

DOI:10.11784/tdxbz202406031

风切变对舰载系留无人机系统动力学响应的影响研究

张素侠^{1,2,3}, 朱清荣^{1,2,3}, 吴思琛^{1,2,3}

(1. 天津大学机械工程学院, 天津 300350; 2. 天津市非线性动力学与控制重点实验室, 天津 300350;
3. 车用动力系统全国重点实验室, 天津 300350)

摘要: 舰载系留无人机工作在海洋上, 必定会受到海洋上风的作用。海洋风场中存在着垂直切变现象。为探究垂直切变对舰载系留无人机系统动力学响应的影响, 本文忽略大气层结状态以及边界层厚度等因素, 采用指数律模型来描述海洋风场的垂直切变, 同时由于无人机与缆绳相互耦合, 因此将无人机平台看作系留缆绳上端点的边界条件; 将舰船的垂荡运动看作缆绳下端点的垂向激励, 建立了垂直切变风场下舰载系留无人机系统的动力学模型, 计算了不同切变指数下缆绳各位置处的最大张力以及无人机运动速度与位移, 分析了切变指数对缆绳最大张力和无人机运动的影响。结果表明: 最大张力沿缆绳的分布呈现非线性上升趋势; 与不考虑切变的情况相比, 切变指数为 0.30 时上端点的最大风速增大为 1.37 倍, 缆绳最大张力减小了 11.4%, 说明风切变的影响不可忽略; 3 种风速下缆绳最大张力均呈现先减小后增大的趋势, 即缆绳最大张力都存在极小值, 并且风速越大, 缆绳张力曲线极小值处的切变指数越小; 切变指数增加不会改变无人机的运动性质, 无人机始终为倍周期运动, 但会改变无人机的偏移量, 在计算参数范围内, 水平最大偏移增大了 9.4 m, 竖直最大偏移减小了 3.1 m, 以水平偏移为主。研究结果明确了风切变对舰载系留无人机系统的影响规律, 为舰载系留无人机系统的工程设计与安全工作提供了参考。

关键词: 垂直切变; 舰载系留无人机系统; 动力学响应; 缆绳张力; 无人机运动

中图分类号: O313 文献标志码: A 文章编号: 0493-2137(2025)10-1069-07

Effect of Wind Shear on the Dynamics Response of Shipborne Tethered Unmanned Aerial Vehicle System

Zhang Suxia^{1,2,3}, Zhu Qingrong^{1,2,3}, Wu Sichen^{1,2,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;
2. Tianjin Key Laboratory of Nonlinear Dynamics and Control, Tianjin University, Tianjin 300350, China;
3. National Key Laboratory of Vehicle Power System, Tianjin 300350, China)

Abstract: The shipborne tethered unmanned aerial vehicle (UAV) system operating on the ocean is inevitably affected by ocean winds, which exhibit vertical shear. To investigate the impact of vertical shear on the dynamic response of the shipborne tethered UAV system, this paper employed an exponential law model to describe the vertical shear in the ocean wind field while excluding factors such as atmospheric junction state and boundary layer thickness. Additionally, owing to the coupling between the UAV system and the tethered cables, the UAV platform was treated as the boundary condition at the tether endpoints. Considering the ship's heave motion as the vertical excitation at the cable lower end, a dynamics model of the shipborne tethered UAV system under vertical shear wind conditions was developed. The maximum tension at each position along the cable, as well as the speed and displacement of the UAV system under different shear indices, were calculated. The effects of shear indices on the maximum tension in the cable and the drone motion of the UAV system were analyzed. The results show that the distribution of maximum ten-

收稿日期: 2024-06-16; 修回日期: 2024-10-24.

作者简介: 张素侠 (1978—), 女, 博士, 教授, zhangsux@tju.edu.cn.

通信作者: 朱清荣, zqr123@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51479136); 天津市自然科学基金资助项目 (17JCYBJC18700); 装备预研基金重点资助项目 (61403110101).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51479136), the Natural Science Foundation of Tianjin, China (No. 17JCYBJC18700), the Key Project of Equipment Pre-Research Fund (No. 61403110101).

sion along the cable exhibits a nonlinear upward trend. Compared with the case where shear is not considered when the shear index is 0.30, the maximum wind speed at the upper endpoint increases by 1.37 times, while the maximum tension in the cable decreases by 11.4%. This indicates that the influence of wind shear is significant and cannot be ignored. Under the three wind speeds, the maximum tension in the cable firstly decreases and then increases, meaning that the maximum tension has a minimum value. As the wind speed increases, the shear index at which the minimum tension occurs decreases. The increase in the shear index does not alter the motion characteristics of the UAV, which always exhibits period-doubling motion. However, it does affect the UAV offset: within the range of the calculated parameters, the maximum horizontal offset increases by 9.4 m, while the maximum vertical offset decreases by 3.1 m, with the horizontal offset being the primary change. The research results highlight the effect of wind shear on the shipborne tethered UAV system and provide a reference for the engineering design and safety of such systems.

