

# 疲劳载荷谱 B 氏等效与试验验证

金甲<sup>1,\*</sup>, 姚卫星<sup>2</sup>, 谢飞<sup>1</sup>, 许力蒲<sup>1</sup>

1. 南京航空航天大学 飞行器先进设计技术国防重点学科实验室, 南京 210016

2. 南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016

**摘要:** 疲劳试验是确定结构疲劳特性的最有效手段。为缩短疲劳试验时间, 通常采用低载截除方法。相对于低载截除, 载荷折算能进一步缩短试验时间, 减小成本。为了能够合理地对待载荷谱进行简化浓缩, 本文选取了 Bhattacharyya 距离 (简称 B 距离) 作为衡量原谱与等效谱寿命相似程度的参量, 综合考虑了寿命均值与分散性, 得到浓缩后疲劳载荷等效谱。基本方法是在给定折算水平下, 得到相应 B 距离最小的等效谱, 并进行了缺口试验件的试验验证。结果表明, 该方法合理有效, 可大幅缩短试验时间。

**关键词:** B 距离; 缺口件; 载荷折算; 疲劳载荷谱; 载荷谱等效;  $p$ - $S$ - $N$  曲线

中图分类号: V215.5 文献标志码: A 文章编号: 1007-5453 (2016) 07-0057-07

疲劳破坏是大多数工程结构失效的最主要形式之一, 其疲劳特性需要依靠实际载荷谱下的疲劳试验进行测试。而在实际的载荷-时间历程中, 占绝大部分的小幅循环不产生或产生很小损伤, 却占用大量的试验时间, 因此, 加速疲劳试验是结构疲劳特性评定的重要组成部分。加速疲劳试验的途径主要有 5 种: 超声振动疲劳试验<sup>[1,2]</sup>、删除小载荷<sup>[3,4]</sup>、载荷折算<sup>[5-9]</sup>、幅值增强<sup>[10]</sup>和严重谱法<sup>[11]</sup>, 其中, 载荷等效折算为加速疲劳试验技术的重要组成部分。

真实载荷-时间历程下零构件承受的交变载荷的幅值一般总是不规则变化的, 通常称之为变幅载荷, 也叫不规则载荷。最初, 载荷等效折算往往仅仅考虑原谱与折算谱的块谱寿命相当, 也就是应用损伤等效原理, 损伤计算一般采用线性 Miner 理论。虽然这些方法简单易行, 但对于工程上最常见的缺口结构, 这些方法不仅没有考虑载荷的顺序效应, 也没有考虑等效折算对疲劳寿命分散性产生的影响, 因而会产生较大误差。王永廉<sup>[12]</sup>在使用跑道计数法 (Racetrack Counting Method) 对随机谱进行简化和浓缩处理的基础上, 比较了 5 种等损伤等幅块谱模型, 得到 5 种模型的估算寿命与试验寿命比值分布范围均从 0.27 到 1.12。

苏开鑫<sup>[13]</sup>根据损伤等效当量折算理论, 综合起落架的

载荷谱特点, 分别提出了平均应力相同、最小应力相同和已知应力比参数下的等效折算方法, 并注意保持谱型和载荷施加顺序不变。平安<sup>[14]</sup>在强化载荷谱时对所有载荷按比例进行折算放大。沈永峰<sup>[15]</sup>则在损伤等效基础上使用五级程序谱。

本文考虑了材料和载荷的统计特性, 提出了一个基于 Bhattacharyya 距离 (简称 B 距离) 的载荷谱等效方法, 并进行了缺口试验件的试验验证。结果表明该方法合理有效, 可大幅缩短试验时间。

## 1 载荷谱等效思想

从统计学的角度来看, 传统的载荷谱编制方法存在 2 个问题, 一是没有定量考虑载荷和损伤的随机性质, 只是靠经验或工程判断方法取值; 二是仅仅考虑损伤或寿命、疲劳强度的均值, 这与实际的损伤情况有很大出入。

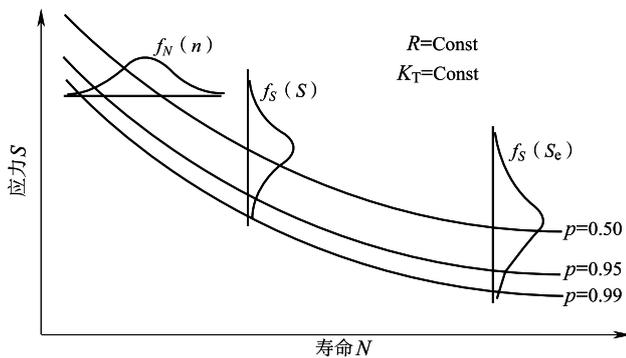
通常情况下, 构件的材料特性、几何特性、载荷历程和环境条件都有一定的随机性, 使得结构的疲劳寿命有一定的分散性<sup>[16]</sup>。实践中, 直接通过试验获得疲劳强度的分布十分困难, 而是通过疲劳寿命的分布推算疲劳强度的分布。通常, 人们用不同可靠度下的  $S$ - $N$  曲线即  $p$ - $S$ - $N$  曲线来描述处于某一应力场中的材料的疲劳强度, 如图 1 所示。

收稿日期: 2016-04-20; 录用日期: 2016-06-14

基金项目: 国家自然科学基金 (51275241), 江苏省高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD)

\* 通讯作者. Tel.: 18168020772 E-mail: 615427096@qq.com

引用格式: JIN Jia, YAO Weixing, XIE Fei, et al. Equivalence of fatigue load spectra based on B-distance with experimental verification[J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27 (07): 57-63. 金甲, 姚卫星, 谢飞, 等. 疲劳载荷谱 B 氏等效与试验验证 [J]. 航空科学技术, 2016, 27 (07): 57-63.

