

文章编号: 1000-8055(2003)06-0727-05

操作相关的发动机载荷谱模型 与仿真研究

宋迎东, 孙志刚

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 以某型歼击机发动机重心法向过载谱为例, 进行统计分析, 建立了与操作相关的航空发动机载荷谱的数学模型, 并验证了模型的合理性。研究表明: 一个操作相关的发动机载荷谱可以用泊松随机过程描述, 由持续时间分布和到达时间间隔分布以及载荷持续时间累积频次曲线和载荷穿级计数次数累积频次曲线等四个因素完全确定, 其中持续时间和到达时间间隔均服从指数分布。在保证上述四个方面等效的基础上, 提出了操作相关的载荷谱仿真方法, 并对该发动机的重心法向过载谱进行了仿真, 结果表明与实测载荷谱吻合较好, 仿真方法可行。

关键词: 航空、航天推进系统; 航空发动机; 载荷谱; 操作; 模型; 仿真

中图分类号: V 231.91

文献标识码: A

Model and Simulation of Aeroengine Load Spectrum Related to Operation

SONG Ying-dong, SUN Zhi-gang

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The paper presents a model of aero-engine load spectrum related to operation, and makes a statistic analysis for vertical overload factor spectrum of a fighter engine center of gravity. The model is proved reasonable. The results show that load spectrum related to operation can be described by Poisson stochastic processes, which are completely determined by four factors such as distribution of loading duration, distribution of loading arrival interval, frequency accumulation curve of loading duration and frequency accumulation curve of loading level crossing by Level Crossing Counting. The loading duration and the loading arrival interval yield exponent distribution. Based on the equivalent of the four factors, a simulation method for load spectrum related to operation is provided. As an example, the vertical overload factor spectrum of the engine is simulated. The results are satisfactory and show that this simulation method is correct.

Key words: aerospace propulsion system; aero-engine; load spectrum; operation; model; simulation

收稿日期: 2003-01-26; **修订日期:** 2003-05-14

作者简介: 宋迎东(1969-), 男, 安徽太湖人, 南京航空航天大学能源与动力学院教授, 主要从事航空发动机结构强度与振动研究。本文系第十一届中国航空学会航空发动机结构强度与振动学术会议优秀论文。

为了提高发动机的推重比,就必须最大发挥材料的性能,这就要求对零部件进行准确的应力分析和寿命分析,而这又取决于合理、可靠的载荷。目前我国对多种型号的发动机飞行载荷谱进行了比较全面的空测和统计,获得了大量有用的使用信息。航空发动机的飞行载荷谱是随机的,如叶片、转子系统的高频振动载荷谱以及发动机转速谱、飞行速度谱等等。对于高频振动随机谱通常采用功率谱分析方法,而发动机转速谱、发动机重心法向过载系数谱以及飞行速度谱的谱型与飞机的操作密切相关,譬如飞机在做机动飞行时发动机转速剖面表现为从最大到慢车之间的反复变化,形成典型的慢车—最大—慢车循环。发动机重心法向过载系数谱则基本从1.0增大到某一极大值后再回到1.0,对应于一个个机动飞行动作。合理地建立这种与操作有关的载荷谱的数学模型,对于发动机飞行载荷谱的预测以及确定发动机的多参数载荷组合^[1]都具有重要的意义。本文以某型歼击机发动机重心法向过载谱为例,进行了统计分析,建立了与操作有关的航空发动机载荷谱的数学模型,得到了该发动机重心法向过载谱的统计规律,验证了数学模型的合理性,并提出了仿真方法,进行了仿真计算。

1 操作相关的发动机载荷谱模型

1.1 描述方法

与飞机的机动飞行载荷谱类似^[2],航空发动机的载荷谱的谱型通常也与操作使用有关,如发动机的转速、过载、温度、高度等的载荷谱,可以分

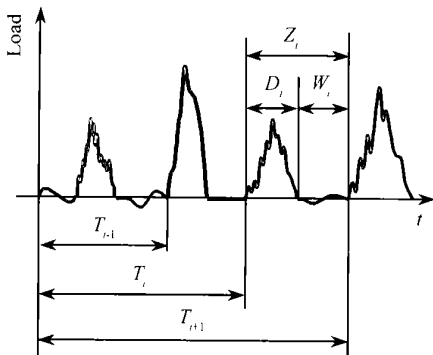


图1 与使用有关的随机载荷谱

Fig 1 Stochastic load spectra related to operation

离出几个大幅度变化的信号。如图1为一个典型的与操作有关的载荷谱,它由一个个任务段组成,每一个任务段持续时间 D_i 之后,有一个等待时间

W_i ,紧接着下一个任务段。任务段到达时间间隔 Z_i 等于任务段 $i+1$ 的开始时间 T_{i+1} 与任务段 i 的开始时间 T_i 之差,如图1所示。当 D 、 W 和 Z 中任意两个确定以后,就可以完全确定一个随机载荷谱的时间轴上的发生情况。

