

地表水源热泵系统取水方式遴选原理及方法研究

尚福强^{1*}, 盛峰¹, 刘军¹, 王硕¹, 秦华云², 张思鸣^{2#}, 安雪晖³

¹中电建路桥集团有限公司, 北京

²江苏河海新能源股份有限公司, 江苏 常州

³清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京

Email: #kimi_caca@163.com

收稿日期: 2020年11月18日; 录用日期: 2020年12月18日; 发布日期: 2020年12月24日

摘要

地表水源热泵的取水方式多种多样, 每种取水方式都有相应的适用条件。本文分析了几种取水方式的原理及适用范围, 给出了地表水源热泵系统取水方式的遴选原则。着重介绍了负压引流取水方式, 从不同的进水方式和出水方式入手, 探讨了在地表水源热泵系统中, 负压引流罐的设计原理和方法。同时, 水泵及负压引流罐的安装高度也应根据实际使用情况进行校核, 避免发生水汽化现象。

关键词

水源热泵, 取水方式, 引流罐, 设计计算, 安装高度

Principles and Methods of Selection of Water Intake Method for Surface Water Source Heat Pump System

Fuqiang Shang^{1*}, Feng Sheng¹, Jun Liu¹, Shuo Wang¹, Huayun Qin², Siming Zhang^{2#}, Xuehui An³

¹China Power Construction Road and Bridge Group Co., Ltd., Beijing

²Jiangsu Hehai New Energy Co., Ltd., Changzhou Jiangsu

³State Key Laboratory of Water and Sediment Science and Water Conservancy and Hydropower Engineering, Tsinghua University, Beijing

Email: #kimi_caca@163.com

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 尚福强, 盛峰, 刘军, 王硕, 秦华云, 张思鸣, 安雪晖. 地表水源热泵系统取水方式遴选原理及方法研究[J]. 仪器与设备, 2020, 8(4): 141-148. DOI: 10.12677/iae.2020.84019

Abstract

Surface water source heat pumps have a variety of water intake methods, and each water intake method has corresponding applicable conditions. The principles and application scope of several water intake methods were analyzed, and how to select the method was discussed. The negative pressure drainage and water intake methods were highlighted. Starting with the inlet and outlet methods, the design principle and method of negative pressure drainage tank in surface water heat pump system was explored. Meanwhile, installation heights of pump and negative pressure drainage tank should be checked according to practical utilization condition in order to avoid water vaporization.

Keywords

Water-Source Heat Pump, Water Intake Method, Negative Pressure Drainage Tank, Design Calculation, Installation Height

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地表水源水量丰富、温度适宜，相对空气而言具有冬暖夏凉的热能特征，是良好的低位可再生清洁能源。我国地表水资源丰富，地表水平均能为 42.1% 的市区的傍水建筑物提供低位冷热源，其工程应用前景十分广阔。

地表水源热泵技术是利用流经城市的江河水、城市附近的湖泊水和沿海城市的海水吸收太阳能和地热能而形成低位热能资源从而作为热泵的冷热源，通过输入少量的高位电能，实现低位热能向高位热能转变，从而实现冬天从水体中吸取热量向建筑物供热，夏季以地表水作为冷却水向建筑物供冷的高效节能空调系统。水源热泵的应用在北美及北欧等国家已相当普遍与成熟，在我国也不断推进鼓励使用。虽然已有一些工程应用，但是仍然存在不少问题，水源热泵空气调节系统设计不完全取决于系统的设计与设备的质量，机组运行时水源的稳定性与可靠性也十分重要。本文将探讨热泵系统水源取水的几种形式，并从进水和出水方式入手，研究地表水源热泵系统中负压引流罐的设计方法，对设备安装高度进行讨论，确保取水系统正常运行。本文重点讨论地表水源热泵的取水方式及其相应的适用适用范围，给出地表水源热泵系统取水方式的遴选原则。

2. 水源水取水方式

水源热泵可分为开式系统和闭式系统，闭式系统将换热盘管置于水体中进行换热，避免因水质不良引起的热泵换热器的结垢和腐蚀的问题。闭式系统不易结垢、能耗低、可以在更低的气温下运行，但也存在机组与水不直接接触，换热效果较差；盘管长期置于水体中，容易受到腐蚀；当水质较差时，底部盘管易结垢，影响传热效果等缺点。开式系统中热泵系统源侧直接利用水源水进入热泵机组换热，该种

