

DOI: 10.7652/xjtuxb201807018

复杂结构件疲劳可靠性模型与评估技术研究

胡杰鑫¹, 谢里阳¹, 尹伟², 白恩军¹, 吕骁³
(1. 东北大学航空动力装备振动及控制教育部重点实验室, 110819, 沈阳; 2. 北京强度环境研究所, 100076, 北京; 3. 上海微创医疗器械(集团)有限公司, 200120, 上海)

摘要: 为了评估复杂结构件在随机载荷作用下的疲劳可靠性,将含有多个疲劳细节的复杂结构件看作由多个只含有单一疲劳细节的单元构成的串联系统,在不做各个疲劳细节失效独立假设的前提下,根据疲劳可靠性异量纲干涉模型,提出了一种从系统层级上直接建立的复杂结构件疲劳可靠性模型。以某型列车枕梁为例,展示了随机载荷历程下含多个疲劳细节结构的疲劳可靠性预测方法及流程,并对其疲劳可靠性进行了分析。结果表明:在随机载荷作用下,提出的模型考虑了复杂结构件中疲劳细节之间失效的统计相关性,计算出的列车枕梁服役 30 年后的可靠度约为 0.90,相比之下,传统的系统可靠性模型计算的可靠度偏于保守。

关键词: 疲劳细节;疲劳可靠性;串联系统;异量纲干涉模型;枕梁
中图分类号: O346.1;O346.2;TB114.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)07-0123-07

Study on Fatigue Reliability Model and Evaluation Method of Complex Structures

HU Jiexin¹, XIE Liyang¹, YIN Wei², BAI Enjun¹, LÜ Xiao³
(1. Key Laboratory of Vibration and Control of Aero-Propulsion Systems, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
2. Beijing Institute of Structure & Environment Engineering, Beijing 100076, China;
3. MicroPort Scientific Corporation, Shanghai 200120, China)

Abstract: To evaluate the fatigue reliability of complex structures under random loads, a complex structure was treated as a series system composed of many units, each containing only a fatigue site, and a fatigue reliability model for complex structures was established based on the dissimilar-dimension interference model of fatigue reliability. The model was directly built at the system level without assuming independence of failures. Furthermore, the fatigue reliability evaluation of a train bolster was taken as an example to display the method and the process of fatigue reliability evaluation for complex structures. The results indicate that the fatigue reliability calculated by this new method considering the statistical correlation of failure among multiple fatigue sites in a complex structure under random loads is less conservative than using traditional methods, and the fatigue reliability of the bolster is about 0.90 in 30 years of service.

Keywords: fatigue site; fatigue reliability; series system; dissimilar-dimension interference model; bolster

经典的应力-强度干涉模型虽然已经普遍地应用于零部件(或是只包含单疲劳细节的结构部件)的疲劳可靠性评估^[1-4],但却存在一些问题,例如:疲劳载荷难以统计,指定寿命下的疲劳强度概率密度分布难以确定,只能评估载荷一次作用下的静强度可靠性。为了获得某一寿命所对应的疲劳强度分布,许多学者提出了利用指定应力水平下的寿命分布来推导指定寿命条件下疲劳强度分布的方法^[5-6],然而这些研究结果均是在恒幅循环载荷条件下获得的,对于变幅载荷情况下的疲劳可靠度预测问题则具有一定的局限性。另外,也有一些学者试图从材料在不同载荷作用下的损伤演化规律中得到静强度退化方程^[7-10],进而得到零件在不同寿命下的剩余静强度,但剩余静强度的分散性却往往被假设成线性的。

近年来,谢里阳、王正从统计平均角度重新解释了应力-强度干涉模型,打破了传统可靠性模型中2个变量必须是同量纲的限制,提出了能够直接应用应力分布和寿命分布进行疲劳可靠度计算的异量纲干涉模型^[11],相较于推导疲劳强度分布所面临的数学困难,疲劳寿命分布更容易从试验中获得,因此这种方法大大降低了疲劳可靠性分析的难度,简化了分析步骤。

