

doi:10.11835/j.issn.1005-2909.2016.02.020

# 谈异型桥教学

李燕峰,袁万城

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室,上海 200092)

**摘要:**异型桥是当前城市桥梁建设的热门选择之一,并且是桥梁结构理论课程中的重要章节,因此为了对异型桥课程教学提供些许参考,文章从异型桥的分类、施工、设计等角度对其知识点进行了较细致的梳理,将异型桥和普通桥进行了简单的对比。最后分别立足于教、学两个角度对如何教好和学好本章知识进行了探讨。

**关键词:**异型桥;桥梁美学;教学

**中图分类号:**TU997;G642.0

**文献标志码:**A

**文章编号:**1005-2909(2016)02-0082-07

经过20世纪以来的大规模基础设施建设,桥梁建设获得了长足的发展,传统桥型从造型设计和施工工艺上都已经日趋完善。但是与此同时,不少设计方案出现了雷同的情况,甚至给人千篇一律的感觉,这不仅无法满足当今社会群众的审美需求,而且对技术创新而言更是一种退步。因此,对于桥梁设计者而言,如何进一步创新以满足大众日益挑剔的审美眼光是必须面对的问题。此外,随着计算机有限元计算方法的进步和新型施工技术与高强材料的应用,无论多复杂的桥梁结构形式都可能实现。正因如此,异型桥成了满足创新要求的不二选择。变化万千的异型桥结构形式,使桥梁结构再次迸发出新的活力。为了给异型桥教学工作的展开提供一定的参考和帮助,文章对异型桥的分类、结构特点等进行了较为详细的概括,希冀读者对异型桥产生系统性的认识。

## 一、异型桥教学内容

### (一)异型桥的分类

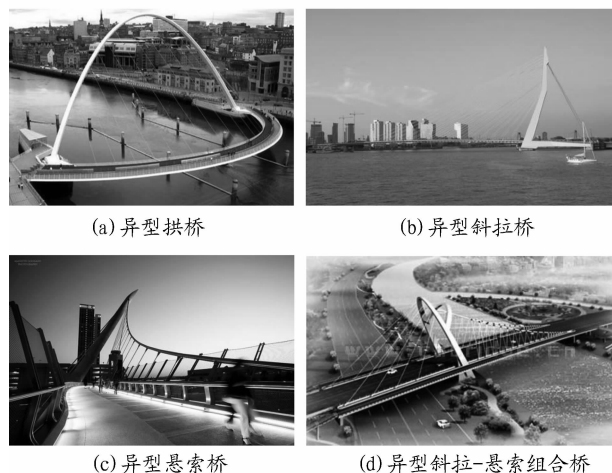
异型桥之名是相对于常规桥而言的,凡是主梁或者主塔以斜、弯设计代替直线设计,就可以认为是异型桥。异型桥的分类与普通桥型的分类是一致的,可以分为异型梁桥、异型拱桥、异型斜拉桥、异型悬索桥、异型组合桥等(图1)。其中,异型梁桥主要包括斜桥和弯桥,但是由于梁桥里面对这两种桥型多是单独研究,所以异型桥的研究对象也主要集中在其余桥型上(最主要的是异型拱桥和异型斜拉桥)。此外,还可以根据拱的形状、梁与塔的相对位置、支撑条件等将异型桥进一步细分为斜支撑拱桥、蝴蝶拱桥、无背索斜拉桥等<sup>[1]</sup>(图2)。

表1统计了自20世纪末以来国内外异型桥梁的部分建设成果,从中可以发现:1)绝大多数的异型桥梁跨径在300 m以下。2)建成年份多在20世纪90年代到21世纪初。这说明了当前异型桥的建设主要是以中小跨径为主,并且正处在建设的热门阶段。

收稿日期:2015-08-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51478339,51278376)

