

人在洪水中的稳定性分析

曹留伟, 钟桂辉, 刘曙光, 武秀根

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 综合考虑人体生物力学及洪水对人体的作用力, 将人体静止失稳分成倾覆失稳和滑移失稳两种形式, 推导出人在洪水中两种临界失稳满足的方程, 对人体失稳的影响因素进行了分析. 应用 Lagrange 方法在仅考虑一个广义坐标下推导了人在洪水中正常行走满足的微分方程, 应用高阶 Runge-Kutta 法求解其数值解, 并对人在洪水中正常行走的影响因素进行了分析. 将人体静止临界失稳及洪水中正常行走的水深和流速值与试验结果比较, 结果表明本文提出的方法能较好地确定人在洪水中失稳和正常行走满足的条件.

关键词: 洪水作用力; 失稳分析; 人体生物力学; Lagrange 方法

中图分类号: TV135.9

文献标志码: A

Analysis of Human Instability in Flood Flow

CAO Liuwei, ZHONG Guihui, LIU Shuguang, WU Xiugen
(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: By taking into consideration the human biomechanics and the flood actions on the human body comprehensively, the study divides the human instability in the flood flow into two types, including tumbling type and slipping type. The equations of two types of critical human instability are deduced and the factors influencing on human stability are analyzed. Then, the ordinary differential equations are deduced by taking only one generalized coordinate into consideration with Lagrange method. The numerical solutions are solved by higher Runge-Kutta method and the factors influencing on human walking in the flood flow are researched. A comparative study is made of the flood depths, the corresponding flood velocities with its experimental values when human losing their stability and walking in the flood flow normally. The results indicate the conditions of human critical instability and walking ordinarily are determined preferably by the proposed method.

Key words: flood loads; stability analysis; human biomechanics; Lagrange method

洪水灾害是人类面临的最严重的自然灾害之一, 引起的人员死亡占自然灾害人员死亡的 55%^[1]. 随着全球气候、气象条件的改变, 洪水的突发性几率增加, 人在突发性洪水中伤亡现象会越来越多. 因此, 有必要研究和探讨人在洪水中稳定性问题, 即研究人在不同洪水要素(水深、流速)条件下静止和行走的安全稳定性问题.

影响人在洪水中稳定性的因素有很多, 主要包括洪水要素(水深、流速、水温、水流的突变性、洪水中夹带的漂流物), 人体要素(身高、体重、人体着装、年龄及健康程度), 地面要素(坡度、粗糙度), 物理条件(光照可见度、风速条件)^[2]. 针对人在洪水中稳定性问题, 研究者大多采用洪水的水深 h 和流速 U 的乘积, 即 $h \times U$ 数值大小来确定人在洪水中失稳的临界条件, 通过物理试验或现场试验测试健康良好的人体在洪水中静止、行走、转弯失稳时洪水对应的水深、流速组合值, 通过公式拟合得出 $h \times U$ 和人体质量 m 、身高 H 的函数, 即 $h \times U = f(m, H)$ ^[2-7]. 试验结果表明^[2-7]: 当地面坡度小于 1.5% 时, 坡度大小对人体失稳时 $h \times U$ 临界值影响较小, 可以忽略; 人体着装对人体所受到的浮力和拖曳力大小影响较大, 因此对人体失稳时 $h \times U$ 临界值影响较大; 不同性别的人体对洪水抵抗能力不同, 性别因素对人体失稳时 $h \times U$ 临界值影响最大, 一般健康男性失稳时 $h \times U$ 临界值是女性的 1.3 倍左右^[3-4]. 理论研究方面, 文献^[2, 4, 8]忽略了洪水对人体浮力作用和人体本身机能, 仅考虑水流拖曳力, 将人体等效为具有一定宽度的长方体, 分析人静止失稳时水深和流速满足的关系式.

收稿日期: 2012-11-19

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(0290219007); 公益性行业(气象)科研专项经费项目(GYHY201306055)

第一作者: 曹留伟(1982—), 男, 博士生, 主要研究方向为结构防灾减灾. E-mail: caoliuwei0510@sina.com

通讯作者: 刘曙光(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为水利及岩土工程. E-mail: liusglu@tongji.edu.cn

本文推导了人静止于洪水中倾覆失稳和滑移失稳满足的方程,利用 Lagrange 方法推导了人在洪水中正常行走满足的微分方程并给出数值解,对今后的相关研究方向提出了一些建议。

1 人在洪水中静止时受力及失稳分析

1.1 受力分析

人在洪水中静止时,人体在水平方向上主要受到拖曳力 f_D 和摩擦力 F_s ,在竖直方向上主要受到自身重力 G 、地面支持力 N 和浮力 F_B 。受力分析见图 1。

