

停泵水锤的简易算法

罗伟, 陈坚

(水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉大学, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对目前国内外使用广泛的各种水锤简易算法, 进行归纳比较和对照, 并结合工程实例, 采用多种算法分析; 最后对各种算法的优缺点和适用条件进行了比较, 以便得出有效的计算方案。

关键词: 泵站; 停泵水锤; 简易算法

中图分类号: TV134

文献标识码: A

文章编号: 1005-6254(2005)02-0016-04

水锤(Waterhammer)也称水击, 是压力管道中由于水流速度发生骤然变化而引起压力变化的一种水力过渡现象, 也称瞬变流。即在压力管道中, 当水流因某种原因而产生流速的急剧变化时, 由于流体的惯性作用而引起管道内液体的压力升高或降低。它对水泵机组和管道系统的危害性很大。一般情况下, 水泵在正常运行和正常停泵过程中是不会发生水锤的。所谓停泵水锤, 是指机组因突然失电或其它原因造成开阀停车时, 在泵和输水管道中水流发生剧烈变化而引起的一种压力递变现象。

1 停泵水锤的几种典型算法

事故停泵的水锤计算一般分有阀和无阀两种情况。通常, 只有在通过水锤计算, 确认它允许机组倒流逆转且不发生危害的情况下才允许取消逆止阀。然而安装了逆止阀保护了机组, 却增大了管道系统的水锤压力, 从而对管路造成威胁。此外, 水锤计算还要校核管路降压时是否会在有水柱分离现象, 即要避免或排除在管路突起部位发生弥合水锤的可能性。

目前常用的水锤计算方法有: 解析法、图解法、电算法和简易法算四种。

前三种方法计算结果比较精确, 但是计算过程复杂; 常常只在需要掌握粗略结果时, 后一种方法比较实用和有效。

水锤简易算法主要是依据大量图表。它是集水锤大量计算结果(经过验证了的), 并绘制成各种图表, 供水锤计算时直接查取。由于这种方法

计算简单、可靠, 可以快速得出水锤过程中机组或管道的各种最不利参数, 因此工程上应用十分广泛。但是需要注意, 这些图表是在不同的计算条件下得出的, 因此使用时要注意其特定条件。

1.1 阿列维(Allivei)法

该方法适用于关阀水锤计算, 提出了简单管道系统末端直线关闭情况下产生的水锤压力变化的计算曲线图表。图表中选用了管道特征常数 ρ 为横坐标, 无量纲关阀时间 θ 为纵坐标, 绘制出最大压力上升率 ξ_m 的等值线, 各参量定义如下:

$$\rho = \frac{1}{2} \frac{aV_0}{gH_0}$$

$$\theta = \frac{T_c}{\mu} = \frac{aT_c}{2L}$$

$$\xi_m = \frac{H_{\max} - H_0}{H_0}$$

式中, ρ 是管道特征常数; H_0 是初始状态的压力水头, m; V_0 是初始流速, m/s; a 是水击波传播速度, m/s; T_c 是关阀时间, s; L 是管路长度, m; μ 是水锤相数; ξ_m 是最大压力上升率; H_{\max} 是最大压力水头, m。

计算时可根据管道的特征参量和关阀时间计算出 ρ 和 θ 值, 再查阅相应的曲线图, 读取 ξ_m 值, 然后计算最大水锤压力。阿列维计算方法没有考虑管道的摩阻损失, 因而只适用于摩阻很小或摩阻可以忽略的情况。

1.2 魁克(Quick)法

魁克绘制了末端阀直线关闭情况下的最大水锤压力上升的计算曲线图表, 选取 ρ 为横坐标,

纵坐标采用最大压力上升率 ξ_m 与 2ρ 的比值来表示;并以无量纲关阀时间 θ 作为参变量,绘制等值线。该法水锤压力升高值按下式计算。

最大水锤压力升高值为:

$$\Delta H_{\max} = 2\rho \left(\frac{\xi_m}{2\rho} \right) H_0$$

管中最大压力为:

$$H = H_0 + \Delta H_{\max}$$

式中 ΔH_{\max} ——最大压力水头的升高值, m

H ——管中最大压力, m

1.3 帕马金(Parmakian)算法

帕马金通过对停泵水锤的计算分析认为,事故停泵过程中的最不利参数,主要取决于水泵机组的惯性、管道的特性和水泵的全特性。水泵机组的惯性可用参量 $K(2L/a)$ 来表示,管道的特性可用 2ρ 来表示。对于一已知水泵的全特征曲线,通过大量的水锤计算,根据不同的 $K(2L/a)$ 和 2ρ 值的计算结果,可以绘制该法的曲线图。

当用帕马金曲线图计算事故水锤时,首先应根据已知数据计算出 2ρ 和 K 的值,然后由该算法图表查出水泵出口和管道中点的最大降压水头和最大升压水头等参数。

1.4 刘竹溪算法

刘竹溪教授通过多年的水锤研究认为,事故停泵水锤过程中的最不利参数——管道最高和最低压力,水泵的最大倒转转速及开始倒流、倒转和到达最大转速的时间等,不仅随 2ρ 和 $2L/a$ 变化,而且随这两个参数的乘积 T_b/T_a 变化。其关系如下:

$$2\rho \cdot K \frac{2L}{a} = \frac{T_b}{T_a},$$

$$T_b = \frac{LV_0}{gH_0}, \quad T_a = \frac{GD^2 n_0}{365N_0}$$

式中 T_b ——管道水柱的惯性时间常数

T_a ——水泵机组的惯性时间常数

GD^2 ——水泵机组的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

n_0 ——水泵的额定转速, r/min

N_0 ——水泵的额定功率, kW

以 T_b/T_a 为横坐标,分别以事故停泵过程中各主要参数(包括水泵出口处的压力升高和降低,管道中点处的压力升高和降低,机组的最高逆转转速,泵内开始倒流时间,机组开始倒转时间,最大倒转转速发生时间等)为纵坐标。计算时,只要根据泵站管道和水泵特性计算出 T_b/T_a , 然后

查表即可得到要求的参数。

1.5 富泽清治算法

日本富泽清治以实际的输水管道为研究对象,对数百个工程进行了水锤计算,并绘制出了水锤计算曲线图。该算法充分考虑了管道摩阻的影响,采用 $K\mu$ 为横坐标(K 为水泵的惯性系数, μ 为水锤相),采用水锤过程中最低降压水头(即实际产生的最低压力水头和水泵额定扬程之比)和开始倒流的相对时间 τ (实际时间与水锤相时间 μ 之比)为纵坐标绘制的,并以管道摩阻占水泵工作扬程的 0%, 20%, 40%, 60%, 80% 这五种情况分别考虑。

该法认为停泵后管道中水锤压力的降低,直接影响倒流开始后水锤压力的升高,由于它是分析研究管道是否产生水柱分离的主要依据,因此它是以最低压力水头作为绘制计算曲线的重要依据。

2 各种算法优缺点比较

阿列维法和魁克法都只适用于关阀时的水锤计算,而且两种方法均没有考虑管道的摩阻损失,故只适用于摩阻较小以致可以忽略的情况。

帕马金算法的优点在于不仅能查出水泵出口和管道中点处的最大降压水头和最大升压水头,而且还能得出水泵的最大倒转转速、水泵开始倒流时间、水泵转速为零的时间、水泵到达最大倒转转速的时间等参数。另外,帕马金算法不仅适用于无阀的水锤计算,而且还能估算出水泵出口装有逆止阀时的停泵水锤参数,可以用来估算任何水泵系统出水管的水锤值。但此种算法仍没有考虑管道的摩阻损失,因此对于长管道、大摩阻的管路系统,此法适用性差。

刘竹溪算法通过参数转换,将帕马金水锤计算曲线简化为两张图,与帕氏算法具有相同的优缺点和适用条件。该算法减少了水锤计算过程中查图的次数,应用更方便,也减小了因多次查图时引起的偶然误差。

富泽清治算法另辟蹊径,他忽略管道特征常数 ρ , 直接从实践出发,结合工程实际经验而得出图表。与前几种方法相比,其优点在于该法得出的数据更接近工程实际,理论和实际结合得更加紧密。另外,该方法充分考虑了管道摩阻,适用于长管道系统的水锤计算。当涉及到管路水柱分离计算时,该方法应首选。此简易算法的缺点在于

计算图表仅给出了摩阻占工作扬程为 0% (即忽略损失)、20%、40%、60%、80% 五种情况, 当阻力占扬程的百分数不是上述数值时, 需要插值, 从而带来不便和误差。

3 算例

某乡镇自来水厂一级输水泵站, 工程参数如下: 水泵工作扬程 $H=45.0$ m, 泵站净扬程 $H_j=21.8$ m, 水泵工作流量 $Q=71$ l/s, 水泵额定转速 $n=2\ 950$ r/min, 水泵效率 $\eta=81\%$, 额定功率 $N=40$ kW, 管径 $D=300$ mm, 管长 $L=3\ 700$ m, 泵出口高程 20.04 m, 管路中部处高程 30.0 m。

