

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.20.011

雨水泵站水泵安装平台水流冲击力的分析计算

孙怡强¹, 李国然²

(1. 新乡市市政设计研究院有限公司, 河南 新乡 453000; 2. 新乡市市政工程处有限公司, 河南 新乡 453000)

摘要: 在雨水泵站新建和改造工程设计过程中,需要计算安装潜水轴流泵的井筒底座所受的水流冲击力,为结构专业提供设计荷载。相关技术人员通常根据厂家水泵样本中提供的数据进行土建结构设计,但水泵样本中的数据是在特定实验条件下得到的,不具备通用性。为此,通过工程实例,根据700QZ-70G型潜水轴流泵配套的DN1 100钢制井筒具体安装形式和使用条件进行受力分析,应用恒定总流的伯努利方程和动量方程较精确地计算出了潜水轴流泵井筒底座所受的水流冲击力,可为经济合理地设计泵站结构提供参考。

关键词: 雨水泵站; 潜水轴流泵; 井筒式安装; 水流冲击力; 伯努利方程; 恒定总流的动量方程

中图分类号: TU99 文献标识码: B 文章编号: 1000-4602(2024)20-0068-05

Analysis and Calculation of Water Flow Stress on Pump Installation Platform in Rainwater Pumping Station

SUN Yi-qiang¹, LI Guo-ran²

(1. Xinxiang Municipal Design & Research Institute Co. Ltd., Xinxiang 453000, China;
2. Xinxiang Municipal Engineering Department Co. Ltd., Xinxiang 453000, China)

Abstract: In the design phase of new construction and renovation of rainwater pumping stations, it is essential to assess the water flow stress on the shaft base equipped with submersible axial flow pumps to calculate the design load for structural profession. Typically, the relevant engineers design the civil structure based on the data provided in the manufacturer's pump sample; however, it is important to note that this data is derived from specific experimental conditions and lacks generalizability. Consequently, the stress was analyzed through engineering case studied and in accordance with the installation configuration and operational conditions of the DN1 100 steel shaft supporting the 700QZ-70G submersible axial flow pump, and the water flow stress exerted on the shaft base of the submersible axial flow pump was accurately calculated utilizing both Bernoulli's equation and the momentum equation under constant total flow conditions, thereby providing valuable insights for the economical and rational design of pumping station structures.

Key words: rainwater pumping station; submersible axial flow pump; wellbore installation; water flow stress; Bernoulli's equation; momentum equation of constant total flow

近年来,随着气候的变化,极端天气增多,国内部分城市汛期出现严重内涝问题,对人民生命财产

安全和城市健康发展造成一定威胁。为完善城市基础设施建设、提升防汛排涝能力,河南省住房和

城乡建设厅要求各城市编制了新的排水防涝专项规划。河南省平原地区城市较多,汛期雨水不能完全自流排放,建设了较多的雨水泵站。设计标准提高后泵站流量增大,需新建或改造雨水泵站,雨水泵型多采用潜水轴流、混流泵,钢制井筒式安装,需要分析计算水泵钢制井筒底座安装平台受力,为泵站土建结构计算提供设计荷载。如何准确计算受力这一问题困扰着相关技术人员,他们通常根据厂家水泵样本中提供的数据进行土建结构设计,但水泵样本中的数据是在特定实验条件下得到的,不具备通用性。为此,对井筒式安装的潜水轴流泵安装平台所受的水流冲击力进行了详细分析,并以新乡市河湾雨水泵站为例进行计算说明。

1 新乡市雨水泵站概况

1.1 基本情况

新乡市位于河南省北部,是豫北重要的工业城市,市区海拔高程平均在72 m左右,地形自然坡度一般在1/5 000~1/4 000之间。由于地势平坦,汛期河道洪水位常高于或接近市政道路高程,造成汛期雨水不能自流排放,只能依靠雨水泵站抽排。按照排水专项规划,根据地形、城市路网布局、河流水系分布等将新乡市中心区划分成42个排水分区,每个分区设置一座雨水泵站,泵站流量多在10~32 m³/s之间。