Keywords: vertical shear; shipborne tethered unmanned aerial vehicle(UAV) system; dynamics response; cable tension; drone motion

舰载系留无人机系统由舰船、系留缆绳以及无人机组成,工作高度一般在 100 ~ 200 m,必然受到海洋切变风场的作用.海洋风场的切变现象^[1],是指随着高度的增加,风速逐渐增大的现象.切变现象的存在会使系统产生复杂的动力学响应,影响系统的正常工作,甚至对系统安全造成威胁,因此研究切变风场下的系留无人机系统的动力学响应具有重要意义.

目前对舰载系留无人机系统的研究主要针对在均匀风场下的问题.陈松领等^[2]研究了舰船运动幅值和频率对缆绳张力的影响,发现舰船运动幅值和频率的增大都会增加缆绳张力;Tao 等^[3]基于应力波方法,发现增大缆绳弹性模量与横截面积会提高纵波波速,使得张力最大幅值增大;邢龙涛等^[4]研究了缆绳法向频率与振型,发现了频率转向现象;李书等^[5]利用遗传算法对系留点的位置进行优化,最终确定了最佳的系留座布局形式;Kumar 等^[6]研究了风速对系统动力学响应的影响,发现随着风速的增大,无人机运动范围逐渐扩大,当风速达 6 m/s 时常规四轴飞行器失效,而倾转旋翼无人机仍能正常工作.以上研究均未考虑风切变对系留系统的影响.

但是海洋环境中是存在风切变的,Frédéric^[7]指出:系留无人机在甲板上起降时必须考虑大气的影响,大气中的风切变是未来需要重点考虑的因素.Marques 等^[8]关于系留无人机系统的研究也表明,目前风切变对舰载系留无人机系统的影响规律尚不明确.对同样在海上工作的风机系统的研究发现,风切变会使风机系统产生大量不对称涡度,导致尾迹结构不对称^[9]、输出功率减小^[10]、风机叶片寿命变短等^[11].这表明风切变会对海上工作系统造成复杂影响,因此研究风切变对舰载系留无人机系统的影响是十分有必要的.

本文采用指数律模型来描述海上风场的垂直切变,建立考虑风速垂直切变的舰载系留无人机的动力学模型,研究切变指数对系留缆绳张力和无人机运动的影响,结果可为舰载系留无人机系统的工程设计提供参考.

1 系留无人机系统模型的建立

舰载系留无人机系统示意如图 1 所示,系留缆绳上端与无人机连接,下端与舰船连接.假设缆绳材质均匀且各向同性, χ_0 为自然悬垂状态下的初始构形, χ_i 为缆绳静平衡构形, χ_r 为在外部荷载作用下的动态构形, U^r 为缆绳动态位移, U_1 、 U_2 分别为动态位移在切向和法向上的投影, α_i 为缆绳在静平衡构形下的倾角, v_{wind} 为风速, h_{chuan} 为缆绳下端系留点到海面的高度, y_i 为静平衡构形下缆绳距离下端系留点的高度.

