

考虑低应力幅影响的钢吊车梁疲劳可靠度分析

潘春宇, 童乐为

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 讨论了钢吊车梁疲劳可靠度分析方法. 首先, 建立了考虑低应力幅对变幅疲劳损伤程度减弱和疲劳荷载循环次数增长率这两个因素的钢吊车梁疲劳失效极限状态方程; 其次, 探讨了疲劳失效极限状态方程中各随机变量的统计特性, 并按一次二阶矩方法和蒙特卡洛模拟方法计算了疲劳可靠度指标; 然后, 通过算例, 研究了以上两个因素对疲劳可靠度指标的影响. 研究表明: 考虑低应力幅的疲劳损伤减弱后, 钢吊车梁的疲劳可靠度指标显著增大, 但随着疲劳荷载循环次数增长率提高, 疲劳可靠度指标降低. 最后, 提出了钢结构疲劳设计的几点建议.

关键词: 钢吊车梁; 变幅疲劳; 低应力幅; 疲劳荷载循环次数增长率; 极限状态方程; 可靠度指标

中图分类号: TU391

文献标志码: A

Fatigue Reliability Analysis of Steel Crane Girders Considering Influence of Low Stress Range

PAN Chunyu, TONG Lewei

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092, China)

Abstract: Fatigue reliability analysis method for steel crane girders is discussed in the paper. Firstly, fatigue failure limit state equations are developed in which two factors are considered such as the variable-amplitude fatigue damage reduction caused by low stress range and the growth in number of fatigue cyclic loading. Next, the statistical properties of random variables in the limit state equation are investigated. Both the first-order second-moment method and Monte Carlo simulation technique are employed to calculate the fatigue reliability index. Then, a case study is carried out to investigate the effect of the above two factors on fatigue reliability index. The current research results reveal that fatigue reliability index of steel crane girders increases significantly after considering fatigue damage reduction of low

stress range, but it decreases as the growth rate in number of fatigue cyclic loading increases. Finally, a few of suggestions are given for fatigue design of steel structures.

Key words: steel crane girders; variable-amplitude fatigue; low stress range; growth rate in number of fatigue cyclic loading; limit state equation; reliability index

支承吊车日常反复运行的钢结构吊车梁是工业厂房中重要的结构构件, 疲劳破坏是其最主要的失效模式, 因此, 钢吊车梁的疲劳强度或寿命评估是结构设计和维护的重要工作. 以往的疲劳分析大都采用确定性的方法^[1], 然而钢结构的疲劳破坏是一个非常复杂的问题, 受到众多因素的影响, 这些因素本质上又都是随机变量, 例如钢吊车梁的疲劳荷载效应、构造细节的疲劳强度等, 因此, 钢吊车梁的疲劳分析应采用结构可靠度理论.

钢结构疲劳可靠度的研究, 归纳起来有两种方法: (1) 应力幅-循环次数 ($S-N$) 曲线构造分类法. $S-N$ 曲线构造分类法依据钢结构构造细节的疲劳试验获取的 $S-N$ 曲线, 再辅以疲劳累积损伤原理 (Miner 准则); (2) 断裂力学方法. 由于 $S-N$ 曲线构造分类法简单实用, 而断裂力学方法则需要运用断裂力学理论和精细化的有限元数值技术, 因此, $S-N$ 曲线构造分类法得到更广泛的工程应用和发展. 国内外许多学者开展了基于 $S-N$ 曲线构造分类法的钢结构疲劳可靠度方面的研究, 如 Wirsching 首次开展了管节点的疲劳可靠度方面的研究^[2]; Chryssanthopoulos 对 Wirsching 提出的管节点的疲劳失效极限状态方程进行了修正, 引入了厚度影响因子^[3]; Márquez-Domínguez 提出了海岸风力发电机结构的疲劳可靠度分析方法^[4]; Vijay 在 Miner 线性累积损伤准则和构造细节的 $S-N$ 曲线的基础上提出了一种新的疲劳

收稿日期: 2014-04-24

基金项目: 国家自然科学基金(51478334; 51078291)

第一作者: 潘春宇(1979—), 男, 博士生, 主要研究方向为钢结构疲劳、断裂可靠度. E-mail: panchunyu2009@163.com

通讯作者: 童乐为(1961—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为钢结构. E-mail: tonglw@tongji.edu.cn

可靠度预测模型^[5].在我国,幸坤涛首次研究了钢吊车梁的疲劳可靠度问题,但其疲劳失效极限状态方程考虑因素较少^[6-7],未进行低应力幅疲劳损伤程度的弱化处理;Deng在结构健康监测数据的基础上提出了钢桥疲劳剩余寿命评估的可靠度方法^[8].