1.2 水泵选型

近年来,随着潜水泵应用的普及和推广,新乡市雨水泵站泵型多选用潜水轴流、混流泵,该泵型具有如下特点:①大流量、低扬程,适用于雨水排放,是传统立式长轴轴流泵的更新换代产品;②电机与水泵连成一体,潜入水中运行,现场无需进行耗工、耗时、复杂的轴线对中装配,安装方便、快捷,简化了泵站的土建及建筑结构工程,减少了安装面积,节约了泵站造价;③潜水泵在水中运行,水流从电机周围流过,电机冷却条件好,噪声低。

1.3 水泵安装方式

当潜水轴流、混流泵的叶轮直径≤1 m时,安装形式有悬吊式、钢制井筒式、混凝土井筒式等;当水泵叶轮直径>1 m时,采用钢筋混凝土进、出水流道的安装方式。采用钢制井筒式、混凝土井筒式及混凝土流道式等安装形式时均需要分析计算水泵安装平台或底座的受力,为土建结构设计提供荷载标

准值。下面以新乡市河湾雨水泵站为例进行计算说明。

2 河湾雨水泵站概况

2.1 基本情况

河湾雨水泵站建于2002年,位于新乡市区中部平原路北侧、卫河南岸,设计流量为10 m³/s,汇水面积为3.15 km²。泵房平面呈矩形,水泵采用一字式布置^[1],由隔墙将泵房分为格栅间和水泵间两部分。格栅间由进水闸门、配水渠道、机械格栅组成;水泵间自下而上为泵房底板、水泵钢制井筒安装平台、地面层人行通道、起重层等。

2.2 水泵选型及安装型式

河湾泵站选用700QZ-70G型潜水轴流泵6台,水泵流量 $Q=1.63$ m³/s、扬程 $H=72.5$ kPa、转速 $n=730$ r/min,配套电机功率 $N=155$ kW、效率 $\eta=84.8\%$ 。水泵叶轮直径为700 mm,采用钢制井筒式安装方式,潜水轴流泵自动耦合安装在钢制井筒内,由水泵厂家提供钢制井筒、井盖、排气阀等,井筒直径为DN1 100,出水三通直径为DN800,井筒安装平台高程为69.64 m,出水三通中心高程为70.50 m,三通顶部密封法兰盖顶部高程为71.50 m,井筒位于安装平台以上的长度 $h_1=1.86$ m、位于安装平台以下的长度 $h_2=2.74$ m。

3 水泵安装平台水流冲击力计算

3.1 井筒安装平台受水流冲击力分析

在抽水过程中,潜水轴流泵钢制井筒主要受水流的水平和竖向冲击力,并通过井筒底座传递给安装平台,详见图1(高程单位为m,其他数据单位为mm)。以水泵井筒为分离体^[2],根据力的平衡条件,竖向(Y方向)和水平方向(X方向)受力平衡公式如下:

$$N_1 + F_1 - P_1 S_1 = 0 \quad (1)$$

$$N_2 - N_2' = 0 \quad (2)$$

式中: N_1 为安装平台对井筒底座竖直向上的支撑力, N ; F_1 为井筒顶盖所受运动水流竖直向上的压力, N ; P_1 为断面1-1的动水压强,Pa; S_1 为断面1-1的截面积,为出水流道、轮毂、井筒支撑环的面积之和,m²; N_2 为安装平台对井筒底座水平向右的支撑力, N ; N_2' 为井筒所受水流的水平冲击力, N 。

