

国外大型风力机技术的新进展*

李 晔^{1,2}

- (1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240;
2. 上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240)

摘要: 为更好地了解国外大型风力机技术,促进国内大型风力机的发展,对近年来国外大型风力机设计技术的革新做出一个较为综合的评述,不仅涵盖陆上水平轴风力机,也将评述海上漂浮式风力机、垂直轴风力机、高空风力机以及带加速罩的风力机等技术的新进展。评述包括设计原理、经济效益、环境影响等综合评估因素,力求对新技术做出较为完整的解释。

关键词: 大型风力机; 海上漂浮式风力机; 高空漂浮式风力机; 垂直轴风力机; 带加速罩的风力机

中图分类号: TK83; O355 **文献标志码:** A

DOI: 10.3879/j.issn.1000-0887.2013.10.001

引 言

风力发电是新能源中开发较早、应用较广的可再生清洁能源。风力发电机被统称为风力机,由于其基本工作原理较为简单、制造技术也不复杂,人们在上世纪中叶便开始考虑如何将风力机产业化。而后,随着风力发电技术的成熟,制造成本和发电成本也不断下降,加上石油价格的上升以及各国政府的政策扶植,风能资源的开发利用逐步得到了发展。尤其到上世纪90年代,随着科学技术的进步,风力发电从可再生能源中脱颖而出,成为最具有工业开发价值的一种新能源。

2001年以来,全球每年风电装机容量增长速率为20%~30%,世界风电正以迅猛的速度发展。总体来说,国外风力机的设计以降低成本和电价为原则,风力机尺寸越来越大,设计理念日新月异。风力机的单机功率已经从30年前的50 kW达到目前的5 MW以及计划中的10 MW^[1-2]。风力机的设计也从千奇百怪的方案减少至三叶片或者两叶片水平轴以及少数垂直轴共存的状态,近几年又慢慢出现了海上或者空中漂浮式风力机。

对于起步较晚的中国风能行业,上述的新变化带来了许多机遇与挑战,也提供了在技术上跻身世界一流水平的良好契机。为此,首先必须了解和分析国外最新的风力机技术进展。本文将对近年来国外大型风力机设计技术的革新做出一个较为综合的评述,包括设计原理、经济效益、环境影响等综合评估因素。本文将先评述大型风力机的基本技术,然后再讲解一些不同形式的大型风力机,包括海上漂浮式风力机、高空风力机、垂直轴风力机、带加速罩风力机,最后评述大型风力机风电场问题。需要说明的是,本文所讨论的大型风力机主要指的是兆瓦级的风

* 收稿日期: 2013-09-09; 修订日期: 2013-09-23

作者简介: 李晔(1977—),男,浙江人,博士,博士生导师(E-mail: ye.li.ocean@gmail.com)。

力机.此外,由于国外新出现的一些风力机术语没有统一的中文翻译,笔者将在括号中保留英文原文.

1 大型风力机技术概述

由于巨大的潜在风能资源和风力机使用量的不断增加,风力机的单机功率以几何级数上升,不少学者对风力机的尺寸与功率之间的关系进行了相关分析^[3-5].这里,本文从最基本的无量纲理论分析方法开始^[3].假设一个风力机的尺寸系数是 x ,那么面积系数就是 x^2 ,速度系数就是 x^3 .不过由于风速一般是遵循 $1/7$ 次幂定律的,如果认为风速和风力机尺度是线性的,那么风力机功率的系数就是

$$P = ax^2(x^{1/7})^3 = ax^{2.42}, \quad (1)$$

其中 a 是一个常数.