钢吊车梁在实际使用过程中承受的是变幅荷载,虽然低应力幅引起的疲劳损伤不能忽视,但其影响程度有所降低.欧洲 EC3 规范采用对构造细节的 $S-N$ 曲线斜率进行修正的方法处理变幅疲劳以及低应力幅问题^[9].在钢吊车梁疲劳可靠度分析中,有关低应力幅、车间生产吊车使用频繁程度提高等因素对疲劳可靠度指标的影响程度如何?这些需要进行专门的研究.

本文根据 Miner 线性累积损伤准则和构造细节的 $S-N$ 曲线,研究和分别建立有关低应力幅对疲劳损伤程度作弱化处理、考虑疲劳荷载循环次数增长率影响的钢吊车梁疲劳失效极限状态方程,探讨钢吊车梁疲劳失效极限状态方程中各随机变量的分布特征,采用一次二阶矩方法和蒙特卡洛模拟方法计算疲劳可靠度指标.

1 钢吊车梁疲劳失效极限状态方程

$S-N$ 曲线由钢结构构造细节的疲劳试验数据经回归分析得到,一般表示如下:

$$N(\Delta\sigma_c)^m = A \quad (1)$$

式中: $\Delta\sigma_c$ 为常幅应力幅; N 为在常幅应力幅 $\Delta\sigma_c$ 作用下疲劳破坏时的循环次数(寿命); A 、 m 为结构构造细节的疲劳性能参数.

Miner 线性累积损伤准则表示为

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (2)$$

式中: D 为疲劳累积损伤值; N_i 为某一应力幅水平 $\Delta\sigma_{ci}$ 下的疲劳破坏时的循环次数; n_i 为该应力幅水平的实际循环次数.

由式(1)和式(2),钢吊车梁在服役期内的疲劳累积损伤 D 可表示为^[8]

$$D = \frac{N_d \cdot t \cdot 365}{A(\Delta\sigma_e)^{-m}} \quad (3)$$

式中: N_d 为疲劳等效应力幅 $\Delta\sigma_e$ 对应的循环次数,即为钢吊车梁一日内(一日以 24 h 计)的循环次数; t 为吊车梁的服役时间(以年计).

由式(3)可知,钢吊车梁 t 年内(一年以 365 d 计)总的循环次数 N_t 为

$$N_t = N_d \cdot t \cdot 365 \quad (4)$$

根据式(3)钢吊车梁的疲劳失效极限状态方程 Z 为

$$Z = \delta - D = \delta - \frac{N_d \cdot t \cdot 365}{A(\Delta\sigma_e)^{-m}} = 0 \quad (5)$$

式中: δ 为钢吊车梁疲劳失效时的临界损伤值.

对于变幅疲劳问题,国际上的研究表明应力幅中小于常幅疲劳极限的低应力幅仍有一定程度的疲劳损伤作用,但是损伤程度有所降低,因此,美国 AASHTO、英国 BS5400 以及欧洲 EC3^[9] 等规范对常幅疲劳试验得到的 $S-N$ 曲线斜率进行修正来处理变幅疲劳问题, $S-N$ 曲线表达式修正为^[4]:

$$N = \begin{cases} A_1(\Delta\sigma_c)^{-m_1}, & N \leq N_D \\ A_2(\Delta\sigma_c)^{-m_2}, & N > N_D \end{cases} \quad (6)$$

式中: A_1 、 m_1 和 A_2 、 m_2 分别为 $S-N$ 曲线在 $N \leq N_D$ 区段和在 $N > N_D$ 区段的疲劳性能参数; N_D 为 $S-N$ 曲线常幅疲劳极限 $\Delta\sigma_D$ 对应的循环次数.

由式(2)和式(6),则考虑 $S-N$ 曲线在低应力幅、长寿命区段时的疲劳累积损伤 D 可表示为

$$D = \frac{t \cdot 365 \cdot N_{d1}}{A_1 \cdot \Delta\sigma_{e1}^{m_1}} + \frac{t \cdot 365 \cdot N_{d2}}{A_2 \cdot \Delta\sigma_{e2}^{m_2}} \quad (7)$$

式中: $\Delta\sigma_{e1}$ 为常幅疲劳极限 $\Delta\sigma_D$ 之上的等效应力幅,对应的日循环次数为 N_{d1} ; $\Delta\sigma_{e2}$ 为常幅疲劳极限 $\Delta\sigma_D$ 之下的等效应力幅,对应的日循环次数为 N_{d2} .