由此可得: $N_1 = P_1 S_1 - F_1$,欲求出 N_1 ,需要先计算出 F_1 ; $N_2 = N_2'$ 。

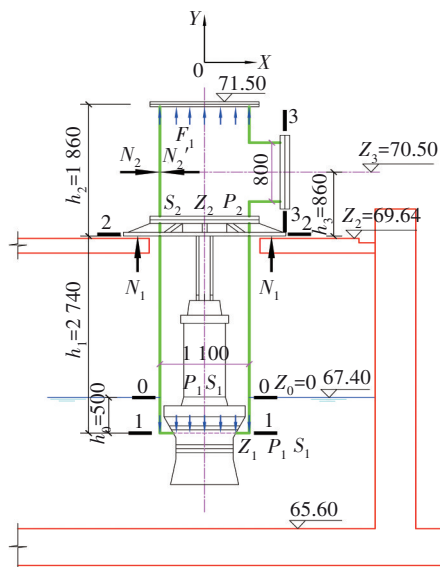


图1 潜水轴流泵井筒受力分析示意

Fig.1 Stress analysis of submersible axial flow pump shaft

3.2 求解井筒顶盖所受的动水压力 F_1

3.2.1 求解断面2-2的动水压强 P_2

取渐变流过水断面,即潜水泵站出水通道中心断面1-1和井筒在安装平台上的进口断面2-2,计算点设置在断面中心。列出恒定总流的伯努利方程,如下:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + H = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_{w1} \quad (3)$$

式中: H 为水泵的扬程,m; Z_1 为断面1-1的位置标高,以最低水位断面0-0为基准面,取相对高程,则 $Z_1 = -0.5$ m; P_1 为断面1-1的动水压强,自由水面的大气压强为 P_0 ,按照相对压强计算,则 $P_1 = P_0 + \gamma h_0 - P_0 = \gamma h_0$,其中, h_0 为集水池液面至断面1-1中心的距离, $h_0 = 0.5$ m; γ 为水的重度, N/m^3 , $\gamma = \rho g$,其中, ρ 为水的密度, g 为重力加速度; v_1 为叶轮出水通道断面的流速, $v_1 = 1.63 / [0.25 \times 3.14 \times (0.8^2 - 0.2^2)] = 3.46$ m/s(水泵通道外径为0.8 m、轮毂外径为0.2 m); Z_2 为断面2-2的位置标高, $Z_2 = h_1 - h_0 = 2.74 - 0.5 = 2.24$ m; P_2 为断面2-2的动水压强,Pa; v_2 为断面2-2的流速, $v_2 = 1.63 / (0.25 \times 3.14 \times 1.1^2) = 1.72$ m/s; h_{w1} 为断面1-1至断面2-2的水头损失,m。

断面1-1至断面2-2的水头损失 h_{w1} 为沿程水头损失 h_{w1-1} 与局部水头损失 h_{w1-2} 之和^[3]。按照舍维列夫公式,因 $v_2 = 1.72$ m/s ≥ 1.2 m/s,故沿程损失 $h_{w1} = i \times L$,其中, L 为钢制井筒长度, $L = 2.74$ m; i 为沿程水头损失系数, $i = 0.00107 \times (v_2^2 / d^{1.3})$; d 为钢制井筒内

径, $d = 1.1$ m,则 $h_{w1-1} = 0.00107 \times (1.72^2 - 1.1^{1.3}) \times 2.74 = 0.0077$ m。局部水头损失 h_{w1-2} 按照公式 $h_{w1-2} = \sum \zeta \times (v_0^2 / 2g)$ 计算,其中, $\sum \zeta$ 为水泵进口和出口局部阻力系数之和,取进口 $\zeta_1 = 1$ 、出口 $\zeta_2 = 1$,则 $\sum \zeta = 2$; v_0 为叶轮进口处流速, $v_0 = 1.63 / (0.25 \times 3.14 \times 0.8^2) = 3.24$ m/s(水泵进口直径为0.8 m),则 $h_{w1-2} = 2 \times [3.24^2 / (2 \times 9.8)] = 1.07$ m,水头损失 $h_{w1} = h_{w1-1} + h_{w1-2} = 0.0077 + 1.07 \approx 1.08$ m。

$$\text{则有: } \frac{P_2}{\gamma} = Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + H - Z_2 - \frac{v_2^2}{2g} - h_{w1} = -0.5 + 0.5 + \frac{3.46^2}{2 \times 9.8} + 7.25 - 2.24 - \frac{1.72^2}{2 \times 9.8} - 1.08 = 4.39 \text{ m。}$$

