# 基于挠度理论的连续梁与悬索组合桥梁结构静力计算

崔明珠 殷永高 任伟新

(合肥工业大学, 安徽合肥 230009)

**摘要:** 连续梁与悬索组合桥梁结构是一种新型组合结构体系,其结构受力本质尚不明确,为研究其静力特性, 提出了一种基于挠度理论的解析计算方法。首先,假设恒载状态下主缆5段线形,确定恒载作用下主缆的线形公 式和主缆内力;其次,将活载作用下结构简化为外伸梁和悬吊钢箱梁部分,考虑之间约束力和弯矩的传递,分 别建立其挠度方程,以主缆变形为相容方程,迭代求解结构的内力和变形;最后,以一连续梁与悬索组合桥梁 结构的方案设计为例,分别采用所提挠度理论方法、弹性理论方法进行静力计算,并和有限元结果进行对比分 析。结果表明:弹性理论计算结果相比有限元结果误差较大,所提挠度理论方法得到的结构主要构件内力和变 形值与有限元的计算结果差异很小。所建立的连续梁与悬索组合桥梁结构静力解析计算方法模型简单、计算精 度较高,可为此类组合桥梁结构初步计算和设计提供参考。

关键词: 连续梁与悬索组合结构; 挠度理论; 主缆找形; 静力计算

中图分类号: U448.29 文献标识码: A 文章编号: 1000-131X(2020)12-0106-08

# Static calculation of continuous girder-suspension composite bridge based on deflection theory

Cui Mingzhu Yin Yonggao Ren Weixin

(Hefei University of Technology, Hefei 230009, China )

Abstract: The continuous girder-suspension bridge is a new-type composite bridge, but its mechanical behavior hasn't been understood very well. To study its static behavior under loading, an analytical calculation method based on the deflection theory was proposed. Firstly, the main cable was supposed to be the shape of 5 segments under the dead loads, and then the shape formula and tension of the main cable were analytically determined. Secondly, the structure under live loads was simplified into two parts, namely the overhanging girder and the suspended steel-box girder. By considering the transfers of constraining forces and moments between the two parts, the deflection equations of the two parts were derived, respectively. Based on the compatibility equation for the deformation of the main cable, the internal forces and deformations of the continuous girder-suspension composite bridge can be solved iteratively. Finally, with the design of a continuous girder-suspension composite bridge as an example, the static calculation were carried out based on the proposed deflection theory and the elastic theory, respectively. The results from two theoretical methods were compared with those from finite element method. It is concluded that the elastic theory may lead to relatively larger errors compared to the finite element calculation. Very small differences in the internal forces and displacements of the main members calculated by the proposed method and the finite element method can be observed. Hence, it can be concluded that the proposed analytical calculation method is simple and accurate, and can be referred to by the preliminary calculation and design of such a kind of continuous girder-suspension composite bridge.

Keywords: continuous girder-suspension composite bridge; deflection theory; shape-finding of the main cable; static calculation

E-mail: 1540927973@ qq. com

作者简介: 崔明珠, 博士研究生

基金项目:国家自然科学基金(51778204)

通讯作者:任伟新,博士,教授

收稿日期: 2020-03-13

# 引 言

连续梁与悬索组合桥梁结构体系是由连续梁或 连续刚构与跨中悬索部分组合而成的一种组合协作 体系桥梁,通过悬索将连续梁跨中部分悬吊起来, 实现大跨径,并可有效解决大跨径梁桥(连续梁、连 续刚构)跨中下挠严重的问题。同时,结合了连续梁 桥经济性能好、施工便捷的优点,又具备悬索桥造 型美观的特点,应用前景广阔<sup>[1]</sup>。连续梁与悬索组 合桥梁结构是一种新型桥梁结构体系,其在荷载作 用下的受力特征与分配本质尚不明确,理论计算方 法也尚未提出。

