

斜拉桥钢绞线斜拉索精细化施工工法

1 前言

1.0.1 随着桥梁建设跨度越来越大，斜拉桥越来越多的被应用到工程实践当中，其钢绞线斜拉索多采用镀锌钢绞线，有部分大型斜拉桥已采用环氧喷涂钢绞线作为斜拉索，但环氧喷涂钢绞线拉索的应用在国内外还不是很普遍。环氧喷涂钢绞线拉索具有施工简便、设备可小型化等优点，但人们对其索力的均匀性、锚固效果、防腐等方面仍存在疑虑，在钢绞线斜拉索精确下料、快速环向切割、斜拉索外套管焊接及穿索安装的技术和工艺方面没有较规范的控制方法。随着桥梁建设不断发展，斜拉桥将会得到更广泛的应用，因此斜拉索施工作为斜拉桥施工中关键工作，其施工方法变得尤为重要，在施工中如果对斜拉索控制不准确，将会给整座桥梁带来巨大的安全隐患。

1.0.2 杭州绕城西复线东苕溪大桥主桥长 308m，采用 84+140+84m 预应力混凝土箱梁矮塔斜拉桥结构，主墩采用塔梁固结、墩梁分离的结构体系，设计时主梁按全预应力构件考虑。主梁采用单箱五室大悬臂变高度箱形截面。主梁在每根拉索锚固点处均设有横隔板，厚度 50cm，纵桥向间距为 4.0m，主墩横梁厚度为 5.0m。全桥共设 4×12 根斜拉索，斜拉索采用 $\Phi s15.2$ 的高强度低松弛环氧喷涂钢绞线，抗拉强度标准值为 $f_{pk}=1860\text{Mpa}$ ，斜拉索规格为 55- $\Phi s15.2$ 和 61- $\Phi s15.2$ ，单股 $\Phi s15.2$ 环氧涂层钢绞线外包 PE 保护，整束斜拉索所外包 HDPE 护套，护套内填充防腐剂。斜拉索张拉端设在梁上，锚具采用和斜拉索配套的可单根更换索式 15-55 锚具和 15-61 锚具，塔上斜拉索通过分丝管（索鞍）贯通，分丝管为多组钢管组焊而成，塔端设置抗滑装置。在东苕溪大桥大桥中，提出钢绞线斜拉索精细化施工方法，在钢绞线的穿索、切割、下料控制及保护套管的施工方面取得了较大的突

破，其中关键技术形成专利《一种钢绞线长度测量装置》《一种自带调平斜拉索聚乙烯套管环向切割焊接装置》已授权。通过采取以上措施及施工工艺，有效解决了环氧涂层钢绞线斜拉索的施工难点，成桥后线形顺直，索力可控，为今后相似条件的环氧涂层钢绞线斜拉索施工提供了参考。

2 工法特点

2.0.1 钢绞线斜拉索长度精准测量。人工以匀速拉住钢绞线前进，钢绞线带动主传动轮转动，计米器传动轴带动计米器转动测量钢绞线长度。具有测量速度快、精度高、操作简单可靠。

2.0.2 实现钢绞线斜拉索快速环向切割。当钢锯切割完钢绞线外层钢丝，锯切机的前移受到限位装置的限制停止移动，防止锯切钢锯对钢绞线中心钢丝的切割损伤。确保锯切机钢锯只能切割钢绞线外层钢丝，而不能切割钢绞线中心钢丝，避免中间钢丝受损，加快了施工进度，保证了施工安全。

2.0.3 通过使用的钢绞线穿索锁扣连接牵引装置，当穿索牵引装置磨损钢丝绳发生断线时，只需要将牵引装置空心段拆开，利用锚固钢环对钢丝绳进行重新挤压锚固，完成牵引索的连接，同时实现牵引装置的重复利用，节约了施工成本，加快了施工进度。

2.0.4 通过斜拉索 HDPE 管焊接工艺改进，有效控制斜拉索聚乙烯套管快速精准切割，保证斜拉索聚乙烯套管切割面与套管中心轴线呈（90°）垂直状态，使得斜拉索聚乙烯套管的接头的精准对接，具有切割焊接快速、高效、精准、简单、安全等优点。

3 适用范围

3.0.1 本工法适用于斜拉桥斜拉索施工。

4 工艺原理

4.0.1 钢绞线斜拉索施工中，精细化控制技术对斜拉桥结构受力起到至关重要的作用，因此斜拉索的切割、穿索、测量下料及护管施工需要精细化控制，从而确保斜拉索按设计完成施工，保证大桥结构受力合理和使用安全。

