

文章编号:1006—2106(2005)05—0056—06

偏压修正法在斜拉桥荷载横向分布计算中的应用

王绍良^{1*} 胡 海² 肖云琳³

(¹ 深圳市城市交通规划研究中心,深圳 518006;² 中国铁路工程总公司,北京 100055;

³ 深圳筑博工程设计有限公司,深圳 518000)

摘要:对于斜拉桥的荷载横向分布计算,当前国内外通用的方法是偏压法加主梁抗扭验算,即索面承担竖向荷载,箱梁承担扭矩,开口截面主梁假定其抗扭刚度为零,不承担扭矩。本文结合斜拉桥受力特点,进一步改进了偏压修正法在斜拉桥上的应用,充分考虑了桥跨结构的横向弯扭耦合效应。

本文还应用 SAP 有限元分析程序对桥例建立空间模型进行了分析,并与偏压修正法和改进后的偏压修正法的计算值进行了对比,证明改进偏压修正法用于斜拉桥计算是完全可行的,并由此得出几点结论。

关键词:斜拉桥;荷载横向分布;偏压修正法

中图分类号: U441⁺.2 **文献标识码:** A

1 引言

桥梁荷载横向分布系数的计算在桥梁的结构分析中占有重要的地位。虽然大部分斜拉桥等复杂体系桥梁均采用空间杆系计算分析方法,但是,采用平面杆系计算,用横向分布系数体现空间作用还有较广泛的应用。

斜拉桥远较梁式桥复杂,横向分布系数受主梁的抗扭刚度、桥宽、跨径、以及索的布置和索、梁、塔的连接形式等诸多因素影响。基于对斜拉桥拉索、主梁和塔的协同承载分析,可得出主梁系的弯扭耦合效应对于其荷载分布起着重要作用。充分考虑弯扭耦合作用的偏压修正法,不仅理论上较偏压法先进,可在设计上取得经济合理的结果,而且计算上也十分简便。本文研究的主要内容是针对当前斜拉桥的荷载横向分布计算的通用方法为偏压法加主梁抗扭验算,忽略加劲梁的抗扭刚度,往往导致设计过于保守的现状,在文献[1]提出的偏压修正法的基础上,做了进一步的修订,并对偏压修正法在斜拉桥的应用做了进一步的探索分析。

本文选取双塔、双索面斜拉桥—重庆马桑溪大桥为例分别用有限元计算程序—SAP 程序建立空间模型和改进后的偏压修正法进行计算,并对计算结果进行了分析比较。

2 马桑溪大桥概况

马桑溪长江大桥(简称桥 A)为 179 m+360 m+179 m 预应力混凝土双塔双索面斜拉桥,塔墩铰接体系,密索飘浮体系。桥塔高 97 m(从桥面计),斜面扇形双索面;每塔 49 对索,索距 6 m,不对称,锚固在桥塔上部 35 m 区域和主梁距桥塔 10 m 外的区域内;主梁采用预应力混凝土截分离式倒梯形箱形断面。桥塔为混凝土倒 Y 型,箱形断面。

主要参数见表 1、表 2。

表 1 材料性质

	40 号混凝土	50 号混凝土	钢索	单位
E (弹性模量)	33	35	185	Gpa
ν (泊松比)	0.17	0.17	0.3	
γ (容重)	25	25	76.4	kN/m ³

表 2 主梁截面特性

几何特性	数值	单位
A (面积)	8.20	m ²
I_x (惯性矩)	106.23	m ⁴
I_y (惯性矩)	6.84	m ⁴
J (扭转惯矩)	14.31	m ⁴

(X —为顺桥向; Y —竖向; Z —横桥向)

* 收稿日期: 2005—08—26 王绍良 工程师 男 1973 年 12 月出生
万方数据

3 改进后的偏压修正法

3.1 斜拉桥索、梁、塔协同承载机制

斜拉桥索、梁、塔三个主要组成部分相互间的联结形式、尺寸等关系,对整个结构内力分布有很大的影响。在恒活载作用下,拉索和主梁联结形成弹性支承而降低了梁的刚度,从而减小梁承受的弯矩。当主梁刚度减小,拉索与索塔变形而引起的主梁的附加弯矩是较小的。但是主梁的刚度减小,将使荷载沿桥纵向的分布减小,使拉索超载。

斜拉桥在荷载作用下,梁、索协同承载。由于梁跨的柔性,每根斜拉索将承受它附近荷重的大部分。梁体分担的荷重使梁体产生与斜拉索相适应的挠度和力矩。主梁的挠度主要控制于拉索伸长。如本文选取的双塔三跨斜拉桥中,在跨中部分,拉索斜度较大,竖向刚度较小,故挠度较大。而在邻近索塔与梁正交竖向刚度大,因而挠度较小。

从以上分析,不难得出以下结论:

斜拉桥的刚度主要来自斜拉索;主梁的刚度作用较小,可把集中力传递到邻近斜拉索。

主梁所承担抗扭矩,在很大程度上取决于缆索系统提供的抗扭支承,对于双索面斜拉桥,取决于梁的抗扭刚度和索提供的刚度对比。

根据以上索、梁、塔协同承载分析,充分考虑索、梁的弯扭耦合作用,对偏压修正法进行改进以在斜拉桥横向荷载分布计算上较好应用。所做改进基于小变形理论,并力求简捷适用。

3.2 双索面斜拉桥的改进偏压修正法

偏压法普遍修正公式为:

$$K_{ik} = \frac{K_{wi}}{\sum K_{wi}} \pm \frac{e_k a_i K_{wi}}{\sum K_{wi} a_i} \beta \quad (1)$$

其中 K_{wi} ——主梁 i 的抗挠刚度系数,即主梁单位挠度所需之力;

a_i —— i 梁至纵轴之距;

e_k ——荷载 P 至纵轴的偏心距。

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{m_r}{m_t}} = \frac{m_r}{m_r + m_t} = \frac{m_r}{m_t} \quad (2)$$

m_r : 梁扭角 $\theta=1$ 时断面各梁挠度产生弹性力构成的扭矩;

m_t : 梁扭角 $\theta=1$ 时断面各梁因扭转产生剪流构成的扭矩。

根据斜拉桥的受力特点对式(1)中的参数进行重新

万方数据

定义。

3.2.1 拉索刚度系数

斜拉桥中主梁刚度系数 K_{wi} 以 K_b 来代替,以 K_s 来表示拉索刚度系数,代表控制截面发生单位位移时荷载跨各斜拉索索力竖向分力之和。

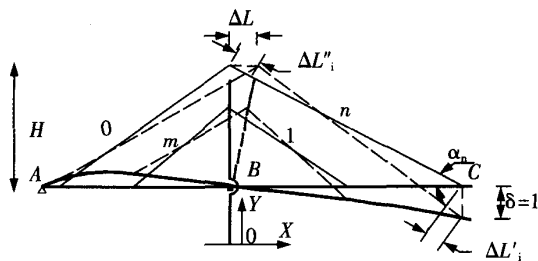


图1 塔墩铰接的计算图式

遵从弹性变形理论,对于塔墩铰接体系,视为索、梁、塔三者组成一三角桁架,各结点为铰接,各杆绝对平直,仅承受轴力;为简化计算,各杆夹角保持不变。

如图1,斜拉桥边跨有 m 条拉索,中跨有 n 条拉索,跨中控制截面发生单位位移时,中跨拉索 i ($1 \leq i \leq n$) 的伸长量为:

$$\Delta L_i = \Delta L'_i - \Delta L''_i = y_i \sin \alpha_i - h_i \frac{\Delta L}{H} \cos \alpha_i \quad (3)$$

可得拉索刚度系数 K_s :

$$K_s = \sum_{i=1}^n E A_i \frac{\Delta L_i}{L_i} \sin \alpha_i \quad (4)$$

式(3)和(4)中:

H ——桥塔高度;

h_i ——与斜拉索 i 相接处塔的高度;

α_i ——斜拉索 i 与主梁轴线的交角,由 x 轴的正方向量测,逆时针为正角;

E_c ——斜拉索的纵向弹性模量;

A_i ——斜拉索 i 的截面积;

L_i ——斜拉索 i 的长度;

ΔL ——主塔顶的水平位移(向右为正);

y_i ——斜拉索 i 的连接点的主梁挠度,向下为正。

3.2.2 主梁刚度系数^[1]

刚度系数是杆件的物理性质,与荷载分布无关,因此,当主梁控制截面产生平移 $\delta=1$,根据刚度系数 K 的定义,则各拉索的竖向力合力 R_s 即为 K_s :

$$R_s = K_s \quad (5)$$

主梁的挠度与拉索挠度相等,因此主梁的刚度系数可根据拉索的刚度系数来求。对于双索面斜拉桥, n 个主梁的 $\sum R_b$ 应等于 $2 R_s$,可得主梁的平均刚度系数:

$$\bar{K}_b = \bar{R}_b = \frac{2}{n} K_s \quad (6)$$

3.2.3 修正系数和荷载分布系数^[1]

(1) 修正系数

根据偏压法普遍修正公式:

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{m_r}{m_i}} \quad (7)$$

m_r 代表断面偏转 $\theta=1$ 时, 断面各梁(支点)弹性反力 R_i 构成抗扭矩, 则:

$$m_r = \sum K_{bi} a_i^2 \quad (8)$$

梁扭转 $\theta=1$ 时, 断面各梁因扭转产生剪流构成的扭矩, 有:

$$m_r = \frac{LG \sum J_{Ti}}{x(L-x)} \quad (9)$$

斜拉桥横向荷载分布如图 2。

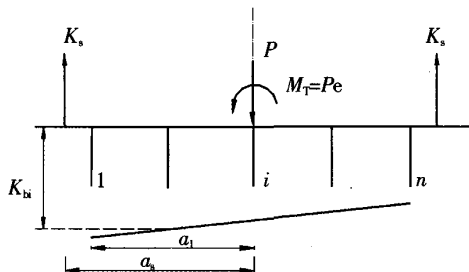


图 2 斜拉桥横向荷载分布图

(2) 主梁荷载分布系数

活载通过横向结构传布于主梁, 同梁桥一样:

$$k_{bi} = \frac{K_{bi}}{\sum K_{bi}} \pm \frac{ea_s K_{bi}}{\sum K_{bi} a_i^2} \beta \quad (10)$$

(3) 主梁扭矩荷载分布系数

偏载的扭矩荷载 $M_T = \sum P e_i$, 其中由主梁反力 K_{bi} 分担(β)部分, 余下 $(1-\beta)$ 部分由主梁抗扭剪流承担, 主梁分担 M_T 的百分比, 即主梁扭矩荷载的分布系数:

$$K_{bi}^T = (1-\beta) J_{Ti} / \sum J_{Ti} \quad (11)$$

(4) 拉索荷载分布系数

拉索相当于主梁结构的弹性支承, 根据主梁承担的中荷载 $P=1$ 扭矩 $e\beta$, 求出拉索的分布系数:

$$K_{si} = \frac{1}{2} \pm \frac{ea_s K_{si}}{\sum K_{si} a_s^2} \beta = \frac{1}{2} \pm \frac{e}{2a_s} \beta \quad (12)$$

3.2.4 变形曲线

为了使计算方法不致过于复杂, 针对桥 A, 假定主梁变形曲线为二次曲线 $y=ax^2+bx$, 且过 A、B、C 三点。B 点为原点 O(塔梁交接点)。则通过 A(梁端点)、C(跨中控制截面处索梁交接点) 两点可很容易求出参数 a 、 b 值。这样就可求出各索梁交接点的竖向位移。

