

# 脉动压力风洞试验采样参数确定方法及应用

张玉杰<sup>1,2</sup>, 黄超广<sup>2</sup>, 孙仁俊<sup>1,2</sup>

(1.西北工业大学 航空学院, 西安 710072;  
2.航空工业第一飞机设计研究院, 西安 710089)

**摘要:** 综合考虑脉动压力风洞试验中的时间延迟效应, 以及结构振动响应分析时截止频率相关要求, 推导出采样频率的计算公式。依据统计学理论, 推导特定置信度和准确度下的采样时间的计算公式, 并计及结构振动响应计算中对频率分辨率的要求, 建立采样时间的确定方法。从输入参数、计算过程和结果出发, 建立了信号采样参数的确定流程。以飞机典型结构脉动压力风洞试验为例, 对该方法进行了说明, 分析了相似换算后结构原型的脉动压力功率谱密度, 结果满足振动响应计算需求, 表明所提采样参数确定方法可行有效。该方法理论依据明确, 对脉动压力风洞试验设计具有指导意义。

**关键词:** 脉动压力; 风洞试验; 采样频率; 采样时间; 相似比; 振动响应

中图分类号: TJ011 文献标志码: A 文章编号: 1672-9242(2024)09-0087-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.09.011

## A Method and Its Application to Determine the Sampling Parameters of Fluctuating Pressure Wind Tunnel Test

ZHANG Yujie<sup>1,2</sup>, HUANG Chaoguang<sup>2</sup>, SUN Renjun<sup>1,2</sup>

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;  
2. AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China)

**ABSTRACT:** The work aims to deduce the formulae to calculate the sampling frequency by considering the time delay effect in the fluctuating pressure wind tunnel test and the cut-off frequency in the structural vibration response analysis. Based on the statistics theory, the formula used to predict the sampling time under the specific confidence level and accuracy degree was deduced and the requirement of frequency resolution in structural vibration response calculation was taken into account to establish the determination method of sampling time. Based on the input parameters, calculation process and results, the determination process of signal sampling parameters was established. With the fluctuating pressure wind tunnel test of typical aircraft structure as an example, this method was illustrated, and the power spectral density of fluctuating pressure of the prototype structure after similar conversion was analyzed. The results met the requirements of vibration response calculation, which showed that the proposed sampling parameter determination method was feasible and effective. The theoretical basis of this method is clear and it has guiding significance for the design of fluctuating pressure wind tunnel tests.

**KEY WORDS:** fluctuating pressure; wind tunnel test; sampling frequency; sampling time; similarity ratio; vibration response

收稿日期: 2024-08-09; 修订日期: 2024-09-31

Received: 2024-08-09; Revised: 2024-09-31

引文格式: 张玉杰, 黄超广, 孙仁俊. 脉动压力风洞试验采样参数确定方法及应用[J]. 装备环境工程, 2024, 21(9): 87-92.

ZHANG Yujie, HUANG Chaoguang, SUN Renjun. A Method and Its Application to Determine the Sampling Parameters of Fluctuating Pressure Wind Tunnel Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(9): 87-92.

由于非定常气动载荷是导致飞机结构振动的主要激励源之一,因此国内外在研制新型战机时,尤为关注非定常气动载荷的预计<sup>[1]</sup>。美国在 F/A-18 飞机<sup>[2]</sup>、F/A-22 飞机<sup>[3]</sup>、JSF 飞机<sup>[4]</sup>的设计中,均开展了尾翼非定常气动力的研究。国内也完成了战斗机 V 形垂尾抖振载荷的预测和分析<sup>[5]</sup>。目前,通常采用脉动压力风洞试验来测量飞机结构表面的非定常气动载荷<sup>[6-7]</sup>。信号采样频率和采样时间是脉动压力风洞试验前需要确定的重要参数。若采样频率过小,就会降低信号分辨率,并有可能无法涵盖待分析的频带范围;若采样频率过大,就可能附带过多的背景噪声,降低信号质量。同样,如果采样时间过短,导致样本量太小,就不能准确地反映总体信息;如果采样时间过长,又会延长试验周期,造成人力、物力和费用的浪费。因此,如何合理有效地确定采样参数十分关键。