4.0.2 斜拉索下料施工中，采用快速环向切割技术，电动锯切机锯沿外环形 U 型滑槽轨道，围绕钢绞线 360 度环向旋转，当钢锯切割完钢绞线外层钢丝，锯切机的前移受到限位装置的限制停止移动，防止锯切钢锯对钢绞线中心钢丝的切割损伤。

4.0.3 钢绞线牵引过程中接头施工，锯切完成后，钢绞线中心钢丝放入穿索锁扣连接牵引装置内进行钢绞线的牵引，当穿索牵引装置磨损钢丝绳发生断线时，只需要将牵引装置空心段拆开，利用锚固钢环对钢丝绳进行重新挤压锚固，完成牵引索的连接，同时实现牵引装置的重复利用。

4.0.4 钢绞线长度下料施工中，牵引过程中对钢绞线长度控制过程中通过使用精密长度测量装置，只需要环氧涂钢钢绞线通过导向轮并放置在导向轮凹槽中，用尼龙压轮顶压在被测量的钢绞线上，调整好压轮的弹簧松紧度，钢绞线通过主传动与下传动轮之间凹槽中，计米器传动轴带动计米器转动测量钢绞线长度。

4.0.5 钢绞线斜拉索 HDPE 管护套施工中，对原有斜拉索外套管焊接机进行改进，主要通过水平调平板上设纵、横方向的调平气泡的方式对焊接机的平衡状态进行调节。从而可以实现环氧钢绞线斜拉索聚乙烯套管焊接机

的移动行走和本身的调平，还可有效控制斜拉索聚乙烯套管快速精准切割，保证斜拉索聚乙烯套管切割面与套管中心轴线呈（90°）的垂直状态，使得斜拉索聚乙烯套管的接头的精准对接。

5 施工工艺流程及操作要点

5.1 施工工艺流程

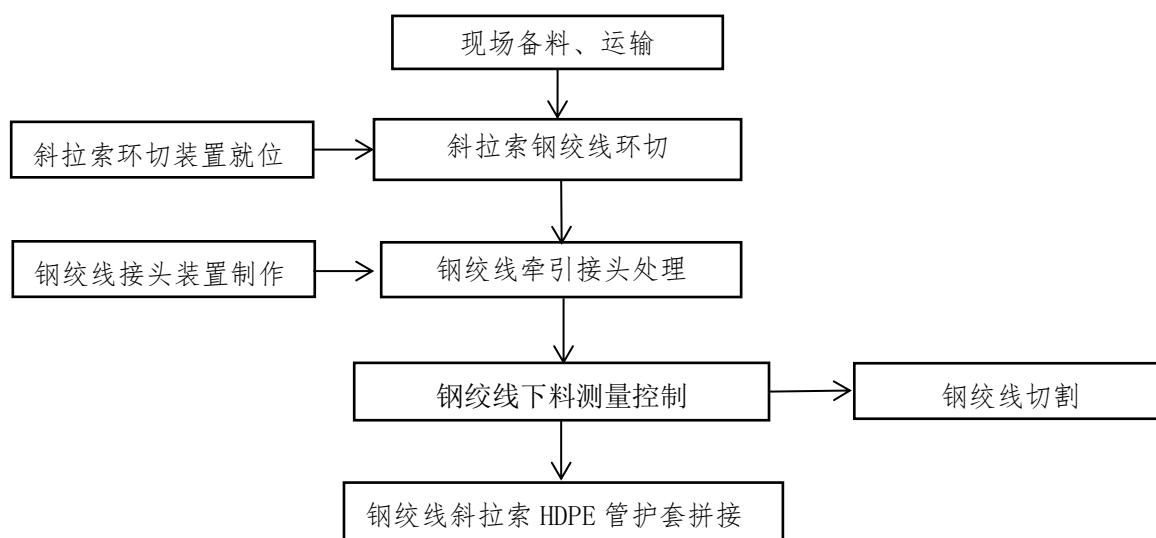


图 5.1 斜拉索精细化施工工艺流程图

5.2 操作要点

本工法主要通过改进传统施工装置及工艺的方法，对斜拉桥钢绞线斜拉索施工进行精细化控制，工法重点介绍斜拉索钢绞线环切、钢绞线牵引接头处理、钢绞线下料测量控制、钢绞线斜拉索 HDPE 管护套拼接等施工要点。

