



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

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



Research
Clean Energy—Review

风机捕集能量和降低负荷使用的先进控制方法

Yuan Yuan, Jiong Tang*

Department of Mechanical Engineering, University of Connecticut, Storrs, CT 06269, USA

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16 February 2017

Revised 20 June 2017

Accepted 12 July 2017

Available online 17 August 2017

关键词

风机

控制方法

能量优化

降低负荷

摘要

本文报道了风机控制领域最近才出现的一些新方法的调查研究结果。最近数年里，在时变不确定的紊乱风场中优化能量捕集效率和降低各个部件负荷的多元控制方法已经被广泛地研究。我们将相关的研究工作分为三类：风机建模和风机动力学研究、风机的主动控制和风机的被动控制。关于风机动力学研究，我们讨论了物理模型的建立，并且给出了空气弹性变形的分析工具。关于主动控制，我们审查了节距控制、扭矩控制和偏航控制等策略，包括相关的理论建立以及针对不同目的的应用情况。我们的研究主要关注风机叶片节距控制，节距控制被认为是在维持能量捕获性能的同时降低负荷的关键要素。关于被动控制，我们研究了调谐质量阻尼器、智能转子和 Microtabs 等技术。另外我们也提出了未来的一些研究方向。

© 2017 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of the 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

风能已经成为一种领先的可再生能源，通过风电系统可以生产清洁电能而且无需排放二氧化碳。风能发电领域的各种技术进步和制造工艺创新，已成功地使风电成本从30年前的每千瓦时0.45美元降至现在的每千瓦时0.05~0.06美元[1]。2015年，全球累计海上风机装机容量已经达到12.1 GW[2]，到2016年6月已确认的全球风机总装机容量已经达到了456 GW。在全球风电市场上，中国继续排在第一位，中国的累计风电装机容量已经超过145 GW[2]。2015年美国的风电装机容量增加了12.3%，2014年美国的风电装机容量则增加了7.8%[2]。2015年美国的新风电装机容量超过8.1 GW，占美国的可再生能源装机容量的56%以上。

风机可将风的动能转化为电能。贝兹法则显示，

任何风机将风的动能转换为电能的效率都不能超过59.3%[3]。实际上，现代化的工业用风机仅可以利用最大理论值的80%。现代风机可以分为两大类：水平轴风机和垂直轴风机[3]。水平轴风机是指风机的旋转轴是水平的，或者与地面是平行的，这种风机在大型风电场中的应用非常广泛。垂直轴风机的旋转轴与地面是垂直的，常用于小型风电项目和居民住宅区的风电项目。风机可以安装在陆地上，也可以安装在海上[4]。陆上风机通常在内陆地区，风电场与现有的电网连接比较方便。尽管陆上风机的成本被认为比较低，风机产生的噪声污染和对视觉美观的影响也是一个问题。海上风机安装在海上，可以采用浮在海面上的平台或者采用深入海底的混凝土平台[4,5]。海上风机不会对人类活动造成干扰，但是成本较高，而且与现有电网之间的连接也比较困难。

* Corresponding author.

E-mail address: jtang@engr.uconn.edu

风机是一个很复杂的机械系统，由一些相互连接在一起的部件组成，在不同的时间范围和长度范围内，不同部件有不同的任务和行为特点[1,3,6]。现代化的风机越来越大，而且结构更加灵活，风机的运行寿命可以达到25年，系统可靠性更高，风机效率也更好（最大能量捕集效率更高）[3]。但是，风能的随机性会导致能量捕集的不确定性以及结构负荷的不确定性，进而会严重影响风机的性能[7-10]。我们的研究目标是全面地审视不同的控制方法，帮助风能应用更好地实现能量捕集和降低结构负荷。

要分析控制目标和合成控制算法，对复杂的风机系统的动力学研究和相关的建模工作非常重要。第2节中简单地介绍了风机动力学的特征情况。风机系统是一个集成化系统，有三个典型的单独控制回路：节距控制、扭矩控制和偏航控制，第3节中将系统讨论相关情况。我们的研究主要关注风机叶片节距控制，节距控制被认为是在维持能量捕获性能的同时降低负荷的关键要素。除这三个控制系统以外，第3节中还将介绍被动控制方法包括调谐质量阻尼器（TMD）和空气动力控制方法，以及microtabs和智能转子等其他控制设备的相关情况。第4节是总结。

2. 风机的动力学特征和建模

虽然垂直轴风机的应用时间已经很长，但是本文中我们重点关注的却是水平轴风机，因为水平轴风机在市电规模的应用市场中占主导地位。主动控制对大型水平轴风机而言更加有效，被动控制则主要用于垂直轴风机。水平轴风机通常由叶片、轮毂、机舱和风机塔组成。机舱中是齿轮箱、动力传动系统轴和发电机，安装在塔顶部。叶片数量通常为两片或三片。安装在叶片根部的执行机构可以调控叶片的节面角，用以改变气动迎角。总距角运动（collective pitch angle motion）被广泛地用于将所有叶片的桨距调整至相同的角度，独立桨距控制则是要单独调整各个叶片的桨距。和高速轴连接在一起的发电机，使用轴的回转运动让磁体转子在铜线回路组成的定子中旋转。在转子转动过程中发电机会产生电磁能并且发电。

2.1. 空气动力学

由于风场很复杂且具有时变不确定性，因此风机的空气动力学是非线性的。因此，很难得到一个完美的、准确的模型并且预测风机的空气动力学情况。由

于已有一系列计算工具被开发出来，空气弹性形变模拟装置已经被用于模拟风机的运行状况。工业界用于计算空气动力和动量的主要空气弹性形变分析模拟工具包括FAST[11]、BLADED[12]、HAWC2[13]和FLEX5(4)[14]。本文将介绍位于科罗拉多州的美国国家可再生能源实验室（NREL）开发的FAST分析模拟工具的相关情况。空气弹性形变分析是FAST分析的一部分，被称为AeroDyn[15]。AeroDyn的基本理论是叶片元素动量（BEM），这种理论是叶片元素理论和动量理论的一个组合。叶片元素理论假定叶片可以被分成一些小元素，这些小元素可以在不受周围元素的空气动力学影响的情况下、作为一个二维的翼面独立运行，可以根据局部的气流状况计算各种空气动力学受力状况。然后这些基本作用力沿着叶片的跨度积聚起来。根据动量理论，可以计算得到在轴向和切向方向的气流中造成动量损失的诱导速度。这些诱导速度会影响转子平面的风流入，进而会影响叶片元素理论计算得到的受力数据。结合这两种理论后AeroDyn可以计算风机上的空气动力受力和动量数据。

2.2. 运行区

风速变化时，风机的输出功率会发生极大的变化，每台风机都有自己专属的功率曲线。空气动力学功率是轮毂高度处风速的一个函数。风机开始工作时所需要的最低风速被称为切入风速。额定输出风速是风力发电机输出达到最大时的风速。切出风速是风机需要调整桨距角、避开升力作用防止发生安全事故时的最高风速。一台风机的独有的功率曲线通常是从现场试验中得到的。图1中给出了美国国家可再生能源实验室的5 MW海上风机的典型功率曲线。

此功率曲线显示，风机的运行状况通常被分为三个区间：

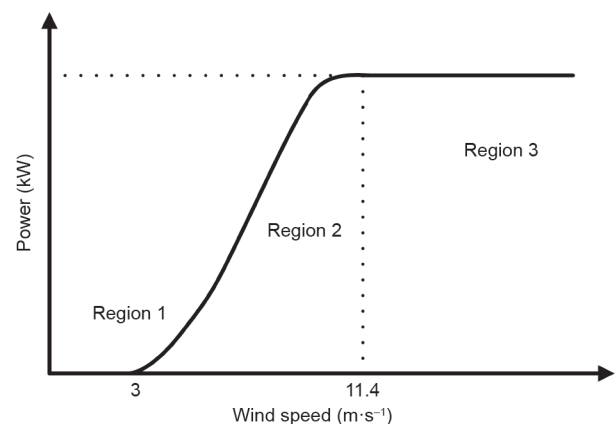


图1. 美国国家可再生能源实验室的海上5 MW风机的功率曲线。

(1) 区间1: 风速很低 (5 MW 的风机低于 $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。风机会刹车, 停止转动。

(2) 区间2: 风速不太快, 目标是要利用风中的最大功率, 即获得最大空气动力学系数。

(3) 区间2½: 区间2和区间3之间有一个过渡区间。这个风速区间内的目标是风速达到额定风速时风机要达到额定功率。

(4) 区间3: 风速很高。在这个区间的目标是要达到额定功率和转子速度。转子利用的空气动力学功率的计算公式[4]为:

$$P_{\text{wind}} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) v^3 \quad (1)$$

