



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng

Engineering



Research
Renewable Energy—Review

海洋可再生能源的前景

Alistair G. L. Borthwick

School of Engineering, The University of Edinburgh, Edinburgh EH9 3JL, UK

ARTICLE INFO

Article history:

Received 22 February 2016

Revised 5 March 2016

Accepted 7 March 2016

Available online 31 March 2016

关键词

海洋可再生能源

海上风电

潮流

洋流

潮差

波浪能

海洋热能

生物能

可持续性

摘要

以化石燃料为基础的发电方式会产生大量二氧化碳，从而导致全球气候变暖。我们需要采取行动减少化石燃料的使用和二氧化碳的排放。海洋能源存在巨大潜力，但是其开发还面临着跨学科的技术、成本、投资、环境影响和政府政策等方面的问题。本文简要介绍了海上风电、潮流、洋流、潮差、波浪能、海洋热能、盐度梯度、生物能等方面的内容，简述了开采海洋可再生能源需要进行研究的领域。这些领域包括能源存储、高级材料、机器人和信息学。本文以可持续性的角度从伦理、立法、监管环境、政府政策、经济、社会和环境制约等方面给出了海洋可再生能源发展的要求，强调我们急需富有专研精神的新一代科学家解决海洋可再生能源面临的重大挑战。

© 2016 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

能源是19世纪工业革命的动力，也是21世纪信息技术革命的动力。现今，世界总人口超过70亿。经济合作与发展组织(OECD)指出发达国家的人均能源使用量很高，每年人均使用的油当量为4.4 t [1]，发展中国家的人均能源使用量也逐年升高。现在最主要的能源是化石燃料，如煤炭、石油和天然气。最近石油价格的波动对整个能源行业都产生了巨大的影响。从2014年中期到2015年初，每桶石油的价格从100美元下降到低于50美元，使天然气和煤炭的市场价格也被调低[2]。世界的能源需求量将会不断上升，但从长期来看化石燃料的存

储确实是有限的。数据显示，过去27年能源领域的全球碳排放量和此前多年的总量相当，化石燃料使用量占一次能源结构的80%以上[2]。过去30年的温室气体排放量增长了约50%，碳排放量占当今全球温室气体排放量的60%。2014年，煤炭、天然气和石油燃烧产生的碳排放量分别占总排放量的44%、20%和35%，同时排放出大量其他温室气体如甲烷和二氧化氮[2]。化石燃料燃烧产生的碳排放量正加速气候变化。根据美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的报道[3]，“2015年前7个月世界大陆和海洋的气温是有历史记录以来最高的，比20世纪的平均气温高0.85 °C。”这个数据说明危机正在来临。

E-mail address: alistair.borthwick@ed.ac.uk

2095-8099/© 2016 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

英文原文: Engineering 2016, 2(1): 69–78

引用本文: Alistair G. L. Borthwick. Marine Renewable Energy Seascape. *Engineering*, <http://dx.doi.org/10.1016/J.ENG.2016.01.011>

很多政府部门正制订使用可再生新能源的方案以缓解人为导致的气候变化，解决未来可能面临的化石燃料枯竭问题，保障国家能源安全。能源工程师是解决问题的关键。提高能源利用率对经济和环境来说都是有益的。例如，改善发动机可以使发动机燃烧效率高达60% [4]，比现在的40%的峰值还高。然而，预测模型和发动机技术还必须加以改进，以制造出燃烧效率更高、碳排放量更低的发动机。未来发动机还需具有使用可替代燃料的能力。碳捕获与封存(CCS)就是一种接近零排放的技术，它能够分离出发电厂和化工厂产生的二氧化碳，然后把它封存起来，从而避免了二氧化碳向大气中的排放。虽然CCS技术很昂贵，但它能对燃气轮机发电站进行脱碳，从而减少二氧化碳向大气中的排放量 [5]。

其他限制碳排放并能同时缩小能源缺口的方式就是投资核能和可再生能源技术。虽然核能可以源源不断地供应电能，但是使用核能还存在放射性废弃物处理、可能的事故(如2011年3月日本福岛核电站三个反应堆的核泄漏事故)或对环境的破坏，以及核武器的扩张等问题。根据国际能源署的报道 [6]，“可再生能源来源于自然，并具有持续不断的属性，它有很多种形式，比如直接来自太阳或地球内部产生的热能。根据刚才的定义，可再生能源还包括来自太阳、风、海洋、水力资源、生物、地热产生的电力和热能，还有来自可再生资源的生物燃料和氢气。”

2. 海洋可再生能源

海洋可再生能源(MRE)包括海上风电、潮流、洋流、潮差、波浪能、海洋热能、盐度梯度和生物能等 [7]。Krewitt等 [8] 预计到2050年可开采的海上风电能源可达16 000 (TW·h)·a⁻¹。最近，Capps和Zender [9] 计算得出全球海上风电能源约有340 000 (TW·h)·a⁻¹。虽然全球海洋总能源(不包括风能)预计超过2 × 10⁶ (TW·h)·a⁻¹ [10]，但是可以被利用的能源仅为2000~92 000 (TW·h)·a⁻¹ [8,11]。Charlier和Justus [12] 估计理论上的潮汐能(包括潮流和潮差)潜力大概是26 000 (TW·h)·a⁻¹，其中8800 (TW·h)·a⁻¹来自浅海盆地；不过，预测的技术潜力更低 [8,11]。波浪能总量大概为32 000 (TW·h)·a⁻¹ [13]，其中可开采的能源大约为5600 (TW·h)·a⁻¹ [8]。海洋热能转换(OTEC)潜力巨大，理论上存在的能源为44 000 (TW·h)·a⁻¹ [14]。盐度梯度可用能源大约为1650 (TW·h)·a⁻¹ [15]。

我们面临的挑战就是如何用最少的费用开发和存

储这些能源。这涉及技术、基础设施、成本节约、投资、环境影响、海洋管理、政府政策和立法等方面的问题。政府对MRE领域的管制比较强。为了更好地开展工作，我们还需收集海床粗糙度、波面高度、潮流、涡流和湍流等数据信息。图1中生长在苏格兰海床的极北海带(*Laminaria hyberborea*)向我们展示了海床的环境是多么复杂 [16,17]。为了清除MRE系统中的障碍，人们已制订出各种多学科MRE技术发展方案路线图(如参考文献 [18,19])，包括设备测试、并网费用和MRE技术的测试(尚无国际测试标准)。小规模的项目对设备的初期测试和优化非常重要(如在西班牙坎塔布里亚环境水力学研究院(IH Cantabria)进行的项目)。而海洋测试站点则可提供试点规模放大和完整的原型条件。例如，苏格兰奥克尼郡的欧洲海洋能源中心(建于2003年，连接14个泊位，在25~50 m处测试波浪和潮汐相关设备)；波浪中心(Wave Hub) (连接4个泊位，水深60~100 m，位于英格兰康沃尔海岸)；爱尔兰的高威海湾四分之一规模测试点和贝尔马利特全规模测试点；美国能源部赞助的三个国家MRE中心——西北国家海洋可再生能源中心(NNMREC)，测试点位于俄勒冈海岸、普吉特海湾和华盛顿湖；西南国家海洋可再生能源中心(SNMREC)，在佛罗里达海峡测试相关设备；夏威夷国家海洋可再生能源中心(HINMREC)，主要测试波浪能转换器和热能转换器设备。加拿大海洋可再生能源中心(Marine Renewables Canada)对上述测试中心的信息进行了对比整理 [20]。

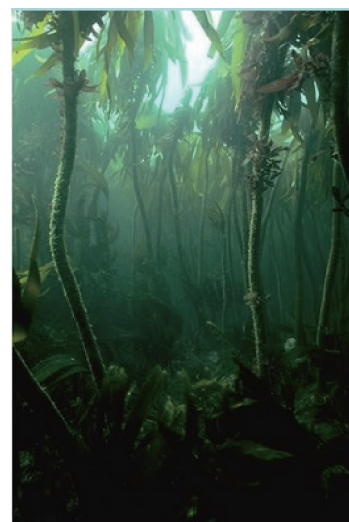


图1. 极北海带(*Laminaria hyberborea*)生长在苏格兰彭特兰湾水深达30 m的地方 [16,17]。彭特兰湾是苏格兰大陆和奥克尼群岛之间的一片海峡，是世界上利用潮汐能的最佳位置，潮流速度可以超过5 m·s⁻¹。