由式(7),钢吊车梁的疲劳失效极限状态方程为

$$Z = \delta - \left(\frac{t \cdot 365 \cdot N_{d1}}{A_1 \cdot \Delta\sigma_{e1}^{m_1}} + \frac{t \cdot 365 \cdot N_{d2}}{A_2 \cdot \Delta\sigma_{e2}^{m_2}} \right) = 0 \quad (8)$$

2 考虑钢吊车梁未来使用率增长的疲劳失效极限状态方程

随着我国经济的快速发展,许多企业的车间生产呈现逐年增长的趋势,致使钢吊车运营日趋繁忙,也就是钢吊车梁承受疲劳荷载或应力幅的循环次数逐年增加,因此,在计算钢吊车梁的疲劳可靠度指标时需将疲劳荷载循环次数的增长率考虑在内.考虑疲劳荷载循环次数的增长率,未来 t 年内总的循环次数为^[10-11]:

$$N = N_d \cdot 365 \cdot \int_0^t (1+\alpha)^t dt = N_d \cdot 365 \cdot \frac{(1+\alpha)^t - 1}{\ln(1+\alpha)} \quad (9)$$

式中, α 为疲劳荷载循环次数的增长率.

令:

$$T = \frac{(1+\alpha)^t - 1}{\ln(1+\alpha)} \quad (10)$$

式中, T 为新的服役时间,年.

由式(10)可得新的服役时间 T 与服役时间 t 的关系曲线,如图 1 所示.由图 1 可见,随疲劳荷载循环次数的增长率 α 的增大,按式(10)计算的新的服役时间 T 增大.若增长率 $\alpha=4\%$,则钢吊车梁的服役时间由 15 年增加到 20.4 年.比较式(4)和式(9)后发现,在日循环次数 N_d 变化不大的情况下,考虑疲劳荷载循环次数的增长率 α ,相当于服役时间的增长.

(1)未作低应力幅疲劳损伤弱化处理但考虑循环次数增长率 α 影响的极限状态方程

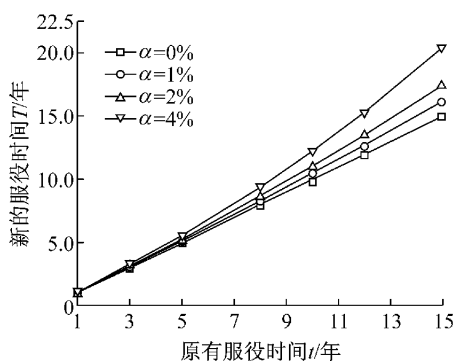


图 1 新的服役时间与原有服役时间的关系

Fig.1 Relationship between new and old service period

由式(5)、(9)可得到未作低应力幅损伤弱化处理,但考虑循环次数增长率 α 影响的钢吊车梁疲劳失效极限状态方程为

$$Z = \delta - \frac{N_{d1} \cdot t \cdot 365}{A \cdot \Delta\sigma_e^m} \cdot \frac{(1+\alpha)^t - 1}{\ln(1+\alpha)} = 0 \quad (11)$$

(2)作低应力幅疲劳损伤弱化处理和考虑循环次数增长率 α 影响的极限状态方程

由式(8)、(9)可得到作低应力幅损伤弱化处理和循环次数增长率 α 影响的钢吊车梁疲劳失效极限状态方程为

$$Z = \delta - \left(\frac{N_{d1} \cdot 365}{A_1 \cdot \Delta\sigma_{e1}^{m_1}} + \frac{N_{d2} \cdot 365}{A_2 \cdot \Delta\sigma_{e2}^{m_2}} \right) \cdot \frac{(1+\alpha)^t - 1}{\ln(1+\alpha)} = 0 \quad (12)$$

3 随机变量的分布特征

方程(5)、(8)、(11)、(12)中共有 10 个随机变量,分别是: N_d 、 N_{d1} 、 N_{d2} 、 A 、 A_1 、 A_2 、 $\Delta\sigma_e$ 、 $\Delta\sigma_{e1}$ 、 $\Delta\sigma_{e2}$ 、 δ .以下分别讨论这些随机变量的分布特征.

(1)疲劳等效应力幅及循环次数

构造细节的疲劳荷载效应,可通过现场实测.由现场实测得到构造细节的应力-时间历程后,可采用

雨流法、泄水法等计数方法统计疲劳应力幅 $\Delta\sigma_e$ 及循环次数 N_d 的分布特征^[12].如果考虑低应力幅疲劳损伤弱化处理,只是在一日的实测时间内共有 2 个等效应力幅值 $\Delta\sigma_{e1}$ 、 $\Delta\sigma_{e2}$ 和 2 个循环次数值 N_{d1} 、 N_{d2} .

