



柔性栈桥新概念设计研究*

谢新连, 王少成, 阚颖

(大连海事大学 交通运输管理学院, 辽宁大连 116026)

摘要: 为提高铁路轮渡栈桥对船型的适应性, 提出一种一端固定连接岸上, 另一端能够上下、左右移动, 从而连接来船不同部位, 便于车辆进出船舱的柔性或活动船岸连接栈桥构造方案。给出这种新型柔性栈桥的基本构造和主要构件组装特征, 说明了其工作原理。进而推导出栈桥活动端的横移距离、偏转角度、纵桁外伸长度等关键设计参数的函数关系。研究表明, 这种新型柔性栈桥具有可行性和实用性。

关键词: 铁路栈桥; 栈桥设计; 柔性连接; 铁路轮渡; 工作机理

中图分类号: U 448.12

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972 (2013) S1-0196-05

A novel conceptual design and research on flexible linkspan

XIE Xin-lian, WANG Shao-cheng, KAN Ying

(Transportation Management College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: To enhance the applicability of the trestle bridge for train ferries, a novel flexible linkspan is put forward which can be hinged to shore at one end and moved up and down and also left and right at the other end, and hence can be connected to various decks on board to facilitate the loading or discharging of rolling stock. The basic configuration of the flexible linkspan and the assembling feature of its main parts are presented with a description of its working mechanism. The key parameters of the flexible linkspan, such as transverse moving distance of the moving end, turning angle of the linkspan, overhang length of carlings, are also formulated. The initial research outcomes show that the new type of flexible linkspan is feasible and practical.

Key words: trestle bridge; bridge design; flexible linkspan; train ferry; working mechanism

连接船岸的铁路栈桥是铁路轮渡系统中最具特色、最为关键的设施, 经过160年的发展, 现在通常被认为是一项成熟的实用技术。然而, 铁路轮渡这种运输形式却没有普及和广泛应用, 特别是与后来形成的集装箱运输、滚装运输等运输形式相比, 更是落后。系统分析表明, 制约铁路轮渡发展的根本原因在于船岸连接栈桥的传统设计形式。栈桥既要满足铁路行车对轨道坡度和曲率的严格要求, 又要适应水位差的变化, 因此栈桥通常较长, 一端固定于岸上, 另一端能够上下移动, 以便适应载车甲板的高度变化。

例如, 英吉利海峡隧道投入使用之前, 英国与法国和欧洲大陆间的铁路联系是通过铁路轮渡实现的。位于英国多佛尔的轮渡码头沿岸潮差较大, 达到7.2 m, 铁路轮渡栈桥设计成105 m长的3跨铰接活动钢桥, 岸端设两股轨道上栈桥, 每股轨道又分岔形成4股轨道上船^[1]。又如2002年投入使用的江阴铁路轮渡, 因水位落差达到6.36 m, 栈桥设计成240 m长的5孔钢桥, 通过三分道岔在桥上将1股轨道分岔成3股轨道上船^[2-3]。

这种传统的铁路栈桥长度大、宽度窄, 难于适应大型船舶, 且对不同船型适应性差等^[4-5]。为

收稿日期: 2011-01-18

*基金项目: 国家自然科学基金项目 (50778029)

作者简介: 谢新连 (1956—), 男, 博士, 教授, 主要从事交通运输规划与管理、交通工程研究。

提高火车渡轮的装载量和装卸效率, 增强铁路轮渡栈桥对船型的适应性, 文献[6-8]中提出了柔性连接栈桥和轨道的概念, 系统论述了其中柔性轨道工作原理和在未来海铁联运新系统中的应用前景。笔者提出一种柔性栈桥的设计方案, 介绍这种新型柔性栈桥的工作机理, 并给出柔性栈桥移动变形过程中的主要工作参数的表达式, 说明这种设计方案的可行性和实用性。

1 柔性栈桥的基本构造

为便于说明问题, 先以两跨栈桥为例介绍柔性栈桥的基本构造。根据栈桥一端固定, 另一端能够上下、左右移动, 以便连接可能处于各种位置的载车甲板的要求, 将栈桥设计成由若干组桥墩、主横梁、纵桁、沿纵梁密布但有一定间隙的横梁和连接横梁的纵梁以及能够使栈桥接船端发生移动的升降设备、横移设备组成, 见图1。因桥墩和升降、横移施力设备的现有技术完全可以支持笔者提出的设计方案^[9], 本节主要讨论栈桥梁系的基本构造。

