

一种利用支持向量机描述应力—寿命关系的新方法

张忠平, 姚志锋, 李春旺, 孙强, 李静

(空军工程大学理学院, 陕西西安, 710051)

摘要 以7种常用航空金属材料的疲劳试验数据为基础,首次利用最小二乘法支持向量机确定了材料的应力—寿命关系及相应的S—N曲线,并将所得结果与传统的幂函数式和三参数式的结果进行了比较,发现:支持向量机不仅能够描述材料的应力寿命关系,而且与现有的幂函数和三参数表达式相比,支持向量机最好;利用支持向量机描绘的S—N曲线,不仅能够精确确定任意交变名义应力作用下材料的疲劳寿命,而且还可精确确定材料的疲劳极限,为保证结构设计和使用的可靠性打下了基础。

关键词 支持向量机;应力—寿命关系;S—N曲线;疲劳极限

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.02.019

中图分类号 O343.4 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)02-0090-05

在工程领域,利用名义应力法估算材料的疲劳寿命时,大多采用应力—寿命(S—N)曲线。目前,描述S—N关系的数学表达式有2种——幂函数式^[1-2]和三参数式^[1-2],可以确定任意交变名义应力作用下构件的疲劳寿命,然而,幂函数式在大多数情况下不能正确反映材料的应力—寿命关系,三参数式虽然优于幂函数,但与试验结果相比,有时也不能正确反映材料的疲劳极限。为尽可能精确地得到材料的应力—寿命关系,恰当地确定构件的疲劳寿命,保证结构设计和使用的可靠性,本文引入一种新方法——最小二乘法支持向量机^[3-7],对已有的试验数据^[8]进行分析,得出了S—N曲线,并与其它2种常用方法进行了对比分析。

1 最小二乘法支持向量机

支持向量机是一种基于统计学习理论的机器学习算法^[3-7],该算法追求在有限信息的条件下得到最优结果,1998年,Suykens等人^[4]提出了最小二乘法支持向量机。如果将最小二乘法支持向量机应用于疲劳问题,则应力—寿命关系式为:

$$S = \sum_{k=1}^p \alpha_k K(N, N_k) + M \quad (1)$$

$$K(N, N_k) = \exp\left(-\frac{|N - N_k|^2}{\eta^2}\right) \quad (2)$$

式中:S为名义交变应力;N为疲劳寿命; α 为支持向量, α_k 为 α 中的第k项; $K(N, N_k)$ 为核函数;M为偏差量;p为试件个数; N_k 为第k个疲劳试验数据; η 为标准化参数。将全部 N_k 代入式(1)–(2)便可得到S—N曲线。

2 标准化参数 η 对S—N曲线的影响

以LC9高强度铝合金棒材光滑试件(轴向加载),应力比 $R = -1$ 时的试验数据^[8]为例,说明标准化参数

* 收稿日期:2011-08-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10804130)

作者简介:张忠平(1962-),男,陕西澄城人,教授,博士生导师,主要从事航空材料与器件的疲劳断裂研究。

E-mail: zhangzhp1962@163.com

η 对 S - N 曲线的影响。图 1 显示了 η^2 分别等于 10、90 和 250 时的 3 条 S - N 曲线,其中,间断线、实线和虚线分别对应于 $\eta^2 = 10, 90$ 和 250;符号“*”表示试验数据。

图 1 表明,不同 η 对应不同的 S - N 曲线,因此,标准化参数 η 对 S - N 曲线有一定影响,绘制 S - N 曲线时应选定合适的标准化参数。对于 LC9 高强度铝合金棒材试验数据^[8],经过多次尝试后发现,合适的参数是 $\eta^2 = 90$,相应的支持向量机函数式为:

$$S = \sum_{k=1}^p \alpha_k K(N, N_k) + 504.4 \quad (3)$$

式中 $\alpha = [-9\ 702, -6\ 523, 8\ 633, -19\ 792, -8\ 239, 4\ 516, 8\ 115, 12\ 568, 18\ 504, 20\ 865, 23\ 054, 28\ 956, -7\ 679, -2\ 765, -1\ 416, 2\ 783, 3\ 630, 7\ 056, 8\ 374, 21\ 564, -26\ 734, -22\ 411, -20\ 622, -18\ 594, -12\ 704, -6\ 362, -2\ 297, 771, 8\ 421, 13\ 829, -10\ 583, -4\ 544, -4\ 439, -322, 1\ 904, 2\ 949, 5\ 544, 5\ 915, 7\ 160, 8\ 961, -19\ 896, -7\ 765, -6\ 256, -3\ 635, -1\ 299, -194, 267, 238, 198]$ 。

