文章编号：0253-374X(2025)11-1664-08

DOI：10.11908/j.issn.0253-374x.24198

公路混合梁斜拉桥主梁钢混交界面合理位置分析

林志平[1]，张翼曦[2]，苏庆田[2]

（1. 福建省高速公路集团有限公司，福建 福州 350001；2. 同济大学 土木工程学院，上海 200092）

摘要：混合梁斜拉桥因其主梁充分发挥钢梁和混凝土梁各自的优势而应用广泛。主梁钢混交界面在主梁上位置的选取对斜拉桥的受力状态有重要影响，如何快速选取钢混交界面的位置成为斜拉桥方案设计中一个重要技术难点。基于斜拉索索面膜化的假定，推导了混合梁斜拉桥桥塔水平力之和与塔高、边中跨长度、混凝土和钢主梁恒载活载集度的关系，从斜拉桥合理成桥状态出发，由桥塔水平受力平衡得出混合梁斜拉桥的合理主梁钢混交界面位置的计算方法。并参考两篇混合梁斜拉桥文献的有限元计算分析结果验证了本方法的可行性和适用性。

关键词：斜拉桥；钢混混合梁；交界面位置；主梁轴力；理想成桥状态

中图分类号：U448.27；TU3　　**文献标志码**：A

Analysis of Rational Position of Steel-concrete Interface in Main Girder of Highway Hybrid Girder Cable-stayed Bridge

LIN Zhiping[1], *ZHANG Yixi*[2], *SU Qingtian*[2]

(1. Fujian Provincial Expressway Group Co., Ltd., Fuzhou 350001, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The hybrid beam cable-stayed bridge is widely used for fully utilizing the advantages of steel girders and concrete girders. The range of the interface position between the steel girder and the concrete girder significantly affects the internal force distribution of the cable-stayed bridge. Determining this interface location expeditiously remains a crucial technical challenge to bridge conceptual design. Hypothesizing the dependent cables as a membrane model, the influence factors of the sum of horizontal component forces on the bridge tower are investigated, such as tower height, span length, live load and constant load of concrete and steel girders. Based on the rational dead load state of cable-stayed bridge and the horizontal force balance of bridge tower, the calculation methods for determining the optimal range of the interface position between the steel girder and the concrete girder are derived. The feasibility and applicability of the methods are confirmed by the finite element analysis results of hybrid girder cable-stayed bridges in two references.

Keywords: cable-stayed bridge; steel-concrete hybrid girder; interface position; axial force of the girder; rational dead load state

斜拉桥是由受拉索、承压桥塔和受压弯作用的主梁组成的桥梁结构，拉索支撑主梁而有效降低主梁梁高，减轻结构自重，降低结构内部弯矩。斜拉桥结构因其良好跨越性能而应用于大跨度桥梁中，如：俄罗斯岛大桥[1]、苏通大桥[2]、多多罗大桥[3]。常规跨度斜拉桥边中跨比区间为0.3～0.5，且多采用混凝土主梁或钢主梁的单一材料主梁形式。采用混凝土主梁的斜拉桥能获得较好的主梁刚度和材料经济性，但混凝土结构自重大且节段施工复杂，而限制这类斜拉桥跨径发展。采用钢主梁的斜拉桥能有效减轻主梁材料自重以获得更大的跨越能力，但钢结构承压易失稳且材料昂贵。故采用单一材料主梁的大跨度斜拉桥难以平衡多项力学性能和经济指标。混合梁斜拉桥采用了钢梁与混凝土梁混合的主梁结构形式，可以充分发挥不同材料的优势从而降低桥梁的造价[4]。

混合梁斜拉桥通常在主梁的中跨位置采用钢梁，边跨位置采用混凝土梁，通过中跨采用钢梁减重从而实现更大桥梁跨径；通过边跨采用混凝土梁从而增强结构整体刚度，并能有效平衡主跨自重形成

收稿日期：2024-06-11
基金项目：福建省交通运输科技项目(202126)
第一作者：林志平，正高级工程师，主要从事高速公路及桥梁建设管理工作。E-mail：648599957@qq.com
通信作者：张翼曦，博士生，主要研究方向为钢桥与组合桥梁。E-mail：tjzhangyx@tongji.edu.cn

论文拓展介绍

平衡体系。这样的结构充分发挥钢梁和混凝土梁的优势，并且能采用比常规斜拉桥更小的边中跨比值，更能满足复杂的工程条件限制。混合梁斜拉桥结构也因其更优异的综合性能而广泛应用[5]。

设置主梁钢混交界面（以下简称为交界面）是混合梁斜拉桥结构区别于一般斜拉桥结构的显著特点。交界面位置的选取是这类桥型在桥梁初步设计时需面对的一个重要问题。既有文献对相关问题展开了探讨。文献[6-9]以有限元变参分析方法，通过评判全桥内力应力分布状态或弯曲应变能大小，对主梁钢混交界面位置的合理性进行了分析，但该方法依赖模型计算结果而不便于在桥梁初设阶段快速确定交界面位置。文献[10-11]从主梁重力平衡条件出发，得到了与钢梁和混凝土梁每延米重量之比、边跨内钢梁和混凝土梁长度之比有关的混合梁斜拉桥合理边中跨比计算方法，对混合梁斜拉桥主梁交界面位置的合理选择有一定的参考意义，但也存在尚未考虑中跨布置方案的问题，且方法不便于直接用于确定交界面的位置。因此，如何在桥梁初设阶段快速确定混合梁斜拉桥主梁钢混交界面的合理位置仍然需要进一步研究。