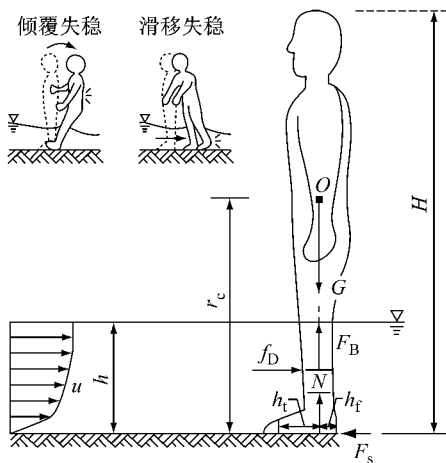


图 1 人体在洪水中受力和失稳模型
Fig.1 Force and instability models of human body in flood flow

(1) 有效重力 G_E

人体在洪水中静止时所受到的有效重力为自身重力和浮力的合力,作用力表达式为

$$G_E = G - F_B = mg - \gamma_w V_w \quad (1)$$

式中: g 为重力加速度, γ_w 为洪水重度, V_w 为人在洪水中的淹没体积。

(2) 拖曳力 f_D

水流拖曳力主要是人体表面与水流的摩擦阻力及迎流面、背流面的压力差产生,洪水水面以下任意一点单位水深和宽度的拖曳力^[9]

$$f_D = \frac{1}{2} C_D \rho_w u^2 \quad (2)$$

式中: C_D 为拖曳力系数(和两脚之间的宽度、水深、水流方向与人体纵轴的夹角有关,当水流方向和纵轴方向平行时取 1.1^[8]), ρ_w 为洪水密度, u 为水面以下任意一点洪水流速。

(3) 摩擦力 F_s

摩擦力是人体在洪水作用下由相对于地面运动

的趋势所产生,摩擦力的大小与地面和鞋底的粗糙程度以及地面对人体的支持力有关,其表达式为

$$F_s = \mu N = \mu G_E \quad (3)$$

式中: μ 为鞋底和地面的摩擦系数。

1.2 失稳分析

人静止在洪水中主要有两种失稳形式:倾覆失稳和滑移失稳。人体失稳分析时作如下假定:①人体各体段质心在同一铅垂轴上;②人体体积沿身高呈线性分布;③洪水流速满足指数分布。人体淹没体积 V_w 、洪水流速 u ^[10] 满足下式:

$$V_w = \frac{h}{H} V_P \quad (4)$$

$$u = u_{max} \left(\frac{y}{h} \right)^\beta \quad (5)$$

式中: V_P 为人体体积, u_{max} 为洪水表面流速, y 为计算点到洪水底面的垂直距离, β 为常数,取为 1/6。将式(5)两边沿垂线积分并将结果带入式(5)得

$$u = (\beta + 1)U \left(\frac{y}{h} \right)^\beta \quad (6)$$

式中: U 为沿水深垂线方向的平均流速。

下面分两种情况(人体直立和倾斜)来分析人体临界失稳时满足的临界条件。

(1) 人体直立

当洪水对人体的水平拖曳力大小等于人体与地面的摩擦力时,人体发生临界滑移失稳,即

$$\int_0^h f_D B dy = F_s \quad (7)$$

式中: B 为人体宽度,在计算中取人体肩宽、臀宽和脚宽的均值。将式(1)~(4)及式(6)带入式(7)整理得

$$hU^2 = A_1 \frac{\mu}{\rho_w B} (mg - \gamma_w V_w) \quad (8)$$

当有效重力、水平拖曳力对脚后跟产生的转矩大小相等时,人体发生临界倾覆失稳,即

$$\int_0^h f_D B y dy = G_E h_f \quad (9)$$

将式(1),(2),(4),(6)代入式(9)整理得

$$h^2 U^2 = A_2 \frac{h_f}{\rho_w B} (mg - \gamma_w V_w) \quad (10)$$

式中: $A_1 = [2(2\beta + 1)]/[C_D(\beta + 1)^2]$, $A_2 = [4(\beta + 1)]/[C_D(\beta + 1)^2]$, h_f 为人体质心与脚后跟之间的水平距离。当人体质量为 50~100 kg 时, V_P 可用下式计算^[11]:

$$V_P = 0.001015m - 0.004937 \quad (11)$$

(2) 人体倾斜

当人体整体向水流方向倾斜时,此时有效重力

G'_E 为

$$G'_E = mg - \rho_w g \frac{h}{H \sin \varphi} V_P \quad (12)$$

将式(9)中的 G_E 替换成 G'_E 可得人体倾斜时临界滑移失稳满足的条件. 临界倾覆失稳时满足

$$\int_0^h f_D B y dy = G'_E (r_c \cos \varphi + h_f) \quad (13)$$

将式(2),(4),(6),(12)代入式(13)整理得

$$h^2 U^2 = A_2 \frac{r_c \cos \varphi + h_f}{\rho_w B} \left(mg - \gamma_w \frac{h}{H \sin \varphi} V_P \right) \quad (14)$$

式中: r_c 为人体直立时整体质心与地面的距离, φ 为人体倾斜时铅垂轴与水平面的夹角, 其最小值由下式确定:

$$\varphi_{\min} = \arccos \frac{h_t}{r_c} \quad (15)$$

式中: h_t 为脚踝与第一跖骨之间的水平距离, 当 φ 取最小值时, 人体重心在水平面的投影和第一跖骨重合.

