

文章编号:1000-6893(2007)01-0586-04

# 某型飞机后机身-尾翼组合体疲劳试验随机加载谱的自动生成

李 健, 张 强

(北京航空工程技术研究中心, 北京 100076)

## Automatic Generation of Random Load Spectrum for Aircraft Fatigue Test on Rear-Body in Combination with Tails

LI Jian, ZHANG Qiang

(Beijing Aeronautical Technology Research Center, Beijing 100076, China)

**摘 要:** 介绍了某型飞机随机载荷谱疲劳试验所采用的载荷值计算模型与算法、随机载荷状态序列与飞行顺序的生成方法、按照关键通道载荷变化量配置加载时间的方法,通过编程实现了复杂随机加载谱的自动生成以及加载时间的合理配置,提高了随机载荷谱计算的自动化程度,也提高了试验的稳定度与加载速度,为改进随机谱疲劳试验的应用技术做出了有益的尝试。

**关键词:** 疲劳; 随机谱; 试验; 加载

**中图分类号:** V216.3      **文献标识码:** A

**Abstract:** Focusing on the random load spectrum adopted for the aircraft structure fatigue test, model and algorithm for computing load values, method for generating random load status sequence and flight sequence, and policy of setting up loading time according to load changing amount of key channel are presented in the paper. Automatic generation of complex random load spectrum and setting of the suitable loading time are established by programming. Automation level of generating random load spectrum, smooth level and loading velocity of test are promoted. It gives the trying to improve the application technique on random load spectrum for fatigue tests.

**Key words:** fatigue; random load spectrum; test; loading

在某型飞机寿命研究工作中,需要对后机身-尾翼组合体结构进行疲劳试验。该项试验的载荷谱主要包括 11 个飞行剖面谱。各飞行剖面谱中各级载荷状态按瞬时随机测量参数统计并组合确定出平尾对称谱前压心、平尾对称谱后压心、垂尾右面谱前压心、垂尾右面谱后压心、垂尾左面谱前压心、垂尾左面谱后压心 6 类不同压心载荷状态。表 1 给出某飞行剖面的垂尾右面谱前压心载荷状态与使用频数示例,其他压心载荷状态与此相同。表 1 中频数按 127 h 计。这 11 个飞行剖面谱组成 66 张表,形成 1 052 种不同载荷状态。

表 1 1 号飞行剖面的垂尾右面谱前压心载荷状态表

Table 1 The front-pressing-center load status in vertical-tail right-side spectrum of profile No. 1

| 载荷状态 | 左平尾载荷 |      | 右平尾载荷 |      | 垂尾载荷 |      | 机身过载 |     | 频数   |
|------|-------|------|-------|------|------|------|------|-----|------|
|      | 峰     | 谷    | 峰     | 谷    | 峰    | 谷    | 峰    | 谷   |      |
| 1    | 2 105 | 0    | -157  | -263 | -962 | -288 | 1.7  | 0   | 64.7 |
| 2    | -157  | -263 | 2 105 | 0    | 288  | 962  | 1.7  | 0   | 35.6 |
| 3    | 2 105 | 0    | -157  | -263 | 288  | -288 | 1.7  | 0   | 78.3 |
| 4    | 2 105 | -263 | -157  | -263 | 288  | -288 | 1.7  | 0   | 13.4 |
| ...  | ...   | ...  | ...   | ...  | ...  | ...  | ...  | ... | ...  |

收稿日期:2006-02-10; 修订日期:2006-04-21  
通讯作者:李 健 E-mail:qianyu@263.net

为了模拟某型飞机使用中不同的瞬时随机状态,保证所加载荷对飞机结构寿命的影响,要求该项试验的载荷谱必须按照随机载荷状态顺序加载<sup>[1]</sup>。与程序块谱和飞续飞谱具有固定的连接顺序不同,由于这些载荷状态之间全部是随机连接的,加载通道多达 32 个,结构变形复杂,加载姿态没有规律,因此给生成载荷谱、产生随机载荷状态序列、配置加载时间带来很大困难。本文主要研究并解决 3 个问题:①如何按照要求自动生成所有加载通道的实际载荷值;②如何产生随机载荷状态序列并生成满足要求的随机飞行顺序;③如何为这种随机的控制加载谱配置合适的加载时间。

