

航空发动机振动环境谱统计归纳方法 及振动试验台复现

房剑锋

(中国飞行试验研究院, 西安 710089)

摘要: 为满足航空发动机及机载产品研制过程贴近使用环境的振动考核试验需求, 需根据发动机实测振动数据给出振动考核试验所需的输入谱图。依据 GJB/Z 126-99 中给出的环境测量数据归纳方法, 建立了发动机实测振动环境谱统计归纳方法并通过程序实现。利用发动机多架次实测试飞振动数据统计归纳得到发动机测点位置的振动实测谱。基于能量等效及信号频域特征分布一致原则, 将归纳得到的实测谱转化为可用于振动台输入的振动环境谱, 并在振动台上进行了振动信号的复现试验。结果表明: 振动台输出信号与发动机实测振动信号频域分布特征一致, 在统计频率带宽范围内振动总量最大相差 5.7%, 证明了转化方法是合理的, 为航空发动机机载设备贴近使用环境的振动考核试验方法提供了真实的输入谱图。

关键词: 振动数据; 统计归纳; 环境谱; 振动试验台; 复现; 航空发动机

中图分类号: V216.2+1; V231.92

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2024.02.022

Aeroengine Vibration Environment Spectrum Statistical Induction and Reproduction on Vibration Testing Table

FANG Jian-feng

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: To meet the requirements of conducting vibration assessment tests under conditions close to the operating environment for the development of aeroengine and airborne products, it is necessary to provide the input spectrum required for the vibration assessment test based on the measured engine vibration data. Based on the induction method of environment measurement data provided in GJB/Z 126-99, a statistical induction method for vibration environment spectra measured engine vibration data was established and implemented through a program. The measured vibration spectra at engine measuring positions were obtained by statistical induction according to vibration data from multiple actual test flights. Based on the principle of energy equivalence and consistent distribution of signal frequency domain characteristics, the spectra obtained using the induction method were converted into vibration environment spectra which can be used as the input for the vibration testing tables, and experiments for vibration signal reproduction were conducted on vibration testing tables. The results show that the frequency domain distribution characteristics of the output signal of the vibration testing table are consistent with that of the measured engine vibration signal. The maximum difference in the overall vibration within the statistical frequency bandwidth is 5.7%, which proves the rationality of the conversion method and the capability of providing real input spectra for vibration assessment tests of aeroengine airborne equipment under conditions close to the service environment.

Key words: vibration data; statistical induction; environment spectrum; vibration testing table; reproduction; aeroengine

0 引言

在航空发动机试飞过程中振动信号的测量具有重要意义, 一方面可用于发动机整机振动特性的确定, 定位发动机整机振动故障^[1], 70% 以上的故障都以

振动的形式表现出来; 另一方面可通过试飞测试数据获取发动机的整机振动环境, 为机载设备振动考核试验提供真实的试飞数据谱图。在机载设备研制过程中的振动考核试验标准^[2]指出“应尽可能用实测数据和装备实际寿命周期的持续时间来制定装备试验条

收稿日期: 2021-09-11 基金项目: 航空动力基础研究项目资助

作者简介: 房剑锋(1980), 男, 硕士, 高级工程师。

引用格式: 房剑锋. 航空发动机振动环境谱统计归纳方法及振动试验台复现[J]. 航空发动机, 2024, 50(2): 159-163. FANG Jianfeng. Aeroengine vibration environment spectrum statistical induction and reproduction on vibration testing table[J]. Aeroengine, 2024, 50(2): 159-163.

