

# 污水泵站进水管涵流量系数估算

李树平<sup>1</sup>, 狄婉茵<sup>1</sup>, 梁小光<sup>1</sup>, 徐明<sup>2</sup>

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 上海芦潮港华士建设有限公司 上海 201306)

**摘要:** 管道或箱涵(简称管涵)流量系数确定、监测数据选择、欠缺或异常数值处理是排水管路系统建模中常常面临的问题。作为特例,可首先根据现场监测的泵站出水流量、集水池液位和管涵上游交汇井液位数据确定管涵流量,然后结合沿程水头损失公式确定污水泵站进水管涵流量系数。现场监测数据中,由于传感器灵敏性、信号传输等问题,常常引起数据异常或不连续,应用中应选择质量较好的连续时段数据。少量欠缺或异常值,可采用相邻数据线性插值法修正。对于测试参数相关性较强的情况,可采用相关分析法,由一个参数的数据推断并补充另一参数的缺失或异常数据。按照基本原理和计算步骤,经实例验证,计算的污水泵站进水管涵流量系数认为处于合理取值范围内,达到了预期目标。

**关键词:** 污水泵站; 进水管涵; 流量系数; 数据处理

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)11-0081-06

## Estimation of Inlet Pipe or Culvert Discharge Coefficient of Wastewater Pumping Station

LI Shu-ping<sup>1</sup>, DI Wan-yin<sup>1</sup>, LIANG Xiao-guang<sup>1</sup>, XU Ming<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;  
2. Shanghai Luchaogang Huashi Construction Co. Ltd., Shanghai 201306, China)

**Abstract:** Pipe or culvert discharge coefficient determination, monitoring data selection, and missing or abnormal data processing are challenges in drainage system modeling. In special cases, the pipe or culvert discharge can be determined according to the on-site pump effluent rate, sump water level and upstream manhole water level; then, the inlet pipe or culvert discharge coefficient can be determined according to the head loss formula. Sensor sensitivity or signal transmission failures often result in data anomalies or discontinuities, and the application should choose continuous field monitoring data with good quality. Linear interpolation method can be used to fill missing data or outliers. When two parameters show strong correlation, correlation analysis can be used to predict the missing or abnormal data of one parameter from the other. According to the basic principle and calculation steps, through the example analysis, the estimated inlet pipe or culvert discharge coefficient was within a reasonable range, and met the expected goals.

**Key words:** wastewater pumping station; inlet pipe or culvert; discharge coefficient; data processing

通过排水设施的数据取样、监视、分析、处理、评价和利用,形成物理、化学、生物、水文等相关信息,用于排水工程的研究、运行、调度、优化和预测,是智慧排水和排水信息化建设的核心内容<sup>[1-2]</sup>。在排水系统水力模型构建中,管道流量系数是一个需要确定的重要参数。当已知管道流量系数和流量时,就可以确定排水管道的水头损失,判断排水水力状况。

排水管道流量系数通常根据管道进出口之间的水头差以及管道内的流量确定。其中,管道进出口之间的水位差,可通过布置在管道进出口的检查井或交汇井内液位计测试获得。管道内的流量,对于小口径管道,可采用测流堰或流量计确定。但是对于大型污水泵站的进水管或箱涵(简称管涵),如果设计和施工阶段没有考虑安装流量测试设施,则在运行中很难找到合适的方式测试管涵内的流量。

当已知污水泵站进水管涵上端交汇井内液位、集水池内液位和泵站出水流量时,作为一种特殊情况,将可以根据集水池内液位和泵站出水流量确定进水管涵内的流量,进而结合进水管涵上下游水头差估算进水管涵流量系数。

## 1 基本原理

污水泵站进水管涵流量系数计算的关键是确定管涵内的流量,因此基本原理可分为两部分:第1部分是当已知进水管涵内的流量后,结合进水管涵前后井内液位,利用沿程水头损失公式计算流量系数

