

文章编号: 0258-1825(2019)06-0950-06

旋转开槽圆筒式阵风发生器流场特性数值模拟

向正平¹, 戴玉婷^{1,*}, 黄广靖²

(1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191;

2. 北京航空航天大学 航空器先进设计技术工业和信息化部重点实验室, 北京 100191)

摘 要:在 OpenFOAM 开源代码框架下开发求解器,对旋转开槽圆筒式阵风发生器的动态等效升力系数进行数值模拟,与试验结果吻合较好,验证了求解器的正确性。在此基础上,对该型阵风发生器的下游流场扰动风速进行了数值模拟和流场分析,分析了开槽圆筒旋转方向、下游流场位置、减缩频率等因素对下游流场扰动阵风的影响规律。结果表明,开槽圆筒的旋转方向对中心线上下两侧流场产生不同影响,对中心线附近的流场干扰较大。阵风幅值的变化与减缩频率有关,当减缩频率值在 0.2~0.25 之间时,产生阵风的正弦特性最佳。该数值模拟的结果对阵风发生器试验装置的设计具有一定的指导意义。

关键词:旋转开槽圆筒;阵风发生器;OpenFOAM;开源代码;数值模拟;旋转频率

中图分类号:V211.3

文献标识码:A

doi: 10.7638/kqdlxxb-2017.0175

Numerical simulation of flow field characteristics about rotating slotted cylinder gust generator

XIANG Zhengping¹, DAI Yuting^{1,*}, HUANG Guangjing²

(1. School of Aeronautic Science and Engineering, BeiHang university, Beijing 100191, China;

2. Key Laboratory of Aircraft Advanced Design Technology and Ministry of Industry and
Information Technology, Beijing 100191, China)

Abstract: A solver is developed under the OpenFOAM open source framework. The solver is validated by simulating the dynamic equivalent lift coefficient of the rotary slotted cylindrical gust generator, which is in good agreement with the experimental result. The numerical simulation and flow field analysis are carried out for the downstream flow field disturbance velocity. The effects of the rotation direction, the rotation frequency, and the flow velocity on the downstream flow field are analyzed. The results show that, the rotation direction of the cylinder has different effects on the flow field of the upper and lower sides of the center line with greater interference near the center line. The change of gust amplitude is related to the reduction frequency, and the sinusoidal characteristics of the gust are best when the reduced frequency is 0.2~0.25. The results of this numerical simulation have some guiding significance for the design of the test device.

Keywords: rotating slotted cylinder; gust generator; OpenFOAM; open source code; numerical simulation; rotation frequency

0 引 言

飞机在飞行过程中,经常会受阵风的影响而发生

颠簸,严重时会导致飞机损坏甚至发生较为严重事故^[1]。因此,飞机必须通过阵风响应检验才能交付使用,而合理确定阵风载荷并减缓阵风影响对于确保飞

收稿日期:2017-09-05; 修订日期:2017-11-09

基金项目:国家自然科学基金(11672018)

作者简介:向正平(1990-),男,硕士,工程师,研究方向:CFD 仿真,气动弹性力学。E-mail:xiangzhengping@163.com

通信作者:戴玉婷*(1985-),女,博士,副教授,主要研究方向:流固耦合、气动伺服弹性和主动控制。E-mail:yutingdai@buaa.edu.cn

引用格式:向正平,戴玉婷,黄广靖. 旋转开槽圆筒式阵风发生器流场特性数值模拟[J]. 空气动力学学报, 2019, 37(6): 950-955.

doi: 10.7638/kqdlxxb-2017.0175 XIANG Z P, DAI Y T, HUANG G J. Numerical simulation of flow field characteristics about rotating slotted cylinder gust generator[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2019, 37(6): 950-955.

机飞行安全具有重大意义^[2-4]。近年来,杨俊斌、吴志刚^[5]等利用能产生连续正弦阵风的叶栅型阵风发生器,设计风洞试验,对大展弦比飞翼布局的飞机开展了阵风减缓主动控制试验研究。宗宁^[6]开展了阵风载荷减缓风洞验证试验,验证载荷减缓方案设计的鲁棒性进行了试验和理论研究。

