

文章编号: 1671-6612 (2019) 03-315-04

双斗式虹吸排水系统泄流量理论与实验研究

贾萌¹ 王胜男²

(1. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031;

2. 中国中铁二院工程集团有限责任公司 成都 610031)

【摘要】 利用伯努利方程结合管路串并联理论对双斗式虹吸雨水排水系统进行理论公式推导, 得到双斗式系统泄流量的计算式。搭建双斗虹吸式雨水排水系统实验台, 对比实验结果与理论计算结果, 得到了较好的一致性; 双斗式虹吸系统中存在近排水立管处的雨水斗泄流量较大的规律。

【关键词】 双斗式虹吸排水; 泄流量; 理论计算式; 实验研究

中图分类号 TU823.6 文献标识码 A

Theoretical and Experimental Study on Discharge of Double-outlet Siphonic Drainage System

Jia Meng¹ Wang Shengnan²

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031;

2. China Railway ERYUAN Engineering Group Co., Ltd, Chengdu, 610031)

【Abstract】 Based on the Bernoulli equation combined with the series parallel theory of pipelines, the theoretical formula of the double-outlet siphonic drainage system is deduced, and the calculation formula for the discharge capacity of the double-outlet system is obtained. Good consistency is obtained by building a double-outlet siphonic rainwater drainage system test bed, and comparing experimental results with theoretical calculation results. In the double-outlet siphonic drainage system, there is a regularity of the higher discharge flow rate of the outlet which near the vertical drainage pipe.

【Keywords】 Double-outlet siphonic drainage system; Discharge flow rate; Theoretical formula; Experimental Study

0 引言

虹吸式雨水排水系统与传统雨水排水系统相比, 因其排水量较大, 管路布置无需坡度等原因被广泛应用在工程中^[1], 既有研究主要针对单斗式虹吸排水系统, 潘浩^[2]研究了不同立管长度下雨水斗泄流量和斗前水深的关系, 万瑞琦^[3]研究了悬吊管管长对系统排水量和虹吸启动时间的影响。机场、车站等大型公共建筑中主要使用多斗式虹吸排水系统, 多斗式系统的运行状况与单斗系统相似, 但更为复杂^[4], G B Wright 和 Scott Arthur 研究了在不同入流量条件下双斗系统内的压力特性, 陈中涛^[5]研究发现随着雨水斗个数的增大, 系统的最大负压

及流量会明显增大。

现有虹吸雨水排水系统设计计算时, 按屋面雨水设计流量和雨水斗的额定泄流量来计算雨水斗的个数^[6], 而利用这种方法设计的多斗系统的系统排量与实际雨水设计流量并不匹配。本文通过推导理论公式得到虹吸式双斗系统泄流量的计算式, 并用实验验证理论计算结果的准确性。

1 双斗虹吸排水泄流量理论分析

伯努利方程是理想的不可压缩恒定流的能量方程, 在虹吸排水系统中, 形成虹吸的满管流流量实质上是位差提供的动力和管路提供的阻力平衡

作者简介: 贾萌 (1993.06-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: 18380321162@163.com

通信作者: 王胜男 (1989.03-), 女, 硕士, 工程师, E-mail: wsn.314@163.com

收稿日期: 2017-05-10

后的结果,因此虹吸式雨水排水系统可以用伯努利方程及管路的串并联理论进行理论分析。

双斗式虹吸雨水排水系统水力分析示意图如图 1 所示,假设系统已形成虹吸满管流,管内无空气;断面 A-A 为天沟上平面,且该平面处于同一水平线,立管出口为断面 Z-Z,对 A-A 和 Z-Z 两断面列出伯努利方程:

$$Z_A + \frac{p_A}{\gamma} + \frac{\alpha_A v_A^2}{2g} = Z_Z + \frac{p_Z}{\gamma} + \frac{\alpha_Z v_Z^2}{2g} + h_{A-Z} \quad (1)$$

