

文章编号:1673-2049(2014)02-0090-09

# 随机车辆荷载作用下斜拉索索力的 概率模型及可靠度分析

杨晓艳<sup>1</sup>, 贡金鑫<sup>1</sup>, 张启伟<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 同济大学 桥梁工程系, 上海 200092)

**摘要:**以苏通长江大桥为工程背景, 计算了随机车辆荷载作用下的斜拉索索力, 采用随机过程的跨阈理论建立了斜拉索索力的概率模型, 在此基础上对随机车辆荷载作用下斜拉索的可靠度进行分析。结果表明: 斜拉索索力可以采用高斯平稳随机过程描述; 设计基准期内斜拉索索力最大值的概率模型可通过跨阈理论确定; 按随机车流数据建立的车辆荷载概率模型计算的斜拉索可靠指标为7.93~14.55。

**关键词:**斜拉桥; 索力; 车辆荷载; 概率模型; 可靠度

**中图分类号:**U448.27 **文献标志码:**A

## Analysis of Probabilistic Model of Stay Cable Stress and Reliability Under Random Vehicle Loads

YANG Xiao-yan<sup>1</sup>, GONG Jin-xin<sup>1</sup>, ZHANG Qi-wei<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;

2. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Taking Sutong Yangtze River Bridge as a project background, the stay cable stress under random vehicle loads was calculated and the probability models of stay cable stress under random vehicle loads were developed based on the stochastic process theory. Then the reliability of stay cable under random vehicle loads was analyzed. The results show that the stay cable stress can be modeled by a Gaussian stationary stochastic process and the probability function of maximum stay cable stress can be determined using up-crossing theory. The stay cable reliability index was from 7.93 to 14.55 for the long span cable-stayed bridge under random vehicle loads.

**Key words:** cable-stayed bridge; cable stress; vehicle load; probability model; reliability

## 0 引言

斜拉桥是由塔、梁、索等基本构件组成的组合结构, 具有结构刚度大、活载挠度小、跨越能力大、抗风稳定性强等优点。虽然斜拉桥的主要设计荷载是结构自重、风荷载、地震作用及温度作用, 车辆荷载效应所占比例较小, 但车辆荷载也是设计中考虑的重

要荷载。特别是近年来, 随着中国经济的高速发展, 交通运输量增长较快, 尽管国家加强了超载车辆的治理, 但是一些路线仍然出现严重的超载现象, 中小跨径桥梁被压垮事件时有发生。对于大跨径的斜拉桥, 尽管形势没有这样严峻, 但是探讨实际超载车流下斜拉桥结构的可靠度也十分必要。

文献[1], [2]中根据目前的公路运输管理政策,

收稿日期: 2014-03-07

基金项目: 交通运输部西部交通建设科技项目(2008 318 494 04)

作者简介: 杨晓艳(1985-), 女, 辽宁沈阳人, 工学博士研究生, E-mail: yangxiaoyan0024@126.com。

对非治超地区、计重收费地区和治超地区的实际车辆荷载进行了统计分析,建立了不同运输管理政策下的车辆荷载概率模型。文献[3]中根据车辆荷载的调查结果,对中小跨径桥梁的可靠度进行了分析,结果表明,3种运输管理政策下桥梁的可靠指标均比《公路工程结构可靠度设计统一标准》(GB/T 50283—1999)[4]中规定的目标可靠指标低。对于斜拉桥,众多学者应用疲劳累积损伤理论分别对风、抖振、车-风联合作用下的斜拉索疲劳可靠度进行了分析[5-9],但是对其在超载车流下的可靠度还缺乏了解。鉴于此,本文中笔者对实测的非治超地区车流进行了统计分析,提出了随机车辆荷载概率模型,应用随机过程的跨阈理论,建立了苏通长江大桥随机车辆荷载作用下斜拉索索力的概率模型,计算了斜拉索的可靠指标。

### 1 有限元模型

以苏通长江大桥为例进行分析,该桥为主跨 1 088 m 的双塔双索面斜拉桥,边跨设置 3 个桥墩,

设计基准期为 100 年。主梁采用扁平流线型钢箱梁,设 6 个行车道和 2 个紧急停车带,行车道净宽为 34 m。斜拉索设计使用年限为 50 年,采用 1 770 MPa 平行钢丝斜拉索共 272 根,其在钢箱梁上锚固点的标准间距为 16 m,边跨尾索区为 12 m,在索塔上锚固点间距为 2.3~2.7 m。索塔采用倒 Y 型结构,索塔总高为 300.4 m,桥面以上高度为 230.41 m。

全桥简化模型及斜拉索布置如图 1 所示。采用 APDL 程序设计语言将 ANSYS 命令组织起来,编写成参数化空间杆系有限元程序对大桥进行结构分析。主梁与主塔均采用 Beam44 梁单元进行模拟,通过 ANSYS 确定主梁与主塔截面的面积、惯性矩等参数。斜拉索采用 Link10 杆单元进行模拟,以合理成桥状态为基础[10],确定斜拉索的初应变为  $4 \times 10^{-4}$ 。全桥模型的边界条件为:主塔、过渡墩及辅助墩,根据设计资料中的约束关系在纵桥方向为滑动约束,横桥方向为主从约束,垂直方向全部约束,主塔根部 6 个自由度全部约束。全桥模型的材料力学性能如表 1 所示。

