

某大跨连续刚构桥的施工仿真和控制分析

张秀成

(莆田学院 土木建筑工程系, 福建 莆田 351100)

摘要:以沪蓉西高速公路宜昌—恩施段渔泉溪大桥的施工控制为背景,通过对大桥进行施工仿真分析,模拟其施工过程,运用 Kalman 滤波法误差理论对大桥的施工进行误差分析调整,通过现场的标高测量和控制断面应力数据,进行桥梁结构线形和受力状态分析,并指导施工。

关键词:施工仿真; Kalman 滤波法; 施工控制; 误差分析

中图分类号: U445.466 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-0300(2009)03-0069-05

1 工程概况

渔泉溪大桥是位于沪蓉西高速公路湖北宜昌—恩施段上一座特大桥梁,该桥主桥为(66+120+66)m 预应力连续刚构,左幅桥两岸引桥分别为两孔、三孔一联的预应力混凝土先简支后连续的 30mT 形梁;右幅桥两岸引桥分别为三孔、六孔一联的预应力混凝土先简支后连续的 30 mT 形梁。主桥箱梁为变截面,支点处梁高 6.5 m,跨中梁高 2.5 m,箱梁根部底板厚 90 cm,跨中底板厚 32 cm,箱梁底板厚度按 1.8 次方抛物线变化。箱梁腹板根部厚 65 cm,跨中厚 40 cm,箱梁顶板厚 28 cm。箱梁顶宽 12.5 m,底宽 5.5 m,顶板悬臂长 3.5 m。主桥立面布置如图 1 所示。主桥上部结构采用挂篮悬浇逐段施工,在桥墩施工完成后,在墩顶旁利用托架现浇箱梁 0 号块,箱梁 0 号块施工完成后,在其上面拼装悬浇挂篮,然后依次浇筑各悬臂梁段直到合龙。

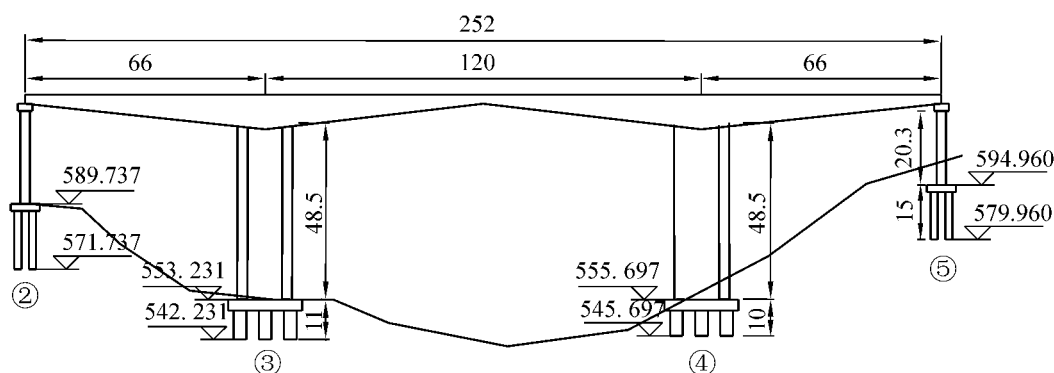


图1 渔泉溪特大桥主桥立面布置图(单位:m)

2 仿真模型的建立

渔泉溪大桥采用桥梁博士 V3.0 进行结构有限元分析。渔泉溪大桥采用悬臂节段法施工,必须经历一个漫长而又复杂的施工过程以及结构体系的转换过程,施工过程中每个阶段的变形计算和受力分析,是桥梁施工控制最基本的内容,必须通过合理的计算方法和理论分析来确定桥梁结构施工过程中每个阶段受力和变形的理想状态,以便控制施工过程中每个阶段的结构行为,使其最终的成桥线形和受力状态满足设计要求^[1]。该桥共划分 118 个单元,其中主梁结构 90 个单元(编号 1~90),桥墩 20 个单元(编号