式中, R 为转子半径; ρ 为空气密度; v 为风速; 功率系数 C_p 代表风机利用功率的比例, 是叶尖速比 (TSR) 的一个非线性函数; λ 和节面角 β 数据可以从现场测试数据表中查得。叶尖速比是:

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (2)$$

式中, ω 为转子转速。

以 5 MW 的风机为例。功率系数曲线见图2。从图中可以看出, 当节面角为 -1° 、叶尖速比接近7时, 最大 C_p 为0.4806。由于在区间2中的主要目标是要利用最大的风能功率, 从图2中我们可以看出最佳方案是将节面角维持在最佳值 -1° , 并且将叶尖速比维持在最佳值7。从式(2)中我们可以看出叶尖速比实际上是转子转速和风速之间的比值。要维持恒定的叶尖速比, 意味着在风速发生变化时要调整转子的转速。跟踪最佳叶尖速比的最常用方法是扭矩控制法, 我们将在3.2节中讨论相关问题。

2.3. 动态模型

风机的空气弹性力学在很大程度上是非线性的, 因

此我们使用NREL开发的疲劳、空气动力学、结构和紊流 (FAST) 代码系统[11]建立了风机的数字模型。

非线性的风机运动空气弹性力学方程[11]如下:

$$M(q, u, t)\ddot{q} + f(q, \dot{q}, u, u_d, t) = 0 \quad (3)$$

式中, M 为质量矩阵; f 为非线性力作用向量, 其中包括刚度和阻尼效应; q 为响应向量; u 为控制输入向量; u_d 为风能输入扰动向量; t 为时间。 f 是使用AeroDyn通过叶片元素动量理论计算得到的。在这种方法中, 分别计算了各个叶片块段的气动力和力矩, 然后将叶片根部到尖端的相关数据做积分处理得到各种分布力数据。然后FAST将打乱各个变量各自的运行点, 从数学上将式(3)做线性化处理。在泰勒级数展开之后, 我们获得了下列结果:

$$\tilde{M}\ddot{q} + \tilde{C}\dot{q} + \tilde{K}q = \tilde{F}u + \tilde{F}_d u_d \quad (4)$$

式中, \tilde{M} 、 \tilde{C} 、 \tilde{K} 分别为线性化的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; \tilde{F} 为控制输入向量; \tilde{F}_d 是风扰动向量。

有些自由度处于运行状态时, 实际风机系统的非线性模型可以被简化为线性模型。由于风切变和塔影效应的作用, 即使风机系统处于稳定状态时, 也是一个周期性旋转系统。因此, 线性化工作的第一步, 是要在一次旋转过程中的多个等间距的转子方位角上获得一系列的线性化的状态-空间模型。所有状态都采用旋转坐标。然后对我们得到的所有线性数据集做了平均化处理, 得到了状态-空间的形式表述。最后可以获得一个状态-空间表述的线性时间不变系统, 公式如下:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + B_d u_d \\ y &= Cx + Du + D_d u_d \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $x = [q^T, \dot{q}^T]^T$ 为状态向量; A 、 B 、 C 和 D 分别为状态矩阵、控制输入矩阵、输出矩阵和控制输入转换矩阵; B_d 和 D_d 分别为风扰动输入矩阵和风扰动输入转换矩阵;

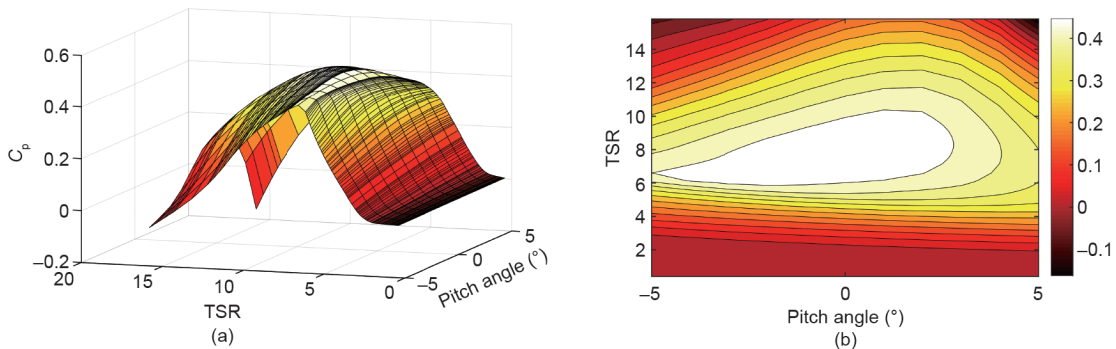


图2. C_p 表面 (a) 和 C_p 轮廓线 (b)。

\mathbf{u} 为控制输入数据（即扰乱的叶片总距角）； \mathbf{u}_d 为扰动输入数据（即扰乱的风速）； \mathbf{y} 为输出数据。

多叶片坐标转换

如前文所述，由于风剪切作用和塔影效应，风机实际上是一个周期性系统。风机转子叶片的动力学情况通常采用安装在单个叶片上的旋转坐标系的情况来表达。但是转子动力学相对于机舱和风机塔塔架的响应实际上应被视为一个整体而不是各个叶片的单独的响应。多叶片坐标（MBC）可以将旋转坐标系的动力学数据转换为非旋转坐标系（和固定式风机塔架一致）的动力学数据，并且连贯地将选择的转子和风机塔以及机舱连接在一起。多叶片坐标来自直升机系统，最先也是在直升机系统中被用于分析襟翼运动稳定性状况[16]。

前述的线性时间不变系统（LTI）模型比较简单，常被用于总距控制方案中。最近的一些研究发现多叶片坐标转换可以降低在不同方位角处测得的不同的线性化结果之间的差异，因此可以更好地描述风机动力学状况[17]。多叶片坐标系统在独立桨距控制策略中应用很广泛，借此可以更好地处理周期动力学情况。文献[18]中可以查找到转动坐标到固定坐标的详细的转换结果。

2.4. 执行机构

风机系统中使用的执行机构有三种。第一类执行机构是桨距执行机构，过去这种执行机构多是液压机构。目前在很多市电规模的陆上风机上都已使用电动机械桨距执行机构。叶片桨距角的变化可导致空气动力攻角变化，进而导致气动扭矩和气动作用力变化。时下的商业用风机都装有独立桨距执行机构，用于单独调整各个叶片的桨距，这种方式具有一个极大的优点，即可以消除不对称的叶片负荷。通常变桨命令和实际的变桨操作之间有一定延迟，因为中间需要一个第一命令传递功能。第二类执行机构在发电机中，可以将其设置在能跟踪参考扭矩或负荷的状态。这类执行机构使用发电机和动力电子设备，通过分开发电机转子和定子的磁体，来决定需要利用风机中的多少力矩。转子的净扭矩是低速轴中由风引发的扭矩与在高速轴中由发电机引发的负荷扭矩之间的差异。因此，发电机扭矩会影响转子的加速度。第三类执行机构是偏航执行机构，这种执行机构通常都是电机驱动的。这种执行机构用于调整整个机舱的位置，以便让叶片正对着风向。由于回转力的作用偏航角速度可能会很高。通常情况下偏航角速度会低于 $1^\circ \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3. 风机控制方法和应用

风机在不同的运行区间有不同的控制目标。总体上说，在区间2中要使功率达到最大，在区间3中则要限制功率或转子速度。

3.1. 桨距控制

区间3中常采用桨距控制，用以调整功率或降低结构负荷。这是风机控制领域中研究最广的一个课题。有两种形式的桨距控制系统，即总距控制和独立桨距控制。总距控制是指每次控制时两个或三个叶片的桨距角改变相同的角度。独立桨距控制是指根据具体的需要（很可能是根据转子旋转时叶片的方位角）每次将两个或三个叶片的桨距角分别改变不同的角度。总距控制的功能通常是调整功率和转子速度并且降低对称的叶片负荷，独立桨距控制的直接目的则是要降低不对称的叶片负荷。

总距控制的直觉意图是要采用单一输入-单一输出（SISO）反馈循环系统，在风速随时变化的情况下跟踪采用区间3中的参考信号。参考信号可以是额定转子速度或额定功率。工业界最常用的方法是使用比例-积分-微分（PID）控制器跟踪额定转子的速度。标称值和额定值之间的转子速度误差反馈给桨距控制执行机构。当系统处于一个平衡位置时，装置模型会从非线性动力学状态被线性化，这意味着转子不会被加速或者减速。在一个运行点处，调整部分增益、积分增益和微分增益。尽管如此，由于风机随时变化的特点，实际运行点的位置会不断变化。最初的部分增益、积分增益和微分增益不能将性能维持在期望的状态下。因此，增加了一个根据增益情况进行调节的校正设备，用于根据不断变化的运行点情况调整增益参数[4]。