件,也可以用已有数据库数据代替实测数据”。航空发动机测量靶作为一种机载产品,用于测量飞机进气道及发动机流道流场分布^[3]。在研制过程中需开展振动考核试验,目前在振动试验过程中依据试验标准^[2]推荐的振动环境谱开展相关考核试验,在新的装备试验鉴定体系下需开展贴近使用环境的考核方法,而振动环境谱的编制作作为考核试验的前提具有重要意义。

实测振动数据不能直接用于振动试验过程中,需将其进行统计归纳,得到其频域、幅值分布特征信息后用于试验中。实测振动环境谱有多种归纳方法,包括极值包络法^[4-6]、统计容差法^[7-8]等。GB 10593.3^[5]采用极值包络法进行归纳统计,无需繁杂的计算处理及理论基础,简单明了,但未考虑数据样本数量及分布特性,不能精确评估具体固有频率上振动数值的大小。GJB/Z 126^[8]、MIL-STD-810F^[9]等标准都推荐采用统计容差法进行振动环境归纳,是从传统的上限包络法到统计概念归纳方法的突破。为便于工程运用,归纳后的实测谱仍需简化,且保留足够的裕度。

王桂华等^[10]、刘海年等^[11]发展和完善了基于环境测试数据的振动环境试验剖面确定方法;张涛^[12]对振动台功率谱复现控制算法进行在线修正,提出了一种功率谱复现迭代算法,并进行了功率谱复现仿真。在机载设备振动环境试验考核方面,目前国内大多采用GJB推荐的相关振动环境谱开展试验,没有获得设备实际使用环境下的振动数据。而对基于实测环境谱的振动环境谱的简化和振动台复现方法研究较少。

本文建立了发动机振动环境实测谱统计归纳方法及流程,将实测谱转化为可用于振动台输入的振动环境谱,并在振动试验台进行了振动信号复现。

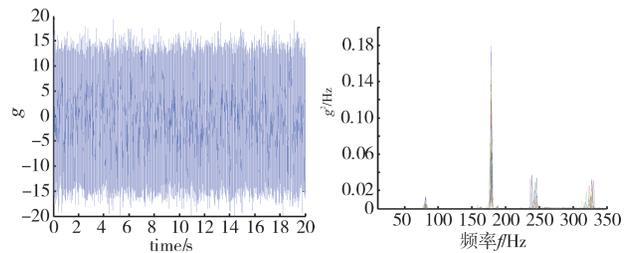
1 振动环境谱统计归纳方法

随机振动环境下的实测谱归纳目前已有相应的国家军用标准和航空标准,数据归纳方法较多,如极值包络法等,这些方法不仅归纳过程相对复杂而且依靠人为给定置信度,这将影响随机振动环境实测数据归纳谱结果的准确性,给结果带来一定的偏差。

MIL-STD-810H^[13]和GJB/Z 126-99都提出在振动环境实测数据处理中采用统计容差法,其是振动环境实测数据归纳方法从使用传统上的极值包络法到运用统计概念归纳法的突破,通过基于GJB/Z 126-99中的统计容差法建立数据归纳方法,并完成相应归纳程

序的开发,以实现随机振动实测数据的快速准确归纳。

数据处理前需对振动数据的平稳性、各态历经性、周期性和正态性等基本特性进行检验,确认待归纳的振动数据为各态历经随机信号。采用柯立—杜开(Cooley-Tukey)方法^[14],对原始振动数据直接快速傅里叶变换得到加速度功率谱密度,根据发动机测点位置振动数据及处理得到的加速度功率谱密度数据如图1所示。



(a) 发动机测点位置振动 (b) 发动机测点功率谱密度

图1 发动机测点位置振动数据及功率谱密度

实测谱归纳的基础是对某通道多个架次样本进行功率谱(Power Spectral Density, PSD)分析,将分析结果按照谱线、功率谱值存入数据文件,随机振动数据归纳流程如图2所示。