以上研究表明阵风发生器是研究阵风响应和阵风减缓的必备装置,其作用是在风洞里模拟阵风,并作为飞机防阵风设计的试验装备,在国内外得到了有效发展^[8-10]。传统阵风发生器有叶栅型阵风发生器^[11]、级联式震荡翼型^[12]、带摆动襟翼的固定翼型^[13-14]、带震荡喷射襟翼的固定翼型、带有循环控制的翼型^[15]等,目前应用比较广泛的为叶栅型阵风发生器。这些传统的阵风发生器存在高频振动明显、机械控制复杂、所需电机功率较大等缺点。因此需要机械控制简单、可靠性高的新式阵风发生器。而旋转开槽圆筒式阵风发生器在很大程度上弥补了传统阵风发生器的不足,具有独特的优点。目前该型阵风发生器主要用于低速风洞试验。

旋转开槽圆筒机构最早用于颤振激励,而后用于阵风发生器机构。在颤振激励方面国内研究较多,许和勇^[16]等对这种新型颤振激励系统的特点提出了一种高效、简便的动网格方法,计算了该激励系统工作时的非定常气动力特性。王涛^[17]等研究了该激励系统的工作原理和激励力特性。杨智春^[18]等研究了该系统的静态和动态气动特性。刘志荣^[19]等研究了开缝圆柱缝隙倾斜角对脱落涡的影响。D.M.Tang^[8]等对该型阵风发生器做了理论和试验研究,分析了阵风产生的机理及阵风与圆槽旋转频率之间的关系。

以上研究工作主要集中在开缝圆柱机构附近的流场特性。且作为阵风发生装置,尽管理论研究和试验研究取得了巨大进步,但该装置若要成功应用于风洞试验,还有许多问题有待研究。本文研究的主要目的是分析该装置在下游产生的流场幅值和频率特性,研究结果对于该型阵风发生器试验装置的合理设计具有一定意义。

1 旋转开槽圆筒式阵风发生器

旋转开槽式阵风发生器装置的几何结构如图 1 所示。为满足阵风幅值要求,该阵风发生器由四片相同的叶片组合而成^[20]。每片叶片由一个可旋转的开槽圆筒和固定直机翼组成。当流体流过机翼并经过旋转的开槽圆筒时,在圆筒后缘会产生类似正弦变化的阵风。机翼的升、阻力系数与圆筒旋转的角度、圆

筒到机翼尾部的距离及圆筒的开槽角度有关^[21]。忽略两叶片之间的干扰,选取一片叶片建模,进行流场分析。由于叶片的截面相同且机翼和圆筒较长,故可用二维模型来模拟。二维模型图如图 2 所示。翼型为 NACA0012 对称翼型,弦长 $c = 305 \text{ mm}$,翼型尾部到圆筒左端距离 $e = 24.4 \text{ mm}$,圆筒外径 76.2 mm ,厚度 9.6 mm ,开缝角度 90° 。

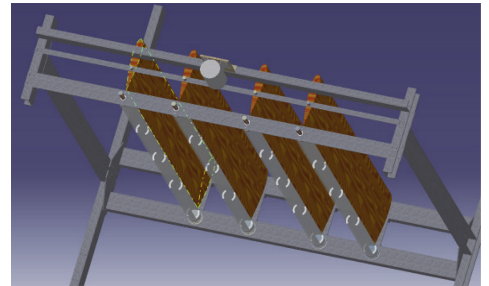


图 1 阵风发生器装置
Fig.1 Gust generator device

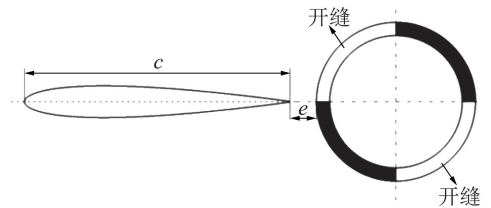


图 2 单片叶片的二维模型图
Fig.2 Two dimensional model of single blade

2 计算网格和方法

2.1 网格划分

采用 OpenFOAM 开源 CFD 软件来建模和数值分析。OpenFOAM 是一个在 Linux 系统下运行的 CFD 类库。它是一个完全由 C++ 编写的面向对象的 CFD 类库,支持多面体网格,可以处理复杂的几何外形。研究人员可根据需要编写自己的求解器。这里采用了 OpenFOAM 中的 AMI (Arbitrary Mesh Interface) 技术实现网格旋转时的数据交换,旋转角速度可设定,从而实现动态旋转的模拟过程。网格划分采用 OpenFOAM 中的 blockMeshDict 字典程序控制,划分结构网格。划分的整体结构化网格如图 3 所示,图 4 为翼型附近局部加密网格,图 5 为旋转圆筒部分网格。