### 1 计算实际载荷值

按照试验加载点位置分布和载荷施加要求,经过不同压心分布计算,得到形如表 2 的所有通道的压心参数表  $P_m$  ( $m = 1, \dots, 6$ , 代表 6 种压心载荷状态)。  $P_m$  中  $1, \dots, i$  位于左平尾;  $i+1, \dots, j$  位于右平尾;  $j+1, \dots, k$  位于垂尾和机身侧向;  $k+1, \dots, n$  位于机身上下方向。杠杆配重  $C$  中,左右加载通道的  $C$  为 0,向上加载通道的  $C$  为正,向下加载通道的  $C$  为负,表示实际载荷是谱值与

配重的合力。

表 2 通道压心参数表  $P_m$

Table 2 Pressing-center parameters of channels

| 通道号    | 乘积因子 A       | 分母因子 B    | 杠杆配重 C    |
|--------|--------------|-----------|-----------|
| 1      | -60.244 0    | 1 107.40  | 210.85    |
| ...    | ...          | ...       | ...       |
| $i$    | 219.259 0    | -1 056.36 | -316.66   |
| $i+1$  | -60.244 0    | 1 107.40  | 210.85    |
| ...    | ...          | ...       | ...       |
| $j$    | 219.259 0    | -1 056.36 | -316.66   |
| $j+1$  | -464.895 0   | -1 056.36 | 0         |
| ...    | ...          | ...       | ...       |
| $k$    | 948.370 9    | 1 308.44  | 0         |
| $k+1$  | -1 485.980 0 | -1 056.36 | 110       |
| ...    | ...          | ...       | ...       |
| $n=32$ | -8 860.800   | -1.00     | -5 487.06 |

为了能够自动计算生成通道载荷值,需要提炼出计算模型,以便于编程计算。首先将表 1 中去除频数和累计频数两列,转置并添加通道与所在位置,得到表 3。研究表 1、表 2、表 3,发现加载通道载荷峰谷值、加载通道位置、通道压心参数、载荷状态和计算后得到的通道实际加载值之间有关系

$$X_{i,j}P_j = D_{i,j}$$

式中: $X_{i,j}$ 和  $D_{i,j}$ 分别为对应于 6 种压心情况的载荷状态表和加载值计算结果表; $P_j$ 为压心计算参数; $i=1, \dots, 11$ 为 11 个飞行剖面谱号; $j=1, \dots, 6$ 为垂尾右面谱前压心、垂尾右面谱后压心、垂尾左面谱前压心、垂尾左面谱后压心、平尾对称谱前压心、平尾对称谱后压心 6 种情况。

表 3 新的 1 号飞行剖面的垂尾右面谱前压心载荷状态表

Table 3 The new front-pressing-center load status in vertical-tail right-side spectrum of profile No. 1

| 载荷状态号                   | 1     | 2     | 3     | 4     | ... | $m$   |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|
| 左平尾载荷 $X_{左}$ 峰         | 2 105 | -157  | 2 105 | 2 105 | ... | 0     |
| (通道 1, ..., $i$ ) 谷     | 0     | -263  | 0     | -210  | ... | -210  |
| 右平尾载荷 $X_{右}$ 峰         | -157  | 2 105 | -157  | -157  | ... | 0     |
| (通道 $i+1, \dots, j$ ) 谷 | -263  | 0     | -263  | -263  | ... | -210  |
| 垂尾载荷 $X_{垂}$ 峰          | -962  | 2 885 | 2 885 | 2 885 | ... | 2 885 |
| (通道 $j+1, \dots, k$ ) 谷 | -288  | 962   | -288  | -288  | ... | -288  |
| 后机身过载 $X_{身}$ 峰         | 1.7   | 1.7   | 1.7   | 1.7   | ... | 1.3   |
| (通道 $k+1, \dots, n$ ) 谷 | 0     | 0     | 0     | 0     | ... | 0.7   |