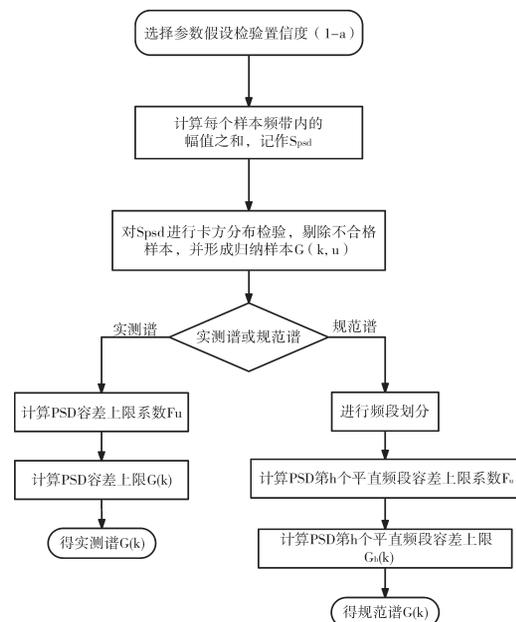


图2 随机振动数据归纳流程

随后对通道样本 $G(k, u)$ (k 为谱线数, u 为样本数) 做变换, 得到服从近似正态分布的样本 $x(k, u)$

$$x(k, u) = \sqrt{G(k, u)} \quad (1)$$

对样本 $x(k, u)$ 进行均值和方差估计, 得到

$$\begin{cases} \bar{X}(k) = \frac{1}{U} \sum_{u=1}^U x(k,u) \\ S^2(k) = \frac{1}{U-1} \sum_{u=1}^U [x(k,u) - \bar{X}(k)]^2 \end{cases} \quad (2)$$

(k=1, 2, 3, \dots, N)

计算置信度为(1 - \alpha)、分位点为\beta的容限系数F_u

$$F_u = \frac{t_{U-1; (1-\alpha)}}{\sqrt{U}} + Z_\beta \sqrt{\frac{U-1}{\chi_{U-1; \alpha}^2}} \quad (3)$$

式中:Z_\beta为满足Pro[Z \le Z\beta] = \beta的正态分布分位点。

则该样本容差上限由式(1)、(2)、(3)联立得到

$$G(k) = [\bar{X}(k) + F_u S(k)]^2, (u = 1, 2, \dots, U) \quad (4)$$

从而得到该振动测点的实测振动功率谱。

随后进行规范谱的归纳,与实测谱不同,规范谱需要对特征样本G(k,u)相邻谱线对应的x(k,u)进行参数假设检验。对相邻谱线的均值\bar{X}_k(u)和方差S_k^2(u)计算统计

$$\begin{cases} F(k, k+1) = \frac{S_k^2(p)}{S_{k+1}^2(p)} \\ t(k, k+1) = \frac{\bar{X}_k - \bar{X}_{k+1}}{\sqrt{(S_k^2(p) + S_{k+1}^2(p))/v_u}} \end{cases} \quad (5)$$

(k = 1, 2, 3, \dots, N - 1)

如特征样本u中第k条谱线和第k+1条谱线的PSD属于同一总体,则F(k, k+1)服从F(v_u - 1, v_u - 1)的F分布, t(k, k+1)服从t(2v_u - 2)的中心t分布。

如满足式(5)则将相邻第k条谱线和第k+1条谱线归并在同一频段内,设u通道最后形成h_u个频段,记作H_u(c), c = 1, 2, 3, \dots, h_u代表每一个平直频带,设每一平直频带起止频点为sta_c、end_c,谱线数共d_c条,从而任一频段内x(u, v_u)近似服从正态分布;反之,不属于一个频段。

由于频段已经归并,因此上限系数需要根据归并频段内的幅值估算

$$\begin{cases} \bar{X}(k) = \frac{1}{U \cdot d_c} \sum_{u=1}^U \sum_{k=c_{sta}}^{c_{end}} x(k,u) \\ S^2(k) = \frac{1}{U \cdot d_c - 1} \sum_{u=1}^U \sum_{k=c_{sta}}^{c_{end}} [x(k,u) - \bar{X}(k)]^2 \end{cases} \quad (6)$$

计算容差上限系数F(k)

$$F(k) = \frac{t_{U \cdot d_c - 1; (1-\alpha)}}{\sqrt{U \cdot d_c}} + Z_\beta \sqrt{\frac{U \cdot d_c - 1}{\chi_{U \cdot d_c - 1; \alpha}^2}} \quad (7)$$