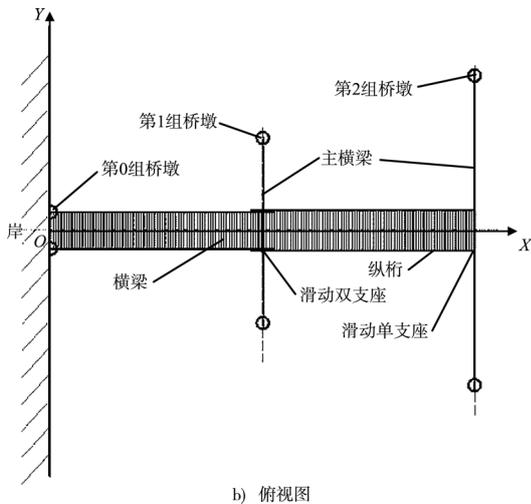
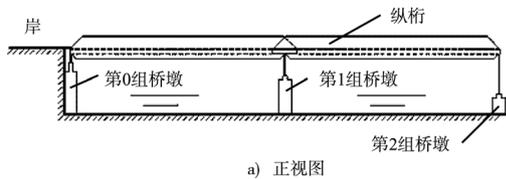


图1 栈桥基本构造

1.1 主横梁

主横梁由箱形钢结构、滑道和滑动支座组

成, 见图2。其主要功能是承托纵桁, 将纵桁和纵梁上的载荷传递到桥墩上, 在设于桥墩上的升降机构的提拉下能够上下移动。滑动支座用于连接纵桁, 并在沿横梁方向推拉力作用下, 带动纵桁和桥面沿横梁横向 (Y方向) 移动。当主横梁跨度较大时, 为了减小主横梁上的弯矩和应力可以在主横梁下设置1个至若干个具有随动升降定位功能的支墩支撑主横梁。

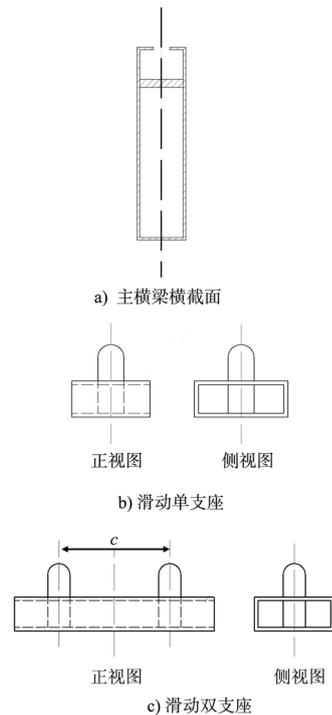


图2 主横梁及其主要构件

1.2 纵桁

纵桁为非对称复合型钢结构, 见图3。其主要功能是承托桥面横梁, 将横梁上的载荷传递到纵桁上。纵桁通过滑动支座支撑在主横梁上, 并能够在主横梁上滑动, 使桥面发生偏转。对于重载桥梁可以在两纵桁之间设置一道至若干道纵梁,

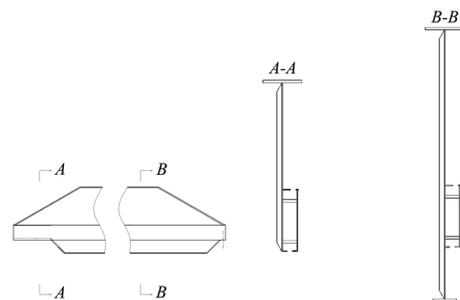


图3 纵桁

进一步支撑桥面横梁。纵梁的结构形式可以采用箱形，并类似于纵桁设有上下滑道。

1.3 横梁

横梁亦称为桥面横梁，为箱形钢结构，两端设有连接圆柱体，见图4。其主要功能是组成桥面，承托载荷，并将载荷传递到纵桁上。由于横梁与纵梁之间留有一定的间隙，或者是光滑连接，随着纵梁的转动，相邻横梁之间也发生相对位置变化，但其位移始终平行于主横梁。