令跨中控制截面向下发生单位位移, 图 3 为用 SAP 程序计算得出的主梁变形曲线和假定二次曲线万方数据

(Y 坐标为位移量, X 坐标为梁长) 从中可看出在中跨吻合较好, 且偏于安全。

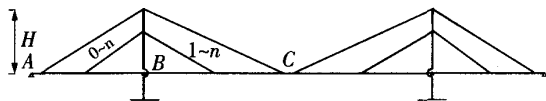


图 3 桥 A 简图

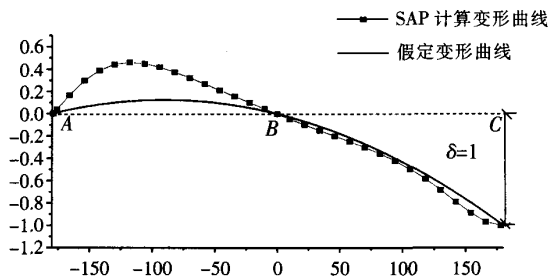


图 4 假定变形曲线与 SAP 计算变形曲线

4 空间模型计算

应用 SAP 有限元程序建立全桥模型进行空间分析计算。对于计算模型, 以下列各项原则为准:



图 5 计算模型

(1) 模型中各部分采用单元类型以及结构划分一定再现真实体系结构特征;

(2) 各部分联系尽可能符合实际;

(3) 边界条件, 按实际结构确定;

(4) 从研究内容出发, 抓住主要因素, 力求简化。

由以上原则, 桥例中主塔与梁均采用梁单元; 索采用了等效弹性模量法的力学模型, 将内力的影响, 转化为弹性模量的折减来模拟。由 Ernst 公式:

$$E = \frac{E_c}{1 + \frac{(rL)^2}{12\sigma^3} E_c} \quad (13)$$

其中 E——斜拉索修正弹性模量;

E_c ——斜拉索材料弹性模量;

r ——斜拉索材料容重;

L ——斜拉索水平投影长度;

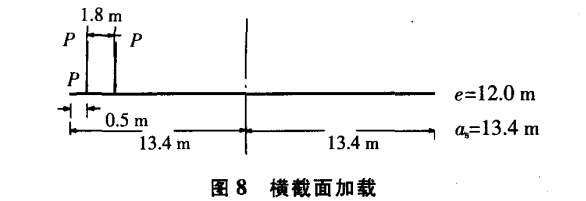
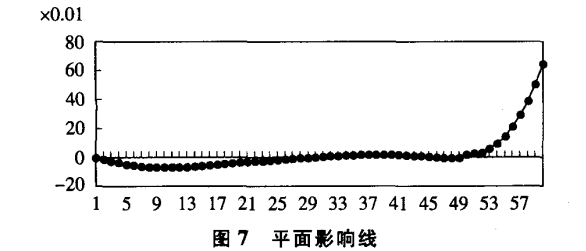
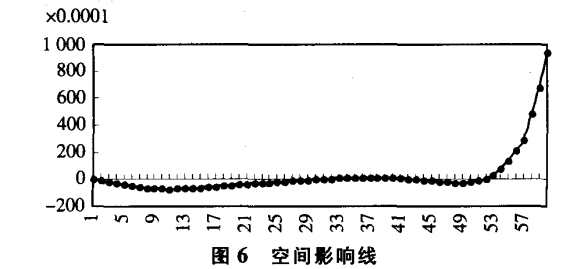
σ ——斜拉索中应力。

5 计算结果

5.1 分别应用 SAP 有限元程序和改进的偏压修正法, 对桥 A 进行计算

(1) 首先应用 SAP 程序计算出桥 A 跨中截面的纵向弯矩影响线, 如图(6、7), 可见平面影响线和空间

影响线(沿梁的方向等距划分的节点号为横坐标,由于桥 A 的对称关系跨中截面主梁弯矩纵向影响线取半跨)基本相同,根据影响线对模型加载,本文均按一列汽超-20 加载。汽车横向布置如图 8。