随机过程理论表明^[3]:泊松随机过程适合于描述与随机事件的到达时间和到达时间间隔。对于一个泊松过程在时间间隔 $(0, t)$ 内出现 m 个事件的概率 $P(t)$,由下列关系式给出:

$$P(t) = \frac{(\lambda t)^m}{m!} e^{-\lambda t} \quad (1)$$

式中: λ 为泊松参数。泊松过程的第 i 个任务段的到达时间 T_i 的分布函数为:

$$F_{T_i}(t) = 1 - e^{-\lambda t} \sum_{j=0}^{i-1} \frac{(\lambda t)^j}{j!} \quad (2)$$

两个相邻到达时间之差为到达时间间隔 $Z_i = T_{i+1} - T_i$,则 Z_i 也是一个随机变量,它的分布函数具有指数形式:

$$F_Z(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (3)$$

同理,与使用有关的任务段的持续时间 D 将服从分布:

$$F_{D_K}(\tau) = 1 - e^{-\mu \tau} \sum_{j=0}^{K-1} \frac{(\mu \tau)^j}{j!} \quad (4)$$

$K = 1, 2, 3, \dots$ 是自由参数。令 $K = 1$ 得到:

$$F_D(\tau) = 1 - e^{-\mu \tau} \quad (5)$$

这样到达时间间隔 Z 和持续时间 D 的概率分布就可以由(3)和(5)表示的指数分布完全确定下来,从而操作相关的载荷谱在时间轴上的发生情况就可以确定。

根据蠕变理论,蠕变损伤主要取决于载荷的持续时间,因此可以由各级载荷持续时间累积频次曲线表示,而疲劳损伤可以按照不同的计数统计结果描述,譬如穿级计数次数累积频次曲线或者雨流计数循环次数累积频次曲线^[4,5]。本文按穿级计数次数累积频次曲线进行模型的研究。

综合上述分析表明:一个操作相关的载荷谱,可以通过两个指数分布,即(3)和(5)以及两个累积频次曲线(各级载荷持续时间累积频次曲线和载荷穿级计数次数累积频次曲线)来完全描述。

1.2 某发动机机动飞行载荷谱的统计分析

根据上述方法,本文统计分析了某战斗机发动机7个机动飞行任务的重心法向过载系数谱。图2为持续时间 D 的概率分布,从统计结果可见,在持续时间中存在一些大于100 s 以上的数据,明显与小于100 s 的数据不在一条直线上,这些明显

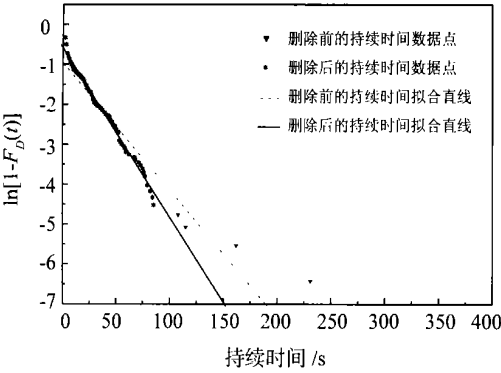


图2 持续时间D 的分布

Fig 2 Distribution of duration D

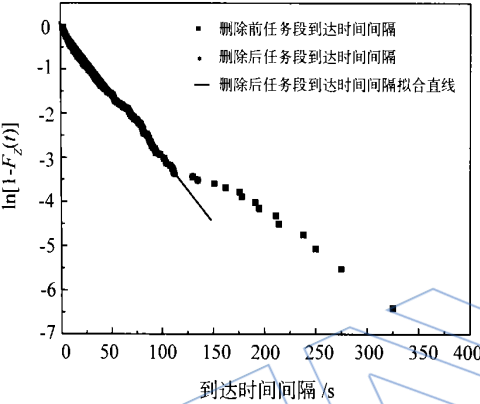


图3 达到时间间隔 Z 的分布

Fig 3 Distribution of arrival interval Z

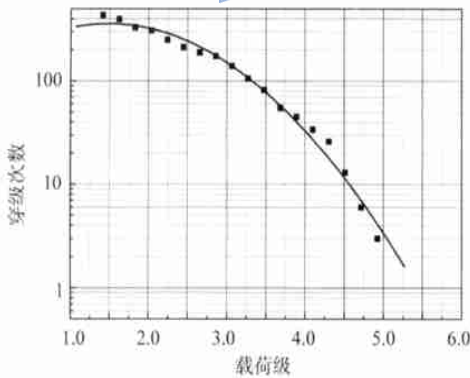


图4 载荷持续时间累积频次曲线

Fig 4 Frequency acumulation curve of loading duration

过大的数据实际上是空中飞行前后的起飞和降落段, 不属于空中机动飞行, 因此与空中飞行的数据不是来源于一个母体, 必需剔除, 否则估计出来的分布参数会有很大的误差, 不能真实反映机动飞