3.2.2 求解井筒顶盖所受的动水压力 F_1

欲求 F_1 ,需要研究运动液体与固体边壁相互间的作用力,在此需要运用恒定总流的动量方程。该方程将运动液体与固体边壁相互间的作用力直接同运动液体的动量变化联系起来,它的特殊优点是不必知道运动范围内部的流动过程,只需要知道其边界面上的流动状况。对于该工程,取断面2-2至3-3及井筒内壁所围成的封闭曲面为控制面,详见图2。

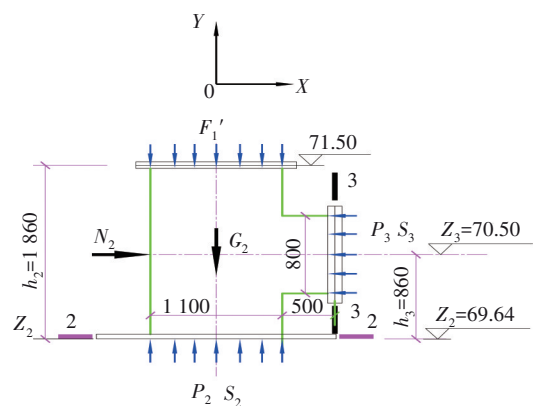


图2 断面2-2至3-3控制面受力示意

Fig.2 Stress diagram of the control surface of water flow section 2-2 to 3-3

水体由断面2-2流至断面3-3,应用动量定理^[4],该控制面的动量变化率等于该系统所受外力的合力,表达式如下:

$$\sum F = \rho Q (\beta_3 v_3 - \beta_2 v_2) \quad (4)$$

式中: $\sum F$ 为作用在恒定总流断面2-2至3-3之间控制面的所有外力的合力,N; ρ 为恒定总流的密度, kg/m^3 ; Q 为通过恒定总流断面2-2至3-3的水流

量, m^3/s ; v_2 和 v_3 分别为恒定总流断面 2-2 和 3-3 的流速, m/s ; β_2 和 β_3 均为动量修正系数, 即实际动量与按照断面平均流速计算的动量比值, 一般 β_2 和 β_3 均取 1。

为方便起见, 建立 XY 坐标系, X 为水平方向, 向右为正, Y 为竖直方向, 向上为正。由式(4)得出总流的动量方程在 Y 方向(竖直方向)上的投影为:

$$P_2 S_2 - G_2 - F_1' = \rho Q(0 - v_2) \quad (5)$$

式中: F_1' 为井筒顶盖对水流向下的压力, 即水流对井筒的竖直作用力 F_1 的反力, N ; G_2 为断面 2-2 与 3-3 之间的水流重力, N ; S_2 为断面 2-2 的截面积, $S_2 = S_1$ 。

则有: $F_1' = P_2 S_2 - G_2 + \rho Q v_2 = 1\,000 \times 9.8 \times 4.39 \times 0.25 \times 3.14 \times 1.21 - (0.25 \times 3.14 \times 1.21 \times 1.86 + 0.25 \times 3.14 \times 0.82 \times 0.5) \times 1\,000 \times 9.8 + 1\,000 \times 1.63 \times 1.72 = 23\,892.42 \text{ N} \approx 23.89 \text{ kN}$ 。

3.3 求解井筒安装平台竖向支撑力 N_1

由式(1)可得: $N_1 = P_1 S_1 - F_1 = 1\,000 \times 9.8 \times (7.25 + 0.5) \times (0.25 \times 3.14 \times 1.12) / 1\,000 - 23.89 = 48.25 \text{ kN}$ 。