另一方面,我们对实测的统计数据进行分析(图1),功率和尺度的关系大约可以表示成为以下经验公式:

$$P = 0.1215 D^{2.23}. \quad (2)$$

由实测数据所得的经验公式(2)的结论和理论推算的公式(1)十分接近,其中 $a = 0.1215$.不过,由经验公式(2)是基于3 MW 以下的风力机得到的.所以,当讨论大型风力机的时候,本文继续采用式(1)的无量纲方法进行理论分析.简单的说,风力机的直径增加50%,那么功率就可以增加165%.当然,对于是否真的要把风力机做得超级大,另一个要考虑的问题就是成本.可以假设成本和重量成正比而重量和体积成正比,也就是说成本是 x^3 ,那么单位造价(成本除以功率)就可以被写成 $x^{0.58}$,这样一来,当直径增加后,单位功率的造价就增加26%.当然,这只是非常粗略的估算,并且只考虑风轮的基本尺寸,并没有考虑大型风力机材料的变化以及人工的不同等因素.

有一些研究机构做了比较系统化的估算,例如美国国家可再生能源实验室的新型风力机系统零件研究计划^[5].其研究具体地考虑了风力机各个零件的特性、开发研究方法的不同、政府的政策、对环境的影响、经验的作用等等.其研究显示,在理想的情况下,大型风力机还是比小风力机经济性好.简单地说,当风力机尺寸变大以后,风轮单位价格是增加的,但是安装、运营、塔架等单位价格都降低了(图2).当然,这是在人们对大型风力机的技术完全掌握的前提下.

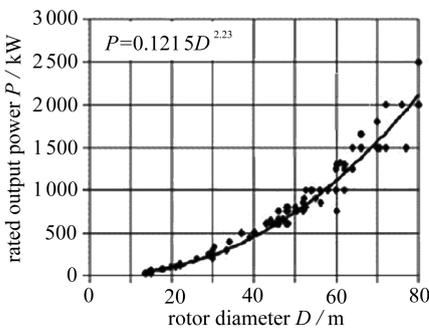


图1 风力机功率和尺度关系(统计数据)^[4]

Fig.1 Wind turbine power vs. scale
(statistical data)^[4]

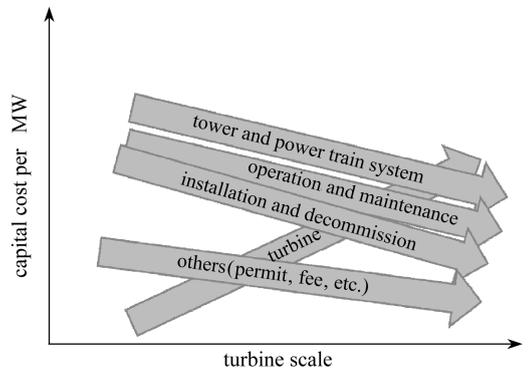


图2 大型风力机单位成本和尺度关系

Fig.2 Large wind turbine cost of
electricity vs. scale

实际上,企业在把风力机尺度变大这方面表现得更为乐观.自 2005 年第一台 5 MW 的风力机在欧洲投入使用后,人们就很快开始构想更大的风力机,并且预测 10 年内便会有 10 MW 的风力机出现^[6].很多企业都有兴趣将他们的风力机做大,认为大型风力机能更好的利用塔架、发电机以及风力机用地等等(表 1).当然,中国国内的企业,例如金风华锐以及国电联合动力都在对 10 MW 左右的风力机进行研究,不过 6 MW 及以上的风力机设计都是以和国外合作设计为主.然而,目前还是没有 10 MW 的风力机下线,主要还是技术上的问题没有解决.诸如,叶片的二维/三维气弹大变形,发电机重量增加造成的稳定性问题等等,都还有待时日解决.另外,由于欧美的经济形势下滑,对可再生能源的投入也大大降低,这也造成了对大型风力机这样不成熟技术投资的力度大幅下降,没有企业、国家敢于大步前进.这也造成了 10 年来,还是没有超过 10 MW 的风力机投入运营的原因之一.

