

# 对公路桥梁剩余寿命评估时可变荷载取值的研究

索清辉, 钱永久, 张方

(西南交通大学, 成都 610031)

**[摘要]** 文章以现行公路桥梁设计荷载为基础, 采用后继服役期超越评估荷载的概率等于设计使用期超越设计荷载概率的原则, 给出了现有公路桥梁结构可靠性评估时可变荷载取值的修正系数; 利用时变安全可靠度理论, 对现有结构的剩余寿命进行评估, 提出了对可变荷载取值进行修正的方法。

**[关键词]** 桥梁结构; 可变荷载; 等超越概率; 时变可靠度; 后继服役期

**[中图分类号]** U441+.2; U448.14 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2004)05-0052-04

以可靠性理论为基础的极限状态设计一般有两种表达模式: 一种是用带有分项系数的极限状态设计表达式; 另一种是直接利用可靠度计算的基本公式。参照设计表达式对现有结构可靠度进行评估, 需要知道现有结构抗力和荷载的统计参数。关于评估荷载的取值主要有两种观点<sup>[1]</sup>: 第一种观点认为服役结构仍处于设计基准期, 设计基准期内的最大荷载仍能发生, 因此评估荷载应与设计荷载相同; 第二种观点认为服役结构的荷载应按新的基准期重新估计。通过以下的分析, 作者认为服役结构的评估荷载应根据结构的继续服役期重新评估。

## 1 设计基准期和设计工作寿命的关系

设计基准期指的是一个选定的时间段, 可以作为评定各种可变作用取值以及与时间有关的材料性能取值的基础; 设计使用寿命指的是结构或结构构件不需要大的维修而能够按预定目的使用的时间段<sup>[2,3]</sup>。当结构的使用寿命超过设计基准期时, 表明结构的可靠指标可能低于目标可靠指标; 在设计基准期内结构的安全并非绝对意义上的安全, 而是概率意义上的安全。

公路桥梁的可变荷载一般是按随机过程描述

的, 随机过程的时间域一般取为设计基准期; 在结构的概率极限状态设计中, 将随机过程概率模型在设计基准期内转化为随机变量概率模型来描述, 进一步确定可变荷载的设计值和标准值, 所以作用效应  $S$  的分布类型和特征值是由设计基准期确定的。假定某一结构的设计基准期为  $T$ , 已经服役时间为  $t_0$ , 后继服役期为  $M$ ; 在时段  $(0, t_0)$  内荷载已经发生, 荷载效应  $S$  的随机性变为确定性; 如果按设计荷载对该结构进行可靠度评估, 根据可变荷载的确定过程可知, 评估荷载是由时段  $(t_0, t_0 + T)$  确定的。由设计基准期和设计工作寿命的关系可知, 评估结果仅仅反映现有结构在未来时段  $(t_0, t_0 + T)$  内是否可靠。而实际上, 现有结构的剩余寿命  $M$  不一定等于  $T$ , 可靠性评估所要的结果是时段  $(t_0, t_0 + M)$  内的情况。所以应该根据结构的剩余寿命重新评估可变荷载。在现行规范规定的荷载标准值基础上, 作者给出了现有公路桥梁结构可靠度评估时可变荷载取值的修正系数。

## 2 可靠度评估时可变荷载修正系数的确定<sup>[2]</sup>

关于现有结构可靠度评估时可变荷载的取值,

[收稿日期] 2003-10-17; 修回日期 2004-01-06

[基金项目] 教育部优秀青年教师教学科研奖励计划资助项目 (A0110719950102)

[作者简介] 索清辉 (1975-), 男, 山东滨州市人, 西南交通大学博士研究生

文献[4]提出了等超越概率的准则，根据这一准则，文献[5]得出了以设计使用寿命、后继服役期以及设计基准期为自变量可变荷载修正系数。设  $N$  为设计使用寿命， $T$  为设计基准期， $M$  为后继服役期， $T_0$  为“评估基准期”（定义为确定评估荷载所需的时间段）。等超越概率准则是指：在设计使用寿命  $N$  内发生超越设计荷载的概率与后继服役期  $M$  内发生超越评估荷载的概率相等，设计基准期  $T$  内发生超越设计荷载的概率等于评估基准期  $T_0$  内发生超越评估荷载的概率。设  $F_L(x)$  为截面荷载随机变量概率分布函数， $N, T, M, T_0$  对应的荷载平均出现次数为  $m_N, m_T, m_M, m_{T_0}$ ，则：

