

航空航天装备

运输类飞机实测突风谱编制方法研究

王勇彬¹, 卫昆钰², 贺小帆^{2*}

(1. 空装西安局某军事代表室, 西安 710089;
2. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘要: 目的 针对运输类飞机突风载荷谱编制需求, 基于实测载荷数据和任务分析法原理, 采用5×5谱编制方法, 建立一种运输类飞机实测突风谱编制方法。方法 首先依据任务分析确定飞机典型任务剖面 and 任务段, 对实测载荷数据进行预处理和统计分析, 获得突风增量过载超越数的分布参数。然后通过得到的平均突风增量过载累积超越数曲线, 编制各任务段载荷谱, 进而编制任务剖面谱, 按任务剖面比例, 对任务剖面谱进行随机排序, 编制得到了突风增量过载飞-续-飞谱。最后给出了一个示例以详细阐明该编谱方法。结果 该型运输机爬升任务段突风载荷谱相较其余任务段偏重。结论 通过该方法编制的突风载荷谱能够较好地反映实测突风载荷数据特点, 方法具备合理性和可行性。

关键词: 运输类飞机; 实测谱; 载荷谱编制方法; 突风过载; 过载累积超越数曲线; 5×5谱

中图分类号: V216 文献标志码: A 文章编号: 1672-9242(2024)04-0081-10

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.04.010

Development Method of Measured Gust Spectra for Transport Aircraft

WANG Yongbin¹, WEI Kunyu², HE Xiaofan^{2*}

(1. Military Representative Office of Xi'an Office, Air Force Equipment Department Stationed in Certain Area, Xi'an 710089, China; 2. School of Aeronautical Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

ABSTRACT: Aiming at the demand of gust load spectra for transport aircraft, the work aims to establish a method for developing the measured gust spectra for transport aircraft by 5 × 5 spectrum development method based on the measured load data and the task analysis method. Firstly, according to the task analysis method, the typical mission profile and mission section of the aircraft were determined, and the measured load data were pre-processed and analyzed statistically to obtain the distribution parameters of the incremental normal acceleration exceedance number of the gust. Then, the curve of the average incremental normal acceleration cumulative exceedance number of the gust was obtained to develop the load spectrum of each mission section by the method of 5 × 5 spectrum, and then the mission profile spectra were developed and randomly ordered according to the proportion of the mission profile, so as to obtain the flight to flight spectra of the gust incremental normal acceleration. Finally, an example was given to illustrate the method in detail. In the climbing phase of this type of transport aircraft, the gust load spectra were relatively more significant compared to those of other mission sections. The gust load spectra developed by

收稿日期: 2023-11-30; 修订日期: 2024-03-18

Received: 2023-11-30; Revised: 2024-03-18

基金项目: 航空科学基金(201909051002); 装发基础科研项目(514010502)

Fund: Aerospace Science Fund(201909051002); Basic Research Project of the Equipment Development Department(514010502)

引文格式: 王勇彬, 卫昆钰, 贺小帆. 运输类飞机实测突风谱编制方法研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(4): 81-90.

WANG Yongbin, WEI Kunyu, HE Xiaofan. Development Method of Measured Gust Spectra for Transport Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(4): 81-90.

*通信作者(Corresponding author)

this method can effectively reflect the characteristics of measured gust load data, demonstrating the rationality and feasibility of the approach.

KEY WORDS: transport aircraft; measured spectrum; load spectrum development method; gust normal acceleration; normal acceleration cumulative exceedance number curve; 5×5 spectrum

运输类飞机结构的使用寿命受服役期间突风载荷的影响,易发生疲劳破坏,因此必须进行疲劳分析和试验以评价飞机耐久性寿命。作为疲劳分析和试验的输入,突风载荷谱的编制具有重要意义。

载荷数据是编谱的基础,经过对服役飞机长期的载荷实测,航空界积累了大量实测突风数据,并作为飞机设计的参考性文件,如美国的 NACA TN 4332^[1]、AC23-13A^[2],欧洲的 ESDU 69023^[3],我国的 JNS 手册、GJB 67.6A—2008 都提供了离散突风速度累积超越数曲线。文献[4]对 2012~2021 年酒泉地区大气风场的分布特征进行了研究。文献[5]以实测年代较晚的多个型号的突风速度超越数^[6]为基础,研究了突风载荷谱的损伤分散性,得到了损伤分散性取值范围。波音和空客分别提出了突风设计谱编制方法,包括以任务剖面为基本编谱单位的“TWIST”谱方法^[9]和以任务段为基本编谱单位的“ 5×5 ”谱方法^[10]。文献[11-12]对 5×5 谱编制方法进行了探讨,提供了 5×5 谱的编制思路。文献[13]建立了基于标准突风速度累积超越数曲线的运输类飞机设计阶段突风载荷谱编制方法。文献[14]建立了基于参考实测过载累积超越数曲线的民用飞机设计阶段突风过载谱编制方法。

上述载荷数据是基于长期经验数据获得的,均用于设计阶段。但飞机的实际使用情况与设计使用情况不同,实际使用中经历的突风环境与设计环境不同,造成设计谱不完全适用,迫切需要根据实际使用情况编制实测谱。文献[15]对突风谱趋势进行了研究,认为当前的实测数据与早期参考数据相比变化较大,载荷谱编制采用当前实测的突风谱曲线更符合实际。文献[16]采用 FIR 数字滤波器处理飞机实测数据,并采用 DFR 方法评估了飞机结构的疲劳寿命。文献[17]形成了一种飞机改装结构局部应变谱实测方法,该方法通过飞机历史数据统计和飞行实测相结合,并进行高载外推,获得了飞机使用的实测载荷谱。阎楚良^[18]提出了载荷谱实测技术与编制方法。文献[19]对基于实测数据的飞-续-飞疲劳载荷谱编制进行了研究,但缺少实测数据处理方法和过载累积超越数曲线绘制方法。

本文提出了一种运输类飞机实测突风谱编制方法。首先针对运输类飞机实测数据,通过计数处理和统计分析,建立了一种平均增量过载累积超越数曲线选取方法,并进行 5×5 谱的编制,为运输类飞机突风实测谱编制提供参考。

1 载荷实测与预处理

1.1 典型任务剖面的确定

首先按运输机的使用要求确定飞机的典型任务剖面,包括以下 2 个方面。

1) 典型任务剖面确定:单位块谱下的起落/任务次数 n ,该次数一般取飞机设定安全寿命目标的 $1/10$;典型任务剖面种类;每种任务剖面在单位块谱下的使用百分比;每种任务剖面下任务段种类及其顺序,包括起飞滑行、起飞爬升、巡航、待机、下滑、着陆、着陆滑行等;每种任务剖面的结构有效载荷,包括载油量等。

