· 建筑给排水 ·

直饮水管道瞬时高峰流量的计算*

赵世明　傅文华

提要　直饮水管网的设计瞬时高峰流量(传统称设计秒流量)应该用概率法计算。同时用水的龙头数量可按二项分布规律确定,其中龙头的使用概率计算涉及到两个重要参数:最大用水小时之内更为密集用水的时段 T 和该时段的累计耗水量 αQ_h,这两个参数需要实地观测确定。所观测的建筑物要有确定的居住率,系统应达到一定的规模,观测实施时应捕捉住系统的最大用水小时并记录瞬时流量或用量。

关键词　瞬时高峰流量　管道直饮水　概率法

0　概述

典型的直饮水管网系统包括直饮水储水箱(池)、水泵、输水管、配水管网。输水管及配水管网的流量设计应满足系统中用户的瞬时高峰用水。如果在输水管和配水管网之间有水量调节设施,则只须配水管网按瞬时高峰流量设计。

我国目前的管道直饮水工程设计中,瞬时高峰流量(又称设计秒流量)计算存在多种方法,较有影响的主要有以下两种:

$$q_g = 0.204\sqrt{N} + 0.004\,5N \tag{1}$$

$$q_g = 0.049\sqrt{q_d N} \tag{2}$$

式中 q_g——设计秒流量,L/s;

N——管道负担的龙头总当量数;

q_d——用水量标准,L/(人·d)。

以上两式都是以公式(3)为基础推导而来。

$$K_s = 30/\sqrt{Q_s} \tag{3}$$

式中 Q_s——平均用水量,m^3/d;

K_s——秒变化系数,为 q_g 与平均日平均秒流量之比。

公式(3)是前苏联工程师库尔辛在20世纪30年代提出的,根据当时的观测资料整理而成。到20世纪70年代,前苏联已不再使用该类型公式,而改用概率法公式。

把式(3)所描述的用水规律应用于我国的直饮水管网,需要做大量的观测证实及公式修正工作,否则使用公式(1),(2)是带有盲目性的。

用概率法确定生活配水管道的瞬时高峰流量,已成国际发展趋势。该方法使用的计算式具有半经验半理论性质,式中的概率参数需要通过观测获得。

直饮水管道的流量计算采用概率法比上述的平方根公式具有两个明显的优势:

第一,理论优势。概率计算法是半经验半理论公式,而式(1)~(3)是根据观测数据拟和而来的,属经验公式,并且是以前苏联的经验公式做基础。

第二,观测优势。概率法具有理论公式,试验观测只是确定其中的个别参数,观测工作量相对小,并且针对性强。

1　概率法流量公式的建立

1.1　饮水龙头用水与概率论的联系

一类现象在个别试验中呈现出不确定性,在大量重复试验中又具有统计规律性,称之为随机现象。试验在这里包括各种各样的科学试验,甚至对某一事物的某一特征的观察也认为是一种试验。具有下述三个特性的试验称为随机试验。①可以在相同的条件下重复进行;②每次试验的可能结果不止一个,并且能事先明确试验的所有可能结果;③进行一次试验之前不能确定哪一个结果会出现。

从一个居住楼中任指定一户的直饮水龙头观察其放水状况就可以近似看作是一个随机试验。它可以在基本相同的条件(比如每日同一高峰用水时段)下重复进行;它有两种可能的结果出现:在开启放水或关闭着未出水;但在指定观察之前不能确定其是

---

* 本文内容主要来自建设部'建筑和居住小区优质水供应技术'课题研究报告。

在放水，还是未放水。

在随机试验中，对一次试验中可能出现也可能不出现、而在大量重复试验中却具有某种规律性的事件，称为随机试验的随机事件。随机试验中，它的每一个可能出现的结果都是一个随机事件。上述的观察饮水龙头的试验中，龙头"在放水"这件事情可能发生也可能不发生，但在各高峰用水时段观察许多次后，就能看出它的发生是具有某种规律性的。该试验中，龙头"在放水"和"未放水"是试验的随机事件。

一般地，设随机事件 A 在 n 次试验中出现 n_A 次，比值

$$f_n(A) = n_A / n$$

叫做事件 A 在这 n 次试验中出现的频率。当 n 较小时，频率 $f_n(A)$ 有随机波动性，当 n 逐渐增大时，频率 $f_n(A)$ 逐渐稳定于某个常数 $P(A)$，即当 n 很大时就有 $f_n(A) \approx P(A)$。常数 $P(A)$ 实际上是事件 A 发生的概率。

