

# 基于广义 $\sigma-N$ 曲面的涡轮盘疲劳寿命预测

廖强, 黄洪钟, 朱顺鹏, 何俐萍, 凌丹

(电子科技大学机械电子工程学院 成都 611731)

【摘要】以 $\sigma-N$ 曲面为基础, 并由应力幅值 $\sigma_a$ 和平均应力 $\sigma_m$ 构建Goodman型和Gerber型广义 $\sigma-N$ 曲面方程, 对涡轮盘进行疲劳寿命估算。由某型航空发动机涡轮盘算例结果显示, 基于Gerber型等寿命曲线的估算寿命比Goodman型更接近于其真实额定寿命, 且该方法无需循环应力等效转换, 从而提高了疲劳寿命估算的精度。

关键词 疲劳寿命; Miner准则; 名义应力法;  $S-N$ 曲线;  $\sigma-N$ 曲面

中图分类号 V231.95; O346.2

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2013.02.026

## Turbine Disk Fatigue Life Prediction Based on Generalized $\sigma-N$ Surface

LIAO Qiang, HUANG Hong-zhong, ZHU Shun-peng, HE Li-ping, and LING Dan

(School of Mechatronics Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

**Abstract** On the basis of the  $\sigma-N$  curved surface, the fatigue life of turbine disk is investigated in this paper by constructing Goodman and Gerber types of generalized  $\sigma-N$  curved surface equation based on stress amplitude and mean stress. An example of an aircraft engine turbine disk is presented to validate the proposed method, and the results show that the prediction from Goodman equivalent life curve is much better than that of Gerber type model. In addition, there is no need to equivalently convert the cyclic stress in above method. This method can improve the accuracy of fatigue life estimation.

**Key words** fatigue life; Miner criterion; nominal stress method;  $S-N$  curve;  $\sigma-N$  surface

目前疲劳寿命预测方法主要有名义应力法、局部应力应变法、损伤力学法、断裂力学法等。在实际工程运用中, 常用名义应力法分析和预测结构的疲劳寿命<sup>[1]</sup>。

机械零部件在服役过程中常受随机循环载荷的作用, 其疲劳寿命与循环应力幅值 $\sigma_a$ 和平均应力 $\sigma_m$ 有关, 而传统的名义应力法只用最大应力 $\sigma_{\max}$ 计算疲劳寿命, 将产生较大的误差。本文通过建立应力幅值 $\sigma_a$ 、平均应力 $\sigma_m$ 和疲劳寿命 $N$ 的关系式, 构建广义 $\sigma-N$ 曲面<sup>[2-5]</sup>; 运用 $\sigma-N$ 曲面方程替代 $\sigma_{\max}-N$ 曲线方程, 对某型航空发动机涡轮盘进行了疲劳寿命估算。

### 1 基于广义 $\sigma-N$ 曲面的名义应力法分析构件疲劳寿命步骤

基于广义 $\sigma-N$ 曲面的名义应力法分析构件疲劳寿命步骤如下:

1) 建立广义 $\sigma-N$ 曲面, 得到应力幅值 $\sigma_a$ 、平均

应力 $\sigma_m$ 和构件疲劳寿命 $N$ 的关系式。

2) 将材料的 $S-N$ 曲线修正到构件的 $S-N$ 曲线, 通过数据拟合确定 $\sigma_{\max}-N$ 曲线方程的参数 $m$ 、 $C$ 。

3) 通过已知的循环载荷数据, 求出构件疲劳寿命 $N$ 。

### 2 建立广义 $\sigma-N$ 曲面

在疲劳可靠性设计和疲劳性能测试中, 循环最大应力 $\sigma_{\max}$ 与疲劳寿命 $N$ 的关系为:

$$\sigma_{\max}^m N = C \quad (1)$$

式中,  $m$ 、 $C$ 为材料常数。

常用来描述等寿命曲线的近似公式<sup>[6]</sup>为:

1) 直线Goodman公式<sup>[7]</sup>为:

$$\sigma_a = \sigma_{-1}(1 - \sigma_m / \sigma_b) \quad (2)$$

2) 抛物线Gerber公式<sup>[8]</sup>为:

$$\sigma_a = \sigma_{-1}[1 - (\sigma_m / \sigma_b)^2] \quad (3)$$

式中,  $\sigma_b$ 为极限强度;  $\sigma_{-1}$ 为对称弯曲疲劳极限。

实验表明, 不同的应力比 $R$ 对应着不同的 $S-N$ 曲

线。在已知应力比 $R$ 的情况下, 循环最大应力 $\sigma_{\max}$ 与平均应力 $\sigma_m$ 和应力幅值 $\sigma_a$ 之间的关系分别为:

$$\sigma_{\max} = \frac{2\sigma_a}{(1-R)} \quad (4)$$

$$\sigma_m = \left(\frac{1+R}{1-R}\right)\sigma_a \quad (5)$$

将式(4)代入式(1), 可得:

$$\left(\frac{2\sigma_a}{1-R}\right)^m N = C \quad (6)$$

即:

$$\sigma_a = \frac{1-R}{2}(C/N)^{1/m} \quad (7)$$

将式(7)代入式(5), 可得:

$$\sigma_m = \frac{1+R}{2}(C/N)^{1/m} \quad (8)$$

1) 选用Goodman公式作为等寿命曲线时, 将式(7)和式(8)代入式(2), 可得:

$$\sigma_{-1} = \frac{\sigma_b(1-R)(C/N)^{1/m}}{2\sigma_b - (1+R)(C/N)^{1/m}} \quad (9)$$

将式(9)代入式(2), 可得Goodman型广义 $\sigma$ - $N$ 曲面方程为:

$$\sigma_a = \frac{(\sigma_b - \sigma_m)(1-R)(C/N)^{1/m}}{2\sigma_b - (1+R)(C/N)^{1/m}} \quad (10)$$

疲劳寿命 $N_1$ 为:

$$N_1 = \frac{C}{\left[\frac{\sqrt{(1-R)^2(\sigma_b^2 - \sigma_m^2)^2 + 4\sigma_a^2(1+R)^2\sigma_b^2 - (1-R)^2(\sigma_b^2 - \sigma_m^2)}}{\sigma_a(1+R)^2}\right]^m} \quad (14)$$

Gerber型广义 $\sigma$ - $N$ 曲面如图2所示。

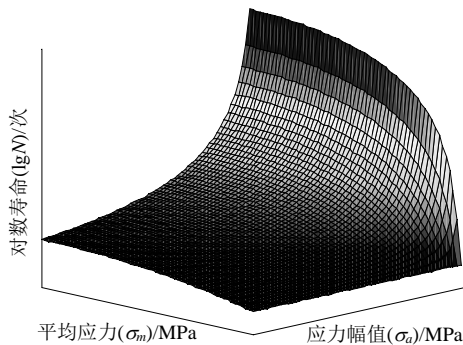


图2 Gerber型广义 $\sigma$ - $N$ 曲面

### 3 构件的S-N曲线修正

材料的S-N曲线是用标准试样在特定的应力循环加载方式下获得的, 与真实构件的S-N曲线有较大的差别。将材料的S-N曲线修正到构件的S-N曲线, 需要修正的因素较多, 常包括疲劳缺口系数 $K_f$ 、尺

$$N_1 = \frac{C}{\left[\frac{2\sigma_a\sigma_b}{(1+R)\sigma_a + (1-R)(\sigma_b - \sigma_m)}\right]^m} \quad (11)$$

