

高空风电系统的优化控制研究进展与挑战*

庞岩^{1,2†} 杨禹鹏^{1,2} 杜智伟^{1,2}

(1. 大连理工大学 工业装备与结构分析国家重点实验室, 大连 116024)

(2. 辽宁省空天飞行器前沿技术重点实验室, 大连 116024)

摘要 为了实现“碳达峰,碳中和”的战略目标,我国将持续推动可再生能源的高比例发展,构建以新能源为主的新型电力系统.作为可再生的清洁源,风能的开发和利用已成为研究的重要方向.研究表明远离地面的高空风速更加强健并且更均匀,风向也更稳定,因此,风力发电的进一步突破可以通过用风筝捕获高空风能来实现.为了确保高空风能系统安全、经济、高效地运行,对其控制系统设计的要求极高.本文阐述了国际上几种主流高空风电技术的发电原理、发展进程以及现状.通过对典型的 Yo-Yo 式结构进行动力学建模,分析了各类非线性控制技术的原理和特点,具体描述了非线性模型预测控制原理和轨迹跟踪控制的仿真结果.总结了未来高空风能控制技术面临的控制算法计算量大,控制系统可靠性研究缺乏以及智能化水平不高等关键问题.

关键词 高空风能, 风筝发电, 动力学建模, 非线性模型预测控制优化

中图分类号: V19

文献标志码: A

Research Progress and Challenges for the Optimal Control of Airborne Wind Energy Systems*

Pang Yan^{1,2†} Yang YuPeng^{1,2} Du ZhiWei^{1,2}

(1. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

(2. Liaoning Provincial Key Laboratory of Frontier Technology of Aerospace Vehicles, Dalian 116024, China)

Abstract In order to achieve the strategic goal of "carbon peak and carbon neutrality", the development of a high proportion of renewable energy will be promoted continuously in our country. Therefore a new power system based on new energy will formed gradually. As a renewable clean source, the development and utilization of wind energy has become an important research direction. Studies have shown that the wind speed in the higher altitude is stronger and the wind direction is more stable. Therefore, breakthroughs in wind power generation can be achieved by capturing high-altitude wind energy. In order to ensure the safe, economical and efficient operation of the high-altitude kite power generation system, the design of its control system has extremely high requirements. This paper starts from the basic principles, development history and application status of several high-altitude wind power technologies. Then, a typical Yo-Yo structure kite is modeled. Based on this model, the principles and characteristics of various nonlinear control technologies are analyzed, and the principle of nonlinear model predictive control and simulation results of trajectory tracking control are described in detail. It summarizes that the key problems of high-altitude wind energy control include that control algorithm calculation is too consuming, the research of control system reliability is lack and the control methods are not

2023-05-02 收到第 1 稿, 2023-11-07 收到修改稿.

* 国家自然科学基金资助项目(61973052), National Natural Science Foundation of China (61973052).

† 通信作者 E-mail: ypang@dlut.edu.cn

intelligent.

Key words airborne wind energy systems, kite power, dynamical model, model predictive control, optimization

引言

随着煤炭价格大幅上涨造成的电煤短缺,加上双控标准加紧实施,全国多地陆续出现电力供应严重不足的现象.因此,逐步加大可再生能源的投入,提升非化石能源在一次能源消费中的比重,努力实现能源转型势在必行.在可再生能源中,风能是一种重要的传统能源替代品.2020年全年,全球的风电总装机容量增加93GW,风电行业相较上年同比增长了53%^[1],并且仍具有巨大的开发潜能.目前,风能主要通过水平轴风力涡轮机安装在低高度(一般在200米以下)的陆地上收集.然而绝大部分风能却存在于高空和海上,这些地方超出了传统风电设备的收集范围.

高空风能(也称为风筝发电)系统是一种新兴的可再生能源技术,使用系留式飞行装置来收集风能,该装置可收集比传统风力发电机更高海拔的风能.这种发电技术在相同装机容量下比传统风力发电机所占场地更小,并且具有更高的发电效率以及更低的发电成本.文献[2]阐明了研究高空风能的主要原因:首先,像太阳能一样,风能是为数不多的可再生能源之一,理论上讲足以满足人类所有能源需求.其次,与地面风力发电机不同,高空风能设备可以利用更高海拔并且迄今尚未开发的大型风能资源,不论是在陆地上还是在海上,高海拔地区的风通常比靠近地面部分的风更强且更稳定.第三,也是最重要的,高空风能系统与大多数其他可再生能源相比,单位可用功率所需的材料消耗更少.这种高功率低消耗的技术有望以相对较低的成本实现大规模的部署.此外,高空风能设备因为不用固定在地面还具有可改变其运行空域的优势,这使高空风能设备在其操作环境方面具有更大的灵活性,进而有助于最大化其功率输出.

近年来,我国政府力求提高可再生清洁能源在能源消费中所占比重,对风能、太阳能等能源的有效利用提出了新的要求.因此,高空风筝发电有望

为我国目前面临的能源短缺,生态环境变化,可持续发展性不足等问题的有效解决途径.

1 高空风筝发电装置的发展动态

1980年,美国学者Miles Loy^[3]最早提出了关于“风筝发电”概念,其结构如图1所示.随后,荷兰代尔夫特理工大学的Kite Power团队采用一根主绳索作为主要结构,利用主绳索的相对长度变化,通过空中的控制单元(KSU)来控制^[4,5]风筝飞行.此外,瑞士的Kite Power研究团队、慕尼黑理工大学的“绿翼团队”以及德国的SkySails公司等也采用了类似的结构,如图1(a)所示;与主绳索结构不同,Enerkite公司和WindLift公司则使用多根系绳来控制风筝的飞行轨迹^[6],如图1(b)所示.下面介绍几种不同结构的风筝发电系统.

