

设计经验

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.16.009

## 《建筑给水排水设计标准》设计秒流量计算方法商榷及改进

陈和苗<sup>1,2</sup>, 刘芳<sup>3</sup>, 邵建美<sup>4</sup>

(1. 宁波市天一建筑设计有限公司, 浙江 宁波 315010; 2. 宁波市甬太建设工程施工图审查中心, 浙江 宁波 315010; 3. 浙江水利水电学院 测绘与市政工程学院, 浙江 杭州 310018; 4. 中国联合工程有限公司, 浙江 杭州 315010)

**摘要:** 对《建筑给水排水设计标准》(GB 50015—2019)居住类建筑的生活给水管道设计秒流量计算方法进行了数学解析,指出此计算方法的理论依据不足,按此计算方法得到的秒流量值在小规模管网必定偏大、在大规模管网必定偏小。分析了该标准中旅馆、酒店类平方根法给水设计秒流量计算方法存在的问题,指出此计算方法不适合较大规模的给水管网;分析了该标准中含大便器自闭式冲洗阀生活给水管道设计秒流量计算方法存在的问题,算例揭示按此计算方法得到的秒流量值严重偏小;分析了该标准中生活排水设计秒流量计算方法存在的问题,揭示此设计秒流量计算值偏小。提出概率法设计秒流量计算方法可以解决以上问题,该方法比现行标准中的计算方法更加科学、简单、安全、准确。

**关键词:** 设计秒流量; 平方根法; 概率法

**中图分类号:** TU99 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)16-0054-09

## Discussion and Modification on Design Flow Calculation Methods in *Standard for Design of Building Water Supply and Drainage*

CHEN He-miao<sup>1,2</sup>, LIU Fang<sup>3</sup>, SHAO Jian-mei<sup>4</sup>

(1. Ningbo Tianyi Architecture Design Co. Ltd., Ningbo 315010, China; 2. Ningbo Yongtai Construction Engineering Construction Drawing Review Center, Ningbo 315010, China; 3. School of Geomatics and Municipal Engineering, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China; 4. China United Engineering Corporation Limited, Hangzhou 315010, China)

**Abstract:** Design flow calculation method for residential building domestic water supply pipeline in *Standard for Design of Building Water Supply and Drainage* (GB 50015 - 2019) was mathematical analyzed. It was found that the calculation method was lack of theoretical basis, and the design flow obtained by this calculation method must be too large in small-scale pipe network, and too small in large-scale pipe network. Problems existing in calculation method of design flow by square root method for inns and hotels in the standard were analyzed, and it was found that this calculation method was not suitable for large-scale water supply networks. The problems existing in the design flow calculation method for domestic water supply pipeline design with toilet self-closed flushing valve in the standard were analyzed, and the calculation examples revealed that the design flow obtained by this method was too small. The problems existing in the design flow calculation method for domestic drainage in the standard were analyzed, which also indicated that the calculation value was too small. It was proposed that probability

design flow calculation method could solve the above problems, and the method is more scientific, simple, safe and accurate than calculation methods in the current standard.

**Key words:** design flow; square root method; probability method

《建筑给水排水设计标准》(GB 50015—2019,以下简称《建水标》)已于2020年3月1日起实施。《建水标》建筑生活给水排水管道设计秒流量计算公式沿用《建筑给水排水设计规范》(GB 50015—2003,以下简称《建水规》)中的公式。多年来对生活给水设计秒流量的计算公式不合理,有很多反映,要求建立我国设计秒流量公式的呼声较高<sup>[1-4]</sup>,但是无论《建水规》还是《建水标》,设计秒流量计算方法问题始终没有解决。

## 1 《建水标》计算方法商榷

### 1.1 居住类建筑生活给水管道设计秒流量计算

按《建水标》,设计秒流量计算先按式(3.7.5-1)计算卫生器具给水当量平均出流概率 $U_0$ (为书写方便,以下把 $0.01U_0$ 记为 $p$ ):

$$0.01U_0 = p = \frac{q_L \cdot m \cdot K_h}{0.2 \cdot N_g \cdot 3600 \cdot T} \quad (1)$$

最大时平均秒流量(L/s)以 $q_s$ 表示:

$$q_s = \frac{q_L \cdot m \cdot K_h}{3600 \cdot T} \quad (2)$$

那么式(1)可简化为:

$$p = \frac{q_s}{0.2 \cdot N_g} \quad (3)$$

移项后:

$$q_s = 0.2 \cdot N_g \cdot p \quad (4)$$

按《建水标》式(3.7.5-2)计算卫生器具给水当量同时出流概率:

$$U = \frac{1 + \alpha_c (N_g - 1)^{0.49}}{\sqrt{N_g}} \quad (5)$$

若给水管道的卫生器具给水当量为 $N_g$ ,那么同时使用的给水当量 $m$ 计算如下:

$$m = N_g \cdot U = \sqrt{N_g} [1 + \alpha_c (N_g - 1)^{0.49}] \quad (6)$$

按《建水规》,第151页条文说明,当 $q_s = 40$  L/s时, $q_s = q_g$ ,则:

$$\alpha_c = \frac{p(200/p)^{0.5} - 1}{(200/p - 1)^{0.49}} \quad (7)$$

将式(7)的 $\alpha_c$ 代入式(6),得到:

$$m = \sqrt{N_g} + \sqrt{N_g} \alpha_c (N_g - 1)^{0.49} = \sqrt{N_g} +$$

$$\frac{p(200/p)^{0.5} - 1}{(200/p - 1)^{0.49}} \sqrt{N_g} (N_g - 1)^{0.49} \quad (8)$$