下面分别介绍开采海洋能源的不同技术。更详细的内容可以参考Day等[21]关于MRE设备(磁流体力学发电)的文章、Khan等[22]关于海洋涡轮机的文章、Drew等[23]关于波浪能转换器的文章,以及Adcock等[24]关于潮汐能测试模型的文章。

2.1. 海上风电能源

海上风力涡轮机技术来源于由发电风车改进而来的陆上风力涡轮机(图2(a)所示为由美国克利夫兰的Charles F. Brush建立的12 kW风力涡轮机)。海上风力涡轮机一般由三个叶片组成,和陆上风力涡轮机相似,如图2(b)所示。海上和陆上的风力发电技术一直在快速发展,目前最大的风力涡轮机是美国超导公司(AMSC)建造的Seatitan™ 10 MW风力涡轮机。其轮轴高125 m,转子直径为190 m,转速为 $10 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,叶尖速度接近 $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,额定功率为10 MW [25]。该风力涡轮机的转子直径未来可能进一步升级至250 m,额定功率可达20 MW [26]。以这么快的速度运转,噪声和叶片腐蚀是有待解决的问题。科学家正对海上漂浮式风力涡轮机的深水组装进行更深入的研究。例如,Principle Power在位于葡萄牙海域的一个漂浮式平台上安装了一台2 MW的海上风力涡轮机,预计将来最大功率容量会达到150 MW [27]。

虽然海上风电技术正在快速发展,但还是存在一些工程问题。例如,在海洋环境中海洋基础设施和悬浮支撑结构的设计和建造;基于3D计算流体动力学(CFD)的涡轮机设计问题;转子叶片先进材料的使用;更复杂和强大的控制系统,降低叶片损耗的方法,以及船舶操

纵的安全控制;海上基础设施的共享(如发电、储存和海水养殖)。图3所示为根据CFD模拟出的当风穿过瑞典南海岸Lillgrund海上风电场的一排涡轮机后产生的效果以及涡轮机后部的3D旋流效果图。

2.2. 潮汐和洋流能源

潮汐能是由潮流经过海岸线地区时产生的水头差所形成的。潮汐是海水在天体(主要是月球和太阳)引潮力作用下产生的周期性运动[28]。天体的运动、地球旋转产生的科里奥利加速度、大陆板块的存在和海床地形等的影响使研究潮汐更加困难[28]。潮汐变化是可预测的,这是潮汐能的一大优势。洋流是在海洋运动和风力的共同作用下形成的。潮流和洋流的速度通常大于 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,因此它们有潜力作为海洋能源被开发。潮汐能的开发常集中在特定地区,如海峡(如加拿大的约翰斯顿海峡、苏格兰的彭特兰湾和新西兰的库克海峡),海角(如威尔士的安格尔西岩礁),海湾(加拿大的芬迪湾和英国的塞文河),以及岛屿和陆地之间(爱尔兰的拉斯林岛),这些沿海地形的几何形状有助于潮流的产生。最强的洋流包括北向的佛罗里达海流(从加勒比海到北大西洋方向最终并入墨西哥湾暖流)和南向的阿加勒斯海流(沿南非东海岸)。它们的速度都可以达到 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。海洋能发电和风能发电的设备环境有很大不同:洋流的流向比风向更容易被预测;和大气不同,海洋表面的洋流活动可以增加阻力;海水密度比空气大800倍,因此能源设备的负荷更大;海洋环境比大气更严酷。最重要的是,潮汐涡轮机可以改变流场,流场反过来可以提高能源利用率。海上涡轮机对局部洋流的影响可以延续很长的距

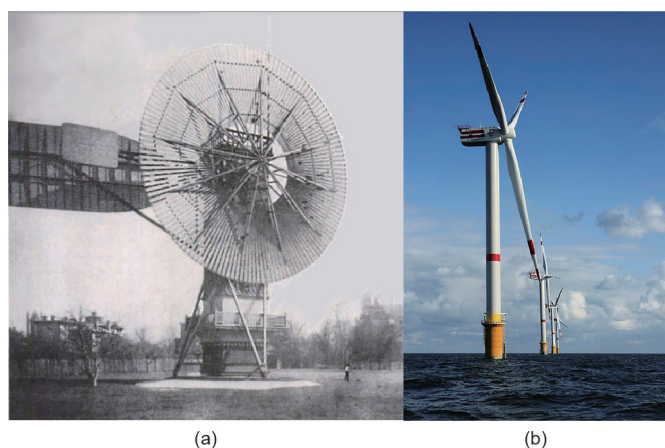


图2. 风力涡轮机技术的进化。(a) Charles F. Brush的发电风车,建于1887—1888年(图片由维基百科提供);(b)位于比利时北海桑顿浅滩的现代海上风电场,由瑞普尔(Repower)生产的5 MW轴流式涡轮机组成(图片由Hans Hiller提供,来自维基百科)。

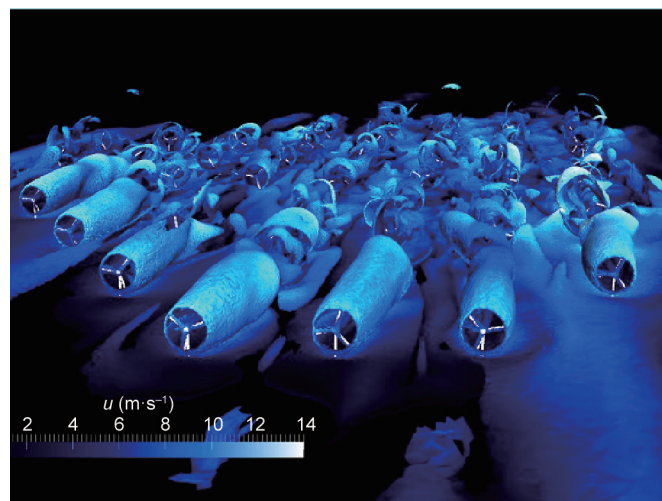


图3. Lillgrund海上风电场的计算流体动力学(CFD)大涡模拟3D图。(图片由爱丁堡大学的Angus Creech博士提供。)

离[29,30]。

虽然关于潮汐和洋流开采设备的设计方案有很多，但是极少方案能投入制造和测试(图4 [31–39])。这些设备可以归为以下几类：轴流式涡轮机、双击式水轮机、振荡水翼涡轮机、潮汐帆船和潮汐风筝等。

就像风力涡轮机从流动空气中汲取能量一样，轴流式涡轮机从流动的水中汲取能量。这种涡轮机根据安装方式不同有水平式和垂直式两种。风力涡轮机可以由裸露的叶片组成，如图4(a)所示的Atlantis轴流式涡轮机；可以是导管式的，如图4(b)所示为应用了文丘里效应的涡轮机，其中的风道可以使风力加速穿过涡轮机；也可以是中央开放式的，图4(c)所示的风力涡轮机由多个叶片围绕着一个中心空洞组成，当风力从中心空洞穿过时，基准压力下降，从而质量流量上升。悬臂结构的叶片会承受非常高的负载，这意味着叶片材料的强度和疲劳特性是非常重要的。转子叶片转动时，它们转过的圆面积可用于估算阻塞效应，这个因素会影响推力，并进而影响有效功率。涡轮叶片后面的流场具有非常强的

涡流成分。

双击式水轮机的概念为我们提供了激动人心的前景。这些设备的配置可以实现高流量阻塞效应，从而实现功率提取最大化。在这种情况下，叶片具有方向性，流体横穿整个叶片，更像联合收割机的逆过程。转动轴垂直于流动方向，要么水平，要么竖直。Kepler横向水平轴水轮机(THAWT)设备就基于该原则，如图4(d)所示。Edinburgh纵轴双击式水轮机如图4(e)所示，叶片垂直排列，两个末端基本上都受到大型自行车轮的支持，它具有可变螺距及边缘动力输出装置，反向旋转转子的直径为200 m，扫掠面积为10 000 m²，每个转子产生的功率超过100 MW [35]。如图4(f)所示，Gorlov螺旋式水轮机(GHT)本质上是一种改进的Darrieus双击式水轮机，配有对称的螺旋叶片。GHT在反向流动中工作效果良好。