索具有典型的大位移非线性特征<sup>[2]</sup>,针对包含 索构件的桥梁结构,目前常用的计算方法有基于有 限元法的软件计算和基于经典理论的解析计算<sup>[3-8]</sup>。 有限元法具有计算精度高的优点,但通过有限元建 模计算并不能对结构受力特性和传力本质有深入的 了解,因此发展基于结构受力特征的理论解析法很 有必要,特别是在桥梁初步设计阶段。挠度理论是 悬索桥静力理论计算的经典理论之一<sup>[3]</sup>,其方程明 确表达了结构的力学特性,计算简单,计算成本低, 适用于中小跨径悬索桥的设计和大跨径悬索桥的初 步设计,并可与有限元计算结果相互验证,提高结 构设计的可靠性<sup>[7]</sup>。

本文基于挠度理论,提出了一种适用于连续梁 与悬索组合桥梁结构的理论解析计算方法。首先, 将此类组合桥梁结构主缆按受力形式不同进行分段 找形,再将活载作用下结构简化为混凝土外伸梁和 悬吊钢箱梁部分,分别建立其挠度方程,并结合主 缆相容方程,建立非线性方程组,并介绍了迭代求 解过程。最后以一连续梁与悬索组合桥梁结构方案 设计为算例,分别采用本文挠度理论方法和弹性理 论方法进行静力计算,并与有限元结果进行对比, 验证本文理论解析方法的可靠性。

#### 1 连续梁与悬索组合桥梁结构体系

桥梁依据其受力特点不同可分为三种基本体系: 梁桥体系、拱桥体系和索支撑桥体系。三种基本桥 梁体系中梁桥体系构造最简单,经济性能优异,施 工简便,在工程中应用最广。但目前已建的连续梁 或连续刚构梁桥,大部分跨径都小于 300m,跨度较 大的情况下,长期运营后跨中下挠和腹板开裂问题 较为严重。悬索桥体系是目前跨越能力最大的桥型, 多应用于 800m 以上跨径桥梁,在中小跨径内竞争优 势不明显。不同基本体系的桥梁进行组合与协作, 充分发挥各自特点,是解决基本桥型适用范围局限 性的有效举措<sup>[9]</sup>。因此,考虑采用缆索对大跨径梁 桥跨中进行悬吊后提出一种连续梁与悬索组合桥梁 结构体系,既解决了大跨径梁桥跨中下挠问题,又 拓宽了悬索桥在 800m 以下跨径的应用范围。

连续梁与悬索组合桥梁结构体系示意图如图1所 示。结构主梁由外伸混凝土梁和主跨中部钢箱梁组成, 混凝土梁和钢箱梁之间可采用铰接或全固结方式进行 连接。在混凝土梁墩顶部设置低高度桥塔,塔顶设置 鞍座,主缆将主跨中部等截面钢箱梁悬吊起来,实现 了大跨径主跨<sup>[1]</sup>。混凝土梁采用变截面形式,靠近桥 墩处的梁截面高度大,抗弯刚度大,可用来抵抗根部 较大的弯矩,充分发挥混凝土结构截面优势。主跨中 部钢箱梁采用与混凝土梁端部等高的等截面形式,可 以减轻结构自重,减少主缆用量。



图 I 建铁米可总系组口衍米组构体示示意图 Fig. 1 Schematic diagram of continuous girder-suspension composite system

### 2 连续梁与悬索组合桥结构简化计算方法

连续梁与悬索组合桥梁结构通过吊索将主跨跨

中钢箱梁悬吊起来,主缆主要承受钢箱梁部分传递的力,并将力传给锚碇;混凝土主梁主要承担自身范围内恒载及活载,并将力传给桥墩;因此,将此 类组合桥梁结构简化为混凝土外伸梁和悬吊钢箱梁 部分,如图2所示,简化模型与三跨静定梁相似。混凝土外伸梁与悬吊钢箱梁通过铰接或刚性连接。混凝土外伸梁一般采用变截面形式,为了简化计算,本文采用等截面形式,旨在说明此类组合结构的受力原理。

