

潮流能发电装置现状分析

白杨, 杜敏, 周庆伟, 孟洁, 武贺

(国家海洋技术中心 天津 300112)

摘要:潮流能是海洋新能源中相对稳定且可提前预报的一类,较传统的拦坝式潮汐能开发具有环境影响小、开发规模灵活等优点,其大力发展可为海岛经济发展和海洋观测设备提供能源。文章对潮流能发电技术的研究现状进行了总结分析,详细介绍了水平轴、垂直轴和其他形式潮流能发电装置的构造以及国际上主流装置的设计参数和试验示范情况,重点对比分析了不同类型潮流能发电装置的特点和技术参数,简要总结了我国潮流能示范电站安装运行情况,并对其装置类型、导流罩作用以及布放形式等内容进行了讨论,可为我国潮流能资源的开发利用和潮流能装置测试区建设提供科学参考和设计依据。

关键词:潮流能;发电装置;参数分析;现状

中图分类号:P742

文献标志码:A

文章编号:1005-9857(2016)03-0057-07

Proceeding of Tidal Current Energy Conversion System

BAI Yang, DU Min, ZHOU Qingwei, MENG Jie, WU He

(National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China)

Abstract: Tidal current is a kind of renewable marine energy resource which is relatively stable and predictable. It has more advantages such as less environmental impact and flexible scale of development, compared with traditional tidal barrage energy development. Its rapid development can provide energy for the island's economic development and ocean observation equipment. The technology of international tidal current energy devices currently was reviewed and summarized in this paper. The structure of tidal current energy generation, including the kind of horizontal axis, vertical axis and others, was thoroughly introduced, as well as the designing parameters and testing situation of major international turbines. Features and technical parameters of different types of tidal current energy generation were compared and analyzed specially. Installation and operation of tidal current energy demonstration in China was summarized in brief. Device type, dome effect and placement form were also discussed. It provided significant and scientific reference for exploitation of resources and construction of test area of tidal current energy.

Key words: Tidal current, Conversion systems, Parameter analysis, Proceeding

基金项目: 财政部海洋可再生能源专项资金项目(GHME 2012ZC05)(GHME2013GC03)(GHME2013ZC01)(GHME 2014ZC01)。

作者简介: 白杨, 工程师, 研究方向为海洋能资源评估及开发利用, 电子信箱: minibaiyang@qq.com

通信作者: 武贺, 副研究员, 研究方向为海洋能资源调查与评估, 电子信箱: wh_crane@163.com

1 引言

随着海洋能战略地位的日益突出,全世界各国都在争取占据海洋能开发利用的技术高地。我国是最大的发展中国家,CO₂的排放量居世界前列,中国已然成为世界第二大能源消费国,面临巨大的节能减排压力,为海洋能开发利用提出了迫切的要求。近些年来,世界各国都把目光投向了可再生新能源的开发,将其作为可持续发展的基本举措。可以说,探索和开发利用清洁高效的可再生能源,将是 21 世纪能源发展的必然趋势。潮流能是海洋可再生能源的一种,指潮流做水平运动所含有的动能^[1]。

我国海岸线长达 18 000 km 余,在海湾湾口、岛屿之间的水道存在着强潮流运动,具有广阔的潮流能开发前景。潮流能开发利用之前,首先必须了解其潜在量、可开发量以及时空分布特点等,摸清潮流能资源的基本情况。截至目前,美国、加拿大、英国等发达国家都对其潮流能资源做了评估,我国也进行了 3 次较大规模的潮流能资源调查,分别是:1986 年开展的沿海农村海洋能资源区划;2004 年启动的“我国近海海洋综合调查与评价”专项,即“908 专项”,对我国沿海海洋可再生能源潜在量和可开发利用量进行了调查与评估工作;2010 年财政部“海洋可再生能源专项资金”项目。其中,“908 专项”海洋能调查评估研究结果显示:我国近海主要水道(99 条水道)的潮流能资源潜在量为 832.51 万 kW,技术可开发装机容量 166.49 万 kW,技术可开发年发电量 145.86 亿 kW·h。在随后开展的海洋可再生能源专项资金项目中又在前期的基础上选择了潮流能资源丰富的我国渤海海峡、成山头外、胶州湾、斋堂水道、长江口、杭州湾、舟山海域、三沙湾、金門水道、琼州海峡 10 个重点海域的潮流能资源的时空分布特征进行了分析,利用 FLUX 等方法计算了 10 个区域 75 条水道(断面)的潮流能资源总量;结果表明,75 条水道截面的潮流能资源理论潜在量约为 556.25 万 kW,理论年发电量为 487.28 亿 kW·h,技术可开发量为 81.88 万 kW,年发电量为 71.73 万 kW·h^[2]。