Goodman型广义 $\sigma$ - $N$ 曲面如图1所示。

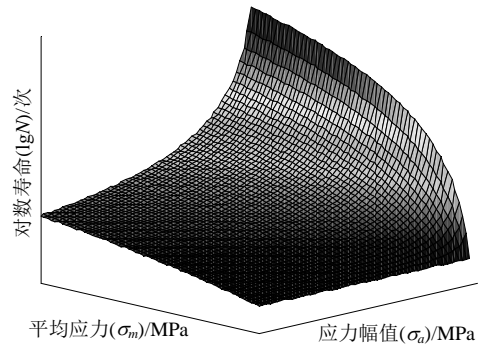


图1 Goodman型广义 $\sigma$ - $N$ 曲面

2) 选用Gerber公式作为等寿命曲线时, 将式(7)和式(8)代入式(3), 可得:

$$\sigma_{-1} = \frac{\sigma_b^2(1-R)(C/N)^{1/m}}{2\sigma_b^2 - \frac{(1-R)^2}{2}(C/N)^{2/m}} \quad (12)$$

将式(12)代入式(2), 可得Gerber型广义 $\sigma$ - $N$ 曲面方程为:

$$\sigma_a = \frac{(\sigma_b^2 - \sigma_m^2)(1-R)(C/N)^{1/m}}{2\sigma_b^2 - \frac{(1-R)^2}{2}(C/N)^{2/m}} \quad (13)$$

疲劳寿命 $N_2$ 为:

寸系数 $C_s$ 、表面质量系数 $C_f$ 、可靠度系数 $C_r$ <sup>[9-11]</sup>等, 其表达式如下:

$$S_a = \frac{\sigma_a}{K_f} C_s C_f C_r \quad (15)$$

式中,  $S_a$ 为对应于构件的S-N曲线的应力;  $\sigma_a$ 为对应于材料的S-N曲线的应力。

#### 3.1 疲劳缺口系数 $K_f$

应力集中降低构件疲劳强度的作用常用疲劳缺口系数 $K_f$ 表征, 主要取决于理论应力集中系数 $K_t$ 。在疲劳设计中常以疲劳缺口系数 $K_f$ 代替理论应力集中系数 $K_t$ , 它们之间有以下关系<sup>[12]</sup>, 即Peterson公式为:

$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + a/r} \quad (16)$$

式中,  $r$ 为缺口半径;  $a$ 为材料常数。

#### 3.2 尺寸系数 $C_s$

疲劳强度随构件尺寸增大而降低的现象称为尺

寸效应, 尺寸效应的大小用尺寸系数  $C_s$  表征为:

$$C_s = \sigma_{-1d} / \sigma_{-1} \quad (17)$$

式中,  $\sigma_{-1d}$  为构件的疲劳极限;  $\sigma_{-1}$  为标准尺寸试样的疲劳极限。尺寸系数  $C_s$  一般由试验曲线确定, 其值可查表得出, 也可使用以下经验数据:

$$C_s = \begin{cases} 0.85 & 13 \text{ mm} \leq d \leq 50 \text{ mm} \\ 0.70 & d \geq 50 \text{ mm} \end{cases}$$

式中,  $d$  为构件直径。

### 3.3 表面加工系数 $C_f$

在抗疲劳设计中, 构件的表面状况和环境介质对疲劳强度的影响用表面系数<sup>[13]</sup>为:

$$C_f = \sigma_{-1s} / \sigma_{-1} \quad (18)$$

式中,  $\sigma_{-1s}$  为具有某种加工表面的标准光滑试样的疲劳极限;  $\sigma_{-1}$  为磨光的标准光滑试样的疲劳极限。工程中一般通过实验得到表面加工系数图。