本文首先基于斜拉索索面膜化的假定，推导了混合梁斜拉桥桥塔水平力之和与塔高、边中跨长度、混凝土和钢主梁恒载活载集度的关系。从斜拉桥合理成桥状态出发，由桥塔水平受力平衡得出混合梁斜拉桥的合理交界面位置的计算方法。并结合两座混合梁斜拉桥的有限元计算分析结果，论证了方法的可行性和适用性，为指导混合梁斜拉桥初步设计阶段的主梁设计和跨径布置参数选取提供了一种便捷方法。

1 主梁合理交界面位置求解

本文从斜拉桥合理成桥状态出发推导主梁合理交界面位置。斜拉桥理想成桥状态是指斜拉桥主梁恒载弯矩接近刚性支承连续梁的弯矩，索塔恒载下接近于轴向受压状态，恒载弯矩接近于零[12-13]。显而易见，索塔在两侧斜拉索索力作用下处于水平受力平衡状态是使得斜拉桥的主梁和桥塔处于理想成桥状态的必要条件，故本文基于桥塔两侧受水平力平衡进行如下推导。

1.1　桥塔水平受力求解

为了便于求解而进行以下简化：将空间密索支撑体系的混合梁斜拉桥结构简化为由连续索膜支撑的梁、索膜、塔三部分组成的竖直平面受力结构；假定拉索在主梁和主塔上等索距均匀布置；拉索只承受索距范围内的荷载。简化恒、活载为均布荷载；忽略主塔的顺桥向抗推刚度、斜拉索的自重、主梁的抗弯刚度和主梁纵坡，得到在主梁受均布竖向荷载下塔梁的单侧受力分析如图1所示。可将桥塔单侧受水平力之和的求解转化为塔根处主梁轴力N的求解。

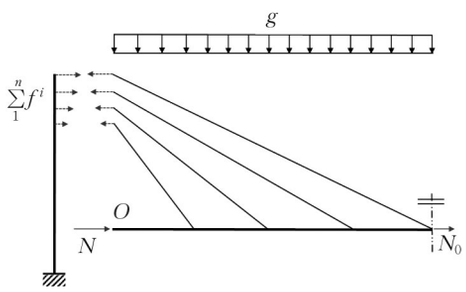


图1　塔梁单侧受力分析图

Fig.1　Force diagram of half-side bridge tower and girder

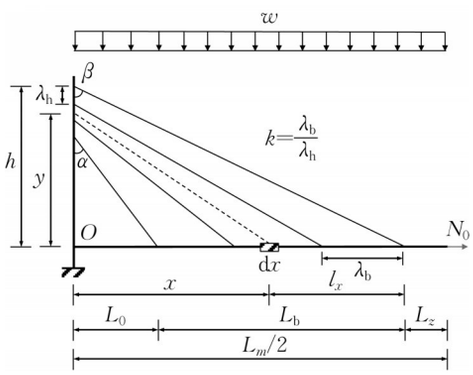
以斜拉桥主跨为例的计算如图2所示。图中，h为主塔有效高度；L_m为主梁中跨跨径；L_b、L_0、L_z分别为主梁半跨有索区长度、塔根无索区半长度和跨中无索区半长度，则有$L_m/2=L_0+L_b+L_h$；w为均布荷载集度；α、β分别为最靠近主塔的拉索与主塔的夹角、最靠近跨中的拉索与主塔的夹角；x和y分别为主梁微元段在主梁的位置、微元段对应虚拟拉索在桥塔的锚固高度。$T(x)$为有索区x位置处的索力；$N(x)$为有索区x位置处的轴力；N_0为跨中无索区主梁轴向拉力大小。

定义λ_b和λ_h分别为主梁索距和主塔索距，定义k为梁塔索距比例即$k=\lambda_b/\lambda_h$。同时定义参数l_x为被积分梁长即$l_x=L_0+L_b-x$。此时参数y可以表达为$y=h-l_x/k$。

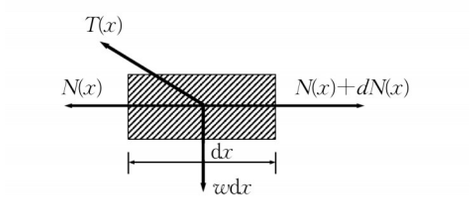
假定塔根无索区荷载全部由最接近塔根位置的拉索承担；假定跨中无索区荷载全部由最接近跨中的拉索承担，由图2可以分析得到任意$x=x_0$位置的主梁轴力$N(x_0)$计算公式如式(1)所示（取轴向受压为正值）。

$$N(x_0)=\begin{cases}N(L_0)+wL_0\tan\alpha, & 0\leqslant x_0\leqslant L_0\\ \int_{x_0}^{L_b+L_0}\mathrm{d}N(x)+wL_z\tan\beta-N_0, & L_0\leqslant x_0\leqslant L_b+L_0\\ -N_0, & L_b+L_0<x_0\leqslant L_m/2\end{cases}\tag{1}$$