增益调节部分控制和积分控制（GSPI）的公式可以采用：

$$\Delta\theta = GS(\theta) \left(K_p \Delta\omega + K_i \int_0^t \Delta\omega \right) \quad (6)$$

式中， $\Delta\theta$ 为围绕运行点的叶片桨距角的小扰动量； $\Delta\omega$ 为测得的发电机转速和额定的设定值之间的差值。在初始运行点处首先计算出 K_p 和 K_i 。增益校正系数 $GS(\theta)$ 是叶片桨距角的一个函数，用以调整不同运行条件下的增益值[4]：

$$GS(\theta) = \frac{1}{1 + \theta/\theta_k} \quad (7)$$

式中, θ 为叶片桨距角; θ_k 为桨距敏感度值达到其在额定运行点时的敏感度值的两倍时的叶片桨距角度。增益调整部分是根据桨距敏感度得出的, 桨距敏感度是气动功率对转子总桨距的敏感度。

需要指出的是, 桨距敏感度和桨距角之间的关系不是严格的线性关系。因此, 不能彻底消除扰动效应。最近的一项研究发现, 结合增益-调整的PID和扰动观测器(DOB)控制后, 风荷激励中的风机低频率成分降低[19]。结果显示, 还可以进一步改善功率和速度调整系统。除了PID类的控制方法以外, Frost等[20]使用了一种自适应控制系统来调整速度, 这种系统不需要知道确切的风机模型参数。参考信号就是发电机的额定速度。标称装置的输出数据必须跟踪存在多种内部和外部不确定性时的参考值。前述所有方法都将发电机速度误差用作测量数据和反馈信息, 用以获得叶片桨距角。

风机的控制回路实际上是多重输入-多重输出(MIMO)的一些系统。传统的PID控制不能有效地处理这些系统。尤其是, 当控制目标包括降低单个叶片的负荷时, 多变量系统必须分成两个SISO系统, 才能使用PID控制功能。但是, 尤其是在频率较高时, 系统可能难以很好地分开。使用SISO控制方法不可避免地会牺牲一些性能。实际上, 在风机控制领域有许多需要我们同时处理的问题, 而且这些问题有时甚至会是相互之间有冲突的问题, 如捕集能量、降低负荷和桨距活动等。由于风机速度调节可激发第一个前后模式和侧-侧风机模式, 因此总速度控制回路和风机塔负荷是结合在一起的。另外, 降低叶片负荷需要桨距执行机构更多的工作, 但是执行机构也有其自身的机械限制。否则, 降低负荷的操作也会影响能量捕集效果。因此, 最好是有一种方法可以同时实现多重目标。

MIMO系统最常用的方法包括扰动调节控制(DAC)/线性二次型调节(LQR)/线性二次型高斯(LQG)、模型预测控制(MPC)以及 H_2/H_∞ 法。

3.1.1.1. DAC

DAC同时处理调节速度和降低负荷的问题, 此方法是一个应用很广泛的方法, 常和LQR一起连用。不同目标之间的折中可以通过恰当地选择权重函数来实现。DAC概念最先是Johnson[21-24]提出的, Balas等[25,26]进一步将DAC的概念扩大至大规模的水平轴风机。在DAC中, 风扰动被假定为运行点处的风速的方差, 波形是已知的, 振幅则是未知的。因此, 可以用装置模型增

强扰动模型, 用以评估扰动和状态变量。可以采用LQR计算全负荷状态反馈控制的增益量[27]。DAC框图如图3所示。

DAC的第一步是要决定扰动的模型。扰动模型可以采用状态-空间形式表达, 状态估算函数可以估算无法测得的状态变量和扰动量, 即

$$\dot{z}_d = Fz_d, u_d = \Theta z_d \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}} \\ \dot{\hat{z}}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_d \Theta \\ 0 & F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{z}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} (y - \hat{y}) \quad (9)$$

式中, \hat{x} 、 \hat{u}_d 、 \hat{z}_d 和 \hat{y} 是 x 、 u_d 、 z_d 和 y 的估算值; K_1 和 K_2 采用极点配置法进行调整, 让估算函数可以具有可以接受的瞬时行为和准确度。DAC控制法则为:

$$u = Gx + G_d z_d \quad (10)$$

式中, G 为状态增益; G_d 为扰动状态增益。采用LQR法可以获得状态增益数据, 扰动状态增益数据可以通过使 L_2 基准最小化得到 $\|B G_d + B_d \Theta\|$ 。实际上式中的 x 和 z_d 是两个估算得到的数据。

实际工作中, 集中控制和单独控制需要选择不同的进风模型, 这意味着 F 和 Θ 是不同的。由于总距集中控制只能调整均匀的对称部分, 这种情况下, 建模的扰动是一个均匀的步骤信号, 可以视作是在每个区域间隔中从一个量级升高至另一个量级的风速。 F 和 Θ 被假定为:

$$F = 0, \Theta = 1 \quad (11)$$

但是, 独立桨距可以调整不对称的部分。由于在转子平面上存在垂直风剪切变量, 风机叶片会受到周期性的正弦分量作用力[7]。 F 和 Θ 可以采用下列公式进行选择:

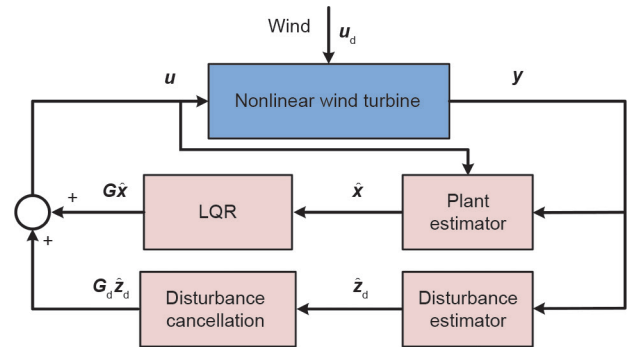


图3. DAC板块示意图。

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\omega_p^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \Theta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中, ω_{1p} 是1P转子速度, 单位为 $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 。尽管矩阵 F 中可能涉及更高的频率, 此处我们还是采用1P频率作为例子。用这种方法可以降低1P频率下的负荷。

近年来还有关于DAC的其他深入研究。由于结构和空气动力学情况都对风机的周期性动力学状况有影响, Stol和Balas[28]研究了周期性DAC控制的情况, 他们的研究中使用了一个固定时间段内的时变不确定反馈增益系统。结果显示, 相比于没有牺牲速度调节性能的PID和时变不确定DAC控制而言, 叶片负荷降低水平有所提高。为了更好地降低风扰动, Hand和Balas[29,30]将连贯紊流风结构性质融入了DAC控制系统中, 用于降低气流中的蓝金涡流造成的瞬态叶片负荷响应。理论上, 由于这种情况下只能处理水平的均匀扰动, 因此总距控制器只可降低叶片的对称负荷。独立桨距控制可以降低叶片的不对称负荷, 风扰动建模针对的是水平组分的集合以及不对称线性剪切组分[31,32]。叶片局部风速中的谐波部分可以纳入扰动模型中, 得到周期性的降低扰动的效果。结果显示可以得到1P和2P负荷降低效果, 且能够更好地调节转子的速度。为计算广义逆矩阵、降低扰动, 我们研究了三种相关的方法: Moore-Penrose Pseudoinverse、Kronecker积以及D-1[33]。Pace等扩大了DAC系统, 使用LIDAR (light imaging, detection and ranging) 探测极端事件, 可以防止因风机超速而在紧急情况下被关机。其中的核心观点是将可运行的控制器从基线控制器 (一个增益调整用DAC) 切换至极端事件控制器 (一个降低发电机速度的跟踪用DAC)。结果显示切换控制期改善了平均功率状况[34]。另外, 对海上风机而言, 波扰动也可纳入DAC中, 平台的偏航自由度可以在扰动模型中进行模拟。结果显示功率和速度调节效果有所改善[5]。

3.1.2. 模型预测控制

模型预测控制是一种先进的控制方法, 可以利用预测模型和当前的测量结果, 将成本函数最小化, 获得控制信号。模型预测控制使用的模型可以预测将来的基准条件下的过程输出, 并且在输入和输出数据中有限制的情况下, 使期望的成本函数最小化, 计算控制序列。这是一种后退的方法, 每一步都会计算一些将来的控制信