### 3.4 可靠度系数 $C_r$

可靠度系数为:

$$C_r = 1 - 0.8 \left| \frac{x - \mu}{\sigma} \right|$$

式中,  $x$  为指定可靠度时对应的寿命值;  $\mu$  为寿命分布均值;  $\sigma$  为寿命分布标准差。

## 4 疲劳累积损伤模型(Miner准则)

疲劳累积损伤理论是疲劳累积损伤分析的基础, 疲劳损伤是指在疲劳过程中初期材料内的细微结构变化和后期裂纹的形成和扩展。线性累积损伤理论即Miner准则, 假设损伤  $D$  是线性累积的, 当材料承受高于疲劳极限的应力时, 每一个循环都使材料产生一定的损伤。每一个循环所造成的损伤为  $1/N$ , 且  $n$  次恒幅载荷所造成的损伤  $D$  与其循环次数比  $C=n/N$  ( $n$  为实际循环次数,  $N$  为该应力下的破坏循环次数) 具有线性关系。

设在一个周期内包含有  $L$  级应力水平  $s_1$ 、 $s_2$ 、 $\dots$ 、 $s_L$ , 各级应力水平的循环数分别为  $n_1$ 、 $n_2$ 、 $\dots$ 、 $n_L$ 。令  $N_1$ 、 $N_2$ 、 $\dots$ 、 $N_L$  分别代表在各级应力水平单独作用下的破坏循环数。线性累积损伤理论认为疲劳损伤度可用相应的循环比表示, 即  $n_1/N_1$ 、 $n_2/N_2$ 、 $\dots$ 、 $n_L/N_L$ 。当损伤  $D$  累积到1(100%)时, 构件发生疲劳破坏, 则有:

$$D = \sum_{i=1}^L \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (19)$$

上式即Miner法则的基本表达式<sup>[12,14]</sup>。

有关学者提出了多种疲劳累积损伤理论, 由于双线性累积损伤理论、非线性累积损伤理论的计算

模型复杂, 理论计算与实验结果常有出入, 因而在疲劳设计及疲劳寿命估算中, 目前工程上应用最广泛的仍是最简单的线性疲劳累积损伤理论。该方法简单易行, 具有较高的工程应用价值。

## 5 算例分析

本文通过某型航空发动机涡轮盘疲劳寿命估算来验证上述基于广义  $\sigma$ - $N$  曲面的寿命预测理论的可行性和正确性, 并对Gerber型和Goodman型等广义  $\sigma$ - $N$  曲面的估算寿命进行对比分析。

某型航空发动机涡轮盘材料为GH4698, 它是以铝、钛、钼、铌等元素强化的镍基高温合金<sup>[15-16]</sup>, 材料的  $S$ - $N$  曲线数据如表1所示。

表1 GH4698材料疲劳性能试验数据

应力( $\sigma_{\max}$ )/Mpa	寿命( $N$ )/次	应力( $\sigma_{\max}$ )/Mpa	寿命( $N$ )/次
981	$10^2$	227	$5 \times 10^5$
520	$5 \times 10^3$	206.8	$1 \times 10^6$
471	$1 \times 10^4$	118	$2 \times 10^7$
306	$1 \times 10^5$		

在应力比  $R=0$  情况下, 材料的极限强度  $\sigma_b=1265$ MPa, 缺口半径  $r=0.25$  mm,  $K_f=3.35$ , 取GH4698材料常数  $a=0.46$ <sup>[12]</sup>。

结合构件的  $S$ - $N$  曲线数据和式(16), 可得  $K_f=1.83$ ; 尺寸系数依据经验值取  $C_s=0.7$ <sup>[17]</sup>; 表面加工系数取  $C_f=1.02$ <sup>[13]</sup>。由于材料的  $S$ - $N$  曲线是中值寿命曲线, 故  $x=\mu$ , 可得可靠度系数  $C_r=1$ , 对应的涡轮盘所受应力为  $S_a=0.39\sigma_a$ 。构件的极限强度  $\sigma_b^*=493.3$  MPa, 且其疲劳强度与寿命关系如表2所示。