由微元体受力分析和几何关系可得



a 主跨计算示意图



b 主梁微元段示意图

图2 考虑无索区主梁轴力计算简图

Fig.2 Simplified sketches of the axial force in girders considering no-cable-stayed segment

$$\mathrm{d}N(x)=\frac{x}{y}w\mathrm{d}x=\frac{kx}{kh-(L_0+L_b-x)}w\mathrm{d}x \quad (2)$$

代入求解可得$x=x_0$时,式(1)中积分部分的关系式如下:

$$\int_{x_0}^{L_b+L_0}\mathrm{d}N(x)=wk\int_{x_0}^{L_0+L_b}\frac{x}{x+kh-L_0-L_b}\mathrm{d}x$$

$$wk\left[l_{x_0}+(kh-L_0-L_b)\ln\left(1-\frac{l_{x_0}}{kh}\right)\right] \quad (3)$$

其中$l_{x_0}=L_0+L_b-x_0$

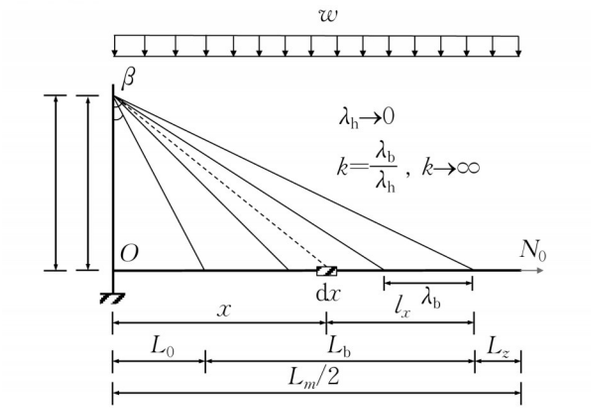
综上可得基于索膜法求解的斜拉桥主梁轴力表达式$N(x)$为(取轴向受压为正值)

$$N(x_0)=\begin{cases}wL_0\tan\alpha+N(L_0), & 0\leqslant x_0<L_0\\ wk\left[l_{x_0}+(kh-L_0-L_b)\ln\left(1-\dfrac{l_{x_0}}{kh}\right)\right]+ & \\ \quad wL_z\tan\beta-N_0, & L_0\leqslant x_0\leqslant L_b+L_0\\ -N_0, & L_b+L_0<x_0\leqslant L_m/2\end{cases} \quad (4)$$

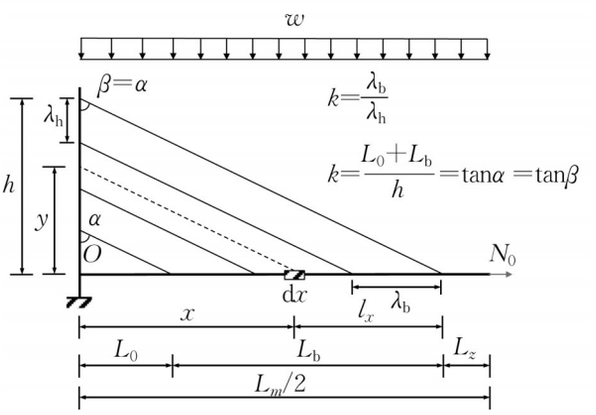
其中, $l_{x_0}=L_0+L_b-x_0$

该公式考虑了近塔区和跨中主梁无索区的长度,且对于不同的拉索布置形式(辐射式、竖琴式和扇形体系)具有普适性。以下给出辐射式、竖琴式布索以及忽略无索区长度的特殊情况的分析。

(1)当斜拉索辐射式布置,各拉索锚固于主塔同一位置如图3a所示。



a 辐射式布置计算简图



b 竖琴式布置计算简图

图3 特殊布置形式主梁轴力计算简图

Fig.3 Simplified sketches of the axial force in girders with a special form of cable layout

可知:$\lambda_h\to 0$,则$l_x/(kh)\to 0$。考虑二阶泰勒展开公式可得

$$\ln\left(1-\frac{l_x}{kh}\right)\approx-\left[\frac{l_x}{kh}+\frac{l_x^2}{2k^2h^2}\right]=$$

$$\frac{-l_x(l_x+2kh)}{2k^2h^2} \quad (5)$$

则当$L_0\leqslant x\leqslant L_b+L_0$时,有

$$N(x)=wk\left[l_x-(kh-L_0-L_b)\frac{l_x(l_x+2kh)}{2k^2h^2}\right]+$$

$$wL_z\tan\beta-N_0=$$

$$\frac{wl_x}{2h^2}\frac{-(l_x-2L_0-2L_b)kh+l_x(L_0+L_b)}{k}+$$

$$wL_z\tan\beta-N_0$$

$$\xrightarrow{k\to\infty}\frac{wl_x}{2h}(-l_x+2L_0+2L_b)+wL_z\tan\beta-N_0 \quad (6)$$

得到辐射状拉索布置下斜拉桥主梁轴力表达式$N_1(x)$为（轴向受压为正）

$$N_1(x)=\begin{cases} wL_0\tan\alpha+N(L_0), & 0\leqslant x\leqslant L_0 \\ \dfrac{wl_x}{2h}(-l_x+2L_0+2L_b)+ & \\ \quad wL_z\tan\beta-N_0, & L_0\leqslant x\leqslant L_b+L_0 \\ -N_0, & L_b+L_0<x\leqslant L_m/2 \end{cases} \tag{7}$$