振荡水翼涡轮机通过将升力作用于水翼，引起悬臂移动，从而驱动液压系统中的流体，然后将之转换成电能。典型的振荡水翼设备包括Stingray (150 kW)、模仿

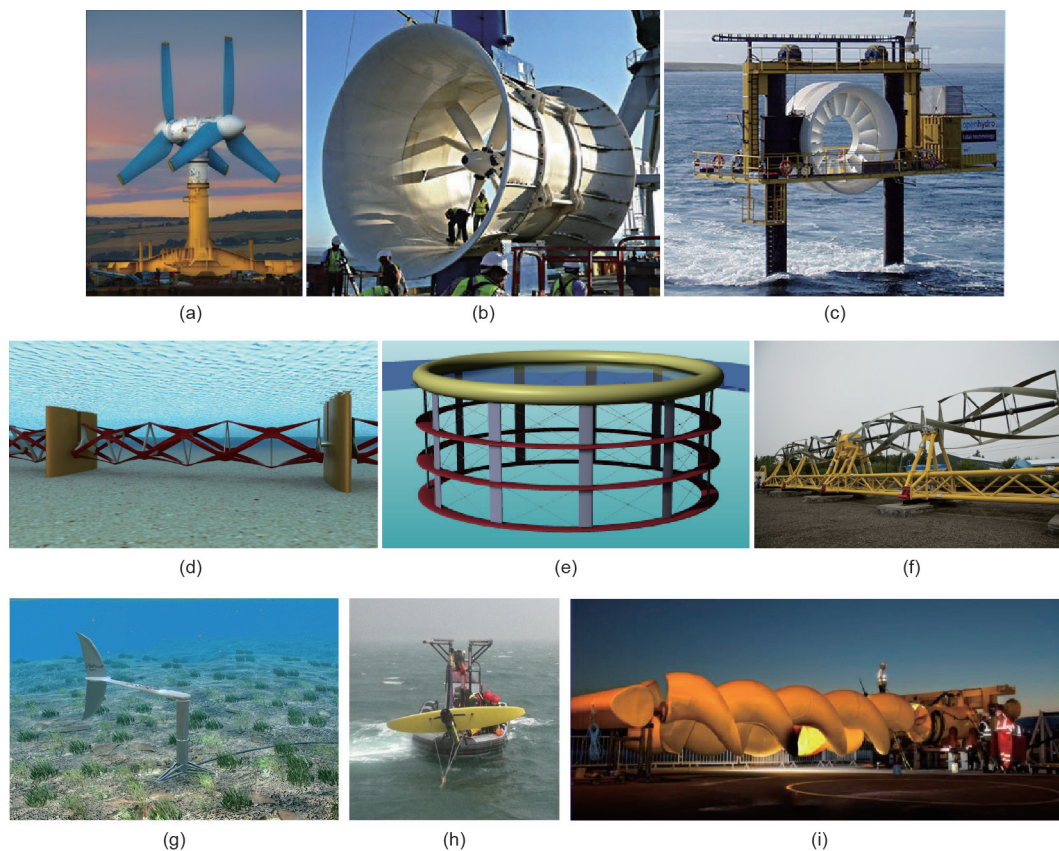


图4. 潮汐和洋流设备的例子。(a) Atlantis AK1000轴流式涡轮机(1 MW) [31]; (b) Atlantis Solon-K导管式涡轮机(1 MW) [32]; (c) OpenHydro中央开放式涡轮机(250 kW) [33]; (d) Kepler横向水平轴水轮机(THAWT)，是一种双击式水轮机(4 MW) [34]; (e) Edinburgh纵轴双击式水轮机的概念(100 MW) [35]; (f) 在美国科布斯库克湾部署前采用的Gorlov螺旋式水轮机[36]; (g) bioSTREAM (150 kW)振荡水翼涡轮机(图片由BioPower提供) [37]; (h) Minesto深海潮汐风筝[38]; (i) Flumill Archimedes螺旋式水轮机[39]。

鱼类推进原理的bioSTREAM(150 kW) (如图4(g)所示) 和由Pulse Tidal发展的Pulse-System(1.2 MW)的概念。

如图4(h)所示, 潮汐风筝涡轮机被拴在吊挂式扫雷臂上于水下“飞行”, 并将当前的动能转化为电能。遵循8字形轨迹, 潮汐风筝就能具有潜在的有效性, 可在水深60~120 m处、洋流速度为 $1.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的环境下操纵。Minesto在北爱尔兰斯特兰福德湾测试了翼展为3 m的潮汐风筝, 接下来会设计翼展为14 m的潮汐风筝, 该风筝在洋流速度为 $1.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时功率为850 kW。Minesto计划在2017年研发一种规模为1.5 MW的Deep Green涡轮机组, 并计划在未来开发功率达10 MW的机组。

其他种类的潮汐和洋流风力涡轮机还在研究当中。例如, 图4(i)中的Archimedes螺旋式涡轮机通过潮流驱动螺旋式叶片旋转来发电。其他的例子有Atlantis Fanbelt Aquanator 400和潮汐帆船概念涡轮机等。

还有一些有趣的研究主要集中在不确定性、湍流、涡流、波流相互作用[40]、模型放大和环境影响(如对哺乳动物和生物多样性的影响)上。例如, 暴风雨诱导的波浪可以产生比潮汐流还大的水质点速度。此外, 波浪周期与涡轮机转子的周期是同阶的。湍流和大规模涡流可以对来流的一致性产生影响。这些都可以通过计算机模拟技术来完成预测。研究人员最近通过CFD解决了设备实际规模下潮汐和洋流涡轮机的湍流问题。在近期模拟(图5)中, 转子叶片背后重现湍流旋流流动, 形成与下游涡轮机和局部环境相互作用的尾迹。高性能、大数据计算能够使这样的3D计算模型在未来作为常规工具得到推广。

实验室模型和中试规模的实地测试对这类分析进行了补充, 并为深入了解潮汐涡轮机的原位行为提供验证数据。图6(a)显示了单向实验室水槽测试下Oxford THAWT涡轮机的成比例模型[41]。图6(b)显示了在位于苏格兰奥克尼群岛北部的欧洲海洋能源中心进行测试的中试规模潮汐涡轮机[42]。

2.3. 潮差

潮差是在一个潮汐周期内, 相邻高潮位与低潮位之间的差值。潮汐磨坊起源于公元早期的几个世纪, 考古学家指出, 潮汐磨坊早在罗马人建立伦敦时和公元6世纪的爱尔兰就已出现。现代版潮汐磨坊就是潮堰和潮汐潟湖。潮堰是低水头水利发电系统, 它横跨在河口处而形成潟湖。潮差形成的水头差通过轴流式涡轮机产生电能。表1列举了世界上不同的潮堰类型[43,44]。

潮堰发电取决于瞬时水头, 其类型可以分为以下几种: 退潮发电(水从水槽里流出)、涨潮发电(水流进水槽里)、双向发电和水泵发电。虽然潮堰可以提供充足能源, 但投资和建设的成本非常高, 冗长的建设周期抑制了投资的积极性。堰坝开发商必须考虑航行和航运水位的要求。堰坝可能引起的环境问题包括潟湖潮汐运动的变化、停滞, 水质损失, 沉积物运移、盐度、生物多样性的变化, 以及通过影响潮间期对涉禽产生影响。公共和政治因素也一直影响着潮堰的发展速度。最近, Waters和Aggidis [45]在一篇综述中报道了目前最先进的潮差发电技术, 这种技术利用潮汐潟湖、礁石和围栏发电, 成本相对较低且对环境的影响也较小, 这项技术将会使潮差发电在未来变得更可行。在英国, 科学家一直想利用塞文河口的潮差进行发电。他们之前提出了一个建设一条长为16 km的拦河坝的方案, 这条拦河坝从威尔士加