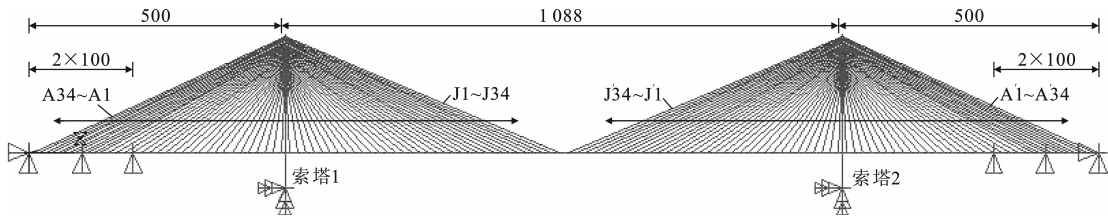


图 1 计算模型(单位:m)  
Fig. 1 Calculation Model (Unit:m)

表 1 材料力学性能

Tab. 1 Material Mechanical Properties

材料	主梁钢材	鱼刺横梁 钢材	主塔混凝土	斜拉索 钢丝束
弹性模量/Pa	$2.1 \times 10^{11}$	$3.5 \times 10^{13}$	$3.25 \times 10^{10}$	$1.95 \times 10^{11}$
剪切模量/Pa	$8.1 \times 10^{10}$	$8.1 \times 10^{12}$	$1.42 \times 10^{10}$	
密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	7 900	7 900	2 600	7 900
泊松比	0.30	0.30	0.20	0.25

注:鱼刺横梁主要承受分布横向荷载的作用,横向刚度很大,因此采用提高其弹性模量的方法考虑较大的横向刚度。

斜拉桥的拉索在不同拉力作用下处于不同的弯曲下垂状态,属于大变形构件。斜拉桥的几何非线性不可忽略,即理论上不能按线性分析方法采用叠加原理计算桥梁的内力,这产生了可靠度分析中如何将荷载转化为荷载效应的问题。传统的基于线弹性分析可靠度计算中,常采用荷载效应与荷载呈线性关系的假定,对于需要进行几何非线性分析的斜拉桥,这一假定不再成立。为近似根据荷载计算桥

梁的荷载效应,做如下假定:

(1)由于桥梁自重的变异性很小(自重产生的斜拉索索力平均值为 123.52 MPa,变异系数为 0.043 [11]),即桥梁自重在其平均值附近上下波动幅度很小,认为在此比较小的波动范围内,荷载效应与荷载近似呈线性关系。这样可根据桥梁自重的平均值,通过几何非线性分析求得桥梁索力的平均值,变异系数保持不变。

(2)对于大跨度斜拉桥,由于车辆荷载在桥梁竖向荷载中所占比例很小,认为在桥梁自重平均值的基础上,车辆荷载没有很明显地改变桥梁的几何非线性。因此,可在自重产生的索力的基础上,通过叠加车辆荷载产生的索力计算斜拉索的总索力。

### 2 斜拉索索力计算

#### 2.1 自重产生的索力

斜拉桥的自重可由 ANSYS 软件自动计算。根



表 3 非治超地区各测点不同类型车辆所占比例

Tab. 3 Proportions of Different Kinds of Vehicles for Measuring Points in Non-controlling Area							
测点编号	不同类型车辆所占比例						
	二轴轻型客车	二轴大客车	二轴货车	三轴货车	四轴货车	五轴货车	六轴货车
1	0.592 3	0.048 9	0.284 1	0.031 0	0.017 1	0.013 8	0.012 8
2	0.644 8	0.051 5	0.236 5	0.030 9	0.016 3	0.010 5	0.009 4
3	0.608 9	0.045 8	0.277 2	0.026 5	0.016 2	0.013 1	0.012 4
4	0.651 9	0.050 0	0.236 5	0.027 5	0.012 9	0.010 7	0.010 6
5	0.663 0	0.046 0	0.228 3	0.026 7	0.014 3	0.009 8	0.011 9
6	0.625 7	0.050 6	0.251 8	0.031 1	0.015 0	0.012 5	0.013 3
7	0.680 2	0.049 8	0.207 1	0.026 7	0.014 9	0.009 2	0.012 1
8	0.612 2	0.048 2	0.271 7	0.029 9	0.015 1	0.011 3	0.011 6
9	0.669 0	0.043 5	0.224 3	0.027 3	0.016 5	0.009 8	0.009 6
10	0.649 5	0.049 6	0.234 9	0.030 8	0.015 9	0.009 4	0.009 8
11	0.596 5	0.048 7	0.279 4	0.030 9	0.018 5	0.013 1	0.012 8
12	0.602 5	0.050 4	0.271 6	0.033 0	0.017 6	0.014 6	0.010 2
13	0.656 4	0.046 5	0.232 7	0.028 4	0.016 5	0.009 9	0.009 5
平均值	0.634 8	0.0484	0.248 9	0.029 3	0.015 9	0.011 4	0.011 2