号, 但是只有计算得到的控制序列中的第一个控制信号会被用于实际装置。近年来, 已经发表了大量的为风机定制模型预测控制方法。

在数学上, 模型预测控制可以被分成有限模型预测控制和无限模型预测控制这两种方法。在不失一般性的前提下, 本文说明了约束优化问题的相关情况, 以便找到最优控制输入 \mathbf{z}_k^T , 尽量降低成本函数 $J(\mathbf{z}_k)$, 成本函数是按照系统层面的需求定义的。 $J(\mathbf{z}_k)$ 定义为在整个预测基准线 p (用 Q 作加权处理) 上来自参考值 r 的系统输出 y 的所有衍生量的总和, 以及在整个控制基准线 m 上 (用 R 作加权处理) 控制输入数据 \mathbf{u} 的所有变化的总和。 $\cdot(k+i|k)$ 是根据时间点 k 的相关信息, 在第 i 个预测平面步骤得到的 (\cdot) 的预测值。通常, 可以使用状态估计装置提取时间点 k 的状态和扰动信息。模型预测控制解出的二次方程如下:

求得 \mathbf{z}_k^T 使下列数据最小化

$$\begin{aligned} J(\mathbf{z}_k) &= Q \sum_{i=1}^p [\mathbf{y}(k+i|k) - r(k+i)]^2 + R \sum_{i=0}^{m-1} [\mathbf{u}(k+i|k) \\ &\quad - \mathbf{u}(k+i-1|k)]^2 \\ \text{s.t.} \quad \mathbf{x}(k+1) &= A\mathbf{x}(k) + B\mathbf{u}(k) + B_d \mathbf{u}_d(k) \\ \mathbf{y}(k) &= C\mathbf{x}(k) + D\mathbf{u}(k) + D_d \mathbf{u}_d(k) \\ \mathbf{u}_{\min} &\leq \mathbf{u}(k) \leq \mathbf{u}_{\max} \\ \dot{\mathbf{u}}_{\min} &\leq \dot{\mathbf{u}}(k) \leq \dot{\mathbf{u}}_{\max} \end{aligned} \quad (13)$$

式中, k 为当前的控制间隔; p 为预测基准; m 为控制基准, 另外

$$\mathbf{z}_k^T = [\mathbf{u}(k|k)^T \mathbf{u}(k+1|k)^T \cdots \mathbf{u}(k+m-1|k)^T] \quad (14)$$

风机的所有模型预测控制算法中都具有一些共同要素, 但是每个要素可以选择不同的方法, 进而会得到不同的算法。这些要素包括: ①预测模型; ②目标函数; ③控制法则[35]。

预测模型是模型预测控制的基础。好的设计方案需要准确地描述必要的机制, 要能捕获全部过程动力并且可以计算出各种预测值。文献中, 得到的线性模型预测控制和非线性模型预测控制都是为了通过基本概念解决相同的优化问题, 只是模型和优化算法有所不同。文献[36]中介绍了从空气动力学数据、驱动机构和发电机数据等简单物理量得出的线性模型。线性模型对降低驱动机构负荷和使能量捕集效率最大化很有效。之后, 包

括风机塔自由度的另外一个线性模型的结果显示,在所有运行区间内其对转子速度、风机塔负荷、驱动机构扭转负荷等参数都有很好的调节效果[37]。Schlipf等[38]曾将FAST系统用于将非线性动力学系统直接做线性化处理,得到线性化的模型。这提供了另外一种有效的方法,可以借此获得一个线性模型,并且很方便地纳入更多的自由度。所有前述线性模型预测控制方法在所有运行点上使用的都是一个模型。一个调整后的模型预测控制系统包括在不同的运行点上的多个线性模型,用于调整转子速度和降低驱动机构负荷[39]。所有线性模型同时得出输出数据,最终的输出数据则是所有输出数据的加权和,根据估算得到的风速选择各个输出数据的权重比例。同时,由于可以直接纳入一些内在的非线性空气动力数据[38,40,41],因此基于非线性模型的模型预测控制必定是很有应用前景的。获得非线性模型的一种方法是采用空气弹性变形模拟器,即FAST系统,使用叶片元素动力计算风场对叶片的影响效果。尽管响应预测是准确的,计算过程却必须反复进行,因此也就比较昂贵。一个稍有不同纳入非线性动力学数据的方法是,通过可以查表得到的非线性空气动力学推力和扭矩建立一个降序模型[40]。文献[38]中给出了线性模型预测控制(LMPC)和非线性模型预测控制(NMPC)之间的一个明白的对比。LMPC使用的模型只有一个运行点是线性化的,NMPC则是在每个预测步骤中都是线性化的。结果显示NMPC在风速偏离运行点很远的时候也可以获得较好的效果。

预测的另外一个重要的部分是如何表示状态变量和扰动数据。过去,人们常常假定风速是一个无法测量的变量,因此都是采用卡尔曼滤波器(线性系统)或扩展后的卡尔曼滤波器(非线性系统)[36,39]系统计算风速。由于风速传感器LIDAR最近获得的一些进步,MPC问题领域的状态预测已可以被简化并且比之前更加准确。LIDAR安装在机舱上,可以用于测量即将来临的风的速度[42]。研究显示,如果能够比较完美地预测风速情况[42,43],则线性MPC的性能可以得到极大的改善。另外的一项研究显示,采用LIDAR预测测量系统之后,非线性MPC可以改善风机塔和叶片的负荷状况,并且降低桨距活动[40]。尽管有些研究显示LIDAR对风速的预测并不很准确[44],但结果还是显示虽然LIDAR的测量结果不完美但是比较真实,通过非线性MPC已可实现降低负荷并且减少桨距活动等功[45]。这种情况下,研究人员提出了一个时变不确定的模型预测控制器,用于对吹

向风机转子的风的速度进行预测。比较了两种类型的测量结果,即在叶片旋转位置处测得的未失真测量值,以及在相同位置获得的但有失真的测量值。两种数据都被纳入MPC中,并且使用 H_∞ 预测控制器与之前的研究结果做了比较。结果显示即使在使用有失真的LIDAR测量数据的情况下,MPC的效果也比 H_∞ 预测控制器的效果要好。因此,如果将来能够准确地预测各种变量,则效果会更好[42]。

相比于其他方法,MPC可以使用目标功能和各种约束条件,因此对风机控制而言还有其他一些优点。在存在一些相互之间有冲突的性能参数时,MPC可以比较容易地处理多变量问题,比如如何平衡风机塔和叶片上的负荷等问题[40]。另外,桨距执行机构在控制输入数据中引入的限制条件可以很方便地在控制原理设计阶段得以处理[40]。控制设计中可以纳入疲劳损坏动力学问题,以便解释目标函数中材料的疲劳机制[46]。另外,动态流入状况可以纳入MPC设计的预测模型,提高控制器的鲁棒性[47]。在很多文献[36,40,42,48]中,MPC的优化问题都是通过权重求和法予以解决的,方法将数个不同的成本函数组合成了一个成本函数。文献[49]基于敏感度表格的计算,研究了调谐方法,目的在于获得多目标成本函数的折中方案,以便优化五个确定的测量数据方面的性能:功率变化、桨距使用、风机塔位移、驱动装置扭曲以及超过标称功率限制的频率。之后,在重量调谐过程中,为了更好地平衡在整个运行区间内的能量捕集和风机塔前后疲劳负荷等各种有冲突的目标,Pareto曲线描述了多目标MPC调谐的情况[50]。

3.1.3. 强大的 H_2/H_∞ 控制

对一个典型的三叶片风机而言,一个降低周期性负荷扰动的有效方法是降低 nP 频率处的负荷(P 是旋转频率, $n=1,2,3,\dots$)。负荷的周期性扰动来自风剪切、塔影效应和离心力的作用。典型情况下,我们只考虑低频率情况下(即 $1P$ 、 $2P$ 、 $3P$ 和 $4P$)的周期性作用。在高频率状态下进一步降低负荷还需要更高的调浆速度,这样一来桨距执行机构的负荷会有所增加,进而其使用寿命会有所降低。在 H_2/H_∞ 法中,使用权重函数执行回路成型工作是处理在某些带宽情况下的性能的一个很有效的方法。这个混合敏感度优化问题会直接影响各种控制工作的效果和系统的性能。