因为 $200/p - 1 \approx 200/p$ ,且当 $N_g$ 充分大时 $N_g - 1 \approx N_g$ ,因而式(8)可简化为:

$$m = \sqrt{N_g} + \frac{p(200/p)^{0.5} - 1}{(200/p)^{0.49}} N_g^{0.99} = \sqrt{N_g} + \frac{p(200/p)^{0.5} - 1}{(200/p)^{0.49}} N_g^{0.99} \quad (9)$$

当 $p = 0.01$ 时,式(9)可写为:

$$m = \sqrt{N_g} + 0.00323 N_g^{0.99} \quad (10)$$

式(10)是当 $p = 0.01$ 时按《建水标》计算方法得到的同时使用当量数计算公式。在式(10)中,0.00323即为《建水标》附录B表格中 $p = 0.01$ 对应的 $\alpha_c = 0.00323$ 。

以上是《建水标》住宅类生活给水管道设计秒流量的计算方法。

若按概率法计算方法,同时使用的卫生器具给水当量数 $m$ 可通过下式计算:

$$m = 2.33 \sqrt{N_g \cdot p} + N_g \cdot p + 1.2 \quad (11)$$

若忽略式(11)中的尾数1.2,且把 $p = 0.01$ 代入,那么式(11)就转为:

$$m = 0.233 \sqrt{N_g} + 0.01 N_g \quad (12)$$

把式(10)与式(12)进行对比,可发现两者结构相似;当 $N_g$ 较大时,式(10)或式(12)的等号右边第二项 $N_g$ 对设计秒流量有更大的贡献。因为式(10)等号右侧第二项 $N_g$ 前的系数0.00323小于式(12)等号右侧第二项 $N_g$ 前的系数0.01,因而可判定在较大规模的给水管网,《建水标》计算所得的设计秒流量偏小;同理可判定在较小规模的给水管网,《建水标》计算所得的设计秒流量偏大。 $p$ 为其他取值时,也可得到相同的判定。所有实测给水流量,均验证此判定正确<sup>[5-6]</sup>。

《建水规》第3.6.4条的条文说明:“从公式的形式上就可以看出它是原平方根法计算公式的改良”。可见《建水标》《建水规》计算法是概率修正的平方根法,是在原《建筑给水排水设计规范》(GBJ 15—88)平方根法的基础上,经改进后以幂函数形式的计算公式,并加上一些硬性规定修正而成,这种

计算方法没有实现《建水规》管理组曾经的共识“生活给水管道设计秒流量计算公式应以概率法计算作为基础”<sup>[3]</sup>。硬性规定为:当计算管段最大用水时的平均秒流量 $q_s$ 达到40 L/s时,以最大用水时的平均秒流量作为设计秒流量,在此称此硬性规定为边界条件二。在 $q_s \geq 40$  L/s时,实测秒流量与最大小时平均秒流量并不相等;即实测表明边界条件二不成立。边界条件二不成立,即式(7) $\alpha_c$ 计算方法不成立。式(7)不成立,那么式(8)、(9)、(10)就不成立,就直接表明《建水标》的计算方法不合理。

对《建水标》这个设计秒流量计算方法,鉴于当时条件所限不曾进行具体工程测试验证<sup>[1]</sup>。众多实测流量表明较大规模的给水管网,《建水标》计算所得的设计秒流量偏小;较小规模的给水管网,《建水标》计算所得的设计秒流量偏大<sup>[5-6]</sup>。

《建水标》中,设计秒流量算法取消了3 000人(或5 000人)的边界限制。因为式(5)中的分母 $\sqrt{N_g}$ 的值,大于分子中 $(N_g - 1)^{0.49}$ 的值,故可判定:当 $N_g$ 充分大时,会使得同时出流概率 $U <$ 平均出流概率 $p$ ,即会使得设计秒流量小于最大小时的平均秒流量,导致逻辑不严、计算失误。从式(10)与式(12)的对比,更可以轻易得出如下判定:

《建水标》设计秒流量对应的使用当量数为 $\sqrt{N_g} + 0.003\ 23\ N_g^{0.99}$ ,最大小时流量的平均秒流量对应的当量数为 $0.01\ N_g$ ;当 $N_g$ 充分大时,前者将会小于后者,即设计秒流量小于最大小时流量的平均秒流量。

## 1.2 旅馆、酒店、医院、学校类建筑设计秒流量计算

《建水标》中此类给水设计秒流量采用平方根法计算公式计算,此公式自《室内给水排水和热水供应设计规范》(BJG 15—64)使用至今已近60年;此计算式系沿用前苏联1962年建筑标准与法规的公式,1976年苏联已不再使用此公式;我国改革开放20多年来,建筑标准不断提高,卫生器具的配置标准也相应提高,用水定额也有了提高,公式沿用太久不能反映真实用水情况<sup>[3]</sup>。

