

悬索桥体系演变与主缆控制研究综述

罗进¹, 董江华²

¹西南交通大学土木工程学院 四川成都

²成都林立宇坤勘察设计有限公司 四川成都

【摘要】悬索桥凭借跨越能力强、受力合理、造型优美等优势,在大跨度桥梁领域占据核心地位,并呈现出跨径持续增大、结构形式日趋多元的发展态势。本文从结构体系演变、主缆找形理论和施工控制技术三个维度系统梳理研究进展:在结构体系方面,介绍多塔多主缆、空间缆及自锚式等新型体系的力学特性与典型工程;在找形理论方面,论述抛物线法、分段悬链线法(SCM)、无应力长度有限元法(含TCUD法)及智能优化算法的适用条件与精度特征;在施工控制方面,对比AS法与PPWS法技术特点,梳理基准索股弦长调整、温度效应及索鞍修正等主要研究成果;最后指出现有研究不足与未来方向。

【关键词】悬索桥;结构体系;主缆找形;分段悬链线法;施工控制

【收稿日期】2026年3月12日

【出刊日期】2026年4月15日

【DOI】10.12208/j.jer.20260019

Review on the evolution of suspension bridge systems and main cable control

Jin Luo¹, Jianghua Dong²

¹School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan

²Chengdu Liliyu Kun Survey and Design Co., Ltd., Chengdu, Sichuan

【Abstract】Suspension bridges occupy a core position in the field of long-span bridges owing to their superior spanning capability, rational load-bearing mechanism, and aesthetic appeal, and have exhibited a continuous trend toward increasing span lengths and diversified structural forms. This paper systematically reviews the research progress from three dimensions: structural system evolution, main cable shape-finding theory, and construction control technology. Regarding structural systems, the mechanical characteristics and representative engineering applications of novel systems such as multi-tower multi-cable, spatial cable, and self-anchored suspension bridges are introduced. Regarding shape-finding theory, the applicable conditions and accuracy characteristics of the parabolic method, segmental catenary method (SCM), unstressed length finite element method (including the TCUD method), and intelligent optimization algorithms are discussed. Regarding construction control, the technical characteristics of the AS and PPWS methods are compared, and the major research findings on reference strand chord length adjustment, temperature effects, and cable saddle correction are reviewed. Finally, existing research deficiencies and future directions are identified.

【Keywords】Suspension bridge; Structural system; Main cable shape-finding; Segmental catenary method; Construction control

1 引言

现代悬索桥以跨越能力强、受力合理、造型优美等特点,在大跨工程中得到广泛应用。本文从悬索桥结构体系演变、主缆找形理论和施工控制技术三个方向系统梳理研究进展,以期为相关研究与工程实践提供参考。

2 悬索桥结构体系的演变

2.1 历史发展概述

悬索桥历史发展历程如图 1 所示。21 世纪以来,

中国成为大跨悬索桥建设的主要推动力。张靖皋长江大桥则率先研发了自走行拼装索鞍与超高钢箱-钢管约束混凝土组合桥塔,大幅简化了超大跨情形下索鞍施工的难度^[1];五峰山长江大桥则在桥塔下横梁处设置纵向黏滞阻尼器,创新性地实现了千米级铁路悬索桥的刚度控制^[2]。