将 Z-Z 看作系统水力计算基准面,此时, Z_A 为系统天沟上平面到立管出口的高度 h , $Z_Z=0$; 由于 A-A 和 Z-Z 两断面均与大气相通, p_A 和 p_Z 两项看作 0; 系统满足连续性方程 $v_A A_A = v_Z A_Z$, 而天沟截面 $A_A \gg$ 管道出口截面 A_Z , 因此 $v_A \approx 0$ 。由此,伯努利方程可以简化为:

$$h_{A-Z} = h - \frac{v_Z^2}{2g} \quad (2)$$

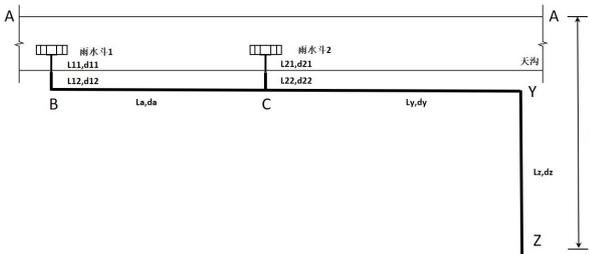


图 1 双斗虹吸排水系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of double-outlet siphonic drainage system

两断面间的阻力损失 h_{A-Z} 由沿程损失和局部损失组成:

$$h_{A-Z} = h_f + h_m \quad (3)$$

其中, h_f 为沿程阻力损失; h_m 为局部阻力损失。沿程阻力损失应按 Darcy-Weisbach 公式计算:

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

式中: λ 为沿程阻力系数; l 为管道长度, m; d 为管道计算直径, m; v 为管道某一截面平均流速, m/s。

根据技术措施^[7]要求, λ 采用 Colebrook-White 计算,但由于 Colebrook-White 式过于繁复,因此

采用随着流速变化和管路长度变化,计算误差较小而且相对较稳定的,由 Swamee 和 Jain^[8]提出的近似显式计算式计算:

$$\lambda = \frac{0.25}{\left[\lg \left(\frac{k}{3.71d_j} + \frac{5.74}{\text{Re}^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (5)$$

管道的局部水头损失 h_m 应根据管道的连接方式,按公式 (6) 计算,雨水斗及配件的局部阻力系数取值通过产品实测确定。

$$h_m = \sum \xi \frac{v^2}{2g} \quad (6)$$

式中: ξ 为管道的局部阻力系数。

将沿程阻力 h_f 和 h_m 局部阻力表达式带入式 (2), 可得:

$$\sum \left(\lambda_i \frac{l_i}{d_i} + \sum \xi_i \right) \frac{8Q_i^2}{g\pi^2 d_i^4} = h - \frac{8Q_Z^2}{g\pi^2 d_Z^4} \quad (7)$$

因为出口局部阻力系数 $\xi_0 = 1$, 将系统立管出口处的速度水头看作出口局部阻力系数加到 $\sum \xi_Z$

中,再令 $S_i = \left(\lambda_i \frac{l_i}{d_i} + \sum \xi_i \right) \frac{8}{g\pi^2 d_i^4}$, 式 (7) 可以写成:

$$\left(\sum S_i \right) Q^2 = h \quad (8)$$

式中: Q 为多斗虹吸系统总泄流量, m^3/s ; S_i 为各管段对应系统总流量为 Q 的阻抗, s^2/m^5 。

带入到图 1 所示的双斗模型中,即为:

$$\left(S_{AC0} + S_{CY} + S_{YZ} \right) Q^2 = h \quad (9)$$

式中: S_{AC0} 为三通前管段总阻抗; S_{CY} 为管段 CY 阻抗; S_{YZ} 为管段 YZ 阻抗。

再利用管路并联原理^[9], 并联管路遵循质量平衡原理:

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (10)$$

式中: Q_1 为雨水斗 1 泄流量, m^3/s ; Q_2 为雨水斗 2 泄流量, m^3/s 。

从能量平衡的观点来看,支路 ABC、支路 AC 的阻力损失均等于 A、C 两节点的压头差。

$$h_{ABC} = h_{AC} = h_l \quad (11)$$

式中: h_l 为 A、C 两节点的压头差。即:

$$S_{ABC}Q_1^2 = S_{AC}Q_2^2 = S_{AC0}Q^2 \quad (12)$$

式中: S_{ABC} 为雨水斗 1 管段阻抗; S_{AC} 为雨水斗 2 管段阻抗。

通过式 (10)、(11)、(12) 求得三通前总阻抗及雨水斗 1 与雨水斗 2 泄流量的比值分别为:

$$\frac{1}{\sqrt{S_{AC0}}} = \frac{1}{\sqrt{S_{ABC}}} + \frac{1}{\sqrt{S_{AC}}} \quad (13)$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\sqrt{S_{AC}}}{\sqrt{S_{ABC}}} \quad (14)$$

双斗雨水系统的总泄流量可以写成式 (15):

$$Q^2 = \frac{h}{\left(\frac{1}{\sqrt{S_{ABC}}} + \frac{1}{\sqrt{S_{AC}}}\right)^2 + S_{cy} + S_{yz}} \quad (15)$$

2 双斗虹吸排水系统实验

2.1 实验原理及实验装置

虹吸排水系统主要由虹吸雨水斗、管道(尾管、悬吊管、立管等)及管道配件等部分组成。搭建全尺寸实验台,采用间接测试法对双斗式虹吸雨水排水系统泄流量进行测试。

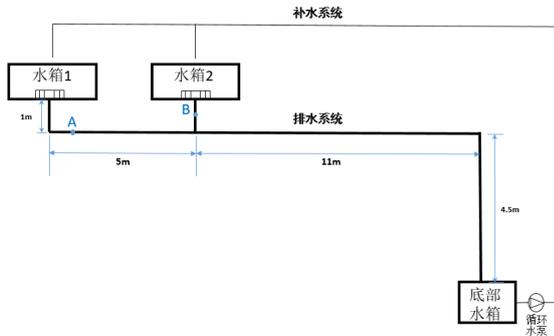


图 2 双斗式虹吸排水系统实验台示意图

Fig.2 Test bed diagram of double-outlet siphonic drainage system

实验台主要由排水系统和补水系统两部分构成,实验台的结构示意图如图 2 所示。排水系统由顶部水箱、虹吸雨水斗及排水管组成,为方便观察液位变化及雨水斗挡气板附近水面状况,顶部水箱由透明 PVC 制成,箱底设置 2 个补水口,为均匀布水在补水口上方 300mm 的位置设置挡气板;雨水斗均采用 TY56 型虹吸雨水斗;排水管采用透明

PVC 管材以便清晰观察管内流态。补水系统即在系统底部设置两集水箱,分别由水泵向顶部水箱供水。水箱出口连接 ISG 型系列单级单吸管道离心泵,在水泵前后安装蝶阀,实验时同时调节两水泵的蝶阀开度以便控制两顶部水箱的进水量。



图 3 双斗排水系统实物图

Fig.3 Physical diagram of double-outlet siphonic drainage system

实验目的是对双斗虹吸排水系统的泄流量进行测试,但不宜在排水管上安装流量计影响流态发展,本实验中采用间接测量的方法,即在补水管上安装电磁流量计监测补水量,并在顶部水箱底部安装压力传感器测试水箱液位,通过补水量和水箱液位的变化来得到系统的实时排水量。补水量和液位的变化,采用 Keysight 示波器和无纸记录仪进行记录。

2.2 数据处理及泄流量计算

将上述仪器测得的进水量、斗前水深进行滑动平均滤波法处理,将按滑动平均滤波法处理后的数据按式 (16) 计算出系统泄流量,绘制成系统如图 4 的泄流量-时间 ($Q-t$) 曲线。

$$Q = \frac{\bar{Q}_{进水量} \Delta t - (h_n - h_{n-1})BL}{\Delta t} \quad (16)$$

式中: Q 为泄流量, m^3/h ; $\bar{Q}_{进水量}$ 为顶部水箱进水流量平均值, m^3/h ; Δt 为虹吸启动流量测试时间间隔, s ; h 为顶部水箱内液位值, m ; B 为顶部水箱宽度, m ; L 为顶部水箱长度, m 。

