度聚乙烯薄膜制作，材料密度 $920\text{kg/m}^3$ ，弹性模量 $3.0 \times 10^8 \text{Pa}$ ，厚度0.1 mm；一条叶片高13 cm，宽3 mm，每株含5个叶片；植株的茎为木质，其直径6.3 mm，高20 mm。水槽底部全部铺设灰塑料板，板上通过钻孔固定植物，两相邻孔的圆心间距为0.06 m(见图3(a)(b))。模型植物在水槽底部交叉种植，种植区长度为10 m。

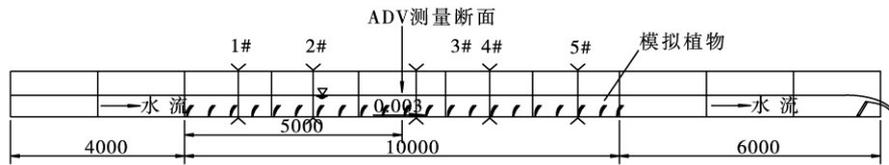


图2 试验布置示意图(单位: mm)

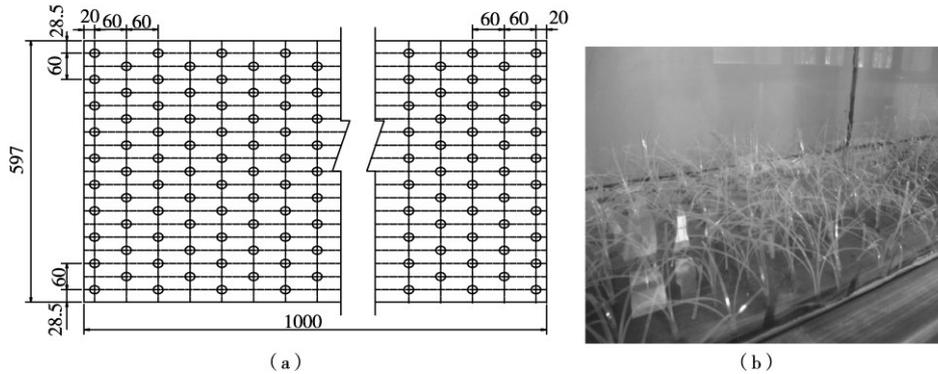


图3 试验植物平面布置示意图

**3.2 试验成果** 试验采用 $M_0=0$ 株/ $\text{m}^2$ 、 $M_1=142$ 株/ $\text{m}^2$ 、 $M_2=198$ 株/ $\text{m}^2$ 、 $M_3=269$ 株/ $\text{m}^2$ 共4种植物生长密度，针对每种生长密度设0.25、0.30、0.35、0.40和0.45m共5组控制水深(以5#水位站控制)，每组控制水深下调节0.04、0.06、0.08和0.10 $\text{m}^3/\text{s}$ 4级流量，共得出80组试验成果。每组试验工况还分别用水位测针测量植物倒伏后的平均有效高度 $h_v$ ，以研究植物相对淹没高度和生长密度对水流等效曼宁糙率系数的影响。

试验成果分别按每一种植物生长密度 $M_0—M_3$ 给出等效曼宁糙率系数 $n_v$ 及其对应的雷诺数、弗劳德数及各项水力指标。由于篇幅有限，本文只给出 $M_3$ 相应的试验成果，表中同时列出对应水力条件下无植物( $M_0$ )的曼宁糙率系数 $n_0$ ， $n_0$ 平均值为0.011，符合试验水槽玻璃侧壁和灰塑料底板的糙率预期，如表1所示。表中同时列出 $n_v/n_0$ 的比值，以说明水生植物的存在对曼宁糙率系数的附加影响。

植物高度是影响水流阻力的重要因素之一。在水流流速的作用下，植物产生倒伏现象，植物的倒伏高度 $\Delta h_v = h_{v0} - h_v$ ，即倒伏度 $\xi = \Delta h_v / h_{v0} = 1 - \delta$ ，定义 $\delta = h_v / h_{v0}$ 为挺立度， $h_{v0}$ 为植物在空气中的平