表 4 车辆荷载统计参数  
Tab. 4 Statistical Parameters of Vehicle Loads

车型	$\mu_{\ln(G_{1i})}$	$\sigma_{\ln(G_{1i})}$	$p_{1i}$	$\mu_{G_{2i}}/\text{kg}$	$\sigma_{G_{2i}}/\text{kg}$	$p_{2i}$	$\mu_{G_{3i}}/\text{kg}$	$\sigma_{G_{3i}}/\text{kg}$
二轴轻型客车	7.65	0.36						
二轴大客车	8.84	0.67						
二轴货车	9.51	0.39						
三轴货车			0.55	16 236	4 934.9	0.45	32 500	13 500
四轴货车			0.43	20 570	3 545.6	0.57	36 857	19 441
五轴货车			0.46	23 671	4 931.2	0.54	61 123	20 950
六轴货车			0.54	31 405	8 798.8	0.46	78 913	26 193

$$\frac{p_{2i}}{\sqrt{2\pi}\sigma_{G_{3i}}}\exp\big[-\frac{1}{2}(\frac{g-\mu_{G_{3i}}}{\sigma_{G_{3i}}})^2\big] \quad i=4,5,6,7 \quad (2)$$

$$f_s(S)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln(S)}S}\exp\big[-\frac{1}{2}(\frac{\ln(S)-\mu_{\ln(S)}}{\sigma_{\ln(S)}})^2\big] \quad (3)$$

式中: $i=4,5,6,7$  分别表示三轴货车、四轴货车、五轴货车和六轴货车。

式中: $S$  为车间距随机变量; $\mu_{\ln(S)}$ 、 $\sigma_{\ln(S)}$  分别为车间距对数的平均值和标准差, $\mu_{\ln(S)}=4.83$ 、 $\sigma_{\ln(S)}=1.12$ 。

(3)车间距的概率模型

分析结果表明,车间距可采用对数正态分布描述<sup>[3]</sup>,概率密度函数  $f_s(S)$ 为

(4)不同类型车辆轴距及轴重比例

根据文献[12],不同类型车辆前后轴轴重所占比例及不同类型车辆的轴距按表 5 采用。

表 5 不同类型车辆轴距及轴重比例

Tab. 5 Inter-axes Distances and Axle Weight Proportion of Different Kinds of Vehicles											
车型	轴距/m					轴重比例					
	轴 1-2	轴 2-3	轴 3-4	轴 4-5	轴 5-6	轴 1	轴 2	轴 3	轴 4	轴 5	轴 6
二轴轻型客车	3.0					0.39	0.61				
二轴大客车	5.0					0.26	0.74				
二轴货车	5.0					0.28	0.72				
三轴货车	5.0	1.3				0.15	0.44	0.41			
四轴货车	2.5	6.0	1.3			0.10	0.19	0.36	0.35		
五轴货车	3.4	7.4	1.3	1.3		0.06	0.27	0.24	0.22	0.22	
六轴货车	3.2	1.5	7.0	1.3	1.3	0.04	0.19	0.17	0.21	0.19	0.21

根据上述车辆荷载概率模型,即可按如图 3 所示的流程采用 Monte-Carlo 法随机抽取车辆并按顺序组成随机车队。

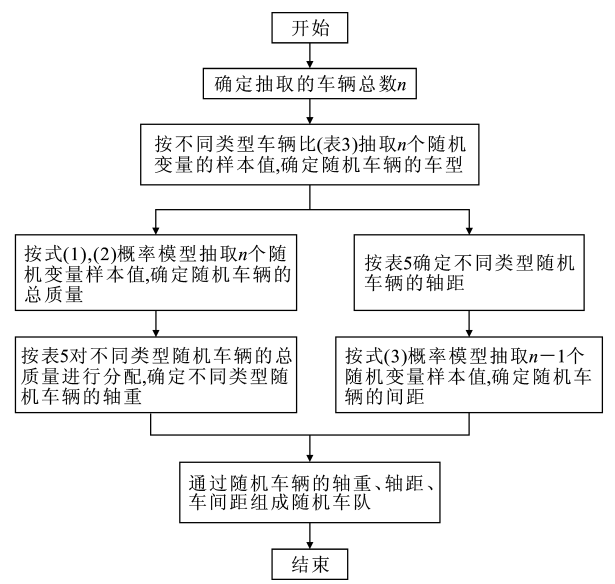


图 3 斜拉桥上仿真车队的生成流程  
Fig. 3 Flow Chart of Generating Simulation Motorcade on Cable-stayed Bridge

2.2.3 随机车辆荷载作用下的索力计算

本文中研究的桥梁结构为双塔双索面钢箱梁斜拉桥,属于对称结构,因此,只需要分析与索塔 1 相连(A1~A34,J1~J34)的斜拉索索力。根据随机车辆在桥梁上的位置,使用影响线计算各车辆产生的斜拉索索力,将各随机车辆产生的索力叠加得到各斜拉索的总索力。图 4 为随机车辆荷载作用下斜拉索索力计算流程,其中加载和输出过程表述为随机车辆荷载以 0.5 m 的位移差在桥梁结构上移动时,每个位移点产生的斜拉索总索力。