作者简介:李燕峰(1991-),男,同济大学土木工程防灾国家重点实验室硕士研究生,主要从事桥梁抗震研究,(E-mail)892682528@qq.com;通讯作者:袁万城(1962-),男,同济大学土木工程防灾国家重点实验室教授,博士,主要从事桥梁抗震与振动研究,(E-mail)yuan@tongji.edu.cn。



(a) 异型拱桥

(b) 异型斜拉桥

(c) 异型悬索桥

(d) 异型斜拉-悬索组合桥

图1 异型桥诸桥型图示

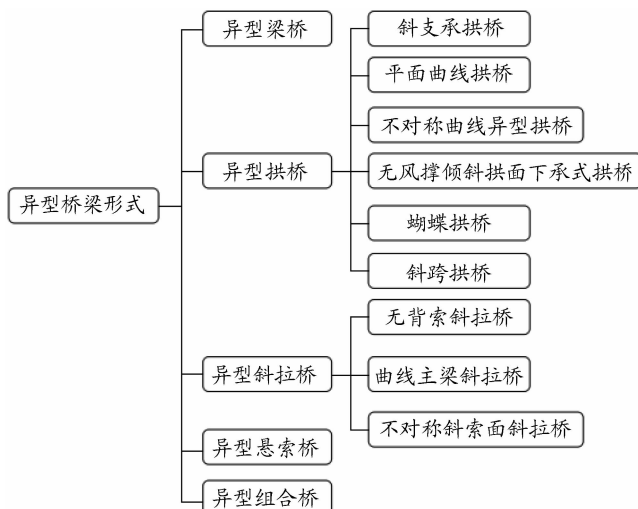


图2 异型桥的分类

表1 部分异型桥梁统计表

	序号	桥名	主跨(m)	桥址	建成年份
异型拱桥	1	东京大桥	75	开封(中国)	2014
	2	西大盈港桥	76.5	上海(中国)	2010
	3	太原南中环大桥	180	太原(中国)	2010
	4	南宁大桥	300	南宁(中国)	2009
	5	Endarlatsa Bridge	100	纳瓦拉(西班牙)	2009
	6	通泰大桥	190	张家口(中国)	2008
	7	Galindo River Bridge	110	巴斯克(西班牙)	2007
	8	Gateshead Millennium Bridge	105	伦敦(英国)	2001
	9	Pont de l'Europe Bridge	201.6	奥尔良(法国)	2000
	10	Hulme Arch Bridge	52	曼彻斯特(英国)	1997
	11	La Devesa Bridge	44	加泰罗尼亚(西班牙)	1991
异型斜拉桥	12	南京青奥文化体育公园步行桥	240	南京(中国)	2013
	13	洪山大桥	206	长沙(中国)	2004
	14	Sundial Bridge	128	加利福尼亚(美国)	2004
	15	Sail Bridge	70	威尔士(英国)	2003
	16	KumDang Bridge	160	Kwang Yang(韩国)	2002
	17	太阳桥	140	哈尔滨(中国)	2000
	18	Marian Bridge	123.3	Usti nad Labem(捷克)	1998
	19	Erasmus Bridge	284	鹿特丹(荷兰)	1996
异型悬索桥	20	Alamillo Bridge	200	塞维利亚(西班牙)	1992
	21	云蒙大桥	165	北京(中国)	2013
异型斜拉-悬索组合体系	22	Harbor Drive Pedestrian Bridge	54	圣地亚哥(美国)	2011
	23	龙岗大桥	162.5	汉中(中国)	2012
	24	京杭运河龙城大桥	113.8	常州(中国)	2008

## (二) 异型桥的结构形式与受力特点

异型桥在视觉感官上有两大特点,其一是“反重力”,在造型上会给人一种受力不稳的错觉,在拱肋和索塔倾斜时尤为明显。其二是“不规则”,结构的形式变化无端,或变宽,或变折,或变斜等奇形异状,由于打破了常规的对称、规则、齐整的布局方案,在

