

连续突风频域响应过程的时域等效模拟方法

刘滢滢, 刘景光

(中国商用飞机有限责任公司上海飞机设计研究院 载荷部, 上海 201210)

摘要: **目的** 在时域中模拟连续突风响应, 比较常见的功率谱密度函数的时域数值模拟方法。**方法** 构建民用飞机大展弦比单机翼突风响应计算模型, 针对 CCAR25 规定的大气紊流功率谱密度函数, 进行连续突风随机载荷计算, 并直接为频谱分配随机相位, 经傅立叶逆变换得到与连续突风随机计算使用的功率谱密度函数等效的突风时域激励, 进行离散突风载荷分析, 并与连续突风响应计算结果进行对比。**结果** 比较机翼的弯矩、剪力及扭矩, 离散突风载荷分析得到的弯剪扭载荷值与连续突风载荷分析得到的弯剪扭载荷值的偏差不超过 3%。**结论** 在功率谱密度函数等效的基础上, 利用随机相位构造时域突风激励的方法快捷有效, 能直观地显示随机突风激励下载荷响应的时域情况, 便于进行时域中的非线性分析。

关键词: 连续突风; 功率谱密度; 时域模拟

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.09.004

中图分类号: V221+.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)09-0021-05

Time Domain Equivalence Simulation Method in Continuous Gust Frequency Response Process

LIU Ying-ying, LIU Jing-guang

(Load Department of Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Commercial Aircraft Corporation of China Ltd, Shanghai 201210, China)

ABSTRACT: The work aims to construct the calculation model of gust response of single wing with high aspect ratio of civil aircraft, and calculate the random load of continuous gust according to the power spectral density function of atmospheric turbulence specified by CCAR25, so as to simulate the continuous gust response in time domain. The common time domain numerical simulation methods of power spectral density function were compared and random phase was directly assigned to spectrum. The gust time domain excitation equivalent to the power spectral density function used in the random calculation of continuous gust was obtained by inverse fourier transform to carry out discrete gust load analysis and compare the continuous gust response calculation results. The results indicated that based on the equivalence of power spectral density function, the method of constructing time domain gust excitation by random phase was fast and effective, which could visually display the time domain of load response under random gust excitation and facilitate nonlinear analysis in time domain. Comparing the bending moment, shear force and torque of the wing, the deviation between the bending, shearing and torsional loads obtained by discrete gust load analysis and those obtained by continuous gust load analysis was less than 3%.

KEY WORDS: continuous gust; powerspectral density; time domain simulation

收稿日期: 2020-06-30; 修订日期: 2020-07-08

Received: 2020-06-30; Revised: 2020-07-08

作者简介: 刘滢滢 (1988—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为飞行器动载荷计算。

Biography: LIU Ying-ying(1988—), Female, Master, Senior engineer, Research focus: dynamic load of aircraft.

现代民用飞机尺寸变大后,结构的柔度增大^[1],同时,飞机的飞行速度增加,巡航状态下的气动特性非线性特征增强^[2]。突风载荷已成为民用飞机最重要的设计载荷情况之一,突风响应给出的全机载荷和过载对详细设计阶段和取证阶段都至关重要^[3]。

突风和紊流载荷是民用航空规章^[4]中飞行载荷的重要情况,分连续突风载荷及离散突风载荷两种。按中国民用航空规章 CCAR-25§25.341 (a)(1)的规定,计算限制突风载荷时必须考虑结构弹性模态及刚体模态在内的多个模态,通过动态分析,给出结构各部分的载荷^[5-7]。

按中国民用航空规章 CCAR-25-R4§25.341 规定,离散突风的突风速度输入与突风梯度、高度、飞行速度、飞机载重情况有关^[8],具有明确的相位及幅值信息。连续突风的突风速度输入与高度、飞行速度、飞机载重情况有关,输入为突风速度的功率谱密度形式,无明确的相位及幅值信息^[9-10]。

离散突风分析给出全机载荷时域响应,同一时刻,全机载荷平衡;连续突风分析给出全机载荷频域的均方根,无明确的时域平衡载荷^[11],为分析带来不便。一个连续突风分析工况对应无数的离散分析工况,两者结果应相符并可互相验证。若能将连续突风分析转化为离散突风分析,则可利用离散突风分析的优势,并弥补离散突风激励不足的劣势,增加突风载荷包线的分析精度,且频域分析的优势在于快速线性化分析,同时时域分析的优势是可考虑舵面偏转限制等多种非线性因素,进行较精确的非线性分析^[12-14]。