利用方式相较闭式系统无需水-水换热器, 机组效率高, 因此应用更为广泛。

对于开式系统而言, 水源水取水方式对于整个系统可分为压力流、重力流、负压流三种方式[1], 如表 1 所示。

Table 1. Comparison of water intake methods

表 1. 水源取水方式对比

取水方式	方法	优点	局限
压力流	使用水泵直接提升水位的正压供水	对机房与取水水位高差无要求	用于取水水位低于机房的情况, 水泵流量需满足主机用水量需求, 水泵扬程需克服取水水位与最高点高差及供回水管路阻力之和
重力流	利用水的重力, 使水自然从取水点通过引水管流入泵坑后再经由水泵提升的取水方式	水源与泵坑距离限制较小, 可远距离取水; 取水量大; 泵坑内安装机械格栅, 利于杂物清理	用于取水水位高于机房的情况; 对于场地及地质条件有一定要求, 工程量大, 一般需将管道埋地; 一般在河岸或干渠侧壁开取水口, 水源水位应足够高, 取水口开在适当位置, 既要保证有足够压差产生重力流
负压流	利用物理方法使取水管道内形成负压, 依靠大气压与管道内压力作为动力取水的方式	取水时利用取水管道内的负压, 与大气压形成压差作为取水动力; 取水过程中无需其他动力, 管道形成真空后可稳定取水	一般用于取水水位低于工作系统的情况; 减少大量土石方开挖量及水下工作量, 降低施工中的困难

负压流依靠大气压力取水, 充分利用自然条件, 且施工工程量小, 取水设备制造维修简便, 相较其他取水方式有很大优势。在工程实际应用中, 可依据现场实际情况选择真负压流罐或带真空泵的负压引流成套设备使用。当水源距离机房较近, 且机房面积较小时, 可在室外设置负压引流罐取水, 减少电控系统的投资和使用; 当水源距离机房较远, 且取水量大时, 可在机房设置负压引流成套设备, 最大限度利用大气压力压取源水, 保证水流量。

在取水工程中, 经常会碰到水泵位置高于取水面的情况。负压引流罐是能够将水顺利引入水泵, 且无需向水泵中灌水的装置[1] [2]。负压罐一般为圆柱筒体, 在取水过程中罐体内保持负压, 依靠大气压力将水压入罐内。采用负压引流罐引水, 避免了使用底阀造成的局部阻力大、易堵塞等问题, 同时减少了每次启动水泵时均需重复引水带来的不便[3] [4]。

在地表水源热泵系统中, 负压引流罐从江、河、湖等水源将水引入热泵机组进行循环。与大部分建筑给排水中的工作环境不同, 地表水源热泵系统中取水管管径相对较大。在区域供热项目中, 热泵所需供给的热负荷基本都达到兆瓦级, 按照 5℃ 的供回水温差计算, 所用取水管至少在 DN200 以上; 对于供热需求较大的项目, 取水管管径甚至可达 DN500~DN700 [5], 较建筑给排水中的取水管有很大区别, 在设计负压引流罐时许多经验参数已不可简单套用[6]-[12]。因此, 针对地表水源热泵系统负压引流罐的设计进行研究, 具有重要的意义。

3. 负压引流罐极其设计计算

3.1. 负压引流罐简介

负压引流罐是能够将水顺利引入水泵, 且无需向水泵中灌水的装置, 仅在初次使用时向水管及引流罐中充水即可。其取水示意图如图 1 所示。负压罐一般为圆柱筒体, 其工作步骤为: 水泵启动前先向引流罐内注水, 排出水泵及罐体内空气, 当罐内水从溢流管溢出时关闭注水管。水泵启动后引流罐内液面下降, 罐内气体形成负压, 将吸水管中的水不断吸入罐体, 保证取水泵正常工作。