表1  $M_3=269$ 株/m<sup>2</sup>的试验成果

$H_c/m$	$Q/(m^3/s)$	$h/m$	$U/(m/s)$	$Fr$	$Re \times 10^4$	$J/\%$	$h_e/h$	$h_e/h_{e0}$	$n_v$	$n_0$	$n_v/n_0$
0.25	0.04	0.24	0.29	0.19	3.83	1.07	0.32	0.60	0.0292	0.0123	2.37
	0.06	0.24	0.41	0.27	5.46	1.77	0.29	0.53	0.0267	0.0108	2.48
	0.08	0.25	0.54	0.35	7.25	2.61	0.27	0.50	0.0248	0.0107	2.31
	0.10	0.25	0.66	0.42	9.04	3.72	0.25	0.48	0.0242	0.0108	2.24
0.30	0.04	0.29	0.24	0.14	3.51	0.67	0.31	0.68	0.0297	0.0108	2.76
	0.06	0.29	0.34	0.20	5.01	1.18	0.27	0.59	0.0279	0.0111	2.51
	0.08	0.29	0.45	0.27	6.68	1.83	0.26	0.58	0.0263	0.0118	2.22
	0.10	0.30	0.57	0.33	8.36	2.61	0.24	0.54	0.0253	0.0114	2.23
0.35	0.04	0.34	0.21	0.11	3.24	0.46	0.30	0.77	0.0299	0.0105	2.85
	0.06	0.34	0.29	0.16	4.64	0.78	0.23	0.60	0.0276	0.0108	2.56
	0.08	0.34	0.39	0.21	6.19	1.10	0.22	0.58	0.0248	0.0114	2.16
	0.10	0.34	0.49	0.27	7.76	1.63	0.21	0.56	0.0242	0.0116	2.08
0.40	0.04	0.39	0.18	0.09	3.01	0.31	0.28	0.82	0.0293	0.0098	2.98
	0.06	0.39	0.26	0.13	4.30	0.51	0.22	0.67	0.0267	0.0103	2.59
	0.08	0.39	0.34	0.17	5.75	0.77	0.21	0.62	0.0246	0.0114	2.15
	0.10	0.39	0.43	0.22	7.22	1.13	0.20	0.60	0.0239	0.0111	2.15
0.45	0.04	0.44	0.16	0.08	2.81	0.19	0.27	0.90	0.0261	0.0099	2.65
	0.06	0.44	0.23	0.11	4.01	0.34	0.21	0.72	0.0251	0.0116	2.17
	0.08	0.44	0.30	0.15	5.37	0.49	0.20	0.66	0.0227	0.0120	1.89
	0.10	0.44	0.38	0.18	6.74	0.72	0.19	0.64	0.0220	0.0118	1.87

注： $H_c$ 为控制水深； $Q$ 为控制流量； $h=(h_1+h_5)/2$ 为平均水深； $U=Q/A$ 为平均流速， $A=(Bh_1+Bh_5)/2$ ； $Fr=U/\sqrt{gh}$ 为弗劳德数； $Re=UR/v$ 为雷诺数， $R=(R_1+R_5)/2$ 为水力半径； $J=\Delta h/L$ 为水面坡降， $\Delta h=h_1-h_5$ ； $h_e/h$ 为植物相对淹没高度。

