全世界的风电产业所以能够得到快速发展，现代高新技术的发展无疑是最强大的推动力之一，在风电机组技术的发展过程中，都出现过哪些技术特征，目前的发展趋势是什么？在风能的实践应用领域，又出现哪些应用新模式？王承煦、柴建云、张振有几位专家对以上问题分别做了详尽介绍。

科学有序发展风电 建设绿色低碳能源

◯ 王承煦

王承煦

1933年3月生，天津人。1957年毕业于清华大学电机工程系。毕业后在清华电机工程系工作，历任助教、讲师、副教授、教授及教研室主任的职务。讲授《电机学》《电力传动与控制》、《可再生能源发电》等课程，以及指导研究生课题工作。

1981～1983年负责主持水电部重点科研项目——立轴风力发电机组研制。1983～1987年负责主持中国—联邦德国可再生能源利用合作示范项目——风力发电装置研究。

1990～1991年应邀赴德国oldenburg大学物理系可再生能源研究室进行风力柴油联合发电系统研究。

1992～1993年编写《可再生能源发电》教材。1994～1995年编著《风力发电实用技术》书籍。2000～2002年主编专著书籍《风力发电》。

一、世界风电快速发展的原因

现代风力发电的崛起始于上世纪80年代，特别是进入了21世纪以来取得了飞速的进展，已成为在利用可再生能源发电方面发展最快的。从并网风电场的装机容量来看，1999年末全球并网风电机组装机容量为1356万KW，2000年底为1757万KW，到2009年底则为1亿5790万KW。

我国原计划2010年底装机容量达到1000万KW，2020年底达到3000万KW。现在我国在2009年底装机容量已达到2590万KW。世界风力发电如此快速地发展，其原因主要可归纳为以下三个因素：

1．保护环境及可持续发展的要求

风能属于无污染的可再生能源，利用风能发电可以减少以矿物燃料为能源的发电过程中向空气中排放的有害气体，如二氧化碳及硫化物等，从而减少温室效应及酸雨的形成。1992年世界环境及发展大会及其后的“京都议定书”对世界各国在有害气体的排放上都提出了减排的要求及减排的时间表。风能不像矿物燃料能源一样，不会随着其被利用过程储量日趋减少，因此可以说是一种取之不尽、用之不竭的自然能源，从可持续发展的观点看，风能显然是一种可持续利用的能源，并可节约宝贵的矿物燃料资源，实现合理的资源利用。

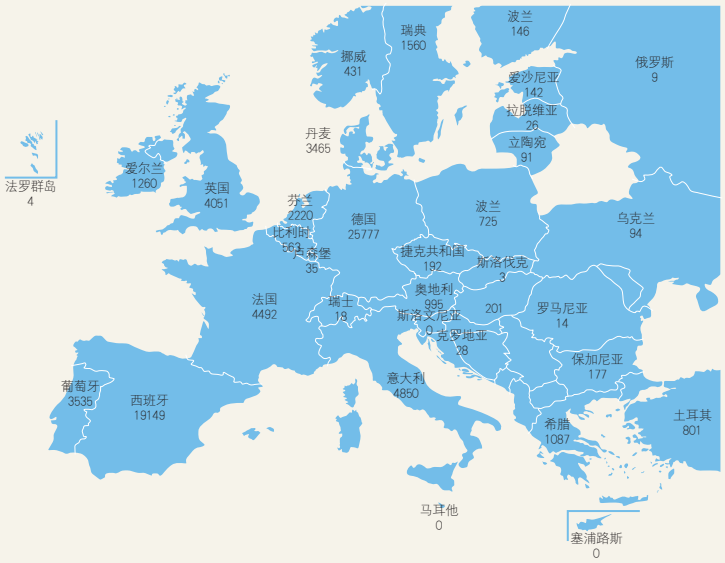
2．现代高新技术发展的促进

上世纪80年代以来，新材料、电力电子技术、通讯及控制理论、计算机应用技术在各个工业领域获得了广阔的应用。这些高新技术与传统的风力发电装置中应用的空气动力学、机械、电机、传动及输配电等技术的结合，逐步发展为集高技术于一体的装置，使风力发电装置的可靠性及效率得到了极大的提高。在此基础上，风力发电装置的制造逐步形成产业化、规模化的一种新兴的绿色能源工业，而规模化、产业化以及商业化则促使风力发电成本的不断降低和风电电价的降低，增强了风电与常规能源发电的竞争力，促使风电得到快速发展。