(2)构造细节的疲劳性能参数

构造细节的疲劳性能参数一般由试验确定,通常认为式(1)的参数 m 为常值,而参数 A 为随机变量.若没有构造细节的疲劳试验数据,疲劳性能参数可采用钢结构设计规范.由于我国钢结构设计规范 GB50017—2003(以后简称钢规)未考虑变幅疲劳 S-N 曲线斜率变化以反映低应力幅对疲劳损伤程度降低的效应,因此可参考欧规 EC3^[9],如图 2 所示.

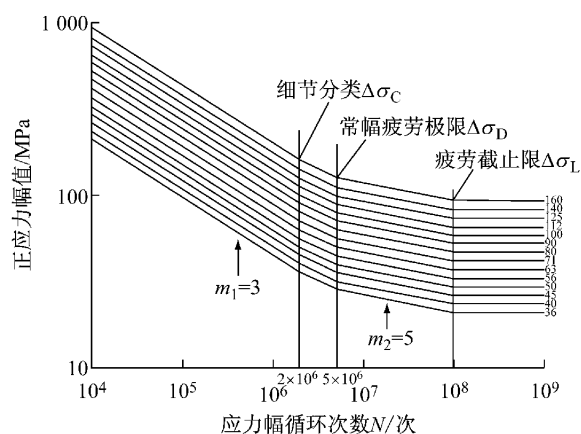


图 2 EC3 规范的 S-N 曲线^[9]

Fig.2 S-N curve of EC3 code

(3)疲劳失效临界损伤值 δ

由 Miner 疲劳累积损伤准则,当疲劳累积损伤达到 1 时,结构发生疲劳破坏,而实际上结构发生疲劳破坏时累积损伤并不一定等于 1,而是具有一定的随机性^[8].为此,定义疲劳失效时的临界损伤值为 δ ,且 δ 为随机变量. Wirsching 认为 δ 服从均值为 1.0、变异系数为 0.3 的对数正态分布^[2].

4 疲劳可靠度指标的计算方法

建立疲劳失效极限状态方程后,即可采用一次二阶距方法(JC 法)和蒙特卡洛模拟方法计算疲劳可靠度指标^[12].对于一次二阶距方法,首先将极限状态方程中不服从正态分布的随机变量正态化,转换原则是在验算点处 x_i^* 两者具有相等的概率分布函数值和概率密度函数值.正态化后随机变量的均值 μ_{X_i} 、标准差 σ_{X_i} 公式为^[8]:

$$\mu_{X_i} = x_i^* - \Phi^{-1}[F_{X_i}(x_i^*)]\sigma_{X_i}, \quad i = 1, 2, \dots, l \quad (13)$$

$$\sigma_{X_i} = \frac{\varphi(\Phi^{-1}[F_{X_i}(x_i^*)])}{f_{X_i}(x_i^*)}, i = 1, 2, \dots, l \quad (14)$$

式中: $F_{X_i}(x_i^*)$ 为验算点处累积分布函数值; $f_{X_i}(x_i^*)$ 为验算点处概率密度函数值; Φ 为标准正态分布函数。

因此,对于形如 $Z = g_X(X_1, X_2, \dots, X_l) = 0$ 的极限状态方程,按一次二阶矩方法得到的可靠度指标为

$$\beta = \frac{g_X(x_1^*, x_2^*, \dots, x_l^*) + \sum_{i=1}^l \frac{\partial g_X}{\partial X_i} (\mu_{X_i} - x_i^*)}{\sqrt{\sum_{i=1}^l \left(\frac{\partial g_X}{\partial X_i} \Big|_{x^*} \sigma_{X_i} \right)^2}} \quad (15)$$

对于蒙特卡洛模拟方法,若已知随机变量的概率分布,根据结构的极限状态方程,产生符合随机变量概率分布的一组随机数,将随机数代入极限状态方程,计算得到极限状态方程的随机数数组。如果 M 个极限状态方程的随机数中有 M_f 个小于或等于零,当 M 足够大时,根据大数定律,此时的频率已近似于概率,因而失效概率为

$$P_f = P[g_X(X_1, X_2, \dots, X_n)] \leq 0 = \frac{M_f}{M} \quad (16)$$

疲劳可靠度指标 β 的计算式为

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (17)$$

5 算例分析

为了研究疲劳失效极限状态方程(5)、(8)、(11)、(12)中低应力幅损伤弱化处理和疲劳荷载循环次数增长率 α 对疲劳可靠度指标 β 的影响,进行如下算例分析。某车间一钢吊车梁,至今已使用 5 年,钢吊车梁的构造细节如图 3 所示。