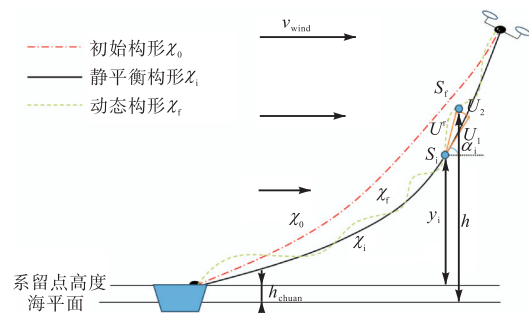


图 1 舰载系留无人机系统示意

Fig.1 Schematic of the shipborne tethered UAV system

在动态构形中,缆绳上任一点的高度 h 可表示为

$$h = h_{chuan} + y_i + U_1 \sin \alpha_i + U_2 \cos \alpha_i \quad (1)$$

静平衡构形下的缆绳微元段示意如图 2 所示,

ds_i 为缆绳微元段在静平衡构形下的弧长, dy_i 为 ds_i 在竖直方向上的投影, 则有

$$y_i = \int \sin \alpha_i ds_i \quad (2)$$

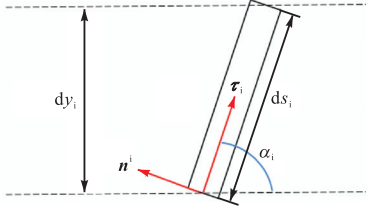


图2 静平衡构形下缆绳微元段示意

Fig.2 Schematic of a cable element segment under static equilibrium configuration

本文研究具有切变特性的脉动风场下的舰载系留无人机系统动力学响应, 此时风场由平均风与脉动风两部分组成, 其中脉动风可采用简谐函数模拟^[12]; 平均风在水平维度不变, 在竖直维度有切变. 将以往只在时间上变化的风场拓展至时间和空间上都存在变化, 更加贴近实际. 由标准 DNV-RP-C205^[13]可知, 忽略大气层结状态以及边界层厚度等因素, 选用指数律模型作为平均风速廓线模型, 缆绳上高度为 h 处的风速表达式为

$$v_{\text{wind}} = v_1 \left(\frac{h}{h_1} \right)^\eta + A_w \sin(2\pi f_w t) \quad (3)$$

式中: h_1 为参考高度; v_1 为高度 h_1 处的平均风速; η 为风切变指数; A_w 为周期风幅值; f_w 为周期风频率.

沿缆绳切向、法向的相对风速 v_{1f} 、 v_{2f} 的表达式分别为

$$v_{1f} = v_{\text{wind}} \cos(\alpha_i + \alpha_r) - \left(\frac{\partial U_1}{\partial t} \cos \alpha_r + \frac{\partial U_2}{\partial t} \sin \alpha_r \right) \quad (4)$$

$$v_{2f} = -v_{\text{wind}} \sin(\alpha_i + \alpha_r) - \left(-\frac{\partial U_1}{\partial t} \sin \alpha_r + \frac{\partial U_2}{\partial t} \cos \alpha_r \right) \quad (5)$$

式中 α_r 为缆绳在动态构形相较于静平衡构形的变化倾角.

根据文献[14], 缆绳切向动力学方程为

$$m \left(\frac{\partial^2 U_1}{\partial t^2} \cos \alpha_r + \frac{\partial^2 U_2}{\partial t^2} \sin \alpha_r \right) = \frac{\partial T_f}{\partial s_f} - mg \sin(\alpha_i + \alpha_r) + F_{dr} \quad (6)$$

缆绳法向动力学方程为

$$m \left(-\frac{\partial^2 U_1}{\partial t^2} \sin \alpha_r + \frac{\partial^2 U_2}{\partial t^2} \cos \alpha_r \right) = T_f \left(\frac{\partial \alpha_i}{\partial s} + \frac{\partial \alpha_r}{\partial s} \right) - mg \cos(\alpha_i + \alpha_r) + F_{dn} \quad (7)$$

式中: m 为缆绳单位长度质量; T_f 为缆绳上任一点的拉力, 表达式为

$$T_f = EA \sqrt{\frac{1-2\varepsilon_{Ai}}{(1+2\varepsilon_{Gr})^3}} (\varepsilon_{Ai} + \varepsilon_{Gr}) \quad (8)$$

式中: E 为缆绳弹性模量; A 为缆绳横截面面积; ε_{Ai} 、 ε_{Gr} 分别为缆绳在静平衡构形下的阿尔曼西应变和动态构形下的相对格林应变.

F_{dr} 、 F_{dn} 分别为单位长度切向和法向气动力, 即

$$F_{dr} = \frac{1}{2} \left(\frac{1+2\varepsilon_{Gr}}{1-2\varepsilon_{Ai}} \right)^{\frac{1}{4}} \rho_a \pi D C_{dr} v_{1f} |v_{1f}| \quad (9)$$

$$F_{dn} = \frac{1}{2} \left(\frac{1+2\varepsilon_{Gr}}{1-2\varepsilon_{Ai}} \right)^{\frac{1}{4}} \rho_a D C_{dn} v_{2f} |v_{2f}| \quad (10)$$

式中: ρ_a 为空气密度; D 为缆绳直径; C_{dr} 、 C_{dn} 分别表示缆绳切向、法向气动系数.