对于多部位损伤结构的失效问题,国内外学者已进行了广泛的研究。机身铆钉搭接结构的多铆钉孔是典型的多部位损伤结构,目前的研究也主要是针对这种结构。许多研究表明:多铆钉孔的损伤能够使机身结构的强度降低20%~40%,甚至可以达到60%,且应力强度因子呈现出快速增长趋势^[12-14]。Shi等研究了铆钉搭接结构在腐蚀环境下的多部位损伤疲劳可靠性问题,在认为一个疲劳细节失效就会导致结构系统失效的前提下,应用一次二阶矩法计算了结构可靠度^[15]。王卫国等基于多疲劳细节之间失效相互独立的假设,研究了压气机轮盘可靠度的计算方法^[16]。值得注意的是,以上研究均未考虑各疲劳细节之间的失效相关问题。实际上,含有多个疲劳细节的结构件可以看作是由多个只含有单一疲劳细节的单元构成的系统,因此,复杂结构件的可靠性问题可以转化为系统可靠性问题。失效相关性普遍存在于机械系统中,相关程度取决于载荷不确定性和各单元强度不确定性的相对大小,其中载荷不确定性是导致失效相关的主要原因^[17]。

目前,对于失效相关问题的研究国内学者已取得了一些成果,例如:钱文学在没有假设各薄弱部位

失效相互独立的前提下,直接从系统层建立了随机恒幅载荷作用下含有多个相同结构尺寸的薄弱部位结构的可靠性模型,并分析了安全裕量和载荷粗糙度对可靠度的影响,认为高的安全裕量可以提高多薄弱部位结构的可靠度,且在安全裕量一定时,高的载荷粗糙度可以降低多薄弱部位结构可靠度对薄弱部位数目的敏感性^[18-19];Xie等研究了多个压气机叶片组成的串联系统的可靠性问题,并分析了失效独立与失效相关之间的差异,认为假设各零部件之间失效独立会低估串联系统的可靠度,得到较为保守的结果^[20]。

综上所述,对于含有多个疲劳细节的结构可靠性研究还仅局限于一些简单的情况:载荷简单,均为确定性载荷或随机恒幅载荷;结构简单,如含有多铆钉孔的机身结构、航空发动机轮盘结构等;各疲劳细节的材料性能独立同分布,几何尺寸也都相似,在同一载荷作用下各疲劳细节的应力都一样。然而,对于列车枕梁这类复杂结构,以上的所有情况都不满足,因为列车在运行过程中承受随机变幅载荷;枕梁上的疲劳细节涵盖了母材和焊缝,不同疲劳细节的材料性能分布也不相同;各疲劳细节的几何尺寸不一样,即使在同一载荷作用下各疲劳细节的应力也有显著差异。如何处理好这些问题,将成为对枕梁这类复杂结构部件进行可靠性分析的关键。

本文基于疲劳可靠度异量纲干涉模型,结合系统可靠性理论,在不做失效相互独立假设的前提下建立了含有多个疲劳细节结构的可靠性模型,并将理论模型与蒙特卡罗仿真相结合,提出了一种评估随机变幅载荷作用下复杂结构可靠性评估的新方法,并以列车枕梁为研究对象,对其进行了疲劳可靠性评估。

1 应力-寿命干涉分析及系统疲劳可靠性模型

在应力-强度干涉模型中,应力和强度这2个随机变量同量纲,应用这个模型来计算疲劳可靠度需要已知指定寿命下的疲劳强度分布,但由于数学推导困难,准确的疲劳强度分布很难得到。

谢里阳、王正通过对应力-强度干涉模型进行统计平均解释,得到了可以直接利用疲劳试验所获得的寿命分布来计算疲劳可靠度的应力-寿命干涉模型,表达式^[11]为

$$R(N) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(s) \int_N^{+\infty} g(n | s) dn ds \quad (1)$$

式中: N 是具体寿命; n 是寿命变量; $f(s)$ 是应力概率密度函数; s 是标识应力; $g(n|s)$ 是在应力历程 s 下的寿命概率密度函数。

式(1)只适用于含有 1 个疲劳细节(或者 1 个零件)的可靠度计算。由多个疲劳细节构成的复杂结构件可以看作是由多个单元组成的系统,因此复杂结构件的可靠性可以采用系统可靠性方法进行处理。但是,由于各疲劳细节在不确定载荷作用下存在着失效相关性^[17],故不能用假设各部位失效相互独立的传统可靠性模型来计算系统可靠度。

