

深基础降水喷射泵的特性方程

卜长根

中国地质大学工程技术学院, 北京 100083

摘要: 为方便工程技术人员优化设计并合理地选用降水同心式喷射泵, 介绍了同心式喷射泵井点降水系统结构 and 应用特点, 建立了深层降水喷射泵降深与结构、性能参数等之间的优化数学模型. 既可通过该数学模型, 按降水深度和排水量的要求, 选择工作泵的压力和流量, 设计喷射泵的结构; 又可根据喷射泵设计的数学模型计算特定降深的排水量, 进行深基础降水设计.

关键词: 深基础降水; 喷射泵; 特性方程; 降水深度.

中图分类号: TU46<sup>+</sup>3; P634. 3<sup>+</sup>2      文章编号: 1000—2383(2006)03—0423—04      收稿日期: 2005—06—11

Design Modeling for Deep Foundation Dewatering Ejector

BU Chang-gen

School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

**Abstract:** In order to design optimally and apply rationally a single pipe ejector, this paper describes the structural and application characteristics of a single pipe ejector system. The basic optimum formulae are created between the parameter relationships of dewatering depth and the size of the ejector, and the performance of the centrifugal pump. It is simple and convenient to select the performance parameters of the centrifugal pump and design a single pipe ejector system according to dewatering depth and yield, and to calculate the yield of the dewatering depth through the ejector and design a deep foundation dewatering system.

**Key words:** deep foundation dewatering; ejector; basic formula; dewatering depth.

在深基础施工中, 首先要解决的问题是把地下水位降到坑底标高以下, 通过预排水, 给地下工程提供安全和干燥的开挖环境, 并增加开挖基坑的边坡稳定性, 防止基坑底部岩土隆起或翻浆. 由于地下工程(如地铁、地下交通线路)和高层建筑对地基基础、建筑功能和抗震等的要求不同, 一般设计 2~3 层地下建筑, 基础埋深达 9~15 m, 对于这种深大地下工程, 轻型井点降水系统常常不能满足降水深度要求.

当降水深度超过 8~20 m, 可采用喷射泵深层降水系统, 它基本上是一种深埋于地下的高压喷射泵装置, 在井底可以形成较高的负压, 集水效果较好. 图 1 为研制的同心式喷射泵深层降水系统, 该系统不仅解决了并列式深层降水喷射泵拔出时废损率高的问题, 与潜水泵或深井泵降水试验对比, 性能还很优异. 在抽吸地层滞留水时, 与现有潜水泵、深井泵相比抽水效率高 5 倍以上, 而且利用真空集水, 相

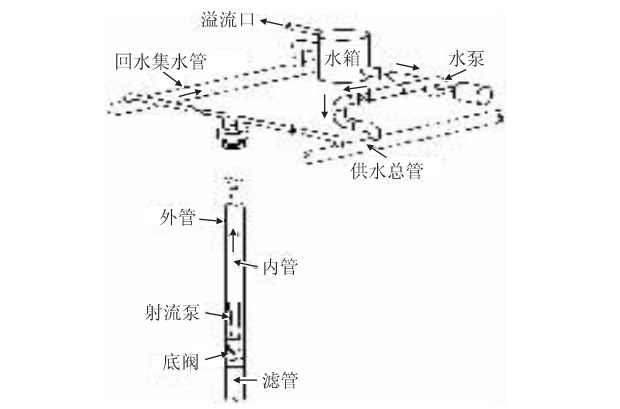


图 1 同心式喷射泵深层降水系统  
Fig. 1 Single pipe ejector system for deep foundation dewatering

对基坑深度而言, 施工降水孔浅、直径小, 施工周期短, 效益好. 特别适用于 8~20 m 以下渗透系数

(0.1~20 m/d)较小的砂、粘土地层中干扰降水.