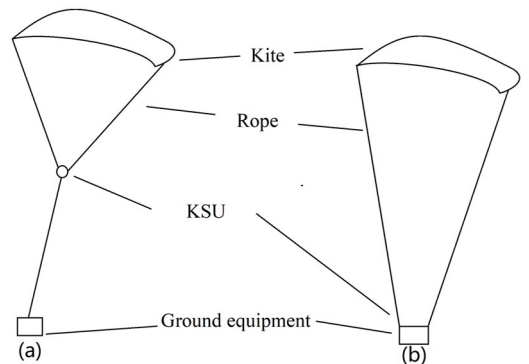


图1 风筝发电装置结构组成
Fig. 1 Main structure of kite generator

1.1 Yo-Yo 式结构

在这种Yo-Yo式结构配置中,风筝用系绳固定在地面上,风能被风筝转换成动能,滚筒安装在发电机上,这种设置的目的是可以利用侧风,产生最大的功率输出.根据这种结构,意大利KiteGen公司最先开发了规模化的风筝发电站“KiteGen Stem”,其原型为意大利都灵理工大学的KiteGen科研项目.如图2为其推出的由单个风筝组成的小型Yo-Yo装置样机^[7],其发电功率为3MW.而其高空风能电站已经于2015年4月正式投入使用.



图2 KiteGen Yo-Yo发电系统样机

Fig. 2 KiteGen prototype of a Yo-Yo configuration

1.2 Carousel 装置

由于 Yo-Yo 结构存在耗电阶段,因此发电过程不连续.如图3所示,意大利“巨杉自动控制”公司提出了 Carousel 装置^[8],该装置能将多个 Yo-Yo 风筝整合到一个圆盘,可以克服上述问题.



图3 Carousel 系统设想图

Fig. 3 KiteGen carousel configuration concept

1.3 多个风筝系统

多个风筝系统与常规的风筝相比,这类系统每平方米的牵引力更高,然而其结构更加复杂,不利于建模和控制.荷兰科学家 Ockels 曾提出一种多个风筝系统,即将多个风筝用一根绳索按顺序连接组成一个多伞系统,增加风筝伞的好处是能够增加整个装置的迎风面积,如图4所示,可以通过一条绳索上的多个风筝上下往复运动的方式进行发电^[9].名为 Laddermill(梯形电站)便是一种多风筝装置^[10].

在国内,中国能建中电工程和中路股份共同建设,中国能建安徽院总承包、江苏电建一公司承建的安徽绩溪高空风能发电新技术示范项目成功发电,成为我国首个可并网的兆瓦级高空风能发电示范项目.如图5所示,此项目采用伞梯组合型陆基

高空风能发电技术路线,设计装机总容量 $2 \times 2.4 \text{ MW}$,能够利用 $300 \text{ m} \sim 3000 \text{ m}$ 的高空风能进行发电,是我国高空风能发电技术的首次工程化实践,对推动高空风能发电技术和产业化发展具有重大意义^[11].

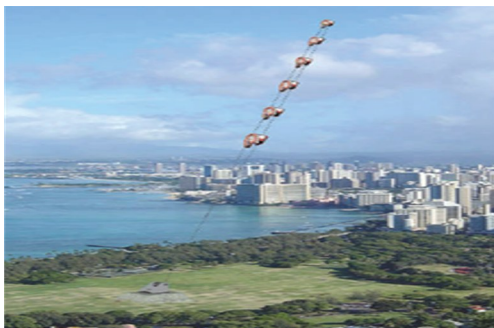


图4 Laddermill 发电理念图

Fig. 4 Simple illustration of the Laddermill



图5 “天风二号”发电系统设想图

Fig. 5 Schematic diagram of “Skywind” power generation system

1.4 固定翼飞行器式结构

固定翼飞机式结构如图6^[12],按其发电机位置可分为机载发电式系统和地面发电式系统两种,最初是由 Makani Power 公司设计并研制的^[13],近期又由业内先锋 Windlift^[14]和 EnterKite^[15]继续跟进.



图6 固定翼飞机式结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of fixed wing designs

1.5 船舶牵引

高空风能除了可以用来发电之外,还可以用来给船舶提供牵引,如图7所示.德国的 SkySails 公司研究开发了将其用于拖船和游艇或高空发电的技术方案.他们的产品融合了两方面的巨大优势:100%环保的船用辅助动力和风能推进器(两者均

由自动控制的风筝提供). 该系统可以根据需要分别以推进或发电机模式运行. 船上的机载风能大大降低了货船的油耗, 削减了运输成本. 除此之外, 它还减少了二氧化碳的排放, 同时减少了诸如硫和氮氧化物之类的污染物的输出^[16].