2.2 数值计算方法

在惯性坐标系下,非定常积分形式的 Navier-Stokes 表达式为:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega(t)} U d\Omega + \int_{S(t)} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{S} = \frac{1}{Re} \int_{S(t)} \mathbf{F}_v \cdot d\mathbf{S} \quad (1)$$

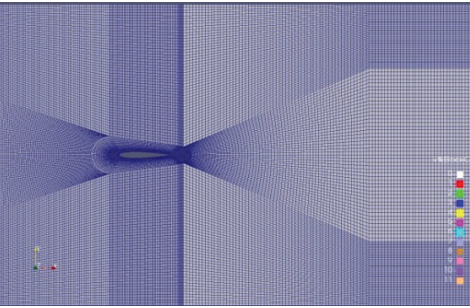


图 3 整体结构网格
Fig.3 Computational structured grid

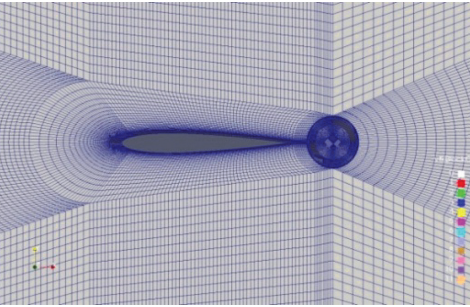


图 4 翼型附近网格
Fig.4 Grid near airfoil

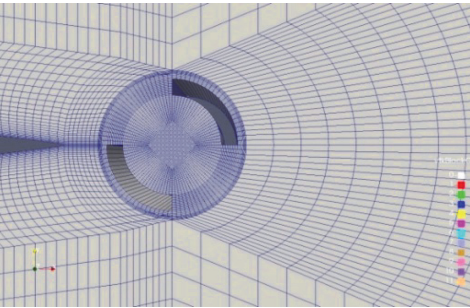


图 5 旋转圆筒处网格
Fig.5 Grid near rotating cylinder

其中 U 表示单位体积质量、能量和动量表示的通量, F 和 F_v 分别表示无黏流通矢量和有黏流通矢量, $\Omega(t)$ 为运动控制体积, $S(t)$ 为运动控制体积的表面积。

采用有限体积法进行空间离散,二阶迎风格式,时间推进采用隐式方法,湍流模型为 $k-\omega$ SST 湍流模型,该模型能很好地处理流动分离^[22]。

在圆筒旋转的过程中,机翼和圆筒上会产生非定常气动力。旋转开槽圆筒阵风发生器的等效升力系数^[5]计算方法为:

$$C_{L,eq} = \frac{2(dL_a + dL_{rsc})}{\rho u^2 (c + d)}$$

(2)

式中 dL_a 、 dL_{rsc} 分别为翼型和开槽圆筒上的升力, c 为翼型弦长, d 为圆筒外径, ρu^2 为动压。

3 计算结果及分析

3.1 等效升力系数计算

为准确模拟阵风发生器的下游流场特性,需首先数值模拟旋转开槽圆筒式阵风发生器的等效升力系数,与试验数据对比。图 6、图 7 分别为圆筒旋转 20° (以图 2 位置为起点,逆时针旋转) 时的压力、速度云图。中心线位置在图 6 中划出,来流方向沿 x 轴正方向。中心线上下两侧为侧向位置,以圆筒中心为起点,沿 x 轴正向为下游流场。

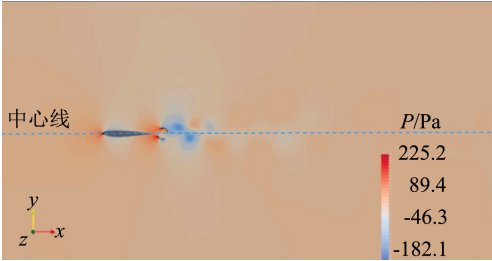


图 6 旋转角 20° 时的压力云图
Fig.6 Pressure contours at 20° rotation angle

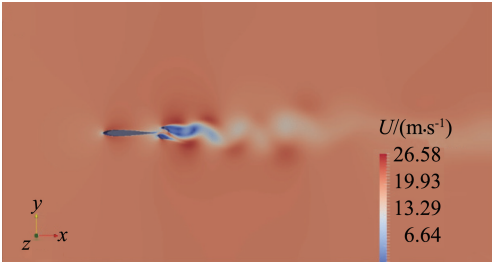


图 7 旋转角 20° 时的速度云图
Fig.7 Velocity contours at 20° rotation angle

在旋转角度 0°~180° 范围内,数值计算获得等效升力系数与试验数据对比结果如图 8 所示。图中试验数据和理论数据从文献[8]中获得,OpenFOAM 仿真数据为本文 CFD 数值模拟结果。由图可见,等效升力系数随着旋转角度的变化类似正弦变化,分别