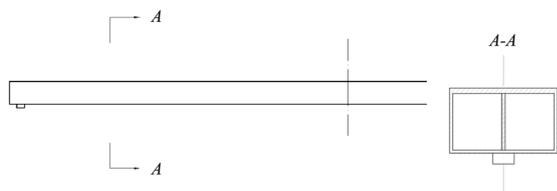


图4 横梁形式

主横梁、纵桁、横梁、滑动支座等构件的主要尺寸可以参照烟大线铁路轮渡栈桥的相近构件设计^[10]，或者通过进一步的力学分析和尺度优化计算确定。

2 柔性栈桥的工作机理

主横梁由设在桥墩上的液压升降装置支撑。靠岸端一跨梁的纵桁与靠岸端的桥墩铰接，铰接点位置固定，向海一端的纵桁通过主横梁滑动支座与主横梁铰接。滑动支座能够在主横梁上移动，从而带动纵桁移动或转动。为使纵桁在移动或转动过程中始终能够搭接在两道相邻的主横梁上，纵桁长度要大于两道相邻的主横梁之间的距离。即在靠岸第一跨，向海一端的主横梁外纵桁留有一定的外伸长度。其他各跨纵桁通过主横梁滑动单支座与向海一端主横梁铰接，通过滑动双支座与向岸一端主横梁铰接。同理，为使纵桁移动或转动过程中始终能够搭接在主横梁上，纵桁长度要大于相邻的两个主横梁之间的距离。但与靠岸第一跨梁不同的是，其他各跨梁的纵桁要在向岸一端的主横梁外留有一定的纵桁外伸长度。

栈桥安装调试成功后，在桥墩上设置的液压升降装置的作用下，桥梁能够以接岸端两纵桁端支点为中心上下摆动，桥梁上下摆动时桥面沿纵向应保持成一直线。在作用于主横梁处的横

向推力或拉力的作用下纵桁能够以接岸端两纵桁端支点为中心左右转动，最大转角根据（船宽）需要确定，并受纵桁长度限制（以纵桁滑动端不从主横梁上脱落为限）。桥面向左或右转动的过程中，桥面横梁随纵桁向左或右平行于主横梁移动。桥面转角越大，相邻两主横梁之间的纵桁长度越大，与转角为零时相比，纵桁长度增加的部分由纵桁外伸段随着桥面转角加大而自然补充。

当栈桥由多跨组成时，允许各跨梁段的偏转角不同，从而使栈桥整体呈现出折角线弯曲形状，见图5。相邻两跨梁段之间的最大相对偏转角取决于这两跨梁上接续纵桁之间的横向间隙和外伸端长度。

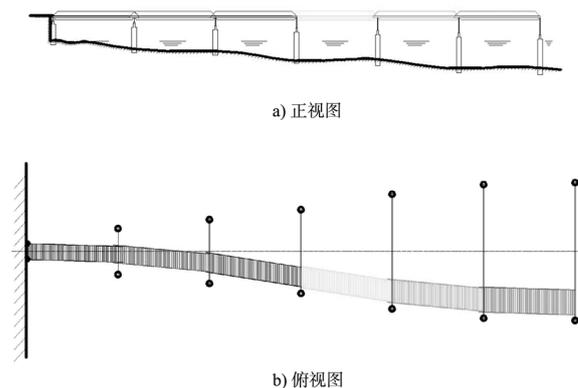


图5 多跨栈桥梁面变形

3 主要形变控制参数关系

3.1 形变参数的表达与定义

为便于建立柔性栈桥的形变控制参数关系，按照图1所示，建立 XOY 坐标系。将栈桥梁系置于坐标系内，坐标原点设在岸端桥墩上两纵桁支点之间的桥面中点处， X 轴垂直于岸端桥墩上两纵桁支点连线，指向海向。桥面横梁中点连线称为梁面纵中线，当梁面或纵桁转角为零时，梁面纵中线与 X 轴重合。梁面的转角可用纵桁转角或梁面纵中线转角表达。在岸端的一组桥墩标号为0，设栈桥由 n 跨组成，则向海方向的各组桥墩顺次编号为1, 2, ..., n ，其中 n 表示靠船端桥墩组或梁段编号，或用 $i=0, 1, 2, \dots, n$ 表示第 i 组桥墩或梁段（设0号梁段为陆地）。

定义1: 当第*i*跨梁段(的纵桁)在水平方向偏转时, 其相对于初始位置(即与*X*轴)的夹角, 称为第*i*跨梁段的偏转角, 用 α_i 表示。

定义2: 当各跨梁段或各跨纵桁在水平方向等角度偏转时, 梁面的偏转角等于纵桁的偏转角, 定义此角为梁的偏转角 α , 此时显然, $\alpha = \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_{n-1} = \alpha_n$ 。