表 1 国外计划中和设计中的大型风力机(截止 2011 年)

Table 1 Examples of ongoing large wind turbine projects (till 2011)

company	power P /MW	note
Clipper Wind Power	10	Britannia-under process
American Superconductor	10	Sea Titan-under process
Areva	10	under design
Repower	6	in production
Enercon	6	in production

总之,大型风力机还处于研制过程中.主要的技术障碍还是由于力学中的非线性问题造成的.它不仅仅影响叶片和风轮,也对塔架、发电机、传动部分等等造成很大的影响.相对而言,目前人们对叶片的研究更加深入一些,所以,如何在降低除叶片外其他部件成本的同时提高其可靠性,可能比只专注于叶片开发上更加行之有效.进一步地说,把整个风力机的各个部件作为一个系统来综合考虑将更加快风力机开发的步伐.

2 海上风力机技术

第一节的论述基本上涵盖了风轮和陆上风力机.其实,对大型风力机的使用,最大的受益者并不是陆上风力机,而是海上风力机.由于开阔的地理环境和特殊的海洋气候,海上的风速以及风资源分布比陆上丰富许多.全球 90% 以上的海上风电装机容量来自欧洲的英国、丹麦、荷兰、瑞典、爱尔兰、德国等国家.据世界风能协会 2008 年报道,英国是海上风能领先国家,也是世界上拥有海上风力发电站最多的国家,运行的 7 个风力发电场,能力达到 530 MW,并且有 6 个项目(总计 1.2 GW)在建设中,2012 年又增加了 900 MW.英国海上风力发电场总装机容量达到 598.4 MW,已经超过丹麦的 415.75 MW,位居世界海上风能装机容量第一位^[7].自 1991 年第一台海上风力机在丹麦投放使用以来,全世界已经有近 900 台海上风力机投入使用.总的来说,海上风力机的容量一般要比同等的陆上风力机大很多,最小的也在 2 MW 以上.更重要的是,尽管风力机叶片基本设计原理和陆上风力机相近,但风力机系统的设计理念却有着很大的区别.

最明显的区别就是风力机底座,在浅滩的情况下(0~30 m),主要的底座设计还是跟陆地风力机底座较为类似的重力式桩墩(gravitational foundation)或负压桶基(suction bucket)一类的技术,人们还可以借鉴陆地风力机的设计经验.而在过渡水深中(30~60 m),人们便开始借

鉴石油平台的技术^[8],或者使用早期陆上风力机的塔架设计^①.比较常见的设计有三脚架基础(tripod tube),带缆线的单桩结构(guyed tube),桁架基础(space frame/jacket),桁架与单桩结合的基础(talisman)等等.

在深水区的设计方面,海上风力机的底座设计与陆上风力机的底座设计是截然不同的.目前,大多数风力机设计者认为深海区应该使用漂浮式的技术.不过,漂浮式风力机的底座设计理念到现在还在不断地探索当中.自本世纪初,人们已经提出了上百种不同方案.不过,它们和过渡水深设计类似,大部分都是从传统的海上石油平台技术上发展而来,例如:单桩式、半潜式、张力腿平台式等等.而进行过测试的方案只有单桩式(挪威的 Hywind)以及半潜式(美国/葡萄牙的 Principle Power)两种(图3),但尚未彻底商业化.深水海上风力机的底座设计,主要要考量的问题是确保载荷物稳定性、漂浮物稳定性和锚链结构稳定性.最理想的状态是同时实现这3个目标,当然,要完成这项任务是相当艰巨的.所以,不能完全沿袭传统石油平台技术来设计深水海上风力机的底座,研究者还在继续寻找优化的漂浮式海上风力机底座的设计方案.

除底座之外,漂浮式风力机发电机部分的要求和陆上风力机也有不同.其一,由于海上风速较快,所以,叶片的转速也更快.其二,为了让漂浮式风力机漂浮得更好,叶片和塔架被做得更轻,发电机舱室也更轻.所以,人们需要低扭矩、低齿轮转速比^[9]的发电机.因此,不少工程师认为没有齿轮直驱永磁传动的发电机可能会比齿轮传动的发电机更好^[10].



