

大型泵站水泵安装高程的计算方法刍议

问泽杭¹, 李太民², 吴海军¹

(1. 江苏省南水北调办公室, 江苏 南京 210029; 2. 江苏省骆运水利工程项目管理处, 江苏 宿迁 223800)

摘要:理论分析和实际运行表明,合适的水泵安装高程可以有效地避免气蚀(空)对水泵的伤害,而水泵气蚀仍是影响水泵安全的重要因素。近年来,有关设计部门高度重视水泵安装高程的选取,在模型试验成果和相关规程规定基础上,进行了适当的减低,较好的改善了水泵运行时的气蚀状况。因目前还没有一个针对水泵安装高程的定量计算方法,水泵安装高程如何取值存在着较大的争议。借鉴近几年专家学者的研究,在对在用的部分泵站气蚀状况统计分析的基础上,试图通过对水泵安装高程计算公式的修正,找出合适的水泵安装高程计算方法,进而为泵站设计提供参考。

关键词:泵站; 水泵; 安装高程; 计算方法

中图分类号:TV675 **文献标识码:**B **文章编号:**1007-7839(2019)11-0013-05

Discussion on calculation method of installation elevation in large pumping station

WEN Zehang¹, LI Taimin², WU Haijun¹

(1. Jiangsu South-to-North Water Transfer Office, Nanjing 210029, Jiangsu;

2. Luoyun Hydraulic Project Management Division of Jiangsu Province, Suqian 223800, Jiangsu)

Abstract: At present, pump cavitation is still an important reason for the safety of pumps. The appropriate pump installation elevation can effectively avoid the damage of the pump caused by cavitation. In recent years, the relevant design departments have attached great importance to the selection of the installation height of the pump, and have appropriately reduced the scope within the scope of the regulations, which has improved the cavitation condition of the pump during operation. As there is currently no quantitative calculation method for the installation height of the pump, the design of the pump station faces great difficulties. This paper draws on the research of experts and scholars in recent years. Based on the statistical analysis of the cavitation conditions of some pumping stations in use, this paper attempts to find a suitable calculation method for the installation of the pump by the correction of the pump installation elevation calculation formula, and provide a reference for pump station design.

Key words: Pumping station; pump; installation height; calculation method

1 问题的提出

合适的水泵安装高程是水泵安全稳定运行的关键。在泵站设计过程中,水泵安装高程是泵房各部位高程的基准高程,更是泵站投入运行后,决定

机组是否能良好运行的重要技术参数。多年来,泵站设计单位为减少土建工程投资,秉承了“水泵安装高程尽量高,尽量减少泵站基础的开挖深度”的设计理念。因此,20 世纪大部分已建成的大型泵站,因水泵安装高程选择不当,机组运行时产生有

收稿日期:2019-05-21

作者简介:问泽杭(1963—),男,本科,研究员级高级工程师,主要从事水利工程建设、管理工作。

害的气蚀(空穴),造成机组强烈振动、部件损坏,影响水泵使用寿命和运行稳定性,缩短了维修周期,增加了水泵机组维护养护费用,严重时,造成泵站机组失效,直接影响泵站效益的发挥。近年来,随着对气蚀对水泵运行重要性的认识,设计单位从水泵安装高程入手,在模型试验和规程规定的基础上,适当地降低了水泵安装高程以增加叶轮淹没深度,使水泵运行气蚀状况有了较大的改善。然而,确定合适的水泵安装高程目前仍是泵站设计的一个难点。理论研究表明,水泵安装高程越低,气蚀状况越好,但过低的水泵安装高程又会明显增加土建工程投资。李玉芷等^[1]用汽蚀安全系数法对水泵安装高程进行了探讨。本文通过对水泵安装高程计算公式的修正,确定安装高程适用计算方法,为泵站工程设计提供参考。

2 现行水泵的安装高程计算方法

《泵站设计规范》GB50265-2010 对水泵安装高程作了规定。即在进水池最低水位时,应满足不同工况下水泵的允许吸上真空高度或必需气蚀余量的要求。按照规程中的定义,水泵安装高程可用以下计算公式表示^[2]:

$$H_s = H_d + P_a - P_v - K[NPSH]C - H_f \quad (1)$$

式中:

H_s —水泵安装高程(m);

H_d —泵站进水池最低水位(m);

P_a —大气压力取 10.24 m;

P_v —气化压力按最恶劣状况,水温 40℃ 时 0.76 m;

$[NPSH]C$ —设计点水泵必需气蚀余量(m);

K —满足不同工况下气蚀余量安全系数,目前一般取 1.3~1.5;