图7 SkySails 风筝牵引艇示意图

Fig. 7 Schematic diagram of SkySails Yacht

2 高空风筝发电装置的系统建模

在高空风能的研究与发展过程中, 高空风筝的系统动力学建模是对其进行仿真、优化和控制的必要前提条件. 近些年来, 牵引风筝系统动力学建模的相关研究比较活跃^[17-20]. 这些成果表明牵引风筝的动力学建模可以参考已经更为成熟的翼伞系统建模方法. Goodrick 等^[21]在 1975 年完成了三自由度翼伞的平面运动模型的建立; Diehl 于 2001 年在忽略绳索质量的前提下, 建立了四自由度风筝空间运动模型, 在该模型中, 风筝的牵引绳索的长度被设定为定值^[22]. 2006 年, Canale 和 Fagiano 等将绳索长度的变化速率和变化加速度纳入考量, 建立了更为完善的六自由度单个风筝动力学模型^[23]. 2012 年, 赵振华等^[24]在上述模型的基础上将绳索长度的变化率设为定值, 将复杂的六自由度风筝动力学模型简化为五自由度模型. 同年, Baayen 和 Ockels^[25]首先提出了通过转角变换将原本非常复杂的风筝飞行控制问题转化为单一-单出系统的控制问题. 2013 年, Erhard 和 Strauch^[26]提出了转弯率定律, 并且用其证明了风筝动力学主要受航向角的控制. 在上述研究的基础上, Fechner^[27, 28]提出了进一步改进的简化风筝动力学模型. 近几年来, 随着高空风能技术的进一步发展, 一些面向控制的精确模型^[29-32]以及系统模型估计^[33]和模型辨识^[34]等相关研究被广泛关注.

由于大多数系统建模都是基于 Yo-Yo 式发电装置, 本文仅讨论 Yo-Yo 式发电装置的建模过程. 首先, 为了方便分析风筝在空间的运动轨迹, 采用球坐

标系建立模型. 如图 8 所示, 建立地面坐标系时, 原点是绳索与地面的连接点, OX 轴方向为风向.

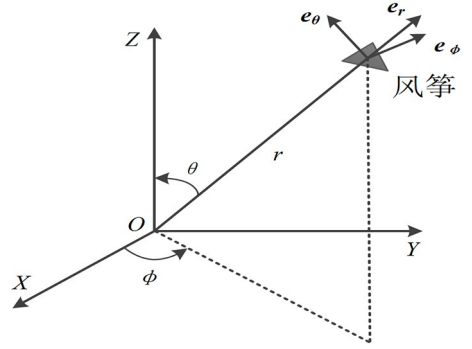


图8 地面坐标系与风筝装置体坐标系

Fig. 8 The ground coordinate system and the kite body coordinate system

记球面坐标三个方向单位矢量方向为径向(e_θ, e_ϕ, e_r)即从原点指向风筝质心方向, e_θ 在 e_r 和 OZ 轴的平面内指向 OZ 方向, e_ϕ 满足右手系. 他们之间存在这个转换关系:

$$(e_\theta, e_\phi, e_r) = \begin{pmatrix} \cos\theta \cos\phi & -\sin\phi & \sin\theta \cos\phi \\ \cos\theta \sin\phi & \cos\phi & \sin\theta \sin\phi \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (1)$$

在球坐标系中, 风筝质心相对于原点的位置为 \mathbf{p} :

$$\mathbf{p} = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r \sin\theta \cos\phi \\ r \sin\theta \sin\phi \\ r \cos\theta \end{pmatrix} \quad (2)$$

风筝的质量定义为 m , 用 $\vec{\mathbf{F}}$ 定义风筝所受合力, 用牛顿运动定律来描述风筝质心的运动特性, 可得:

$$\ddot{\mathbf{p}} = \frac{d^2 \mathbf{p}}{dt^2} = \frac{\vec{\mathbf{F}}}{m} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)中, 得到风筝质心在球坐标系中的加速度表达式为:

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{p}} &= \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \theta} \dot{\theta} + \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \phi} \dot{\phi} + \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial r} \dot{r} \right) \\ &= \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \theta} \ddot{\theta} + \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \phi} \ddot{\phi} + \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial r} \ddot{r} + \frac{\partial^2 \mathbf{p}}{\partial \theta^2} \dot{\theta}^2 + \frac{\partial^2 \mathbf{p}}{\partial \phi^2} \dot{\phi}^2 + \\ &\quad \frac{\partial^2 \mathbf{p}}{\partial r^2} \dot{r}^2 + 2 \frac{\partial^2 \mathbf{p}}{\partial \phi \partial \theta} \dot{\phi} \dot{\theta} + 2 \frac{\partial^2 \mathbf{p}}{\partial r \partial \theta} \dot{r} \dot{\theta} + 2 \frac{\partial^2 \mathbf{p}}{\partial r \partial \phi} \dot{r} \dot{\phi} \end{aligned} \quad (4)$$

最终将风筝的运动规律整理为如下形式:

$$\begin{aligned} r\ddot{\theta} - r\sin\theta\cos\theta\dot{\phi}^2 + 2\dot{r}\dot{\theta} &= \frac{\mathbf{F}_\theta}{m} \\ r\ddot{\phi}\sin\theta + 2\dot{r}\dot{\phi}\sin\theta + 2r\dot{\theta}\dot{\phi}\cos\theta &= \frac{\mathbf{F}_\phi}{m} \end{aligned}$$

$$\ddot{r} - r\dot{\theta}^2 - r\dot{\phi}^2 \sin^2 \theta = \frac{\mathbf{F}_r}{m} \quad (5)$$