图3 漂浮式海上风力机(左:Hywind;右:Principle Power)^②

Fig.3 Floating offshore wind turbines(left: Hywind; right: Principle Power)

海上风电场的大规模商业化已经迫在眉睫,很多与产业化相关的问题已经摆在议事日程上.由于风电场规模越来越大以及复杂的海况和水文情况,海上风电场的并网系统需要进行更深的研究.除了常规的问题,例如功率稳定性(power stability),电网故障(grid fault)等等,应该更多关注系统可靠性(system reliability),电网体系架构(grid-architecture),电网损耗(grid loss),信息处理等问题.目前,不少国家已经开始了一些前期的分析工作,例如美国^[11-13]、德

① 80年代以及之前,由于人们对风力机的安全性设计比较保守,所以设计的塔架都可以承受远远大于陆上会出现的环境载荷,因此,这些设计大多被摒弃.然而,海上风力机所承受的载荷一般大于陆上的载荷,所以有些早年的设计可以被重新考虑.

② 图片来自 http://en.wikipedia.org/wiki/Floating_wind_turbine

国^[14]和丹麦^[15]等.当然,这些探索性的分析都只仅仅关注并网问题的一、两个方面而已,人们还是需要更系统地更全面地分析.另一方面,更为重要的是人们需要在海上风力机大规模产业化之前,发布相应的规范.

3 其他风力机技术

随着风力机商业化的开进以及风力机功率的增加,许多曾经不被重视的想法又重新回到了人们的视线里,例如:高空风力机、垂直轴风力机以及带有加速罩的风力机.笔者将在这一部分对这几种技术进行讨论.

3.1 高空风力机

风力机进军海上风资源可以被认为是水平方向的挺进,除此之外,人们也开始考虑纵向进军,也就是高空风力机技术.早在 18 世纪末,人们就开始尝试使用高空风力机,不过由于技术不成熟,没有受到大量关注^[16].但是,相对陆地和海上,较为稳定和快速的高空风力资源还是吸引着很多研究者.特别地,最近几年,在传统风力机技术日趋成熟之后,投资者和政府又开始大力关注高空风力机^[17].目前全世界已经有数十家公司在开发高空风力机.主要技术都是以类似风筝的漂浮技术为主(图 4),其风轮的设计原理和早期(20 世纪初)的风力机类似,包括带加速罩的风力机和多风力机系统,升力型和阻力型都有.高空风力机工作高度以数百米较为常见,但也有一些在上千米的高空运行的设计.比较著名的是得到谷歌公司和美国能源部所投资由 Makani 公司开发的悬浮式多风力机系统,其最终产业型号将达到 5 MW,目前还在数十千瓦级的样机试验中^[18].许多科学家都认为高空风力机有很好的前景,可以解决世界能源问题^[19-20].不过,由于成本问题和可靠性问题,政府尚未批准任何大型试验,目前高空风力机尚未被产业化.