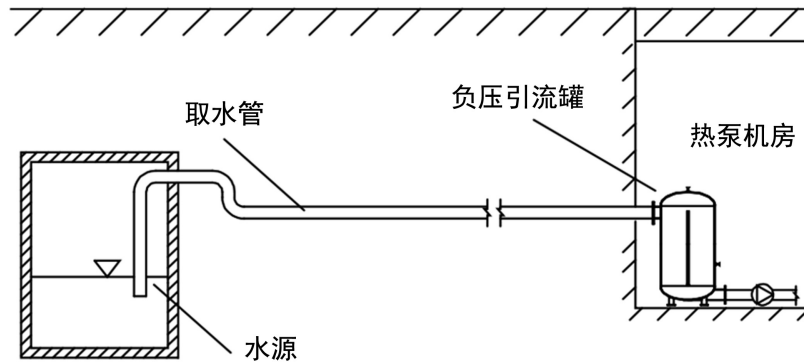


Figure 1. Schematic diagram of water intake in negative pressure drainage tank
图 1. 负压引流罐取水示意图

3.2. 负压引流罐的设计计算

负压罐的进水方式可分为三种：侧面进水[13]、底部进水[14]和顶部进水[15]，如图 2 所示。

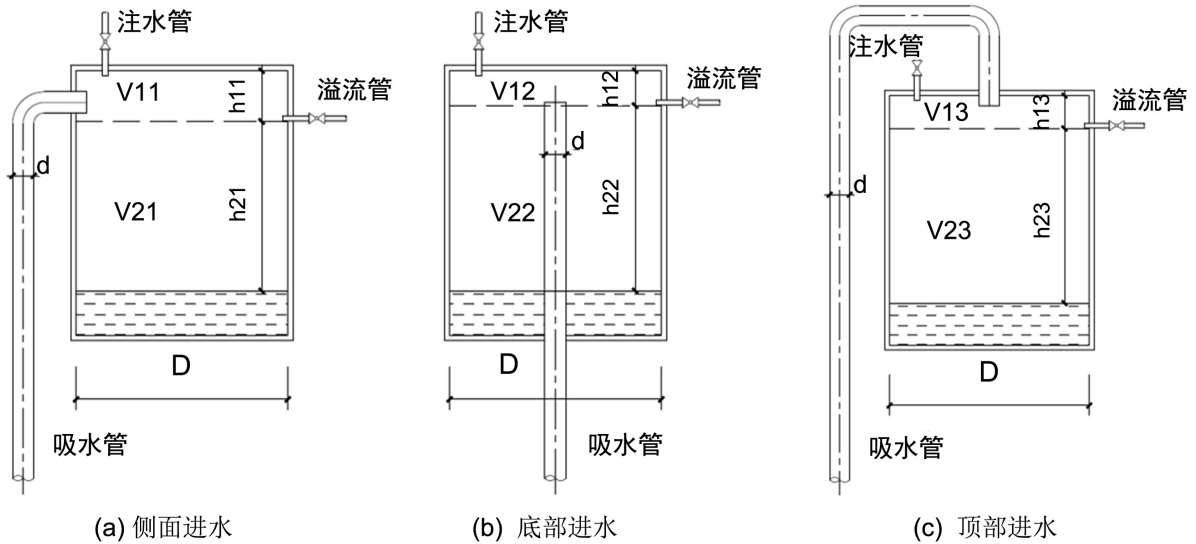


Figure 2. Schematic diagram of different water inlet methods
图 2. 不同进水方式示意图

对于不同的进水方式，水泵启动前的罐体内空气体积 V_1 及空气膨胀容积 V_2 也不相同。现在在吸水管径 d 、负压罐直径 D 、吸水高度 H_s 及吸水管长度 L 都相同的情况下，对不同进水方式中的 V_1 和 V_2 进行计算[16] [17]。

水泵启动前，系统内空气体积 $V_q = V_1 + V_g$ ，其中 $V_g = \frac{\pi}{4} d^2 L$ ，为吸水管内空气体积，空气压力为大气压 p_a ；水泵工作时，系统内空气体积 $V_p = V_1 + V_2$ ，空气压力为 p_b ， $p_b = p_a - \rho g (h_f + H_s + h_v)$ ，其中 h_f 为吸水管水力损失， h_v 为吸水管出水速度水头。一般负压罐直径 D 取吸水管径 d 的 n 倍，即 $D = nd$ ， n 的取值范围为 3~6。

取水计算的依据是等温条件下的波马定律，即

$$V_q \cdot p_a = V_p \cdot p_b \tag{1}$$

Table 2. Three calculation methods for water intake
表 2. 三种进水方式计算方法

进水方式	水位变化高度计算式
侧面进水	$h_{21} = \frac{V_{21}}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{\Sigma h}{H_a - \Sigma h} h_{11} + \frac{H_a}{H_a - \Sigma h} \frac{1}{n^2} L$
底部进水	$h_{22} = \frac{V_{22}}{\frac{\pi (D^2 - d^2)}{4}} = \frac{\Sigma h}{H_a - \Sigma h} \frac{n^2}{n^2 - 1} h_{12} + \frac{H_a}{H_a - \Sigma h} \frac{1}{n^2 - 1} L$
顶部进水	$h_{23} = \frac{V_{23}}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{\Sigma h}{H_a - \Sigma h} h_{13} + \frac{H_a}{H_a - \Sigma h} \frac{1}{n^2} L$

由式(1)可推得三种不同进水方式所需要的最小水位变化高度,如表2所示。在地表水源热泵系统当中,由于吸水管管径较大,若采用侧面进水方式,工作前罐内空气体积 V_{11} 将会很大,从而负压罐工作时的膨胀容积 V_{21} 也较大,导致整个罐体尺寸偏大。因此,针对地表水源热泵系统中吸水管管径大的情况,侧面进水方式并非最佳进水方式。

对于底部进水方式,可以将负压罐直接布置在取水点上方,缩短吸水管长度,使初始空气体积 V_q 减小。该种进水方式需与工程实际状况相结合决定是否选取。

对于顶部进水方式,从空气膨胀体积所需的罐体高度来看,对比上述计算分析后,可以得到 $h_{23} < h_{21}$, $h_{23} < h_{22}$,故顶部进水方式下所需罐体体积也最小。从负压罐设计的角度讲,该种进水方式是较为理想的进水方式,所需负压罐尺寸相对较小,系统工作时罐内储水量也较小,有利于设备承重、运行相对安全等方面的要求。但其吸水管的最高高度要高于其他两种取水方式,故在设置负压罐时,要注意其与取水水位间的高差不能过大。

根据上述分析可知,负压引流罐进水方式的选择,需要根据实际情况,综合考虑负压罐可放置的位置、吸水高差、水泵汽蚀余量等因素后确定。

负压罐的出水方式分为两种:侧面出水和底部出水,如图3所示。

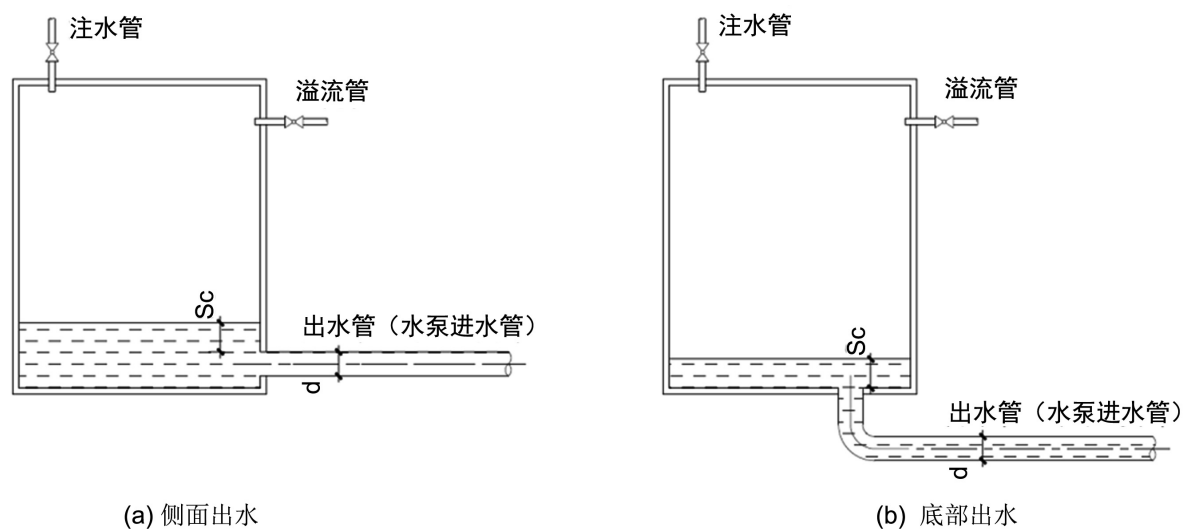


Figure 3. Schematic diagram of different water outlet methods
图 3. 不同出水方式示意图

张群涛[1]、徐善春[8]等针对侧面出水方式,均提出在水泵工作时负压罐内液面高度至少高出出水管管顶 0.2 m。而对于底部出水方式,并未有研究指出保护容积及水面高度应如何确定。