3.4 求解井筒安装平台水平支撑力 N_2

3.4.1 求解断面 3-3 的动水压强 P_3

从水泵恒定总流中取断面 1-1 至 3-3, 列伯努利方程如下:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + H = Z_3 + \frac{P_3}{\gamma} + \frac{v_3^2}{2g} + h_{w2} \quad (6)$$

式中: Z_3 为断面 3-3 的位置标高, $Z_3 = h_1 - h_0 + h_3 = 2.74 - 0.5 + 0.86 = 3.1 \text{ m}$; v_3 为断面 3-3 的流速, $v_3 = 1.63 / (0.25 \times 3.14 \times 0.8^2) = 3.24 \text{ m/s}$; P_3 为断面 3-3 的动水压强, Pa ; h_{w2} 为断面 1-1 至 3-3 的水头损失, m 。

3.4.2 断面 1-1 至 3-3 的水头损失 h_{w2}

断面 1-1 至 3-3 的水头损失 h_{w2} 为沿程水头损失 h_{w2-1} 与局部水头损失 h_{w2-2} 之和^[4]。按照舍维列夫公式, 因 $v_2 = 1.72 \text{ m/s} \geq 1.2 \text{ m/s}$, 故沿程损失 $h_{w2} = i \times L$, 其中, L 为钢制井筒长度, $L = 2.74 + 0.86 + 1 = 4.6 \text{ m}$ 。则 $h_{w2-1} = 0.001\,07 \times (1.72^2 / 1.1^{1.3}) \times 4.6 = 0.013 \text{ m}$ 。局部水头损失 h_{w2-2} 按照公式 $h_{w2-2} = (\zeta_1 + \zeta_2) \times (v_0^2 / 2g) + (\zeta_3 + \zeta_4) \times (v_3^2 / 2g)$ 计算, 其中, ζ_3 、 ζ_4 分别为 90° 转弯、突然放大阻力系数, $\zeta_3 = 1.5$ 、 $\zeta_4 = 0.18$ 。则 $h_{w2-2} = 2 \times [3.24^2 / (2 \times 9.8)] + (1.5 + 0.18) \times [3.24^2 / (2 \times 9.8)] = 1.97 \text{ m}$, 水头损失 $h_{w2} = h_{w2-1} + h_{w2-2} = 0.013 + 1.97 \approx 1.98 \text{ m}$ 。

则有: $\frac{P_3}{\gamma} = H - Z_3 + \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_3^2}{2g} - h_{w2} = 7.25 - 3.1 +$

$$\frac{3.46^2}{2 \times 9.8} - \frac{3.24^2}{2 \times 9.8} - 1.98 = 2.24 \text{ m}。$$

3.4.3 求解井筒安装平台水平支撑力 N_2

从水泵恒定总流中取过水断面 2-2 至 3-3, 由式(4)得出总流的动量方程在 X 方向(水平方向)上的投影为:

$$N_2 - P_3 S_3 = \rho Q(v_3 - 0) \quad (7)$$

则有: $N_2 = P_3 S_3 + \rho Q v_3 = 1\,000 \times 9.8 \times 2.24 \times 0.25 \times 3.14 \times 0.8^2 + 1\,000 \times 1.63 \times 3.24 = 16\,309.88 \text{ N} \approx 16.31 \text{ kN}$ 。

4 讨论

4.1 厂家样本提供的荷载标准值

根据部分潜水轴流泵生产厂家提供的水泵样本及其他技术资料, 对于钢制井筒式安装的潜水轴流泵, 井筒直径为 DN1 100 对应的安装平台所承受的竖直方向荷载标准值为 28.30 kN。

