

大跨度桥梁施工控制结构分析计算方法

张治成, 叶贵如, 陈衡治, 徐 兴

(浙江大学 土木工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 为了提高大跨度桥梁施工控制中结构分析计算的精度, 提出将 Kalman 滤波法和正装分析法结合起来进行施工控制的分析计算. 应用 Kalman 滤波法滤去施工和测量中的随机噪声, 得到结构系统统计意义上无偏的最优估计值, 再结合正装算法预测最终的成桥状态, 据此确定各控制点处的施工预抛高值. 结合某钢管混凝土中承式拱桥桥道系的施工预抛高值的求解问题, 对该方法进行了详细论述, 并以通用有限元程序 ANSYS 作为平台编制了相应的计算程序. 实践证明该方法计算精度高, 具有一定的应用推广性.

关键词: Kalman 滤波法; 正装分析法; 钢管混凝土拱桥; 桥道系; 施工控制

中图分类号: U 442

文献标识码: A

文章编号: 1008-973X (2004) 02-0210-05

Analysis and computation method of structure for the construction control of bridges with large span

ZHANG Zhi-cheng, YE Gui-ru, CHEN Heng-zhi, XU Xing

(Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A new method combining Kalman's filtering method and orderly-erecting analysis method was put forward to improve the analysis and computation precision of structure for the construction control of bridges with large span. Through Kalman's Filtering method, the random noise of the construction and measurement system were filtered and the best statistically unbiased estimation of the bridge structure could be achieved. Then the final line-shape of bridge could be forecasted with orderly-erecting analysis method. So the pre-camber of all the controlled points could be determined. The method was discussed in detail through solving the pre-camber of the bridge floor of the CFST half arch bridge in the construction, and the corresponding program for analysis and calculation was generated based on the common FEM software - ANSYS. The results of its application showed that it could improve the calculation precision and can be spread widely.

Key words: Kalman's filtering method; orderly-erecting analysis method; CFST arch bridge; bridge floor; construction control

为了使竣工后的桥梁结构线形符合设计要求, 在施工过程中通常用设置预拱度的方法来实现^[1], 而对于分段施工的斜拉桥、悬索桥、钢管混凝土拱桥等大跨度复杂结构, 需要给出各个施工阶段结构控制点的预抛高值. 目前大跨度桥梁施工控制结构计算一般采用倒装分析法, 它的基本思想是: 假定结构的成桥线形满足设计要求, 在此状态下, 按照施工的

逆过程对结构进行倒拆, 分析每次卸除一个施工段后对剩余结构的影响, 由此得出的位移、内力状态便是该施工阶段结构的理想状态^[2]. 这种方法存在一定的缺陷: 其一, 无法考虑一些与桥梁结构形成历程有关的因素, 如结构的几何非线性、混凝土的收缩以及徐变等问题; 其二, 由于施工过程中存在施工和测量误差, 当实际施工状态与理想状态发生偏差时, 不

收稿日期: 2002-11-19

作者简介: 张治成(1977-), 男, 江苏泰兴人, 博士生, 主要从事大跨度桥梁施工控制研究. E-mail: zzc7331@sohu.com

能及时对线形和标高进行调整 因此通过这种方法进行施工控制,精度较低,将会影响成桥后的施工线形质量

为了克服上述倒装分析法的缺陷,本文结合 Kalman 滤波法^[3]和正装分析法^[2]的优点,提出一种新型的施工控制结构计算方法,即运用 Kalman 滤波法滤去系统状态向量中由施工和测量误差产生的噪声,得到结构系统状态统计意义上无偏的最优估计值,再以此滤波估计值作为正装计算分析的初始状态,按照施工的进程前进分析到成桥状态,预测最终的成桥线形,并与设计线形进行比较,由预测的线形偏差不仅可以计算出下一施工阶段控制点的预抛高值,而且还可对已施工完的结构标高进行校核 文中结合大跨度钢管混凝土中承式拱桥桥道系施工时的各横梁预抛高值的计算对该方法进行了阐述,并编制了相应的程序 应用实例表明,本文求解施工预抛高值的方法计算精度很高,能保证最终的成桥线形满足设计要求