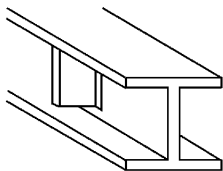


图 3 有加劲肋的钢吊车梁

Fig.3 Steel crane girder with stiffener

利用 Matlab 语言按式(18)模拟该吊车梁跨中下翼缘外侧 24 h 的应力-时间历程,如图 4 所示。

$$\sigma = 50 \cdot (\text{randn}(5\,000, 1) + \text{rand}(5\,000, 1)) \quad (18)$$

式中: σ 为应力; $\text{randn}(5\,000, 1)$ 为正态分布随机数; $\text{rand}(5\,000, 1)$ 为 0-1 分布随机数。

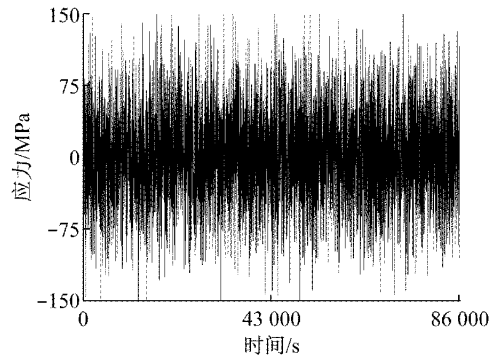


图 4 应力-时间历程

Fig.4 Stress-time histories

对于极限状态方程(5)和(11),该钢吊车梁构造细节的疲劳强度 $S-N$ 曲线采用我国钢规的疲劳分类曲线 5,对应 2×10^6 次的疲劳强度为 90 MPa,参数 m (曲线斜率)为 3.0,参数 A 服从对数正态分布,变异系数参照文献[13]采用 0.45,并将循环次数为 10^8 次对应的疲劳强度值设定为疲劳截止限。

对于极限状态方程(8)和(12),为便于比较分析,如图 5 所示,对分类曲线 5 作低应力幅对疲劳损伤程度有降低的弱化处理,处理后的参数 m_1 和 m_2 分别为 3.0 和 5.0,参数 A_1 和 A_2 都服从对数正态分布,变异系数仍都采用 0.45,将循环次数为 10^8 次对应的疲劳强度值设定为疲劳截止限。

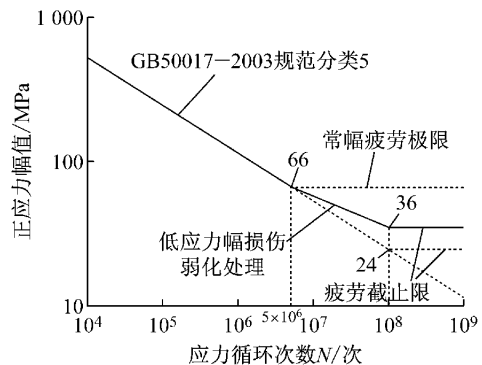


图 5 考虑低应力幅对疲劳损伤度降低的 S-N 曲线

Fig.5 S-N curve considering decrease of fatigue damage due to low stress range

利用雨流循环计数法,对图 4 所示的应力-时间历程进行循环计数,应力幅 $\Delta\sigma$ 、 $\Delta\sigma_1$ 、 $\Delta\sigma_2$ 等的频谱计算结果如图 6 所示。按钢规公式得到疲劳等效应力幅 $\Delta\sigma_e$ 、 $\Delta\sigma_{e1}$ 、 $\Delta\sigma_{e2}$,它们也服从对数正态分布。Deng^[8]的研究表明日循环次数的随机性对可靠度指标的影响不能忽视,本文假设日循环次数服从对数正态分布,变异系数为 0.05。各随机变量的统计参数

列于表 1—2.