2.2 多塔与多主缆体系

多塔体系中间塔因缺乏足够水平约束导致活载挠度偏大,是研究热点。彭元诚等^[3]介绍了燕矶长江大桥

四主缆体系设计, 通过交替悬挂加劲梁节段有效控制超宽桥面横向弯矩并提升抗扭刚度。常付平等^[4]对济南

凤凰黄河大桥三塔自锚式空间缆复合方案进行了论述, 实现了抗风稳定性与施工便利性的统一。

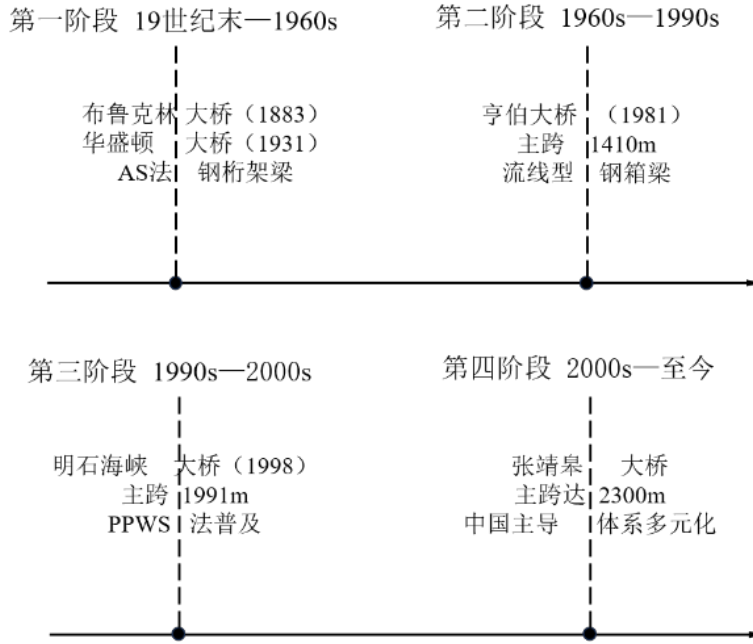


图1 悬索桥发展历程

2.3 空间缆与自锚式体系

空间缆悬索桥主缆在桥塔顶部向外侧扇形展开形成三维索面, 可同时提升横向和扭转刚度, 改善抗风稳定性。空间缆模型如图2所示。挪威哈罗格兰大桥(主跨 1145m) 是目前已建成的最大跨径地锚式空间缆悬索桥, Jamal 和 Sundet^[5]验证了空间缆体系在千米级跨径中的可行性, 但主缆三维倾斜特性使找形与施工控制复杂程度显著增加。

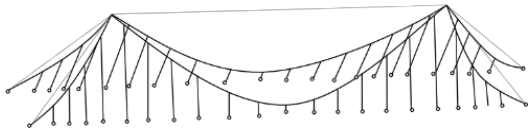


图2 空间缆模型示意图

自锚式悬索桥(SASB)将主缆水平分力锚固于加劲梁端部, 无需庞大锚碇。Xu 等^[6]系统梳理了中国已建 SASB, 指出合理跨径约为 250~500m; SASB 主缆线形受梁体轴向刚度影响, 须进行缆-梁耦合分析, 是其找形计算的主要难点。

3 主缆找形计算理论

3.1 抛物线理论

抛物线理论假定缆索自重沿跨径水平均匀分布, 主缆水平分力沿全长为常数, 对矢跨比 $\leq 1/10$ 的工况误差在允许范围内, 常用于初步设计估算^[7]。随跨径增大

其与实际悬链线偏差加大, 不适用于施工精算。研究者在此基础上先后发展出分段直线法、分段抛物线法和精度更高的分段悬链线法。

3.2 分段悬链线法(SCM)

分段悬链线法(SCM)将主缆划分为若干索段, 每段以精确悬链线方程描述, 通过迭代求解多段耦合的几何相容方程组确定整体线形, 是目前最广泛应用的解析方法^[8]。对第*i*段索段, 设两端竖向分力为 V_{i-1} 、 V_i , 水平分力为 H , 单位弧长自重为 q , 精确悬链线方程为:

$$\Delta x_i = \frac{H}{q} \left[\sinh^{-1} \left(\frac{V_i}{H} \right) - \sinh^{-1} \left(\frac{V_{i-1}}{H} \right) \right] \quad (1)$$

$$\Delta z_i = \frac{H}{q} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{V_i}{H} \right)^2} - \sqrt{1 + \left(\frac{V_{i-1}}{H} \right)^2} \right] \quad (2)$$

式中, Δx_i 和 Δz_i 分别为第*i*段的水平和竖向投影长度, 联立各段方程与边界条件即可求解全桥主缆线形与水平分力。

随着空间缆体系的兴起, SCM 在三维情形中的适用性成为研究重点。Tian 等^[9]对地锚式空间缆悬索桥主缆线形进行了解析研究, 推导了空间缆构型精确解析表达式。针对不规则空间缆, 吴月星等^[10]推导了考虑

主缆与吊杆空间耦合效应的解析公式, 扩展了 SCM 适用范围。邓小康等^[11]提出斜率爬升法, 可处理含不等高锚点和不规则索面的复杂情形。刘超等^[12]针对自锚式悬索桥建立了坐标迭代法, 将梁体轴向变形直接引入找形方程。

