

某型航空发动机振动环境统计

赵帅帅¹, 陈立伟¹, 彭康¹, 杨博¹, 吴红²

(1. 北京强度环境研究所, 北京 100076; 2. 天津航天瑞莱科技有限公司, 天津 300462)

摘要: 目的 研究某型航空发动机振动应力测量数据PSD在整个频率带宽内不完全服从对数正态分布情况下的振动环境统计方法。方法 在对数据进行对数正态分布检验的基础上,采用一种将正态容差限和非参数上限统计方法相结合的方法。结果 该方法的振动环境统计结果介于传统单独采用正态容差限或非参数上限之间。结论 对比结果表明,该方法用于确定航空发动机的振动环境条件合理可行。

关键词: 航空发动机; 环境统计; 正态容差限; 非参数上限

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.01.005

中图分类号: TJ86; V216.5 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)01-0020-05

Statistical Estimation of Vibration Environment for a Certain Aero-engine

ZHAO Shuai-shuai¹, CHEN Li-wei¹, PENG Kang¹, YANG Bo¹, WU Hong²

(1. Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China;

2. Tianjin Relia Technology Co., Ltd., Tianjin 300462, China)

ABSTRACT: Objective The statistical estimation method of vibration environment was studied, which was applied to the condition that the vibration data PSD of aero-engine obeyed lognormal distribution incompletely in the whole frequency bandwidth. **Methods** Based on the lognormal distribution test of the vibration data, a method was used combining normal tolerance limits and non-parameter upper limits. **Results** The results of this method were between the traditional normal tolerance limits and the non-parameter upper limits. **Conclusion** The comparison results showed that this method was reasonable and feasible for determining the vibration environment for aero-engine.

KEY WORDS: aero-engine; statistical estimation; normal tolerance limits; non-parameter upper limits

振动环境是航空发动机最恶劣的工作环境之一,振动导致发动机发生故障的例子不少,如油管振动破裂等。因此,航空发动机在研制过程中需要进行振动环境试验,但振动环境条件制定得正确与否,将直接影响试验的科学性和有效性,同时对航

空发动机的可靠性、研制进度和成本都会有影响。目前,航空发动机及附近区域振动环境试验条件制定主要是以 GJB 150.16—86 和 HB 5830.5—1984 为依据的^[1-2],但这些试验条件没有考虑发动机不同转速诱发振动环境存在差异这一实际问题,并不能模

收稿日期: 2014-11-08; 修订日期: 2014-12-18

Received: 2014-11-08; Revised: 2014-12-18

作者简介: 赵帅帅(1987—),男,河南新乡人,硕士,工程师,主要研究方向为可靠性与环境试验。

Biography: ZHAO Shuai-shuai(1987—), Male, from Xinxiang, Henan, Master, Engineer. Research focus: reliability and environmental test.

拟实际振动环境^[3]。

随着装备研制和标准发展的需求,均优先采用实测数据来进行振动环境试验,因此,实测数据的归纳处理方法是决定振动环境模拟试验是否反映实际振动环境的关键。HB/Z 87—84和GB 10593—90采用极值包络法,对实测数据进行统计处理^[4-5]。GJB/Z 126—99假设实测数据服从正态分布,给出了按一定置信度和包含数据百分位点来统计实测数据的方法^[6]。MIL-STD-1540C, NASA-STD-7001和NASA-HDBK-7005推荐采用对数正态分布假设的正态容差限,用于验收试验。最高期望环境谱值是指该值在95%次飞行中,用50%置信度估计不会被超过^[7-9]。MIL-STD-810F推荐:当数据量足够大(≥ 7)时,采用自由分布容差限;数据量不是足够大时,采用正态容差限确定最高期望环境值^[10]。另外NASA-HDBK-7005和MIL-STD-810F指出数据量大于10时,经验容差限可分别替代正态容差限和自由分布容差限。中国运载火箭技术研究院标准Q/Y 216—2007推荐采用对数正态分布假设统计估计和无参数上限估计两种方法:子样数大于13时,采用对数正态分布假设统计估计;子样数小于13时,采用无参数上限估计^[11]。HB/Z 87—84和GB 10593—90中极值包络法和Q/Y 216—2007中无参数上限估计与NASA-HDBK-7005中给出的包络限相同;Q/Y 216—2007中的对数正态分布假设统计估计与正态容差限相同;GJB/Z 126—99中的统计容差法与正态容差限相似,但GJB/Z 126—99在给定置信度和给定概率下给出的容差上限系数存在偏差^[12]。因此,国内外标准中常用振动环境统计方法可以总结为依赖于对数正态分布假设的正态容差限和不依赖于正态分布假设的非参数上限,其中,非参数上限包括包络限、自由分布容差限和经验容差限。