国内外学者针对动态压力采样频率和采样时间的确定开展了一些研究。Lee<sup>[8]</sup>通过分析尾翼抖振压力发现,采样时间取 1.6 s 即可满足统计需求。李斌等<sup>[9]</sup>研究了飞机最大抖振设计载荷的长期极值估计法,分析了采样时长对极值估计精度的影响,认为 2 s 的数据量就能保证相对误差小于 5%。但这些研究属于试验后的数据统计分析,对脉动压力试验规划的指导意义不强。一些学者研究了水轮压力脉动的测试方法<sup>[10-12]</sup>,给出了采样频率与采样时间的控制准则,建议采样频率应大于 1 000 Hz,采样时间应大于 10 s。张飞等<sup>[13]</sup>针对水泵水轮机压力脉动的测量问题,建议采样频率不低于 2 倍的有效信号频率,并应保证采集数据的分布情况不出现严重偏差,采样时间应大于信号中所关注频率与旋转周期的乘积。但上述文献所提准则并不适用于基于缩比模型的脉动压力风洞试验。

本文综合考虑缩比模型脉动压力试验和结构振动响应分析中关于时间延迟效应、截止频率、频率分辨率等要求,依据统计学理论,提出一种脉动压力信号采样频率和采样时间的确定方法,并给出了应用案例。

## 1 采样频率的确定

确定脉动压力信号采样频率时,应着重考虑如下 2 个因素:风洞试验中的时间延迟效应<sup>[14-15]</sup>和进行结构原型振动响应分析时的截止频率。

### 1.1 时间延迟效应限制

如图 1 所示,顺吹风气流方向上的 2 个测点  $P_1$  和  $P_2$ ,其水平距离为  $D$ ,气流由左侧而来,速度为  $v$ 。这样气流会先流经测点  $P_1$ ,后流经测点  $P_2$ ,因此这 2 个测点的压力信号在时间上不同步,这种现象称为时间延迟效应。延迟时间  $\Delta t$  为:

$$\Delta t = \frac{D}{v} \quad (1)$$

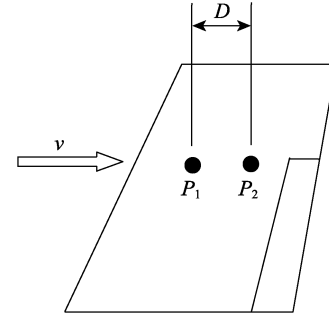


图 1 时间迟滞效应示意

Fig.1 Schematic diagram of time delay effect

为了在试验中捕捉这种延迟效应,以便于进行信号相关性分析。要求采样间隔时间  $\Delta t_s$  应不大于  $\Delta t$  的最小值,即采样频率  $f_s$  应满足:

$$f_s = \frac{1}{\Delta t_s} \geq \frac{v}{D_{\min}} \quad (2)$$

式中:  $D_{\min}$  为相邻测点的最小间距。

实际情况下,流经不同测点的气流速度不仅大小不同,方向也存在差异。若存在矢量夹角  $\theta$ ,则式(2)变为:

$$f_s \geq \frac{v \cos \theta}{D_{\min}} \quad (3)$$

显然,式(2)能够覆盖式(3)的取值范围。因此,选择式(2)判定时间延迟对采样率的限制较为合适。

### 1.2 响应截止频率限制

在脉动压力风洞试验中,无量纲的减缩频率是一个重要的相似律。要求结构模型频率与全尺寸原型频率满足如下关系<sup>[16]</sup>:

$$\frac{f_m L_m}{v_m} = \frac{f_p L_p}{v_p} \quad (4)$$

式中:  $L$  为参考长度;  $v$  为风洞风速或飞机飞行速度。下标  $m$  和  $p$  分别表示缩比模型和全尺寸结构原型。

在进行结构全尺寸原型动态响应分析时,通常需要选取前若干阶模态,相应地会设定截止频率  $f_{c,p}$ 。因此,要求输入的脉动压力覆盖分析频带。根据式(4)所示相似律关系式,要求模型脉动压力截止频率满足:

$$f_{c,m} = \left( \frac{L_p}{L_m} \right) \left( \frac{v_m}{v_p} \right) f_{c,p} \quad (5)$$

