# 绪论

随着中国经济的快速发展，能源短缺问题越来越严重[1,2]。日常生活中我们使用最多的能源为常规能源，如煤、石油、天然气等。但是常规能源是不可再生能源，且存储量有限。与此同时，因常规能源使用过度带来气候的剧烈变化，环境的严重污染等问题也日益严重。从这些现象可以看出，可再生能源在世界能源结构中会占据越来越大的比重。可再生能源包括风能、水能、太阳能等。伴随着发展各国能源技术及制造业服务的需求[3,4]，很多国家都在寻找适合本国国情的可再生能源，而风能凭借风电行业成熟的技术和商业化的应用在众多可再生能源中脱颖而出。

## 背景研究

风能作为一种可再生能源，不但取之不尽、用之不竭，而且不受地域的限制。风电行业的发展能够帮助一些不发达国家减少对进口能源的依赖，属于能够解决当前能源问题的一种最为经济的方式。风力发电设备相对简单，相较于其他能源设备安装周期较短，而且因风力发电机组高度的原因，其占地空间很小，一般安装在戈壁、山村或者海边等一些人烟稀少的偏远地带。风力发电机组能够利用简单的自然资源，将风能转换为电能，并且在这期间不产生任何二氧化碳或有毒副产物，给边区牧民、海岛驻军等这些难以进行电线架接的地方带来了极大的便利[5]。基于以上种种原因，风力发电产业正逐渐发展为一项全球性的业务[6]。

随着全球风力发电产业的日益壮大，风力发电技术也在不断趋于成熟。从概念上分析风能转换理论比较简单，但从桨叶之间的受力情况分析风力发电机组设计又并不简单。风力发电机组是由十分复杂的子系统组成的[7]，其设计工作十分复杂，需要不同专业领域的工程师团队才能完成，这些领域包括空气动力学领域、控制领域、机械领域、电气领域等。随着风力发电机组技术的稳步提高，每台风力发电机组的发电量提高了约100倍，重量和噪音都减轻了约一半，形式也由之前的垂直轴风力发电机组发展为现在的水平轴风力发电机组，之前的陆上风力发电机组发展为现在的海上风力发电机组。由于大型风力发电机组是个极其复杂的非线性系统，且具有不确定性和多干扰性，为了解决这些问题，风电的研究领域主要集中在优化控制和高效控制，以此保证风力发电机组高效、稳定运行[8]。

## 国内外风力发电发展现状

从2007年起，全球风电行业一直以超出其预期的速度不断壮大。据全球风能理事会统计，截止到2013年年底，全球风电累计装机容量达到318137兆瓦（如图1所示），同比增长12.5%。2013年为风电行业发展中经历的最艰苦的一年[9]，全球新增风电装机容量为35467兆瓦，对比2012年45169兆瓦的增量下降了约10000兆瓦（如图2所示）。2014年，随着国家政策的调整，风电行业整体呈现回暖趋势，对比2013年风电累计装机容量有所提升。

### 国内风力发电发展现状

中国是一个发展中国家，要想保障经济快速发展，前提是拥有强大的能源后盾。而风电的发展无疑是与中国国情相符[10]。我国的风电事业起步较晚，在早期阶段，中国风电主要依靠国外贷款和国内政府资助，进行风力发电机组的设计研究，建设小型风电场。随着风电进入产业化阶段，风电场投资商、开发商和上网电价都是由风电特许招标项目确定，并且建立了稳定的费用分摊制度，逐渐的扩展了风电开发规模，提高了本土制造能力。在市场需求力及竞争力的驱动下，中国风电设备制造技术进一步提升，目前，1.5兆瓦风力发电机组在市场上已经大范围应用，3兆瓦风力发电机组已投入运行，5-6兆瓦风力发电机组已下线。中国风电产业基地的发展速度已趋于全球第一。

2006年到2009年三年间，中国风电累计装机年增长率平均在100%以上，在2009年与2011 年间，中国风电实现了每年超过16000MW吊装规模。2013年，中国风电新增装机容量达到16088.7MW，同比增长24.1%，累计装机容量实现91412.89MW，同比增长21.4%，新增装机容量和累计装机容量均位于全球第一。

但是经过前几年的飞速发展，从2010年开始，伴随着各种问题的出现，2012年度岸上风电装机容量从2011年的1800万千瓦下降至1390万千瓦，降低了23% 。中国风电的发展速度开始放缓，虽然保持着稳中求进，但是瓶颈依然凸显，主要体现在以下四个方面。