该振动测点平直段容差上限估计为

$$G(k) = [\bar{X}(k) + F(k)S(k)]^2$$

$$(u = 1, 2, \dots, U; c = 1, 2, 3, \dots, h_u) \quad (8)$$

最终将式中的相邻平直段连起来即得到随机振动规范谱。

2 振动环境的振动台复现技术

利用上述振动环境实测谱和规范谱统计归纳方法,开发相应的算法程序,对发动机进气机匣多架次振动数据进行统计归纳,得到发动机测点位置振动环境实测谱如图3所示。

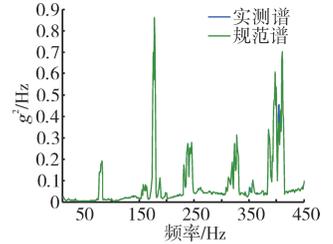


图3 发动机测点位置振动环境实测谱和规范谱

从图中可见,规范谱与实测谱较为接近。这是因为按照GJB/Z 126-99规定的归纳方法,首先对相邻谱线(频率)的样本数据(PSD数据)进行样本假设检验,结果显示相邻谱线的样本数据不满足归并为同一样本的条件,因而没有出现如GJB 150.16A中C.16所示较为规范的发动机振动环境谱。这说明了实际发动机振动环境的复杂性,若直接将该规范谱作为结构件振动考核试验的输入,在振动台上难以实现输入控制。而如何将实测谱及规范谱转换为振动台的控制输入有较大难度。

为此需要将实测振动数据统计归纳得到的实测谱转化为可用于振动台输入的谱图,用于机载设备的振动环境考核试验。

2.1 振动环境试验室复现原则及方法

振动试验台对发动机实际振动环境的复现目的是提供尽可能接近于实际振动环境的试验室振动环境^[15]。在工程应用中,由于振动台模拟能力的限制、振动环境固有的随机性和易变性,导致在试验室振动环境下无法完全复现产品使用过程中所经历的振动环境。实际上完全复现使用过程中的振动环境没有足够的使用价值^[16]。因此振动环境规范和试验条件的制定一般基于适当的等效原则^[16-17],以保证振动环境试验条件能够覆盖产品在预期使用过程中所经历的振动环境,并且具有适当的裕量。

通过实际振动环境归纳得到的实测谱/规范谱代表了测点位置的振动环境,通常从以下几个方面描述其整体振动环境:随机振动的频率范围、随机振动各个频率上的能量值以及随机振动加速度总均方根值(G_{RMS}),其中G_{RMS} = \sqrt{S}, S为功率谱密度曲线与频率f

轴所包围的面积。为了尽可能还原实际振动环境,需从上述3方面对振动台输入谱图进行处理。其中复现的基本原则是基于能量相等原则,即振动台的输入谱和实测谱分别与横坐标轴所包围的面积相等,同时结合GJB 150.16A中C.16给出的涡轮发动机振动环境(如图4所示)与实测谱谱型,确定发动机窄带中心频率。窄带频率对应的幅值则通过对应的窄带频率与频率 f 轴围成的面积占比相等的原则进行确定。

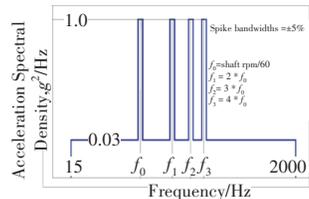
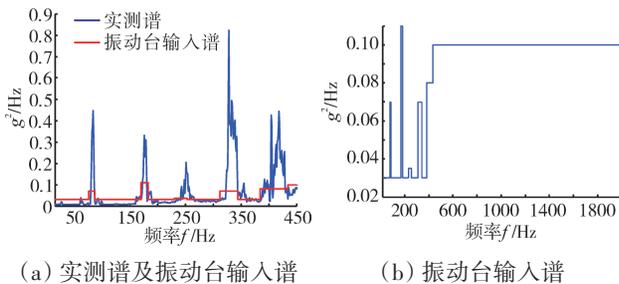


图4 涡轮发动机振动环境

基于统计得到的实测谱/规范谱,按照上述原则确定的用于试验室振动台输入的振动环境谱(如图5所示)能够从频率分布、能量分布及能量值3方面反映实际振动环境的特点,同时谱型简洁,便于试验室振动台输入。