根据式(6)所示的参考尺寸  $L$  的相似比定义,可以将式(5)简化为如(7)所示的形式。

$$\lambda_L = \frac{L_m}{L_p} \quad (6)$$

$$f_{c,m} = \frac{\lambda_v}{\lambda_L} f_{c,p} \quad (7)$$

由式 (7) 可见, 当已知风洞模型设计的尺寸比  $\lambda_L$  和速度比  $\lambda_v$  时, 就可以确定模型与原型截止频率之间的关系。

动态信号采样定理要求采样频率必须高于信号中最高频率的 2 倍, 即:

$$f_s \geq 2f_{c,m} \quad (8)$$

综合式 (7) 和式 (8), 可得采样频率应满足:

$$f_s \geq \frac{2\lambda_v}{\lambda_L} f_{c,p} \quad (9)$$

综合考虑时间延迟效应和响应截止频率对采样频率的限制要求, 提取式 (2) 和式 (9) 计算得到的较大值作为采样频率的基准值。为便于信号处理分析, 通常取不小于且最接近该基准值的 2 的  $m$  ( $m$  为正整数) 次方幂指数, 作为最终的信号采样频率。

## 2 采样时间的确定

如式 (10) 所示, 样本量  $n$  由采样频率  $f_s$  和采样时间  $t_s$  决定。样本量的大小影响信号的统计置信度, 在特定采样频率下, 采样时间决定了信号的置信水平。

$$n = f_s t_s \quad (10)$$

下面根据统计学理论<sup>[17]</sup>估计特定置信度下的样本量。一般试验中只有“成功”和“失败”2 种结果, 因此可以用两点分布描述:

$$P(X = k) = p^k (1-p)^{1-k}, \quad k = 0, 1 \quad (11)$$

式中:  $p$  为期望的成功率。

已知两点分布的期望  $E(X)$  和方差  $D(X)$  分别为:

$$\begin{cases} E(X) = p \\ D(X) = p(1-p) \end{cases} \quad (12)$$

依据中心极限定理可知, 当  $n$  足够大时, 式 (13) 成立, 即服从标准正态分布:

$$\frac{\bar{X} - E(X)}{\sqrt{D(X)/n}} = \frac{\bar{X} - p}{\sqrt{p(1-p)/n}} \sim N(0, 1) \quad (13)$$

式中:  $\bar{X}$  为变量  $X$  的均值, 即实际的成功率。

针对样本量  $n$ , 设实际成功率  $\bar{X}$  与期望成功率  $p$  的绝对误差不超过  $\delta$  的概率为  $(1-\alpha)$ :

$$P(|\bar{X} - p| \leq \delta) = 1 - \alpha \quad (14)$$

即:

$$P\left(\frac{|\bar{X} - p|}{\sqrt{p(1-p)/n}} \leq \frac{\delta}{\sqrt{p(1-p)/n}}\right) = 1 - \alpha \quad (15)$$

由式 (13) 可知:

$$P\left(\frac{|\bar{X} - p|}{\sqrt{p(1-p)/n}} \leq u_{\alpha/2}\right) = 1 - \alpha \quad (16)$$