无人机的动力学方程为

$$M \ddot{U}_{11} = F_{UAVe1} \cos(\theta + \alpha_i) + (F_{\text{lift}} + F_{UAVe2}) \cdot \sin(\theta + \alpha_i) - T_{\text{up}} \cos \alpha_r - Mg \sin \alpha_i \quad (11)$$

$$M \ddot{U}_{21} = (F_{\text{lift}} + F_{UAVe2}) \cos(\theta + \alpha_i) - F_{UAVe1} \sin(\theta + \alpha_i) - T_{\text{up}} \sin \alpha_r - Mg \cos \alpha_i \quad (12)$$

式中: M 为无人机及负载质量; \ddot{U}_{11} 、 \ddot{U}_{21} 分别表示无人机沿缆绳切向和法向的加速度; F_{lift} 为无人机旋翼提供的升力; θ 为无人机倾角; T_{up} 为缆绳上端点的拉力, 无人机与缆绳通过缆绳上端点拉力进行耦合; F_{UAVe1} 、 F_{UAVe2} 分别表示无人机受到的切向和法向气动力, 其表达式分别为

$$F_{UAVe1} = -\frac{1}{2} \rho_a C_{UAVe1} \cdot \left[\dot{U}_{11} \cos(\theta + \alpha_i) - \dot{U}_{21} \sin(\theta + \alpha_i) - v_{\text{wind}} \cos \theta \right] \cdot \left| \dot{U}_{11} \cos(\theta + \alpha_i) - \dot{U}_{21} \sin(\theta + \alpha_i) - v_{\text{wind}} \cos \theta \right| \quad (13)$$

$$F_{UAVe2} = -\frac{1}{2} \rho_a C_{UAVe2} \cdot \left[\dot{U}_{11} \sin(\theta + \alpha_i) + \dot{U}_{21} \cos(\theta + \alpha_i) - v_{\text{wind}} \sin \theta \right] \cdot \left| \dot{U}_{11} \sin(\theta + \alpha_i) + \dot{U}_{21} \cos(\theta + \alpha_i) - v_{\text{wind}} \sin \theta \right| \quad (14)$$

式中: C_{UAVe1} 、 C_{UAVe2} 分别为无人机切向和法向气动系数; \dot{U}_{11} 、 \dot{U}_{21} 分别表示无人机切向和法向的速度.

只考虑舰船垂荡运动, 运动表达式^[15]为

$$U_{sc} = A_{sc} \sin(2\pi f_{sc} t) \quad (15)$$

式中: U_{sc} 为舰船垂荡运动位移; A_{sc} 为舰船垂荡运动幅值; f_{sc} 为舰船垂荡运动频率.

缆绳下端与舰船相连, 以舰船运动为下端边界条

件. 缆绳下端点的切向与法向运动表达式分别为

$$U_{10} = U_{sc} \sin \alpha_i \quad (16)$$

$$U_{20} = U_{sc} \cos \alpha_i \quad (17)$$

式中 U_{10} 、 U_{20} 分别表示缆绳下端点切向和法向的位移.

舰船垂荡运动频率 f_{sc} 与幅值 A_{sc} 会改变舰船的垂荡运动位移 U_{sc} , 进而改变缆绳下端点的位移 U_{10} 、 U_{20} , 从而影响整个系统的动力学响应.

2 仿真分析与结果讨论

本文以一艘长为 220.3 m 的 3 万吨级舰船为例, 舰载系留无人机系统参数如表 1 所示. 研究极端海况下, 舰船垂荡运动频率 $f_{sc} = 0.1 \text{ Hz}$ 、幅值 $A_{sc} = 6 \text{ m}$, 周期风频率 $f_w = 0.4 \text{ Hz}$ 、幅值 $A_w = 10 \text{ m/s}$ [16] 时, 切变指数对舰载系留无人机系统的影响.