其中$l_{x_0}=L_0+L_b-x_0$。

（2）当斜拉索竖琴状布置，各拉索平行布置如图3b所示，可知：$k=\lambda_b/\lambda_h=(L_0+L_b)/h=\tan\alpha=\tan\beta$。

得到竖琴状拉索布置下斜拉桥主梁轴力表达式$N_2(x)$为（轴向受压为正）

$$N_2(x)=\begin{cases} w\dfrac{L_0+L_b}{h}\cdot\dfrac{L_m}{2}-N_0, & 0\leqslant x<L_0 \\ w\dfrac{L_0+L_b}{h}\left(\dfrac{L_m}{2}-x\right)-N_0, & L_0\leqslant x\leqslant L_b+L_0 \\ -N_0, & L_b+L_0<x\leqslant L_m/2 \end{cases} \tag{8}$$

（3）当忽略塔根无索区长度和跨中无索区长度，即$L_0=0$，$L_z=0$，$N_0=0$，此时有$L_b=L_m/2$，$l_x=L_m/2-x$。

此时基于索膜法求解的斜拉桥主梁轴力表达式$N(x)$为（取轴向受压为正值）

$$N(x)=wk\left[L_m/2-x+\left(kh-\frac{L_m}{2}\right)\ln\left(1-\frac{L_m/2-x}{kh}\right)\right] \tag{9}$$

辐射状拉索布置下斜拉桥主梁轴力计算表达式$N_1(x)$和竖琴状拉索布置下斜拉桥主梁轴力计算表达式$N_2(x)$分别为

$$N_1(x)=\frac{w}{2h}\left(\frac{L_m^2}{4}-x^2\right) \tag{10}$$

$$N_2(x)=\frac{wL_m}{2h}\left(\frac{L_m}{2}-x\right) \tag{11}$$

1.2　主梁交界面位置合理区间分析

以上分析是基于斜拉桥在均布荷载下得到的结论。对于混合梁斜拉桥，其钢混主梁恒载集度不一致，可以通过叠加原理将其等效为分段均布荷载进行计算。

混合梁斜拉桥在初步设计阶段往往已知结构体系的参数较少，将扇形布置简化为辐射状拉索布置或竖琴状拉索布置分析。当混合梁斜拉桥无索区长度相对跨径较小时，可忽略无索区长度，认为无索区长度同样受到索膜结构支撑而进行等效。定义$F(w,L)$为单侧跨径为L的主梁在满布均布荷载w的作用下索塔所受索力的水平分力之和。此时对于辐射状拉索布置和竖琴状拉索布置分别有索塔所受索力的水平分力之和如下

$$F_1(w,L)=N_1(x)_{x=0,\frac{L_m}{2}=L}=\frac{w}{2h}L^2 \tag{12}$$

$$F_2(w,L)=N_2(x)_{x=0,\frac{L_m}{2}=L}=\frac{w}{h}L^2 \tag{13}$$

根据理想成桥状态下桥塔水平受力平衡要求，考虑辅助墩不提供多余支撑且不出现负反力，可以得到主梁钢混交界面位置取值的两个临界条件。临界条件一为边跨恒载与中跨恒载在桥塔处产生的水平力平衡。临界条件二为边跨无活载而中跨满布活载时，边跨与中跨在桥塔处产生的水平力平衡。

混合梁斜拉桥主梁钢混交界面既可以设置在边跨内也可以设置于中跨内。在恒活载布载下混合梁斜拉桥计算如图4所示。图中，参数L_a、L_m分别为混合梁斜拉桥边跨跨径和中跨跨径。g_a和g_m分别为混凝土梁和钢梁包括二期恒载在内的主梁恒载每延米集度；p为中跨满布活载的每延米集度。图中参数s为伸入长度，表示主梁钢混结合处距离塔梁交界处O点的距离。

如图4a所示，对于交界面设于边跨的情况由两个临界条件可分别得

$$F(g_a,L_a)-F(g_a,s)+F(g_m,s)\geqslant F\left(g_m,\frac{L_m}{2}\right) \tag{14}$$

$$F(g_a,L_a)-F(g_a,s)+F(g_m,s)\leqslant F\left(g_m,\frac{L_m}{2}\right)+F\left(p,\frac{L_m}{2}\right) \tag{15}$$

如图4b所示，对于交界面设于中跨的情况由两个临界条件可分别得

$$F(g_a,L_a)\geqslant F\left(g_m,\frac{L_m}{2}\right)-F(g_m,s)+F(g_a,s) \tag{16}$$

$$F(g_a,L_a)\leqslant F\left(g_m,\frac{L_m}{2}\right)-F(g_m,s)+F(g_a,s)+F\left(p,\frac{L_m}{2}\right) \tag{17}$$

定义钢梁混凝土梁恒载集度比为$\lambda_{m/a}=g_m/g_a$，活恒载集度比为$\lambda_{p/m}=p/g_m$，边中跨比为$r_a=L_a/L_m$。定义伸入长度比r_s为伸入长度与中跨长度的比值，即$r_s=s/L_m$。则使用r_s参数可以同时

