



内河趸船系泊设施疲劳分析*

孔繁^{1,2}, 吴林键^{1,2}, 李怡^{1,2,3}, 刘冰冰^{1,2}, 李艳坤^{1,2}

(1. 重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074;
2. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 3. 中国交建海岸工程水动力重点实验室, 天津 300222)

摘要: 基于 *Miner* 线性累积损伤准则, 提出当只考虑内河趸船系泊设施的系缆、系锚应力变化作为引起疲劳损伤的主要因素时, 对其系泊缆绳、锚链进行疲劳分析的具体实施步骤。以某内河斜坡式码头工程项目为依托, 计算得到在 4 种随机过程情况下, 各系泊缆绳、锚链在整个疲劳寿命期范围内的日均系缆、系锚应力-历时曲线。基于该应力值样本, 计算各缆绳、锚链的累积疲劳损伤, 并预测其疲劳寿命年限。该疲劳分析方法不仅可以为内河趸船系泊设施的安全隐患整改提供强有力的技术支持, 同时也能为内河新建码头工程项目提供技术储备。

关键词: 内河; 趸船系泊设施; 缆绳; 锚链; 疲劳分析

中图分类号: O 346.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)04-0066-07

Fatigue analysis of pontoon mooring facilities in inland river

KONG Fan^{1,2}, WU Lin-jian^{1,2}, LI Yi^{1,2,3}, LIU Bing-bing^{1,2}, LI Yan-kun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Hydraulic & Waterway Engineering of the Ministry of Education, National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
3. CCCC-Key Hydrodynamic Laboratory for Coastal Engineering, Tianjin 300222, China)

Abstract: Based on the criterion of *Miner* linear cumulative damage, we propose the specific implementation steps of fatigue analysis of the mooring line and anchor chain when only considering pontoon mooring devices' stress changes of mooring line and anchor chain as main factors causing the fatigue damage. Based on one slop wharf project in the inland river, we calculate each mooring line and anchor chain's average daily stress-duration curve within the scope of the whole fatigue life period under the four kinds of random process. Taking these stress values as samples, we calculate to get the cumulative fatigue damage of every one, and predict the fatigue life. The fatigue analysis method can not only provide a strong technical support for the safety hidden dangers' rectification of pontoon mooring devices in the inland river, but also provide technical reserves for new wharf engineering projects in the inland river.

Keywords: inland river; pontoon mooring device; mooring line; anchor chain; fatigue analysis

当前, 内陆河流中的斜坡式码头、浮码头等由于受河流水位随机涨落、流速变化等水文情势及其余诸多因素的影响, 随着时间的推移, 其码头趸船系泊设施(缆绳、锚链)在不同的随机过

程情况下将会呈现出交替循环的松弛-张紧状态。在这一过程中, 各系泊缆绳、锚链上将不可避免地出现疲劳裂纹, 随着疲劳裂纹的不断积累和开展, 最终将导致趸船系泊缆绳和锚链的疲劳破

收稿日期: 2014-07-09

*基金项目: 重庆市港航管理局科技项目(SW2013-27)

作者简介: 孔繁(1990—), 女, 硕士研究生, 从事港口、海岸及近海工程方面的研究。

坏^[1]。内河趸船系泊设施的疲劳问题将直接影响码头的安全作业、正常运营、码头及其附属设施的使用寿命年限,在码头的设计及使用过程中理应引起高度重视。

目前,国内对于内河码头趸船系泊设施疲劳安全性能方面的研究成果尚属较少,国家也并未出台相关的规范文件资料作为内河趸船系泊设施疲劳分析的依据。针对上述问题,本文基于 *Miner* 线性累积疲劳损伤准则,提出了当只考虑趸船系泊设施的系缆、系锚应力变化作为疲劳损伤的主要因素时,对缆绳、锚链进行疲劳分析的具体实施步骤和方法。并依托某内河斜坡式码头工程项目,对其系泊缆绳、锚链在不同随机过程情况下进行疲劳分析。

1 趸船系泊设施疲劳分析基本理论

当前,结构疲劳分析的常用理论主要有两种^[2]: 1) 基于 *S-N* 曲线的 *Miner* 线性累积疲劳损伤准则; 2) 基于 *Paris* 裂纹扩展法则的断裂力学计算方法。本文主要基于第 1 种理论方法对内河趸船系泊缆绳、锚链进行疲劳分析。