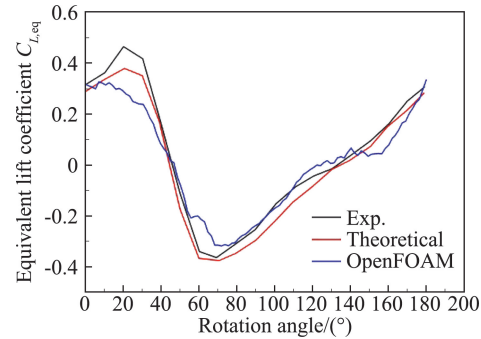


图 8 等效升力系数 CFD 模拟值与试验数据对比
Fig.8 Comparison of equivalent lift coefficient between CFD results and experimental data

在 20° 左右和 70° 左右达到峰值,最大幅值约为 0.4。结果表明 CFD 计算的等效升力系数与试验数据吻合较好,验证了求解器的正确性。

3.2 下游流场分析

3.2.1 旋转圆筒对流场的影响

首先,开槽圆筒的旋转方向对下游流场特性有明显影响。当逆时针方向旋转时,在阵风发生器下游圆筒中心距离 0.6 m 处,中心线两侧等距位置处产生的阵风(y 方向的扰动速度)有明显差别。以旋转频率 5 Hz、来流速度 20 m/s、中心线两侧 0.25 m 处为例,计算结果如图 9、图 10 所示。由图可知,上侧产生的阵风比较紊乱,下侧产生的阵风正弦特性较好,阵风响应不对称是由扰动速度的初值引起的。当改变圆筒旋转方向为顺时针时,结果正好相反,中心线上侧阵风正弦特性较好,下侧比较紊乱,计算结果如图 11 所示。圆筒旋转方向不同导致上下产生的扰动阵风不对称,当逆时针旋转时,对上侧扰动阵风的干扰较大,阵风的正弦特性变差。当圆筒顺时针旋转时,情况正好相反。

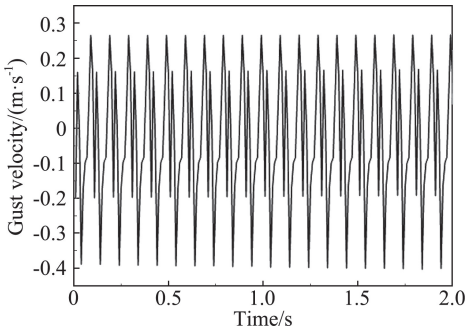


图 9 逆时针旋转时中心线上侧阵风随时间响应
Fig.9 Gust response with time on the upside of center line with counter-clockwise rotation

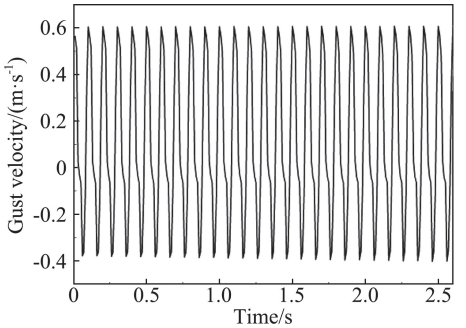


图 10 逆时针旋转时中心线下侧阵风随时间响应
Fig.10 Gust response with time on the downside of center line with clockwise rotation

其次,旋转圆筒对中性线附近流场干扰明显。在中心线两侧较近的位置,离中心线侧向距离约 0.2 m 以内的范围,产生的阵风比较紊乱,随着远离中心线位置,阵风的正弦特性越来越好。同样以旋转频率

