

文章编号:1671-8879(2006)05-0043-05

# 钢桥防腐涂层寿命的预测方法

耿刚强<sup>1,2</sup>, 林 杰<sup>1</sup>, 刘来君<sup>3</sup>, 崔静娜<sup>1</sup>

(1. 长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 华南理工大学  
机械工程学院, 广东 广州 510640; 3. 长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**钢桥防腐涂层的大气腐蚀是一个相当复杂的过程,存在着许多不确定因素。因而涂层保护寿命预测系统的建立,需要在包含大量不确定信息的灰色状态下进行推理。将灰色理论引入到桥梁防腐涂层的失效研究中,建立了涂层腐蚀坑剥落的面积随时间变化的 GM(1,1)模型,并在此基础上推导出桥梁防腐涂层寿命的一般预测公式。通过实例分析计算,该模型预测得到的腐蚀面积和实测值相对误差小于 8%,具有较好的拟合精度和预测可靠度。

**关键词:**桥梁工程; 钢桥; 防腐涂层; 寿命预测; 灰色系统理论; GM(1,1)模型

中图分类号:U445.73 文献标识码:A

## Life prediction system for protective coating of steel bridge

GENG Gang-qiang<sup>1,2</sup>, LIN Jie<sup>1</sup>, LIU Lai-jun<sup>3</sup>, CUI Jing-na<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Highway Construction Technology and Equipment of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 3. Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** The atmospheric corrosion of protective coating of steel bridge is an extraordinary complicated process with many uncertain factors. To build life prediction system of coatings requires using gray system which suit for dealing with the case that contains a great number of uncertain information. The gray system theory is introduced for the study of failure of protective coating of bridge, and a gray model GM (1, 1) of coatings corrosion area variantion with time is built, a generic predict formula of protective coating life of bridge is put forward based on this theory. Project practices identify that the prediction is in good agreement with field data, its relative error is less than 8%, so the model has good precision and forecast dependability. 3 tabs, 7 refs.

**Key words:** bridge engineering; steel bridge; protecting coating for corrosion; life prediction; gray system theory; GM (1, 1) model

## 0 引 言

钢桥的防腐涂层在大气环境作用下将不可避

免的随时间出现粉化、起泡、龟裂和剥落等腐蚀缺陷,如果对保护涂层的腐蚀缺陷未采取相应的维修措施,则防腐涂层将随着钢桥服役年限的延伸,腐

蚀区域增大,到了一定程度后,不仅该涂层将会失去保护功能,同时钢桥的金属基体也将遭受腐蚀破坏,从而影响钢桥的安全使用寿命<sup>[1-2]</sup>。为了保证钢桥服役期的安全可靠,有必要在一定时间内对原有防腐涂层进行维护或重涂装。但是何时对防腐涂层进行更新维护最合理和最经济呢?如果提前对原防腐涂层进行更新维护,则原有涂层还没有完全发挥作用就清除,很不经济;若超过更新涂装时间再维护,不仅防腐涂层完全失去保护作用,钢铁基材又会遭到一定程度的锈蚀,增加了更新涂装前处理的难度和费用。为此,本文以某桥的现场腐蚀面积检测数据为依据,采用灰色理论建立涂层腐蚀寿命预测模型。该预测模型所需的检测数据简便易得,计算简单,对防腐涂层进行现场寿命预测十分方便,可为维修决策提供依据。

## 1 涂层寿命预测现状

世界各国钢桥防腐涂装应用经历了近 100 年,从早期的简单防护,到现代的长效重防腐体系,涂装工艺也不断发展。防腐涂层使用寿命从 3~5 a 提高到现在的 10~15 a<sup>[3]</sup>。20 世纪以来,不少科学工作者提出了许多有关涂层保护理论和假设,但是涉及到涂层寿命的文献很少,提出涂层寿命预测公式的文献则更少。日本的山本隆曾查阅世界上有关涂层文献 26 838 篇,其中涉及涂层寿命的仅 90 篇,提出涂层寿命预测公式的仅 3 篇<sup>[4]</sup>。

Mayne 根据涂层钢板的电化学性质的研究,提出了“涂膜极化电阻控制论”,并结合 Fick 扩散定律提出了涂层寿命公式<sup>[5]</sup>

$$L = l^2 / (6D) + \varphi(p_s \sigma_n)$$

式中: $L$  为涂层的寿命; $l$  为涂层的厚度; $D$  为涂层离子的扩散系数; $\varphi$  为常数; $p_s$  为涂层的附着力; $\sigma_n$  为施加在涂层下钢表面的压力。