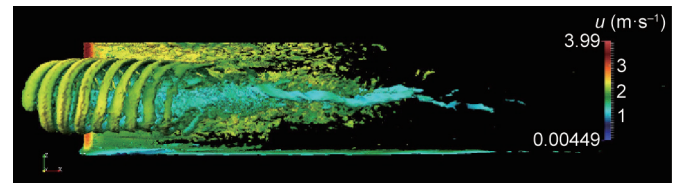


图5. 潮汐涡轮机设备规模的CFD模型(图片由爱丁堡大学的Angus Creech博士提供)。



图6. 潮汐设备测试。(a) THAWT设备的实验室模型(<http://www.kepler-energy.co.uk/>)[41]; (b) 欧洲海洋能源中心的1 MW潮汐设备的中试规模模型(图片Atlantis Resources Corporation提供)[42]。

表1 不同潮堰的地点及相关参数[43,44]

Site	Mean tidal range (m)	Barrage length (km)	Estimated energy production ((GW·h)·a ⁻¹)
La Rance, France	8.5	0.74	533
Annapolis Royal, Canada	7.0	0.60	50
Sihwa, Republic of Korea	5.6	12.70	550
Severn Estuary, UK	7.0	17.00	12 900
Solway Firth, UK	5.5	30.00	10 050
Bay of Fundy, Canada	11.7	8.00	11 700
Gulf of Cambay, India	6.1	25.00	16 400

迪夫的Lavernock Point到滨海韦斯顿的Brean Down, 使用216台额定功率为40 MW的灯泡式水轮机, 总发电量可达8640 MW (即 $17 \text{ (TW} \cdot \text{h)} \cdot \text{a}^{-1}$) [44]。他们最近提出了斯旺西海湾潟湖的方案。该方案利用16台双向灯泡式水轮机, 可产生电力320 MW (即 $0.63 \text{ (TW} \cdot \text{h)} \cdot \text{a}^{-1}$)。该方案已吸引大量的投资者[45]。降低成本和环境问题依然是该技术发展的关键障碍。

2.4. 波浪能

科学家提出了很多波浪能转换器的设计方案(图7 [46–53])。根据参考文献[7], 科学家设计了50多种转换器设备[54–56], 包括振荡浮子式、悬浮鸭式、海蛇式、襟翼式和密闭式等。工程技术人员必须想办法挖掘发电潜能, 提高发电效率, 降低环境影响, 提高材料硬度和持久度, 节约成本, 保证可持续性。波浪能转换器发电量的理论预测正在通过实验室物理模型研究和现场试验进行验证。现有的实验室设施包括爱丁堡的圆形造波池(FloWave)和上海、普利茅斯、科克、特隆赫姆、根特等地的矩形造波池。波浪能转换器现场试验主要在英国的波浪中心和欧洲海洋能源中心进行。

图7(a) [46]是Salter设计的一款波浪能转换器, 它在波浪中产生类似点头的动作, 利用该动作抽取液压机液体或压缩空气, 然后通过内部的涡轮机把能量转化为电量。现场规模方面, Salter的鸭式波浪能转换器

能以预配置模式布放在海中, 以利用当地的波浪条件。

图7(b) [47]为海蛇式波浪能转换器, 波浪通过仪器使部件伸缩和弯曲从而发电。2004年, 由苏格兰公司海蛇波浪发电有限公司(Pelamis Wave Power) (原名为英国海洋动力传递公司(Ocean Power Delivery))发明的海蛇式波浪能转换器是世界上第一个用于供电的海上波浪能转换器。图7(c) [48]是振荡水柱式波浪能转换器。它以流动的水作为圆筒内的活塞, 当波浪上升时空气被挤压出来; 当波浪下降时, 外部的空气就会被吸进去。流动的空气就会通过圆筒顶部的涡轮机发电。图7(d) [49,50]为Manchester浮子式波浪能转换器, 该转换器由许多像钻头一样的装置组成, 这些装置和半潜的浮子连在一起随着波浪上下浮动, 带动皮带轮控制飞轮旋转, 该飞轮与发电机连接在一起。投入使用后, 这种浮子式波浪能转换器平均可以发电5 MW, 在波涛汹涌的海域使用时可产生更多的电能。Manchester浮子式波浪能转换器的造型简单可靠也容易维护——它所有的元部件都在海面上, 仅浮子和海面接触, 因此它具有很大的吸引力。在极端海况下, 海浪对钻机的损害可通过加水以抑制浮子运动的办法来避免。它可在海面自由漂浮, 发电能力与波浪的流动方向无关。图7(e) [51]为Archimedes波浪摇摆机, 它基于一个拴在海床上的巨大圆柱浮筒建造而成, 并在海面至少6 m以下工作。上部气缸提供浮力, 还包含一个基底气缸, 通过与海浪同

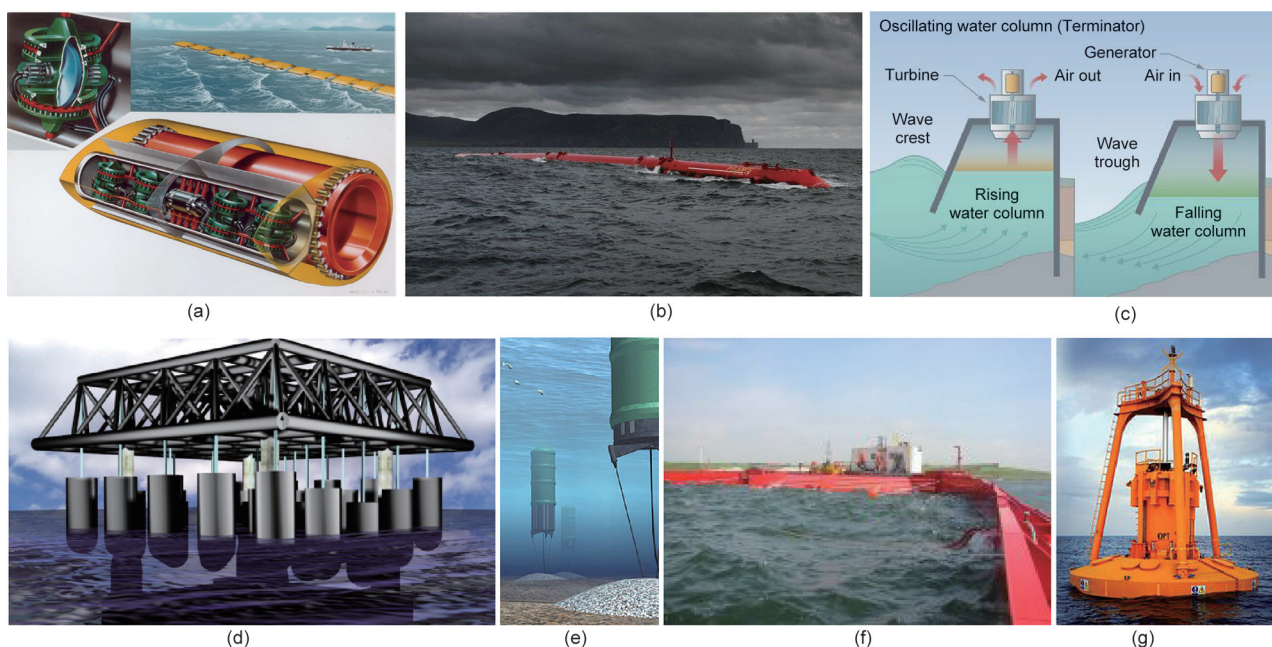


图7. 波浪能转换器实例。(a) Salter的鸭式波浪能转换器[46]; (b) 海蛇式波浪能转换器[47]; (c) 振荡水柱式波浪能转换器[48]; (d) Manchester浮子式波浪能转换器[49,50]; (e) Archimedes波浪摇摆机[51]; (f) Wave Dragon波浪能转换器[52]; (g) 额定输出功率峰值为150 kW的PB150 PowerBuoy波浪能转换器[53]。