收稿日期:2009-04-22

作者简介:张秀成 男 1967 年出生 副教授

基金项目:福建省莆田学院科研基金项目(2006Q009);福建省教育厅 B 类科研项目(JB07155)

91~110),挂篮8个单元(编号111~118)。结构仿真模型如图2所示。

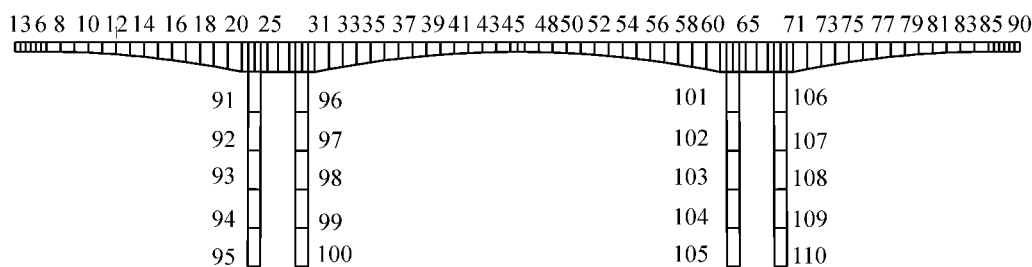


图2 渔泉溪大桥施工仿真模型

3 施工控制的主要方法及分析

3.1 线形监控

3.1.1 标高测量方法

对于标高的控制,以控制梁底标高为主,以控制梁顶标高为辅。每个节段浇筑混凝土前,会力求精确地把梁底标高引到预埋在梁顶的钢筋头上来。钢筋头埋设在靠每个节段的端部约15 cm处,横向位置如图3所示。

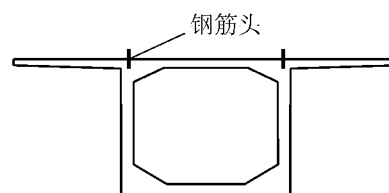


图3 主梁标高测点示意图

3.1.2 施工节段立模标高预测方法

箱梁施工节段立模标高应根据前阶段已施工梁端钢筋头实测标高值与理论设计标高值的误差进行不断调整,在本桥的立模标高指令计算过程中,首先,分析了桥梁施工过程中挠度计算结果(计算值)与实测值的误差产生原因,提取了常用的几种设计参数并进行了参数敏感性分析,最后基于自适应控制理论,运用最小二乘法对渔泉溪大桥的各项主要参数进行了修正,使桥梁能逐渐逼近成桥后的理想状态^[2]。

(1) 桥梁施工控制误差分析。通过有限元理论计算分析可以确定桥梁结构各施工阶段的理想状态,也就是在施工中实现的目标。但是在实际施工中,结构的实际状态很难达到它的理想状态,换言之,桥梁结构的实际状态与理想状态总存在着一定的误差。施工中结构偏离目标的原因涉及的范围极其广泛,包括设计参数误差(如材料特性、截面特性、容重等)、施工误差(如制作误差、架设误差等)、测量误差、结构分析模型误差等。其中,设计参数误差是引起桥梁施工误差的主要因素之一。所谓设计参数误差,就是在进行桥梁结构分析时所采用的理想设计参数值与结构实际状态所具有的相应设计参数值的偏差。本桥误差调整方法为 Kalman 滤波法。

(2) Kalman 滤波法。Kalman 滤波法是一种处理动态定位数据的有效手段,不要求贮存过去的观测数据。当新的数据被观测到后,只要根据新的数据和前一时刻的估计量,借助于信号过程本身的状态转移方程,按照一套递推公式,即可算出新的估计量。可以大大减少计算量和贮存量,便于实时处理。可以显著地改善动态数据处理的精度,能有效地剔除随机干扰噪声,获得逼近真实情况的有用信息,获得良好效果^[3]。