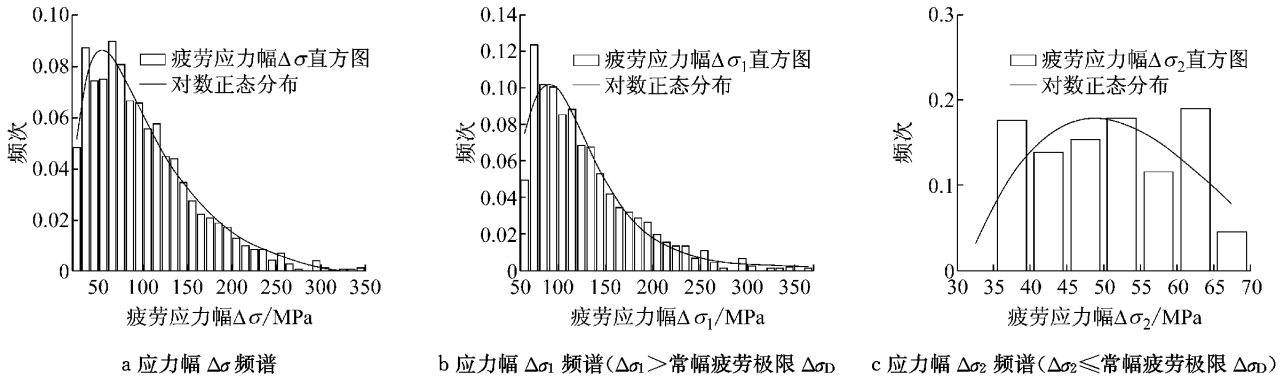


图 6 应力幅谱的计算结果

Fig.6 Calculated results of stress range spectrum

表 1 疲劳等效应力幅的统计参数

等效应力幅	概率分布	均值/MPa	变异系数
$\Delta\sigma_e$	对数正态分布	42.2	0.058 3
$\Delta\sigma_{e1}$	对数正态分布	42	0.094 0
$\Delta\sigma_{e2}$	对数正态分布	10.4	0.032 8

表 2 极限状态方程中各随机变量的统计参数

随机变量	代表符号	概率分布	均值	变异系数
疲劳性能参数	m	常值	3.0	
	m_1	常值	3.0	
	m_2	常值	5.0	
	A	对数正态分布	1.47×10^{12}	0.45
临界损伤值	A_1	对数正态分布	1.47×10^{12}	0.45
	A_2	对数正态分布	5.369×10^{15}	0.45
	δ	对数正态分布	1.0	0.3
日循环次数	N_d	对数正态分布	1 384	0.05
	N_{d1}	对数正态分布	906	0.05
	N_{d2}	对数正态分布	352	0.05

针对未作低应力疲劳幅损伤弱化处理(极限状态方程(5))和作低应力幅疲劳损伤弱化处理(极限状态方程(8))两种情况,表 3 给出了分别按照一次二阶矩方法(验算点法)和蒙特卡洛模拟方法计算得到的钢吊车梁服役 10 年后的疲劳可靠度指标 β 值,同时图 7 给出了按照一次二阶矩方法计算得到的 β 值随服役时间变化的关系曲线。

图 8 给出了随疲劳荷载循环次数增长率 α 的情况下,循环次数与服役时间的关系曲线.在疲劳荷载循环次数不同增长率的情况下,同时,图 9 和图 10 分别给出了在针对未作低应力幅损伤弱化处理(极限状态方程(11))和作低应力幅损伤弱化处理(极限状态方程(12))两种情况,按照一次二阶矩方法计算得到的疲劳可靠度指标 β 值随服役时间变化的曲

线。

表 3 疲劳可靠度指标的计算结果

极限状态方程	可靠度指标 β (服役 10 年后)	
	蒙特卡洛模拟方法	一次二阶矩方法
方程(5),未作低应力幅损伤弱化处理	2.252 2	2.251 8
方程(8),作低应力幅损伤弱化处理	2.820 8	2.820 3

分析这些图表数据可得到以下特点:

(1)由表 3 可知,是否作低应力幅损伤弱化处理,疲劳可靠度指标 β 值差别较大.作低应力幅损伤弱化处理后, β 值显著提高.再者,按一次二阶矩方法和蒙特卡洛模拟方法计算得到的 β 值一致,说明计算程序可靠适用。

(2)由图 7 可知,随钢吊车梁服役年限的增加,无论是否作低应力幅损伤弱化处理,疲劳可靠度指标 β 值都将下降.但是,下降程度两者有一定的差别,例如服役 10 年后,未作低应力幅损伤弱化处理比作低应力幅损伤弱化处理的 β 值小 25.3%.若可接受的疲劳目标可靠度指标 $\beta_t = 2.4^{[6]}$,则未作低应力幅损伤弱化处理的 β 值已经低于 2.4,相反作低应力幅损伤弱化处理后的 β 值仍大于 2.4,差异较大。

(3)由图 8 可见,随着疲劳荷载循环次数增长率 α 的增大,循环次数逐渐增大.例如当 α 为 4%时,钢吊车梁服役 15 年的循环次数由 82 万次增加到 112 万次。