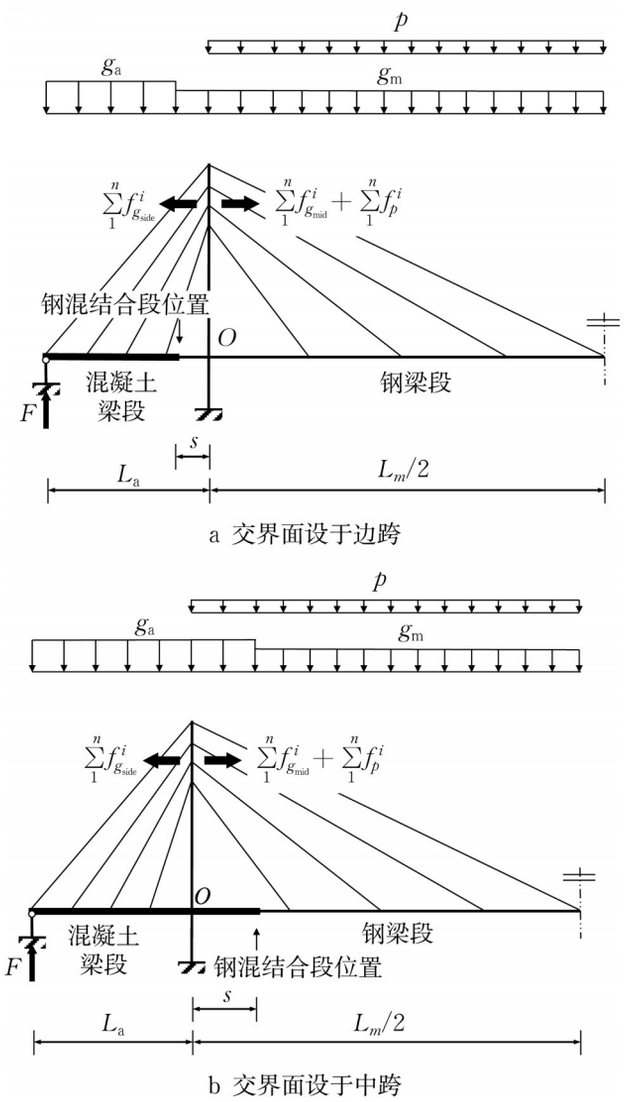


图4 混合梁斜拉桥计算简图(半结构)

Fig.4 Simplified sketches of half span for hybrid girder cable-stayed bridge

表示交界面设于边跨和中跨两种情况下主梁钢混交界面的位置。将式(12)或(13)代入式(14)～(17),对于交界面设于边跨和中跨两种情况,均可以推导得到相同临界条件计算公式如下:

$$r_a^2-(1-\lambda_{m/a})r_s^2\geqslant\frac{\lambda_{m/a}}{4} \tag{18}$$

$$r_a^2-(1-\lambda_{m/a})r_s^2\leqslant\frac{\lambda_{m/a}(1+\lambda_{p/m})}{4} \tag{19}$$

由此可得,基于混合梁斜拉桥理想成桥状态假设,伸入长度比r_s的合理区间由式(20)确定。由公式可知,混合梁斜拉桥合理主梁钢混交界面位置r_s的取值与桥梁边中跨比r_a、钢混梁重比$\lambda_{m/a}$、活恒载比$\lambda_{p/m}$有关。

$$\sqrt{\frac{r_a^2-\frac{1}{4}\lambda_{m/a}(1+\lambda_{p/m})}{1-\lambda_{m/a}}}\leqslant r_s\leqslant\sqrt{\frac{r_a^2-\frac{1}{4}\lambda_{m/a}}{1-\lambda_{m/a}}} \tag{20}$$

2 主梁合理布跨方法分析

上文基于钢混主梁交界面设置在边跨和中跨两种情况,分别得到了表达式完全一致的混合梁斜拉桥交界面位置参数r_s的合理区间。说明对于满足理想成桥状态的混合梁斜拉桥,不论钢混主梁交界面设置在边跨或者设置在中跨,交界面参数取值均满足相同的控制条件。采用相同的伸入长度比参数r_s,交界面位于边跨或者中跨得到的是相同的混合梁斜拉桥平衡状态。

依据该公式可以在混合梁斜拉桥初步设计阶段合理布置桥梁跨径。对于给定的恒载活载条件,依据公式即可得到理想成桥状态的混合梁斜拉桥伸入长度比r_s与边中跨比r_a之间的约束关系。确定了边中跨比r_a取值,则可以确定钢混交界面位置的选取的上下限区间。当参数r_s取值高于式的上限时,则表明桥梁边跨较轻中跨较重,在恒载情况下边跨出现负反力,辅助墩需要设置拉力墩。当参数r_s取值低于式的下限时,则表示边跨偏重,在中跨满布活载时边跨仍有较大的正反力。对于该种跨径布置,如果需要使桥塔获得较理想的恒载弯矩,则边跨在多余的重力作用下将产生较大的恒载弯矩。