某型航空发动机振动环境统计,对于振动应力测量数据PSD在整个频率带宽内并不完全服从对数正态分布的情况,若直接采用依赖于对数正态分布假设的正态容差限进行环境统计会引起一定偏差;若采用不依赖于正态分布假设的非参数上限进行环境统计,结果又偏保守。为了解决这一工程实际问题,文中采用一种将正态容差限和非参数上限统计方法相结合的方法。该方法首先对各个频率分辨率带宽内的PSD数据进行对数正态分布检验,如果服从对数正态分布,则采用正态容差限进行统计;如果不服从对数正态分布,则选择一种非参数上限进行统计,最后得到整个频率带宽内的PSD数据,作为振

动环境统计结果。工程实例证明,该方法计算结果合理,计算过程较为简便,适宜工程应用。

1 振动环境统计方法

振动环境统计过程中,首先需要根据不同工作状态和结构类型等划分不同的区域。区域划分是把结构分成若干不同区域,使每个区域内的点具有相对一致的结构响应,且要求所选择的区域与制定设计或试验条件所关心的结构区间相一致。对于给定一个区域,设共有 n 个测量点,第 i 个测量点在第 j 个频率分辨率带宽内的PSD数据记为 $x_{ij}(i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$ 。

1.1 方法流程

振动环境统计方法流程如图1所示,步骤如下:

- 1) 采用SHAPIRO-WILK检验,对第 j 个频率分辨率带宽内的数据进行对数正态分布检验;
- 2) 若 x_{ij} 服从对数正态分布,采用正态容差限,作为振动环境统计上限值;
- 3) 若 x_{ij} 不服从对数正态分布,选择一种非参数上限,作为振动环境统计上限值;
- 4) 重复步骤1)~3),得到整个频率带宽内的振动环境统计上限曲线。

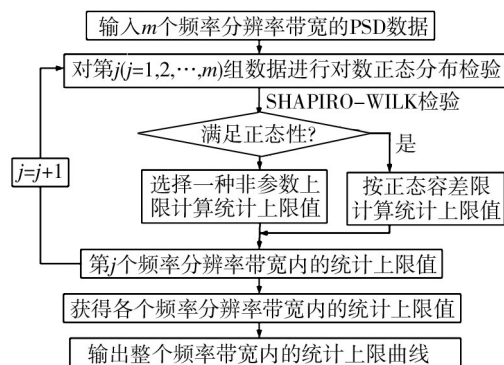


图1 振动环境统计方法流程

Fig.1 The flowchart of estimation method of vibration environment

1.2 计算过程

1.2.1 SHAPIRO-WILK 检验

SHAPIRO-WILK 检验已经被列入GB 4882—2001^[13]。

对第 j 个频率分辨率带宽内的PSD数据 $x_{ij}(i=1, 2, \dots, n)$ 作对数变换。

$$y_{ij} = \lg x_{ij} \quad (1)$$

将 y_{ij} 作非降次序排列:

$$y_{(1)j} \leq y_{(2)j} \leq \cdots \leq y_{(n)j}$$

建立假设 H_0 : 样本 $y_{(1)j}, y_{(2)j}, \cdots, y_{(n)j}$ 来自正态分布, 检验此假设的SHAPIRO-WILK统计量为:

$$W = \frac{\left\{ \sum_{i=1}^{[n/2]} a_i [y_{(n+1-i)j} - y_{(i)j}] \right\}^2}{\sum_{i=1}^n (y_{(1)j} - \bar{y}_j)} \quad (2)$$