(非满管流常采用曼宁粗糙系数 $n$ ,满管流常采用海曾-威廉系数 $C$ );第2部分是结合集水池内的水量平衡,根据泵站出水流量确定进水管涵内的流量。

### 1.1 进水管涵流量计算公式

由于污水泵站进水管涵较长,通常在数千米以上,当忽略管涵进口和出口处的水头损失时,管涵内流量常结合沿程水头损失公式计算。

进水管涵非满流时,常采用曼宁公式计算:

$$Q_L = \frac{1}{n} \omega R^{2/3} \left( \frac{h_1 - h_2}{L} \right)^{1/2} \quad (1)$$

即:

$$n = \frac{1}{Q_L} \omega R^{2/3} \left( \frac{h_1 - h_2}{L} \right)^{1/2} \quad (2)$$

进水管涵满流时,常采用海曾-威廉公式计算:

$$Q_L = 0.278 4 C D^{2.63} \left( \frac{h_1 - h_2}{L} \right)^{0.54} \quad (3)$$

即:

$$C = Q_L / \left[ 0.278 4 D^{2.63} \left( \frac{h_1 - h_2}{L} \right)^{0.54} \right] \quad (4)$$

式中: $Q_L$ 为进水管涵内污水流量, $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $\omega$ 为过流断面面积, $\text{m}^2$ ;  $R$ 为水力半径, $\text{m}$ ;  $h_1$ 和 $h_2$ 分别为进水管涵上游交汇井和下游集水池的水位, $\text{m}$ ;  $L$ 为进水管涵长度, $\text{m}$ ;  $D$ 为进水管涵直径, $\text{m}$ ;  $n$ 为曼宁粗糙系数,常用数值见表1;  $C$ 为海曾-威廉流量系数,常用数值见表2。

表1 排水管渠的曼宁粗糙系数

Tab.1 Manning roughness coefficient of drainage channels

项 目	$n$	项 目	$n$
UPVC管、PE管、玻璃钢管	0.009 ~ 0.011	浆砌砖渠道	0.015
石棉水泥管、钢管	0.012	浆砌块石渠道	0.017
陶土管、铸铁管	0.013	干砌块石渠道	0.020 ~ 0.025
混凝土管、钢筋混凝土管、水泥砂浆抹面渠道	0.013 ~ 0.014	土明渠 (包括带草皮)	0.025 ~ 0.030

表2 海曾-威廉流量系数值<sup>[3]</sup>

Tab.2 Hazen-Williams flow coefficient value

管道材料	水的 $C$ 值	污水的 $C$ 值
PVC	135 ~ 150	130 ~ 145
钢管(具有砂浆衬里)	120 ~ 145	120 ~ 140
钢管(无衬里)	110 ~ 130	110 ~ 130
球墨铸铁管(具有砂浆衬里)	100 ~ 140	100 ~ 130
石棉水泥管	120 ~ 140	110 ~ 135
混凝土压力管	130 ~ 140	120 ~ 130
球墨铸铁管(无衬里)	80 ~ 120	80 ~ 110

曼宁公式和海曾-威廉公式均适用于紊流条件(即雷诺数 $Re > 200$ )。式(2)和式(4)分别是在已知进水管涵流量、上下游井内液位条件下确定流量系数(即曼宁粗糙系数和海曾-威廉流量系数)公式。考虑到进水管涵中流量直接测试的难度,需要根据泵站集水池流量演算间接推导。

### 1.2 集水池流量演算

由于集水池的水量调节作用,泵站的出流量通常不等于泵站的进流量。污水泵站运行中,有集水

池液位和出流量的良好记录,同时集水池的液位与容积具有确定性关系,当这些条件已知时,可根据流量连续性确定泵站进流量,即进水管涵内的流量。当污水泵站只具有1路进水管涵时,根据流量连续性,集水池中蓄水容积的变化速率应等于进流量和出流量的差值,即:

$$Q_L - Q_P = \frac{dS}{dt} \quad (5)$$

式中: $Q_L$ 为集水池进流量,即进水管涵流量, $m^3/s$ ;  $Q_P$ 为集水池出流量,即水泵提升流量, $m^3/s$ ;  $S$ 为集水池蓄水量, $m^3$ ;  $t$ 为时间, $s$ 。

