

文章编号:1674-8190(2020)03-338-06

连续变速颤振试验的自适应粒子滤波算法

谭博

(航空工业第一飞机设计研究院 综合航电系统设计研究所, 西安 710089)

摘要: 连续变速颤振试验的采集信号通常为非平稳信号,其频率和幅值随时间变化,尤其在亚临界状态下,变化程度十分剧烈。常用的非平稳信号时变参数建模分析方法,在信号非平稳程度较高的情况下难以对信号的模态进行准确地分析和跟踪。为了解决这一问题,结合信号非平稳度量计算方法,提出一种改进的自适应粒子滤波算法,并通过仿真实验数据对所提算法在高非平稳度情况下的跟踪性能进行验证。结果表明:与一般粒子滤波算法相比,本文方法在高非平稳度情况下具有更高的跟踪精度。

关键词: 连续变速颤振试验;非平稳信号处理;时变参数建模方法;非平稳度;自适应粒子滤波算法

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2020.03.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Adaptive Particle Filter Algorithm for Flutter Test with Variable Progression Speed

TAN Bo

(Avionics System Design Department, AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China)

Abstract: Signal collected in flutter test with variable progression speed (FTVPS) is usually non-stationary, both its frequency and amplitude changed dramatically with time, especially in the sub-critical state. The common non-stationary signal processing method, such as time-varying parameter modeling can hardly analyze and track the mode of signal precisely under high non-stationary degree. Therefore, an adaptive particle filter method based on non-stationary degree is proposed. The tracking performance under high non-stationary degree of this method is verified by simulation experiment data. The results indicate that the method proposed in this thesis has better precision under high non-stationary degree when compared with usual particle filter.

Key words: FTPVS; non-stationary signal processing; time-varying parameter modeling method; non-stationary degree; adaptive particle filter algorithm

0 引言

颤振试验数据处理的基本目的是分析实测亚临界响应信号,完成模态参数估计(Modal Parameter Estimation, 简称 MPE)和颤振边界预测

(Flutter Boundary Prediction, 简称 FBP)。目前常用的风洞颤振试验方法为台阶法,即在一个台阶时间内保持外界条件基本稳定并采集振动信号,因信号模态参数在台阶时间内变化很小,可认为采集的信号是近近平稳的。通过连续采集多个台阶的

收稿日期:2020-03-07; 修回日期:2020-05-04

通信作者:谭博, tanbo19870630@163.com

引用格式:谭博. 连续变速颤振试验的自适应粒子滤波算法[J]. 航空工程进展, 2020, 11(3): 338-343.

TAN Bo. Adaptive particle filter algorithm for flutter test with variable progression speed[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(3): 338-343. (in Chinese)

振动信号并提取其模态参数,以阶梯的方式预估信号模态参数变化的趋势,并达到预测颤振边界的目标。此方法易于操作,但因其与颤振发生的实际原理不符,导致预测结果存在较大的偏差。为了解决台阶试验方法的问题,一种连续变速颤振试验(Flutter Test with Variable Progression Speed,简称 FTVPS)方法被提出,该方法是马赫数、速度、高度等飞行参数个别或全部随时间不断变化的一类颤振试验。与传统的台阶法相比,其试验周期短且更符合实际状态。但是,试验采集的信号为非平稳信号,在亚临界状态下,各项特征变化剧烈,为试验数据的处理和分析带来了新的困难。

非平稳信号广泛存在于各工程应用领域^[1],且各领域的非平稳信号之间存在很大的差异性,这使得非平稳信号的分析处理方法通常具有很强的专业领域限制和问题针对性。例如,用于分析切削振动信号的经验模态分解方法^[2]、时域和频域分开的非平稳随机振动分析方法^[3]以及基于最大谱的非平稳随机振动数据分析处理方法^[4]等就是针对特定工程领域问题提出的方法,这些方法一般不具有普适性,且多用于处理具有随机激励的振动信号,而颤振属于自激振动,因此上述方法难以在连续变速颤振试验数据处理中应用。