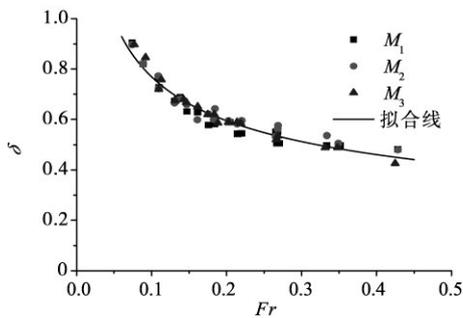


图4 挺立度 $\delta$ 与 $Fr$ 的拟合情况

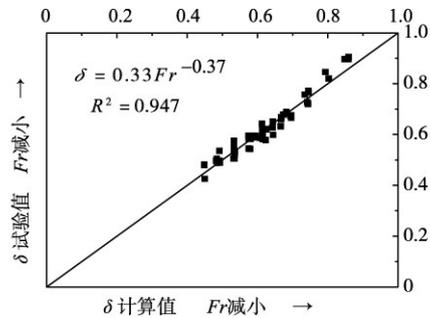


图5 挺立度 $\delta$ 计算值与实际值的比较

均直立高度， $\delta(0 < \delta \leq 1)$ 是表征水生植物抵抗水流作用下倒伏的参数，以此对植物的倒伏现象进行定量分析。

图4表明：植物挺立度 $\delta$ 随水流弗劳德数 $Fr$ 的增加而逐渐递减，且该规律受植物生长密度 $M$ 变化的影响较小。对图4的试验数据点进行拟合，得到淹没状态下柔性水生植物挺立度的经验公式：

$$\delta = 0.33Fr^{-0.37} \quad (8)$$

柔性水生植物挺立度 $\delta$ 和水流弗劳德数 $Fr$ 的相关性如图5所示，相关系数0.973，可决系数0.947，说明挺立度 $\delta$ 和 $Fr$ 的相关性显著。

综上所述，水生植物的生长密度 $M$ 对植物的挺立度 $\delta$ 影响不显著，但是和水流弗劳德数 $Fr$ 密切相关。对于不同种类的植物，由于植物柔韧度不同，公式(8)中的系数和指数是不同的，这有待今后对各种特定植物进行试验率定。

## 4 试验成果分析

**4.1 量纲分析** 根据量纲分析理论<sup>[20-21]</sup>, 将影响含水生植物河道等效曼宁糙率系数的各项物理参变量, 以隐函数形式给出:

$$\Phi(n_v, n_0, U, h, B, \rho, g, \mu, h_v, M, \alpha, \beta, \dots) = 0 \quad (9)$$

式中:  $n_v$  为含水生植物河道等效曼宁糙率系数;  $n_0$  为基础(无水生植物河道)曼宁糙率系数;  $U$  为河道断面平均流速;  $h$  为河道平均水深;  $B$  为河道宽度;  $\rho$  为水的密度;  $g$  为重力加速度(取  $9.8 \text{ m/s}^2$ );  $\mu$  为动力粘滞系数;  $h_v$  为植物倒伏后的平均有效高度;  $M$  为植物的生长密度;  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\dots$  为与植物种类及生长状态有关的系数。

式(9)进行无量纲化处理后:

$$\Phi_1\left(\frac{n_v}{n_0}, Fr, Re, h_v/h, N, \alpha, \beta, \dots\right) = 0 \quad (10)$$

式中:  $h_v/h$  为植物相对淹没高度, 表示植物倒伏后平均有效高度与平均水深的比值; 植物生长密度  $M$  的量纲有其特殊性, 我们采用植物相对密植度  $N = M/M_{\min}$  作为表征植物生长密度  $M$  的无量纲表达式, 其中  $M_{\min}$  为单位面积最少植物株数, 并定义  $M_{\min} = 1 \text{ 株/m}^2$ ;  $Fr$  为水流弗劳德数;  $Re$  为水流雷诺数。

将式(10)中的等效曼宁糙率系数写成显函数形式, 即:

$$\frac{n_v}{n_0} = f(Fr, Re, h_v/h, N, \alpha, \beta, \dots) \quad (11)$$

由于  $n_v$  与  $n_0$  相应的水流及几何条件相同, 因此当用  $n_0$  作为  $n_v$  的无量纲尺度时, 即认为  $\frac{n_v}{n_0}$  已包含了全部与水流及几何条件有关的特征参数的影响, 则式(11)将不再出现与水流相关的特征量, 因而可简化成如下形式:

$$\frac{n_v}{n_0} = f(h_v/h, N, \alpha, \beta, \dots) \quad (12)$$

$$n_v = n_0 f(h_v/h, N, \alpha, \beta, \dots) \quad (13)$$

在含水生植物河道等效曼宁糙率系数  $n_v$  的函数表达式(13)中, 将  $f(h_v/h, N, \alpha, \beta, \dots)$  定义为水生植物“附加曼宁糙率系数函数”。函数  $f$  的主要自变量为植物相对淹没高度  $h_v/h$ 、相对密植度  $N$  以及与植物种类和生长状态有关的参数  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\dots$  等。其中植物相对淹没高度满足  $0 \leq h_v/h \leq 1$ , 相对密植度  $N \geq 0$ ; 而  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\dots$  是受植物种类及生长状态影响的无量纲系数。因此, 寻求含水生植物河道的等效曼宁糙率系数, 归结为寻求各类水生植物的“附加曼宁糙率系数函数”  $f$  的统一表达式。

