



## 高效节能水锤泵技术研究进展

李甲振<sup>1\*</sup>, 杨开林<sup>1</sup>, 任显明<sup>2</sup>, 郭永鑫<sup>1</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;  
2. 大庆油田第十采油厂供水大队, 黑龙江 大庆 166405)



李甲振

**摘要:** 为了厘清水锤泵的技术发展动态和目前的技术应用现状, 回顾了水锤泵技术发展历史, 并简要介绍了水锤泵的基本结构, 在此基础上, 阐述了水锤泵的效率计算方法, 并对水锤泵的理论设计方法发展进行了梳理. 随后对水锤泵的国内外研发现状进行了大致概括, 提出了中国水锤泵发展受限的根本原因, 并指出简化制造和装配工艺、发展大型化水锤泵制造技术以及研发轻型化和分体式水锤泵是未来发展的重点; 接着总结出水锤泵系统参数和结构参数是影响水锤泵的主要因素; 最后对国内外水锤泵的实际应用现状进行了对比分析, 提出应在考虑泄水阀和输水阀动态启闭过程的水锤泵运行全过程理论模型的基础上发展适用于不同群体或目标的水锤泵制造技术. 研究成果为扩大水锤泵的应用范围, 提升中国水锤泵的制造技术提供了一定的参考.

**关键词:** 水锤泵; 高效; 节能; 提水; 灌溉

**中图分类号:** TH34; S277.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2021)12-1189-07

**Doi:** 10.3969/j.issn.1674-8530.20.0268

李甲振, 杨开林, 任显明, 等. 高效节能水锤泵技术研究进展[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(12): 1189-1195.

LI Jiazhen, YANG Kailin, REN Xianming, et al. Research progress on high-efficiency and energy-saving performance of hydraulic ram pump[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2021, 39(12): 1189-1195. (in Chinese)

## Research progress on high-efficiency and energy-saving performance of hydraulic ram pump

LI Jiazhen<sup>1\*</sup>, YANG Kailin<sup>1</sup>, REN Xianming<sup>2</sup>, GUO Yongxin<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Daqing Oilfield 10th Oil Production Plant Water Supply Brigade, Daqing, Heilongjiang 166405, China)

**Abstract:** In order to clarify the technical development and application status of hydraulic ram pump, the development history of hydraulic ram pump technology, and brief introductions of the basic structure of hydraulic ram pump were reviewed. On this basis, it expounds the efficiency calculation method of hydraulic ram pump, and combs the development of theoretical design method of hydraulic ram pump. Then, the research and development status of hydraulic ram pump at home and abroad was summarized, and the fundamental reasons for the limited development of hydraulic ram pump in China were put forward. It is pointed out that simplifying the manufacturing and assembly process, developing large-scale hydraulic ram pump manufacturing technology, and developing lightweight and split hydraulic ram pump are the key points of future development. Then it is concluded that the system parameters and structural parameters are the main factors affecting the hydraulic ram pump. Finally, the practical application status of hydraulic ram pump at home and abroad was compared and analyzed. It is pro-

收稿日期: 2020-09-17; 修回日期: 2020-10-15; 网络出版时间: 2021-11-30

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20211129.1539.024.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401808); 国家自然科学基金资助项目(51609265)

第一作者简介: 李甲振(1989—), 男, 山东泰安人, 高级工程师(通信作者, lijiazhen@iwhr.com), 主要从事水力学及河流动力学研究.

第二作者简介: 杨开林(1955—), 男, 四川西充人, 教授级高级工程师(ykcliwhr@sohu.com), 主要从事水力学及河流动力学研究.

posed that the development and application of hydraulic ram pump should be based on the theoretical model of the whole operation process of hydraulic ram pump considering the dynamic opening and closing process of discharge valve and delivery valve, and the manufacturing technology of hydraulic ram pump suitable for different groups or objectives should be developed. The research results provide a certain reference for expanding the application scope of hydraulic ram pump and improving the manufacturing technology of hydraulic ram pump in China.