#### 2.1 基本假设

悬索桥静力计算的基本理论有弹性理论和挠度 理论,弹性理论未考虑结构体系变形对内力的影响, 假设活载对主缆形状没有改变,采用结构力学解超 静定结构的方法即可求解<sup>[10]</sup>。挠度理论考虑了缆索 的非线性变形,具有更高的计算精度。本文以挠度 理论为基础,推导适用于连续梁与悬索组合桥梁结 构的理论解析方法。

挠度理论推导过程基于 5 条基本假设<sup>[3,10]</sup>。但由 于连续梁与悬索组合结构的主缆并非全跨均布吊索, 进行力学分析计算时,假设与传统悬索桥有所不同: (1)跨中钢箱梁恒载全部由主缆承担,恒载作用下, 跨中钢箱梁部分无应力;(2)根据主缆受力方式不 同,按照锚固点,索鞍点和吊索最外侧悬吊点将主 缆分为  $y_1$ 、 $y_2$ 、 $y_3$ 、 $y_4$ 、 $y_5$ ,共 5 段,如图 2 所示, 其中  $y_1$ 、 $y_2$ 、 $y_4$ 、 $y_5$ 主要承受自身自重,为悬链线分 布, $y_3$ 主要承受钢箱梁传来的均布恒载,假设形状为 抛物线;(3)荷载作用下吊索仍保持竖直,且不可伸 长,故 $y_3$ 部分主缆变形与跨中钢箱梁部分变形相同。





#### 2.2 恒载作用下主缆找形

传统悬索桥恒载作用下主缆内力按照抛物线法 进行求解<sup>[3]</sup>。针对该组合结构首先假设跨中钢箱梁 为刚性支撑连续梁结构,计算吊索力*T<sub>h,i</sub>*,采用分段 悬链线法进行恒载作用下主缆的找形计算<sup>[11-13]</sup>,确 定恒载作用下主缆水平力*H<sub>g</sub>*和吊索悬吊点的高程*h<sub>i</sub>*, 如图 3 所示。然后根据关键节点坐标和基本假设 (2),确定主缆线形公式如式(1)和式(2)所示,为 活载作用下结构内力计算做准备。

y,段形状为抛物线型:

$$y = \frac{4f}{l^2} x(l-x) \tag{1}$$

式中:l、f分别为 $y_3$ 段两端点之间水平距离和 $y_3$ 段 矢高。

 $y_1$ 、 $y_2$ 、 $y_4$ 、 $y_5$ 段为悬链线分布:

 $\gamma = -$ 

$$-\operatorname{ch}(cx+c_1)+c_2$$

式中:  $c = \frac{q_e}{H_g}$ ,  $c_1 = \operatorname{sh}^{-1} \frac{hc}{2\operatorname{sh}(cl/2)} - \frac{cl}{2}$ ,  $c_2 = \frac{\operatorname{ch}c_1}{c}$ ;  $q_e$ 为 主缆自重;  $h \setminus l$ 分别为此段主缆两端点之间的竖向 和水平向距离。

#### 2.3 活载作用下结构静力计算

活载作用下,依据改进的挠度理论<sup>[3]</sup>,传统悬 索桥采用"代换梁法"简化<sup>[14]</sup>,将承受竖向外荷载 *p*的单跨悬索桥模型简化为受拉弯共同作用的简支梁 模型,主梁的挠度微分方程如式(3)所示:

$$EIw^{(4)} - Nw'' = q \tag{3}$$

式中:  $E \ I$  为主梁的弹性模量和抗弯惯性矩; w 为 主梁竖向位移;  $N = H_g + H_p$  为简化梁所受轴向拉力,  $H_g 和 H_p$ 分别为主缆在恒载和活载作用下的水平拉力;  $q = p + H_p y''$ 为简化梁所受竖向外荷载,  $-H_p y''$ 是活载作 用下主缆拉力引起的向上均布力。

主缆相容方程[3]如式(4)所示:



(2)



$$\frac{H_{\rm p}}{E_{\rm c}A_{\rm c}}L_{\rm c} + \alpha_{\rm T}TL_{\rm T} - \int_{l}w'y'dx = \delta_{\rm k} - \delta_{\rm t} \qquad (4)$$