集水池演算中,只知道出流量  $Q_P$  随时间的变化情况(即出流过程线),而进流量  $Q_L$  和集水池蓄水量  $S$  均未知,很难应用直接积分方法求解,需采用差分方法求式(5)的近似解<sup>[4]</sup>。把式(5)表示为如下有限差分格式:

$$\frac{Q_{L,t+\Delta t} + Q_{L,t}}{2} - \frac{Q_{P,t+\Delta t} + Q_{P,t}}{2} = \frac{S_{t+\Delta t} - S_t}{\Delta t} \quad (6)$$

结合式(5),可以看出式(6)中作了如下假定:时段  $\Delta t$  的入流等于时段开始和结束时入流的平均值;时段  $\Delta t$  的出流等于时段开始和结束时出流的平均值;时段内蓄水量的变化等于时段结束时的蓄水量和时段开始时的蓄水量差值与时段  $\Delta t$  的比值。

对于每一时段,可用时段开始  $t$  时对应值推求时段结束  $t + \Delta t$  时对应值。分离未知量,经整理得:

$$Q_{L,t+\Delta t} = Q_{L,t} + \frac{2}{\Delta t}(S_{t+\Delta t} - S_t) + (Q_{P,t+1} - Q_{P,t}) \quad (7)$$

式(7)中出流过程  $Q_P$  是已知的。同样集水池的蓄水量  $S$  可看作水深  $h_2$  的函数,即:

$$S = S(h_2) \quad (8)$$

式(8)中集水池的水深  $h_2$  也是已知的。当能够确定出  $t = 0$  的  $Q_{L,t=0}$  时,其余各个时刻的  $Q_{L,t+\Delta t}$  将通过式(7)的迭代依次确定。

为确定  $t = 0$  时的初始  $Q_{L,t=0}$ ,需分析如下情况:

① 由式(7)看出,由于各时刻的  $S_t$  和  $Q_P$  是确定值, $Q_{L,t+\Delta t}$  随  $t = 0$  时  $Q_{L,t=0}$  的数值同步变化;如果初始进流量  $Q_{L,t=0}$  增加  $\Delta Q$ ,  $Q_{L,t+\Delta t}$  也会增加同样的  $\Delta Q$  值。

② 由式(5)看出,当  $t$  和  $t + \Delta t$  时集水池内水深不变,即蓄水容积  $S$  不变时,进流量  $Q_L$  将等于出流量  $Q_P$ 。

③ 由于泵站出流量和集水池水深测试过程中存在误差,且式(6)为式(5)的有限差分近似,因此即使在蓄水容积不变时刻,计算得到的进流量与出水流量也存在不一致性。

结合以上3点,确定初始  $Q_{L,t=0}$  的方法包括两步:①取  $Q_{L,t=0}$  为泵站最小出流量  $Q_{P,\min}$  和最大出流量  $Q_{P,\max}$  之间的1个数值,利用式(7)执行演算,求得后续各时刻的  $Q_{L,t+\Delta t}$  值,当然这些数值通常不是真实值。②考虑测试数据在  $t$  和  $t + \Delta t$  时蓄水量  $S_t = S_{t+\Delta t}$  的情况,这时  $\frac{Q_{L,t+\Delta t} + Q_{L,t}}{2} - \frac{Q_{P,t+\Delta t} + Q_{P,t}}{2}$  并不等于零,而是数值  $\Delta Q$  (该值可为正值也可能是负值);由于测试期间可能存在多个  $t$  和  $t + \Delta t$  时蓄水量  $S_t = S_{t+\Delta t}$  的情况,也就存在多个不同的  $\Delta Q$ ;取这些  $\Delta Q$  的平均值  $\overline{\Delta Q}$ ;然后令  $Q_{L,t=0} = Q_{L,t=0}^{(0)} - \overline{\Delta Q}$ ,进而可求出不同时刻的进流量  $Q_L$ 。

### 1.3 计算步骤

估计污水泵站进水管涵流量系数的步骤如下:

① 收集已知数据信息,包括进水管直径或箱涵尺寸、集水池蓄水容积随深度变化关系、进水管涵上游检查井的水位监测数据、集水池内水位(或水深)监测数据、泵站出水量数据等。