视觉上形成新颖、独特的美感,消除了视觉审美疲劳。

但是,由于结构设计一改传统普通桥型的经典思路,以非对称、变宽、弯曲、倾斜、复杂支撑、形状奇异为宗旨,造成了结构受力的复杂化。在受力上,异型桥不再与普通桥型相同,构件可能将承受非常复

杂的弯、剪、扭耦合作用,因此,构件截面的设计多以抗扭能力最好的箱型截面为主。以索塔和拱肋为例,当他们倾斜或弯曲之后,受力的空间性将使以承压为主的塔柱和拱圈的承载能力和稳定性大大降低,反过来还需要缆索和主梁或者配预应力筋来帮助

塔柱和拱圈保持稳定<sup>[2-4]</sup>。从这点上来看,传统的力学分析方法不再适用于异型桥,只能凭借强大的有限元模拟来获得构件的受力情况。根据各类异型桥的结构形式与受力特点,为保证结构的稳定性和平衡,设计时采取了很多复杂的构造措施(表2)。

表2 异型桥结构形式与受力特点一览表

桥名	结构形式与受力特点	所采取的措施
蝴蝶拱桥 (南宁大桥) 	拱肋、吊杆不对称,主梁在平曲线上跨径较大约 300 m。拱肋与铅垂面夹角一侧为 31.3°,另一侧为 33.5° 采用临时塔斜拉扣挂方法悬臂拼装,扣塔会对拱肋产生一定的水平力,横向稳定性较弱	主梁、拱肋均采用钢箱截面 在主梁水平面内布置与平曲线相反的体外预应力筋 施工过程中在两拱肋间设置钢绞线和钢管桁架压杆
平曲线拱桥 (Galindo River Bridge) 	拱轴线是一条空间曲线,拱脚存在水平夹角,使拱肋产生横向弯曲 若采用水平拉杆,主梁、拱肋会产生额外的扭矩	设置横向拉杆连接拱肋和桥面边缘 将主梁、拱肋截面全部设计成抗扭刚度大的箱型截面
异型拱桥 无风撑倾斜拱面下承式拱桥 (Gateshead Millennium Bridge) 	因为有通航要求,受力必须考虑开启和运营两种设计状态 拱肋倾角很大,主梁受吊杆水平力影响产生很大的横向弯矩 拱肋的承载能力降低,需要额外增大主梁的刚度承担荷载	主梁端部和拱脚固结,并设有可以滚动的滚轴 避免施工麻烦,采用临时纵梁扣住两拱脚的整体预制吊装方法 主梁设计成平面拱以承担横向弯矩,截面设计成箱型截面
斜跨拱桥 (通泰大桥) 	拱肋受到很大的横向弯矩,桥面受到平面内扭矩,可能产生桥面平转 拱肋横向稳定而非主梁自重控制吊杆张拉力,主梁将承受比普通下承式拱桥更大的弯矩 主梁在平曲线上,纵桥向的水平力可能不平衡	主梁支座两侧设置了导向挡块,限制主梁只能纵向伸缩 吊索成对布置,增大主梁截面,形成强梁弱拱 主梁、拱肋均采用箱型截面 在梁端远离拱脚角落处配置压重混凝土,防止支座脱空
无背索斜拉桥 (Alamillo Bridge) 	以恒载状态下主塔仅受轴力的控制条件,在活载作用下并不满足,主梁主塔都将产生很大的弯矩 同时无法采用平衡悬臂无支架施工 主梁在活载作用下刚度低,为了保证主塔的合力方向,主梁不宜过重	主梁采用钢混组合脊骨梁降低自重,增大主梁高度来加强刚度 采用满堂支架架架架,再张拉斜拉索脱架
异型斜拉桥		