式中:  $E_e$ 、 $A_e$ 为主缆的弹性模量和截面积,  $L_e = \int_0^l (1 + {y'}^2)^{3/2} dx$ ;  $\alpha_T$ 为主缆线膨胀系数; T为主缆温 度变化差;  $L_T = \int_0^l (1 + {y'}^2) dx$ ;  $\delta_k \ \delta_i$ 为主缆两支点 水平位移。

活载作用下,连续梁与悬索组合结构的受力示 意图如图4所示,参照三跨静定梁计算模型,混凝土 外伸梁可看作"基本部分",悬吊钢箱梁可看作"附 属部分",混凝土外伸梁按照结构力学知识求解,跨 中悬吊钢箱梁部分依据悬索桥改进的挠度理论<sup>[3]</sup>进 行求解,求解的关键问题有以下几部分:

(1) 钢混结合处弯矩和约束力的求解:按照三跨 静定梁的求解思路,先对"附属部分"悬吊钢箱梁 进行计算,如图4(c)所示,根据静力平衡原则,确 定弯矩和约束力之间关系式见式(5):

$$\sum F_{y} = F_{1} + F_{2} - H_{p} y_{3}'' l_{3} - F_{p(x)} = 0$$
(5a)  
$$\sum M(0) = F_{2} l_{3} - M_{1} + M_{2} - M_{p(x)}(0) - \frac{H_{p} y_{3}'' l_{3}^{2}}{2} = 0$$
(5b)

式中:  $F_{p(x)}$ 代表竖向活载 p(x)的合力; M(0)为钢箱 梁上荷载对 x = 0 处弯矩,  $M_{p(x)}(0)$ 即活载 p(x)对 x = 0处弯矩。

弯矩按照力法的思路进行求解:

$$\delta_{11}M_1 + \delta_{12}M_2 + \Delta_{1p} = 0 \tag{6a}$$

$$\delta_{21}M_1 + \delta_{22}M_2 + \Delta_{2p} = 0 \tag{6b}$$

式中: $\delta_{ij}$ 为*j*处单位弯矩在*i*处产生的转角; $\Delta_{ip}$ 为外 荷载作用下*i*处产生的转角。由于边跨为外伸梁,跨 中为拉弯简支梁,式(6)中系数与传统悬索桥的系 数<sup>[3,5]</sup>有所不同:

$$\delta_{11} = \frac{3l_2 + l_1}{3E_{\text{con}}I_{\text{con}}} + \frac{1}{N} \left(\frac{\beta}{\tanh\beta l_3} - \frac{1}{l_3}\right)$$
(7a)

$$\delta_{12} = \delta_{21} = \frac{1}{N} \left( \frac{1}{l_3} - \frac{\beta}{\sinh\beta l_3} \right)$$
(7b)

$$\delta_{22} = \frac{3l_4 + l_5}{3E_{\rm con}I_{\rm con}} + \frac{1}{N} \left(\frac{\beta}{\tanh\beta l_3} - \frac{1}{l_3}\right)$$
(7c)

式中:  $E_{con}I_{con}$ 为混凝土主梁抗弯刚度; N 含义同式 (3),为简化梁所受轴向拉力;  $\beta = \sqrt{\frac{N}{E_sI_s}}, E_sI_s$ 为钢 箱梁抗弯刚度。

联立式(5)和式(6),在确定  $H_p$ 的情况下,即可 计算钢混结合处弯矩  $M_1$ 、 $M_2$ 和约束力  $F_1$ 、 $F_2$ 。

(2) 外伸梁的挠度求解:如图 4(b) 所示,外伸

梁所受荷载主要包括活载、钢混结合处弯矩和约束力,荷载作用下外伸梁截面的弯矩为 *M*<sub>con</sub>,则根据梁的挠曲微分方程式(8)和边界条件,可确定外伸梁任 一截面的挠度 *w*<sub>con</sub>。其中两侧悬臂端挠度 *w*<sub>1</sub>和 *w*<sub>2</sub>,为钢箱梁两支座处位移。