2 人在洪水中行走的稳定性分析

2.1 模型及方程的建立

人体行走是一个非常复杂的物理过程. 目前研究人体行走大多采用将人体各体段等效成刚体模型, 各体段的质量集中在质心处, 利用 Lagrange 方程推导出人体行走时各作用力、关节力矩满足的动力学方程, 方程未知量较多且方程形式复杂^[12-13]. 人体在一个步行周期内左右腿各摆动一次、各支撑地面一次且行走两步, 因此仅需研究一步内人体各体段的运动方式. 本文将人体分成上半身、摆动腿和支撑腿三个体段部分, 将其简化成刚体模型且各部分质量集中在质心处. 在方程建立过程中作如下假定: ①支撑腿在髋关节提供的关节力矩 M_{st} 作用下绕 O_1 点做倒单摆运动, 角速度为 $\dot{\theta}$; ②摆动腿在髋关节提供的关节力矩 M_{sw} 作用下相对于支撑腿末端 O_2 点做角速度为 $-\dot{\theta}$ 的单摆运动; ③上半身做平面运动, 平面运动的速度和方向等同于支撑腿末端 O_2 的速度; ④摆动腿、支撑腿与铅垂线的夹角始终相等. 人在洪水中行走的计算模型如图 2 所示.

由如上假定, 选取支撑腿和水平面的角度 θ 为广义坐标, 对应的 Lagrange 方程为

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial L}{\partial \theta} = F_\theta \quad (16)$$

$$L = T - E \quad (17)$$

式中: L 为 Lagrange 函数, T 为质点系的动能, E 为质点系的势能, F_θ 为广义力.

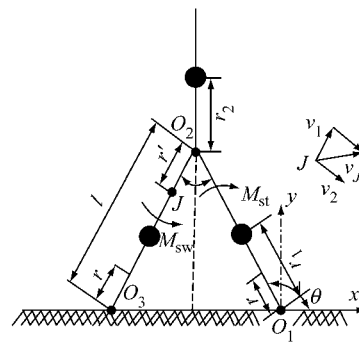


图 2 人在洪水中行走的计算简图
Fig. 2 Calculation diagram of human walking in flood flow

2.1.1 Lagrange 函数的求解

质点系中各质点的动能计算如下:

$$T_{st} = \frac{1}{2} (I_1 + m_1 r_1^2) \dot{\theta}^2 \quad (18)$$

$$T_{ub} = \frac{1}{2} m_2 v_{O_2}^2 = \frac{1}{2} m_2 l^2 \dot{\theta}^2 \quad (19)$$

式中: T_{st} , T_{ub} , I_1 , m_1 , m_2 , r_1 , l 分别为支撑腿的动能、上半身的动能、腿绕其质心的转动惯量、腿的质量、上半身质量、腿的质心到 O_1 点的距离和腿的长度. 距摆动腿 O_2 点为 r' 的任意一点 J 的速度 v_J 和动能 dT_J 分别为

$$v_J^2 = v_1^2 + v_2^2 - 2v_1 v_2 \cos 2\theta \quad (20)$$

$$v_1 = l \dot{\theta} \quad (21)$$

$$v_2 = r' \dot{\theta} \quad (22)$$

$$dT_J = \frac{1}{2} dm v_J^2 \quad (23)$$

将式(20)~(22)代入式(23)并沿腿长方向积分得摆动腿的动能

$$T_{sw} = \frac{1}{2} m_1 (l \dot{\theta})^2 + \frac{1}{2} \dot{\theta}^2 I_{sw}^{(O_2)} - m_1 l \dot{\theta}^2 r_c^{(O_2)} \cos 2\theta \quad (24)$$

式中: $I_{sw}^{(O_2)}$ 为摆动腿相对于 O_2 点的转动惯量, $r_c^{(O_2)}$ 为摆动腿相对于 O_2 的质心距离. 将式(24)表示成 r_1 的函数为

$$T_{sw} = \frac{1}{2} m_1 (l \dot{\theta})^2 + \frac{1}{2} \dot{\theta}^2 [I_1 + m_1 (l - r_1)^2] - m_1 l (l - r_1) \dot{\theta}^2 \cos 2\theta \quad (25)$$