1.1 基于 *S-N* 曲线的 *Miner* 线性累积疲劳损伤理论

疲劳累积损伤理论从宏观上主要可分为 3 大类^[3], 包括: 线性累积疲劳损伤理论、修正线性累积疲劳损伤理论以及非线性累积疲劳损伤理论。其中, 线性累积损伤理论认为在循环荷载作用下, 结构或构件的疲劳损伤可以通过线性累加得到, 当疲劳损伤累积达到一定程度时, 结构即发生破坏。

目前, 在工程领域内最常用的疲劳累积损伤模型建立在 *Miner* 线性累积损伤理论^[4] 基础之上, 该理论认为: 在多级交变应力作用下结构发生疲劳破坏时, 结构的总疲劳损伤 D 可由结构在各级应力幅 S_i 作用下所产生的疲劳损伤 D_i 进行线性累加得到:

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

式中: n_i 为第 i 级应力幅 S_i 出现的实际循环次数;

N_i 为结构在第 i 级应力幅为 S_i 的恒幅交变应力作用下达到破坏所需要的循环次数。其中, N_i 需要通过结构材料的 *S-N* 曲线计算得到。

1.2 趸船系泊设施疲劳分析的实施步骤

结合 *Miner* 线性累积疲劳损伤的基本理论, 可通过以下实施步骤对趸船系泊设施中的缆绳、锚链进行疲劳分析。具体步骤如下:

1) 根据工程所在地的自然环境因素随时间的变化规律, 得到在疲劳寿命期范围内, 各随机过程情况下趸船系泊缆绳、锚链的应力-历时关系;

2) 采用雨流计数法统计各级应力幅 S_i 所出现的实际循环次数 n_i ;

3) 根据系泊缆绳、锚链材料的 *T-N* 曲线, 得到缆绳、锚链在应力幅为 S_i 的恒幅交变应力作用下达到疲劳破坏所需的循环次数 N_i ;

4) 基于 *Miner* 线性累积损伤理论, 计算各系泊缆绳、锚链的疲劳损伤 D , 并预测其疲劳寿命年限。

1.2.1 缆绳、锚链的应力-历时关系

根据 JTS 144-1—2010 《港口工程荷载规范》^[5] 规定, 在内河中影响趸船系泊设施系缆力、系锚力的主要因素为风荷载和水流力。其中风向、风速以及水流流速、流向的变化将直接影响系泊缆绳、锚链的应力变化情况。不同内陆河流的水文情势有所区别, 但在 1 a 范围内河流的水位会发生或大或小的变幅, 这必然会使得水流流速发生相应的改变, 由此将直接导致其内码头趸船系泊缆绳、锚链的系缆力、系锚力发生同步变化。由于内陆河流的流量、水位、流速等随时间的变化过程是随机的, 因此, 可将各物理量随时间的变化规律看作是不同的随机过程。

由于水流流速的大小及其随时间的变化情况是影响趸船系泊设施系缆、系锚应力变化规律的重要因素, 因此, 需要得到码头所在位置的流速-时间关系, 并结合该处的风速和风向分布规律, 可分别计算得到在不同随机过程情况下, 码头工程所在地趸船系泊设施的系缆、系锚应力-历时关系。

1.2.2 雨流计数法

雨流计数法^[6]是一种常用的双参数循环计数法,在计数原则上有一定的力学基础。雨流计数法的实质是从结构疲劳损伤机理出发,其主要功能是将一个随机过程的应力-历时关系简化为一系列的全循环或半循环,并统计得到相应的应力幅值和循环次数以供疲劳分析使用,该方法在疲劳寿命评估分析等工程领域中运用十分广泛。本文基于雨流计数法原理,编写计算机程序来统计得到在各随机过程情况下,趸船系泊缆绳、锚链的各级应力幅 S_i 出现的实际循环次数 n_i 。

