

限高条件下大跨度桥梁选型研究

王青桥

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 在航空限高要求愈发严格的当下,大跨度桥梁的设计面临着桥型选择与结构优化的双重挑战。以主跨400~465 m、航空限高60 m的跨江桥为研究背景,系统剖析了矮塔斜拉桥、钢桁连续梁桥以及自锚式悬索-斜拉协作体系的适用性。研究表明:矮塔斜拉桥通过V形塔创新设计可将塔高优化至35 m;钢桁连续梁桥采用边墩压重与预降顶升技术,可解决小边跨比引发的负反力和大悬臂施工内力问题;自锚式悬索-斜拉协作体系通过钢塔设计与混合区索力分配优化,显著降低主塔主梁结构内力。研究成果为限高条件下大跨度桥梁的选型提供了科学依据。

关键词: 航空限高;矮塔斜拉桥;钢桁连续梁;自锚式悬索-斜拉协作体系

中图分类号: U442.5*4

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)07-0082-06

Research on Selection of Long-span Bridges under Condition of Height Restrictions

WANG Qingqiao

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: In the current situation where the height restrictions on aviation are becoming increasingly strict, the design of long-span bridges confronts the twin challenges of bridge type selection and structural optimization. Against the backdrop of a cross-river bridge with a main span ranging from 400 m to 465 m and the height restriction 60 m on aviation, the applicability of the low-pylon cable-stayed bridge, the steel truss continuous beam bridge and the self-anchored suspension cable - stayed collaborative system is systematically analyzed. The findings indicate that through the innovative design of a V-shaped pylon, the pylon height of the low-pylon cable-stayed bridge can be optimized to 35 m. The application of side-pier counterweight and pre-lowering jacking techniques for the steel truss continuous beam bridge can solve the problems such as negative reaction forces resulting from a small side-span ratio and internal forces during long-cantilever construction. As for the self-anchored suspension cable - stayed collaborative system, by means of steel pylon design and optimization of cable force distribution in the combined zone, the internal forces of the main pylon and main girder are remarkably decreased. The research outcomes offer a scientific foundation for the selection of long-span bridge under the condition of height restrictions.

Keywords: height restriction on aviation; low-pylon cable-stayed bridge; steel truss continuous beam; self-anchored suspension cable - stayed cooperative system

0 引言

随着城市建设的持续推进,城市桥梁建设面临着一个日益凸显且无法回避的限制因素——限高要求。其中,航空限高的影响尤为显著,这给机场周边区域的桥梁建设带来了诸多难题。传统的高耸桥型,如常规斜拉桥、悬索桥等,由于塔高容易超出限高标准,难以满足实际需求,因此需要探索具有低塔高、高跨越能力的替代桥型方案。此外,大桥下方通常还需满足

通航净空条件,这进一步压缩了桥梁结构高度的设计空间。如何在多重限制条件下实现大跨度与低结构高度之间的平衡,成为桥梁设计的核心难题。

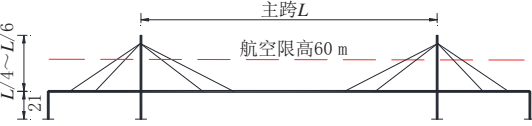
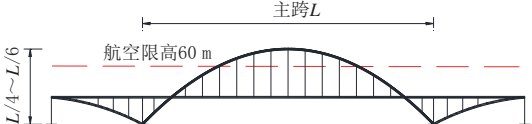
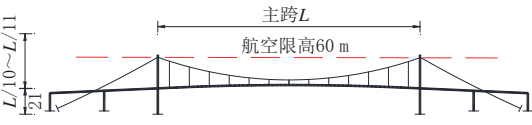
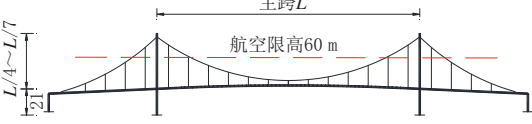
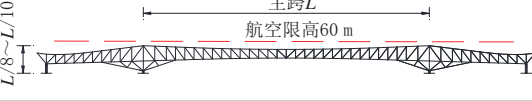
本文以某城市主跨400~465 m的跨江桥梁为具体案例,筛选出矮塔斜拉桥、钢桁连续梁桥及自锚式悬索-斜拉协作体系这3种适用桥型,并从总体构思、设计要点等方面展开分析。