因为平方根法计算公式只含有与管网有关的 $\sqrt{N_g}$ 项,因而当管网较大时,计算所得的设计秒流量小于最大时平均秒流量<sup>[3]</sup>,设计秒流量计算值肯定偏小。平方根法计算公式不适合较大规模的给水管网。

## 1.3 含大便器自闭式冲洗阀设计秒流量计算

按《建水标》,含大便器自闭式冲洗阀生活给水管道的的设计秒流量按条文第3.7.7条、第3.7.8条计算,在实际工程设计中发现,此计算公式存在以下问题(或不足、或差错):

某学校设置有 $N = 1\ 000$ 个冲洗阀,每个冲洗阀额定流量为1.2 L/s,按《建水标》第3.7.7条计算这些冲洗阀产生的设计秒流量如下:

$$q_g = 0.2\alpha \sqrt{0.5N} + 1.2 = 0.2 \cdot 1.8 \sqrt{500} + 1.2 = 9.2\text{ L/s} \quad (13)$$

设计秒流量9.2 L/s,相当于在1 000个冲洗阀中有8个冲洗阀同时作用,即大便器自闭式冲洗阀同时出流概率为0.008。一般认为学校类建筑的大便器自闭式冲洗阀平均使用概率为0.03。同时出流概率0.008如此之小,且小于平均使用概率0.03,令人不解。依据上述计算法,同样可得出:在宿舍(I、II类)、旅馆、宾馆、酒店式公寓、医院、疗养院,含有大便器自闭式冲洗阀的流量计算公式也有问题。

按《建水标》第3.7.8条,工业企业生活间、公共浴室、体育场馆等“密集型”用户的给水管道的的设计秒流量,采用“同时使用百分数”公式,自闭式冲洗阀的同时给水百分数为1%~2%。若按2%计,100个自闭式冲洗阀,同时使用的冲洗阀为1~2个,此流量与日常生活经验和工程师们的习惯设计差异巨大,令人不解。

## 1.4 建筑生活排水管道设计秒流量计算

① 首先是平方根法本身因素而导致的缺陷:《建水标》中的平方根法只考虑排水的不均匀性,没有全面反映影响排水量的各种实际因素,如卫生器具的设置场所、单位器具负荷人数、给水定额、不同类型卫生器具组合形式、使用频率等因素与设计秒流量的关系。虽然通过 $\alpha$ 值反映了不同类型用户的卫生器具使用形态不同的情况,但用户类型划分比较粗糙,公式中的参数 $\alpha$ 的取值需进一步推敲。

② 对于高层建筑和功能复杂的建筑,采用现行的设计流量计算时常显现出结果偏小,特别是在和国外的交流合作项目中,这种现象越发凸显。《建水标》《建水规》主要起草人冯旭东<sup>[7]</sup>研究揭示:与欧洲和日本的计算值相比,我国排水设计秒流量值偏小。按理我国双职工人数多于日本,给排水的高峰更加集中,计算所得的排水管道设计秒流量



应大于日本值才合理。业内普遍认为按《建水标》计算所得的排水管道设计秒流量值偏小。以33层高层住宅的厨房洗涤盆(按单个洗涤盆1个当量计算)管道为例,设计秒流量为1.36 L/s,显然偏小。按现行《建水标》计算,对大于40层住宅的厨房的给水、排水管道进行秒流量计算,所得的排水管道设计秒流量会小于给水管道设计秒流量,令人不解。排水系统的大便器、洗涤盆、浴盆等因为排水口有塞,因而排水流量理应大于其对应的给水流量。

③ 排水流量计算公式仍采用《建水规》(GBJ 15—88)算法而未做大的修改。此计算方法沿用前苏联算法,1976年苏联不再使用此公式。

④ 为了解决排水流量与承载负荷之间不合理的现象,引入“最大设计排水能力”概念<sup>[4]</sup>,以区别实测最大排水流量,在排水秒流量计算公式尚未出台的过渡时期,作为解决问题的方案。因为《建水标》设计秒流量值不符合实际,因而只好人为修改排水管道通水能力值,以使设计秒流量值与排水管道通水能力值相匹配;《建水标》排水管道通水能力值不能正确反映排水管道的真实通水能力。

研究表明,《建水标》平方根排水设计秒流量计算方法值小于概率法排水设计秒流量计算值,在不同的卫生器具组合、不同建筑物、不同卫生器具数、不同地域,这两种计算值的比值并不是一个定数,例如在连接18~30层污废合流的住宅卫生间排水立管中,两者比值是0.8~0.6。可见《建水标》把排水管道通水能力实测值打折扣成为“最大设计排水能力”后,“最大设计排水能力”与排水设计秒流量之间是扭曲的对应关系,在很多场合不存在对应关系。

与排水管道通水能力相匹配的是排水管道管径、管材(材质、是否具有内螺旋肋等)、采用的管件类型(如普通排水管件或特殊管件)、系统(含通气系统)、判定条件(管道内正负压或水封残余水深)等因素,而不是生活排水管道设计秒流量计算公式。

只有当排水设计秒流量计算值符合实际,排水管道通水能力值符合实际时,两者才存在科学合理的匹配关系,两者才能建立联系,真正解决工程实际问题。

⑤ 居住建筑生活给水管道设计秒流量公式采用概率修正的平方根法,而排水流量公式仍采用平方根法,违反了给水和排水管道设计秒流量计算方

法应一致的同一律。

## 2 改进建议

研究表明,卫生器具的使用是随机事件。住宅、旅馆类居住建筑中,人员少而卫生器具较多,每个卫生器具的使用各自独立、不受其他卫生器具的影响或影响不显著,卫生器具的使用符合二项分布。在一些公共建筑中,卫生器具拥挤使用,卫生器具的使用规律符合泊松分布。数量较多的卫生器具在随机使用状态下,符合正态分布。可见卫生器具的使用规律可能符合二项分布、泊松分布或正态分布,因而可按概率论确定随机使用状态的卫生器具的数量,进而计算给水(或排水)管道设计秒流量。

建筑生活给水排水管道设计秒流量的计算方法是衡量一个国家建筑给水排水工程建设标准水平的重要指标。设计秒流量的计算方法按应用的先后顺序分为三个阶段:经验法、平方根法、概率法。显而易见概率法比经验法、平方根法更科学合理的计算方法。

本课题组提出的基于概率论的建筑生活给水排水管道设计秒流量计算方法,于2019年1月在住建部科技与产业化发展中心通过评估。

## 3 概率法计算生活给水管道设计秒流量

### 3.1 按二项分布计算单一卫生器具设计秒流量

若某管道系统存在 $N$ 个水龙头(或卫生器具),每个水龙头在用水最大高峰1h内的平均给水概率为 $p$ ,每个水龙头的额定流量为 $q_d$ (L/s)。若 $0 \sim m$ 个水龙头使用概率的总和不小于0.99,则设计秒流量 $q_g$ :

$$q_g = m \cdot q_d \quad (14)$$

0.99为给水系统的保证率,即可靠度,记为 $P_m$ 。

若水龙头的使用符合二项分布,则 $N$ 个龙头在所观察时刻有 $m$ 个同时被使用的概率 $P$ 为:

$$P_{(x=m)} = \binom{N}{m} p^m (1-p)^{N-m} \quad (15)$$

式中: $P$ 为 $m$ 个水龙头同时使用概率; $\binom{N}{m}$ 为在 $N$ 个不同元素中,每次取出 $m$ 个不同元素,不管其顺序合并成一组的组合种数, $\binom{N}{m} = \frac{N!}{m!(N-m)!}$ ;  $N$ 为管道系统水龙头总数; $m$ 为同时使用的水龙头个数; $p$ 为水龙头使用的概率。

在  $N$  个水龙头中,若  $0 \sim m$  个水龙头使用概率的总和不少于  $P_m$ ,则有:

$$\sum_{k=0}^m \binom{N}{k} p^k (1-p)^{N-k} \geq P_m \quad (16)$$

若通过计算求得式(16)中的  $m$  值,则依据式(14)可求得设计秒流量。

为叙述方便,把式(16)改写:

$$\sum_{k=0}^m \binom{N}{k} p^k (1-p)^{N-k} = P_m \quad (17)$$

依据上述计算方法的算例如下:

算例1:一个存在100个大便器自闭式冲洗阀的给水系统,计算其同时使用的冲洗阀数量<sup>[8]</sup>。

解:自闭式冲洗阀每次冲洗时间为6 s,在最大用水高峰的1 h内前后两次使用冲洗阀的间隔为200 s,则冲洗阀平均使用概率  $p = t/T = 6/200 = 0.03$ 。

100个冲洗阀中没有任何一个使用的概率为:

$$P_{(x=0)} = \binom{N}{0} p^0 (1-p)^{N-0} = (1-p)^{100} = 0.97^{100} = 0.048$$

100个冲洗阀中任何一个在使用的概率为:

$$P_{(x=1)} = \binom{N}{1} p^1 (1-p)^{N-1} = 100 \cdot 0.03^1 \cdot 0.97^{99} = 0.147$$

按照上述计算方法进行下去,一直计算到任意10个冲洗阀同时使用的概率,其计算结果如表1所示。

表1 100个冲洗阀中有任何0~10个同时使用的概率值

Tab. 1 Probability value of using 0~10 flush valves simultaneously in random among the 100

使用个数	代码	概率值
0	$P_{(x=0)}$	0.048
1	$P_{(x=1)}$	0.147
2	$P_{(x=2)}$	0.225
3	$P_{(x=3)}$	0.227
4	$P_{(x=4)}$	0.170 5
5	$P_{(x=5)}$	0.101 3
6	$P_{(x=6)}$	0.049 6
7	$P_{(x=7)}$	0.020 6
8	$P_{(x=8)}$	0.007 4
9	$P_{(x=9)}$	0.002 3
10	$P_{(x=10)}$	0.000 65