连续突风速度一般采用 Von-karman 功率谱形式。将频域输入转化为时域输入的方法主要有三种,一是基于 PSD 离散的逆 Fourier 变换法,由 D. Cebon 首次提出,并在铁轨模拟中成功应用的^[15];二是线性滤波方法^[16],即白噪声滤波法,其用于满足特定条件的白噪声抽象指定的随机过程,然后适当变换假定系统而拟合出该随机过程的时域模型,得到一个代表性样本^[17];三是谐波叠加法模拟^[18],采用离散谱逼近目标随机过程的模型离散化数值模拟方法,只要频率间隔足够密,将对应各小区间的谐波函数累加,即得到随机过程的一个时域模型^[19]。

将连续突风的输入功率谱密度分为若干频率间隔上的功率谱分布,为每段功率谱直接分配随机相位,得到频谱,进行傅里叶逆变换,得到时域上的突风速度输入,该时域激励与频域激励的功率谱密度相同。得到时域激励后,进行离散突风载荷分析,与连续突风载荷分析的结果对比,结果显示利用随机相位构造时域突风激励的方法快捷有效,便于进行非线性分析,能直观地显示随机突风激励的时域情况,同时,比较机翼的弯矩、剪力及扭矩,离散突风载荷分析得到的弯剪扭载荷值与连续突风载荷分析得到的弯剪

扭载荷值的偏差不超过 3%。

1 突风分析方法

频域中的突风响应分析,在模态坐标系中进行,其基本运动方程如下:

$$\begin{bmatrix} -M_{hh}\omega^2 + iB_{hh}\omega + (1+ig)K_{hh} \\ -\frac{1}{2}\rho V^2 Q_{hh}(m, k) \end{bmatrix} \{u_h\} = \{P(\omega)\} \quad (1)$$

式中: M_{hh} 为广义质量矩阵; B_{hh} 为广义阻尼矩阵; K_{hh} 为广义刚度矩阵; m 为马赫数; k 为减缩频率; c 为参考弦长; $Q_{hh}(m, k)$ 为广义气动力系数矩阵; ω 为圆频率; g 为结构阻尼; ρ 为大气密度; V 为飞行速度; u_h 为模态幅值向量; $\{P(\omega)\}$ 为变换到模态坐标系的外激励。

中国民用航空规章 CCAR-25 § 25.341 突风设计准则规定了民用飞机的突风激励形状,离散突风形状为 1-cos 型的时域激励,连续突风采用功率谱密度输入的形式。

2 民用飞机单机翼连续突风响应

建立用于突风响应计算的民用飞机单机翼模型,进行垂向连续突风响应计算。

2.1 模型

民用飞机的单机翼结构模型如图 1 所示,其机翼长 16.24 m,展弦比为 9。用部件弹性刚轴上的弹性梁模拟整个结构,其中,若干梁元模拟机翼的不同站位,用若干集中质量离散化结构质量及燃油质量,加载在梁元对应节点。对应气动模型如图 2 所示,用 720 个气动力面元模拟单机翼,采用 MSC. Nastran 中的偶极子格网法计算非定常气动力,气动力与结构位移间的耦合通过样条函数实现。

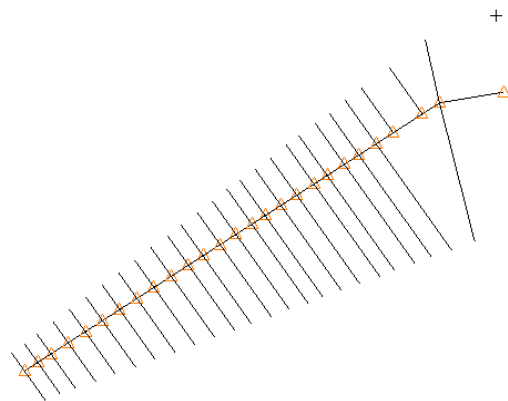


图 1 单机翼结构模型

Fig.1 Structure model of single wing

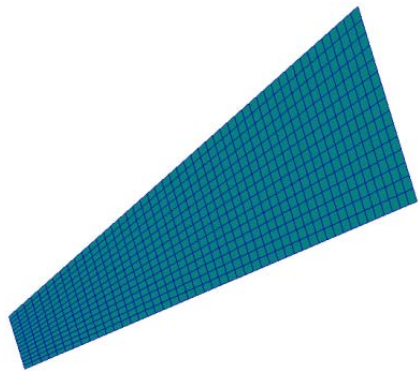


图 2 单机翼气动模型
Fig.2 Aerodynamic model of single wing

2.2 突风功率谱输入及时域转化

突风速度为 1 m/s, 突风速度功率谱输入采用 Von-karman 谱, 功率谱密度函数如下:

$$\Phi(f) = \frac{\sigma^2 L}{\pi} \frac{1 + \frac{8}{3}(1.339L\Omega)^2}{\left[1 + (1.339L\Omega)^2\right]^{\frac{11}{6}}} \quad (2)$$