式中:  $u_{\alpha/2}$  为标准正态分布  $N(0, 1)$  的  $\alpha/2$  分位点。综合式 (15) 和式 (16), 近似有:

$$\frac{\delta}{\sqrt{p(1-p)/n}} = u_{\alpha/2} \quad (17)$$

因此, 样本量  $n$  为:

$$n = p(1-p) \left(\frac{u_{\alpha/2}}{\delta}\right)^2 \quad (18)$$

由于  $p(1-p)$  满足如下不等式:

$$2\sqrt{p(1-p)} \leq p + (1-p) = 1 \quad (19)$$

即:

$$p(1-p) \leq \frac{1}{4} \quad (20)$$

因此, 保守起见, 可根据式 (21) 计算样本量:

$$n = \left(\frac{u_{\alpha/2}}{2\delta}\right)^2 \quad (21)$$

通常定义  $(1-\alpha)$  为置信度,  $(1-\delta)$  为准确度。当给定这 2 个参数后, 就可根据式 (21) 估计必要的样本量  $n$ 。获知  $n$  之后, 结合式 (9) 可以确定采样时间:

$$t_s = \frac{n}{f_s} = \left(\frac{u_{\alpha/2}}{2\delta}\right)^2 \frac{1}{f_s} \quad (22)$$

根据式 (21), 表 1 列举了若干常用置信度  $(1-\alpha)$  和准确度  $(1-\delta)$  组合下的样本量  $n$ 。

表 1 不同置信度和准确度对应的样本量  
Tab.1 Sample size under different confidence and accuracy

1- $\delta$	1- $\alpha$				
	0.9	0.95	0.99	0.995	0.999
0.9	42	68	136	166	239
0.95	165	271	542	664	955
0.99	4 106	6 764	13 530	16 588	23 874
0.995	16 424	27 056	54 119	66 349	95 496
0.999	410 594	676 386	1 352 974	1 658 725	2 387 384

另外考虑到结构振动响应计算中对频率分辨率  $\Delta f$  的要求, 以及频率相似比换算关系, 可知样本时间应满足:

$$t_s \geq \frac{1}{\frac{\lambda_v}{\lambda_L} \Delta f} = \frac{\lambda_L}{\lambda_v \Delta f} \quad (23)$$

选取式 (22) 和式 (23) 中的较大值确定采样时间。根据上述理论分析, 脉动压力风洞试验中信号采样频率和采样时间的确定流程如图 2 所示。

## 3 案例说明

### 3.1 案例一

某次脉动压力低速风洞试验前规划的已知参数

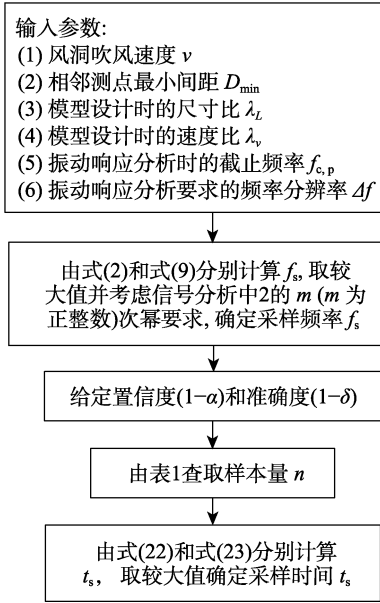


图2 确定采样频率和采样时间的流程

Fig.2 Determination process of sampling frequency and time

见表 2。由表 2 中的数据，根据式 (2) 可得采样频率至少为 1 556 Hz，根据式 (9) 可得采样频率至少为 840 Hz，两者取较大值，则采样频率至少为 1 556 Hz。为便于信号处理分析，通常取最接近该值的 2 的  $m$  ( $m$  为正整数) 次方幂指数，即 2 048 Hz。考虑到工程计算精度以及试验周期等因素，设定置信度  $(1-\alpha)=0.99$ ，准确度  $(1-\delta)=0.99$ 。查阅表 1 可知，该组合下的样本量  $n=13\ 530$ 。然后由式 (22) 计算可得采样时间至少为 6.61 s，由式 (23) 计算可得采样时间为 2.38 s，两者取较大值，因此采样时间至少为 6.61 s。