随着世界各国对海洋能开发利用重视程度的不断加深,潮流能转换技术已成为成熟度较高(仅

次于潮汐能技术)、最具开发利用前景的可再生能源之一。然而,由于潮流能转换技术还未最终定型,其开发利用形式、安装布放方式、叶轮尺度、转换效率等方面存在着较大的差异,而上述因素不仅直接影响着潮流能水轮机阵列布局、年发电量、功率预测等潮流能资源的精确评估,也将对未来我国大规模开发利用海洋能涉及的海洋功能区划修订产生影响。

为此,本文按照潮流能水轮机发电原理的不同分别介绍了国内外潮流能装置的利用特点及应用情况,并总结了一批适合我国海洋特点的潮流能转换装置,可为我国潮流能开发利用提供重要参考。

2 潮流能发电装置调研

潮流能发电装置是将潮流动能转换为电能的装置或系统,由海上支撑载体、发电机、电能变换与控制系统、获能装置(水轮机)、负载系统与电力传输等 5 个子系统组成。潮流能发电装置可以按照工作原理、外部结构特征、安装布放方式的不同进行分类^[3]。

按照工作原理分类,主要包括水轮机类型和其他类型,其中水轮机又可分为水平轴和垂直轴水轮机,其他类型包括振荡水翼式、螺旋叶片式、Savonius 发电形式、文丘里式等多种类型。

2.1 水平轴式水轮机

水平轴水轮机主要由桨叶、轮毂、机舱、制动舱、制动器、传动机构、密封、发电机、整流励变控制器、对水机构和塔架等组成,其中两片或三片桨叶安装在轮毂上构成叶轮,制动器、发电机、传动机构、整流励变控制器和对水机构都密封于机舱内,机舱与叶轮浸没在海水中,叶轮的旋转方向由对水机构调节始终保持正面迎着水流(图 1),塔架对机舱起固定作用^[4]。该类型涡轮机代表类型较多,主要包括英国 MCT(Marine Current Turbines)公司联合多家机构研制的 SEAGEN、爱尔兰的 OPEN-HYDRO、挪威 Hammerfest Strom 公司发展的 Blue Concept、美国的 Verdant、加拿大的 Clean currents 等,还包括我国哈尔滨工程大学、中国海洋大学等高校研制的类似设备。

2.1.1 SEAGEN

2003 年英国 MCT(Marine Current Turbine)

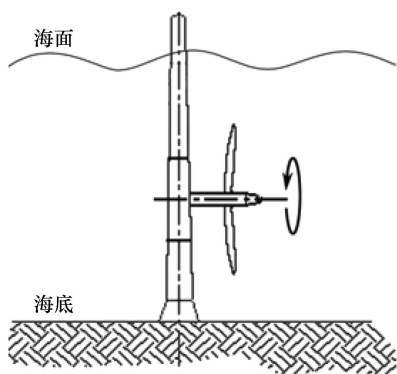


图1 水平轴式水轮机概念图

公司于英国 Bristol 海峡成功安装了 300 kW “Sea-flow”水平轴潮流发电装置 SEAGEN,该装置特点是:采用置入海底的钢质桩柱式结构固定发电机组,机组可升降至海面以上进行维护和检修,叶轮直径 11 m。之后,MCT 公司又开发了 1 200 kW (2×600 kW)的“SeaGenS”潮流水轮机,该装置的特点是:钢质三腿单桩柱,叶轮直径 16 m,额定流速 2.4 m/s,180°变桨距叶片适应双向潮流,于 2008 年在北爱尔兰 Strangford 成功并网运行,是世界上首台兆瓦级潮流能发电装置^[5]。