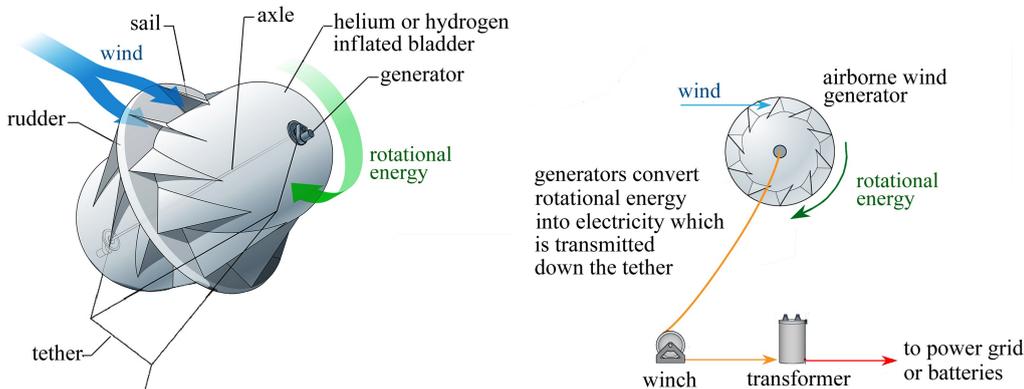


图 4 高空悬浮风力机^③

Fig.4 Airborne high altitude wind turbines

3.2 垂直轴风力机

在 80 年代,垂直轴风力机和水平轴风力机并驾齐驱,可谓都是一时之选.然而,由于价格问题,水平轴风力机胜出,占领了大部分整个市场.目前来说,垂直轴风力机只在小型风力机领域有一席之地.然而,当人们在设计大尺寸风力机的时候,发现巨大的传动系统非常重,它在风轮后造成了不稳定的问题.水平轴风力机的研究开发者们只好继续研究改良的形式,例如增加

③ 图片来自 http://en.wikipedia.org/wiki/Airborne_wind_turbine

塔架的直径,但是这样就大大地增加了成本.为克服这个不稳定的问题,最近,有些研究者又重新想起了垂直轴风力机.垂直轴风力机的优势主要由于其的传动系统在风力机底部,不会对塔架造成影响.特别是,对于海上风力机,即便没有风,波浪也对风力机的稳定性造成了很大的影响.因此,垂直轴风力机这一特点在海上风力机的开发中有更大的优势.例如丹麦的 DeepWind 项目和法国的 INFLOW 项目(图 5)^④.法国的 INFLOW 项目已经制订了详细的实施计划,准备在法国南部外海 50 km 处建设一个 26 MW 的风电场作为试验基地,每台风力机 2 MW 共 13 台,为以后建立更大的风电场作出准备.当然,要真的产业化使用大型垂直轴风力机,研究者还是要解决垂直轴风力机的固有问题,例如启动问题和不均匀扭矩问题等.

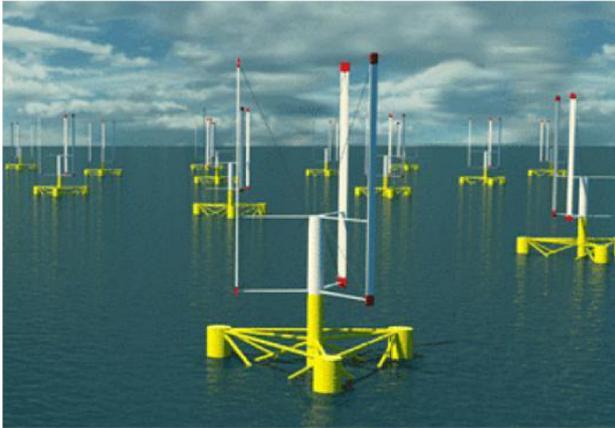


图 5 计划中的 INFLOW 垂直轴风力机海上风电场^[21]

Fig.5 INFLOW-vertical axis offshore wind turbines(under design)^[21]



图 6 计划中的 FlowDesign 风电场^[22]

Fig.6 FlowDesign wind farm(under design)^[22]

3.3 带加速罩(shroud)风力机

在 80 年代,带加速罩的风力机设计已是人们讨论的重点之一.但是,因为其造价较高,没

^④ 这两个项目都是欧盟资助的.主要由丹麦和法国各自领导,但是每个团队中都有不少其他国家的工作人员.