5 Hz、来流速度 20 m/s 为例,在阵风发生器下游圆筒中心距离 0.6 m、中心线下侧位置 0.15 m 和 0.35 m 处,阵风随时间的响应分别为图 12、图 13 所示。

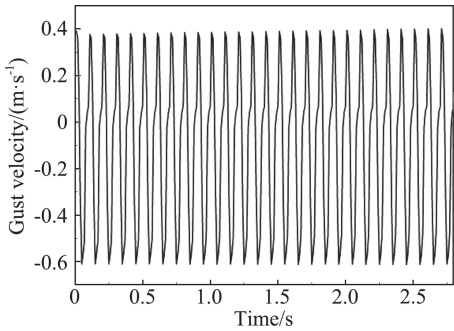


图 11 顺时针旋转时中心线上侧阵风响应
Fig.11 Gust response with time on the upside of center line with clockwise rotation

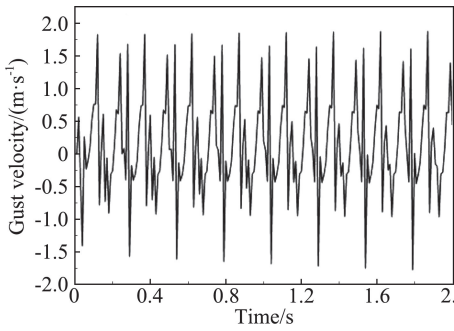


图 12 中心线下侧 0.15 m 处阵风随时间的响应
Fig.12 Gust response with time at the location of 0.15 m below the center line

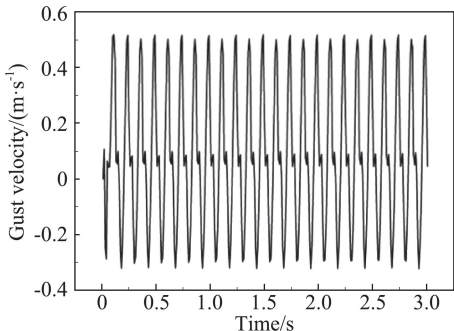


图 13 中心线下侧 0.35 m 处阵风随时间的响应
Fig.13 Gust response with time at the location of 0.35 m below the center line

对比图 12 和图 13 可知,虽然离中心线越近,最大阵风幅值越大,但是阵风正弦特性很差,这主要是由于开槽圆筒旋转过程中,对中心线附近的干扰比较大所致。

3.2.2 下游流场位置对阵风幅值的影响

首先,在不同旋转频率下,比较了阵风幅值随侧向距离的变化规律,比较结果如图 14 所示。图中分别计算了旋转频率 1~8 Hz 的状态,获得一致的规

律,即侧向位置离中心线越远,阵风幅值逐渐递减。

其次,在不同频率下,比较了阵风幅值随下游距离的变化规律,比较结果如图 15 所示。图中画出了旋转频率 5 Hz 和 6 Hz 下的变化。由图可知,距离圆筒中心越远,阵风幅值逐渐递减。