例如,  $X_{1,2} P_2 = D_{1,2}$ 表示 1 号飞行剖面谱的垂尾右面谱后压心载荷状态数据表与垂尾右面谱后压心参数表计算后得到所有通道对应于 1 号飞行剖面谱的垂尾右面谱后压心载荷状态的加载值(含峰、谷值,多段)。

由于  $P$  由  $A, B, C$  组成,每个通道加载值的计算公式  $d=A(X/B)+C$ ,例如,载荷状态 1(属于表  $X_{1,1}$ )的左平尾上通道 1 实际施加载荷是:

$$\text{峰值 } d_{1\text{峰}} = A_1 X_{\text{左峰}}/B_1 + C_1 =$$

$$-60.244 \times 2\ 105/1\ 107.4 + 210.85;$$

$$\text{谷值 } d_{1\text{谷}} = A_1 X_{\text{左谷}}/B_1 + C_1 =$$

$$-60.244 \times 0.0/1107.4 + 210.85;$$

载荷状态 1 的左平尾上通道 2 实际施加载荷是:

$$\text{峰值 } d_{2\text{峰}} = A_2 X_{\text{左峰}}/B_2 + C_2;$$

$$\text{谷值 } d_{2\text{谷}} = A_2 X_{\text{左谷}}/B_2 + C_2;$$

左平尾其他通道计算同此公式;并且右平尾、垂尾和机身各加载通道也都是这样分别与载荷状态  $X$  中对应部位的数据计算得到。注意:这种对应关系是  $P$  表的多个通道的参数对应  $X$  表的一个数据即多对一的关系。

进一步,相同压心加载区域不同的通道加载值的计算关系具有表 4 形式(以 1 号飞行剖面谱的垂尾右面谱后压心载荷状态与对应的压心参数计算表  $D_{1,2}$  为例):

表 4  $D_{1,2}$  中不同位置的通道加载值的计算关系

Table 4 Relations between channel load values and parameters at different positions in table  $D_{1,2}$

|           | 载荷状态 1                        |                               | 载荷状态 2 |      |
|-----------|-------------------------------|-------------------------------|--------|------|
|           | 峰-S1                          | 谷-S2                          | 峰-S3   | 谷-S4 |
| 左平尾载荷 $X$ | $A_i X_{\text{左峰}}/B_i + C_i$ | $A_i X_{\text{左谷}}/B_i + C_i$ | ...    | ...  |
| 右平尾载荷 $X$ | $A_j X_{\text{右峰}}/B_j + C_j$ | $A_j X_{\text{右谷}}/B_j + C_j$ | ...    | ...  |
| 垂尾载荷 $X$  | $A_k X_{\text{垂峰}}/B_k + C_k$ | $A_k X_{\text{垂谷}}/B_k + C_k$ | ...    | ...  |
| 后机身过载 $X$ | $A_n X_{\text{身峰}}/B_n + C_n$ | $A_n X_{\text{身谷}}/B_n + C_n$ | ...    | ...  |

其中: $i$ 为左平尾上通道; $j$ 为右平尾上通道; $k$ 为垂尾上通道; $n$ 为机身上通道。

表 4 中相同部位通道对载荷状态 2 中峰谷加载值的计算与各通道对载荷状态 1 的计算公式相同,同一种压心情况下使用的压心参数也相同。计算结果为正表示向上或向左加载,结果为负表示向下或向右加载。如果向上、向左加载通道的计算结果为负或者向下、向右加载通道的计算结果为正,则表示该通道处于随动状态,改其值为 0,与其对称的反方向通道处于主动加载状态。