1 桥型适用性筛选

针对常规的斜拉桥、悬索桥、拱桥、桁架梁桥、矮塔斜拉桥等桥型,对主跨420 m的典型桥型的建筑高度进行分析,如表1所列。

收稿日期: 2025-02-12

作者简介: 王青桥(1984—),男,工学硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

表 1 大跨度桥梁建筑高度分析					单位:m
桥型	图式	桥面以上高/拱高 H	桥面以下净空	建筑总高	
斜拉桥		$L/4\sim L/6$		91~126	
拱桥		$L/4\sim L/6$		75~105	
地锚式悬索桥		$L/10\sim L/11$	21	59~63	
自锚式悬索桥		$L/4\sim L/8$		81~126	
钢桁连续梁		$L/7\sim L/10$		42~60	

由表 1 可知,对于主跨 420 m 的特大桥,常规斜拉桥、拱桥、自锚式悬索桥的建筑高度远超 60 m,远远超出机场限高要求,不适用。而地锚式悬索桥,其主跨 420 m 左右并非经济跨径,并且工程所在区域为软土地基,设置锚碇的难度较大^[1],风险较高,也不宜采用。

因此,符合限高条件的可选桥型为矮塔斜拉桥、钢桁连续梁桥或者协作体系桥梁。矮塔斜拉桥相较于常规斜拉桥,塔高较低,在满足限高要求方面具有明显优势;钢桁连续梁桥整体结构高度较低,能够较好地适应限高条件;协作体系桥梁则融合了多种结构的优点,不仅可以满足限高要求,还有望实现更优的力学性能和经济效益。

2 矮塔斜拉桥

2.1 矮塔斜拉桥分析调研

矮塔斜拉桥是一种兼具梁桥与斜拉桥特点的受力结构^[2]。目前,梁式桥的最大跨度已达到 330 m^[3]。在此基础上,矮塔斜拉桥利用拉索体系的协同作用,在满足高度限制的条件下,其跨度能够进一步扩大至 400 m。

矮塔斜拉桥不仅外形美观,还具备施工方便、性价比高等诸多优势^[4],展现出广阔的应用前景。截

至目前,已建成的矮塔斜拉桥有一百余座,部分代表性桥梁如表 2 所列。

表 2 矮塔斜拉桥案例调研				
序号	桥名	桥跨布置/m	国家	建成年份
1	冲原桥	65.4+180.0+76.4	日本	1997
2	曼达-麦克坦二桥	111.5+185.0+111.5	菲律宾	1999
3	芜湖长江大桥	180.0+312.0+180.0	中国	2000
4	开封黄河二桥	85.0+6×140.0+85.0	中国	2006
5	惠青黄河大桥	133.0+220.0+133.0	中国	2006
6	Golden Ears	121.0+3×242.0+121.0	加拿大	2009
7	嘉悦大桥	145.0+250.0+145.0	中国	2010
8	金门大桥	140.0+5×280.0+140.0	中国	2016

2.2 总体构思

大桥主跨为 400 m,在面对限制性建设条件时,若采用常规直立式塔柱矮塔斜拉桥,桥面以上塔高将达 40 m($L/10$),桥塔总高 65 m,超出机场限高。

为有效解决这一难题,本文设计采用 V 形塔的创新设计方案。如图 1 所示,通过塔柱外倾,减小主梁中跨无索区长度,增大拉索与主梁之间的倾角,桥面以上桥塔高度可降低至 35 m,满足机场限高要求,同时受力效率提升约 25%。

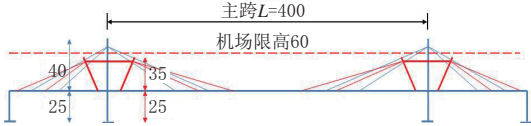


图 1 V 形塔构思示意图(单位:m)

如图2所示,主桥跨径布置为(64+86)m+400 m+(86+64)m,主塔采用钢结构V形塔^[5],主梁采用混合梁,其中中跨为钢箱梁,边跨为叠合梁,跨中无索区长度为92 m。

