

超大直径主缆索夹同步分级张拉施工工法

中铁大桥局集团有限公司

阮梦飞 李奔琦 王瑞 杨忠勇 田永强

1. 前言

悬索桥结构受力明确，恒载和活载通过吊杆传递到主缆上，索夹与主缆之间的抗滑摩擦可以确保这种传递的有效性。索夹螺杆张拉力不足会导致抗滑摩擦力不足，从而导致索夹在主缆上滑移，这不仅会改变吊杆状态（竖直吊杆变成斜吊杆），对结构产生不利影响，而且会损坏主缆防锈层，滑伤缠丝，导致主缆损伤。同时索夹滑移后的位置调整或者重新安装施工难度极大，对桥下交通线路影响巨大，因此索夹螺杆张拉力的控制是悬索桥施工的质量控制关键环节。

国内外已建、在建悬索桥项目中，索夹张拉均采用对称分批张拉，张拉力分布不均匀、损失率较高等问题普遍存在，为了消除上述现象，需要对螺杆进行反复检查、反复张拉耗时费力且效果不佳。

新建连镇铁路五峰山长江大桥，为世界首座公铁两用悬索桥。主缆横向中心间距 43 米。单根主缆长约 1932 米、直径 1.3 米，由 352 根索股组成。每根索股由 127 根直径 5.5 毫米的 1860 兆帕高强平行钢丝组成。设计空隙率在索夹处取 18%，在索夹外取 20%。索夹分为有吊索索夹和无吊索索夹，有吊索索夹与吊索采用销轴连接。索夹均采用上下对合型结构形式，采用 M52 高强螺杆连接紧固。

大桥的荷载在悬索桥中首屈一指，其主缆为世界上最大直径主缆，对应的索夹也是世界最大的，单个索夹最重达 10.8 吨，长 2.4 米。为了确保索夹与主缆之间摩擦力能够满足抗滑需要，单个索夹最多设计了 24 根螺杆对其进行对拉。为了确保施工过程中螺杆张拉力分布均匀，新建连镇铁路五峰山长江大桥主缆索夹张拉采用同步分级张拉的方式。

为了促进该施工方法在我国类似桥梁工程项目中得到推广应用，根据新建连镇铁路五峰山长江大桥主缆索夹张拉实际经验编制本工法，供今后同类索夹施工参考借鉴。

2. 工法特点

2.1 本工法使用的同步拉伸装置小巧轻便、安全可靠，通用性强，能够适应相邻螺杆中心距在 20cm 以上的索夹。

3.2 本工法采用分级同步张拉的方法，能确保单个索夹上所有螺杆轴力分部均匀。

3.3 本工法采用逐级持荷保压的方法，在拉伸器达到一定压力时，进行保压持荷，使主

缆内部钢丝充分蠕动、变形，大大减缓螺杆轴力损失速率。

3.4 本工法采用超声波螺杆轴力检测技术，配合传统的单台手摇泵检测技术，对螺杆轴力分布、变化情况进行系统、全面的检测，并根据检测结果进一步指导现场施工。

3. 适用范围

本工法适用于所有悬索桥上下对合式索夹的安装，在大型悬索桥施工中更具有优势。

4. 工艺原理

本工法主要的工艺是在单个索夹所有螺杆上安装拉伸器，通过油泵驱动使其同步、分级张拉至设计轴力。每一级张拉完成后，通过拨套拧紧螺帽。分级张拉时，尤其是最后一级张拉后，需要长时间保压持荷，让主缆钢丝充分蠕动、变形，使主缆结构更加稳定，内力分部更加均匀。

5. 施工工艺流程及操作要点

5.1 索夹安装

(1) 将索夹吊装到位再上下对合之后，先在四个角处穿上 4 根螺杆并对其进行初步张拉，张拉力控制在 10%设计拉力以内，使索夹与主缆密贴，索夹对主缆产生一定的握裹力，确保后续作业时索夹的安装位置固定不动。

(2) 将剩余索夹螺杆孔中穿入螺杆，调整所有上螺杆外露长度，确保防水螺帽能全部拧入，且防水螺帽顶部还留有适当空隙。尽量调整凹凸垫圈保证其同轴，同时调整防水螺帽棱角与螺帽棱角对应，以便后续防腐涂装作业。

5.2 拉伸器安装

(1) 拉伸器进场验收合格后，对所有油泵、拉伸器进行验收并编号，油泵、油表和拉伸器需要配套使用，每个油泵对应一个油表和 12 个拉伸器。

(2) 提前对所有拉伸器进行标定，得出拉伸器的平均线性回归方程，并计算设计拉力下对应的油压。

(3) 拉伸器安装前将螺母在螺杆上从头到尾拧一遍，确保紧固体系匹配良好。若发现施拧不畅的，需通知厂家现场处理，或返厂处理。

(4) 为更好地保证张拉作业的同步性，将每台油泵对应的拉伸器在大小里程交叉布置。

5.3 分级同步张拉

(1) 索夹正式张拉之前，再次确认索夹安装位置，复核记录索夹偏转、横桥向、纵桥向偏位情况，确保索夹安装位置准确。

(2) 启动拉伸器，将各螺杆同步张拉至设计张拉力的 10%，拧紧所有螺杆的螺帽。在索夹两侧缝隙的左、中、右三处合适位置画上下贯通的直线，用游标卡尺测量并记录该三处缝隙宽度、下螺帽外露长度，及周长和纵横向主缆直径。