2.1.2 Free Flow System

Free Flow System 装置由美国 Verdant Power 公司制造,是 3 叶片固定倾角水平轴水轮机,座底式安装,叶轮机直径 4.68 m,额定流速 2.2 m/s,额定功率 35.9 kW,在纽约 East 河安装了 6 台全尺寸的样机,装置历经 9 000 h 的连续测试,共计发电量 8 000 kW·h。该公司于 2012 年获得了联邦能源监管会(FERC)的商业许可,正在进入更大规模的潮流能开发阶段^[6]。

2.1.3 Blue Concept

挪威 HSAS(Hammerfest Strom AS)公司研制了坐底式三叶片水平轴潮流能水轮机称为“Blue Concept”。水轮机具有自动对流功能,工程样机于 2003 年在挪威 Kvalsundet 水道安装,经 4 年运行测试,已正式并网发电。2009 年安装了改进型的 300 kW 机组 HS300,叶片长 10 m,座底式结构重 200 t。2011 年开始研制 1MW 全尺寸样机 HS1000,在 Orkney 群岛的欧洲海洋能研究中心(EMEC)进行测试^[7]。

2.1.4 TidEL

TidEL 水轮机是由英国 SMD Hydrovision 公司设计,属于悬浮式水平轴,整套装置结构简单,适用于超过 30 m 水深,双转子水轮机完全浸没水下运行,单点固定,减小了波浪冲击,叶轮直径 18.5 m,额定流速 2.3 m/s,总功率 1 000 kW。在 Blyth 对 1:10 的水轮机模型通过了测试,2006 年全尺度模型在 Orkney 进行了测试^[8]。

2.1.5 Open Centre

爱尔兰 OpenHydro 公司开发的 Open Centre 水轮机最大的特点是结构比较简单,中央式固定桨叶轮,直径 6 m,导流罩与发电机定子为一体,启动流速低,250 kW 试验样机于 2006 年在 EMEC 进行测试,整个样机由双桩柱式结构支撑,2008 年 5 月发出的电力并入英国电网^[9]。2009 年为加拿大 Nova Scotia Power 公司设计建造了 1 台 1 000 kW 商业型示范样机,直径 10 m,重 400 t,同年 11 月成功安装于加拿大 Fundy Ocean Research Centre for Energy 试验场^[10]。

2.1.6 Clean Current

CC100B 水轮机是由加拿大 Clean Current Power Systems 公司设计的,单转子双向带导流罩的水平轴水轮机,于 2006 年建成,额定功率 500 kW,叶片直径 10 m,安装水深大于 13 m,设计寿命 25 年。2007 年在 BC Race Rocks 进行了测试。2008 年 10 月,对水轮机进行了修复和清理,同时优化了导流罩^[11]。

2.1.7 海明 I

哈尔滨工程大学的 10 kW 水平轴水轮机发电装置“海明 I”号于 2011 年 9 月投放于浙江省岱山县小门头水道,带导流罩的叶轮直径 2 m,在 2.0 m/s 流速下发电功率 10 kW,系统效率 78%,非导流罩的叶轮直径 2.5 m,在 2.3 m/s 流速下发电功率 10 kW,系统效率 34.5%。装置外形尺寸 9.0 m×7.5 m×6.5 m,采用重力坐底式固定,支撑结构重 20 t;发电机组有自适应 180°换向尾翼^[12],发出的电力为水道附近的仙舟桥“海上生明月”灯塔照明和供热。

2.1.8 东北师范大学

东北师范大学于 2006 年研发了直驱式水平轴海流发电装置,装机容量 0.5 kW,启动流速低于

0.25 m/s, 可在水下 30 m 以浅深度运行。通过海上实验初步形成了水发电密封技术、直驱式低流速发电装置整体结构。在国家科技支撑计划支持下, 该校研制了 20 kW 水平轴自变距潮流能发电装置, 4 叶片定桨叶轮叶片直径 5 m, 启动流速 0.7 m/s, 设计流速 2.1 m/s, 额定转速 40 r/min^[13]。该装置的研制重点在于具有较强的环境适应性和运行的可靠性, 即能够适应我国海域潮流高流速时间短、平均流速较低(0.5~2 m/s)等特点。