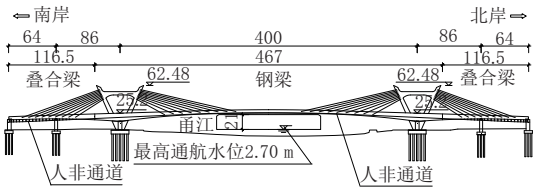


图2 V形塔矮塔斜拉桥总体布置图(单位:m)

2.3 设计要点

2.3.1 主桥约束体系

矮塔斜拉桥常见的结构体系有塔梁固结和塔梁分离两种形式。塔梁固结体系是指索塔与主梁固结,梁底设置支座,其约束体系类似连续梁结构。而塔梁分离体系是指索塔与主梁分离,与桥墩固结,梁底设置支座,其约束体系类似常规斜拉桥。

该工程拉索角度较小(13.8°~31.5°),对于塔梁分离体系,在温度荷载作用下,主梁的伸缩变形会在主塔根部产生较大内力,使得温度荷载成为主塔设计的控制因素,材料利用效率低。而塔梁固结体系则很好地解决了小角度拉索条件下主塔的受力难题,该体系的受力特点与连续梁相似,在温度作用下,塔底弯矩大幅减少,相比塔梁分离体系,可减少钢材用量约1 000 t,两种体系受力对比如表3所列。

表3 两种体系下主塔温度内力、位移

工况	内力及位移		塔梁固结体系	塔梁分离体系
	弯矩/(kN·m)	塔根	21 464 / -18 422 (1.0 / 1.0)	34 126 / -27 648 (1.59 / 1.50)
温度 工况	轴力/kN	主塔	956 / -855 (1.0 / 1.0)	1 386 / -1 104 (1.45 / 1.29)
		横梁	1 592 / -2 280 (1.0 / 1.0)	2 475 / -3 244 (1.56 / 1.42)
		位移/mm	32(1.0)	46(1.44)

2.3.2 索梁合理荷载分担比例

在矮塔斜拉桥中,荷载由拉索和主梁共同承担^[6]。塔梁的受力和位移与索梁的荷载分担比例密切相关,研究合理的索梁荷载分担比例具有重要意义。以 $\beta = \frac{\text{拉索分担的竖向荷载}}{\text{总恒载的竖向荷载}} \times 100\%$ 表示拉索的竖向荷载分担比,分别令 β 取值35%、40%、45%、50%,研究不同拉索荷载分担比对结构受力和位移的影响。

如表4所列,随着拉索恒载系数的增大,主梁跨中弯矩基本保持不变(无索区),主梁支点负弯矩呈

线性减小趋势,但主塔根部弯矩线性增大。主梁跨中竖向挠度逐渐减小,但当 $\beta > 45\%$ 后,主梁竖向挠度的变化趋于平缓。

表4 不同 β 值的结构内力和位移

荷载组合		$\beta=35\%$	$\beta=40\%$	$\beta=45\%$	$\beta=50\%$
弯矩/ (kN·m)	主梁跨中	569 828 (1.0)	570 154 (1.0)	570 480 (1.0)	570 806 (1.0)
	主梁主墩处	-2 322 404 (1.41)	-1 984 803(1.21)	-1 647 243 (1.0)	-1 309 662 (0.80)
	主塔根部	-181 755 (0.63)	-235 947 (0.81)	-290 118 (1.0)	-344 300 (1.19)
	主梁跨中 挠度/mm	2 311	1 608	1 497	1 493

综合考虑,增大拉索恒载系数有助于改善主梁的受力状态,但超过一定限度后,其作用不再显著。兼顾主梁与主塔的内力和变形情况,选取 $\beta=45\%$ 的拉索恒载系数较为合理。

2.3.3 主梁结构形式

大桥中跨400 m,边跨150 m,边中跨比较小(0.375)。在主梁结构设计时,首先应考虑减轻中跨结构自重,以提升跨越能力,同时边跨设计需兼顾边中跨比较小的结构受力特性。经综合比选分析,主梁采用混合梁布置形式,中跨采用钢箱梁以匹配跨越能力,边跨采用钢-混组合梁以增加压重能力,这种布置形式与结构受力特点相契合。