5.2.1 斜拉索钢绞线环切

(1) 环氧喷涂钢绞线下料

传统环氧涂层钢绞线利用人力索盘（放料架）放料，人工拖拽，在指

定长度处做好标记，到位后利用砂轮切割机切割，此种方法不仅浪费人力，而且由于拉索钢绞线普遍偏长，下料完成后占用场地偏大，影响现场文明施工。东苕溪大桥拉索钢绞线下料时利用一个人工索盘放料，在 15m~20m 处再放置一台电动索盘收料，两个索盘中间放置一台项目部自主研发的预应力钢绞线长度测量装置（见图 5.2.1），电子显示钢绞线释放长度，到位后利用砂轮机切割，单根钢绞线下料完成后在电动索盘上打包成卷然后吊运至指定位置堆放，不仅节约了人力物力，同时节约了堆放场地，规范了现场文明施工。



图 5.2.1 钢绞线索盘及下料完成钢绞线

（2）环氧钢绞线斜拉索快速环向切割

传统的、常规的钢绞线拉索外围的钢丝切断剥离，是工人用手持式电动砂轮片围绕钢绞线外围切割剥离，容易造成中心钢丝的损伤和操作人员自身伤害。如图 5.2.4 所示为环氧钢绞线斜拉索快速环向切割装置，环氧钢绞线斜拉索在环向切割过程中，电动锯切钢带锯沿外环形 U 型滑槽轨道围绕钢绞线 360 度环向旋转。锯切机固定支架是二根竖直方钢导向柱，电锯在竖直方钢导向柱上可以上下灵活移动，竖直方钢导向柱上设置锯切机固定支架顶压弹簧，电动锯切机在固定支架顶压弹簧压力的作用下，施加锯

切机的切割压力。环氧钢绞线斜拉索快速环向切割过程中，操作人员手握操作把手，使锯切机沿外环形 U 型滑槽轨道 360 度环向旋转，锯切机在固定支架顶压弹簧压力的作用下，向位于钢绞线的方向移动，钢带锯高速运动切割钢绞线。

锯切机固定支架竖直方钢导向柱上，设有切割限位槽装置。当钢带锯切割完钢绞线外层钢丝，电动锯切机的前移受到固定支架限位槽的限制终止移动，防止了锯切钢带锯对钢绞线中心钢丝的切割损伤。确保锯切机钢带锯只能切割钢绞线外层钢丝，而不能切割钢绞线中心钢丝。

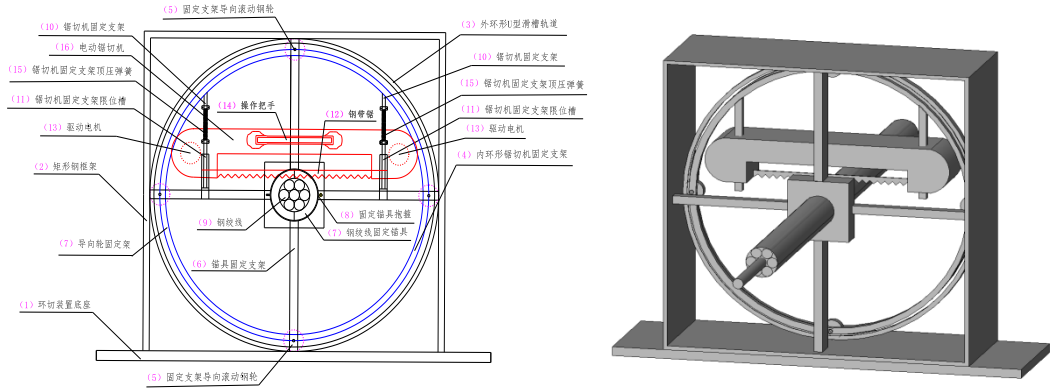


图 5.2.3 环氧钢绞线斜拉索快速环向切割装置

5.2.2 钢绞线牵引接头处理

钢绞线拉索在穿索前，要用切割工具将外层的钢丝切断剥离，只留下钢绞线拉索中心的钢丝。传统的斜拉索穿索锁扣连接牵引装置，是在尾部空心段插入牵引钢丝绳，然后用挤压方式把插入的钢丝绳与尾部挤压扁平锚固一起，容易导致钢丝绳磨损断线，而且挤压方式不能是现充利用，造成整个穿索锁扣装置损失浪费。如图 5.2.3 所示，采用液压镦粗机将留下的中心钢丝前端镦粗成球体形状，加工制造了一种可拆卸反复循环使用的钢绞线穿索锁扣连接牵引装置，该装置通过在牵引锁扣装置中部增加锚固钢

环的方式，将牵引钢丝绳锚固于牵引装置内，当穿索牵引装置磨损钢丝绳发生断线时，只需要将牵引装置空心段拆开，利用锚固钢环对钢丝绳进行重新挤压锚固，完成牵引索的连接，同时实现牵引装置的重复利用。

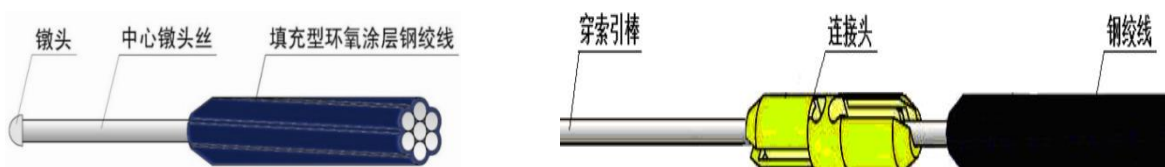


图 5.2.4 环氧涂层钢绞线墩头及牵引接头

5.2.3 钢绞线下料测量控制

在斜拉索穿索前，要按照设计长度下料切割，用钢卷尺测量长度的精度低、误差大。如图 5.2.5 所示，研发的环氧喷涂钢绞线拉索精密长度测量装置，只需要环氧涂钢钢绞线通过导向轮并放置在导向轮凹槽中，用尼龙压轮顶压在被测量的钢绞线上，调整好压轮的弹簧松紧度，钢绞线通过主传动与下传动轮之间凹槽中，人工以匀速拉住钢绞线前进，钢绞线带动主传动轮转动，计米器传动轴带动计米器编码转动测量钢绞线长度。具有测量速度快、精度高、操作简单可靠。

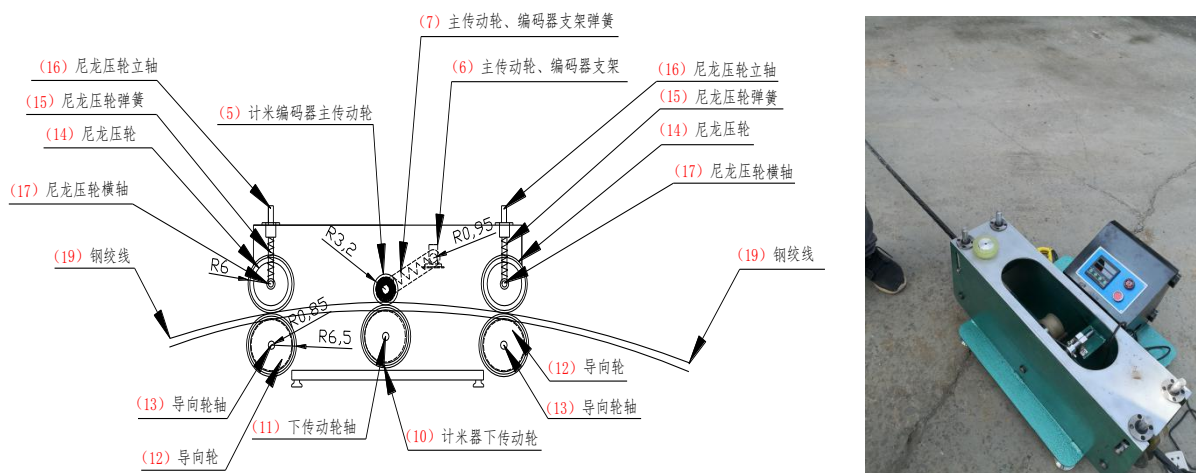


图 5.2.5 钢绞线长度精密测量装置

5.2.4 钢绞线斜拉索 HDPE 管护套拼接

斜拉索外套管焊接作业时，如果焊接机不是处于精准水平姿态，会导致高密度聚乙烯（HDPE）管的切割截面，不是垂直的平整截面。热熔对接挤压，焊缝不均匀，导致焊接后的斜拉索外套管不是成直线，而成为扭曲状态而影响美感，严重的丧失使用功能而造成浪费。目前，市场上高密度聚乙烯（HDPE）斜拉索外套管焊接机，在进行 HDPE 管焊接作业时，由于地面不平整，管焊接作业前，要用木板、木片、木楔支垫，进行焊机水平姿态的调整，调平速度慢、水平精度低，而且受焊机作业的震动木片、木楔支垫容易松动滑落失稳。