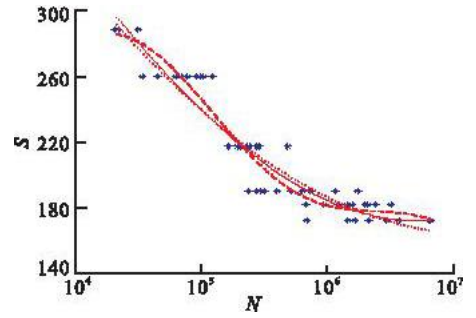


图 1 不同 η^2 对应的 S - N 曲线
Fig. 1 S - N curves for different η^2

3 不同材料的 S - N 关系

仍然采用文献[8]的试验数据,得到 TC4、GC4、30CrMnSiNi2A 棒材和 LY12B、LC4 板材轴向加载时的 S - N 曲线如图 2 中的实线所示。其中,TC4 棒材试件, $K_i = 1$, 应力比 $R = -1$ 时,支持向量机函数式为:

$$S = \sum_{k=1}^p \alpha_k K(N, N_k) + 10.0 \quad (4)$$

$\alpha = [7\ 275.3, 7\ 032.7, -57.2, -4\ 867, 3\ 025.1, 5\ 146.1, 2\ 169.8, -3\ 037.2, 1\ 318.7, 892.4, 1\ 562.1, -3\ 186.8, 7\ 053.9, 7\ 075.5, -1\ 661.6, 2\ 016.3, 7\ 094.3, 3\ 913.1, 4\ 710, -3\ 847.8, 3\ 321.9, -767.4, -8\ 230.5, 2\ 156.7, -2\ 670, 504.2, 856, 918.8, 869.6, -5\ 402.3, -1\ 864.3, -5\ 171.8, -218.9, 3.1, -299.9, -40.2, -5\ 143.2, 9.7, -1\ 238.4, -1\ 222.3, -1\ 247.8, -1\ 226.1, -5\ 013.3, -1\ 241.2, -2\ 363.6, -2\ 819.1, -2\ 479.1, -3\ 608.5]$ 。

GC4 棒材试件, $K_i = 3, R = -1$ 时,支持向量机函数式为:

$$S = \sum_{k=1}^p \alpha_k K(N, N_k) + 9.3 \quad (5)$$

$\alpha = [1\ 546, 1\ 714, 1\ 859, 2\ 989, 3\ 046, 3\ 327, 3\ 583, 3\ 770, 5\ 043, -4\ 608, -3\ 213, -1\ 257, -363, 1\ 751, 2\ 852, 3\ 681, 4\ 191, 4\ 232, 4\ 336, -6\ 366, -4\ 221, -3\ 843, -3\ 263, -1\ 196, -817, 441, 2\ 814, 3\ 773, 3\ 911, 4\ 676, 5\ 338, 7\ 416, -6\ 722, -6\ 228, -5\ 372, -5\ 131, -3\ 559, -2\ 441, -1\ 518, -606, 373, 1\ 804, 2\ 131, 2\ 529, 3\ 556, 3\ 955, 4\ 177, 4\ 248, 6\ 158, 7\ 903, 8\ 157, 8\ 702, 9\ 849, 1\ 875, -2\ 026, 292, 9\ 485, 9\ 551, -1\ 491, -7\ 306, 5\ 492, -5\ 590, 4\ 779, 4\ 861, -6\ 142, 3\ 689, -911, 1\ 115, -7\ 762, -7\ 180, -6\ 733, -9\ 749, -10\ 774, -4\ 517, -4\ 517, -8\ 648, -4\ 517, -4\ 517, -5\ 690, -9\ 620, -5\ 690, -6\ 862]$ 。

LC4 高强度铝合金板材试件, $K_i = 4, R = -1$ 时,支持向量机函数式为:

$$S = \sum_{k=1}^p \alpha_k K(N, N_k) - 4.6 \quad (6)$$

$\alpha = [-1\ 259.6, -1\ 021.8, 134.2, 1\ 907, -673.5, 106.8, 1\ 286.1, 1\ 785, -2\ 207.8, -2\ 168.4, 777.6, 1\ 141.1, 1\ 309.3, 1\ 781.8, -1\ 999.9, 395.5, 623.2, 946.6, 881.7, 779.2, -640.6, -617.2, -388.5, -54, -54, -54, -54, -887.2, -887.2, -887.2]$ 。