$$E_{\rm con}I_{\rm con}w_{\rm con}'' = -M_{\rm con} \tag{8}$$

(3) 悬吊钢箱梁挠度求解:如图 4(c)所示,参 考悬索桥改进的挠度理论,将活载作用下悬吊钢箱 梁按"代换梁法"简化成拉弯简支梁。活载下挠度 按照式(3)查相关公式<sup>[3]</sup>确定,均布力- $H_{p}y_{3}^{"}$ 、活载  $p(x)、支座处弯矩 M_{1}和 M_{2}作用下钢箱梁的挠度分别$  $为<math>w_{Hp}$ 、 $w_{p}$ 、 $w_{M}$ ,再考虑钢箱梁两支座处的刚体位 移,则活载作用下钢箱梁的总挠度为:

$$w(x) = w_{H_{p}}(x) + w_{p}(x) + w_{M}(x) + \left(w_{1} + \frac{w_{2} - w_{1}}{l_{3}}x\right) (9)$$

(4) 主缆相容方程确定:组合结构的主缆相容方 程见式(10)。活载作用下主缆变形图如图 4(a)所 示,桥塔抗推刚度由位于塔顶的水平弹簧刚度  $k_{\rm T}$ 表 示,由于桥塔水平刚度的作用,活载作用下各跨的 主缆水平力有所不同,分别为  $H_{p1}$ 、 $H_{p2}$ 、 $H_{p3}$ ,由桥 塔两侧主缆水平力差值和桥塔刚度,可计算出主缆 在各 跨两端点水平距离的改变量。式(10b)中  $\int_{u} w'y' dx$ 可采用分部积分法进行求解,其中  $y_3$ 段主缆 变形按照假设(3)等于悬吊钢箱梁挠度,由于  $y_2$ 和  $y_4$ 部分无吊索传递活载,假设  $y_2$ 和  $y_4$ 段主缆方程为  $y_2'$ 和  $y_4'$ ,故  $y_2$ 和  $y_4$ 段主缆变形为: $w_{l2}(x) = y_2'(x) - y_2$ (x), $w_{l4}(x) = y_4'(x) - y_4(x)$ 。

$$F_{1}(H_{p1}, H_{p2}, H_{p3}) = \frac{H_{p1}}{E_{c}A_{c}}L_{c1} + \alpha_{T}TL_{T1} + \frac{H_{p1} - H_{p2}}{k_{T}} = 0$$
(10a)

$$F_{2}(H_{p1}, H_{p2}, H_{p3}) = \frac{H_{p2}}{E_{c}A_{ci}} \sum_{i=2, 3, 4} L_{ci} + \alpha_{T}T \sum_{i=2, 3, 4} L_{Ti}$$
$$- \sum_{i=2, 3, 4} \int_{li} w'y' dx + \frac{H_{p2} - H_{p1}}{k_{T}} + \frac{H_{p2} - H_{p3}}{k_{T}} = 0$$
(10b)
$$F_{3}(H_{p1}, H_{p2}, H_{p3}) = \frac{H_{p3}}{E_{c}A_{c}}L_{c5} + \alpha_{T}TL_{T5} + \frac{H_{p3} - H_{p2}}{k_{T}} = 0$$
(10c)

#### 2.4 求解过程

上述方程(5)~(10)为非线性方程组,且各方程 均和 $H_p$ 相关,因此假设 $H_p$ 初始值,利用 MATLAB 编 程进行迭代求解,具体过程如下:



Fig. 4 Mechanical and deformation diagram under live loads

(1)进行恒载作用下主缆找形计算,确定恒载作用下主缆水平力 H<sub>a</sub>和主缆线形 y<sub>i</sub>。

(2) 假设活载作用下主缆初始水平力 H<sub>p</sub>=[H<sub>p1</sub>,
 H<sub>p2</sub>, H<sub>p3</sub>], 按照式(5)、式(6)和式(7)求解钢混结
 合处弯矩 M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub>和约束力 F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>。