2) 任务剖面任务段确定:各任务段的标准时间;每个任务段内的性能参数,如高度、速度、标准质量等。一般来说,任务段内的性能参数随时间在发生变化,一般采用参数的平均值进行代替。

1.2 载荷谱数据要求

由于飞行环境和执行任务的差异性,机队中每架飞机以及每架飞机执行相同任务时所经受载荷均不相同。为了反映载荷谱的分散性,编制能够反映飞机实际使用状态下的载荷谱,应收集不少于 10 次的实测载荷数据,以满足高置信度采样要求^[18],至少包括飞机的重心垂向过载、真空速、海拔高度、油箱油量等。

1.3 载荷实测数据预处理

首先进行间歇噪声尖峰、异常点和突变值的消除。如果在时间历程目视检查期间,检测到测量间歇数值尖峰、异常点或突变值,应首先定义每个尖峰数字值的数目 N_n ,并在尖峰之后的第一个值和尖峰之前的最后一个值之间内插一个适当的新值,替代所消除的每个尖峰值。如信号是周期性的,应采用信号前一个周期中所观察到的数据值内插。对随机和瞬态信号,可以采用线性内插。为了保证数字时间历程所有其他值的时间基准不变,所有的消除值都必须用内插值替代^[18]。将飞参记录仪采集的运输机重心垂向过载 n_y 减去平衡状态对应的单位过载 1,得到垂向增量过载 Δn_y 。

综合典型任务剖面定义,基于飞参特征对实测的每架飞机各典型任务剖面的载荷时间历程进行任务剖面识别。综合典型任务剖面下各任务段的分析,对每个典型任务剖面的各任务段的载荷-时间历程

进行识别和分离, 得到各任务段的增量过载时间 Δn_y-t 历程。

按如下条件, 对载荷谱中的机动和突风载荷进行分离: 过载循环周期少于 2 s 者为突风载荷^[20]; 带有舵面偏角增量小于 5° 的过载为突风载荷, 其中 5° 为暂定值, 根据实测情况还可以进行调整; 舵偏与重心过载同向为突风载荷。

实测数据采样频率高于载荷交变频率, 且为等间隔采样。在进行计数统计之前, 要对各任务段的过载时间历程进行峰谷值检测, 删除峰谷值中间数据, 将所有峰值和谷值检测出来, 同时保留对应采样点序号。如果满足式 (1), 则取峰值 (或谷值) 1 次。

$$\begin{cases} \Delta n_{yi} > \Delta n_{yi-1} \\ \Delta n_{yi} > \Delta n_{yi+1} \end{cases} \text{ 或 } \begin{cases} \Delta n_{yi} < \Delta n_{yi-1} \\ \Delta n_{yi} < \Delta n_{yi+1} \end{cases} \quad (1)$$

实测过载数据峰谷值计数完之后的过载时间历程中存在大量小幅值的载荷循环, 这些载荷循环次数较多, 对损伤贡献可以忽略。因此, 删除对疲劳损伤产生影响的峰谷值, 对过载滤波压缩处理。取某一主参数的变程滤波标准 (门槛值) 为 $[\Delta n_y]$, 按如下条件处理 (如图 1 所示):

1) 如果 $|\widehat{\Delta n}_y^{k+1} - \widehat{\Delta n}_y^k| \geq [\Delta n_y]$ 时, 取 $\widehat{\Delta n}_y^k$ 。

2) 如果 $|\widehat{\Delta n}_y^{k+1} - \widehat{\Delta n}_y^k| < [\Delta n_y]$, 且图 1a 中 $|\widehat{\Delta n}_y^{k-1} - \widehat{\Delta n}_y^k| < |\widehat{\Delta n}_y^{k+1} - \widehat{\Delta n}_y^{k+2}|$, 则去掉 $\widehat{\Delta n}_y^k$ 、 $\widehat{\Delta n}_y^{k+1}$; 或图 1b 中 $|\widehat{\Delta n}_y^{k-1} - \widehat{\Delta n}_y^k| > |\widehat{\Delta n}_y^{k+1} - \widehat{\Delta n}_y^{k+2}|$, 则去掉 $\widehat{\Delta n}_y^{k+1}$ 、 $\widehat{\Delta n}_y^{k+2}$ 。

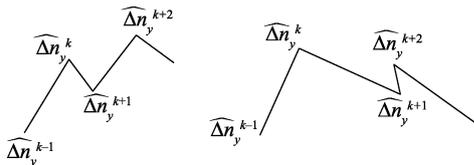


图 1 滤波参数值

Fig.1 Filter parameter values

取采集到的突风载荷的第一个谷值为第一个 $\widehat{\Delta n}_y^{k-1}$, 即从 $k=2$ 开始进行滤波判别, 最终得到突风增量过载峰谷值数据对 $(\Delta n_{y, \text{峰}}, \Delta n_{y, \text{谷}})_i$ 。

2 平均增量过载超越数曲线确定

2.1 基于实测数据的增量过载超越数曲线族获取

载荷谱统计计数的常用方法包括雨流计数法^[21]和限制跨均峰计数法^[22]。考虑到离散突风过载时间历程的对称性, 采用限制跨均峰计数法对预处理后的增量过载时间历程进行计数。方法如下: 设定载荷均值为 0, 当 2 个峰值之间的谷值不超过该任务段载荷

均值的下偏差时, 只记录其中最大峰值; 当 2 个谷值之间的峰值不超过该任务段载荷均值的上偏差时, 只记录其中最小谷值。上下偏差设定为相邻各级载荷之间的差值, 如图 2 所示。