选取地面为零势能面, 质点系中各质点势能为

$$E_{st} = E_{sw} = m_1 g r_1 \sin \theta \quad (26)$$

$$E_{ub} = m_2 g (l \sin \theta + r_2) \quad (27)$$

式中: E_{st} , E_{sw} , E_{ub} , r_2 分别为支撑腿、摆动腿、上半身

的势能、上半身质心距 O_2 点距离。

将式(18), (19), (25)~(27)代入式(17)求出 L , 然后代入方程(16)的左边整理得

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial L}{\partial \theta} = k_1 \ddot{\theta} + k_2 \dot{\theta}^2 + k_3 \quad (28)$$

其中 k_1, k_2, k_3 的值见表 1。

2.1.2 广义力 F_θ 的求解

距离支撑腿 O_1 、摆动腿 O_3 、髋关节 O_2 距离为 r 的任意一点坐标变分为

$$\begin{cases} \delta x_{st} = -r \sin \theta \delta \theta, & \delta y_{st} = r \cos \theta \delta \theta \\ \delta x_{ub} = -l \sin \theta \delta \theta, & \delta y_{ub} = l \cos \theta \delta \theta \\ \delta x_{sw} = -(2l-r) \sin \theta \delta \theta, & \delta y_{sw} = r \cos \theta \delta \theta \end{cases} \quad (29)$$

(1) 拖曳力虚功

当 $0 \leq h \leq l \sin \theta$ 时, 拖曳力虚功

$$\delta W_{f_D} = - \int_0^{h/\sin \theta} f_D \frac{B}{2} \sin \theta (\delta x_{st} + \delta x_{sw}) dr \quad (30)$$

将式(2), (6), (29)代入式(30)整理得

$$\delta W_{f_D} = \frac{1}{A_1} \rho_w U^2 B l h \sin \theta \delta \theta \quad (31)$$

当 $h > l \sin \theta$ 时, 拖曳力虚功

$$\delta W_{f_D} = - \int_0^l f_D \frac{B}{2} \sin \theta (\delta x_{st} + \delta x_{sw}) dr - \int_{l \sin \theta}^h f_D B \delta x_{ub} dy \quad (32)$$

将式(2), (6), (29)代入式(32)整理得到与式(31)相同的结果。

(2) 浮力虚功

当 $0 \leq h \leq l \sin \theta$ 时, 浮力虚功

$$\delta W_{F_B} = \int_0^{h/\sin \theta} \rho_w g \frac{1}{2H} V_P (\delta y_{st} + \delta y_{sw}) dr \quad (33)$$

将式(29)代入式(33)整理得

$$\delta W_{F_B} = \frac{1}{2} \rho_w g \frac{h^2}{H} V_P \cos \theta \csc^2 \theta \delta \theta \quad (34)$$

当 $h > l \sin \theta$ 时, 浮力虚功

$$\delta W_{F_B} = \int_0^l \rho_w g \frac{1}{2H} V_P (\delta y_{st} + \delta y_{sw}) dr + \int_{l \sin \theta}^h \rho_w g \frac{1}{H} V_P \delta y_{ub} dy \quad (35)$$

将式(29)代入式(35)整理得

$$\delta W_{F_B} = \rho_w g \frac{l}{H} V_P \left(\frac{l}{2} + h - l \sin \theta \right) \cos \theta \delta \theta \quad (36)$$

(3) 髋关节屈肌力力矩虚功

$$\begin{cases} \delta W_{hst} = -M_{st} \delta \theta \\ \delta W_{hsw} = -M_{sw} \delta \theta \end{cases} \quad (37)$$

当 $M_{st} = M_{sw} = M$ 时,

$$\delta W_{hst} = \delta W_{hsw} = -M \delta \theta \quad (38)$$

将式(31), (34), (36), (38)代入式(16)右端可得广义力 F_θ 的表达式, 则式(16)简化为

$$k_1 \ddot{\theta} + k_2 \dot{\theta}^2 + k_3 = k_4 \quad (39)$$

方程(39)为人在洪水中行走的动力学方程, 式(39)系数表达式见表 1。

表 1 方程(39)系数表达式

Tab.1 Coefficient expression of formula No.39		
系数	$0 \leq h \leq l \sin \theta$	$h > l \sin \theta$
k_1	$2I_1 + 2m_1 r_1^2 + 2m_1 l^2 + m_2 l^2 - 2m_1 l r_1 - 2m_1 l(l-r_1) \cos 2\theta$	
k_2	$2m_1 l(l-r_1) \sin 2\theta$	
k_3	$(2m_1 r_1 + m_2 l) g \cos \theta$	
k_4	$\frac{1}{A_1} \rho_w U^2 B l h \sin \theta + \frac{1}{2} \rho_w g \frac{h^2}{H} V_P \cos \theta \csc^2 \theta - 2M$	$\frac{1}{A_1} \rho_w U^2 B l h \sin \theta + \rho_w g \frac{l}{H} V_P \left(\frac{l}{2} + h - l \sin \theta \right) \cos \theta - 2M$