钢-混的结合位置布置于中跨,墩顶负弯矩区段为钢箱梁,有效避免了结合位置布置于边跨时墩顶混凝土板开裂的难题。

2.3.4 主塔倾角

V形索塔倾角的变化会影响斜拉索的水平倾角,进而影响主梁和主塔结构的受力分配。分别考虑主塔倾角为15°、20°、25°、30°、35°五种工况,分析不同倾角情况下主梁与主塔的受力情况。

结果如表5所列,随着索塔竖向倾角的增大,主梁跨中正弯矩和墩顶负弯矩减小,主梁跨中挠度减小,但主塔根部弯矩增大,主梁和主塔轴压力增大,主塔横梁轴拉力增大。综合考虑主梁、主塔及主塔横梁受力的合理性,选用索塔倾角 $\theta=25^\circ$ 。

3 钢桁连续梁桥

3.1 钢桁梁分析调研

钢桁梁桥作为一种经典的桥梁形式,以其宏伟的外观、强大的跨越能力和卓越的承载性能而被广泛应用。对于本工程而言,采用主跨465 m的钢桁梁

表 5 恒载工况不同主塔倾角下结构内力和位移

内力及位移		$\theta=15^{\circ}$	$\theta=20^{\circ}$	$\theta=25^{\circ}$	$\theta=30^{\circ}$	$\theta=35^{\circ}$
弯矩/(kN·m)	主梁跨中	303 772	300 515	297 082	293 319	289 245
	主梁主墩	-1 206 627	-1 141 199	-1 059 660	-987 531	-893 082
	主塔根部	-205 635	-217 690	-218 956	-253 730	-309 301
轴力/kN	主梁	-221 722	-223 937	-226 699	-229 355	-232 800
	主塔	-51 713	-53 393	-55 602	-60 204	-68 965
	横梁	117 597	120 187	123 413	126 479	130 458
位移/mm	主跨跨中	897	872	846	818	789

桥结构,能够很好地满足工程的限高要求。世界主要的大跨钢桁梁桥如表 6 所列。

表 6 钢桁梁桥案例调研

序号	桥名	主跨/m	国家	建成年份
1	福斯桥	521	英国	1890
2	港大桥	510	日本	1974
3	切斯特桥	501	美国	1974
4	大新奥尔良 II 号桥	482	美国	1988
5	豪利桥	457	印度	1943
6	密西西比河桥	446	美国	1943
7	海湾桥(东桥)	427	美国	1936
8	生月大桥	400	日本	1991

3.2 总体构思

如图 3 所示,主桥采用一跨过江的设计方案,主跨 465 m。为节省工程投资,边跨应尽可能缩短。同时,为避免主桥进入曲线或变宽段,边跨跨径确定为 160 m^[7]。主桥的跨径布置为 160 m+465 m+160 m=785 m,边中跨比仅为 0.34,大幅超出常规连续钢桁梁边中跨比(0.4~0.75),这种小边跨比给设计和施工带来了较大挑战。

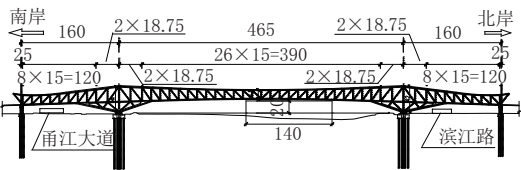


图 3 钢桁连续梁总体布置图(单位:m)

3.3 设计要点

3.3.1 小边中跨比应对措施

本桥钢桁梁的边跨与中跨长度比值仅为 0.34,这一比例在恒载作用下易导致边墩支座产生负反力。为解决此问题并优化结构受力性能,结合桥梁构造特点,采取了以下技术措施。

3.3.1.1 边墩墩顶配重设计

针对开口断面(未设底板)的桥面系,在靠近边墩支座的 17 m 范围内增设底板,形成箱型截面结构。箱内填充铁矿砂混凝土进行压重,每延米配重

约 158 t,最终边墩总压重量达 4 200 t^[8]。此举通过增强局部刚度与自重,有效平衡了支座的负反力。

3.3.1.2 边墩支点预降与顶升控制

在边墩支点安装阶段实施预降操作,待主桥合龙后执行顶升工艺。通过预降与顶升 0.8 m,支点反力可提升 400 t。此方法不仅转移了结构弯矩,降低了墩顶桁梁的负弯矩效应,还显著减少了边墩负反力。