假设指定的应力历程为 s ,则单个疲劳细节的可靠度可以表示为

$$R(N|s) = \int_N^{+\infty} g(n|s)dn \quad (2)$$

假设系统是由多个疲劳细节组成的 k/m 系统(表决型系统, m 为系统中的单元总数),即系统中有 $m-k$ 个以上单元失效时系统才失效,同时假设各疲劳细节的寿命独立同分布。根据系统可靠性理论,在确定载荷的作用下,各疲劳细节的失效相互独立^[20],则在指定的应力历程 s 的作用下,系统的条件可靠度可以表示为

$$R^{k/m}(N|s) = \sum_{i=k}^m \frac{m!}{i!(m-i)!} \cdot \left(\int_N^{+\infty} g(n|s)dn \right)^i \left(\int_{-\infty}^N g(n|s)dn \right)^{m-i} \quad (3)$$

当 $k=m$ 时,得到串联系统可靠性模型

$$R^{\text{seri}}(N|s) = \left(\int_N^{+\infty} g(n|s)dn \right)^m \quad (4)$$

此模型适用于不允许任何疲劳细节失效的系统。

当 $k=1$ 时,得到并联系统可靠性模型

$$R^{\text{para}}(N|s) = 1 - \left(\int_{-\infty}^N g(n|s)dn \right)^m \quad (5)$$

此模型适用于不允许全部疲劳细节都失效的系统。

在随机载荷作用下,各类系统可靠度的表达式分别为

$$R^{k/m}(N) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(s)R^{k/m}(N|s)ds \quad (6)$$

$$R^{\text{seri}}(N) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(s)R^{\text{seri}}(N|s)ds \quad (7)$$

$$R^{\text{para}}(N) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(s)R^{\text{para}}(N|s)ds \quad (8)$$

当各疲劳细节的寿命分布不同时,假设在指定的应力历程 s 下,各疲劳细节的寿命概率密度函数分别为 $g_1(n|s), g_2(n|s), \dots, g_m(n|s)$,则系统的可靠度(以串联系统为例)可以表示为

$$R^{\text{seri}}(N) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(s) \prod_{i=1}^m \int_N^{+\infty} g_i(n|s)dn ds \quad (9)$$

若各疲劳细节所受的应力也不相同,设第 i 个疲劳细节的应力服从正态分布,即 $s_i \sim N(\mu_i, \sigma_i^2)$,可以通过式(10)获得其与标准正态分布 $s_0 \sim N(0, 1)$ 之间的关系

$$s_0 = \frac{s_i - \mu_i}{\sigma_i} \quad (10)$$

将式(10)代入式(9),得到串联系统的可靠度为

$$R^{\text{seri}}(N) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(s_0) \prod_{i=1}^m \int_N^{+\infty} g_i(n | \mu_i + \sigma_i s_0) dn ds_0 \quad (11)$$

若采用传统的串联系统可靠性模型,即各个疲劳细节的失效相互独立,则串联系统可靠度的表达式为

$$R_{\text{trad}}^{\text{seri}}(N) = \prod_{i=1}^m \int_{-\infty}^{+\infty} f(s_0) \int_N^{+\infty} g_i(n | \mu_i + \sigma_i s_0) dn ds_0 \quad (12)$$

对比式(11)和式(12)可以发现,虽然只是简单地改变了计算顺序,但式(11)是从系统层级上直接应用应力-寿命干涉模型建立的,它不仅考虑了由于载荷的不确定性而导致的疲劳细节失效的统计相关性,而且避免了由于假设疲劳细节失效独立而导致低估串联系统可靠度的问题^[20]。

2 随机载荷历程下复杂结构件的疲劳可靠度计算方法

复杂结构件在实际使用中往往承受随机变幅载荷作用,因此有必要讨论在这种载荷环境下复杂结构件疲劳可靠度的计算方法与步骤。

首先考虑复杂结构件中单个疲劳细节在随机变幅载荷历程下的疲劳可靠性问题,然后再推广到多个疲劳细节构成的系统疲劳可靠性问题。单个疲劳细节的疲劳可靠度计算步骤如下:

(1)选取一个确定的载荷历程,通过力学计算转化为疲劳细节的应力历程;

(2)利用雨流计数法获得疲劳细节应力历程中各循环的应力均值与幅值以及循环次数;

(3)利用平均应力修正公式,将疲劳细节应力循环中的非对称循环转化为对称循环(对于估算疲劳寿命问题,应用 Goodman 平均应力修正公式得到的结果较保守);

