

预应力混凝土斜拉桥施工控制新进展

陈德伟 许俊 周宗泽 李国志

(同济大学桥梁工程系 上海 200092)

摘要: 在预应力混凝土斜拉桥的施工中几何线形和结构内力的控制非常重要, 据此介绍近年来我国在这一方面的新进展, 应用现代工程控制理论中自适应控制的思想形成控制系统, 其中主要在结构参数辨识和现浇主梁底模标高的实时修正等关键技术上有突破, 并经过几座大跨预应力混凝土斜拉桥的实践取得了成功的经验。

关键词: 斜拉桥 控制 拉索力

近20年来, 预应力混凝土斜拉桥(PC斜拉桥)在中国得到了很快的发展, 是全世界拥有预应力混凝土PC斜拉桥数量最多的国家之一。但是, 目前还存在一项关键技术制约着中国PC斜拉桥设计和施工质量提高, 特别是近年来还有PC斜拉桥在施工过程中出现失控而形成严重事故的例子。这项关键技术就是PC斜拉桥的施工控制, 确切地说就是在PC斜拉桥悬臂浇筑施工过程中对主梁线形和全桥结构内力的控制技术。PC斜拉桥有一特点, 尽管可以采用现代计算手段进行结构施工的仿真计算, 但在施工过程中还会出现理论计算结果与实际结构反应之间的不一致性, 当无法消除不一致性而引起误差积累时就会导致失控。本文作者在长期实践中发现, 引起失控的另一些重要原因是: ①在施工过程中还存在控制变量的动态连续变化与理论计算按照工况而引起相对静止、片面、间断之间的矛盾, 集中反映在确定现浇主梁底模标高的抛高值问题上, 对这一问题的认识目前还没有见到有关报道, 也未引起同行们的足够重视; ②需要一个合理的仿真计算方法, 以考虑在施工过程中诸如徐变收缩、预应力、结构体系转换等多种因素的作用和影响。

斜拉桥的施工控制问题早已引起桥梁工程师们的足够重视^[1-8], 近20年来, 形成了一些实用的控制方法, 目前主要有三种基本思想指导下的不同方法: 第一种是卡尔曼滤波的方法^[9], 采用纠偏终点控制的思想, 也就是在斜拉桥施工过程中将各种产生主梁线型偏差的因素不断用改变斜拉索索力予以纠正, 很显然, 这种做

法不仅要增加施工作业量, 而且对斜拉索索力不利, 或者说是将误差积累到索力中去, 所以也有称其为线形单控的方法; 另一种是应用现代控制理论中自适应控制的思想, 具体做法是通过施工过程中主梁标高和(或)斜拉索索力的实测值进行结构主要基本设计参数的识别, 辨别设计值与实际值产生偏差的主要原因, 从而修改最初设计的“轨道”, 达到标高和索力双控的目标, 也即控制系统与被控系统之间互相适应, 或称双控的方法; 还有一种做法是在设计时给予主梁标高和斜拉索索力较大的宽容度, 香港某斜拉桥其主梁线型的设计宽容度达 $\pm 15\text{cm}$ (悬臂长为215m), 当然对于每一节段长度的误差也有限制, 这种做法虽然减少了控制的难度, 但是对PC斜拉桥却不适用, 理由是预应力混凝土斜拉桥的主梁应力或预制的斜拉索的长度都不容易具备较大的宽容度。由此, 自适应的控制思想被认为最符合PC斜拉桥的施工控制模型。

在自适应控制的方法中, 结构主要参数的识别方法是一项重要技术。有日本学者曾提出了最小二乘法的参数辨识方法^[2], 但这种需要假设结构误差模型的全量计算方法在实用时还存在困难。本文设想应用结构计算中转置矩阵的思想, 并用不同工况的增量来辨识不同的参数, 它的优点是所需要的测量信息比较少, 符合中国的实际情况, 另外就是实用、简单、有效。本文作者在微机上用Windows95或NT下用VisualC++平台开发了一套斜拉桥施工控制的软件, 实现了上述思想^[8,9], 已经过几座大跨PC斜

拉桥的使用和验证, 本文将介绍上述内容。

1. PC斜拉桥的控制新技术

PC斜拉桥的施工控制系统最基本的功能是确保在悬臂施工过程中结构的安全, 同时在一个合理的误差范围内保证结构的线形和内力符合设计要求。一个实用和典型PC斜拉桥的自适应控制系统的流程图如图1所示, 在这个系统中应该包括施工过程的仿真计算或称建立期望值数据库、修正期望值数据库、标高, 应力和斜拉索索力等的测量、参数辨识、实时修正和施工数据文档处理等主要内容。