1.2.3 T-N 曲线

系泊缆绳、锚链在正常工作过程中主要会受到系泊张力或因打结而出现扭转的现象^[7]。本文主要考虑系泊张力的变化对缆绳、锚链疲劳损伤的影响。根据 API 推荐规范《浮式结构定位系统的设计与分析》^[8]的规定,应根据各缆绳、锚链试验的 T-N 曲线,来选取计算缆绳、锚链疲劳损伤的相关参数,其中的 T 代表系缆、系锚张力, N 代表恒幅荷载循环的次数。

API 推荐规范^[8]中同时规定,用于各种系泊部件的 T-N 曲线应建立在对该部件的疲劳试验数据和回归分析的基础上,在缺乏更准确数据的情况下, T-N 曲线的离散方程式如式(2),可用来计算在恒幅交变应力幅 S 作用下各缆绳、锚链达到疲劳破坏所需要的理论循环次数 N。

$$NS^M = K \quad (2)$$

式中: N 为恒幅交变应力作用下构件达到疲劳破坏所需要的理论循环次数; S 为应力幅 (MPa); M 为 T-N 曲线的斜率; K 为 T-N 曲线的截距。在实际工程中,可根据趸船系泊缆绳、锚链材料的 T-N 曲线,确定 M、K 参数值,根据式(2)计算得出在不同随机过程情况下,缆绳、锚链在各级应力幅为 S_i 的恒幅交变应力作用下达到破坏所需要的循环次数 N_i 。

1.2.4 缆绳、锚链的疲劳损伤计算

综上所述,根据雨流计数法原理可计算得到

在某随机过程情况下,系泊缆绳、锚链出现应力幅 S_i 的实际循环次数 n_i ,并基于 T-N 曲线结合式(2)可计算得在各级应力幅为 S_i 的恒幅交变应力作用下,各缆绳、锚链达到疲劳破坏所需要的理论循环次数 N_i ,则各缆绳、锚链的疲劳损伤表达式为:

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (3)$$

根据式(3),可计算得到各缆绳、锚链在各级应力幅 S_i 情况下的疲劳损伤值 D_i ,基于 Miner 线性累积疲劳损伤理论,根据式(1)计算得到在该随机过程情况下,各缆绳、锚链的总体疲劳损伤值 D,同时预测趸船系泊设施的疲劳寿命年限 Y。

2 实例分析

2.1 工程概况

重庆市某内河码头位于巴南区鱼洞滨江路,其所在地位于长江三峡水库变动回水区重庆河段。该码头使用岸线总长约 315 m,共设 3 000 吨级多用途泊位 1 个以及 400 车位滚装船泊位 1 个。以该码头中 3 000 吨级多用途泊位为例,对其趸船系泊缆绳、锚链进行疲劳分析。该泊位由 1 艘钢质趸船和 1 条架空缆车斜坡道组成,趸船平面尺度为 72 m × 15 m,架空斜坡道坡度为 1:2.4,斜坡道坡顶高程 209.7 m,坡底高程 167.20 m,水平投影长 102 m,坡道总长 110.50 m、宽 28.5 m。缆车斜坡道下部为桩柱式结构,桩柱间距 17 m,共 6 跨。每排 4 根 $\phi 1\ 800$ mm 的钻孔灌注桩,桩基嵌入中等风化岩层深 3 倍桩径。主柱柱 $\phi 1\ 600$ mm,柱间设 100 cm × 80 cm 联系梁,柱顶横梁尺寸为 2 850 cm × 220 cm × 140 cm,地梁尺寸为 2 690 cm × 240 cm × 150 cm。

2.2 缆绳、锚链在疲劳寿命期内的应力循环次数

由于该码头的设计使用寿命为 50 a,根据 API 推荐规范^[8]规定,系泊缆绳、锚链的疲劳寿命年限应为设计使用寿命的 3 倍,故本文依托工程实例中缆绳、锚链的整个疲劳寿命期应为 150 a。

对于长江三峡水库变动回水区重庆河段的水

文情势就某 1 d 而言, 其水位、流量、流速变化幅度不会太大。可认为在 1 d 时间范围之内, 工程所在地河道断面的日均水位、日均流量以及日均流速是恒定的。基于上述假设, 可通过工程所在地河道断面处多年的日平均水文资料计算得到各系泊缆绳、锚链在整个疲劳寿命期内的日均应力-历时关系。按照上述思路, 趸船系泊设施在整个疲劳寿命期范围内的总应力循环次数应为 $365 \times 150 = 54\ 750$ 次。根据 JTS 152—2012 《水运工程钢结构设计规范》^[9] 中的规定, 当构件的应力循环次数超过 5×10^4 次时, 应进行疲劳计算。