续表

桥名	结构形式与受力特点	所采取的措施
曲线主梁斜拉桥	拉索产生水平分力,导致主梁产生横向弯曲,同时索塔也将承担弯矩作用 主梁的弯扭耦合效应无法完全抵消	塔柱布置预应力筋 调整塔柱和主梁的相对位置 设置横向锚索固定塔顶抵消部分水平力 主梁采用箱型截面
异型斜拉桥 不对称索面斜拉桥 (Sail Bridge)	拉索布置在一侧,桥面承担很大的扭矩和横向弯矩 主塔也将承担很大的弯矩	主梁采用闭口箱型截面,可能会采用不对称截面,主塔也采用钢箱截面 桥台设置竖向、横向、扭转约束
异型悬索桥	主塔倾斜 $30^{\circ}$ 主梁会因为单边吊索产生很大的扭矩 主梁会因为吊索的倾斜,产生横向弯矩	两根背索平衡主塔的侧倾弯矩 主梁截面采用不对称箱型截面 设置预应力筋平衡扭矩 桥面设计成曲线形式,抵消横向弯矩
京杭运河龙城大桥	索塔倾斜,索塔的刚度低,荷载主要由梁承担 索塔倾斜,斜拉索对主梁和主塔将产生不平衡的水平力	主梁采用箱型截面,梁高较一般斜拉桥要高 主梁形式采用结合梁与混凝土梁组合的方案,以保证水平力平衡

### (三) 异型桥施工方法选择

异型桥结构特点主要是弯、斜,所以在未成桥的时候,结构承载能力往往并不能达到要求,故施工方法多采用满堂支架施工。此外,为了减少现场施工的不可控因素,也为了减少造价,当全桥跨径较低的时候,有些异型桥也可以采用整体预制吊装的方法,如伦敦 Gateshead Millennium Bridge。当跨径过大又有通航需要的时候,有些拱桥采用临时塔加扣索的施工方法,如南宁大桥,当然还需要进一步增加横向系杆连接拱肋以保证结构的稳定,而斜拉-悬索体系的施工往往也采用先梁后塔方式,京杭运河龙城大桥即采用主梁支架现浇,钢主塔整体预制竖转的方案<sup>[5]</sup>。因

此,具体的施工方案需要结合实际情况分析。

### (四) 异型桥的设计流程

异型拱桥、异型斜拉桥的吊索面一般是倾斜的,不仅给拱肋和塔柱带来了横向的水平力,同时也给主梁带来了水平力和横向弯矩,这是异型桥与普通桥型最大的区别。如何降低拱、塔等的横向弯矩是这类桥梁设计时的重点关注对象。因此,在异型桥几何规划上需要进一步优化设计。

在确定了主梁和拱肋的截面形式和自重集度的情况下,理论上是可以找到无数个异型桥设计方案的,但在主梁、主拱或者索塔的弯矩最小控制条件下,往往设计方案选择范围就会缩小。一般的控制

设计先从纵断面入手,然后根据弯矩为零条件修改水平面内的布置形式<sup>[6]</sup>,其流程如图3所示。

表3 部分异型桥施工方法一览表

	序号	桥名	主跨/m	施工方法
异型拱桥	1	Gateshead Millennium Bridge	105	整体预制吊装
	2	南宁大桥	300	临时塔斜拉扣索悬臂拼装
	3	通泰大桥	190	满堂支架架设
	4	La Devesa Bridge	44	满堂支架架设
异型斜拉桥	5	Alamillo Bridge	200	满堂支架架设
	6	Sundial Bridge	128	悬臂拼装
	7	Sail Bridge	70	满堂支架架设
异型悬索桥	8	Harbor Drive Pedestrian Bridge	54	满堂支架架设
异型组合桥	9	京杭运河龙城大桥	113.8	主梁支架现浇、主塔整体预制