(2) 根据第二节改进的偏压修正法和第一节所提供基本参数,对桥 A 跨中截面进行计算得到改进的偏压修正法数据(见表 3)。

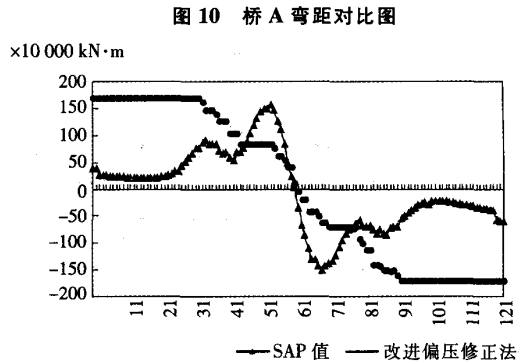
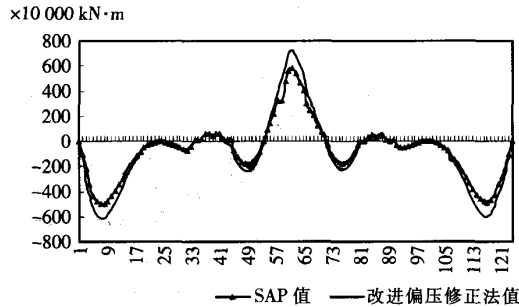
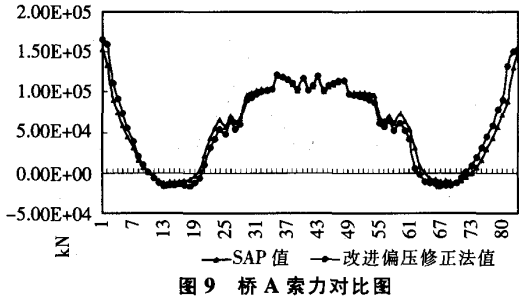
跨中截面		单位
K_s	3.634E+7	kN/m
m_r	2.39E+6	kN·m
m_r	1.94E+6	kN·m
β	0.827	
k_a	0.870	
k_b	0.870	
k_b^T	0.065	

5.2 计算结果

5.2.1 分别应用 SAP 程序对桥 A 建立空间模型进行计算并和改进后的偏压修正法计算结果进行对比 (以汽一超 20 加载,位置如图 8 所示)。加载车流和横向位置完全相同。取计算结果中的索力,主梁的弯矩和扭矩进行比较。

具体计算结果见图 9-图 11。

5.2.2 为了进一步验证改进后的偏压修正法。再选取万方数据



结构形式完全与桥 A 相同仅跨径不同的桥 B (127 m+252 m+127 m)和桥 C(227 m+456 m+227 m)来进行验算。加载情况与桥 A 一致,计算结果见图 12-图 17。