对于负压罐出水,无论是哪种出水方式,当负压罐内液面与出水管口距离过小时,在进水口处均会产生立轴旋涡。立轴旋涡的产生会造成入水不畅,过流能力急剧下降,使吸水流量减小,热泵机组的工作效率下降,同时可能会吸入气体带来设备震动及噪音问题,并对吸水泵产生冲击等危害。因此,为避免旋涡对设备产生的影响,提高热泵系统的运行效率,需要采取有效措施避免负压罐出水口旋涡的产生。

避免旋涡的产生有两种方式,一是可以在出水管口处设置消涡板,二是可以令水面距出水口距离大于临界淹没水深 S_c 。设置消涡板需要在负压罐内壁贴近出水口处壁焊接钢板,会增加出水的局部阻力。当出水口径较大时,所需的消涡板尺寸也会增大,焊接处的应力增大,对设备的安全性有不利影响。若不设置消涡板,则需保证水面距出水口高度大于临界淹没水深 S_c 。根据郑双凌等[18]学者对临界淹没水深研究,通过公式计算可以得到,对于侧向出水,管径为 DN300 的出水管道而言,其临界淹没水深可达 0.48 m,远远超过先行研究中提出的 0.2 m 的安全余量值。因此在设计负压罐时,应注意要保证出水管的淹没深度,否则容易造成旋涡形成,影响取水系统的运行,严重者会造成设备的损坏。在设计安全储水水深时,应考虑到旋涡对出流水流造成的影响,可根据临界淹没水深的经验公式 $S_c = cv\sqrt{D}$, 确定不同出水方式下的临界淹没水深,最终得到安全储水水深。其中 c 为系数,正向出水时取 0.55,侧向出水时取 0.73, v 为出水口处水流速度, D 为出水口直径。

此外,相较于底部出水,侧面出水所需求的保护容积高度多出一个出水管径,且需要的临界淹没水深较大,使得罐体高度增大。同时,侧面出水方式需要在圆柱罐体上焊接圆管,焊缝处应力大于底部出水方式所需的平面焊缝应力,因此,在实际条件允许的情况下,负压罐采用底部出水是较好的选择。

4. 水泵及负压罐安装高度

4.1. 水泵安装高度

水泵工作时,其入口处压强最低,相应的汽化温度也降低。若不能保证进入水泵的水具有一定的压力,则水泵会发生汽蚀现象,导致叶片损坏。这就对水泵的安装高度有一定要求。

水泵的最大安装高度 $H_{b\max}$ 可按下式计算:

$$H_{b\max} = H_a - H_z - h_s - h_v - NPSH_r \quad (2)$$

其中 H_a 为大气压力,如表 3 所示, H_z 为工作时设计最高水温下的饱和蒸汽压力,如表 4 所示, h_s 为所有管路的水力损失, h_v 为水流动压, $NPSH_r$ 为水泵的必须汽蚀余量,通过查询水泵样本得到。式中压力及水头损失的单位均为 m。

Table 3. Atmospheric pressure at different altitudes

表 3. 不同海拔下的大气压力

海拔(m)	-600	0	200	500	1000	2000	3000	4000	5000
大气压力(m)	11.3	10.3	10.1	9.7	9.2	8.6	8.1	6.3	5.5

Table 4. The corresponding saturated steam pressure at different water temperatures

表 4. 不同水温下对应的饱和蒸汽压力

温度(°C)	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
饱和蒸汽压力(m)	0.06	0.09	0.12	0.24	0.43	0.75	1.25	2.02	3.17	4.82	7.14	10.33

当水泵实际安装高度不大于 $H_{b\max}$ 时,水泵入口处的压力能够保证大于汽化压力,不会发生汽蚀现象。

4.2. 负压罐安装高度

在使用负压引流系统时,除需确保水泵不发生气蚀外,仍同时保证负压引流罐内也不发生水汽化现象,否则可能会造成吸水不畅,或对管道内壁冲击腐蚀的问题。对于不同进水方式的引流罐,应校核其水位最高点处的压力,保证其不大于水的汽化压力。

对于侧面和底部进水,应校核负压引流罐进水口高度处的压力;对于顶部进水,吸水管最高高度高于负压引流罐,故应校核吸水管最高点处的压力,保证水在管道内不会汽化,保证吸水的连续性。