TC4 棒材试件, $K_i = 5, R = 1$ 时,支持向量机函数式为:

$$S = \sum_{k=1}^p \alpha_k K(N, N_k) - 6.8 \quad (7)$$

$\alpha = [-816.3, 5\ 029, 2\ 600.6, -1\ 261.5, -925.9, -118.1, 3\ 510.8, 6\ 419.2, -398.6, -3\ 150.7, -3\ 937.4, 7\ 047, -1122.1, 212.2, 1\ 841.3, -2\ 932.5, -1\ 083.4, -4\ 903, -2\ 403.9, 1\ 631.9, 3\ 092.1, -225.6, 2\ 401.7, 1\ 285.4, 1\ 304.6, 434.8, -925.5, 1\ 434.6, 925.9, -394.6, -100.8, -279.8,$

-279.8, -279.8, -2 612.1, -1 018.4, 32.4, 86, 40.1, -1 389.3, -602.5, -5 955.6, -605.2, -1 607]。

30CrMnSiNi2A 钢棒材, $K_f = 3, R = 0.1$ 时, 支持向量机函数式为:

$$S = \sum_{k=1}^p \alpha_k K(N, N_k) + 13.9 \quad (8)$$

$\alpha = [1\ 934, 4\ 965, 5\ 977, -113, 2\ 794, 3\ 039, -434, 781, 3412, 3\ 463, -4\ 528, -66, 3\ 882, 4\ 072, 8\ 876, 10\ 142, 10\ 739, 11\ 068, -6\ 286, -5\ 003, -392, 493, 932, 4212, -8\ 085, -742, -5\ 353, 990, -450, -450, -450, -450, -4\ 693, -6\ 998, -14\ 725, -4019, -1\ 889, -3\ 329, -3\ 329, -3\ 329, -3\ 329, -3\ 329]$ 。

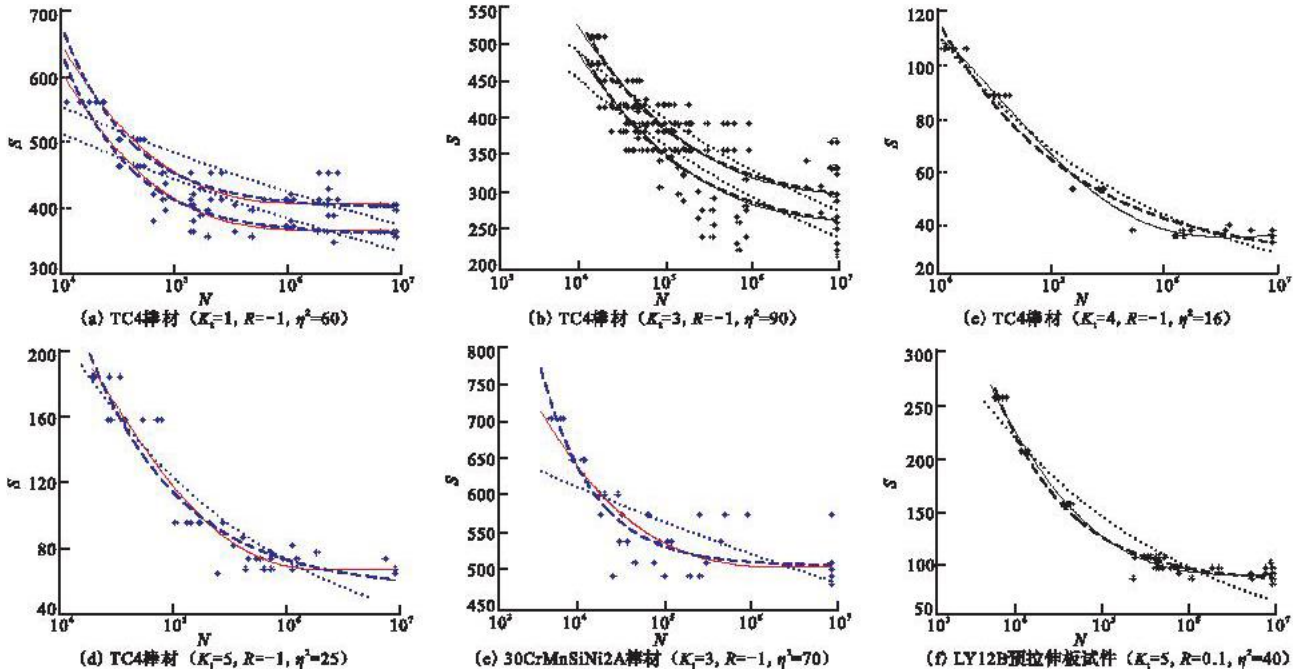


图2 不同材料的 S - N 曲线

Fig.2 S - N curves for different materials

LY12B 铝合金预拉伸板试件, $K_f = 5, R = 0.1$ 时, 支持向量机函数式为:

$$S = \sum_{k=1}^p \alpha_k K(N, N_k) + 7.3 \quad (9)$$

$\alpha = [-697, -127.2, -127.2, 916.8, 1\ 852.8, 3\ 093.2, -1\ 708.9, -1\ 481.9, -1\ 481.9, 30.4, -1\ 014.4, -887.9, -190.1, -82.9, 323.4, 419.7, 697.2, -254.7, 440.8, 664.6, 732.9, 843.5, 1\ 091.9, 1\ 251.2, 1\ 530.7, -639.8, -479.1, -312.1, 75.7, 278.6, 557.9, 975.5, 1\ 036.7, 1\ 049.2, 1\ 033, 1\ 913.6, 355.8, -479.1, 1033, -312.1, 203.3, 171.8, 155.6, -557.6, -675.5, -721.8, -1\ 088.9, -721.8, -3\ 889.4, -1\ 599.2, -1\ 599.2, -1\ 599.2]$ 。

4 3种方法所得 S - N 曲线的对比

幂函数式^[1-2]和三参数式^[1-2]的表达式分别为:

$$S^m N = C ; (S - S_f)^m N = C \quad (10)$$

式中: m, C 为材料常数; S_f 为疲劳极限, 当 S 趋近于 S_f 时, N 趋于无穷大。为比较幂函数式、三参数式和支持向量机得到的 S - N 曲线, 利用文献[8]的试验数据, 拟合式(10)中的常数, 结果见表1, 对应的 S - N 曲线见图2 - 图3, 图中, 实线对应支持向量机, 虚线对应幂函数式, 双划线对应三参数式。图2 - 图3表明:

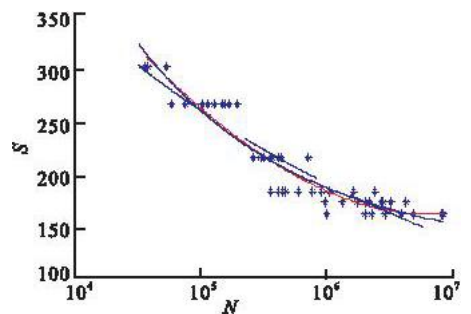


图3 LC9 高强度铝合金棒材光滑试件的 S - N 曲线

Fig.3 S - N curve of LC9 rod

1) 反映 $S-N$ 关系的幂函数形式虽然简单明了,但在大多数情况下,只能近似反映中等寿命区间的应力-寿命关系,在低寿命区间和高寿命区间,由于曲线远离试验结果(如图 2(a)、(d)、(e)和(f)),因此不能采用幂函数估算材料在低寿命区间和高寿命区间的疲劳寿命。另外,在 $S-\lg N$ 坐标系中,幂函数对应的 $S-N$ 关系是一条直线,不能反映疲劳极限的存在。

2) 与幂函数相比,三参数表达式较好地描述了材料的疲劳性能,但在某些情况下(如图 2(c)、图 2(d)和图 3)却不能真实反映疲劳极限的大小。

3) 支持向量机描绘的 $S-N$ 曲线,无论是头尾还是中间,曲线都与试验数据符合的很好,都恰当地反映了应力寿命关系,同时,曲线的尾部还直观地显示了疲劳极限的大小。