(4)采用蒙特卡罗方法^[21],从材料的 p (存活率)- s - N 曲线簇中抽取 l 条 s - N 曲线(根据超高周疲劳研究的结论,材料在低于传统疲劳极限的循环应力下运行多于 1 000 万次以上时仍会发生疲劳,

因此,本文假设疲劳细节的材料不存在传统意义上的疲劳极限,这样的计算结果较为保守且能满足使用安全的要求),结合步骤(3)获得的疲劳细节应力历程,对每条 $s-N$ 曲线应用累计损伤法则(本文采用 Miner 线性累计损伤法则^[22])获得疲劳细节的寿命值,最后得到 l 个寿命样本;

(5)根据材料的中值 $s-N$ 曲线,应用 Miner 线性累计损伤法则将步骤(3)获得的疲劳细节应力历程转化为恒幅循环应力,并将此恒幅循环应力的幅值作为该载荷历程的标识应力,这样获得的标识应力可以避免评估结果出现保守或危险的情况;

(6)通过拟合步骤(4)获得的 l 个寿命样本,得到在步骤(5)获得的标识应力下的寿命分布;

(7)多次重复步骤(1)~(6),得到不同载荷历程下的标识应力和相应的寿命分布;

(8)寻找寿命分布参数与标识应力之间的关系,将各寿命分布参数用标识应力表达,得到只包含应力参数的寿命分布函数;

(9)拟合不同载荷历程下的标识应力,得到标识应力分布函数;

(10)通过式(1)计算出任意指定寿命下单个疲劳细节的疲劳可靠度。

对于多个疲劳细节构成的系统,模仿步骤(1)~(9)得到各个疲劳细节的寿命分布函数与应力分布函数,然后应用式(11)计算出多个疲劳细节构成的串联系统疲劳可靠度。

3 枕梁的疲劳可靠度计算

枕梁(长 2.4 m,宽 3.35 m,高 0.44 m)是一个几何形状复杂且包含多个疲劳细节的复杂结构件,主要承受空气弹簧载荷、抗蛇行载荷和中心销载荷,如图 1 所示。

根据有限元计算结果,在枕梁左侧选取 3 个疲

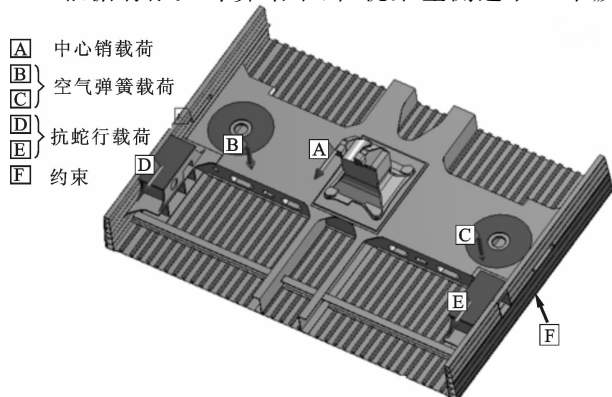


图 1 列车枕梁承载示意图

劳细节(如图 2 所示,疲劳细节 1 和疲劳细节 2 位于角接焊缝上,疲劳细节 3 位于母材上)。由于枕梁结构及其所受载荷均左右对称,在枕梁右侧也存在 3 个疲劳细节与左侧的疲劳细节相对应,且两边对应位置的应力历程和寿命分布相同,因此共需考虑枕梁上的 6 个疲劳细节。

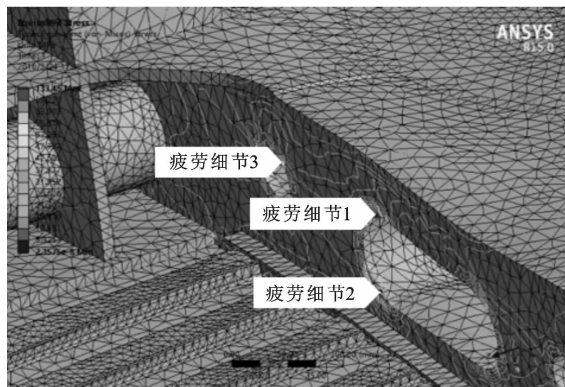
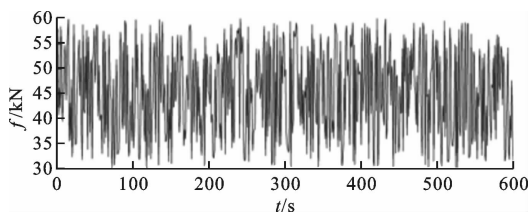