图4中给出了一个使用 H_∞ 控制的典型例子。风机调浆系统中有两个控制回路。其中一个用于调控发电机

速度的总距回路，可以提供总距信号。另外一个独立调距控制回路，可以根据转子平面中的叶片方位角对总距进行较小的调整。在独立调距控制回路中，叶片根部的动量被MBC转换系统转换成非转动坐标系中的倾斜动量和偏航动量。独立桨距控制器可以是一个多变量 H_∞ 控制器。倾斜和偏航桨距角再被反向MBC转换系统转换为旋转坐标数据，然后再与总距控制信号结合在一起。

图5中给出了通用的 H_∞ 控制配置数据。P是通用的装置模型，其中包括装置、扰动模型及装置与控制器之间的互连结构。互连结构可以纳入权重函数，以便进一步促进回路成型工作。 w 为相当于周期性扰动的外缘输入数据； z 为外缘输出，指的是在发电机标称速度和额定发电机速度之间需要使其最小化的跟踪误差； v_i 为通用配置的控制器输入，如命令、测得的装置输出等； u 为控制输入。最佳的 H_∞ 控制可以得到一个反馈增益数据K，使跟踪误差最小化，并且降低风扰动在1P、2P、3P和4P等频率状态下对叶片襟翼负荷造成的各种影响。

优化过程可使权重闭环转移函数S（即输出敏感度函数）、KS和T（即补充输入敏感度函数）的无穷范数最小化为：

式中

$$S = (I+L)^{-1}, T = L(I+L)^{-1}, L = \tilde{P}K \quad (16-18)$$

敏感度函数S是SISO和MIMO这两个系统的闭环性能的一个很好的指示参数。S的主要优点是，由于我们希望S在理想状态下比较小，因此考虑|S|的幅度就已足够，而无需考虑其正负相位问题。

可以恰当地挑选权重函数，在多变量有冲突的性能指数之间做折中处理，这个过程被称为混合敏感度优化问题。比如，要获得足够的鲁棒性，或者防止输入信号太大，我们可能希望为转移函数KS设置一定界限。另外，还可为T这个幅度规定一个上限，确保L转降在高频率状态下足够快。在敏感度函数中，较高的增益值意味着能较大幅度地降低扰动量。需要指出的是，在MBC转换之后，旋转框中原来的1P,2P,3P,……频率值会变成0P,3P,6P,……等频率值。因此，我们需要重点关注降低低频率和3P频率值的性能。选择 W_1 时，我们将在低频率（0P）处得到一个较高的增益，并且在3P频率处得到一个倒转的陷波滤波效果。由于调桨执行机构的限制，较少考虑高频率。选择了 W_2 来保证执行机构可以在恰当的带宽处正常发挥其功能。 W_2 常是一个高通滤波器，在执行机构带宽以下的增益量很低，在执行机构带宽以上的增益量很高。交叉频率最好在带宽的中部。 W_3 选作空矩阵，意思是T上没有任何全部数据。

控制问题的一个线性矩阵不等式（LMI）公式通过使 H_2/H_∞ 基准值最小化，可以获得一个线性参数变化（LPV）控制器优化。文献[51]中的控制器考虑了叶片、轴和风机塔自由度，相比于增益调整的LQG和PI控制器，性能也有所提高。随后，设计了一个强大的基于LMI的控制器，帮助在整个运行条件内实现其他限制功能。在有结构不确定性存在的情况下，控制器模型中可以纳入各种参数不确定性[52]。文献[53]中的结果显示，发电机速度控制可以扩大降低闭环扰动的带宽范围和风机塔的前后位移。采用总距 H_∞ MISO控制器可以同时改善这两方面的性能。考虑到在独立调桨回路中，在MBC转换之后，偏航与倾斜模式之间存在明显的耦合，且随着旋转频率变化叶片模式也会有所变化，建立了一个频率相关的MIMO装置，帮助解决 H_∞ 混合敏感度优化问题[54]。周期性扰动建模问题被纳入控制设计阶段的相关工作中，但是结果显示这个模型只在风速处于稳定状态时有明显的作用。甚

(15)

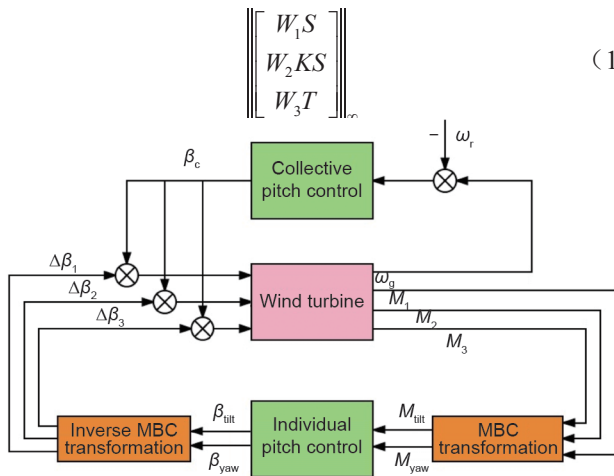


图4. 总距控制和独立桨距控制的增广控制板块示意图。

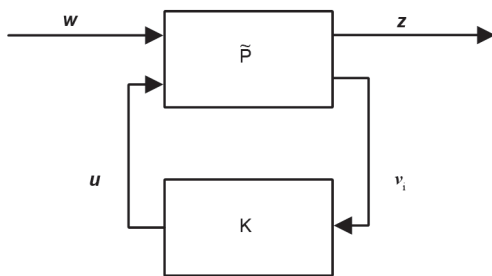


图5. H_∞ 控制板块配置。

在湍流风扰动较小时，降低负荷的效果都不如预期。原因在于扰动具有宽频谱能量，在多频率状态下负荷降低的量不够大[55]。

3.1.4. 组合前馈 / 反馈控制

前面各小节已经讨论的控制方法是一种基于反馈信号的控制方法。风机控制中还有数个相关事项需要涉及使用前馈系统。比如，传感器探测到一阵狂风和后继的转子扭矩响应的机械调整之间可能会有一定时间延迟，而这种延迟可能影响控制器的有效性。最近研究人员已开始研究前馈策略，这种策略可以预测未来的风速，并且在风吹到风机上之前调整输入数据。最新的传感技术LIDAR系统可以提供转子平面前的风场的各种测量结果。预估的序列风参数可以输入回路中，帮助控制器在相关的大风事件发生前采取预防措施。此系统可以预测暴风可能造成的故障，并且让控制器提前采取应对措施，补偿风速对转子速度造成的影响。另外，前馈控制可以结合反馈控制，以便同时实现多种多变量目标[56,57]。前馈控制和反馈控制结合在一起的结构见图6。

前馈控制的初步研究，基于各种测量结果和之前对转子行为的相关知识，重建了气动扭矩，并且使用了相关的估算风速数据[58]。目标是在有风湍流和狂风时降低风导致的扰动，并且同时调节转子的速度。结果显示，前馈控制方法有望将速度变化量降低30%~40%。之后，为了同时兼顾降低负荷等其他目标，又开发了将前馈控制和反馈控制结合在一起的控制系统[59]。反馈部分是一个最佳的LQG控制器，目的在于通过单独的桨距控制降低1P和3P负荷，使偏航和倾斜模式最小化。前馈部分是为了降低作用在转子力矩上的低频率部分的影响。这里，用卡尔曼滤波器估算了风速，在滤波器中根据风机状态增广了随机游走的风模型。无需预测未来的风速。与LQG反馈回路不同， H_∞ 控制方法试图使预测的在单个风机叶片根部产生弯矩的局部风速最小化。因

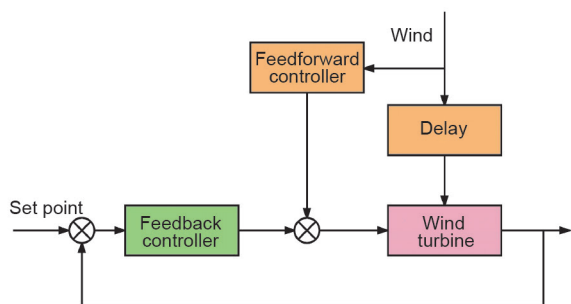


图6. 前馈与反馈结合的控制系统结构。

为考虑的是调桨执行机构的约束条件，因此这是一个更加简单的方法。在文献[60]的研究中，前馈控制被用于两个模型，即非MBC模型和MBC模型。结果显示，这种控制方式可以较明显地降低风机的负荷，降低的幅度会受到风速预测结果和可用的调桨速度的影响。在文献[61]的研究中，进一步探讨了这个问题，在可调桨前馈控制器测量作用风的风速的状况下，使用了其中一个非成因的系列扩展。结果显示，在大幅提高变桨速度的时候，叶片挥舞和塔基的前后DEL可能会降低。在文献[62]的另外一项研究中，结果显示基于FX-RLX的前馈方法结合LIDAR可以降低扰动量并且抑制振动幅度。控制器能够改善风机塔和叶片的弯矩，改善转子速度状况、条件执行机构使用状况，且只会牺牲很小一部分能量捕集效果。尽管LIDAR测量数据可以帮助前馈控制同时实现多个多变量目标，但LIDAR失真和风况变化导致的风速测量误差可能会对控制系统的性能产生严重的负面影响。一个可以采用的解决方案是在风参数测量过程之后增加一个优化的过滤器，降低误差[63]。国家可再生能源实验室现场测试已经验证了使用LIDAR的前馈控制系统的效果[64,65]。实验结果显示转子速度调节效果有所改善，风机负荷也有所降低，因此可以延长风机的使用寿命并且降低能源成本。