**4.2 水生植物“附加曼宁糙率系数函数”** 含水生植物河道的“附加曼宁糙率系数函数”  $f(h_v/h, N, \alpha, \beta, \dots)$  有如下性质: 当植物相对淹没度  $h_v/h = 0$  时, 有  $n_v/n_0 = f(0, N, \alpha, \beta, \dots) = 1$ ; 当相对密植度  $N = 0$  时, 有  $n_v/n_0 = f(h_v/h, 0, \alpha, \beta, \dots) = 1$ 。实际上, 无论是  $h_v/h = 0$  或  $N = 0$ , 都意味着河道内无水生植物存在, 所以得出  $n_v = n_0$  是合理的, 这也为寻求  $f(h_v/h, N, \alpha, \beta, \dots)$  的函数表达式提供了边界条件和依据。

**4.2.1 等效曼宁糙率系数  $n_v$  与相对淹没高度  $h_v/h$  的关系** 通过对全部试验成果进行分析, 由  $h_v/h = 0$ ,  $f(0, N, \alpha, \beta, \dots) = 1$  的约束条件, 确定  $n_v/n_0$  与植物相对淹没高度  $h_v/h$  二者存在以  $e$  为底的指数函数关系, 如图 6 所示。

从  $n_v/n_0 \sim e^{(h_v/h)}$  的关系图可看出, 二者之间呈线性变化。对  $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$  三种相对密植度下的试验数据分别进行分析与拟合, 得出不同相对密植度  $N$  的  $n_v/n_0 \sim e^{(h_v/h)}$  的直线关系方程为:

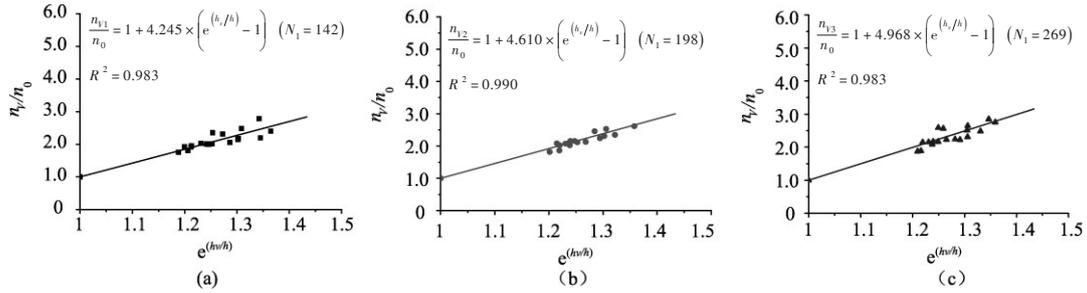


图6  $N_1 = 142$ ,  $N_2 = 198$ ,  $N_3 = 269$ ,  $n_v/n_0$ 随 $e^{(h_v/h)}$ 的拟合曲线

$$n_{v1}/n_0 = 1 + 4.245 \left( e^{(h_v/h)} - 1 \right) \quad (N_1 = 142) \quad (14)$$

$$n_{v2}/n_0 = 1 + 4.610 \left( e^{(h_v/h)} - 1 \right) \quad (N_2 = 198) \quad (15)$$

$$n_{v3}/n_0 = 1 + 4.968 \left( e^{(h_v/h)} - 1 \right) \quad (N_3 = 269) \quad (16)$$