(3)将钢混结合处弯矩 M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub>和约束力 F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>
 代入式(8),计算外伸梁两侧悬臂端挠度 w<sub>1</sub>和 w<sub>2</sub>。

(4) 按照式(3)和式(9)求解悬吊钢箱梁挠度(即 y<sub>3</sub>段变形),依据悬链线方程确定 y<sub>2</sub>、y<sub>4</sub>段主缆变形。

(5) 将活载作用下主缆拉力 *H*<sub>p</sub>、主缆线形公式 *y<sub>i</sub>*和变形代入相容式(10)求解。

(6) 判断 *F*(*H*<sub>p</sub>) 是否满足精度要求,不满足时 采用牛顿-拉普森迭代法确定新的初始水平力。

 $H_{p,i+1} = H_{p,i} - J^{-1}F(H_{p,i})$  (11) 其中  $F(H_p) = [F_1(H_p), F_2(H_p), F_3(H_p)]$ 即方程组 (10), [J]为函数  $F(H_p)$ 的雅各比矩阵,矩阵中第 i行j列元素为 $\frac{\partial F_i}{\partial H_{si}}$ 。

(7) 重复步骤(2)~(6),直到 F(H<sub>p</sub>)满足精度
 为止,确定 H<sub>p</sub>的数值解,计算外伸梁和悬吊钢箱梁
 变形和内力。

#### 3 算 例

某大桥提出的方案设计为连续梁与悬索组合桥梁,桥型布置如图1所示。以此方案设计为背景,设计一跨径700m的连续梁与悬索组合桥梁,跨径布置

为(100+500+100)m, 垂跨比为 1/8, 其中主跨跨中 等截面钢箱梁长 390m, 主跨一侧混凝土梁长 55m, 混凝土主梁为等截面,吊索间距 6m。表 1 为结构各 构件的材料和几何特性。分别采用本文所提挠度理 论方法和悬索桥弹性理论方法<sup>[10]</sup>进行结构静力计算, 同时与考虑几何非线性的有限元模型计算结果进行 对比分析,验证本文计算方法的可靠性。

表 1 结构的材料和几何特性

#### Table 1 Material and geometric characteristics of structure

部件	E(GPa)	$A(m^2)$	$I(m^4)$	$D(\mathrm{kN/m^3})$
主缆	195.0	0. 192	—	78.5
吊索	195.0	0.002	—	78.5
钢箱梁	206.0	1.667	2.392	78.5
混凝土梁	34.5	55.018	226.464	25.0
桥塔	34.5	28.566	95.927	25.0

#### 3.1 恒载作用下找形计算

恒载作用下按照 2.2 节对主缆进行找形计算,计 算主缆拉力水平力为 107980kN,有限元模型主缆拉 力水平力为 106099kN,相对误差为 1.74%。绘出主 缆的线形图如图 5 所示,对比利用有限元模型进行成 桥计算得到的各节点高程,吻合良好,最大误差为 最外侧吊索的高程,误差为 2.39%,说明恒载作用 下假设主缆的线形分布合理。

#### 3.2 活载作用下静力计算

考虑 4 种活载工况, LC1~LC3 如图 6 所示, LC4 为施加于主缆的温度荷载 Δ*T*=-25℃。4 种工况下, 3

种方法得到的主梁挠度和弯矩曲线如图 7 和图 8 所示,表2列出了结构主要构件的内力和变形值。

弯矩值,这与连续梁桥受力特性类似,因此外伸混 凝土梁采用变截面形式更能发挥其力学优势。



Fig. 5 Shape of the main cable



由图 7 和图 8 可以看出,弹性理论得到跨中梁挠 度和弯矩均明显大于有限元结果。对比表 2 中弹性理 论和有限元计算的结构主要构件的内力和变形值, 除 LC4 工况下主缆拉力,弹性理论计算的主缆拉力 水平力、主梁挠度和跨中弯矩最大值普遍大于有限 元计算结果,且相对误差较大。这是由于弹性理论 忽略了悬索结构主缆重力刚度和结构的非线性大位 移<sup>[10]</sup>,导致内力计算偏大。而边跨梁挠度和弯矩与 有限元结果较吻合,说明边跨外伸梁采用弹性理论 可以满足计算精度要求。