表 1 舰载系留无人机系统参数 [17]

Tab.1 Parameters of the shipborne tethered UAV system

参数	数值
无人机及负载质量 M / kg	7.3
无人机升力 $F_{\text{lift}} / \text{N}$	198.94
无人机倾斜角度 $\theta / (^\circ)$	5
无人机切向气动系数 $C_{\text{UAVe1}} / \text{m}^2$	0.064
无人机法向气动系数 $C_{\text{UAVe2}} / \text{m}^2$	0.089
缆绳长度 L / m	100
缆绳直径 D / m	0.004 5
缆绳承力极限 $/ \text{N}$	490
缆绳轴向刚度 EA / N	19 950
缆绳单位长度质量 $m / (\text{kg}/\text{m})$	0.023
缆绳切向气动系数 C_{dr}	0.062
缆绳法向气动系数 C_{dn}	0.9
空气密度 $\rho_a / (\text{kg}/\text{m}^3)$	1.205
缆绳下端系留点到海面的高度 $h_{\text{chuan}} / \text{m}$	20.2

2.1 考虑风切变的必要性

根据羲和能源气象大数据平台记录数据 [18] 和欧洲北海的海上试验场的实测数据 [19], 选取风速 $v_1 = 5 \text{ m/s}$, 分别计算得到风切变指数 η 为 0、0.12、0.20、0.25、0.30 时最大风速沿缆绳的分布曲线如图 3 所示. 可以看出, 当 $\eta = 0$ 即不考虑切变时, 各点的最大风速都相同. 当考虑垂直切变时, 最大风速沿缆绳弧长按照幂函数规律增长, 并在上端点处达到最大值. 不考虑切变时, 上端点最大风速为 15 m/s 、 $\eta = 0.12$ 时, 即 DNV-RP-C205 规范中的取值状态, 上端点最大风速为 16.76 m/s , 是不考虑切变时最大风速的 1.12 倍; $\eta = 0.30$ 时上端点最大风速为 20.55 m/s , 是不考虑切变时最大风速的 1.37 倍, 表明风切变的影响不可忽略.

此时计算得到的最大张力沿缆绳的分布曲线如图 4 所示, 可以看出最大张力沿弧长非线性增大, 缆绳最大张力发生在上端点 $s = 100 \text{ m}$ 处. 不考虑切变时, 缆绳上端点的最大张力为 201.20 N , 常规规范 $\eta = 0.12$ 时, 缆绳上端点的最大张力为 187.75 N , 比不考虑切变时的最大张力减小了 6.68%; $\eta = 0.30$ 时缆绳上端点的最大张力为 178.35 N , 比不考虑切变时的最大张力减小了 11.4%, 在缆绳张力的角度同样表明了风切变的影响不可忽略.

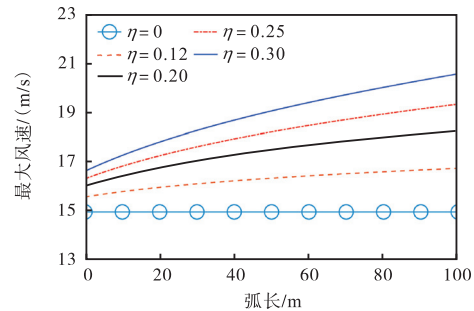


图 3 最大风速沿缆绳的分布曲线
Fig.3 Distribution curves of the maximum wind speed along the cable

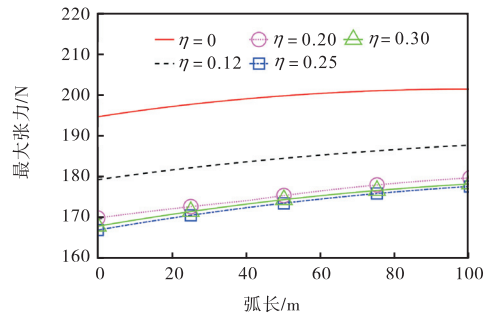


图 4 最大张力沿缆绳的分布曲线
Fig.4 Distribution curves of the maximum tension along the cable

2.2 切变指数对缆绳最大张力的影响

由第 2.1 节可知, 缆绳在上端点处达最大张力, 计算得到风速 $v_1 = 5 \text{ m/s}$ 时缆绳上端点处最大张力随切变指数 η 的变化曲线如图 5 所示. 可以看出, 缆绳的张力并不是单调变化的, 随着切变指数 η 的增大, 缆绳最大张力由 201.20 N 减小至 177.74 N 再增大至 178.35 N , 曲线在 $\eta = 0.25$ 处出现极小值. 因为当风切变指数由 0 增大到 0.30 时, 风与无人机之间的相对速度会先减小再增大, 无人机受到的气动力随之先下降后上升, 所以缆绳张力会出现先减小再增大的变化趋势. 在工程中, 若以 $\eta = 0$ 时的最大张力为工作载荷, 安全系数最小, 为 2.4; 若以 $\eta = 0.25$ 时的最大张力为工作载荷, 安全系数最大, 为 2.8. 表明缆绳的安全系数会在 2.4 ~ 2.8 范围内变化.

