

拱塔斜拉桥不同拱轴线形的力学特点分析

马文刚, 陈立, 朱玉琴, 胡世翔

(南京工程学院 土木工程与智慧管理研究所, 江苏 南京 211167)

摘要: 拱塔斜拉桥兼具斜拉桥和拱桥的特点,其优美的造型很好地满足了桥梁设计对于美学的要求,使其往往成为城市的地标性建筑。现以拱塔斜拉桥的发展历史为依据,总结了国内外该类桥梁的设计、建造情况。以此为基础,分析了不同拱轴线形对拱塔斜拉桥的桥面布置、拱塔受力的影响,从而得到了各类拱轴线形的优、缺点及力学特点。该结论可为拱塔斜拉桥的设计和后期维护提供一定参考。

关键词: 拱塔斜拉桥;拱轴线形;力学特点;景观效果

中图分类号: U441+.5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)01-0067-06

0 引言

拱塔斜拉桥结合了斜拉桥和拱结构的特点,不仅体现了拱桥的优美,而且极易融入自然环境而成为自然景色中的一环;同时也展现了斜拉桥的纤细、适应性强的特点。拱塔斜拉桥以其宽幅路面可适应城市大通行量的需求;索面适应性强,依据需要可以设置为单索面形式、双索面形式,甚至可以考虑三索面或空间“双翼”的索面形式;借助其横向布置的拱形索塔,不仅可为小角度跨线桥提供很好的解决方案,同时解决了城市桥梁中常用的门式刚架墩景观效果不佳的问题。因此,国内外已建成和正在建设中的拱塔斜拉桥不在少数;线形各异的拱塔斜拉桥表现出设计者不同的美学考虑和不同的受力特性。

1 拱塔斜拉桥的发展及现状

拱塔斜拉桥首次出现在公众视野始于1996年修建于日本羽田机场的Haneda SkyArch拱塔斜拉桥(见图1)。该桥用于连接机场原有设施和后扩建的部分,不仅要求该桥具有地标性功能,同时由于地处机场周围,对建筑高度有严格要求^[1]。该桥的拱塔上低位斜拉索锚固于主梁远端,高位斜拉索锚固于主梁近塔区,形成了空间螺旋形索面,景观效果甚

好。之后于1997年,日本在位于山区的自然保护区修建了秀美美术馆(Miho Museum),此馆正门面临峡谷^[2];设计者巧妙地使用了拱塔斜拉的结构形式,既畅通了道路,又为美术馆增添了一道亮丽之门。



图1 Haneda Skyarch Bridge

1997年竣工的日本MIHO museum桥(见图2),全长120 m,桥宽7.5 m,用于人行和小汽车通行,一端连接200 m长的隧道,另一端连接博物馆。主拱塔竖向高19 m,倾斜30°。得益于当地优良的岩层,斜拉索的一端锚固于主梁上,另一端则锚固于隧道洞口处。此桥因完美地与周围环境融合而备受关注,并获得2002年国际桥梁及结构工程协会颁发的“杰出结构大奖”。



图2 MIHO Museum Bridge

收稿日期: 2022-03-11

基金项目: 南京工程学院校级科研基金项目(YKJ201984, YKJ201984); 江苏省高等学校自然科学研究面上项目(20KJB580002)

作者简介: 马文刚(1980—),男,工学博士,讲师,从事土木工程专业教学工作。

进入新世纪后,拱塔斜拉桥得到了迅猛的发展。不同的设计者,基于不同的周围环境及美学考虑,采用不同的拱塔线形,使得拱塔斜拉桥呈现丰富多彩的景观效果。

意大利都灵人行桥(Turin Footbridge,见图3)是为2006年冬奥会所建^[2]。该桥全长369 m,最大跨径150 m,桥面宽4 m,主塔是3 m边长的三角形截面;连接奥运村一侧的8对直径75 mm的斜拉索分别锚固于支撑主梁的墩柱上,实现对拱塔的支撑;主跨侧8对直径55 mm的斜拉索锚固于主梁,支撑主跨跨越铁路,在靠近主塔塔基位置还布置了部分非成对的斜拉索。