行的任务特征。同样到达时间间隔也具有类似的特点, 图3为到达时间间隔 Z 的概率分布。从图中可以看出, 剔除起飞和降落段后, 机动飞行时该发动机重心法向过载谱的持续时间 D 和到达时间间隔 Z 服从指数分布, 拟合直线具有很高的相关性。

此外, 本文还统计了各级载荷持续时间的累积频次曲线, 如图4。各级载荷的穿级计数次数累积频次曲线见图5。这两条累积频次曲线包含了该机动飞行载荷谱的蠕变载荷和疲劳载荷的损伤信息。

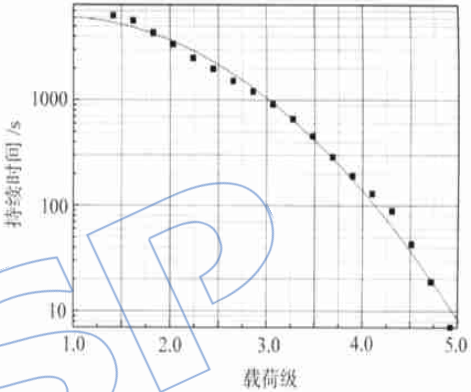


图5 载荷穿级计数次数累积频次曲线

Fig 5 Frequency acumulation curve of loading level crossing

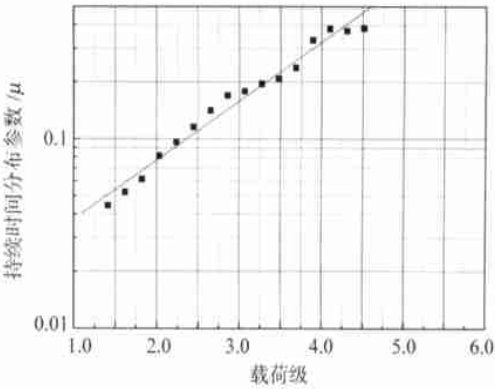


图6 载荷持续时间分布参数与载荷级之间的关系

Fig 6 Relation between ditribution parameter of loading duration and load level

为深入研究发动机机动飞行载荷谱的特征, 统计了各级载荷持续时间的分布参数 μ 随载荷级的变化情况, 如图6所示, 可见在半对数坐标系中分布参数 μ 与载荷级成直线关系。本文还统计

了等待时间 W 的分布情况,如图7为删除起飞段和降落段的等待时间统计处理结果,从该图可见拟合直线的相关性要明显小于图2和图3,但是相关系数仍然可达0.97949。实际上等待时间 $W = Z - D$,而 Z 和 D 均是指数分布,理论上两个指数

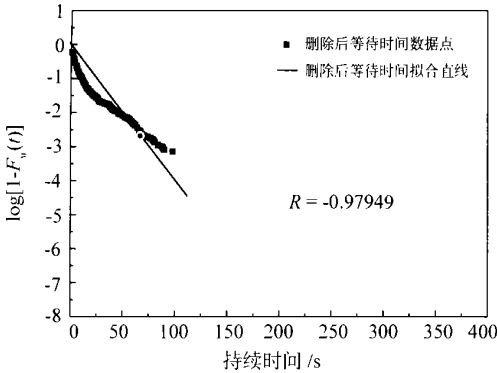


图7 等待时间 W 的分布

Fig 7 Distribution of waiting time W

分布之差并不是指数分布,只不过其分布与指数分布较接近,因此利用指数分布来描述等待时间 W 只是一种近似。

2 操作相关的发动机载荷谱仿真

对发动机载荷谱进行仿真时,必须保证:(1) 仿真谱载荷的持续时间分布与原谱相同;(2) 仿真谱载荷的到达时间间隔分布与原谱相同;(3) 仿真谱的载荷穿级计数次数累积频次分布和各级载荷持续时间累积频次分布与原谱相同。条件(1)和(2)保证仿真谱与原谱在操作方面是一致的,条件(3)使仿真谱与原谱在疲劳和持久蠕变损伤是等效的。根据上述原则,提出了以下方法仿真方法。

2.1 仿真方法^[6]

(1) 据穿级计数次数累积频次曲线获得最小的载荷级 L_0 的任务段数量 n_0 。

(2) 利用反函数法,产生 n_0 个满足载荷持续时间分布的随机数 t_{0i} ($i = 1, 2, \dots, n_0$) 作为 L_0 级载荷的任务段持续时间。

