

锦江人行天桥设计方案优化研究

李丰群

(东南大学建筑设计研究院有限公司,江苏 南京 210096)

摘要:成都锦江人行天桥主桥采用桅杆式斜拉桥,原方案由国外公司创作。桥型结构外形轻巧,有一定辨识度,但是结构受力不尽合理。为使该中标方案结构受力合理必须对其进行优化。该文阐述了主桥方案优化过程,力求在美学创意和结构逻辑中取得相对平衡。

关键词:景观桥;优化设计;结构体系;支座选型;舒适度

随着经济的不断发展,桥梁已不仅仅是单纯的交通设施,它被承载了很多意义,如城市家居、文化载体、历史见证者等,景观桥也就应运而生。好的景观桥必定是桥梁结构和建筑美学的完美统一。建筑美学中天马行空的创意最终要通过结构的逻辑去合理地表达。桥梁作为社会公共空间之一,其公共安全是第一位的。如果美学创意和结构逻辑冲突时,如何寻找两者的平衡,是大众都关注的问题。该文以成都锦江人行天桥为例,阐述桥梁方案优化的过程。

1 工程概况

锦江人行天桥是成都市环城生态区生态修复综合项目中一级绿道跨越锦江的一座人行天桥。

桥梁平面位于W形曲线上,由三段圆弧接一直线再接圆弧结束。起点处圆弧半径为 $R=450\text{ m}$,接同向半径 $R=235\text{ m}$ 的圆弧,再接反向半径 $R=235\text{ m}$ 的圆弧后,顺接一段直线后再接到直径 $R=160.679\text{ m}$ 的圆弧上。跨锦江主桥位于第3段圆弧 $R=235\text{ m}$ 的曲线上。

桥梁全长 694 m ,桥梁净宽 6 m 。跨径布置为 $(35+35)+(53+64+53)+(35+35)+(52+102+36+36)+(2\times 30)+(3\times 30)\text{ m}$ 。其中主桥为第4联,跨径布置为 $(52+102+36+36)\text{ m}$ 。上部结构为桅杆式地锚斜拉桥,主跨跨径采用 102 m 跨越锦江。原方案共设置17根桅杆,等间距布置,间距为 6.375 m ,主梁梁高 1.2 m ,塔梁墩固结。下部结构采用V形钢管混凝土桥墩,钻孔灌注桩基础,图1为锦江桥方案效果图。



图1 锦江桥方案效果图

果图。

原桥梁方案通过方案征集的方式,由国外公司创作。由图1可知:桥梁外形轻巧,桅杆有韵律排列,有一定辨识度,为中标方案。

2 方案优化

常规斜拉桥是一种由索塔、主梁和拉索3种基本构件及基础共同承受荷载作用的结构体系,加入锚碇后,使背索部分或者全部锚固于锚碇上,便形成了地锚斜拉桥[图2(a)],拉索的竖向分力能分担主梁的荷载,水平分力可以给主梁提供预压力,锚固在主塔上的拉索的竖向力通过主塔传递给基础。而该文介绍的桅杆式斜拉桥体系,由于中间塔的下方并没有基础传力,拉索锚固在塔上的竖向分力最终还是传递到主梁。当拉索倾角为 45° 时,若所有拉索索力一致,则图2(c)、(d)的J1节点处,拉索产生的竖向分力与拉索锚固传递给主塔最终传递到主梁的力相互抵消,拉索对主梁不能产生有效帮助,只有最外侧J2节点处的拉索可以发挥作用,对主梁提供有效弹性支撑。