2.2 方程的求解

2.2.1 初始条件的确定

人体正常行走步距 S_L 与身高 H 及行走的频率 s_F 有关, 步距计算如下^[13]:

$$S_L = 0.004 s_F H \quad (40)$$

$$\begin{cases} \theta_{t=0} = \frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{S_L}{2l} \\ \dot{\theta}_{t=0} = \arcsin \left(\frac{S_L}{2l} \right) s_F / 30 \\ \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{S_L}{2l} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{S_L}{2l} \end{cases} \quad (41)$$

2.2.2 方程的数值解

方程(39)为二阶非线性常微分方程, 无解析解。

令 $x = \dot{\theta}$, 则式(39)和(41)可变为

$$\begin{cases} \dot{x} = -\frac{k_2}{k_1} x^2 - \frac{k_3}{k_1} + \frac{k_4}{k_1} \\ x_{t=0} = \arcsin \left(\frac{S_L}{2l} \right) s_F / 30 \end{cases} \quad (42)$$

方程(42)可采用四阶或五阶 Runge-Kutta 法求数值解。表 2 为人体基本生物力学参数, 参照表 2 的内容将动力学方程及初始条件有关的系数表示成 H 和 m 的形式。

图 3 和 4 分别为当 $m=75 \text{ kg}$, $H=1.8 \text{ m}$, $\rho_w=1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $s_F=60 \text{ step} \cdot \text{min}^{-1}$, $h=0.3 \text{ m}$, $M=0.9 \text{ m}$ 时, 在不同洪水流速下人体行走时角度、角速度随时间的变化。由图可知, 在给定初始角速度下, 洪水流速越大, 人体越不容易在洪水中正常行走。当人能在洪水中行走时, 角速度数值有先减小后增大的趋势; $\theta > \frac{\pi}{2}$ 对应点的角加速度数值小于关于

表 2 人体生物力学参数^[13-14]

Tab.2 Anthropometric values of body segments

人体体段	<i>i</i>	<i>l_i</i>	<i>m_i</i>	<i>R_i^l/l_i</i>	<i>χ_i^l/l_i</i>
上身	1	0.470 00	0.678	0.500	0.496
腿	2	<i>l₃+l₄</i>	<i>m₃+m₄</i>	0.553	0.326
大腿	3	0.236 69	0.100	0.433	0.323
小腿	4	0.245 56	0.061	0.606	0.416
体宽	5	0.160 00			
足部	6	0.147 00			
整体重心—足底	7	0.550 00			
脚踝—脚跟(水平)	8	0.029 59			
脚踝—足底(竖直)	9	0.038 46			
脚踝—第一跖骨(水平)	10	0.075 40			
第一跖骨—脚趾末端(水平)	11	0.042 01			
髋关节屈肌力矩 ^[15]			(0.8~1.5) <i>m</i>		

注:*l_i*,*m_i* 表示各体段长度与质量分别和身高 *H* 与人体质量 *m* 的比值,*R_i^l* 为质心到各关节距离,*χ_i^l* 为旋转半径.

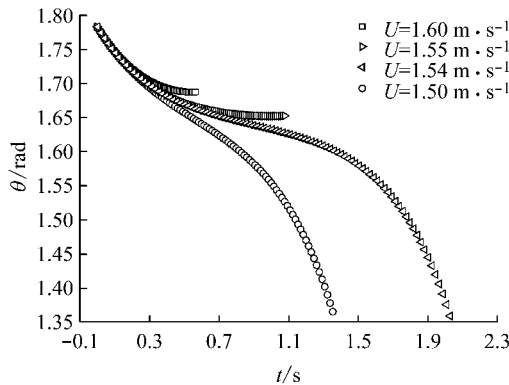


图 3 不同洪水流速情况下角度随时间变化

Fig.3 The relationship between angle and time at different flood flow velocities

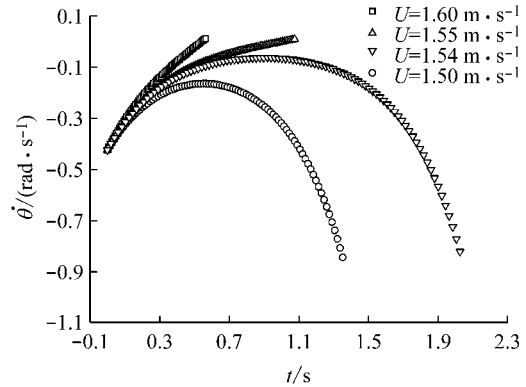


图 4 不同洪水流速情况下角速度随时间的变化

Fig.4 The relationship between angle rate and time at different flood flow velocities

$\theta = \frac{\pi}{2}$ 对称的对应点的角加速度值(约为 1.57 rad).