以上结果表明,中心线侧向位置和流场下游位置离旋转圆筒越远,阵风幅值越小。

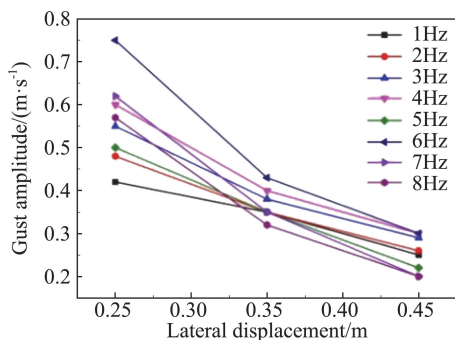


图 14 阵风幅值随侧向位移的响应

Fig.14 Gust amplitude response with lateral displacement

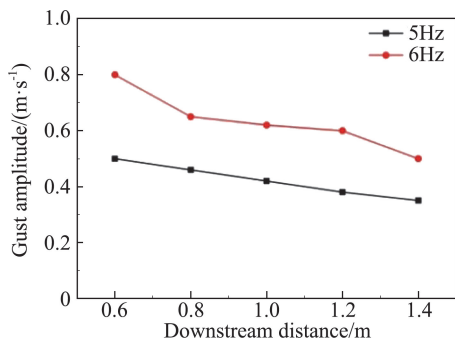


图 15 阵风幅值随下游位移的响应

Fig.15 Gust amplitude response with downstream displacement

3.2.3 减缩频率对阵风幅值的影响

在不同减缩频率下,比较同一点处阵风幅值随减缩频率的响应关系,减缩频率 k 定义为 $k = \frac{c\omega}{v}$, 其中 ω 为旋转频率, v 为来流速度。结果如图 16 所示。图中选取 4 个固定点,分别为下游 0.6m、侧向位置 0.25 m 处,和下游 1.2 m、侧向位置 0.25 m、0.35 m 及 0.45 m 处四个位置。四个位置的阵风变化趋势一致。在减缩频率 0~0.2 范围,随减缩频率增加,阵风幅值越大;当减缩频率在 0.2~0.25 范围内时,阵风幅值有所下降;当减缩频率大于 0.25 时,阵风幅值随减缩频率的增加逐渐递减。但减缩频率在 0.2~0.25 之间时,阵风响应正弦特性最好;当减缩频率从 0.25 开始增大时,阵风正弦响应正弦特性越来越差。以减缩频率 0.32 为例,阵风随时间的响应如图 17 所示,可以看出阵风幅值不稳定。因此产生阵风正弦特性最好的减缩频率范围在 0.2~0.25 之间。

计算了在低速不同状态下的减缩频率,都获得了一致规律,但在 0.2~0.25 减缩频率范围内出现突变的内在机理有待进一步研究。

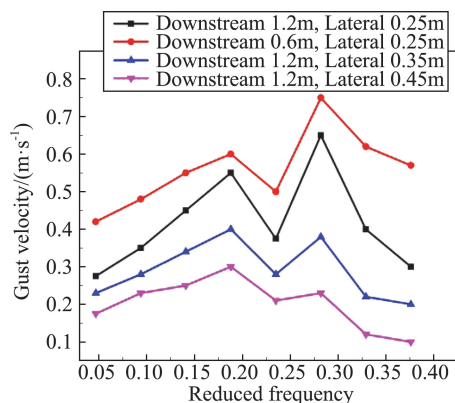


图 16 阵风幅值随减缩频率的响应

Fig.16 Gust amplitude response with reduced frequency

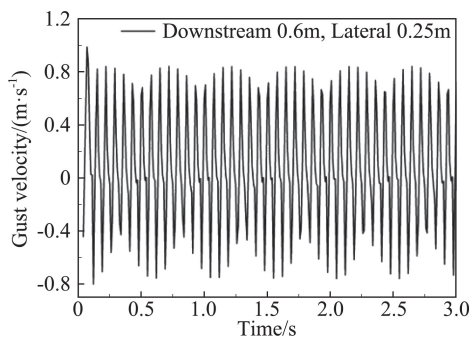


图 17 频率 7 Hz 时阵风随时间的响应

Fig.17 Gust response with time at the frequency of 7 Hz

4 结 论

通过对旋转开槽圆筒式阵风发生器进行数值模拟和流场分析,得以下结论:

- 1) 开槽圆筒的旋转方向对中心线上下两侧流场产生不同影响,且对中心线附近的流场干扰较大。
- 2) 侧向位置离中心线越远,阵风幅值越小,下游离圆筒中心越远位置,阵风幅值越小。
- 3) 阵风幅值的变化与减缩频率有关,在减缩频率 0.2~0.25 时阵风正弦特性最佳。但对于出现突变的内在机理还有待深入研究。

从前景来看,这种阵风发生器具有耗能少、激励频率宽、幅值可控、安装方便等优点。对该型阵风发生器进行数值模拟研究,对试验装置的设计有一定的指导意义。

参 考 文 献:

- [1] 朱博,刘琴,屈晓丽,等.阵风发生装置流场测量与分析[J].实验流体力学,2013,27(6):76-80.