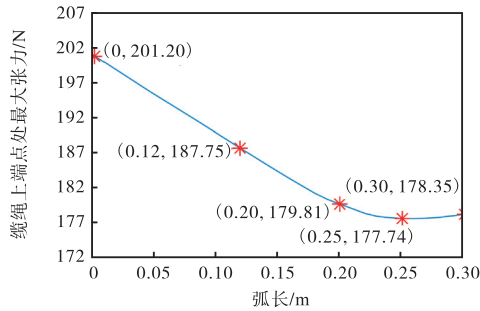


图5 $v_1 = 5 \text{ m/s}$ 时缆绳最大张力随切变指数变化曲线
 Fig.5 Curve of maximum cable tension vs shear index when $v_1 = 5 \text{ m/s}$

为了确定缆绳最大张力曲线极小值出现的位置, 重点关注缆绳张力曲线出现极小值时的切变指数, 根据羲和气象大数据平台, 考虑低于平均风速、平均风速和最大风速, 选取具有代表性的风速 $v_1 = 4 \text{ m/s}$ 、 $v_1 = 5 \text{ m/s}$ 和 $v_1 = 6 \text{ m/s}$, 分别计算得到缆绳上端点处最大张力随切变指数变化曲线如图 6 所示, 工程范围之外的部分采用虚线表示. 可以发现, 缆绳上端点处最大张力均呈现先减小后增大的趋势, 都存在极小值. 在 3 种风速下, 缆绳最大张力的极小值点分别在 $\eta = 0.38$ 、 $\eta = 0.25$ 与 $\eta = 0.15$ 处. 随着风速 v_1 的增大, 张力极小值点的切变指数减小. 这是因为 v_1 增大后, 风与无人机的相对速度达到极小值时的切变指数 η 变小, 无人机气动力达极小值时 η 也会变小, 从而缆绳张力极小值点的切变指数 η 减小.

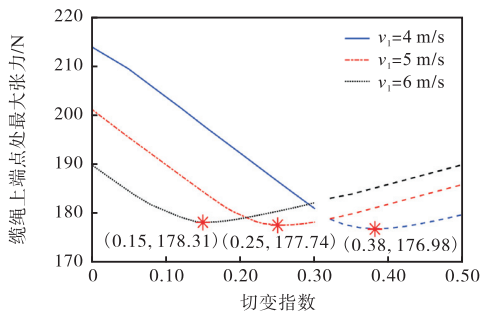


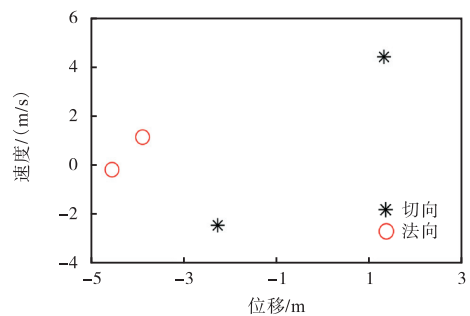
图6 3种风速下缆绳最大张力随切变指数变化曲线
 Fig.6 Curves of maximum cable tension vs shear index under three wind speeds

2.3 切变指数对无人机运动的影响

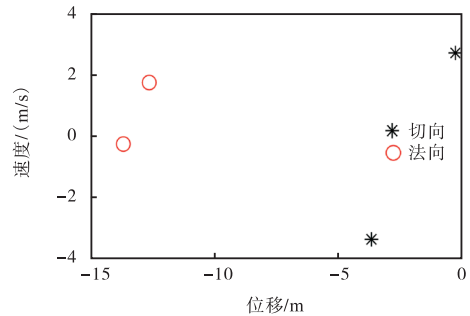
为了研究风切变对无人机运动的影响, 计算得到 $\eta = 0$ 与 $\eta = 0.30$ 时无人机的运动庞加莱截面点如图 7 所示. 根据图 7(a) 可以发现, 切变指数 $\eta = 0$ 时, 无人机切向运动和法向运动均为 2 倍周期的倍周期运动; 根据图 7(b) 可以发现, 切变指数 $\eta = 0.30$ 时, 庞加莱截面点仍为 2 个, 即无人机的运动仍为 2 倍周期的倍周期运动. 表明切变指数 η 的增加不会改变无人机切向和法向运动的周期性. 这是因为风切变只改变了

风速的大小, 而没有改变风的频率, 所以切变指数增加并不会改变无人机运动的周期性.