2.1.9 浙江大学

浙江大学于 2006 年研制了 5 kW 固定式水平轴螺旋桨式潮流能水轮机^[14], 转子旋转直径 2 m, 在 2 m/s 流速下, 转速 50 r/min, 并于 2006 年 4 月 26 日在浙江省舟山市岱山县进行了海上试验。2009 年, 浙江大学继续发展了 25 kW 的半直驱水平轴潮流发电装置样机, 设计额定功率 25 kW, 额定流速 2 m/s, 叶片长 2.2 m, 转速 45 r/min^[15]。2009 年 5 月, 在浙江省小门头水道进行了海试。2010 年海洋能专项资金支持该校研制了 60 kW 半直驱水平轴潮流能发电装置工程样机, 2014 年 5 月在摘箬山岛海域进行了海试, 海试发电最大功率达 31.5 kW, 转换效率 0.371^[16]。

2.1.10 海洋能专项示范工程

2010 年财政部海洋可再生能源专项资金项目启动, 哈尔滨工程大学参与 500 kW 海洋能独立电力系统示范工程项目, 负责桩基立式潮流能发电装置 1 座“海能 II”, 2 台 100 kW 机组总装机容量 200 kW, 叶轮直径 12 m, 启动流速 0.6 m/s, 极限流速 2.0 m/s, 额定流速 1.7 m/s, 能量利用率大于 25%。该方案是根据电站安装海域(青岛市斋堂岛水道)环境条件而设计。发电机组由单桩(基础)、水轮机(叶轮、轴系)、增速器、发电机及其支撑结构等组成, 是一种适应低流速的较大功率潮流能发电装置。

2.2 垂直轴式水轮机

与水平轴水轮机相比, 一般情况下, 垂直轴水轮机没有对水机构, 其他结构基本相似。机组利用叶轮获取潮流能, 海水经叶片产生垂直于海流方向的上升力, 使叶片转动, 利用机械传动, 变速机驱动发电机工作, 发出电能。机组的输出功率为能量机

组效率、潮流能能量大小与利用系数的乘积。此类装置的转轴方向与流向垂直(图 2)。该类型装置主要包括意大利阿基米德桥公司(PdA, Ponte di Archimede S. p. A.)研制的 ENERMAR 系统、哈尔滨工程大学研制的万向 I 和万向 II 等。

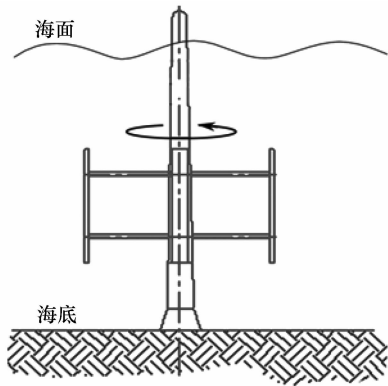


图 2 垂直轴式水轮机

2.2.1 Blue Energy

加拿大 Blue Energy 公司是较早开展潮流能垂直轴水轮机研究的单位。其中著名的 Davis Hydro Turbines 就是以该公司工程师 Davis 命名的, 水轮机采用的是 4 个固定偏角叶片, 额定功率 250 kW, 整个转子安装于一个固定在海底的沉体中。另外, 耦合器、发电机及电力控制系统处于一个干燥的环境中, 沉体的特殊构造可以加速水流, 提高水轮机的效率^[17]。

2.2.2 Kobold 水轮机

Kobold 水轮机由意大利 PdA (Ponte di Archimede S. p. A.) 公司设计, 于 2002 年在墨西拿海峡(Strait of Messina)成功建成装机容量 120 kW 的漂浮式电站, 漂浮式载体直径 10 m, 水轮机采用的是变偏角式, 三叶片叶轮直径 6 m, 叶片弦长 0.4 m, 长 5 m。电站第二期建设中, 加载了太阳能发电, 功率 6 kW, 实现互补发电, 测得该水轮机能量利用率在 0.23 左右, 通过海底电缆将发出的电力并入当地电网, 这是世界上第一个接入电网的垂直轴水轮机^[18]。