从  $P_{(x=0)}$  开始将这些概率值累加起来,其累加值  $\geq 0.99$  时的最少同时使用的冲洗阀为8个,即同时使用的冲洗阀数量为8个。

### 3.2 按正态分布计算单一卫生器具设计秒流量

从算例1可见,基于二项分布的式(17)需计算组合数,当  $N$  较大时计算麻烦,可采用二项分布的正态分布逼近计算来求得式(17)中的  $m$  值。

根据棣莫弗-拉普拉斯极限定理,当  $N$  充分大[符合  $N \cdot p \geq 5, N \cdot p(1-p) \geq 5$ ]时,服从二项分布的随机变量近似服从正态分布,即可采用下式对式(15)做近似计算:

$$P_{(x=m)} = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(m-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (18)$$

式中  $\mu = N \cdot p, \sigma^2 = N \cdot p(1-p)$ 。则式(17)改写为:

$$P_m = \int_0^m \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (19)$$

令:

$$z = \frac{t-\mu}{\sigma} \quad (20)$$

则式(19)等效转换为:

$$P_m = \int_{-\frac{\mu}{\sigma}}^{\frac{m-\mu}{\sigma}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = \Phi\left(\frac{m-\mu}{\sigma}\right) - [1 - \Phi\left(\frac{\mu}{\sigma}\right)] \quad (21)$$

式(21)中  $\Phi(x)$  称为正态分布的分布函数,  $x$  称为正态分布的下侧分位数。

在建筑给水排水系统  $p < 0.03$ , 当  $N > 500$  时:

$$\frac{\mu}{\sigma} = \frac{N \cdot p}{\sqrt{N \cdot p(1-p)}} > \frac{300p}{\sqrt{300p(1-p)}} = 3.9 \quad (22)$$

因为  $\Phi\left(\frac{\mu}{\sigma}\right) = \Phi(3.9) = 0.999\ 96 \approx 1$ , 所以式

(21)简化为:

$$P_m = \Phi\left(\frac{m-\mu}{\sigma}\right) \quad (23)$$

查标准正态分布表,当取不同保证率  $P_m$  时,下式中  $x$  的取值见表2。

$$\frac{m-\mu}{\sigma} = x \quad (24)$$

整理得到:

$$m = x \cdot \sigma + \mu \quad (25)$$

在式(25)中代入  $\sigma, \mu$ , 得到:

$$m = x \cdot \sigma + \mu = x \sqrt{N \cdot p(1-p)} + N \cdot p \quad (26)$$

建筑生活给水管道系统  $p$  较小,  $1-p \approx 1$ , 因而

计算时可忽略式(26)中的 $(1-p)$ 而不影响计算精度。

按式(26)求得的 $m$ 值,有时略小于按式(17)

求得的,需要设置尾数 $K$ 值来修正,修正后的计算式为式(11)。

$K$ 取值见表2。

表2  $P_m$ 与 $x$ 、 $K$ 的关系

Tab. 2 Relationship between  $P_m$  and  $x$ ,  $K$

保证率 $P_m$	0.900	0.917	0.950	0.958	0.970	0.990	0.997	0.998	0.999
下侧分位数 $x$	1.28	1.38	1.65	1.73	1.88	2.33	2.75	2.88	3.09
修正系数 $K$	0.60	0.64	0.76	0.85	0.90	1.20	1.60	1.70	1.90

$$m = x \sqrt{N \cdot p} + N \cdot p + K \quad (11)$$

式(11)是按二项分布、正态分布推导得到的建筑生活给水设计秒流量计算公式。也是按泊松分布得到的给水设计秒流量公式通式。

式(11)是在一定前提条件下推导得出的连续型通式,验算发现按此连续型通式计算值与按式(17)或(29)离散型计算值完全一致。在混合器具系统也是如此。

算例2:试按式(11)计算算例1。

解:自闭式冲洗阀个数为 $N=100$ ,平均使用概率 $p=0.03$ ,把这些数据代入式(11): $m = x \sqrt{N \cdot p} + N \cdot p + K = 2.33 \sqrt{100 \cdot 0.03} + 100 \cdot 0.03 + 1.2 = 8.2$ 。

即同时使用的冲洗阀数量为8.2个。

### 3.3 按泊松分布计算单一卫生器具设计秒流量

$N$ 个水龙头在所观察时刻有 $m$ 个同时被使用的概率是 $P$ :

$$P_{(x=m)} = \frac{\lambda^m}{m!} e^{-\lambda} \quad (27)$$

式(27)中 $\lambda$ 既是泊松分布的均值,也是泊松分布的方差。

$$\lambda = N \cdot p \quad (28)$$

如果确定了保证率 $P_m$ ,可由下式计算同时给水的卫生器具数 $m$ :

$$\sum_{k=0}^m P_{(x=k)} \geq P_m \quad (29)$$

式(29)是离散型公式,使用不便。按概率论,泊松分布与正态分布在一定的条件下也具有近似关系,即符合下式:

对于任意 $m>0$ ,有:

$$\lim_{\lambda \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^m \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_a^b e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (30)$$

其中 $a = \frac{0-\lambda}{\sqrt{\lambda}}$ ,  $b = \frac{m-\lambda}{\sqrt{\lambda}}$ ,  $\lambda = N \cdot p$ 。