$$[F_L(x)]^{m_N} = [F_L(y)]^{m_M} \quad (1)$$

$$[F_L(x)]^{m_T} = [F_L(y)]^{m_{T_0}} \quad (2)$$

由上式比较得

$$m_{T_0} = \frac{m_M}{m_N} m_T \quad (3)$$

### 2.1 人群荷载按 10 m 统计结果分析

根据文献[2]，采用 2 m<sup>2</sup> 和 10 m, 20 m, 30 m 观测段统计、分析人群荷载。根据 10 m 统计结果，人群荷载每一年内分布不拒绝极值 I 型分布

$$F_L(x) = \exp \left[ - \exp \left( \frac{x - \beta}{\alpha} \right) \right] \quad (4)$$

设计基准期的最大值分布为

$$F_{LT}(x) = [F_L(x)]^m = \left\{ \exp \left[ - \exp \left( \frac{x - \beta}{\alpha} \right) \right] \right\}^m = \exp \left\{ - \exp \left[ - \frac{x - (\beta + \alpha \ln m)}{\alpha} \right] \right\} \quad (5)$$

式中  $\alpha, \beta$  为截面分布参数， $\alpha_T, \beta_T$  为设计基准期人群荷载最大值分布参数， $m = T/1 = 100$ 。按 10 m 实测统计分析得出的分布函数中， $\alpha = 0.114 6 L_{K1}, \beta = 0.090 9 L_{K1}$ （对应人群荷载一般规定，现行规范标准值  $L_{K1} = 3.0 \text{ kN/m}^2$ ）； $\alpha = 0.098 2 L_{K2}, \beta = 0.079 9 L_{K2}$ （对应行人密集地区规定，现行规范标准值  $L_{K2} = 3.5 \text{ kN/m}^2$ ）。取设计基准期人群荷载最大值概率分布的 95% 分位值，分别得

$$L_K = 0.96 L_{K1} \quad (6)$$

$$L_K = 0.82 L_{K2} \quad (7)$$

设计基准期为 100 年， $m_N = N/1, m_T = T/1, m_M = M/1, m_{T_0} = T_0/1$ ；按等超越概率准则确定评估基准期，进而确定评估基准期内最大人群荷载的分布函数，取分布函数 95% 分位值，利用式 (6)、式 (7)，可得既有公路桥梁评估所需人群荷载的修正系数，如表 1。

### 2.2 人群荷载按 2 m<sup>2</sup> 统计结果分析

根据文献[2]，采用 2 m<sup>2</sup> 面积观测、统计结

表 1 人群荷载标准值修正系数

Table 1 The revised factor for the characteristic value of footway loading

设计使用期 $N/a$	60	60	60	60	100	100	100	100
后继服役期 $M/a$	20	40	60	80	20	40	60	80
一般规定修正系数	0.868	0.951	1.000	1.033	0.807	0.890	0.938	0.972
密集地区修正系数	0.871	0.954	1.000	1.037	0.809	0.892	0.941	0.975

果，设计基准期内人群荷载概率分布函数为

$$F_{L_T}(x) = \exp \left[ - \exp \left( - \frac{x - 0.476 8 L_{K1}}{0.176 4 L_{K1}} \right) \right] \quad (8)$$

$$F_{L_T}(x) = \exp \left[ - \exp \left( - \frac{x - 0.408 7 L_{K2}}{0.151 2 L_{K2}} \right) \right] \quad (9)$$

现行《公路桥涵设计通用规范》JTJ-89 中规定：人群荷载一般为  $L_{K1} = 3.0 \text{ kN/m}^2$ ，相当于文献[2]中按 2 m<sup>2</sup> 面积观测结果所统计的设计基准期人群荷载最大值分布的 95% 分位值；行人密集地区可为  $L_{K2} = 3.5 \text{ kN/m}^2$ ，相当于文献[2]中按