**Key words:** hydraulic ram pump; high-efficiency; energy-saving; water-lifting; irrigation

水锤泵是一种利用低落差水能资源的水力机械,借助泄水阀和输水阀周期性自动交替启闭产生的水锤作用,可将大量来水的低水头位能集中转换为其中一小部分水的高水头位能,实现向高处泵水或向远处输水的功能。

作为一种可再生/可持续能源的利用设备,水锤泵在 0.5~10.0 m 落差内的工作效率可达 50%~75%,提水性能优于该水头范围内水轮机—发电机—电泵的组合方案;水锤泵的运动部件只有泄水阀和输水阀 2 个止回阀,结构可靠,经久耐用,可长年累月连续运行.据记载,英国坦布里奇韦尔斯的一台水锤泵已经运行了 100 多年<sup>[1]</sup>.除定期更换密封圈外,水锤泵不需要其他的维修养护,运行成本低.由于省去了长距离架设电线、修建变电站泵房、购置运送化石燃料以及人员维护等费用,水锤泵在某些特定情况下的综合效益远大于其他提水方式.以慈利县新城区桑木溪村为例,采用传统电泵抽水的前期投资在 80 万元以上,而利用水锤泵提水的前期投资仅为 30 万元;另一方面,利用水锤泵提水可节约 5.0 万元/年和 1.8 万元/年的电费和人员管理费用<sup>[2]</sup>.因此,水锤泵成为了电泵可靠的替代方案之一<sup>[3-4]</sup>.目前,有数十个国家和地区在生产及销售水锤泵,一些慈善机构、基金会和政府机构也将水锤泵作为一项扶贫技术进行了大范围的推广,通过解决工程性缺水问题,使人们摆脱人力或畜力提水的束缚,从而助力脱贫.

世界上最早的水锤泵是 WHITEHURST 于 1772 年发明的,用于向山顶啤酒厂泵送工业用水,但它的泄水阀通过人工操作实现启闭,因此,它在一定程度上只能称为“手动水锤泵”.1797 年, MONTGOLFIER 和 ARGANT 将泄水阀改进为止回阀,在水流流速达到一定数值时关闭,出现回流时开启,实现了水锤泵的自动运行功能.1816 年, PIERCE 在泵体上设置了进气孔,用以补充空气罐内被高压水溶解的气体,逐渐形成了现代自动水锤泵(简称为水锤泵)的完整结构.自此,水锤泵成了一种实用、高

效、可靠的自动提水工具,给 20 世纪前后欧美地区的农场、山区居民的灌溉、生产和生活提供了极大的便利.之后,由于使用化石燃料的电动机、电泵以及自来水的普及,水锤泵在发达国家和地区的应用逐渐减少.但受限于经济因素、资源分布、交通不便或气候恶劣等因素,全球范围内尚有超过 15 亿人未能通电<sup>[5]</sup>;且大量使用化石燃料造成的环境污染也不断加剧,人们开始寻求节约型生产.因此,水锤泵再次进入了人们的视野.

为此,在对水锤泵技术进行大量研究的基础上,文中系统地梳理该技术在理论分析、产品研发、影响因素、工程应用方面的研究进展,并总结相关的研究难点及前沿问题,以期水锤泵技术的理论研究、优化设计和推广应用提供借鉴和参考.

## 1 理论分析

一个典型的水锤泵系统由上池、动力水管、水锤泵、下池、扬水管和高位水池组成,如图 1a 所示.① 上池为水锤泵提供恒定落差的微水能资源,也起到了过滤和沉淀的作用.② 动力水管将水由上池导入水锤泵,并承受水锤高压,建议采用波速较大(1 000~1 300 m/s)的钢铁材质.③ 下池为水锤泵的安装和操作提供作业面,并将水导回原河道,以免侵蚀局部地基,影响系统稳定性.④ 扬水管用于将水锤泵提升的水输送至目标区域,对材质无特殊要求.⑤ 高位水池用于存储水锤泵输送的水量.上池与下池之间的水位差称为作用水头,记为  $H$ ;高位水池与上池之间的水位差称为扬程,记为  $h$ ;进入下池的水量称为泄水量,记为  $Q$ ;进入高位水池的水量称为扬水量,记为  $q$ .

水锤泵系统效率的计算方式有 2 种,分别为 RANKINE 效率和 D'AUBUSSION 效率. RANKINE 效率  $\eta$  以上池水面为基准,是指进入高位水池的水所增加的能量与进入下池的水所减小的能量之间的比值,计算公式为

$$\eta = \frac{qh}{QH} \quad (1)$$

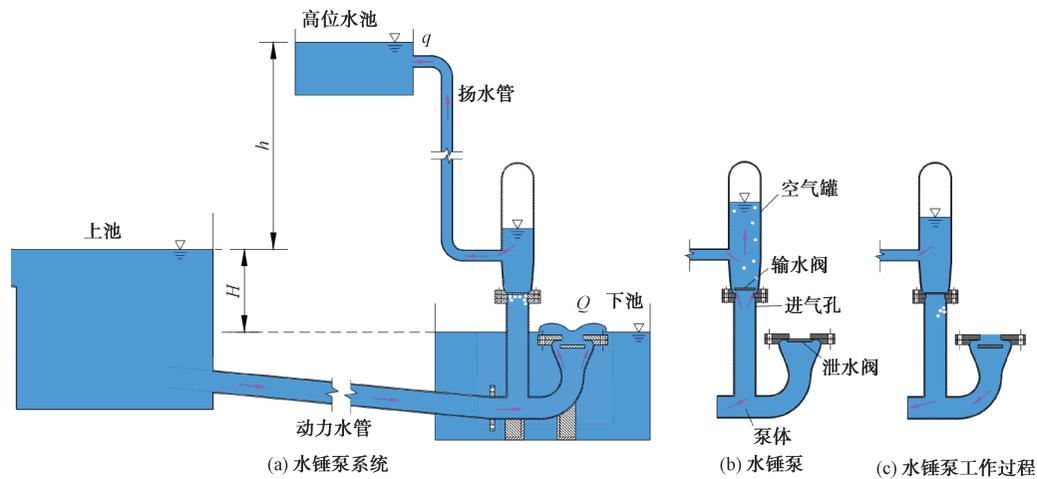


图1 水锤泵系统示意图  
Fig.1 Hydraulic ram pump system

D'AUBUSSON 效率  $\eta_D$  以下池水面为基准,是指水锤泵的输出水能与输入水能之间的比值,计算公式为

$$\eta_D = \frac{q(h+H)}{(q+Q)H} \quad (2)$$

对比式(1),(2)发现,D'AUBUSSON 效率的分子和分母多了  $qH$  这一项.由于效率值小于1,因此,D'AUBUSSON效率略大于 RANKINE 效率.

一个典型的水锤泵由泄水阀、输水阀、泵体、进气孔和空气罐组成,如图1b所示.水锤泵的一个工作过程概述如下:①初始时刻,泄水阀在重力或其他外力作用下开启,输水阀在上侧水压力作用下关闭.上池低落差的水能资源经由动力水管进入水锤泵、下池,并对泄水阀产生了驱使其关闭的作用力,如图1a所示.当水流作用力大于重力或其他外力时,水推动泄水阀迅速关闭.②由于泄水阀突然关闭,系统发生水锤作用,泵体内压力急剧增加.高压推动输水阀打开,水由泵体进入空气罐,如图1b所示.进入空气罐内的水,一部分直接经由扬水管到达高位水池,而大部分则通过压缩空气暂时存储在空气罐内.③由于空气罐压力增加,泵体压力减小,输水阀在上下压差作用下再次关闭,泄水阀在重力或其他外力作用下重新开启,水锤泵进入下一个工作过程,如图1c所示.空气会在系统出现回流时进入水锤泵,并在下一工作过程输水阀打开时逸入空气罐;暂时储存在空气罐内的水,则借助压缩气体的缓慢膨胀,平稳地输送至高位水池.

针对水锤泵的理论研究,一种方法是根据泄水阀和输水阀的状态,将它的1个工作周期划分为若干个工作阶段,基于不可压缩流动方程积分求解每

个阶段的水量和时间,求和获得水锤泵的工作周期、扬水量、泄水量、效率等参数.O'BRIEN 和 GOSLINE 将水锤泵的1个工作周期划分为4个阶段,首次给出了自动水锤泵工作运行的合理解释,但仅在泵水过程采用弹性水锤理论,其他阶段采用刚性水锤理论<sup>[6]</sup>.LANSFORD 等<sup>[7]</sup>随后将1个工作周期细化为6个阶段,在O'BRIEN 和 GOSLINE 的基础上补充考虑了动力水管和泄水阀的弹性作用,研究了水量和效率随扬程和作用水头的变化趋势.他们假定泄水阀是以恒定加速度关闭的,输水阀瞬间启闭.KROL<sup>[8]</sup>分析了泄水阀在水流和重力作用下启闭的动力学和运动学特性,假定输水阀是在固定时间内开启和关闭的.TACKE<sup>[9]</sup>认为2个阀门的启闭过程是瞬间完成的,将水锤泵的1个工作周期简化为加速、减速和回水3个阶段,推导了泵水量和总水量的数学表达式.INTHACHOT 等<sup>[3]</sup>以及 RENNIE 等<sup>[10]</sup>也采用类似方法进行了研究.