3.2. 扭矩控制

当风速位于区间2中时，扭矩控制是主要的控制功能。风机扭矩控制中最具挑战性的一个问题是空气动力学的不确定性。文献[7]的数据显示，得到最佳叶尖速比（TSR）的发电机扭矩可表示为：

$$\tau = k_g \omega_g^2 \quad (19)$$

式中， ω_g 为发电机速度； k_g 为一个优化常数：

$$k_g = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{C_{p_{\max}}}{\lambda_*^3} \quad (20)$$

式中， R 为转子半径； ρ 为空气密度； $C_{p_{\max}}$ 为风机的最大功率系数； λ_* 为能得到 $C_{p_{\max}}$ 的最佳TSR。

Johnson [66]利用自适应控制系统降低不确定度的负面影响。设计了一个自适应法则，用以在时变不确定紊流风场中获得最大的能量捕集效果。在实际现场测试中测试了自适应控制期的效果[66]。文献[67]中进一步进行了稳定性分析。从 C_p 表面开始，我们知道得到最佳的TSR值的时候可以得到最大的空气动力系数。文献[68]

中的自适应控制跟踪了在时变不确定风条件下的最佳TSR状况, 研究中的风速是由状态估算器估算得到的。文献[69]中说明了另外一项通过跟踪最优气动扭矩优化能量捕集效果的研究, 研究中使用了一个二阶滑行模型观测装置来处理模型不确定性和电网扰动等问题。非线性鲁棒控制可平衡转化效率和扭矩震荡平滑化效果。文献[53]中的讨论认为, 两个SISO H_{ω} 扭矩控制器可以分别用于降低风对驱动装置模式和风机塔侧-侧模式的影响。除了这些SISO类型的扭矩控制器以外, 还结合非线性动力学状态反馈控制, 开发了一个用于扭矩控制的多变量策略和桨距控制用的一个线性策略[70]。结果显示这种策略可以在功率调整和转子速度调整之间得到一个折中方案。

3.3. 偏航控制

主动偏航控制可以将风机转子的方向调整为针对风的方向。安装在机舱上的传感器可以测量风向并且确定偏航控制期的控制信号。偏航误差超过一定量之后, 将触发启动偏航电机, 使叶片以恒定的速度偏航至理想的方向, 以捕集最大的能量。偏航控制可以帮助降低结构负荷。比如将一个周期性的LQ控制器用作悬架系统, 则可以降低与偏航动力学有紧密关系的风机塔横向运动[71]。文献[72]中给出了一个考虑了尾流效应的优化后的偏航控制系统, 控制器使用了一个尾流效应的内部参数模型, 用于预测作为偏航角的一个函数的风机发电量水平。结果显示, 进行计算流体动力学模拟时, 发电量有所增加, 且风机负荷有进一步的降低。文献[73,74]中给出了最近的一项关于风电场偏航控制的研究的相关结果。偏航控制可以使近尾流区的尾流偏斜, 并且改变下风区的尾流轨迹。因此, 单个风机可以使用偏航控制应对风场尾流问题, 并且提高整个风场的总体性能效果。文献[75]中基于偏航的尾流转向控制和布局变化, 对风机装置的年发电量情况做了进一步研究, 结果显示年发电量可以提高5%。

3.4. 被动控制方式

降低风机不同部件的负荷可以提高风机运行的稳定性和耐久性。为了实现这个目的可以采用被动控制方式。在文献[76]中一个调谐质量阻尼器(TMD)安装在风机塔顶用以降低塔顶的振动。在文献[77]中两个独立的单一自由度(DOF)调谐质量阻尼器被安装在机舱中, 分别处理从前部到尾部方向的运动和侧-侧方向的运动。

随着风机叶片规格变大, 降低叶片负荷就变得越来越重要。智能转子这个概念是建立在装有数个控制设备的叶片基础上的, 这些控制设备可以调整叶片局部的受力状况。这种控制方式的灵感来源于固定翼飞机和旋翼飞机系统。一些襟翼增升系统和应变传感器可用于改善反馈控制状况。文献[78]中的试验显示了能有效降低1P和3P频率的智能转子的概念验证研究结果。

Microtab是另外一种用于控制空气动力学状况、降低叶片负荷的装置[79]。Microtabs是一些安装在临近翼面后缘处的平移装置。这些装置近似于安装在曲面的法线上, 最大安装高度与转子叶片高度差不多。随着后缘风流动状态的变化, 结构会影响提升效果, 并且影响翼面的有效弧形。文献[79]中给出了一个反映Microtabs对局部翼面的空气动力学状态的影响的动态模型的原型。研究了叶片负荷的频率响应状况, 以便改善设计方案, 在多种频率区间降低相关负荷。这种装置可以延长叶片的使用寿命[80]。研究在文献[81]中进一步延伸, 根据不连续的上下表面贴片分布对翼面产生的影响, 分析了一个非传统的Microtab。

3.5. 最近的发展状况和将来的发展方向

现在有很多研究人员都在研究上述各种风机控制领域的相关问题。另外, 全球还有一种研究趋势是如何改善风电场的性能状况。由于尾流效应的作用, 临近的风机之间会产生相互影响, 因此单个风机的行为可以与整个风电场的性能进行协调。比如, 最近的一些工作已经完成了一些针对数据驱动的优化控制方案的概念验证工作; 在高保真度风电装置模拟工作[65,72,74,75]中使用偏航控制改变尾流轨迹。将来的工作重点可以集中在更加准确地分析尾流效应, 包括整个风场中尾流传播产生的延迟等。LIDAR控制设计也是一个较好的研究方向, 这种控制设计可以测量尾流的参数并且估算控制回路使用的尾流位置情况。这个领域内最近的一些研究工作已经确认了降低负荷和捕集能量的有效性[38,40,42,44,45,57,62,64,65]。目前正在对LIDAR进行风电场现场测试[82]。

4. 总结

本文审查了一些用于在时变不确定紊乱风场中优化风机部件捕集能量和降低负荷的效果的控制方法。我们首先综述了风机系统的动力学和建模工作的相关情况,

包括系统的数学表达、功率曲线、运行条件、MBC转换、总距控制和独立桨距控制用的执行机构等。讨论了三种单独的控制回路，即桨距控制、扭矩控制和偏航控制回路，主要关注的问题是桨距控制方法。另外，本文还简要地回顾了一些被动控制及其目前在业界的发展状况。

Acknowledgment

This work is supported in part by the US National Science Foundation (CMMI1300236).