表 2 脉动压力低速风洞试验参数

Tab.2 Fluctuating pressure low-speed wind tunnel test parameters

序号	参数名称	参数数值
1	风洞吹风速度	70 m/s
2	相邻测点最小间距	45 mm
3	尺寸比	0.1
4	速度比	0.42
5	截止频率	100 Hz
6	频率分辨率	0.1 Hz

### 3.2 案例二

某次脉动压力高速风洞试验前规划的已知参数见表 3。由表 3 中的数据，根据式 (2) 可得采样频率至少为 6 737 Hz，根据式 (9) 可得采样频率至少为 6 000 Hz，两者取较大值，则采样频率至少为 6 737 Hz。为便于信号处理分析，通常取最接近该值的 2 的  $m$  ( $m$  为正整数) 次方幂指数，即 8 192 Hz。考虑到工程计算精度以及试验周期等因素，设定置信

度  $(1-\alpha) = 0.99$ ，准确度  $(1-\delta) = 0.99$ ，查阅表 1 可知，该组合下的样本量  $n=13\ 530$ 。然后由式 (22) 计算可得采样时间至少为 1.65 s，由式 (23) 计算可得采样时间为 1 s，两者取较大值，因此采样时间至少为 1.65 s。脉动压力风洞试验实施时，设置采样时间为 3 s。受脉动压力传感器及采集设备限制，实际采样频率设置为 5 000 Hz。

表 3 脉动压力高速风洞试验参数

Tab.3 Fluctuating pressure high-speed wind tunnel test parameters

序号	参数名称	参数数值
1	风洞吹风速度	256 m/s
2	相邻测点最小间距	38 mm
3	尺寸比	0.1
4	速度比	1
5	截止频率	300 Hz
6	频率分辨率	0.1 Hz

## 4 实施效果

### 4.1 案例一

根据表 2 所示的试验参数，及其 3.1 节确定的采样频率  $f_s=2\ 048$  Hz 和采样时间  $t_s=8$  s，进行了飞机典型结构的脉动压力风洞试验。模型上某个测点的脉动压力功率谱密度 (PSD) 如图 3 所示。

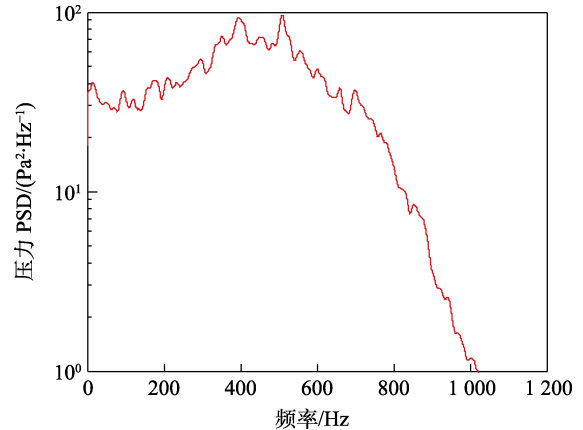


图 3 模型测点的脉动压力功率谱密度

Fig.3 Fluctuating pressure PSD of model measurement point

将图 3 横轴频率数据除以频率相似比 (数值为 4.2)，纵轴压力 PSD 数据除以功率谱密度相似比 (数值为 0.232)，可得原型相应部位的脉动压力功率谱密度。经相似换算后，原型上对应位置的脉动压力 PSD 如图 4 所示。可见，脉动压力的截止频率约为 240 Hz，能够覆盖原型结构的截止频率 100 Hz，频率分辨率为 0.03 Hz，满足振动响应计算需求。这表明所提的采样参数确定方法可行有效。

