

探针系统测定流场反应特性分析

仇宝云 刘超 汤方平 袁家博 周济人 何忠宁

(江苏省水利动力工程重点实验室; 扬州大学水利与建筑工程学院水利水电系, 江苏扬州, 225009)

摘要: 研究提出了探针系统测定流场时针孔压力测量反应时间的计算方法, 对3种系统测定水流场和测定空气流场的反应特性进行了计算比较; 分析压力反应时间的影响因素, 综合考虑测试精度和试验时间, 确定针孔压力适宜的测量误差, 给出了合理的系统和系统参数

关键词: 探针系统; 流场测量; 压力反应时间; 测试精度; 系统参数

中图法分类号: TV 131.3

文献标识码: A

文章编号: 1007-824X(2000)03-0071-05

探针广泛用于流场测定, 它能同时测量流速与压力, 对现场条件要求不高, 这两方面是其他现代测流方法所替代不了的。对探针测量精度的研究, 一般只考虑探针加工误差, 给出率定曲线, 未研究系统反应特性和测量误差。探针测量空气场压力传递反应较快, 而测量水流场时流动阻力很大, 系统反应缓慢, 测量压力需要一定时间才能与针孔压力趋于一致。流场测量需要测定数十点至数百点的流动参数, 要花费大量时间。若在测量压力反应或稳定不充分时读数或采样, 则会造成较大的测量误差。本文将对3种探针系统测定水流场和空气场的反应特性进行全面研究分析, 为探针测量流场合理选择系统型式和参数提供参考。

1 探针测试系统

按针孔压力测量方法, 探针测试系统分为3类

1) 采用连接管将测压管与探针尾部针管相连, 测量针孔压力(系统一)。连接管一般采用透明塑料管, 以便观察存气及排气。由于水银差压计误差较大, 一般采用水柱测压管。测量水流场时, 只需将连接管延长作为测压管, 根据所测压力确定测压板高度, 将管内水面控制在观测范围内, 如图1(a); 测量气流场时, 用“U”型水柱差压管, 如图1(b)。

2) 将外接的连接管与压力传感器连接测量压力^[1](系统二), 压力值可读取或计算机采样

3) 将微型压力传感器在探针杆内部^[2]或尾部^[3]直接与针管连接(系统三), 设备费用高

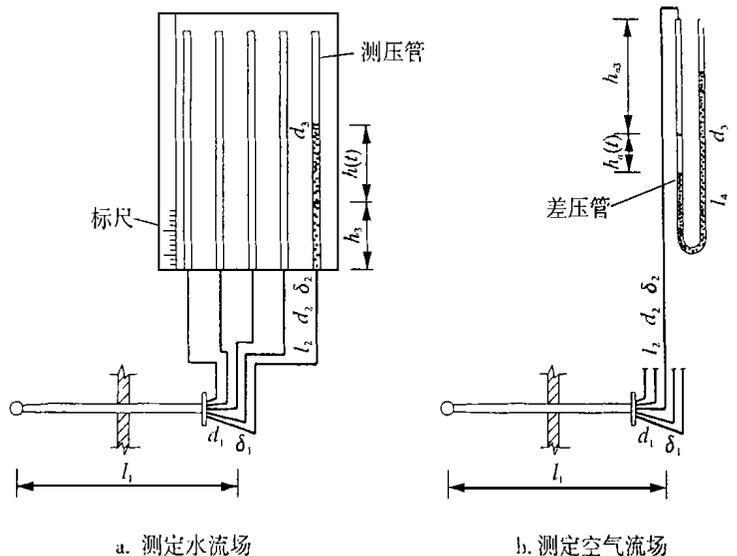


图1 探针系统一

Fig 1 Probe system I

收稿日期: 2000-04-21

基金项目: 江苏省水利科技基金项目(970034)