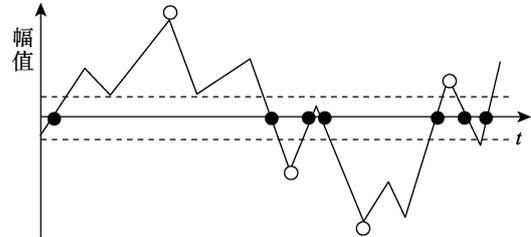


图 2 限制跨均峰值计数

Fig.2 Restricted cross average peak counting method

选定若干级增量过载, 分别对不同任务段的正值增量过载和负谷值增量过载记录超越数, 分别记为 $N(+\Delta n_y)$ 和 $N(-\Delta n_y)$ 。实测的相同幅值的正向和负向突风增量过载超越数存在一定差异, 采用几何平均求得对称的增量过载对应的累积超越数的平均数, 得到 $(\Delta n_y, N)_i (i=1, \dots, n)$ 数据对, 见式 (2)。

$$N(\Delta n_y) = \sqrt{N(+\Delta n_y) \cdot N(-\Delta n_y)} \quad (2)$$

载荷谱实测得到的任务段飞行时间与任务剖面中任务段标准时间存在差别, 需要将实测的任务段过载累积超越数数据转换为标准时间的累积超越数数据。设实测数据对应的飞行时间为 t_m , 任务段标准时间为 t_s 。实测时间得到的第 i 级载荷的累积超越数 N_{ib} , 则标准时间的第 i 级载荷的累积超越数 N_i 应该为:

$$N_i = N_{ib} \times \frac{t_s}{t_m} \quad (3)$$

对各级载荷的累积超越数均按式 (3) 进行替换, 即可得到标准时间的任务段过载累积超越数数据。

采用式 (4) 所示方程拟合每个任务段的增量过载累积超越数数据对 $(\Delta n_y, N)_i$ 。

$$\Delta n_y = a \cdot \lg N + b \quad (4)$$

由此得到任务段下的过载累积超越数曲线, 该过程适用于所有起落的该任务段, 从而得到任务段下的过载累积超越数曲线族。

2.2 突风增量过载累积超越数曲线统计分析

首先将增量过载累积超越数曲线离散化, 离散为 $(\Delta n_y, N)_i (i=1, \dots, n)$ 数据对, 增量过载级差取 0.05g, 计算得到超越数 $\Delta N_i = N_i - N_{i-1} (i=2, \dots, n)$, 获得不同 Δn_y 对应的超越数数据对 $(\Delta n_y, \Delta N)_i (i=1, \dots, n)$ 。

对于指定任务段, 假定指定 Δn_y 对应的超越数 ΔN 服从对数正态分布, 由最大似然估计方法估计分布参数, 似然函数如式 (5) 所示。

$$L(\mu, \sigma) = \prod_{i=1}^n f(x_i, \mu, \sigma^2) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x_i - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

式中: $x_i = \lg \Delta N_i$ 。

似然函数分别对 μ 和 σ^2 求导为 0, 求解参数(μ , σ^2), 如式(6)所示:

$$\begin{cases} \frac{\partial \ln L}{\partial \mu} = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^n (\ln x_i - \mu) = 0 \\ \frac{\partial \ln L}{\partial \sigma^2} = \frac{n}{2\sigma^2} + \frac{1}{2\sigma^4} \sum_{i=1}^n (\ln x_i - \mu)^2 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

求解方程组(6), 并进行无偏修正, 得到的分布参数估计见式(7)和(8):

$$\hat{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg \Delta N_i \quad (7)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\lg \Delta N_i - \hat{\mu})^2 \quad (8)$$

式中: $\hat{\mu}$ 为 μ 的无偏估计估计量; $\hat{\sigma}^2$ 为 σ^2 的无偏估计量。

2.3 平均突风增量过载累积超越数曲线确定

指定增量过载下对应 50%可靠度的平均超越数按式(9)计算:

$$\Delta N_i = 10^{\mu_i} \quad (9)$$

依次求和 ΔN_i 可以得到累积超越数 N_i , 由式(4)拟合得到该任务段的平均突风增量过载累积超越数曲线。

3 5×5 谱编制

3.1 高载截取与低载截除

对 2.3 小节中得到的任务段的平均突风增量过载累积超越数曲线进行高载截取和低载截除^[23], 确定 Δn_y 的范围 $[\Delta n_{yb1}, \Delta n_{yb5}]$ 。

高载截取的目的是避免高载的迟滞效应, 高载截取 Δn_{yb1} 的取值是每单位块谱下该任务段出现 1 次的高载, 该值与表 1 中 5×5 谱中的 Δn_{yd1} 相等。

低载截除的目的是进一步删除对疲劳损伤贡献小的载荷循环, 从而减少循环次数。低载截除值 Δn_{yb5} 目前尚无统一计算标准。文献[24]对缺口和接头试件进行了飞-续-飞谱疲劳试验, 试验结果显示, 低载截除应力水平为飞行平均应力的 22.5%~37.5% 时对疲劳寿命的影响很小。波音 757 和波音 767 载荷谱中的最小交变应力小于巡航平均应力的 17.5%^[10]。文献[25]进行了 2324-T39 和 7050-T7451 铝合金 M(T)试件在不同低载删除水平下运输机谱的裂纹扩展试验, 研究了低载删除水平对疲劳裂纹扩展寿命的影响, 综合考虑节省试验时间和对疲劳裂纹扩展寿命的影响, 建议低载删除水平为最大过载的 11.72% 或 13.98%。考虑到低载删除水平设置过高可能导致给出较为危险的结果, 本文建议低载删除水平不超过平均应力的 17.5%。

3.2 载荷谱当量计算方法

采用当量损伤的方法^[23]进行 5×5 谱各级载荷的当量计算。将过载累积超越数曲线离散为 4 段, 分别为 $[\Delta n_{yb1}, \Delta n_{yb2}]$ 、 $[\Delta n_{yb2}, \Delta n_{yb3}]$ 、 $[\Delta n_{yb3}, \Delta n_{yb4}]$ 、 $[\Delta n_{yb4}, \Delta n_{yb5}]$, 并采用 4 段直线分别代替这 4 段离散曲线, 第 i 段的线性方程为:

$$\Delta g = a_i \lg N + b_i \quad (10)$$

式中: a_i 、 b_i 为第 i 段载荷谱曲线的常数。

当量载荷为:

$$\Delta n_{yd} = \left(\frac{-\ln 10}{n} \times \sum_{i=1}^m A_i \right)^{\lg S} \quad (11)$$

$$A_i = a_i^{-1} 10^{-\frac{b_i}{a_i}} \int_{\Delta g_i}^{\Delta g_{i+1}} \Delta n_{yd} \lg S \cdot 10^{a_i} d(\Delta n_{yd}) \quad (12)$$

式中: S 为材料 $S-N$ 曲线斜度参数, 对于铝合金, $S=2.0$ ^[23]。

当量载荷循环次数为:

$$N_{eq} = -\ln 10 \Delta n_{yd} \frac{1}{\lg S} \sum_{i=1}^m A_i \quad (13)$$

对 4 段过载累积超越数曲线分别采用该方法进行载荷谱当量计算, 共得到 4 级当量载荷 Δn_{yd2} 、 Δn_{yd3} 、 Δn_{yd4} 、 Δn_{yd5} 和对应的循环次数 N_{eq2} 、 N_{eq3} 、 N_{eq4} 、 N_{eq5} , 这 4 级载荷与高载截取 Δn_{yb1} 及高载循环次数 1 共同组成了 5×5 谱中的 5 级过载和各级过载的循环次数。