计算得到不同切变指数下的无人机运动轨迹如图 8 所示, 可以发现, 切变指数的增加会改变无人机运动轨迹. 无人机水平位移最大值由 $\eta = 0$ 时的 6.3 m 到 $\eta = 0.30$ 时的 15.7 m, 增加了 9.4 m; 对应的无人机竖直位移最大值由 4.9 m 到 1.8 m, 减小了 3.1 m, 可以看出切变指数对无人机水平方向的位移影响, 比对竖直方向的位移影响大. 这是风向为水平风的缘故. 因此在工程中应重点关注切变指数变化带来的无人机水平位移变化, 确保系留无人机系统能正常工作.



(a) $\eta = 0$



(b) $\eta = 0.30$

图7 无人机运动庞加莱截面点

Fig.7 Poincaré cross-section points of UAV movement

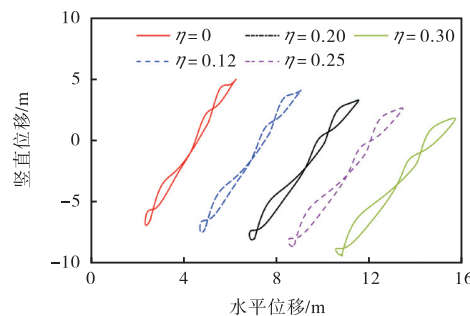


图8 无人机运动轨迹

Fig.8 Motion trajectories of the UAV

2.4 验证

本文选用文献[20]的缆绳与无人机参数, 采用本

文的研究理论计算了文献[20]中工况 5、6、7 下的缆绳上端点拉力,并与其实验数据进行对比,具体如表 2 所示。

通过表 2 中的数据对比可以看到,理论张力与实验张力较为接近,误差在 10% 以内。考虑到计算误差以及实验条件的限制,理论与实验所得的张力误差可以接受,证明了本文理论结果的正确性。

表 2 实验与理论张力对比

Tab.2 Comparison of experimental and theoretical tensions

工况	风速/(m/s)	实验上端点张力/N	理论上端点张力/N	误差/%
5	4	13.221 6	14.243 7	7.73
6	6	18.602 3	19.266 9	3.57
7	8	30.638 3	28.935 9	5.56

3 结 论

本文考虑了海洋风场中的垂直切变现象,将以往只在时间维度上变化的风场拓展至时间和空间维度,研究了具有切变特性的脉动风场下舰载系留无人机的动力学响应,分析了风切变指数对系留缆绳张力和无人机运动的影响,填补了目前舰载系留无人机系统研究中有关切变风场影响的空白,得到如下结论。

(1) 与不考虑切变的情况相比,切变指数为 0.30 时上端点的最大风速增大为 1.37 倍,缆绳最大张力减小了 11.4%,说明风切变的影响不可忽略。

(2) 风速分别为 4 m/s、5 m/s 和 6 m/s 时,随着切变指数的增大,缆绳最大张力均呈现先减小后增大的趋势,分别在切变指数为 0.38、0.25 和 0.15 处达到极小值,风速越大,缆绳张力达极小值时的切变指数越小。

(3) 切变指数增大,无人机运动的周期性不会改变,但无人机位移会发生变化:水平最大位移增大了 9.4 m,竖直最大位移减小了 3.1 m。在工程中应重点关注切变指数变化带来的无人机水平位移变化,确保系留无人机系统能正常工作。

参考文献:

[1] do Carmo L F R, Palmeira A C P D, Antonio C F D L, et al. Comparison of wind profile estimation methods for calculating offshore wind potential for the northeast region of Brazil[J]. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 2022, 13(1): 365-375.

[2] 陈松领, 刘习军. 考虑舰船激励和系留点偏移的系留无人机运动响应研究[J]. *应用力学学报*, 2024,

41(5): 1007-1014.

Chen Songling, Liu Xijun. Research on motion response of tethered UAV considering ship excitation and tethering point deflection[J]. *Chinese Journal of Applied mechanics*, 2024, 41(5): 1007-1014(in Chinese).

- [3] Tao Y, Zhang S. Research on the vibration and wave propagation in ship-borne tethered UAV using stress wave method[J]. *Drones*, 2022, 6(11): 349.
- [4] 邢龙涛, 刘习军, 张素侠. 系留无人机系统振动特性分析[J]. *应用力学学报*, 2021, 38(1): 106-112.
- Xing Longtao, Liu Xijun, Zhang Suxia. The vibration characteristics analysis of the tethered UAV system[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2021, 38(1): 106-112(in Chinese).
- [5] 李 书, 何忠桓, 徐丽娜. 舰载直升机系留座的布置优化[J]. *航空学报*, 2005, 26(6): 61-65.
- Li Shu, He Zhonghuan, Xu Lina. Optimization design of the mooring base of the ship-based helicopter[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2005, 26(6): 61-65(in Chinese).
- [6] Kumar R, Agarwal S R, Kumar M. Modeling and control of a tethered tilt-rotor quadcopter with atmospheric wind model[J]. *IFAC-Paper OnLine*, 2021, 54(20): 463-468.
- [7] Frédéric M. Umbilical deployment modeling for tethered UAV detecting oil pollution from ship[J]. *Applied Ocean Research*, 2011, 33(4): 332-343.
- [8] Marques M N, Magalhães S A, Dos Santos F N, et al. Tethered unmanned aerial vehicles—A systematic review[J]. *Robotics*, 2023, 12(4): 117.
- [9] Sezer-Uzol N, Uzol O. Effect of steady and transient wind shear on the wake structure and performance of a horizontal axis wind turbine rotor[J]. *Wind Energy*, 2011, 16(1): 1-17.
- [10] Bardal L M, Saetran L R, Wangsness E. Performance test of a 3 MW wind turbine—Effects of shear and turbulence[J]. *Energy Procedia*, 2015, 80: 83-91.
- [11] Tilg A M, Skrzypinski W R, Hannesdottir A, et al. Effect of drop-size parameterization and rain amount on blade-lifetime calculations considering leading-edge erosion[J]. *Wind Energy*, 2022, 25(5): 952-967.

- [12] Belhaq M, Kirrou I, Mokni L. Periodic and quasiperiodic galloping of a wind-excited tower under external excitation[J]. *Nonlinear Dynamic*, 2013, 74(3): 849-867.
- [13] DNV. DNV-RP-C205—2010 Environmental Conditions and Environmental Loads[S]. Norway: Det Norske Veritas, 2010.
- [14] 刘洪德, 张素侠. 基于应变修正的二维缆索动力学建模改进[J]. *中国科学(物理学·力学·天文学)*, 2022, 52(12): 86-95.
Liu Hongde, Zhang Suxia. Improvement of two-dimensional dynamic modeling of cable based on strain modification[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2022, 52(12): 86-95 (in Chinese).
- [15] 赵浩东. 考虑弹性效应的大型舰船波浪荷载相应研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学船舶工程学院, 2017.
Zhao Haodong. Study of Wave Load Responses of Large Ship Considering Elastic Effect[D]. Harbin: College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, 2017 (in Chinese).
- [16] Vincent C, Giebel G, Madsen H. Resolving nonstationary spectral information in wind speed time series using the hilbert-huang transform[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2010, 49(2): 253-267.
- [17] Ioppo P G. The Design, Modelling and Control of an Autonomous Tethered Multirotor UAV[D]. Stellenbosch: School of Electrical & Electronic Engineering, Stellenbosch University, 2017.
- [18] 南京图德科技有限公司. 羲和能源气象大数据平台[EB/OL]. <https://www.xihe-energy.com>, 2022-04-12.
Technology of Digital Energy Co., Ltd. Xihe energy meteorological big data platform[EB/OL]. <https://www.xihe-energy.com>, 2022-04-12 (in Chinese).
- [19] da Silva M P A, Salcedo-Bosch A, Gutierrez-Antunano M A, et al. Offshore doppler wind lidar assessment of atmospheric stability[C]// 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing. Waikoloa, USA, 2020: 6081-6084.
- [20] 何伟, 张素侠, 李亚泽, 等. 系留无人机系统冲击张力实验研究[J]. *力学学报*, 2024, 56(5): 1448-1457.
He Wei, Zhang Suxia, Li Yaze, et al. Experimental study on the impact tension of a tethered unmanned aerial vehicle system[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2024, 56(5): 1448-1457 (in Chinese).

(责任编辑: 王晓燕)