吸水管最高点距吸水平面的最大高差 $H_{l_{\max}}$ 可按下式计算:

$$H_{l_{\max}} = H_a - H_z - h_l - h_v \quad (3)$$

其中 h_l 为吸水管的水力损失,其余符号同前。式中压力及水头损失的单位均为 m。根据计算结果,可以限定负压引流罐的最大安装高度。

5. 结论

负压引流罐在地表水源热泵的取水系统中有着重要的作用。针对水源热泵负荷、管径变化范围大以及取水条件的特点,本文从负压罐吸水和出水两方面讨论了罐体设计形式。主要结论如下:

1) 当负压罐的吸水管径相对较小时,侧面出水较底部出水所多出的安全储水高度不大,此时可采用顶部或底部进水、侧面出水的罐体形式。采用何种进水方式,应根据现场实际情况确定,若负压罐可设置在取水点处则优先选用底部进水,以缩短吸水管长度;若负压罐仅能设置在距取水点较远处,则优先选用顶部进水,以减小罐体高度。当负压罐的吸水管径较大时,侧面出水所需安全储水高度较高,此时可采用顶部进水、底部出水方式。

2) 在确定负压罐的使用形式后,应分别对取水泵及负压引流罐进行安装高度的校核,保证不大于最大安装高度,避免由于水压过低造成水汽化,从而产生泵的气蚀或对取水管内壁冲击腐蚀等危害。

企业项目

清洁能源建筑冷热综合开发应用关键技术研究。

参考文献

- [1] 张群涛. 浅谈负压引水装置的设计和应用[J]. 山东煤炭科技, 2015(5): 108-110.
- [2] 卢珍, 周小波, 曾文明, 李玉玲, 李光辉. 真空引水装置的设计计算[J]. 四川农业与农机, 2019(3): 25-26.
- [3] 王殿平, 陈静媛. 真空引水罐参数确定[J]. 煤矿机械, 2005(8): 22-24.
- [4] 鞠继升. 污水及地表水源热泵系统中取水技术研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛大学, 2018.
- [5] 鞠继升, 吴荣华, 谢鸿玺, 李帅, 武潇. 污水源热泵系统虹吸负压取水分析及应用[J]. 暖通空调, 2017, 47(11): 90-93.
- [6] 李海清. 离心泵引水罐的应用及优化[J]. 化工设计通讯, 2017, 43(9): 91.
- [7] 丁洁. 开式地表水源热泵常用取水方案的分析[J]. 科技风, 2014(20): 122.
- [8] 徐善春. 真空引水罐的设计与应用[J]. 粮食与食品工业, 2014, 21(1): 75-76.
- [9] 刘清华. 开式地表水源热泵取水优化策略的数值模拟及分析[C]//贵州省暖通空调及热能动力学术委员会. 第十四届西南地区暖通空调热能动力学术年会论文集. 成都: 制冷与空调, 2011: 7.
- [10] 綦时明. 水泵启动过程中的真空系统[J]. 内蒙古石油化工, 2011, 37(18): 53-54.
- [11] 管晓涛, 廖达卫, 管晓琴. 顶吸式真空引水罐的改造设计及应用[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2007, 32(1): 64-66.
- [12] 杜增耀, 刘永亮. 无底阀水泵负压引水罐容积的确定[J]. 内蒙古石油化工, 2006(8): 77-78.

- [13] 侯伟, 刘红岚. 水泵真空引水罐的选用[J]. 房材与应用, 2001(3): 21-26.
- [14] 冯林豹, 高友好. 真空罐引水装置设计选用及设置要点[J]. 青岛建筑工程学院学报, 1999(1): 71-74.
- [15] 刘莉, 曹听歌, 李春玲. 真空罐在抽水泵站中的应用[J]. 黑龙江水利科技, 1997(2): 51-53.
- [16] 张俊. 真空引水罐和密闭水箱在离心水泵引水中的应用[J]. 化工给排水设计, 1994(3): 25-27.
- [17] 陶振亚. 用水力真空罐给离心泵灌引水[J]. 农田水利与小水电, 1985(2): 43.
- [18] 郑双凌, 马吉明, 陈浩波, 等. 进水口漩涡特性及临界淹没水深研究进展[J]. 南水北调与水利科技, 2010(5): 129-132