按照上面分析和总结出的计算公式,编程实现不同压心的载荷谱各通道加载值  $D_{i,j}$  的自动生成。试验总共使用 32 个加载通道,其中 1~8 在左平尾,9~16 在右平尾,17~28 在垂尾和机身侧向,29~32 位于机身上和机身下(算法略)。

经过编程计算,得到  $D_{1,1}-D_{11,6}$  等 66 张表,2 104 段(含 32 通道实际加载值)载荷峰、谷值。

## 2 生成随机载荷谱

与飞行顺序随机的飞续飞载荷谱不同<sup>[2]</sup>,生成载荷状态全随机载荷谱的过程分 3 步进行:

第 1 步,产生一个载荷状态随机序列。

任务书给出了 127 飞行小时各种载荷状态的使用频数(见表 1)。要求试验载荷谱为随机谱,一个训练周期为一个谱循环,计 127 飞行小时,各种载荷状态以 0.1 次为单位计算频数;相同载荷状态累计频数满 1 施加 1 次,1 个谱循环共计 17 566.9 次。

由于 1 个谱循环中,载荷状态以 0.1 次为单位计算频数,给生成随机数和载荷状态序列带来不便。为了方便,采用混合乘同余法产生 1~175 669 之间整数  $k$  的伪随机数列,其中  $k$  在 1~647 内取载荷状态 1, $k$  在 648~1 003 内取载荷状态 2,以此类推。一个随机数对应载荷状态的频数为 1 次,编程产生一个长度为 175 669(1 270 飞行小时)的载荷状态随机加载序列。

第 2 步,确定每个 127 h 载荷循环中各载荷状态的加载频数和载荷循环总次数。由于 127 h 载荷循环中各个载荷状态的加载频数带有小数,只有当该种载荷状态的加载频数满 1 次时,本次 127 h 载荷循环中该种载荷状态的加载频数才能增加 1 次,不满 1 次时要后移至下一循环;因此必须先要计算出 10 次各 127 h 载荷循环中每个载荷状态的加载频数和各次含有载荷状态的总次数。计算结果如下(顺序 10 次)。

状态 1:64,65,65,64,65,65,64,65,65,65;

状态 2:35,36,35,36,36,35,36,35,36,36;

……。

各次含有载荷状态的总次数:17 120, 17 592, 17 523, 17 602, 17 745, 17 394, 17 497, 17 628, 17 487, 18 081。总次数仍为 175 669 次。

第 3 步,对第 1 步得到的 1 270 h 试验载荷谱的随机加载序列,按照 127 h 作为一个载荷循环进行分解。按照上面确定的各载荷状态在每个 127 h 载荷循环中的次数,从 1 270 h 的随机加载序列中依次提取载荷状态构成 127 h 载荷循环加载序列。每个载荷状态要按照原顺序进行排列,频数不满 1 次时要后移至下一循环,得到表 5 的 10 个随机加载飞行序列。

## 3 配置谱段加载时间

为试验载荷谱的每个加载段配上加载时间就变成了控制用的加载谱。配置加载时间的要求

表 5 10 个飞行序列中各载荷状态的随机顺序列表

Table 5 Random load status order list in 10 flights

| 顺序     | 飞行 1   | 飞行 2   | 飞行 3   | ...   | 飞行 10  |
|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
| 1      | 57     | 728    | 431    | ...   | 579    |
| 2      | 758    | 965    | 457    | ...   | 595    |
| 3      | 3      | 881    | 113    | ...   | 887    |
| ...    | ...    | ...    | ...    | ...   | ...    |
| 长度 $n$ | 17 120 | 17 592 | 17 523 | ..... | 18 081 |
| 总段数    | 34 240 | 35 184 | 35 046 | ..... | 36 162 |