式中: $\bar{y}_j$ 为均值,按式(3)给出:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{ij} \quad (3)$$

在显著性水平下 $\alpha=p$,如果统计量的值小于其 p 分位数($p=\alpha$),则拒绝 H_0 假设。GB 4882—2001给出了统计量 W 在 $p=\alpha=0.01$ 和 $p=\alpha=0.05$ 时的分位数。

1.2.2 正态容差限

y_j 的正态容差限标记为 $NTL_{y_j}(n, \beta, \gamma)$,它定义的值超过 y_j 所有可能值的 β 部分的置信度为 γ 。则有:

$$NTL_{y_j} = \bar{y}_j + k_{n,\beta,\gamma} s_{y_j} \quad (4)$$

式中: $k_{n,\beta,\gamma}$ 为正态容差系数,是与 n, β, γ 有关的值,其值见文献[14—15]; s_{y_j} 为标准偏差,按式(5)给出:

$$s_{y_j} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_j)^2} \quad (5)$$

未经变换的原工程单位的正态容差限可表示为:

$$NTL_{x_j}(n, \beta, \gamma) = 10^{NTL_{y_j}(n, \beta, \gamma)} \quad (6)$$

1.2.3 包络限

x_j 的包络限标记为 ENV_{x_j} ,它定义的值 x_j 所有可能值的最大值。则有

$$ENV_{x_j} = \max \{x_{1j}, x_{2j}, \cdots, x_{nj}\} \quad (7)$$

1.2.4 自由分布容差限

x_j 的自由分布容差限标记为 $DFL_{x_j}(n, \beta, \gamma)$,它定义的值超过 x_j 所有可能值 β 部分的置信度为 γ 。则有

$$DFL_{x_j}(n, \beta, \gamma) = x_{hj}; \gamma = 1 - \beta^n \quad (8)$$

式中: x_{hj} 可以通过次序统计确定,见文献[16]。

1.2.5 经验容差限

经验容差限利用原始样本值,并假设估计集由在 m 个频率分辨率带宽上的 n 个测量点,总共有 nm 个估计值组成,即:

$$\{x_{11}, x_{12}, \cdots, x_{1m}; x_{21}, x_{22}, \cdots, x_{2m}; x_{n1}, x_{n2}, \cdots, x_{nm}\}$$

$\bar{x}_j$ 是在 n 个测量点上,第 j 个频率分辨率带宽上

的平均估计,见式(9):

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij} \quad (9)$$

$\bar{x}_j$ 用来构造每个频率分辨率带宽上获得的归一化估计集,即:

$$\{\mu\} = \{\mu_{11}, \mu_{12}, \cdots, \mu_{1m}; \mu_{21}, \mu_{22}, \cdots, \mu_{2m}; \mu_{n1}, \mu_{n2}, \cdots, \mu_{nm}\}$$

其中, $\mu_{ij} = x_{ij} \sqrt{x_j}$ 。

归一化的估计集 $\{\mu\}$ 是按从小到大排序的,且 $\mu_{\beta} = \mu_{(k)}$,其中 $0 < \beta = k/nm \leq 1$,是估计集 $\{\mu\}$ 中的第 k 个有序元素。对于每个频率分辨率带宽,有:

$$ETL_{x_j}(\beta) = \mu_{\beta} \bar{x}_j \quad (10)$$

用 x_j 表示在第 j 个频率分辨率带宽上,值以50%的置信度超过这一值有100 $\beta\%$ 个。

2 某型航空发动机振动环境统计

某型航空发动机地面试车,根据发动机的不同转速分成不同的试车状态。在相同的试车状态下,根据发动机机载设备机械环境设计要求中的规定分成不同的区域。在给定的区域中,布置一定数量的加速度传感器监测其加速度响应。对实测振动信号进行一系列的数据处理后,得到一定频率带宽内的PSD数据。