(a) 实测谱及振动台输入谱 (b) 振动台输入谱

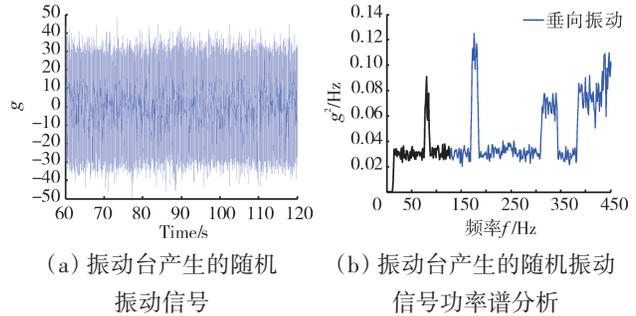
图5 基于实测谱转换得到的用于振动台输入的振动谱

2.2 振动环境振动台复现验证

涡轮发动机振动环境是窄带随机叠加宽带随机振动,在试验室模拟时本质是将1组窄带随机振动分量叠加在宽带随机振动分量上。其中宽带随机振动分量为高斯分布的平稳随机振动过程,通常采用加速度自功率谱密度定义。窄带随机振动分量同样为高斯分布的平稳随机振动过程,分为2种类型:固定频率窄带随机振动分量和窄带扫描随机振动分量。发动机振动环境通常为窄带扫描随机振动分量。

为了验证基于等效原则确定的发动机振动环境输入谱的合理性,在试验室振动台利用电磁式振动台产生的振动台输入谱(图5)对应的输出信号,利用数据采集系统采集试验过程中振动台面的振动加速度信号及分析结果如图6所示。

对振动台产生的振动信号从时域、频率分布与发动机测点位置实测振动数据进行对比分析,振动信号



(a) 振动台产生的随机振动信号 (b) 振动台产生的随机振动信号功率谱分析

图6 振动台产生的振动加速度信号及对应的功率谱

时域峰值包含了发动机实测时域的最大峰值。振动信号的频域成分与实测信号的频域成分保持一致且在统计频率带宽范围内振动总量相等,模拟随机振动信号在统计频率带宽范围内的振动总量与实测谱的振动总量最大相差5.7%,表明基于实测数据的振动台振动环境输入谱转化方法具有合理性和可行性。

在开展发动机进气道测量靶振动考核试验过程中,基于发动机实测振动数据,对发动机常见工作状态(慢车、巡航、最大等)多架次振动数据依据本文给出的统计归纳方法进行处理,将其转化为可用于振动台输入的谱图,并基于文献[18]推荐的试验方法依据不同发动机状态的时间占比统计数据,确定不同振动谱图对应的振动试验时间。

3 结束语

本文基于GJB/Z 126-99环境测量数据归纳方法建立了航空发动机振动数据统计归纳方法及流程,对发动机进气机匣多架次振动数据进行统计归纳得到其实测谱及规范谱,建立了用于振动台输入的环境谱转化方法,在电磁式振动台上开展了振动信号的复现,验证了转化方法的合理性和可行性。为贴近使用环境的发动机机载设备振动环境考核试验提供了基础的环境振动谱。

参考文献:

- [1] 王树兰.某航空发动机振动故障诊断[D].长沙:湖南大学,2011.
WANG Shulan. The vibration fault diagnosis of a aeroenging [D]. Changsha: Human University, 2011. (in Chinese)
- [2] 中国人民解放军总装备部.军用装备实验室环境试验方法(第16部分—振动试验):GJB 150.16A-2009[S].北京:中国人民解放军总装备部,2009,17-18.
General Armament Department of the Chinese People's Liberation Army. Laboratory environment test methods for military materiel (part 16—vibration test): GJB150.16A-2009[S]. Beijing: General Armament Department of the Chinese People's Liberation Army, 2009, 17-18. (in