定义 $\mathbf{F}_\theta, \mathbf{F}_\phi, \mathbf{F}_r$ 分别为三个单位方向的分力, 其中, 包含重力 $\vec{\mathbf{F}}^{\text{grav}}$ 、气动力 $\vec{\mathbf{F}}^{\text{aer}}$ 、牵引力 $\vec{\mathbf{F}}^{\text{trc}}$. 它们之间的关系表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_\theta &= \mathbf{F}_\theta^{\text{grav}} + \mathbf{F}_\theta^{\text{aer}} + \mathbf{F}_\theta^{\text{c,aer}} \\ \mathbf{F}_\phi &= \mathbf{F}_\phi^{\text{grav}} + \mathbf{F}_\phi^{\text{aer}} + \mathbf{F}_\phi^{\text{c,aer}} \\ \mathbf{F}_r &= \mathbf{F}_r^{\text{grav}} + \mathbf{F}_r^{\text{aer}} + \mathbf{F}_r^{\text{c,aer}} - \mathbf{F}^{\text{trc}} \end{aligned} \quad (6)$$

设系统状态向量为:

$$\mathbf{x}(t) = [\theta(t), \phi(t), r(t), \dot{\theta}(t), \dot{\phi}(t), \dot{r}(t)] \quad (7)$$

Yo-Yo 式风筝装置的空间运动轨迹模型可表示为:

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \\ \dot{r} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\phi} \\ \ddot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \\ \dot{r} \\ \frac{-\mathbf{F}_\theta}{mr} + \sin\theta \sin\theta \dot{\phi}^2 - \frac{2\dot{r}\dot{\theta}}{r} \\ \frac{\mathbf{F}_\phi}{mr \sin\theta} + 2\dot{\theta}\dot{\phi} \cot\theta - 2\dot{r}\dot{\phi} \\ \frac{\mathbf{F}_r - \mathbf{F}^{\text{trc}}}{m} + r\dot{\theta}^2 + r\dot{\phi}^2 \sin^2\theta \end{bmatrix} \quad (8)$$

3 高空风筝发电装置的非线性控制

若想实现高空风筝发电的大规模使用, 自动飞行控制是其中的关键技术. 为了让高空风筝发电装置稳定、连续地工作, 必须控制风筝沿着预定轨迹飞行, 为防止绳索缠绕轨迹通常设置成“8”字形. 而该轨迹根据其空间位置关系又分为开放式轨迹和闭合式轨迹^[19,20,35,36]. 分析表明: 对于开放式风筝轨迹, 其“8”字形轨迹越小, 系统的发电效率越高; 对于闭合式风筝轨迹, 其“8”字轨迹方向越正, 系统的发电效率越高^[37].

在确定完轨迹后, 还需要使风筝沿目标轨迹运行时的发电量尽可能高, 因此需要对风筝的飞行轨迹进行优化设计. 这里的轨迹优化问题可以看作包含多个状态和控制约束的非线性系统最优控制问题 (OCP)^[38]. 一般情况下, 数值求解 OCP 问题的方法主要分为直接法和间接法^[39]. 其中, 直接法的求解思路为通过离散化把连续时间的 OCP 转化为非线性规划问题, 再通过比较成熟的算法对非线性规划问题进行数值求解^[40]. 文献[41]提出了用

Radau 伪谱法求解高空风筝轨迹优化问题, 通过此算法轨迹优化的计算速度得到了极大提升, 并得到了优化的风筝飞行轨迹. 该 Radau 伪谱法为直接法的一种, 又称 Legendre-Guass-Radau 配点法, 此方法在航空航天工程中得到广泛应用.

风筝的飞行控制中, 无法避免各种扰动, 比如突风、紊流等. 这些扰动会极大地干扰发电做功过程, 可能会导致飞行轨迹偏离、飞行状态紊乱, 严重的甚至有可能发生坠毁. 从理论上讲, 由于风筝系统具有非线性动态、开环不稳定且受到风扰动的影响, 使得其控制极其复杂, 因此备受关注^[5-8,12-28,41-53]. 文献[54]将机器学习与风筝发电的弹性控制结合, 采用可靠性分析中的子集模拟^[55]和机器学习中的支持向量机^[56]等技术对系统的故障进行预测. 文献[57]使用深度神经网络来学习基于最新结果的近似控制器, 这些结果证明了这种网络相对于传统浅层网络具有更强大的描述能力. 还有很多人工智能被应用在风筝发电的控制当中的例子^[52,54,57,58]. 而目前风筝的控制问题主要应用非线性模型预测控制 (NMPC) 来解决, 获得了部分有价值的成果. NMPC 的前提是系统模型必须精确, 而精确的模型对风筝系统来说不易获取, 而且在线优化的计算量也是一个挑战^[44,49,50]. 关于此问题, 一些学者提出了许多种算法, 例如, 基于状态反馈近似的显式非线性模型预测算法, 以及针对快速求解性能指标的快速在线非线性模型预测算法等^[59]. 文献[41]采用了一种实时迭代 (RTI) 策略, 极大地降低了非线性模型预测^[60]轨迹跟踪控制律的计算量, 缩短了递推优化的时间, 解决了轨迹跟踪控制的实时性问题. 该 RTI 策略在优化过程中, 利用前一个采样时刻的优化解来对当前采样时刻的优化问题进行初始化, 将优化计算过程中的迭代次数减少到一到三次牛顿迭代, 这样就减少了传统非线性模型预测控制中的大量数值迭代^[61].