对本工程实例中趸船系泊设施的疲劳分析只考虑引起各缆绳、锚链疲劳损伤的主要影响因素为系缆、系锚应力随时间的变化, 暂不考虑系泊设施的平面布置形式、缆绳及锚链的锈蚀、构件连接薄弱部分以及船行波所引起船体的动力响应等其余各因素的影响。

2.3 趸船系泊设施总平面布置及部件规格

本文依托工程实例中趸船系泊设施总平面布置见图 1。

从图 1 可以看出, 趸船系泊设施共设缆绳 4 根、锚链 3 根, 各缆绳、锚链的规格见表 1。

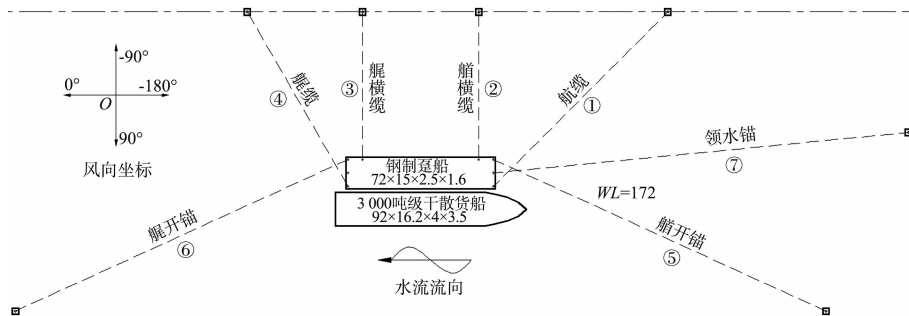


图 1 趸船系泊设施总平面布置 (单位: m)

表 1 缆绳、锚链的规格

编号	名称	类型	材料	直径/mm	长度/m	说明
①	船缆	螺旋形钢绞线	钢材	$\phi 32$	约 124.0	各缆绳、锚链的长度应随三峡库区变动回水区的水位变化而适时调整
②	船横缆			$\phi 28$	约 74.5	
③	艏横缆			$\phi 28$	约 74.5	
④	艉缆			$\phi 28$	约 101.8	
⑤	船开锚	普通有档链环	AM ₂ 级链钢	$\phi 44 \times 2$	1 155.0	
⑥	艏开锚			$\phi 38 \times 2$	577.5	
⑦	领水锚			$\phi 44 \times 2$	1 155.0	

2.4 缆绳、锚链的 T-N 曲线

如表 1 所示, 本工程实例中所采用的缆绳均为螺旋形钢绞线, 锚链均为普通有档链环。根据 API 推荐规范^[8] 规定, 应选取其中的螺旋形钢绞线 (Spiral Strand) 以及普通有档链环 (Chain-Stud link) 的 T-N 曲线, 见图 2。根据图 2 中的 2 条 T-N 曲线, 得到相应的计算参数, 其中螺旋形钢绞线的 $M = 5.05$, $K = 10^{(3.25 - 3.43L_m)}$, L_m 为钢缆绳的平均荷载与断裂强度的比值; 普通有档链环的 $M = 3.0$, $K = 1\ 000$ 。