2.2.3 万向系列

2002 年 4 月, 由哈尔滨工程大学研制的我国首座 70 kW 漂浮式潮流实验电站“万向 I”在浙江省岱

山县龟山水道建成,装置的载体为双鸭舢式船型,搭载水轮机、发电装置和控制系统;锚泊系统由4套重力锚块、锚链和浮筒组成;水轮机采用立轴可调角直叶片摆线式双转子机型,直径2.5 m,水轮机主轴输出端安装液压及控制系统进行调速,将机械能转换为稳定的压力能和稳定的输出转动,带动发电机工作,具有蓄电池充电控制、并网控制和相关的保护功能。在流速2~2.5 m/s时,平均发电功率5~25 kW^[19]。

2005年12月,“万向II”40 kW坐海底式潮流能发电实验电站在岱山建成。装置建于岱山县高亭镇与对港山之间的潮流水道中,是一个独立供电系统,采用弹簧控制叶片偏角H型双转子水轮机,直径2.5 m。载体呈双导流箱形,由机舱、浮箱、导流罩、沉箱和支腿构成,机械增速系统与发电机组密封于机舱中。电站沉没于水下,坐在海底上运行发电,避免了潮流发动机组受强台风袭击的问题。电力通过海底电缆输送到岸上,经电能变换与控制等系统稳频稳压和储能供岸上灯塔照明。电站具有下潜和上浮功能便于安装维护^[20]。

2.2.4 海能I

2010年,在科技部“支撑计划”支持下,哈尔滨工程大学在龟山航门研建150 kW潮流能电站“海能I”。电站载体平台为双体船漂浮式结构,由弹性系泊系统定位,立轴自调角直叶水轮机作为潮流能转换装置,叶轮直径4 m。水轮发电机组、电能变换及保护设备安装于海上电站载体平台上,发出的电力通过350 m海底电缆上岸接入官山岛岸上独立电力系统,控制设备及演示系统置于海岛上的变配电控制室内,设置电站远程监测系统,能够在官山岛(偏远海岛)和岱山县高亭镇(城市)进行电站的运行监控,2012年测得系统效率大于30%。

2.3 其他形式

其他形式潮流能转换装置主要包括振荡水翼式、螺旋叶片式、Savonius发电形式、文丘里式等。

振荡水翼系统的潮流能发电装置是借鉴了“游鱼”的尾部运动特征,通过潮流作用使发电系统尾翼上下摆动而产生动能,进而转换为电能。主要由翼板、摇臂和支撑结构组成,摇臂底部与垂直结构

相接,顶部与水平翼板相接。在垂直结构和摇臂之间有液压油缸,上下振荡的摇臂压缩活塞运动,将机械能转换为高压能量,再通过液压马达将压力能转变为旋转机械能,带动发电机发电。这种装置的特点是用往复运动的水翼代替了旋转叶片^[21]。2002年8月,第一架150 kW Stingray原型示范机组在英国设得兰群岛附近的Yell Sound进行了测试。

GHT水轮机由美国Gorlov Helical Turbine (GCK)公司设计,叶片设计成了有一定的扭曲角度的垂直轴螺旋叶片。另外,OCGen水轮机由美国Ocean Renewable Power(ORPC)公司设计,同时也采用了螺旋叶片方案,额定功率60 kW,采用横轴布置方式,并且发电机两侧采用了旋向相反的两个叶轮,这样又可以抵消螺旋叶轮旋转产生的轴向力。该水轮机已进行了多次海上试验。

EXIM水轮机由瑞典Seapower公司设计,是在Savonius风力机的基础上的一种阻力型潮流能水轮机,获能效率相对较低,但能产生较大的转矩,Savonius风力机叶片与转轴平行,即为直叶片,叶片处于一定位置区域时,难以自启动。印度理工学院对有一定螺旋角的Savonius水轮机进行了实验研究,结果表明水轮机在任意角度都能自启动,最大获能系数接近0.2。

文丘里(Venturi)系统基于Bernoulli效应,通过潮流流经狭窄节流口产生的压力差驱动发电机工作。这类装置相当于在横轴或纵轴叶轮的外部增加一个文丘里管,这可使通过水轮的水流能量更加集中,驱动转换效率更高。代表公司为英国的月能公司(Lunar Energy)的RTT(the Rotech Tidal Turbine)技术,海王星可再生能源公司(Neptune Renewable Energy)的NP(The Neptune Proteus)技术。