国内一些研究机构在风筝控制方面取得了一些进展. 孙明玮等^[62]提出了一种基于在线搜索策略的 Yo-Yo 式风筝的优化方法. 通过使用均匀采样和混沌搜索方法, 在线获得受物理约束的次优解. 对转盘式风筝发电系统, 贺建平^[63]在论文中提出了检测翼伞姿态的新方法, 首先建立模糊控制数学模型, 然后通过用超声波雷达检测翼伞的位置, 由中央控制器实现无线远程控制, 达到实时控

制翼伞姿态并让其保持最优姿态. 孙衢等^[64]针对 Carousel 风筝发电系统提出了一种基于神经网络的预测函数的控制器, 通过 BP 神经网络来建立预测模型, 基于非线性模型预测控制原理设计了使风筝发电机组得到最大发电量的控制器. 毋玉^[65]提出的改进型单点质量模型, 在不考虑湍流风的影响下, 能有效地改变航向角、仰角等, 达到控制风筝飞行器按既定飞行路径运动的目的, 从而优化系统的功率输出. 近期, 越来越多的国内学者对这一领域进行关注, 发表了一些关于高空风能研究控制系统现状和发展趋势的文章^[66-68].

作为风筝发电领域较为成熟的非线性控制方法, 本文以非线性模型预测控制为例进行简要的介绍. 风筝通过连续改变线的长度来驱动发电机发电, 需要按一定轨迹飞行. 非线性模型预测控制器旨在实现对绳系风筝系统的跟踪问题, 为了保证预测输出尽可能地接近设定的参考轨迹, 需要解决非线性优化问题. 定义跟踪阶段的二次性能指标:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{T_p} [\dot{y}(t+\tau) - \dot{y}_r(t+\tau)]^T \mathbf{Q} [\dot{y}(t+\tau) - \dot{y}_r(t+\tau)] d\tau \quad (9)$$

其中, T_p 为预测时域, $\dot{y}(t+\tau)$ 为预测输出, $\dot{y}_r(t+\tau)$ 为参考轨迹, \mathbf{Q} 为权矩阵, 取 $\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, 本文将“8”字形参考轨迹定义为:

$$\theta_r(t) = 35 - 5\sin\left(\frac{\pi}{3}t\right), \phi_r(t) = -50\sin\left(\frac{\pi}{6}t\right) \quad (10)$$

为了实现轨迹跟踪, 设 $y_1 = \theta$, $y_2 = \phi$ 为系统的输出量. 通过二阶泰勒展开 $\dot{y}(t+\tau)$ 对预测的输出量进行近似:

$$\begin{aligned} \dot{y}_1(t+\tau) &= y_1(t) + \tau y_1^{(1)}(t) + \frac{\tau^2}{2!} y_1^{(2)}(t) + \dots \\ &+ \frac{\tau^k}{k!} y_1^{(k)}(t) \approx \theta(t) + \tau \dot{\theta}(t) + \frac{\tau^2}{2!} \ddot{\theta}(t) \\ \dot{y}_2(t+\tau) &= y_2(t) + \tau y_2^{(1)}(t) + \frac{\tau^2}{2!} y_2^{(2)}(t) + \dots \\ &+ \frac{\tau^k}{k!} y_2^{(k)}(t) \approx \phi(t) + \tau \dot{\phi}(t) + \frac{\tau^2}{2!} \ddot{\phi}(t) \end{aligned} \quad (11)$$

与风筝数学模型(7)相同, $J = \int_0^{T_p} \{[(\theta - \theta_r) + \tau(\dot{\theta} - \dot{\theta}_r) + \tau^2/2(\ddot{\theta} - \ddot{\theta}_r)]^2 + [(\phi - \phi_r) + \tau(\dot{\phi} - \dot{\phi}_r) + \tau^2/2(\ddot{\phi} - \ddot{\phi}_r)]^2\} d\tau$ 为系统状态量, 可以通过状态方程(7)获得. 将式(10)和式(9)代入式(8)中, 得到:

$$J = \int_0^{T_p} \{[(\theta - \theta_r) + \tau(\dot{\theta} - \dot{\theta}_r) + \frac{\tau^2}{2}(\ddot{\theta} - \ddot{\theta}_r)]^2 + [(\phi - \phi_r) + \tau(\dot{\phi} - \dot{\phi}_r) + \frac{\tau^2}{2}(\ddot{\phi} - \ddot{\phi}_r)]^2\} d\tau \quad (12)$$

令 $\frac{\partial J}{\partial u} = 0$ 便可直接求得 NMPC 控制器的表达式 u .

表 1 列出了风筝模型和非线性模型预测控制仿真的具体参数. 当线长 $r = 500\text{m}$ 到 $r = 1000\text{m}$ 之间变化时, 风筝发电系统的非线性模型预测控制跟踪结果如图 9 所示. 图 9 显示了整个模拟过程中的风筝位置轨迹(虚线), 结果证明它很好地跟随着参考轨迹(实线).

表 1 模型与控制仿真参数
Table 1 Model and control parameters

Parameters	Symbol	Value
Kite mass/kg	m	50.00
Characteristic areas/m ²	A	100.00
Air density/(kg/m ³)	ρ	1.20
Drag coefficient	C_D	0.15
Lift coefficient	C_L	1.20
Kite span/m	d_s	40.00
Reference elevation value/m	h_0	10.00
Roughness factor	h_r	0.10
Traction phase reference line speed/(m/s)	\dot{r}_{ref}	2.20
Passive phase reference line speed/(m/s)	\dot{r}_{ref}	-5.50
Minimum length of lines/m	r_{min}	500.00
Maximum length of lines/m	r_{max}	1000.00
Predictive period/s	T_p	1.00