基于腐蚀介质渗透引起有机涂层失效的经验寿命预测公式<sup>[3]</sup>

侵蚀初期为  $q/Q < 0.55$

$$q/Q = A(D_i/x^2)^{1/2}$$

侵蚀后期为  $q/Q > 0.55$

$$m(1-q/Q) = -BDt/x^2$$

$$t = -(x^2)/(BD)m(1-q/Q)$$

式中: $q$  为无限长时间后介质的渗入量; $Q$  为无限长时间后介质对有机物的平衡渗入量; $x$  为涂层厚度; $A$  为比例系数; $D$  为扩散系数;则有  $t$  为介质渗透通过有机涂层的时间,即视为涂层的使用寿命; $B$  为比

例系数。

涂层的失效是一个从量变到质变的过程,同时也是一个包含诸多因素、相当复杂的过程。从上面的涂层寿命预测可以看出,在预测的时候需要知道腐蚀介质在涂层中的扩散系数。对于腐蚀介质在涂层中的扩散系数的测量是非常困难的,同时不同的腐蚀介质其扩散系数是不尽相同的,而且在不同涂层、不同环境下更是变化的。目前,国内外科学工作者提出的涂层寿命预测公式基本上都是基于涂层防护基体的理论,在实验室条件下得出的,其在工程应用上存在一定的局限性。

## 2 灰色系统理论

大气环境中由于水、氧和腐蚀离子,通过防腐涂层的表面和内部的微观缺陷进入涂层内部或涂层/金属界面形成腐蚀电解液,造成涂层起泡、剥落而形成腐蚀坑。随着时间的变化,腐蚀面积将会越来越大,涂层的剩余寿命将会越来越短。本文应用灰色理论方法,通过对系统的腐蚀数据进行生成处理,从杂乱无章的离散现象中找出内在规律,达到预测钢桥防腐涂层腐蚀寿命的目的。

### 2.1 等时序的 GM(1,1) 模型

GM(1,1) 模型的建立。设涂层腐蚀面积变化的原始序列为

$$\{x^{(0)}\} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(N)\},$$

所对应的时间序列为  $t = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_N\}$ , 该数列的一次累加数列为

$$\{x^{(1)}\} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(N)\}$$

且满足  $x^{(1)}(k) = \sum_{m=1}^k x^{(0)}(m)$  (1)

对  $x_i^{(1)}$  建立白化形式的微分方程

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u$$
 (2)

式(2)中的参数  $a$ 、 $u$ , 可由最小二乘法  $[a, u]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y_N$  确定,其中

$$B = \begin{bmatrix} -[x_1^{(1)}(2) + x_1^{(1)}(1)]/2 & 1 \\ -[x_1^{(1)}(3) + x_1^{(1)}(2)]/2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -[x_1^{(1)}(N) + x_1^{(1)}(N-1)]/2 & 1 \end{bmatrix}$$
 (3)

$$Y_N = [x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(N)]^T$$
 (4)

方程的解为

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = [x^{(0)}(1) - u/a]e^{-ak} + u/a$$
 (5)

然后确定  $k=1, 2, 3, \dots, N-1$  时的值

$$\hat{x}^{(1)}(2), \hat{x}^{(1)}(3), \hat{x}^{(1)}(4), \dots, \hat{x}^{(1)}(N)$$

进而得还原数列

$$\hat{x}^{(0)}(k) = \hat{x}^{(1)}(k) - \hat{x}^{(1)}(k-1), k = 2, 3, \dots, N \quad (6)$$

设  $[x^{(0)}(1) - u/a] = A, u/a = B$ , 则式(5)可变为

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = Ae^{-ak} + B \quad (7)$$

式(7)即为涂层腐蚀面积变化的预测公式。

### 2.2 预测模型的精度检验

#### 2.2.1 残差检验

预测的绝对误差

$$\epsilon^{(0)}(k) = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k), k = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

预测的相对误差

$$q = |\epsilon^{(0)}(k)/x^{(0)}(k)| \times 100\% \quad (9)$$

#### 2.2.2 后验差检验

设  $x^{(0)}(k)$  为原始数列,  $\hat{x}^{(0)}(k)$  为模型模拟预测数列,  $\epsilon(k)$  为残差数列, 则

$$s_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [x^{(0)}(k) - \bar{x}^{(0)}(k)]^2, \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x^{(0)}(k) \quad (10)$$

$$s_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [\epsilon(k) - \bar{\epsilon}]^2, \bar{\epsilon} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \epsilon(k) \quad (11)$$