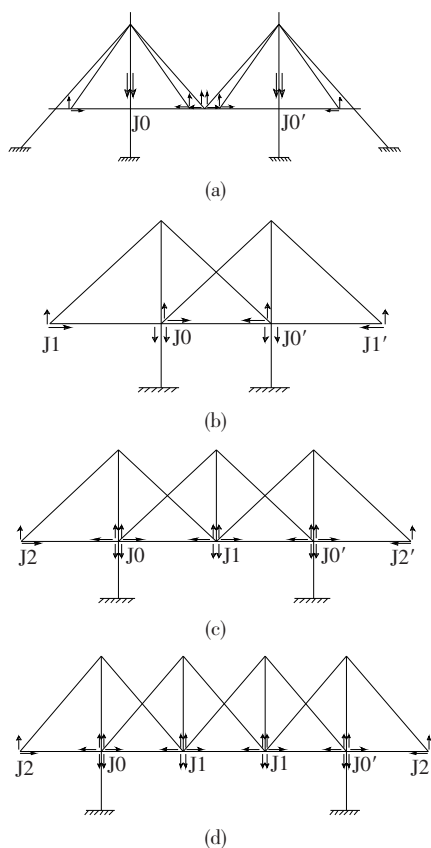


图2 结构受力图示

因此,该桥虽然形式上有地锚拉索,但实际上并非完全意义上的斜拉桥,中间桅杆及拉索对主梁的贡献非常有限。从受力机理来看,结构行为更接近索辅梁桥。原中标方案为了达到桥梁轻巧飘逸的效果,梁高很小,仅为1.2 m。经计算,原结构刚度偏小,难以满足受力需要。要使中标方案在结构受力上满足要求,必须对原方案进行优化。

2.1 总体布置优化

该桥方案优化的思路之一是提高斜拉索的效率,发挥其索辅梁的作用。原方案桅杆布置方式,拉索能发挥的作用非常有限。只有把主塔上的拉索在主梁上的锚固点尽量往跨中移动,并增大锚固索的索力,才能充分发挥锚固拉索的作用。拉索的作用发挥程度决定了主梁的梁高。

故整个优化过程应在桅杆根数(实际是调整拉索在主梁上的锚固点)和主梁梁高中取得平衡:①调整桅杆根数,优化拉索间距,提高斜拉索效率;②桅杆根数不变,增大梁高;③两者结合。因此,在兼顾景观和结构受力的基础上,保持跨径布置不变,进行17、9、8、7根桅杆共4种方案的比选(图3)。

经过比选可得,在结构受力满足现行规范要求的

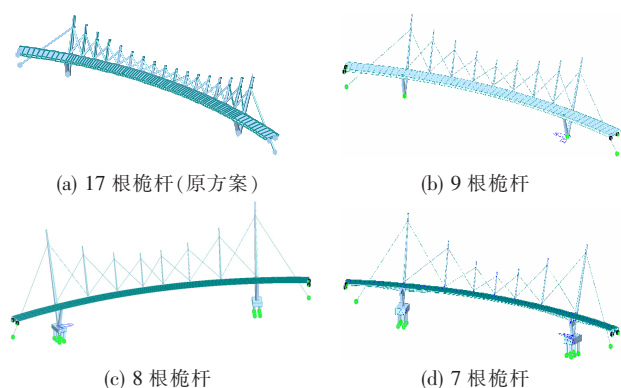


图3 方案比选图

前提下,17根桅杆方案梁高需3.2 m,9根桅杆方案梁高为2.1 m,8根桅杆方案梁高为1.7 m,7根桅杆方案梁高为1.5 m。由此可见:桅杆根数和主梁梁高成正比。但原方案又是通过桅杆有韵律地排列达到一种跳跃式美感,如果桅杆根数过少,显然景观效果难以达到。如果桅杆根数增加,梁高又要增加,则达不到桥梁轻薄、飘逸的效果。因此经综合考虑后,把原方案优化为8根桅杆方案,这样结构受力接近索辅梁桥,斜拉索效率发挥尚可,梁高与跨径对比协调。

2.2 结构体系优化

常规斜拉桥塔梁墩处理方式一般为以下3种:①塔梁墩固结刚构体系;②塔墩一体—梁塔分离体系;③塔梁固结—梁墩分离等。塔梁墩固结刚构体系的优势是不需要支座,通过塔梁墩连接形成整体的受力结构形式,但难点是塔梁墩固结处受力较为复杂,特别是移动荷载和温度荷载作用下该连接处的变形与受力较大。塔墩一体—梁塔分离是半漂浮体系,拉索荷载由塔和基础共同承担,主梁的受力较为简单,但塔梁连接处的构造也较为复杂。塔梁固结、梁墩分离体系是连续梁体系,拉索荷载主要由梁来承担,结构受力比较明确。针对该桥实际情况,对结构体系进行研究。

在同等条件下,仅改变塔梁墩的关系,进行多次试算和分析,结果见表1,根据表1结果主桥最终确定采用塔梁固结—梁墩分离的方案。主要有以下原因:①塔梁墩固结的刚构体系温度次内力大,墩顶弯矩大,桥墩受力极不利;②采用塔墩一体—梁塔分离的方案,主墩处有较大的负反力,如果主墩处采用配重方案,使得主墩处主梁构造复杂,也降低了结构的效率;③采用塔梁固结、梁墩分离方案,有效解决了主墩处出现负反力的问题,使得结构受力明确,桥墩受力也能满足规范要求。该桥受力机理为主梁受力为主的结构,斜拉索为主梁提供弹性支撑,回归到“索辅梁桥”的本质。