图1  $p$ - $S$ - $N$  曲线示意图Fig.1 Schematic diagram of  $p$ - $S$ - $N$  curve

对于载荷折算,折算后的载荷幅值和载荷次数都会发生相应的改变。给定寿命的疲劳强度以及应力幅值下的疲劳寿命都有一定的分散性,因此,在不考虑载荷顺序效应的情况下,其分散性通常也会相应改变,再加上顺序效应等疲劳缺口效应改变带来的影响,可能会使试验结果差距很大,使得使用折算谱的试验结果失真。因此,仅仅考虑平均寿命来进行等效折算远远是不够的,为了保证编制的等效谱的分散性和均值同时符合要求,这里使用 B 距离对编谱前后载荷谱的寿命差异进行描述。

在统计学中, B 距离被用来度量 2 个随机变量的概率分布的相似程度<sup>[17]</sup>, B 系数的定义为:

$$D = \int \sqrt{f(x)g(x)} dx \quad (1)$$

假定 2 个随机变量的概率分布在同一定义域内,其分布密度函数为  $f(x)$  和  $g(x)$ , B 距离的定义为:

$$D_B(F||G) = -\ln \int \sqrt{f(x)g(x)} dx \quad (2)$$

若  $f(x)$  服从正态分布  $N(u, \sigma^2)$ ,  $g(x)$  也服从正态分布  $N(v, \gamma^2)$ , 则它们的 B 距离为:

$$D_B = \frac{1}{4} \frac{(v-u)^2}{\sigma^2 + \gamma^2} + \frac{1}{2} \ln \left( \frac{1}{2} \frac{\sigma^2 + \gamma^2}{\sigma\gamma} \right) \quad (3)$$

从上式可以看出, B 距离量化了 2 个随机变量的平均值和方差差异的总和。当 2 个分布完全相同时, B 距离为 0。而因为 B 系数本质上近似于对 2 个样本的重叠部分进行积分,如果 2 个样本完全没有重叠, B 系数将趋近于 0,而此时 B 距离则趋于无穷。

## 2 载荷谱的等效方法

### 2.1 基于 B 距离的载荷等效

由于载荷过程、材料性能和几何尺寸等的随机性,疲劳寿命是一个随机变量,可以采用概率分布来描述。假设原始

谱为  $S_0(E)$ ,  $S$  为应力(最大应力或幅值应力),  $E$  为应力  $S$  的超越数。给定一个载荷折算水平  $S_{eqv}$ , 将应力  $S < S_{eqv}$  的小载荷折算成大载荷,得到新载荷谱  $S(E)$ 。设载荷谱  $S_0(E)$  和  $S(E)$  的疲劳寿命为  $F$  和  $G$ , 若  $G=F$ , 则认为  $S_0(E)$  和  $S(E)$  相互等效,  $S(E)$  为原始谱  $S_0(E)$  的等效谱,  $F$  和  $G$  均为随机变量。

真实情况下,等效谱和原谱肯定会有所差异。所以载荷谱等效的任务是找到  $S(E)$  使其疲劳寿命分布在  $G$  与  $F$  之间的差异最小,其数学形式为:

$$\begin{cases} \text{find } S(E) \\ \text{min } D_B(F||G) \end{cases} \quad (4)$$

载荷谱的等效过程是将给定折算水平以下的小载荷折算为较大的载荷。而最大应力  $S_{max}$  (通常为每个块谱中超越次数为 1 的应力) 对裂纹形成寿命的影响很大,因此,载荷谱等效的过程中,最大应力应保持不变。

### 2.2 寿命分布的计算

疲劳寿命通常用  $S$ - $N$  曲线进行描述,疲劳寿命的分散性可以用相应载荷水平下的  $p$ - $S$ - $N$  曲线进行描述。有了  $p$ - $S$ - $N$  曲线,就可以依据二维概率 Miner 准则<sup>[18]</sup>,算出随机谱作用下给定可靠度结构的疲劳寿命。

$$\begin{cases} T_p \cdot \sum_i \sum_j \frac{n_{ij}}{N_{cp}(S_{ai}, S_{mj})} = 1 \\ N_{vp} = T_p \cdot \sum_i \sum_j n_{ij} \\ N_{vp} \cdot \iint_Q \frac{l(S_a, S_m)}{N_{cp}(S_a, S_m)} dS_a dS_m = 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $n_{ij}$  是载荷作用频次,  $S_{ai}$  和  $S_{mj}$  是载荷的应力幅值和均值,  $T_p$  是可靠度  $p$  时结构失效的块谱数,  $N_{cp}$  是可靠度  $p$  下等幅加载失效的载荷循环数,  $N_{vp}$  是可靠度  $p$  下构件失效的作用频次,  $l(S_a, S_m)$  是二维分布的密度函数。

对于任意连续载荷谱  $S(E)$ , 求反函数,将其写成  $E(S)$  的形式,应力  $S$  下的载荷循环数为:

$$n(S) = -E'(S) dS \quad (6)$$

式中:  $n$  为应力  $S$  的载荷循环数,  $E'(S)$  为超越数  $E$  对  $S$  的导数。任意可靠度下的疲劳寿命为:

$$T_p = \frac{1}{-\int \frac{E'(S)}{N_{cp}(S)} dS} \quad (7)$$

由式 (7) 可得原始谱  $S_0(E)$  和等效谱  $S(E)$  在任意可靠度下的疲劳寿命为:

$$\begin{cases} T_{0p} = -\frac{1}{\int_0^{S_{\max}} \frac{E'(S)}{N_{cp}(S)} dS} \\ T_p = \frac{1}{-\int_{S_{\text{eqv}}}^{S_{\max}} \frac{E'(S)}{N_{cp}(S)} dS} \end{cases} \quad (8)$$