3.3 基于无应力长度的有限元法

FEM 可对全桥进行完整几何非线性分析。弹性悬链线单元切线刚度矩阵由精确解析公式显式给出, 节点力增量 ΔF 与节点位移增量 Δu 满足:

$$K_T \cdot \Delta u = \Delta F \quad (3)$$

其中切线刚度矩阵 K_T 各分量由当前构型下水平分力和节点坐标对各自自由度的偏导数显式给出。

TCUD 法将各单元无应力长度作为未知量直接求解, 已广泛用于平面和三维悬索桥, 近年扩展至空间索系自锚式悬索桥, Zhang 等^[13]基于最小弯曲应变能确定了空间索系自锚式悬索桥的合理成桥状态, 为此类复杂体系的找形提供了新思路。Zhu 等^[14]基于 Euler 描述的非线性有限元法提出了新的找形方法, 在三维空间缆情形下取得了良好的收敛性与精度。

3.4 智能优化算法

传统 Newton-Raphson 迭代法对初值敏感, 在多塔、空间缆等复杂构型中常出现收敛困难。Cao 等^[15]提出了一种适用于特殊索面主缆的找形新方法, 结合改进量子遗传算法求解索端力, 再以改进最小二乘法迭代, 在复杂索面构型下展现出良好的收敛性与精度。

4 主缆施工控制技术

4.1 架设方法技术对比

悬索桥主缆架设 AS 法(空中纺丝法)和 PPWS 法(预制平行钢丝索股法)两种主流方式。AS 法在现场逐根绕制钢丝, 锚头处存在弯折, 次应力较大, 且受天气影响架设效率偏低, 质量控制难度较大; PPWS 法在工厂预制索股, 缆力均匀、次应力较小, 架设效率高、质量稳定, 已在中国绝大多数大跨悬索桥工程中占据主导地位。

PPWS 法在工厂预制索股, 运至现场后逐股牵引架设, 在温稳条件下完成矢高调整后整体紧缆; 超大直径主缆(直径超过 1.2 m)的预制和运输是当前面临的主要工程挑战。

4.2 基准索股弦长调整

基准索股矢高控制是主缆架设精度的核心环节。第一根索股以绝对高程控制跨中矢高, 其余普通索股以相对基准索股的高差控制, 调整顺序遵循“主跨→边

跨→锚跨”原则。弦长调整计算的本质是建立无应力索长调整量 ΔL_0 与矢高偏差 Δf 及温度变化 ΔT 之间的解析关系:

$$\Delta L_0 = \frac{\partial L_0}{\partial f} \Delta f + \frac{\partial L_0}{\partial T} \Delta T \quad (4)$$

谭红梅等^[16]基于悬链线理论推导了式(4)各偏导数的精确表达式, 计算精度高于传统抛物线公式, 但需反复迭代。邓小康等^[17]将主缆方程在目标自由索状态附近 Taylor 展开, 将偏导数转化为显式表达, 直接得到无应力索长调整量, 避免迭代。

4.3 温度效应与索鞍修正

温度是影响主缆施工精度最主要的环境因素。Zhang 等^[18]对悬索桥施工期主缆均匀温度效应进行了解析研究, 定量给出了施工温度对各节点标高的影响规律, 研究表明自由索状态温度敏感值略高于基准索股状态; 现行规范规定矢高调整应在纵向温差不大于 2°C 的温稳条件下进行。

主缆在索鞍处因几何形态转变而产生附加长度, 需在无应力长度计算中加以修正。高庆飞等^[19]从几何关系出发推导了索鞍处主缆曲线修正算法, 定量评估了鞍顶圆弧半径、鞍槽包角等参数的影响, 为索鞍加工精度要求制定提供了依据。

5 研究不足与展望

综合以上分析, 当前研究存在以下不足。

(1) 空间缆体系的找形理论尚不完善。Tian 等和吴月星等分别针对特定空间缆情形发展了计算方法, 但对主缆扭转控制、索鞍处三维形态转换等问题, 尚缺乏系统理论框架。

(2) 施工误差的随机特性研究薄弱。高庆飞等和 Zhang 等进行了单变量确定性分析, 但对多误差因素耦合作用下的随机累积规律缺乏系统研究, 难以指导施工概率验收标准的制定。

(3) 算法与软件集成程度不足。Cao 等提出的找形新方法性能良好, 但与主流工程软件的集成开发工作开展较少, 制约了推广应用。

未来研究应重点关注: ①空间缆三维找形精细化理论, 尤其是主缆扭转效应量化与索鞍三维几何修正; ②多误差因素耦合的主缆线形随机分析框架; ③BIM 技术与施工控制系统的深度融合; ④机器视觉等新型监测技术的工程化应用; ⑤智能优化算法在复杂索系找形中的进一步发展。