② 分析已知数据信息,弃除数据质量较差时段内的数据,从中选择质量较好的连续时段内数据作为计算已知数据。少量欠缺或异常值,可采用相邻数据线性插值法修正。对于测试参数相关性较强的情况,可采用相关分析法,由一个参数的数据推断并补充另一参数的缺失或异常数据<sup>[5]</sup>。

③ 根据集水池流量演算方法,计算各时刻的进流量  $Q_L$ 。

④ 如果进水管涵为非满流,根据公式(2)求各时刻曼宁粗糙系数  $n$  值;如果进水管涵为满流,根据公式(4)求各时刻海曾-威廉系数  $C$  值。

⑤ 考虑到各时刻求出的管道曼宁粗糙系数或海曾-威廉系数值并不相等,为便于排水管路系统模拟计算使用,最终确定污水泵站进水管涵流量系数采用曼宁粗糙系数或海曾-威廉系数的平均值,并与经验数值比较,确定系数的合理性。

## 2 案例研究

华东某市污水系统的大型泵站最大输送能力为  $20 m^3/s$ ,两条并联进水矩形混凝土箱涵的断面尺寸均为  $2.8 m \times 2.8 m$ ,长度均为  $3740 m$ ,建设时未安

装流量计量设施(见图1)。当上游水量出现大幅波动时(尤其在雨天),难以合理调度泵站。考虑泵站进水箱涵中安装流量计的难度,拟通过测试交汇井和集水池的水位情况估算流量系数,结合排水管渠系统水力模型,有效制定泵站的水泵运行方案,达到节约能源、降低泵机损耗的科学调度目的。

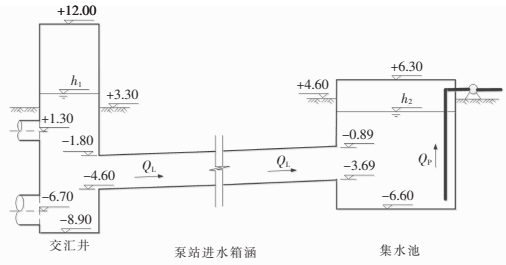


图1 污水泵站进水箱涵示意

Fig. 1 Inlet pipe or culvert of wastewater pumping station

估算进水箱涵内流量的关键是确定泵站进水箱涵的流量系数,主要步骤如下:

① 通过查询图纸资料和现场调查了解到,交汇井设有超声波液位计,可实时收集井内液位变化情况;集水池分两格,每格水平截面积为  $370 \text{ m}^2$ ,每格均设有超声波液位计,可实时收集液位变化情况;泵站流量可由出水总管上的流量计实时测试。

② 液位和流量数据通常每 5 min 记录 1 次。但是由于传感器灵敏性或信号传输问题,偶尔会出现极大值、极小值或者欠缺值等异常状况。通过测试数据分析,将 2017 年 4 月 4 日—9 日质量较好的液位和流量作为基础数据,这期间交汇井液位、集水池液位和泵站出水流量数据见图 2。由图 2(a)可以看出,交汇井液位数据异常发生在 4 月 8 日 23:45—9 日 00:20 之间,水位变化在  $3.71 \sim 4.36 \text{ m}$ 。考虑到交汇井液位数据齐全,中间无间断数据,且同一时段内集水池液位数据同样较高且泵站出水流量较大,认为该时段的液位仍处于正常状态。