3．国家扶持政策及优惠措施的实施

为了支持风力发电的发展，世界各国纷纷制定各种法规及优惠措施。在欧洲，丹麦一直执行一套风电价格支持体系，并多年来一直鼓励风力发电设备的私有化与合作化，促使风电设备制造业及风电的应用得到快速发展。德国自1991年开始执行支持风电的政策，鼓励企业与个人投资，

图1：2009年欧洲风电累计装机（单位：MW）



允许风电投资者发出的风电就近上网；各电力公司要投资风电，上网风电电价高出电网平均电价部分可由电力公司在全网的电力用户中分摊。德国按照其所制定的可再生能源法还要求电网营运单位承担风力发电场向电网供电所需的输电电缆费用。在这些政策的激励下，到2000年底德国风电的装机容量达到611万KW，超过美国跃居世界第一位，其发电量可满足国内2.5%的电力需求。此外，英国、西班牙等国也都制定了相应的政策、法规来推动风电的发展，到2009年底，欧洲风电的装机容量已达到7610万KW（详见图1）。

二、当前风电技术发展趋势

1．高可靠性、高效率、高技术含量不断增加的新型风力发电机组不断涌现。

如前所述，风力发电机组是一种集多学科技术于一体的高新技术设备，从过去10年风电技术发展的历程来看，围绕风电技术的新概念、新思路不断涌现。从空气动力学的应用来看，如风轮的输出机械功率先后有定桨距失速调节，变桨距调节，及主动失速调节等，已形成并行发展。从电力电子技术与发电机技术的结合上来看，如双速变极异步发电机中采用的由电力电子器件组成的软并网及高速/低速转换控制装置；变滑差异步发电机转子电流控制器；绕线式双馈异步发电机的变频励磁系统；低速永磁同步发电机的全功率变频器；同步发电机或异步发电机与交—直—交（AC—DC—AC）系统组合等的相继出现，皆极大地提高了风电机组的可靠性、效率及性能。从传动系统的配置上看，除具有齿轮增速的传动系统外，不采用增速齿轮的直接驱动系统日渐增多。这种系统简化了机组的机械传动链，可减少机组的机械损耗，降低运行噪音，减轻维护工作。近年来一种低齿轮速比的传动链系统也在大型永磁同步风力发电装置中出现。

在风力发电机并入电网的技术方面，异步发电机的软并网，同步发电机经变频器并网，高压发电机直接并网都保证了并网的可靠性，减小了对电网的干扰。

从新材料的应用上看，除风轮叶片主要采用玻璃钢合成纤维复合材料外，风力机的整流罩，机舱等部件也趋向于采用玻璃钢复合材料，原因是复合材料质轻，耐腐蚀，耐高强度应力及维护简单，同时风轮叶片也开始使用碳纤维复合材料，以提高风轮叶片的刚度及强度，从而使风电机组的可靠性提高。

从风电机组的运行控制及安全保护上看，计算机控制及网络通讯技术在风电装置主机及分部控制中的应用使风电场得以实现无人值班及机组运行状况的远程监控任务，从而提高了风电场运行的可控性及安全性。从风电机组的运行方式看，兆瓦级以上的机组多采用变桨变速恒频

（VSCF）方式，可以大大提高风电机组的效率，机组每KW的发电量约提高10%~30%。目前大型风电机组的利用率已较10年前提高达95%以上，甚至可达98%或以上。

2．为适应中、大型风电场的建设，并网风力发电机组的单机容量逐步增大。风电制造工业的规模日益扩大，国际化的跨国生产日益增多。

进入上世纪90年代以后，并网风力发电机组的单机容量向大型化的发展异常迅速。增大风电机组的单机容量可使发电成本降低，例如兆瓦级的风电机组的单位KW成本比数百KW级的大约可降低25~30%左右。