图 2 列车枕梁左侧疲劳细节

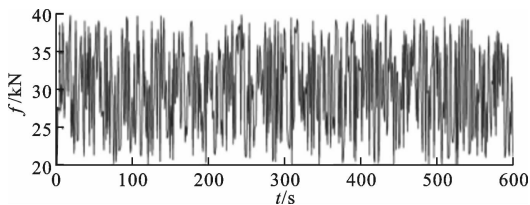
将列车枕梁看作是由这 6 个疲劳细节组成的串联系统,采用本文方法计算列车枕梁的疲劳可靠度。

3.1 疲劳细节的标识应力及寿命分布

根据欧盟标准 EN12663—1^[23],假设在某一线路上行驶的列车的枕梁所承受的空气弹簧载荷恒定,抗蛇行载荷和中心销载荷每 10 min 循环一次直至破坏,即载荷历程循环周期为 600 s,具体的载荷历程如图 3 所示。



(a) 中心销载荷



(b) 抗蛇行载荷

图 3 列车枕梁载荷历程

按照前述步骤(1)~(4),计算各个疲劳细节的寿命样本值。以疲劳细节 1 为例,该疲劳细节的应力历程经雨流计数法处理后的结果如图 4 所示,图 5 为 Goodman 平均应力修正前后的示意图。

