

跨河悬索桥施工关键技术分析

文 / 包皓文 四川路桥华东建设有限责任公司

摘要：悬索桥是当前基建中较为常见的施工类型，其具有较大的跨越能力，能够跨越江河、峡谷。如果施工环境受到限制，施工跨径超过 800m，那么悬索桥可作为最佳方案。但实际施工中具有较多关键技术，这需要施工中加强注意，从而保证工程质量的提升。本文主要通过工程实例，对几个关键技术进行分析，以期为跨河悬索桥的施工提供参考。

关键词：跨河悬索桥；施工；关键技术

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.22.065

引言

悬索桥是一种跨径较大的桥梁类型，又称为吊桥。我国悬索桥相较于国外发展较晚，但随着经济的发展，科学水平的提高，悬索桥的发展得到了良好促进。近年来，部分悬索桥的施工相继完成，且符合国际标准。例如，江阴大桥跨径 1385m、青马大桥跨径 1377m、汕头湾大桥跨径 452m 等。虽然在悬索桥的建设中取得了良好进展，但实际施工中仍然需要对关键技术进行控制。基于此，本文对部分技术进行相关探讨。

一、工程概括

某地区 2019 年 4 月 15 日所建跨河悬索桥正式投入使用，该桥梁依水库区域而建，始于山城街道东江，终于驳山头。投资数额较大，道路工程投资将近 2 亿元，总长 4km，总跨度 1200 米多，主桥采用悬索桥施工方案。按四车道一级公路标准设计，设计速度 80km/h。

二、悬索桥计算单元

(一) 计算中的弹力理论计算

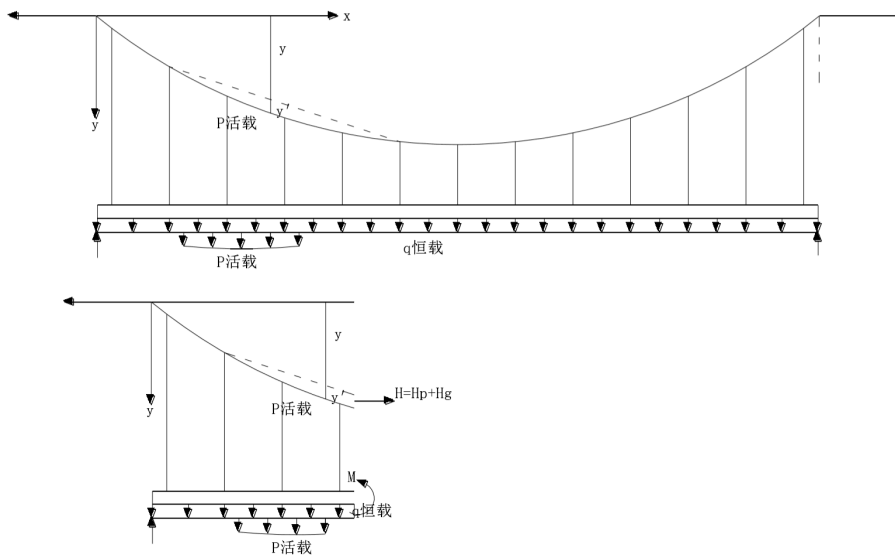


图 1 弹性理论计算图

如图 1 所示，当主梁中 P 点施加后，对任何部位的主梁截面弯矩计算采用以下公式：

$$M = M_{p0} - M_{iy} - (H_p + H_g) y \quad (1)$$

式中： M_{p0} 表示活载 P 对 O 取矩产生的弯矩； H_p 表示 P 活载作用下主缆水平分力； g 在公式中代表了荷载作用； y 在公式中代表截面边缘到主轴的距离。

悬索桥采用以上计算理论进行计算，可获得较大的安全储备。根据对上述公式的分析得出：弹性理论适用条件为：加筋梁刚度大但跨径小，该理论为小变形理论。对主缆的假定：主缆初内力不考虑。而公式 (3) 采用扰度理论，该理论适用条件：符合要求的小跨径悬索桥；通过几何非线性以及充分的解析获得结果是公示应用的

主要理论，假定主缆起初内力水平方向具有相同的分力。

(二) 索单元计算原理

具体计算公式如下：

$$K_{clastic} = \frac{EA}{L} \quad (2)$$

$$K_{sag} = \frac{12T^3}{w^2L^3} \quad (3)$$

式中： E 表示弹性模量； A 表示截面面积； L 表示长度； w 表示单位长度重量； T 表示拉力； K 表示拉索长度； $clastic$ 表示两端索力； sag 表示无应力索长。