深层降水喷射泵深埋地下,除了像地表常规喷射泵(如 SPS-150 正反循环喷射泵)一样,利用喷射泵的吸程工作外,主要利用降水喷射泵扩压管排出流体正压输送流体到地面,因此,需要建立深层降水喷射泵性能与结构参数之间的关系方程.一方面,方便设计人员确定结构性能参数,设计出结构合理、性能优异的喷射泵;另一方面,方便降水施工人员选择、使用深层降水喷射泵,来满足深基础降水深度和排水量需要.

索科洛夫和津格尔(1977)系统建立了地表喷射泵设计理论,Powers(1992)研究了降水喷射泵实践应用,近期一系列的研究(Deberne *et al.*, 1999; Beithou and Aybar, 2000)主要针对用热蒸汽驱动的两相流喷射泵特性进行建模并仿真.本文应用地表喷射泵设计理论,结合降水喷射泵实践,建立了深层降水喷射泵性能与结构参数之间的关系方程,据此理论优化设计了深层降水喷射泵.

1 深基础降水喷射泵设计原理

喷射泵内没有运动构件,结构简单,工作可靠,密封性好.为深基础降水工程设计的深层降水喷射泵结构如图 2 所示,喷射泵主要由喷嘴、喉管入口、喉管和扩压管组成.离心泵输出的高压水经供水总管输入内外管之间的环状空间,经喷射泵喷嘴形成高速射流,由于射流质点的横向紊动扩散作用,将喷嘴周围流体带走而形成低压区,真空度最高可达 10 m 水柱(−0.1 MPa),这个低压区经底阀与滤水管连通,因此地下水将被吸入,经滤水管、底阀进入喷射泵内,与喷嘴射出的高速水流相遇,在喷射泵喉管内经过能量交换,工作流体速度减小,被吸流体速度增加,在喉管出口处二者趋近一致,压力逐渐增加,进入扩压管,混合流体经扩散后,速度降低,大部分动能转化为压力能,使压力进一步增加.混合水经内管、回水胶管、内水管路进入水箱内,地层中吸出的水将经水箱溢水口流走.

1.1 地表喷射泵的基本理论

地表喷射泵基本方程表示压力、效率、流量与几何尺寸之间的关系,它反映泵内能量的转换过程及主要构件(喷嘴、喉管等)对性能的影响,是设计和使用喷射泵的理论依据.

索科洛夫和津格尔(1977)系统建立了置于地表

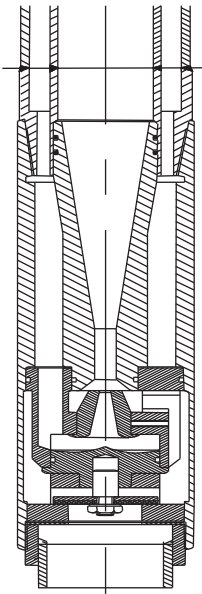


图 2 深基础降水喷射泵结构  
Fig. 2 Structure of a single pipe ejector

喷射泵扬程比  $h$ 、效率  $E$  与面积比  $m$  及引射系数  $q$  之间关系的基本方程为:

$$h = \frac{\varphi_1^2}{m} [2\varphi_2 + (2\varphi_2 - \varphi_4^2) \frac{n}{m} q^2 - (2 - \varphi_3^2) \frac{1}{m} (1 + q)^2], \tag{1}$$

$$\text{效率 } E = \frac{\text{引射流体经喷射泵所获能量}}{\text{工作流体经喷射泵所失去能量}} = \frac{qh}{1 - h}. \tag{2}$$

式中: $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$  分别是喷嘴、喉管、扩压管和喉管入口的流量系数, $\varphi_1=0.95, \varphi_2=0.975, \varphi_3=0.90, \varphi_4=0.925$ .

$$\text{扬程比 } h = \frac{\text{喷射泵扬程}}{\text{工作扬程}} = \frac{p_o - p_s}{p_n - p_s}.$$

面积比  $m = \text{喉管面积} / \text{喷嘴面积} = f_3 / f_n$ . 当工作流体比容  $v_p$  与引射流体比容  $v_s$  相等时,即  $v_p = v_s$ , 则

$$\text{引射系数 } q = \frac{\text{引射流体质量流量 } G_s}{\text{工作流体质量流量 } G_p} = \frac{\text{引射流体体积流量 } Q_s}{\text{工作流体体积流量 } Q_p}.$$