目前1.0至3.0MW的陆上风电机组皆已成功实现批量生产，并投入商业化运行。

3．随着风电场建设的日益增多，与风电场建设相关的技术及科学，如风能资源测量及计算评估（包括硬件及软件）；风电场场址选择，风电场内风电机组机位排布（即微观选址）的优化及发电机量计算软件；风机的安全等级标准；风电机组技术性能检验标准及产品的认证等在科学、严谨的指导原则下取得了更充分、更精确、更高效的进展，使风电技术的设计及应用更趋成熟、严谨。

4．随着大型风电机组及并网风电场的快速增多，电网对并网风电机组的并网及网上运行提出了更严格的要求，也就是应满足和适应电网安全运行的要求及风电发电量有功及无功功率输出可调节及预报的要求，也即是目前大家所关注的“低电压穿越”（LVRT），风电功率预报系统问题。所谓低电压穿越就是指当电网发生故障，风电机组并网端电压降低到一定值的情况下，风电机组不脱离电网而继续维持运行，还可以进而为电网系统提供一定的无功支持以帮助电网系统恢复电压的能力。德国Eon对低电压穿越能力提出的要求如2图示，

即：

(1)风电机组具有当并网点电压跌落至20%额定电压时能够保持不脱离电网运行625ms的低电压穿越能力。

(2)风电场并网点电压在发生跌落后3s内能够恢复到额定电压的90%时，风电机组能保持并网运行。

图2：低电压穿越能力曲线

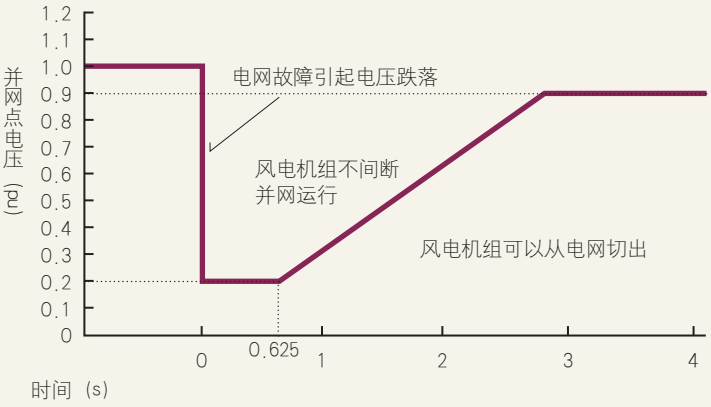
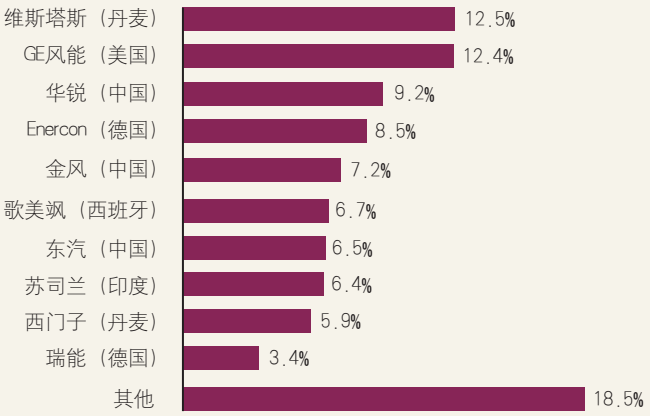


图3：2009年，世界风电机组制造企业排名



5．海上风电发展的步伐加快。各国对海上风电持谨慎乐观，试点推动的态度。

近10年来欧洲一些国家的研究机构，风电机制造厂家，包括政府机构，对发展海上风电给予了很大关注，其原因是气流在海上的流动比在陆地上快而且平稳，也即是海上风力资源较陆地上好。据估算相同装机容量的风电场，在海上比在陆地上年发电量可增加20~50%。其次是欧洲地区人口密度较高，在陆地上建风电场会占用土地或无地可占；欧洲人对自然景观很重视，在海上建风电场对自然景观不会有影响；此外，海上风电场风电机组运转时发出的噪音远离居民地，噪音干扰小。迄今丹麦、英国、爱尔兰、荷兰、瑞典等国已分别建成或正在建造海上风电场。丹麦在离日德兰半岛以西17公里的Horns Rev及Rodsand建造了两座装机容量各为16万KW的海上风电场。