有得到广泛应用.理论上说,由于风力机功率和风速的三次方成正比,加速罩有效地提高来流速度并减少不必要的风力机偏航.当风力机尺度较小的时候,加速罩的成本还是相对较高的,但是,当风力机尺度达到一定程度时,带加速罩的风力机在价格上还是有可能和没有加速罩的风力机一拼高下.这一点对带加速罩的风力机的支持者给予了极大的鼓励,特别是那些开发喷气式飞机发动机的厂商.例如,美国的发动机开发商 FlowDesign 最近得到了美国能源部的大力支持,进一步对带加速罩的风力机设计进行研究(图6).他们目前正在开发百千瓦级的样机,最终的目标是兆瓦级的商业型产品.另外,不少高空悬浮式风力机开发商也在考虑这一技术,希望用充满氦气或者氢气的加速罩作为悬浮的载体并同时加速来流发电,做到一举两得.

4 大型风力机风电场优化布置问题

随着大量风力机的安装以及风力机容量的增加,人们已开始关注风电场分布和风力机在风电场中布置的问题,主要包括力学问题、环境问题和并网问题等.最突出的问题是力学问题,也就是环境流体与风电场的风力机相互作用的力学问题.在风电场中,许多风力机布置在一起,一些风力机将处于其他风力机的尾迹中.对于风电场本身,力学问题便是风电场中上游风力机的尾迹对下游风力机发电机的影响^[23].由于来流通过上游风力机推动风轮旋转时产生动量损失,会在风轮下游形成风速下降的尾迹区.处于尾迹区中的下游风力机来流速度下降,使其性能受到影响,功率输出减小,最终导致整个风电场总的功率输出减小.特别是,今后风电场的占地面积越来越有限,风力机的尺寸越来越大,如何提高整个风电场的发电效率便成了一个亟待解决的问题.此外,上游风力机的尾迹会形成较强的湍流,尾迹的湍流结构对下游风力机的疲劳载荷会产生很大影响,这也是研究人员十分关注的问题之一.当把环境与风电场作为一个整体来看时,风电场本身的运营对周围环境流体(来流、尾迹、横向侧风以及高空边界层)都有着直接的影响.当风电场大到一定程度以后,它对周围大气边界层的影响也会增大,不过对于这个影响目前还没有准确的定量分析方法,研究人员主要采用数值模拟的方法来计算和优化风力机的布置.

对于大型风电场来说,另外一个重要的问题就是风电场并网问题.由于风力机的装机容量变大,整个风电场的瞬间发电量的变化也会较大.所以,并网的高压电线以及其他元器件容量的选择变成了一个复杂的难题.如果容量选择小了,当风速高的时候,只好让风力机叶片顺桨停机,无法发电.如果容量选择大了,很多时候并网设备都没有得到充分利用,使发电成本大大提高.

5 结 语

本文通过对近年大型风力机技术的综述,对大型风力机的发展趋势进行了分析.特别是在风力机的尺寸越来越大后,风力机已经不限于传统的水平轴陆上风力机,海上风力机已经成为了一个国际趋势.同时,过去被忽视的许多技术,例如垂直轴风力机,带加速罩的风力机等,都又被重新重视起来.大型风力机的研发变成了百花齐放的局面,我们力求跟进国外先进水平,可以在国内的研究中有所突破.

致谢 由于笔者许久未用中文写作,国文生疏,加之成文仓促,用词不当,望请见谅.对上海电力学院胡丹梅老师的校对工作表示深深的感谢.

参考文献(References):