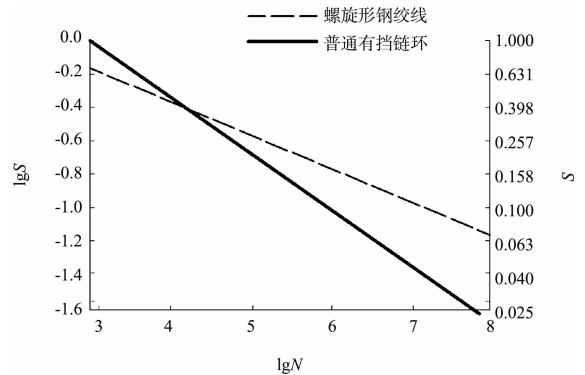


图 2 螺旋形钢绞线及普通有档链环的 T-N 曲线

2.5 自然条件

2.5.1 水流因素

1) 工程所在地河道断面的月均流量-时间序列。

根据附近水文站实测的水文数据资料,可统计得到工程所处河道断面 20 a 范围内各年的实测月均流量-时间序列关系,见图 3。

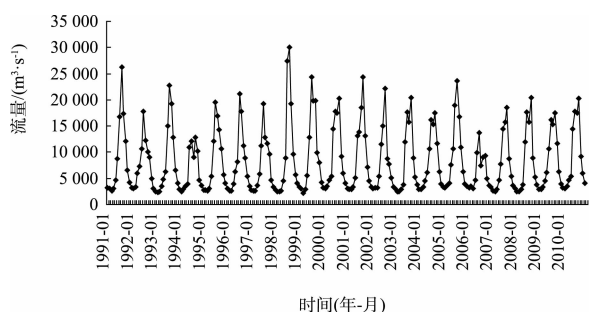


图 3 工程所在地河道断面的月均流量-时间序列

2) 工程所在地河道断面的月均水位-时间序列。

由于趸船系泊缆绳、锚链的应力值大小与长江三峡水库变动回水区的水位情况关系密切,根据尚明芳^[10]所提出的方法,运用水力学计算软件 HEC-RAS 计算得到码头工程所在地河道断面的水位-时间序列。水力学模型中所需用到的流量-时间序列关系见图 3,而其余各计算参数和计算过程见文献[10],工程所在地河道断面的月均水位-时间序列见图 4。

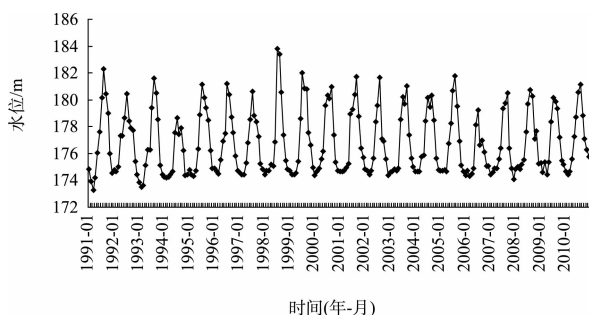


图 4 工程所在地河道断面的月均水位-时间序列

3) 工程所在地河道断面的月均流速-时间序列。

根据该处河道断面的几何特征,结合图 3、4 中的时间序列关系,可推求得到工程所在地河道

断面的月均流速-时间序列,见图 5。

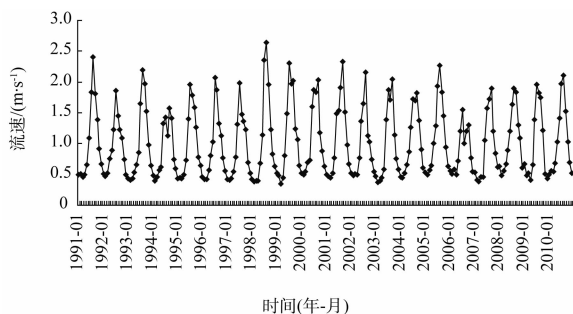


图 5 工程所在地河道断面的月均流速-时间序列

2.5.2 风因素

由于工程所在位置的风因素分布资料较少,无法得到风速、风向的历时关系。根据 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》^[5]规定,港区内的基本风压可按照以下公式计算:

$$W_o = \frac{1}{1600}v^2 \quad (4)$$

式中: v 为港口附近的空旷地面,离地 10 m 高,重现期为 50 a, 10 min 内的平均最大风速 (m/s)。

当无实测风速资料时,内河港口的基本风压应按照现行国家标准 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》^[11]的规定选用,但不得小于 0.3 kPa。根据上述方法,可简易推求计算得到码头工程所在地的极端风速大小在 15 ~ 30 m/s。