该站所用水泵, 比转数 $n_s=130$, 额定流量 $Q_0=71$ l/s, 额定扬程 $H_0=45.0$ m; 根据该泵全特性曲线, 利用帕马金或刘竹溪算法, 不难得出泵出口不装逆止阀时泵的飞逸转速 $\gamma=-72\%$ 。由 $n_0=2\ 950$ r/min, $n=-2\ 124$ r/min, 可知倒转速度小于正常时的额定转速, 只要泵轴装有倒转防松装置, 不会发生水泵飞车事故, 因此该站水泵出口可以不装逆止阀。

3.1 基本参数计算

(1) 水锤波传播速度

$$a = \frac{1\ 425}{\sqrt{1 + \frac{kD}{E\delta}}} = \frac{1\ 425}{\sqrt{1 + \frac{2.5 \times 10^6 \times 300 \times 10^{-3}}{21 \times 10^6 \times 40 \times 10^{-3}}}} = 1\ 035.8 \text{ m/s}$$

式中, k 为水的弹性模量, $k=2.5$ GPa; $D=300$ mm 为管径; E 为管材弹性模量, 此工程 $E=21$ GPa; δ 为管壁厚度, $\delta=40$ mm。

(2) 水柱与机组惯性时间常数之比

$$T_b = \frac{Lv_0}{gH_0} = \frac{3\ 700 \times 1.0}{9.81 \times 45.0} = 8.38 \text{ s}$$

$$T_a = \frac{GD^2 n_0^2}{365 N_0} = \frac{2.316 \times 2950^2}{365 \times 40} = 1.38 \text{ s}$$

$$\frac{T_b}{T_a} = \frac{8.38}{1.38} = 6.07 \text{ s}$$

式中, v_0 为管中流速, 取 $v_0=1.0$ m/s; $L=3\ 700$ m 为管长; $H_0=45.0$ m 为水泵总扬程; GD^2 为电动机的转动惯量, 取 $GD^2=2.316$ kg·m²; n_0 为水泵额定转速, $n_0=2\ 950$ r/min; N_0 为电机额定功率, 取 $N_0=40$ kW; $g=9.81$ m/s²。

(3) 管道特性常数 2ρ 和系数 $K\mu$ 值

$$2\rho = \frac{\omega_0}{gH_0} = \frac{1\ 035.8 \times 1.0}{9.81 \times 45.0} = 2.35$$

$$K\mu = 0.362 \times 7.14 = 2.59$$

式中 K ——水泵机组惯性系数

$$K = \frac{182.5 N_0}{GD^2 n_0^2} = \frac{182.5 \times 40 \times 10^3}{2.316 \times 2950^2} = 0.362 \text{ s}^{-1}$$

μ ——水锤相

$$\mu = \frac{2L}{a} = \frac{2 \times 3700}{1035.8} = 7.14 \text{ s}$$

3.2 算法分析及选取

阿列维法和魁克法适用于关阀水锤简易计算, 该算例不设逆止阀, 故首先排除这两种算法。

帕马金算法研究了停泵水锤的计算, 认为事故停泵过程中最不利参数主要取决于水泵机组的惯性。但该实例查表得 $K\mu=2.59$, 超出帕马金计算表范围, 故无法用帕马金算法计算。

刘竹溪简易算法在分析研究了帕马金停泵水锤计算曲线的基础上, 提出了更为简单的计算图, 管道中水柱和机组转子的惯性时间常数 T_b 和 T_a 可分别代表管道中水柱和机组的惯性, 其物理意义均为在惯性作用下从正常速度减速到零时所需要的时间。惯性时间常数 T_b/T_a 既表示水柱与转子的惯性比, 也表示两种不同的惯性对水力瞬态过渡过程的影响。该例由查表可得 $T_b/T_a=6.07$, 超出刘竹溪计算表范围, 故也无法用刘竹溪算法计算。

分析其原因在于该工程管路较长, 水力摩阻较大, 而帕马金和刘竹溪简易算法中忽略了管道摩阻损失, 故不能满足计算条件。当要考虑管道的摩阻损失, 以及对于长管道系统的管道中可能产生水柱分离时, 当选日本学者富泽清治的简易算法。