WYLIE 和 STREETER 给出了特征线解法,可对水锤偏微分方程组进行直接求解.VERSPUY 等<sup>[11]</sup>将水锤泵简化为动力水管下游的水位边界,水流流速未达到临界值为0,达到临界流速后为实际扬程.该模型未考虑泄水阀、输水阀的运动特性,也未包含空气罐.NAJM 等<sup>[12]</sup>构建的模型首次考虑了水锤泵系统所有部件,假定泄水阀和输水阀的开度变化与时间满足幂函数关系,幂指数为0.5,但并未对该假设的准确性以及幂指数取值的合理性进行分析.FILIPAN 等<sup>[6]</sup>的模型给出了泄水阀的水动力学方程和运动学方程,将输水阀作为一个瞬间启闭的止回阀.

水锤泵是借助泄水阀和输水阀周期性自动交

替启闭产生的水锤作用实现泵水的.已有理论研究对泄水阀和输水阀启闭过程的处理方式有 2 种:①忽略阀门的启闭动态过程,认为它们在满足压差条件的情况下瞬间开启或关闭.②假定阀门以某一规律开启或关闭,如假定阀门的开度变化与时间满足线性关系或幂函数关系.但上述处理方式存在以下不足,亟待深入研究:①假定的启闭规律未经过理论分析或模型试验数据的校验,其合理性还有待进一步研究.②忽略或假定阀门的动作过程,会使得人们无法掌握真实的压力和水量特性,也就很难从理论上辨识影响水锤泵性能的关键因素并进行改进优化.

## 2 产品研发

ANDERSON<sup>[1]</sup>对 EASON 和 AMOS 制造的原始水锤泵进行了多年的研究,研发了 ANDERSON 水锤泵,也就是现在英国 VULCAN 水锤泵的前身.1985 年至 1997 年的 12 a 间,Warwick 大学对水锤泵进行了大量研究,设计制造了 S1, S2 和 P90 等型号的水锤泵<sup>[6]</sup>.考虑空气罐内的气体会被高压水溶解吸收,气体体积逐渐减少,因此,常规水锤泵一般设置进气孔来补充被溶解的空气;PLATPUS 水锤泵利用橡胶气囊将空气限制在封闭空间内,空气不会被溶解,也就不需要设置进气孔了<sup>[13]</sup>.除了较成熟的商业水锤泵外,一些专家、学者、科技爱好者也制造了一些水锤泵.MOATES<sup>[14]</sup>设计的水锤泵利用 25 ft (7.62 m) 的水源,可向 90 ft (27.43 m) 的高度每日扬送 2 160 gal (8.18 m<sup>3</sup>) 的水量.中国 20 世纪 60 年代开始发展水锤泵,浙江省新昌南明机械厂最早试制生产了中国第 1 台自动水锤泵.但该水锤泵的泄水阀与输水阀容易损坏,难以满足日开关动作 4~8 万次长期稳定运行的要求,且会产生很大的噪声,因此,未能大范围地推广应用<sup>[15]</sup>.目前,江、浙、川、闽等地区使用的水锤泵多以德国进口产品为主.

近年来,高性能水锤泵产品的研发越来越多地使用计算流体动力学技术和有限元结构分析技术.针对传统设计过程中难以对流动道进行分析、研发经费高、周期长的问题,李甲振等<sup>[16]</sup>建立了水锤泵内部流道的计算流体动力学模型,给出了水锤泵的流动评价指标体系.所研制的新型水锤泵效率最高可达 70%,可将水扬送至 42 倍作用水头的高度<sup>[4]</sup>.HARITH 等<sup>[17]</sup>利用 Fluent 分析了不同泄水阀开度的过流特性,优化后的配置能使泄水量减小 20%~

30%.王涛等<sup>[18]</sup>建立了水锤泵结构强度的有限元分析模型,分析了静态强度和模态参数,指出了研究的水锤泵在空气罐部位、尾水筒处以及底座后端连接处需要强化.

水锤泵作为电泵的可靠替代方案之一,在一些偏远的、落后的或通水通电不方便的地区,其经济价值和社会价值则更加凸显.高性能水锤泵的研发以及相应制造技术的普及,将会是未来研究的重点,在以下 3 个方面需要特别关注:①简易的水锤泵制造或装配技术.利用市场上可购置的管件、阀门、橡胶等原材料,在小型车间经过简单的切割、焊接或螺纹连接等操作,能够实现泵水功能即可.这对经济、技术比较落后的地区是十分重要的,因为市场上的成品水锤泵对这些地区而言通常是比较昂贵的.②大型化的水锤泵制造技术.亟须水锤泵技术的地区一般人口密度高、需水量大,安装一台大口径水锤泵的经济效益远大于安装多台小口径水锤泵;另一方面,水锤泵用于水力发电、海水反渗透淡化或水力空气压缩等领域,也需要极大的水流量.因此,大型化水锤泵的制造技术也将是研究的重要内容之一,其难点在于周期性启闭的泄水阀和输水阀的结构强度设计.目前,世界范围内最大口径水锤泵为 500 mm,是位于北京市凉水河的新环保水锤泵<sup>[19]</sup>.③轻型化或分体式水锤泵的研发.水锤泵的质量一般较大,如 Rife 水锤泵的质量为 256 kg (100 mm), 907 kg (200 mm), VULCAN 水锤泵的质量为 240 kg (100 mm), 1 678 kg (200 mm).水锤泵一般安装在偏远地区,大型运输车辆或施工机械有时难以到达现场,过大的质量或整体式设备会给运输和安装带来极大的不便,因此,轻型化或分体式也是后续研究需要解决的问题.

## 3 影响因素

水锤泵性能的影响因素主要有 2 方面:①水锤泵系统的参数,包括作用水头、扬程、动力水管和输水管参数(长度、直径、管材、壁厚)等.②水锤泵的结构参数,包括泄水阀和输水阀的型式和参数(孔口、开度、阀瓣直径和质量等)、通气孔的型式和尺寸、空气罐体积等.对此,国内外专家进行了大量的研究,总结了一些经验公式或规律.

SETHI 等<sup>[20]</sup>现场实测了所研制水锤泵在不同作用水头和扬程的水力性能,并拟合了扬水量的计算公式.钟建立等<sup>[21]</sup>分析了 BIL 水锤泵在作用水头

为1.00,1.14和1.28 m,动力水管为4,6和8 m工况下,扬程为6,8和10 m的扬水量,在此基础上给出了动力水管的优化长度.YOUNG<sup>[22]</sup>总结了水锤泵系统设计公式,公式所使用的经验系数取决于水锤泵口径、扬程、动力水管材料及壁厚、泄水阀配置等因素.针对水锤泵的结构参数,SUARDA等<sup>[23]</sup>研究了泄水阀孔口和阀瓣直径对性能的影响.孔口和阀瓣直径越大,水流旋涡越多,流速越小;随着阀瓣直径的增加,泄水阀的动作时间减少,水锤泵的工作频率增加.朱成祥<sup>[24]</sup>通过模型试验给出了典型水锤泵泄水阀的优化配置.SURYAWAN等<sup>[25]</sup>研究发现,配置空气罐能够使试验水锤泵的工作效率由17.03%提升至52.99%;随着空气罐内气体体积的增加,水锤泵工作效率提升,泵体和空气罐压力峰值减小<sup>[26]</sup>;但当空气罐体积大于某一数值时,系统效率受空气罐体积影响较小<sup>[3]</sup>.李甲振等<sup>[27]</sup>提出了空气罐内气体热力学过程多方指数的系统辨识方法.SUCIPTA等<sup>[28]</sup>研究了无进气孔、1 mm小孔和配置止回阀的1 mm小孔3种结构的性能差异,结果表明,在1 mm小孔上配置止回阀能够提升水锤泵的效率 and 扬水量.

通过大量调研发现,有关性能影响因素的研究,一般是针对某一种或某几种特定水锤泵进行试验,并在此基础上总结经验公式.但由于系统布置、水锤泵的结构型式和参数配置不同,得到的经验公式差别也较大.以动力水管长度的确定方法为例,欧美地区以作用水头作为计算基准,EYTELWEIN认为是作用水头和扬程的函数,俄罗斯则通过管径、作用水头和频率确定动力水管长度,KROL和KAH-ANGIRE给出的计算公式与泄水阀参数有关.因此,在对某几种水锤泵开展模型试验、小数据量拟合得到的经验公式,并不具有普遍适用性,只对特定水锤泵或工况有效.而水锤泵性能随设备参数变化的趋势性规律,如SUCIPTA和SUARDA建议进气孔配置止回阀、扬水量随泄水阀开度的变化等,对于设计人员或使用者具有一定的实用价值.后续研究可结合完善的数学模型和计算流体动力学分析开展,辅以必要的模型试验验证,得到趋势性规律,以指导水锤泵的产品设计或现场调试.

## 4 工程应用

MONTGOLFIER发明水锤泵的目的是为造纸厂输送水资源,之后,水锤泵被广泛用于输送工业生

产用水、林田灌溉用水或日常生活用水.美国伊利诺伊州修建了可满足1 200人日常用水的水锤泵站,日提水量227 m<sup>3</sup>/d.西雅图的枫叶泵站安装了2台DN300水锤泵,可满足当地居民日常生活和森林防护的用水需求.坦桑尼亚的恩仲贝和姆贝亚地区分别修建了17座和12座水锤泵站,2 800多人从该工程直接受益,妇女和孩子不再需要长距离挑水.IN-THACHOT<sup>[3]</sup>在泰国清迈府萨蒙县安装了利用当地零配件制造的水锤泵,为山区咖啡树泵送灌溉用水.

中国在20世纪80年代开始大量推广和使用水锤泵.1987年,浙江省科委与德国不来梅海外研究与发展协会展开合作,对水锤泵进行示范推广;截至2002年底,浙江省山村已推广应用700多台水锤泵,数十万山区农村人口直接受益,发展了小型山区自来水工程.之后,浙江省继续推广应用水锤泵,仅丽水市松阳县就推广了186台,解决了666.67 hm<sup>2</sup>山地、农田、茶园、果园的灌溉用水问题,以及3个村的饮用水问题.此外,四川省、福建省、湖北省等地区也对水锤泵进行了大量的推广应用.

除提水外,经探索后人们还发现了水锤泵在空气压缩、城镇景观制造、机械做功、微水能发电、海水淡化等领域也具有一定的应用前景.PEARSALL通过增大空气罐体积,将水锤泵转换为高效空气压缩机,为德文郡的凿岩机输送湿冷空气<sup>[1]</sup>.杨开林<sup>[19]</sup>自主原创了世界上最大的500 mm环保低噪声水锤泵,将挡水堰上下游1.2 m落差的水泵送至桥面位置,制造了自动喷泉景观<sup>[29]</sup>.ROBERTS等<sup>[30]</sup>将扬水管和高位水池替换为活塞连杆机构,进行机械做功.NGANGA等<sup>[31]</sup>设计了将水锤泵和传统水电技术结合起来的联合系统,该系统在水流冲击水轮机前,利用水锤泵提升水的势能,优化出力.联合系统的电压比不使用水锤泵的电压大5倍,出力提升近15倍.张峰等<sup>[32]</sup>也提出了类似的技术,利用水锤泵将海水提升至高水库,把潮汐的低水头势能转化成高水头势能,进而实现抽水蓄能.在低压反渗透海水淡化方面,MARATOS<sup>[33]</sup>研究后认为,水锤泵可提供足够的压力,且在经济上和技术上是可行的.作者在索尔福德大学设计了相应的试验装置,但未见后续研究.

水锤泵尚缺乏具有普适性的、系统性的技术手册,用来详细介绍水锤泵选址、安装、调试、运行、维修等内容.已有研究表明水锤泵在空气压缩、城镇景观制造等领域具有一定的应用前景,但相关技术尚未成熟.

## 5 结 论

在适宜的工程条件下,水锤泵能够解决长距离架设电线带来的高成本或高难度问题、使用化石燃料电动机带来的环境污染或材料运输问题、水力发电机微水头运行带来的提水低效率问题,应用前景广阔.以下关键问题仍需深入研究.

1) 建立考虑泄水阀和输水阀动态启闭过程的水锤泵运行全过程理论模型,为产品设计和优化提供理论支撑.

2) 针对经济技术落后地区、需水量大或水力发电等情形以及偏远山区的安装和使用,发展简易的、大型化的和分体式的水锤泵制造技术.

3) 系统总结水锤泵性能随工程条件和设备参数变化的规律,为产品设计和现场调试提供参考.

4) 研究水锤泵在空气压缩、水力发电、海水淡化、机械做功等领域的应用,以期服务于偏远无电地区的电能供应、海岛驻防的淡水和能源供应、波浪能或潮汐能开发等.

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] ANDERSON E W. Hydraulic rams [J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, 1922,102:337-355.
- [ 2 ] 肖晓. 高扬程水锤泵及其相关专利技术在农村提水实践中的推广应用研究 [J]. 中国农村水利水电, 2019(7):193-195.  
XIAO Xiao. Research on popularization and application of high-lift hydraulic ram pump and its related patented technology in rural water extraction practice [J]. China rural water and hydropower, 2019(7):193-195. (in Chinese)
- [ 3 ] INTACHOT M, SAEHAENG S, MAX J F J, et al. Hydraulic ram pumps for irrigation in northern Thailand [J]. Agriculture and agricultural science procedia, 2015,5:107-114.
- [ 4 ] 李甲振, 杨开林, 郭新蕾, 等. 可控高扬程水锤泵模型试验 [J]. 水利学报, 2015,46(1):102-108.  
LI Jiazhen, YANG Kailin, GUO Xinlei, et al. Adjustable and high-head model experiment on the hydraulic ram pump [J]. Journal of hydraulic engineering, 2015, 46(1):102-108. (in Chinese)
- [ 5 ] WILLIAMSON S J, STARK B H, BOOKER J D. Performance of a low-head pico-hydro Turgo turbine [J]. Applied energy, 2013,102:1114-1126.
- [ 6 ] FILIPAN V, VIRAG Z, BERGANT A. Mathematical modelling of a hydraulic ram pump system [J]. Journal of mechanical engineering, 2003,49(3):137-149.
- [ 7 ] LANSFORD W M, DUGAN W G. An analytical and experimental study of the hydraulic ram [R]. Illinois: University of Illinois, 1941.
- [ 8 ] KROL J. The automatic hydraulic ram [J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, 1951, 165(1):53-73.
- [ 9 ] TACKE J H P M. Hydraulic rams—comparative investigation [R]. Delft: Delft University of Technology, 1988.
- [ 10 ] RENNIE L C, BUNT E A. The automatic hydraulic ram—experimental results [J]. Journal of power and energy, 1990,204(1):23-31.
- [ 11 ] VERSPUY C, TIJSSELING A S. Hydraulic ram analysis [J]. Journal of hydraulic research, 1993,31(2):267-278.
- [ 12 ] NAJM H N, AZOURY P H, PIASECKI M. Hydraulic ram analysis: a new look at an old problem [J]. Journal of power and energy, 1999,213(2):127-141.
- [ 13 ] MATHEWSON L. The rebirth of the hydraulic ram pump [J]. Waterlines, 1993,12(2):10-14.
- [ 14 ] MOATES T. Hydraulic ram pump [J]. Countryside and small stock journal, 2004,88(4):32-35.
- [ 15 ] 刘英学. 水波泵的流体力学理论和实验研究 [D]. 上海: 上海大学, 2007.
- [ 16 ] 李甲振, 郭新蕾, 杨开林, 等. 水锤泵内部流道优化及性能研究 [J]. 水利学报, 2017,48(9):1098-1106.  
LI Jiazhen, GUO Xinlei, YANG Kailin, et al. Flow passage optimization and performance study of the hydraulic ram pump [J]. Journal of hydraulic engineering, 2017, 48(9):1098-1106. (in Chinese)
- [ 17 ] HARITH M N, BAKAR R A, RAMASAMY D, et al. A significant effect on flow analysis & simulation study of improve design hydraulic pump [C]//Proceedings of 4th International Conference on Mechanical Engineering Research, 2017,257:012076.
- [ 18 ] 王涛, 于振江. 基于 ANSYS 水锤泵结构有限元分析 [J]. 灌溉排水学报, 2016,35(6):103-108.  
WANG Tao, YU Zhenjiang. Structural finite element analysis of hydraulic ram pump based on ANSYS [J]. Journal of irrigation and drainage, 2016,35(6):103-108. (in Chinese)
- [ 19 ] 杨开林. 利用新环保水锤泵开发低水头能源改善城市河湖生态环境 [C]//湖泊湿地与绿色发展—第五届中国湖泊论坛论文集. 长春: 吉林人民出版社, 2015:451-453.
- [ 20 ] SETHI L N, PANME F A, TERONPI A, et al. Per-