图3 Turin Footbridge

位于美国达拉斯市的玛格丽特·亨特·希尔桥(Margaret Hunt Hill Bridge,见图4),始建于2006年春季,并于2012年3月2日通车^[3]。此桥全长570 m,主跨365 m,桥塔高122 m,斜拉索采用了空间的“双翼”索面,共设置29对斜拉索。大桥拱式桥塔、蛛网型拉索,别出心裁的构件在同一座桥梁中相互联系、共同作用,空间形象新颖独特,虚实相映,力线简捷流畅。



图4 MHH Bridge

意大利雷焦艾米利亚省的I Ponti di Calatrava bridge 1,2,3号桥(见图5),连接米兰和博洛尼亚的高速公路,共三座桥,中间是一座主跨跨径221 m的双向四车道的拱桥,两侧是两座相同的拱塔斜拉桥,塔高68.8 m,桥梁总长179 m,对称布置;桥面宽

13.6 m,双向两车道;26对斜拉索锚固于主梁中央^[4]。该桥于2007年10月20日正式通车。



图5 I Ponti di Calatrava bridge

巴西里约市为了将中心与2016年夏季奥运会的奥林匹克公园和奥运村连接所修建的运河桥(见图6),也是采用拱塔斜拉桥的形式,景观效果甚佳;圣保罗市也在修建一座类似的拱塔斜拉桥^[5],于2020年通车。



图6 运河桥

国内首次建造的拱塔斜拉桥则是位于沈阳的三好桥(见图7),跨径布置为(35+2×100+35)m,主桥宽34 m,引桥及引道宽32 m,双向六车道。主桥桥塔为单塔双斜拱结构,单片拱肋为曲线,局部为直线段^[6]。拱塔、主梁、吊索组成的空间几何图形使结构立体感强,与周边环境交相辉映、浑然一体,具有良好的景观效果。与之类似的还有延吉的天池大桥,江苏通州的世纪大桥等。



图7 沈阳三好桥

台江大桥位于福建省三明市,2010年11月通车运营,主桥采用(50+60+110+110+60+50)m的跨径布置,双向4车道,两侧人行道各宽2.5 m;塔高82.2 m,全桥共32对斜拉索,2对对拉索,1根竖向

索。该桥采用钢拱塔斜拉桥方案,其拱塔造型别致;通过巧妙的设置 Y 形组合索,使得拱塔的水平推力得以平衡。拉索布置采用由上而下,由近而远的“双翼形索面”形式,与拱塔、Y 形组合索形成了极具美感的动态,如图 8 所示。

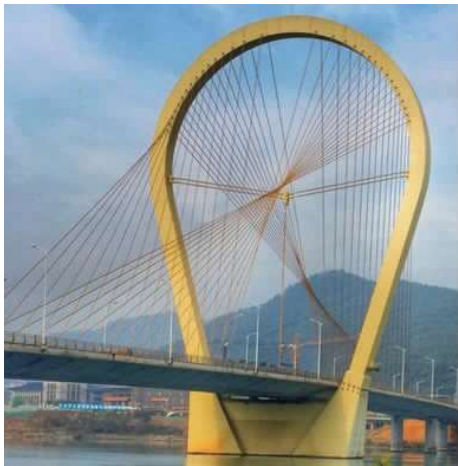


图 8 台江大桥

西安灞河一号桥(见图 9)建成于 2008 年,主桥结构形式为独塔半飘浮体系斜拉桥^[7]。其跨径布置为 145 m+48 m+42 m。拱塔高 78 m,倾角 75°,主塔上拉索间距 2.5 ~ 3.8 m,主跨索距 6 m,边跨索距 3.8 m;主梁采用钢梁与预应力混凝土梁的混合梁结构。



图 9 西安灞河一号桥

2009 年建成的江苏省宜兴荆邑大桥(见图 10),主桥采用双套拱拱塔斜拉桥,跨径布置为(28+39+106)m^[8]。主塔高 73.6 m,倾角 8°,副塔高 61.7 m,倾角 17°,主、副塔之间用钢拉杆连接;全桥共设 16 对斜拉索,主跨钢箱梁上索距为 9 m,边跨预应力混凝土箱梁上索距为 6 m,拱塔上索距 2.2 ~ 2.6 m;钢箱梁侧桥面顶板宽 51 m,底板宽 45.5 m^[9]。与此结构体系类似的有位于锦州市的小凌河大桥。

随着建设经验的积累和新材料的应用,拱塔斜拉桥得以进一步发展:马鞍山长江大桥右汉桥^[10]主桥采用(37+83+2×260+83+37)m 的三塔双索面半漂浮体系(见图 11,2013 年),椭圆形拱塔,两边塔桥面以上高 61 m,中塔高 76 m;常益长高铁沅江特大桥^[11]为世界首座高速铁路拱塔斜拉桥(见图 12,2022



图 10 荆邑大桥

年);山东聊城兴华路跨徒骇河大桥(2022 年)采用 4 根 CFRP 斜拉索及 UHPC 混凝土铺装;南京的花山大桥(2021 年通车)则采用纵向拱塔^[12],整体呈现“心”形拱塔造型,景观效果甚佳。



图 11 马鞍山长江大桥右汉桥



图 12 沅江特大桥

2 拱轴线形及其力学特点

总结目前已建成的国内外拱塔斜拉桥的相关信息可以发现,其拱轴线主要可分为四类:即圆弧形、抛物线形、椭圆形、圆弧或抛物线加直线段。不同的拱轴线性致使其受力特性差异明显,文献[13]对拱轴线性进行优化求解;已建成的拱塔斜拉桥以椭圆形拱塔居多。

2.1 圆弧形拱塔

圆弧形拱塔斜拉桥,以已建成的日本羽田机场的 Haneda skyarch 桥为代表。该桥拱脚间距 160 m,拱塔矢高 44.5 m,跨径布置为(75.7+27.7)m;同时,该桥斜拉索采用不对称布设。如图 13 所示,图中左侧显示为跨径较大一侧布设 9 根斜拉索,图中右侧显示为跨径较小一侧布设 5 根斜拉索;两个中心线

相距 80 m 的行车道悬吊于拱塔之下。

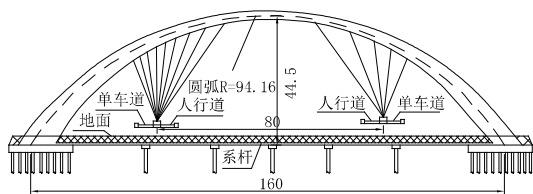


图 13 日本羽田机场 Haneda skyarch 桥

由 Haneda skyarch 拱塔斜拉桥的设计和应用可看出,以圆弧形形做拱塔,两拱脚间距必定远大于桥面宽度,如果两拱脚之间距离与主梁宽度较接近,则一方面主梁外侧靠近拱塔处的桥面净空不足(拱塔影响桥面净空),另一方面不管是单索面还是双索面,都会存在拉索与主梁锚固区桥面净空不足的问题(斜拉索影响桥面净空);如果拱的跨度较大,且桥面荷载较大,势必造成拱结构的截面尺寸较大;另外,为了平衡拱脚的水平力,横穿与拱底的系杆的工程也相应增加。

因此,对于圆弧形形的拱塔仅适用于对景观有一定要求,但荷载较轻的情况,比如景区、机场等;同时,相同的宽度,拱的矢高可以较小,这对于机场等对建筑高度要求比较严格的场地而言非常有利。

2.2 抛物线形拱塔

抛物线形拱塔斜拉桥在实际工程中也有应用。中国台湾的猫罗溪大桥、乌日大桥,日本的 Miho Museum 桥,以及俄罗斯 Zhivopisny 桥都采用抛物线形拱塔。

相对于圆弧形形拱塔斜拉桥,抛物线形拱塔线形变化空间更大;可以通过改变抛物线的线形来适应实际工程的需要。分析已建成的几座抛物线形拱塔斜拉桥可以发现,如果采用较坦的抛物线也会存在类似圆弧拱的桥面净空不能充分利用的问题。台湾的猫罗溪大桥采用拱塔横跨两幅桥的布置形式,同时,斜拉索只是在拱塔四个点沿高度布置,很好地解决了斜拉索沿拱塔布置对桥面净空的影响问题。乌日大桥则采用高次抛物线在不增大拱脚间距的情况下解决拉索对桥面净空的影响。

同样是采用抛物线形的日本 Miho Museum 拱塔斜拉桥,在无索区采用宽度为 7.5 m 的三角形截面,在索区顶板挑出的悬臂上锚固斜拉索,以一根索将两斜拉索锚固点及梁底相连。如此处理可以增加桥面净空,减小斜拉索对桥面的影响,同时,该桥采用将拱塔向主跨侧倾斜,增大斜拉索与桥面间夹角,减小拉索对桥面净空的影响。

俄罗斯 Zhivopisny 桥(见图 14)亦采用二次抛物线拱塔,桥面宽 44 m,拱脚间距为 138 m,塔高 102 m;将拱脚设置在河两岸,既不影响桥下通航,也可以有效地减少基础工程的造价。



图 14 俄罗斯 Zhivopisny 桥

通过以上分析可以看出,采用抛物线形拱轴线存在一定的局限性,对于塔高较低,且拱脚间距较小的情况,会存在桥面净空不足的问题;如果采用高次抛物线,当主梁截面增大时,塔高急剧增大;当拱脚之间距离远大于主梁截面时,二次抛物线是不错的选择,在满足工程需要的同时也提升了桥梁结构的景观效果。

2.3 椭圆形拱塔

椭圆形拱轴线是已建成拱塔斜拉桥中应用最多的形式,特别是最近几年建成的拱塔斜拉桥,基本都采用椭圆形拱轴线。

椭圆线是一种合理且适应性比较强的拱轴线。以荆邑大桥拱塔间距及塔高为依据,给出了抛物线与椭圆线的对比(见图 15);从图中可以看出,相对于抛物线而言,椭圆线与桥面间夹角更大,这使得椭圆线拱塔可以不考虑斜拉索对桥面净空的影响;而且,采用椭圆形拱塔时,斜拉索一般会从距离塔顶一定距离开始锚固,这样的布置方式一方面使索对桥面不会产生任何影响,另一方面,斜拉索与桥面夹角增大,有助于减小拱脚的水平力。

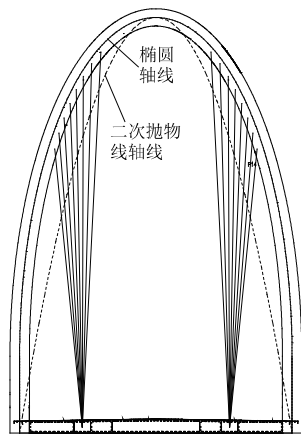


图 15 椭圆与抛物线对比图

2.4 曲线(抛物线或圆弧)+直线形拱塔

曲线+直线形拱轴线在已建成的拱塔斜拉桥中也有采用。根据直线段的倾斜角度不同,可将其分为曲线+内倾直线和曲线+外倾直线的形式。

曲线+内倾直线的拱轴线形式根据斜拉索的布索方式不同,可分为斜拉索布置在曲线段和斜拉索在曲线段、过渡段及直线段均有的多种布置形式。斜拉索的布置方式不同,使得看似外形相同的拱塔受力完全不同。

如图 16 所示沈阳三好桥采用了长轴平行于横桥向的椭圆线+过渡段+直线段的形式;双索面支撑主梁,斜拉索对称的布置于椭圆长轴两侧,如此布置拉索,使得拱脚位置的水平分力得以平衡,如图所示,索力 F_1 – F_{10} 沿 X 方向的分力使得椭圆段端部的水平力 F_c 得以平衡;但就结构整体受力而言,在活载作用下,椭圆形无索区不再是受压而主要是受弯,高于索力 F_1 作用点的椭圆段无外荷载作用。由此看来,此类拱轴线形未能发挥拱受压的优势。

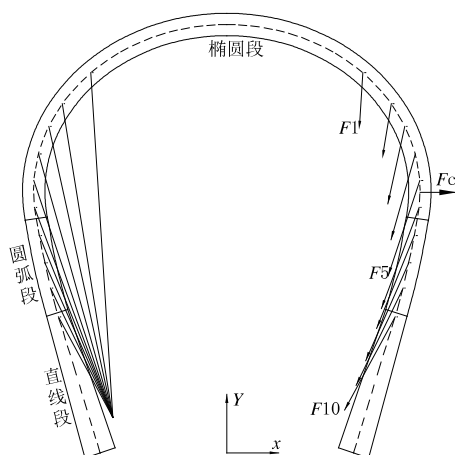


图 16 三好桥拱轴线及受力示意图

图 17 所示三明台江大桥,拱塔外形看似与三好桥相似,但受力完全不同。这主要由其索的布置形式确定。三明台江大桥斜拉索采用了非传统的索力布置方式,即采用了将高位的拉索锚固在近塔主梁中心线,低位的斜拉索锚固在远塔的主梁中心线,形成“双翼形索面”。如果采用此类布索方式将斜拉索沿拱塔高度依次布置势必出现低位斜拉索影响桥面净空的问题。要解决该问题,一种方法是增加塔高,另外一种方法则是将斜拉索锚固在塔顶。

三明台江大桥采用了后一种方式,即拱塔采用圆弧形,使斜拉索尽量锚固在高位;同时,为了减小基础工程,需要拱塔在与主梁相交的位置尽量靠近主梁,因此采用了内倾的过渡段+直线段。如此布置

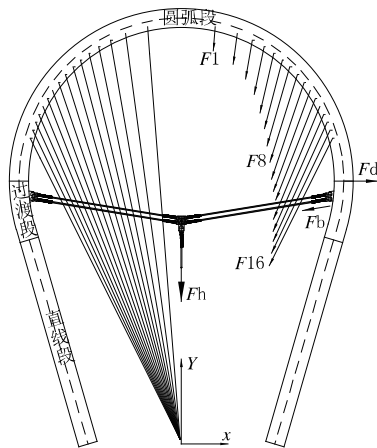


图 17 台江桥拱轴线及受力示意图

拱塔及斜拉索可使圆弧拱在荷载作用下充分发挥拱受压的优势,但由于内倾的过渡段及直线段使得圆弧线在拱脚位置的水平力无法平衡,如图所示,在 F_1 – F_{16} 索力沿 Y 方向分力的作用下,在圆弧端部产生沿 X 方向的水平力 F_d ,而索力沿 X 方向的分力不足以平衡此水平力,加之该拱塔采用内倾的直线段,更加大了水平力 F_d ,因此,三明台江大桥在圆弧线两端设置横向拉索,提供了一个几乎与 F_d 反方向的平衡力 F_b ,且通过竖向拉索将横向拉索与主梁相连,通过调节竖向索力 F_h 实现调整 F_b 的大小,进而使圆弧线两端水平力得以平衡。

图 18 为美国 Margaret Hunt Hill Bridge 拱轴线示意图。该桥拱轴线采用抛物线+外倾直线段的形式;修建于意大利雷焦艾米利亚的 Santiago Calatrava Bridge 桥亦采用类此拱轴线形,该桥拱轴线采用椭圆线+外倾直线段的形式;虽然曲线形式不同,但受力形式及设计目的相同。这两座桥梁都采用了与三明台江大桥相同的布索形式,如果拱塔较矮,则同样存在低位的斜拉索影响桥面净空的问题,所以需要将拱塔加高,一方面可以满足净空需求,另外也可以满足美学需求。采用曲线+外倾直线段的形式,直线段提供的轴向力 F_g 沿 X 方向的分力使得曲线端部的水平分力 F_e 得以平衡,同时,在不影响桥梁景观的前提下便于施工。

3 结论

通过对国内外已建和在建的各型拱塔斜拉桥的详细分析可知:

(1) 拱塔斜拉桥以其优美的造型、宽幅桥面,以及很好地解决小角度相交问题等特点,在满足城市交通需求的同时也使其成为城市一道靓丽的风景。

(2) 单独使用圆弧形和抛物线做拱轴线,会存在

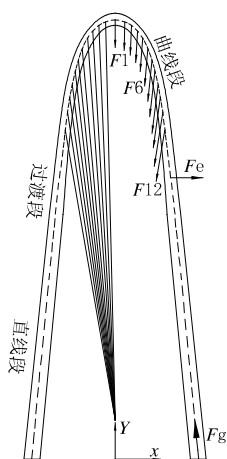


图 18 MHH bridge 拱轴线及受力示意图

影响桥面布置等问题,而致使其应用存在一定的限制,需要采取一定的措施改进;通过对比分析各种拱轴线发现,实际应用较多的椭圆形拱轴线是一种比较理想的拱轴线形。

(3)曲线+内倾直线段的轴线形式在受力方面存在不尽合理之处,需要采取措施解决受力不平衡的问题;曲线+外倾直线段的拱轴线形式也不失为一种可推荐的拱塔轴线形式。

拱塔斜拉以其优美的造型、千变的拱塔形式,在满足城市交通需求同时成为城市的地标建筑。随着对该类桥梁研究工作的深入和建设经验的积累,拱塔斜拉桥将不仅仅适用于城市的中、小跨桥梁,也必将公路、铁路等大跨度桥梁中得以应用。

参考文献:

- [1] MASAKI SHIOMI, YOSHIO NAKAMURA. Aesthetic Design of Haneda Sky Arch[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1996(1549):35-41
- [2] Klaus Idelberger. The world of footbridges—from the utilitarian to the Spectacular[M]. Ernst&Sohn GmbH& Co. KG, 2011
- [3] Scott Lomax, Charles E. Quade. Margaret Hunt Hill (Woodall Rodgers) Bridge[C]. Structures 2009: Don't Mess with Structural Engineers @ASCE, 2009. 164-173
- [4] Stefania Palaoro. Arch Bridge: design-construction - perception[D]. University of Trento, PHD, 2011
- [5] 张妮.巴西圣保罗一座拱形塔斜拉桥[J].世界桥梁,2021,49(4):118-119.
- [6] 王昕.沈阳三好斜拉桥主桥钢拱塔竖转施工技术[J].公路,2009(2):6-8
- [7] 张国泉,戴少雄.独塔斜拉桥钢混结合段应力分析[J].结构工程师,2007,23(3):26-30
- [8] Ma Wen-gang, Huang Qiao, Chen Xiao-qiang, Ren Yuan. Mechanical Performance Evaluation of a New Type of Cable-Stayed Beam-Arch Combination Bridge based on Field Tests[J]. 2012, 28(1):64-72
- [9] 马文刚.拱塔斜拉桥力学特性及若干问题研究[D].东南大学,2014.
- [10] 杨善红,徐宏光,梅应华,等.马鞍山长江大桥右汊主桥拱形塔斜拉桥设计创意[J].公路交通科技,2009,53(5):191-193
- [11] 张乃乐,李海泉.常益长铁路沅江特大桥(32+90+90+32)m 拱塔斜拉桥总体设计[J].铁道标准设计,2021,65(12):69-73.
- [12] 刘厚军,郑国富,陆勤丰.南京花山大桥主桥设计[J].桥梁建设,2020,50(S2):82-87.
- [13] 施洲,胡豪,蒲黔辉,等.高速铁路拱塔斜拉桥拱塔轴线优化求解[J].西南交通大学学报,2021,56(3):469-476.

(上接第 66 页)

(3)相比 T 梁,波形钢腹板组合小箱梁施工安装方便,不存在单片 T 梁的倾覆问题;且横隔梁少,现浇工作量少,施工速度快,景观效果好。

通过研究及应用,表明该类型结构具有预应力的效率高、结构各部分受力明确、施工速度快、综合造价低及造型美观等优点,值得进一步在高架桥梁中

推广和应用。

参考文献:

- [1] 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司.上海市沿江通道西延伸(富长路~江杨北路)改建工程施工图设计[Z].上海:上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,2021.