1 工程背景

浙江省境内的南浦大桥为净跨 308 m 的钢管混凝土中承式无铰拱,主拱由 2 条钢管混凝土桁架拱肋组成,拱肋轴线为悬链线,拱轴系数 $m = 1.167$,净矢跨比 $f_0/L_0 = 1/5.5$ 桥道系是由预应力混凝土横梁和纵向“T”型行车道板组成,横梁通过 28 对 PE 热挤镀锌高强钢丝拉索悬挂于拱肋上,纵向“T”型行车道板设置于横梁之上,并通过横向和纵向(吊杆横梁处)现浇接头形成全桥连续的纵、横正交梁格体系 南浦大桥的立面布置图见图 1,图中的序号为横梁的施工吊装顺序

该桥上部结构的施工主要有以下三个阶段:第一阶段,空钢管拱肋的悬臂架设;第二阶段,灌注钢管内混凝土;第三阶段,施工桥道系 在钢管混凝土拱肋形成的过程中,由于施工和测量的误差,钢管混凝土裸拱肋的实际标高偏离设计标高较大,因此在进行桥道系施工时,必须根据拱肋实际标高值来计算桥道系各施工阶段的预抛高值,而且由于该桥跨径较大,计算中需要考虑结构的几何非线性及混凝土徐变问题 很明显,如仍采用倒装分析法进行计

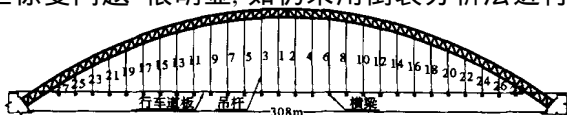


图1 南浦大桥立面布置图

Fig 1 Elevation view of Nanpu bridge

算,那桥道系的最终线形会与设计线形偏差很大,因此作者尝试采用新的计算方法对该桥桥道系施工预抛高值进行控制计算

2 施工控制计算的新方法

南浦大桥的桥道系是按照吊装横梁 铺设纵向行车道板 浇筑桥面铺装层的顺序进行施工的,而桥面纵向线形是通过预抬横梁标高进行控制的 设想一下,如果能够准确知道各根横梁吊装后结构线形的真实状态,并能精确预测从此真实状态开始按照预定的方法施工到成桥状态时各根横梁的标高,那么只要将所有横梁的预测标高与设计标高进行比较,根据两者的偏差就可以确定下一根安装横梁的预抛高值,并且可以校核已安装完的横梁标高是否满足设计要求

现在被工程界广泛应用的 Kalman 滤波法正好能用来解决结构线形真实状态的最优估计问题,该方法是运用概率统计的原理,从被噪声污染的信号中提取真实的信号,估计出系统的真实状态,它已在斜拉桥、悬索桥、刚构桥的施工控制中得到较为成功的应用^[4-6] 而正装分析法一直被桥梁工程界用来对未来的施工状态进行预测分析,它是按照桥梁结构实际施工加载顺序来进行结构变形和受力分析的,不仅能较好地模拟桥梁结构的实际施工历程,而且能逐步计入混凝土徐变、收缩等时差效应,因此预测未来的成桥状态精度较高^[3] 现将这两种方法结合起来,通过 Kalman 滤波法最优估计出各根横梁吊装完后拱肋线形的真实状态,把它作为正装分析的初始状态来预测下一根横梁的预抛高值

3 真实状态最优估计的 Kalman 滤波模型

3.1 建立状态方程

在钢管混凝土拱桥桥道系施工过程中,需要对钢管混凝土拱肋的线形进行最优估计,因此选取拱肋轴线的标高作为 Kalman 滤波的状态向量,即

$$Y_k = [y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_{M-1}]^T; i = 1, 2, \dots, M-1$$

式中: $M-1$ 为标高控制点的总数, k 为卡尔曼滤波阶数, $[y_i]_k$ 为 i 点在第 k 阶段的标高值,各控制点可根据实际工程需要进行配置,本文取各吊杆与拱轴线的交点为控制点