6 结论

通过以上对比分析,得出结论如下:
6.1 改进后的偏压修正法,充分考虑了斜拉桥的索、梁刚度,较杠杆法和偏压法有一定优势,并且保持了算

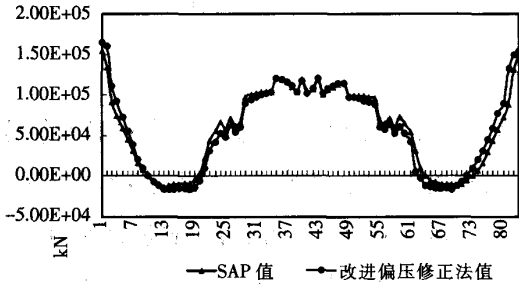


图 12 桥 B 索力对比图

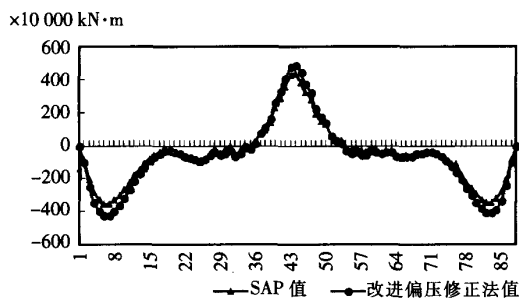


图13 桥B弯矩对比图

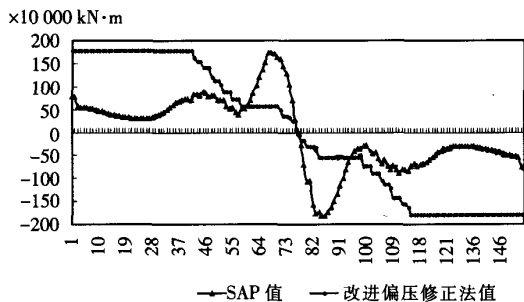


图17 桥C扭矩对比图

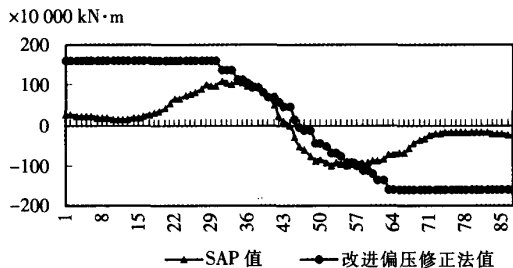


图14 桥B扭矩对比图

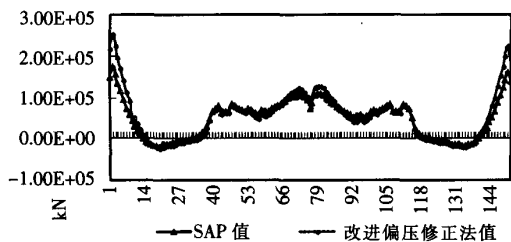


图15 桥C索力对比图

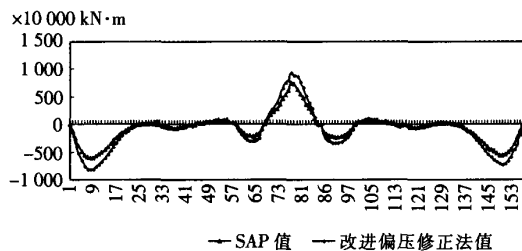


图16 桥C弯矩对比图

法简捷的特点。

6.2 改进后的偏压修正法充分考虑了斜拉桥的索、梁刚度,所以对较大跨径的斜拉桥也具有较好的适用性。

并且通过计算结果,也说明斜拉桥的刚度主要来自斜拉索。

6.3 对于桥A、B、C,改进偏压修正法对有限元程序SAP计算值的索力和弯矩的相对误差并没有随跨度的变化而有明显的变化。说明改进后的偏压法由于充分考虑了整体索的刚度,可适用于较大跨度,并具有一定的精度。可进一步得出:随跨度的增大,主梁抗扭作用减小, β 值增大会逐渐接近偏压法。

6.4 本文的不足之处如下:

- (1) 对单索面斜拉桥未做进一步的验证。
- (2) 对于斜拉桥扭矩的分配未给出很好的解决办法。

参考文献

- [1] 胡肇滋.桥跨结构简化分析-荷载横向分析[M].北京:人民交通出版社,1996.
- [2] 李国豪,石洞.公路桥梁荷载横向分布计算[M].北京:人民交通出版社,1987.
- [3] 严国敏.现代斜拉桥[M].成都:西南交通大学出版社,1996.
- [4] 李乔.斜拉桥的受力特征分析[A].四川省公路学会桥梁专委会98年桥梁学术讨论会论文集[C],1999.
- [5] 朱以文,韦庆如,顾伯达.微机有限元前后处理系统 Vizi CAD 及其应用[M].北京:科学技术文献出版社,1993.
- [6] 郑振飞,吴庆雄.斜、弯桥跨分析的广义梁各法[M].北京:人民交通出版社,1998.
- [7] 奚绍中,郑世瀛.应用弹性力学[M].北京:中国铁道出版社,1981.
- [8] 尼尔斯J·吉姆辛.缆索承重桥梁[M].北京:人民交通出版社,1991.