如图 5.2.6 所示，通过对移动式高密度聚乙烯（HDPE）斜拉索外套管焊接机进行改装，在底座设有四个刹车耐磨橡胶轮，橡胶轮支架为螺栓支撑柱与焊机底座相连，螺栓支撑柱上设有升降手柄轮。设有纵横方向的调平气泡，用以显示焊接机的调平姿态。拉索外套管焊接作业时，焊机置于 HDPE 管头处，转动螺栓支撑柱上的升降手轮，用以调整焊机底座的水平姿态，同时观察焊机底座纵横方向的调平气泡。调平气泡居中即可。随即进行套管焊接接头切割，焊接板通电加热焊接作业，完成一个接头焊接后，又要将焊机移动到下一个接头焊接。此装置具有移动方便快捷、调平速度快、稳定牢固、刹车锁定不移动等优点，确保了斜拉索 HDPE 外套管的焊接质量。

可以实现环氧钢绞线斜拉索聚乙烯套管焊接机的移动行走和本身的调平，可有效控制斜拉索聚乙烯套管快速精准切割，能保证斜拉索聚乙烯套管切割面与套管中心轴线呈（90°）的垂直状态，能确保斜拉索聚乙烯套管的接头的精准对接，聚乙烯套管的接头的结合面严丝合缝，具有切割焊接

快速、高效、精准、简单、安全等优点。

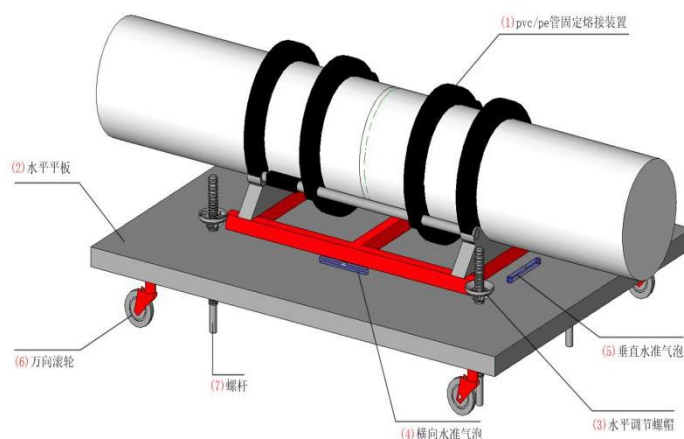


图 5.2.6 带有调平装置移动式 HDPE 斜拉索外套管焊接机

6 材料与设备

6.1 主要设备与材料（见表 6.1）

序号	名称	规格型号	单位	数量	备注
1	钢绞线索盘	/	个	2	用于存放钢绞线
2	砂轮切割机	J3G3	台	2	用于钢绞线切割
3	墩粗机	/	台	2	用于钢丝绳牵引端部处理
4	斜拉索环向切割装置	/	台	1	用于钢绞线环向切割
5	牵引连接头	/	个	5	钢绞线牵引连接
5	钢绞线长度测量装置	/	台	1	钢绞线长度测量
6	HDPE 外套管	Φ240×8mm	根	16	保护斜拉索
7	外套管焊接机	/	台	1	用于外套管焊接
8	电焊机	ZX7-315T	台	1	用于各种装置焊接
9	调平气泡	/	个	4	调平外套管
10	吊车	25T	台	1	用于钢绞线及机具吊运
11	运输车		台	1	用于材料运输