状态方程设为

$$Y_k = \Phi_{k,k-1} Y_{k-1} + H_k G_k + W_k; k = 1, 2, \dots, N$$

式中: N 为卡尔曼滤波阶段总数,取滤波阶段的总

数等于安装横梁的根数, Y_k 表示 k 阶段各控制点的高程向量, $\phi_{k,k-1}$ 为系数矩阵, 针对本文所选取的状态向量取为单位阵, $G_k = [0, \dots, 0, g_k, 0, \dots, 0]$ 为控制向量, 其中 g_k 表示第 k 施工阶段被安装横梁的自重荷载控制值, $H_k = \lfloor h_{ij} \rfloor_k$ 是 G_k 的系数矩阵, 其中 h_{ij} 表示第 j 个横梁自重荷载的单位变化量对控制点 i 高程的影响, 本文通过有限元软件 ANSYS 事先算出此值, 在利用 Kalman 滤波时直接调用, W_k 为系统的噪声序列, 来源于施工过程中系统的随机误差, 其统计特性为

$$\text{数学期望: } E[W_k] = 0,$$

$$\text{均方差: } E(W_k, W_j^T) = 0, k \neq j,$$

$$E(W_k, W_k^T) = Q_k.$$

式中: Q_k 为 W_k 的自协方差。

3.2 建立测量方程

在施工全过程中, 拱肋所有点标高均可直接测量, 因此, 选取状态向量控制点的标高实测值作为观测向量。但实测的结构标高值不可避免地要受到测量时的温度影响, 而状态向量对应的是特定理想温度条件(本文为 15°C)下的标高值, 因此必须对测量向量进行温度效应的修正, 通过滤去温差的影响, 将实测状态修正到理想状态。温度效应修正方法见文献[2]。

测量向量设为

$$Z_k = [z_1, z_2, \dots, z_i, \dots, z_{M_1}]_k^T; i = 1, 2, \dots, M_1;$$

测量方程为

$$Z_k = C_k Y_k + V_k.$$

式中: Z_k 是在实测值基础上滤去温度荷载效应的影响得到的, C_k 为 Y_k 到 Z_k 的系数转化矩阵, 针对本文情况取其为单位阵, V_k 为白噪声向量, 统计特性为

$$\text{数学期望: } E[V_k] = 0,$$

$$\text{均方差: } E(V_k, V_j^T) = 0; k \neq j,$$

$$E(V_k, V_k^T) = R_k.$$

式中: R_k 为 V_k 的自协方差, W_k 与 V_k 均互不相关, 即 $E(W_k, V_j^T) = 0$ 。

3.3 Kalman 滤波递推公式

限于篇幅, 文中仅列出了 Kalman 滤波递推公式的结果。对于上述建立的状态方程和量测方程来说, 卡尔曼滤波递推公式为

滤波算法:

$$Y_k = \bar{Y}_k + K_k(Z_k - C_k \bar{Y}_k); \quad (1)$$

预测算法:

$$\bar{Y}_k = \phi_{k,k-1} Y_{k-1} + H_k G_k; \quad (2)$$

滤波增益:

$$K_k = P_{k,k-1} C_k^T (C_k P_{k,k-1} C_k^T + R_k)^{-1}; \quad (3)$$

预测误差协方差:

$$P_{k,k-1} = \phi_{k,k-1} P_{k-1} \phi_{k,k-1}^T + Q_k; \quad (4)$$

滤波误差协方差:

$$P_k = (I - K_k C_k) P_{k,k-1}. \quad (5)$$

最优滤波与最优一步预测是紧密联系的, 在滤波基础上进行一步预测, 得出下一施工阶段可能出现的状态, 而且当获得新的量测数据后, 又可以在预测的基础上进行下一步的滤波, 如此不断循环, 递推计算步骤见图 2, 图中方框中的数字为上述递推方程式序号。