连续变速颤振试验数据处理一般使用时变参数建模方法,主要有自适应滤波、基函数展开和粒子滤波三种。其中,自适应滤波算法和基函数展开算法在处理信号时,容易受到噪声的影响^[5],因此连续变速颤振试验数据处理中一般使用粒子滤波算法。粒子滤波算法是 20 世纪 50 年代末提出的一种基于贝叶斯采样估计的顺序重要采样滤波方法^[6],此后, N. Gordon 等^[7-8]于 1993 年又提出了新的基于顺序重要采样的 Bootstrap 非线性滤波算法,该方法的目的是完成目标状态的在线跟踪。目前,在各工程领域内的非平稳信号处理中有广泛应用,例如,王宏健等^[9]提出一种改进差分粒子滤波算法;陈志敏等^[10]提出一种自适应粒子群优化的目标跟踪算法;叶华等^[11]提出一种基于稀疏表示的粒子滤波算法;林晓梦等^[12]提出改进粒子滤波重采样算法;谌剑等^[13]进行了粒子滤波算法的权值优化组合研究;郑华等^[14]提出一种用于多传

感器组合测量的粒子滤波算法。以上粒子滤波算法都针对应用时面临的问题进行了改进。

本文针对连续变速颤振信号的特点并结合工程实际,选用合适的非平稳度的度量方法,并将非平稳度引入粒子滤波算法中,并通过仿真实验验证该方法分析非平稳程度变化信号的有效性。

1 非平稳度

平稳信号一般指信号特性时不变的信号,与之对应的非平稳信号则是指信号特性会随时间变化的信号。非平稳信号种类多样且都具有各自的特点,因此很难找到一种可广泛适用的方法度量非平稳信号特性变化剧烈程度(Non-stationary Degree,简称 ND)。目前存在的度量方法有很多,如周期非平稳度(Degree of Cyclostationary,简称 DCS),基于 Hilbert 时频谱的 ND,基于相关积分值的 ND 等。上述三种度量方法中,DCS 一般针对周期非平稳信号,对非周期信号不具有适用性;第二种计算复杂,且其与平稳信号的关系不够明确;第三种针对具体的工程问题,均不适用于处理本文研究的问题。

连续变速颤振试验中测量信号一般为非周期信号,且非平稳程度会随时间发生变化,在亚临界状态下变化速度明显增大。因此,本文选用文献[15]中给出的非平稳度计算方法,该方法得到的 ND 值恒大于 0,其中,平稳信号的 ND 值小于 1,非平稳信号的 ND 值一般大于 1 且与其幅值或频率变化速率呈近似线性关系。

2 自适应粒子滤波算法

对于连续变速颤振信号这一非线性信号,数学推导往往无法进行,一般使用粒子滤波算法结合蒙特卡洛方法进行估计。具体方法为:以一组随机或已知的某种分布样本来描述估计量的概率分布,再根据得到的测量值,通过重要性函数对各样本点的权值进行调整,以该带权值的样本序列来逼近真实的后验概率分布,从而序贯更新状态,其核心步骤是通过重要性函数进行的采样和调整过程,即重采样过程。

连续变速颤振试验信号的一个主要特点是信

号的幅频特性随时间非线性变化,在初始阶段变化缓慢,在临界状态会剧烈变化直至颤振发生结构破坏。这使得一般的粒子滤波算法在采集信号的幅频特性变化速度增快后,无法进行有效的跟踪,导致最终处理结果和实际结果相差过大,无法准确预估颤振边界。因此,需要针对其非平稳程度变化的特点优化调整重采样过程,将非平稳度作为重要性函数的一个变量进行综合考虑。

考虑到非平稳度增加后,需要在更广泛的状态

空间内寻找权值更大的粒子,本文的自适应滤波算法在一般的重采样过程后,引入粒子调整步骤,依据非平稳度的变化,增加或减少粒子数量及步长,达到扩大或缩减粒子群在状态空间内分布的目的。同时,为了避免非平稳度过大引起粒子数剧增,导致无法计算,或非平稳度过小引起粒子数剧减,导致粒子数不足的情况,对步长和粒子数调整幅度进行限制。最终可得到如下自适应粒子滤波算法步骤。

初始化: $t=0$

对 $i=1,2,\dots$, 采样 $x_0^{(i)} \sim p(x_0)$, 其中, $p(x_0)$ 为先验概率。

当 $t=1,2,\dots$ 时, 重复进行以下步骤:

(1) 重要性采样

对 $i=1,2,\dots,N$, $\hat{x}_t^{(i)} \sim q(x_t | x_{0:t-1}^{(i)}, y_{1:t})$, 设置 $\hat{x}_{0:t}^{(i)} \triangleq (x_{0:t-1}^{(i)}, \hat{x}_t^{(i)})$;