- [1] Burton T, Sharpe D, Jenkins N, Bossanyi E. *Wind Energy Handbook*[M]. New York: John Wiley & Sons, Ltd, 2001.
- [2] Manwell J F, McGowan J G, Rogers A L. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*[M]. 2nd ed. John Wiley & Sons, Ltd, 2010.
- [3] Moe G. What is the optimum size for a wind turbine[C]//*Proceedings of the 26th International OMAE Conference*. San Diego, 2007.
- [4] Ewea. The facts[C]//*CD Distributed at the EWEC 2004*. London, 2004.
- [5] Fingersh L, Hand M, Laxson A. Wind turbine design cost and scaling model[R]. NREL Report, 2006.
- [6] Marsh G. Wind turbines;how big can they get? [J]. *Refocus*, 2005, 6(2): 22-24.
- [7] World Wind Energy Association. World wind energy 2008[R]. Report World Wind Energy Association. Bonn, 2009.
- [8] MacAskill A. The beatrice windfarm demonstrator: applying oil and gas expertise to renewable[C]//*2005 Copenhagen Offshore Wind Conference and Exhibition*. Copenhagen, Oct 26-28, 2005.
- [9] DUWIND. Offshore wind energy: ready to power a sustainable Europe[R]. Final report. Concerted action on offshore wind energy in Europe, Dec, 2001, NNE5-1999-562. Duwind 2001. 006. Delft, Netherlands, 2001.
- [10] Poore R, Lettenmaier T. Alternative design study report: WindPACT advanced wind turbine drive train designs study[R]. NREL/SR-500-33196, Golden, CO, USA, 2002.
- [11] Tierney S F, Okie A, Carpenter S. Strategic options for investment in transmission in support of offshore wind development in Massachusetts[R]. Analysis Group Report. Dec, 2009.
- [12] Kempton W, Pimenta F M, Veron D E, Colle B A. Electric power from offshore wind via synoptic-scale interconnection[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, 107(16): 7240-7245.
- [13] Barthelmie R, Hanse O F, Enveoldsen K, Højstrup J, Fradsen S, Pryor S, Larsen S, Motta M, Sanderhoff P. Ten years of meteorological measurements for offshore wind farms[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2005, 127(2): 170-177.
- [14] Tambke J, Poppinga C, von Bremen L, Claveri L, Lange M, Focken U, Bye J A T, Wolff J O. Forecasting 25 GW wind power above north and Baltic sea[C]//*Proceedings of Copenhagen Offshore Wind Conference*. Copenhagen, 2005.
- [15] Sørensen P, Hansen A D, Thomsen K, Madsen H, Nielsen H A, Poulsen N K, Iov F, Blaabjerg F, Donovan M H. Wind farm controllers with grid support[C]//*Large Scale Wind Power Workshop*. Glasgow, 2005.
- [16] Pockock G. *The Aeropleustic Art, or, Navigation in the Air: by the Use of Kites, or Buoyant Sails*[M]. London: Sherwood & Company, 1827.
- [17] Cringely R X. Oh, and we also saved the world: google's energy plan[N]. Weekly Forum, Public Broadcasting Service, Oct 12, 2007.
- [18] <http://www.makanipower.com>.
- [19] Roberts B W, Shepard D H, Caldeira K, Cannon M E, Eccles D G, Grenier A J, Freidin J F. Harnessing high-altitude wind power[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2007, 22(1): 136-144.

- [20] Archer C L, Caldeira K. Global assessment of high-altitude wind power[J]. *Energies*, 2009, 2 (2): 307-319.
- [21] <http://www.inflow-fp7.eu/index.html>.
- [22] <http://arpa-e.energy.gov/?q=arpa-e-projects/mixer-ejector-wind-turbine>.
- [23] Noppenau H. Horns rev 2, time schedule, contract strategy and choice of technology[C]// *Copenhagen Offshore Wind 2005*. Copenhagen, Oct 26-28, 2005.

Status of Large Scale Wind Turbine Technology Development Abroad

LI Ye^{1,2}

(1. *School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, P.R.China;*

2. *State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University,
Shanghai 200240, P.R.China;*)

Abstract: In order to facilitate the domestic large scale (multi-megawatt) wind turbine development in China, the efforts and achievements in the area abroad were reviewed and summarized. Not only the popular horizontal axis wind turbines on-land, but also offshore wind turbines, vertical axis wind turbines, high altitude wind turbines and shroud wind turbines were discussed. It is intended to provide a comprehensive comment and assessment about their basic working principle, economic aspects and environmental impacts.

Key words: large-scale wind turbine; offshore wind turbine; high altitude wind turbine; vertical axis wind turbine; shroud wind turbine