表2 构件的疲劳性能数据

应力( $\sigma_{\max}$ )/Mpa	寿命( $N$ )/次	应力( $\sigma_{\max}$ )/Mpa	寿命( $N$ )/次
382.6	$10^2$	88.5	$5 \times 10^5$
202.8	$5 \times 10^3$	80.3	$1 \times 10^6$
183.7	$1 \times 10^4$	46	$2 \times 10^7$
119.3	$1 \times 10^5$		

根据式(1), 拟合表2的数据如图3所示。

计算得到构件的  $S$ - $N$  曲线参数  $m=5.723$ ,  $C=10^{16.863}$ 。

基于式(11), 涡轮盘Goodman型广义  $\sigma$ - $N$  曲面疲劳寿命  $N_1$  为:

$$N_1 = \frac{10^{16.863}}{\left( \frac{986.6\sigma_a}{\sigma_a - \sigma_m + 493.3} \right)^{5.723}}$$

基于式(14), 涡轮盘Gerber型广义  $\sigma$ - $N$  曲面疲劳寿命  $N_2$  为:



$$N_2 = \frac{10^{16.863}}{\left[ \frac{\sqrt{(2.433 \times 10^5 - \sigma_m^2)^2 + 9.734 \times 10^5 \sigma_a^2 - (2.433 \times 10^5 - \sigma_m^2)}}{\sigma_a} \right]^{5.723}}$$