3.1.3 Kalman 滤波法在渔泉溪大桥施工中的应用

(1) Kalman 滤波基本离散线性法计算流程图,如图4所示。

(2) 输出结果与分析。通过滤波计算,便可计算出大桥两侧主梁从1号块开始的悬臂端标高预测值,输出结果。由于篇幅有限,以该桥左幅为例,把3号墩跨中合龙段张拉后(全桥合龙后)各施工梁段控制中的设计标高、实际标高及预测(理论计算)标高的数据对比分析表如表1所示(工况:(宜昌方向)中跨合龙段张拉完(恩施方向))。

通过线形监控数据可以看出:①多数钢筋头能有效反应梁端的各个施工工况的挠度变化值,通过将底模标高与钢筋头的实际标高结合起来,能有效的预测和真实的反应各个施工节段梁底标高值;②钢筋头标高实测值与设计值及理论计算值均吻合较好,本桥线性监控良好,满足设计线形要求。

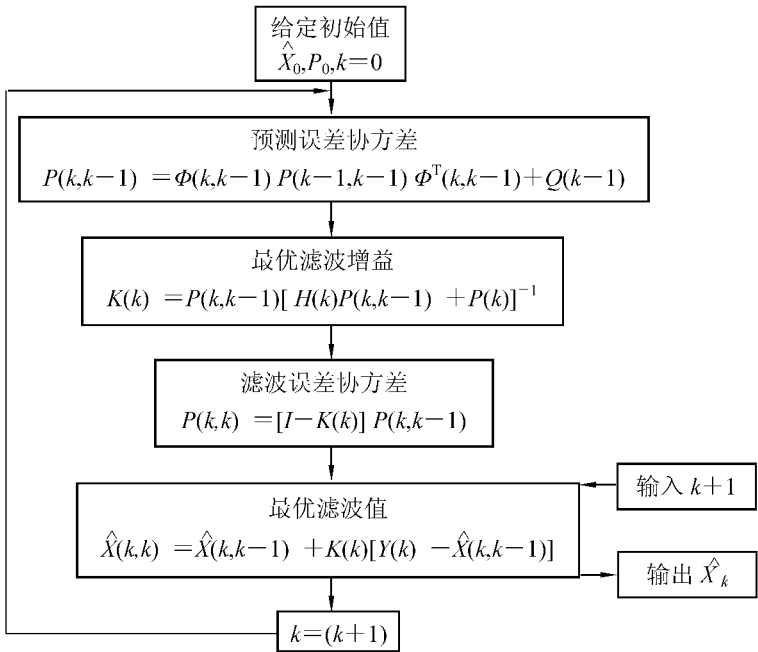


图 4 Kalman 滤波基本离散线性法计算流程图

表 1 左幅 3#墩各施工梁段标高观测点分析表

断面号	设计标高/m	实测值/m	计算值/m	误差/m
15'	618.184	618.176	618.203	0.027
14'	618.24	618.292	618.264	-0.028
13'	618.245	618.307	618.272	-0.035
12'	618.208	618.282	618.257	-0.025
11'	618.13	618.194	618.176	-0.018
10'	618.013	618.088	618.056	-0.032
9'	617.861	617.938	617.906	-0.032
8'	617.673	617.739	617.709	-0.030
7'	617.449	617.508	617.484	-0.024
7	618.935	618.973	618.997	0.024
8	619.384	619.466	619.452	-0.014
9	619.796	619.897	619.868	-0.029
10	620.173	620.275	620.258	-0.017
11	620.514	620.629	620.607	-0.022
12	620.816	620.941	620.916	-0.025
13	621.078	621.231	621.199	-0.032
14	621.297	621.43	621.408	-0.022
15	621.466	621.592	621.580	-0.012

3.2 应力监控

3.2.1 传感器的布置

由于应力测量及计算影响因素众多,为达到应力测量最佳效果以有效指导施工、检测施工质量,本次监控过程引进三种不同品牌的传感器:长沙三智、丹东辽丹以及北京基康(预埋跨中)。该桥左幅传感器埋设情况如下:丹东产传感器 34 个,长沙产传感器 2 个,基康传感器 6 个。左幅桥传感器布置示意图如图 5 所示。