3 斜拉索索力概率模型

实际中公路桥梁车辆行驶的平均速度为 70 km·h<sup>-1</sup> (19.44 m·s<sup>-1</sup>),分析斜拉索索力概率模

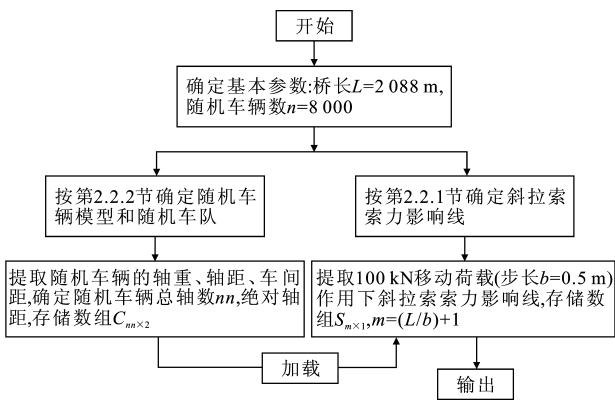


图 4 随机车辆荷载作用下斜拉索索力计算流程  
Fig. 4 Computational Flow Chart of Stay Cable Stress Under Random Vehicle Loads

型时将随机车辆运行的距离间隔转换为时间间隔  $\tau$ ,即  $\tau=\Delta s/v=0.03\text{ s}$ ,其中, $v$  为速度, $\Delta s$  为距离间隔。由于大跨斜拉桥跨度较大,同一辆车从桥梁的一端运行到另一端需要花费一定的时间  $t$ (几分钟到数十分钟),而统计斜拉索索力时是以  $0.03\text{ s}$  采样的,这样不同位置斜拉索索力是由很多个相同的车辆产生的,斜拉索索力具有相关性,不能采用各时刻独立的方法对斜拉索索力进行统计分析,而需要采用随机过程的方法。本文中以随机车辆荷载在不同时刻产生的斜拉索索力作为随机过程的样本函数  $X(t)$  分析斜拉索索力的自相关性,样本函数的平均值和标准差见表 6。

随机过程的平均值函数和自相关函数是描述随机过程的 2 个重要指标。自相关函数是用来表征一个随机过程本身在任意 2 个不同时刻  $t_1, t_2$  之间的相关程度,利用  $t_1, t_2$  时平稳过程的二维分布进行描述,即有

$$\left. \begin{aligned} \rho_X(t_1, t_2) &= \frac{\text{Cov}(t_1, t_2)}{\sigma_X(t_1)\sigma_X(t_2)} \\ \text{Cov}(t_1, t_2) &= E\{[X(t_1) - \mu_X(t_1)] \cdot [X(t_2) - \mu_X(t_2)]\} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

表 6 随机车辆荷载作用下斜拉索索力平均值和标准差

Tab. 6 Average and Standard Deviations of Stay Cable Stress Under Random Vehicle Loads											MPa
索编号	$\mu_X(t)$	$\sigma_X(t)$	索编号	$\mu_X(t)$	$\sigma_X(t)$	索编号	$\mu_X(t)$	$\sigma_X(t)$	索编号	$\mu_X(t)$	$\sigma_X(t)$
A4	5.27	1.73	A12	13.36	3.01	A20	46.95	18.34	A28	62.46	17.43
A5	6.87	2.26	A13	14.60	3.36	A21	47.57	18.59	A29	63.88	17.82
A6	6.97	2.29	A14	15.73	3.49	A22	48.92	19.12	A30	64.68	20.38
A7	7.63	2.52	A15	17.26	4.21	A23	52.69	20.58	A31	64.68	25.27
A8	8.68	2.57	A16	19.49	7.61	A24	53.16	20.77	A32	65.85	25.73
A9	9.14	2.66	A17	30.71	12.00	A25	59.53	16.61	A33	67.02	26.19
A10	9.19	2.69	A18	42.10	16.45	A26	60.10	23.48	A34	79.06	31.81
A11	10.64	2.73	A19	45.24	17.68	A27	61.21	23.92			

注: $\mu_X(t), \sigma_X(t)$  分别为随机过程样本函数  $X(t)$  的平均值和标准差。

式中:  $\text{Cov}(t_1, t_2)$  为协方差函数;  $\rho_X(t_1, t_2)$  为自相关函数, 是反映相关程度的一个指标, 它的优点是量纲为 1, 大小只取决于随机变量之间的相关程度, 而不取决于随机变量取值的量级;  $\mu_X(t_i)$  为随机过程样本函数  $X(t_i)$  的平均值;  $\sigma_X(t_i)$  为随机过程样本函数  $X(t_i)$  的标准差,  $i=1, 2$ 。

随机车辆荷载作用下各时间点的斜拉索索力假定是平稳随机过程, 具有各态历经性, 因此, 各时间点斜拉索索力的平均值采用样本函数的平均值。对时间间隔  $\tau$  的随机样本, 式(4)的协方差函数和标准差按式(5)计算

$$\left. \begin{aligned} \text{Cov}(t, t+\tau) &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [X(t_i) - \mu_X(t)] \cdot [X(t_i + \tau) - \mu_X(t)] \\ \sigma_X(t) &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [X(t_i) - \mu_X(t)]^2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