按文中方法进行一定状态下一定区域的振动环境统计,首先对各个频率分辨率带宽内的PSD数据进行对数正态分布检验,如果服从对数正态分布,采用正态容差限的方法给出统计上限值;如果不服从对数正态分布,采用非参数上限的方法给出统计上限值,最后得到此状态下此区域的振动环境统计上限曲线。为了对比该方法与单独采用正态容差限或非参数上限方法的区别,选取发动机试车过程中4组数据进行计算。4组数据的统计上限均方根值见表1,功率谱密度及统计上限曲线如图2所示。

表1 统计上限曲线均方根值对比

Table 1 Grms comparison of statistical upper limits curves

数据	测点数量	正态容差限	Grms非参数上限	文中方法
第1组	16	0.9162	0.5276	0.5796
第2组	16	0.8728	0.5582	0.8126
第3组	16	4.9869	2.6864	3.7516
第4组	12	20.5224	14.6916	20.3470

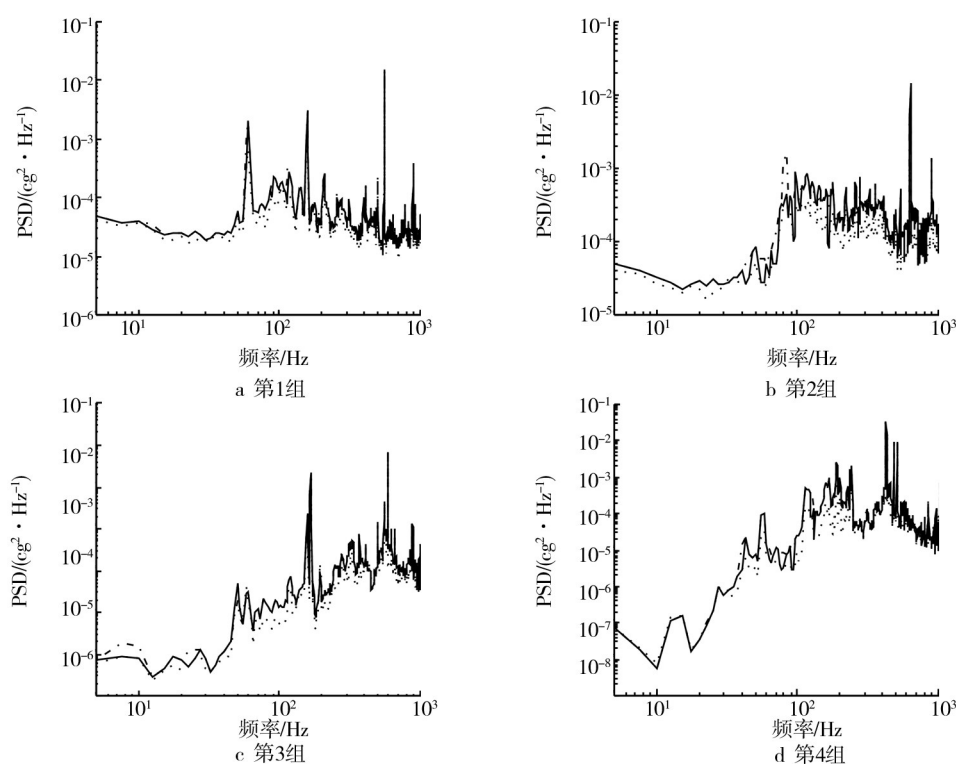


图2 统计上限曲线

Fig.2 Statistical upper limits curves

由表1和图2可知,该方法得到的振动环境统计上限值在大部分频率分辨率带宽内(相对于整个频率带宽)与正态容差限一致,说明大部分频率分辨率带宽内的PSD数据服从对数正态分布,直接采用正态容差限是合理的。在小部分频率分辨率带宽内PSD数据不服从对数正态分布,直接采用正态容差限所引起的偏差是不容忽视的。在整个频率带宽内直接采用非参数上限,没有估计数据的分散性,结果趋于保守。采用将两者相结合的方法,合理可行。

3 结论

针对某型航空发动机振动应力测量数据PSD在整个频率带宽内不完全服从对数正态分布的情况,文中采用了一种基于正态容差限和非参数上限的振动环境统计方法。与单独采用正态容差限或非参数上限的对比结果表明,该方法更能真实反映航空发动机的振动环境条件。结合我国航空发动机对振动环境统计的发展要求和技术现状,有以下几点结论和建议。

1) 对实测振动数据进行对数正态分布假设检验,对于服从对数正态分布的频率分辨率带宽,推荐采用正态容差限的方法进行振动环境统计。

2) 对于不服从对数正态分布的频率分辨率带宽,直接采用正态容差限的方法所引起的偏差是不容忽视的,推荐选择一种非参数上限的方法。

3) 航空发动机实测数据比较珍贵,建议对现有试验数据建立数据库,为相似预研型号的环境条件制定提供较准确的依据。

参考文献:

- [1] GJB 150.16, 军用设备环境试验方法 振动试验[S]. GJB150.16, Environmental Test Methods for Military Equipments-Vibration Test[S].
- [2] HB 5830.5—1984, 机载设备环境条件及试验方法[S]. HB 5830.5—1984, Environmental Conditions and Test Methods for Airborne Equipments[S].
- [3] 王桂华, 刘海年, 张大义, 等. 航空发动机成附件振动环境试验剖面确定方法研究[J]. 推进技术, 2013, 34(8): 1101—1107. WANG Gui-hua, LIU Hai-nian, ZHANG Da-yi, et al. Study on Formulating Method for Vibration Environment Test Profiles of Aero-Engine Accessories[J]. Journal of Propulsion Technology, 2013, 34(8): 1101—1107.