- Chinese)
- [3] Yuhua A J, Ray R J, Burley R R, et al. Design and development of an F/A-18 inlet distortion rake: a cost and time saving solution [R]. NASA-TM-1995-4722.
- [4] 孙建勇, 姚军, 张建军, 等. 军用飞机平台环境测量数据归纳方法: HB 20237-2014[S]. 北京: 国家国防科技工业局, 2014: 5-17.
SUN Jianyong, YAO Jun, ZHANG Jianjun, et al. Inductive methods for platform environment measured data of military airplane: HB 20237-2014[S]. Beijing: State Administration of Science, Technology and Industry for National Defence, 2014: 5-17. (in Chinese)
- [5] 国家技术监督局. 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: GB 10593.3-90[S]. 北京: 中国标准出版社, 1990: 675-677.
State Bureau of Technical Supervision. The measure methods for environmental parameters of electronic electrical products the inductive methods for vibration data: GB 10593.3-90[S]. Beijing: Standards Press of China, 1990: 675-677. (in Chinese)
- [6] Department of defense guidance for implementing net-centric data sharing[EB/OL]. [2006-4-12]. <http://www.dtic.mil>.
- [7] 徐明. 随机振动环境测量数据归纳的统计容差法[C]//武器装备环境工程技术交流研讨会. 北京: 中国航空综合技术研究所, 2002: 231-236.
XU Ming. The statistical tolerance method for environment measured data of random vibration[C]//Weaponry Materiel Environment Engineering Proseminar. Beijing: AVIC China Aero-Polytechnology Establishment, 2002: 231-236. (in Chinese)
- [8] 中国人民解放军总装备部. 振动、冲击环境测量数据归纳方法: GJB/Z 126-99[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999: 2-5.
General Armament Department of the Chinese People's Liberation Army. The inductive methods for environment measured data of vibration and shock: GJB/Z 126-99 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1999: 2-5. (in Chinese)
- [9] Department of Defense. Environment engineering considerations and laboratory tests: MIL-STD-810F[S]. Washington: Department of Defense, 2000: 1-539.
- [10] 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 Guihua, LIU Hainian, ZHANG Dayi, et al. Study on formulating method for vibration environment test profile of aero-engine accessories[J]. Journal of Propulsion Technology, 2013, 34(8): 1101-1107. (in Chinese)
- [11] 刘海年, 张志强, 张大义, 等. 航空发动机成品振动环境分析与试验载荷谱确定[J]. 航空维修工程, 2013, 247(4): 63-65.
LIU Hainian, ZHANG Zhiqiang, ZHANG Dayi, et al. Study on the vibration environment characteristics and test spectrum of aero-engine accessories[J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2013, 247(4): 63-65. (in Chinese)
- [12] 张涛. 振动台功率谱复现控制算法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
ZHANG Tao. Research of replicate algorithm for PSD of vibration table [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)
- [13] Department of Defense. Test method standard environment engineering consideration and laboratory: MIL-STD-810H[S]. Washington: Department of Defense, 2019: 1-1089.
- [14] 田永卫, 闫楚良, 张书明, 等. 飞机随机振动环境实测试验数据的归纳方法[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(6): 577-580.
TIAN Yongwei, YAN Chuliang, ZHANG Shuming, et al. Inductive method of flight test data measured from aircraft random vibration environment[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2014, 34(6): 577-580. (in Chinese)
- [15] 王帅, 夏益霖, 荣克林. 振动环境试验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2021: 28-33.
WANG Shuai, XIA Yilin, RONG Kelin. Vibration environment test[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2021: 28-33. (in Chinese)
- [16] Benasciutti D, Tovo R. Fatigue life assessment in nonGaussian random loadings[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(7): 733-746.
- [17] Ashwini P, Abhijit G, Guru R K. Fatigue failure in random vibration and accelerated testing[J]. Journal of Vibration and Control, 2011, 18(8): 1199-1206.
- [18] 中国航空工业集团公司. 军用装备实验室环境试验方法(第16部分—振动试验实施指南): Q/AVIC 05017-2014[S]. 北京: 中国航空综合技术研究所, 2014: 128-130.
Aviation Industry Corporation of China, Ltd. Laboratory environmental test methods for military materiel (part 16—guidance for vibration test): Q/AVIC 05017-2014[S]. Beijing: AVIC China Aero-Polytechnology Establishment, 2014: 128-130. (in Chinese)

(编辑: 刘 静)