Compliance with ethics guidelines

Yuan Yuan and Jiong Tang declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Ginley DS, Cahen D, editors. *Fundamentals of materials for energy and environmental sustainability*. Cambridge: Cambridge University Press; 2012.
- [2] Beiter P, Tian T. 2015 Renewable energy data book. Report. Washington D.C.: US Department of Energy; 2016 Nov.
- [3] Pao LY, Johnson KE. A tutorial on the dynamics and control of wind turbines and wind farms. In: *Proceedings of the 2009 American Control Conference*; 2009 Jun 10–12; St. Louis, MO, USA. Piscataway: IEEE Press; 2009. p. 2076–89.
- [4] Jonkman JM, Butterfield S, Musial W, Scott G. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development. Report. Golden: National Renewable Energy Laboratory; 2009 Feb. Report No.: NREL/TP-500-38060.
- [5] Namik H, Stol K. Disturbance accommodating control of floating offshore wind turbines. In: *Proceedings of the 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition*; 2009 Jan 5–8; Orlando, FL, USA. Reston: AIAA; 2009. p. 483.
- [6] Pao LY, Johnson KE. Control of wind turbines. *IEEE Control Systems* 2011;31(2): 44–62.
- [7] Wright AD. Modern control design for flexible wind turbines. Report. Golden: National Renewable Energy Laboratory; 2004 Jul. Report No.: NREL/TP-500-35816.
- [8] Wright AD, Balas MJ. Design of controls to attenuate loads in the controls advanced research turbine. *J Sol Energy Eng* 2004;126(4):1083–91.
- [9] Stol KA, Zhao W, Wright AD. Individual blade pitch control for the controls advanced research turbine (CART). *J Sol Energy Eng* 2006;128(4):498–505.
- [10] Wright A, Fingersh L, Stol K. Designing and testing controls to mitigate tower dynamic loads in the controls advanced research turbine. In: *Proceedings of the 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*; 2007 Jan 8–11; Reno, NV, USA. Reston: AIAA; 2007. p. 1021.
- [11] Jonkman JM, Buhl ML Jr. FAST user's guide. Report. Golden: National Renewable Energy Laboratory; 2005 Aug. Report No.: NREL/EL-500-38230.
- [12] Bossanyi E. GH Bladed theory manual. Bristol: Garrad Hassan & Partners Ltd; 2011.
- [13] Larsen TJ, Hansen AM. How 2 HAWC2, the user's manual. Roskilde: Risø National Laboratory; 2007 Dec.
- [14] Øye S. FLEX4 simulation of wind turbine dynamics. In: *Proceedings of the 28th Meeting of Experts on State of the Art of Aerolastic Codes for Wind Turbine Calculation*; 1996 Apr 11–12; Lyngby, Denmark. Paris: International Energy Agency; 1996. p. 71–7.
- [15] Moriarty PJ, Hansen AC. AeroDyn theory manual. Report. Golden: National Renewable Energy Laboratory; 2005 Jan. Report No.: NREL/TP-500-36881.
- [16] Miller R. Helicopter control and stability in hovering flight. *J Aeronaut Sci* 1948;15(8):453–72.
- [17] Bir G. Multiblade coordinate transformation and its application to wind turbine analysis. Report. Golden: National Renewable Energy Laboratory; 2008 Jan. Report No.: NREL/CP-500-42553.
- [18] Laks J, Pao L, Wright A, Kelley N, Jonkman B. The use of preview wind measurements for blade pitch control. *Mechatronics* 2011;21(4):668–81.
- [19] Yuan Y, Chen X, Tang J. Disturbance observer based pitch control of wind turbines for disturbance rejection. In: *Proceedings of the SPIE Smart Structures and Materials and Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*. 2016 March 20–24; Las Vegas, USA. Bellingham: SPIE; 2016. p. 980609.
- [20] Frost SA, Balas MJ, Wright AD. Direct adaptive control of a utility-scale wind turbine for speed regulation. *Int J Robust Nonlinear Control* 2009;19(1):59–71.
- [21] Johnson C. Theory of disturbance-accommodating controllers. *Contr Dyn Syst* 1976;12:387–489.
- [22] Johnson C. Disturbance-accommodating control—Overview of the subject. *J Interdiscipl Model Simulat* 1980;3(1):1–29.
- [23] Johnson C. Discrete-time disturbance-accommodating control theory with applications to missile digital control. *J Guid Control Dyn* 1981;4(2):116–25.
- [24] Johnson C. Disturbance-accommodating control—An overview. In: *Proceedings of the 1986 American Control Conference*; 1986 Jun 18–20; Seattle, USA. Piscataway: IEEE Press; 2009. p. 526–36.
- [25] Kendall L, Balas MJ, Lee Y, Fingersh L. Application of proportional-integral and disturbance accommodating control to variable speed variable pitch horizontal axis wind turbines. *Wind Eng* 1997;21(1):21–38.
- [26] Balas MJ, Lee Y, Kendall L. Disturbance tracking control theory with application to horizontal axis wind turbines. In: *Proceedings of the 1998 ASME Wind Energy Symposium*; 1998 Jan 12–15; Reno, NV, USA. Reston: AIAA; 1998. p. 95–9.
- [27] Stol K, Rigney B, Balas M. Disturbance accommodating control of a variable-speed turbine using a symbolic dynamics structural model. In: *Proceeding of the 2000 ASME Wind Energy Symposium*; 2000 Jan 10–13; Reno, NV, USA. Reston: AIAA; 2000. p. 84.
- [28] Stol KA, Balas MJ. Periodic disturbance accommodating control for blade load mitigation in wind turbines. *J Sol Energy Eng* 2003;125(4):379–85.
- [29] Hand MM. Mitigation of wind turbine/vortex interaction using disturbance accommodating control. Report. Golden: National Renewable Energy Laboratory; 2003 Dec. Report No.: NREL/TP-500-35172.
- [30] Hand MM, Balas MJ. Blade load mitigation control design for a wind turbine operating in the path of vortices. *Wind Energy* 2007;10(4):339–55.
- [31] Wang N, Wright AD, Balas MJ. Disturbance-accommodating control-based individual blade pitch control design for two-bladed turbines. In: *Proceedings of the 34th Wind Energy Symposium, AIAA SciTech Forum*; 2016 Jan 4–8; San Diego, CA, USA. Reston: AIAA; 2016. p. 1736.
- [32] Wang N, Wright AD, Johnson KE. Independent blade pitch controller design for a three-bladed turbine using disturbance accommodating control. In: *Proceedings of the 2016 American Control Conference*; 2016 Jul 6–8; Boston, MA, USA. Golden: National Renewable Energy Laboratory; 2016. p. 2301–6.
- [33] Wang N, Wright AD, Balas MJ. Disturbance accommodating control design for wind turbines using solvability conditions. *J Dyn Syst Meas Control* 2017;139(4):041007.
- [34] Pace A, Johnson K, Wright A. Preventing wind turbine overspeed in highly turbulent wind events using disturbance accommodating control and light detection and ranging. *Wind Energy* 2015;18(2):351–68.
- [35] Camacho EF, Bordons C. *Model predictive control*. Berlin: Springer; 1999.
- [36] Soliman M, Malik O, Westwick D. Multiple model MIMO predictive control for variable speed variable pitch wind turbines. In: *Proceedings of the 2010 American Control Conference*; 2010 Jun 30–Jul 2; Baltimore, MD, USA. Piscataway: IEEE Press; 2010. p. 2778–84.
- [37] Henriksen LC. *Model predictive control of a wind turbine [dissertation]*. Lyngby: Technical University of Denmark; 2007.
- [38] Schlipf D, Grau P, Raach S, Duraiski R, Trierweiler J, Cheng PW. Comparison of linear and nonlinear model predictive control of wind turbines using LIDAR. In: *Proceedings of the 2014 American Control Conference*; 2014 Jun 4–6; Portland, OR, USA. Piscataway: IEEE Press; 2014. p. 3742–7.
- [39] Kumar A, Stol K. Scheduled model predictive control of a wind turbine. In: *Proceedings of the 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition*; 2009 Jan 5–8; Orlando, FL, USA. Reston: AIAA; 2009. p. 481.
- [40] Schlipf D, Schlipf DJ, Kühn M. Nonlinear model predictive control of wind turbines using LIDAR. *Wind Energy* 2013;16(7):1107–29.
- [41] Bottasso C, Croce A, Savini B. Performance comparison of control schemes for variable-speed wind turbines. *J Phys Conf Ser* 2007;75:012079.
- [42] Mirzaei M, Soltani M, Poulsen NK, Niemann HH. Model predictive control of wind turbines using uncertain LIDAR measurements. In: *Proceedings of the 2013 American Control Conference*; 2013 Jun 17–19; Washington D.C., USA. Piscataway: IEEE Press; 2013. p. 2235–40.
- [43] Korber A, King R. Model predictive control for wind turbines. In: *Proceedings of the European Wind Energy Conference*; 2010 Apr 20–23; Warsaw, Poland. Brussels: WindEurope; 2010.
- [44] Simley E, Pao LY, Frehlich R, Jonkman B, Kelley N. Analysis of wind speed measurements using continuous wave LIDAR for wind turbine control. In: *Proceedings of the 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition*. 2011 Jan 4–7; Orlando, FL, USA. Reston: AIAA; 2011. p. 263.
- [45] Laks J, Pao LY, Simley E, Wright A, Kelley N, Jonkman B. Model predictive control using preview measurements from LIDAR. In: *Proceedings of the 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition*. 2011 Jan 4–7; Orlando, FL, USA. Reston: AIAA; 2011. p. 813.
- [46] Santos RA. *Damage mitigating control for wind turbines [dissertation]*. Boulder: University of Colorado at Boulder; 2007.
- [47] Odgaard PF, Knudsen T, Overgaard A, Steffensen H, Jørgensen M. Importance of dynamic inflow in model predictive control of wind turbines. *IFAC-Paper*