3.3 飞行类型和 5×5 谱矩阵定义

为了模拟真实飞行环境, 5×5 谱共定义了 5 种不同的飞行类型, 即 A、B、C、D、E 等 5 种飞行类型和 Δn_{yd1} 、 Δn_{yd2} 、 Δn_{yd3} 、 Δn_{yd4} 、 Δn_{yd5} 等 5 级载荷。5×5 谱以 5×5 谱矩阵的形式给出, 见表 1。每种飞行类型下各级载荷的出现次数 $B_{i,j}$ 和各类飞行类型的出现次数 $y_i (i=1, 2, \dots, 5)$, 应满足 5×5 谱的 2 个准则:

1) 极值载荷对数正态分布原则。以具有最高载荷的任务段载荷谱为基准, 每次任务段中最高载荷为正态对极值分布。

2) 突风载荷相似性准则。各飞行类型下单次飞行的突风增量过载累积超越数曲线近似平行, 具有大致相同的形状。

3.4 飞-续-飞载荷谱的编制

在确定各任务段的 5×5 谱后, 对各飞行类型下的各级载荷进行排序得到任务段谱。将第 j 种剖面第 i 个任务段的第 k 种飞行类型单次起落下各级载荷及其相应频数联系起来, 随机交替选取峰、谷值(即峰、谷值分别随机)进行随机成对编排, 形成任务段特定飞行类型的载荷谱, 记为任务段谱。

将任务段谱按顺序进行排列组成任务剖面谱, 按各飞行类型的任务剖面谱在载荷块谱下的出现次数对任务剖面谱进行随机排列, 采用乘同余法的伪随机方法得到以 n 次飞行为单位块谱的飞-续-飞谱。

表 1 5×5 谱矩阵定义
Tab.1 Definition of 5 × 5 spectral matrix

| 飞行类型 | 次数 | 突风增量过载循环次数 | | | | | 每次飞行循环次数 |
|------|-----------------------------|-------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------------------------|
| | | Δn_{yd1} | Δn_{yd2} | Δn_{yd3} | Δn_{yd4} | Δn_{yd5} | |
| A | $y_1(1)$ | $B_{1,1}(1)$ | $B_{1,2}$ | $B_{1,3}$ | $B_{1,3}$ | $B_{1,3}$ | $\sum_{i=2}^5 B_{1,i}$ |
| B | y_2 | | $B_{2,2}$ | $B_{2,3}$ | $B_{2,4}$ | $B_{2,5}$ | $\sum_{i=3}^5 B_{2,i}$ |
| C | y_3 | | | $B_{3,3}$ | $B_{3,4}$ | $B_{3,5}$ | $\sum_{i=4}^5 B_{3,i}$ |
| D | y_4 | | | | $B_{4,4}$ | $B_{4,5}$ | $\sum_{i=5}^5 B_{4,i}$ |
| E | y_5 | | | | | $B_{5,5}$ | $B_{5,5}$ |
| 总和 | 总飞行次数 $\sum_{i=1}^5 y_i$ | 单级突风增量过载总循环次数 $N_{eq1}(1)$ | N_{eq2} | N_{eq3} | N_{eq4} | N_{eq5} | 谱总循环次数 $\sum_{i=1}^5 N_{eqi}$ |

首先由式 (14) 形成 “ y_i ” 数列, 然后由式 (15) 得到随机数列 “ x_i ”。

$$y_{i+1} = \lambda y_i \pmod{2^k} \tag{14}$$

$$x_i = y_i / 2^m \tag{15}$$

计算 x_i 在总数列的按从小到大排列的顺序 x_{is} , 这样就得到了随机整数数列 “ x_{is} ”。

关于式 (14)、(15) 中的参数取值, 初值 y_1 取奇数; 系数 $\lambda = 8t - 3$; t 为任意自然数; k 根据需要随机的周期 “ n ” 确定, 使 $2^{k-2} \geq n$; m 取 2。通过改变 y_1 、 t 、 k 的大小, 可以得到不同的随机数列。

4 示例

某型运输机有 2 种典型任务剖面, 记为任务剖面 1 和任务剖面 2, 各任务剖面均包含 3 个任务段: 爬升、平飞和下滑。任务剖面 1 和任务剖面 2 的任务段飞行参数见表 2。以 1 000 次飞行为单位块谱周期, 其中任务剖面 1 次数为 310 次, 任务剖面 2 为 690 次。

表 2 典型任务剖面下任务段飞行参数
Tab.2 Flight parameters of mission section under typical mission profile

| 任务剖面 | 任务段 | 总质量/ kg | 燃油质量/ kg | 高度/ m | 速度/ (km·h ⁻¹) | 时间 /min |
|------|-----|------------|-------------|----------|------------------------------|------------|
| 1 | 爬升 | 31 045 | 7 704 | 2 500 | 600 | 10 |
| | 平飞 | 29 737 | 6 396 | 5 000 | 820 | 27 |
| | 下滑 | 28 680 | 5 339 | 2 500 | 520 | 15 |
| 2 | 爬升 | 39 179 | 13 538 | 3 000 | 650 | 24 |
| | 平飞 | 34 673 | 9 032 | 8 000 | 900 | 150 |
| | 下滑 | 31 673 | 6 032 | 3 000 | 450 | 20 |

4.1 载荷数据实测与预处理

针对 2 种典型任务剖面进行了载荷谱实测, 2 个任务剖面分别实测 10 次。对载荷实测数据进行预处理, 包括任务剖面识别、任务段划分、突风载荷与机动载荷分离、峰值计数和滤波。最终得到了突风增量过载峰值数据对 $(\Delta n_{y,峰}, \Delta n_{y,谷})_i$ 。

4.2 平均突风增量过载累积超越数曲线获取

以 0.05g 起始, 取间隔 0.05g, 采用限制跨均峰方法对峰值数据对计数, 得到了突风增量过载峰值数据对 $(\Delta n_{y,峰}, \Delta n_{y,谷})_i$ 。

对正峰值过载和负谷值过载分别进行标准化处理后和计数, 得到同一任务段下的过载超越数数据对, 拟合得到各任务段的增量过载累积超越数曲线族和各级增量过载下超越数参数如图 3 和图 4 所示。

平均增量过载累积超越数曲线如图 5 所示。对过载累积超越数曲线进行高载截取和低载截除, 高载选取准则为每单位块谱下该任务段出现一次的高载, 低载截除值统一取 0.175g, 该幅值为平均过载水平的 17.5%。