对 $i=1,2,\dots,N$, 计算权值 $w_t = w_{t-1}^{(i)} \frac{p(y_t | \hat{x}_t^{(i)}) p(\hat{x}_t^{(i)} | x_{t-1}^{(i)})}{q(\hat{x}_t^{(i)} | x_{t-1}^{(i)}, y_{1:t})}$;

对 $i=1,2,\dots,N$, 归一化权值 $\tilde{w}_t^{(i)} = w_t^{(i)} \left[\sum_{j=1}^N w_t^{(j)} \right]^{-1}$ 。

(2) 重采样

对根据各自归一化权值 $\tilde{w}_t^{(i)}$ 的大小复制/舍弃样本 $\hat{x}_{0:t}^{(i)}$, 得到 N 个近似服从 $p(x_{0:t}^{(i)} | y_{1:t})$ 分布的样本 $x_{0:t}^{(i)}$ 。对 $i=1,2,\dots,N$, 取 $w_t^{(i)} = \tilde{w}_t^{(i)} = \frac{1}{N}$ 。

(3) 调整粒子

计算当前 ND 值, 并依据 ND 值调整粒子群:

$$\begin{cases} Pt_{\text{next}} = Pt \oplus \mu Pt' & (ND > 1) \\ \mu = \min [\log(ND), \mu_{\text{max}}] \end{cases}$$

$$\begin{cases} Pt_{\text{next}} = \mu Pt' & (0 \leq ND \leq 1) \\ \mu = \max [-\log(ND)^{-1}, \mu_{\text{min}}] \end{cases}$$

其中, Pt' 为调整粒子集; μ 为调整的步长; ND 为信号当前的非平稳度; μ_{max} 为可调整的最大步长; μ_{min} 为可调整的最小步长。

最终期望:

$$E[g_t(x_{0:t})] = \int g_t(x_{0:t}) p(x_{0:t} | y_{1:t}) dx_{0:t} \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g_t(x_{0:t}^{(i)})$$

可以看出: 当信号 ND 值增大时, 本文方法将对粒子集 Pt 进行扩充, 扩充后的新粒子集粒子数量更多, 在状态空间中的分布更加分散, 可在更大范围内寻找更精确的状态; 当信号 ND 值减小时, 本文方法将缩减粒子集以提高粒子的聚集程度, 减少运算量并提高运算速度。

3 仿真试验

生成两组变 ND 信号, 其 ND 值由初始值起, 于第 2、第 4 和第 6 s 时分别增加为初始值的 2 倍、3 倍和 4 倍。信号时长 8 s, 采样频率为 128 Hz。生成信号在无噪声环境下的时间历程及经由 STFT 求得的时频分布分别如图 1~图 2 所示。向两个信号中依次混入信噪比不同的噪声后得到两组仿真信号。

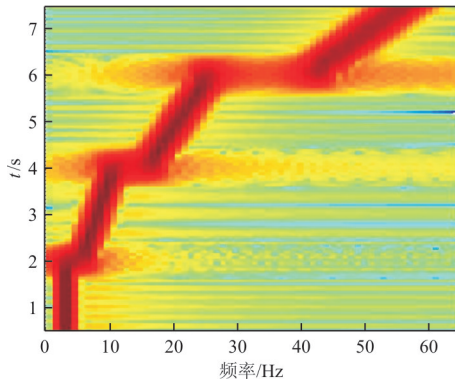


图 1 变频变 ND 信号时频分布

Fig. 1 Time-frequency distribution of variable frequency signal

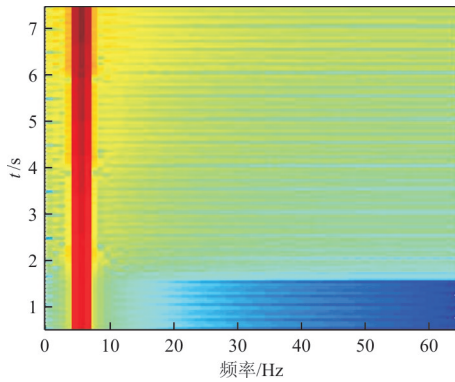


图 2 变幅变 ND 信号时频分布

Fig. 2 Time-frequency distribution of variable amplitude signal

分别使用一般粒子滤波算法和本文的自适应粒子滤波算法对两组生成信号进行处理,所得的跟踪相对误差结果如图 3~图 6 所示,由上至下依次为无噪声和信噪比分别是 10、6、3、0 dB。

