

⑥
2000(2) 三滩黄河大桥

道王桥

海双河

控制软件

桥梁建设

《OVM通讯》2000年 第2期 (总第19期)

甘肃靖远三滩黄河大桥施工控制技术研究

3-5

徐岳

杨惠林

U 445

一、概述

“三滩黄河大桥施工控制技术研究”是交通部行业联合攻关项目“黄土山区高等级公路修筑技术研究”的子课题，由甘肃省交通规划设计院和西安公路交通大学承担，交通部第二公路工程局第一工程处参加。

本课题的研究目的是满足三滩黄河大桥主桥施工观测与控制要求，并使合拢偏差不大于 $\pm 15\text{mm}$ ，合拢后桥面线形良好，为同类桥型的设计与施工积累经验。

本课题的主要研究内容为：主桥施工观测与控制方法研究、监测系统建立、控制软件的引进、开发和配套软件的编制及施工控制实施等工作。

二、施工过程检测

1、检测目的

施工过程检测是施工控制的主要内容之一，是全桥顺利、成功修建的重要工序，也是建立预测调控模型所需的基础资料。

2、施工检测的主要内容

- (1) 每一梁段移安装模板后的立模标高；
- (2) 每一梁段施工过程中主梁各控制点的高程及变形情况；
- (3) 每一梁段的截面尺寸变异；
- (4) 每一梁段施工过程中各预应力索的索力及索力变化值；
- (5) 若干关键工况下的基础变位；
- (6) 主梁控制截面应力（应变）；
- (7) 典型气候条件下，日照温差对主梁挠度的影响；

徐岳 西安公路交通大学教授
杨惠林 甘肃省交通规划设计院高工

(8) 建桥材料的力学指标，尤其是弹性模量及徐变收缩系数等。

3、施工检测的实施

(1) 主梁标高观测

主梁标高测量主要是利用桥梁施工时的测量控制网，在最佳观测时刻用TOPCONGTS—6A全站仪（测距标准差 $\pm(2\text{mm}+2\text{ppm})$ 、测角标准差 $\pm 2''$ ）或同精度要求的其它型号全站仪，按直接三角高程观测法四测回观测，测量基准点选在墩顶桥面，各梁段标高测点均置于相应梁段端部顶板的上、下游及截面中心。

(2) 温度影响修正

温度影响是混凝土连续刚构桥施工测量的重要内容之一，包括日照温差和季节性平均温差影响。在施工阶段，主要考虑日照温差对主梁挠度的影响。一般地，日温差变化越大，对主梁挠度影响越大，且随悬臂的加长，影响愈加显著。目前完全消除温差影响尚无法作到，因此可按以下两点将日温差影响减小到最低程度：

- ① 选择相对稳定的测量时间，通常在清晨日出之前施测完毕；
- ② 可选每天观测五次或每天观测一次，同时刻连续观测五天，建立温度—变形影响曲线，并以此为根据对理想设计温度（如 $T=20^\circ\text{C}$ ）时的变形值进行修正，作为新的理想状态，从而间接消除温度影响。

(3) 主梁控制截面应力（应变）测试

为保证施工过程安全及控制参数识别，应对主梁控制截面的应力（应变）进行定期观测。其中，钢筋和混凝土应力采用钢弦式应力计，待钢筋骨架绑扎成型且混凝土浇筑前预埋。应力计的

桥梁建设

量程和种类取决于设计图中的钢筋直径及该截面的设计内力。

三、施工控制技术

由于各种因素的直接和间接影响,使得实际桥梁在施工过程中的每一状态不可能与设计状态完全一致,结构的受力及变形过程表现为非平稳的随机过程。因此,只有对三滩桥的施工过程实施有效控制,才能保证成桥后的主梁线形及结构的受力状态符合设计期望,虽然国内外的研究者对这一问题进行了一些研究并提出了相应的控制方法,如卡尔曼滤波法、参数识别法以及其他的一些方法,但由于三滩桥施工控制的复杂性以及较强的实践性,因此还不能断言现有的控制方法已能完全解决连续刚构桥的施工控制这一复杂的问题。

现代控制理论是本世纪60年代以后发展起来的控制理论,基于现代控制理论及由此而产生的一切分析设计方法,都是从受控对象的精确模型出发的。但连续刚构桥的施工过程是一多变量、高阶时变的复杂过程,要对这种复杂过程建立起精确的数学模型极其困难,而具有对模型要求低、控制性能优良等特点的预测控制是解决这类建模困难、受控对象复杂系统控制的有效控制方案。因此,采用预测控制理论作为三滩桥施工过程的控制算法,预测模型、滚动优化、反馈校正描述预测控制算法的3个要素。

1、预测模型

对象的输出预测是预测控制的关键,而对象的输出预测又必须基于描述对象动态特性的数学模型即预测模型,现有的预测模型有灰色系统、神经网络系统等,本课题根据实桥设计与施工状况选用灰色理论来分别建立系统输入、输出及状态变量之间的数学模型。

2、滚动优化

预测控制采用滚动式的有限时域优化目标函数,始终把新的优化建立在系统当前实际情况的

基础上,在每一时刻提出相对于该时刻起对未来有限时域内的优化目标,即要确定从当前 k 时刻起的一组 M 个控制变量。

$$U(k)=[u(k), u(k+1), \dots, u(k+M-1)]$$

使得未来 p 时刻的输出预测 $Y_p(k+i)$ 与期望输出 $Y_r(k+i)$ ($i=1, 2, \dots, p$)的方差为最小,即

$$J_p = \text{Min} \sum_{i=1}^p \{ [Y_p(k+i) - Y_r(k+i)]^2 W_i \}$$

这里 W_i 为第 i 步预测的非负加权系数。

由于各种干扰和计算误差的影响,使得对象的实际输出 $Y(k+i)$ 一般不可能与参考轨迹 $Y^*(k+i)$ 完全重合,因此滚动优化意味着按一个已知的非干扰模型来计算控制变量 $U(k)$,以使得从 k 时刻开始的未来 P 个预测输出 $Y_p(k+i)$ 尽可能地接近参考轨迹。