式中： $T_{0p}$  和  $T_p$  分别为用块谱数表示的原始谱和等效谱在可靠度  $p$  下的疲劳寿命。 $N_{cp}(S)$  根据给定可靠度  $p$  下的  $p$ - $S$ - $N$  曲线得到, 结构的  $p$ - $S$ - $N$  曲线采用三参数模型描述:

$$N_{cp}(S - S_{0p})^{H_p} = C_p \quad (9)$$

式中： $S_{0p}$  为理论疲劳极限,  $H_p$  和  $C_p$  为材料常数。

假设  $F$  和  $G$  服从对数正态分布, 则式 (3) 中, 各分布参数近似计算如下:

$$\begin{cases} \mu = \lg T_{050} \\ \nu = \lg T_{50} \\ \sigma = \frac{1}{u_p} [\mu - \lg T_{0p}] \\ \gamma = \frac{1}{u_p} [\nu - \lg T_p] \end{cases} \quad (10)$$

式中： $T_{050}$  和  $T_{50}$  为原始谱和等效谱在 50% 可靠度下的疲劳寿命;  $u_p$  为给定可靠度  $p$  下的标准正态偏量。

### 2.3 寿命分布的计算

将式 (10) 代入式 (3), 在原始谱、折算水平、 $p$ - $S$ - $N$  曲线给定的情况下, 前后载荷谱的 B 距离成为与等效谱有关的函数。

$E'(S)$  为超越数  $E$  对  $S$  的导数。若函数  $E(S)$  使得  $D_B$  取最小值, 可以求得:

$$\frac{\partial D_B}{\partial E'} = 0 \quad (11)$$

假设等效谱  $E(S)$  可以由如下形式表示且在  $[S_{\text{eqv}}, S_{\max}]$  上二阶连续可微:

$$\lg E = c \lg E_0 \quad (12)$$

式中： $c$  为放大系数, 且  $c \geq 1$ 。对  $E$  求导得:

$$E' = c E_0^{c-1} E_0' \quad (13)$$

在这里,  $c E_0^{c-1} > 0$  且  $E_0$  为单调函数, 在此基础上,  $D_B$  是放大系数  $c$  的函数。求解式 (13) 即可得到  $c$  的取值。对  $D_B$  求最小值有:

$$\frac{\partial D_B}{\partial c} = 0 \quad (14)$$

## 3 算例

### 3.1 材料与试件

试验件材料为 LC4CS (7A04T6) 铝合金, 试验件如图

2 所示, 边切口试件, 应力集中系数为 4, 试件来自厚度为 2.5mm 的板材, 纵向取样。LC4CS 铝合金的力学性能如表 1 所示。

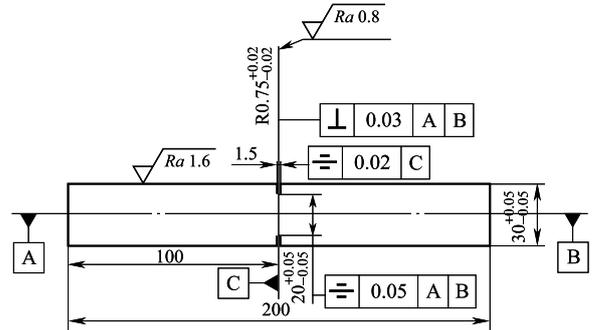


图 2 试验件尺寸

Fig.2 Specimen dimension

表 1 LC4CS 铝合金力学性能

Table 1 Mechanical properties of aluminum alloy LC4CS

抗拉强度 $\sigma_b$ / MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ / MPa	延伸率 $\delta_5$ / %
549	494	8.75%

### 3.2 随机有限元法拟合 $p$ - $S$ - $N$ 曲线

通过试验法获得缺口件的疲劳强度分散性要花费大量的时间和金钱, 尤其是升降法试验<sup>[19]</sup>, 基于这一点, 本文不使用试验法得到疲劳载荷谱分散性, 而是选取有限元抽样法处理缺口件的疲劳强度。对于普通的缺口件, 我们认为疲劳寿命是由微观结构和局部应力应变状况共同影响的<sup>[20]</sup>。这两者本身也存在一定的随机性。在常幅载荷下, 两种分散性对缺口件的影响关系可以用图 3 表示。假定缺口件和光滑件中微观结构的分散性程度是一样的。这样缺口件微观结构的分散性带来的影响就是等同的光滑件的分散性。而局部应力应变的分散性可以通过有限元抽样法进行求解获得。

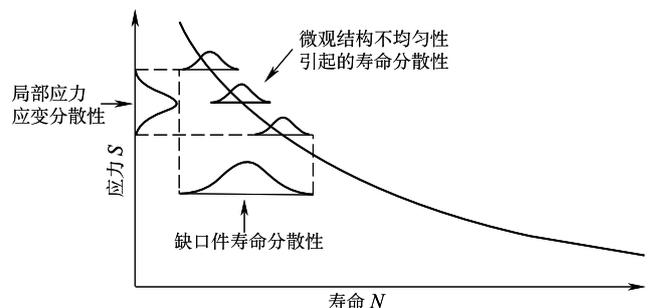


图 3 缺口件分散性示意图

Fig.3 Schematic diagram of dispersion of notched specimens

王长江<sup>[21]</sup>通过对 210MPa 下光滑件进行成组法和升降法试验, 并使用双加权最小二乘法<sup>[22]</sup>, 拟合得到在该应力水