由图 7 和图 8 结果表明,本文提出的挠度理论方 法和有限元方法得到的主梁挠度和弯矩曲线重合度 很高,表 2 中结构主要构件的内力和变形值相对误差 较小,均在 10%以内。相比于恒载下主缆拉力,活 载下主缆拉力较小,其中活载下主缆拉力最大的 LC1 工况,活载主缆拉力占恒活载共同作用下主缆拉力 总和的 10.28%,这与悬索桥主缆轴力主要由恒载产 生的特性一致。4 种工况下,桥塔处都产生了较大的



Fig. 7 Deflection of the main girder under the live loads

main



图 8 活载作用下主梁弯矩



表	<b>2</b>	活载	下结构	主要	构件[	内力和变	形	直
Table 2	Int	ernal	forces	and	displa	cements	of	the

members under the live loads

构件内力	工况	弹性理论	挠度理论	有限元计算
	LC1	13174	12366	12014
吹中子燃拾去 <b>火</b> 亚去(1M)	LC2	11384	10887	10331
跨中主境拉刀水半刀(kN)	LC3	5724	4798	4606
	LC4	1545	1917	1973
_	LC1	0. 748	0. 540	0. 575
<b></b> · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	LC2	0.607	0.405	0. 422
土采渷及取入阻(m)	LC3	0.515	0.464	0.463
	LC4	-0. 501	-0.340	-0.355
_	LC1	50335	32605	35495
<b>ナ</b> 洌亦に見十店(1N)	LC2	27367	15324	16201
土栄弓起取入徂(KN・m)	LC3	106091	58884	64198
	LC4	74933	73827	76447
_	LC1	-117848	-126213	-127011
<b>→</b> 洌亦に具また(1N)	LC2	-90671	-90062	-90797
土朱弓起取小沮(KN・m)	LC3	-235898	-240883	-230171
	LC4	-22617	-13001	-13777

## 表 3 增大活载下结构主要构件内力和变形值 Table 3 Internal forces and displacements of the main members under the increased live loads

构件内力	工况	弹性理论	挠度理论	有限元计算
	LC1	13174	12366	12014
跨中主缆拉力水平力(kN)	LC1×5	65871	60260	57181
	LC1×10	131740	117340	109924
-	LC1	0. 748	0. 540	0. 575
主梁挠度最大值(m)	LC1×5	3.740	2.458	2.616
	LC1×10	7.480	4. 564	4.669
	LC1	50335	32605	35495
主梁弯矩最大值(kN・m)	LC1×5	251673	155997	161062
	LC1×10	503346	283394	276611
	LC1	-117848	-126213	-127011
主梁弯矩最小值(kN・m)	LC1×5	-589241	-659949	-685889
	LC1×10	-1178481	-1375150	-1480088

为分析连续梁与悬索组合桥梁结构的几何非线 性行为,将LC1工况荷载增大到5倍、10倍,3种 方法计算的结构主要构件内力和变形值如表3所示。 其中弹性理论计算的结构内力和变形值与荷载倍数 同比例增加,随着荷载倍数增大,弹性理论结果与 有限元结果之间的相对误差也越来越大。而本文挠 度理论考虑了悬索的非线性大位移影响,随着荷载增 大,计算结果与有限元结果吻合度始终较好,相对 误差均在10%以内,仍能保持其计算的可靠性。

#### 4 结 论

(1)依据连续梁与悬索组合桥梁结构受力特性, 将结构简化为外伸梁和悬吊钢箱梁部分,利用力学 原理和改进的挠度理论,得到了连续梁与悬索组合 桥梁挠度和内力的解析解,该模型简单,计算难度 较小,方便对此类组合结构力学特性的把握。