4.2.2 等效曼宁糙率系数 $n_v$ 与相对密植度 $N$ 的关系 通过式(14)—(16)可以看出,  $n_v/n_0$ 与 $\left( e^{(h_v/h)} - 1 \right)$ 满足直线方程, 该方程的斜率随着植物相对密植度 $N$ 的增加而增加。由 $N=0$ ,  $f(h_v/h, 0, \alpha, \beta, \dots) = 1$ 的约束条件, 发现直线斜率(设为 $\phi(N)$ )与植物相对密植度 $N$ 存在幂函数关系, 即 $\phi(N) = \alpha N^\beta$ 。由此得出淹没柔性水生植物的“附加曼宁糙率系数函数”如下式所示:

$$\frac{n_v}{n_0} = f(h_v/h, N, \alpha, \beta, \dots) = 1 + \alpha N^\beta \left( e^{h_v/h} - 1 \right) \quad (17)$$

由式(14)—(16)可见, 三种相对密植度 $N$ :  $N_1 = 142$ ,  $N_2 = 198$ ,  $N_3 = 269$ , 对应的 $\phi(N)$ 应满足如下等式:

$$\phi(N_1) = \alpha (142)^\beta = 4.245 \quad (18)$$

$$\phi(N_2) = \alpha (198)^\beta = 4.610 \quad (19)$$

$$\phi(N_3) = \alpha (269)^\beta = 4.969 \quad (20)$$

对式(18)—(20)分别取对数并进行拟合, 最后得到 $\alpha = 1.23$ ,  $\beta = 1/4$ , 代入式(17), 并引用植物挺立度公式(8), 至此, 我们得出了适用于本次系列试验在不同的 $h_v/h$ 和 $N$ 条件下的“附加曼宁糙率系数函数”和等效曼宁糙率系数的经验公式如下:

$$\begin{cases} \frac{n_v}{n_0} = 1 + 1.23 \times \sqrt[4]{N} \left( e^{\delta \frac{h_{v0}}{h}} - 1 \right) \\ \delta = 0.33 Fr^{-0.37} \end{cases} \quad (21)$$

将式(21)的 $n_v/n_0$ 计算值与试验值的进行比较, 并以其他学者<sup>[22-23]</sup>的试验数据予以验证。其结果如图7所示, 相关系数达到0.93, 即 $n_v/n_0$ 的计算值和理论值相关性良好。这说明经验公式(21)能较好地反映在淹没状态下含柔性水生植物河道水流的阻力特性。

4.3 通用等效曼宁糙率系数经验公式 上述对淹没状态下含柔性水生植物河道等效曼宁糙率系数经验公式(21)的研究, 我们得到了“附加曼宁糙率系数函数”的表达式:  $f\left( e^{h_v/h}, \sqrt[4]{N}, \alpha, \beta, \dots \right)$ 。进一步推论, 我们获得了适用于含不同植物种类( $i$ )的淹没柔性水生植物河道的通用等效曼宁糙率系数经验公式如下:

$$\begin{cases} n_v = n_0 \left( 1 + \alpha_i \sqrt[4]{N} \left( e^{\delta_i \frac{h_{v0}}{h}} - 1 \right) \right) \\ \delta_i = \gamma_i Fr^{\omega_i} \end{cases} \quad (22)$$

式中： $\alpha_i$ 、 $\delta_i$ 、 $\gamma_i$ 、 $\omega_i$ 分别为针对不同植物种类( $i$ )和生长状态的参数，它们需要通过对特定的水生植物进行水力试验或野外观测确定。

综上所述，含淹没柔性水生植物河道通用等效曼宁糙率系数经验公式(22)包含了影响含水生植物河道曼宁糙率系数 $n_v$ 的主要参数：植物种类( $i$ )、植物相对淹没高度 $h_v/h$ 及植物相对密植度 $N$ 等。公式物理意义明确，形式简单，结构合理，具有较强的实用性和可操作性。