同时为了使得式(20)的上限取值存在,则边中跨比r_a存在最小取值。由上限取值的根号内值大于零可知,边中跨比r_a需要满足下式

$$r_a\geqslant\sqrt{\frac{\lambda_{m/a}}{4}} \tag{21}$$

式(21)表明小边中跨比混合梁斜拉桥的边中跨比取值存在最小取值。边中跨比r_a的最小值与钢混梁重比$\lambda_{m/a}$正相关。在桥梁初设阶段给定钢梁和混凝土梁截面特征即可确定钢混梁重比,从而得到小边中跨比最小取值。如果小边中跨比取值小于该值,则不论主梁钢混交界面的位置如何布置,均无法使混合梁斜拉桥取得理想成桥状态。故在确定桥梁初始设计参数时应该避免边中跨比取值小于该限制值,可以通过适当减小钢主梁截面、增大混凝土主梁截面从而降低钢混梁重比进行调整。

由此可以总结主梁合理布跨确定方法。首先在桥梁初步设计阶段,确定钢梁和混凝土梁的主梁截面、材料后,即确定钢混梁重比$\lambda_{m/a}$和活恒载比$\lambda_{p/m}$

的取值。之后参照本文式(21)可以得到混合梁斜拉桥的边中跨比最小取值。选取合适的边中跨比r_a取值后，参照本文式(20)可以计算得到主梁钢混交界面取值参数r_s的临界取值上下限，即得到合理的主梁钢混交界面布置区间。

此外也可以选取使用绘图法确定钢混交界面合理布置区间。在r_s-r_s图中绘制式(22)和式(23)两条曲线，两曲线与$r_s=0$围成的区域即为该建设条件下主梁钢混交界面位置选取的合理区间。

$$r_s=\sqrt{\frac{r_a^2-\frac{1}{4}\lambda_{m/a}(1+\lambda_{p/m})}{1-\lambda_{m/a}}} \tag{22}$$

$$r_s=\sqrt{\frac{r_a^2-\frac{1}{4}\lambda_{m/a}}{1-\lambda_{m/a}}} \tag{23}$$

取活恒载比为0.25，对常见的钢梁与混凝土梁总恒载之比$\lambda_{m/a}$的取值1/6、1/5、1/4、1/3进行了计算。考虑混合梁斜拉桥边中跨比取值不超过0.5，故取边中跨比上限为0.5。得到混合梁斜拉桥合理结合段位置与跨径布置的关系曲线如图5所示。

3　数值模拟案例验证

为验证本文所求公式的合理性和适用性，下面结合两座混合梁斜拉桥案例展开分析。

(1)闽安特大桥

针对小边中跨比的混合梁斜拉桥—闽安特大桥展开讨论分析。该混合梁斜拉桥跨径布置为(3×60+716+3×60=1 076m)，边中跨比为0.25。该边中跨比取值低于常规斜拉桥的取值，也低于一般的混合梁斜拉桥的取值。根据文献[14]参数，钢混梁重比的近似取值为1/5。在边中跨比取值为0.25的情况下，取活恒载比为0.25，依据本文式(20)可以得到该桥梁主梁钢混交界面取值参数r_s的合理取值范围为0.025～0.127。

文献[14]中对比了该桥梁两种交界面布置位置的方案。方案一为交界面设置在边跨侧距桥塔35m位置，方案二为结合段设置在中跨侧距桥塔20m位置。方案一对应的r_s为0.049；方案二对应的r_s为0.028。将桥梁跨径布置参数点(r_a，r_s)绘制入混合梁斜拉桥合理交界面位置与跨径布置的关系曲线图中，如图5a所示。由图可知，两方案的跨径布置参数均位于绘阴影的合理交界面位置区域内，但是方案二取值更加接近下限取值。故方案二相比方案一倾向于不

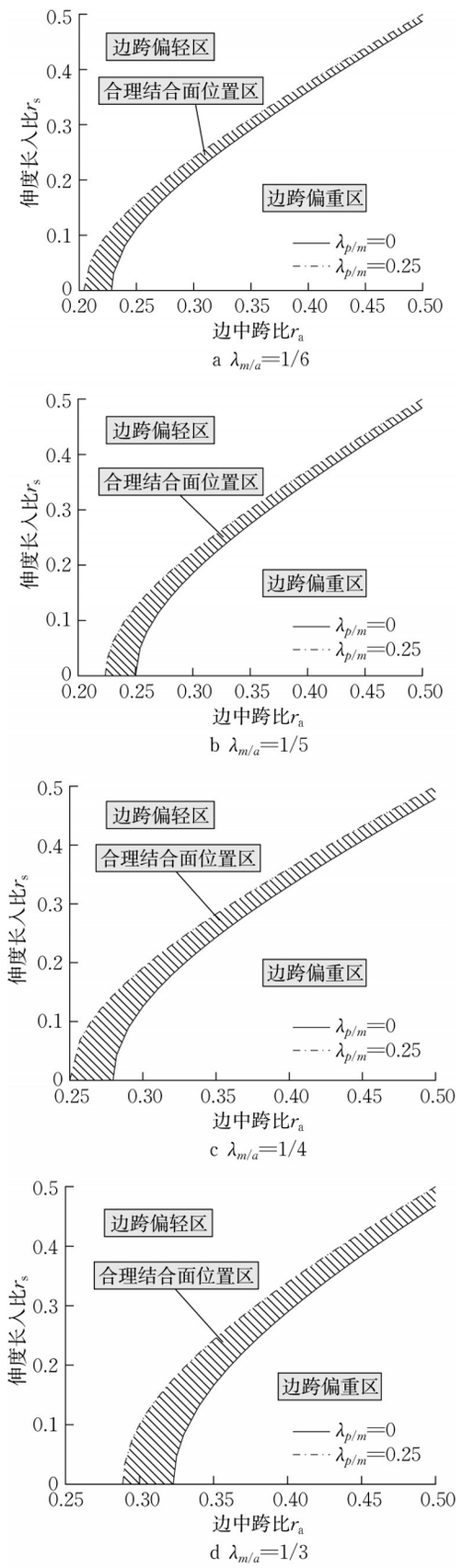


图5　合理交界面位置与跨径布置的关系曲线

Fig.5　The relationship between the rational interface position and the span arrangement