(2) 恒载作用下假设主缆的5段线形分布是合理的,与有限元计算得到线形吻合较好。

(3)活载作用下基于本文所提挠度理论方法得到 结构主要构件内力与有限元结果吻合良好,在增倍 荷载作用下,本文方法仍然能保持较高的计算精度, 适用于中等跨径连续梁与悬索组合桥梁结构的静力 计算,可满足此类组合桥梁结构的快速求解需求, 直观把握其受力和传力性能,可为此类新型组合桥 梁结构的初步设计和应用提供参考。

#### 参考文献

- [1] 安徽省交通控股集团有限公司.一种变截面梁与悬索组 合桥梁结构体系:中国,201710273900.7[P].[2018-02-16]
- [2] 项海帆.高等桥梁结构理论[M].北京:人民交通出版 社,2001
- [3] Wollmann G P. Preliminary analysis of suspension bridges
   [J].Journal of Bridge Engineering, 2001, 6(4): 227-233
- [4] Del Arco D C, Aparicio A C.Preliminary static analysis of suspension bridges [J]. Engineering Structures, 2001, 23 (9): 1096-1103
- [5] Jung M R, Shin S U, Attard M M, et al.Deflection theory for self-anchored suspension bridges under live load [J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20(7): 04014093
- [6] 沈锐利,王志诚.自锚式悬索桥力学特性挠度理论研究
   [J].公路交通科技,2008,25(4):94-98,102 (Shen Ruili, Wang Zhicheng. Study on mechanical property of self-anchored suspension bridge based upon deflection

theory[J].Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (4): 94-98, 102 (in Chinese))

- [7] 曹鸿猷,陈志军,吴巧云,等.基于单索理论的多塔悬 索桥简化计算模型[J].中国公路学报,2016,29(4): 77-84 (Cao Hongyou, Chen Zhijun, Wu Qiaoyun, et al. Simplified calculation model for multi-span suspension bridges based on single cable theory[J].China Journal of Highway and Transport, 2016, 29 (4): 77-84 (in Chinese))
- [8] 沈锐利,张兴标,彭丹.多塔悬索桥结构变形的实用计算方法[J].中国公路学报,2016,29(6):207-213 (Shen Ruili, Zhang Xingbiao, PengDan. Practical calculation method for structural deformation of multi-span suspension bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(6):207-213 (in Chinese))
- [9] 肖汝诚.桥梁结构体系[M].北京:人民交通出版社, 2013 (Xiao Rucheng. Bridge structural systems [M]. Beijing: China Communications Press, 2013 (in Chinese))
- [10] 雷俊卿,郑明珠,徐恭义,等.悬索桥设计[M].北京: 人民交通出版社,2002(Lei Junqing, Zheng Mingzhu, Xu Gongyi.Suspension bridge design[M].Beijing: China Communications Press, 2002 (in Chinese))
- [11] 唐茂林,强士中,沈锐利.悬索桥成桥主缆线形计算的 分段悬链线法[J].铁道学报,2003,25(1):87-91 (Tang Maolin, Qiang Shizhong, Shen Ruili. Segmental catenary method of calculating the cable curve of suspension bridge [J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25(1):87-91 (in Chinese))
- [12] Kim H K, Lee M J, Chang S P.Non-linear shape-finding analysis of a self-anchored suspension bridge [ J ]. Engineering Structures, 2002, 24(12): 1547-1559
- [13] 王邵锐,周志祥,高燕梅,等.考虑缆-梁联合作用的自 锚式悬索桥恒载状态计算方法研究[J].土木工程学报, 2015,48(8):70-76 (Wang Shaorui, Zhou Zhixiang, Gao Yanmei, et al.Study on the calculation method of the dead load state for the self-anchored suspension bridge considering the joint action of cable-stiffening girder[J]. China Civil Engineering Journal, 2015,48(8):70-76 (in Chinese))
- [14] 李国豪.桥梁与结构理论研究[M].上海:上海科学技术 文献出版社,1983

- 殷永高(1960—),男,硕士,教授级高级工程师。主要从事桥梁和基础施工技术的研究。
- 任伟新(1960—),男,博士,教授。主要从事桥梁结构稳定与振动的研究。

**崔明珠**(1992—),女,博士研究生。主要从事悬索桥非线性行为分析的研究。