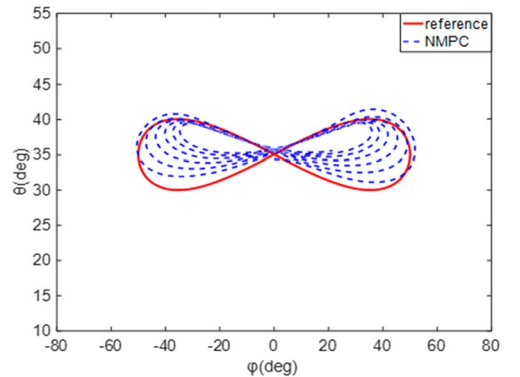


图 9 发电系统中风筝轨迹(虚线)跟踪参考轨迹(实线)效果
Fig. 9 Trajectory of the kite position (dashed) following a reference path (solid) for power generating system

4 结论

作为可再生的清洁能源,高空风能具有发电成本低、发电效率高、环保等优势,可为偏远、高海拔,海上等环境中的军事或民用设施提供不间断能源供给,也将为全球开发利用清洁能源提供另一条渠道.对于高空风能的利用国外已有很多方案,部分已经进行了试飞实验,而我国还处于起步阶段.在此,针对高空风能装置的优化控制研究存在的问题和今后的发展方向进行展望:

(1)高空风筝的飞行过程存在不稳定、快速变化且受到干扰等问题,这些问题对于 NMPC 算法的适用性提出了挑战.传统 NMPC 方案在实时控制过程中,有两个主要的缺点:一个是实时控制过程中计算输入更新迭代需要大量时间,另外系统的状态估计值和对应的过程输入更新之间有很严重的延迟,致使实际测量值和由其产生的控制作用之间产生了明显延迟.如果 NMPC 控制律的计算时长超过跟踪控制的采样周期或与之接近时, NMPC 跟踪控制即会产生相应的延迟,难以实现对轨迹的精确跟踪.针对这些问题,可以考虑更先进的数值优化技术,比如实时迭代方案(RTI)来实现.

(2)高空风筝发电装置一方面要保证利用系统最大可能地发电,另一方面又要保证运行安全.现有文献几乎全部都集中前者,而对于后者的研究较少.这种性能优化和可靠性研究之间的不平衡表明今后还需要大量的工作来提升高空风能系统的弹性和鲁棒性.为了能保证控制器的可靠性,需要大量的仿真.这里面临两个困难,一个是对控制系统验证的计算量非常大,另一个是不容易找到大量控制系统故障的反例.如果反例的数据足够多,那么就可以与控制系统建立一个并行的模型用以监视当前的飞行状态.此外,控制系统若能够获取当前风场参数,感知风场内高风速位置,在无人工操作的条件下,智能调整工作状态,最大程度地获得电能是今后研究的重要方向.

(3)随着人工智能技术的发展,很多飞行器故障诊断可以采用机器学习等方法.基于第三节可以看出人工智能技术的许多方法也被应用于高空风电系统的控制系统设计中,未来其或将成为主流研究方向.

参考文献

- [1] JØRGENSEN B H, MADSEN P H, GIEBEL G, et al. DTU International Energy Report 2021: Perspectives on Wind Energy [R]. [S. l.]: GWEC, 2021.
- [2] AHRENS U, DIEHL M, SCHMEHL R. Airborne wind energy [M]. Berlin: Springer, 2013.
- [3] LOYD M L. Crosswind kite power [J]. Journal of Energy, 1980, 4(3): 106–111.
- [4] WILLIAMS P, LANSDORP B, OCKELS W. Modeling and control of a kite on a variable length flexible inelastic tether [C]//Proceedings of the AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 2007.
- [5] LANSDORP B, RUITERKAMP R, OCKELS W. Towards flight testing of remotely controlled surfkites for wind energy generation [C]//Proceedings of the AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 2007.
- [6] ALONSO-PARDO J, SÁNCHEZ-ARRIAGA G. Kite model with bridle control for wind-power generation [J]. Journal of Aircraft, 2015, 52(3): 917–923.
- [7] CANALE M, FAGIANO L, MILANESE M. Power kites for wind energy generation [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2007, 27(6): 25–38.
- [8] CANALE M, FAGIANO L, MILANESE M, et al. KiteGen project: control as key technology for a quantum leap in wind energy generators [C]//2007 American Control Conference. New York: IEEE, 2007: 3522–3528.
- [9] OCKELS W, LANSDORP B. Comparison of concepts for high-altitude wind energy generation with ground based generator [C]//The 2nd China International Renewable Energy Equipment & Technology Exhibition and Conference. [S. l. : s. n.], 2005.
- [10] LANSDORP B, WILLIAMS P. The laddermill: innovative wind energy from high altitudes in Holland and Australia [C]//Proceedings of the Global Windpower Conference. Reston, Virginia: AIAA, 2006.
- [11] 国家电力投资集团有限公司. 我国首个兆瓦级高空风能发电示范项目成功发电[J]. 电世界, 2024, 65(1): 62.
- [12] VERMILLION C, COBB M, FAGIANO L, et al. Electricity in the air: insights from two decades of