H_f —进水流道水头损失,取 0.3 m。

其中设计点水泵必需气蚀余量 $[NPSH]C$,一般通过通模型试验取得,也可以由以下公式计算得出:

$$[NPSH]C = \left(5.62 \frac{nQ^{\frac{1}{2}}}{C} \right)^{4/3} \quad (2)$$

式中:

n —水泵转速(r/min);

C —水泵气蚀比转数。

为了便于计算,从偏安全考虑,气蚀余量安全系数 K 取大值 1.5;对于轴流泵,考虑到泵的气蚀性能并兼顾水泵效率,设计点气蚀比转数取 900。式

(1)简化为:

$$H_s = H_d + 9.18 - 1.72 \times 10^{-3} n^{\frac{4}{3}} Q^{\frac{2}{3}} \quad (3)$$

从式(3)可以看出,水泵安装高程和水泵的转速及水泵的流量有关,其中水泵转速越高,安装高程越低,流量增加对高程影响不明显。

按式(2),选取部分典型泵站安装高程进行了计算,计算成果见下表 1。

由表 1 可以看出,除个别泵站外,大部分泵站实际安装高程都低于计算安装高程。

3 现状大型泵站水泵安装高程讨论

从表 1 中可以看出,大部分泵站实际安装高程都低于计算的安装高程,理论上应不会产生有害的气蚀。事实上,泵站工程的实际运行情况表明,即使在水泵安装高程计算成果的基础上进行了降低,大部分泵站仍存在不同程度的气蚀,个别泵站还很严重。

理论上淹没深度越大越好,但淹没深度过大直接影响土建工程投资,也没有必要。因此,确定在原计算基础上增加多大裕度,以确保在兼顾工程投资最优时有效改善水泵的气蚀,对泵站优化设计具有重要意义。表 1 中,气蚀良好的泵站大致在计算成果基础上减低 1~3 m,而这种减低一般都是人为所定,并无规律可循,也缺乏科学性。

3.1 $[NPSH]C$ 的选用

从计算公式(1)可以看出, $[NPSH]C$ 是泵站安装高程计算关键参数。按照《水泵模型及装置模型验收试验规程》(SL140-2006)规定,在流量保持常数,逐渐降低水泵进口压力,改变空化余量值至与无空化工况相比效率下降 1% 作为临界空化余量 $[NPSH]C$,即水泵的临界气蚀余量^[3]。实际上,试验时所谓无空化工况的界定较为困难,有学者认为试验中无空化工况前已发生气蚀,因此临界气蚀余量 $[NPSH]C$ 的取值大小值得商榷。

3.2 气蚀余量安全系数 K 选用

水泵生产厂家一般会提供水泵设计工况下必需气蚀余量,该数值是在水泵模型试验基础上,通过原模型换算得出。当水泵偏离设计工况点运行时,从水泵性能曲线中可以看出,水泵扬程降低时,流量变大,相应的必需气蚀余量变大,且呈二次方关系增加;而水泵扬程增加时,流量变小,相应的必需气蚀余量变小。理论上,为适应不同工况下必需气蚀余量要求,一方面应计算工况点以外附加必需气蚀余量;另一方面考虑到水泵在制作过程中,因

表 1 典型泵站安装高程计算表

泵站名称	水泵安装型式	单机设计 流量 (m ³ /s)	水泵转速 (转/分)	水泵叶轮 直径 (m)	下游最低 水位 (m)	叶轮安装 高程 (m)	实际淹没 深度 (m)	计算淹没 深度 (m)	是否有气蚀 状况
江都一站	立式轴流	8	250	1.64	0	-2.05	2.05	1.66	明显
江都二站	立式轴流	8	250	1.64	0	-2.05	2.05	1.66	明显
江都三站	立式混流	13.5	214.2	2	0	-3.5	3.5	3.32	一般
江都四站	立式轴流	30.2	125	3.1	0	-3.5	3.5	1.25	良
宝应站	立式混流	34	125	2.95	0.2	-3	3.2	2.10	良
淮安二站	立式轴流	60	93.8	4.5	4.63	1.63	3	2.05	一般
淮安四站	立式轴流	33.4	125	3.1	4.63	0.8	3.83	1.97	一般
淮阴站	立式轴流	30	125	3.1	9	3	6	1.20	好
泗阳站	立式轴流	33	125	3.1	10.5	6.75	3.75	1.88	良
洪泽站	立式混流	37.5	125	3.15	7.1	4	3.1	2.86	一般
刘老涧一站	立式轴流	37.5	150	3	15.8	13	2.8	6.18	差
刘老涧二站	立式轴流	29.4	125	2.9	15.85	12.4	3.45	1.06	良
皂河站	立式混流	97.5	75	5.7	18.5	16	2.5	2.34	一般
皂河二站	立式轴流	25	150	2.65	18.5	15	3.5	2.54	良
睢宁二站	立式混流	20	150	2.6	13.3	9.8	3.5	0.92	良
刘山站	立式轴流	31.5	150	2.9	21.27	17.5	3.77	4.49	一般
解台站	立式轴流	31.5	150	2.9	26	23	3	4.49	一般
台儿庄泵站	立式轴流	31.25	136.4	2.95	20.56	16	3.56	2.80	良
万年闸泵站	立式轴流	33.5	125	3.15	24.02	21	3.02	1.99	良
长沟泵站	立式轴流	33.5	125	3.15				1.99	良
邓楼泵站	立式轴流	33.5	125	3.15	33.82	29.45	4.37	1.99	良
八里湾泵站	立式轴流	33.5	115.4	3.15	36.12	31.62	4.5	0.86	好