其中  $n = f_3 / (f_3 - f_n) = m / (m - 1)$ , 则(1)的另一表达形式为:

$$h = (p_o - p_s) / (p_n - p_s) = 1.75/m + (0.7n/m^2)q^2 - (1.07/m^2)(1 + q)^2. \tag{3}$$

欲使喷射泵在特定工况具有最高效率,对(3)作

一阶求导,令  $dh/dm=0$  得最优面积比:

$$m_{opt} = f_3/f_{nopt} =$$
$$[(2-\varphi_3^2)(1+q)^2 - (2\varphi_2 - \varphi_4^{-2})nq^2]/\varphi_2. \quad (4)$$

可以从(4)看出,最优面积比  $m_{opt}$  是引射系数  $q$  的函数,喷射泵工况变化,最优面积比随引射系数  $q$  变化而变化,当取  $q=1$ 、 $m_{opt} \approx 3.8$  时,喷射泵的效率  $E$  最高,由此即可确定工作泵的参数. 因此设计喷射泵,只能在特定工况下,满足最高效率的要求,当偏离  $q=1$  时,效率  $E$  会有所下降.

1.2 深基础降水喷射泵特性方程

深基础降水喷射泵特性方程是指降水深度与供水泵压力、流量和喷射泵结构参数(喷嘴面积、喉管面积及长度等)之间关系方程,图 3 为深层降水喷射泵工作简图,喷射泵喷嘴入口压力、扩压管排出口压力和吸入口压力如下:

喷射泵喷嘴入口压力  $p_n=h_p+h_d-h_{fi}$ ,

(5)

扩压管排出口压力  $p_o=h_d+h_{fo}$ ,

(6)

吸入口压力  $p_s=-h_s$ .

(7)

式中: $h_{fi}$ 是离心泵和喷嘴间的供水总管、双壁管环状间隙的沿程和局部阻力的总和; $h_{fo}$ 是喷射泵排出口和水箱间回水总管、双壁管内管的沿程、局部阻力的总和; $h_p$ 是离心泵出口的表压; $h_d$ 、 $h_s$  分别是喷射泵的排水和吸水水头;把(5)、(6)、(7)代入(3),并代入最优面积比  $m_{opt}=3.8$ ,得扬程比  $h$  随  $q$  变化的基本方程:

$$h = (p_o - p_s)/(p_n - p_s) = (h_d + h_{fo} + h_s)/$$
$$(h_p + h_d + h_s - h_{fi}) = 0.386 - 0.148q - 0.008q^2. \quad (8)$$

变换(8)得:

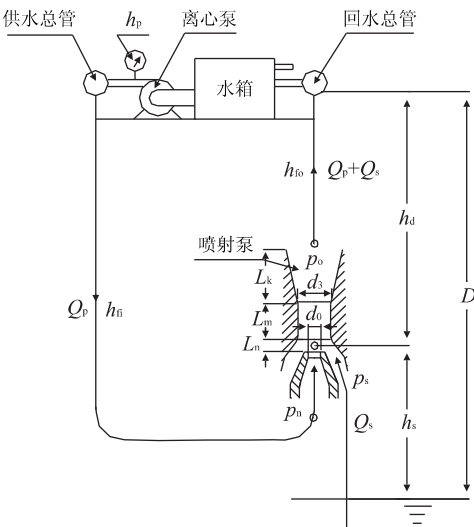


图 3 深层降水喷射泵工作简图

Fig. 3 Principle sketch of single pipe ejector

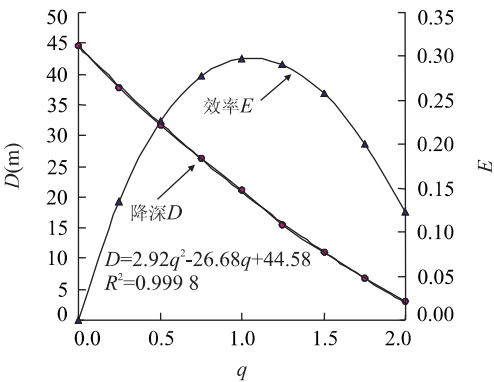


图 4 降水深度  $D$ 、效率  $E$  与引射系数  $q$  的关系

Fig. 4 Ejector equation of dewatering depth  $D$  and efficiency  $E$  versus  $q$