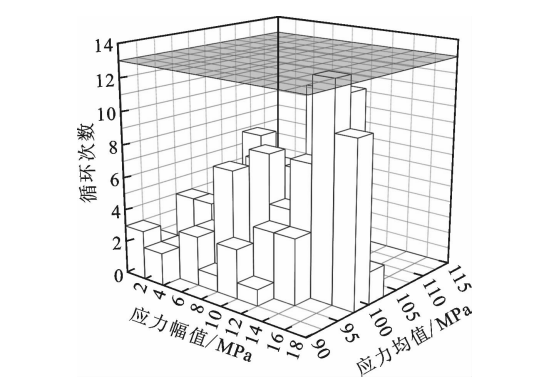


图 4 应力循环统计结果

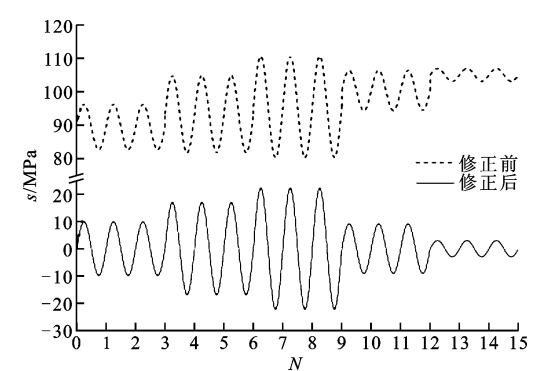


图 5 平均应力修正效果示意图

疲劳细节 1 使用的 $p-s-N$ 曲线^[24]如图 6 所示, 10 000 个仿真数据的统计结果如图 7 所示。

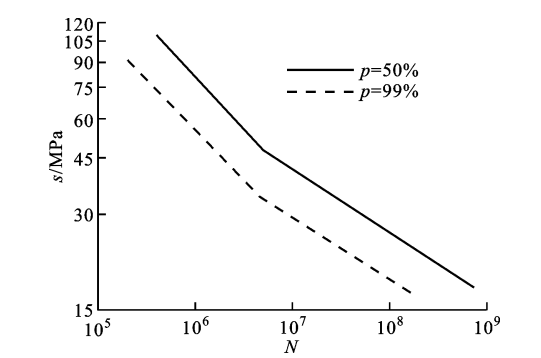


图 6 角接焊缝的 $p-s-N$ 曲线

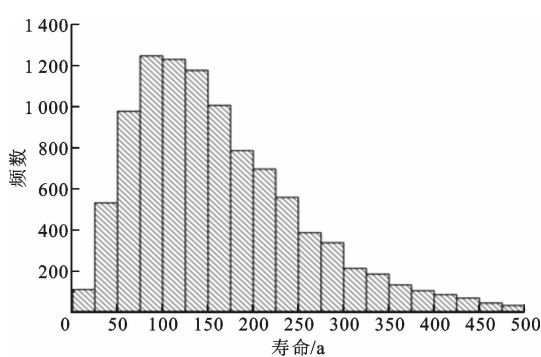


图 7 疲劳细节 1 的寿命仿真数据统计图

按照前述步骤(5),计算图 3 所示载荷历程的标识应力,图 8 为其应力等效示意图。

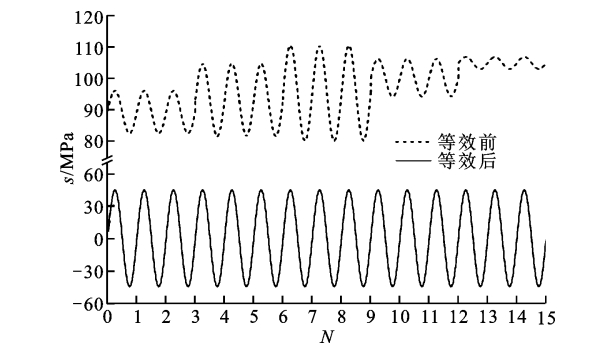


图 8 应力等效示意图

在图 3 所示的载荷历程下,求得的 3 个疲劳细节的标识应力(步骤(5))及其寿命威布尔分布参数(步骤(6))见表 1。

表 1 标识应力与寿命威布尔分布参数

疲劳细节	标识应力 s/MPa	尺度参数 η	形状参数 β
1	41.66	186.96	1.74
2	35.29	313.87	1.77
3	10.56	3.17×10^{17}	0.12

3.2 疲劳细节的寿命分布函数

对于同种材料,一般情况下寿命威布尔分布的尺度参数 η 直接与应力有关,而形状参数 β 可以认为与应力无关,并且大量试验结果也表明:疲劳寿命威布尔分布的形状参数主要取决于材料、结构及失效机理,对应力不敏感^[22]。表 1 中各疲劳细节的寿命分布参数恰好验证了这一结论。

通常尺度参数与应力的关系可以表示为

$$\eta(s) = 10^{a+b\lg s} \tag{13}$$

式中 a, b 为待定系数。

根据 EN12663—1 标准^[23]选用合理的载荷参数,设计不同的载荷历程。按照 3.1 小节中的分析过程,分别计算各个载荷历程下 3 个疲劳细节的标识应力与寿命分布参数(步骤(7))。利用最小二乘法^[25]拟合式(13)中的待定系数 a, b ,由于形状参数对应力不敏感,故将各个载荷历程下的形状参数简单地取算术平均值(步骤(8)),拟合结果见表 2。

表 2 寿命分布函数的拟合参数

疲劳细节	a	b	β
1	7.19	-3.04	1.77
2	7.20	-3.04	1.78
3	35.60	-17.70	0.12

以疲劳细节 1 为例,在指定标识应力 s 下,其寿命概率密度函数可以表示为

$$g_1(n | s) = \frac{1.77n^{1.77-1}}{10^{12.73-5.38\lg s}} \exp\left[-\left(\frac{n}{10^{7.19-3.04\lg s}}\right)^{1.77}\right]$$

(14)

3.3 含多个疲劳细节结构的疲劳可靠度

对于在不同线路上行驶的列车,枕梁所承受的载荷历程也不相同。经过统计计算得到的不同线路上枕梁各个疲劳细节的标识应力均服从正态分布(步骤(9)),具体的分布参数见表 3,与图 2 所示枕梁左侧疲劳细节相对应的右侧 3 个疲劳细节的应力分布与这 3 个疲劳细节的应力分布分别相同。