虽然在建成后运行初期出现了故障，但经过排除故障，风电场实现了成功运行。当前为了适应未来海上风电发展的需要，欧洲一些风电机制造厂家正在纷纷研制推出单机容量更大的风电机组。例如丹麦Vestas公司3MW、4MW双馈型风电机组，德国Siemens公司的3.6MW直驱型风电机组，德国Repower公司的5.0~6.0MW双馈型机组，西班牙的Gamesa公司则正在开发研制4.5~5.0MW的机组。此外，Multibrid已研制出具有单级齿轮传动（亦称半直驱）5.0MW机组。现今的问题是哪种风电机组机型更适合海上运行仍在探索中。此外海上风电场的建设和经营费用要比陆上同容量的风电场高出30~40%左右。这主要是因为海上风电机组的基础施工复杂，海底电缆昂贵，机组部件的吊装、运输、维修需特殊的设备以及海上风电场对远程监控数据传送要求更安全、更可靠等因素造成。虽然如此，但从长远来看，海上风电仍被各国谨慎乐观看好，并持试点推动的积极态度。

三、当前我国风电所处的环境与面临的挑战

1．当前我国风电发展正处在大规模高速发展过程中。主要表现在两方面：

⑴风电场建造规模大。

我国已建成的风电场装机容量，到2009年底已达2590万KW，预计今年年底将超过3000万KW，提前完成原定2020年达到的并网风电装机容量目标。国家有关部门已规划制订和已开始启动在甘肃、新疆、内蒙古、河北，江苏等省区建设7个千万KW级大型风电基地；并准备在江苏沿海地带建设20和30万千瓦装机容量的潮间带和近海的海上风电场。到2020年我国并网风电场的装机容量将达到1.5亿KW，也即是10年内将增加1.2亿KW的装机容量。

⑵风电制造工业产能发展快。

自2005年以来我国风电机组制造业，无论是主机装配制造或是关键零部件制造企业皆呈现了快速发展的势头。据2009年的统计，我国风电主机制造企业，大小规模不一的约达70~80余家，2009年的风电机组产能可达1400万KW。据国外资料披露，预计中国风电机组产能约占全球的25~30%。

2．从风电发展的技术层面看，我国风电发展面临的挑战，也即是需思考和解决的问题。主要有以下几方面：

⑴科学、准确勘察和评估我国风能资源。

为了使我国的风电发展立足于更准确翔实的风能资源基础上，应进一步利用现代先进仪器和科技手段对我国陆地及海上风能资源进行更普遍、更准确的勘察，科学地研究其形成机理、特点，可利用性，从而作出综合评估，为我国的风能利用，不仅是针对中、大型并网风力发电，也为离网的中小型风电及风力提水奠定坚实基础。

⑵自主创新，研究开发设计适合我国地理环境，风资源，气候状况及电网结构、特点的风力发电设备。

过去20年风电发展的历程表明，由于新技术、新概念不断融合到风电技术中，风电设备更新的速度很快，每隔3~5年就有新型的风电设备出现。我国在这方面与欧美等国的差距较大，基本上是跟着国外技术及产品的轨迹走。结合我国情况在自主研究开发制造的风力发电设备方面显得力度和深度不够。

实际上我国两大风带（即三北地区及东南沿海地区）的风资源、地理环境、气候状况与欧洲、北美的情况差别较大。我国北方有寒冬低温问题、沙尘问题；南方有台风问题、潮湿盐雾腐蚀问题、防雷电问题。此外，我国风电场（包括已建的和未来将建的）有些处于电网的末端，电网的电压不够稳定，三相负荷不平衡的问题也经常出现。这些因素在风电机组的设计中皆应给予认真的考虑和解决，才能保证风电机组的高可靠性及良好的运行性能和利用率。