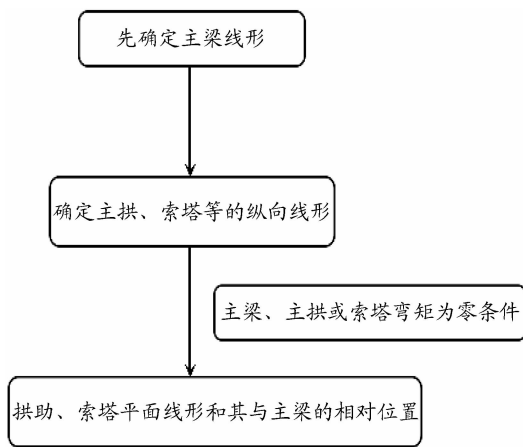


图3 一般异型桥控制设计流程

此外,拓扑优化<sup>[7]</sup>理论也为异型桥设计提供了一种参考思路。所谓拓扑优化,就是在单独荷载或多个荷载的作用下,寻求对材料的最佳使用方式,即造型的优化。材料的最充分使用在拓扑优化中代表的是最大刚度设计。从理论上讲,拓扑优化寻求最小材料使用率下最小化结构的变形能,并以此为目标控制设计。

#### (五) 异型桥与普通桥比较

异型桥作为一种新型桥型,在最近的20多年间得到了广泛的应用和发展,在提供一种桥梁方案新选择的同时,也需要我们对异型桥和同等跨径的普通桥之间的差异进行全面细致的对比。

(1) 异型桥的施工周期一般都较同类型跨径的普通桥型长,这主要是因为施工多采用整体支架现浇工艺,施工措施多。

(2) 异型桥构件受到较大的扭矩和横向弯矩,即便在设计上使恒载作用下结构受力横向弯矩或扭矩

为零,也会在动荷载作用下让结构承受很大的不利弯矩,因此会比同类普通桥型采用更多的补救措施来弥补。

(3) 由于是空间结构,异型桥很难采用传统的力学分析方法进行手算,而只能求助于有限元进行设计计算,这也是早期计算机技术未发展时,异型桥得不到推广应用的根本原因。

(4) 异型桥的造价颇高,以全桥长213 m,主跨128 m长的异型斜拉桥Sundial Bridge为例,当时的造价就高达2350万美元,是常规普通同等跨径的斜拉桥桥型方案的8倍,这也是为什么异型桥饱受争议的原因之一。但如果异型桥能在美学上提高城市魅力,贡献特有的文化价值,那么经济因素可适当让位于美学因素,如英国伦敦的盖茨黑德千禧桥。

(5) 从力学上讲,杆件只承受轴向拉压作用时功效比最高,但异型桥传力途径相较普通桥而言要复杂得多,构件除了承受轴力以外还将承受弯矩和扭矩,而弯矩和扭矩在一定程度上会降低构件功效比。

(6) 适用跨径方面,在同类桥型方面,异型桥的适用跨径比普通桥梁的要小得多,且适用桥型多以轻载或人行桥为主。

(7) 在城市小跨径桥梁建设方面,异型桥方案往往以突出的美学效果取胜,以本次伦敦旺兹沃思自治市公布的新泰晤士河人行桥设计方案来看,大部分的设计方案多以异型桥方案设计为主,如图4所示。异型桥造型新颖奇特,美学效果突出,在跨径较小,荷载较轻的情况下,竞争力非常强。在增加文化底蕴和美学特色上具有无可替代的优势。