其原因为:当 $\theta > \frac{\pi}{2}$ 时髋关节屈肌力矩由克服重力和洪水阻力做功变成髋关节屈肌力矩和重力克服洪水阻力做功。 $U = 1.54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为对应水深人体正常行走的流速临界值.

3 结果试验验证及分析

3.1 结果试验验证

表 3 为科研工作者对在洪水中稳定性试验研究所采用的试验对象、设备参数的基本状况.

表 3 试验参数对比

Tab.3 Comparison of experimental test parameters

文献	<i>H/m</i>	<i>m/kg</i>	<i>h/m</i>	<i>U/(m·s⁻¹)</i>	设备	设备底面材料
文献[3]	1.70~1.90 ^a 1.53~1.73 ^b	59.1~91.4 ^a 40.9~56.6 ^b	0.43~1.20	0.82~3.05	水槽	混凝土、钢材、草皮、卵石
文献[5]	1.70~1.95 ^a 1.60~1.62 ^b	69.0~100.0 ^a 48.0~57.0 ^b	0.40~1.10	0.60~2.60	港池	钢材
文献[2]	1.70	68.0	0.26~0.35	2.40~3.10	水渠(现场)	混凝土
文献[8]	1.64~1.83	64.0~73.0	0.44~0.93	0.58~2.00	水池	钢材

注:a 指男性,b 指女性.

图 5 和 6 为男性、女性静止临界失稳时以及人体能在洪水中正常行走时对应的 *h* 和 *U* 值与试验值的比较.图 5 中参数取值为 $m = 75 \text{ kg}$, $H = 1.80 \text{ m}$, $\mu = 0.8$, $C_D = 1.1$, $\rho_w = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $g = 9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, $\varphi = 80^\circ$, $s_F = 60 \text{ step} \cdot \text{min}^{-1}$.图 6 中 $m = 60 \text{ kg}$, $H = 1.60 \text{ m}$,其余参数取值与图 5 相同.图中的试验点表示人体在洪水中静止和不能在洪水中行走时对应的水深和流速值.由图 5 可知:当洪水流速小于某个临界值时(约为 $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),人在洪水中静止时

容易发生倾覆失稳;当流速大于 $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,人在洪水中静止时容易发生滑移失稳.两种失稳临界水深和流速可以由图 7 的方法确定.当水深一定时,人在洪水中能够正常行走对应的流速值基本上小于人静止失稳时对应的流速值.当水深大于某一数值时(图 5 约为 1.0 m),人在洪水中顺利行走时对应的流速值略大于静止失稳时对应的流速值.其原因可能为髋关节屈肌力矩的数值随腿和铅垂线夹角的增大呈线性减小关系^[15],而本文假定为定值.

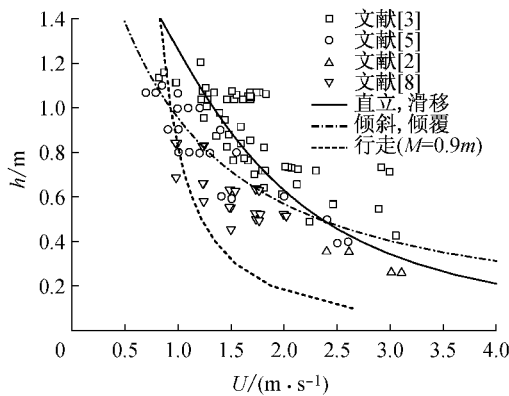


图 5 人静止临界失稳以及在洪水中正常行走时 h 和 U 值和试验值对比(男性)

Fig. 5 Comparison of the calculation value of flood depth, velocity with the experiment value when human just lost instability and walking in the flood flow(Male)

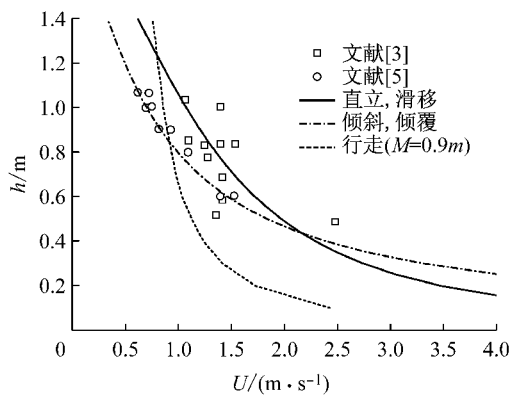


图 6 人静止临界失稳以及在洪水中正常行走时 h 和 U 值和试验值对比(女性)