- ZHU B, LIU Q, QU X L, et al. Measurement and analysis of a gust generator flow field in wind tunnel [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2013, 27(6): 76-80. (in Chinese)
- [2] RAVEH D E. CFD-based models of aerodynamic gust response [J]. Journal of Aircraft, 2007, 44(3): 888-897.
- [3] 陈磊, 吴志刚, 杨超. 弹性机翼阵风响应和载荷减缓与风洞试验验证[J]. 工程力学, 2011, 28(6): 212-218.
- CHE L, WU Z G, YANG C. Gust response and load alleviation of elastic wing and wind tunnel test[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(6): 212-218. (in Chinese)
- [4] 袁刚, 李爱军, 王长青, 等. 多舵面大型民机阵风减缓系统设计[J]. 飞行力学, 2011, 29(4): 65-67.
- YUAN G, LI A J, WANG C Q. Multiple rudders large civil aircraft gust alleviation system design[J]. Flight Mechanics, 2011, 29(4): 65-67. (in Chinese)
- [5] 杨俊斌, 吴志刚, 戴玉婷, 等. 飞翼布局飞机阵风减缓主动控制风洞试验[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(1): 184-192.
- YANG J B, WU Z G, DAI Y T. Wind tunnel test of gust alleviation active control for flying wing configuration aircraft [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(1): 184-192. (in Chinese)
- [6] 宗宁. 某型飞机阵风载荷分析与载荷减缓设计[C]//2016年航空科学与技术全国博士生学术论讨摘要集, 2016.
- ZONG N. The gust load analysis and alleviation design for a certain aircraft [C]//Proceedings of the National Doctoral Forum on Aeronautical Science and technology in 2016. (in Chinese)
- [7] DAI Y T, CHAO Y, WANG C. Strategy for robust gust response alleviation of an aircraft model[J]. Control Engineering Practice, 2016, 60: 211-217.
- [8] DOWELL E H, TANG D M, CIZMAS P G A. Experiments and analysis for a gust generator in a wind tunnel[J]. Journal of Aircraft, 1996, 33(1): 139-148.
- [9] 刘志强, 史志伟, 白鹏. 双翼微型飞行器水平阵风响应实验研究[J]. 实验流体力学, 2009, 23(3): 54-57.
- LIU Z Q, SHI Z W, BAI P. Double wings miniature aircraft experimental study on horizontal gust response[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2009, 23(3): 54-57. (in Chinese)
- [10] 史志伟, 刘志强, 丁超. 柔性翼微型飞行器水平阵风响应特性实验研究[J]. 实验流体力学, 2010, 24(6): 1-5.
- SHI Z W, LIU Z Q, DING C. Flexible wing miniature aircraft experimental study on horizontal gust response [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2010, 24(6): 1-5. (in Chinese)
- [11] BENNETT R M, GILMAN J. A wind-tunnel technique for measuring frequency-response functions for gust load analyses [J]. Journal of Aircraft, 1966, 3(6): 535-540.
- [12] MALIK M R, PLETCHER R H. A study of some turbulence models for flow and heat transfer in ducts of annular cross-section[J]. Journal of Heat Transfer, 1981, 103(1): 146-152.
- [13] BLCKNELL J, PARKER A G. A wind-tunnel stream oscillation apparatus[J]. Journal of Aircraft, 2015, 9(6): 446-447.
- [14] PARKER A G, BICKNELL J. Some measurements on dynamic stall[J]. Journal of Aircraft, 1974, 11(7): 371-374.
- [15] HAM N D, BAUER P H, LAWRENCE T L. Wind tunnel generation of sinusoidal lateral and longitudinal gusts by circulation of twin parallel airfoils[R]. NASA CR 1974-137547.
- [16] 许和勇, 叶正寅, 霍幸莉. 基于嵌套网格的颤振激励系统数值计算研究[J]. 空气动力学学报, 2010, 28(5): 536-539.
- XU H Y, YE Z Y, HUO X L. Numerical calculation of flutter excitation system based on nested grid[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2010, 28(5): 536-539.
- [17] WANG T, SHI A M, YANG Y N. Characteristics of a new type of flutter excitation system[J]. Flight Mechanics, 2005, 23(1): 35-37.
- [18] 杨智春, 党会学, 孙勇军, 等. 带开缝旋转圆筒固定小翼气动特性的数值模拟[J]. 工程力学, 2009, 26(11): 222-227.
- YANG Z C, DANG H X, SUN Y J, et al. Numerical simulation of aerodynamic characteristics of a fixed small wing with a slotted rotating cylinder[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(11): 222-227. (in Chinese)
- [19] 刘志荣, 邹赫, 刘锦生, 等. 开缝圆柱缝隙倾斜角对脱落涡的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(1): 128-135.
- LIU Z R, ZOU H, LIU J S, et al. The influence of the slit angle of the slotted cylinder on the shedding vortex[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(1): 128-135. (in Chinese)
- [20] TANG D M, DOWELL E H. Response of a nonrotating rotor blade to lateral turbulence Part II: Experiment[J]. Journal of Aircraft, 1995, 32(1): 154-160.
- [21] CIZMAS P G A, DOWELL E H, TANG D. Flow about a slotted cylinder-airfoil combination in a wind tunnel[J]. Journal of Aircraft, 1996, 33(4): 716-721.
- [22] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. AIAA Journal, 1994, 32(8): 1598-1605.