(3) 据穿级计数次数累积频次曲线计算出在该级应结束的波形数 Δn_0 ,取 Δn_0 个最小的随机数所对应的波形在该级结束,结束的波形在该级用半正弦波模拟,正弦波的幅值要小于 $\Delta L = L_1 - L_0$ 。

(4) 用 $t_{1j} = \frac{D_1}{D_0} t_{0j}$ ($j = 1, 2, \dots, n_1 - \Delta n_0$), 计算出 L_1 级任务段的持续时间,其中 D_0 为能达到该

级的波形所对应的 L_0 级的持续时间的总和, D_1 为波形所对应的 L_1 级的持续时间的总和, t_0 为该波形所对应 L_0 级的持续时间,在 L_1 和 L_0 之间用半正弦信号来模拟。

(5) 重复(1)~(4)步直至达到最大的载荷级为止。

(6) 结束上述步骤后,将形成任务段数据源,它们满足穿级次数和各级载荷累计时间与原始谱相同。从任务段数据源中随机选择进行排列,从而得到与操作有关的载荷谱。

图8 仿真的载荷谱片段

Fig 8 Segment of simulated load spectrum

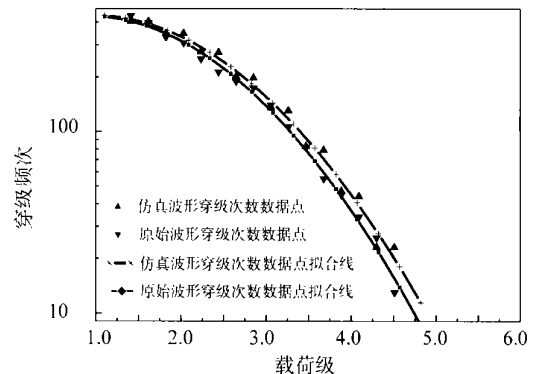


图9 原始谱与仿真谱的穿级次数频次分布

Fig 9 Frequency accumulation curve of loading level crossing of initial and simulated spectrum

2.2 某发动机载荷谱仿真

作为一个实例,按照图2~图5对该发动机的载荷谱进行了仿真模拟。图8是仿真波形的一部分。图9、10中的模拟载荷谱的统计分析结果表明:仿真谱与原始谱的穿级计数次数累积频次分布和载荷持续时间分布有较好的一致性。穿级计数次数分布的误差主要是模拟和统计时载荷所分的段数不同产生的;持续时间分布的差别主要来源于

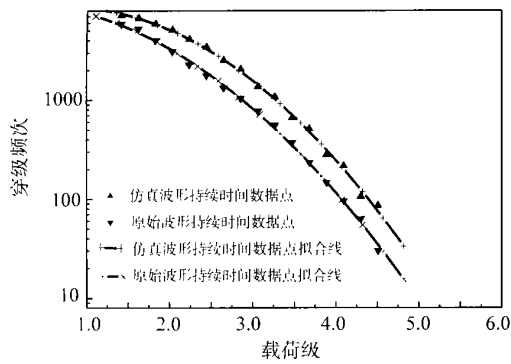


图10 原始谱与仿真谱持续时间累积频次分布

Fig. 10 Frequency acumulation curve of loading duration of initial and simulated spectrum

对原始谱进行统计处理时滤波方法的影响^[6]。从穿级计数的观点, 只要保证穿级计数结果的一致, 就可以保证疲劳损伤的等效。

3 结 论

本文的研究得到以下几个结论:

- (1) 一个操作相关的发动机载荷谱, 可以通过持续时间和到达时间间隔以及各级载荷持续时间累积频次曲线和载荷穿级计数次数累积频次曲线来完全描述。
- (2) 操作相关的发动机载荷谱的持续时间和到达时间间隔均服从指数分布。
- (3) 提出的操作相关载荷谱仿真方法, 可以保证仿真载荷谱与原谱疲劳蠕变损伤一致, 同时保证操作上的统计相似性。

参考文献:

- [1] 宋迎东, 张勇, 温卫东, 等 多参数载荷组合的概率分布研究[J] 航空动力学报, 2001, 16(4): 331- 334
- [2] 飞机强度规范参考资料(九) [R] 北京: 航空航天工业部《A SST》系统办公室, 1992
- [3] 周荫清 随机过程导论[M] 北京: 北京航空学院出版社, 1987.
- [4] 刘义伦 工程构件疲劳寿命预测理论与方法[M] 湖南: 湖南科学技术出版社, 1997.
- [5] 酆明 结构抗疲劳设计[M] 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [6] 孙志刚 航空发动机载荷谱模型与仿真[D] 南京: 南京航空航天大学, 2002