

# 一种飞-续-飞随机谱的编制方法及软件

李健 陈志伟

(北京 9203 信箱 10 室, 北京, 100076)

## A METHOD AND A SOFTWARE FOR CONSTRUCTING FLIGHT-BY-FLIGHT RANDOM LOAD SPECTRUM

Li Jan, Chen Zhi-wei (First Institute of air force, Beijing, 100076)

**摘 要** 本文介绍了一种飞-续-飞随机谱的编制方法和软件。它以空测的重心过载数据为基础, 经过数据处理后, 建立对应于每个飞行任务的 Markov 矩阵。并调整统计平均后的 Markov 矩阵以保证可得到一个不中断的过载序列。然后从矩阵中抽取半循环序列, 构成飞-续-飞随机谱。本文中讨论了矩阵中半循环的随机抽取方法, 给出了应用实例。

**关键词** 随机载荷, 载荷谱, Markov 矩阵

**Abstract** The paper presents a method and a software for constructing flight-by-flight random load spectrum. Based on load factors at centre of gravity measured in flights, the software creates Markov matrix corresponding to each flight mission after processing the data. The statistical averaged Markov matrix is adjusted to ensure an obtainable uninterrupted load sequence. Then, a sequence of half-cycle is drawn from the matrix to construct a flight by flight random load spectrum. The drawing method for half-cycle in the matrix is discussed, and an example of application is given in the paper.

**Key words** Random load, Load spectrum, Markov matrix

为了编制出战斗机机动载荷的飞-续-飞随机过载谱, 研制了一套计算机软件。在方法上比北大西洋公约组织的疲劳评定载荷标准<sup>[1]</sup>有所改进。下面就有关的主要方面做一些介绍。

### 1 软件功能与结构

(1) 对空测得到的飞行任务的重心过载历程进行处理, 即进行滤波和分级, 得到满足要求的各级过载的标准峰谷值序列。

(2) 建立对应于飞行任务的峰谷载荷的 Markov 矩阵<sup>[2]</sup>。

(3) 可以把同一飞行任务多次飞行实测数据合并到一个 Markov 矩阵中, 并对其元素按飞行次数取统计平均。

(4) 对矩阵中的峰谷或谷峰半循环进行随机抽取, 形成一个可用的典型飞行任务随机过载序列。

(5) 根据各飞行任务的比例系数阵, 随机安排各飞行任务的顺序<sup>[3]</sup>, 形成一个完整周期飞-续-飞随机谱。其中, (1) ~ (4) 项是载荷谱编制的基础。这部分程序的结构框图示于图 1。

### 2 关于 Markov 矩阵

对实测的飞行数据通过程序进行滤波、分级处理后, 构造出按载荷(过载)峰谷分级

1990年2月9日收到, 1990年7月20日收到修改稿

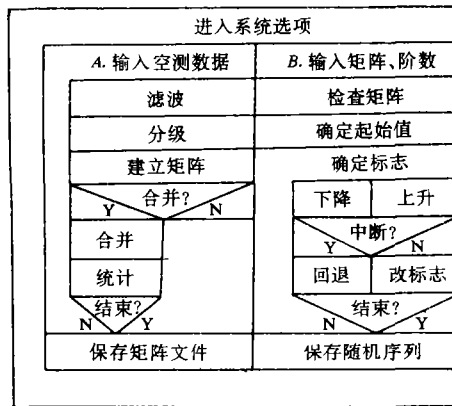


图 1 飞行任务处理的软件结构框图

排列的 Markov 矩阵。一个飞行中所有载荷上升的半循环（谷→峰）记数都排列在矩阵的左下三角区内（简称下半区），所有载荷下降的半循环（峰→谷）记数都排列在矩阵的右上三角区内（简称上半区），并将主对角线元素划去。对于实际飞行来说，若把重心过载历程中各峰谷的载荷级别看作一个节点，则每次飞行载荷历程都是一个可连续一笔画下来的历程，因此“一笔画”问题的特点都充分地反映在 Markov 矩阵中。将 Markov 矩阵中所有从 I 点（载荷级）开始的半循环总数称为 I 的走出数，把所有终止于 I 点的半循环总数称为 I 的进入数，那么根据可解的“一笔画”问题的特点，一次飞行的 Markov 矩阵具有下述性质：

(1) 矩阵上半区内第  $i$  行元素之和为  $i$  点的降载进入数  $A_i$ ，而下半区内第  $i$  列元素之和为  $i$  点的升载走出数  $B_i$ ；类似地，矩阵下半区第  $i$  行元素之和为  $i$  的升载进入数  $A_i$ ，而上半区第  $i$  列元素之和为  $i$  的降载走出数  $B_i$ 。由于升载与降载历程必须交替出现，对于任意的  $i$ ，不是  $A_i = B_i$ ，就是  $A_i = B_i \pm 1$ 。

(2) 所有  $A_i = B_i$  的点（载荷级）可以出现在历程中的任意位置上。一个历程可以完全由历程起点从任意处开始，并终止于同一点。

(3) 一个完整的“一笔画”历程中， $A_i = B_i \pm 1$  的点至多只能各有一个，且  $A_i = B_i - 1$  处必须为历程起点， $A_i = B_i + 1$  处必定为终点。