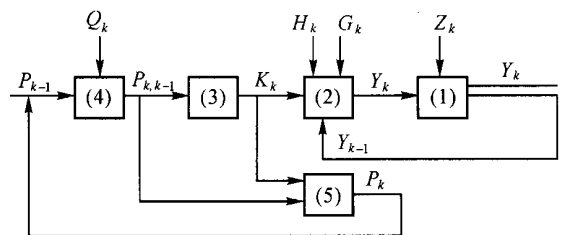


图 2 Kalman 滤波递推计算步骤示意图

Fig. 2 Sketch-map of Kalman filtering's increasing computing step

3.4 Kalman 滤波系统有关参数的选定

3.4.1 噪声参数 Q_k 和 R_k 的统计特性 Q_k 为结构系统误差的均方差, 在钢管混凝土拱桥桥道系吊装过程中, 此值难以准确确定; 而 R_k 为测量误差均方差, 它与测量仪器和测点的位置有关, 也不好确定, 因此本文将利用前 6 根横梁吊装时各控制点标高的实测值与计算值, 应用文献[3]中的公式计算出 Q_k 和 R_k , 而且随着施工进度此值还要作不断的修正。由于噪声复杂, 为避免滤波发散, 对增益矩阵使用限定下界法[3]。

3.4.2 初始条件的确定 选取钢管混凝土裸拱肋的系统状态作为横梁吊装的初始状态, 并将此阶段的施工仿真理论计算值 μ_0 作为初始状态的最优估计值:

$$Y_0 = \mu_0.$$

再由初始状态的测量值 Z_0 求出滤波均方误差阵值 P_0 :

$$E[(Z_0 - \mu_0), (Z_0 - \mu_0)^T] = P_0.$$

4 正装分析的有限元模型

在获得桥梁结构线形的真实状态后, 就可以进行施工仿真的正装分析。由于钢管混凝土拱桥是属

于高次超静定空间结构,仿真计算中可采用有限元法进行分析。本文是采用通用的有限元软件 ANSYS 7 对结构进行离散分析。施工仿真成桥状态的有限元模型如图 3 所示,模型中单元类型包括空间梁单元和索单元,其中将钢管混凝土桁架拱肋及桥道系离散为空间直梁单元,将吊杆离散为索单元。考虑到该桥的拱肋弦杆为钢管混凝土结构而腹杆为纯钢管,在计算拱肋弦杆组合截面的单元截面属性时,采用计算公式为

$$A = A_s + nA_c, I = I_s + nI_c, n = E_c/E_s,$$

通过上式将钢-混凝土的组合结构转化为单一的钢结构。上式中 E_c 为考虑混凝土徐变后钢管内混凝土的弹性模量,由于缺乏钢管混凝土的徐变试验资料,在计算 E_c 时采用文献[7]中大体积混凝土的弹性模量计算公式:

$$E_c(\tau) = E_0(1 - e^{-0.40\tau^{0.34}}).$$

式中: τ 为混凝土的龄期, $E_0 = 1.20E(90)$, 其中 $E(90)$ 为混凝土 90 d 龄期的瞬时弹性模量,南浦大桥钢弦管内灌注的是 C50 微膨胀混凝土,经试验测得: $E(90) = 4.2 \times 10^4 \text{ MPa}$

在正装分析的过程中,随着施工阶段的推进,结构的形式、边界约束、荷载形式及几何位置都在不断地变化,因此需要根据前一阶段结构的状态,对施工仿真模型作不断地修正。而 ANSYS 7 本身没有这个修改功能,本文采用了 ANSYS 的接口语言 APDL 编制了正装分析中循环修改计算模型的前后处理程序。

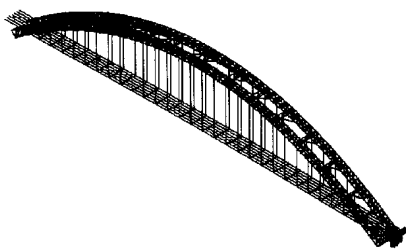


图3 正装分析的成桥状态有限元模型

Fig. 3 FEM model of completed bridge for step-analysis

5 程序设计

根据上述 Kalman 滤波模型的推导和分析结果,运用 Fortran 语言,编制了横梁吊装阶段的 Kalman 滤波分析程序,并通过前后处理程序,将滤波分析程序与正装分析的通用有限元软件 ANSYS 连接起来,形成一个施工控制计算的系统程序。该系统程序设计框图如图 4 所示。