Tidel Sail系统由挪威TSAS(Tidal Sails AS)公司设计,主要由金属导线、齿轮和帆叶等构件组成。工作原理是水流推动帆叶,帆叶拉动金属导线,驱动齿轮转动,最终带动发电机工作。

Nereus潮流能装置由英国ARC(Atlantis Resources Corporation)公司设计,专门为近岸浅水环

境设计,叶片有倾斜角度的安装在链形式的装置上,水轮机获取流体动能驱动链条转动。该装置于2008年7月进行了400 kW的拖拽试验。

潮流能转换装置 bioSTREAM 系统由澳大利亚 BPSP(BioPower Systems Pty)公司设计,原理是基于浮游生物的前进方式,流过装置水流的能量驱动推进器克服发电机的扭矩从而发生摆动。当海洋流速度过大,BPSP 系统将自动沿着潮流方向改变,以避免潮流的侵袭,目前250 kW的试验系统正在研制中。

VIVACE 系统概念由美国 VHE(Vortex Hydro Energy)公司于2005年11月提出。2011年,该系统进行了原型测试,工作原理主要是将水流引起的涡激振动转换为电能,能源密度更高,对于周围的居民和鱼类毫无影响。目前,VIVACE 系统已经投入商业运行。

Eel 系统由美国 OPTI(Ocean Power Technologies Inc)公司开发,是一种新型装置,使用高分子压电材料转化流体机械能为电能。Eel 系统既可以用于海洋中,也可使用于河流中,启动流速仅0.4 m/s。Eel 发电系统利用直壁体后的尾涡拉伸压电单元。而内部的电池储存 Eel 系统产生的多余能量,以供水下无人机器人或传感器工作时使用。

2008年中国海洋大学在国家“863”计划项目资助下,制作了5 kW 柔性叶片潮流能发电水轮机进行海上样机试验,该水轮机在结构性能上具有独到优势:在结构上,叶片采用高分子薄膜材料、帆布等柔性材料直接剪裁制作成形,易于维护、保养和更换,特别是当作较大装机容量水轮机时柔性叶片在加工、运输、维护上体现出较大的优势,同时柔性叶片具有重量轻、造价低廉、耐腐蚀的独特优点;在性能上,柔性叶片潮流能水轮机具有单向旋转特性,其转向与来流方向无关,仅与叶片安装方向有关;具有不同于纯升力型或阻力型水轮机的独特水动力学特性,在旋转过程的绝大多数位置产生同向力矩,具有较高效率;水轮机起转流速低,在水槽实验中0.3 m/s 流速下转子便可很好起转,海上样机实验中,0.5 m/s 流速下已开始较为稳定的发出电能,具有良好的推广应用前景^[22]。

2.4 主要工程及其技术参数

本文按照潮流能水轮机的发电原理的不同分别介绍了国内外潮流能装置的利用特点及应用情况,总结归纳了各形式特点及装置参数。目前主流的潮流能一级转换装置仍与同属流体能源的风电设备类似,属于水平轴类型,占总设备类型的50%,其次是垂直轴类型,约占设备类型23%,其他非主流装置总和约为27%;其中多数装置(算整机装机容量)属于百千瓦级,兆瓦级装置还较少,仅有 MCT、Hammerfest Strom、Lunar Energy、SMD Hydrovision、OpenHydro 5 类,显然,功率大的装备其尺寸也较大,因此对水深的要求也较为苛刻;各类装置启动流速较高,均超过0.7 m/s,额定功率流速一般均超过2 m/s,还不太适合向流速较低的普通海域推广,就其安装布放形式来看,仍以座底式居多,由于潮流能资源富集区多位于海湾口、海峡或水道等航道资源稀缺处海域,此类也较漂浮式装置更有利于未来的应用推广。

3 结论与讨论

通过对目前主要潮流能转换装置进行调研分析,详细介绍了水平轴、垂直轴和其他形式潮流能发电装置的构造以及主流装置的设计参数和试验示范情况,重点对比分析了不同类型潮流能发电装置的特点和技术参数,并简要总结了我国潮流能示范电站安装运行情况,为我国潮流能资源的开发利用和潮流能装置测试区建设提供重要的科学参考。