在一个规模较大的直饮水系统中，观察其中 n 个水龙头工作状态的试验相当于做 n 次随机试验。发现用水的龙头个数 n_A 与 n 之比即为水龙头的使用频率 f_n。当 n 较小时，f_n 随机波动，当 n 逐渐增大到很大时，f_n 将稳定于概率 P。

概率法只适用于用水器具较多的情况，其道理也在于此。

1.2 水龙头使用概率

给水系统的流量一天内时刻都在变化着，有高峰，有低峰，并且高、低峰的出现时间是有一定规律的。譬如低峰总是出现在夜间，高峰总是出现在下午下班之后。这种高、低峰分布差异的出现，并不是概率统计规律支配的结果，而是用户生活规律的作用。在用户生活规律的支配下，一天中不同时段龙头的使用概率不同。有的时段使用概率低，有的时段使用概率高。高峰用水时段的使用概率是概率计算中所关注的。本文中的"龙头使用概率"，即是指高峰用水时段的龙头使用概率。

在用水高峰时段，卫生器具的使用概率根据美国专家 Hunter 提出的公式计算，见式(4)。

$$p = t / T_0 \tag{4}$$

式中 p——卫生器具使用概率；

T_0——用水高峰时段器具连续两次用水(即从第一次开始放水到第二次开始放水)的时间间隔，s；

t——T_0 期间的放水时间，s。

T_0 与 t 都由实地观察统计确定。

把式(4)应用于直饮水龙头，则 p 即为直饮水龙头的使用概率，T_0 即为用水高峰时段龙头连续两次用水的时间间隔。

根据河海水环境公司对住宅直饮水工程的观测统计(每 0.5 h 一次)，约有 25% 的日用水量集中在早晨 6:30～8:00 的时间使用，15% 集中在中午使用，40% 集中在晚上使用。据此可以知道，管道直饮水系统同生活水系统一样存在着最大小时用水。

在最大用水小时之内，所观测的管道系统的用水量不会随时间均匀分布，存在一个更高峰用水时段，并且时段长度较为固定，比如 20 min 或 30 min。这种固定时段长度的用水高峰的出现是用户的生活规律，而不是概率统计规律支配的结果，是生活规律使得龙头使用概率在该时段上大于其它时段。而在这个用水高峰时段之内，每一时刻出现的流量值可看作是随机的。观测统计龙头的使用概率，应限定在这一时段之内。

为了简化处理，我们设定在这一高峰用水时段上水龙头的每次使用的时间间隔及放水时间都是固定不变的，这样龙头的使用概率可用式(5)表述：

$$p = t / T \tag{5}$$

$$t = \alpha Q_h / (n q_0)$$

式中 T——用水高峰时段的延续时间，s，由观测确定<3 600 s；

t——龙头在 T 时段的累计放水时间，s；

α——T 时段用水量占最大小时用水量的比例系数，<1；

Q_h——被观测管道系统的最大小时用水量，L；

αQ_h——被观测管道系统 T 时段的耗水量，L；

n——管道系统中水龙头的数量；

q_0——龙头的额定流量，L/s。

根据式(5)，在实地求测 p 时便简化为：记录用水高峰时段 T 及该时段上的累计用水量 αQ_h。

1.3 二项式概率公式计算瞬时高峰流量

设试验 E 只有两个可能的结果：A 及$\overline{A}$（$\overline{A}$表示事件 A 不发生）。记 A 的发生概率为 p，$\overline{A}$的发生概率为 $1-p(0<p<1)$，将 E 独立地重复进行 n 次，则称这一串重复的独立试验为 n 重伯努里试验，简称伯努里试验。其中事件 A 发生 $k(0\leqslant k\leqslant n)$次的概率 $P_n(k)$见式 6：

$$P_n(k)=\binom{n}{k}p^k(1-p)^{n-k}\quad(k=0,1,\cdots,n)\tag{6}$$

由此又称随机事件 A 发生的次数服从参数为 n，p 的二项分布，并且各概率累加之和为 1，即：

$$\sum_{k=0}^{n}\binom{n}{k}p^k(1-p)^{n-k}=1\tag{7}$$

在负担 n 户居民（即 n 个水龙头）的直饮水系统或管道中，若各水龙头的用水概率相同均为 p，将龙头是否在放水看成是一次试验的结果，某一时刻同时观察 n 个水龙头相当于做 n 重伯努里试验，而放水龙头出现的个数服从参数为 n，p 的二项分布，如式（6）。

这里使用了条件——各水龙头用水概率相同。实际上，各个龙头或因水压的不同或因住户耗水量的差异等因素的影响，其放水概率是有差异的。因此，此处的概率 p 实际上是一个近似值。

直饮水管网中，同时放水的龙头发生的个数 k 可有 $n+1$ 个取值，从无龙头用水 $k=0$ 到所有龙头都在用水 $k=n$，共有 $n+1$ 种情况。现实中，这 $n+1$种情况是都有可能出现的，只是有的情况出现的可能性小，有的出现的可能性大。图 1 是 $n=20$，$p=0.2$ 条件下 k 取各个值的概率，即各种情况出现的概率。

根据式（7），把图 1 中所有可能的用水情况（即 k 取 $0\sim n$）的概率累加起来，其和为 1 或 100%。

工程中，如果我们把龙头所有可能的用水情况都考虑进来显然是不经济的，因为那些 $k=n$，$n-1$，…，等用水情况出现的概率极小。所以我们可把该用水情况略去。美国专家 Hunter 首先提出用下式处理此类问题。

$$P=\sum_{k=0}^{m}\binom{n}{k}p^k(1-p)^{n-k}\geqslant 0.99\tag{8}$$

或

$$\sum_{k=m+1}^{n}\binom{n}{k}p^k(1-p)^{n-k}<0.01\tag{9}$$

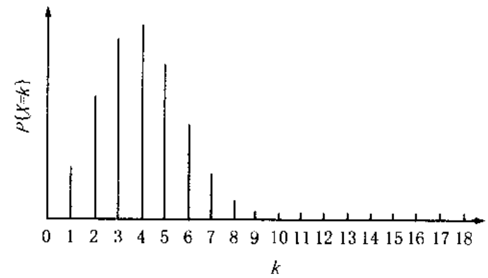

图 1 $n=20$，$p=0.2$ 时各种情况出现的概率

式中 P——不多于 m 个龙头同时用水的概率；

p——任一个龙头的使用概率；

n——管道担负的龙头个数；

m——计算给水龙头个数。

该方法中，把出现 n，$n-1$，…，$m+2$，$m+1$ 个龙头同时用水的情况（其概率之和小于 0.01 或 1%）都忽略掉，只考虑发生 $0\sim m$ 个龙头同时用水的情况。

把式（8）用于直饮水管道中，其代表的意义可理解为：在各龙头放水概率均为 p 的时段上（注意不同时段 p 是不一样的），在任一时刻同时观察所有的水龙头（n 个），当观察次数足够多时，则发现不多于 m 个龙头同时用水的次数逐渐稳定于总观察次数的 99%，或者说发现多于 m 个龙头同时用水的次数逐渐稳定于总观察次数的 1%。这相当于：在该时段上 99% 的时间，同时用水的龙头个数不会超过 m 个，或者说超过 m 个龙头同时用水的时间不大于 1%。比如：假若各龙头用水概率 p 在最大用水的 0.5 h 上均匀分布，则在该时段，超过 m 个龙头同时用水的时间累计不超过 $1\ 800\times1\%=18$ s。

式（8）中 0.99 或式（9）中的 0.01 是 Hunter 在建立这种方法时（用于生活水管网）任意选择的值，被沿用至今。取 0.99 以上的数对 m 影响不大。例如对 $n=100$，$p=0.1$，当 P 从 0.99 变到 0.999，m 仅从 18 增到 20。式（8）可制成计算表格，见表 1。

表 1 瞬时高峰用水龙头计算

n \ p	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.055	0.060	0.065	0.070	0.075	0.080
50	5	5	6	6	7	7	7	8	8	9	9
100	8	8	9	10	11	11	12	13	13	14	15
150	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
200	12	14	15	16	18	19	20	22	23	24	25