- [4] HB/Z 87—84, 飞机飞行振动环境测量数据的归纳方法[S]. HB/Z 87—84, The Inductive Methods for Environmental

- Measured Data of Aircraft Flying[S].
- [5] GB 10593.3—90, 电工电子产品环境参数测量方法 振动数据处理和归纳方法[S].
GB 10593.3—90, The Measure Methods for Environmental Parameters of Electronic-electrical Products the Inductive Methods for Vibration Data[S].
- [6] GJB/Z 126—99, 振动、冲击环境测量数据归纳方法[S].
GJB/Z 126—99, The Inductive Methods for Environmental Measured Data of Vibration and Shock[S].
- [7] MIL-STD-1540C, Tests Requirements for Launch, Upper-Stage, and Space Vehicles[S].
- [8] MIL-STD-7001, Payload Vibroacoustic Test Criteria[S].
- [9] NASA-HDBK-7005, Dynamic Environmental Criteria[S].
- [10] MIL-STD-810F, Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests[S].
- [11] Q/Y 216—2007, 运载火箭力学环境条件设计规范[S].
Q/Y 216—2007, Design Specifications for Rocket Mechanical Environmental Conditions[S].
- [12] 袁宏杰, 罗敏, 姜同敏. 随机振动环境测量数据归纳方法研究[J]. 航空学报, 2007, 28(1): 115—117.
YUAN Hong-jie, LUO Min, JIANG Tong-min. Study on Inductive Method for Environmental Measured Data of Random Vibration[J]. Aeronautics Journal, 2007, 28(1): 115—117.
- [13] GB 4882—2001, 数据的统计处理和解释 正态性检验[S].
GB 4882—2001, Statistical Interpretation of Data-Normal Tests[S].
- [14] BOWKER A H, LIEBERMAN, G J. Engineering Statistics (2nd edit) [M]. Enfieldwood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1972: 314—325.
- [15] OWEN, DB. Factors for One-sided Tolerance Limits and for Variables Sampling Plans[M]. Albuquerque, NM: Sandia Corp, 1963.
- [16] GUTTMAN I, WILKS S S, HUNTER J S. Introductory Engineering Statistics, 3rd ed., p.311, Wiley, NY, 1982: 46—50.