(三) 在计算悬索桥平衡状态计算

平衡关系公式：

$$T_x \left(-\frac{z_{i-1} - z_i}{d_i} + \frac{z_i - z_{i+1}}{d_{i+1}} \right) = P_i \frac{z_{Gi} - z_i}{h_i} + W_{ci} = W_{si} + W_{ci} \quad (i = 1, 2, \dots, N-1) \quad (4)$$

式中： Z_i ($i=1, 2, \dots, N-1$) 和 T_x 为未知数； W 表示单位长度重量； G_i 为吊杆张力； h_i 为吊杆长度； c_i 为单元长度。

根据以上计算方法有多个未知数，求解的过程中可采用坐标与垂度关系公式：

$$Z \frac{N}{2} = \frac{1}{2} (Z_N + Z_0) + f \quad (5)$$

式中： Z_N 表示竖向平面； Z_0 表示横向平面； f 表示平面坐标； $Z \frac{N}{2}$ 表示节点坐标、加劲梁坐标、结构内力。

通过以上方式可计算主梁节点坐标和加劲梁坐标，并得出结构内力。

三、跨河悬索桥锚碇锚固施工技术

在悬索桥主缆锚碇锚固施工中可充分考虑锚碇锚固系统的应用。第一，在施工设计阶段，需要注重后锚梁以及底层锚杆的安装，标注具体安装部位，同时明确相关构件，合理控制水平面夹角及构件夹角。在施工阶段，为了保证预埋件设置的精确性，施工人员提前进行混凝土台阶的搭建，使其呈 V 形，完成后将锚梁和锚杆安装到指定位置，采用分层浇筑方法进行锚碇混凝土的施工。第二，该施工阶段施工技术优化后，在 V 型混凝土的基础上进行型钢定位支架的安装，以此为定位支架稳定性提供保障，控制和预防支架变形的情况发生，以此提高该施工的精确性。第三，混合型定位支架的布置需注意合理性。混合型定位支架具有较高的刚度，与全型钢定位支架的刚度相比具有优势，体积小，可以有效避免施工中的浪费情况。锚体构件均由体积较大的混凝土组成，因此施工中采用分批安装锚杆的方法，混凝土的浇筑也分层施工，以此提高施工质量，提高锚梁、锚杆以及支架的稳定性。

四、桥梁牵引系统施工技术

(一) 桥梁牵引系统的主要构件

上述工程中，共准备 4 台 20t 卷扬机，其中两台安装于山城街道东江岸主牵引，另外两台于驳山头岸副牵引。准备 1600m 的 $\phi 28$ mm 牵引绳六根，对卷扬机进行主牵引和副牵引。准备 2 套拽拉机进行主牵引绳和副牵引绳的连接。准备 8 套转向轮作为锚碇转向轮支架。准备 4 套塔顶门架导轮组作为塔顶门架。准备 36 套猫道门架导轮组进行散索鞍、猫道门架的安装。

(二) 牵引系统安装施工

在牵引索过河施工中，应分段进行，利用中塔进行对接。即从山城街道东江岸使用拖轮导索至中塔底部，对接中塔钢丝，中塔与驳山头岸的对接应用栈桥展索的方法，之后进行提升，从而满足施工要求高度。三塔塔顶安排卷扬机 $\phi 24$ 钢丝绳进行先导索。首先，将先导索利用三塔塔顶卷扬机分别卷入，与塔顶向轮下转，并将

其置入塔底，东江岸利用人工牵引方法至岸边，连接拖轮。其次，施工过程中进行水面清理，保证无船只。再次，以中塔为终点、山城街道东江岸为起点，进行导索作业，期间合理利用拖轮完成。实际施工期间，应合理利用驳山头岸设置的卷扬机设备，让其反方向运行，形成与导索方向相逆的作用力，以此控制牵引过程中的垂度。完成东江岸到中塔的牵引后，将导索卡紧后连接，此时驳山头岸到中塔的连接采用栈桥展索相关技术完成，开启塔顶卷扬机，提升牵引。最后，利用三塔卷扬机引索收紧，待两岸塔顶牵引索到位后收紧锚固。

五、猫道架设施工技术

(一) 施工准备

施工前需要做好充足的准备，包括机械、设备、器具、钢丝绳。根据工程要求加工预埋件，对临时设施进行安装。工程相关人员结合工程需求充分准备钢丝绳，使其能够满足施工需要，同时对各个准备环节加强监督。在施工过程中，需要施工人员提前进行猫道绳的制作，在进行相关连接时，使用钢丝绳套接—熔融金属套接施工技术，套接时选择合金浇筑接头，确保接头符合 ISO 3189 规定。与破断荷载相比，猫道绳预张拉荷载应高于 1/2，持续张拉 1h。气温稳定时，使用气温修复方法，在持荷状态下，对钢丝绳进行位置及编号的标记，并精准测长、下料。

(二) 施工技术落实

第一，架设先导索。悬索桥上部结构施工中先导索架设十分重要，可选择无人牵引技术。使用拖轮牵引法。由于施工地空旷，受到风力影响较多，有较高的安全风险，所以施工期间应结合实际情况，综合考虑施工安全、施工效率和成本，故选择拖轮牵引法。采用质量轻、牵引不沉底等特点的迪尼玛绳共计 18m，长为 1400m，牵引距离约 45m。实际操作中应于无风条件下施工。第二，形成牵引系统。牵引系统的建立中，首先进行先导索的架设，该步骤完成后，开启一端的卷扬机，并通过规格相符的过渡索与另一端连接，以此为基础沿着卷扬机的方向进行牵引。过渡索尾端的连接应用牵引钢丝绳，施工期间持续牵引，直至过河。牵引系统主要是拽拉装置与牵引绳的连接。第三，架设猫道承重索。采用连续架设方法从边跨到中跨架设猫道承重索，坚持中跨平衡、横桥向对称和顺桥向边跨的原则，这一方法能够减少主塔受到的影响。第四，安装变位钢梁及下拉装置。安装变位钢梁时，明确主索鞍位置，并将转索鞍设置于旁边，保持在塔顶转索鞍位置适当处，进行变位钢梁的变位，以主缆为中心集中各承重索。安装下拉装置时，为了保证主缆与猫道的线形一致性，在中跨近塔处进行下拉装置的安装。第五，侧网及立杆、面层铺设、横向通道安装。在施工期间进行猫道面层安装以及横向通道安装时，施工人员可采用下滑法，在主边跨铺设时应进行反拉系统和牵引系统的安装，而中跨边跨应基于设计要求进行塔两侧水平力差异的控制，架设期间需要检查塔的承重索及偏移垂度。以塔顶为中心向跨中铺设是猫道面层的施工方法，从锚固处向塔顶铺设边跨。第六，安装

猫道门架。依据从中跨跨中向塔顶以及边跨锚碇向塔顶方向的原则进行门架安装。第七, 安装面层托架滚轮。采用人工方法进行面层托架滚轮的安装, 明确位置后在牵引系统中放置托架滚轮, 施工人员操作钢丝进行猫道承重索与托架支架的固定。

六、缆索吊装施工技术

(一) 索鞍安装

缆索吊机索鞍应安装于主塔横梁和塔架横梁上, 施工过程中索鞍的选择以固定式为主。在施工期间, 为了促进施工顺利, 要提前加工侧板和底板, 并运送各个安装结构到指定位置, 此时施工人员用塔吊进行构件的运输, 全部准备齐全后, 焊接施工人员进场, 将底板与预埋件通过焊接进行固定。选择索鞍固定于底板, 待所有构件固定完成后安装转向轮。

(二) 跑车安装

搭建临时作业平台, 之后进行跑车的安装, 平台应稳定, 之后对跑车结构进行检查, 采用卷扬机将跑车吊起, 放置在作业平台上, 并加以固定。在施工过程中, 应确保临时平台符合固定, 位置精确。放置跑车时应保持缓慢落地, 避免冲击作业平台。

(三) 承载索架设

架设承载索施工阶段, 应明确具体施工部位, 与卷盘位置安装, 在锚碇处进行放置架的安装施工, 与此同时对卷扬机完成安装, 以索塔为终点, 将承载索通过吊机运送至此, 绳索布置时保证牵引索与卷扬机的连接。确保承载索的固定后进行安装。承载索绳头达到塔顶位置, 将其穿过索鞍, 连接至塔顶牵引索, 成功后解除其他牵引索连接。承载索长度需合理控制, 以 100m 为宜, 将滑轮安装于塔顶过河承载索下方。塔顶承载索过河时, 需要施工人员卷扬机运转速度, 以便垂度控制。承载索在锚碇位置安装后, 需要及时转化绳头与牵引所的连接, 将绳头连接与滑轮, 并保持固定。连接滑轮组与锚碇预埋件, 控制卷扬机反向操作, 将滑轮牵引至塔顶。安装完成后, 进行调整。