式中: Φ 为大气紊流功率谱密度; σ 为突风速度均方根值; Ω 为折算频率, $\Omega = 2\pi f/\nu$; L 为突风尺度 (规范规定为 760 m)。

取 σ 为 1, 功率谱密度频域曲线如图 3 所示。

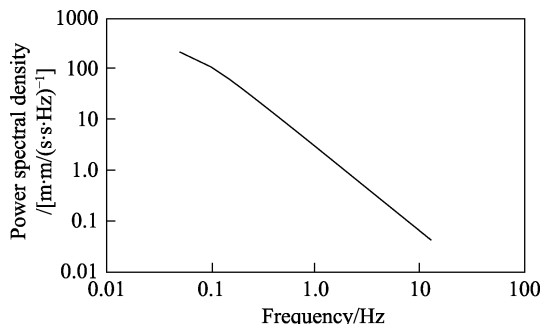


图 3 突风功率谱密度输入
Fig.3 Input of power spectral density of gust velocity

对图 3 所示的功率谱密度, 考虑输入时长为 20 s 的离散突风速度, 选取 1024 个未知的离散速度点进行拟合, 目标是已知的功率谱密度函数。

由于时域突风速度输入 $x(t)$ 的均方值可表示为:

$$\overline{x^2} = \sum_{k=1}^N \left(\frac{1}{\sqrt{2}} |C_k| \right)^2$$

其中, 傅氏级数 C_k 满足:

$$x(t) = \sum_{k=0}^N C_k e^{j \frac{2\pi k}{T} t}$$

总时间 $T=20$ s, 总离散点数 $N=1024$ 。时间离散点的均方根具有功率的含意, 故 $W(f_k) = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} |C_k| \right)^2$ 表

示 f_k 频率处, 频率间隔为基频 ω_0 , 即 $1/T$ 频段的功率谱分布。

针对式 (2) 中的功率谱密度函数, 在 0 至 25.6 Hz 区间, 每隔 1/20 Hz 取一个频率点, 共取 513 个频率点, 将各频率点上的值 $\Phi(f_k)$ 乘以频率间隔 $1/T$, 得功率谱分布 $W(f_k)$, 考虑到单边功率谱的分布特征, 上述频率序列中的 1/20 至 511/20 Hz, 其功率谱分布为 $W(f_k)/2$, 开根得 C_k 的模值, 此时为 1/20 Hz 至 511/20 Hz 分配随机相位, 得到 C_k 的估计值, 随机相位位于 0 至 2π rad 之间, 则 513/20 至 1024/20 Hz 频率点的 C_k 估计值与 1/20 至 511/20 Hz 对应频率点的 C_k 估计值共轭。

按上述方法得到 0/20 至 1024/20 Hz 频率点上的 C_k 后, 进行傅里叶逆变换, 可得到离散时域点, 位于 10 s 内, 共 1024 个离散点, 分布如图 4。

图 4 中转化后的突风速度时域激励, 包含低频及高频信号, 具有确定的相位及幅值。

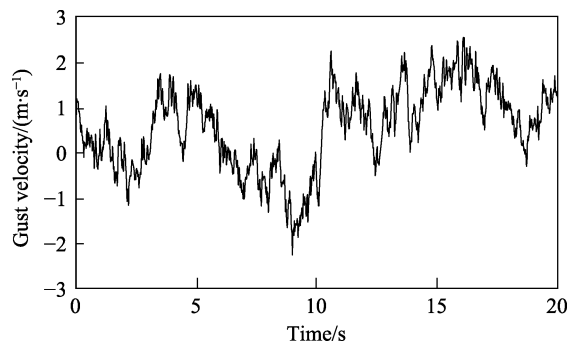


图 4 突风速度时域激励
Fig.4 Gust velocity time domain excitation

2.3 连续突风及离散突风结果对比

检查上述连续突风结果, 机翼翼中的垂向弯矩、剪力及扭矩的均方根见表 1。

表 1 连续突风机翼翼中的均方根值

Tab.1 Root mean square value of swing in continuous gust		
弯矩/(N·m)	剪力/N	扭矩/(N·m)
3.86×10^4	9.00×10^3	3.47×10^6