(4)从图 9 和 10 可见,无论是否作低应力损伤弱化处理,随着疲劳荷载循环次数增长率 α 的增大,疲劳可靠度指标 β 值都降低.在使用初期,疲劳荷载循环次数增长率 α 的影响不显著,但随服役时间的

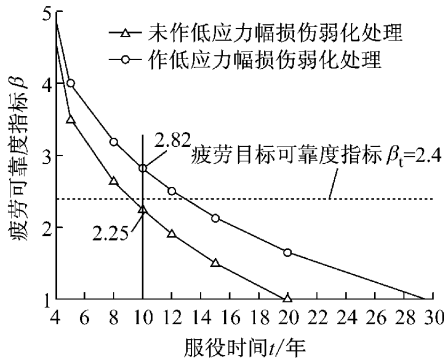


图 7 低应力幅的损伤弱化对 β 的影响

Fig.7 Effect of damage reduction of low stress range on fatigue reliability index β

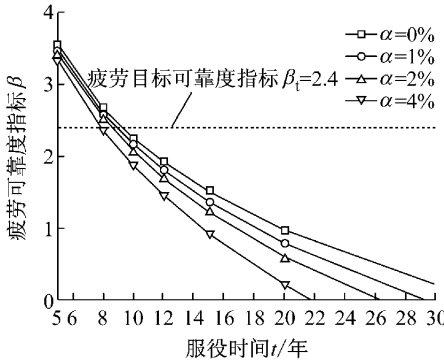


图 9 未作低应力幅损伤弱化处理时 α 对 β 的影响

Fig.9 Effect of α on β without damage reduction of low stress range

增长,影响逐渐加大.例如,在作低应力幅损伤弱化处理的情况下(图 10),当 $\alpha=0\%$ 时,钢吊车梁服役 14 年后 $\beta=2.4$;当 $\alpha=4\%$ 时,钢吊车梁服役 14 年后 $\beta=2.0$,如果疲劳目标可靠度指标 $\beta_t=2.4$ ^[6],则此吊车梁已经疲劳失效.

6 钢结构疲劳设计建议

由第 5 节分析可知,S-N 曲线低应力幅损伤弱化处理对疲劳可靠度指标的影响较大,为此,建议钢结构疲劳设计中应注意以下几点:

- (1) 钢结构疲劳设计应采用可靠度理论及其方法.
- (2) 对变幅疲劳验算,当有大量低应力幅作用时,应根据我国现行钢规所选用的 S-N 曲线进行低应力幅损伤弱化处理,使得疲劳设计经济合理.
- (3) 疲劳失效极限状态方程可采用式(5)或式(8).
- (4) 对变幅疲劳应力幅的处理:

当疲劳失效极限状态方程采用式(5)时,且 S-N

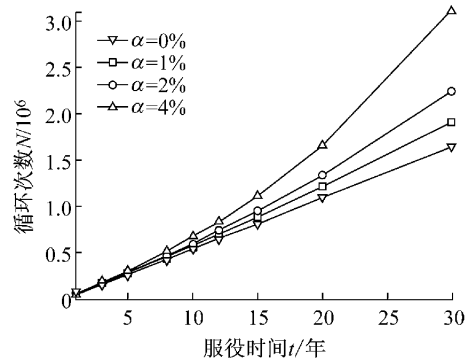


图 8 服役时间与循环次数的关系

Fig.8 Relationship between service period and cycle number

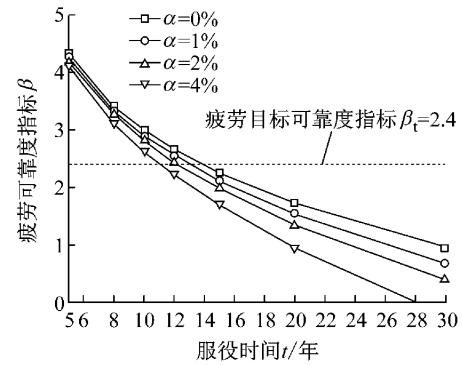


图 10 作低应力幅损伤弱化处理时 α 对 β 的影响

Fig.10 Effect of α on β with damage reduction of low stress range

曲线已作低应力幅损伤弱化处理,则疲劳等效应力幅可计算如下^[14]:

$$\Delta\sigma_e = \left[\frac{\sum (n_i \cdot \Delta\sigma_i^{m_1}) + (\Delta\sigma_D)^{m_2 - m_1} \cdot \sum (n_j \cdot \Delta\sigma_j^{m_2})}{\sum n_i + \sum n_j} \right]^{1/m_1} \quad (19)$$

式中: $\sum n_i + \sum n_j$ 为以循环次数表示的结构预期使用寿命; n_i 为应力幅 $\Delta\sigma_i$ ($\Delta\sigma_i \geq \Delta\sigma_D$) 对应的循环次数; n_j 为应力幅 $\Delta\sigma_j$ ($\Delta\sigma_D \leq \Delta\sigma_j \leq \Delta\sigma_L$) 对应的循环次数.