2.6 趸船系泊设施疲劳损伤计算随机过程

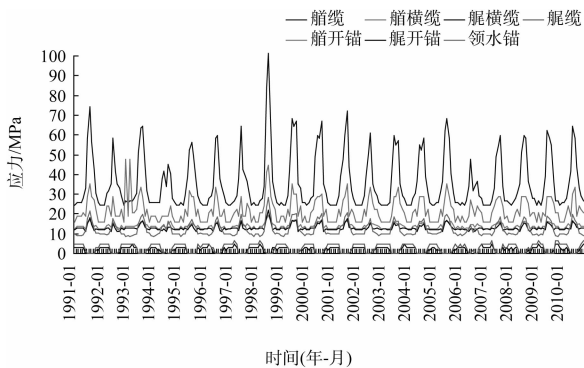
根据第 2.5 节中自然因素的分析,结合码头所在处历年实际水文气象资料表明:该处的风向主要以北风、东风及东北风为主,故共拟定出 4 种对系泊缆绳、锚链的随机过程情况,分别如下:

- 1) 随机过程 1: 风向 0°(顺水风) + 风速 24 m/s + 水流历时关系;
- 2) 随机过程 2: 风向 0°(顺水风) + 风速 30 m/s + 水流历时关系;
- 3) 随机过程 3: 风向 90°(吹开风) + 风速 16 m/s + 水流历时关系;
- 4) 随机过程 4: 风向 90°(吹开风) + 风速 24 m/s + 水流历时关系。其中,风向、水流流向的规定见图 1。

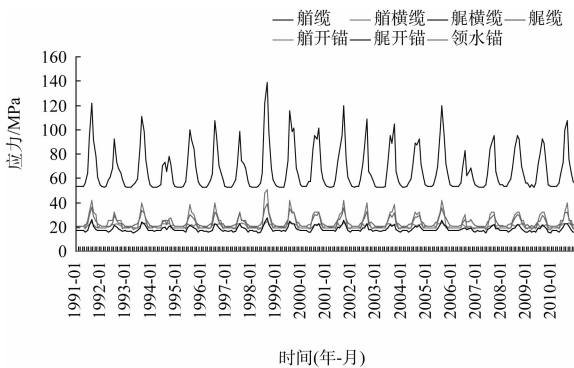
2.7 缆绳、锚链的应力-历时曲线

2.7.1 缆绳、锚链的月均应力-历时曲线

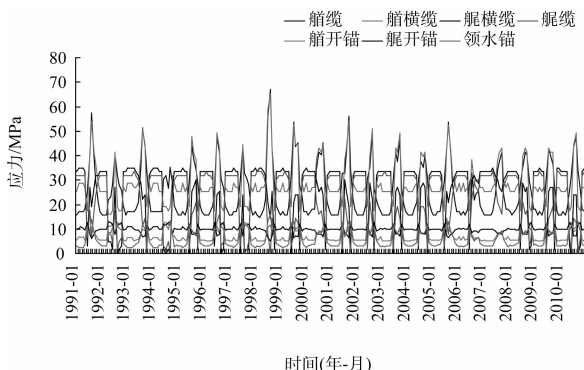
根据图 4、5 中工程所在地河道断面处的 20 a 的月均水位-历时关系、月均流速-历时关系, 以及表 1 中各缆绳、锚链的各项规格, 并结合趸船、靠泊船舶的基本尺度等数据, 运用国际著名系缆力计算商业软件 OPTIMOOR 分别建立上述 4 种随机过程情况下的计算模型, 计算出各系泊缆绳、锚链在 20 a 内的月均系缆、系锚应力-历时曲线。计算结果见图 6。