APPLICATION OF MODIFIED ECCENTRIC -COMPRESSIVE METHOD IN THE TRANSVERSAL DISTRIBUTION OF LOADING OF CABLE-STAYED BRIDGE

WANG Shao-liang¹, HU Hai², XIAO Yun-lin³

¹Shenzhen Urban Transport Planning Center; ²China Railway Engineering Corporation; ³Shenzhen Zhubo

万方数据

Engineering Design Co.Ltd

Abstract: The cable-stayed bridge, an indeterminate structure with more degrees of redundancy, consists of towers, cables and girders. Under loading, towers, cables and girders take part in working in cooperation with each other. Currently, the method of loading transversal distribution of cable-stayed bridge is the eccentric-compressive method. It means that cables sustain vertical forces and box girder sustains torsion moment. The torsion stiffness of girder with open cross section is assumed to be zero. So, the girder with open cross section can't sustain torsion. Based on the analysis of cables and girders working cooperation with each other, loading transversal distribution of girder mostly depends on the coupling of bending and torsion. In this paper the application of modified eccentric-compressive method has been discussed and some improvement on it has been also done.

At the end of this paper, some results of examples obtained from SAP, a large finite element program, are given. Compared with the values obtained from the modified eccentric-compressive method and the improved method, it can be seen that the improved eccentric-compressive method is suitable for the cable-stayed bridge.