定义3: 第*n*跨梁的海向端, 即梁面接船端离开其初始位置沿主横梁的移动距离称之为梁的接船端横移距离, 或简称梁端横移距离, 用 Δy 表示。

定义4: 当第*i+1*跨梁的偏转角度与第*i*跨梁的偏转角度不同时, 定义这两跨梁的偏转角之差 $\alpha_{i+1} - \alpha_i$ 为这两跨梁之间的相对偏转角, 用 β_{i+1} 表示。

定义5: 栈桥桥面中心线垂直于岸边时, 桥面两侧相邻两跨接续纵桁之间的间距, 或滑动双支座上两个支柱中心线之间的距离称为接续纵桁之间的距离, 用*c*表示, 见图2c)。

其他符号意义如下:*l_i*为当栈桥桥面中心线垂直于岸边时, 第*i*跨梁的长度, 即第*i*跨梁两端的主横梁之间的距离; *L*为栈桥桥面中心线垂直于岸边时, 柔性栈桥总长度, $L = l_1 + l_2 + \dots + l_n$; Δl_i 为第*i*跨梁上纵桁的外伸长度, 第*i*跨梁上纵桁的长度等于 $l_i + \Delta l_i$ 。

3.2 形变参数关系式

笔者提出的柔性栈桥梁系的最大特点是其接船端在水平和垂向两个方向具有移动自由度。桥端的这种移动自由度的大小或桥面上下俯仰、左右偏转角度的大小与纵桁的外伸长度有关。在给定各个主横梁长度的条件下, 接船端最大横移距离由各跨梁的最大偏转角和纵桁的外伸长度共同确定。在各跨梁偏转角度保持相同的情况下, 有

$$\tan \alpha = \frac{\Delta y}{L} \quad (1)$$

当 α 达到最大值 α_{\max} 时, Δy 也达到最大值 Δy_{\max} 。此时, 需要的纵桁外伸长度为

$$\Delta l_i = \frac{l_i}{\cos \alpha_{\max}} - l_i \quad (2)$$

设栈桥梁面的俯仰角为 γ , γ 的最大值为 γ_{\max} 。

当同时考虑 γ_{\max} 和 Δy_{\max} 时, 有

$$\Delta l_i = \frac{l_i}{\cos \alpha_{\max} \cdot \cos \gamma_{\max}} - l_i \quad (3)$$

由式(1)可见, 若要求梁端横移距离大(适

应大船宽), 则允许的梁面最大偏转角也大; 而式(2)和(3)表明, 大的梁面偏转角和俯仰角要求大的纵桁外伸长度 Δl_i 。

为了使多跨梁构成的梁面具有“柔性”, 允许接续的两跨梁段或其纵桁具有不同的偏转角度, 其相对偏转角的最大值取决于这两跨梁连接处接续纵桁之间的距离, 或取决于支撑纵桁的滑动双支座上的两个支柱中心线之间的距离。例如, 设滑动双支座的两个支柱中心线之间的距离为*c*, 纵桁宽度为*b*, 各纵桁的外伸长度相等, 为 $\Delta l = \Delta l_i$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。对于 $\alpha_i = 0$, $\alpha_{i+1} \neq 0$, 即 $\beta_{i+1} = \alpha_{i+1}$ 的这种简单情况, 可以推导出关系式(4)。

$$\left(\Delta l + l_{i+1} - \frac{l_{i+1}}{\cos \alpha_{i+1}} \right) \sin \alpha_{i+1} + \frac{b}{2} (1 + \cos \alpha_{i+1}) \leq c \quad (4)$$

式(1)~(4)给出了柔性栈桥设计中, l_i , Δl_i , Δy , *c*, *b*, α , γ 等主要设计参数必须满足的关系式。对于 $\alpha_i \neq 0$, $\alpha_{i+1} \neq 0$, 以及当 Δl_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 不都相等的一般情况, 也可以推导出类似的关系式, 但其关系式形式会更加复杂一些。

4 结论

通过对铁路轮渡运输系统中现有船岸连接技术的分析, 提出了一种以纵桁和横梁通过活动铰接构成, 依靠升降、横移机构实现栈桥整体俯仰和偏转的船岸连接栈桥。这种新型柔性栈桥是一种铁路、公路两用栈桥, 能够彻底改善铁路轮渡运输系统中船桥之间的互相兼容性或通用性。