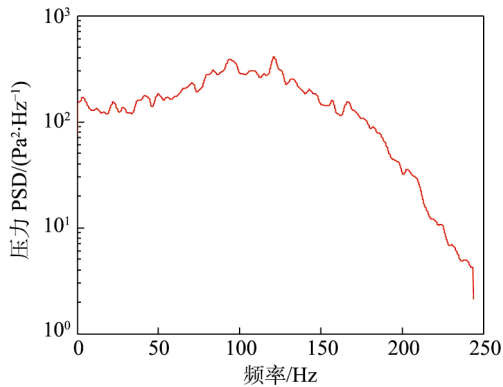


图 4 相似换算的原型脉动压力功率谱密度  
Fig.4 Fluctuating pressure PSD of full scale prototype

## 4.2 案例二

根据表 3 所示的试验参数, 及其 3.2 节确定的采样频率  $f_s=5\ 000\ \text{Hz}$  和采样时间  $t_s=3\ \text{s}$ , 进行了飞机典型结构的脉动压力高速风洞试验。模型上某个测点的脉动压力 PSD 如图 5 所示。

将图 5 所示曲线的横轴数值除以频率相似比(数值为 10), 纵轴压力 PSD 数据除以功率谱密度相似比(数值为 0.015), 可得原型相应部位的动态压力功率谱密度。经相似换算后, 原型上对应位置的脉动压力 PSD 如图 6 所示。可见, 脉动压力的

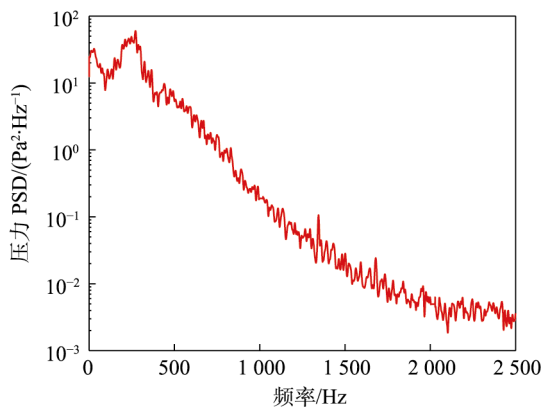


图 5 模型测点的脉动压力功率谱密度  
Fig.5 Fluctuating pressure PSD of model measurement point

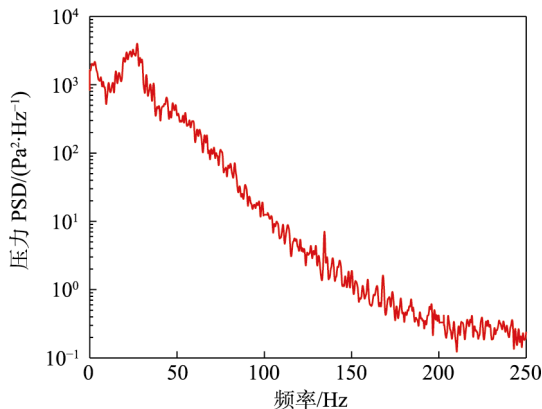


图 6 相似换算的原型脉动压力功率谱密度  
Fig.6 Fluctuating pressure PSD of full scale prototype

截止频率为 250 Hz, 不满足截止频率 300 Hz 的要求。由此可知, 原先设置的采样频率 5 000 Hz 是不合适的, 应提高采样频率。这也从侧面印证所提采样参数确定方法的有效性。

## 5 结语

提出了一种确定脉动压力风洞试验采样参数的方法。综合考虑时间延迟效应、振动响应截止频率和动态信号采样定理要求, 建立了采样频率的确定公式。综合设计及特定置信度和准确度对样本量的需求和振动响应频率分辨率的要求, 建立了采样时间的确定公式, 建立了脉动压力风洞试验中信号采样频率和采样时间的确定流程。以飞机典型结构脉动压力风洞试验为例, 给出了采样参数确定的具体案例, 验证了所提方法的可行性和有效性。该信号采样参数确定方法从理论上量化了采样频率和采样时间, 实施过程简便, 对脉动压力风洞试验设计具有指导意义。