- advanced control research and experimental flight testing of airborne wind energy systems [J]. *Annual Reviews in Control*, 2021, 52: 330–357.
- [13] WIJNJA J, SCHMEHL R, DE BREUKER R, et al. Aeroelastic analysis of a large airborne wind turbine [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2018, 41(11): 2374–2385.
- [14] AULL M, COHEN K. A nonlinear inverse model for airborne wind energy system analysis, control, and design optimization [J]. *Wind Energy*, 2021, 24(2): 133–148.
- [15] CANDADE A A, RANNEBERG M, SCHMEHL R. Structural analysis and optimization of a tethered swept wing for airborne wind energy generation [J]. *Wind Energy*, 2020, 23(12): 2256.
- [16] ERHARD M, STRAUCH H. Sensors and navigation algorithms for flight control of tethered kites [C]//2013 European Control Conference (ECC). New York: IEEE, 2013: 998–1003.
- [17] HOUSKA B, DIEHL M. Robustness and stability optimization of power generating kite systems in a periodic pumping mode [C]//2010 IEEE International Conference on Control Applications. New York: IEEE, 2010: 2172–2177.
- [18] FAGIANO L. Control of tethered airfoils for high-altitude wind energy generation-advanced control methods as key technologies for a breakthrough in renewable energy generation [D]. Turin: Politecnico Di Torino, 2009.
- [19] ILZHÖFER A, HOUSKA B, DIEHL M. Nonlinear MPC of kites under varying wind conditions for a new class of large-scale wind power generators [J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2007, 17(17): 1590–1599.
- [20] WILLIAMS P, LANSDORP B, OCKESL W. Optimal crosswind towing and power generation with tethered kites [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2008, 31(1): 81–93.
- [21] GOODRICK T. Theoretical study of the longitudinal stability of high-performance gliding airdrop systems [C]//Proceedings of the 5th Aerodynamic Deceleration Systems Conference. Reston, Virginia: AIAA, 1975.
- [22] DIEHL M. Real-time optimization for large scale nonlinear processes [D]. Heidelberg, Germany: Heidelberg University, 2001.
- [23] CANALE M, FAGIANO L, IPPOLITO M, et al. Control of tethered airfoils for a new class of wind energy generator [C]//Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control. New York: IEEE, 2006: 4020–4026.
- [24] ZHAO Z H, YANG J, YUE H, et al. Modeling and nonlinear model predictive control of kite system for high altitude wind energy generation [C]//Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference. New York: IEEE, 2014: 6998–7003.
- [25] BAAYEN J H, OCKELS W J. Tracking control with adaptation of kites [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2012, 6(2): 182.
- [26] ERHARD M, STRAUCH H. Control of towing kites for seagoing vessels [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, 21(5): 1629–1640.
- [27] FECHNER U, SCHMEHL R. Flight path control of kite power systems in a turbulent wind environment [C]//2016 American Control Conference (ACC). New York: IEEE, 2016: 4083–4088.
- [28] FECHNER U. A methodology for the design of kite-power controlsystems [D]. Delft: Technische Universiteit Delft, 2016.
- [29] HAAS T, DE SCHUTTER J, DIEHL M, et al. Wake characteristics of pumping mode airborne wind energy systems [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1256(1): 012016.
- [30] EIJKELHOF D, RAPP S, FASEL U, et al. Reference design and simulation framework of a multi-megawatt airborne wind energy system [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1618(3): 032020.
- [31] TREVISI F, GAUNAA M, MCWILLIAM M. Unified engineering models for the performance and cost of ground-gen and fly-gen crosswind airborne wind energy systems [J]. *Renewable Energy*, 2020, 162: 893–907.
- [32] TODESCHINI D, FAGIANO L, MICHELI C, et al. Control of a rigid wing pumping airborne wind energy system in all operational phases [J]. *Control Engineering Practice*, 2021, 111: 104794.
- [33] SCHMIDT E, DE LELLIS COSTA DE OLIVEIRA M, SARAIVA DA SILVA R, et al. In-flight estimation of the aerodynamics of tethered wings for airborne wind energy [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2020, 28(4): 1309–1322.

- [34] LICITRA G, BÜRGER A, WILLIAMS P, et al. Aerodynamic model identification of an autonomous aircraft for airborne wind energy [J]. *Optimal Control Applications and Methods*, 2019, 40(3): 422—447.
- [35] CANALE M, FAGIANO L, MILANESE M. KiteGen: a revolution in wind energy generation [J]. *Energy*, 2009, 34(3): 355—361.
- [36] WILLIAMS P. Optimal wind power extraction with a tethered kite [C]//*Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. Reston, Virginia: AIAA, 2006.
- [37] ARGATOV I, SILVENNOINEN R. Energy conversion efficiency of the pumping kite wind generator [J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(5): 1052—1060.
- [38] HOUSKA B, DIEHL M. Optimal control for power generating kites [C]//*2007 European Control Conference (ECC)*. New York: IEEE, 2007: 3560—3567.
- [39] BETTS J T. Survey of numerical methods for trajectory optimization [J]. *Journal of Guidance Control Dynamics*, 1998, 21(2): 193—207.
- [40] GILL P E, MURRAY W, SAUNDERS M A. SNOPT: an SQP algorithm for large-scale constrained optimization [J]. *SIAM Review*, 2005, 47(1): 99—131.
- [41] 韩思麒. 高空风筝发电装置的动力学建模与控制 [D]. 大连:大连理工大学, 2020.
- HAN S Q. Dynamic modeling and control of tethered kite system for high altitude wind power generation [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [42] SUN Q, YU H J, SUN Y. Maximum generation control of kite generator based on predictive functional Control [C]//*Proceedings of the 31st Chinese Control Conference*. New York: IEEE, 2012: 6804—6808.
- [43] SUN Q, WANG Y Y. Data-driven predictive functional control of power kites for high altitude wind energy generation [C]//*2012 IEEE Electrical Power and Energy Conference*. New York: IEEE, 2012: 274—279.
- [44] FAGIANO L, ZGRAGGEN A U, MORARI M, et al. Automatic crosswind flight of tethered wings for airborne wind energy: modeling, control design, and experimental results [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, 22(4): 1433—1447.
- [45] ZHAO Z H, YANG J, YUE H, et al. Modeling and nonlinear model predictive control of kite system for high altitude wind energy generation [C]//*Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference*. New York: IEEE, 2014: 6998—7003.
- [46] WANG Y Y, SUN Q. Predictive functional control of power kites for high altitude wind energy generation based on hybrid neural network [C]//*2015 34th Chinese Control Conference (CCC)*. New York: IEEE, 2015: 7866—7870.
- [47] ZGRAGGEN A U, FAGIANO L, MORARI M. Automatic retraction and full-cycle operation for a class of airborne wind energy generators [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2016, 24(2): 594—608.
- [48] COSTELLO S, FRANÉOIS G, BONVIN D. Real-time optimizing control of an experimental crosswind power kite [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2018, 26(2): 507—522.
- [49] DIWALE S S, FAULWASSER T, JONES C. Model predictive path following control for airborne wind energy systems [C]//*20th World Congress of the International-Federation-of-Auto-matic-Control (IFAC)*. Amsterdam: Elsevier, 2017.
- [50] WOOD T A, HESSE H, SMITH R S. Predictive control of autonomous kites in tow test experiments [J]. *IEEE Control Systems Letters*, 2017, 1(1): 110—115.
- [51] DIEF T N, FECHNER U, SCHMEHL R, et al. System identification, fuzzy control and simulation of a kite power system with fixed tether length [J]. *Wind Energy Science*, 2018, 3(1): 275—291.
- [52] COBB M K, BARTON K, FATHY H, et al. Iterative learning-based path optimization for repetitive path planning, with application to 3-D crosswind flight of airborne wind energy systems [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2020, 28(4): 1447—1459.
- [53] BARI S, KHAN M U. Sliding mode control for autonomous flight of tethered kite under varying wind speed conditions [C]//*2020 17th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)*. New York: IEEE, 2020: 315—320.
- [54] RAPP S, SCHMEHL R. Enhancing resilience of