7 质量控制

7.0.1 施工过程中要严格遵守《钢结构设计规范》(GB50017-2003)、《建筑结构荷载规范》等规范标准、技术要求中的相关规定。

7.0.2 将拉索钢绞线两端的 PE 及环氧涂层剥掉一部分作为工作长度。剥皮时应注意刀具不能损伤钢绞线，清洗时应将钢绞线端头打散后用棉纱

擦拭干净。同时擦拭干净的光面钢绞线要进行防污保护。

7.0.3 钢绞线切割中严禁采用电焊机进行切割，防止对钢绞线受力产生影响，必须采用砂轮切割机进行切割。

7.0.4 下料前，应对钢绞线索盘出厂编号、质量保证书编号及单个索盘钢绞线重量进行记录。

7.0.5 在斜拉索穿索前，要按照设计长度下料切割，常规钢卷尺测量长度的精度低、误差大，必须采用钢绞线拉索精密长度测量装置进行测量下料。

7.0.5 钢绞线环向切割时避免对中间钢丝损坏，采用环氧钢绞线斜拉索快速环向切割装置进行切割，确保牵引接头处理。

7.0.6 管材规格、预热温度（℃）、卷边高度 $H=1\text{mm}$ 时的预热压力、预热完成后加热时间、允许最大切换时间、焊接压力、冷却时间等严格按照设计要求控制。

7.0.7 刨削时压力要均衡，刨花成连续圈状，厚度均匀，才能退刀，退刀时压力要适当减小，退刀时要直进直出，不能左右摆动。退刀后进行试对，看管接缝四周是否有缝隙，如有缝隙必须重新刨削。刀片刀口钝用细砂轮进行水磨，要注意刀口的角度。

7.0.8 成立质量控制小组，分级管理、逐级检查、集中研讨，严格把控现场实施质量，对组装构件及时检查，重点要点部位进行规范、设计及标准对照检查。

7.0.9 制定质量管理制度，包括质量责任制度、质量目标管理制度、质量预控制度、施工过程中的质量检测制度、原材料、成品和半成品进场验

收制度、技术交底制度、工序检查制度等。工程实施过程中，要严格执行质量管理体系。

8 安全措施

8.0.1 施工中，贯彻执行“安全第一，预防为主，综合治理”和“动态相关性”的原则，严格执行《中华人民共和国安全生产法》、《建设工程安全生产管理条例》及《施工现场临时用电安全技术规范》。

8.0.2 专职安全工程师制定《安全生产责任制》，贯彻安全管理理念，现场做好安全防护；起重吊装作业严格执行《建筑机械使用安全技术规程》（JGJ33-2015）、《建筑安装工人安全技术操作规程》和《建筑施工高处作业安全技术规范》（JGJ80-2016）规定要求。

8.0.3 现场重点安全防护措施：HDPE 管堆放场地要垫平，堆放高度不宜超过 6 层，要远离火源。用卷尺选出 HDPE 管并做好顺接标记，变形严重的 PE 管不能使用。施工人员的生活污水，用固定容器收集，定期运至污水处理处进行处理。对用电设备要确保电路安装的正确，检查转向是否正确，设置接地装置及标志，要严格按照安全用电方案办理，做到一机一闸一漏，人走闸锁，要安排专门电工负责，加强日常和定期维修工作，及时发现和消除隐患，建立维修工作记录，并于每处集水井处配备灭火器材。

8.0.4 创建安全文明工地：品质工程创建本着“内业指导外业，外业验证内业”的原则，结合现场实际情况，制定特种人员培训教育及持证上岗、进入施工现场安全防护用品佩戴、特种机械安全技术措施、施工用电、夜间照明等相关安全管理制度和防护措施。

9 环保措施

9.0.1 结合工程条件和环境特点，贯彻执行“预防为主、全面规划、综合治理”的方针和“因地制宜、重点管理、注重效益”的原则，全面按照《建筑施工现场环境卫生标准》、《建筑项目环境保护管理条例》，严格控制施工阶段的环境、水土污染，确保实现“环境得到有效保护、水土不受污染”的环境工作目标。

9.0.2 针对现场废水产生量建立四级沉淀池，严禁污水不处理排放，排放的水一定要经检验达标后方可排入河沟。

9.0.3 严格控制施工期噪声排放量，施工现场严格执行 GB12523-90《建筑施工现场界噪声限值》，并遵照环境噪声管制相关办法执行。

9.0.4 选择低污染机械设备，并安装空气控制系统和尾气净化装置，进出现场设置洗车台，同时便道配备专用洒水车保持路面潮湿，避免大气污染和扬尘。

9.0.5 油料和涂料物品远离水源设置。现场钢管喷涂施工选择下风口，下方铺设隔离布，避免油渍、涂料污染水质。

9.0.6 按文明施工要求，场地布设统一规划，分区标识隔离，标牌齐全统一；施工区与非施工分离设置，临边围挡和工作平台进行全封闭作业，材料、成品摆放整齐、场区划分显著、现场清洁整齐，做到文明标化规范。

10 效益分析

10.1 经济效益分析

本工法与传统斜拉索施工技术相比较，具有灵活性、便捷性和安全性，

工法主要采取精细化施工的方式对传统斜拉索施工进行改进提升，通过研发了钢绞线拉索精密长度测量装置看，能够对钢绞线长度进行精准测量下料，相比传统卷尺测量的方式，该装置更加精快捷，为整个桥梁斜拉索施工节约工期约 15 天，节约综合管理成本 5 万/天*15 天=75 万元；研发的绞线斜拉索快速环向切割装置，避免钢绞线环向切割对中心钢丝损伤，确保工成安全，相比传统手工切割方式可极大的减少钢绞线损耗，节约材料损耗费用 50 万元；斜拉索 HDPE 管焊接工艺改进，使得斜拉索聚乙烯套管的接头的精准对接，具有切割焊接快速、高效、精准、简单、安全等优点，减少施工投入 10 万元，节约材料成本 20 万元；研发可拆卸反复循环使用的钢绞线穿索锁扣连接牵引装置，可实现牵引装置的重复利用，节约人工及材料费 48 万元。上述一系列精细化措施的应用，有效加快整个斜拉桥斜拉索施工进度，节约大量人工和材料，带来了巨大的经济效益。工法应用于 G25 德清至 G60 桐乡高速联络线湖州段工程 LTJ01 标段东苕溪大桥工程共计节约成本约 203 万元。

该工法应用于湖州市创业大道跨长湖申线大桥工程共计节约成本约 155 万元。

10.2 社会效益分析

改进了穿索工艺，研发出一种可拆卸反复循环使用的斜拉索钢绞线穿索锁扣连接牵引装置和一种环氧钢绞线斜拉索快速环向切割装置还有一种环氧钢绞线拉索、预应力钢绞线长度测量装置，另外针对钢绞线斜拉索 HDPE 护管焊接质量难以控制的问题研发了一种自带调平斜拉索钢绞线聚乙烯（HDPE）套管焊接装置。实现了矮塔斜拉桥钢绞线斜拉索精细化施工，

减少了人力物力的浪费，提高了施工质量，规范了现场文明施工。为今后斜拉桥施工提供更精细化的施工方法，具有一定的借鉴意义。相比常规方法斜拉桥钢绞线斜拉索精细化施工工法从成本、工期及环保等方面有了较大改进，特别是在改善斜拉索施工方面优势突出。因此业主、监理组织同行进行观摩学习，得到大家一致好评，扩大了社会影响力，树立了良好的企业形象，为下一步申报“优质工程”打下基础。

11 应用实例

11.1 东苕溪大桥

G25 德清至 G60 桐乡高速段联络线湖州段工程 LTJ01 标段，东苕溪大桥是一座大型桥梁，东苕溪大桥主桥长 308m，采用 84+140+84m 预应力混凝土箱梁矮塔斜拉桥结构，主墩采用塔梁固结、墩梁分离的结构体系。索塔布置在中央分隔带上，桥面以上索塔结构高约 29.322m，为钢筋混凝土结构，采用多边实心截面，塔根部顺桥向长 5.0m，横桥向宽 2.0m，塔顶顺向长 3.0m 横桥向宽 2.0m，塔身设计景观造型。根据现场的实际情况，在工期紧、任务重的情况下，制定了功效更高施工方案，通过运用钢绞线斜拉索精细化施工工法，改善了传统斜拉索施工方式，大大提高了主塔施工工效，节省人力物力，保证了斜拉桥穿索质量。



图 11.1 东茗溪大桥

11.2 湖州创业大道跨长湖申线大桥工程（湖州创业大桥）

湖州市创业大桥位于长湖申运河之上，起点桩号 K0+438.420，终点桩号 K1+072.398，桥梁全长 633.978m，其中桩号 K0+678.908~K0+927.908，长度 249.000m 范围内为大桥主桥范围，其余为两侧引桥。跨径布置：主桥：149+100=249m，标准桥宽 38m，结构形式：混凝土主梁独塔斜拉桥，引桥：西引桥：5×24+5×24=240m，东引桥：6×24=144m，标准桥宽 35m，结构形式：简支变连续小箱梁。道路等级：城市主干路；设计车速 40km/h；设计使用年限 100 年。



图 11.2 创业大桥