合理,边跨设置上偏重。而该文献通过有限元计算对比两方案成桥状态下主梁纵向弯矩曲线,得到了方案二边跨过重,主梁恒载弯矩分布不合理的结论,与本文通过公式推导得到的结论一致。

(2)鄂东长江大桥

针对千米级混合梁斜拉桥—鄂东长江大桥展开分析讨论。该混合梁斜拉桥采用(3×67.5+72.5+926+72.5+3×67.5m=1 476m)的九跨连续半飘浮双塔混合梁斜拉桥结构,边中跨比为0.297。文献[6]基于索塔只承受轴力的斜拉桥理想成桥恒载状态对该桥展开有限元计算分析,以主梁弯曲应变能作为主要指标对比该桥梁5个不同的交界面位置的方案。根据该文献给出该桥部分计算参数取钢混梁重比近似值为1/5,取活恒载比为0.25,代入桥梁边中跨比为0.297,可以得到该桥梁主梁钢混交界面取值参数r_s的合理取值范围为0.116~0.185。

文献[6]对比了5种交界面设置方案,方案分别为交界面在三个辅助墩向跨中7.5m处、索塔向跨中方向12.5m处和89.5m处。即5个方案分别为边跨距离塔根200m,132.5m,65m和中跨距离塔根12.5m、89.5m。对应的参数r_s取值分别为0.216、0.143、0.070、0.013、0.097。本文得到参数r_s的合理取值范围为0.116~0.185。将桥梁跨径布置参数点(r_a,r_s)绘制入混合梁斜拉桥合理交界面位置与跨径布置的关系曲线图中,如图6b所示。

仅方案2的跨径布置参数点位于合理交界面位置区域内,其他方案中方案5的参数点最接近合理交界面位置区域。而该文献计算得到了5种方案无辅助墩条件下的恒载主梁弯曲应变能比例为7.13∶1.00∶3.26∶9.76∶1.71,也能得到方案二最优,其次为方案5,与本文通过公式和图解推导得到的结论一致。

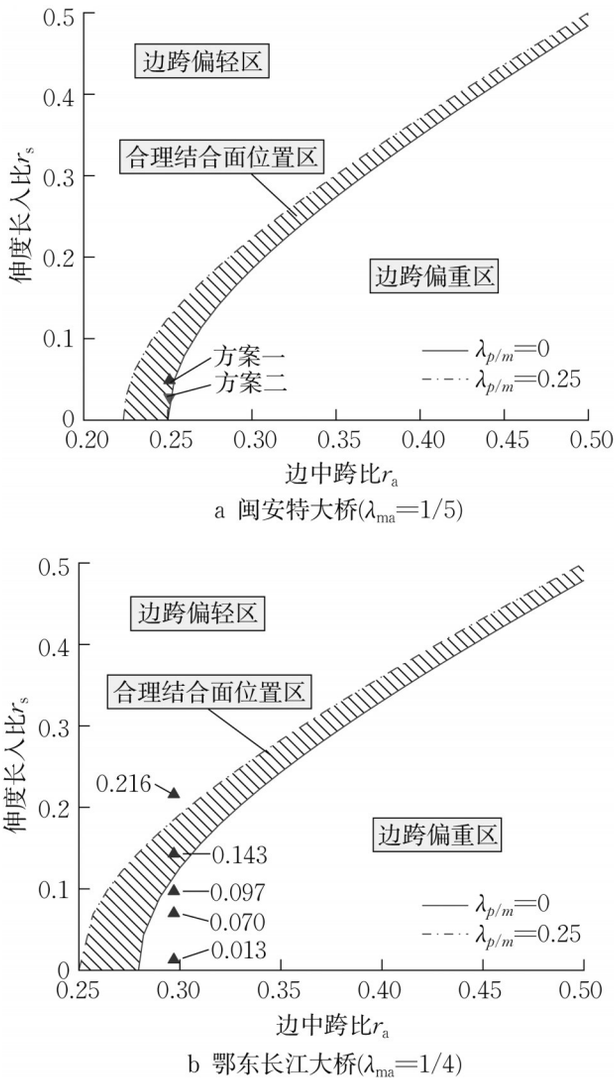


图6 合理交界面位置分析曲线

Fig.6 The analysis of the rational interface position of two bridges

4 结论

本文基于斜拉索索面膜化的假定和桥塔水平受力平衡,对混合梁斜拉桥主梁钢混交界面合理位置的快速求解展开了分析。通过理论推导并结合文献案例分析,本文得到如下结论:

(1)基于斜拉桥理想成桥状态得到了混合梁斜拉桥的主梁钢混交界面位置合理取值范围计算公式,合理交界面位置的选取与桥梁边中跨比、钢混梁重比和活恒载比有关。

(2)在桥梁初步设计阶段,给定恒载活载条件和边中跨比,则可以确定主梁钢混交界面位置r_s的上下限区间,当参数r_s高于上限值则桥梁边跨偏轻;当参数r_s低于下限值则桥梁边跨偏重。

(3)混合梁斜拉桥的边中跨比存在最小取值,如果边中跨取值比小于该值,则不论主梁钢混交界面的位置如何布置,均无法使混合梁斜拉桥取得理想成桥状态。

(4)本文针对两座混合梁斜拉桥的多种主梁钢混结合面布置方案分别展开讨论。本文公式推导的合理取值结论与文献中有限元对比分析得到的结论吻合,证明了本文计算方法的合理性和适用性,为混合梁斜拉桥初步设计阶段跨径布置提供了一种快速计算方法。

作者贡献声明：

林志平：提供工程数据、理论推导、论文撰写；
张翼曦：数据处理与绘图、论文撰写与论文修订；
苏庆田：论文撰写指导，论文修订。

参考文献：

[1] PIPINATO A. Case study：the Russky bridge[C]//Innovative Bridge Design Handbook：Construction，Rehabilitation and Maintenance. Oxford：Butterworth-Heinemann，2016：671-680.

[2] 徐利平. 超大跨径斜拉桥的结构体系分析[J]. 同济大学学报(自然科学版)，2003，31(4)：400.
XU Liping. Structural system analysis for super-long span cable-statyed bridges [J]. Journal of Tongji University (Natural Science)，2003，31(4)：400.

[3] Honshu-Shikoku Bridge Authority. The tatara bridge：design and construction technology for the world's longest cable-stayed bridge[R]. Tokyo：Honshu-Shikok u Bridge Authority，1999

[4] 徐国平，刘玉擎，张喜刚. 混合梁斜拉桥[M]. 北京：人民交通出版社，2013.
XU Guoping，LIU Yuqing，ZHANG Xigang. Hybrid girder cable-stayed bridge[M]. Beijing：China Communication Press，2013.

[5] 陈开利，余天庆，习刚. 混合梁斜拉桥的发展与展望[J]. 桥梁建设，2005(2)：1
CHEN Kaili，YU Tianqing，XI Gang. Development and prospective of hybrid girder cable-stayed bridge [J]. Bridge Construction，2005(2)：1.

[6] 刘高，唐亮，谭皓，等. 混合梁斜拉桥钢混结合部的合理位置[J]. 公路交通科技，2010，27(6)：52.
LIU Gao，TANG Liang，TAN Hao，*et al*. Determination of rational steel-concrete connection position for hybrid girder cable-stayed bridge. [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development，2010，27(6)：52.

[7] 刘潜，黄才良，唐学庆. 单塔混合梁斜拉桥主梁钢混结合部合理位置研究[J]. 北方交通，2017(7)：15.
LIU Qian，HUANG cailiang，TANG xue qing. Study on the rational steel-concrete connection position of main girder for single pylon hybrid girder cable-stayed bridge [J]. Northern Communications，2017(7)：15.

[8] 王冰，李方柯. 高速铁路主跨332m高低塔混合梁斜拉桥设计优化[J]. 铁道建筑，2019，59(10)：23.
WANG Bing，LI Fangke. Design and optimization on hybrid girder cable-stayed bridge with main span of 332 m and unequal height pylons on high speed railway[J]. Railway Engineering，2019，59(10)：23.

[9] 李大勇，张浩. 混合梁斜拉桥主梁钢混交界面位置对受力特性的影响研究[J]. 工程技术研究，2022，7(14)：80.
LI Dayong，ZHANG Hao. Research on the influence of the position of the steel-concrete joint surface on the mechanical properties of hybrid beam cable-stayed bridges[J]. Engineering and Technological Research，2022，7(14)：80.

[10] 徐利平. 混合梁斜拉桥的边、中跨合理比例[J]. 上海公路，2002(4)：28.
XU Liping. Reasonable ratio of edge and mid span for hybrid cable-stayed bridges [J] Shanghai Highways，2002 (4)：28.

[11] 徐利平. 混合梁斜拉桥边跨混凝土梁受力特点[J]. 结构工程师，2003(1)：12.
XU Liping. Behavior of concrete deck in side span for hybrid cable-stayed bridge[J]. Structural Engineers，2003(1)：12.

[12] NIELS J. Gimsing . Cable Supported Bridges：Concept Design [M]. New York：John Wiley & Sons，Inc，1997.

[13] 肖汝诚. 确定大跨径桥梁结构合理设计状态的理论与方法研究[D]. 上海：同济大学，1996.
XIAO Rucheng. Research on theory and methods of determining the rational design state of long-span bridge structures [D] Shanghai：Tongji University，1996.

[14] 甄玉杰，颉瑞杰. 极限边中跨比混合梁斜拉桥关键技术研究[J]. 城市道桥与防洪，2021(10)：99.
ZHEN Yujie，XIE Ruijie. Research on key technology of compound beam cable-stayed bridge with limiting side-span ratio [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control，2021(10)：99.