(3) 分级将螺杆张拉至设计张拉力，张拉过程中同步拧紧下螺帽。其中在张拉至设计张拉力的 50%及 100%时需测量并记录索夹缝隙各标记点的宽度、下螺帽外露长度、主缆周长和纵横向直径。

(4) 分级张拉时先驱动拉伸器达到对应油压后持压，在当前压力下通过螺母拨套拧紧螺杆螺母，然后依次旋转拉伸器使拉伸器底口再次与索夹密贴，所有拉伸器均旋转到位后，再次驱动拉伸器完成下一个行程的张拉。分级张拉过程中若发现个别拉伸器进尺存在异常，需要及时排查问题后方可继续。

(5) 张拉至 100%设计张拉力之后，需要对张拉油泵进行保压，确保单次油压下降 5% 的时间不小于 20 分钟。

(6) 油压稳定后，用超声波检测仪依次对所有螺杆进行检测，并用小锤敲击上螺帽，检查所有下螺帽确保其均已拧紧，油泵回油、拉伸器放松。

(7) 拉伸器拆除后再用超声波检测仪及单台手摇泵依次对所有螺杆进行轴力检测，并记录相关数据。

(8) 在索夹张拉完成后、张拉完成 24 小时、张拉完成 72 小时时，再对全部索夹螺杆轴力用超声波检测仪进行检测。

(9) 全桥索夹张拉完成后，每隔 10 天需要对已安装索夹螺杆的 10%进行轴力抽查，若发现个别螺杆轴力低于设计张拉力的 70%，需要对该索夹全部螺杆进行检测并复拧。

5.4 超声波检测

5.4.1 检测原理和方法

超声波波速随应力状态改变而变化的现象，称为声弹性现象。这种现象不论在弹性范围还是在“非线性应力—应变”范围均存在。依据材料的声弹性原理，超声波在高强钢螺杆内部轴向传播速度与螺栓的轴向应力基本呈负线性关系，即应力增大，传播速度降低，则超声波在螺杆内的传播时间与其轴力呈正线性关系。另外，螺杆轴向应力增大，螺栓在轴向有伸长量，这个伸长量也增加了超声波在螺栓内的传播时间，并且也是线性的。短时间内温度基本被认为恒定不变时，超声波在螺栓内的轴向传播时间与螺栓轴力存在公式(1)的线性关系。

$$F = \pi D^2 \frac{E}{8(r+D)} \frac{K_s \Delta S C_{t_0}}{1+K_t(t-t_0)} \quad (1)$$

其中 F 为螺杆轴力， E 为材料弹性模量， r 为夹持长度， D 为缩腰处直径，如下图所示， t 和 t_0 分别为当前温度和自由状态下的温度， ΔS 为当前轴力状态与自由状态超声回波声时差， C_{t_0} 为温度为 t_0 、自由状态下的超声波传播速度，应力系数 K_s 和温度系数 K_t 由材料决定，可以通过实验进行标定。

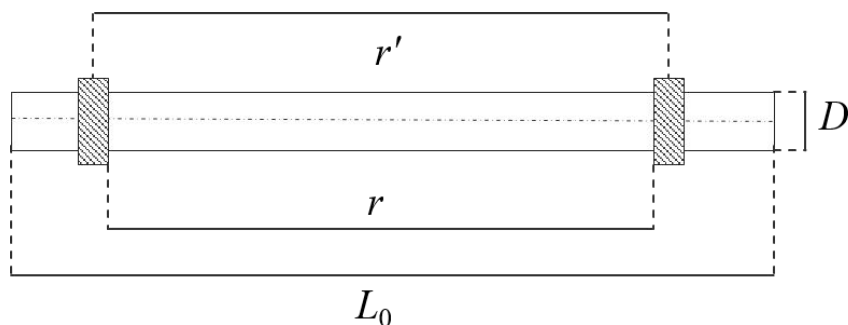


图 5-1 高强度螺杆尺寸约定

在对索夹螺杆轴力进行检测之前，需要进行室内或现场试验对公式（1）完成标定，然后根据标定的公式完成对实桥螺杆的轴力检测。在实际操作中，超声探头固定在螺杆的一端发出超声波，超声波在螺杆内沿轴向传播至另一端面，在这个端面反射，再传播至超声探头被其接收，然后通过超声检测系统测量超声波从发出到反射回来的时间，这个时间称为回波时间。