平下光滑件的  $p$ - $S$ - $N$  曲线,如表 2 所示。缺口件疲劳寿命概率分布的拟合流程,如图 4 所示。

表 2 平均应力 210MPa 下  $p$ - $S$ - $N$  曲线参数

Table 2 The parameters of  $p$ - $S$ - $N$  curve under the mean stress 210MPa

可靠度 $p$	$H_p$	$\lg C_p$	$S_{0p}/\text{MPa}$
99.87%	1.3948	7.2577	38.5
97.72%	1.3811	7.2828	39.2
84.1%	1.3660	7.3052	39.9
50%	1.3493	7.3247	40.6
15.9%	1.3307	7.3410	41.3
2.28%	1.3102	7.3539	42.0
0.13%	1.2876	7.3630	42.7

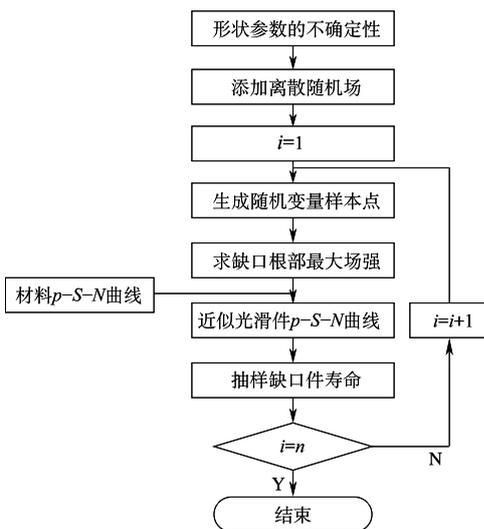


图 4 随机有限元法流程图

Fig.4 Flow chart of stochastic finite element method

使用文献 [23] 中的方法,取该试件的模量均值为 73000MPa,变异系数为 3.3%,相关函数取为单指数型, $x$  方向和  $y$  方向的相关长度假设为 10mm,载荷变异系数取 0.8%,场强积分半径取 1.8mm,再进行蒙特卡罗随机抽样,得到了应力水平 86MPa 下图 2 切口试件的  $p$ - $S$ - $N$  曲线,如表 3 所示。

表 3 应力幅值 86MPa 下本例缺口件  $p$ - $S$ - $N$  曲线参数

Table 3  $p$ - $S$ - $N$  curves of notched specimens under stress amplitude 86MPa

可靠度 $p$	$H_p$	$\lg C_p$	$S_{0p}/\text{MPa}$
99.87%	1.5011	6.8273	11.34
97.72%	1.4222	6.7358	12.42
84.1%	1.3754	6.6972	13.18
50%	1.3451	6.6855	13.75
15.9%	1.3310	6.6989	14.18
2.28%	1.3197	6.7177	14.54
0.13%	1.3198	6.7534	14.82

### 3.3 载荷谱试验

选用的载荷谱是基于曲线  $S_a = -15.6 \lg E_0 + 85.7$  使用 Twist 编谱法编制的飞续飞谱,单块谱包括 1200 次飞行,载荷循环数为  $10^{5.4936}$  次。此外考虑到载荷的顺序效应,使用雨流再建谱法<sup>[24]</sup> 编制中值损伤谱进行试验。平均应力水平为 86MPa,对于地空地循环,取地面应力  $S_g = 0\text{MPa}$ ,载荷峰值为 119MPa。根据二维概率 Miner 准则得到不同可靠度时疲劳谱的寿命,利用概率纸法检验其分布类型是否满足对数正态分布,结果发现原始载荷谱的寿命(以地空地循环数为计)可以用对数正态分布来表示。对于本算例,  $\mu = 3.8320$ ,  $\sigma = 0.056$ 。

首先进行了几组删除(低载截除)谱的试验,小载荷删除前后,保留部分的载荷顺序不变。删除谱试验中,幅值为 12MPa 水平和 14MPa 水平下的删除谱寿命分布与原始谱相同,并通过了显著性检验和方差齐性检验(即 T 检验和 F 检验)。然后再取折算水平取为 28MPa。则可以求得各放大系数水平下的概率距离值。对应以下公式:

$$\lg E = c \lg E_0 = c(5.4936 - 0.0641 S_a) \quad (15)$$

式中,  $S_a$  指的是应力幅值。对每一个  $c$  值计算等效谱  $S(E)$  的疲劳寿命分布参数  $\nu$  和  $\gamma$ 。根据式 (3) 计算 B 距离, B 距离为放大系数  $c$  的函数。对于 28MPa 等效谱  $S(E)$ ,计算得到的 B 距离最小值为 0.0109,放大系数  $c$  为 1.0915,等效谱  $S(E)$  如图 5 中的虚线所示。

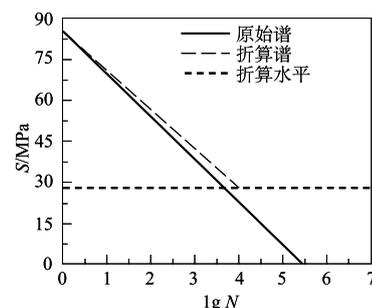


图 5 等效谱幅值应力超越数曲线

Fig.5 Exceedance curve of equivalent spectra amplitude stress

同时还计算了把载荷谱中所有载荷折算为最大载荷 85.7MPa 时,单块谱的循环次数,计算得到此时的  $N = 2045$ 。B 距离为 0.053。等效后,按等效后的连续载荷-频率曲线重新编制飞续飞谱进行试验。使用力学测试与模拟(MTS)疲劳试验机进行试验,加载频率 10Hz,试验结果如表 4 所示。每个应力水平先做 5 件,获得疲劳寿命后进行了最小件数的检验,检验结果表明:5 件能够满足 10% 精度的最小件数要求。