1) 弃风限电现象严重

2013年，全国风电“弃风”电量162亿千瓦时，比2012年减少46亿千瓦时，平均“弃风”率降至11%，同比降低6个百分点。虽然数据表明风电弃风现象有所缓解，但是从经济层面上计算，按照每度电0.50元计算，弃风电量162亿千瓦时意味着损耗近似80亿的收入，可以称为新能源发电的巨大浪费。

2) 风电消纳并网困难

由于我国风资源丰富的地区往往远离负荷聚集地，因此缺乏调峰能力，外加上跨区输电能力不足，使得我国的风电消纳问题尤为凸显。至于并网困难也间接反映了风电场建设和电网建设两者之间的协调发展问题。

3) 产能过剩

几年来因各地风电项目发展迅速，产生电网与电厂规划不同步的矛盾，弃风限电现象严重，造成利用端产能过剩。新兴事物发展到一定程度会产生一些问题是不可避免的现象，但是必须从根本上发现原因，解决问题。如果盲目扩张，助长不公平竞争进而影响该产业的发展质量，就会造成大量的资源浪费。

4) 科技创新力薄弱

我国风力发电机组主要依赖国外设计技术，不管是制造技术还是控制技术，研发新型风力发电机组的能力都比较缺乏。如齿轮箱、发电机可靠性有待提高，控制系统不完善，总体设计和关键零部件的核心技术都需加强。

要想彻底解决这些问题，必须从政策实施，风场管理，电网建设等多方面下手，采取多管齐下手段，尤其应该重视技术研发在风电中的核心位置。

### 国外风力发电发展现状

风能的开发利用在国外发达国家已经相当普及，尤其在德国、荷兰、西班牙、丹麦等欧洲国家，风力发电在电网中占相当大的比重。目前在装机总量上，欧洲一直处于领先位置。截止到2013年底，欧洲累计装机总量达到121.474吉瓦，占世界装机总量的38.18%，亚洲风电累计装机总量达到115.939吉瓦，占世界装机总量的36.44%；北美累计装机总量达到70.885吉瓦，占界装机总量的22.28%。

作为欧洲风电产业的集中地带，德国成为欧洲风电发展最快的国家之一，大型风电控制技术的研发与风力发电优惠价格的支持为德国风电发展创造了强烈的市场需求。得益于德国政府的支持，其风电设备的制造和出口均成稳定增长趋势。并且德国采用循序渐进的发展策略，最早从风力资源丰富的州市开始发展，逐渐向山区延伸，待陆上风电饱和，又开始在海上平铺，根据德国政府制定的风电发展战略，未来几年重点在海上扩展风电事业。2013年年底，德国的风电装机总量接近34250兆瓦，德国电力需求的10%都由风电行业供应，风能已成为德国不可或缺的可再生能源。

亚洲风电未来很可能会赶超欧洲，特别是中国风电一直保持强劲的增长势头，成为亚洲风电的主力军，此外还有印度，韩国和日本的风电产业均出现不同程度的增长。

北美方面，一直是美国在推动风电市场的发展。到2013年底，美国地区风电装机容量为61,091MW，占世界装机容量的19.2%。美国的电源结构以燃气发电为主，电力系统灵活性比较好，能够大规模适应风电发展。美国联邦政府和各州政府发布风电优惠政策，另外还有一些激励政策和补贴政策在驱动美国风电的发展。美国在风电项目运行之前便已开展的一些前期研究工作，也给美国风电产业发展带来了很有利的影响。但近两年美国风电市场表现不佳，对北美风电发展影响也很大。

目前，世界风力发电机组主要发展趋势有四个：1) 风力发电机组单机容量不断增大[12]。2000年，世界上的主流风力发电机组还是500~1000KW；到2009年，主流机型已变为2MW~5MW；近年来，单机容量为6MW的风力发电机组已经开始运行，8MW~10MW风力发电机组的概念设计已经开始。2) 变速变桨控制技术发展[13]。变速控制技术具有捕获最大风能的特点，变桨控制技术具有控制功率平稳的特点。为了使风能转换效率得到进一步的提升，将变速控制技术与变桨控制技术结合成为风电控制领域的研究热点，并且该技术在风电中的应用比例越来越高。3) 海上风力发电产业日益强盛[14]。由于陆上风电市场的饱和，各国逐渐向海上扩展市场，尤其是欧洲海上风电发展势头十足，很多海上均设置风电设备，有望实现“2020年使可再生能源在欧盟总能源消耗中占20%”的发展目标。4) 风力发电与电网关系。并网瞬间安全问题及电网稳定性要求国家需要制定相关的标准来规范风力发电的发展，并加快风力发电大规模应用的进程。