在实际生态河道修复工程中，利用式(22)对含淹没柔性水生植物河道等效曼宁糙率系数 $n_v$ 进行估值时可按以下步骤进行：(1)确定河道的基础曼宁糙率系数 $n_0$ ，一般可从水力计算手册或工程设计手册中查得，或由经验确定；(2)确定设计水力条件，如流量 $Q$ 、水深 $h$ 、流速 $U$ 等，并在野外估算水生植物的平均直立高度 $h_{v0}$ 及平均单位面积内水生植物的生长密度 $M$ ，从而确定 $h_{v0}/h$ 和 $N$ ；(3)确定水生植物挺立度 $\delta_i$ ，由于其值变化不大( $0 < \delta_i \leq 1$ )，它可通过野外考察或参考公式 $\delta = 0.33 Fr^{-0.37}$ 根据水流条件和植物的柔韧度估算；(4)确定 $\alpha_i$ ，其取值一般应通过水力试验或原型观测获得，在没有资料可循的条件下，我们初步建议： $\alpha_i$ 在1.0~2.0之间取值，对柔性大的植物取1.1~1.5，对刚度大的植物，可取1.5~2.0，对于重要工程宜通过水力试验率定。

## 5 结论

基于水槽系列试验和量纲分析，得出如下结论：

(1)试验表明，淹没柔性水生植物在中等生长密度( $M \leq 500$ 株/ $m^2$ )条件下，植物在流水中的挺立度 $\delta$ 和水流弗劳德数 $Fr$ 密切相关，而生长密度 $M$ 对 $\delta$ 的影响不显著；

(2)试验表明，淹没状态下含柔性水生植物河道的等效曼宁糙率系数 $n_v$ 与植物相对淹没高度 $h_v/h$ 二者具有指数函数( $e^{(h_v/h)}$ )关系，与植物相对密植度 $N$ 二者具有根式函数( $\sqrt[4]{N}$ )关系；

(3)量纲分析得出含水生植物河道等效曼宁糙率系数经验公式 $n_v = n_0 f(h_v/h, N, \alpha, \beta, \dots)$ 。通过试验数据回归分析得出的含淹没柔性水生植物河道的通用等效曼宁糙率系数经验公式如(22)所示；

(4)式(22)的通用性，尚有待更多的水力试验和原型观测验证。

致谢：本文承谢省宗教教授给予帮助，并提出宝贵意见，特此表示感谢！

## 参 考 文 献：

- [ 1 ] CURRAN J C, HESSION W C . Vegetative impacts on hydraulics and sediment processes across the fluvial system [J] . Journal of Hydrology, 2013, 505(8) : 364-376 .
- [ 2 ] 侯俊 . 生态型河道构建原理及应用技术研究[D] . 南京：河海大学，2005 .
- [ 3 ] SUKHODOLOV A N, SUKHODOLOVA T A . Vegetated mixing layer around a finite-size patch of submerged plants: Part 2. Turbulence statistics and structures[J] . Water Resources Research, 2012, 48(12) : 12506 .
- [ 4 ] CHEN S C, CHAN H C, LI Y H . Observations on flow and local scour around submerged flexible vegetation[J] . Advances in Water Resources, 2012, 43(6) : 28-37 .
- [ 5 ] BRAUDRICK C A, DIETRICH W E, LEVERICH G T, et al . Experimental evidence for the conditions necessary