(1)  $c = s_2/s_1$  为均方差比值, 给定  $c_0 > 0$ , 当  $c < c_0$  时, 则模型为均方差合格模型。

(2)  $P = P\{|\epsilon(k) - \bar{\epsilon}| < 0.674 5s_1\}$  为小误差概率, 对给定的  $p_0 > 0$ , 当  $P > p_0$  时, 则模型为小误差概率合格模型。

(3) 外推性好的预测,  $c$  必须小, 小误差概率  $P$  大, 按  $c$  和  $P$  将精度分为“好”、“合格”、“勉强合格”、“不合格”4 个等级, 模型精度等级如表 1 所示。

当  $P, c$  都在允许的范围之内, 则可以应用模型预测, 所建立的灰色模型精度满足要求。

表 1 模型精度等级

预测精度等级	后检验比值 $c$	小误差概率 $P$
好	$< 0.35$	$> 0.95$
合格	$< 0.45$	$> 0.80$
勉强合格	$< 0.50$	$> 0.70$
不合格	$\geq 0.65$	$\leq 0.70$

## 3 灰色预测模型的应用

某人行天桥净跨 100 m, 为中承式钢管拱桥, 净矢跨比为 1 : 9.6, 全长 120.5 m, 主拱肋采用  $\phi 650$  ( $\delta 10$ ) 钢管, 钢管内填充 30 号混凝土, 主纵梁采用 56C 工字钢, 主横梁采用 40C 槽钢, 桥面采用 8 mm 的钢板上铺 6 cm 厚 25# 混凝土。从 1995 年 9 月 28

日建成, 在典型的城市大气环境中, 该人行天桥已历经 10 年。1995 年初建时, 桥梁钢结构的涂装采用的是锌黄醇酸防锈底漆和面漆, 涂层总厚度为 300  $\mu\text{m}$ 。以主拱肋防腐涂层现场腐蚀面积检测数据为依据, 采用灰色理论建立涂层腐蚀寿命预测模型。表 2 给出了 1998 年 9 月到 2000 年 9 月的涂层腐蚀面积的实测数据。

表 2 涂层腐蚀面积数据

时间/a	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
腐蚀面积/%	2.4	4.5	6.1	8.7	11.2	16.4	19.7

注: 3.0 表示距 1995 年 9 月已经 3 年了, 其余类同。

### 3.1 模型预测

为了评价模型预测的精度, 只利用前面 5 组数据建立数学模型, 最后两组留作检验模型精度。令  $x^{(0)}(t)$  表示表面涂层的腐蚀面积, 则原始序列为

$$x^{(0)}(t) = \{2.4, 4.5, 6.1, 8.7, 11.2\}$$

对数据进行累加处理, 得  $x^{(1)}(t) = \{2.4, 6.9, 13, 21.7, 32.9\}$

代入式(3)构造  $B$  矩阵和  $Y_N$  矩阵

$$B = \begin{bmatrix} -4.65 & 1 \\ -9.95 & 1 \\ -17.35 & 1 \\ -27.3 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Y_N = [4.5, 6.1, 8.7, 11.2]^T$$

将上面数据代入  $[a, u]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y_N$ , 利用 Matlab 工程软件计算, 其计算结果为

$$a = -0.299152, u = 3.193810, \frac{u}{a} = -10.676211$$

代入式(5), 得

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = 13.076211e^{0.299152t} - 10.676211 \quad (12)$$

上式即为该人行天桥主拱肋表面涂层的腐蚀面积预测公式。进而得到模型的预测值, 见表 3。

表 3 GM(1,1)模型的预测值

时间/a	实测值/%	预测值/%	相对误差/%
3.0	2.4	2.400000	0
3.5	4.5	4.559867	1.330
4.0	6.1	6.149959	0.819
4.5	8.7	8.294550	4.660
5.0	11.2	11.186968	0.116
5.5	16.4	15.088028	7.999
6.0	19.7	20.349444	3.299

### 3.2 模型精度分析

通常用后验差检验模型的精度,把表3的数据代入式(10)、式(11),得

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x^{(0)}(k) = 6.58$$

$$s_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [x^{(0)}(k) - \bar{x}^{(0)}(k)]^2 = 47.868$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon(k) = 0.076504$$

$$s_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [\varepsilon(k) - \bar{\varepsilon}]^2 = 2.776385$$