Key words: cable-stayed bridge; transversal distribution of loading; modified eccentric-compressive method

~~~~~  
(上接第47页)

railroad from Guangzhou to Shenzhen, much labor force with high intensity was involved, but the production efficiency was low and the engineering quality was poor.

To construct on the current foundation of railroad, limited by the narrow construction site, the construction equipment to fulfill it must be of small bulk, light weight, flexibility, high effect and so on, on the condition the safety is to be assured.

In 2002, the construction equipment for packing pile was developed. It filled in the gaps in domestic in this aspect. This set of equipment includes the drilling machine, the compacting machine and an up-and-down the rail bed unit. It had a good effect after being tried out in the railroad from Beijing to Shanhaiguan and the one from Beijing to Qinhuangdao.


The key part of the construction equipment for packing pile was the drilling machine. Without the high efficient top-quality drilling machine, only depending on manual construction, it is difficult to efficiently fulfill the construction of packing pile in large amount. The developed drilling machine uses a series of key techniques like hydraulic transmission, application oil cylinder-chain machine to increase the power, extending and retracting drilling rod, circular drilling teeth and fast joint etc. It can rapidly work on the rail bed and go downward to avoid the train, at the same time it satisfies what is limited by the construction environment to the equipment.

This equipment can be widely used in the reinforcement of the foundation of railroad and it can bring the damaged part under control. After a slightly refit, it can also be used in geologic drilling and dealing with soft foundation. It has a good application foreground.

In the paper, a brief introduction was discussed on the technological fundamentals of packing pile. The paper also discussed some developed construction equipment for packing pile, which include its main specification, structural feature, key technique, test in-situ. This paper gave an advice on the measures to improve some deficiencies in the equipment, in addition the paper foreseed and analyzed its further development and its prospect in application as well.

**Key words:** speed up; foundation; reinforcement; equipment; prospect

# 偏压修正法在斜拉桥荷载横向分布计算中的应用

作者: [王绍良](#), [胡海](#), [肖云琳](#), [WANG Shao-liang](#), [HU Hai](#), [XIAO Yun-lin](#)  
作者单位: [王绍良, WANG Shao-liang \(深圳市城市交通规划研究中心, 深圳, 518006\)](#), [胡海, HU Hai \(中国铁路工程总公司, 北京, 100055\)](#), [肖云琳, XIAO Yun-lin \(深圳筑博工程设计有限公司, 深圳, 518000\)](#)  
刊名: [铁道工程学报](#)   
英文刊名: [JOURNAL OF RAILWAY ENGINEERING SOCIETY](#)  
年, 卷(期): 2005 (5)

## 参考文献(8条)

1. [胡肇滋](#) [桥跨结构简化分析-荷载横向分析](#) 1996
2. [李国豪](#); [石洞](#) [公路桥梁荷载横向分布计算](#) 1987
3. [严国敏](#) [现代斜拉桥](#) 1996
4. [李乔](#) [斜拉桥的受力特征分析](#) 1999
5. [朱以文](#); [韦庆如](#); [顾伯达](#) [微机有限元前后处理系统ViziCAD及其应用](#) 1993
6. [郑振飞](#); [吴庆雄](#) [斜、弯桥跨分析的广义梁各法](#) 1998
7. [奚绍中](#); [郑世瀛](#) [应用弹性力学](#) 1981
8. [尼尔斯J·吉姆辛](#) [缆索承重桥梁](#) 1991

## 本文读者也读过(10条)

1. [易鹏](#) [大跨度公铁两用斜拉桥计算模型简化的探讨](#)[期刊论文]-[铁道标准设计](#)2003 (9)
2. [李宗坤](#), [王新玲](#), [李杉](#), [姜景山](#), [Li Zongkun](#), [Wang Xinling](#), [Li Shan](#), [Jiang Jingshan](#) [斜拉桥的空间非线性静力分析](#)[期刊论文]-[工业建筑](#)2005, 35 (z1)
3. [江定宇](#), [郭健](#), [孙炳楠](#), [JIANG Ding-yu](#), [GUO Jian](#), [SUN Bing-nan](#) [不同计算模型下大跨度斜拉桥静动力对比分析](#)[期刊论文]-[中国市政工程](#)2011 (1)
4. [刘永健](#), [刘世忠](#), [张俊光](#), [邓淑飞](#), [张国玺](#), [LIU Yong-jian](#), [LIU Shi-zhong](#), [ZHANG Jun-guang](#), [DENG Shu-fei](#), [ZHANG Guo-xi](#) [三桁桁架梁桥横桥向内力调整方法及影响参数](#)[期刊论文]-[广西大学学报 \(自然科学版\)](#) 2011, 36 (1)
5. [李的平](#) [三主桁三索面斜拉桥索力优化及空间受力性能研究](#)[学位论文]2008
6. [裴丙志](#), [方志](#), [余钱华](#), [郭棋武](#) [斜拉桥施工过程中的空间受力分析](#)[会议论文]-2000
7. [陆军](#), [LU Jun](#) [主梁截面不同时铰接板\(梁\)桥荷载的横向分布计算](#)[期刊论文]-[苏州科技学院学报\(工程技术版\)](#) 2007, 20 (4)
8. [蒋卫东](#) [道路中央分离带的安全性分析](#)[期刊论文]-[公路交通技术](#)2004 (2)
9. [陈玉骥](#), [叶梅新](#), [CHEN Yu-ji](#), [YE Mei-xin](#) [板桁组合结构分析中的板梁单元](#)[期刊论文]-[中南大学学报 \(自然科学版\)](#) 2005, 36 (4)
10. [侯杰平](#) [客运专线96m下承式密布横梁体系钢桁简支结合梁桥模型试验研究](#)[学位论文]2009

引用本文格式: [王绍良](#), [胡海](#), [肖云琳](#), [WANG Shao-liang](#), [HU Hai](#), [XIAO Yun-lin](#) [偏压修正法在斜拉桥荷载横向分布计算中的应用](#)[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2005 (5)