4.3 突风增量过载谱编制

任务剖面 1 和任务剖面 2 的飞行类型次数见表 3, 任务剖面 1 的各任务段突风 5×5 谱见表 4~6, 任务剖面 2 的各任务段突风 5×5 谱见表 7~9。

从表 3~5 可以看出, 该型运输机平飞任务段的突风载荷谱相较爬升和下滑任务段较弱, 表现为突风载荷幅值小, 次数少, 原因在于在该型任务剖面下, 平飞任务段所处海拔高度较高, 且巡航时间较短。从表 6~8 可以看出, 该型飞机平飞任务段的突风载荷相较爬升和下滑任务段较强, 原因在于该型任务剖面下, 平

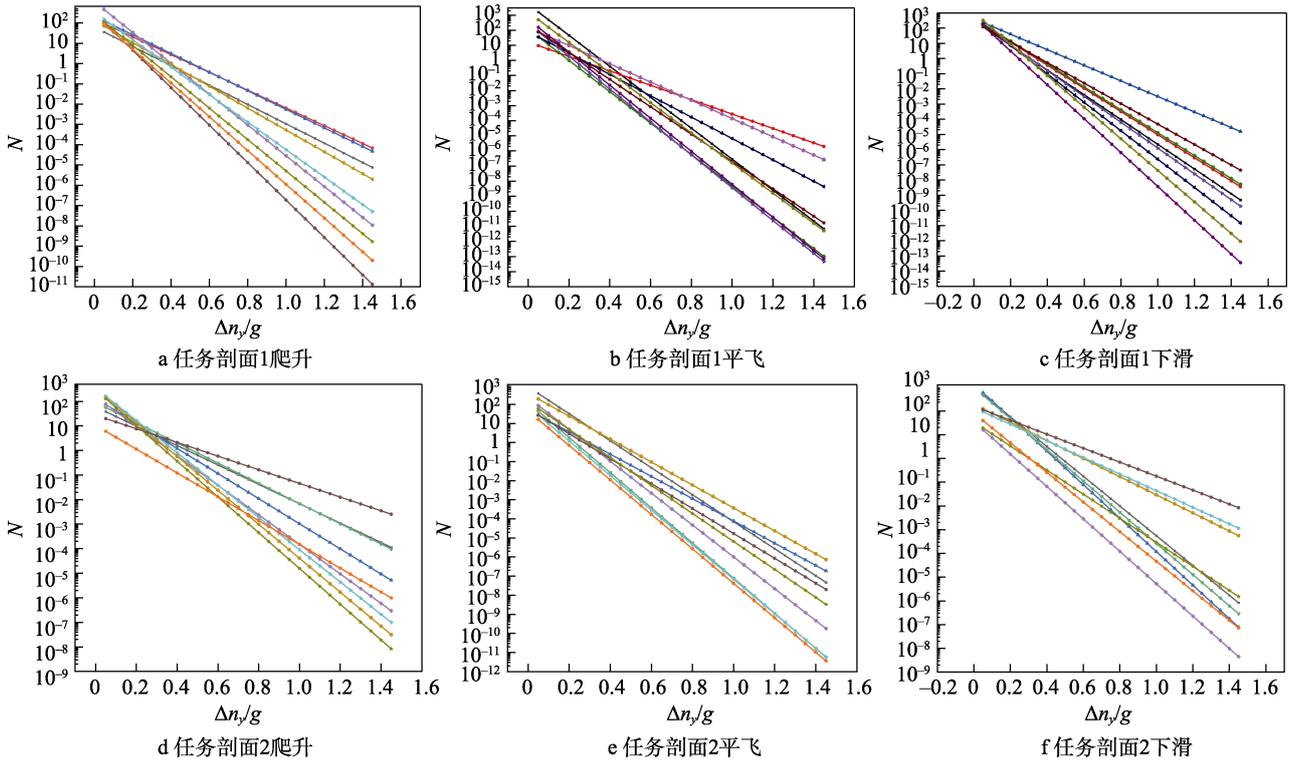


图3 各任务段的增量过载累积超越数曲线族

Fig.3 Incremental overload cumulative exceedance number curve family of each mission section:

- a) climbing of mission profile 1; b) horizontal flight of mission profile 1; c) glide slope of mission profile 1;
- d) climbing of mission profile 2; e) horizontal flight of mission profile 2; f) glide slope of mission profile 2

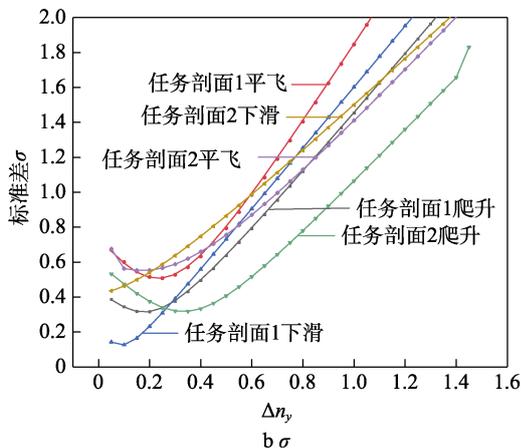
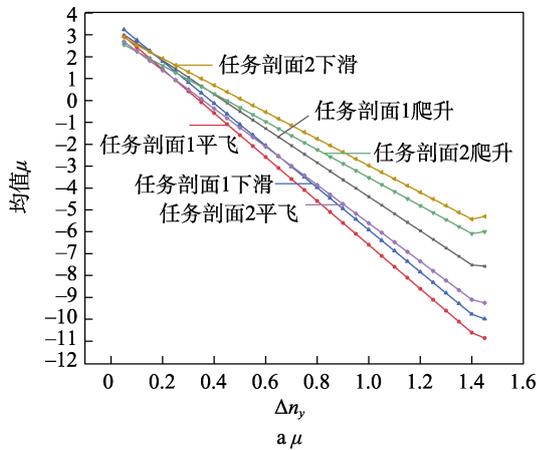


图4 各级 Δn_y 超越数对数正态分布参数

Fig.4 Parameters of Δn_y exceedance number at each level

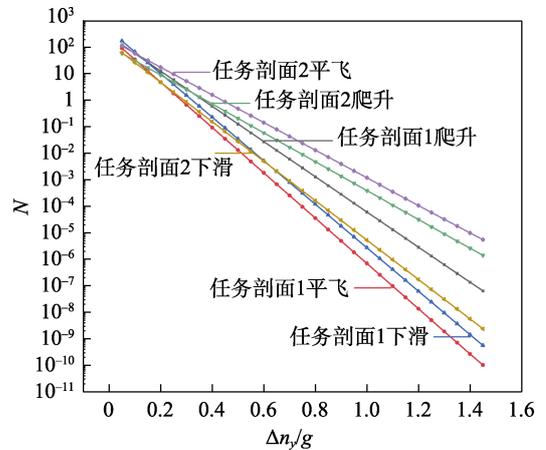


图5 各任务段平均增量过载累积超越数曲线

Fig.5 Average incremental overload cumulative exceedance curve by mission section