步的上下反复运动发电。2007年，AWS海洋能源公司在奥克尼海岸首次安装了这种设备，并花费2.5亿英镑安装了100台AWS设备，每台设备的直径为13 m，高度为35 m，质量为800 t，在直线发电机的帮助下可以产生1 MW的电力[51]。图7(f)为Wave Dragon波浪能转换器，它在高于平均水位的蓄水池中存储海水，然后通过释放海水产生电能。Wave Dragon是一种漂浮式波浪能转换器，它利用系缆索固定位置。图7(g) [53]是PowerBuoy波浪能转换器，我们可以把它看成点吸收式波浪能转换器，通过上下的摆动产生电能，所产生的电能可以借助于水下电缆传输到陆上，当离岸较远时也可以直接利用。PowerBuoy由新泽西彭宁顿的美国海洋能源技术公司(Ocean Power Technologies, OPT)制造。这种设备占地面积小，在波涛汹涌的海域也能工作，并且适用于OPT的海上风电场。安装在PowerBuoy上的传感器可以监控当地的环境状况，并在极端天气情况下自动锁定设备。PowerBuoy已经安装或计划安装在全球范围内的9个位置，以澳大利亚和美国的海岸为主[57]。

最新的模拟方法涉及波浪能转换器阵列的波浪—电缆模型[58]，该模型整合了波浪流体力学、设备反应、动力输出装置、实时控制和电能生产等。这种模拟能预测波动的时间序列、设备反应、活塞动力、累计气压、电源阵列和输出电压大小。

2.5. 海洋热能转换和盐度梯度能

海洋是存储热能的巨大仓库，约吸收太阳辐射热量的15%。海洋热能转换(OTEC)概念利用了海洋表层和深层至少20°C的温度差。该能量转换方法也适用于热带地区水深达1 km的海域[7,12]。热能转换装置最重要的部件是热交换器，包括蒸发器和冷凝器[8]；其运行技术方案有闭式循环、开式循环和混合式循环。尽管小规模闭式循环和开式循环发电站已经在美国(包括夏威夷)、瑙鲁、印度和日本等国家进行测试，但目前热能转换现场试验的费用仍过于昂贵。洛克希德·马丁空间系统公司(Lockheed Martin)估计一座100 MW的OTEC发电站的商业成本约为每千瓦10 000美元[59]。另一种海洋能源来源于海水和淡水融合时由盐度梯度形成的化学势(如河口的盐水楔)。利用盐度梯度发电的技术包括压力延迟渗透(PRO)[60]和反向电渗析(RED)[61]。2009年，科研人员在挪威托夫特[7]建立了一个利用PRO法产生渗透压的5 kW试验工厂，但是后来由于膜污染而停止运行。2014年，利用了RED技术的中试规

模的发电站在荷兰阿夫鲁戴克拦海大坝投入运营[62]。在完全实现RED技术的应用之前还需要解决以下技术问题：水中天然杂质对膜的破坏、粒子的过滤、生物污损、多价离子对系统性能的影响、大量抽水过程对海洋生物的影响和内阻最小化[62]。

2.6. 海洋生物能

海藻类植物(如海藻)是MRE的潜在来源。这类海洋生物可以通过发酵产生甲烷和氢气。循环经济概念主要是指：使用MRE维持近海的水产养殖系统；在养鱼场周围种植海藻以控制富营养化；夏季结束时能够收获海藻；经青贮预处理的海藻可以全年为沼气池提供原料；剩余的MRE可与沼气一起制备氢气，并通过进一步反应实现从沼气到生物甲烷的升级($4\text{H}_2 + \text{CO}_2 = \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$)，使甲烷产量翻倍；可作为绿色能源气并入天然气供应网。从本质上讲，绿色能源气是MRE和海藻中生物能分布的能源载体。可再生热能、天然气汽车中的可再生交通能源和站外可再生电力都可能成为现成的能源载体。海藻类植物的使用为利用陆地生物体可持续地生产生物柴油和生物乙醇的争论提供了一种解决方法，避免了生产食物、燃料和其他土地利用方式之间矛盾。海藻的生长速度非常快，可以作为能源储备库，也可以固碳[63]。因此，为了建立藻类生物燃料的工业化生产，进一步研究和开发是必要的[64]。

3. 存储、先进材料、机器人和信息技术

海洋能源输出很不稳定。由于产生于天气系统，风和海浪本质上具有随机性、季节性，而且服从一定的年际变化特征。潮汐具有周期性循环往复的特点，并受到多个振荡因素的影响，包括半日、全日和大小潮，这都是由地球与太阳和月亮的相对位置引起的。时间尺度从几个小时到几年不等。因此，能量存储至关重要，它可以调整海洋能量的输出。目前正在研究的大容量存储技术包括抽水蓄能装置、电解储氢装置、压缩空气储能装置和代用天然气。例如，电力转气体(power-to-gas)的技术通过电解制氢，然后转化为甲烷再并入天然气供应网中(如第2.6节所述)[65–67]。这种规划远景为材料科学、技术和制造业提供了复杂的可以融合的机会。海洋气候恶劣多变，海水具有腐蚀性，因此科研人员设计了许多不同的海洋设备。例如，在轴流式涡轮机中，悬臂转子的叶片必须具有极强的抗海水腐蚀性，从而催生出

强度更高、抗疲劳性更好和防腐性能更强的新材料。先进的复合材料，如玻璃纤维增强复合材料、碳纤维增强复合材料和玄武岩纤维增强复合材料[68,69]，成为低成本和高耐久性的理想替代材料。图8(a)显示了250 kW涡轮机上长为13 m的单片式风力涡轮机叶片，该部件由ÉireComposites使用玻璃/碳纤维和环氧树脂粉末通过电热陶瓷复合材料加工制成，如图8(b)所示。

使用MRE设施是昂贵的和危险的，面临的问题包括远程监控、利用机器人进行运行支援和预测性维护过程中的实时天气预报。所有问题都是必须要解决的，这样才能确保设备能够在极端海况中安全使用。此外，MRE信息系统无疑是改善信息管理、监控和决策的关键。其中，大数据和高性能计算也是重要且密切相关的。

4. 海洋可再生能源的前景

为了MRE的可持续发展，我们必须解决经济、环境和社会的制约问题。在我们使用MRE设备之前就应先了解它可能产生的不利影响并制订出应对措施。经济制约问题主要是指利用海洋能源发电和利用其他能源发电的相对成本问题，这就需要考虑到资金和经营性成本、碳减排义务、政府补贴和市场需求的波动。环境制约主要是指海洋能源设备的使用可能会改变海流方向、制造噪声和影响海洋多样性等。社会制约涉及就业前景、审美价值、利益相关者的参与度和人民福利等。Bonar等[70]综述了使用海洋能源设备可能造成的社会和生态影响。

4.1. 伦理和法律问题

开采MRE要考虑伦理和法律方面的问题，如海洋能源的开采是否合法，是否符合当地的文化，甚至是宗教观念。另一个问题是，谁应该拥有这些资源呢？如果一个国家开采资源的领域对于另一个国家来说也是可用的，那么这种开采行为合法吗？为了解决这些问题，我们需要有一个伦理或道德方面的标准[71]。纠纷也应通过法律程序来解决。其中一个例子就是印度和孟加拉国自1974年起持续了近40年的孟加拉湾领海争端。印度采用的是等距离原则而孟加拉国采用的是公平原则，两个原则的不同导致了海洋边界划分的重叠和争议。该领海争端直到2014年才通过联合国仲裁法庭得以解决。

4.2. 环境监管、治理和政府政策

国际海洋管理机构管理着全世界60%的海域，这是



图8. 涡轮机叶片先进材料。(a) 长为13 m的单片式风力涡轮机叶片，适用于功率为250 kW的涡轮机；(b)使用玻璃/碳纤维和环氧树脂粉末通过电热陶瓷复合材料加工制成的叶片(图片由Conchúr Ó Brádaigh教授和ÉireComposites提供)。

各个国家边界以外的海域，因此属于共享资源。各国在国际海洋管理上并没有统一的定义和标准，因此在处理事务时只能参照《联合国海洋法公约》(UNCLOS)，该公约包括各种司法管辖权、制度和框架。目前，欧洲联盟(以下简称“欧盟”)正试图制定出更好的国际海洋管理法规，欧盟委员会正在进行关于海洋管理的通信和“蓝色经济”的准备。欧盟指令2014/89/EU明确指出综合海洋政策制定的目标是“保持海洋资源开发的可持续性，保证决策的协调、统一和透明……同时保持良好的环境状态使其符合欧盟指令2008/56/EC的要求”。欧盟的定位是保证海洋的可持续发展，主要关注的主题是：基于法律规则的国际管理，保护海洋生物多样性、气候变化、海洋安全、海上安全和航行自由，提高海事部门的工作效率，以及加深对海洋的认识等。为了完成这些目标，欧盟已经实施了维护海洋资源可持续发展的环境法规，同时制定了一系列推动可持续性蓝色经济发展的政策。