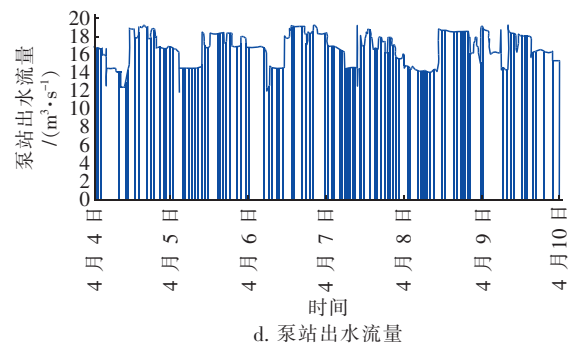
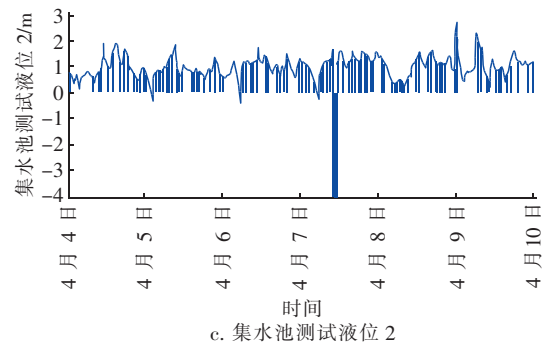
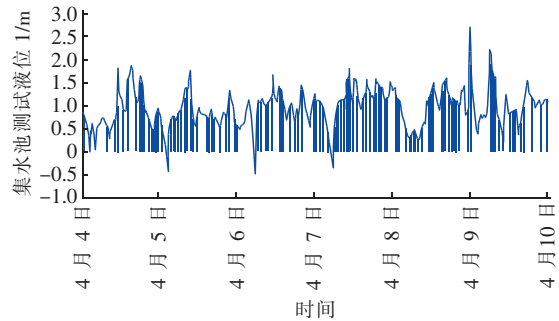
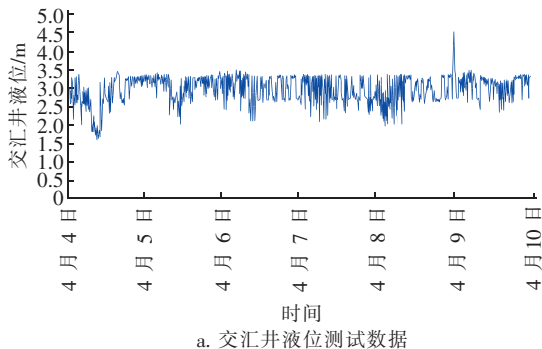


图2 2017年4月4日—9日交汇井液位、集水池液位和泵站出水流量

Fig. 2 Water level of manhole, sump and outflow of pumping station during April 4–9, 2017

集水池测试液位 1、测试液位 2 和泵站出水流量计量中一些单独时间点缺乏测试数据,表现为突然降落到零(没有测试数据时认为零值)的情况。为补充这些时间点的数据,将采用该时间点前后的数据进行线性插值确定。经处理后的集水池测试液位 1 和泵站出水流量数据见图 3。集水池测试液位 2 在 4 月 7 日 10:00—11:10 之间出现异常,测试记录显示数据均为  $-4.00 \text{ m}$ 。为弥补该段数据,发现两个集水池的测试液位 1 和测试液位 2 具有同步变化性,经曲线拟合,认为满足  $y = 0.9924x + 0.0615$  的线性关系( $R^2 = 0.9919$ ),其中  $x$  为测试液位 1 实测数据, $y$  为测试液位 2 推测数据。因处理后的测



试液位2的变化趋势与测试液位1相似,故不再列其数据图。

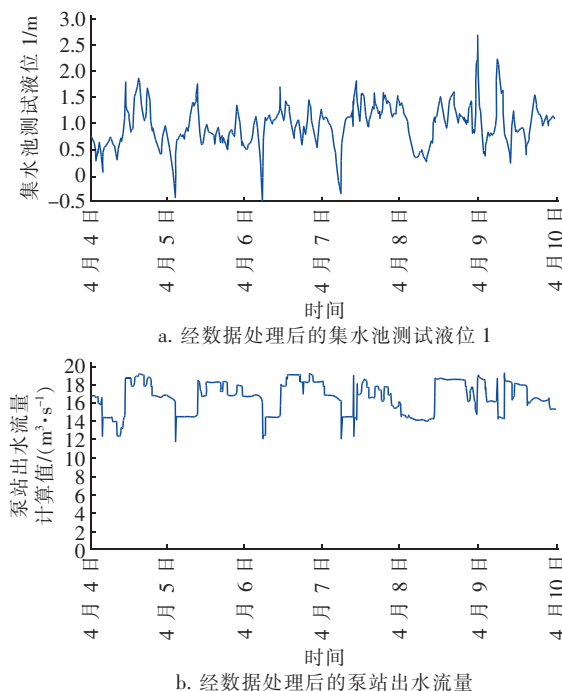


图3 经数据处理后的集水池测试液位1和泵站出水流量

Fig. 3 Test water level 1 of sump and outflow of pumping station after data processing