以上 2 项措施合计增加边墩反力 4 600 t,成功解决了小边中跨比带来的边墩负反力难题。

3.3.2 大悬臂施工内力调整

大桥主跨采用悬臂拼装法施工,最大悬拼长度近 230 m。若不进行内力调整,最大悬拼状态下累计的墩顶负弯矩将控制结构设计,桁架高度会大于 60 m,无法满足机场限高要求。

通过边墩支点预降、顶升可有效转移弯矩,降低本桥中跨悬臂施工累积的墩顶恒载负弯矩,进而降低主墩桁架高度,满足机场限高要求。如图 4 所示,在悬臂拼装阶段,主墩墩顶会累积巨大的负弯矩,成桥后边支点顶升,主墩墩顶会产生正弯矩,以此抵消部分墩顶负弯矩。经计算,边墩预降顶升 0.8 m 产生的正弯矩效应可抵消 15% 的墩顶负弯矩效应,能够降低主墩桁架高度 3 m,节约钢材约 1 500 t。

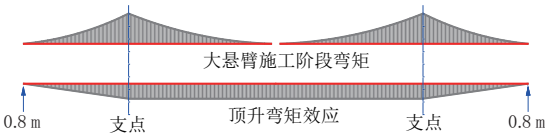


图 4 边墩支点预降顶升内力调整示意图

4 自锚式悬索-斜拉协作体系

4.1 悬索-斜拉协作体系调研

悬索-斜拉协作体系桥梁是在斜拉桥和悬索桥的基础上发展而来的一种新型组合体系桥梁^[9-11],其结合了二者的特点。目前,国内外已建成的此类桥梁有十余座。土耳其博斯普鲁斯海峡三桥是已建成

的最大跨斜拉-悬索协作体系桥梁,主跨 1 408 m,于 2016 年建成通车。中国在斜-悬索协作体系桥梁建设方面发展迅速,在建的甬舟铁路西堠门特大桥主跨 1 488 m,是世界上最大跨径的斜拉-悬索协作体系桥梁;在建的 G3 铜陵长江大桥主跨也达到 988 m。部分悬索-斜拉协作体系桥案例如表 7 所列。

表 7 悬索-斜拉协作体系桥案例调研

编号	桥名	跨径布置/ m	国家	建成 年份
1	Albert Bridge	主跨 122	英国	1873
2	博斯普鲁斯海峡三桥	主跨 1 408	土耳其	2016
3	甬舟铁路西堠门大桥	主跨 1 488	中国	在建
4	G3 铜陵长江大桥	主跨 988	中国	在建
5	Brooklyn 桥	286+486+286	美国	1883
6	Orio 桥	65+180+65	西班牙	2014
7	贵州乌江大桥	66+288+66	中国	1997
8	大连庄河建设大桥	45+110+45	中国	2007

4.2 总体构思

传统悬索-斜拉协作桥梁多采用地锚式结构,但对于主跨 420 m 的大桥而言,地锚式在软土地基中锚碇施工难度大、成本高,经济性不足。为此,本文研究提出创新性的自锚式悬索-斜拉协作体系方案(见图 5),主缆直接锚固于主梁端部,跨径布置为 50 m+60 m+90m+420 m+75 m+75 m+50 m=820 m。该体系垂跨比为 1/14.6,桥塔高度降至跨径的 1/14,符合机场限高要求。相较于地锚式结构,自锚式体系在受力性能与施工方式上具有显著差异,且塔高更低、主缆垂度更小、斜拉索倾角更平缓,技术挑战性较高^[12]。

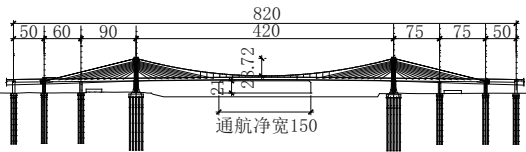


图 5 自锚式悬索-斜拉协作体系总体布置图(单位:m)