所有海洋位置的开发都需要得到许可。但因为存在大量不同的许可方式和许可流程，所以具体的许可事项取决于项目的规模和涉及的国家。大规模项目的部署更容易得到许可，但测试中心就不太一样了(其中一些需要签署提前同意协议)。开发商抱怨监管机构和复杂的许可流程(包括环境影响评估)会导致项目延迟，并成为开发MRE的障碍[73]。所有获得许可的方式中，一站式模式似乎是最有效的[73]。在苏格兰，开发商可以通过向苏格兰海洋许可运营团队(MS-LOT)提交申请来获得海洋能源开采的同意书/许可证。MS-LOT遵循可持续海洋规划原则提供一站式的申请流程[74]。博弈论[75]可以改善许可流程，参与者包括开发商、能源公司、政府和当地的社会团体。

4.3. 经济制约

度电成本(LCOE)可定义为寿命期内的总成本与总发电量的比值，它表示了给定电力来源在寿命期内的单

位电力成本的净现值。表2 [76,77]列出了英国在2010年确定的一系列能源的LCOE。同时, Allan等[78]在2011年估计了陆地风能发电、海上风能发电、潮汐能发电和波浪能发电的LCOE分别为每兆瓦时54.4英镑、每兆瓦时81.6英镑、每兆瓦时81.3英镑和每兆瓦时189.7英镑, 而联合循环燃气涡轮机发电、压水反应堆发电、粉状燃料发电和带碳捕集与封存技术的燃煤发电的LCOE分别为每兆瓦时34.7英镑、每兆瓦时40.2英镑、每兆瓦时26.2英镑和每兆瓦时44.8英镑。不同的评估结果表明, 要成功开发MRE, 降低成本至关重要。政府和私营企业支持MRE行业很重要, 但未来政府补贴的不确定性和私营部门投资的匮乏将会阻碍MRE的开发。潮汐能设备研发需求导致供应产业链的各个部门都在致力于降低成本和提高可靠性, 其中包括先进材料、制造、安装、动力输出装置和能量储存等方面。

表2 2010年英国一系列能源的度电成本(LCOE)预测[76,77]

Energy production	LCOE (£·(MW·h) ⁻¹)
Natural gas turbine without carbon capture	55–110
Natural gas turbine with carbon capture	60–130
Biomass	60–120
New nuclear	80–105
Onshore wind	80–110
Coal with carbon capture	100–155
Solar farms	125–180
Offshore wind	150–210
Tidal power	155–390

4.4. 环境制约

MRE的发展受限于可供参考的精确的环境数据的缺乏和预测模型不确定性的传播, 这里的预测模型可以用于估算发电功率及其对海洋生态系统的影响。要获取现场数据非常困难而且费用昂贵。流域尺度上设备交互的影响需要被进一步理解; 而且, 除非获得设备安装后的监测活动数据, 否则海上发电站和设备农场的长期生态副作用也不得而知[70]。MRE设备可以改变局部流体动力学, 影响堵塞、旁路涌流、尾流、混合、湍流、沉积物运移、沿岸沉积物流、冲刷、浊度、海底形态、生物多样性、食品供应和水质等[70]。可再生能源设备基础和支持结构可以作为人工礁来提高生物多样性, 但也可能会吸引入侵物种。生物淤积可改善物种丰度, 但也会导致更高的沉积率和富营养化, 而防淤积的化学药品可能会对特定的物种产生毒害作用。有人担心某些鱼类和海洋哺乳动物可能会与旋转的转子叶片相撞, 而较低的能见度和高能区域更加剧了这种危险[70]。我们急需对长期接触噪声、电磁辐射和被迫离开原居住地环境的海洋动物健康进行研究。

4.5. 社会制约

公众对可再生能源的支持(基于当地就业、更便宜的电力、能源安全性和更低的碳排放)和规划申请的低成功率(基于视觉效果、对气候变化的漠视、防止海洋变成工业区的希望以及对旅游、航行、渔业、房价、娱乐和社会凝聚力的损害等原因)之间存在着“社会差距”[70]。规划和决策过程可能会因为公众参与度不高而屡遭反对。这个问题最好通过加强所有利益相关者之间的沟通和参与度来解决, 尽管协商过程中需要付出的代价和产生的成本可能更高。

4.6. 可持续性评价

在MRE的发展背景下, 可持续发展必须实现经济、社会、环境和制度功能的一体化。一套可持续性评估应该识别影响的来源, 设置基准和目标, 并注意潮汐能资源的充分性、能源供应及相关服务的可获取性、能源的生产率、灾害后的恢复力, 以及不同用户和供应商之间的公平性[79]。这里, 充分性可以视为海洋盆地的容量能满足各种能源需求的能力(包括生态系统的要求和发电需求)。可获取性与不同利益相关者群体要求的资源可用性有关。生产率涉及将海洋能源转化为经济实用的电能。恢复力是衡量海洋系统对变化的缓解和适应能力。公平性是指对不同客户与供应商之间MRE资源分配的公平性。可持续性指标应进行系统的选择, 目的是创建一个逻辑结构良好的潮汐系统可持续性评估框架。过程分析方法(PAM)可提供合适的整体分析[80], 它检查了可持续发展的不同领域之间的权衡取舍, 如经济发展、环境绩效和社会福利, 从而更好地管理和开发MRE资源。

5. 总结

海洋蕴藏着巨大的能量, 研究开采MRE的新技术是非常值得的。它可以为我们提供源源不断的能源, 保证能源安全, 减少因燃烧化石燃料引起的碳排放。本文简要介绍了如何从海上风电、潮流、洋流、潮差、波浪能、海洋热能和盐度梯度中获得MRE, 以及如何从藻类植物中得到生物能源。全世界研发活动聚焦于如何解决在开采MRE时遇到的技术、经济、社会和环境等方面的问题。当然, 在成本降低、能源存储、先进材料、机器人、信息学、投资、许可与批准程序和海洋管理等方面还需进一步的努力。我们面临的挑战之一就是如何可持续性、可靠地、经济有效地开采MRE, 以实现利用MRE为整个城市供应能源。在这次技术革新过程中, 我们需

要新一代有智慧、有胆识的工程师们来迎接这一挑战。

最后，笔者想用莎士比亚的话来结束本文（节选自创作于1599年的戏剧《裘力斯·凯撒》）：

人生潮起潮落，
若能把握机会必定能马到成功。
错过则困于浅滩与苦楚。
我们正漂浮于这样的茫茫大海中。
我们必须把握住潮涨的时刻，
否则眼前的幸运将随波远离。

致谢

笔者感谢Paul Bonar, Angus Creech, Maggie Creed, Markus Mueller, Mark Linne, Mathieu Lucquiaud, Conchúr Ó Brádaigh, Stephen Salter, Vengatesan Venugopal, Robin Wallace, Harry van der Wiejde (英国爱丁堡大学), Gillian Bruton, Tony Lewis, Jerry Murphy, Brian Ó Gallachóir (爱尔兰考克大学), Mike Hartnett (爱尔兰国立高威大学), Frederic Dias (爱尔兰都柏林大学), Dan Toal (爱尔兰利默里克大学), John Ringwood (爱尔兰国立梅努斯大学), Tom Adcock, Guy Houlisby, Sena Serhadlioglu, Richard Willden (英国牛津大学)和Scott Draper (澳大利亚西澳大学)，他们为本文的写作提供了大量帮助。笔者同时也很感谢所有审稿专家为本文提供的意见和指正。笔者是爱尔兰海洋可再生能源(MaREI)SFI中心的科学咨询委员会主席(MaREI)。