表 1 结构体系比选计算结果

结构体系	弯矩/(kN·m)		主梁应力/MPa		主墩应力/MPa
	跨中	支点	截面上缘	截面下缘	
塔梁墩固结	65 843	—83 452	187.9	—192.6	—552.5
塔梁固结	68 859	—78 409	172.0	—172.6	—131.0
梁墩分离					
塔墩一体	65 168	—74 571	176.3	—170.2	—243.4
塔梁分离					

2.3 支座选型优化

曲线桥梁不同于直线梁桥，由于曲率的影响及弯扭耦合效应，使其结构整体受力具有特殊性，由此产生的结构内力分布及挠曲变形更加复杂。曲线梁桥的支座布置方式要综合曲梁半径、单跨跨径、以及一联的跨数等因素来考虑。一般来说，曲线梁桥尽量采用大半径曲线、小跨径，适当控制总联长，这样可以淡化曲线梁的力学特征，使其更接近于直梁，以减少梁内扭矩。

该桥的实际情况却与上述原则相悖。首先大桥主桥平面位于空间曲线上，跨径布置为(52+102+36+36) m，一联有 4 跨，单跨跨径达到 102 m，总联长达到 226 m；其次，作为人行桥，桥面净宽仅 6 m，支座间距离难以拉大；再者，该桥外观上又属于斜拉桥，抗震设防类别需按甲类设计。基于以上情况，该桥的支座选型尤其关键。由于甲类抗震设防的要求，如果仅靠结构自身来抵抗地震作用会非常困难，作为景观桥，需要付出很大的代价。因此，在支座选型时首选减隔震支座，以达到隔震、减震的目的。

由于该桥为空间曲线桥梁，拉索力要通过塔梁传递给支座，在静力情况下，梁底支座需承担一定的水平力和位移量。目前常见的整体型减隔震支座一般为铅芯橡胶支座、高阻尼橡胶支座、拉索减震支座。经分析，3 种支座类型都可以有效减震和隔震，但 3 种类型支座刚度不同(表 2)，能承受的水平力和位移量均不相同。采用高阻尼橡胶支座，支座刚度较小，在静力作用下支座位移量较大，影响桥梁正常使用。铅芯橡胶支座能有效减震、隔震，但其水平承载力较小，在正常使用状态下，支座的水平力已经超过其允许承载力，故也不适合该桥。最终选用了拉索减震支座，既能满足正常使用要求，也能满足桥梁在地震作用下的要求。

2.4 舒适度优化

采用 Midas 建模分析，该桥前 10 阶基频如表 3 所示。

表 2 支座刚度比较

支座类型	竖向承载力/ kN	水平承载力/ kN	横向位移/ mm	刚度/(kN·mm ⁻¹)	
				屈服前	屈服后
高阻尼橡胶支座					
DR(II)—420—470	1 990	180	79	5.49	1.57
* 157—G1.0					
拉索减震支座					
LSPZ2000DX	2 000	150	300	13.3	23.3
铅芯橡胶支座					
J4Q520 * 520	2 000	75	150	10.3	1.6

表 3 桥梁振型周期及其参与质量

模态号	频率/ Hz	周期/ s	不同方向质量参与系数/%			
			X	Y	Z	Z 向合计
1	0.740	1.351	42.78	7.43	0.04	0.04
2	0.875	1.143	2.96	2.88	9.15	9.19
3	0.899	1.113	4.89	28.05	1.16	10.35
4	1.385	0.722	0.85	1.28	0.01	10.36
5	1.609	0.621	5.13	0.14	0	10.36
6	1.622	0.616	3.61	1.71	0	10.36
7	1.711	0.585	0.03	17.54	0.16	10.52
8	1.751	0.571	0.75	0.37	9.62	20.14
9	2.224	0.450	0	0.23	0.12	20.27
10	2.370	0.422	0.19	0.04	0.55	20.82

由表 3 可得：桥梁横向振动出现在 1 阶模态，频率为 0.74 Hz，竖向振动出现在 2 阶模态，频率为 0.875 Hz。根据 CJJ 69—1995《城市人行天桥与人行地道技术规范》，该桥上部结构竖向自振频率不应小于 3 Hz。根据《德国人行桥设计指南》，人行桥在行人荷载激励下的固有频率 f_i 的临界范围为：对于竖向和纵向振动： $1.25\text{ Hz} \leq f_i \leq 2.3\text{ Hz}$ ，对于横向振动 $0.5\text{ Hz} \leq f_i \leq 1.2\text{ Hz}$ 。

因此，根据表 3，结构的第 1、3 模态为横向水平第 1、2 阶振型，频率为 0.740 Hz 和 0.899 Hz；第 2、8、10 模态分别为竖向第 1、2、3 振型，其频率分别为 0.875、1.751、2.370 Hz，以上振型频率均在敏感频率范围内。

目前控制人行桥振动普遍采用并行之有效的方法是增加结构阻尼。该桥采用消能减震设计，选用单点 TMD 消能减震系统。经过优化计算，在桥面竖向振

动响应最大处附近布置 4 个 TMD 减震装置,如图 4 所示。减震装置由调频质量阻尼器组成,包括弹簧减震器、黏滞阻尼器和若干连接件、万向铰等。

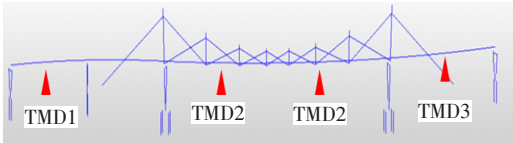


图 4 主桥梁 TMD 减震装置布置图

通过在人行天桥两个边跨和中跨设置调频质量阻尼器,有效抑制了桥面在人行荷载激励下的震动(表 4)。由表 4 可得:经过减震设计后,结构在各种工况下的竖向加速度峰值均在 1.0 m/s^2 内,横向加速度峰值均在 0.3 m/s^2 内,属于中等舒适范畴。

表 4 各工况下桥梁动力响应分析

工况	频率/ 车速	动力响应/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$			减振 率/%
		最大响应点	减振前	减振后	
步行 (竖向)	1.75 Hz	177	1.011	0.517	48.86
	2.07 Hz	99	0.102	0.095	6.86
	2.37 Hz	81	0.135	0.066	51.11
步行 (横向)	1.48 Hz	125	0.002	0.002	0.00
	1.76 Hz	121	0.003	0.003	0.00
跳跃	1.75 Hz	177	0.622	0.349	43.89
	2.07 Hz	99	0.308	0.263	14.61
	2.37 Hz	99	0.385	0.231	40.00
跑步	2.37 Hz	81	1.001	0.480	52.05
车辆	40 km/h	99	0.037	0.027	27.03
	80 km/h	84	0.093	0.062	33.33

3 结论

锦江桥作为人行景观桥,有其自身的特点。经上述设计优化,使得主桥结构成立,并且在景观和结构受

力之间取得平衡。

(1) 经过总体布置优化后,主桥桅杆由原先的 17 根优化为 8 根,结构受力合理,满足相关规范要求。通过桅杆间距和桅杆高度的调整,优化后桥梁的景观并没有受到很大影响。

(2) 通过结构体系的优化,简化了塔梁墩之间的关系,结构受力明确。

(3) 通过支座选型的优化,使得桥梁既能满足正常使用状态需求,又能在罕遇地震下保证桥梁安全。

(4) 通过设置 TMD 减振装置,有效抑制了桥面在人行荷载激励下的振动,使得桥梁舒适性满足使用要求。

该桥于 2018 年 10 月开工建设,2019 年 12 月竣工,大桥建成后成为了成都绿道工程中又一标志性建筑。

参考文献:

[1] 赵晓晋,闫磊,侯炜,等. 基于整体刚度的独塔地锚式 PC 斜拉桥参数分析[J]. 深圳大学学报(理工版),2018(4).

[2] 王立峰,刘龙,肖子旺. 大跨度矮塔斜拉桥结构静动力特性分析[J]. 中外公路,2013(3).

[3] 彭元诚,等. 多跨长联曲线连续箱梁桥支承约束优化设计研究[J]. 中外公路,2018(3).

[4] 单德山,李乔. 高速铁路曲线梁桥的支座布置方式初探[J]. 重庆交通学院学报,2001(2).

[5] 工程防震减灾及交通安全产业技术创新战略联盟. 桥梁标准构件系列产品 HDR 系列高阻尼隔震橡胶支座设计指南[Z],2012.

[6] JT/T 822—2011 公路桥梁铅芯隔震橡胶支座[S].

[7] DB51/T 2241—2016 拉索减震支座与应用技术指南[S].

[8] 陈政清,华旭刚. 人行桥的振动与动力设计[M]. 北京:人民交通出版社,2009.

[9] 徐海军,等. 大跨度曲线人行桥人致振动分析与耦合振动控制研究[J]. 中外公路,2016(4).

[10] CJJ 69—1995 人行天桥与人行地道技术规范[S].