3.2.2 控制过程

根据监控细则,在全桥施工的关键阶段(分别为:挂篮就位、混凝土浇筑完、预应力张拉完)都进行了

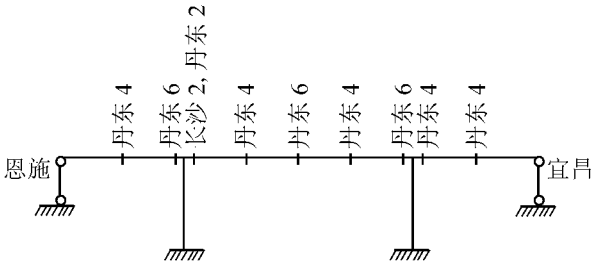


图 5 鱼泉溪左幅传感器布置图

应力测量,并将现场应力实测值同理论计算值相比较。

3.2.3 输出结果及分析

由于篇幅有限,同样以该桥左幅为例,把 3[#]墩边跨 2[#]截面底板在某些工况下测得的应力数据(403[#]、341[#]两种传感器)与预测(理论计算)值的进行分析,对比分析表如表 2 所示。

表 2 3[#]墩边跨 2[#]断面底板应力分析表 MPa

工况	计算值	403 [#] 传感器		341 [#] 传感器	
		应力值	误差值	应力值	误差值
3 [#] 挂篮就位	0.30	0.59	-0.29	0.81	-0.51
3 [#] 块浇筑完	0.53	0.72	-0.19	0.95	-0.42
3 [#] 块张拉完	0.43	0.77	-0.34	1.09	-0.66
4 [#] 块浇筑完	1.00	1.45	-0.45	0.86	0.14
5 [#] 挂篮就位	1.15	1.99	-0.84	1.72	-0.57
5 [#] 块浇筑完	1.66	2.22	-0.56	2.04	-0.38
6 [#] 挂篮就位	1.86	2.40	-0.54	2.17	-0.31
6 [#] 块浇筑完	2.58	2.90	-0.32	2.44	0.14
6 [#] 块张拉完	2.27	3.48	-1.21	2.49	-0.22
7 [#] 挂篮就位	2.73	3.80	-1.07	2.67	0.06
7 [#] 块浇筑完	3.58	3.80	-0.22	3.12	0.46
7 [#] 块张拉完	3.25	4.21	-0.96	2.71	0.54
8 [#] 块浇筑完	4.78	4.16	0.62	3.57	1.21
8 [#] 块张拉完	4.44	5.52	-1.08	3.30	1.14
9 [#] 挂篮就位	5.08	5.56	-0.48	4.25	0.83
9 [#] 块浇筑完	6.18	5.75	0.43	5.20	0.98
9 [#] 块张拉完	5.81	5.88	-0.07	5.43	0.38
10 [#] 挂篮就位	6.55	6.24	0.31	5.66	0.89
10 [#] 块浇筑完	7.75	6.06	1.69	6.74	1.01
10 [#] 块张拉完	7.38	6.56	0.82	6.06	1.32
11 [#] 挂篮就位	8.21	6.70	1.51	7.42	0.79
11 [#] 块浇筑完	9.52	7.10	2.42	7.83	1.69
11 [#] 块张拉完	9.13	7.69	1.44	8.14	0.99
12 [#] 块立模完	10.10	8.10	2.00	8.73	1.37
12 [#] 块浇筑完	11.50	9.82	1.68	9.14	2.36
12 [#] 块张拉完	11.20	9.73	1.47	8.96	2.24
13 [#] 块立模完	12.20	10.81	1.39	10.04	2.16
13 [#] 块浇筑完	13.80	11.94	1.86	11.13	2.67
13 [#] 块张拉完	13.50	11.81	1.69	10.90	2.60
14 [#] 块立模完	14.60	12.71	1.89	12.08	2.52
14 [#] 块浇筑完	16.20	15.02	1.18	14.39	1.81
14 [#] 块张拉完	16.00	14.88	1.12	14.16	1.84
边跨合龙	15.40	14.57	0.83	14.21	1.19
边跨张拉完	15.00	14.43	0.57	14.07	0.93
中跨合龙	14.50	14.21	0.29	13.66	0.84
中跨张拉完	14.10	13.93	0.17	13.35	0.75