后验差比值

$$c = s_2/s_1 = 0.058 < 0.35$$

小误差概率

$$P = P\{|\varepsilon(k) - \bar{\varepsilon}| < 0.6745s_1\} = 1$$

从  $c$  和  $P$  的指标可以看出,该模型预测精度为“好”。

## 4 桥梁防腐涂层寿命预测

防腐涂层主要通过以下3个作用机制来实现金属制件的防护目的:涂层对腐蚀介质的阻挡屏蔽作用以及腐蚀抑制作用;以限制离子迁移而产生的在腐蚀反应发生的阳极和阴极回路中的等效高阻抗作用;涂料中颜填料的钝化作用<sup>[6-7]</sup>。当涂层腐蚀面积增加到一定程度后,腐蚀介质可以轻易的扩散进入金属基体,导致基体大面积腐蚀。到目前为止,涂层的保护寿命还没有一个统一的定义,但有以下几种说法<sup>[4]</sup>:

(1) 只要发现一个地方生锈,就证明涂层已经达到了寿命。

(2) 金属基体发生了穿孔才算涂层达到寿命。

(3) 认为涂层的生锈面积达到某一预定值,就算涂层达到了寿命。

一般情况下,钢桥某一部位的腐蚀不会对结构承载力产生多大的影响,只有当涂层腐蚀面积达到一定程度以后,才认为防腐涂层已经达到了保护寿命。当涂层腐蚀面积达到  $S\%$  后,可定义涂层已经达到了寿命。

由于  $GM(1,1)$  模型是建立在等时距检测数据上,所以假设等时距数列第一个数据对应的时间为  $t_0$ ,等时距为  $N$ ,则任意一时刻  $t = t_0 + Nk$ 。结合式(6)、式(7)可以得到涂层的寿命预测公式为

$$t = \frac{N \ln(1 - e^a)}{a \ln S\%} + t_0 \quad (12)$$

通过式(12),可以很容易的预测涂层腐蚀面积

达到  $S\%$  时的时间,为钢桥防腐涂层的维修提供了参考依据。对于涂层腐蚀面积  $S\%$  的定义,需要考虑钢桥所处的大气环境的腐蚀性。

## 5 结 语

(1) 钢桥防腐涂层的失效是一个从量变到质变的过程,同时也包含着诸多复杂因素,其中许多因素是不了解或不甚了解的,应属于一种灰色状态。

(2) 运用灰色  $GM(1,1)$  模型建立了基于涂层腐蚀面积发展趋势的预测公式

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = 13.076211e^{0.299152t} - 10.676211$$

(3) 应用本文的预测公式计算某钢拱桥的涂层腐蚀坑面积,计算得到的腐蚀面积和实测值相对误差小于  $8\%$ ,后验差比值  $c = 0.058 < 0.35$ ,模型预测精度为“好”,具有较好的拟合精度和预测可靠度。

(4) 利用  $GM(1,1)$  模型,并依据涂层防腐机制和经验,建立了腐蚀寿命预测公式

$$t = \frac{N \ln(1 - e^a)}{a \ln S\%} + t_0$$

(5) 该预测模型将腐蚀直观的转化为腐蚀坑面积测量,只需要少量的数据,即可构建腐蚀寿命预测公式,同时这些数据只需要用简单的检测仪器就可以很方便的得到。

参考文献:

References:

- [1] 吴海军,陈艾荣. 桥梁结构耐久性设计方法研究[J]. 中国公路学报,2004,17(3):57-61.  
WU Hai-jun, CHEN Ai-rong. Study of durability design method for bridge structures[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(3): 57-61.
- [2] 王春生,陈惟珍. 即有钢桥工作状态模拟与剩余寿命评估[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,24(1):43-47.  
WANG Chun-sheng, CHEN Wei-zhen. 3D finite-element model simulation and remaining fatigue life assessment of existing steel bridges [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(1): 43-47.
- [3] 任必年. 公路钢桥腐蚀与防护[M]. 北京:人民交通出版社,2002.  
REN Bi-nian. Corrosion and protection of highway steelbridge[M]. Beijing:China Communications Press, 2002.
- [4] 方震. 涂膜保护寿命的预测理论初探[J]. 涂料涂装与电镀,2005,(3):3-5.  
FANG Zhen. Simple talk about the forecast theory

about coating's life[J]. Coating Application and Electric Plating, 2005, (3): 3-5.