自锚式悬索-斜拉协作体系通过融合两种桥型结构,优化了结构性能。相比传统自锚式悬索桥,得益于斜拉索分担部分荷载,主缆力更低,跨中钢梁轴压力更小;同时整体结构刚度提高,活载和温度挠度明显降低。相比常规斜拉桥,其主塔高度可降低 20%~40%,满足限高的同时提升抗风抗震性能;主梁轴向压力分布更均匀,斜拉段可改用混凝土梁以增强稳定性。施工方式上兼具灵活性,斜拉段可采用悬臂浇筑或拼装工艺,悬索段则能通过临时斜拉索拼装、整体吊装或主缆安装后分段吊装等多种方式实现高效施工。

4.3 设计要点

4.3.1 混合区斜、吊索协同分配

为保障悬索与斜拉体系平顺过渡,在两者交汇区域设置 31.5 m 范围的过渡段(见图 6)^[13],采用斜拉索与吊索交叉布置共同承重。通过分析吊索索力递增、相等及递减 3 种工况(见图 7)发现以下问题。

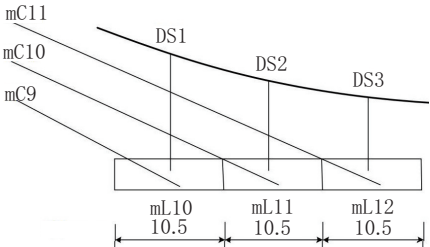


图 6 斜-吊索混合区布置示意图(单位:m)

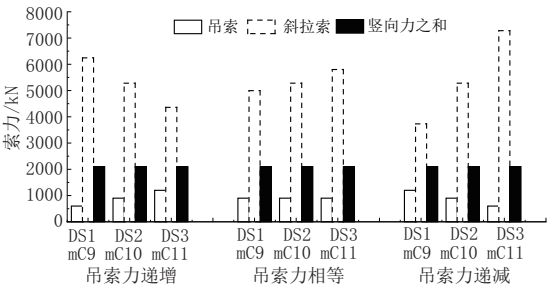


图 7 混合区索力分配比例

- 递增模式:斜拉索索力均匀递减,内力过渡平缓;
- 等力模式:吊索索力突变,分布不连续;
- 递减模式:远端斜拉索索力骤增,易引发局部应力集中。

综合以上分析,确定混合区吊索索力需向跨中方向逐级递增,同时确保斜拉索与吊索的合力与纯悬索区段一致,避免主梁弯矩突变^[14]。此设计优化了结构整体受力性能,提升了体系的协同效率。

4.3.2 桥塔形式选择

该桥主塔高度较低(桥面以上塔高约 35 m,桥面以下塔高约 25 m),斜拉索角度较小(最小斜拉索水平角度为 12.9°),其桥塔受力特点与常规悬索桥和斜拉桥存在较大差异。在使用阶段荷载作用下,塔底弯矩显著大于常规的斜拉桥和悬索桥,尤其是整体升降温产生的塔底弯矩占比较大。

常规悬索桥和斜拉桥桥塔一般采用混凝土结构。如表 8 所列,若本桥采用混凝土索塔,由于索塔高度低、刚度大,体系升降温荷载产生的弯矩接近 708 m 闵浦大桥温度弯矩的 2 倍^[15]。鉴于桥塔高度低、刚度大的特点,体系升降温荷载效应成为混凝土桥塔设计的控制工况,需通过降低塔柱刚度来减小塔底弯矩。

表 8 混凝土索塔内力对比表

桥梁	桥型	主跨 跨径/m	主缆垂 跨比	塔底弯矩/(kN·m)	
				体系升降温	活载
本桥	自锚式悬索-斜 拉协作体系	420	1/14.6	416 745	283 769
闵浦 大桥	斜拉桥	708	—	232 741	323 266
小干 二桥	自锚式 悬索桥	370	1/6	113 853	432 088

对比钢塔、混合塔、混凝土塔 3 种方案,如表 9 所列,钢塔方案因降低了桥塔刚度,塔底弯矩比混凝土桥塔方案减小 50% 以上^[16]。塔底弯矩的减小,不但改善了塔柱自身的受力状况,还能缩小基础的规模,推荐采用全钢塔结构。