3、反馈校正

预测控制算法在进行滚动优化时,都强调优化的基点应与系统当前实际情况一致。即在控制的每一步,都应检测系统的实际输出值,并通过引入误差预测或模型辨识对未来输出作出准确的预测。为此必须引入反馈校正策略,即根据实时输出对模型的结构或参数进行实时校正。预测模型的反馈校正是克服系统中所存在的不确定性因素影响的有效手段。

4、三滩桥施工控制参考轨迹的确定

三滩桥施工控制实施以前,必须对桥梁的每一施工阶段进行详尽的理论分析以确定该桥施工过程的参考轨迹或期望输出(输入)值,它主要包括以下内容:

- (1) 成桥时主梁线形及结构的受力状态;
- (2) 每一施工阶段预应力索的张拉力、主梁挠度、控制截面的控制应力、立模标高或悬拼节段前端点标高等;
- (3) 施工顺序、施工荷载的明确规定;
- (4) 满足应力控制及其它约束条件下预应

桥梁建设

力的允许调整幅度。

这些内容在三滩桥施工过程中根据实际情况进行必需的补充和完善。参考轨迹的确定可采用前进分析和倒退分析法完成。

5、施工控制信息的制定与发布

根据施工过程检测数据及预测控制分析,编制“施工检测与控制信息”,并由施工及监理单位实施。

6、施工控制的实施

(1) 控制机理

三滩桥施工过程中在其它因素得到有效控制的前提下,则主梁线形和内力状态只有通过立模标高和预应力索力进行调整。立模标高和预应力索拉力为系统的两个输入。由于立模标高的改变并不对结构的内力产生多少影响,亦即在不改变结构内力的前提下可通过立模标高的调整来改变结构线形,因此成桥状态线形可以以设计线形作为控制目标,不必进行调整。而施工中结构各项参数与设计段取值不一致所带来的结构内力变化,只有通过预应力的改变来调整以使结构内力分布符合设计期望,故最终的控制目标是成桥状态时主梁线形和结构的内力分布符合设计期望,而内力大小在保证结构安全的前提下允许在一定范围内变化。

(2) 立模标高的确定

① 预应力索张拉前后悬臂端竖向位移增量预测

若第 $k+1$ 号预应力索的张拉力调整值已确定为 $T_r(k+1)$,相应的设计值为 $T_d(k+1)$,竖向位移增量的设计值为 $\Delta_{id}(k+1)$,则相应的模型输出值 $\Delta_{im}(k+1)$ 为

$$\Delta_{im}(k+1) = T_r(k+1) \cdot \frac{\Delta_{id}(k+1)}{T_d(k+1)} x_l(k+1)$$

② 梁段混凝土浇筑前后悬臂端竖向位移增量预测

若第 $k+1$ 号梁段混凝土浇筑前后悬臂端竖向

位移增量的设计值为 $\Delta_{id}(k+1)$ 则模型输出值 $\Delta'_{im}(k+1)$ 为

$$\Delta'_{im}(k+1) = Y_l(k+1) \cdot \Delta'_{id}(k+1)$$

③ 浇筑梁段混凝土时挂蓝(支架)变形的预测

若施工中挂蓝(支架)不用替换压重而采用预抛高的方法考虑挂蓝变形,则在立模标高的确定中必须对其进行合理预测,为此定义 $Z_l(i)$ 系列为浇筑第 i 号梁段混凝土时挂蓝(支架)变形的实测值与理论值之比,并设挂蓝(支架)变形的理论值为 $\Delta_{id}(k+1)$,则模型输出值为

$$\Delta''_{im}(k+1) = Z_l(k+1) \cdot \Delta'_{id}(k+1)$$

④ 第 $k+1$ 阶段立模标高 $H_l(k+1)$,则第 $k+1$ 阶段施工完毕后悬臂端标高的模型输出 $H_m(k+1)$ 为

$$H_m(k+1) = H_l(k+1) + \Delta_{im}(k+1) - \Delta'_{im}(k+1) - \Delta''_{im}(k+1)$$

若采用闭环预测,则与 $H_m(k+1)$ 相应的预测输出为

$$H_p(k+1) = H_m(k+1) + [H(k) - H_m(k)]$$

这里, $H(k)$ 与 $H_m(k)$ 分别为第 k 阶段悬臂标高的实测值及模型输出值。若第 $k+1$ 阶段预应力索的张拉力 $T_r(k+1)$ 已确定,并根据过去和现在的信息求出预测值 $\Delta_{im}(k+1)$, $\Delta'_{im}(k+1)$, $\Delta''_{im}(k+1)$ 后,则立模标高 $H_l(k+1)$ 可被唯一确定。

四、结语

本文以三滩黄河大桥工程为依托,简要介绍了PC连续刚构桥施工控制的新方法。工程实践表明,采用本文方法可以取得良好的控制效果,同时,通过施工过程检测,为该类桥型的设计与施工积累了宝贵的第一手资料。

课题研究得到甘肃省交通厅工程处、交通工程监理事务所的大力支持,在此一并致谢。

编者注:本文原载于1999年甘肃兰州《预应力技术应用与发展研讨会会议交流论文集》。