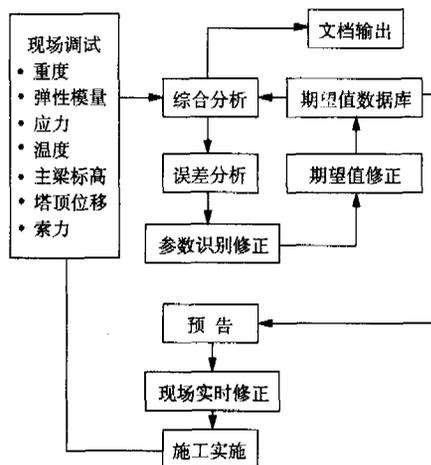


图1 PC斜拉桥自适应控制系统流程

近几年, 随着PC斜拉桥自适应控制技术的发展, PC斜拉桥悬臂施工中的线形和内力控制技术已经变得比较成熟, 主要归功于在PC斜拉桥自适应控制方法中两项最为关键技术水平的提高, 即结构的参数识别和现场立模标高实时修正方法, 前者为工程控制论中自适应控制的基本原理和方法, 也是斜拉桥施工控制中实现主梁标高和斜拉索索力双控的重要的基本手段之一, 主要解决理论值与实际值不一致性问题; 而后者为斜拉桥施工控制中的特色问题, 其目的主要是为了解决实际施工时结构控制变量的连续动态变化与理论计算时依赖固定工况而使变量相对间断和具有局限性之间的矛盾, 在现场实施每一段主梁底模标高时合理解决这一矛盾显得尤为重要, 而有些工程师往往忽视这一重要问题, 或没有方法来解决这一问题。

1.1 挂篮上底模标高实时修正公式

挂篮上浇注主梁的底模标高的测量设置被认为是主梁线形控制的最重要的决定因素之一, 由于这一底模标高的测量设置工作需要全天候作业, 因此除了需要在理论计算上给出正确的符合实际的底模标高之外, 在施工作业时的全天候的实时修正尤为重要, 为了排除临时荷载变化、日照温差、挂篮刚度差别和已成梁的误差等因素对确定未浇梁底模段标高的影响, 采用如下修正公式(见图2):

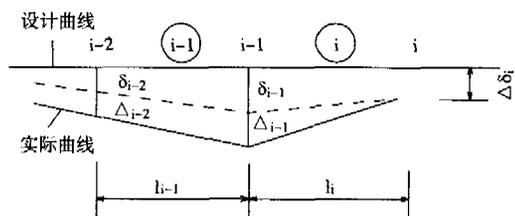


图2 实时修正公式示意图

$$\Delta\delta_i = \delta_i + \delta_g + \delta_\Delta \quad (1)$$

式中: $\Delta\delta_i$ 为未浇段底模前端实时修正量; δ_i 为临时荷载变化和日照温差等的修正量; δ_g 为挂篮的抛高; δ_Δ 为已成梁段的误差修正量。

根据结构变形的几何关系容易导出 δ_i 为^[6]

$$\delta_i = \delta_{i-1} + (\delta_{i-1} - \delta_{i-2}) l_i / l_{i-1} \quad (2)$$

式中: δ_{i-1} 为第*i-1*段梁的临时荷载和日照温差的竖向变位; δ_{i-2} 为第*i-2*段梁的临时荷载和日照温差的竖向变位; l_i, l_{i-1} 分别为第*i, i-1*段主梁的长度。

当第*i-1, i-2*段主梁高程存在施工误差时还应加上由此引起第*i*段梁标高的修正量, 即

$$\delta_i + \delta_\Delta = (\delta_{i-1} + \Delta_{i-1}) + [(\delta_{i-1} + \Delta_{i-1}) - (\delta_{i-2} + \Delta_{i-2})] l_i / l_{i-1} \quad (3)$$

式中: Δ 为已成梁段的高程施工误差。

当主梁节段长度都相同时, 公式(3)可以简化为

$$\delta_i + \delta_\Delta = (2\delta_{i-1} - \delta_{i-2}) + (2\Delta_{i-1} - \Delta_{i-2}) \quad (4)$$

而当挂篮为牵索式长挂篮时则有

$$\delta_g = \delta_a - \delta_b \quad (5)$$

式中: δ_a 为张拉挂篮斜拉索时挂篮的非弹性或其它因素引起的附加变形量, 或称为下抛值;

δ_b 为浇注混凝土时挂篮的非弹性或其它因素引起的附加变形量,或称为上抛值,将式(4)和式(5)代入式(1)可以得到实时修正公式

$$\Delta\delta_i = (2\delta_{i-1} - \delta_{i-2}) + (\delta_a - \delta_b) + (2\Delta_{i-1} - \Delta_{i-2}) \quad (6)$$

此外还有一些因素也将影响挂篮标高的正确设置,例如悬吊挂篮上斜拉索的张拉力大小和拉索与主梁的倾角变化等,这些可以在施工中积累数据并根据经验来决定。通过公式(6)可以发现:当已成梁段前端有一标高误差 Δ_{i-1} 存在时,将在待浇梁段前点产生两倍的标高误差,可以想象仅这一项误差修正的重要性。

1.2 参数辨别的转置矩阵法

施工控制流程图中另一个得到发展的技术问题就是在现场通过对实测数据进行分析处理,通过不同的工况来分别检验结构计算中所取用的一些主要参数是否能够正确反映施工中实际结构的特征,如徐变系数、主梁重量和塔及主梁的抗弯刚度等,这是对结构实行线形和内力双控的主要手段。本系统应用结构计算中转置矩阵方法的思想,并用不同工况分别对主梁抗弯刚度和自重等参数进行识别。由于转置矩阵方法是一种链式递推计算过程,因此特别适合斜拉桥悬臂施工中结构内力的计算。图3给出了桥梁节段端部内力、位移定义,在悬臂端的施工循环中,主要荷载增量没有作用在节段*i*,节点(*i+1*)的状态向量 S_{i+1} 通过转置矩阵 G_i 节点*i*的状态向量关联,如下关系式:

$$S_{i+1} = G_i S_i \text{ 或者}$$

$$\begin{Bmatrix} u_i(L_i) \\ v_i(L_i) \\ \phi_i(L_i) \\ N_i(L_i) \\ Q_i(L_i) \\ M_i(L_i) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_i/E_i A_i & 0 & 0 \\ 0 & 1 & L_i & 0 & L_i^3/6E_i I_i & L_i^2/2E_i I_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 & L_i^2/2E_i I_i & L_i/E_i I_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_i & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i(0) \\ v_i(0) \\ \phi_i(0) \\ N_i(0) \\ Q_i(0) \\ M_i(0) \end{Bmatrix}$$

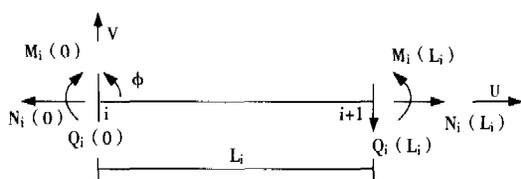


图3 单元示意图

式中: $E_i I_i$ 为第*i*单元的抗弯刚度; L_i 为第*i*单元的长度; $Q_i(0)$, $Q_i(L_i)$ 分别为第*i*单元两端的剪力(见图3); $M_i(0)$, $M_i(L_i)$ 分别为第*i*单元两端的弯矩; $V_i(0)$, $V_i(L_i)$ 分别为第*i*单元两端的实测竖向位移; $\phi_i(0)$, $\phi_i(L_i)$ 分别为第*i*单元两端的转角。

梁端点位移 $V_i(L_i)$ 和转角 $\phi_i(L_i)$ 可以写成如下关系式^[8]:

$$V_i(L_i) = V_i(0) + \phi_i(0)L_i + \frac{L_i^3 Q_i(0)}{6E_i I_i} + \frac{L_i^2 M_i(0)}{2E_i I_i} \quad (7)$$

$$\phi_i(L_i) = \phi_i(0) + \frac{L_i^2 Q_i(0)}{2E_i I_i} + \frac{L_i M_i(0)}{E_i I_i} \quad (8)$$

当从实测中知道某工况(例如张拉斜拉索工况)改变后的节点位移增量值,或斜拉索力增量时,就可以得到悬臂梁所有单元的内力增量,现在可进行主梁的抗弯刚度反求,实用的主梁抗弯刚度求解公式为

$$E_i(I_i) = \frac{1}{6} \frac{L_i^3 Q_i(0) + 3L_i^2 M_i(0)}{V_i(L_i) - V_i(0) - L_i \phi_i(0)} \quad (9)$$

$$\phi_i(L_i) = \phi_i(0) + 6 \frac{[L_i^2 Q_i(0) + 2L_i M_i(0)] \times [V_i(L_i) - V_i(0) - L_i \phi_i(0)]}{L_i^3 Q_i(0) + 3L_i^2 M_i(0)} \quad (10)$$

计算方向可以从塔梁固结点(通常也是对称点)开始至悬臂端,因为在对称点一般有初始条件 $\phi_i(0) = 0$ 。在求解梁的 $E_i I_i$ 之后,可以用实测的浇注混凝土工况的主梁位移以及斜拉索索力的增量来复核所浇注的混凝土重量。在整个施工过程中可以反复进行这些计算,直至基本消除理论值与实际值的不一致性。另外还有一些重要参数也应该在施工过程中得到检验,例如混凝土的徐变收缩参数,则可以采用不断地固定测量某些对徐变收缩较敏感的斜拉索索力来进行拟合^[5]。

2. 可视化软件系统的开发

现代微机技术的飞速发展斜拉桥施工控制带来了新的内涵,使得有可能用微机软件来高效地实现这一复杂的工作。一个实用和高效

的斜拉桥施工控制软件就是要实现图1的基本功能^[9],特别是还可以利用现代可视化技术来丰富软件的功能。例如处理一座大跨斜拉桥施工过程的仿真计算结果,工作量较大,一般对计算结果处理要达到两个目的:一是检查仿真计算的次序安排是否正确,另一个是要通过计算结果中应力验算检查结构在施工全过程中是否安全。在这一软件中采用目前流行的工业标准OpenGL来支持,根据施工过程仿真计算和相应的应力验算结果来生成具有灯光、混色和纹理的三维动画,既直观又高效。开发研制这一软件时在满足基本功能的前提下,另一特点是使用方便,具体表现为采用可视化技术以及常用的提示、置缺省值、灰化、强化说明、自锁等功能。此外最重要的是软件的核心已经过近10座以上大跨实桥的考核,具有一定的可靠性。

3. 实例

现以某斜拉桥为例,说明现场主梁底模标高实时修正公式等的应用。该桥的主桥为一座独塔双索面不对称的预应力混凝土斜拉桥,现在用本文方法来说明PC斜拉桥在悬臂浇注循环施工过程中确定主梁底模前端高程的重要性。当施工至第11号梁段时,在挂篮前移到位工况后需要确定11号段主梁底模的标高,此时9、10、11高程控制点的设计、实测和误差值分别为:

梁段编号	9	10	11
设计值/m	37.990	37.926	37.872
实测值/m	37.903	37.816	37.784
误差值/m	-0.026	-0.015	

另外,由实测知道9、10号梁段控制点的施工误差分别为1.5cm和2.6cm。根据挂篮试验和前几段的施工已知挂篮的 δ_a 、 δ_b 分别为3cm和7cm,现可将上述数值代入公式(6)

$$\Delta\delta_i = (2\delta_{i-1} - \delta_{i-2}) + (\delta_a - \delta_b) \\ + (2\Delta_{i-1} - \Delta_{i-2}) = 0.089\text{m}$$

经实时修正后,正确的主梁底模标高理论值应为:37.872m-0.089m=37.783m,实施值为37.784m,存在误差为1mm。但11号段梁的标高

修正量竟达到8.9cm,其中分别由已经完成梁段的施工误差、日照温差的影响以及挂篮的非弹性变形等因素构成。另外仿真计算时采用的每一梁段的修正浇注重量为3351kN,实际施工的平均值为3390kN,经扣除输送管道内的损耗量后几乎与识别的重量相差无几。当该桥施工至悬臂长度为168m时,主梁高程的最大误差仅在绝对值4cm之内,而同时斜拉索索力误差在 $\pm 5\%$ 之内,线形的光滑程度明显比作者完成的另外几座斜拉桥要好得多^[6],原因是修正公式(6)增加考虑了已经完成梁段的施工误差这一因素的影响。

4. 结语

PC斜拉桥施工过程中线形和内力的控制是非常重要的。经过长期实践,本文作者建立了适合PC斜拉桥施工控制的自适应控制系统,分析了在控制问题中主要存在结构参数辨识和修正以及挂篮底模标高实时修正两个关键技术问题并提出了实用的解决方法,为解决PC斜拉桥的施工控制问题提供了一种新的思想和方法。现在已在微机上运用可视化技术初步实现了这一系统的运行,又经几座大跨PC斜拉桥施工控制的实际使用证明这一系统是有效的和实用的,为国内同行们所接受。

参考文献

- [1] Fritz Leonhardt. Die Spannbeton-Schräg-Kabel Bruken über den Columbia River Zwischen Pasco and Kennawich[M]. Etstaat Washington: Beton und Stahlelomban, Heft, 1980.
- [2] Tomaka H, Kamei M. Cable tension adjustment by structural system identification[A]. Nukulchai W Kanok. Int Conf on Cable stayed Bridge [C]. Bangkok: Asian Institute of Technology, 1987. 856-868.
- [3] 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.
- [4] 陈德伟, 郑信光, 项海帆. 混凝土斜拉桥的施工控制[J]. 土木工程学报, 1993, 26(1): 1-11.
- [5] 陈德伟, 项海帆. 施工控制在甬江斜拉桥施工中的应用[A]. 杨健. 1992年全国桥梁结构学会年会论文集[C]. 上海: 同济大学出版社, 1992. 559-568.
- [6] 陈德伟, 范立础, 项海帆. 独塔斜拉桥(广东三水大桥)的施工控制[J]. 同济大学学报, 1997, 25(1): 23-28.
- [7] 蔡四维. 结构力学的矩阵方法[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1975.
- [8] 陈德伟, 王小同, 陈文云, 等. 斜拉桥施工控制系统可视化软件[J]. 同济大学学报, 1998, 26(5): 537-541.