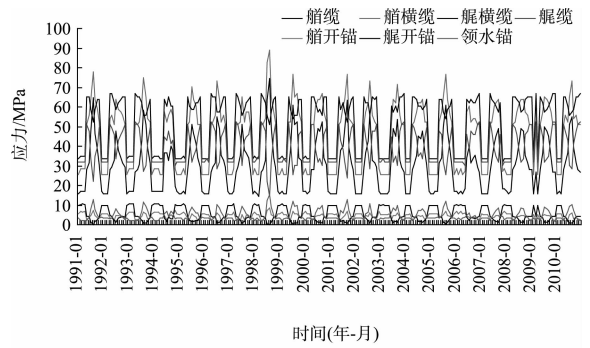
a) 随机过程1



b) 随机过程2



c) 随机过程3

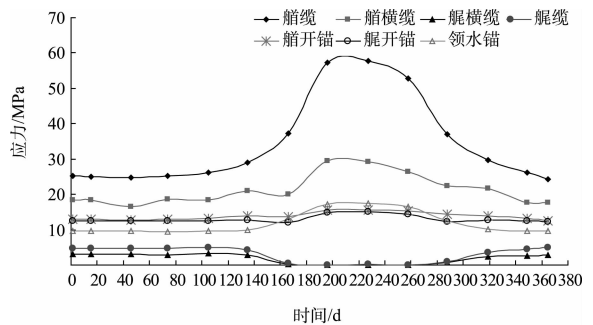


d) 随机过程4

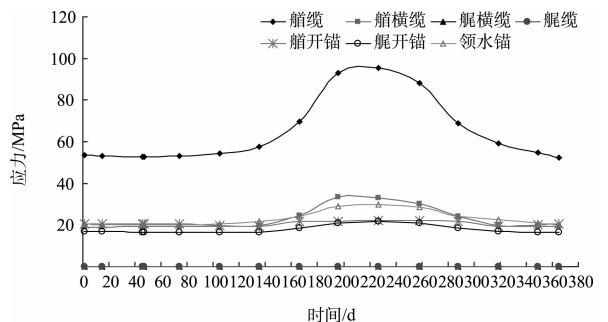
图 6 各随机过程情况下缆绳、锚链的月均应力-历时曲线

2.7.2 缆绳、锚链在疲劳寿命期典型年的日均应力-历时关系

根据图 6 所示的应力-历时关系, 分别将 20 a 中各年同一个月份的应力值取出后求平均, 将其作为疲劳寿命期典型年内该月的代表应力值, 例如: 将 1991—2010 年这 20 a 中每年 1 月份各缆绳、锚链的月均应力值取出后, 求得这 20 个数据的平均值, 将其作为疲劳寿命期典型年 1 月份的代表应力值, 依此类推。而后, 将典型年各月的 15 日对应的天数作为横坐标, 以上述典型年中 12 个月的代表应力值作为纵坐标, 通过分段追踪拟合这 12 个代表应力散点, 得到在不同随机过程情况下, 各系泊缆绳、锚链在疲劳寿命期典型年内的日均应力-历时关系, 见图 7。