(四) 起重索架设

起重索架设施工阶段, 应将其布置在悬索桥中跨和边跨的左幅及右幅上, 施工人员需要进行钢绳的合理选择, 保证与牵引规格相同。另外, 合理设计起重索路线, 此案例中设计 10 条。在实施安装过程中, 使用卷扬机连接起重索的一端, 另一端固定于地面, 安装过程中应用跑车辅助。

(五) 支索器安装

支索器的安装采用塔吊与人工结合的方法。利用跑车移动作用, 位移到主塔周围, 便于后续悬挂支索器, 之后操作塔吊吊起支索器, 将其在主索上悬挂, 施工人员悬挂支索器, 并加强固定。完成一侧悬挂后, 进行支索器牵引索安装, 从而控制稳定性和张力。

七、上横梁支架施工技术

(一) 安装上横梁支架

上横梁支架的主斜腿、副斜腿、平联钢管分别采用

D840mm×12mm、D630mm×10mm、D245mm×7mm 钢管截面, 承重横梁采用 T56a 工字钢。基于横梁顶支撑处加强腹板的操作下进行 321 贝雷梁放置, 使用三幅一组的方法, 并控制间距为 60cm 进行横梁腹板下的布置。其他部位采用二幅一组, 以 90cm 的间距控制。将支撑架安装于贝雷梁, 并使用 L63mm×4mm 角钢设置剪刀撑。采用与贝雷梁相同的材料在梁上设置横向分配梁。选择厚竹胶板(15mm) 铺设纵向分配梁。

(二) 预埋上横梁支架

选择 6 块尺寸合适的钢板进行顶钢管预埋, 直径锚筋均设置成 25mm, 布置 4 层锚筋, 以 250mm 的间距为宜, 选择 20 根钢管以工程实际情况控制距离后进行水平布置, 控制好锚固长度, 以 750m 为宜。主钢管预埋时选择 6 块尺寸合适的钢板, 锚筋直径以 20mm 为宜, 共设置 6 层, 间距 250mm, 选择 20 根钢管以工程实际情况控制距离进行水平布置, 控制好锚固长度, 以 550m 为宜。副钢管预埋时选择 6 块尺寸为尺寸合适的钢板, 锚筋直径、层数, 间距与主钢管预埋时保持一致, 选择 26 根钢管工程实际情况控制距离后进行水平布置, 控制好锚固长度, 以 550m 为宜。

(三) 操作平台预埋件及上横梁桩安装

预埋锚筋 16mm 的钢板, 共计 6 块, 布置 2 层锚筋, 间距为 200mm, 水平间距 150mm 为, 设置 4 根, 每根锚固长度 450m, 以上为横撑预埋钢板方法。斜撑预埋选择 6 块锚筋为 16mm 的钢板, 布置 2 层锚筋, 与预埋锚筋的间距相同, 150mm 为水平间距, 设置 4 根, 每根锚固长度 450m。钢管桩与预埋件焊接, 保持垂度和质量。

上述操作完成后依次安装钢管桩剪刀撑、承重横梁、贝雷主梁、分配梁、下横梁底模和上横梁内外模。

八、工程现状

桥塔和悬索是跨河悬索桥的核心结构。通常情况下, 跨度越大的悬索桥, 桥塔高度越高, 在施工过程中, 需要加强对稳定性问题的关注。此次案例中的工程, 根据弹力理论计算、索单元计算、平衡计算和垂度计算后, 结合工程实际情况, 采用上述各个技术手段完成施工, 促使大桥顺利竣工, 大桥建成后质量良好, 具有较高的使用质量, 无安全事件发生。

结语

本文通过实例对各种施工技术的应用进行介绍, 实际工程中需要根据施工设计方案合理地选择施工技术, 只有这样才能为相关工程的建设提供了参考。由此可见, 通过合理的计算以及施工技术的应用, 能够提高工程建设的效率和质量。

参考文献

- [1] 朱耀博. 自锚式悬索桥钢箱梁顶升施工质量控制探讨[J]. 黑龙江交通科技, 2023(9): 99-101.
- [2] 池忠波, 刘志, 邱洋. 山区悬索桥超大倾斜式隧道锚施工技术研究[J]. 黑龙江交通科技, 2023(9): 147-149.
- [3] 刘超. 管道悬索桥上部结构的施工技术研究[J]. 交通建设与管理, 2022(6): 138-139.