Fig. 6 Comparison of the calculation value of flood depth, velocity and the experiment value when human just lost instability and walking in the flood flow(Female)

3.2 结果分析

将式(14)除以式(8),并将结果代入式(8),利用 $\sin \varphi \approx 1$ 和假定洪水密度约等于人体密度,整理得两种失稳对应水深和流速的临界值为

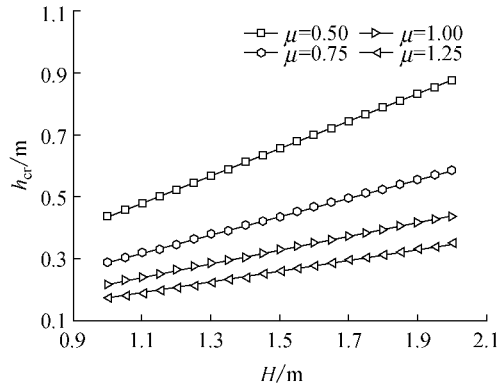
$$h_{cr} = \frac{2\beta + 2}{2\beta + 1} \frac{1}{\mu} (r_c \cos \varphi + h_f) \quad (43a)$$

$$\frac{\rho_w H U_{cr}^2}{mg} = A_1 \frac{\mu}{B} \left(\frac{H}{h_{cr}} - 1 \right) \quad (43b)$$

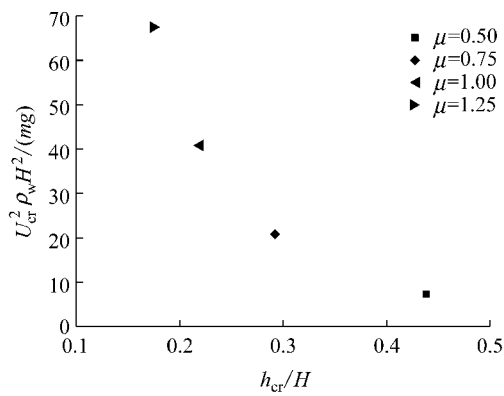
图 7 为人静止在洪水中时发生滑落失稳和倾覆失稳水深和流速的临界值. 由图 7 及式(43)可知:临界水深可以近似地认为仅与 H, φ, μ 值有关,当 φ 和 μ 为定值时, h_{cr} 和 H 成线性关系. 由 h_{cr}/H 值及 μ 值可以很容易计算出对应临界水深的临界流速值.

图 8 和 9 为髋关节屈肌力矩对人在洪水中行

走的影响. 图 8 中参数取值为 $m=75 \text{ kg}, H=1.8 \text{ m}, s_F=60 \text{ step} \cdot \text{min}^{-1}, \rho_w=1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}, h=0.3 \text{ m}, U=2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 图 9 中 $h=1.0 \text{ m}, U=0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 其余参数取值与图 8 相同. 由图 8 和 9 及方程(42)可得:在相同的初始条件下,髋关节屈肌力矩



a 水深



b 流速

图 7 人静止滑落失稳和倾覆失稳水深和流速的临界值($\varphi=80^\circ$)

Fig. 7 The critical flood depth and velocity between slipping type and tumbling type when human just lost instability in flood flow($\varphi=80^\circ$)

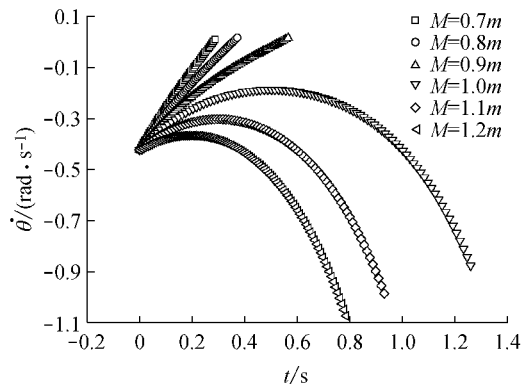


图 8 髋关节屈肌力矩对人在洪水中行走角速度的影响 ($h=0.3 \text{ m}, U=2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 8 The influence of hip's moment on angle rate when human walking in flood flow ($h=0.3 \text{ m}, U=2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

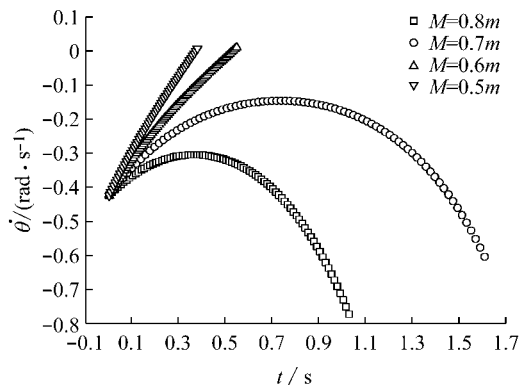


图 9 髋关节屈肌力矩对人在洪水中行走角速度的影响 ($h=1.0\text{ m}$, $U=0.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig.9 The influence of hip's moment on angle rate when human walking in flood flow ($h=1.0\text{ m}$, $U=0.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