图 5 中给出了按式(4), (5)计算得到的不同时间间隔  $\tau$  时斜拉索索力的自相关系数曲线。通过数值分析得到的自相关系数  $\rho(\tau)$  按式(6)描述, 即

$$\rho(\tau) = \exp(-A\tau^2) \quad (6)$$

式中:  $A$  为系数。

由图 5 可以看出, 斜拉索索力 6 s 后某一时刻的自相关系数曲线基本趋于平稳, 说明其与 6 s 之前的值相关性不再明显。斜拉索索力自相关系数曲线拟合参数见表 7。

对连续型随机过程, 研究其超越某一状态或某一值的概率时, 常采用跨阈理论。上跨阈率是跨阈理论的一个重要指标, 表示随机过程单位时间内正向跨越某一水平的次数。图 6 中给出了平稳连续随机过程的一个样本函数  $X(t)$ , 令指定的跨阈水平为  $X(t)=a$ , 其中,  $a$  为上跨越阈值, 图 6 中的黑点表示上跨越点。

本文中按跨阈理论计算随机车辆荷载作用下斜拉索索力对不同跨阈水平的跨阈次数, 判断  $t$  和  $t+\Delta t$  相邻 2 个时刻斜拉索索力是否满足  $X(t) \leq a$  且  $X(t+\Delta t) > a$ , 若当条件满足时, 则在  $\Delta t$  内发生一次对水平  $a$  的上跨越, 将每次判断满足上跨越条件的数目叠加得到该跨阈水平的总次数。图 7 中给出了计算得到的 A34 号斜拉索索力 1 d ( $t=24$  h) 内跨越不同应力阈值的平均次数, 其中,  $x$  为斜拉索索力随机变量。

斜拉索索力变化是由多个车辆的共同作用引起的, 根据随机理论的中心极限定理, 可认为斜拉索索力为高斯平稳随机过程, 其上跨越阈值  $a$  的上跨阈

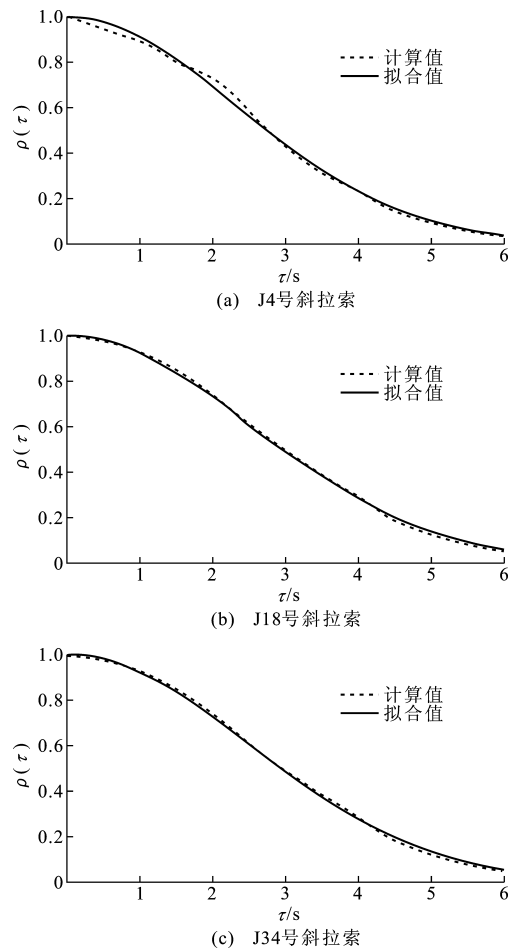


图 5 随机车辆荷载作用下不同斜拉索索力的自相关系数曲线

Fig. 5 Autocorrelation Coefficient Curves for Stay Cable Stress Under Random Vehicle Loads

率  $v_a^+$  可由 Rice 公式计算, 即

$$v_a^+ = v_0 \exp\left[-\frac{(a-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (7)$$

式中:  $\mu, \sigma$  分别为高斯随机过程样本函数的平均值和标准差;  $v_0$  为跨越  $\mu$  的平均次数。

由于斜拉索断裂失效是一个小概率事件, 实际中更关注的是斜拉索索力为拉应力的情况。因此用式(7)对图 7 的计算结果进行拟合时, 只需要考虑索力为拉应力的情况, 拟合曲线见图 7 中右尾部的光滑曲线。对各斜拉索索力上跨阈率进行拟合得到的  $v_0, \mu, \sigma$  如表 8 所示。

虽然表 6 和表 8 中均给出了斜拉索索力样本函数的平均值  $\mu$  和标准差  $\sigma$ , 但是表 8 中的  $\mu$  和  $\sigma$  是按 Rice 公式[式(7)]对计算的车流斜拉索索力上跨阈率曲线(图 7)的右半部分拟合得到的( $v_0, \mu, \sigma$  同时优化), 只对上跨阈率曲线的右半部分拟合是因为对于荷载效应, 起控制作用的是其最大值, 因此, 下述