4.2 分析计算的荷载标准值

通过对新乡市河湾雨水泵站安装的潜水轴流泵井筒和水流控制体受力分析, 根据水力学的伯努利方程和动量方程, 计算竖直方向: 出水泵安装平台对井筒底座竖直向上的支撑力 $N_1 = 48.25 \text{ kN}$, 则其反力即潜水轴流泵对水泵井筒安装平台竖直向下的冲击力 $N_1' = 48.25 \text{ kN}$; 水平方向: 井筒安装平台对井筒底座水平向右的支撑力 $N_2 = 16.31 \text{ kN}$, 则其反力即井筒安装平台所受水流水平向左的冲击力 $N_2' = 16.31 \text{ kN}$ 。雨水泵站常年枯水, 汛期运转, 开停泵瞬间的冲击力较大, 应当根据《泵站设计标准》(GB 50265—2021), 并参考《给水排水工程构筑物结构设计规范》(GB 50069—2002) 4.2.2 条“直接支承轴流泵电动机、机械表面曝气设备的梁系, 设备转动部分的自重及由其传递的轴向力应乘以动力系数后作为标准值。动力系数可取 2.0”, 计算井筒安装平台所承受的水流冲击力的荷载标准值, 竖直方向: $N_1 = 2.0 \times N_1' = 2.0 \times 48.25 = 96.50 \text{ kN}$, 方向向下; 水平方向: $N_x = 2.0 \times N_2' = 2.0 \times 16.31 = 32.64 \text{ kN}$, 方向向左。

4.3 水流冲击力荷载设计值

由上述可知, 厂家提供的竖直方向荷载标准值为 28.30 kN, 是在特定实验条件下得到的数据, 不具备通用性, 远小于分析计算的荷载标准值 $N_y = 96.50 \text{ kN}$, 不能直接作为结构计算依据, 建议厂家后续加应变片进一步通过实验验证, 并给出不同条件

下的修正方式。目前应以该研究的计算结果为结构专业提供荷载标准值,结构专业以此荷载标准值乘以分项系数1.5后,作为可变荷载设计值进行结构计算。2004年—2022年向阳、河师大、金穗大道东孟姜女河、白小屯、人民西路西孟姜女河等5座雨水泵站先后应用此案例计算方法,建成运行后经历了各种工况的考验,土建结构安全可靠。

5 结论

在新乡市雨水泵站工程设计过程中,根据700QZ-70G型潜水轴流泵配套的DN100钢制井筒具体安装形式和使用条件进行了受力分析,应用恒定总流的伯努利方程和动量方程较精确地计算出潜水轴流泵井筒底座所受的水流冲击力,为经济合理地设计泵站结构提供了依据,是工程力学、水力学等相关理论的实际应用,可为其他新建、改扩建雨水泵站工程项目中水流冲击力荷载系统分析计算提供参考。

参考文献:

- [1] 北京市政工程设计研究总院有限公司. 给水排水设计手册 第5册:城镇排水[M]. 3版. 北京:中国建筑工业出版社,2017:165-190.
- Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd.. Design Manual for Water & Wastewater Volume 5: Urban Drainage [M]. 3rd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017:

165-190 (in Chinese).

- [2] 洪嘉振,刘铸永,杨长俊,等. 理论力学[M]. 3版. 北京:高等教育出版社,2023:12-16.
- HONG Jiazhen, LIU Zhuyong, YANG Changjun, et al. Theoretical Mechanics [M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2023: 12-16 (in Chinese).
- [3] 中国市政工程西南设计研究院. 给水排水设计手册 第1册:常用资料[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社,2000.
- Southwest Municipal Engineering Design & Research Institute of China. Design Manual for Water & Wastewater Volume 1: Common Materials [M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000 (in Chinese).
- [4] 闻德荪,黄正华,高海鹰,等. 工程流体力学(水力学):上册[M]. 4版. 北京:高等教育出版社,2020:182-188.
- WEN Desun, HUANG Zhenghua, GAO Haiying, et al. Engineering Fluid Mechanics (Hydraulics): Volume 1 [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2020: 182-188 (in Chinese).

作者简介:孙怡强(1972—),男,河南新乡人,本科,高级工程师,注册公用设备工程师(给水排水),主要从事市政给水排水工程设计工作。

E-mail:444016956@qq.com

收稿日期:2023-12-21

修回日期:2024-04-15

(编辑:刘贵春)

坚持以高水平保护支撑高质量发展,
筑牢国家生态安全屏障