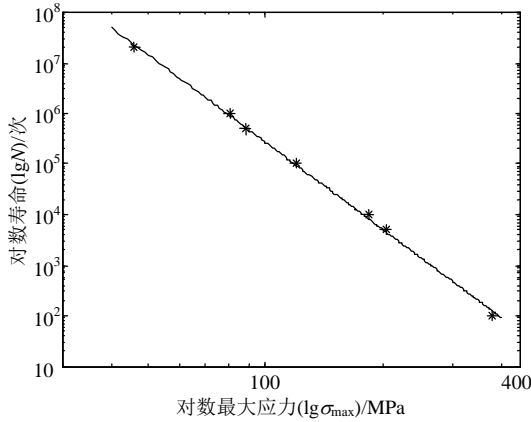


图3 构件的应力寿命线性拟合图

依据某厂提供的实测数据, 已知涡轮盘标准化到1 000 h所受的循环应力值及作用的循环次数, 计算相应的应力循环寿命和损伤当量结果, 分别如表3和表4所示。

表3 标准化到1 000 h, Goodman型循环计算结果

循环应力值/MPa	应力幅值/MPa	平均应力/MPa	Goodman型循环寿命次数 $N_{1i}$	应力循环次数 $n_i$	Goodman型损伤当量 $D_{1i}$
0~86	43	43	619 249.071	14	$2.260 8 \times 10^{-5}$
0~104	52	52	208 697.958	4	$1.916 65 \times 10^{-5}$
0~112	56	56	136 560.55	2	$1.464 55 \times 10^{-5}$
0~119	59.5	59.5	96 526.095 7	39	0.000 404 036
0~126	63	63	69 595.213 3	7	0.000 100 582
0~131	65.5	65.5	55 700.151 3	12	0.000 215 439
0~138	69	69	41 349.664 3	65	0.001 571 96
0~146	73	73	29 950.812 4	772	0.025 775 595
54~86	16	70	91 384 833.9	850	$9.301 32 \times 10^{-6}$
54~104	25	79	7 106 276.76	492	$6.923 46 \times 10^{-5}$
54~112	29	83	3 039 128.37	1 126	0.000 370 501
54~119	32.5	86.5	1 583 231.1	2 165	0.001 367 457
54~126	36	90	881 725.854	941	0.001 067 225
54~131	38.5	92.5	600 428.132	844	0.001 405 664
54~138	42	96	364 919.523	619	0.001 696 264
54~146	46	100	216 815.196	657	0.003 030 23
86~104	9	95	1 595 661 286	950	$5.953 64 \times 10^{-7}$
86~112	13	99	194 523 818	2 491	$1.280 56 \times 10^{-5}$
86~119	16.5	102.5	49 706 133	1 976	$3.975 36 \times 10^{-5}$
86~126	20	106	16 530 116.9	408	$2.468 22 \times 10^{-5}$
86~131	22.5	108.5	8 424 226.57	289	$3.430 58 \times 10^{-5}$
86~138	26	112	3 682 799.87	179	$4.860 43 \times 10^{-5}$
86~146	30	116	1 623 699.47	8	$4.927 02 \times 10^{-6}$
104~112	4	108	$1.276 8 \times 10^{11}$	247	$1.934 45 \times 10^{-9}$
104~119	7.5	111.5	3 497 457 559	697	$1.992 88 \times 10^{-7}$
104~126	11	115	390 694 886	214	$5.477 42 \times 10^{-7}$
104~131	13.5	117.5	121 011 852	138	$1.140 38 \times 10^{-6}$
104~138	17	121	32 349 597.9	95	$2.936 67 \times 10^{-6}$
104~146	21	125	9 653 105.21	4	$4.143 74 \times 10^{-7}$
112~119	3.5	115.5	$2.434 6 \times 10^{11}$	47	$1.930 54 \times 10^{-10}$
112~126	7	119	4 609 186 324	358	$7.767 1 \times 10^{-8}$
112~131	9.5	121.5	802 801 462	351	$4.372 19 \times 10^{-7}$
112~138	13	125	133 359 065	217	$1.627 19 \times 10^{-6}$
112~146	17	129	28 725 075	10	$3.481 28 \times 10^{-7}$
119~131	6	125	$1.001 6 \times 10^{10}$	197	$1.966 79 \times 10^{-8}$
119~138	9.5	128.5	722 030 093	226	$3.130 06 \times 10^{-7}$
119~146	13.5	132.5	96 642 317.2	10	$1.034 74 \times 10^{-7}$

表4 标准化到1 000 h, Gerber型循环计算结果

循环应力值/MPa	应力幅值/MPa	平均应力/MPa	Gerber型循环寿命次数 $N_{2i}$	应力循环次数 $n_i$	Gerber型损伤当量 $D_{2i}$
0~86	43	43	618 526.749 1	14	$2.263 44 \times 10^{-5}$
0~104	52	52	208 455.368 2	4	$1.918 88 \times 10^{-5}$
0~112	56	56	136 402.090 4	2	$1.466 25 \times 10^{-5}$
0~119	59.5	59.5	96 414.274 09	39	0.000 404 504
0~126	63	63	69 514.729 8	7	0.000 100 698
0~131	65.5	65.5	55 635.820 31	12	0.000 215 688
0~138	69	69	41 301.998 05	65	0.001 573 774
0~146	73	73	29 916.365 06	772	0.025 805 274
54~86	16	70	158 733 369.7	850	$5.354 89 \times 10^{-6}$
54~104	25	79	12 061 344.5	492	$4.079 15 \times 10^{-5}$
54~112	29	83	5 105 653.624	1 126	0.000 220 54
54~119	32.5	86.5	2 636 085.479	2 165	0.000 821 294
54~126	36	90	1 455 024.156	941	0.000 646 725
54~131	38.5	92.5	984 539.685	844	0.000 857 253
54~138	42	96	593 073.3554	619	0.001 043 716
54~146	46	100	348 821.6302	657	0.001 883 484
86~104	9	95	3 850 411 783	950	$2.467 27 \times 10^{-7}$
86~112	13	99	461 608 072.6	2 491	$5.396 35 \times 10^{-6}$
86~119	16.5	102.5	116 239 177.1	1 976	$1.699 94 \times 10^{-5}$
86~126	20	106	38 094 498.81	408	$1.071 02 \times 10^{-5}$
86~131	22.5	108.5	19 212 265.01	289	$1.504 25 \times 10^{-5}$
86~138	26	112	8 277 109.51	179	$2.162 59 \times 10^{-5}$
86~146	30	116	3 588 898.277	8	$2.229 1 \times 10^{-6}$
104~112	4	108	$3.734 04 \times 10^{11}$	247	$6.614 81 \times 10^{-10}$
104~119	7.5	111.5	10 046 013 821	697	$6.938 08 \times 10^{-8}$
104~126	11	115	1 102 232 327	214	$1.941 51 \times 10^{-7}$
104~131	13.5	117.5	337 042 871.7	138	$4.094 43 \times 10^{-7}$
104~138	17	121	88 494 288.13	95	$1.073 52 \times 10^{-6}$
104~146	21	125	25 869 488.35	4	$1.546 22 \times 10^{-7}$
112~119	3.5	115.5	$7.690 87 \times 10^{11}$	47	$6.111 14 \times 10^{-11}$
112~126	7	119	14 279 669 624	358	$2.507 06 \times 10^{-8}$
112~131	9.5	121.5	2 452 742 336	351	$1.431 05 \times 10^{-7}$
112~138	13	125	399 568 125.5	217	$5.430 86 \times 10^{-7}$
112~146	17	129	84 166 470.88	10	$1.188 12 \times 10^{-7}$
119~131	6	125	33 249 060 929	197	$5.924 98 \times 10^{-9}$
119~138	9.5	128.5	2 347 268 079	226	$9.628 21 \times 10^{-8}$
119~146	13.5	132.5	306 765 338.3	10	$3.259 82 \times 10^{-8}$