6 结论

主要结论如下:

(1) 悬索桥结构体系经历四个发展阶段,当前正向多塔多主缆、空间缆、自锚式等方向多元演进,提升结构刚度是超大跨径体系发展的核心驱动力。

(2) SCM 是主缆找形主流解析方法,已延伸至空间缆;TCUD 法为代表的无应力长度有限元法精度高、适用范围广;两类方法组合是工程主流策略;智能优化算法有效克服了复杂体系的收敛难题。

(3) PPWS 法已成大跨悬索桥施工主流;弦长调整公式是施工控制核心工具,温度效应与索鞍修正研究为误差控制提供了理论依据。

(4) 空间缆精细化理论、多误差随机分析及控制标准统一化是当前亟待突破的方向。

参考文献

- [1] 蒋振雄. 张靖皋长江大桥建设综述[J].公路,2023,68(06):1-7.
- [2] 唐贺强,徐恭义,刘汉顺. 五峰山长江大桥主桥总体设计[J].桥梁建设,2020,50(06):1-7.
- [3] 彭元诚,丁少凌,任蒙,等. 湖北燕矶长江大桥体系构思与总体设计[J].桥梁建设,2022,52(03):1-7.
- [4] 常付平,陈亮,邵长宇,等. 济南凤凰黄河大桥主桥设计[J].桥梁建设,2021,51(05):101-107.
- [5] Jamal A, Sundet E. Hålogaland bridge—a landmark in Arctic Norway[J]. Structural Engineering International, 2021, 31(4): 516-522.
- [6] Xu F, Zhang M, Wang L, et al. Self-Anchored Suspension Bridges in China[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2016, 22(1): 04016018-04016018.
- [7] Huang P, Li C. Review of the Main Cable Shape Control of the Suspension Bridge [J]. Applied Sciences, 2023, 13 (5): 3106-3106.
- [8] 唐茂林,强士中,沈锐利. 悬索桥成桥主缆线形计算的分段悬链线法[J].铁道学报,2003,(01):87-91.
- [9] Tian G, Zhang W, Chang J, et al. Analytical study on cable shape and its lateral and vertical sags for earth-anchored suspension bridges with spatial cables[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2023, 87(3): 255-272.
- [10] 吴月星,周建庭,孙马,等. 空间异形索面悬索桥主缆成桥线形计算方法[J].桥梁建设,2020,50(05):37-43.
- [11] 邓小康,徐恭义. 一种悬索桥主缆计算的新方法[J].铁道学报,2019,41(05):133-141.
- [12] 刘超,高展. 基于整体力学分析的自锚式悬索桥主缆找形法[J].同济大学学报(自然科学版),2020,48(01):1-6.
- [13] Zhang W, Zhang Z, Tian G, et al. Determining the Reasonable Completed Bridge State of a Self-Anchored Suspension Bridge with a Spatial Cable System Based on Minimum Bending Strain Energy: An Analytical Algorithm [J]. Journal of Bridge Engineering, 2023, 28 (5): 04023018.
- [14] Zhu W, Ge Y, Fang G, et al. A Novel Shape Finding Method for the Main Cable of Suspension Bridge Using Nonlinear Finite Element Approach [J]. Applied Sciences, 2021, 11 (10): 4644-4644.
- [15] Cao Q, Deng J, Feng Z, et al. A New Method for Finding the Shape of the Main Cable in the Special Cable Plane [J]. Applied Sciences, 2022, 12 (23): 11913-11913.
- [16] 谭红梅,袁帅华,肖汝诚. 大跨度悬索桥的基准索股调整[J].中国铁道科学,2010,31(01):38-43.
- [17] 邓小康,孙杰. 悬索桥基准索股调整计算的改进方法[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2021,40(12):90-95.
- [18] Zhang W, Tian G, Liu Z. Analytical Study of Uniform Thermal Effects on Cable Configuration of a Suspension Bridge during Construction[J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(11): 04019104-04019104.
- [19] 高庆飞,洪能达,郭斌强,等. 大跨径悬索桥索鞍处主缆长度计算方法[J].哈尔滨工业大学学报,2020,52(09):57-62.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS