

# 斜跨拱桥研究现状与展望

李川, 郑凯锋

(西南交通大学, 四川 成都 610031)

**摘要:**随着人们对桥梁审美的不断追求,在桥梁方案竞赛中涌现出较多新型结构形式桥梁,斜跨拱桥是近些年来发展起来具有代表性的异形拱桥之一,属于梁拱组合体系桥梁的空间组合形式。为对斜跨拱桥的设计建造提供参考,该文对该桥型研究现状进行了综述。首先统计了斜跨拱桥的应用现状,随后对斜跨拱桥的总体布置、合理成桥状态、稳定性、动力特性、锚固区设计和施工设计的研究成果进行介绍和总结。研究表明:斜跨拱桥的不对称设计带来的结构不对称受力影响突出,指出了斜跨拱桥设计建造中仍需进一步研究的问题,探讨了斜跨拱桥设计建造手段的发展趋势。

**关键词:**桥梁设计;斜跨拱桥;综述;参数化设计;建筑信息化

拱是一种独特的结构形式,它能清晰地表现出力流和美学的外观,采用钢结构设计的拱显得明快、通透,散发出现代桥梁建筑的独特魅力。随着桥梁美学理念的提升和景观要求的提高,设计师通过合理调整梁拱组合体系桥梁中拱肋和主梁的相对位置得到一些意想不到的梁拱组合结构形式,进而满足桥梁建设的

景观需求。斜跨拱桥是采取单片拱肋与主梁轴线斜交,拱脚分别落于主梁两端不同侧的梁拱组合体系桥梁,具有明显的结构不对称、空间受力,吊索布置容易受行车净空控制等特点,在设计和建造过程中有其特别注意和考究的地方。

荷载组合作用下,结构最小屈曲稳定系数为 21,结果表明:大桥具有足够的稳定性能。

根据以上计算结果可知:大桥各结构构件均能满足受力要求,设计方案可行。

## 4 结论

湿地公园大桥全桥用钢量为 2 900 t,约为 530 kg/m<sup>2</sup>。由于景观需求,该桥主、副拱跨度相差较大,主拱采用系杆拱、副拱采用推力拱的结构体系,在保证桥梁造型及受力合理的前提下,能较好地控制工程成本、有效解决软土地基中承式斜靠式拱桥的支撑问题,同时主、副拱吊杆两端锚固的细节处理方案,可为类似桥梁建设提供借鉴。该桥于 2018 年 7 月开工建设,2020 年建成通车。

## 参考文献:

[1] 肖汝诚,孙海涛,贾丽君,等. 昆山玉峰大桥——首座大跨

度无推力斜靠式拱桥的设计研究[J]. 土木工程学报, 2005(1).

[2] 李莹. 斜靠式梁拱组合体系桥梁设计理论研究[D]. 同济大学硕士学位论文, 2006.

[3] 陈淮,胡锋,申哲会,等. 斜靠式拱桥稳定性分析[J]. 福州大学学报, 2005(A1).

[4] 周阳,蒲黔辉,施洲,等. 混合梁斜拉桥钢-混结合段剪力连接件群力学性能研究[J]. 铁道学报, 2017(10).

[5] 姚亚东,杨永清,刘振标,等. 大跨度铁路钢箱梁混合斜拉桥钢混结合段模型试验研究[J]. 铁道学报, 2015(3).

[6] JTG/T D65-05-2015 公路悬索桥设计规范[S].

[7] 陈淮,胡锋,申哲会,等. 斜靠式拱桥动力特性分析[J]. 郑州大学学报, 2005(4).

[8] 阳霞. 斜靠式拱桥结构体系与稳定性分析[D]. 中南大学硕士学位论文, 2011.

[9] 张振伟,张伟. 飞燕式钢管混凝土系杆拱桥静动力特性分析[J]. 中外公路, 2019(1).

[10] 张国刚,刘传乐,张贵明. 某异形拱桥模态分析与有限元修正[J]. 中外公路, 2018(3).

# 1 斜跨拱桥发展概况

如图 1 所示,位于英国曼切斯特的休姆拱桥是世界上建造较早的斜跨拱桥之一,其灵感来源于美国圣路易斯拱门,桥梁造型设计为通往城市的大门,结构新颖,景观效应十分突出,获得多个建筑和结构设计奖项。国内外通过采用斜跨拱桥的结构形式实现了不同立意的景观桥梁设计,取得了良好的城市标志桥梁建设效果。如表 1 所示,统计了斜跨拱桥应用现状。斜跨拱桥的景观效应带来的不对称设计使其主要应用于

中小跨度公路市政桥梁和少数人行桥,目前尚未见铁路斜跨拱桥建设。



图 1 曼切斯特休姆拱桥

表 1 斜跨拱桥应用统计

序号	桥名	主跨/m	拱肋矢跨比	吊索布置	建成年份/年
1	韩国大田世博会大桥	70	1/2	交叉式	1993
2	英国休姆拱桥	50	1/2	分离式	1997
3	巴西 JK 总统大桥	240	1/3.87	交叉式	2002
4	英国博尔顿纽波特街桥	35	1/1.89	分离式	2005
5	英国爱丁堡 Gogarburn 桥	60	1/2.12	分离式	2006
6	英国克莱德拱桥	96	1/3.17	交叉式	2006
7	临沂蒙山大道沭河大桥	120	1/2	对锚式	2007
8	台北市彩虹人行桥	167	—	单索面	2007
9	张家口市通泰大桥	180	1/2.9	交叉式	2008
10	哈萨克斯坦阿斯塔纳桥	180	1/3	交叉式	2008
11	大连市红星大桥	100	1/3	交叉式	2009
12	月娘桥	60	1/2	对锚式	—
13	TeRewaRewa 人行桥	70	—	单索面	2010
14	合肥机场高速上跨桥	68	1/2.8	交叉式	2011
15	上海嘉定北水湾大桥	76	1/2	分离式	2013
16	太原市北中环桥主桥	90	1/1	分离式	2013
17	英国塔夫河城镇联络桥	40.9	1/2.21	分离式	2014
18	新北市汐止联络道桥	119	1/3.3	对锚式	2015
19	(35+60+35 m)斜跨拱桥	82	1/1.65	对锚式	—
20	迪拜运河人行拱桥	—	—	单索面	2016
21	新郑市创业路彩虹桥	60	1/2	对锚式	2016
22	新西兰亨顿人行桥	100	—	交叉式	2017
23	贵阳市图书馆人行桥	—	—	对锚式	2018
24	深圳市前海 11 号景观桥	50	—	对锚式	在建

注:“—”表示资料暂缺。

由于荷载轻,人行斜跨拱桥设计具有其灵活性和特殊性,具体可采用单索面和“S”形主梁,如台北市彩虹人行桥、迪拜运河人行拱桥和贵阳市图书馆人行桥。

或因抗风需求采用单索面刚性曲吊索,如新西兰 TeRewaRewa 人行桥,进而解决通行净空带来的索面布置问题。

## 2 斜跨拱桥总体布置

### 2.1 吊索布置

斜跨拱桥的吊索布置形式对拱肋和主梁的受力状态影响较大且需考虑对行车净空的限制,因此合理的吊索布置形式是斜跨拱桥设计中需要重点考虑的地方。目前斜跨拱桥的吊索布置形式主要分为分离式、交叉式和对锚式(图 2)。分离式采取将两个索面分别均匀锚固于拱肋左右两侧,在拱顶无交叉;交叉式采取将吊索均匀锚固于拱肋,在拱顶有交叉;对锚式采取吊索成对锚固于拱肋,由于行车净空限制,锚固点集中于拱肋顶部。

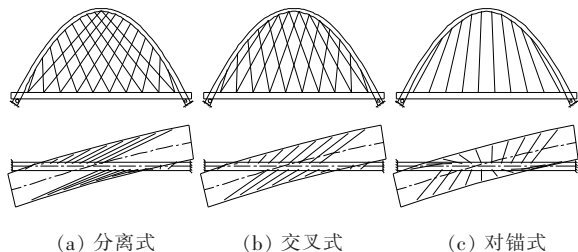


图 2 斜跨拱桥吊索布置形式

对斜跨拱桥的参数研究表明,交叉式较分离式布置形式的拱肋承受面外作用更小,结构受力较对称,材料利用率较高。但同样通行净空要求下,交叉式较分离式可用桥面宽度较小。目前分离式和交叉式斜跨拱桥拱肋跨度范围分别为 35~90 m 和 68~240 m,对锚式为 60~120 m。

### 2.2 拱肋设计

斜跨拱桥拱肋在跨度范围内单肋布置,普遍采取钢箱拱,截面形式包括矩形、菱形、圆形和多边形等,或为了进一步增强拱肋观赏性,采取以上截面的变截面形式。为保证设计净空,拱肋矢跨比设计经验值为  $1/1 \sim 1/3.87$ ,大于常规钢拱桥矢跨比  $1/4 \sim 1/5$ 。斜跨拱桥的合理拱轴是对拱肋承受的面内作用而言,这时分离式吊索布置由于面内作用荷载分布均匀,拱轴线相对流畅。对交叉式吊索布置的拱轴线推导表明,在拱脚无吊索区拱轴线曲率较小,在吊索集中区段拱轴线曲率较大,可采用抛物线进行拟合。

### 2.3 主梁设计

较小跨度斜跨拱桥,如统计中目前所有建于英国的斜跨拱桥,主梁常采取组合梁并设计外伸牛腿作梁上锚固结构,斜跨拱桥典型组合梁结构如爱丁堡 Gogarburn 桥(图 3)。较大跨度斜跨拱桥,如巴西 JK

总统大桥、张家口市通泰大桥和大连市红星大桥,由于需要较大抗扭刚度和抗风性能要求,采用带风嘴的钢箱梁。此外,中国部分斜跨拱桥主梁还采用混凝土连续梁,在保留斜跨拱桥造型的同时,荷载主要由主梁承担。



图 3 爱丁堡 Gogarburn 桥

由于吊索的空间布置导致拱肋同时受面外和面内作用,主梁同时受到弯矩、轴力和扭矩作用,受力状态复杂,主张采用刚性系杆刚性拱体系,使拱肋和主梁在竖向作用下协同受力。如图 4 所示,新北市汐止联络道桥采用刚性系杆刚性拱体系和对锚吊索布置形式,由于桥址限制,增设系杆将拱肋和主梁相连,减小拱脚水平推力 650 t,使得斜跨拱桥的结构形式更加接近系杆拱桥。

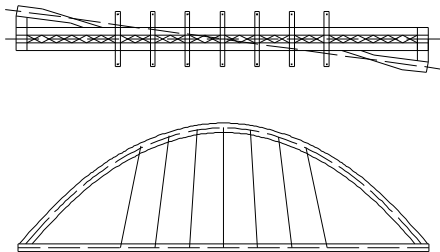


图 4 新北市汐止联络道桥

## 3 斜跨拱桥合理成桥状态

斜跨拱桥合理成桥状态关注拱、梁、索三大部分的受力,考虑的优化目标根据影响大小分为:拱肋面外弯矩、拱肋扭矩、主梁面内弯矩、主梁扭矩、拱顶横向位移、主梁竖向位移、索力均匀性和支座负反力。目前研究主要采取影响矩阵法或最小能量法,针对优化目标较多的问题,需结合实际设计对象研究确定优化方法实现合理成桥状态的求解。采取最小能量法时,主梁扭转应变能和主梁面内弯曲应变能应作为优化目标函数的重要组成部分。此外,通泰大桥长期运营后索力发生改变导致支座脱空、限位挡块压碎的问题说明大跨斜跨拱桥的主梁约束和限位应合理设置,但未见相

关研究报道。

## 4 斜跨拱桥稳定性

有关研究表明线性屈曲分析或仅考虑几何非线性会大幅高估斜跨拱桥的稳定性,其稳定计算需同时考虑几何和材料非线性。斜跨拱桥非保向力作用明显,但受到较大面外作用,因此其他面外作用包括横风荷载的影响不能忽略。1:25 缩尺模型试验说明现有空间杆系有限元计算满足斜跨拱桥设计需求。

目前对斜跨拱桥的稳定性研究主要以通泰大桥和红星大桥为研究对象。通泰大桥为强拱弱梁体系,其1阶失稳模态为面内和面外失稳形式的组合。改变拱肋面内刚度可有效提高整体稳定性。改变拱肋面外刚度也可提高稳定性,但达到一定程度后影响不大。矢跨比为1/2.5~1/3.3时,拱肋面内稳定性最优,矢跨比高于或低于最优值时,稳定性均会下降。改变主梁竖向刚度对稳定性提升不大。红星大桥1阶失稳模态为面外失稳,随满跨均布荷载的增大,拱肋的破坏始于拱肋 $L/6$ 和 $5L/6$ 截面的屈服,拱肋逐渐从无铰拱变为三铰拱,增加拱脚截面厚度,即局部加强拱脚可有效提高斜跨拱桥的极限承载能力。

## 5 斜跨拱桥动力特性

以通泰大桥为工程背景研究说明,在设计可能考虑的幅值范围内,斜跨拱桥的拱肋矢跨比、拱肋与主梁轴线夹角和主梁宽跨比不会明显改变斜跨拱桥自振形态,矢跨比对自振频率的影响相对较大,自振频率随矢跨比的增大而减小,抗震分析表明:竖向地震激励作用对结构内力和位移有较大影响,斜跨拱桥的抗震分析应严格按照相关抗震规范考虑竖向地震作用的影响。除改变刚度提高抗震性能外,采用铅芯橡胶支座和阻尼器等减隔震措施也可显著改善斜跨拱桥在地震作用下的受力状况。

## 6 斜跨拱桥锚固区设计

连接主梁和拱肋的吊索是主要传力构件,其在拱上和梁上的合理锚固构造是设计的关键环节。克莱德拱桥设计时考虑了吊索断裂的影响,但安装错位和不恰当钢材的选用导致索夹疲劳断裂事故,虽无人员伤亡,但对吊耳的更换工作导致交通中断近6个月。

梁上锚固构造设计可参照斜拉桥拉索锚固设计,目前钢箱梁斜拉桥索梁锚固结构常见连接形式有锚箱式、耳板式、锚管式与锚拉板连接4种。拱上锚固设计原理也可参照梁上锚固设计,出于景观考虑,拱肋锚固一般采取锚箱式连接和耳板式连接。锚箱连接的特点是构造复杂,设计应注意锚箱底板厚度取值、加劲板的合理布置以降低应力集中。耳板式连接特点是构造简单,但销孔处存在较大的应力集中,耳板需特殊处理采用高性能钢,以保证良好的抗疲劳性能。

## 7 斜跨拱桥施工设计

由于主梁和拱肋基本采取钢结构设计,斜跨拱桥通常采取节段预制施工现场拼接的施工方法。为方便拱肋拼接时支架搭接,通常采取先梁后拱的施工顺序。目前除巴西JK总统大桥采取钢箱梁顶推施工外,大部分斜跨拱桥主梁由于跨度较小基本采取支架施工,钢箱拱肋采取临时支架吊装拼接。

对通泰大桥的吊索张拉施工研究主要考虑张拉时主梁支座脱空和桥面纤维混凝土开裂两个因素的影响,最后采取在主梁支架拆除前,完成纤维混凝土分块铺装,从跨中至两边的顺序完成吊索初张拉,在完成纤维混凝土接缝浇筑和桥面铺装工作后调整索力至设计值。

## 8 结论

(1) 斜跨拱桥景观效果突出,拱肋受面外荷载作用效应明显,其研究工作主要为研究和降低结构不对称设计带来的结构受力不对称影响。目前以通泰大桥和红星大桥为工程背景对斜跨拱桥拱肋的基本受力性能、稳定性影响因素和动力特性开展了较多研究,新北市汐止联络道桥给出了斜跨拱桥的系杆拱结构实现方式。但对斜跨拱桥主梁合理的约束和支座限位形式研究还有待进一步开展。

(2) 斜跨拱桥基本采用钢结构的设计形式为其提供了较好的构件工厂化制造条件,但主梁受力条件复杂,吊索张拉可能带来的主梁支座脱空和桥面混凝土铺装开裂等问题,吊索张拉顺序和各阶段张拉力值设计工作需予以重视。

(3) 不对称布置带来了斜跨拱桥吊索每个锚固区都需单独设计的问题,可参照将有限元计算分析软件和计算机辅助制图引入桥梁设计领域的思路,继续将



航空和机械加工三维参数化设计理念引入桥梁设计,从而更加准确高效地进行以斜跨拱桥为代表的异形空间结构桥梁设计、结构分析和结构优化。此外,关于桥梁全寿命考虑,桥梁各阶段信息均保存于同一三维参数模型文件也有利于各阶段后期研究工作的进行,可在该方面继续开展深入研究。

## 参考文献:

- [1] 林同炎. 拱是结构也是建筑[J]. 土木工程学报, 1997(3).
- [2] 易云焜. 梁拱组合体系设计理论关键问题研究[D]. 同济大学博士学位论文, 2007.
- [3] 肖汝诚, 陈红, 魏乐永. 桥梁结构体系的研究、优化与创新[J]. 土木工程学报, 2008(6).
- [4] Warren L B. A Critical Analysis of the Hulme Arch Bridge, Manchester[C]. Proceedings of Bridge Engineering Conference, 2009.
- [5] Mulqueen, Charles P. Creating the TeRawaRawa Bridge, New Zealand[J]. Structural Engineering International, 2011, 21(4): 486—491.
- [6] Peng X, Wang X N, Gui X. 3D Finite Element Analysis of Single Span Special—Shape Arch Bridge with Diagonal Crossing Arch Rib and Curved Girder[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 63—64: 915—918.
- [7] 方诗圣, 王文洋, 顾颖, 等. 基于正交试验设计与功效系数法的斜跨拱桥优化设计[J]. 中外公路, 2015(3).
- [8] Pieter VandeWalle, Skew Placement of Arches for Single Span Road Bridges[D]. Ghent: Ghent University, 2017.
- [9] 金立新, 潘盛山, 郭慧乾, 等. 国内外对角斜跨拱桥的设计与施工[J]. 公路, 2011(9).
- [10] 陈宝春, 陈康明, 赵秋. 中国钢拱桥发展现状调查与分析[J]. 中外公路, 2011(2).
- [11] 周朋. 斜跨拱桥结构静力性能研究[D]. 大连理工大学博士学位论文, 2013.
- [12] Xun J C, Zhao Q, Gao H J. Experimental Study on the Wind Stability of Tongtai Bridge[C]. 2016 5th International Conference on Civil, Architectural and Hydraulic Engineering (ICCAHE 2016). Atlantis Press, 2016.
- [13] 吴学华, 潘盛山, 黄才良. 斜跨拱桥的力学特性及工程实践[J]. 公路, 2009(10).
- [14] 张志斌, 温俊明, 张容慈, 等. 大跨径单斜拱肋钢拱桥之应用——以汐止联络道桥为例[J]. 技师期刊, 2016(75).
- [15] 李斐然, 石磊, 张哲. 弯梁斜跨拱桥合理恒载状态研究[J]. 计算力学学报, 2010(5).
- [16] 梁栋, 马金龙, 刘志强, 等. 拱、弯梁与索空间组合桥梁的成桥调索方法[J]. 公路交通科技, 2016(8).
- [17] Huang H, Liu B, Zang Y, et al. Optimum Analysis of Suspenders Tensioning through Skewed Arch Bridge with Curved Beam[M]. ICCTP 2010: Integrated Transportation Systems: Green, Intelligent, Reliable, 2010.
- [18] 荀敬川. 空间梁拱组合桥安全分析及控制研究[D]. 长安大学博士学位论文, 2017.
- [19] 王会利, 葛晓萌, 张勇, 等. 基于纤维单元的斜跨异型拱桥极限承载力分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2012(2).
- [20] Qiu W L, Kao C S, Kou C H, et al. Stability Analysis of Special—Shape Arch Bridge [J]. Tamkang Journal of Science and Engineering, 2010, 13(4): 365—373.
- [21] 王善巍, 潘盛山, 张哲. 钢箱斜跨拱桥的稳定分析[J]. 北方交通, 2010(1).
- [22] 王会利, 秦泗凤, 张哲, 等. 斜跨异型拱桥的设计与分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2012(6).
- [23] 吴阳, 潘盛山, 张哲. 单肋对角斜跨拱桥受力性能分析[J]. 中外公路, 2013(1).
- [24] 阳治群. 异型拱桥自振特性影响因素分析[J]. 湖南交通科技, 2017(2).
- [25] 苗峰, 张哲, 李斐然. 下承式曲线梁斜交拱桥动力特性分析[J]. 工业建筑, 2009(S1).
- [26] 曹新奎, 郝翠. 采用铅芯橡胶支座的斜跨拱桥抗震性能分析[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版), 2012(4).
- [27] 尹锦明, 田涛, 王永. 强震后铅芯橡胶支座在简支梁桥恢复重建中的应用[J]. 中外公路, 2016(1).
- [28] Apostolidis C. A Critical Analysis of the Clyde Arc Bridge, Glasgow, UK [C]. Proceedings of Bridge Engineering 2 Conference 2011, 2011.
- [29] 李小珍, 蔡婧, 强士中. 大跨度钢箱梁斜拉桥索梁锚固结构型式的比较[J]. 工程力学, 2004(6).
- [30] 杜闯, 张彩利, 卿龙邦. 异型拱桥索梁索拱锚固区受力分析[J]. 铁道建筑, 2014(9).
- [31] Bailey C. A Critical Analysis of the Design and Construction of the Juscelino Kubitschek Bridge[C]. Proceedings of Bridge Engineering Conference, 2007.
- [32] 郑凯锋, 唐继舜, 王应良. 钢桥全桥全壳单元模型的空间计算方法[J]. 铁道工程学报, 1997(2).
- [33] 孙辉, 李雍友, 程振庭, 等. 基于 CATIA—BIM 的钢结构加工技术在桥梁工程中的应用[J]. 中外公路, 2019(1).
- [34] 李健刚, 杨冰, 许志宏, 等. BIM 技术在永定河特大桥项目中的参数化应用[J]. 土木建筑工程信息技术, 2018(3).