表 7 随机车辆荷载作用下斜拉索索力自相关系数曲线拟合参数

Tab. 7 Fitting Parameters of Autocorrelation Coefficient Curves for Stay Cable Stress Under Random Vehicle Loads

索编号	A	索编号	A	索编号	A	索编号	A	索编号	A	索编号	A
A4	0.083 57	A9	0.085 40	A14	0.082 39	A19	0.078 15	A24	0.078 36	A29	0.078 41
A5	0.082 85	A10	0.088 68	A15	0.079 55	A20	0.078 13	A25	0.078 32	A30	0.078 43
A6	0.083 12	A11	0.104 38	A16	0.078 67	A21	0.078 16	A26	0.078 38	A31	0.078 45
A7	0.084 13	A12	0.096 28	A17	0.078 34	A22	0.078 21	A27	0.078 40	A32	0.078 47
A8	0.083 50	A13	0.092 41	A18	0.078 20	A23	0.078 28	A28	0.078 39	A33	0.078 48

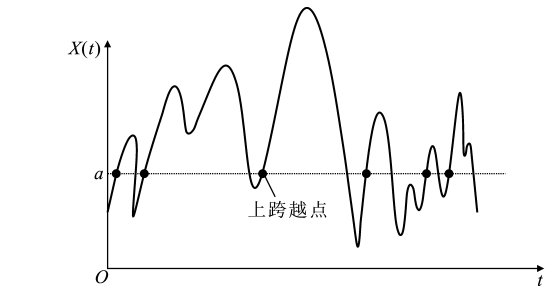


图 6 连续型随机过程的样本函数  
Fig. 6 Sample Function of Continuous Stochastic Process

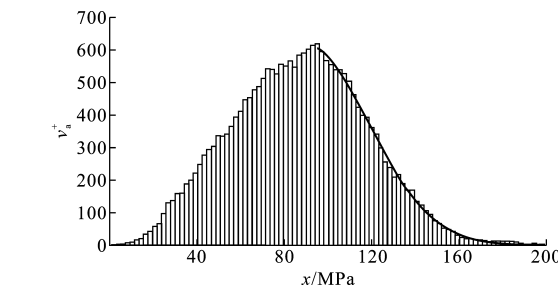


图 7 随机车辆荷载作用下 A34 号斜拉索索力的  
上跨閾率及拟合曲线

Fig. 7 Up-crossing Rates and Fitting Curves for A34 Stay Cable Stress Under Random Vehicle Loads

的可靠度计算中  $\mu$  和  $\sigma$  均按表 8 取值。

上跨閾率  $v_a^+$  表示了单位时间内 (本文中为 1 d) 上跨越閾值  $a$  的平均次数。从桥梁的安全设计考虑,斜拉索拉断是一个小概率事件,所以斜拉索索力设计使用年限  $T$  内斜拉索索力最大值的概率分布函数  $F_{XT}(x)$  为

$$F_{XT}(x) = \exp(-v_a^+ T) =$$
$$\exp\left[-Tv_0 \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)\right] \quad (8)$$

由式(8)可知,使用年限  $T$  内斜拉索索力最大值的概率密度函数  $f_{XT}(x)$  为

$$f_{XT}(x) = \frac{Tv_0(x-\mu)}{\sigma^2} \exp\left[-Tv_0 \cdot \right.$$
$$\left. \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)\right] \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (9)$$

式(9)中分别取  $T=7\,300, 18\,250, 36\,500$  d, 即可得使用年限分别为 20, 50, 100 年时斜拉索索力最大值的概率密度曲线,如图 8 所示。

由图 8 可以看出,随着  $T$  的增大,斜拉索索力概率密度曲线右移,说明随机车辆荷载作用下不同设计使用年限内斜拉索索力最大值随着  $T$  的增长而增大。

4 斜拉索可靠度分析

上述计算的是桥梁自重和车辆荷载产生的斜拉索索力,所以对应的斜拉索抗力为斜拉索极限拉力。

斜拉索的失效模式为抗拉失效,根据第 1 节中的基本假定,随机车辆荷载作用下第  $j$  根斜拉索的功能函数  $Z_j$  可近似按线性函数表示为

$$Z_j = R - (S_G)_j - (S_{Q_T})_j \quad (10)$$

式中:  $(S_G)_j$  为自重产生的第  $j$  根斜拉索的索力,服从正态分布;  $(S_{Q_T})_j$  为随机车辆荷载产生的第  $j$  根斜拉索的索力;  $R$  为斜拉索抗力。