References

- [1] International Energy Agency. World energy outlook 2012. Paris: International Energy Agency; 2012.
- [2] International Energy Agency. World energy outlook special report 2015: energy and climate change. Paris: International Energy Agency; 2015.
- [3] National Oceanic and Atmospheric Administration. National Centers for Environmental Information, State of the Climate: Global Analysis for July 2015 [Internet]. 2015 Aug [cited 2016 Mar 4]. Available from: <http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201507>.
- [4] Gehm R. Lund University runs truck diesel engines on gasoline to boost efficiency, reduce emissions [Internet]. 2014 Mar 18 [cited 2016 Mar 4]. Available from: <http://articles.sae.org/12892/>.
- [5] International Energy Agency. Technology roadmap: carbon capture and storage. Paris: International Energy Agency; 2013.
- [6] IEA Renewable Energy Working Party. Renewable energy... into the mainstream. Sittard: Novem; 2002.
- [7] Lewis A, Estefen S, Huckerby J, Lee KS, Musial W, Pontes T, et al. Ocean energy. In: Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Seyboth K, Matschoss P, Kadner S, et al., editors Renewable energy sources and climate change mitigation: Special report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press; 2012. p. 497–534.
- [8] Krewitt W, Nienhaus K, Kleßmann C, Capone C, Stricker E, Graus W, et al. Role and potential of renewable energy and energy efficiency for global energy supply. Dessau-Roßlau: Federal Environment Agency (Umweltbundesamt); 2009 Dec. Report No.: (UBA-FB) 001323/E.
- [9] Capps SB, Zender CS. Estimated global ocean wind power potential from

- QuikSCAT observations, accounting for turbine characteristics and siting. *J Geophys Res* 2010;115(D9):D09101.
- [10] Rogner HH, Barthel F, Cabrera M, Faaaj A, Giroux M, Hall D, et al. Energy resources. In: United Nations Development Programme, United Nations Department of Economic and Social Affairs, World Energy Council. World energy assessment: energy and the challenge of sustainability. New York: UNDP; 2000. p. 135–72.
- [11] Sims REH, Schock RN, Adegbululge A, Fenhann J, Konstantinaviciute I, Moomaw W, et al. Energy supply. In: Metz B, Davidson OR, Bosch PR, Dave R, Meyer LA, editors Climate change 2007: mitigation of climate change. New York: Cambridge University Press; 2007. p. 251–322.
- [12] Charlier RH, Justus JR. Ocean energies: environmental, economic and technological aspects of alternative power sources. Amsterdam: Elsevier Science Ltd.; 1993.
- [13] Mørk G, Barstow S, Kabuth A, Pontes MT. Assessing the global wave energy potential. In: Proceedings of OMAE2010: 29th International Conference on Ocean, Offshore Mechanics and Arctic Engineering: Volume 3; 2010 Jun 6–11; Shanghai, China. New York: ASME Press; 2010. p. 447–54.
- [14] Nihous GC. A preliminary assessment of ocean thermal energy conversion resources. *J Energy Resour Technol* 2007;129(1):10–7.
- [15] Skråmestø ØS, Skilhagen SE, Nielsen WK. Power production based on osmotic pressure. In: Proceedings of Waterpower XVI; 2009 Jul 27–30; Spokane, WA, USA; 2009.
- [16] Salter SH. Correcting the under-estimate of the tidal-stream resource of the Pentland Firth [CD-ROM]. In: Proceedings of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference: EWTEC 2009; 2009 Sep 7–10; Uppsala, Sweden. Uppsala: Uppsala University; 2009.
- [17] Joint Nature Conservation Committee. Laminaria hyperborea forest with Echinus esculentus and Palmaria palmata., Meikle Spiker, Dunbar, Paul Brazier [Internet]. [cited 2015 Feb 20]. Available from: <http://www.jncc.gov.uk/Marine/biotope.aspx?biotope=JNCCMNCR00001957>.
- [18] Ocean Renewable Energy Group (OREG). Charting the course: Canada's marine renewable energy technology roadmap [Internet]. Halifax: OREG; 2011 [cited 2016 Mar 20]. Available from: http://www.marinerenewables.ca/wp-content/uploads/2012/09/MRE_Roadmap_e.pdf.
- [19] Energy Technologies Institute, UK Energy Research Centre. Marine energy technology roadmap 2014 [Internet]. Loughborough: Energy Technologies Institute; 2014 [cited 2016 Mar 20]. Available from: <http://www.eti.co.uk/wp-content/uploads/2014/04/Marine-Roadmap-FULL-SIZE-DIGITAL-SPREADS-.pdf>.
- [20] Marine Renewables Canada. Marine renewable energy in Canada & the global context: state of the sector report—2013 [Internet]. [cited 2016 Mar 20]. Available from: <http://www.marinerenewables.ca/wp-content/uploads/2012/11/State-of-the-Canadian-MRE-Sector-20131.pdf>.
- [21] Day AH, Babarit A, Fontaine A, He Y-P, Kraskowski M, Murai M, et al. Hydrodynamic modelling of marine renewable energy devices: a state of the art review. *Ocean Eng* 2015;108:46–69.
- [22] Khan MJ, Bhuyan G, Iqbal MT, Quaiocoe JE. Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: a technology status review. *Appl Energ* 2009;86(10):1823–35.
- [23] Drew B, Plummer AR, Sahinkaya MN. A review of wave energy converter technology. *P I Mech Eng A-J Pow* 2009;223(8):887–902.
- [24] Adcock TAA, Draper S, Nishino T. Tidal power generation—a review of hydrodynamic modelling. *P I Mech Eng A-J Pow* 2015;229(7):755–71.
- [25] AMSC. SeaTitan™ 10 MW wind turbine [Internet]. [cited 2016 Feb 20]. Available from: <http://www.ams.com/documents/seatitan-10-mw-wind-turbine-data-sheet/>.
- [26] Fichaux N, Beurskens J, Jensen PH, Wilkes J. UpWind: design limits and solutions for very large wind turbines. 2011 Mar. Contract No.: 019945 (SES6).
- [27] Guedes Soares C, Bhattacharjee J, Karmakar D. Overview and prospects for development of wave and offshore wind energy. *Brodogradnja* 2014;65(2):87–109.
- [28] Pugh D, Woodworth PL. Sea-level science: understanding tides, surges, tsunamis and mean sea-level changes. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press; 2014.
- [29] Serhadlioglu S, Adcock TAA, Houlisby GT, Draper S, Borthwick AGL. Tidal stream energy resource assessment of the Anglesey Skerries. *Int J Mar Energ* 2013;3–4:e98–111.
- [30] Neill SP, Jordan JR, Couch SJ. Impact of tidal energy converter (TEC) arrays on the dynamics of headland sand banks. *Renew Energ* 2012;37(1):387–97.
- [31] BBC News. Largest tidal power device unveiled [Internet]. 2010 Aug 12 [cited 2016 Feb 20]. Available from: <http://www.bbc.co.uk/news/uk-scotland-highlands-islands-10942856>.
- [32] Snieckus D. Atlantis' Solon-K turbine emerges out of a high tide [Internet]. 2012 Nov 5 [cited 2016 Feb 20]. Available from: http://www.rechargenews.com/news/wave_tidal_hydro/article1279366.ece.
- [33] Barker P. OpenHydro's tidal technology is being tested at EMEC [Internet]. [cited 2016 Feb 20]. Available from: <http://www.seavision.org.uk/article/new-technologies/openhydros-tidal-technology-being-tested-emec>.
- [34] Kepler Energy [Internet]. [cited 2016 Feb 20]. Available from: <http://www.keplerenergy.co.uk/>.
- [35] Salter SH, Taylor JRM. Vertical-axis tidal-current generators and the Pentland Firth. *P I Mech Eng A-J Pow* 2007;221(2):181–99.
- [36] Ocean Renewable Power Company (ORPC), USA. Chain of Horizontal Gorlov turbines being installed in Cobscook Bay, Maine, USA [Internet]. 2012 Sep 1