表 3 标识应力分布参数

疲劳细节	均值 μ /MPa	标准差 σ /MPa
1	37.39	9.51
2	31.69	8.00
3	9.86	1.52

通过式(11)和式(12)分别计算列车枕梁的可靠度与寿命之间的关系,所得结果如图 9 所示。

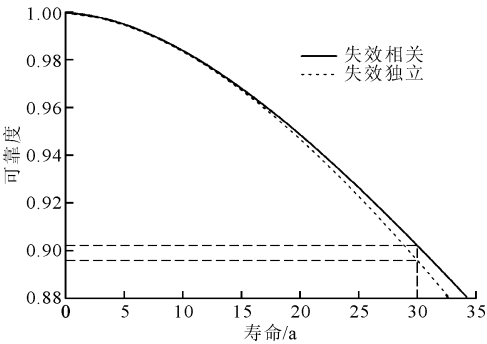


图 9 枕梁可靠度随寿命的变化曲线

图 9 中,虚线是根据传统的串联系统可靠性模型(式(12))计算得到的,即假设各个疲劳细节的失效相互独立;实线则是根据本文提出的串联系统可靠性模型(式(11))计算得到的,即考虑了各个疲劳细节失效的统计相关性。从图 9 中可以看出:传统的系统可靠性模型计算的可靠度偏于保守;该列车枕梁服役 30 年后的可靠度约为 0.90。由于本文所使用的列车枕梁载荷历程是根据 EN12663—1 标准设计的,比实际服役的载荷历程要严酷,因此,所计算的列车枕梁服役 30 年后的可靠度较实际情况要保守。

4 结 论

(1)将含有多个疲劳细节的复杂结构件看作由

多个只含有单一疲劳细节的单元构成的串联系统,基于应力-寿命异量纲干涉分析原理,提出了一种复杂结构件疲劳可靠性模型。与前人研究的模型相比,该模型适用于复杂载荷情况(如随机变幅载荷)、复杂结构情况(如各个疲劳细节的几何尺寸均不相同,即在同一载荷作用下各疲劳细节的应力有显著差异)以及各个疲劳细节的材料性能完全不同的情况(如疲劳细节出现在母材或焊缝上)。

(2)与多个零件组成的机械系统一样,在载荷不确定的情况下,有多个疲劳细节的结构内也存在着失效相关性,本文提出的系统疲劳可靠性模型能体现各个疲劳细节之间的失效相关性。

(3)列车枕梁各个疲劳细节寿命的威布尔分布参数表明,对于同种材料,尺度参数与应力有关,而形状参数对应力不敏感,这与前人研究的结果一致。

参考文献:

[1]

KECECIOGLU D. Reliability analysis of mechanical components and systems [J]. Nuclear Engineering and Design, 1972, 19(2): 259-290.

[2]

SUNDARARAJAN C, WITT F J. Stress-strength interference methods [M]. New York, USA: Springer, 1995: 8-26.

[3]

HE Z, LOH H T, XIE M. A two-dimensional probability model for evaluating reliability of piezoelectric micro-actuators [J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29(2): 245-253.

[4]

NI K, MAHADEVAN S. Strain-based probabilistic fatigue life prediction of spot-welded joints [J]. International Journal of Fatigue, 2004, 26(7): 763-772.

[5]

CHEN D. A new approach to the estimation of fatigue reliability at a single stress level [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1991, 33(1): 101-113.

[6]

MURTY A S R, GUPTA U C, KRISHNA A R. A new approach to fatigue strength distribution for fatigue reliability evaluation [J]. International Journal of Fatigue, 1995, 17(2): 85-89.

[7]

PETRYNA Y S, PFANNER D, STANGENBERG F, et al. Reliability of reinforced concrete structures under fatigue [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2002, 77(3): 253-261.

[8]

KARADENIZ H. Uncertainty modeling in the fatigue reliability calculation of offshore structures [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2002, 74(3): 323-335.

[9]

XIE L, ZHOU J, WANG Y, et al. Load-strength order statistics interference models for system reliability