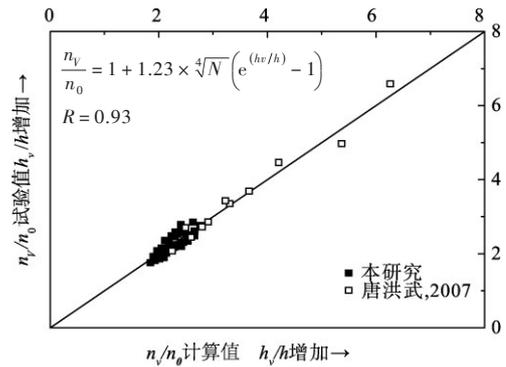


图7  $n_v/n_0$ 理论值与试验值的误差曲线

- to sustain meandering in coarse-bedded rivers[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106 (40): 16936-16941.
- [ 6 ] ABERLE J, JÄRVELÄ J. Flow resistance of emergent rigid and flexible vegetation[J]. Journal of Hydraulic Research, 2013, 51(1): 33-45.
- [ 7 ] NEPF H M. Hydrodynamics of vegetated channels[J]. Journal of Hydraulic Research, 2012, 50(3): 262-279.
- [ 8 ] CHOW V T. Open-Channel Hydraulics[M]. McGraw-Hill College, New York, 1959.
- [ 9 ] KOUWEN N, UNNY T E. Flexible roughness in open channel[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1973, 99 (5): 713-728.
- [ 10 ] KOUWEN N, LI R M, SIMONS D B. Flow resistance in vegetated waterways [J]. Transactions of the Asae, 1981, 24(3): 684-690.
- [ 11 ] URSULA S, KARL W. Experiments on hydraulic roughness of macrophytes[A]. Environmental Hydraulics and Eco-Hydraulics, Proc. Theme B. XXIX IAHR Congress. Beijing, 2001: 358-363.
- [ 12 ] SHUCKSMITH J D, BOXALL J B, GUYMER I. Bulk flow resistance in vegetated channels: Analysis of momentum balance approaches based on data obtained in aging live vegetation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 137(137): 1624-1635.
- [ 13 ] LUHAR M, NEPF H M. From the blade scale to the reach scale: A characterization of aquatic vegetative drag [J]. Advances in Water Resources, 2013, 51(51): 305-316.
- [ 14 ] 黄本胜, 赖冠文. 河滩种树对行洪影响试验研究[J]. 水动力学研究与进展: A辑, 1999(4): 468-474.
- [ 15 ] 李艳红, 赵敏. 含植物河流动力学实验研究—流速、摩阻流速及曼宁糙率系数垂线分布[J]. 水动力学研究与进展, 2004, 19(4): 513-519.
- [ 16 ] 吴福生. 柔性植物阻流特性研究[J]. 水利学报, 2007, 38(S1): 288-292.
- [ 17 ] 曾玉红, 槐文信, 张健, 等. 非淹没刚性植被流动阻力研究[J]. 水利学报, 2011, 39(7): 834-838.
- [ 18 ] 吴一红, 郑爽, 白音包力皋, 等. 含植物河道水动力特性研究进展[J]. 水利水电技术, 2015, 46(4): 123-129.
- [ 19 ] 窦国仁. 紊流力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987.
- [ 20 ] 谢多夫(Л.И.Седов). 力学中的相似方法和量纲理论[M]. 沈青译. 北京: 科学出版社, 1982.
- [ 21 ] 李桂芬, 谢省宗. 量纲分析及其应用. 现代工程数学手册[M]. 第二卷. 武汉: 华中工学院出版社, 1985.
- [ 22 ] 闫静. 含植物明渠水流阻力及紊流特性的实验研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [ 23 ] 唐洪武, 闫静, 肖洋, 等. 含植物河道曼宁阻力系数的研究[J]. 水利学报, 2007, 38(11): 1347-1353.

## Experimental research on Manning's roughness coefficient of an open channel with aquatic vegetation

ZHENG Shuang, WU Yihong, Baiyinbaoligao, MU Xiangpeng

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research,

State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Aquatic vegetation is an important part of the river ecosystem, but the presence of them increases the flow resistance and reduces the flood capacity. Thus, to carry out the research on Manning's roughness coefficient in vegetated channel has important guiding significance for the comprehensive management of river ecosystem. Based on a series of flume experiments with vegetated open-channel flow and dimensional analysis theory, the plant upright degree, the relative submerged height and the relative planting density of vegetation effects on the channel roughness are analyzed in this paper. And a universal equivalent Manning's roughness empirical formula is deduced which is applicable to the open channel with submerged aquatic vegetation. The formula is  $n_v = n_0 \left( 1 + \alpha_i \sqrt[4]{N} \left( e^{\delta_i \frac{h_{sv}}{h}} - 1 \right) \right)$ ,  $\delta_i = \gamma_i Fr^{\omega_i}$ . In which,  $\alpha_i$ ,  $\delta_i$ ,  $\gamma_i$ ,  $\omega_i$  are the parameters for different plant species ( $i$ ) and growth parameters, and they need to be determined by hydraulic experiments or field observations of specific aquatic plants.

**Keywords:** aquatic vegetation; plant upright degree; relative submerged height; relative planting density; equivalent Manning's roughness coefficient

(责任编辑: 李福田)