

微水头资源开发与发电装置研究现状及趋势

张玉全¹, 郑源^{1,2}, 孙科³, 杨春霞¹, 罗红英²

(1. 河海大学能源与电气学院, 南京 210098; 2. 西藏农牧学院, 西藏林芝 860000;
3. 哈尔滨工程大学船舶工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 我国水能资源丰富, 开发水力发电技术是增加可再生能源供应、优化能源结构、缓解环境问题的优先选择。本文着眼于我国丰富的微水头资源, 梳理河流、运河、水库、电厂尾水、管道供水、城市废水、海洋新能源等微水头资源需求和应用特点, 总结适合开阔流域和封闭流域特点的两型微水头水力发电水轮机, 对形成动势能结合型微水头水轮机设计方法和研究其流动特征和机理提供基础。介绍了微水头资源评估和水力发电水轮机研究的趋势, 并对今后研究方向提出了建议。

关键词: 微水头资源; 水力发电水轮机; 开阔流域; 封闭流域

中图分类号: TV7 **文献标识码:** A

Research Status and Trends of Ultra-Low-Head Water Resources and Hydro-Turbines

Zhang Yuquan¹, Zheng Yuan^{1,2}, Sun Ke³, Yang Chunxia¹, Luo Hongying²

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Tibet Agriculture & Animal Husbandry University, Linzhi 860000, Tibet, China; 3. College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: China is rich in hydropower resources, and hydropower technology development is the first choice to increase the supply of renewable energy, optimize the energy structure, and alleviate environmental problems. This paper focuses on rich microhead resources in China and presents the demand and application characteristics of microhead resources such as rivers, canals, reservoirs, power plant tailings, piped water supply, municipal wastewater, and marine energy. The paper summarizes two types of microhead hydro-turbines suitable for open and closed watersheds, which provide a basis for the design method of microhead hydro-turbines and the study of their flow characteristics and mechanism. This paper introduces the research trend of microhead resource evaluation and hydropower turbines. In addition, some suggestions for future research are put forward.

Keywords: ultra-low-head water resources; hydro-turbines; open watershed; closed watershed

一、前言

随着全球能源紧缺、气候变化加剧和人们对生

态环境重视程度的提高, 加快发展可再生能源、保障生态环境安全、支撑社会经济可持续发展, 已成为世界各国关注的重点。目前我国能源普及率

收稿日期: 2018-04-22; 修回日期: 2018-05-08

通讯作者: 张玉全, 河海大学能源与电气学院, 讲师, 主要研究方向为流体机械及海洋能利用; E-mail: zhangyq@hhu.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“我国能源技术革命的技术方向和体系战略研究”(2015-ZD-09); 中央高校基本科研业务费专项资金“基于致动线方法的潮流能水轮机阵列水动力特性研究”(2017B06914)

本刊网址: www.enginsci.cn

低、人均能源消耗量少, 能源不足已成为制约我国经济发展的障碍之一。根据我国《可再生能源发展“十三五”规划》, 我国可再生能源占一次性能源供应的比重, 2020 年要提高到 15%, 2030 年要提高到 20% [1]。水能是我国仅次于煤炭的第二大能源, 也是可再生能源中能够形成最大供给规模的清洁能源。我国小水电资源十分丰富, 遍布全国 1500 个县, 其中约有 600 个县主要以小水电供电, 解决了 2000 多万人口的用电。我国的小水电 (装机容量 ≤ 50 MW 的水电站) 技术可开发量为 1.28×10^8 kW, 截至 2015 年年底, 已经开发 7.5×10^7 kW, 开发率为 58.6% [2]。因此, 开发小水电技术符合可再生能源国家发展战略, 是我国优化能源结构、保障能源安全、缓解环境问题的优先选择。

微水头即水头在 0~3 m 的水力资源, 具有水力发电的潜力, 但因为经济开发价值太低, 故一直未引起足够的重视 [3]。实际上, 我国微水头资源分布广泛, 具有不同于常规水电的独特开发优势: ①资源丰富, 种类繁多, 具有巨大的开发潜力; ②资源便利, 结构简单, 二次能源回收, 节省投资; ③运河、管道、尾水等微水头资源稳定, 具有可预测性; ④无需蓄水调节, 对环境影响小。

水轮机是决定电站运行效率和效能产出的最关键设备, 目前微水头水电开发采取的水轮机设计主要有两种方式: ①沿用常规低水头机型的设计方法。常规水电站的设计以水的势能为核心参数, 成本主要取决于水头, 水头越低, 经济性越差。常规水力发电水轮机类型只有轴流式和贯流式两种水轮机适应水头范围可低至 2~3 m。但从实际运行来看, 目前低水头电站所采用的全贯流水轮发电机组和整装式灯泡贯流机组并不完全适用于在微水头段运行。②采用零水头发电机组的设计方法。这类水轮机通常应用于天然河流、潮流、海流、人造水道以及其他具有足够水流速度的流道, 与常规水轮机的本质区别是将水的动能转化为机械能再通过发电机进一步转化为电能。这类水轮机结构简单, 通常安装在开阔水域, 弃水量大, 理论极限效率只能达到 59.3%, 与同等装机容量的内流水轮机相比, 尺寸较大, 安装成本高, 维护困难 [4]。

可见, 适应 0~3 m 微水头发电的水轮机尚没有成熟的机型可以应用, 其成为制约微水头水电开发

的技术瓶颈。因此有必要梳理微水头资源需求和应用特点, 提出研发适合开阔流域和封闭流域特点的两型微水头水力发电水轮机, 总结形成动势能结合型微水头水轮机设计方法。

二、微水头资源开发研究现状

世界上许多未开发的河流和溪流蕴含了丰富的微水头资源, 借助简单的、现场结构安装合适的水力机组利用其来发电。美国电力研究院 (EPRI) 的一项研究表明, 在美国从河流中水动力技术上可恢复的能量为 119.9 TW·h [5]。通过流速型水轮机 [6] 可以仅仅使用水流 (即无水压头) 来产生电能。水流的速度和深度决定了可利用的水动力能量, 并决定了可以使用的水轮机的尺寸。

对于微水头发电, 当运河和其他人工河道的水流速度大于 1.5 m/s 时能量转换理想, 它们具有可控、可测和相对清洁的特点。美国的风能和水能技术办公室支持在已有的运河系统发展水动力能源 [7], 例如华盛顿州的 Roza 运河。中国台湾 [8] 和老挝 [9] 在农用水渠中建造了利用灌溉水的微型水电系统。总体来说, 当运河和人工河道中有足够的水流速度时, 利用水流动能发电是可行的。此外, 水流的速度越快, 发电的潜力就越大。在一些泵站中, 在特殊情况下泵可作为水轮机来发电, 例如在中国的江都灌溉总渠, 当淮河入流非常大时, 泵机组可作为水轮机发出 3 MW 的电量。

在工业冷却水循环系统管道, 自来水厂和水电站供水管道中有大量的富余水头。文献 [10] 阐述了在冷却塔管道中富余压力从 39~147 kPa 的例子, 在冷却系统中安装一个改进的混流式水轮机, 从而回收冷却系统浪费的能量。文献 [11] 研究了 300 kW 的小型水轮机组, 可以用来替代水电站供水系统中的减压阀。许多水处理厂的引水管中的过压也可以用来发电, 在供水网络中使用微型水力系统来发电可以控制系统的压力。当利用城市供水网络中的潜在能量时, 必须注意避免对水质的影响, 此外还可以设置旁通管路防止事故的发生。

虽然污水厂水力发电的实施仍然处于发展阶段, 但是随着新的低水头水轮机系统技术的出现, 在这些设施中存在的水能已得到越来越多的关注。自 2002 年以来, 位于美国波士顿、马萨诸塞州附

近的鹿岛污水处理设施，一直在从工厂流出的水中回收能源 [12]。两台 1 MW 的水力发电机组安装在该厂，每年发出超过 6×10^6 kW·h 的电能，每年可节约 60 万美元。在马萨诸塞州米尔伯里的一个污水处理厂，有 1.7 m 的有效水头，平均流量为 $1.4 \text{ m}^3/\text{s}$ ，可以产生大约 20 kW 的电能。一般来说，在污水处理厂附近安装水力装置有两种方案：第一种方案：水力装置安装在污水处理厂的上游。在这种情况下，水轮机部件应该更耐腐蚀，并且导流管入口必须配备一个薄的拦污栅；第二种方案，水力发电机组安装在下游，此处进入水力机组的水流更干净，对各部件的耐腐蚀要求降低，但是产生的另外一个重要问题是空间受到限制。

水电站坝脚处蕴藏的水流以及补偿流，或者从尾水管流出的水流依然具有相当大的水动力能量 [13]。利用这些水流来发电将导致更低的流速，从而减少对沿线下游水工建筑物的侵蚀。在美国华盛顿州东南部的瓦纳普大坝，可以将尾流中一定量的流场可视化，为水力机组选址提供了有用的参考点 [14]。文献 [15] 证实了印度 Poringalkuthu 水电站小水电项目的可行性。除了从尾流中获取能量，热电厂的冷却水也被输送到水电厂，通过卡普兰水轮发电机来发电。

潮汐能包含了势能和动能，可以分别通过潮汐水库和潮流机组来发电。地球潮汐资源理论蕴藏量估计为 8.8×10^{11} kW·h/a，技术上可开采的潮汐能的潜力预计为 8×10^{10} kW·h/a [16]。美国国家可再生能源实验室估计美国所有潜在的海洋可再生能源的总和超过目前全国电力能源需求，到 2025 年，总共有 13 GW 的新水动力技术可以利用，至少供应美国 10% 的电力需求 [17]。存在潜在海流能的国家或地区，包括爱尔兰、亚马逊河、英吉利海峡、直布罗陀海峡、斐济岛、墨西哥海峡、伊朗南部海岸和韩国等 [18]。在中国，丰富的潮汐能资源有巨大的开发潜力，中国的潮汐能源超过 80% 分布在福建和浙江，长江口的南部海域具有丰富的潮流能 [19]。然而，目前潮汐能的开发仍然面临着复杂的海洋水动力环境、设备寿命短、维修困难、施工难度大、投资大等挑战。

综上所述，已有的研究和应用表明，微水头水力资源分布十分广泛，且具有巨大的开发潜力。但是目前我国微水头水力资源分布研究不足，对河流、

运河、水库、工业生活废水、海洋新能源等微水头资源需求和应用特点的梳理及研究意义重大。

三、微水头发电装置研究现状

选择合适的水轮机型式对微水头水力资源的开发十分重要。传统的水轮机可以分为冲击式水轮机和反击式水轮机，可以细分为以下几类：冲击式水轮机、斜流式水轮机、双击式水轮机、混流式水轮机、轴流式水轮机和贯流式水轮机。此外，还有二十多种将水能转换成电能的新型水轮机型式，这些新型的水轮机可分为升力型和阻力型，其分类是基于作用在叶片上的力的原理，或是流动方向与水轮机旋转轴之间的关系为水平或垂直而划分的。

（一）传统类型微水头水力发电水轮机

水轮机选型通常采用的一种方法就是参考水轮机选型图表，并利用它进行技术和经济比较。水轮机选型表可以为特定地址的水轮机型式确定提供参考信息，并且帮助制造厂家来核实水轮机是否适合该特定地址的情况。有报道表明，一些结构简化的混流式水轮机可应用在水头低于 3 m 的情形，同时，重新设计的双击式水轮机也可应用于没有压头的情形。文献 [20] 使用相关的研究成果创建了适合微水头的水轮机选型图表，该表考虑了技术和经济的可行性，甚至在水头低至 0.5 m 或流速低至 0.5 m/s 的极端情况下，依然有水轮机型式可选。

一般来说，在微水头应用中很少使用明槽式的混流式水轮机。在流量低于 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，混流式水轮机尺寸小，叶片数量多，因此加工困难，造价高。在相同的微水头情况下，和轴流转桨式水轮机相比，混流式水轮机的过流能力较差，出力较低。在较宽的水头范围内或流量波动范围内，混流式水轮机稳定性好，效率高，优于轴流定桨式水轮机。轴流转桨式水轮机由于其双调节能力（即转轮叶片和转轮都可调），在较宽的范围内也展现较好的性能，但是叶片调节机构复杂并且在转轮轮毂内需要适当的安装空间。由于这种复杂性，轴流转桨式机组价格昂贵，因此在大流量、低水头情况下更适合，经济性能更好。轴流定桨式水轮机更适合在微水头中应用，但对轴流（定桨）式水轮机最优的出力运行范围受到限制。

对微水头的情况,贯流式水轮机是较好的选择,因为水流笔直通过水轮机,过流量大,水力损失小。对于总流量较小的站址,可以使用单调节或无调节的贯流式水轮机来代替双调节的类型以减少复杂性和降低系统成本。此外,可以适当地简化导叶和转轮叶片的几何形状和数目来降低轴流转桨式水轮机和贯流式水轮机的制造成本。文献 [21] 对江夏潮汐电站双向灯泡贯流式水轮机(水头范围 1.2~5.5 m)进行了优化设计,将正反向发电效率提高了 6%。文献 [22] 研制了适用于 2 m 左右的超低水头竖井贯流式水轮机。近年来,一种非常低水头的水轮机已被证明适合在微水头情况下运转,它是一种新型的轴流式水轮机。

传统的双击式水轮机由射流推动,通常应用的水头范围较宽(5~200 m)。双击式水轮机的最佳效率略低于轴流式或混流式水轮机。然而,双击式水轮机在变负荷工况下效率曲线平坦,且它的结构要求简单,具有自净能力 [23]。此外,双击式水轮机可以改进为半浸没或全浸没式的,从而转换电能的效率更高。因此,双击式水轮机可能是一种理想的用于微水头的水能转换器。

(二) 新型微水头水力发电水轮机

德国研制了阿基米德螺旋式水轮机,螺旋式水轮机的一个重要优点就是对碎片的耐受性,阿基米德螺旋式水轮机具有对鱼类友好的潜力,对环境影响小,转速低,以及相对简单的结构需求 [24]。文献 [25] 通过多目标分析工具,认为阿基米德螺旋式水轮机是一种最适合低水头能源的水轮机。然而,阿基米德螺旋式水轮机体积大,导致运输和安装困难。

此外,文献 [26] 研制出了适用于 0.5~3 m 水头范围的正反转双转轮水轮机;丹麦研究建立了 Wave Dragon 漂浮型波浪发电场 [27];爱尔兰研究建立了 Wavebob 波浪能发电场 [28];美国水电绿色能源公司与美国陆军工程兵团联合研制了安装于密西西比河上的小水电站的流速水轮机;韩国 Uldolmok 海峡海岸安装了戈尔洛夫螺旋形水轮机 [29];新加坡 Altantis 公司研发了设计流速为 2.6 m/s 的坐海底式定桨距水轮机,还研发了带导流罩水轮机,并成功安装运行测试 [30];中国在官山安装了漂浮式双转子垂直轴水轮机、摆线式转轮、二叶片水平轴叶轮等装置,并进行了水道测试 [31];文献 [32]

对矩形潮流能水轮机进行了研究,设计出一种适用于中低流速的垂直轴新型发电转换装置。

在超低或零水头下,流速型水轮机是由自由流动驱动的。这种类型的水轮机通常应用在自然河流、潮汐、潮流、人工水道以及其他具有足够水流速度的场所。水动力系统可以将流水的能量转换成电能,可以通过像风电场一样布置多机组来提供电力产量。此外,这些系统的机构要求是最小的。但是,其相对较低的效率、空化性能,高昂的安装成本和维修困难是推进水动力技术的最大挑战。

四、趋势与建议

综上所述,目前的微水头发电主要是利用其水流流速所带来的动能转化为机械能发电,常规水轮机在微水头特点发电时显示出诸多不足,因此,有必要对应用于微水头的水力发电装置进行深入研究,提出微水头水力发电原动机的设计方法和性能研究方案。

国际上已经逐渐意识到微水头资源的价值,并且在运河、污水处理厂、水坝下游等微水头应用的典型个案。但是对于微水头总体资源分布还没有全面的统计,对于资源类型、特点、装置适用性等还没有清晰的论述。所以业界对于微水头资源究竟可以创造多少经济价值尚缺乏清晰的认识,进而影响在该领域资金和技术的投入,制约了微水头开发利用发展的步伐。应首先进行微水头资源的梳理和分类,总结国内外微水头资源的特点,进行设计方案的归类,给出总体设计方案、系统集成化设计和经济性分析,吸引相关领域研究学者和业主的目光,推进微水头水电开发技术的进步。

目前对于微水头水力发电水轮机的研究,多以压力型常规水轮机或速度型零水头为母型,在适应超低水头特点上进行部分参数和部件的改进,或者是单个机型的发明创新,尚没有一套针对“压力头”和“速度头”同时并存的完整的设计理论和方法,相当于处在理论设计的空白阶段,与常规水力发电的成熟技术相比有着遥不可及的距离,严重制约着微水电的发展。应结合叶栅理论和叶素动量理论方法,建立动势能结合型微水头水轮机的设计理论和方法,为微水头水轮机机型的完善和发展奠定理论基础。

五、结语

开发微水头水力发电技术符合可再生能源国家发展战略,是我国优化能源结构、保障能源安全、缓解环境问题的优先选择。笔者通过梳理河流、运河、水库、电厂尾水、管道供水、城市废水、海洋新能源等微水头资源需求和应用特点,总结适合开阔流域和封闭流域特点的两型微水头水力发电水轮机,对形成动能结合型微水头水轮机设计方法有了初步认知。本文可为开发微水头小型水力发电装置创新设计提供技术基础。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 可再生能源发展“十三五”规划[J]. 太阳能, 2017(1): 78.
National Development and Reform Commission of the PRC. The “13th five-year” plan for renewable energy development [J]. Solar Energy, 2017(1): 78.
- [2] 赵永平. 小水电多了还是少了? [N]. 人民日报, 2016-01-06(16).
Zhao Y P. More or less for the small hydro-electric power plant? [N]. People's Daily, 2016-01-06(16).
- [3] Zhou D, Deng Z. Ultra-low-head hydroelectric technology: A review [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 78: 23–30.
- [4] Khan M J, Iqbal M T, Quaicoe J E. River current energy conversion systems: Progress, prospects and challenges [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2008, 12(8): 2177–2193.
- [5] Jacobson P T, Ravens T M, Cunningham K W, et al. Assessment and mapping of the riverine hydrokinetic resource in the continental United States [R]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2012.
- [6] Ladokun L L, Ajao K R, Sule B F. Hydrokinetic energy conversion systems: Prospects and challenges in Nigerian hydrological setting [J]. Nigerian Journal of Technology, 2013, 32: 538–549.
- [7] Colby J A, Adonizio M A, Power P. Hydrodynamic analysis of kinetic hydropower arrays [R]. Waterpower XVI, 2009.
- [8] Wang L, Lee D J, Liu J H, et al. Installation and practical operation of the first micro hydro power system in Taiwan using irrigation water in an agriculture canal [C]. Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the Century, IEEE, 2008.
- [9] Smits M. Technography of pico-hydropower in the Lao PDR [R]. Lao Institute for Renewable Energy Lire, 2008.
- [10] Zhou D, Chen H, Yang C. A highly efficient Francis turbine designed for energy recovery in cooling towers [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2015, 7(3): 1–8.
- [11] Zheng Y, Zhang F, Liu D. Small turbine unit replacing reducing valve in water supply systems of hydropower plants [C]. ASME 2006 2nd Joint U.S.-European Fluids Engineering Summer Meeting Collocated with the 14th International Conference on Nuclear Engineering, 2006.
- [12] Adhikary P. Energy recovery in existing infrastructures with small hydropower plants [R]. Gcre, 2016.
- [13] Liu Y, Packey D J. Combined-cycle hydropower systems: The potential of applying hydrokinetic turbines in the tailwaters of existing conventional hydropower stations [J]. Renewable Energy, 2014, 66(6): 228–231.
- [14] Arango M A. Resource assessment and feasibility study for use of hydrokinetic turbines in the tailwaters of the priest rapids project [D]. Washington DC: University of Washington (Doctoral dissertation), 2011.
- [15] Jose D, Varghese L, Renjini G. Design of small hydro electric project using tailrace extension scheme [J]. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, 2014, 3(1): 79–87.