工艺水平不同,大部分生产厂家很难保证和模型线型完全一致,制作的误差造成气蚀性能有较大的差距。综合上述因素,引出了气蚀余量安全系数 K 。目前,气蚀余量安全系数只给出了一个范围,即 1.3~1.5,具体取值多少则视工程而定,但实践中该值取值大小对安装高程的影响较大。

4 泵站机组安装高程的计算方法建议

前文所述,现行水泵安装高程计算方法所确定的水泵安装高程,还不能有效的消除水泵有害的气蚀,造成在具体工程设计中难以定量的计算,因此,需要找到一个合适计算方法。

4.1 全工况测试法

泵站在实际运行时,泵站一般都处于非设计工况运行,并且,对于大型泵站机组还通过叶片角度的调节,实现变流量运行。按泵站设计规程规定,为使泵站机组在不同工况下运行时,机组运行均不发生气蚀,需对不同工况下运行时必需气蚀余量进行分析。水泵安装高程公式变为:

$$H_s = H_d + P_a - P_v - H_f - [NPSH]_c - [NPSH]_{C1} - H_j \quad (4)$$

式中:

$[NPSH]_{C1}$ —设计点以外附加水泵必需气蚀余量(m)

为取得设计点以外附加水泵必需气蚀余量,在水泵模型试验时,必须对水泵的所有运行工况下的必需气蚀余量进行测试。而不是只测试额定工况下必需气蚀余量,将测试结果代入式(4)进行计算。另水泵模型转换成原型后,因流道施工及叶轮加班误差,实际水力状况发生了很大变化,实际附加水泵气蚀余量较难精确计算。

4.2 原型 nD 计算方法

目前我国水泵模型设计水平已基本达到国际先进水平,按现行的模型试验方法,模型设计点临界空化余量 $[NPSH]_C$ 一般都能够控制在 7.5 m 左右,进一步提高气蚀性能难度较大。因此,仅将临界空化余量 $[NPSH]_C$ 作为判断水泵模型气蚀性能好坏的依据,而不作为水泵安装高程的计算依据。

近几年来,随着水泵运行理论研究的不断深化,在水泵选型时,对水泵运行特征数据 nD 选取受到重视。目前大部分学者认为水泵 nD 和水泵的气蚀特性存在着较大的联系,并将 nD 作为原型泵造型的限制性条件。基于这方面的考虑,建议将水泵的 nD 作为水泵安装高程依据^[4]。

按照水泵运行产生气蚀的机理,水泵的气蚀是

由于水泵的高速运转带动水流的高速运动产生压力的降低,形成动力真空,产生水的汽化和溃灭。这种压力的降低需要通过增加水泵的淹没深度(降低水泵安装高度)这个静力真空抵消。

事实上,水泵工作时,水在叶轮内的运动是一种复合运动。水流质点随叶轮旋转的圆周运动,又有沿叶片的相对运动。其中随叶轮的旋转运动,其速度为牵连速度 u ;流体质点相对于叶轮的相对运动,其速度为相对速度 W 。叶轮中任意液体质点的绝对速度 V 是该点相对速度 w 和圆周速度 u 的矢量和。最恶劣情况下,水泵中最大水流质点最大速度为圆周速度。

$$\text{其中: } u = \frac{\pi n D}{60}$$

水流质点随叶轮旋转的圆周运动形成的压力减低为:

$$H_p = \frac{\left(\frac{\pi n D}{60}\right)^2}{2g} = 1.4 \times 10^{-4} (nD)^2 \quad (5)$$

式中:

n —水泵转速;

D —水泵叶轮直径。

由此,可将水泵安装计算公式(1)转化为:

$$H_v = H_d + P_a - P_v - k (nD)^2 - H_f \quad (6)$$

从式(6)可以看出,除 k 以外,其它一般都是定值,因此只要选择合适的 k ,就可以对安装高程进行定量的计算。目前对 k 值的理论分析及取值还有较大的难度。经对典型泵站安装高程取值(见表2),并结合运行时气蚀进行分析, k 值一般在 $8 \times 10^{-5} \sim 9 \times 10^{-5}$ 较为合适,具体计算时可以取 8×10^{-5} 。即相当于水泵运行最大线速度产生的水头的 57%,也约等于叶轮直径 75% 处的线速度。