表 8 斜拉索索力上跨閾率拟合参数

Tab. 8 Fitting Parameters of Up-crossing Rates for Stay Cable Stress

索编号	$v_0$	$\mu/\text{MPa}$	$\sigma/\text{MPa}$	索编号	$v_0$	$\mu/\text{MPa}$	$\sigma/\text{MPa}$	索编号	$v_0$	$\mu/\text{MPa}$	$\sigma/\text{MPa}$	索编号	$v_0$	$\mu/\text{MPa}$	$\sigma/\text{MPa}$
A4	2 751.74	14.09	5.05	A12	3 128.63	14.33	4.92	A20	507.33	52.99	17.09	A28	388.61	68.56	21.78
A5	1 945.59	18.78	6.35	A13	2 750.99	15.80	5.59	A21	530.03	50.46	16.24	A29	524.12	50.92	16.30
A6	1 921.01	18.80	6.54	A14	1 919.41	17.46	5.66	A22	510.34	52.25	16.91	A30	561.48	47.63	15.12
A7	2 332.90	15.83	5.23	A15	1 630.25	18.02	5.80	A23	449.61	59.25	19.08	A31	537.52	49.81	15.91
A8	2 040.81	17.96	5.94	A16	1 275.93	21.76	6.96	A24	361.55	73.46	23.61	A32	460.24	58.12	18.67
A9	2 916.39	13.17	4.44	A17	791.47	34.25	11.04	A25	396.24	67.01	21.57	A33	375.96	71.48	23.38
A10	3 948.39	10.25	3.33	A18	574.43	46.96	15.12	A26	353.65	75.09	23.88	A34	298.01	89.59	29.06
A11	4 089.44	11.09	4.17	A19	493.58	54.39	17.67	A27	451.83	59.04	18.73				

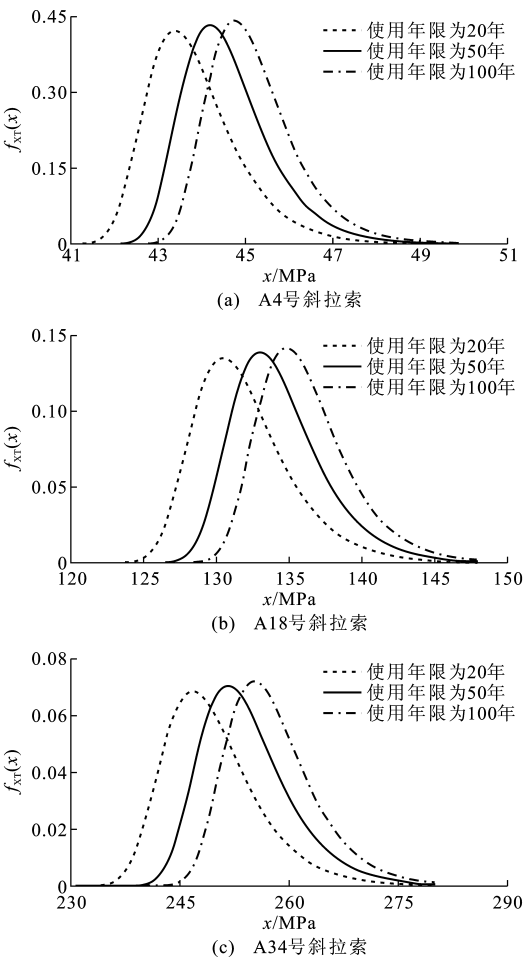


图 8 随机车辆荷载作用下不同设计使用年限内斜拉索索力最大值概率密度曲线

Fig. 8 Probability Density Curves of Maximum Stay Cable Stress for Different Design Working Lives Under Random Vehicle Loads

由文献[13]可知,斜拉索的抗力近似服从对数正态分布,其统计参数为: $k_R=1.30$ , $\delta_R=0.16$ 。随机变量统计参数见表 9。

表 9 随机变量统计参数

Tab. 9 Statistical Parameters of Random Variables

参数	分布类型	平均值	变异系数
$R$	对数正态分布	1 556.176 MPa	0.158 0 <sup>[13]</sup>
$(S_G)_j$	正态分布	按表 2 取值	0.043 1 <sup>[11]</sup>
$(S_{Q_T})_j$	式(8)和式(9)	按表 8 取值	

基于上述统计参数,采用《公路工程结构可靠度设计统一标准》(GB/T 50283—1999)<sup>[4]</sup>中建议的一次二阶矩方法计算斜拉索的可靠指标  $\beta$ 。考虑斜拉索的设计使用年限为 50 年,计算的斜拉索可靠指标如图 9 所示。由图 9 可以看出,采用实测的非治超地区车流数据建立的车辆荷载概率模型计算的苏通长江大桥斜拉索的可靠指标为 7.93~14.55,靠近

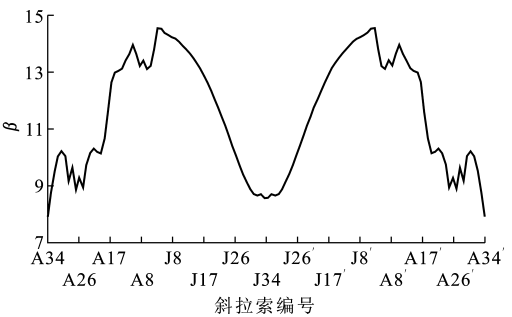


图 9 斜拉索可靠指标

Fig. 9 Reliability Indexes of Stay Cables

索塔处的斜拉索可靠指标较大,远离索塔处的斜拉索可靠指标较小。

5 结 语

- (1)大跨度斜拉索索力可用高斯随机过程描述,设计使用年限内斜拉索索力最大值的概率分布函数可用跨阈理论确定。
- (2)建立了苏通长江大桥斜拉索应力设计使用年限内最大值的概率分布函数。
- (3)按实测车流数据建立的车辆荷载概率模型计算的斜拉索的可靠指标为 7.93~14.55。

参考文献:

References:

[1] 贡金鑫,李文杰,赵君黎,等.公路桥梁车辆荷载概率模型研究(一)——非治超地区[J].公路交通科技,2010,27(6):40-45,57.