- evaluation [J]. International Journal of Performability Engineering, 2005, 1(1): 23-36.
- [10] 罗毅, 高镇同. 疲劳寿命可靠性分析模型 [J]. 机械强度, 1994(3): 64-66.
LUO Yi, GAO Zhentong. Fatigue life reliability analysis model [J]. Mechanical Strength, 1994(3): 64-66.
- [11] 谢里阳, 王正. 随机恒幅循环载荷疲劳可靠度量纲干涉模型 [J]. 机械工程学报, 2008, 44(1): 1-6.
XIE Liyang, WANG Zheng. Dissimilar-dimension interference model of fatigue reliability under uncertain cyclic load [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(1): 1-6.
- [12] DE CASTRO P M S T, DE MATOS P F P, MOREIRA P M G P, et al. An overview on fatigue analysis of aeronautical structural details: open hole, single rivet lap-joint, and lap-joint panel [J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 468/469/470(1): 144-157.
- [13] SILVA L F M, GONCALVES J P M, OLIVEIRA F M F, et al. Multiple-site damage in riveted lap-joints: experimental simulation and finite element prediction [J]. International Journal of Fatigue, 2000, 22(4): 319-338.
- [14] CHERRY M C, MALL S, HEINIMANN B, et al. Residual strength of unstiffened aluminum panels with multiple site damage [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1997, 57(6): 701-713.
- [15] SHI P, MAHADEVAN S. Corrosion fatigue and multiple site damage reliability analysis [J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25(6): 457-469.
- [16] 王卫国, 卿华, 杜文军. 危险部位数目对轮盘低循环疲劳寿命的影响研究 [J]. 燃气涡轮试验与研究, 2007, 20(3): 11-14.
WANG Weiguo, QING Hua, DU Wenjun. Effect of number of critical features on disk LCF life [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2007, 20(3): 11-14.
- [17] 谢里阳, 王正, 周金宇. 机械可靠性基本理论与方法 [M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2012: 120-133.
- [18] 钱文学. 某型航空发动机低压力气机轮盘疲劳可靠性分析 [D]. 沈阳: 东北大学, 2006: 58-68.
- [19] 钱文学, 谢里阳, 尹晓伟. 载荷相关多薄弱部位零部件可靠度建模与分析 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(6): 182-187.
QIAN Wenxue, XIE Liyang, YIN Xiaowen. Reliability modeling and assessment of load dependent multiple weak site parts [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(6): 182-187.
- [20] XIE L, WANG Z, LIN W. System fatigue reliability modelling under stochastic cyclic load [J]. International Journal of Reliability and Safety, 2008, 2(4): 357-367.
- [21] ROBERT C P, CASELLA G. Monte Carlo statistical methods [M]. 2nd ed. New York, USA: Springer, 2005: 88-215.
- [22] SCHIJVE J. Fatigue of structures and materials [M]. 2nd ed. Dordrecht, Germany: Springer, 2009: 249-255.
- [23] Railway applications: structural requirements of railway vehicle bodies: BS EN12663-1 [S]. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, 2010.
- [24] 何如. 高速列车铝合金焊接接头疲劳性能研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2008: 28-30.
- [25] SHAO Jun. Mathematical statistics [M]. 2nd ed. Beijing, China: World Book Publishing Company, 2009: 193-200.

[本刊相关文献链接]

- 孟文俊, 张四聪, 淡紫嫣, 等. 按类统计方法在滚动轴承可视化可靠性动态评估中的应用. 2018, 52(6): 23-29. [doi: 10.7652/xjtuxb201806004]
- 白恩军, 谢里阳, 胡杰鑫. 考虑啮合齿对失效相关性的齿轮系统可靠性评估. 2018, 52(5): 38-43. [doi: 10.7652/xjtuxb201805005]
- 王智明, 任丽娜, 段红燕, 等. 耐用度服从三参数 Weibull 分布的机床刀具在变加工条件下的可靠性评估. 2018, 52(4): 77-83. [doi: 10.7652/xjtuxb201804011]
- 杨培林, 侯翌, 徐凯, 等. 利用形式化方法的机电系统概率失效模式及影响分析. 2018, 52(1): 1-7. [doi: 10.7652/xjtuxb201801001]
- 周晓松, 梅志远, 张焱冰. 夹芯复合材料 T 型接头弯曲疲劳损伤机制及剩余强度试验研究. 2017, 51(9): 125-130. [doi: 10.7652/xjtuxb201709018]
- 付曦, 张俊红, 寇海军, 等. 复杂载荷下轴流压气机叶片疲劳损伤数值研究. 2017, 51(5): 149-155. [doi: 10.7652/xjtuxb201705021]
- 吴波, 杨利, 金绍江, 等. 仿生活塞疲劳寿命预测与回归设计. 2016, 50(5): 72-80. [doi: 10.7652/xjtuxb201605011]
- 罗明军, 侯之超, 宋立新, 等. 后扭力梁轴头载荷谱仿真及疲劳寿命预测. 2013, 47(9): 106-111. [doi: 10.7652/xjtuxb201309018]

(编辑 葛赵青)