是:既要使加载尽可能真实、协调、满足精度要求,又要尽可能缩短试验周期、降低试验经费。

在飞行顺序随机的飞续飞载荷谱中,随机的是飞行顺序,每个飞行中各加载段的连接顺序是固定的。分析当前已经生成的载荷谱,对某一载荷状态来说,它从峰-谷变化是固定的,但是从谷-峰变化与前一个载荷状态的谷值有关,由于随机性导致从谷-峰的变化是不惟一的,因此必须逐段定义加载时间。确定各级载荷施加时间的比较合理的方法是逐级测量各级载荷衔接变化时的尾翼形变,根据这个形变程度确定加载时间。但是,对本试验每个飞行平均长度超过 35 000 段(包括峰-谷和谷-峰)的情况来说,不可能实现逐级测量各级载荷变化,时间不允许,也不现实。若按照每个载荷状态的连接段都定义一个加载时间不同的段,则段库、块库中的段数、块数将是非常庞大的,很可能由于占用资源过大导致软件系统无法正常工作。

怎样确定各级载荷加载时间呢?分析并参考文献[3],发现加载时间与关键通道所施加的载荷密切相关,所谓关键通道是指对结构形变影响较大的通道,包括通道所在位置和载荷变化量 2 个主要因素。由于机身载荷是作为平衡载荷的,主要的载荷变化集中在平尾和垂尾上,所以平尾和垂尾上载荷变化量最大的通道就可以作为关键通道。

因为每个载荷状态从峰-谷是固定的,而从谷-峰是变化的,起始点就是前一个载荷状态的谷值。所以将段库设计为每种载荷状态按表 6 所示分为 10 个段(9 级)并配置加载时间(前 9 个是载荷相同加载时间不同的谷-峰,第 10 个是峰-谷,

表 6 载荷变化量与时间配置关系

Table 6 Relations between load changes and time settings

| 级序号 | 载荷变化量/N      | 谷-峰时间/s | 峰-谷时间/s |
|-----|--------------|---------|---------|
| 1   | 0~1 000      | 1.0     | 1.2     |
| 2   | 1 000~2 000  | 1.2     | 1.5     |
| 3   | 2 000~3 000  | 1.5     | 1.8     |
| 4   | 3 000~4 000  | 1.8     | 2.0     |
| 5   | 4 000~5 000  | 2.0     | 2.2     |
| 6   | 5 000~6 000  | 2.3     | 2.6     |
| 7   | 6 000~8 000  | 2.7     | 3.0     |
| 8   | 8 000~10 000 | 3.0     | 3.5     |
| 9   | 10 000 以上    | 3.5     | 4.0     |

载荷状态 1 的 10 个段编号为段 1~段 10, 载荷状态 2 的 10 个段编号为段 11~段 20, 依此类推), 以保证载荷状态之间无论怎样衔接, 都能按照其载荷变化量找到对应的加载段。这样, 段库按 1~1 052 个载荷状态顺序排列, 总长达 10 520 段。

时间计算中用 Delphi 7.0 编程实现: 首先, 以 1 000 N 为变化量(6 000 N 以上以 2 000 N 为变化量), 考虑到载荷从峰-谷变化(有反弹)时间应比从谷-峰变化时间略长 1.2~1.3 s, 建立了表 6 所示的配置方案, 并为 10 520 段配置时间; 其次, 在各级载荷衔接变化时, 按照表 5 中各飞行的随机载荷序列衔接关系找出平尾和垂尾上变程最大通道, 计算出该通道的载荷变化值; 最后, 依据该通道的载荷变化值, 使用表 6 的方案自动选取与载荷变化量相符合的该级序号所对应的加载段号。