采用 2.2 节中生成的时域离散突风速度, 进行垂向离散突风响应计算, 机翼中段的垂向弯矩、剪力及扭矩时域响应曲线见图 5。

施加图 4 的突风激励后, 机翼中段的弯矩、剪力及扭矩响应载荷如图 5 所示, 在 10.5 s 左右, 其弯矩、剪力及扭矩达到最大值, 其中包含低频响应及高频响应, 且随着图 4 中的突风速度激励变化而变化。

对图 5 中的弯矩、剪力及扭矩求其整个时域响应过程的均方根值, 并与连续突风在频域响应过程中得到的载荷进行对比, 结果见表 2。

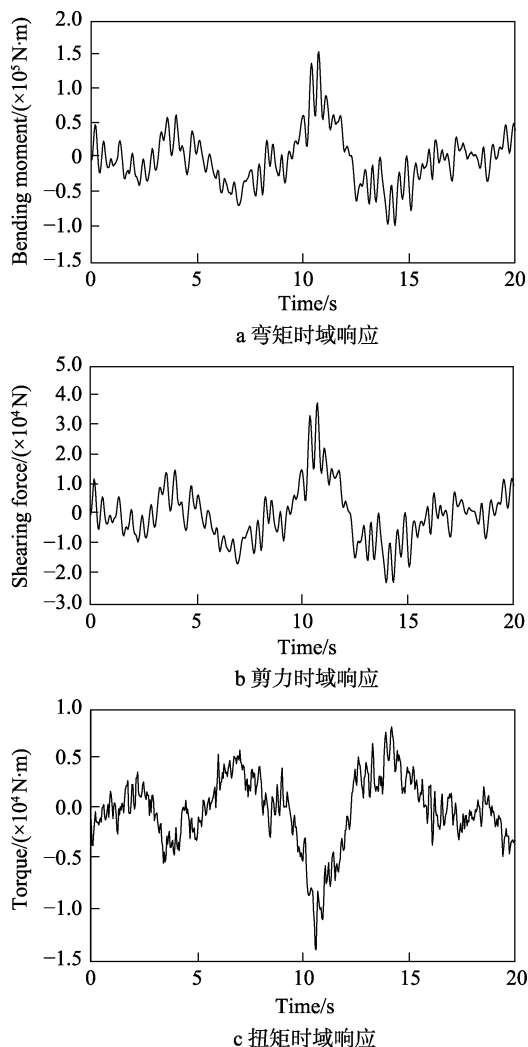


图5 机翼中段的垂向弯矩、剪力及扭矩时域响应曲线

Fig.5 Time domain response of bending moment, shearing force, torque at middle part of the wing: a) bending moment, b) shearing force, c) torque

表2 离散突风机翼翼中的均方根值及差异
Tab.2 Root mean square value and difference in discrete gust wing

载荷类型	量值	差异/%
弯矩/(N·m)	3.82×10^4	-1.04
剪力/N	9.20×10^3	2.22
扭矩/(N·m)	3.48×10^6	0.27

表2显示离散突风载荷分析得到的弯剪扭载荷值与连续突风载荷分析得到的弯剪扭载荷值的偏差不超过3%。

结合图5,在功率谱密度函数等效的基础上,利用随机相位构造时域突风激励的方法快捷有效,能直观地显示随机突风激励的时域情况,便于进行非线性分析。

3 结论

1)给出一种工程中实用的给定功率谱密度函数,

拟合等效时域输入的方法,拟合后的突风速度时域激励频率含低频及高频。

2)通过数值拟合,建立连续突风分析与离散突风分析的关系,结果显示离散突风载荷分析得到的弯剪扭载荷值与连续突风载荷分析得到的弯剪扭载荷值的偏差不超过3%。

3)通过拟合连续突风的突风功率谱密度输入为等效的时域输入,可发挥两者优势。连续突风分析频率范围广,但不直观,无法给出明确的时域平衡载荷,且无法直接考虑非线性;离散突风分析给出全机载荷时域响应,同一时刻,全机载荷平衡,但分析频率范围有限。

参考文献:

- [1] 谢长川, 吴志刚, 杨超. 大展弦比柔性机翼的气动弹性分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(12): 1087-1090.
XIE Chang-chuan, WU Zhi-gang, YANG Chao. Aeroelastic Analysis of Flexible Large Aspect Ratio Wing[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(12): 1087-1090.
- [2] 顾宁, 陆志良, 张家齐,等. 基于CFD的机翼突风响应计算[J]. 航空学报, 2011, 32(5): 785-791.
GU Ning, LU Zhi-liang, ZHANG Jia-qi, et al. CFD-based Analysis for Gust Response of Aircraft Wing[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2011, 32(5): 785-791.
- [3] FAA AC 25. 341-1 Dynamic Gust Loads[S].
- [4] 中国民用航空规章第25部CCAR-25[S].
China Civil Aviation Regulations Part25 CCAR-25[S].
- [5] 詹浩, 钱炜祺. 翼型和机翼阵风响应的数值模拟[J]. 空气动力学学报, 2007, 25(4): 531-536.
ZHAN Hao, QIAN Wei-qi. Numerical Simulation of Gust Response for Airfoil and Wing[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2007, 25(4): 531-536.
- [6] 严德, 杨超, 肖志鹏. 弹性飞机平衡的阵风外载荷计算与分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(10): 1321-1325.
YAN De, YANG Chao, XIAO Zhi-peng. Balanced External Gust Loads Computation and Analysis for Elastic Aircraft[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(10): 1321-1325.
- [7] 詹浩, 钱炜祺. 弹性机翼阵风响应数值计算方法[J]. 计算力学学报, 2009, 26(2): 270-275.
ZHAN H, QIAN W Q. Numerical Simulation on Gust Response of Elastic Wing[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2009, 26(2): 270-275.
- [8] 吴志刚, 杨超. 弹性导弹的连续与离散突风响应[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(2): 136-140.
WU Zhi-gang, YANG Chao. Continuous and Discrete Gust Responses of Elastic Missiles[J]. Journal of Beijing

- University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(2): 136-140.
- [9] 杨秋艳, 王育林. 飞机连续阵风载荷计算方法应用研究[J]. 飞行力学, 2008, 26(4): 65-68.
YANG Qiu-yan, WANG Yu-lin. Research and Application of the Continuous Gust Loads Analysis Method for Aircraft[J]. Flight Dynamics, 2008, 26(4): 65-68.
- [10] 荆志伟, 肖启之, 侯宗团. 规范修正对垂尾连续紊流载荷的影响分析[J]. 航空科学技术, 2015, 26(9): 14-18
JING Zhi-wei, XIAO Qi-zhi, HOU Zong-tuan. Influence of Regulation's Modification on Continuous Turbulence Loads of Vertical Tail[J]. Aeronautical Science & Technology, 2015, 26(9): 14-18.
- [11] NOBACK R. Comparison of Discrete and Continuous Gust Methods for Airplane Design Loads Determination[J]. Journal of Aircraft, 1986, 23(3): 226-231.
- [12] KARPEL M, SHOUSTERMAN A. Combined Frequency and Time-domain Solutions for Aeroservoelastic Response with Nonlinearities [C]//Proceedings of the International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics. Bristol: [s. n], 2013.
- [13] KARPEL M, PRESENT E, ANGUIA L, et al. Gust Loads on Transport Aircraft with Nonlinear Control System[C]//48th Israel Annual Conference on Aerospace Sciences. Technion. Haifa: [s. n], 2008.
- [14] TEUFEL P, KRUSE M. Efficient Method for Coupling Discrete Gust Loads Analysis in the Frequency Domain with a Fully Non-Linear Flight Control System Simulation [C]//Proceedings of the International Forum of Aeroelasticity and Structural Dynamics, Stockholm: [s. n], 2007.
- [15] 陈果, 翟婉明. 铁路轨道不平顺随机过程的数值模拟[J]. 西南交通大学学报, 1999, 34 (2): 138-142.
CHEN Guo, ZHAI Wan-ming. Numerical Simulation of the Stochastic Process of Railway Track Irregularities[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1999, 34(2): 138-142.
- [16] YOSHIMURA T. A Semi-active Suspension of Passenger Cars Using Fuzzy Reasoning and the Field Testing[J]. International Journal of Vehicle Design, 1998, 19(2): 151-166.
- [17] 缪炳荣, 谭仕发, 鄢平波, 等. 非稳态风致载荷下车体结构典型载荷谱仿真研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(10): 100-107.
MIAO Bing-rong, TAN Shi-fa, WU Ping-bo, et al. Research of Typical Fatigue Load Spectrum Simulation of Carbody Structure Based on Non-stationary Aerodynamic Load Journal of Mechanical Engineering [J]. 2017, 53(10): 100-107.
- [18] NEWLAND D E. Random Vibrations and Spectral Analysis[M]. London: Longman, 1985.
- [19] 杨虎军, 安军, 赵美英, 等. 基于时域法的运载火箭风载荷动力响应分析[J]. 强度与环境, 2018, 40(4): 22-26.
YANG Hu-jun, AN Jun, ZHAO Mei-ying, et al. The Analysis of Launch Vehicle Structural Dynamics underground Wind Load based on Time-domain Method[J]. Structure & Environment Engineering, 2018, 40(4): 22-26.