表4 原始谱和等效谱的试验寿命

Table 4 Test life of original spectra and equivalent spectra

载荷谱	差寿命 (以块谱计算, 1块谱=1200次飞行)	寿命均值	标准差	寿命比	循环数比
<12MPa 删除谱	5.06, 4.94, 4.87, 5.11, 4.53	4.89	0.23	1	17%
<14MPa 删除谱	4.28, 5.16, 5.61, 5.16, 4.80	5.00	0.49	1.02	13%
<28MPa 折算谱	5.89, 4.86, 5.64, 5.50, 4.71	5.32	0.51	1.09	3.5%
<85.7MPa 折算谱	4.13, 4.31, 3.59, 3.79, 3.78	3.92	0.30	0.80	0.7%

以 12MPa 删除谱为基准 (原谱) 进行假设检验, 采用 T 检验法对不同载荷谱下的裂纹形成寿命的均值进行检验, 判断 2 个等效谱的寿命均值是否与原谱差异较大, 采用 F 检验法对不同载荷谱下的裂纹形成寿命的方差进行检验, 判断 2 个等效谱的寿命标准差是否与原谱差异较大<sup>[25]</sup>。取显著性水平  $\alpha = 0.05$ , 可以看出:

(1) 对于 28MPa 等效谱, 有  $T_{\alpha/2} < T < T_{1-\alpha/2}$ , 寿命均值与原谱相比, 没有显著差别。

(2) 对于 85.7MPa 等效谱,  $T > T_{1-\alpha/2}$ , 寿命均值与原谱相比有一定的差异。

(3) 对于 2 个等效谱, 有  $F_{\alpha/2} < F < F_{1-\alpha/2}$ , 寿命标准差与原谱相比没有显著变化。

$T$  和  $F$  表示的样本相关参数, 而  $T_{\alpha/2}$ ,  $T_{1-\alpha/2}$ ,  $F_{\alpha/2}$ ,  $F_{1-\alpha/2}$  均代表临界值。

由此可得出结论: 28MPa 谱的疲劳寿命与原谱同分布, 85.7MPa 谱的寿命均值与原谱相比有一定的差别, 但标准差没有差别,  $T$  检验和  $F$  检验结果如表 5 所示。

表5 T 检验和 F 检验的结果

Table 5 Results of T test and F Test

载荷谱	$T$	$T_{\alpha/2}$	$T_{1-\alpha/2}$	$F$	$F_{\alpha/2}$	$F_{1-\alpha/2}$
<28MPa 折算谱	2.75	-2.78	2.78	4.94	0.10	9.60
<85.7MPa 折算谱	7.89	-2.78	2.78	1.66	0.10	9.60

## 4 结论

(1) 与小载荷删除谱相比, 本文的载荷等效方法能够进一步压缩载荷谱, 节约试验时间。而且试验验证说明是有效的。

(2) 本文选取折算水平依然略显偏大, 尤其是 T 检验只是勉强符合, 在试验经费和时间许可时, 应适量减小折算水平。

## 参考文献

- [1] Pyttel B, Schwerdt D, Berger C. Very high cycle fatigue is there a fatigue limit[J]. International Journal of Fatigue, 2011, 33 (1): 49-58.
- [2] 胡燕慧, 张峥, 钟群鹏. 金属材料超高周疲劳研究进展 [J]. 机械强度, 2009, 31 (6): 979-985.  
HU Yanhui, ZHANG Zheng, ZHONG Qunpeng. Recent development of research on very high cycle fatigue of metal materials[J]. Journal of Mechanical Strength, 2009, 31 (6): 979-985. (in Chinese)
- [3] Heuler P, Seeger T. A criterion for omission of variable amplitude loading histories[J]. International Journal of Fatigue, 1986, 8 (4): 225-230.
- [4] YAN J H, ZHENG X L, ZHAO K. Experimental investigation on the small-load-omitting criterion[J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23 (5): 403-415.
- [5] 张保法, 傅祥炯. 运输机随机载荷谱的简化与浓缩 [J]. 航空学报, 1994, 15 (1): 50-53.  
ZHANG Baofa, FU Xiangjiong. Simplifying and concentrating a set of random spectrum for transport[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1994, 15 (1): 50-53. (in Chinese)
- [6] 许晖, 傅祥炯. 浓缩随机载荷谱试验研究 [J]. 机械强度, 2003, 25 (5): 541-543.  
XU Hui, FU Xiangjiong. Test research on concentrated random load spectrum[J]. Journal of Mechanical Strength, 2003, 25 (5): 541-543. (in Chinese)
- [7] 熊峻江, 高镇同, 费斌军, 等. 疲劳 / 断裂加速试验载荷谱编制的损伤当量折算方法 [J]. 机械强度, 1995, 17 (4): 39-42.  
XIONG Junjiang, GAO Zhengtong, FEI Binjun, et al. The equivalent damage calculation method to compile the fatigue/fracture accelerated test load spectrum[J]. Journal of Mechanical Strength, 1995, 17 (4): 39-42. (in Chinese)
- [8] 隋福成, 刘文斑. 飞机等幅疲劳试验载荷谱编制技术研究 [J]. 机械强度, 2008, 30 (2): 266-269.  
SUI Fucheng, LIU Wenting. Study on the technique of developing constant amplitude load spectrum for aircraft fatigue test[J]. Journal of Mechanical Strength, 2008, 30 (2): 266-269. (in Chinese)
- [9] XIONG Junjiang, SHENOI R A. A load history generation approach for full-scale accelerated fatigue test[J]. Engineering