通过比较表3和表4当中相同载荷下的Goodman型和Gerber型循环寿命次数, 发现在应力幅值 $\sigma_a$ 和平均应力 $\sigma_m$ 相差不大的情况下, Goodman型和Gerber型循环寿命次数基本相同。随着应力幅值 $\sigma_a$ 和平均应力 $\sigma_m$ 的差值不断增大, Goodman型和Gerber型循环寿命的差值也在不断增大, 基本符合正相关性。同时也进一步验证了构件所承受载荷即使是在相同的最大应力 $\sigma_{max}$ 作用下, 但由于不同的应力幅值 $\sigma_a$ 和平均应力 $\sigma_m$ , 其总循环寿命也不同。

依据式(19)计算得到Goodman型涡轮盘的损伤当量为 $D_1 = 3.731 \times 10^{-2}$ , Gerber型涡轮盘的损伤当量为 $D_2 = 3.375 \times 10^{-2}$ 。由此可得, Goodman型涡轮

盘的总寿命为  $N_1 = 2.680 \times 10^4$  h, Gerber型涡轮盘的总寿命为  $N_2 = 2.963 \times 10^4$  h。

在上述寿命计算中,没有考虑载荷及材料的分散性。在最终确定构件的寿命时应当考虑寿命分散系数,其取值一般为4~6<sup>[9]</sup>。本文取寿命分散系数为5,则考虑分散系数后的涡轮盘的寿命为  $N_1^* = 5.360 \times 10^3$  h; 涡轮盘的Gerber型总寿命为  $N_2^* = 5.926 \times 10^3$  h。

## 6 结论

1) 在实际工程中,应用传统名义应力法常需要应力比 $R=-1$ 时的 $S-N$ 曲线,常由于缺乏相关试验数据限制了其应用。本文通过使用任意应力比 $R$ 下 $S-N$ 曲线求得到广义 $\sigma-N$ 曲面方程,对构件或材料进行寿命预估,适用范围更广。

2) 传统名义应力法利用 $S-N$ 曲线将随机循环载荷等效成对称循环载荷,该过程将产生误差。本文通过应力幅值 $\sigma_a$ 和平均应力 $\sigma_m$ 估算寿命,无需将循环应力值进行等效转换,从而提高了疲劳寿命估算精度。