表 9 不同结构形式桥塔的塔底弯矩

桥塔结构形式	塔底弯矩/(kN·m)			百分比/%
	整体温度	活载	组合值	
混凝土桥塔	356 985	278 349	687 121	100
(钢-混)混合桥塔	299 135	213 875	546 262	80
钢塔	178 144	124 842	330 550	48

4.3.3 非线性及大位移效应影响

大桥采用的自锚式悬索-斜拉协作体系是一种全新的桥梁结构体系。该体系塔高仅为 60 m,主缆垂跨比仅为 1/14.6,临时斜拉索最小角度仅为 9°,均大大超出常规自锚式悬索桥及斜拉桥的合理范围。大位移非线性及 $P-\delta$ 效应突出,非线性及大位移影响对比如表 10 所列。在设计时,必须重视非线性及大位移效应的影响,以确保结构安全。

表 10 非线性及大位移效应影响对比表

工况	部位	比较		
		不考虑 非线性	考虑 非线性	差值/ %
成桥	塔顶位移/m	0.017 3	0.018 4	6.36
	塔底弯矩/(kN·m)	-17 230	-19 212	11.50
	主梁跨中弯矩/(kN·m)	-5 579	-6488	16.29
	主梁墩顶弯矩/(kN·m)	-8 027	-11734	46.18
	主缆力/kN	105 538	105619	0.08
汽车 活载	塔顶位移/m	0.046	0.053	15.22
	塔底弯矩/(kN·m)	8 017	9 119	13.75
	主梁跨中弯矩/(kN·m)	134 856	160 968	19.36
	主梁墩顶弯矩/(kN·m)	10 710	12 293	14.78
	主缆力/kN	7 875	9 173	16.48

5 结 语

受限於机场限高、航道、水利等多方面的需求,大跨度限高桥梁的桥型选型难度极大。本文提出的 3 种桥型体系凭借独特的设计理念,各自展现出鲜明的特色风貌和技术特点,为复杂限制条件下的桥梁选型提供了系统化的思路。在未来的桥梁建设中,可进一步探索材料创新与智能化施工技术的集成应用,推动桥梁工程领域的发展。

参考文献:

[1] 张洪金. 航空限高条件下的越江桥梁设计方案研究[J]. 上海公路, 2021(4): 12-16.

[2] 吴圣城. 高墩大跨矮塔斜拉桥抗震性能研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2017.

[3] 邓文中, 代彤. 重庆石板坡长江大桥复线桥总体设计[J]. 桥梁建设, 2006(6): 28-32.

[4] 吴永敏. 中兴大桥变截面钢梁曲线滑移施工技术[J]. 城市道桥与防洪, 2021(1): 143-145.

[5] 何武超. 宁波中兴大桥 V 形主塔设计关键技术[J]. 中国市政工程, 2022(2): 12-16.

[6] 林博. 矮塔斜拉桥结构特性分析及桥塔局部分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.

[7] 张洪金, 马翥. 三官堂大桥主桥总体设计与构思[J]. 城市道桥与防洪, 2021(3): 92-95.

[8] 张洪金. 三跨连续钢桁梁桥小边中跨比应对措施研究[J]. 上海公路, 2021(1): 46-49.

[9] 张哲, 韩立军, 万其柏. 自锚式斜拉-悬吊协作体系桥的设计研究[J]. 公路, 2010(6): 46-51.

[10] 张文静. 自锚式协作体系的简化分析与影响结构性能的参数研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2018.

[11] 朱巍志. 自锚式斜拉-悬索协作体系桥合理成桥状态确定与若干问题研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.

[12] 王飞. 自锚式悬索-斜拉桥钢箱梁稳定理论及模型试验研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2018.

[13] 李文超, 彭彬. 自锚式斜拉——悬索协作体系桥吊跨比优化分析[J]. 中国科技投资, 2017(10): 258.

[14] 李中培. 自锚式斜拉-悬索协作体系力学行为分析[D]. 浙江: 浙江大学, 2018.

[15] 马翥, 颜爱华, 邓青儿, 等. 上海闵浦大桥设计技术综述[J]. 城市道桥与防洪, 2009(10): 8-12.

[16] 邹小洁, 顾民杰, 马翥. 大跨度限高自锚式悬索-斜拉协作体系桥受力特点研究[J]. 公路工程, 2023(2): 90-96.