表3 典型飞行剖面的飞行类型次数 (1 000 次飞行)
Tab.3 Number of flight types for typical flight profiles (1 000 flights)

| 序号 | 典型飞行剖面 | A | B | C | D | E |
|----|--------|---|---|----|-----|-----|
| 1 | 任务剖面 1 | 1 | 5 | 22 | 74 | 208 |
| 2 | 任务剖面 2 | 1 | 7 | 45 | 134 | 503 |

飞任务段所处海拔高度较低, 突风强度较高, 巡航时间较长, 且巡航速度较快, 对突风的响应有所提高, 这些现象与各任务剖面下任务段的飞行参数相对应。2 种任务剖面下, 爬升任务段突风载荷谱均较重, 推测与低空环境下突风紊流环境较为常见相关, 因此突

表 4 任务剖面 1 爬升突风谱
Tab.4 Climbing gust spectrum in mission profile 1

| 飞行类型 | 次数 | 突风增量过载循环次数 | | | | | 每次飞行循环次数 |
|------|-----|------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | 0.740 4g | 0.603 6g | 0.464 6g | 0.374 2g | 0.256 5g | |
| A | 1 | 1 | 3 | 19 | 74 | 187 | 286 |
| B | 5 | 0 | 1 | 4 | 22 | 81 | 110 |
| C | 22 | 0 | 0 | 1 | 4 | 24 | 30 |
| D | 74 | 0 | 0 | 0 | 1 | 8 | 14 |
| E | 208 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 5 |
| 总和 | 310 | 1 | 10 | 71 | 442 | 3 048 | 3 572 |

表 5 任务剖面 1 平飞突风谱
Tab.5 Horizontal flight gust spectrum in mission profile 1

| 飞行类型 | 次数 | 突风增量过载循环次数 | | | | | 每次飞行循环次数 |
|------|-----|------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | 0.570 9g | 0.472 7g | 0.371 3g | 0.304 3g | 0.237 7g | |
| A | 1 | 1 | 4 | 12 | 34 | 112 | 163 |
| B | 5 | 0 | 1 | 3 | 13 | 27 | 44 |
| C | 22 | 0 | 0 | 1 | 4 | 9 | 14 |
| D | 74 | 0 | 0 | 0 | 1 | 5 | 6 |
| E | 208 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 总和 | 310 | 1 | 9 | 49 | 261 | 1 023 | 1 343 |

表 6 任务剖面 1 下滑突风谱
Tab.6 Glide gust spectrum in mission profile 1

| 飞行类型 | 次数 | 突风增量过载循环次数 | | | | | 每次飞行循环次数 |
|------|-----|------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | 0.625 5g | 0.535 8g | 0.438 1g | 0.368 4g | 0.268 1g | |
| A | 1 | 1 | 5 | 13 | 48 | 127 | 194 |
| B | 5 | 0 | 1 | 4 | 14 | 51 | 70 |
| C | 22 | 0 | 0 | 1 | 5 | 16 | 22 |
| D | 74 | 0 | 0 | 0 | 1 | 6 | 7 |
| E | 208 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 |
| 总和 | 310 | 1 | 10 | 55 | 302 | 1 594 | 1 962 |

表 7 任务剖面 2 爬升突风谱
Tab.7 Climbing gust spectrum in mission profile 2

| 飞行类型 | 次数 | 突风增量过载循环次数 | | | | | 每次飞行循环次数 |
|------|-----|------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | 0.895 0g | 0.734 1g | 0.554 4g | 0.424 8g | 0.304 9g | |
| A | 1 | 1 | 4 | 21 | 100 | 269 | 395 |
| B | 7 | 0 | 1 | 3 | 20 | 90 | 114 |
| C | 45 | 0 | 0 | 1 | 6 | 33 | 40 |
| D | 134 | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | 5 |
| E | 503 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 总和 | 690 | 1 | 11 | 87 | 644 | 3 423 | 4 166 |

表 8 任务剖面 2 平飞突风谱
Tab.8 Horizontal flight gust spectrum in mission profile 2

| 飞行类型 | 次数 | 突风增量过载循环次数 | | | | | 每次飞行循环次数 |
|------|-----|------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | 0.983 2g | 0.830 1g | 0.682 9g | 0.535 4g | 0.373 7g | |
| A | 1 | 1 | 4 | 16 | 64 | 152 | 237 |
| B | 7 | 0 | 1 | 4 | 21 | 83 | 109 |
| C | 45 | 0 | 0 | 1 | 5 | 34 | 40 |
| D | 134 | 0 | 0 | 0 | 1 | 5 | 6 |
| E | 503 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 |
| 总和 | 690 | 1 | 11 | 89 | 570 | 3 939 | 4 610 |

表9 任务剖面2下滑突风谱
Tab.9 Glide gust spectrum in mission profile 2

| 飞行类型 | 次数 | 突风增量过载循环次数 | | | | | 每次飞行循环次数 |
|------|-----|------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | 0.672 3g | 0.524 1g | 0.431 1g | 0.349 2g | 0.267 7g | |
| A | 1 | 1 | 2 | 11 | 34 | 82 | 130 |
| B | 7 | 0 | 1 | 3 | 10 | 36 | 50 |
| C | 45 | 0 | 0 | 1 | 3 | 14 | 18 |
| D | 134 | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | 5 |
| E | 503 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 总和 | 690 | 1 | 9 | 77 | 373 | 2 003 | 2 463 |