我国目前已建风电场中风电机是近几年按许可证生产方式引进的国外设计的机型，这些原型机是按国外风资源及运行环境设计的。按照这样的设计图纸生产的机组，即使局部作了某些修改，其产品在运行中也还是频繁暴露出不少技术问题，尤其是核心技术，不包括在许可证生产协议中。例如风电机组的整机控制系统（包括硬件和软件），一旦出现问题，仍需依靠外方技术人员来解决，而当外方在设备上进行一些技术改进，我们又缺乏研究分析区别对待，而忙于补救，例如对待“低电压穿越”问题。总之，我

国风电机组的研发、设计需要以科学发展观为依据，用自主创新的精神，洋为中用结合中国实际，用新思维、新概念才能不断攀登风电设备技术的高峰。

⑶风电场建设与电力发展规划，电网建设应做到协调配合，有序发展。

地区电力发展规划要全面综合考虑一次能源（包括燃料能源、新能源、可再生能源等）的利用及发电系统，电网系统与地区及用户间的互动配合，既要有战略规划，又要有技术路线。电力行业可持续发展面临的主要挑战是环保、效率及安全。据统计，全球CO_2排放量中约45%是电力生产造成的，因此低碳电力是实现未来低碳经济的至关重要的一环。2009年12月在丹麦哥本哈根召开的世界气候大会上我国政府向世界承诺到2020年中国单位GDP的CO_2排放将比2005年下降40~45%。这是一项需要付出重大努力才能实现的任务，而风电以及其他可再生能源是能够在完成这一任务中起重要作用的，因此任何轻视风电，甚至认为风电是垃圾电力的说法都是不恰当的。但是风电场的建设必须按照科学、有序、健康的方向发展。在建设大规模风电场时如何与电网互相协调配合是关键。例如风电场发出的大量的上网电量如何送出及消纳；电网接受风电的能力；风电与火电，水电配套协调问题等。当前有些地区风电场建成后，不能全时正常发电，被限制发电（即所谓“限电”）。就是因为只看重完成了多少万KW风电机组的吊装容量。在电网建设或电网改造等配套设施完成前，建成的风电场规模越大，造成的浪费也越大。因为设备被搁置不运转带来的问题比正常运转时要大得多，特别是在低温寒冷、风沙吹蚀的环境下，衡量风电场建设的优劣，不是看其完成了多少KW容量的风电机组吊装，而是要看它的风电产能能力，即发出了多少kwh的电量。我国风电场的风电产能能力按风电场设备平均年满负荷运行时数来计算为2000小时左右，而在国际上认为在2200至2500小时才是经济合理的。

⑷补充和完善风电整机及关键零部件的技术标准和认证规范，严格执行风电设备认证制度，提高我国风电设备产品质量。

由于近几年风电建设的快速发展，原有的风电技术标准及认证规范已不能适应当前风电发展的需要，必须进行补充和完善，才能保证我国的风电设备的技术水平是优秀的，产品质量是可信的，有竞争力的。

我国风电设备的认证规则和方法与国际上著名的认证机构的规则和方法是相似的，和国际上是接轨的。我国目前制造的单机容量为750KW至2MW的风电整机认证都属于设计评估（Design Assessment）认证，还没有达到型式认证（Type Certificate）。要达到型式认证的水平，除了要有设计评估这一环节外，尚需要有生产厂家质量管理体系的认证，样机测试及最终评估等环节。国外一些著名的风电机组整机制造厂商都是拥有型式认证证书的。我国在这方面还有大量的工作要做。例如从事认证工作人员的专业知识与技能的培养和经验的积累，测试设备的完善，评估方法