3) 由本文涡轮盘算例结果显示,基于Gerber型等寿命曲线的估算寿命比Goodman型要更接近于其真实额定寿命6 000 h。

## 参 考 文 献

- [1] 袁熙, 李舜酩. 疲劳寿命预测方法的研究现状与发展[J]. 航空制造技术, 2005(12): 80-84.  
YUAN Xi, LI Shun-ming. Research status and development of forecast method of fatigue life[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2005(12): 80-84.
- [2] 阎楚良, 高镇同. 疲劳性能广义 $\sigma-N$ 曲面[J]. 机械工程学报, 1999, 35(1): 103-105.  
YAN Chu-liang, GAO Zhen-tong. Generalized  $\sigma-N$  curved surface of fatigue character[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1999, 35(1): 103-105.
- [3] AGGARWAL M L, AGRAWAL V P, KHAN R A. A stress approach model for predictions of fatigue life by shot peening of EN45A spring steel[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(12): 1845-1853.
- [4] 武滢, 谢里阳. 随机载荷作用下疲劳寿命分布预测模型[J]. 工程设计学报, 2010, 17(6): 435-438.  
WU Yin, XIE Li-yang. Prediction on probability distribution of fatigue life under spectrum loading[J]. Journal of Engineering Design, 2010, 17(6): 435-438.
- [5] 胡俏, 谢里阳, 徐灏. 双参数名义应力法[J]. 航空学报, 1993, 14(3): 500-502.  
HU Qiao, XIE Li-yang, XU Ying. Two-parameter nominal-stress approach[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 1993, 14(3): 500-502.
- [6] KAWAI M, MATSUDA Y, YOSHIMURA R. A general method for predicting temperature-dependent anisomorphic constant fatigue life diagram for a woven fabric carbon/epoxy laminate[J]. Applied Science and Manufacturing, 2012, 43(6): 915-925.
- [7] WANG B H, LU P M. Experimental research on fatigue strength of concrete pump truck[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2010, 35(5): 766-770.
- [8] ISHIHARA S, MCEVILY A J, SATO M, et al. The effect of load ratio on fatigue life and crack propagation behavior of an extruded magnesium alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(11): 1788-1794.
- [9] 杨延功. 空心传动轴塞焊孔疲劳特性分析方法与应用研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2011.  
YANG Yan-gong. Hollow transmission shaft plug welding hole fatigue analysis methods and applied research[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2011.
- [10] 姚卫星. 结构疲劳寿命分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.  
YAO Wei-xing. Fatigue life analysis of structures[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003.
- [11] UGURAL A C. Mechanical design an integrated approach [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2005.
- [12] 尹泽勇. 叶片轮盘及主轴强度分析-航空发动机设计手册第18册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2007.  
YIN Ze-yong. Manual for design of turbo engine: Fascicule 18, strength analysis of turbine disk and shaft[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2007.
- [13] 赵少汴, 王忠保. 抗疲劳设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.  
ZHAO Shao-bian, WANG Zhong-bao. Anti-fatigue design[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1997.
- [14] 倪侃, 张圣坤. 疲劳可靠性二维统计Miner准则[J]. 机械工程学报, 2002, 38(7): 65-69.  
NI Kan, ZHANG Shen-kun. Two-dimensional statistical miner's rule in fatigue reliability[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(7): 65-69.
- [15] 高镇同. 航空金属材料疲劳性能手册[M]. 北京: 北京航空材料研究所, 1981.  
GAO Zhen-tong. Handbook of fatigue performance of aviation metal materials[M]. Beijing: Beijing Aviation Materials Research Institute, 1981.
- [16] 王卫红. GH4698合金特大型涡轮盘组织性能及热处理制度的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.  
WANG Wei-hong. The research of super-huge type turbine disk's structure property and thermal treatment of GH4698 alloy[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [17] 李舜酩. 机械疲劳与可靠性设计[M]. 北京: 科学出版社, 2006.  
LI Shun-ming. The fatigue and reliability design in mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2006.

编辑 黄 莘