- airborne wind energy systems through upset condition avoidance [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2021, 44(2): 251–265.
- [55] LI H S. Subset simulation for unconstrained global optimization [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2011, 35(10): 5108–5120.
- [56] 杨奎河, 单甘霖, 赵玲玲. 基于最小二乘支持向量机的故障诊断方法[J]. *计算机应用研究*, 2007, 24(7): 99–101.
- YANG K H, SHAN G L, ZHAO L L. Fault diagnosis method based on least squares support vector machine [J]. *Application Research of Computers*, 2007, 24(7): 99–101. (in Chinese)
- [57] KARG B, LUCIA S. Learning-based approximation of robust nonlinear predictive control with state estimation applied to a towing kite [C]//2019 18th European Control Conference (ECC). New York: IEEE, 2019: 16–22.
- [58] RUSHDI M A, RUSHDI A A, DIEF T N, et al. Power prediction of airborne wind energy systems using multivariate machine learning [J]. *Energies*, 2020, 13(9): 2367.
- [59] 杨月彩. 模型预测控制快速在线优化算法研究[D]. 大连:大连理工大学, 2018.
- YANG Y C. Research on fast online optimization algorithms for model predictive control [D]. Dalian, Dalian University of Technology, 2017.
- [60] HAN S Q, PANG Y, XIA H. Modeling and tracking control of tethered kite systems [C]//2018 37th Chinese Control Conference (CCC). New York: IEEE, 2018: 7476–7481.
- [61] 修观, 王良明, 孙瑞胜, 等. 一种快速非线性模型预测控制律研究[J]. *兵工学报*, 2011, 32(10): 1189–1194.
- XIU G, WANG L M, SUN R S, et al. Research on a fast nonlinear model predictive control law [J]. *Acta Armamentarii*, 2011, 32(10): 1189–1194. (in Chinese)
- [62] SUN M W, LIU D H, QUAN S, et al. Online predictive control based trajectory optimization of tethered foils for wind energy generator [C]//Proceedings of the 31st Chinese Control Conference. New York: IEEE, 2012: 4183–4188.
- [63] 贺建平. 风筝发电机翼伞姿态控制方法的研究[D]. 吉林:吉林大学, 2008.
- HE J P. Research on the Control Method of Parawing Posture of the Kite Generator [D]. Jilin: Jilin University, 2008.
- [64] SUN Q, LI J P, YU H J. Predictive functional controller for HAWC generators based on neural network [C]//Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference. New York: IEEE, 2013.
- [65] 毋玉. 基于自适应控制的风筝发电系统研究[D]. 大庆:东北石油大学, 2020.
- WU Y. Research on kite power generation system based on adaptive control [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2019.
- [66] 王永玉, 朱智林. 基于混合神经网络的风筝发电机组预测函数控制[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(06): 828–832.
- WANG Y Y, ZHI Z L. Predictive functional control of power kites for high altitude wind energy generation based on a hybrid neural network [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*. 2019, 55(6): 828–832.
- [67] 王若钦, 严德, 李柳青, 等. 切风模式风力发电飞行器的进展与挑战[J]. *航空工程进展*, 2018, 9(2): 139–146.
- WANG R Q, YAN D, LI L Q, et al. Advances and challenges of crosswind mode airborne wind energy aircrafts [J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2018, 9(2): 139–146. (in Chinese)
- [68] 邵垒, 毛虹霖, 邢胜, 等. 高空风力发电发展现状及关键技术研究综述[J]. *新能源进展*, 2020, 8(6): 477–485.
- SHAO L, MAO H L, XING S, et al. Review on development status and key technology of airborne wind energy system [J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2020, 8(6): 477–485. (in Chinese)