- [cited 2016 Feb 20]. Available from: https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AChain_of_Horizontal_Gorlov_Turbines_in_Maine.png.
- [37] BioPower Systems. bioSTREAM™ [Internet]. San Francisco: BPS Energy Inc.; c2013 [cited 2016 Feb 20]. Available from: <http://www.biopowersystems.com/biostream.html>.
- [38] Minesto. Technology development [Internet]. [cited 2016 Feb 20]. Available from: <http://minesto.com/technology-development/>.
- [39] EMEC. Tidal devices [Internet]. Stromness: European Marine Energy Centre (EMEC) Ltd.; c2016 [cited 2016 Feb 20]. Available from: <http://www.emec.org.uk/marine-energy/tidal-devices/>.
- [40] Lewis MJ, Neill SP, Hashemi MR, Reza M. Realistic wave conditions and their influence on quantifying the tidal stream energy resource. *Appl Energy* 2014;136:495–508.
- [41] Szondy D. Kepler Energy reveals plans for tidal energy scheme in Bristol Channel [Internet]. 2015 Jul 5 [cited 2016 Feb 20]. Available from: <http://www.gizmag.com/kepler-energy-tidal-energy-fence-bristol-channel/38148/>.
- [42] EMEC. Blog: Atlantis resources testing next generation tidal turbine power train with ORE Catapult [Internet]. 2016 Jan 8 [cited 2016 Feb 20]. Available from: <http://www.emec.org.uk/blog-atlantis-resources-testing-next-generation-tidal-turbine-power-train-with-ore-catapult/>.
- [43] Boyle G. Renewable energy: power for a sustainable future. 3rd ed. Oxford: Oxford University Press; 2012.
- [44] Xia J, Falconer RA, Lin B, Tan G. Estimation of annual energy output from a tidal barrage using two different methods. *Appl Energy* 2012;93:327–36.
- [45] Waters S, Aggidis G. Tidal range technologies and state of the art in review. *Renew Sust Energy Rev* 2016;59:514–29.
- [46] Edinburgh Wave Power Group [Internet]. 2009 Dec 11 [cited 2016 Feb 20]. Available from: <http://www.homepages.ed.ac.uk/v1ewave/>.
- [47] Pelamis Wave Energy Converter [Internet]. San Francisco: Wikimedia Foundation, Inc. 2015 Oct 27 [cited 2016 Feb 20]. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Pelamis_Wave_Energy_Converter.
- [48] OpenEI. Marine and hydrokinetic technology glossary [Internet]. [cited 2016 Feb 20]. Available from: http://en.openei.org/wiki/Marine_and_Hydrokinetic_Technology_Glossary.
- [49] Katofsky RE. Ocean energy: technology basics [Internet]. 2008 Jun 1 [cited 2016 Feb 20]. Available from: <http://www.renewableenergyfocus.com/view/3335/ocean-energy-technology-basics/>.
- [50] Manchester Bobber wave power [Internet]. UK: REUK; c2006-16. 2015 Dec 18 [cited 2016 Jan 29]. Available from: <http://www.reuk.co.uk/Manchester-Bobber-Wave-Power.htm>.
- [51] Archimedes Wave Swing machines [Internet]. UK: REUK; c2006-16. 2015 Dec 18 [cited 2016 Feb 20]. Available from: <http://www.reuk.co.uk/Archimedes-Wave-Swing-Machines.htm>.
- [52] Wave Dragon [Internet]. San Francisco: Wikimedia Foundation, Inc. 2015 Mar 15 [cited 2016 Feb 20]. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Wave_Dragon.
- [53] Ocean Power Technologies. File:Optbuoy.jpg [Internet]. 2011 Apr 1 [cited 2016 Mar 4]. Available from: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=19136668>.
- [54] Falcão AFO. Wave energy utilization: a review of the technologies. *Renew Sust Energy Rev* 2010;14(3):899–918.
- [55] Khan J, Bhuyan GS. Ocean energy: global technology development status. Final Technical Report [Internet]. British Columbia: Powertech Labs Inc.; 2009 Mar. Report No.: T0104. [cited 2016 Mar 4]. Available from: http://www.energybc.ca/cache/tidal/annex_1_doc_t0104-1.pdf.
- [56] US DOE. Energy Efficiency and Renewable Energy Marine and Hydrokinetic Database. Washington, DC: Energy Efficiency and Renewable Energy US Department of Energy; 2010.
- [57] Committee on America's Energy Future, National Academy of Sciences, National Academy of Engineering, National Research Council. America's energy future: technology and transformation: summary edition. Washington, DC: The National Academies Press; 2009.
- [58] Forehand DIM, Kiprakis AE, Nambiar AJ, Wallace AR. A fully coupled wave-to-wire model of an array of wave energy converters. *IEEE Trans Sustain Energy* 2016;7(1):118–28.
- [59] Cooper DJ, Meyer LJ, Varley RJ. OTEC commercialization challenges. In: Proceedings of Offshore Technology Conference; 2009 May 4–7; Houston, TX, USA; 2009.
- [60] Loeb S, Norman RS. Osmotic power plants. *Science* 1975;189(4203):654–5.
- [61] Lacey RE. Energy by reverse electrodialysis. *Ocean Eng* 1980;7(1):1–47.
- [62] Schaeztle O, Buisman CJN. Salinity gradient energy: current state and new trends. *Engineering* 2015;1(2):164–6.
- [63] Sayre R. Microalgae: the potential for carbon capture. *Bioscience* 2010;60(9):722–7.
- [64] Singh A, Nigam PS, Murphy JD. Mechanism and challenges in commercialisation of algal biofuels. *Bioresour Technol* 2011;102(1):26–34.
- [65] Allen E, Browne J, Hynes S, Murphy JD. The potential of algae blooms to produce renewable gaseous fuel. *Waste Manag* 2013;33(11):2425–33.
- [66] Ahern EP, Deane P, Persson T, Ó Gallachóir B, Murphy JD. A perspective on the potential role of renewable gas in a smart energy island system. *Renew Energy* 2015;78:648–56.
- [67] Murphy JD, Drosog B, Allen E, Jerney J, Xia A, Herrmann C. A perspective on algal biogas. *IEA Bioenergy*; 2015.
- [68] Kennedy CR, Leen SB, Ó'Brádaigh CM. A preliminary design methodology for fatigue life prediction of polymer composites for tidal turbine blades. *P I Mech Eng L-J Mat* 2012;226(3):203–18.
- [69] Flanagan T, Maguire J, Ó'Brádaigh CM, Mayorga P, Doyle A. Smart affordable composite blades for tidal energy. In: Proceedings of the 11th European Wave and Tidal Energy Conference EWTEC2015; 2015 Sep 6–11; Nantes, France; 2015. p. 08A2-3-1–8.
- [70] Bonar PAJ, Bryden IG, Borthwick AGL. Social and ecological impacts of marine energy development. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;47:486–95.
- [71] Rachels J, Rachels S. The elements of moral philosophy. 6th ed. Boston: McGraw-Hill; 2010.
- [72] Directive 2014/89/EU of the European Parliament and of the Council of 23 July 2014 establishing a framework for maritime spatial planning. (2014).
- [73] O'Hagan AM. A review of international consenting regimes for marine renewables: are we moving towards better practice? In: Proceedings of the 4th International Conference on Ocean Energy; 2012 Oct 17–19; Dublin, Ireland; 2012.
- [74] Marine Scotland. Marine Scotland licensing and consents manual, covering marine renewables and offshore wind energy development. Hampshire: ABP Marine Environmental Research Ltd.; 2012 Oct. Report No.: R.1957.
- [75] von Neumann J, Morgenstern O. Theory of games and economic behaviour. 60th Anniversary Commemorative edition. Princeton: Princeton University Press; 2007.
- [76] Mott MacDonald. UK electricity generation costs update [Internet]. Brighton: Mott MacDonald; 2010 Jun [cited 2016 Feb 20]. Available from: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/65716/71-uk-electricity-generation-costs-update-.pdf.
- [77] Cost of electricity by source [Internet]. San Francisco: Wikimedia Foundation, Inc. [cited 2016 Feb 20]. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Cost_of_electricity_by_source.
- [78] Allan GJ, Gilmartin M, McGregor PG, Swales K. Levelised costs of wave and tidal energy in the UK: cost competitiveness and the importance of “banded” renewables obligation certificates. *Energy Policy* 2011;39(1):23–39.
- [79] Wu H, Darton RC, Borthwick AGL, Ni JR. Defining and measuring river basin sustainability: a case study of the Yellow River. In: Brebbia CA, editor Proceedings of the 8th International Conference on River Basin Management; 2015 Jun 17–19; A Coruña, Spain; 2015.
- [80] Chee Tahir A, Darton RC. The Process Analysis Method of selecting indicators to quantify the sustainability performance of a business operation. *J Clean Prod* 2010;18(16–17):1598–607.