由式(30)可知,泊松分布 $x \sim \pi(\lambda)$ 的极限分布是正态分布 $x \sim N(\mu, \sigma^2)$ ,因而可以按下式采用正态分布求得式(29)中的 $m$ :

$$m = x\sigma + \mu = x \sqrt{N \cdot p} + N \cdot p \quad (31)$$

式(31)中 $x$ 的取值见表2。计算发现式(31)有时计算值偏小,需要设置 $K$ 值来修正。 $K$ 取值见表2。即按泊松分布推导得到的给水管设计秒流量计算式(31)完全等同于式(11)。

### 3.4 建筑给水管设计秒流量计算公式的通式

按同时使用的水龙头数量计取的设计秒流量计算公式的通式为式(11)。若换算为以流量计的设计秒流量,则给水管设计秒流量计算式为:

$$q_g = m \cdot q_d = q_d (x \sqrt{N \cdot p} + N \cdot p + K) \quad (32)$$

在最大用水时段卫生器具给水当量平均出流概率 $p$ 可按下式求得:

$$q_s = q_d \cdot N \cdot p \quad (33)$$

很明显,式(4)是式(33)在 $q_d=0.2$  L/s时的特例。

那么式(32)可改写为:

$$q_g = x \sqrt{q_d} \sqrt{q_s} + q_s + K \cdot q_d \quad (34)$$

管道直饮水水龙头 $q_d=0.05$  L/s;一般建筑配水点 $q_d=0.20$  L/s;大便器自闭式冲洗阀 $q_d=1.2$  L/s。若取 $P_m=0.99$ ,查表2可得 $x=2.33$ ,  $K=1.2$ 。把这些数据代入式(34),可分别得到:

管道直饮水系统设计秒流量计算式:

$$q_g = 0.52 \sqrt{q_s} + q_s + 0.06 \quad (35)$$

一般生活给水管设计秒流量计算式:

$$q_g = 1.04 \sqrt{q_s} + q_s + 0.24 \quad (36)$$

大便器自闭式冲洗管道设计秒流量计算式:

$$q_g = 2.6 \sqrt{q_s} + q_s + 1.4 \quad (37)$$

将式(36)与式(37)对比,可知含大便器自闭式冲洗管道的设计秒流量与普通生活给水管设计秒流量之间的差值,并不是恒等于1.2。

### 3.5 计算混合卫生器具系统设计秒流量

若管道系统中各类用水卫生器具的使用规律符合正态分布,那么混合卫生器具的给水管道设计秒流量可按式(38)计算:

$$\begin{cases} \mu = \sum q_{di} \cdot N_i \cdot p_i \\ \sigma^2 = \sum q_{di}^2 \cdot N_i \cdot p_i \\ q_g = x \cdot \sigma + \mu + K \cdot q_{dmax} \end{cases} \quad (38)$$

式(38) $\sigma^2$ 计算时已忽略 $(1-p_i)$ 项而不影响计算精度。

显然式(38)中的 $\mu$ 等同于式(34)中的 $q_s$ ,亦等同于日本定流量值 $\bar{q}$ 。

### 4 概率法计算生活排水管道设计秒流量

与生活给水管道相比,生活排水管道的流态有下列不同:排水管道具有高度与长度;排水管道非满流。这些不同可能使得排水设计秒流量不同于给水设计秒流量。

上述两个特性会影响瞬间流卫生器具产生的秒流量,具体分析如下:

① 排水管道具有一定高度,发生在上游的排水需要流淌一段时间才能与下游排水叠加组成设计秒流量。若建筑物排水立管高度为160 m,从最上游的排水抵达排水立管底部的时间约为40 s,那么高峰排水时间会从3 600 s延长至3 640 s,从而分散了高峰排水流量、削减了设计秒流量的峰值,即使实测秒流量小于按式(32)、式(38)计算秒流量。3 640 s与3 600 s的比值约为1.01,可见有限高度的建筑物高度对设计秒流量的影响极其微弱。

② 排水管道存在空隙容量,瞬间流排水的流量会在排水管道中衰减,即式(32)、式(38)中 $q_d$ 值会变小。此因素导致实测秒流量会略小于按式(32)、式(38)计算的秒流量。

③ 经计算发现,概率法排水设计秒流量计算公式中修正尾数 $K$ 值与 $N$ 、 $p$ 均有关; $N$ 、 $p$ 越小, $K$ 值越小。对于排水管道系统, $N$ 、 $p$ 较小, $K$ 值可小于表2的取值。此因素导致实测秒流量会略小于按式(32)、式(38)计算的秒流量。

④ 早些发生在上游的瞬间流排水流淌一定距离后恰好与晚些发生在下游的瞬间流排水重叠,即不在同一时刻发生的排水会过度叠加,此因素导致实测排水秒流量会略大于按式(32)、式(38)计算的秒流量。举例如下:大便器是瞬间流排水器具,一次

排水4 s。若第1秒第28层大便器排水,第5秒第23层大便器排水,那么在这条排水立管同时排水的大便器是一台。若模拟实际水流行进过程,会发现第28层大便器排水与第23层大便器排水叠加。