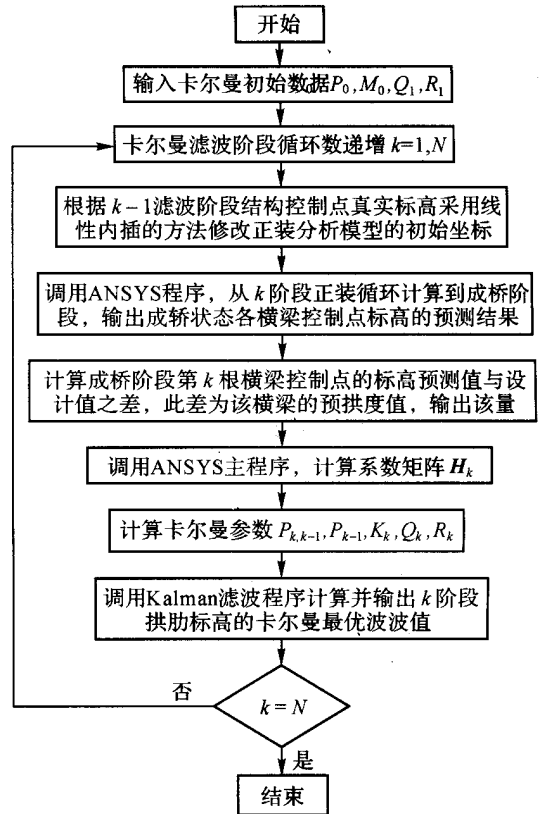


图4 施工预抛高值的计算程序框图

Fig. 4 Flow chart of computing program for per-camber of construction

6 工程应用结果

在南浦大桥桥道系的线形施工控制中,应用了上述计算施工预抛高值的程序求得各根横梁控制点处(即吊杆吊点处)的预抛高值,作为实际施工预抛高的控制值,表 1 列出了各控制点的预抛高值,并与倒装法求得的预抛高值进行了比较,两者最大偏差达到 21.2%,这表明施工和测量误差及混凝土徐变对预抛高值的求解精度影响较大。

现将南浦大桥竣工时桥面系悬浮部分的实测线形与设计线形的差异绘于图 5,为了便于比较,直接通过倒装法进行预抛高设置(按照实际的施工方法进行模拟施工)获得的悬浮桥面的成桥线形偏差用虚线表示在图中。由图 5 可知,用倒装法设置预抛高得到的桥道系线形凹凸不平,几乎成波浪形,而且跨中的偏差较大,达到 2.2 cm,而采用本文所述方法得到的线形比较顺直,偏差也小,跨中最大偏差仅为 0.82 cm。通过比较,表明本文方法求得的预抛高值精度较高,而且由于采用了 Kalman 滤波法滤去系统随机误差,使得桥道系的成桥线形克服了以往成波浪形的缺陷。

表 1 控制点的施工预抛高值比较

Tab 1 Comparison of pre-camber of control points cm

Kalman 滤波 阶段	横梁 编号	本文方法 求得的预 抛高值	倒装法求 得的预抛 高值	两者的 相对 偏差/%	Kalman 滤波 阶段	横梁 编号	本文方法 求得的预 抛高值	倒装法求 得的预抛 高值	两者的 相对 偏差/%
1	C1	16.24	13.41	21.1	2	C2	15.69	13.09	19.9
3	C3	15.10	12.73	18.6	4	C4	14.73	12.48	18.0
5	C5	13.96	12.05	15.9	6	C6	14.03	12.02	16.7
7	C7	13.27	11.32	17.2	8	C8	13.28	11.37	16.8
9	C9	12.34	10.65	15.9	10	C10	12.58	10.91	15.3
11	C11	11.31	9.91	14.1	12	C12	11.73	10.25	14.4
13	C13	10.32	9.16	12.7	14	C14	10.64	9.42	13.0
15	C15	9.10	8.17	11.4	16	C16	9.70	8.48	14.4
17	C17	7.79	7.11	9.6	18	C18	8.21	7.30	12.5
19	C19	6.47	5.92	9.3	20	C20	6.81	6.12	11.3
21	C21	4.97	4.65	6.9	22	C22	5.16	4.65	11.0
23	C23	3.42	3.21	6.5	24	C24	3.59	3.32	8.1
25	C25	2.13	2.02	5.4	26	C26	2.14	2.03	5.4
27	C27	0.84	0.79	6.3	28	C28	0.85	0.80	6.2