的研究，计算和应用软件的掌握以及对制造厂生产工艺流程的了解与熟悉等。

我国风电设备在认真执行产品认证规定上目前仍存在着不够严格、需要改进的问题。例如在风电场设备招标时，制造厂家提供的产品认证证书是制造厂家引进国外机型时所出具的该机型的认证证书，而国内制造厂家在引进该机型后，用国产的零部件取代国外零部件，实现国产化后，应进行设备部件的机械载荷，电气性能，控制功能等的校核、测试，以验证是否符合原设计中技术规范的要求，并最终给出国内制造的该设备的认证证书，这样才能保证设备产品的质量。至于有的风电机组制造厂家，在样机“下线”后即投入批量生产，并与风电场业主签订供货协议，更是值得思考和研究改进的。

⑸正确认识电网对风电场接入电网技术的要求，开展对电网友好的风电机型、风电发电出力预报及蓄能方式的研究。

近年来随着风电发展的进展，电网对风电接入电网运行颁布了严格的技术要求，例如电压控制，有功及无功功率的调控，电网故障时风电机组的低电压穿越能力等。从维持电网安全、稳定运行的观点来看，是完全合理的和必要的。但细则如低电压穿越能力是否各地区各类大小装机容量的风电场皆要按此技术标准统一执行是值得商榷的。风电业界对此也有不同的看法，认为目前给出的低电压穿越要求时间已远超过电网保护动作的时间，低电压穿越装置将因上级保护动作而不起作用，但却增加了风电设备的成本；认为此要求过于严格，不够灵活。对于不同地区，不同并网容量的风电场应按照并网风电场装机容量占本地区电网容量的比例高低区别对待，比例低的可以不要求。欧洲风能协会撰写的欧洲风电并网研究报告中也谈到对低电压穿越这种成本很高，很严格的技术要求尚未经过技术评判，并不是所有风电场都要求装有低电压穿越能力的装置，尤其是对于风电电量在电网中所占比例较小的风电场。

在风电场中，不同的风电机组类型会以不同的方式来满足电网对并网规范的要求。关于风电场在电网系统发生故障，电网电压发生大幅度下降时各类型风电机组为电网提供支持的能力以及与之相关的技术尚在研究之中。采用低电压穿越装置也是着眼于这一问题的解决。目前作为风力发电主流机型的变速变桨双馈型异步风力发电机组及变桨变速直驱永磁型同步风力发电机组皆有一定的承受电网故障及支撑电网恢复的能力。但还不似火力发电及水力发电设备中具有励磁调节功能的恒速运行的同步发电机系统那样，能快速、宽幅度调节电压及无功功率的能力。基于这种考虑，清华大学目前正在进行利用电磁耦合器将变速进行的风轮与要求恒速运行从而发出恒定的工频电能的同步发电机相连接的风电设备的研究，目的是这种机型并网器可以更好地满足电网对风电机组的电压，无功功率的调控。增强电网故障时支持电网恢复的能力，保证电网运行的稳定性；同时还可以消除直驱永磁同步发电机经变频器并网及双馈异步发电机转子经变频器与电网连接后对电网带来的谐波问题，所以也可以说这是一种对电网更为适用的友好的机型。现在这项研究以产学研合作的方式，进入兆瓦级机组的设计和样机试制阶段。

由于风能是随机性能源，为了克服风力时大时小，风能时有时无导致的风电有功出力不稳定，难于调控的弱点，进行风电出力预报及蓄能方式的研究，将不可贮存和难于调控的风能转化为可贮存、可调控、可预报也是保证电网持续、平稳、安全运行的重要关键技术。风电出力预报可以提高风电机组的利用率，使风电与网内的火电、水电及其他电源得以实现有计划的、合理的、适时的预先调配，提升电网运行的稳定性。风电的蓄能方式的研究主要是为解决当风电满发、少发或停发时有一定的备用容量，以实现风电持续稳定发电。从实用的角度看，抽水蓄能电站是配合风电的最理想的蓄能方式，当然这需要一定的合适的地理环境。

当前世界各国已把利用可再生能源作为国家可持续发展的长远战略，争相在向可再生能源利用技术的高端进行不懈的努力，风电技术和应用即是重点之一。我国在风电技术和应用上已取得了长足的进步，只要循着科学、有序的步伐，克服和纠正前进过程中呈现出的缺点和不足，定能在这场全球性的建设绿色低碳能源的进军中，阔步走在前列。