表1 不同材料的 $S-N$ 关系Tab.1 $S-N$ relationship for different materials

材料	幂函数式	三参数式
LC9 棒材($K_t=1, R=-1$)	$S^{8.32} N=1\ 021^{8.32}$	$(S-128.8)^{3.20} N=4\ 645^{3.20}$
TC4 棒材($K_t=1, R=-1$)	$S^{13.73} N=1\ 035^{13.73}$	$(S-347.9)^{1.43} N=(2.02 \times 10^5)^{1.43}$
GC4 棒材($K_t=3, R=-1$)	$S^{10.25} N=1\ 142^{10.25}$	$(S-241.1)^{2.81} N=6\ 770^{2.81}$
LC4 板材($K_t=4, R=-1$)	$S^{4.38} N=911.6^{4.38}$	$(S-18.81)^{2.78} N=2\ 695^{2.78}$
TC4 棒材($K_t=5, R=-1$)	$S^{4.13} N=2\ 093^{4.13}$	$(S-53.99)^{1.95} N=(2.42 \times 10^4)^{1.95}$
30CrMnSiNi2A 棒材($K_t=3, R=0.1$)	$S^{21.7} N=994.6^{21.7}$	$(S-495.2)^{1.14} N=(1.6 \times 10^6)^{1.14}$
LY12B 板材($K_t=5, R=0.1$)	$S^{5.76} N=976^{5.76}$	$(S-75.84)^{2.08} N=(9\ 592)^{2.08}$

5 结论

与现有的幂函数和三参数表达式相比,一方面支持向量机可以更好地描述材料的应力寿命关系;另一方面支持向量机描绘的 $S-N$ 曲线,无论是头尾还是中间,曲线都与试验数据符合的很好,都恰当地反映了应力寿命关系,同时,曲线的尾部还直观地显示了疲劳极限的大小。该方法可以指导材料的疲劳设计。

参考文献:

- [1] Fuchs H O, Stephens R I. Metal fatigue in engineering [M]. New York: John-wiley & sons inc, 1980:1-10.
- [2] Frost N E, Marsh K J, Pook L P. Metal fatigue [M]. Oxford: Clarendon press, 1974.
- [3] Vapnik V. Statistical learning theory [M]. New York: John wiley & sonsinc, 1998.
- [4] Suykens J, Vandewalle J. Least squares support machine classifiers [J]. Neural processing letters, 1999; 9(3): 293~300.
- [5] 白鹏,张喜斌. 支持向量机理论及工程应用实例[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2008.
BAI Peng, ZHANG Xibin. The theory and the application of the support vector machine[M]. Xi'an: Xi'an electronics university publishing house, 2008. (in Chinese)
- [6] 白鹏,张喜斌,陈长兴,等. 基于支持向量机的压力传感器校正模型[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2007, 8(5): 37-40.
BAI Peng, ZHANG Xibin, CHEN Changxing, et al. A correction model of pressure sensor based on support vector machine [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2007, 8(5): 37-40. (in Chinese)
- [7] 李郑琦,何宇廷,邵青,等. 基于支持向量机的机载产品延长日历寿命方法[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2010, 11(4): 6-10.
- [8] LI Zhengqi, HE Yuting, SHAO Qing, et al. Research on SVM-based predicting method on calendar life extension of airborne products[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2010, 11(4): 6-10. (in Chinese)
- [8] 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 Zhentong. The handbook of the aero-metals fatigue properties [M]. Beijing: Beijing aeromaterials institute, 1981. (in Chinese)

A New Method to Describing the Relationship between the Cyclic Stress – fatigue Life by the Support Vector Machine

ZHANG Zhong – ping, YAO Zhi – feng, LI Chun – wang, SUN Qiang, LI Jing
(Science Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Based on the seven conventional aero – metals fatigue test data, the relationship between cyclic stress – fatigue life and the S – N curve are obtained by the Least Squares Support Vector Machine(LSSVM) firstly. The S – N curves got by LSSVM and by the power function and the three – parameter equation are compared. It is found that the LSSVM not only can be used to describing the relationship between the cyclic stress – fatigue life, but also is the best method compared with the power function and the three – parameter equation. Using the S – N curve got by LSSVM, the fatigue life under the cyclic stress can be precisely obtained, and the fatigue limit can be obtained too. So, the security can be ensured for the structure design and using.

Key words: support vector machine; relationship between cyclic stress – fatigue life; S – N curve; fatigue limit

编辑部重申作者签署原创说明的通知

针对近年来陆续出现的学术文章抄袭、重复发表、伪造、篡改等学术不端行为,中国知网等已使用智能“学术不端文献检测系统”对已发表论文进行检测。为杜绝学术不端,树立良好学风,编辑部要求对确定录用稿件,全部作者都要签署原创声明,承诺所投稿件是本人和其他署名人共同撰写的原创论文。一旦出现抄袭、拼凑、重复发表等行为,本人和其他署名人承担相关责任,编辑部将在学报上公告撤稿,并永不接受该作者投稿。