③ 根据集水池流量演算方法,计算各时刻的进水流量 $Q_L$ 。考虑到集水池分两格,且在各时刻的数据存在差异,计算中取两组液位数据的平均值用于计算。计算出的 $Q_L$ 流量为两条进水箱涵的总流量,因这两条箱涵长度、断面尺寸和铺设标高相等,认为其中通过的流量均为 $Q_L/2$ 。推算出的 $Q_L$ 变化见图4。

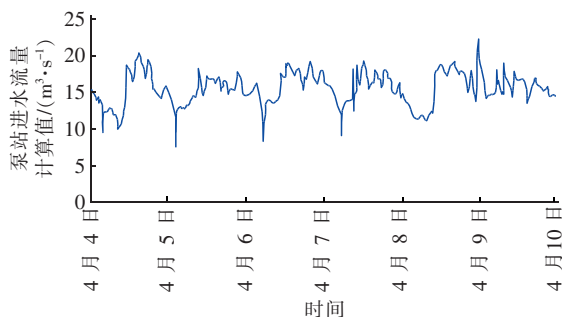


图4 泵站进水流量计算值

Fig. 4 Calculation value of inlet flow of pumping station

④ 进水箱涵上端底部标高为 $-4.60\text{ m}$ 、下端底部标高为 $-3.69\text{ m}$ (见图1),为逆坡铺设(该状况在排水系统中较为少见,通常为正坡铺设);进水箱

涵下端顶部标高为 $-0.89\text{ m}$ ,而集水池测试液位运行在 $-0.5\text{ m}$ 以上。因此,可以确定进水箱涵处于满流条件下运行,待确定的流量系数将采用海曾-威廉系数。考虑到管道较长,忽略局部损失影响。根据进水箱涵确定的流量、交汇井液位高度和集水池液位高度推求海曾-威廉系数。各时刻求出的海曾-威廉系数并不相等(见图5),因此在模型应用中可采用其平均值(124.4)。由表2可以看出,该值处于混凝土压力管 $C$ 值(120~130)的范围内,认为计算所得结果124.4是合理的。

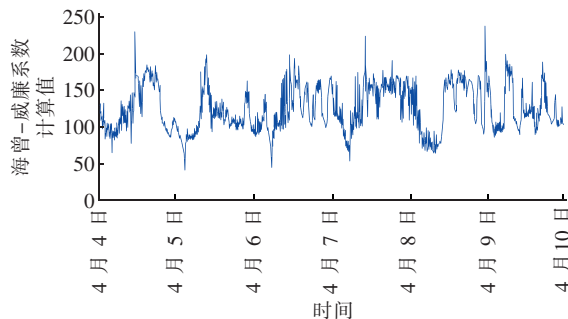


图5 管道在各时刻的海曾-威廉系数计算值

Fig. 5 Hazen-Williams coefficient value of pipeline at each moment

由于数据分析时段为2017年4月4日—9日,难以体现污水泵站进水管涵常年情况,还需长期收集测试数据,反复校核模型和验证结果。

### 3 结论

① 大型污水泵站的进水管涵如果在设计和建设阶段没有考虑安装流量测试设施,在运行过程中很难找到合适方式测试通过的流量。当已知污水泵站进水管涵上端交汇井内液位、集水池内液位和泵站出水流量时,可以根据集水池内液位和泵站出水流量确定进水管涵内的流量;进而结合进水管涵上、下游水头差估算进水管涵流量系数,以满足构建排水系统水力模型的要求。

② 数据收集过程中应注意对数据质量较差时段内数据的处理,例如采用线性内插法或相关法修改。考虑到测试数据存在瞬变特征,模型中将采用进水管涵流量系数平均值。

③ 随着智慧排水和排水信息化要求的提高,建议排水工程在设计和建设阶段考虑在管网内的关键位置安装相应的流量监测设备,便于运行管理中的应用。

(下转第91页)