3.3 富泽清治算法

(1) 计算管道特征常数

$$\mu = \frac{2L}{a} = 7.14 \text{ s}$$

$$2\rho = 2.35$$

$$K\mu = 2.59$$

(2) 计算管道摩阻损失占总扬程的比例

$$h_{pi} = \frac{H_f}{H_0} = \frac{23.2}{45} = 52\%$$

式中, $H_f=23.2$ m, 为泵站净扬程; $H_0=45.0$ m, 为水泵总扬程。

(3)查富泽清治简易算法表,利用数学插值,插入 $h_{\mu}=52\%$,得

- (a) 泵出口最低压力 $h=-10\%$
- (b) $(1/2)L$ 处最低压力 $h=-20.5\%$
- (c) $(3/4)L$ 处最低压力 $h=-18\%$
- (d) 泵开始倒流时间 $1.6 \mu s$
- (4) 绘制管路的压力变化曲线

①绘制管路纵剖面图,并将水泵出口、管路中点及 $3L/4$ 处的最低压力标注在纵剖面图上,以分析最低压力与管路高程的关系。

②绘制最低压力包络图: 分别将水泵出口、管路中点及 $3L/4$ 处的最低压力水头绘入管路纵剖面图中,再用光滑曲线连接这些点,求出最低压力线。若管路中某些最低压力线位于管路位置以下,且差值大于水的汽化压力 H_v 时(若为常温清水,可近似取 $H_v=8 \text{ m}$ 水柱),则可能产生水柱分离。

③绘制最高压力包络线: 管中产生的最高压力,可近似地用上面所求的最低压力线以出水池水位线为基准对称绘制(如图 1)。

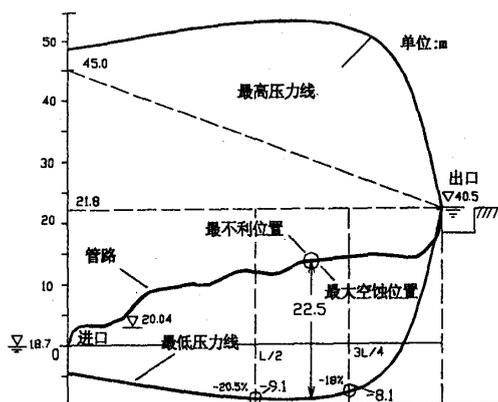


图 1 某水厂泵输水管路系统水锤压力包络线

3.4 计算成果分析

由前面计算可以得出水泵在故障停机后飞逸转速 $n=-2124 \text{ r/min}$, 小于水泵正常额定转速 $n_0=2950 \text{ r/min}$, 则不会因为倒转发生飞车现象而损坏机组, 故可以不必安装逆止阀来保护机组。

由图 1 可以看出, 最高压力为 52 m 水头, 该值甚至小于水泵零流量时的扬程 55 m , 故不会产生管路的升压破坏; 但从最低压力线的分布情况来看, 在管路的最不利位置可能会发生水柱分离现象, 故需要采取预防措施。

4 结语

由以上实例计算可以看出, 水锤简易算法不但可以得出工程所需要的数据, 而且计算简单, 方法容易掌握。但是水锤简易算法仍不够完善, 还没有形成具体的计算规范。

另外, 水锤各种算法都有自身的缺陷, 有的算法适用条件不够明确, 有的算法只能得出部分水锤参数, 有的算法在实际应用中非常繁琐, 误差较大。因而, 水锤简易算法的研究仍在不断的积累和完善之中。

本文针对目前国内外使用广泛的各种水锤简易算法, 对其进行了归纳、比较和对照。并结合工程实例, 采用多种算法分析, 然后对各种算法的优缺点和适用条件进行了比较, 可供有关水锤计算时参考。

参考文献:

- [1] 日本农业土木事业协会. 泵站工程技术手册[M]. 中国农业出版社, 1998: 396-399.
- [2] 刘竹溪, 刘光临. 泵站水锤计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988: 171-200.
- [3] 姜乃昌. 水泵及水泵站[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 121-123.
- [4] 周德峰. 旋流泵水力设计探讨[J]. 排灌机械, 1988, (6): 17-20.

The Simple Algorithm of Stop-pump Water Hammer

LUO Wei, CHEN Jian

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Various kinds of simple algorithm for computing water hammer currently used both at domestic and abroad were summarized up, and a comparison was made as well. In order to obtain the optimal algorithm, a practical case was analyzed with several kinds of algorithms, and the performance of these algorithms and its adaptabilities were compared.

Key words: Pump station; Stop-pump water hammer; Simple algorithm