- Fracture Mechanics, 2008, 75 (10): 3226-3243.
- [10] 平安, 王德俊, 徐灏. 载荷谱强化等损伤寿命折算新方法[J]. 机械强度, 1993, 15 (2): 38-40.  
PING An, WANG Dejun, XU Hao. A new calculating method for converting lives according to equal damage on strengthening loading spectra[J]. Journal of Mechanical Strength, 1993, 15 (2): 38-40. (in Chinese)
- [11] Xiaofan H, Sui F C, Dong Y M, et al. Relative severity investigation in a severe load spectrum[J]. Engineering Failure Analysis, 2010, 17 (7-8): 1509-1516.
- [12] 王永廉. 随机谱下疲劳裂纹扩展的等损伤模型[J]. 强度与环境, 1994 (2): 40-48.  
WANG Yonglian. Equivalent damage model for predicting FCG life under random spectrum loading[J]. Structure & Environment Engineering, 1994 (2): 40-48. (in Chinese)
- [13] 苏开鑫. 起落架疲劳载荷谱的损伤等效当量折算方法[J]. 航空学报, 1994, 15 (1): 62-69.  
SU Kaixin. A calculation method of equivalent damage for landing gear fatigue load spectrum[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1994, 15 (1): 62-69. (in Chinese)
- [14] 平安. 疲劳载荷谱编制准则与寿命预测的研究[D]. 沈阳: 东北工学院, 1992.  
PING An. Study on criterion of constructing fatigue spectra and life prediction[D]. Shenyang: Northeastern University, 1992. (in Chinese)
- [15] 沈永峰, 郑松林, 王治瑞, 等. 某型轿车摆臂程序载荷谱编制研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24 (14): 1974-1978.  
SHEN Yongfeng, ZHENG Songlin, WANG Zhirui, et al. Research on compilation of automotive swing arm program spectrum[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24 (14): 1974-1978. (in Chinese)
- [16] 李锋, 孟广伟, 周振平, 等. 结构疲劳寿命稳健性优化设计[J]. 机械工程学报, 2010, 46 (2): 155-158.  
LI Feng, MENG Guangwei, ZHOU Zhenping, et al. Robust design of structural fatigue life[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46 (2): 155-158. (in Chinese)
- [17] Euisun C, Chulhee L. Feature extraction based on the Bhattacharyya distance[J]. Pattern Recognition, 2003 (36): 1703-1709.
- [18] 倪侃, 高镇同. 疲劳可靠性二维概率 MINER 准则[J]. 固体力学学报, 1996, 17 (4): 365-371.  
NI Kan, GAO Zhentong. Two-dimensional probabilistic MINER's rule in fatigue reliability[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 1996, 17 (4): 365-371. (in Chinese)
- [19] 徐国建, 高镇同. 升降法确定疲劳强度分布假设检验[J]. 机械强度, 1991, 13 (2): 38-42.  
XU Guojian, GAO Zhentong. Test of hypothesis on determining the distribution of fatigue strength with the up and down method[J]. Journal of Mechanical Strength, 1991, 13 (2): 38-42. (in Chinese)
- [20] 奚蔚. 缺口件疲劳寿命分布的敏度分析[J]. 科学技术与工程, 2015, 15 (14): 97-101.  
XI Wei. Sensitivity analysis of fatigue life distribution of notched specimen[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15 (14): 97-101. (in Chinese)
- [21] Wang C J, Yao W X, Xia T X. A Small-load-omitting criterion based on probability fatigue[J]. International Journal of Fatigue, 2014 (68): 224-230.
- [22] 谢金标, 姚卫星. 基于光滑件的缺口件疲劳强度分散性估算方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42 (3): 322-326.  
XIE Jinbiao, YAO Weixing. Estimation of fatigue strength scatter of notched specimen based on smooth specimen[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42 (3): 322-326. (in Chinese)
- [23] 奚蔚, 姚卫星. 一种新的缺口件疲劳寿命分布计算模型[J]. 科学技术与工程, 2013, 13 (10): 2676-2681.  
XI Wei, YAO Weixing. A new computational model for fatigue life distribution of notched specimen[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13 (10): 2676-2681. (in Chinese)
- [24] Khosrovanch A K, Dowling N E. Fatigue loading history reconstruction based on the rainflow technique[J]. International Journal of Fatigue, 1990, 12 (2): 99-106.
- [25] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 1979.  
SHENG Zhou, XIE Shiqian, PAN Chengyi. Probability and statistics[M]. Beijing: Higher Education Press, 1979. (in Chinese)

#### 作者简介

金甲 (1991— ) 男, 硕士。主要研究方向: 结构弹塑性有限

元分析及疲劳寿命预测技术。

Tel: 18168020772

E-mail: 615427096@qq.com

姚卫星 (1957—) 男, 博士, 教授。主要研究方向: 飞行器综合设计技术、飞行器先进结构设计理论、飞行器结构疲劳和可靠性、复合材料结构设计等。

Tel: 025-84892177

E-mail: wxyao@nuaa.edu.cn

谢飞 (1986—) 男, 硕士。主要研究方向: 疲劳可靠性与载荷谱编制术。

Tel: 18168021081

E-mail: 905694656@qq.com

许力蒲 (1989—) 男, 博士。主要研究方向: 飞机结构疲劳与载荷谱编制技术。

Tel: 15151876093

E-mail: 502198029@qq.com

## Equivalence of Fatigue Load Spectra Based on B-distance with Experimental Verification

JIN Jia<sup>1,\*</sup>, YAO Weixing<sup>2</sup>, XIE Fei<sup>1</sup>, XU Lipu<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense-Advanced Design Technology of Flight Vehicle, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

2. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

**Abstract:** Load spectra experiment is the confident way to determine the fatigue life of structures. In order to shorten the fatigue test time, small-load-omitting approach is usually used. Compared to the small-load-omitting, the load conversion can shorten the test time and reduce the cost much more. In order to simplify and concentrate the load spectra reasonably, the Bhattacharyya distance (abbreviation B-Distance) was selected as the parameter to measure the similarity of the original spectra and the edited spectra. Firstly the average life span and dispersion were comprehensively taken into consideration, and then a new method for spectra editing was proposed. The solution to the equivalent spectrum corresponding to an original spectrum which was obtained when the Bhattacharyya distance was to the minimum. An experiment was carried out on notched specimens to verify and the experimental results show that the proposed approach was reasonable and effective, which can greatly reduce the test time.

**Key Words:** B-distance; notched specimens; load conversion; fatigue load spectra; equivalent of load spectra;  $p$ - $S$ - $N$  curve

---

**Received:** 2016-04-20; **Accepted:** 2016-06-14

**Foundation item:** Natural Science Foundation of China (51275241), Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institution (PAPD)

\*Corresponding author. Tel.: 18168020772 E-mail: 615427096@qq.com

# 基于组合策略的航空工业企业信息化战略规划研究

罗雪莱\*

中国航空工业经济技术研究院, 北京 100029

**摘要:** 分析了开展信息化战略规划的必要性, 在回顾典型信息化战略规划方法与组合策略的基础上, 提出了一种新的适用于航空工业企业的信息化战略规划组合策略模型。模型阐明了开展信息化战略规划的具体过程与适用方法, 并从现实角度出发, 着重分析了对于信息化现状与外部约束的考查与衡量。

**关键词:** 组合策略; 航空工业; 企业信息化; 战略规划

**中图分类号:** N94; F27    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1007-5453 (2016) 07-0064-05

近年来, 互联网经济的蓬勃发展推动着用户消费习惯、企业商业逻辑、市场竞争模式的持续改变, 国家政策层面也从“两化融合”到“中国制造 2025”再到“供给侧改革”, 不断引导着企业通过自身变革来应对外部挑战。无疑, 这一轮始发于信息技术作用于“需求侧”的变革将迅速地扩展至“供给侧”, 信息化在企业创新组织模式、提升运营效率、满足市场需求进而获得竞争优势、达成战略目标等方面将扮演着更为重要的角色, 而对于以“多品种、小批量、离散制造”为特点的航空企业而言, 信息化的作用将更为突出。实际上, 我国航空工业多年来一直谋求通过信息化手段获得核心竞争力, 自 20 世纪 70 年代, 其信息化建设一直沿着工程数字化与管理信息化两条脉络持续推进, 并在 21 世纪初明显加快了建设进程, 在缩短研制周期、提升运营效率、降低企业成本等方面发挥了重要作用, 有力地保障了近年来我国飞机型号的“井喷”。

但站在更加宏观的层面上纵观国内外同类企业的信息化实践, 虽有许多企业在某点上的应用取得了突破, 或进一步地使用信息化解决方案打通了某一段运营链条, 取得了一定的成绩, 但总体情况不容乐观, 如部分企业信息化建设未能匹配企业发展战略、信息系统应用范围有限且层次较低、信息孤岛问题依旧严重、数据资产大量闲置等。有资料

表明, 超过 70% 行业的信息化投资与回报之间不存在相关关系, 超过 90% 的企业资源计划系统 (Enterprise Resource Planning, ERP) 不能在预定的时间节点或预算范围内成功上线<sup>[1]</sup>。

对于信息化建设未能达到预期目标的原因, 学术界进行了广泛的探讨。Hong 等人从组织与信息系统的匹配性出发, 论证了匹配性的高低是直接决定 ERP 实施成功与否的关键因素<sup>[2]</sup>; 孙立辉认为企业对其信息系统发展阶段缺乏清晰认识是信息化失败的重要原因<sup>[3]</sup>; 毛蕴诗指出缺乏管理理念支撑是导致我国企业 ERP 项目难以成功的根源<sup>[4]</sup>; 叶峰等人将企业信息化失败的原因归结为员工信息素质欠缺、数据质量不高以及管理与技术匹配性不足等<sup>[5]</sup>。

受上述研究启发并结合多年工作实践, 笔者认为, 科学的企业信息化战略规划的缺失正是导致信息化建设失败的根源, 开展相关研究将为企业弥补这一短板提供重要的指引。同时, 经过多年持续建设, 信息化现状已成为影响航空工业企业科学制定信息化战略规划的重要因素。本文将探讨如何在对信息化现状进行科学评价的基础上, 广泛吸收他人研究成果, 进而构建一个内涵全面、易于实施的信息化战略规划模型。

收稿日期: 2016-06-13;    录用日期: 2016-06-20

\* 通讯作者. Tel.: 010-57827619 E-mail: joygod@126.com

引用格式: Luo Xuelai. Information strategic planning based on portfolio tactics for aviation industry enterprises[J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27(7): 64-68. 基于组合策略的航空工业企业信息化战略组成规划研究[J]. 航空科学技术, 2016, 27(7): 64-68.