1) 多跨桥梁能够整体左右旋转一定角度, 即桥梁的纵向中线保持直线旋转一定角度, 也可以使各跨桥梁转角不同, 从而形成折线型桥面, 满足其上放置的柔性轨道的变形需要。支点越多, 或桥的跨数越多, 折线形状变化越多, 桥面折线线形也越趋于光滑。

2) 纵桁外伸长度和接续纵桁(在主横梁处)之间的距离是这种新型栈桥的重要设计参数, 桥梁的最大俯仰角度、偏转角度主要与纵桁外伸长度和接续纵桁之间的距离有关系。笔者给出的栈桥桥面形变参数理论计算公式可用于栈桥梁系的设计和性能分析。

3) 栈桥结构形式简单, 构件可标准化, 便于制造、安装与维修, 具有实用性和经济性。

目前, 对于这种新型连接栈桥的设计还处于理论和试验研究阶段。许多问题, 例如梁系中各种纵桁和横梁的最佳截面形状、连接形式、力学特性等尚需深入、详细地分析研究。此外, 对于这种柔性栈桥的移动变形控制、升降、横移机构设置方式、可能带来的联运系统经济效益等也是有待进一步研究的问题。

参考文献:

[1] Taylor N. Dover's smart bridge[J]. Journal of Systems and Control Engineering, 1992, 206 (11): 9-18.

[2] 蔡云标, 陈勇. 新长铁路轮渡栈桥活动钢桁梁设计特色[J]. 桥梁建设, 2006 (S2): 115-118.

[3] 刘长勇. 铁路轮渡栈桥跳板梁受扭问题的探讨[J]. 铁道建筑技术, 2005 (S1): 22-24.

[4] XIE Xin-lian. An integrated sea-land transportation systems model and its theory[J]. Transportation Research

Part C: Emerging Technologies, 2009, 17(4): 394-411.

[5] XIE Xin-lian, LI Meng, LIU Shi-yong, et al. On the flexible connection of rigid double-rail track[C]// Proceedings of the Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation(ICICTA), Volume 04. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2009: 581-585.

[6] XIE Xin-lian. A new design for a train ferry and ferry bridge[C]// Conference Proceedings of IMAM, Istanbul, Turkey, November 2 - 9, Volume I Section 5, 1997: 1-6.

[7] 谢新连, 张量, 王少成. 新型铁路柔性轨道弯曲变形量计算[J]. 铁道学报, 2003, 25(4): 31-34.

[8] 谢新连, 刘涛, 王少成, 等. 火车渡轮柔性轨道受力变形计算[J]. 船舶力学, 2007, 11(1): 88-93.

[9] 刘长和. 烟大轮渡铁路栈桥结构研究[J]. 铁道标准设计, 2010(4): 37-40.

[10] 李明刚. 烟大铁路轮渡栈桥钢梁的结构设计[J]. 钢结构, 2010, 25(5): 40-44.

(本文编辑 武亚庆)

《水运工程》优秀论文评选

评委点评:

铁路轮渡栈桥既要适应轨道坡度和曲率的要求, 又要适应潮位和船舶干舷变化的要求, 同时要解决对大型船舶以及不同船型的适应性, 技术复杂。文章提出了一种一端固定连接岸上, 另一端能够上下、左右移动, 从而连接来船不同部位, 便于车辆进出船舱的柔性或活动船岸连接栈桥构造方案, 设计构思独特, 方案新颖。

文章所提出的柔性栈桥横梁及纵桁等基本构造合理, 工作机理论述清晰, 并推导出栈桥活动端的横移距离、偏转角度、纵桁外伸长度等关键设计参数的函数关系, 对栈桥梁系设计和性能分析有较强指导意义。

关于栈桥移动变形控制、升降、横移机构设置等尚有待进一步深化。但可以预见, 这种新型柔性栈桥结构在铁路轮渡运输系统中将发挥其较好的实用性和经济性。

2012年12月

评委简介:

何文钦, 教高, 中交第四航务工程勘察设计院有限公司副总工程师。

交通运输部水运工程技术与标准专家库成员, 中国水运建设行业协会专家, 中交股份优秀技术专家和中国交通建设集团品牌员工。