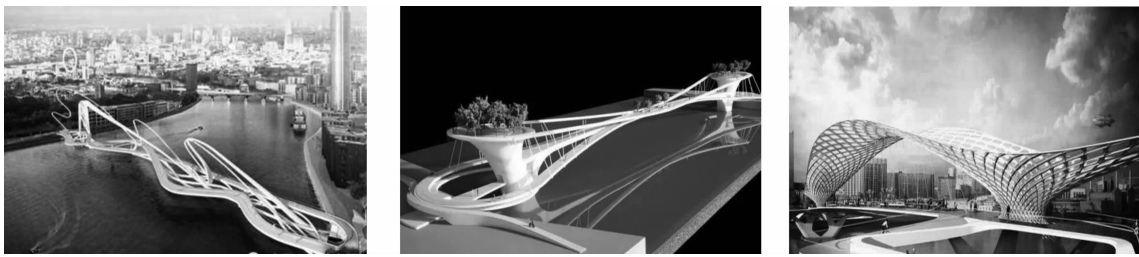


图4 伦敦旺兹沃思自治市公布的新泰晤士河人行桥的部分异型桥设计方案

## 二、异型桥教学探讨

### (一)把握异型桥教学的核心问题

异型桥作为当前城市桥梁建设的热门选择也才不过20年光景。至于为什么没有早期的异型桥呢?关于这个问题当然有多方面原因,计算能力不足固然是原因之一,但其实异型桥始终有两个矛盾存在:第一,异型桥结构形式异化导致的力学退化与桥梁承载需求之间的矛盾(力的问题);第二,经济性与美观性之间的矛盾(钱的问题)。

关于第一个矛盾,本质其实就是一个结构异化后的弯斜体系力学平衡问题,“异型”为的是造型上的新颖,为了追求形式上的突破以获取美学的感官效果,在结构形式上以弯、斜变化代替了过去普通桥的直线设计,从而造成受力方面承载能力上一定的退化,动荷载作用下受力性能不稳定等诸多局部因素后果,因此需要综合考虑施工和成桥状态下的力学稳定问题。

第二个矛盾主要是必须综合比对桥梁的价值,在普通桥梁设计中,按照“安全、经济、适用、美观、耐久”的准则,经济准则往往约束着结构的设计流程。一旦以美学为宗旨建立准则,则不可避免地会与经济性发生冲突。但是,如果美学价值极高的情况下,经济因素又得考虑退居其次,需要一番价值的取舍,综合比对考虑。

这两个矛盾始终贯穿异型桥的设计、施工、运营。因此,教学内容自然也应该围绕这两个矛盾展开。

### (二)寓教于学(教的角度)

课堂时间总是有限的。在有限的时间内,讲解的东西不宜过于艰涩难懂,且现在的教学方式多以快速简捷著称。因此,从教的角度出发,如何才能让学生在课堂上把握住重点就成为了关键。

(1)理论联系实际。鉴于本章在内容上是以案例分析为主,应该围绕着两个矛盾展开论述。一是需要结合具体异型桥案例进行分析,使学生掌握异

型桥在结构变异状态下,整体的受力变形情况。二是让学生懂得如何根据实际案例分析受力与经济之间的关系。

(2)掌握异型桥系统与细微之间的关系<sup>[8]</sup>。由于本章异型桥并没有繁琐的公式推导,但是有极为丰富的案例资料分析,所以从细的角度上来讲,是以分析案例为主,以此系统地让学生明白桥梁结构造型异化以后对结构受力、经济性的深远影响。

### (三)教学相长(学的角度)

学习的目的在于如何充分发挥学生的主观能动性和积极性。课堂时间终究是有限的,且在知识点上停留的时间并不充裕,这就需要学生在课堂之余花费更多的时间预习和复习。因此,学生所要做的就是课余时间按照教师在课上所指出的重点进一步加深理解和认识。学习是一个自我的探索和提升过程,仅靠在课堂上的学习永远都无法发现问题。尤其是在高等教育中,只有更加主动、积极地融入学习过程中,才能取得更好的回报与收获。从学习者的角度出发,如何才能在课余温故而知新,掌握住重点也就成为了学习的关键,亦即学要学到重点。这正是黄侃大师“术由师授,学自己成”<sup>[9]</sup>教学理念的精髓。

(1)自主学习的重要性。学习需要的是自主,“玉不琢,不成器”唯有刻苦学习,努力雕琢,不尚虚华,沉住心思,才能在学习上有所突破。对于本章而言,需要的是学生在课余时间去探索建立异型桥的有限元模型,按照弯矩最小或者变性能最小的原则,把握异型桥的设计流程,理解异型桥设计的本质是力学问题。而这个过程往往缺乏相应的资料与指导,需要学生自己去探索发现。