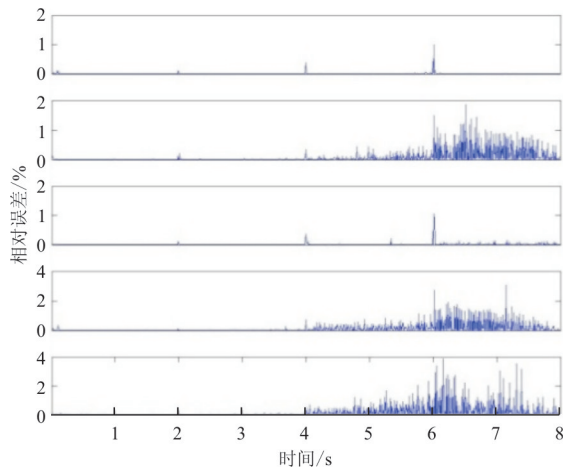


图 3 一般粒子滤波算法(PF)变频信号跟踪结果

Fig. 3 Variable frequency signal tracking result of PF

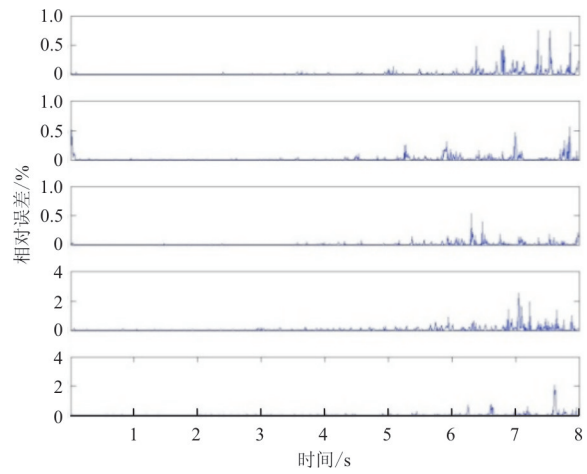


图 4 一般粒子滤波算法(PF)变幅信号跟踪结果

Fig. 4 Variable amplitude signal tracking result of PF

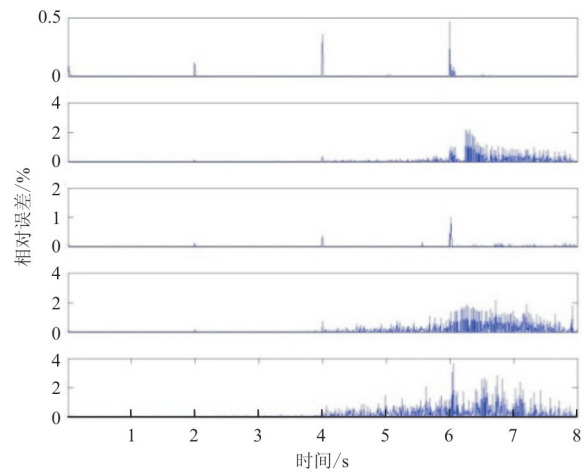


图 5 自适应粒子滤波算法(APF)变频信号跟踪结果

Fig. 5 Variable frequency signal tracking result of APF

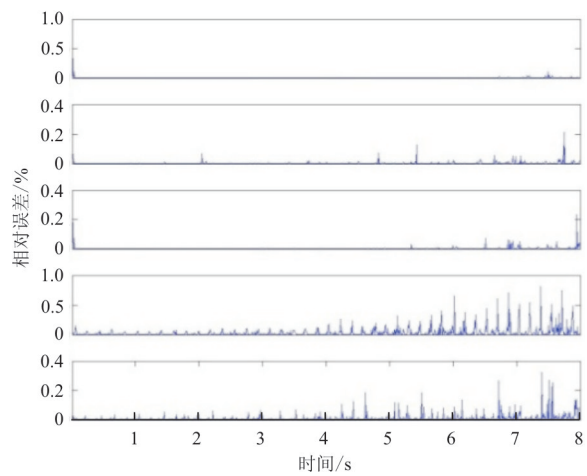


图 6 自适应粒子滤波算法(APF)变幅信号跟踪结果

Fig. 6 Amplitude varying signal tracking result of APF

对比图 3 和图 5,可以看出:对于变频变 ND 信号,无噪声条件下,本文方法跟踪精度高于一般粒子滤波算法,其误差约为一般粒子滤波算法的 50%;有噪声时,本文方法跟踪精度与一般粒子滤波算法相近。