在多个同类型飞行任务数据作统计平均并将频次取整后，Markov 矩阵的上述性质可能会被破坏。若按此矩阵直接进行抽取，则可能造成抽取中断，即矩阵非空而在半区内某列元素和为 0（无法走出）。北大西洋公约组织的 FALSTAFF 谱在此时使用了“插入模式”或“跳跃模式”，使其能形成完整的连续载荷历程。这种插入或跳跃发生在何处以及发生次数是不可预知的（不可干预的），从而使编制出的载荷历程中有了一些不确定的附加载荷变程。为了避免插入一些附加的载荷变程而又使形成的载荷谱自然地连续，我们对平均后的 Markov 矩阵进行调整，以使它仍能保持上述性质，这就保证了该飞行任务仍是一个可解的“一笔画”历程。调整统计平均的 Markov 矩阵时，对各级  $i$  点逐级检查。对不满

足上述性质的点,只要在相邻载荷级间增减一次就能达到要求。

### 3 随机序列的生成

由 Markov 矩阵生成随机载荷序列的算法如下:

(1) 检查矩阵上半区元素和与下半区元素和,应至多相差 1,并分别对升载进入与降载进入情况逐级检查  $A_i$  与  $B_i$ ,确保至多只有一个  $A_i$  与  $B_i$  相差 1。否则要求调整 Markov 矩阵。

(2) 根据检查结果,按下述原则选择起始载荷级(列号),设立升载或降载标志(确定半区位置),该列号进入随机序列。

原则 a 若对任意  $i$ ,总有  $A_i \geq B_i$ ,则以下半区中最先出现  $B_i \neq 0$  的载荷级(列号  $i$ )为起始点(从升载开始)。

原则 b 若有一个  $i$ ,使  $A_i = B_i - 1$ ,则以该载荷级  $i$ 作为起始点,并根据  $B_i$  是升载还是降载设置相应标志。

(3) 在相应半区内,随机抽取该列中非 0 元素的行号,并把抽中行内元素的内容减 1。

(4) 判断矩阵空否。若空,则表明完成了本飞行任务的随机载荷编排,输出随机序列后继续其它飞行任务;若不空,则继续至下面(5)。

(5) 以该抽中的行号为列号,作为下次载荷半循环的起点,查该列在相应半区内元素和是否为 0。若为 0,则回退至上个载荷半循环,即作回退处理后转(3)。否则,继续至下面(6)。

(6) 把该列号纳入随机序列,修改升载或降载标志(使下次抽取进入另一半区),然后转(3)。

### 4 应用实例

表 1

$\begin{matrix} g \\ n \end{matrix}$	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5
1	0	0	1	2	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	4	2	2	3	3	2	1	1	0	0	0	0	0
3	2	3	0	0	1	1.7	1	0.2	0	0	0	0	0	0	0
4	1	3	0	0	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	2	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
6	1.7	4	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	2	2	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0.2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(其余 5 行元素均为 0)。

对所有典型飞行的全部空测重心过载数据,应用本软件进行处理,编制出了飞机重心过载的飞-续-飞随机谱。现把一个飞行任务的处理情况举例如下。该飞行(代号 15)共

空测 4 次, 经滤波、分级规整后, 得到从 0.5g~7.5g 级差为 0.5g 的 15 级标准峰谷过载, 填入 Markov 矩阵并统计平均, 如表 1。

经过取整并进行调整后的 Markov 矩阵如下:

0	0	1	2	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	4	2	2	3	3	2	1	1	0	0	0	0	0
2	3	0	0	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	3	0	0	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	2	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	4	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	2	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(其余 5 行元素均为 0。)

产生的该飞行任务的一个随机过载序列为:

0.5	1.5	0.5	3.5	2	4	1	2	1	4.5	0.5	3
1.5	3	1	1.5	1	1.5	1	3	2	2.5	2	4.5
1	5	1	3.5	0.5	1.5	1	4	1	2	0.5	3.5
1	3	0.5	3	2.5	3.5	1	3	2	3	1	3
1	2	0.5	2	1	2.5	1.5	3.5	1	2.5	1	3.5
2.5	3	1.5	3.5	1.5	2.5	1	1.5	1			

按照本文提出的方法和软件, 成功地编制出了一个完整飞行周期的飞-续-飞随机谱, 不再需要在过程中增加任何“插入”或“跳跃”处理。根据这个重心过载谱, 再利用适当的过载-应力转换关系, 就可得到飞机上某部位处的局部应力谱, 进行试片疲劳寿命对比试验, 或进行疲劳寿命估算。

### 参 考 文 献

- 1 蒋祖国. 战斗机疲劳评定载荷标准. 飞机强度规范参考资料 (一), 第三机械工业部第六研究院, 1982; 158~169
- 12 航空工业部科学技术委员会编著. 飞机结构损伤容限设计指南. 航空工业部科学技术情报研究所, 1985
- 13 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, 航空学报, 1990; 11: (4) B213~B214