综合上述因素,忽略排水管道的高度与长度、忽略排水管道非满流这些不同于给水管道的流态,生活排水管道设计秒流量计算公式可与生活给水管道设计秒流量计算公式采用相同概率法计算公式。

### 5 问题讨论

从设计秒流量计算式(32)、式(38)可知,影响设计秒流量的因素有保证率 $P_m$ 、卫生器具平均给水(或排水)概率 $p$ 、卫生器具数量 $N$ 、卫生器具额定给水(或排水)流量 $q_d$ 。对于某一给定的给水(或排水)管道系统,其 $N$ 、 $q_d$ 值是固定的,只要确定了 $p$ 值,即可求得管道系统的设计秒流量。

#### 5.1 卫生器具最大时平均给水排水概率 $p$ 的确定

卫生器具最大时的平均排水概率,可按以下方法确定:

① 实测法。

② 以人们生活习惯确定,如住宅类建筑每人早晨使用大便器一次;极其拥挤使用的大便器一次冲洗时间6 s,前后两次冲洗间隔200 s,那么 $p = 6/200 = 0.03$ 。

③ 以卫生器具的给水排水量推求。

#### 5.2 保证率 $P_m$ 值

$P_m$ 值与给水(或排水)系统可靠性有关,应根据实际需求而确定。若取保证率99%,那么设计秒流量为高峰给水(或排水)时段内最大持续72 s时间内的平均秒流量。一般地,若保证率为 $P_m$ ,那么设计秒流量的持续时间为 $t = 7200 \times (1 - P_m)$ 。

### 6 概率法设计秒流量计算方法评价

#### 6.1 科学性

基于概率论的设计秒流量算法是基于人们使用卫生器具属于概率事件、同时使用的卫生器具的数量符合概率规律性这一客观存在的事实,因而概率法在理论上是合理的,更具科学性。概率法计算生活给水排水管道设计秒流量,全面考虑了用水定额、卫生器具设置标准、用水人数、用水习惯、安全标准诸多因素,更加科学、合理、先进。

#### 6.2 同律性

建筑给水与排水都是通过卫生器具来完成的,给水是卫生器具对水的接收,排水是卫生器具对水



的排出过程。给水与排水相辅相成、不可分割,其设计秒流量计算应符合同一规律。尽管非满流排水管道存在的空气芯对排水设计秒流量有一定影响,但是总体上排水规律与给水规律一致,建筑生活给水排水管道设计秒流量均应采用概率算法。

概率法设计秒流量计算方法统一了《建水标》中的住宅建筑类生活给水管道、含大便器自闭式冲洗阀给水管道、管道直饮水系统、公共建筑生活给水管道、生活排水管道等五种管道系统的设计秒流量计算公式。

### 6.3 简单性

概率法计算给水管道设计秒流量,与《建水标》算法相比,计算简便。与美、英(欧)、日、俄等算法相比,本算法更加灵活、适用、简便;式(32)、式(34)或式(38)采用初等数学通式作为流量计算公式,而无需查阅图表。本课题组提出的概率法设计秒流量计算方法,解决了《建水规》提出的“由于采用卫生器具数量的概率法尚需进行很多测试和统计分析,以及采用二项分布(或泊松分布)计算同时出流概率的繁琐性,目前还不能推出一套较完整的成果”这一难题。

式(36)是住宅类建筑给水设计秒流量计算的通式。从式(36)可见,住宅类建筑的生活给水管道设计秒流量计算公式极其简单:无需统计卫生器具给水当量数;无需计算卫生器具的平均出流概率 $p$ ,无需查 $\alpha_c$ ;无需查阅图表,无需采用复杂的电算程序。

### 6.4 安全性

按概率法通式(36),解决了《建水标》算法在较大规模的各类建筑中设计秒流量小于最大时平均秒流量的这一不合理的现象<sup>[3]</sup>。

众多实测流量表明,无论在极小型生活给水管道系统<sup>[9]</sup>还是大中型管道系统,概率法设计秒流量计算方法都是安全可靠的,不存在边界条件限制的适用性问题。

### 6.5 准确性

生活给水管道设计秒流量概率法计算科学、准确,与实测流量相符。

众多实测流量都验证了概率法生活给水管道设计秒流量计算方法的正确性,举例如下:

实例<sup>[10]</sup>:某住宅二次供水,实测404户,每户2.6人,用水定额137 L/(人·d), $K_h=1.44$ ;实测最

大高峰120 s的平均秒流量为4.08 L/s。

按概率法计算,先按式(2)计算 $q_s$ :

$$q_s = \frac{q_L \cdot m \cdot K_h}{3600 \cdot T} = \frac{137 \cdot 404 \cdot 2.6 \cdot 1.44}{3600 \cdot 24} \approx 2.4 \text{ L/s}$$

因为实测流量的持续时间是120 s,因而保证率 $P_m = 1 - 120/7200 = 0.9833$ 。从表2查得保证率0.9833对应的下侧分位数 $x = 2.12$ ,修正系数 $K = 1.0$ 。把这些系数代入式(32),得到设计秒流量:

$$q_g = 0.2m = 0.2(2.12\sqrt{N_g \cdot p} + N_g \cdot p + 1.0) = 2.12\sqrt{0.2} \sqrt{0.2N_g \cdot p} + 0.2N_g \cdot p + 0.20 = 0.95\sqrt{q_s} + q_s + 0.24 = 4.1 \text{ L/s}$$