总体上看,现阶段由于缺少潮流能量发电系统海上长期运行的性能和成本数据,因此很难对不同形式的潮流能量转换装置的性能进行精确的评定。目前还没有一种形式的潮流能量转换装置具有明显的技术优势而被广为认可。但现有的在建、已建项目和概念设计项目统计中,水平轴式装置仍是主导。当然,涉及特定项目中对潮流能装置形式选取时,应根据具体的安装位置和设备特点分析获得。

另外,水平轴式的导流罩的作用也是一把双刃剑,一方面能够起到聚流的作用,使潮流能发电装置适应低流速;另一方面可以起到导流的作用,使装置适应潮流的双向流动特性。但是导流罩装置一方面会增加设计制造成本;另一方面减小了转子

的尺度,即减小了叶轮有效能量获取截面积。文献中统计水平轴式水轮机潮流发电项目中使用导流罩的比例为 33%;垂直轴式水轮机潮流发电项目中使用导流罩的比例是 48%。应综合考虑各方面因素对导流罩装置及其结构形式进行选取。

再者,潮流能发电装置的布放形式选取也是其开发利用的一项重要技术环节,决定了潮流能发电装置的安装位置,潮流能资源丰富区域多位于海峡、水道、湾口等航运十分频繁区域,虽然漂浮式布放的安装结构和维护更为简单,但却与通航等重要海洋经济产生冲突,因此从长远的角度说,坐底式布放将更具潜力。

参考文献

[1] 吕新刚,乔方利.海洋潮流能资源估算方法研究进展[J].海洋科学进展,2008,26(1):98-108.

[2] 韩家新.中国近海海洋:海洋可再生能源[M].北京:海洋出版社,2015:29-46.

[3] 李允武.海洋能源开发[M].北京:海洋出版社,2008.

[4] 李伟,林勇刚,刘宏伟.水下风车海流能发电技术[J].浙江大学学报:工学版,2008,42(7):1242-1246.

[5] Marine Current Turbines Ltd. Technology development [EB/OL]. [2015-06-20]. <http://www.marineturbines.com>.

[6] Verdant Power. The RITE Project [EB/OL]. [2015-06-20]. <http://www.verdantpower.com>.

[7] Hammerfest. Research and development [EB/OL]. [2015-06-20]. <http://www.hammerfeststrom.tom>.

[8] Renewable Energy UK. Tidal Turbines[EB/OL]. [2015-06-20]. <http://www.reuk.co.uk/TidEL-Tidal-Turbines.htm>.

[9] Openhydro. Technology[EB/OL]. [2015-06-20]. [http://](http://www.openlaydro.corn)

www.openlaydro.corn.

[10] Ocean Energy Systems. Annual report; implementing agreement on ocean energy systems[R]. The Executive Committee of Ocean Energy Systems,2010.

[11] Clean Current Power Systems Incorporated. Technology [EB/OL]. [2015-06-20]. <http://www.cleancurrent.com>.

[12] 崔琳.座底式水平轴潮流能转换装置设计研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2012.

[13] 夏登文.海洋能开发利用关键技术研究 with 示范[J].中国科技成果,2013(22):76-79.

[14] 蒋秋飏,鲍献文,韩雪霜.我国海洋能研究与开发述评[J].海洋开发与管理,2008,25(12):22-29.

[15] 刘宏伟,李伟,林勇刚,等.水平轴螺旋桨式海流能发电装置模型分析及试验研究[J].太阳能学报,2009,30(5):633-638.

[16] 国家海洋技术中心.中国海洋能技术进展[M].北京:海洋出版社,2014:51-52.

[17] Blue Energy Canada Inc. Technology [EB/OL]. [2015-06-20]. <http://www.blueenergy.com>.

[18] Ponte di Archimede International. Projects[EB/OL]. [2015-06-20]. http://www.pontediarchimede.corn/language_us/.

[19] 张亮,李志川,张学伟,等.垂直轴潮流能水轮机研究与利用现状[J].应用能源技术,2011(9):1-7.

[20] 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.

[21] BEDARD R. EPRI final report [EB/OL]. [2015-06-20]. <http://oceanenergy.epri.com/attachments/streamenergy/reports/004TISECDeviceReportFinal111005.pdf>.

[22] 尹克金.柔性叶片水轮机获能区的研究及应用[D].青岛:中国海洋大学,2010.