注: 1. 滤波阶段和横梁编号与图 1 中的序号一致;
2. 横梁控制点的预抛高值都为正值, 表示施工时吊点处的标高应向上预抬;
3. 相对偏差的计算是以倒装法求得的预抛高值为标准的

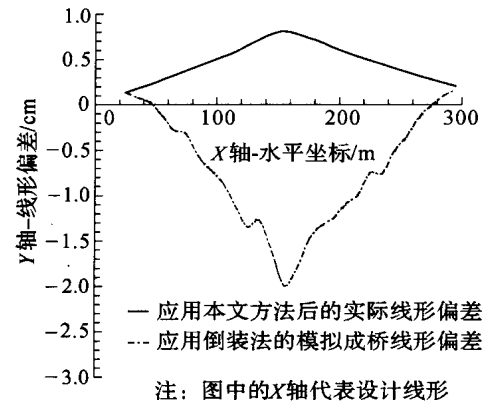


图 5 成桥线形与设计线形的偏差

Fig 5 Deviation of compared line-shape of completed bridge compared with the designed line-shape

7 结 论

(1) Kalman 滤波法能够对桥梁结构各施工阶段的真实状态进行最优估计, 而正装分析法能对结构施工进行精确的仿真计算, 将这两种方法结合起来, 通过编制的应用程序来求解南浦大桥的桥道系施工预抛高值, 概念清晰明了, 计算精度高, 不仅方便了施工, 而且大大地提高了施工质量

(2) 本文的方法虽然是针对中承式钢管混凝土拱桥桥道系的施工控制计算问题提出的, 但它仍可以推广应用到其他类型的桥梁施工控制的计算中, 只需将 Kalman 滤波模型和正装分析的计算模型进行相应的修改就可以了. 但如何提高 Kalman 滤波法在少数数据系统中的精度尚需做进一步研究

(3) 在正装分析的过程中, 若能对正装计算的有限元模型进行设计参数辨识和修正, 以及消除结构分析模型误差, 那么施工控制的计算精度会更高, 施工控制的效果会更好.

参考文献(References):

[1] 中华人民共和国交通部 JTJ 021- 95, 公路桥涵设计规范(合订本)[S]. 北京: 人民交通出版社, 1995

[2] 向中富. 桥梁施工控制技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001: 41- 116

[3] 于长官. 现代控制理论[M]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学出版社, 1988

[4] 林元培. 卡尔曼滤波法在斜拉桥施工中的应用[J]. 土木工程学报, 1983, 16(3): 7- 14

L N Yuanpei. Application of the Kalman's Filtering method to the cable-bridge construction [J]. **Journal of Civil Engineering**, 1983, 16(3): 7- 14

[5] 花迎春, 张劲泉. 卡尔曼滤波法应用于悬索桥施工控制[J]. 公路交通科技, 1999, 16(2): 35- 38

HUA Ying-chun, ZHANG Jin-quan. Application of the Kalman's Filtering method to the suspension brige construction control [J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 1999, 16(2): 35 - 38

[6] 张永水. 大跨度预应力混凝土连续钢构桥施工误差调整的 Kalman 滤波法[J]. 重庆交通工程学院学报, 2000, 19(3): 13- 15

ZHANG Yong-shui. The application of the Kalman's filtering method to construction control for PC continuous rigid frame bridge [J]. **Journal of Chongqing Institute**, 2000, 19(3): 13 - 15

[7] 朱伯芳. 有限元法原理与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998: 349- 351.