计算设计秒流量4.1 L/s与实测秒流量为4.08 L/s非常接近,说明概率法算法符合实际。

当然,《建水标》管道直饮水系统的设计秒流量已经采用概率法计算方法,更有大量管道直饮水项目验证了概率法计算方法的正确性。

## 7 结论

《建水标》中各类生活给水排水管道设计秒流量计算的条款内容整体陈旧落后,不适应当前工程建设的需要。概率法设计秒流量计算方法可弥补《建水标》设计秒流量存在的不足,建议以概率法设计秒流量计算方法代替目前《建水标》计算方法。

## 参考文献:

- [1] 张森. 关注建筑给水设计秒流量计算的参数[C]//中国工程建设标准化协会建筑给水排水专业委员会,中国土木工程学会水工业分会建筑给水排水委员会.“华建杯”全国优秀建筑给水排水论文集.沈阳:辽宁科学技术出版社,2017:1-9.  
ZHANG Miao. Paying attention to the parameters of design flow calculation for building water supply[C]//Committee of Water Supply and Drainage for Building, CECS. Committee of Water Supply and Drainage for Building, Water Industry Branch, CCES. ‘ARCPLUS Cup’ National Outstanding Papers Collection on Building Water Supply and Drainage. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House, 2017: 1-9 (in Chinese).
- [2] 张森. 我国建筑给排水专业标准发展历程及展望[J]. 工程建设标准化,2015(7):79-81.  
ZHANG Miao. The development course and prospect of



- China's standards for building water supply and drainage [J]. Standardization of Engineering Construction, 2015(7): 79-81 (in Chinese).
- [3] 《建筑给水排水设计规范》修订组. 生活给水管道设计秒流量计算公式修改专题报告[J]. 福建给水排水专题资料, 2002(5): 13-16.
- Standard Revision Section of *Code for Design of Building Water Supply and Drainage*. The special report on modification of design peak flow calculation formula of domestic water supply pipeline [J]. Project Information of Water Supply and Drainage in Fujian, 2002(5): 13-16 (in Chinese).
- [4] 建筑给水排水设计规范国家标准管理组. 对“生活排水立管最大设计排水能力的质疑”的应答[C]//中国土木工程学会. 2011年中国建筑给排水技术高峰论坛论文集. 上海: 中国土木工程学会, 2011: 7-15.
- National Standard Management Group of *Code for Design of Building Water Supply and Drainage*. The reply of “questions about the maximum designed drainage capacity of domestic drainage risers” [C]// China Civil Engineering Society. Proceedings of 2011 China Building Water Supply and Drainage Technology Summit Forum. Shanghai: China Civil Engineering Society, 2011: 7-15 (in Chinese).
- [5] 赵锂. 建筑给水排水设计规范[EB/OL]. <https://wenku.baidu.com/view/b5514b0a2d60ddccda38376baf1ffc4ffe47e278.html>, 2020-03-02.
- ZHAO Li. *Code for design of building water supply and drainage* [EB/OL]. <https://wenku.baidu.com/view/b5514b0a2d60ddccda38376baf1ffc4ffe47e278.html>, 2020-03-02 (in Chinese).
- [6] 王峰. 建筑给水排水现状及发展趋势[J]. 给水排水, 2006, 32(7): 62-66.
- WANG Feng. Recent status and prospects of building water system [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2006, 32(7): 62-66 (in Chinese).
- [7] 冯旭东. 国内外建筑排水立管的排水能力计算比较[J]. 给水排水, 2006, 32(8): 56-58.
- FENG Xudong. Comparison of discharging capacity calculations of building vertical sewer pipe [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2006, 32(8): 56-58 (in Chinese).
- [8] 钱维生. 高层建筑给水排水工程[M]. 上海: 同济大学出版社, 1989.
- QIAN Weisheng. *Water Supply & Drainage Engineering of High-Rise Buildings* [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1989 (in Chinese).
- [9] 廖耀青, 高敬. 住宅用水量测试及流量叠加探讨[J]. 给水排水, 2013, 39(2): 27-30.
- LIAO Yaoqing, GAO Jing. Discussion on the tests and flow rate accumulation for the water consumption in residential buildings [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2013, 39(2): 27-30 (in Chinese).
- [10] 郭乃溶, 刘志强, 刘洪海, 等. 基于用水规律的住宅二次供水系统优化及节能分析[J]. 给水排水, 2013, 39(11): 146-150.
- GUO Nairong, LIU Zhiqiang, LIU Honghai, et al. Optimization and energy-saving analysis of the resident-building secondary water supply system based on water consumption discipline [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2013, 39(11): 146-150 (in Chinese).

作者简介: 陈和苗 (1968-), 男, 浙江宁波人, 本科, 高级工程师, 从事建筑给排水工程技术研究工作。

E-mail: 179250301@qq.com

收稿日期: 2020-05-28

修回日期: 2020-08-30

(编辑: 孔红春)

开展河湖“清四乱”, 打好河湖管理攻坚战