- formance evaluation of hydraulic ram pump with rain-cum-roof water harvesting structure in a hilly terrains of north east of India [J]. *Journal of agroecology and natural resource management*, 2015,2(4):317-320.
- [21] 钟建立, 蒋成球. 水锤泵安装系统优化调整的试验研究[J]. *农业工程学报*, 1998,14(1):91-94.  
ZHONG Jianli, JIANG Chengqiu. Optimum adjustment of installation system of hydraulic ram [J]. *Transactions of the CSAE*, 1998, 14(1): 91-94. (in Chinese)
- [22] YOUNG B W. Design of hydraulic ram pump systems [J]. *Journal of power and energy*, 1995, 209(41): 313-322.
- [23] SUARDA M, SUCIPTA M, DWIJANA I G K. Investigation on flow pattern in a hydraulic ram pump at various design and setting of its waste valve [C]//*Proceedings of International Conference on Design, Energy, Materials and Manufacture, Salamanca, Spain, 2019*:012008.
- [24] 朱成祥. 水锤泵冲击阀开关频率对提水量的影响 [J]. *能源工程*, 1993(3):24.  
ZHU Chengxiang. Effects of waste valve working frequency on the delivery flow of hydraulic ram pump [J]. *Energy engineering*, 1993(3):24. (in Chinese)
- [25] SURYAWAN A A A, SUARDA M. Experimental study of acceleration effect to hydram pump performance [J]. *Scientific journal of mechanical engineering*, 2009, 3(2):194-201.
- [26] SAITO S, TAKAHASHI M, NAGATA Y. Effects of the air volume in the air chamber on the performance of water hammer pump system [J]. *International journal of fluid machinery and systems*, 2011,4(2):255-261.
- [27] 李甲振, 杨开林, 郭永鑫, 等. 水锤泵空气罐气体热力学过程的系统辨识 [J]. *南水北调与水利科技*, 2015,13(2):298-301.
- LI Jiazhen, YANG Kailin, GUO Yongxin, et al. System identification of thermodynamic process for the air chamber of hydraulic ram pump [J]. *South-to-north water transfers and water science & technology*, 2015,13(2): 298-301. (in Chinese)
- [28] SUCIPTA M, SUARDA M. Investigation and analysis on the performance of hydraulic ram pump at various design its snifter valve [C]//*Proceedings of International Conference on Design, Energy, Materials and Manufacture, 2019*:012007.
- [29] GUO X, LI J, YANG K, et al. Optimal design and performance analysis of hydraulic ram pump system [J]. *Journal of power and energy*, 2018,232(7):841-855.
- [30] ROBERTS A, THOMAS B, SEWELL P, et al. Generating renewable power from water hammer pressure surges [J]. *Renewable energy*, 2019,134:1392-1399.
- [31] NGANGA O B, NYAKOE G N, KABECHA W, et al. An experimental prototype for low head small hydro power generation using hydram [C]//*Proceedings of the 7th JKUAT Scientific, Technological and Industrialization Conference, Central, Kenya, 2012*:174-183.
- [32] 张峰, 戴春妮, 吴勤兵. 水锤泵用于潮汐抽水蓄能的模型试验分析 [J]. *海洋学研究*, 2015,33(1):69-73.  
ZHANG Feng, DAI Chundi, WU Qinqing. Experimental study on tidal energy storage with hydro-ram pump [J]. *Journal of marine sciences*, 2015,33(1):69-73. (in Chinese)
- [33] MARATOS D F. Technical feasibility of wavepower for seawater desalination using the hydro-ram (Hydram) [J]. *Desalination*, 2003,153(1):287-293.

(责任编辑 盛杰)