2 m<sup>2</sup> 面积观测结果所统计的设计基准期人群荷载最大值分布的 98% 分位值<sup>[6]</sup>。

根据文献[2]中的 10 m 统计结果，人群荷载每一年内分布不拒绝极值 I 型分布，由式 (8)、式 (9) 推导人群荷载在一年内符合极值 I 型分布函数，再根据等超越概率准则计算既有公路桥梁结构的评估基准期，得出在评估基准期内人群荷载最大值分布函数：

$$F_{L_T}(x) = \exp \left\{ - \exp \left[ - (x - 0.476 8 L_{K1} + 0.176 4 L_{K1} \ln 100 - 0.176 4 L_{K1} \cdot \ln m_{T_0}) / 0.176 4 L_{K1} \right] \right\} \quad (10)$$

$$F_{L_T}(x) = \exp \left\{ - \exp \left[ - (x - 0.4087 L_{K2} + 0.1512 L_{K2} \ln 100 - 0.1512 L_{K2} \ln m_T) / 0.1512 L_{K2} \right] \right\} \quad (11)$$

分别取评估基准期人群荷载最大值分布函数 95 % 分位值和 98 % 分位值, 进而计算得人群荷载修正系数, 如表 2。

表 2 人群荷载标准值修正系数

Table 2 The revised factor for the characteristic value of footway loading

设计使用期 $N/a$	60	60	60	60	100	100	100	100
后继服役期 $M/a$	20	40	60	80	20	40	60	80
一般规定修正系数	0.807	0.929	1.000	1.051	0.717	0.839	0.911	0.961
密集地区修正系数	0.833	0.937	1.000	1.042	0.755	0.860	0.921	0.965

2.3 风荷载

根据文献[2], 假定年最大风荷载的分布类型服从极值 I 型分布, 概率分布函数为

$$F_{W_Y}(x) = \exp \left[ - \exp \left( \frac{x - 0.404 W_K}{0.148 W_K} \right) \right] \quad (12)$$

设计基准期 100 年最大风荷载  $W_T$  的概率分布函数为

$$F_{W_T}(x) = [F_{W_Y}(x)]^{100} = \exp \left[ - \exp \left( \frac{x - 1.086 W_K}{0.148 W_K} \right) \right] \quad (13)$$

式中  $W_K$  为现行规范规定的风荷载标准值; 设计基准期内最大风荷载  $W_T$  的统计参数 (平均值  $u_{W_K}$ ) 与  $W_K$  满足关系

$$u_{W_T} = 1.17 W_K \quad (14)$$

按等超越概率准则确定评估基准期, 进而确定评估基准期内最大风荷载的分布函数, 利用关系式 (14) 得出了风荷载的修正系数, 如表 3。

2.4 车辆荷载

根据文献[2], 汽车荷载弯矩效应最大值在设计基准期内分布函数为 (仅讨论极值 I 型分布)

表 3 风荷载标准值修正系数

Table 3 The revised factor for the characteristic value of wind loading

设计使用期 $N/a$	60	60	60	60	100	100	100	100
后继服役期 $M/a$	20	40	60	80	20	40	60	80
修正系数	0.862	0.950	1.000	1.040	0.800	0.885	0.936	0.973

$$F_M(x) = \exp \left[ - \exp \left( - \frac{x - 0.6376 L_{K1}}{0.084 L_{K1}} \right) \right] \quad (15)$$

(一般运行状态)

$$F_M(x) = \exp \left[ - \exp \left( - \frac{x - 0.7685 L_{K2}}{0.0537 L_{K2}} \right) \right] \quad (16)$$

(密集运行状态)

分布函数取 95 % 分位值, 得

$$S_{QK} = 0.8871 S'_{QK} \text{ (一般运行状态)} \quad (17)$$

$$S_{QK} = 0.9280 S'_{QK} \text{ (密集运行状态)} \quad (18)$$

式中  $S'_{QK}$  为现行规范的汽车荷载标准图式产生的效应值。同 2.2 节, 利用关系式 (17)、式 (18), 得汽车荷载弯矩效应修正系数, 如表 4。

对表 1 至表 4 中未列出的数值, 可用插值法确定。

表 4 汽车荷载弯矩效应修正系数

Table 4 The revised factor for the moment effect of motor vehicle loading

设计使用期 $N/a$	60	60	60	60	100	100	100	100
后继服役期 $M/a$	20	40	60	80	20	40	60	80
一般运行状态修正系数	0.896	0.962	1.000	1.027	0.848	0.913	0.952	0.979
密集运行状态修正系数	0.936	0.977	1.000	1.017	0.907	0.947	0.970	0.987