(上接第5页)

- Corrosion and Controlling of GECM and Metals in Atmospheric Environment[J]. Materials Protection, 2002, 35(12): 19—22.
- [9] CUI F, PRESUEL-MORENO F J, KELLY R G. Computational Modeling of Cathodic Limitations on Localized Corrosion of Wetted SS 316L at Room Temperature[J]. Corrosion Science, 2005, 47(12): 2987—3005.
- [10] FU J W. Galvanic Corrosion Prediction and Experiments Assisted by Numerical Analysis[J]. Galvanic Corrosion, ASTM STP, 1988, 978: 79—85.
- [11] JIA J X, SONG G, ATRENS A. Experimental Measurement and Computer Simulation of Galvanic Corrosion of Magnesium Coupled to Steel[J]. Advanced Engineering Materials, 2007, 9(1-2): 65—74.
- [12] LEE J M. Numerical Analysis of Galvanic Corrosion of Zn/Fe Interface Beneath a Thin Electrolyte[J]. Electrochimica Acta, 2006, 51(16): 3256—3260.
- [13] MUNN R S. A Mathematical Model for a Galvanic Anode Cathodic Protection System[J]. R. S. Munn, Naval Underwater Systems Center, New London Laboratory, New London, CT. Materials Performance, 1982, 21(8).
- [14] MURER N, OLTRA R, VUILLEMIN B, et al. Numerical Modelling of the Galvanic Coupling in Aluminium Alloys: A Discussion on the Application of Local Probe Techniques [J]. Corrosion Science, 2010, 52(1): 130—139.
- [15] PALANI S, HACK T, DECONINCK J, et al. Validation of Predictive Model for Galvanic Corrosion under Thin Electrolyte Layers: An Application to Aluminium 2024-CFRP Material Combination[J]. Corrosion Science, 2014, 78: 89—100.
- [16] VERBRUGGE M. Galvanic Corrosion over a Semi-infinite, Planar Surface[J]. Corrosion Science, 2006, 48(11): 3489—3512.
- [17] 王玲, 宣卫芳, 牟献良. 2A11 铝合金-碳钢偶接件在强化自然环境条件下的腐蚀特性[J]. 表面技术, 2011, 40(5): 1—4.
WANG Ling, XUAN Wei-fang, MU Xian-liang. Corrosion Performance of 2A11 Aluminium Alloy Coupled With Carbon Steel in Accelerated Natural Environmental Condition [J]. Surface Technology, 2011, 40(5): 1—4.
- [18] TH BAULT F, VUILLEMINA B, OLTRA R, et al. Modeling Bimetallic Corrosion under Thin Electrolyte Films[J]. Corrosion Science, 2011, 53(1): 201—207.
- [19] ASTM, Standard Practice for Conducting the Washer Test for Atmospheric Galvanic Corrosion[R]. 1997.
- [20] CAO Chu-nan. Principles of electrochemistry of corrosion [M]. Beijing: Beijing Industrial, 2008.
- [21] LIU Yan-jie, WANG Zhen-yao, KE Wei. Corrosion Behavior of 2024-T3 Aluminum Alloy in Simulated Marine Atmospheric Environment[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(5): 1208—1215.