最后, 编制试验加载谱。在此, 需要讲讲试验控制设备。该试验使用的是国产多通道协调加载伺服控制系统, 它采用三级分布式控制技术: 上位机采用 PC 机作为工作站, 通过局域网与多个中位机联接, 具有参数设置、载荷谱编制、系统调试、数据处理、实时监控等功能; 每个中位机采用 PC104 作为控制器, 经 VME 总线控制 16 路下位机, 用于按照上位机的命令实现多通道协调加载; 每个下位机以 TMS320C31 数字信号处理器作为控制机, 按照当前载荷段数据采用 PID 方法对一个加载通道进行闭环控制。与美国 MTS 公司控制设备的载荷谱库相同<sup>[4]</sup>, 该系统的载荷谱库按照段库、块库、飞行库、飞行顺序库(称四层库)进行组织。最底层是段库, 存放各载荷段(即载荷状态的峰谷值, 含所有通道)和该段加载时间。试验时, 由上位机按照定义的飞行顺序、飞行、块、段逐次调用, 中位机负责协调加载, 下位机按照该通道加载值进行闭环调节。由于载荷谱库按照四层库进行组织, 因此, 将各级载荷和随机序列按四层库来编制, 各库编制如下:

**段库:**按照 1~1 052 个载荷状态, 每个包含 10 段, 顺序排列, 总长达 10 520 段。

**块库:**定义 10 块, 每块按照表 5 中的随机载荷状态的峰谷和谷峰序列, 经过计算得出前一个载荷状态的谷值与后一个载荷状态的峰值这 2 个段之间的关键通道载荷变化量, 按该变化量对应的段号选定后一个加载段号。

**飞行库:**按照表 5 提取出的 10 个飞行序列, 依次编为飞行 1 至飞行 10, 每个飞行定义 1 块, 飞行序号与块号一一对应。各飞行所含的载荷状态顺

序、各通道加载值和总段数不变, 只是选用了不同的段号, 表示载荷施加时间不同。例如, 飞行 1 实际加载段顺序是 568, 570, 7 574, 7 580, 29, 30, ...。

**飞行顺序库:**将 10 个飞行序列顺次连接, 执行一遍后, 完成 1 270 h 的随机加载过程。

这样编制使各级载荷施加时间更合理, 试验运行平稳, 精度提高; 也使试验周期大为缩短, 每个 127 h 试验平均只需要 22~24 个试验小时。

经过 6 个月的试验, 各加载点稳定、协调, 试验状态良好, 加载精度较高, 实际峰值误差 $\leq 2\%$ 满量程, 动态误差 $\leq 6\%$ 满量程。目前已完成了 8 000 飞行小时疲劳试验, 取得了令人满意的结果。

## 参 考 文 献

- [1] 刘山之. 随机谱与块谱对疲劳寿命的影响[C]//: 顾伟豪. 飞机结构疲劳定寿文集(第一集). 北京: 航空工业部科学技术委员会, 1987: 603-615.  
Liu S Z. Affection to fatigue life by random spectrum and by block spectrum[C]// Gu W H. Proceedings on Aircraft Structure Fatigue Life: 1. Beijing: Science and Technology Committee, Department of Aeronautical Industry, 1987: 603-615. (in Chinese)
- [2] Li J, Chen Z W. A method and a software for constructing flight-by-flight random load spectrum[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 1992, 5(4): 300-304.
- [3] 顾伟豪. 飞机结构疲劳定寿文集(第三集)[C]//北京: 航空工业部科学技术委员会, 1993.  
Gu W H. Proceedings on aircraft structure fatigue life: 3 [C]//Beijing: Science and Technology Committee, Department of Aeronautical Industry, 1993. (in Chinese)
- [4] 李健. 在多通道自动协调加载系统上实现飞行顺序随机的飞续-飞试验载荷谱[J]. 航空学报, 1990, 11(4): B213-B214.  
Li J. On multiple channel automatic control system, implementing the flight-flight test profile in random sequence [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1990, 11 (4): B213-B214. (in Chinese)

作者简介:



**李 健**(1959—) 男, 博士, 高级工程师。主要研究方向: 自动控制技术、计算机网络、软件与应用。

Tel: 66713599-8891

E-mail: qianyuli@263.net



**张 强**(1972—) 男, 学士, 工程师。主要研究方向: 流体传动及控制、机械设计。

Tel: 66713599-8035

(责任编辑: 李铁柏)