### 3 迭代方法对可变荷载的修正

#### 3.1 结构可靠度模型

现行混凝土结构设计规范采用概率理论为基础的极限状态设计方法<sup>[7]</sup>, 可靠度分析模型未充分考虑时间变化因素, 是静态模型; 结构的服役过程是一个各项参数随时间变化的过程, 现有结构寿命评估时必须将静态可靠度模型转化成时变动态模型。

用  $P_S$  表示可靠概率, 仅有作用效应和结构抗力两个基本变量时, 用  $R$  表示结构能力,  $S$  表示荷载效应, 则:

$$P_S = P\{R - S > 0\} \quad (19)$$

在结构剩余寿命评估时, 应考虑时间变化对结构性能和荷载效应的影响, 将结构可靠度模型转化为与时间有关的时变可靠度, 式 (19) 可以表示为

$$P_S(t) = P\{R(t) - S(t) > 0\} \quad (20)$$

将时变可靠度模型简化成下式:

$$P_S(t) = P\{R(t) - S_{\max} > 0, t \in [0, T]\} \quad (21)$$

式 (21) 的工程意义是: 若在设计基准期  $T$  内出现的最大荷载效应  $S_{\max}$  不会使结构破坏, 则结构在设计基准期内就不会出现破坏。

#### 3.2 抗力随时间变化的模型

文献[8~10]给出了抗力随机衰减过程模型; 例如:

$$R(t) = R_0 \varphi(t) \quad (22)$$

式中  $R_0$  为  $t=0$  时刻结构构件的抗力,  $\varphi(t)$  为一确定性函数。由此, 当抗力  $t$  时刻抗力平均值为  $u_{R(t)}$ , 方差为  $\sigma_{R(t)}$  时, 有  $u_{R(t)} = u_{R_0} \varphi(t)$ ;  $\sigma_{R(t)} = \sigma_{R_0} \varphi(t)$ 。

#### 3.3 结构剩余寿命的评估

假定某一结构已经服役  $t_0$ , 其抗力衰减模型为  $R(t)$ , 后继服役期为  $M$ ; 对式 (21) 进行变化, 得出结构在后继服役期内的可靠度模型:

$$P_S(t) = P[R(t - t_0) - S'_{\max} > 0, t - t_0 \in (t_0, t_0 + M)] \quad (23)$$

式 (23) 的工程意义是: 若在后继服役期内出现的最大荷载效应  $S'_{\max}$  不会使结构破坏, 则结构在后继服役期内就不会出现破坏。由式 (23) 计算可靠指标:

$$\beta(t) = \beta_{\min} = \frac{u_{R(t-t_0)} - S'_{\max}}{\sqrt{\sigma_{R(t-t_0)}^2 + \sigma_{S'_{\max}}^2}} \quad (24)$$

假定  $S'_{\max}$  为已知的确定量, 所以  $\sigma_{S'_{\max}}$  设  $\beta_0$  为可以接受的结构最小可靠指标, 代入式 (24) 中得

$$\beta_0 = \frac{u_{R(t-t_0)} - S'_{\max}}{\sigma_{R(t-t_0)}} \quad (25)$$

解式 (25) 得

$$t = \varphi(S'_{\max, \beta_0, t_0}) \quad (26)$$

式中  $t$  为基于安全可靠指标计算出的结构后继服役期。函数  $\varphi(\cdot)$  是由式 (25) 决定的函数。式 (26) 中  $\beta_0$  与  $t_0$  为已知量。  $S'_{\max}$  是由后继服役期决定的, 是后继服役期的函数; 而后继服役期是未知的, 采用下面所述的迭代方法对式 (26) 进行求解。