2 探针孔压力反应时间计算

2.1 测定水流场针孔压力反应时间计算

如图 1(a) 系统一, 针头移至新测点针孔压力增大 h_m (mH₂O), 系统针管、连接管、测压管长度、内径、壁厚及材料拉压弹性模量分别为 $l_i, d_i, \delta_i, E_i (i=1, 2, 3)$, 其中测压管内水柱高度

$$l_3 = h_3 + h(t), \quad (1)$$

式中 h_3 为针头移至新测点初始时刻 ($t=0$) 测压管内水柱高度; $h(t)$ 为水体流进针孔 t 时刻测压管水面相对于初始时刻上升的高度, $h(0)=0, h(\infty)=h_m, h(t)<h_m (0<t<\infty)$. 设水体容重为 γ , 求得第 i 管段任意截面水体流速为

$$u_i(l, t) = \frac{\gamma}{d_i^2} \left[\sum_{j=i}^3 \frac{d_j^3 l_j}{E_j \delta_j} + \frac{d_3^2}{\gamma} \frac{d_3^3 l}{E_i \delta_i} \right] \frac{dh(t)}{dt}, \quad i=1, 2, 3, \quad 0 \leq l \leq l_i \quad (2)$$

针孔与测压管液面的能量方程为(管内流速很小, 局部水头损失和流速水头不计)

$$h_m - h(t) = \sum_{i=1}^3 \int_0^{l_i} \lambda \frac{dl}{d_i} \frac{u_i^2(l, t)}{2g}, \quad (3)$$

式中 g 为重力加速度; λ 为第 i 管段沿程阻力系数, 设为层流, 将 λ 及式(2)代入(3)式积分得

$$h_m - h(t) = 32\mu \sum_{i=1}^3 \frac{l_i}{d_i^4} \left[\frac{d_i^3 l_i}{2E_i \delta_i} + \sum_{j=i+1}^3 \frac{d_j^3 l_j}{E_j \delta_j} + \frac{d_3^2}{\gamma} \right] \frac{dh(t)}{dt}, \quad (4)$$

式中 μ 为水动力粘滞系数 将(4)式右边展开, 将(1)式代入整理得

$$dt = \frac{A}{h_m - h(t)} [B + D h(t) + E h^2(t)] dh(t), \quad (5)$$

式中 $A = 32\mu; B = \sum_{i=1}^2 \left[\frac{l_i^2}{2E_i \delta_i d_i} + \frac{l_i d_3^2}{\gamma d_i^4} \right] + \frac{d_3^3 l_1 l_2}{E_2 \delta_2 d_1^4} + \frac{d_3^3 h_3}{E_3 \delta_3} \left[\frac{l_1}{d_1^4} + \frac{l_2}{d_2^4} \right] + \frac{h_3}{d_3} \left[\frac{h_3}{2E_3 \delta_3} + \frac{1}{\gamma d_3} \right]; D = \frac{d_3^3}{E_3 \delta_3} \sum_{i=1}^2 \frac{l_i}{d_i^4} + \frac{h_3}{E_3 \delta_3 d_3} + \frac{1}{\gamma d_3^2}; E = \frac{1}{2E_3 \delta_3 d_3}$ 将(5)式积分, 并将 $h(0)=0$ 代入得测压管液面升高 $h(t)$ 所需时间为

$$t_1 = A \left[B + (D + E h_m) h_m \right] \ln \left[\frac{h_m}{h_m - h(t)} \right] - A h(t) \left[D + E h_m + \frac{1}{2} E h(t) \right]. \quad (6)$$

用类似方法推导出系统二传感器压力升高 $h(t)$ 所需时间为

$$t_2 = 32\mu \left[\frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \frac{l_i^2}{E_i \delta_i d_i} + \frac{d_3^3 l_1 l_2}{E_2 \delta_2 d_1^4} \right] \ln \left[\frac{h_m}{h_m - h(t)} \right]. \quad (7)$$

系统三传感器压力升高 $h(t)$ 所需时间为

$$t_3 = \frac{16\mu l_1^2}{E_1 \delta_1 d_1} \ln \left[\frac{h_m}{h_m - h(t)} \right]. \quad (8)$$

2.2 测定空气流场针孔压力反应时间计算

如图 1(b), 针头移至新测点压力增加 p_m , 此时连接管一侧半支差压管上部空气柱高为 h_{a3} , t 时刻差压管内压力增大 $p(t)$, 则连接管一侧空气柱高度增加(差压管内水面下降)值为

$$h_a(t) = \frac{p(t)}{2\gamma}. \quad (9)$$

差压管内空气柱总长为

$$l_3 = h_{a3} + \frac{p(t)}{2\gamma}. \quad (10)$$

按上述方法可求出管内任意断面空气的流速为

$$u_{ai}(l, t) = \frac{1}{d_i^2} \left[\sum_{j=i}^3 \frac{d_j^3 l_j}{E_j \delta_j} + \frac{d_3^2}{2\gamma} \frac{d_3^3 l}{E_i \delta_i} \right] \frac{dp(t)}{dt}, \quad i=1, 2, 3, \quad 0 \leq l \leq l_i \quad (11)$$

设差压管内水柱总长为 l_4 , t 时刻管内能量方程为

$$p_m - p(t) = \sum_{i=1}^3 \frac{l_i}{2} \rho_a \lambda_{ai} \frac{dl}{d_i} u_{ai}^2(l, t) + \lambda_w \frac{l_4}{d_3} u_w^2(t), \quad (12)$$

式中 ρ_a 为空气密度; λ_{ai} 为第 i 段管空气沿程阻力系数; λ_w 为差压管水体沿程阻力系数, λ_{ai}, λ_w 按层流计算; u_w 为差压管内水体流速, 即差压管内水面下降速度, 由 (11) 式或 (9) 式得

$$u_w = u_{a3}(l_3, t) = \frac{dh_a(t)}{dt} = \frac{1}{2Y} \frac{dp(t)}{dt}. \quad (13)$$

将 λ_{ai}, λ_w 表达式及式 (11)、(13) 代入 (12) 式整理得

$$p_m - p(t) = 32\mu_a \left[\sum_{i=1}^3 \frac{l_i}{d_i^4} \left(\frac{d_i^3 l_i}{2E_i \delta_i} + \sum_{j=i+1}^3 \frac{d_j^3 l_j}{E_j \delta_j} + \frac{d_3^2}{2Y} \right) + \frac{vl_4}{2g\mu_a d_3^2} \right] \frac{dp(t)}{dt}, \quad (14)$$

式中 μ_a 为空气动力粘滞系数 将 (14) 式展开整理得

$$dt = \frac{A_a}{p_m - p(t)} [B_a + D_a p(t) + E_a p^2(t)] dp(t), \quad (15)$$

式中 $A_a = 32\mu_a$; $B_a = \sum_{i=1}^2 \left(\frac{l_i^2}{2E_i \delta_i d_i^4} + \frac{l_i d_3^2}{2Y d_i^4} \right) + \frac{d_3^2 l_1 l_2}{E_2 \delta_2 d_1^4} + \frac{d_3^2 h_{a3}}{E_3 \delta_3} \left(\frac{l_1}{d_1^4} + \frac{l_2}{d_2^4} \right) + \frac{h_{a3}}{d_3} \left(\frac{h_{a3}}{2E_3 \delta_3} + \frac{1}{2Y d_3} \right) + \frac{vl_4}{2g\mu_a d_3^2}$;

$D_a = \frac{1}{2Y} \left(\frac{d_3^2}{E_3 \delta_3} \sum_{i=1}^2 \frac{l_i}{d_i^4} + \frac{h_{a3}}{E_3 \delta_3 d_3} + \frac{1}{2Y d_3^2} \right)$; $E_a = \frac{1}{4Y^2 E_3 \delta_3 d_3}$ 差压管压力升高 $p(t)$ 所需时间为

$$t_{a1} = A_a [B_a + (D_a + E_a p_m) p_m] \ln \left[\frac{p_m}{p_m - p(t)} \right] - A_a p(t) \left[D_a + E_a p_m + \frac{1}{2} E_a p(t) \right]. \quad (16)$$

用系统二及系统三测量时, 传感器压力升高 $p(t)$ 所需时间分别为

$$t_{a2} = 32\mu_a \left[\frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \frac{l_i^2}{E_i \delta_i d_i^4} + \frac{d_3^2 l_1 l_2}{E_2 \delta_2 d_1^4} \right] \ln \left[\frac{p_m}{p_m - p(t)} \right], \quad (17)$$

$$t_{a3} = \frac{16\mu_a l_1^2}{E_1 \delta_1 d_1} \ln \left[\frac{p_m}{p_m - p(t)} \right]. \quad (18)$$

详细分析表明, 系统最大雷诺数 $R_{e_{max}}$ 发生在初始时刻针管起始断面 计算结果表明, 测定水流场 $R_{e_{max}} = 200 \sim 300$, 当 $d_1 = 2.0 \text{ mm}$ 时, $R_{e_{max}}$ 为 1 000 左右; 测定空气流场, 一般 $R_{e_{max}} < 100$, 当 $d_1 = 2.0 \text{ mm}$ 时, $R_{e_{max}}$ 为 500 左右, 均处于层流区, 前面假定正确

3 针孔压力反应时间试验验证

利用图 1(a) 所示的测试系统, 将探针插入静水水箱中, 对某一针孔的测压管, 水面从低于水箱水面 h_m 值开始 ($h(0) = 0$), 记录测压管水面上升不同高度 $h(t)$ 所需时间, 试验系统参数为: $d_1 = 0.6 \text{ mm}$, $\delta_1 = 0.2 \text{ mm}$, $l_1 = 0.7 \text{ m}$, $E_1 = 200 \times 10^9 \text{ Pa}$, $d_2 = d_3 = 3.0 \text{ mm}$, $\delta_2 = \delta_3 = 0.4 \text{ mm}$, $l_2 = 2.0 \text{ m}$, $h_3 = 0.01 \text{ m}$, $E_2 = E_3 = 1.147 \times 10^7 \text{ Pa}$, 压力测量误差为

$$\delta_h = \frac{h_m - h(t)}{h_m} \times 100\%. \quad (19)$$

图 2 表明, 不同针孔压力测量误差 δ_h 所需反应时间计算值有很好的准确性

4 针孔压力反应时间影响因素分析

4.1 分析方法

探针测试系统基本参数: $d_1 = 0.8 \text{ mm}$, $\delta_1 = 0.2 \text{ mm}$, $l_1 = 0.9 \text{ m}$, $E_1 = 200 \times 10^9 \text{ Pa}$, $d_2 = d_3 = 3.0 \text{ mm}$, $\delta_2 = \delta_3 = 0.4 \text{ mm}$, $l_2 = 2.0 \text{ m}$, $h_3 = h_{a3} = 0.5 \text{ m}$, $E_2 = E_3 = 1.147 \times 10^7 \text{ Pa}$, $l_4 = 1.0 \text{ m}$, $h_m = 0.6 \text{ m}$, $p_m = 600 \text{ Pa}$, $\delta_p = \delta_h = 0.5\%$. 以系统一和系统二测量水流场和空气流场, 其中某一因素取不同值, 计算压力反应时间 t , 确定 t 与该因素的关系

4.2 结果分析

计算结果如图 3~ 4, 从总体上看, 相同系统测定水流场和空气流场反应时间随各因素的变化趋

势相同,但针孔压力反应时间差异很大:压力测量误差为 0.5% 时,系统一测定水流场的反应时间约为 2~ 6 min,测定空气流场约为 2~ 5 s;系统二两时间分别为 2~ 5 s 和 0.04~ 0.1 s 测定水流场针孔压力反应时间约是测定空气流场反应时间的 50~ 80 倍,前者较后者长得多.若压力稳定时间不够,则会影响测试精度

对测定稳态流场的系统一和系统二横向比较,系统二的反应时间仅为系统一的 1/80~ 1/50.如有条件,应优先采用系统二,但应保证压力传感器率定精度和零点不漂移.理论上,使测量压力与针孔实际压力完全相等的反应时间 t 为无穷大, t 与针孔压力变化值 h_m 或 p_m 无关或基本无关,而与其相对误差 δ_i

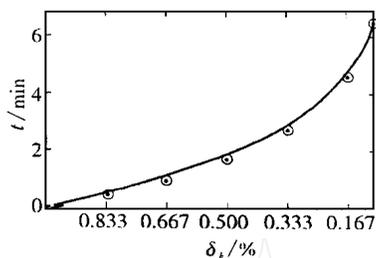


图 2 测压管水面上升时间验证

Fig 2 Experimental verification of pressure reacting time

注: — 计算值 实测值

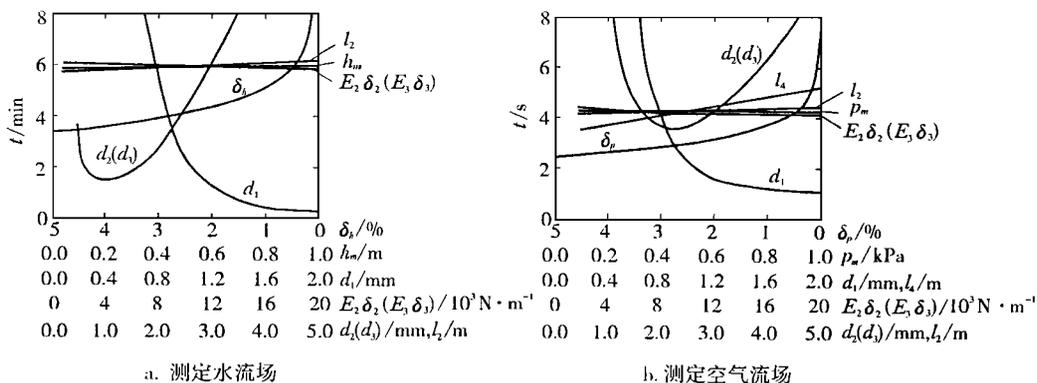


图 3 因素对系统一针孔压力反应时间的影响

Fig 3 Effects of factors on pressure reacting time of system I

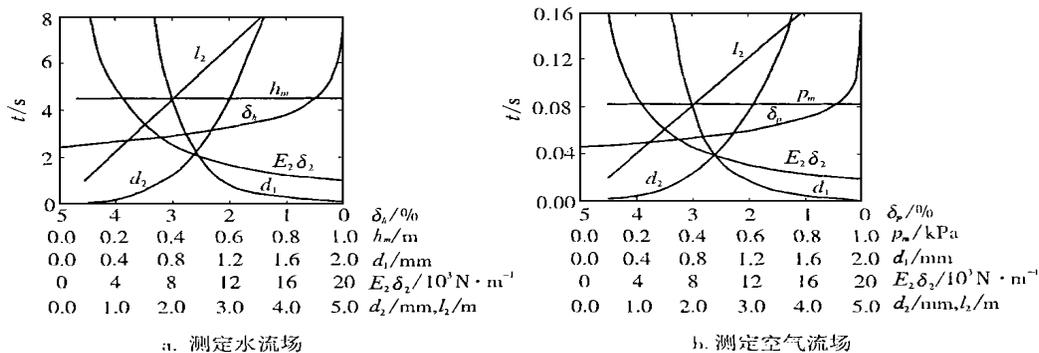


图 4 因素对系统二针孔压力反应时间的影响

Fig 4 Effects of factors on pressure reacting time of system II

(δ_p)有关.曲线 $t \sim \delta_i(\delta_p)$ 在 $\delta_i(\delta_p) = 0.3\% \sim 0.5\%$ 时曲率最大,此后, t 随 $\delta_i(\delta_p)$ 减小急剧上升.综合考虑测试精度和时间,针孔压力测量误差宜控制在:系统一 $\delta_i = 0.3\%$, $\delta_p = 0.2\%$,系统二 $\delta_i = 0.2\%$, $\delta_p = 0.1\%$.由于探针管内径 d_1 最小,对流动阻力起主要作用,因而对 t 影响较大. $\delta_i(\delta_p)$ 一定时, $d_1 < 0.8 \sim 1.0$ mm 后, t 随 d_1 减小急剧增大.测定水流场的探针,测压管测压时 d_1 不应小于 1.0 mm,传感器测压时 d_1 不宜小于 0.8 mm.为保证探针方向敏感性^[4],针孔孔径应取 0.4 mm 左右;而测定空气流场的探针,由于压力反应快, d_1 可以小至 0.6 mm.

系统一管道内流体体积变化主要表现在测压管内液柱或气柱高度的变化, 所以测压管管径愈大, t 愈大, 而连接管长度 l_2 及管壁抗膨胀系数 $E_2\delta_2$ 对 t 影响不大。如果连接管与测压管为同一根管, 内径 $d_2(d_3)$ 过小, 虽然水体体积变化不大, 但流动阻力过大, 而致 t 增大; 相反, $d_2(d_3)$ 过大, 虽然流动阻力不大, 但水体体积变化过大, 也会使 t 增大, 故 $d_2(d_3)$ 存在一最优值, 使 t 最小, $d_2(d_3)$ 最优值图 1(a) 为 1.0 mm, 图 1(b) 为 2.3 mm。测定空气流场的图 1(b) 测试系统差压管水柱总长度 l_4 影响整个系统管路的流动阻力, l_4 愈大, t 愈大。系统二由于管内流体体积变化主要由连接管管壁弹性引起, 连接管所有参数对 t 都有明显影响, t 随 l_2 、 d_2 增大而增大, 而随 $E_2\delta_2$ 增大而减小, 应尽量缩短 l_2 , 适当减小 d_2 , d_2 以 1.0~2.0 mm 为宜, $E_2\delta_2$ 应大于 $8 \times 10^3 \text{ N/m}$, 稍硬的塑料管可满足要求。由式(18)及式(33)可求得系统三测定水流场和空气流场的反应时间 ($\delta_0 = \delta_1 = 0.5\%$) 仅为 $2 \times 10^{-6} \text{ s}$ 和 $4 \times 10^{-8} \text{ s}$ 左右, 即使考虑流体的压缩性, 反应时间也是极短的。所以系统三可以作为动态探针用于测定动态流场^[3]。

5 结语

本文提出的方法能够较准确地计算探针针孔压力测量反应时间。探针系统类型、参数及所测流体性质影响压力反应时间和测量精度, 应合理选择系统型式和参数, 并根据系统类型确定合理的测量反应时间, 做到既能缩短试验时间, 又能保证测试精度。测定稳态流场应优先采用压力传感器测量针孔压力或压差, 针孔压力测量精度可达 0.1%~0.2%; 针管直接与微型压力传感器连接的系统, 反应时间极短, 可以用来测定动态流场。

6 参考文献

- [1] 仇宝云, 徐云年. 数字压差仪与五孔测球配合测定空间流场 [J]. 水泵技术, 1992, (1): 38~39
- [2] Matsunaga S, Ishibashi H, Nishi M. Measurement of instantaneous pressure and velocity in nonsteady three-dimensional water flow by means of a combined five-hole probe [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 1980, 102: 196
- [3] 黄建德. 动态探针测试系统的开发和应用 [J]. 工程热物理学报, 1999, 20(1): 57~60
- [4] 李建威. 水力机械测试技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1981. 134

ANALYSIS ON REACTING PROPERTIES OF PROBE SYSTEMS MEASURING FLOW FIELD

Q U Bao-yun L U Chao TANG Fang-ping YUAN Jia-bo
ZHOU Ji-ren HE Zhong-ning

(Key Lab of Water Conservancy Power Engin, Jiangsu Prov;

Dept of Hydr and Hydroelec Engin, Hydr and Civil Engin Coll, Yangzhou Univ, Yangzhou, 225009, China)

Abstract: A methods is proposed to compute reacting time of measured pressure of probe hole for probe measuring systems when they are used to measure flow field. Reacting properties of 3 types of probe systems measuring water flow field are computed and compared with that measuring air flow field. The factors which influence the pressure reacting time are analyzed. The suitable pressure measuring error is determined as far as measuring precision and testing time are concerned. The reasonable systems and system parameters are presented.

Keywords: probe measuring systems; flow field measurement; pressure reacting time; measuring precision; probe system parameters

(本文责任编辑 晓文)