当疲劳失效极限状态方程采用式(8)时,且 S-N 曲线已作低应力幅损伤弱化处理,疲劳等效应力幅可按本文前面提出的分析方法,按雨流计数法或泄水法分别统计 $\Delta\sigma_{e1}$ 、 $\Delta\sigma_{e2}$ 的统计参数.

7 结语

- (1) 随钢吊车梁服役年限的增加,进行与未进行低应力幅损伤弱化处理计算得到的疲劳可靠度指标

β 值都将下降. 但两者的下降程度有一定的差别, 例如服役 10 年后, 未作低应力幅损伤弱化处理比作低应力幅损伤弱化处理的 β 值小 25.3%, 差异较大.

(2) 无论是否作低应力幅损伤弱化处理, 随疲劳荷载循环次数增长率的升高, 疲劳可靠度指标 β 值降低. 随着服役时间的增长, 疲劳荷载循环次数增长率越大, β 值越低.

(3) 变幅疲劳验算时进行低应力幅损伤弱化处理可使钢结构疲劳设计经济合理, 本文提出的钢结构疲劳设计建议, 可为我国钢规修订提供参考.

参考文献:

- [1] GB50144—2008. 工业建筑可靠性鉴定标准[S]. 北京: [s. n.], 2008.
GB50144—2008. Standard for appraisal of reliability of industrial buildings and structures[S]. Beijing: [s. n.], 2008.
- [2] Wirsching P H. Fatigue reliability for offshore structures[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1984, 110(10):2340.
- [3] Chryssanthopoulos M K, Righiniotis T. D. Fatigue reliability of welded steel structures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(11):1199.
- [4] Márquez-Domínguez S, Sørensen J D. Fatigue reliability and calibration of fatigue design factors for offshore wind turbines [J]. Energies, 2012, 5(1):1816.
- [5] Rathod V, Yadav O M P, Rathore A, *et al.* Probabilistic modeling of fatigue damage accumulation for reliability prediction[J]. International Journal of Quality, Statistics, and Reliability, 2011, 12(1):1.
- [6] 幸坤涛, 岳庆瑞, 刘洪滨. 钢结构吊车梁疲劳动态可靠度研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(8):38.
- XING Kuntao, YUE Qingrui, LIU Hongbin. Fatigue dynamic reliability analysis for steel crane girders [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(8):38.
- [7] 幸坤涛, 张家启, 岳清瑞. 钢吊车梁疲劳可靠度分析与评估[J]. 工程力学, 2004, 21(1):77.
XING Kuntao, ZHANG Jiaqi, YUE Qingrui. Fatigue reliability analysis and evaluation of steel crane beams [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(1):77.
- [8] DENG Yang, DING YouLiang, LI AiQun, *et al.* Fatigue reliability assessment for bridge welded details using long-term monitoring data [J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(12):3371.
- [9] Eurocode 3. Design of steel structure part-1-9: fatigue[S]. London: [s. n.], 2005.
- [10] Kwon K, Frangopol D M. Bridge fatigue reliability assessment using probability density functions of equivalent stress range based on field monitoring data [J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(5):1221.
- [11] LIU Ming, Frangopol D M, Kwon K. Fatigue reliability assessment of retrofitted steel bridges integrating monitored data [J]. Structural Safety, 2010, 32(1):77.
- [12] 胡毓仁, 李典庆, 陈伯真. 船舶与海洋工程结构疲劳可靠度分析[M]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学出版社, 2010.
HU Yuren, LI Dianqing, CHEN Bozhen. Fatigue reliability analysis of ship and ocean engineering structures [M]. Heilongjiang: Harbin Engineering University Press, 2010.
- [13] ZHAO Zhengwei, Haldar A, Breen F L. Fatigue-reliability evaluation of steel bridges [J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(5):1608.
- [14] 谢恩. 我国钢结构疲劳设计规范修订研究[D]. 上海: 同济大学, 2011.
XIE En. Research on revision of chinese specification for fatigue design of steel structures [D]. Shanghai: Tongji University, 2011.