对比图 4 和图 6,可以看出:对于变幅变 ND 信号,本文方法的跟踪精度明显高于一般粒子滤波算法,其误差约为一般粒子滤波算法的 10%~25%。

由实验结果可以得到如下结论:

(1) 对于变频信号,自适应滤波算法在无噪声条件的跟踪精度高于一般粒子滤波算法;

(2) 变频变 ND 信号在 ND 值发生变化的瞬间,自适应滤波算法的误差存在跳变情况;

(3) 对低信噪比的变频信号,自适应滤波算法与一般粒子滤波算法跟踪精度相近;

(4) 自适应粒子滤波算法的跟踪精度随着 ND 值的增大而降低,随着信噪比的降低而降低;

(5) 自适应粒子滤波算法对变幅信号的跟踪精度优于一般粒子滤波算法。

4 结 论

本文提出了一种依据信号非平稳度来调整重采样函数的自适应粒子滤波算法,对变幅变非平稳度信号的跟踪精度优于一般粒子滤波算法,且在无噪声条件下,对变频变非平稳度信号的跟踪也具有更高的精度,为连续变速试验数据分析打下了基础,也为其他领域的非平稳信号分析处理方法提供了一种解决思路。

参考文献

- [1] 王宏禹. 非平稳随机信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 126-160.
WANG Hongyu. Nonstationary random signal analysis and processing[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 126-160. (in Chinese)
- [2] 贾广飞, 孙师泽, 武哲. 经验模态分解在切削振动信号分析中的应用[J]. 河北工业科技, 2018, 35(3): 215-219.
JIA Guangfei, SUN Shize, WU Zhe. Application of empirical mode decomposition in analyzing cutting vibration signal [J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2018, 35(3): 215-219. (in Chinese)
- [3] 赵岩, 贾甜, 周瑞鹏. 地震作用下管道-土耦合结构非平稳随机振动分析[J]. 应用数学和力学, 2018, 39(5): 493-505.
ZHAO Yan, JIA Tian, ZHOU Ruipeng. Non-stationary random vibration analysis of coupled pipeline-soil systems under earthquake[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2018, 39(5): 493-505. (in Chinese)
- [4] 徐俊, 傅耘, 张建军, 等. 基于最大谱的非平稳随机振动数据分析处理方法研究[J]. 装备环境工程, 2016, 13(5): 54-60.
XU Jun, FU Yun, ZHANG Jianjun, et al. The research of processing method based on maximum spectral for non-stationary random vibration data[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(5): 54-60. (in Chinese)
- [5] 谭博, 郑华, 裴承鸣. 基于基函数分解的连续变速颤振边界预测方法[J]. 现代电子技术, 2014, 37(13): 47-49, 52.
TAN Bo, ZHENG Hua, PEI Chengming. Method for progression variable speed flutter boundary prediction based on basis function decomposition[J]. Modern Electronics Technique, 2014, 37(13): 47-49, 52. (in Chinese)
- [6] 朱志宇. 粒子滤波算法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 123-135.
ZHU Zhiyu. Particle filter algorithm and application[M]. Beijing: Science Press, 2010: 123-135. (in Chinese)
- [7] GORDON N, SALMOND D. Novel approach to nonlinear and non-Gaussian Bayesian state estimation[J]. Proceeding of Institute Electric Engineering, 1993, 140(2): 107-211.
- [8] ARULAMPALAM M S, MASKELL S, GORDON N, et al. A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(20): 174-188.
- [9] 王宏健, 徐金龙, 李娟, 等. 非平稳非高斯测量噪声条件下改进差分粒子滤波算法研究[J]. 兵工学报, 2014, 35(7): 1032-1039.
WANG Hongjian, XU Jinlong, LI Juan, et al. Research on improved divided difference particle filter under non-stationary non-Gaussian noise background[J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(7): 1032-1039. (in Chinese)
- [10] 陈志敏, 薄煜明, 吴盘龙, 等. 基于自适应粒子群优化的新型粒子滤波在目标跟踪中的应用[J]. 控制与决策, 2013, 28(2): 193-200.
CHEN Zhimin, BO Yuming, WU Panlong, et al. Novel particle filter algorithm based on adaptive particle swarm optimization and its application to radar target tracking[J]. Control and Decision, 2013, 28(2): 193-200. (in Chinese)
- [11] 叶华, 谭冠政, 李广, 等. 基于稀疏表示与粒子群优化算法的非平稳信号去噪研究[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(7): 328-335.
YE Hua, TAN Guanzheng, LI Guang, et al. De-noising nonstationary signal based on sparse representation and particle swarm optimization[J]. Infrared and Laser Engineer-