GONG Jin-xin, LI Wen-jie, ZHAO Jun-li, et al. Research on Probabilistic Model of Highway Bridge Vehicle Loads(1)—Non-controlling Area[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(6): 40-45, 57.

[2] 贡金鑫,李文杰,赵君黎,等.公路桥梁车辆荷载概率模型研究(二)——计重收费地区和强制治超地区[J].公路交通科技,2010,27(7):56-60.

GONG Jin-xin, LI Wen-jie, ZHAO Jun-li, et al. Research on Probabilistic Model of Highway Bridge Vehicle Loads (2)—Toll-by-weight Area and Overload Controlling Area[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(7): 56-60.

[3] 贡金鑫,杨晓艳,贺拴海,等.荷载组合方法与系数的研究[R].北京:中交公路规划设计院有限公司,2011.

GONG Jin-xin, YANG Xiao-yan, HE Shuan-hai, et al. Research on Load Combination Method and Coeffi-



- cient[R]. Beijing: CCCC Highway Consultants Co., Ltd., 2011.
- [4] GB/T 50283—1999, 公路工程结构可靠度设计统一标准[S].  
GB/T 50283—1999, United Standard for Reliability Design of Highway Engineering Structures[S].
- [5] 刘 扬, 张建仁, 余志武. 大跨混凝土斜拉桥拉索施工期的可靠度分析[J]. 中国公路学报, 2007, 20(3): 41-47.  
LIU Yang, ZHANG Jian-ren, YU Zhi-wu. Reliability Analysis of Stay Cables for Long-span Concrete Cable-stayed Bridges During Construction [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(3): 41-47.
- [6] 李 岩, 吕大刚, 盛洪飞. 考虑随机车载-风载联合作用的斜拉桥拉索疲劳可靠性分析[J]. 中国公路学报, 2012, 25(2): 60-66.  
LI Yan, LU Da-gang, SHENG Hong-fei. Fatigue Reliability Analysis on Cable of Cable-stayed Bridge Under Random Vehicle Load and Wind Load[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(2): 60-66.
- [7] 武芳文. 大跨度斜拉桥随机地震响应分析及其动力可靠度研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.  
WU Fang-wen. Study of Long Span Cable-stayed Bridges Stochastic Seismic Response and Dynamic Reliability[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [8] 杨美良, 李 波, 张建仁. 车辆荷载作用下部分斜拉桥拉索疲劳可靠度研究[J]. 公路交通科技, 2007, 24(12): 66-68, 103.  
YANG Mei-liang, LI Bo, ZHANG Jian-ren. Research on Fatigue Reliability of Cables of Partially Cable-stayed Bridge Under Vehicle Load [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(12): 66-68, 103.
- [9] CREMONA C. Optimal Extrapolation of Traffic Load Effects[J]. Structural Safety, 2001, 23(1): 31-46.
- [10] JTG/T D65-01—2007, 公路斜拉桥设计细则[S].  
JTG/T D65-01—2007, Guidelines for Design of Highway Cable-stayed Bridge[S].
- [11] 贡金鑫, 魏巍巍. 工程结构可靠性设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.  
GONG Jin-xin, WEI Wei-wei. Principle of Design for Reliability of Engineering Structures [M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [12] 张喜刚, 胡大琳, 贡金鑫, 等. 桥梁设计荷载与安全鉴定荷载的研究[R]. 北京: 中交公路规划设计院有限公司, 2012.  
ZHANG Xi-gang, HU Da-lin, GONG Jin-xin, et al. Research on Design Load and Safety Appraisal Load of Bridge[R]. Beijing: CCCC Highway Consultants Co., Ltd., 2012.
- [13] 陈志华, 刘占省. 拉索抗力分项系数研究和可靠度分析[J]. 建筑结构学报, 2010(增 1): 241-246.  
CHEN Zhi-hua, LIU Zhan-sheng. Research on Resistance Partial Factors and Reliability of Cables [J]. Journal of Building Structures, 2010(S1): 241-246.
- [14] WANG L P, GRANDHI R V. Safety Index Calculation Using Intervening Variables for Structural Reliability Analysis[J]. Computers & Structures, 1994, 59(6): 1139-1148.
- [15] 刘 华, 叶见曙, 张 涛. 连续梁在行驶车辆作用下的动态反应[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(2): 26-29, 34.  
LIU Hua, YE Jian-shu, ZHANG Tao. Dynamic Response of Continuous Girder Bridge Under Moving Vehicular Loads[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(2): 26-29, 34.
- [16] 尹冠生, 刘晓伟, 侯秀慧. 箱梁内钢筋在车辆荷载谱作用下的疲劳分析[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(6): 20-27.  
YIN Guan-sheng, LIU Xiao-wei, HOU Xiu-hui. Fatigue Analysis of Steel Bar in Box Girder Under Vehicle Load Spectrum[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(6): 20-27.