## 参考文献:

- [1] 王海峰, 展京霞, 陈科, 等. 战斗机大迎角气动特性研究技术的发展与应用[J]. 空气动力学学报, 2022, 40(1): 1-25.  
WANG H F, ZHAN J X, CHEN K, et al. Development and Application of Aerodynamic Research Technologies for Fighters at High Angle of Attack[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2022, 40(1): 1-25.
- [2] HEALEY M. F/a-18 E/F Vertical Tail Buffet, Design, Analysis and Test[C]// 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Virginia: AIAA, 2003.
- [3] PATEL S, BLACK C, ANDERSON W, et al. F/a-22 Vertical Tail Buffet Strength Certification[C]// 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Virginia: AIAA, 2005.
- [4] POTOTZKY A, MOSES R. An Analysis Method to Predict Tail Buffet Loads of Fighter Aircraft[C]// 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Virginia: AIAA, 2005.
- [5] 金伟, 杨智春, 孟德虹, 等. 先进战斗机全动 V 尾抖振动强度设计与验证[J]. 航空学报, 2020, 41(6): 523473.  
JIN W, YANG Z C, MENG D H, et al. Strength Design and Test of Advanced Fighter All-Moving Twin V-Tail Buffet[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(6): 523473.
- [6] SCHUSTER D, EDWARDS J, BENNETT R. An Overview of Unsteady Pressure Measurements in the Transonic Dynamics Tunnel[C]// 41st Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit. Virginia: AIAA, 2000.
- [7] 陈震宇, 刘洋, 徐亮. 某型民机低速巡航构型平尾抖振特性风洞试验研究[J]. 实验流体力学, 2021, 35(6):

- 94-99.  
CHEN Z Y, LIU Y, XU L. Wind Tunnel Test Investigation on Buffeting Characteristics of Horizontal Tail of Commercial Aircraft in Low-Speed Cruise Configuration[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2021, 35(6): 94-99.
- [8] LEE B H K. Statistical Analysis of Wing/Fin Buffeting Response[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2002, 38(4/5): 305-345.
- [9] 李斌, 张玉杰, 杨智春. 确定飞机最大抖振设计载荷的长期极值估计方法[J]. 振动与冲击, 2012, 31(14): 1-6.  
LI B, ZHANG Y J, YANG Z C. Long-Term Extreme Value Estimation Method to Determine Maximum Buffet Design Loads[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(14): 1-6.
- [10] 潘罗平. 水轮机压力脉动试验方法的研究[J]. 水力发电学报, 2003, 22(3): 107-113.  
PAN L P. A Study on the Testing Method of Pressure Fluctuation[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2003, 22(3): 107-113.
- [11] 潘罗平. 水轮机压力脉动试验方法的研究[J]. 水力发电学报, 2003, 22(3): 107-113.  
PAN L P. A Study on the Testing Method of Pressure Fluctuation[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2003, 22(3): 107-113.
- [12] 田锋社. 水轮机压力脉动测试方法的研究与讨论[J]. 噪声与振动控制, 2006, 26(4): 111-113.  
TIAN F S. Study on the Testing Method of Pressure Fluctuation of the Water Turbine[J]. Noise and Vibration Control, 2006, 26(4): 111-113.
- [13] 张飞, 徐静, 王小军, 等. 原型水泵水轮机压力脉动测量中的几个问题[J]. 大电机技术, 2018(1): 75-80.  
ZHANG F, XU J, WANG X J, et al. Several Problems on Pressure Pulsation Measurements of Hydraulic Prototype Pump-Turbine[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2018(1): 75-80.
- [14] MOSES R, ASHLEY H. Spatial Characteristics of the Unsteady Differential Pressures on 16 Percent F/a-18 Vertical Tails[C]// 36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Virginia: AIAA, 1998.
- [15] ZIMMERMAN N, FERMAN M, YURKOVICH R, et al. Prediction of Tail Buffet Loads for Design Application[C]// 30th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Virginia: AIAA, 1989.
- [16] ANDERSON W, PATEL S, BLACK C. F/a-22 High Angle of Attack Buffet - Test Adequacy Analysis[C]// 22nd Applied Aerodynamics Conference and Exhibit. Virginia: AIAA, 2004.
- [17] 韦俊. 概率论与数理统计[M]. 南京: 东南大学出版社, 2011.  
WEI J. Probability and Mathematical Statistics[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2011.