风减缓需要重点关注爬升任务段。

风增量过载谱如图7所示。

任务剖面1各任务段5类飞行类型突风增量过载谱如图6所示,任务剖面2各任务段5类飞行类型突

风增量过载谱,如图8和图9所示。

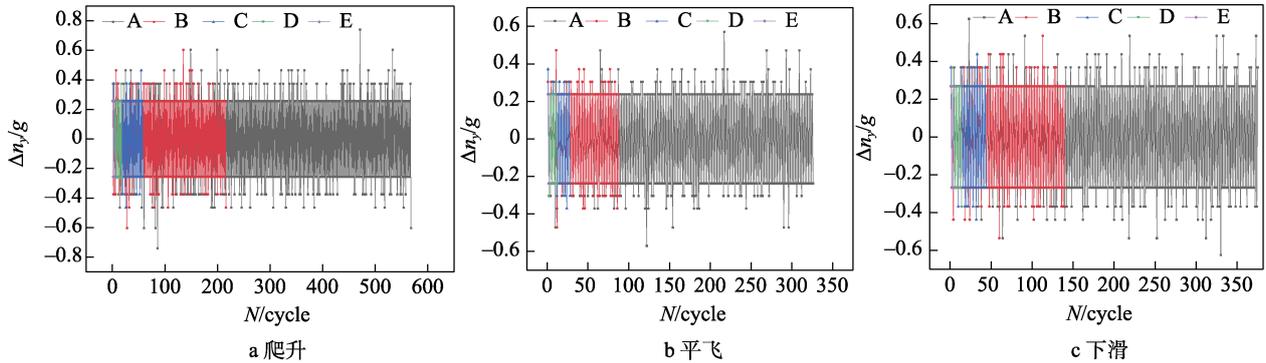


图6 任务剖面1各任务段五类飞行类型突风增量过载谱

Fig.6 Incremental overload spectra of gusts for five types of flight for each mission section in mission profile 1: a) climbing; b) horizontal flight; c) glide slope

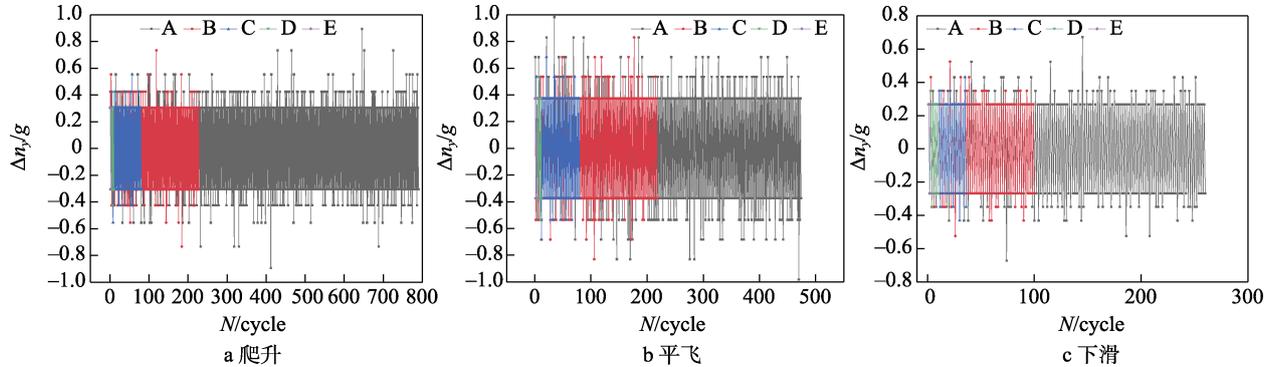


图7 任务剖面2各任务段5类飞行类型突风增量过载谱

Fig.7 Incremental overload spectra of gusts for five types of flight for each mission section in mission profile 2: a) climbing; b) horizontal flight; c) glide slope

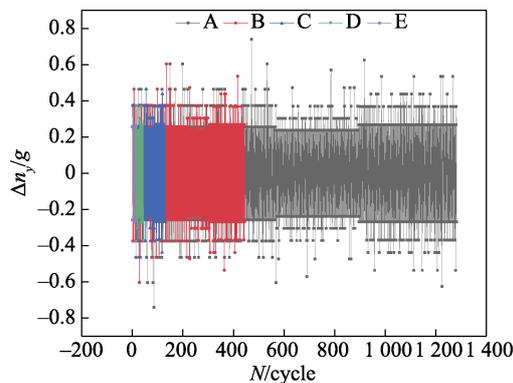


图8 任务剖面1的5类飞行类型突风增量过载谱
Fig.8 Incremental overload spectra of gusts for five types of flight in mission profile 1

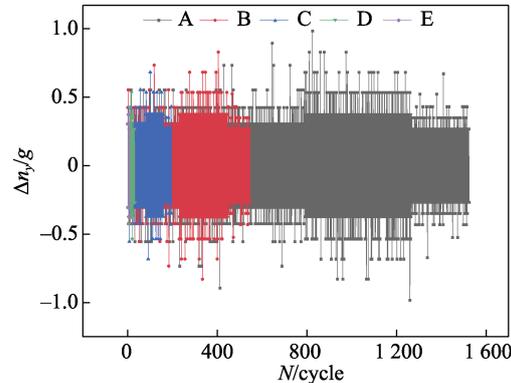


图9 任务剖面2的5类飞行类型突风增量过载谱
Fig.9 Incremental overload spectra of gusts for five types of flight in mission profile 2

以1 000次飞行为单位的突风增量过载飞-续-飞谱如图10所示。

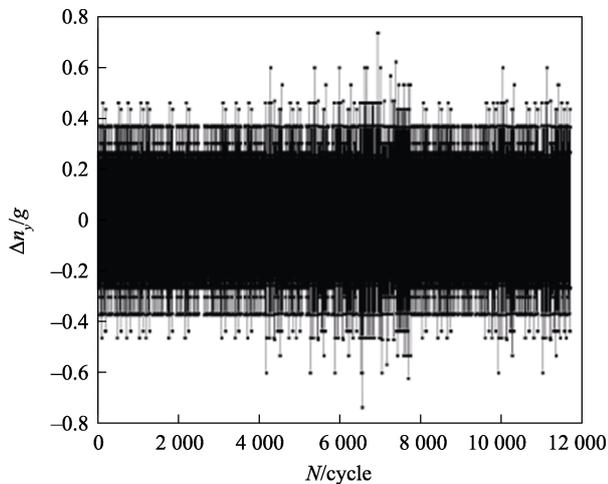


图10 突风增量过载飞-续-飞谱

Fig.10 Gust incremental overload flight to flight spectrum

从图8~9可以看出,任务剖面谱的高低载分布较为均匀,验证了编谱方法中随机编排的正确性。图10则显示1 000次飞行的突风增量过载飞-续-飞谱的最高和最低过载均处于谱偏中间的位置,有效避免了高载迟滞现象。

5 结论

基于过载累积超越数曲线和5×5谱方法建立了一种以任务段作为基本单位的运输类飞机实测突风谱编制方法。该方法能充分利用实测过载数据,生成具有代表性的突风增量过载飞-续-飞谱,为飞机试飞实测阶段定延寿提供了载荷谱输入。结合某型运输机典型任务剖面 and 实测数据,进行了突风载荷谱的编制,结果表明,2种典型任务剖面下爬升任务段突风载荷谱均较重,突风减缓需要重点关注爬升任务段。