a) 随机过程1



b) 随机过程2

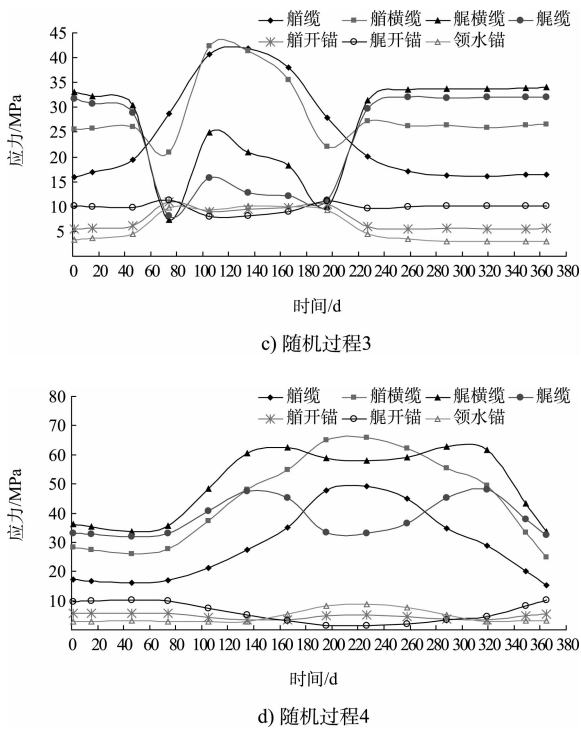


图7 各随机过程情况下缆绳、锚链在疲劳寿命期典型年的日均应力-历时曲线

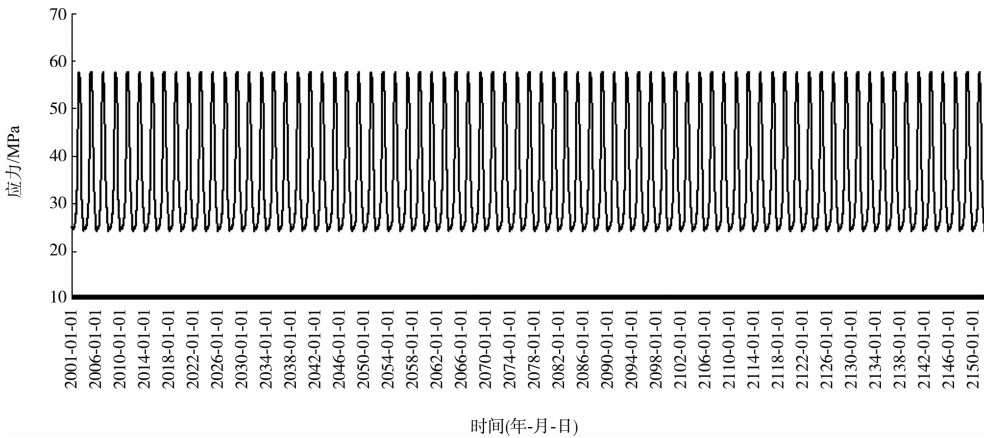


图8 随机过程1情况下船缆在整个疲劳寿命期之内的日均应力-历时曲线

表2 系泊缆绳、锚链在各随机过程情况下的疲劳损伤及疲劳寿命

名称	船缆		船横缆		艀横缆		艀缆		船开锚		艀开锚		领水锚	
	疲劳损伤 D	疲劳寿命 Y	疲劳损伤 D	疲劳寿命 Y	疲劳损伤 D	疲劳寿命 Y	疲劳损伤 D	疲劳寿命 Y	疲劳损伤 D	疲劳寿命 Y	疲劳损伤 D	疲劳寿命 Y	疲劳损伤 D	疲劳寿命 Y
随机过程 1	0.795	188.77	8.62×10^{-3}	17 393.61	3.34×10^{-5}	44.84×10^3	6.77×10^{-4}	22.15×10^4	7.92×10^{-3}	18 949.71	5.90×10^{-3}	25 411.75	3.17×10^{-2}	4 734.32
随机过程 2	2.350	63.93	2.45×10^{-2}	6 132.78	0.00	∞	0.00	∞	1.22×10^{-2}	12 251.10	7.60×10^{-3}	19 741.66	4.69×10^{-2}	3 198.07
随机过程 3	0.457	328.53	1.77	84.53	2.00	75.07	1.06	141.54	3.78×10^{-2}	3 965.28	3.70×10^{-2}	4 049.02	4.95×10^{-2}	3 027.34
随机过程 4	1.140	131.07	4.29	34.99	4.13	36.30	1.99	75.23	2.07×10^{-2}	7 230.98	2.12×10^{-2}	7 061.91	8.18×10^{-2}	1 832.74

注：计算结果暂时忽略各缆绳、锚链的初始疲劳损伤。

2.7.3 缆绳、锚链在整个疲劳寿命期内的日均应力-历时曲线

此处，考虑各缆绳、锚链在疲劳寿命期 150 a 内的日均应力-历时关系为平稳随机过程，即认为在整个疲劳寿命期内，各缆绳、锚链每年的日均应力-历时关系均服从图 7 所示典型年的日均应力-历时关系，将其应力值样本延伸至整个疲劳寿命期的 150 a 当中，由于本文篇幅有限，故此处仅以随机过程 1 情况下，船缆在整个疲劳寿命期内的日均应力-历时关系作为示例，其余各缆绳、锚链情况类似，见图 8。

2.8 缆绳、锚链疲劳损伤计算及疲劳寿命预测

根据图 8 中所示的各缆绳、锚链在整个疲劳寿命期内的日均应力样本，根据之前所述，可计算得到各随机过程情况下各缆绳、锚链的疲劳损伤，并预测其疲劳寿命年限（表 2）。

3 结论

1) 在整个疲劳寿命期范围内，船缆在随机过程 2 情况下，船横缆、艀横缆、艀缆在随机过程

3、4 情况下，其各自的累积疲劳损伤已超过 1，表明构件在疲劳寿命期内已经发生疲劳破坏。

(下转第 125 页)