用 m 个龙头的流量之和作为设计流量，便能满足龙头在 $0\sim m$ 间组合各种同时用水的情况，于是就得到了基于概率方法的瞬时高峰流量计算公式：

$$q_g = q_0 m \tag{10}$$

式中 q_g——设计瞬时高峰流量，L/s。

2 概率法计算式的讨论

2.1 试验观测方案设计

公式(5)，(8)，(10)共同构成了管道直饮水瞬时高峰流量的概率法计算式。在这3个公式中，管网龙头数量 n，龙头额定流量 q_0，最大小时用水量 Q_h 都属已知量(q_0 和 Q_h 的制定不属瞬时高峰流量探讨的内容，是更基础性工作的内容)；用水高峰时段的延续时间 T 及该时段用水量与最大小时用水量的比值 α 需要试验观测确定；龙头使用概率 p 和计算给水龙头个数 m 属中间变量，不是独立变量。

概率法中计算参数的实测，是一项非常艰巨的工作。多年来概率法在我国建筑生活供水系统工程中久唤不出，就是因为受阻于实测工作。因此，直饮水系统的参数实测方案必须仔细设计，以便在难得的工程实测中不遗漏所需要的数据，尽管直饮水系统的观测比生活供水系统的简单并较容易实施。

直饮水系统的实地观测方案，应含有下列内容：

(1)高时用水时段上的用水量，应每分钟或半分钟甚至更短的时间间隔进行记录，目前条件已有能力实现。

(2)夏季最热的几天不可漏测，这很可能是全年的用水高峰日，这些时日龙头使用概率有可能比其它时日的大。

(3)一个既定系统最大用水小时在每日出现的时间可能基本固定，可通过较粗的观测确定出具体的出现时间。

(4)待观测的管网系统，应有确定的居住率，即有效龙头的个数能确定；系统的规模应尽量大，比如不少于100只龙头。

(5)管网中应多处设观测记录点，各相邻点负担的龙头数量以一定值(如20只)递减(顺流方向)。

根据上述观测，可分析得到系统的高峰用水时段 T 和期间耗用的水量、最高小时用水量及比值 α、瞬时高峰用水量、龙头使用概率及其误差范围(由1条)；可使龙头使用概率在全年最高用水日仍能适用(由2条)；使概率法公式可适用于较大规模的管网(由4条)；验证概率法公式在各种规模管网上的适用性(由5条)；花费较低的观测成本(由3条)。

对管道直饮水系统进行科学、系统的测试，是管道直饮水规范编制中的一项重要内容。

2.2 当前条件下概率法的应用

在当前条件下，直饮水管网的系统性观测尚未进行。作为过渡性的措施，可根据我们现有的对直饮水管网的认识和一些粗略的观测资料，做如下加工处理，使概率法得以应用。

设在最大用水小时之内，水量并不均匀分配，又存在一个高峰用水时段，最大时用水量的80%集中在0.5 h之内耗用。这样得到 $T=1\,800$ s，$\alpha=0.8$，代入式(5)，得龙头使用概率：

$$p = 0.8Q_h/(1\,800nq_0) \tag{11}$$

在未有 Q_h 的较权威观测数据时，可按日用水量的25%取值。统计出系统的龙头数量 n，根据龙头产品得到额定流量 q_0。便可计算出系统中龙头的使用概率 p。例如，某个直饮水系统的 $Q_h=625$ L，$n=100$，$q_0=0.05$ L/s，则

$$p = 0.8\times 625/(1\,800\times 100\times 0.05) = 0.056$$

根据使用概率 p 和管道负担的龙头数量 n，在表1中可查出计算龙头个数 m，利用式(10)便得到设计瞬时高峰流量 q_g。

上述设定的计算参数是偏安全的，计算出的瞬时高峰流量值和式(2)的接近。

参考文献

1 姜文源，等. 建筑和小区给水排水，水工业工程设计手册. 北京：中国建筑工业出版社，2000

2 李玉荣. 优质直饮水设计秒流量公式的探讨. 给水排水，1998，24(7)：51

3 太原工业大学，等. 室内给水排水工程(第二版). 北京：中国建筑工业出版社，1986

4 浙江大学数学系. 概率论与统计. 北京：人民教育出版社，1979

5 V. T. Manas. National Plumbing Code Handbook. 1957

▽作者通讯处：100044 北京车公庄大街19号
中国建筑设计研究院
电话：(010)68318541
E-mail：zhaoshi1964@sina.com

收稿日期：2003-1-8