通过应力监控数据可以看出:

(1)多数传感器运行正常,且测量数据基本处于正常工作范围,实测值和理论计算值吻合较为良好,由于桥梁施工中临时荷载分布情况复杂,致使个别传感器在个别工况出现较为微弱的应力异常情况;个别传感器损坏、应力曲线异常明显情况等主要是因为钢筋绑扎完成埋置后,在混凝土浇筑过程中数据导线被振断或者传感器器芯被振歪致偏离桥梁纵向,应力值多相耦合,由此和理论计算值相差较远。

(2)桥梁结构施工中应力分布情况影响因素众多且规律复杂,理论和实际不可能完全一致;本次渔泉溪大桥全程以及各个子阶段监控任务中,结合现场施工情况及时改良传感器埋置技术,传感器存活率明显提高且运行良好,对于工程起到了有效的指导及监控作用。

(下转第 77 页)

能的较好方案。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国交通部. JTGD26. 1—1999 公路隧道通风照明设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,1999.
- [2] 张燕宾. SPWM 变频调速应用技术[M]. 北京:机械工业出版社,1999.
- [3] 赵忠杰. 公路隧道机电工程[M]. 北京:人民交通出版社,2007.
- [4] 昌泽舟. 轴流式通风机实用技术[M]. 北京:机械工业出版社,2005.

Safety Analysis for Start-up of Tunnel Axial Fans in Parallel Connection

Liu Jianming

(Howden Hua Engineering Co., Ltd, Beijing 100031)

Abstract: Axial fans are the main equipment in the long tunnel ventilation system. The safe running of the fans is the basic guarantee for tunnel safety operation. Energy-saving operation of fans is the main method for reducing long-term operation cost. In this paper, several start-up manners are compared for safety, and the control method that is significantly energy-saving is emphatically analyzed.

Key words: axial fan; VVVF control; blade angle adjustable; anti-stall ring

~~~~~  
(上接第 72 页)

## 4 结语

渔泉溪大桥经过以上的施工监控,最后全桥合龙误差最大为 7 mm、最小为 3 mm,达到了施工精度要求。本桥线形及应力监控良好,从而也说明了 Kalman 滤波法在连续刚构桥施工控制应用中的可行性和实用性。

## 参 考 文 献

- [1] 姚波,郑青青. 大跨径预应力连续梁桥悬臂浇筑施工监控[J]. 山西建筑,2007,33(2):269-270.
- [2] 曹江海. 145 m 高墩连续刚构施工控制与监测[J]. 铁道建筑技术,2005(6):23-26.
- [3] 张永水. 大跨度预应力连续刚构桥施工误差调整的 Kalman 滤波法[J]. 重庆交通学院学报,2000,19(3):13-15.

## Construction Simulation and Control Analysis of a Large-span Continuous Rigid Frame Bridge

Zhang Xiucheng

(Department of Civil and Architecture Engineering of Putian University, Putian 351100, China)

**Abstract:** In this paper, the background is set in the construction control of Yuquanxi Bridge in Yichang-Enshi Segment of Shanghai-Chengdu-Xizang Expressway. The following procedures are taken: the simulation analysis of the bridge construction, simulation of the construction process, adjusting of the error analysis of the construction of the bridge using the error theory of Kalman filter method. Through on-site elevation measurement and control of the section stress, bridge linear structure and the load condition is analyzed and guidance provided to the construction.

**Key words:** construction simulation; Kalman filter; construction control; error analysis