- [5] Cmaithland C, Mayne J E O. Factors affecting the electrolytic resistance of polymer films[J]. Official Digest, 1962,34(1):972.
- [6] 尚鑫,徐岳.基于灰色理论的斜拉桥拉索安全性评价[J].长安大学学报:自然科学版,2004,24(1):52-55.

SHANG Xin, XU Yue. Safety-based cables condition

evaluation of cable stayed bridge with grey theory[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(1): 52-55.

- [7] Miskovic V B, Drazic D M. The sorption characteristics of epoxy coating electrodeposited on steel during exposure to different corrosive agents[J]. Corrosion Science, 1996, 38(9): 1 513-1 523.

(上接 42 页)

ZHAO Yu, HE Shuan-hai, SONG Yi-fan. Evaluation methodology for existing truss-cable composite continuous steel bridge[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(5): 47-50.

- [2] 陈惟珍. 铆接桁架桥承载安全分析[J]. 中国公路学报, 2000, 13(4): 53-56.

CHEN Wei-zhen. Assessment of load carrying safety for riveted truss bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(4): 53-56.

- [3] 王春生,陈惟珍,陈艾荣.既有钢桥工作状态模拟与剩余寿命评估[J].长安大学学报:自然科学版,2004,24(1):43-47.

WANG Chun-sheng, CHEN Wei-zhen, CHEN Ai-rong. 3D finite-element model simulation and remaining fatigue life assessment of existing steel bridges [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(1): 43-47.

- [4] 陈万春,郑小燕,郝宪武,等.既有连续钢桁梁桥加固

后工作状态模拟[J].长安大学学报:自然科学版,2006,26(1):43-48.

CHEN Wan-chun, ZHENG Xiao-yan, HAO Xian-wu, et al. Performance simulation of existing continuous steel truss bridges after being strengthened[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(1): 43-48.

- [5] 李宏江,叶见曙,万水,等.波形钢腹板箱梁偏载下的力学性能[J].交通运输工程学报,2004,4(2):23-26.

LI Hong-jiang, YE Jian-shu, WAN Shui, et al. Mechanical performances of box girder with corrugate steel webs under eccentric loading[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(2): 23-26.

- [6] 郑一峰,黄乔,冷曦晨.预弯组合梁桥的弹塑性极限承载能力研究[J].中国公路学报,2005,18(4):54-58.

ZHENG Yi-feng, HUANG Qiao, LENG Xi-chen. Research on elastic-plastic ultimate capacity of preflex beam bridges [J]. China Journal of Highmanly and Transport, 2005, 18(4): 54-58.

## 《中国学术期刊文摘》中文版和英文版 2007 年征订启事

《中国学术期刊文摘》分中文版(简称 CSAC)和英文版(简称 CSAE)两种,各自收录了我国高水平学术期刊中基础科学、医学、农业科学和工程技术领域约 40 个学科的论文文摘,全景展现我国的科研成果与进展。

作为综合性科技类检索刊物,《中国学术期刊文摘》致力于将我国科学技术各领域的原创性学术成果全面、快速地向科技工作者交流、传播,其中 CSAE 是我国第一份综合性英文版科技类学术检索刊物。

《中国学术期刊文摘》由中国科学技术协会主管,科技导报社主办并负责编辑、出版、发行,对科研单位、高等院校、图书馆以及广大科技工作者检索和了解我国的科技研究成果、学术研究动向具有重要的参考价值。

《中国学术期刊文摘(中文版)》刊号为 CN 11-3501/N,ISSN 1005-8923,2007 年为半月刊,大 16 开,国内定价 38.00 元/册,全年定价 912 元,邮发代号:82-707。

《中国学术期刊文摘(英文版)》刊号为 CN 11-5411/N,ISSN 1673-4084,2007 年改为月刊,大 16 开,国内定价 15.00 元/册,全年定价 180 元,邮发代号:80-487。

欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆订阅。

通讯地址:北京市海淀区学院南路 86 号科技导报社(邮编 100081)

联系电话:010-62103122

联系人:姚玉琴

征订信箱:yaoyuqin@cast.org.cn

单位主页:<http://www.csac.org.cn>

户名:科技导报社

账号:0200001409089017271

开户银行:工商银行百万庄支行