- ing, 2018, 47(7): 328-335. (in Chinese)
- [12] 林晓梦, 高勇. 一种改进重采样的粒子滤波盲分离算法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2019, 31(4): 502-508.
LIN Xiaomeng, GAO Yong. An improved resampling algorithm for blind separation of particle filtering[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2019, 31(4): 502-508. (in Chinese)
- [13] 谌剑, 严平, 张静远. 权值优化组合粒子滤波算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(24): 33-35, 39.
CHEN Jian, YAN Ping, ZHANG Jingyuan. Research on weight optimal combination particle filter algorithm [J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(24): 33-35, 39. (in Chinese)
- [14] 郑华, 谭博, 裴承鸣. 粒子滤波算法在多传感器测量中的应用[J]. 现代电子技术, 2014, 37(1): 24-26, 30.
ZHENG Hua, TAN Bo, PEI Chengming. Application of particle filter algorithm in multisensor measurement [J]. Modern Electronics Technique, 2014, 37(1): 24-26, 30. (in Chinese)
- [15] 谭博, 郑华, 裴承鸣. 一种用于 FTPVS 数据处理的非平稳度定义[J]. 飞行力学, 2015, 33(6): 560-564.
TAN Bo, ZHENG Hua, PEI Chengming. A methodology of non-stationary degree suitable for FTPVS data processing [J]. Flight Dynamics, 2015, 33(6): 560-564. (in Chinese)

作者简介:

谭博(1987—),男,博士,工程师。主要研究方向:信号处理,嵌入式实时操作系统,嵌入式应用软件,航空电子系统工程。

(编辑:马文静)

(上接第 325 页)

- [19] JIANG Y, WALKER N, KIM M, et al. LAAIR: a layered architecture for autonomous interactive robots[C]// Proceedings of AIAA 2018 Fall Symposium: Reasoning and Learning in Real-World Systems for Long-Term Autonomy. USA: AIAA, 2018.
- [20] ZHANG R, SONG B, PEI Y, et al. Agent-based analysis of multi-UAV area monitoring mission effectiveness[C]// Proceedings of 2017 AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference. Reston, USA: AIAA, 2017: 1-10.
- [21] WOSNIACK M E, SANTOS M C, RAPOSO E P, et al. The evolutionary origins of Lévy walk foraging[J]. PLOS Computational Biology, 2017, 13(10): 1157-1163.
- [22] TAN Y, ZHENG Z. Research advance in swarm robotics [J]. Defence Technology, 2013(9): 18-39.
- [23] 张民, 田鹏飞, 陈欣. 一种无人机定距盘旋跟踪制导律及稳定性证明[J]. 航空学报, 2016, 37(11): 3425-3434.
ZHANG Min, TIAN Pengfei, CHEN Xin. UAV guidance law for circumnavigating and tracking ground target and its stability proof[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(11): 3425-3434. (in Chinese)
- [24] 张睿文, 宋笔锋, 裴扬, 等. 基于 ABMS 的飞机拦截作战效能评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(2): 322-329.
ZHANG Ruiwen, SONG Bifeng, PEI Yang, et al. Evaluation method for operational effectiveness of aircraft interception based on AMBS[J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(2): 322-329. (in Chinese)
- [25] ZHANG R, SONG B, PEI Y, et al. Improved method for subsystems performance trade-off in system-of-systems oriented design of UAV swarms[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2019, 30(4): 720-737.

作者简介:

张睿文(1991—),男,博士研究生。主要研究方向:飞行器总体设计,飞机生存力设计,作战建模与仿真,多智能体系统。

宋笔锋(1963—),男,博士,教授、博导。主要研究方向:飞行器总体设计,多学科设计优化与顶层决策技术,高生存力技术及可靠性与维修性,微小型飞行器设计。

裴扬(1978—),男,博士,教授。主要研究方向:飞机总体设计,目标毁伤评估与生存力分析,飞机效能评估。

王冠坤(1988—),男,硕士,工程师。主要研究方向:项目管理。

(编辑:马文静)