表压  $h_p = [(1-h)/h](h_d + h_s) + h_{fi} +$ 
$$(1/h)h_{fo}. \quad (9)$$

当  $q=1$ 、 $m_{opt}=3.8$  时,喷射泵的效率  $E$  最高,代入(8), $h=0.23$ ;理论计算  $h_{fo}$ 、 $h_{fi}$  的值偏小,参考 Patrick(1992)中实验数据,供水边阻力损失  $h_{fi}=5$  m水头,回水边阻力损失  $h_{fo}=1.5$  m水头,若设计降水深度  $D=h_d+h_s=20$  m,此时,把数据代入(9),计算表压  $h_p=80$  m. (9)是特定降水深度选择工作泵压的计算公式.

若降水深度  $D$  不变,要想降低工作泵压可采取以下措施:①减小面积比  $m$ ,就可以增大扬程比  $h$ ,可设计高压喷射泵,但喷射泵最大效率会有所下降;②降低供水、回水边阻力损失,尤其是回水边阻力损失.

降水深度  $D = h_d + h_s = [h/(1-h)]h_p -$ 
$$[h/(1-h)]h_{fi} - [h/(1-h)]h_{fo}. \quad (10)$$

(10)反映降水深度  $D$  与  $h_p$ 、 $h_{fo}$ 、 $h_{fi}$  和  $q$  等参数有关,当离心泵出口表压  $h_p=80$  m水头,降水深度  $D=h_d+h_s=20$  m,这样特定工况设计的喷射泵系统,用于降水深度不同的基础工程时,降深  $D$ 、效率  $E$  与引射系数  $q$  之间的关系如图 4 所示,经分析计算:

①当该系统用于深度  $D=10\sim30$  m 基础降水时,效率  $E=23.7\%\sim29.8\%$ ,引射系数  $q \approx 1.56\sim0.58$ ,当工作流量  $Q_p=2.76$  m<sup>3</sup>/h,引射流量  $Q_s=q \cdot Q_p=4.3\sim1.6$  m<sup>3</sup>/h. 因此,适当地选择工作流量  $Q_p$  是能满足大多数深基础工程对降水深度和流量的要求的.

②式(10)表明:供水、回水边阻力损失影响系统的降水深度,设计时要特别注意减小回水端的阻力损失,由于系数  $h/(1-h) \leq 1/(1-h)$ ,较小的回水阻力或背压都能显著地降低喷射泵降深和效率.

③函数关系式(10)较复杂,为便于工程计算,对式(10) $D$ - $q$  之间函数关系进行多项式拟合,降水深度:

$$D = 2.92q^2 - 26.68q + 44.58. \tag{10a}$$

相关系数  $R^2=0.9998$ ,拟合相关程度高. 用 (10a) 简化式计算特定降深的排水量,便于施工人员进行深基础降水设计.

2 喷射泵结构参数的设计

大量实验资料表明,影响喷射泵性能的主要结构参数就是喷嘴直径  $d_n$ 、喉管直径  $d_3$  所确定的面积比  $m$ . 而其他喷射泵结构参数如喉嘴距  $L_n$ 、喉管长度  $L_m$  和扩压管长度  $L_k$  等都与喷嘴直径  $d_n$  或喉管直径  $d_3$  成比例,因此,喷射泵结构设计就是确定喷嘴直径  $d_n$ 、喉管直径  $d_3$ .