根据结构的设计状况, 按现行公路桥梁荷载规范中荷载的取值, 计算得荷载效应  $S_{\max}$ , 首先使  $S'_{\max} = S_{\max}$ , 代入式 (26) 解得  $t = t_1$ 。由于代人的荷载效应是由设计基准期决定的, 不是由后继服役期决定的, 所以时间  $t_1$  不是结构的真实后继服役期; 根据  $t_1$  查表 1 至表 4 得可变荷载的修正系数, 用修正系数乘以现行荷载规范规定的荷载, 组合计算得荷载效应  $S_{\max 1}$ , 重新代入式 (26) 计算得  $t_2$ ; 根据  $t_2$  查表 1 至表 4 得修正系数, 用修正系数乘以现行荷载规范规定的荷载, 组合计算得荷载效应  $S_{\max 2}$ , 代入式 (26) 得出继续服役期  $t_3$ , 如此进行几次迭代计算得到:  $t_1, t_2, \dots, t_n$ , 当  $t_i - t_{i-1}$  小到可以接受时, 即对荷载效应的修正基本上不影响  $t_i$  时,  $t_i$  近似为结构的后继服役期。

### 4 结语

作者基于现行的公路桥梁荷载规范, 利用已有的研究成果, 给出了人群荷载、风荷载以及汽车荷载弯矩效应的修正系数。利用结构安全时变可靠度定义, 计算既有结构剩余寿命; 利用迭代方法修正评估时采用的可变荷载, 简化了分析模型。

#### 参考文献

- [1] 李继华. 工程结构可靠性的设计和评估 [A]. 工程结构可靠性全国第三届学术交流会议 [C]. 1992
- [2] 公路工程结构可靠度设计统一标准 (GB 50283-1999) [S]. 北京: 中国计划出版社, 1999. 32~34
- [3] ISO/TC98-SC2. 结构可靠性总原则 (ISO 2394: 1998) [S]. 陈定外译, 中国工程建设标准化协会, 建设部标准定额站, 1999 (下转第 94 页)

- [24] 王 涛, 李歧强. 基于空间收缩的并行演化算法 [J]. 中国工程科学, 2003, 5(3): 57~61
- [25] Schaffer J D, Carnana R A, Eshelman L J. A study of control parameters affecting online performance of genetic algorithm for function optimization [A]. Proc of the 3rd Int'l Conf on Genetic Algorithms [C]. Morgan Kaufmann, Los Altos, 1989. 51~60
- [26] Clerc M, Kennedy J. The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(1): 58~73
- [27] 李爱国, 覃 征, 鲍复民, 等. 粒子群优化算法 [J]. 计算机工程与应用, 2002, 38(21): 1~3

## Survey on Particle Swarm Optimization Algorithm

Yang Wei, Li Qiqiang

(School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

[Abstract] Particle swarm optimization (PSO) is a new optimization technique originating from artificial life and evolutionary computation. The algorithm completes the optimization through following the personal best solution of each particle and the global best value of the whole swarm. PSO can be implemented with ease and few parameters need to be tuned. It has been successfully applied in many areas. In this paper, the basic principles of PSO are introduced at length, and various improvements and applications of PSO are also presented. Finally, some future research directions about PSO are proposed.

[Key words] swarm intelligence; evolutionary algorithm; particle swarm optimization

(上接第 55 页)

- [4] 鸥进萍, 刘学东, 王光远. 现役结构安全度评估的环境荷载标准研究[J]. 工业建筑, 1995, 25(8): 11~16
- [5] 张俊芝. 服役结构可靠性评估的可变荷载取值研究[J]. 工业建筑, 2000, 30(12): 58~61
- [6] 张建仁, 刘 洋. 结构可靠度理论及其在桥梁工程中的应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003. 102~110
- [7] 混凝土结构设计规范(GB 50010-2002)[S]. 北京: 建筑工业出版社, 2002
- [8] 牛荻涛, 王庆霖. 服役结构抗力的概率模型及其统计参数[J]. 西安建筑科技大学学报, 1997, 29(4): 355~359
- [9] 李桂青, 李秋胜. 工程结构时变可靠度理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 139~142
- [10] Mori Y, Ellingwood R. Time-dependent system reliability analysis adaptive importance sampling[J]. Structural Safety, 1993, 12(1): 59~73

## Study of the Variable Load While Estimating Existing Bridge Structure

Suo Qinghui, Qian Yongjiu, Zhang Fang

(Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

[Abstract] On the basis of design load in force, the revised factors of variable load used in estimating existing bridge structures are given according to the theory, which is the probability that the load used exceeds the re-service term should be equal to the probability that the load used in design exceeds the service term. The theory of time-dependent ability is adopted to evaluate the residual service life of structure and a method is adopted to revise the variable load.

[Key words] bridge structure; variable load; equal exceeding probability; time-dependent ability; re-service life