## 风力发电机组控制技术发展现状

目前世界风力发电市场的单机容量正持续增大，在这种情况下，保证风力发电机组的安全稳定运行，对大型风力发电机组的控制技术提出更高的要求。风力发电机组模型可分为若干相互关联的子系统，包括风、风轮、传动系统、发电机、变桨执行机构、控制器等。理想的控制系统数学模型是能够模拟各子系统自身动态特性及其相互耦合作用的，这样的模型必然是难于建立的复杂非线性模型，因此国内外很多学者基于变速、变桨控制算法做了深入的研究。

### 变速控制技术

变速控制的主要控制目标是在风速低于额定风速时，保证功率输出最大化。按照控制模式，可分为转速控制、功率控制和转矩控制三种 [15]。基于转速控制模式，叶杭冶提出通过风力发电机的输出转矩控制风轮转速，当风轮转速达到额定转速，转矩控制器控制转速使其稳定在额定值[16]。B. Boukhezzar设计了一个级联非线性控制器用于捕获风能并同时避免风力发电机组部件特别是传动系统的瞬时载荷冲击。其内环控制器保证发电机转矩和定子磁通的有效跟踪，外环控制器通过风轮转速的跟踪实现最大风能捕获[17]。基于功率控制模式，Brice Beltran提出了变速风力发电机组的滑模功率控制，保证高风速运行区域的稳定性和模型不确定条件下的理想反馈控制跟踪问题[18]，后又在此研究基础上提出了高阶滑模控制算法，其算法简单可靠，得到的发电机转矩输出平滑，不产生颤振，大大提高了风能转换系统的效率[19]。基于转矩控制模式，有传统转矩控制方法，通过发电机转矩与转速之间的比例关系控制实际转矩输出。在传统的转矩控制方法基础上，又通过改变发电机转速加速度或者气动转矩来快速响应风速变化，达到更可靠的控制目的。

目前，最佳叶尖速比查表法、爬山搜索法、模糊控制和自适应控制法等是描述最大功率捕获的主要方法。因风速测量困难，所以对查表法准确性产生很大的影响，爬山搜索法需要不断的进行转速调节，传动链会造成疲劳过度，产生转矩高频脉动。李树江等人在最佳叶尖速比查表法和爬山搜索法的基础上进行改进，提出了变步长策略，加快了搜索速度，使得动态响应更快，收敛性能更好[20]。模糊控制和自适应控制等智能控制算法虽能取得良好的控制结果，但因算法复杂，对控制器的性能要求较高，所以在风电场中并不实用[21]。

### 变桨控制技术

目前采用非线性模型描述变桨控制系统的方法主要有两种，第一种是针对特定型号的风力发电机组，通过重复仿真和大量实验建立带有约束条件的简化非线性模型，取得了较好的控制效果。Fernando V基于变结构基础理论和李雅普诺夫理论相结合的控制理论设计了一种多输入多输出鲁棒控制器以达到风能转换效率最大化的目标[22]。Kelouwani S. 采用平均风速，标准偏差和输出功率作为神经网络模型的输入进行风力发电机组非线性模型控制，提高控制精度。第二种是建立可反馈线性化的非线性模型，进而采用成熟的线性控制方法获得理想的控制效果[23, 24]。如陈思哲提出采用微分几何原理将非线性模型进行全局线性化，对线性化后的模型设计非线性控制器，实现变速变桨风力发电机组的最优功率控制[25]。杨俊华基于反馈线性化模型建立放射非线性模型，设计桨距角控制器[26]，方法具有较好的鲁棒性和适应性。采用线性模型描述变桨控制系统的方法主要有三种，第一种是选择风力发电机组特定的稳定工作点（如额定功率点等），并在此工作点处建立线性模型。Nam Yoonsu根据空气动力学力矩、风速动态变化量和前馈变桨量设计了一个前馈变桨控制器，减少发电机转速和输出功率等参数的波动[27]。王东风针对风力发电机组的的高度非线性，选择在某个工况点建立线性模型，并通过滑模变结构对被控对象进行控制，使得系统达到很好的鲁棒性[28]。第二种是选择若干物理量作为参数变量（如风速、叶轮转速等），建立线性变参数模型。Bakka Tore 提出的控制方法是在某些工作点附近将风力机模型线性化，通过一族李雅普诺夫函数得到的参数和线性矩阵不等式去约束控制器模型，实现减轻机组振动的目的。后在此研究的基础上又提出了海上风力发电机组控制器的设计方法[29]。第三种是选择若干工作点（如风速等），建立线性切换模型。Li, Liuying 采用的控制方法是从切入风速到切出风速整个完整的风速区域设计切换控制器使得他们能够顺利切换，平稳过渡[30]。Jelavic Mate提出采用模糊控制解决多线性模型之间由于切换频繁造成的振荡问题[31]。