(2)学会对比分析获取信息。学习需要的是对比参照,异型桥和普通桥彼此对比,相互参照,就会明白结构异化对结构本身的受力、施工、经济性的影响。本章中有着大量的实例参考,可开拓视野,同时也可培养发散思维,明白在传统普通桥梁之外,还有

许多异型桥方案可供选择,且这些方案并不雷同,对创新而言尤为可贵。

### 三、结语

文章基于异型桥的研究现状,从分类、受力、施工、设计、与普通桥对比等方面总结出异型桥的以下特点。

(1)异型桥是一种伴随计算机有限元软件开发而兴起的新型桥型,现今大多数异型桥从20世纪90年代才开始建设。由于具有独特的美学效果,异型桥在小跨径、轻荷载的城市桥方案竞争上具有非常强的优势。

(2)受力方面,由于弯曲、倾斜造成构件不得不承受弯矩和扭矩,不仅降低了构件受力的功效比,同时也增大了结构的施工难度。即便在恒荷载作用下,以弯矩和扭矩最小为控制条件进行设计施工,结构也会在动荷载的作用下因为承担较大的不利荷载而打破上述平衡,所以往往还需要补救很多的后续措施。

(3)此外,施工周期长与难以进行现代桥梁的工业化施工也是异型桥的短处,这些因素导致异型桥造价高昂。因此,较小跨径的人行桥、以美学控制设计因素的城市桥可参考异型桥方案,但是对于大跨径的桥型而言,基本不采用异型桥设计。

(4)如果异型桥设计方案的文化、美学价值很高,则经济性和施工复杂性方面的考虑都必须做出一定的让步,因为艺术之美无价可言<sup>[10]</sup>,一如巴黎埃菲尔铁塔。

文章按照“寓教于学,教学相长”的思想理念,分别从教与学两个方面对异型桥章节的教学重点提出了一些建议和意见。异型桥尚处于研究初级阶段,在当前异型桥方兴未艾的情况下,希望在异型桥教学研究中能起到参考帮助的作用。

### 参考文献:

- [1] 项海帆,等. 高等桥梁结构理论[M]. 北京:人民交通出版社,2001.
- [2] 王玮瑶,李生智,陈科昌. 异型系杆拱桥[J]. 中国公路学报,1996,9(1):45-50.
- [3] 杨东升. 异型钢斜拉桥恒载合理索力探讨[D]. 西安:长安大学,2008.
- [4] 刘志权,阮欣,汪军. 曲线箱梁斜拉桥结构性能分析[C]//第二十届全国桥梁学术会议论文集. 北京:人民交通出版社,2012.
- [5] 马恒. 龙城大桥钢索塔竖转施工关键技术[J]. 现代交通技术,2008(3):50-53.
- [6] 苗丰田. 异型桥设计讨论[J]. 林业科技情报,1995(2):21-20.
- [7] 牛飞. 结构拓扑优化设计若干问题的建模、求解及解读[D]. 大连:大连理工大学,2013.
- [8] 刘韶军,高山. 论黄侃治学的系统精神[J]. 求索,2011(10):184-186.
- [9] 黄亚栋. 黄侃的治学思想及其对学生的影响[D]. 大连:辽宁师范大学,2013.
- [10] 邓文中. 美观何价[C]//第二十届全国桥梁学术会议论文集(上册),2012.

## Special-shaped bridge teaching

LI Yanfeng, YUAN Wancheng

(State Key Laboratory of Disaster Prevention in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

**Abstract:** The special-shaped bridge is one of the popular choices for urban bridge construction. It is an important part of advanced theory for bridge structure course. For offering a reference to the teaching of irregular bridge course, we researched on the knowledge of special-shaped bridge from classification, mechanics, construction, and design, compared the special-shaped bridge with the common bridge, and discussed about how to teach and learn special-shaped bridge well from angles of teachers and students.

**Keywords:** special-shaped bridge; aesthetics of bridges; teaching