2.3 实验结果分析

从实验中观察到,两雨水斗的斗前水位均没过雨水斗挡气板,斗 2 水位维持在约 20mm 处稳定,雨水斗 1 水位迅速持续升高。待悬吊管内阻塞的空

气被排出后，整个系统形成虹吸，悬吊管各段均呈现满管流状态。

将进水量 32.2m³/h 作为标准值，选取在 ±5% 的误差允许范围内的点，绘制出雨水斗 1、雨水斗 2 的实时泄流量监测图 $Q-t$ 如图 4 所示，其中雨水斗 1 的平均泄流量 Q_1 为 7.25L/s，雨水斗 2 的平均泄流量 Q_2 为 8.77L/s， $Q_1/Q_2=82.7\%$ 。

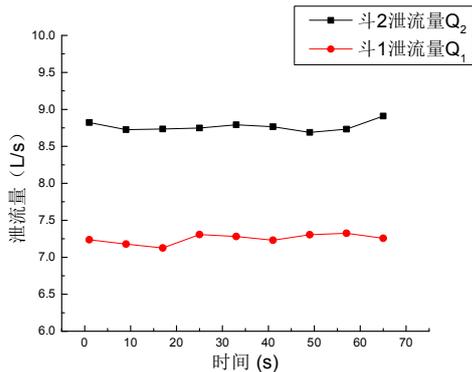


图 4 实验双斗雨水斗泄流量 ($Q-t$)

Fig.4 Discharge flow rate of experimental double-outlet siphonic drainage system($Q-t$)

3 理论计算与实验结果对比

联立方程 (10) (14) (15) 可以求解双斗系统中雨水斗 1、2 的泄流量及总泄流量。由于方程中存在隐式计算，使用 matlab 软件编写迭代程序，将双斗雨水排水系统实验模型中的参数带入计算式得到理论计算值，并与实验测试的泄流量进行对比，对比结果如下。

表 1 实验与理论计算泄流量对比

Table 1 Comparison of experimental and theoretical discharge

泄流量	实验 (L/s)	理论 (L/s)	误差 (%)
雨水斗 1	7.3	7.7	5.48
雨水斗 2	8.8	9.3	5.67
总泄流量	16.1	17.0	5.59

从对比结果可以看出，双斗系统的实验与理论

计算结果较为一致，雨水斗 2 的泄流量均大于雨水斗 1 的泄流量，理论计算中两雨水斗的泄流量之比约为 82.8%。分析造成实验与计算结果差异的原因，是由于理论计算时忽略了管道法兰连接的阻力，造成泄流量数值偏大。

4 结论

本文根据流体力学能量方程及管路内流动规律推导出双斗系统泄流量的计算公式，并用实验进行了检验；在双斗式虹吸雨水排水系统中存在靠近总排水立管的雨水斗泄流量较大的规律；采用本文的方法也可以方便的计算多斗式虹吸雨水排水的系统泄流量。

参考文献:

- [1] 程阳.虹吸式屋面雨水排水系统雨水斗的模拟研究[D].衡阳:南华大学,2015.
- [2] 潘浩.虹吸式屋面雨水排水系统设计中天沟工况实验研究与模拟[D].衡阳:南华大学,2012.
- [3] 万瑞琦.单斗虹吸式雨水排水系统排水性能研究[D].成都:西南交通大学,2017.
- [4] G B Wright, J A Swaffield, S Arthur. Investigation into the Performance Characteristics of Multi-Outlet Siphonic Roof Drainage Systems[J]. International Conference on Urban Storm Drainage, 2002,23(3):1-16.
- [5] 陈中涛.虹吸式屋面雨水排水系统水力研究[D].杭州:浙江大学,2007.
- [6] 王珂.建筑屋面雨水排水系统研究[D].重庆:重庆大学,2007.
- [7] CECS 183:2015,虹吸式屋面雨水排水系统技术规程[S].北京:中国计划出版社,2015.
- [8] PK Swamee, AK Jain. Explicit equations for pipe-flow problems. Journal of the Hydraulics Division-Asce, 1976,102(5):657-664.
- [9] 蔡增基,龙天渝.流体力学泵与风机(第五版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.