从七十多年前开始到今天，比例—积分—微分(proportional integral differential,PID)控制器(或比例—积分((proportional integral,PI))以其结构简单，理论成熟，控制效果理想，逐渐成为工业控制的重要手段。近年来，PID控制策略随着智能控制算法的发展也得到深入研究，构成具有自学习、自适应能力的控制算法，以提高变桨控制器的适应性[32, 33]；模糊控制对系统不确定参数的变化具有较强的鲁棒性，文献[34-36]通过模糊PID控制方法调节桨距角，有效稳定了风力发电机组的输出功率，以及实现最大风能捕获。文献[37-39]利用神经网络自学习的能力，使变桨控制系统与风速随机变化等不确定因素形成对应关系，改善控制系统的动态性能。神经网络控制利用数据建立变桨控制系统的“黑箱”模型并加以控制，但建模具有较大偏差；自适应控制根据环境、状态输出、控制输出等信息调整变桨控制器参数，保证控制系统运行在最佳状态[40,41]，但参考模型建立和系统参数辨识比较困难。Kim, Jin-Sung提出采用新型自适应PID控制器，其由新型的执行器-评价器结构组成，能够适合所有的工作点[42]。

## 课题的研究意义和研究内容

常规能源使用过度，环境污染问题日益严重，作为可再生能源的风能在这种情况下脱颖而出，风电控制技术也逐渐成为风电领域学者研究的热点。本课题针对大型风力发电机组的变速变桨控制策略进行分析研究。

由上述可知，风速的随机性和风力发电机组控制系统的复杂性导致难以获取风力发电机组精确的数学模型，而且从设备和工程费用的角度考虑，风电工程甚少采用复杂的智能控制算法进行控制器设计。在实际风场中风力发电机组广泛使用的是转矩PI控制器和变桨PI控制器，但是其控制参数大多是基于现场经验及调试得来，没有规范的理论分析做依据。因此本文选择从工程应用角度出发，提出将加性分解原理的方法运用于变速变桨风力发电机组控制器设计中，以实现控制器简单可靠，输出功率达到最优的目的。

论文主要内容如下：

第一章首先介绍了课题的研究背景，世界风力发电的发展现状，及现下风力发电机组的一些新型控制技术，包括智能变速控制技术、智能变桨控制技术以及工程中常用的PID控制技术，最后从工程应用角度出发明确本课题的控制方法。

第二章对风力发电机组的基本控制理论做了简单的介绍，包括动量理论、叶素理论和动量—叶素理论，推导出在理想状态下的最大风能利用系数。然后划分了变速变桨风力发电机组的工作区间，对最佳叶尖速比区、转速恒定区和功率恒定区三个运行区域工作状态分别进行了详细的描述。

第三章建立了风力发电机组各个部分的模型，包括风速模型、风力机模型、传动系统模型、发电机模型和变桨执行机构模型，为下文的理论证明和仿真分析奠定了基础。然后，从工程应用角度指出实际风电场中常用的PID控制器或PI控制器在参数调节上缺乏理论支撑及稳定性证明，从而引出了加性分解原理的概念，并通过一个典型的非线性系统论证了该方法适用于复杂的非线性模型。

第四章将加性分解原理用于风力发电机组转矩控制器设计和变桨控制器设计中，将一个复杂的非线性模型分解为主系统和辅系统两个子系统，针对主系统，通过增加不同的低通滤波器分别设计得到转矩PI控制器和变桨PI控制器，然后通过理论推导，证明原系统的稳定性。最后还通过MATLAB仿真验证该控制策略能够满足控制目标。

第五章总结了论文的主要研究内容和研究成果，并对论文下一步工作进行了展望。