## 1 信息化战略规划方法回顾

### 1.1 信息化战略规划方法

企业信息化战略规划 (Information Strategic Planning, ISP) 是从组织使命、战略出发,通过建立、分析企业运营模型,逐步分解得到达成组织目标所需的信息以及存储、处理、传输这些信息的信息系统,并结合组织内、外部资源与约束,最终形成涵盖企业信息化远景蓝图、实施计划、投资预算等诸多要素在内的整体规划方案<sup>[6-8]</sup>。

自信息技术广泛应用于企业科研、生产、管理等各领域以来,信息化战略规划的相关理论与实践一直保持着相当的热度,常被学术界与企业界进行讨论与研究。许多学者和组织基于不同的信息技术发展水平、规划的出发点、范围、目的以及侧重点,提炼出了许多方法与工具,应用比较广泛的有企业系统规划法 (Business System Planning, BSP)<sup>[9]</sup>、战略系统规划法 (Strategic Systems Planning, SSP)<sup>[10]</sup>、关键成功因素法 (Critical Success Factors, CSF)<sup>[11]</sup>、价值链分析法 (Value-Chain Analysis, VCA)<sup>[12]</sup>、战略目标集转化法 (Strategy Set Transformation, SST)<sup>[13]</sup>、应用系统组合法 (Application Portfolio Approach, APA)<sup>[14]</sup>、信息工程法 (Information Engineering, IE)<sup>[15]</sup> 等。上述研究成果为企业信息化建设如何匹配企业经营战略提供了参考。

此外,众多学者对上述方法进行了归类研究。潘自强从规划方法特点出发,将其归纳为以数据为中心的规划方法、以决策信息为中心的规划方法、以运营过程为中心的规划方法和以项目为中心的规划方法等 4 类<sup>[6]</sup>;在此基础上,张玉林进行了调整,归纳为面向低层数据的规划方法、面向决策信息的规划方法、面向内部流程管理的规划方法与面向供应链管理的规划方法等 4 类<sup>[7]</sup>;Silk 将信息战略规划过程划分为 BOTTOM-UP、TOP-DOWN、INSIDE-OUT 与 MIDDLE-OUT 四大阶段,且每一阶段都指出了若干代表方法<sup>[18]</sup>;张学军从基于时间、基于方法特征、基于规划动机 3 个维度对规划方法进行了归纳总结<sup>[19]</sup>。

上述针对规划方法的分类研究在一定程度上回答了各种方法的适用场景问题。但随着市场环境变化、周期频率的不断提高、企业经营战略目标对环境变化的响应速度的不断加快,单一的企业信息战略规划方法已难以满足企业信息化战略与经营战略间的柔性需求。在此背景下,集成了多种规划方法的企业信息战略组合策略成为破解这一难题的重要途径。

### 1.2 组合策略

信息化战略规划组合策略是在对规划方法进行分析并

展开分类研究的基础上,结合不同企业的特点与需求,提出的集成了多种规划方法的信息化战略规划解决方案。潘自强等人通过对各规划方法的规划过程和规划活动进行分析,抽象出信息化战略规划的一般过程模型,并在此基础上给出各规划方法在此模型中的适用范围以及选择组合策略的具体方法<sup>[16]</sup>;张学军等人在文献 [16] 的基础上,对制定组合策略的控制规则和约束规则展开了进一步研究并给出了具体建议<sup>[19]</sup>;张玉林等人从信息化战略动态、柔性匹配企业经营战略的角度出发,提出了一种涵盖企业经营战略规划与信息化规划 2 部分的组合策略分析框架<sup>[17]</sup>。

各类组合策略的提出为企业在不同的阶段、场景采用何种信息系统规划方法给出了新的思路,使企业可以更加灵活地针对自身特点进行信息化战略规划。但现有的研究成果存在以下几方面不足:(1) 偏于宏观与抽象,企业在应用过程中存在一定的知识壁垒;(2) 大部分企业信息化经过多年的投资与建设,其现状已成为决策者在制定信息化规划时需要重点考虑的影响因素,但现有研究讨论较少;(3) 部分研究虽将信息化现状纳入了研究范围,但仅讨论了针对信息系统现状的评估,如 Nolan 模型<sup>[20]</sup>,而缺乏面向围绕信息系统规划、建设、维护而展开的包含诸多管理与技术要素在内的企业信息化体系现状的研究;(4) 针对组合策略涉及的各方法在应用过程中如何进行衔接的讨论不足。

## 2 一种新的企业信息化战略规划模型

基于上述讨论,借鉴组合策略思想,本文提出了一种新的适用于航空工业企业的信息化战略规划模型,如图 1 所示。该模型分为企业信息化战略目标分析、企业信息化现状评估及战略需求分析、企业信息化战略解决方案分析、行动方案拟定四大阶段,如图 2 所示。下文将对模型的设计思想、组成及应用进行具体阐述。

### 2.1 模型基本框架

本模型总体思路为:(1) 从企业经营战略与业务模型出发,将企业经营战略目标转化为信息化战略目标;(2) 对包含信息系统在内的企业信息化体系现状进行评估,评估结果分别支撑差距分析与企业信息化战略需求分析;(3) 基于企业信息化战略需求,在充分考虑外部环境的前提下,提出企业信息化战略解决方案,并绘制信息化战略蓝图;(4) 根据解决方案的内在逻辑,综合考虑投资预算、资源配置等约束因素,最终制定实施方案,指导企业信息化战略规划落地。