参考文献:

- [1] PRESS H, STEINER R. An Approach to the Problem of Estimating Severe and Repeated Gust Loads for Missile Operations[M]. Washington DC: National Advisory Committee for Aeronautics, 1958.
- [2] Advisory Circular (AC) 23-13A, Fatigue, Fail-Safe, and Damage Tolerance Evaluation of Metallic Structure for Normal, Utility, Acrobatic, and Commuter Category Airplanes[S].
- [3] BENOY M B, GRAYLEY M E, et al. Average Gust Frequencies Sub-sonic Transport Aircraft[R]. London: ESDU, 1989.
- [4] 魏蕾, 张冬梅, 张荣, 等. 酒泉地区大气风场分布特征的研究分析[J]. 强度与环境, 2023, 50(1): 57-63.
WEI L, ZHANG D M, ZHANG R, et al. Research and Analysis on the Distribution Characteristics of Atmospheric Wind Fields[J]. Structure & Environment Engineering, 2023, 50(1): 57-63.
- [5] 朱俊贤, 贺小帆, 李玉海. 突风载荷谱的损伤分散性研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(10): 2129-2137.
ZHU J X, HE X F, LI Y H. Research on the Dispersion of Gust Load Spectrum Damage[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(10): 2129-2137.
- [6] RUSTENBURG J W, SKINN D A, TIPPS D O. Statistical Loads Data for the Airbus A320 Aircraft in Commercial Operations[R]. Springfield: FAA, 2002.
- [7] RUSTENBURG J W, SKINN D A, TIPPS D O. Statistical Loads Data for the Boeing 737-400 Aircraft in Commercial Operations[R]. Springfield: FAA, 1998.
- [8] TIPPS D O, RUSTENBURG J W, SKINN D A. Statistical Loads Data for the B767-200ER Aircraft in Commercial Operations[R]. Springfield: FAA, 2000.
- [9] SIMPSON A R, CHEVERTON K E. Standard Fatigue Loading Sequences[R]. London: ESDU, 1997.
- [10] FOWLER K R, WATANABE R T. Development of Jet Transport Airframe Fatigue Test Spectra[M]. West Conshohocken: ASTM International 1989: 36-64.
- [11] 潘庆荣. 飞续飞试验谱编制方法——“TWIST”方法中对数正态极值分布的实现[J]. 民用飞机设计与研究, 2004(3): 21-22, 27-34.
PAN Q R. Compilation Method of Flight Continuation Test Spectrum—Realization of Lognormal Extreme Value Distribution in “Twist” Method[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2004(3): 21-22, 27-34.
- [12] 李元镜. 飞续飞试验载荷谱(5乘5谱)编制方法初探[J]. 民用飞机设计与研究, 2002(3): 1-11.
LI Y J. Preliminary Study on the Method of Compiling the Load Spectrum (5 Times 5 Spectrum) of Flight Continuation Test[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2002(3): 1-11.
- [13] 王想生, 胡玫瑰. 运输机突风飞-续-飞试验载荷谱研究[J]. 飞机设计, 2013, 33(1): 40-45.
WANG X S, HU M G. The Development of the Flight-by-Flight Testing Load Spectrum of Gust[J]. Aircraft Design, 2013, 33(1): 40-45.
- [14] 刘晓明, 万少杰, 熊峻江, 等. 民机飞行载荷谱编制方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(5): 621-625.
LIU X M, WAN S J, XIONG J J, et al. New Approach for Generating Flight Load Spectrum of Civil Aircraft[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(5): 621-625.
- [15] 王长江. 民机突风谱变化趋势研究[J]. 科技创新与应用, 2017(26): 16.
WANG C J. Study on the Change Trend of Civil Aircraft Sudden Wind Spectrum[J]. Technology Innovation and Application, 2017(26): 16.
- [16] 霍文辉, 孙小平. 基于实测数据的飞机结构疲劳强度评估研究[J]. 机械设计与制造工程, 2022, 51(7): 78-81.
HUO W H, SUN X P. Study on Fatigue Strength Evaluation

- tion of Aircraft Structure Based on Measured Data[J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2022, 51(7): 78-81.
- [17] 朱亮, 雷晓欣, 李小鹏, 等. 加改装飞机局部结构载荷谱实测与数据处理方法研究[J]. *航空科学技术*, 2022, 33(6): 46-52.
- ZHU L, LEI X X, LI X P, et al. Research on Load Measurement and Data Processing Method of Local Structure of Modified Aircraft[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2022, 33(6): 46-52.
- [18] 闫楚良. 飞机载荷谱实测技术与编制原理[M]. 北京: 航空工业出版社, 2011.
- YAN C L. Measurement Technology and Compilation Principle of Aircraft Load Spectrum[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2011.
- [19] 霍文辉, 孙小平, 付友波. 基于实测数据的飞-续-飞疲劳载荷谱研究[J]. *现代制造技术与装备*, 2021, 57(2): 22-24.
- HUO W H, SUN X P, FU Y B. Study on Fatigue Load Spectrum of Fight-Continuation-Fight Based on Measured Data[J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2021, 57(2): 22-24.
- [20] JOHN W. RUSTENBURG, DONALD SKINN, and DANIEL O. Tipps. An Evaluation of Methods to Separate Maneuver and Gust Load Factors From Measured Acceleration Time Histories[R]. Springfield, Virginia: FAA, 1999.
- [21] MATSUIISHI M, ENDO T. Fatigue of Metals Subjected to Varying Stress-Fa-Tigue Lives under Random Loading[C]// Preliminary Proc of the Kyushu District Meeting. [s. l.]: The Japan Society of Mechanical Engineers, 1968.
- [22] ASTM 1049-85, Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis[S].
- [23] 郑晓玲. 民用飞机金属结构耐久性与损伤容限设计[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2013.
- ZHENG X L. Durability and Damage Tolerance Design for Metal Structures of the Civil Aircraft[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2013.
- [24] SCHUTZ D, LOWAK H. The Application of the Standardized Test Program for the Fatigue Life Estimation of Fighter Wing Components Part IV[C]// Proceedings of Eighth ICAF Symposium. [s. l.]: International Committee on Aeronautics Fatigue, 1975.
- [25] TIAN H L, BAO R, ZHANG J Y, et al. Influence of Low Load Truncation Level on Crack Growth for Al₂₃₂₄-T39 and Al₇₀₅₀-T7451[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2009, 22(4): 401-406.