综合式(2)、式(6),得到水泵安装高程计算式为:

表 2 部分典型泵站水泵设计参数表

泵站名称	水泵安装型式	单机设计 流量 (m^3/s)	水泵转速 (转/分)	水泵叶轮 直径 (m)	下游最低 水位 (m)	叶轮安装 高程 (m)	实际淹没 深度 (m)	计算淹没 深度 (m)	nD
江都一站	立式轴流	8	250	1.64	0	-2.05	2.05	4.27	410
江都二站	立式轴流	8	250	1.64	0	-2.05	2.05	4.27	410
江都三站	立式轴流	13.5	214.2	2	0	-3.5	3.5	5.50	428.4
江都四站	立式轴流	30.2	125	3.1	0	-3.5	3.5	2.83	387.5

(续表 2)

泵站名称	水泵安装型式	单机设计 流量 (m ³ /s)	水泵转速 (转/分)	水泵叶轮 直径 (m)	下游最低 水位 (m)	叶轮安装 高程 (m)	实际淹没 深度 (m)	计算淹没 深度 (m)	<i>nD</i>
宝应站	立式混流	34	125	2.95	0.2	-3	3.2	1.70	368.75
淮安二站	立式轴流	60	93.8	4.5	5	1.63	3	5.07	422.1
淮安四站	立式轴流	33.4	125	3.1	4.63	0.8	3.83	2.83	387.5
淮阴站	立式轴流	30	125	3.1	9	3	6	2.83	387.5
泗阳站	立式轴流	33	125	3.1	10.5	6.75	3.75	2.83	387.5
洪泽站	立式混流	37.5	125	3.15	7.1	4	3.1	3.22	393.75
刘老涧一站	立式轴流	37.5	150	3	15.8	13	2.8	7.02	450
刘老涧二站	立式轴流	29	125	2.9	15.85	12.4	3.45	1.33	362.5
皂河站	立式混流	97.5	75	5.7	18.5	16	2.5	5.44	427.5
皂河二站	立式轴流	25	150	2.65	18.5	15	3.5	3.46	397.5
睢宁二站	立式混流	20	150	2.6	13.3	9.8	3.5	2.99	390
刘山站	立式轴流	31.5	150	2.9	21.27	17.5	3.77	5.96	435
解台站	立式轴流	31.5	150	2.9	26	23	3	5.96	435
台儿庄泵站	立式轴流	31.25	136.4	2.95	20.56	17	3.56	3.77	402.38
万年闸泵站	立式轴流	33.5	125	3.15	24.02	21	3.02	3.22	393.75
长沟泵站	立式轴流	33.5	125	3.15	33	29	4	3.22	393.75
邓楼泵站	立式轴流	33.5	125	3.15	33.82	29.45	4.37	3.22	393.75
八里湾泵站	立式轴流	33.5	115.4	3.15	36.12	31.62	4.5	1.39	363.51

$$H_y = H_d + 9.18 - 8.5 \times 10^{-5} (ND)^2 \quad (7)$$

从式(7)可以看出,在水泵选用时,对 *nD* 进行了限制, *nD* 值越大,需要的淹没深度越大,并呈平方的关系因此,只有选择合适的 *nD* 才能保证良好运行气蚀状况和减低土建开挖深度。

5 结束语

本文针对目前水泵安装高程没有定量计算方法的现状,结合部分专家学者的研究成果,将原型水泵 *nD* 这个反映水泵物理特征参数,引入水泵安装高程计算中,简化了计算方法。从目前较为普遍认为 *nD* 小于 400,水泵淹没深度在 3 m 左右是合适的。并经过对部分典型泵站安装高程和气蚀状况

分析,提出了计算参数的建议,为设计提供参考。因水泵的气蚀成因机理较为复杂,如何防止或减轻水泵运行气蚀仍为重要的研究课题。

参考文献:

[1] 李玉芷,陈希文. 水泵安装高程计算方法探讨[J]. 水利水电技术, 1999(03):22-25.
[2] 中华人民共和国水利部. GB50265-2010 泵站设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2011.
[3] 中华人民共和国水利部. SL140-2006 水泵模型及装置模型验收试验规程[S]. 北京:中华人民共和国水利部, 2007.
[4] 陈坚,杨树雄,朱丽楠. 水泵 *nD* 值的意义及其合理取值范围[J]. 水泵技术, 2002(01):9-11.