喷嘴的流量  $Q_p = \varphi_1 f_n \sqrt{2v_p(p_n - p_s)} \text{ m}^3/\text{s}, \tag{11}$

水的比容  $v_p=0.001 \text{ m}^3/\text{kg}$ ,

圆锥喷嘴的流量系数  $\varphi_1=0.95$ ,

喷嘴两端的压差  $p_n - p_s = (h_p + D - 5) \times 10^4 \text{ N/m}^2$ ,

喷嘴面积  $f_n = Q_p / [\varphi_1 \sqrt{2v_p(p_n - p_s)}] = 0.235Q_p / \sqrt{h_p + D - 5} \text{ m}^2$ , (12)

喷嘴直径  $d_n = 1.13\sqrt{f_n} \text{ m}$ , (13)

喉管直径  $d_3 = \sqrt{m} \cdot d_n \text{ m}$ . (14)

按以上关系设计的单管同心式深基础降水喷射泵如图 2 所示,其主要结构、技术性能参数见表 1.

表 1 单管同心式喷射泵结构、性能参数

Table 1 Single pipe ejector main size and technical parameter

| 名称       | 参数                |
|----------|-------------------|
| 喷射泵面积比   | 3.8               |
| 喷嘴直径     | 4.8 mm            |
| 喉管直径     | 9.3 mm            |
| 最大抽吸真空度  | 10 m 水柱(−0.1 MPa) |
| 降水深度     | 20 m(包括吸程)        |
| 工作泵扬程    | 80 m              |
| 单喷射器供水量  | 2.76 m³/h         |
| 内、外管外形尺寸 | 直径 Φ80×Φ50        |

3 结论

(1)降水深度  $D$  不变,减小面积比  $m$ ,使扬程比  $h$  增大,或降低供水、回水边阻力损失,设计高压喷射泵,能降低工作泵泵压,但喷射泵最大效率有所下降. (2)供水、回水边阻力损失影响喷射泵井点的降深,设计时要特别注意减小回水端的阻力损失,因为较小回水背压都显著地降低喷射泵降深. (3)为便于施工人员计算特定( $D=20 \text{ m}$ ,  $h_p=80 \text{ m}$  水头)工况的喷射泵  $D$ - $q$  之间的关系,用多项式拟合简化式(10a)计算特定降深的排水量,可以进行深基础降水设计. (4)该系统用于深度  $D=10\sim30 \text{ m}$  基础降水时,引射系数  $q\approx1.56\sim0.58$ ,效率较高,当工作流量  $Q_p=2.76 \text{ m}^3/\text{h}$ ,引射流量  $Q_s=q \cdot Q_p=4.3\sim1.6 \text{ m}^3/\text{h}$ . 因此,适当地选择工作流量  $Q_p$  是能满足大多数深基础工程对降水深度和流量的要求的. 依据上述理论(卜长根等,2002)设计的单管同心式深基础降水喷射泵,已成功应用于深基础降水工程.

References

Beithou, N., Aybar, H. S., 2000. A mathematical model for steam-driven jet pump. *International Journal of Multiphase Flow*, 26(10): 1609–1619.

Bu, C. G., Sun, X. Q., Liu, G. P., 2002. Application of the single pipe ejector system for deep foundation dewatering. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 29(1): 52–53 (in Chinese with English abstract).

Deberne, N., Leone, J. F., Duque, A., et al., 1999. A model for calculation of steam injector performance. *International Journal of Multiphase Flow*, 25(5): 841–855.

Powers, P. J., 1992. Construction dewatering. John Wiley & Sons, Inc., New York, 338–350.

Соколов, Е. Я., Зингер, Н. М., 1977. Ejector. Translated by Huang, Q. Y., Science Press, Beijing, 155–165 (in Chinese).

附中文参考文献

卜长根, 孙孝庆, 刘国平, 2002. 同心式射流泵在深层井点降水中的应用. *水文地质工程地质*, 29(1): 52–53.

索科洛夫, Е. Я., 津格尔, Н. М., 1977. 喷射器. 黄秋云译. 北京: 科学出版社, 155–165.