- sOnLine 2015;48(30):90–5.
- [48] Spencer MD, Stol KA, Unsworth CP, Cater JE, Norris SE. Model predictive control of a wind turbine using short-term wind field predictions. *Wind Energy* 2013;16(3):417–34.
- [49] Jain A, Schildbach G, Fagiano L, Morari M. On the design and tuning of linear model predictive control for wind turbines. *Renew Energy* 2015;80:664–73.
- [50] Odgaard PF, Larsen LF, Wisniewski R, Hovgaard TG. On using Pareto optimality to tune a linear model predictive controller for wind turbines. *Renew Energy* 2016;87(Pt 2):884–91.
- [51] Lescher F, Zhao JY, Martinez A. Multiobjective H_2/H_∞ control of a pitch regulated wind turbine for mechanical load reduction. *Renew Energy Power Quality J* 2006;1:100–5.
- [52] Sloth C, Esbensen T, Niss MO, Stoustrup J, Odgaard PF. Robust LMI-based control of wind turbines with parametric uncertainties. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications & Intelligent Control (2009); 2009 Jul 8–10; St. Petersburg, Russia. Piscataway: IEEE Press; 2009. p. 776–81.
- [53] De Corcuera AD, Pujana-Arrese A, Ezquerro JM, Segurolo E, Landaluz J. H_∞ based control for load mitigation in wind turbines. *Energies* 2012;5(4):938–67.
- [54] Vali M, van Wingerden JW, Kým N. Optimal multivariable individual pitch control for load reduction of large wind turbines. In: Proceedings of the 2016 American Control Conference; 2016 Jul 6–8; Boston, MA, USA. Piscataway: IEEE Press; 2016. p. 3163–9.
- [55] Ozdemir AA, Seiler PJ, Balas GJ. Performance of disturbance augmented control design in turbulent wind conditions. *Mechatronics* 2011;21(4):634–44.
- [56] Laks J, Pao L, Wright A. Combined feedforward/feedback control of wind turbines to reduce blade flap bending moments. In: Proceedings of the 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition; 2009 January 5–8; Orlando, FL, USA. Reston: AIAA; 2009. p. 687.
- [57] Wang N, Johnson KE. Combined LIDAR-based feedforward and feedback controllers for wind turbines with tower and blade damping. In: Proceedings of the 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition; 2011 Jan 4–7; Orlando, FL, USA. Reston: AIAA; 2011. p. 814.
- [58] Van der Hooft E, Van Engelen T. Estimated wind speed feed forward control for wind turbine operation optimization. In: Proceedings of the European Wind Energy Conference; 2004 Nov 22–25; London, UK. Petten: Energy Research Centre of the Netherlands; 2004. p. 126.
- [59] Selvam K, Kanev S, van Wingerden JW, van Engelen T, Verhaegen M. Feedback–feedforward individual pitch control for wind turbine load reduction. *Int J Robust Nonlinear Control* 2009;19(1):72–91.
- [60] Laks J, Pao LY, Wright A, Kelley N, Jonkman B. Blade pitch control with preview wind measurements. In: Proceedings of the 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition; 2010 Jan 4–7; Orlando, FL, USA. Reston: AIAA; 2010. p. 251.
- [61] Dunne F, Pao LY, Wright AD, Jonkman B, Kelley N. Adding feedforward blade pitch control to standard feedback controllers for load mitigation in wind turbines. *Mechatronics* 2011;21(4):682–90.
- [62] Wang N, Johnson KE, Wright AD. FX-RLS-based feedforward control for LIDAR-enabled wind turbine load mitigation. *IEEE Trans Contr Syst Technol* 2012;20(5): 1212–22.
- [63] Simley E, Pao L. Reducing LIDAR wind speed measurement error with optimal filtering. In: Proceedings of the 2013 American Control Conference; 2013 Jun 17–19; Washington, DC, USA. Piscataway: IEEE Press; 2013. p. 621–7.
- [64] Scholbrock A, Fleming P, Fingersh L, Wright A, Schlipf D, Belen F. Field testing LIDAR based feedforward controls on the NREL controls advanced research turbine. In: Proceedings of the 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition; 2013 Jan 7–10; Grapevine, TX, USA. Reston: AIAA; 2013. p. 0818.
- [65] Fleming P, Scholbrock A, Jehu A, Davoust S, Osler E, Wright A, et al. Field-test results using a nacelle-mounted LIDAR for improving wind turbine power capture by reducing yaw misalignment. *J Phys Conf Ser* 2014;524:012002.
- [66] Johnson KE. Adaptive torque control of variable speed wind turbines. Report. Golden: National Renewable Energy Laboratory; 2004 Aug. Report No.: NREL/TP-500-36265.
- [67] Johnson KE, Pao LY, Balas MJ, Kulkarni V, Fingersh LJ. Stability analysis of an adaptive torque controller for variable speed wind turbines. In: Proceedings of the 43rd IEEE Conference on Decision and Control; 2004 Dec 14–17; Nassau, Bahamas. Piscataway: IEEE Press; 2005. p. 4087–94.
- [68] Magar KT, Balas MJ, Frost SA. Direct adaptive torque control for maximizing the power captured by wind turbine in partial loading condition. *Wind Energy* 2015;19(5):911–22.
- [69] Beltran B, Ahmed-Ali T, Benbouzid MEH. High-order sliding-mode control of variable-speed wind turbines. *IEEE Trans Ind Electron* 2009;56(9):3314–21.
- [70] Boukhezzer B, Lupu L, Siguerdidjane H, Hand M. Multivariable control strategy for variable speed, variable pitch wind turbines. *Renew Energy* 2007;32(8):1273–87.
- [71] Ekelund T. Yaw control for reduction of structural dynamic loads in wind turbines. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 2000;85(3):241–62.
- [72] Gebraad P, Teeuwisse F, Wingerden J, Fleming PA, Ruben S, Marden J, et al. Wind plant power optimization through yaw control using a parametric model for wake effects—A CFD simulation study. *Wind Energy* 2016;19(1):95–114.
- [73] Marathe N, Swift A, Hirth B, Walker R, Schroeder J. Characterizing power performance and wake of a wind turbine under yaw and blade pitch. *Wind Energy* 2015;19(5):963–78.
- [74] Fleming PA, Ning A, Gebraad PM, Dykes K. Wind plant system engineering through optimization of layout and yaw control. *Wind Energy* 2016;19(2):329–44.
- [75] Gebraad P, Thomas JJ, Ning A, Fleming P, Dykes K. Maximization of the annual energy production of wind power plants by optimization of layout and yaw-based wake control. *Wind Energy* 2016;20(1):97–107.
- [76] Murtagh P, Ghosh A, Basu B, Broderick B. Passive control of wind turbine vibrations including blade/tower interaction and rotationally sampled turbulence. *Wind Energy* 2008;11(4):305–17.
- [77] Lackner MA, Rotea MA. Passive structural control of offshore wind turbines. *Wind Energy* 2011;14(3):373–88.
- [78] Van Wingerden JW, Hulskamp AW, Barlas T, Marrant B, van Kuik G, Molenaar D, et al. On the proof of concept of a “smart” wind turbine rotor blade for load alleviation. *Wind Energy* 2008;11(3):265–80.
- [79] Yen D, van Dam C, Smith R, Collins S. Active load control for wind turbine blades using MEM translational tabs. In: Proceedings of the 20th 2011 ASME Wind Energy Symposium; 2001 Jan 11–14; Reno, NV, USA. Reston: AIAA; 2001. p. 0031.
- [80] Macquart T, Maheri A, Busawon K. Microtab dynamic modelling for wind turbine blade load rejection. *Renew Energy* 2014;64:144–52.
- [81] Nakafuji DY, van Dam CP, Michel J, Morrison P. Load control for turbine blades: A non-traditional microtab approach. In: Proceedings of the 2002 ASME Wind Energy Symposium; 2002 Jan 14–17; Reno, NV, USA. Reston: AIAA; 2002. p. 321–30.
- [82] Kumar AA, Bossanyi EA, Scholbrock AK, Fleming P, Boquet M, Krishnamurthy R. Field testing of LIDAR assisted feedforward control algorithms for improved speed control and fatigue load reduction on a 600 kW wind turbine. Report. Golden: National Renewable Energy Laboratory; 2015 Nov. Report No.: NREL/CP-5000-65062.