的大小对人能否在洪水中正常行走起到重要作用。计算人在洪水中正常行走的水深和流速时,本文建议其值取为 $0.8\text{ m}\sim 0.9\text{ m}$ 。

4 结论及建议

(1)将人静止在洪水中失稳形式分为倾覆失稳和滑移失稳,推导出人体静止临界失稳时满足的控制方程,得出倾覆失稳和滑移失稳分界点对应的临界流速和临界水深的确定方法,将结果和已有试验结果对比,验证了控制方程的可行性。

(2)利用 Lagrange 方法推导出仅考虑一个广义坐标时满足人体行走的动力学方程,利用高阶 Runge-Kutta 法求解出数值解。分析了髋关节屈肌力矩对人在洪水中正常行走的影响,并和静止失稳时水深和流速值做对比分析,验证了结果的可行性。

(3)人体在行走过程中,人体摆动腿在摆动过程中大腿和小腿有相对运动,且人行走受到髋关节屈肌力矩、膝关节力矩和踝关节力矩的综合主动作用。综合考虑这些因素对人在洪水中正常行走的分析是今后研究的重点。

参考文献:

[1] 韩平,程先富. 洪水灾害损失评估研究综述[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(4):61.

- HAN Ping, CHENG Xianfu. Review on flood loss evaluation [J]. Environmental Science and Management, 2012, 37(4):61.
- [2] Jonkman S N, Penning-Rowse E. Human instability in flood water [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2008, 44(8):1208.
- [3] Abt S R, Wittler R J, Taylor A, et al. Human stability in a high flood hazard zone[J]. Water Resources Bulletin, 1989, 25(4):881.
- [4] Lind N, Hartford D, Assaf H. Hydrodynamic models of human stability in a flood [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2004, 40(1):89.
- [5] Karvonen T, Hepojoki A. The use of physical models in dam-break flood analysis [R]. RESCDAM Final Report. Helsinki: Helsinki University of Technology, 2000.
- [6] Cox R J, Shand T D, Blacka M. Appropriate safety criteria for people [R]. Australian: Australian Rainfall and Runoff, 2010.
- [7] Shand T D, Cox R J, Smith G, et al. Appropriate criteria for the safety and stability of people in stormwater design [C]// Stormwater 2010 Conference Proceedings. Sydney: Australian Stormwater Industry Association, 2010: 1-11.
- [8] Takahashi S, Endoh K, Muro Z. Experimental study on people's safety against overtopping waves on breakwaters [R]. Yokosuka: Report of the Port and Harbor Research Institute, 1992.
- [9] Xia J Q, Teo F Y, Lin B L, et al. Formula of incipient velocity for flooded vehicles [J]. Nature Hazards, 2011, 58(1):1.
- [10] 舒彩文,夏军强,林斌良,等. 洪水作用下汽车的起动力速研究[J]. 灾害学, 2012, 27(1):28.
- SHU Caiwen, XIA Junqiang, LIN Binliang, et al. Estimation of incipient velocity of flooded vehicles [J]. Journal of Catastrophology, 2012, 27(1):28.
- [11] 张宏林. 人因工程学[M]. 北京:高等教育出版社, 2005.
- ZHANG Honglin. Human factor engineering [M]. Beijing: Higher Education Press, 2005:66. (in Chinese)
- [12] 钱竞光. 人体步行的动态数学模型[J]. 扬州师范学院自然科学学报, 1983(2):85.
- QIAN Jingguang. Dynamic mathematical model of human walking [J]. Journal of Yangzhou Normal College, 1983(2): 85.
- [13] Bruderlin A, Calvert T. Goal-directed dynamic animation of human walking [J]. Computer Graphics, 1989, 23(3):233.
- [14] 徐军,黄美光,徐民. 测试体位对髋关节功能运动等速测力结果的影响分析[J]. 中国运动医学杂志, 1996, 15(2):91.
- XU Jun, HUANG Meiguang, XU Min. Effect of body position on isokinetic strength of the hip function motions [J]. China Academic Journal Electronic Publishing House, 1996, 15(2): 91.
- [15] 程蜀琳,谭进,毕新奇. 髋关节屈肌力矩与髋角的关系[J]. 成都体育学院学报, 1985(2):78.
- CHENG Shulin, TAN Jin, BI Xinqi. The relationship between hip's moment and the angle of hip [J]. Journal of Chengdu Sport College, 1985(2):78.