- [16] Fraenkel P L. Marine current turbines: Pioneering the development of marine kinetic energy converters [J]. Journal of Power & Energy, 2007, 22(2): 159–169.
- [17] Thresher R, Musial W. Ocean renewable energy's potential role in supplying future electrical energy needs [J]. Oceanography, 2010, 23(2): 1–6.
- [18] Quesada M C C, Lafuente J G, Garrido J C S, et al. Energy of marine currents in the Strait of Gibraltar and its potential as a renewable energy resource [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 34: 98–109.
- [19] Wang S, Yuan P, Li D, et al. An overview of ocean renewable energy in China [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(1): 91–111.
- [20] Williamson S J, Stark B H, Booker J D. Low head pico hydro turbine selection using a multi-criteria analysis [J]. Renewable Energy, 2014, 61(1): 43–50.
- [21] 王正伟, 杨校生, 肖业祥. 新型双向潮汐发电水轮机组性能优化设计 [J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(5): 417–421.
Wang Z W, Yang X S, Xiao Y X. Optimization design for a new type of bidirectional tidal generating turbine set [J]. Journal of drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(5): 417–421.
- [22] 杨春霞, 郑源, 郑璐, 等. 超低水头竖井贯流式水轮机转轮数值模拟优化 [J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(3): 225–229.
Yang C X, Zheng Y, Zhang L, et al. Numerical simulation and optimization of shaft tubular turbine runner with super-low head [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(3): 225–229.
- [23] Sinagra M, Sammartano V, Aricò C, et al. Cross-flow turbine design for variable operating conditions [J]. Procedia Engineering, 2014, 70(70): 1539–1548.
- [24] Hogan T W, Cada G F, Amaral S V. The status of environmentally enhanced hydropower turbines [J]. Fisheries, 2014, 39(4): 164–172.
- [25] Ak M, Kentel E, Kucukali S. A fuzzy logic tool to evaluate low-head hydropower technologies at the outlet of wastewater treatment plants [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 68: 727–737.
- [26] 韩凤琴, 金元敏. 正反转双转轮水轮机水力性能研究 [J]. 水电能源科学, 2006, 24(5): 37–39.
Han F Q, Kanemoto Toshiaki. Study on hydraulic performance of positive and reverse rotating double runner turbine [J]. Water Resources and Power, 2006, 24(5): 37–39.
- [27] Beels C, Troch P, Visch K D, et al. Application of the time-depen-

- dent mild-slope equations for the simulation of wake effects in the lee of a farm of Wave Dragon wave energy converters [J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(8): 1644–1661.
- [28] Müller N, Kouro S, Glaría J, et al. Medium-voltage power converter interface for Wave Dragon wave energy conversion system [C]. Denver: IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2013.
- [29] Golecha K, Eldho T I, Prabhu S V. Influence of the deflector plate on the performance of modified Savonius water turbine [J]. *Applied Energy*, 2011, 88(9): 3207–3217.
- [30] King J, Tryfonas T. Tidal stream power technology-State of the art [C]. Oceans, IEEE, 2009.
- [31] 张亮, 李新仲, 耿敬, 等. 潮流能研究现状2013 [J]. *新能源进展*, 2013, 1(1): 53–68.
Zhang L, Li X Z, Geng J, et al. Current situation of tidal current energy research in 2013 [J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2013, 1(1): 53–68.
- [32] 陈展, 马勇, 张亮, 等. 矩形潮流能水轮机性能研究 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(6): 128–132.
Chen Z, Ma Y, Zhang L, et al. Study on the performance of rectangular tidal current turbine [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 41(6): 128–132.