5.4.2 注意事项

（1）螺杆张拉之前，检测单位需对所有螺杆初始超声表数据进行采集，方便后续数据分析。

（2）螺杆张拉后采用超声波进行螺杆拉力检测，同时为确保桥梁结构安全，在钢梁架设前、二期恒载加载后及铁路试运营前，对相应索夹的螺杆进行拉力检测，拉力不满足要求时及时补拉。

6. 材料与设备

单个索夹最多设置有 24 套螺杆（SJ1），对索夹螺杆进行张拉施工考虑配置 24 台拉伸装置和 2 台电动油泵及若干分配器、油管线路。为保证上下游主缆南北岸可同时进行索夹安装施工，合计配备 100 台拉伸装置及相关配件。施工主要机具配置如下表所示。

表 6-1 索夹张拉施工机械配置表

序号	设备	型号	单位	数量	使用工况
1	拉伸器	100MPa	台	100	配油泵、油管、分配器
2	单项拉伸器		台	4	螺杆张拉力检查

序号	设备	型号	单位	数量	使用工况
3	超声检测系统		台	1	轴力检测
4	游标卡尺		把	4	上下半索夹间隙测量
5	量角器		把	4	拉伸器拨套旋转角度测量

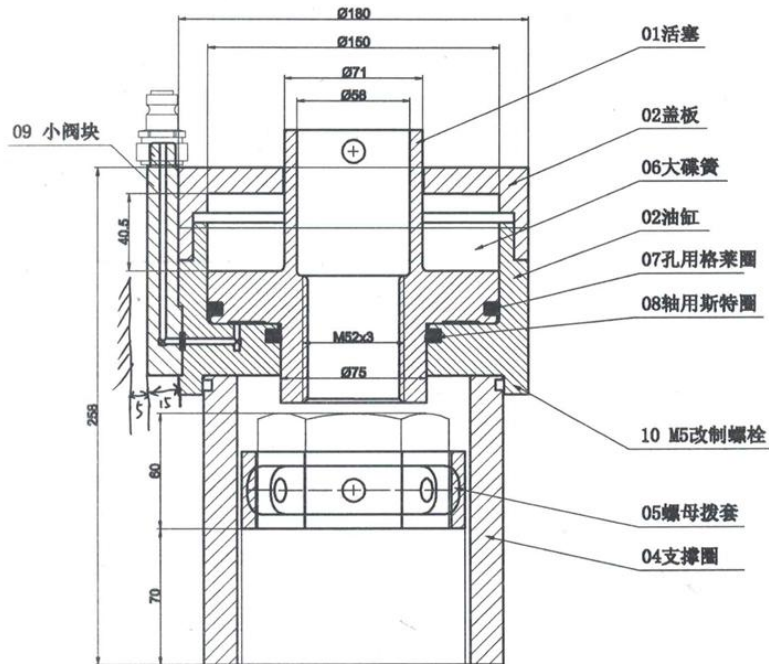


图 6-1 拉伸器结构示意图

本工法采用的拉升器具有小巧轻便、安全可靠，通用性强的特点，与常规拉伸器相比，做了以下两方面改进：

(1) 常规拉伸器油管小阀块设置在油缸侧面，本次将小阀块改至油缸顶面，拉伸器旋转安装时，可将小阀块作为旋转把手，方便操作。

(2) 常规拉伸器螺母拨套和油缸间距较大。当索夹螺杆需要在下端张拉时，需将拉伸器倒头安装，容易出现螺母拨套下移的情况，导致拨套无法使用。本次在螺母拨套和油缸之间增设了一个弹簧垫圈，拉伸器倒头安装时，垫圈可将螺母拨套顶起，保证拨套正常使用。

7. 质量控制

7.1 索夹螺杆施拧质量控制措施

(1) 索夹螺杆要入库存放，实行领用制度，每天根据施工进度发放螺杆，当天施工完成后剩余的螺杆需要送回仓库，不得随意丢放。

(2) 索夹螺杆轴力检测中，如发现个别螺杆由于损失过大，需采用单个拉伸器进行补张

拉，补张拉力大小应为该螺杆实测拉力与其余螺杆平均拉力值之差，补拉后立即进行检测。

(3) 螺杆上端因为要安装防水螺帽，螺栓上端伸出索夹长度预留量需保证防水螺帽能够完全拧入螺杆，球形垫圈外的预留长度为 40mm，现场需根据实际情况进行确认。

7.2 索夹安装精度控制措施

(1) 索夹安装精度要求见下表：

表 7-1 索夹和吊索安装精度要求

序号	项目		规定值或允许偏差
1	索夹偏位	纵向	$\leq 10\text{mm}$
		偏转角	$\leq 0.5^\circ$
3	螺杆紧固力		符合设计要求

(2) 索夹安装时需对索夹上下两侧预留基准点进行准确测量，测量后进行临时固定，在螺杆正式穿入并锚固之前还需要再次测量复核。

8. 安全措施

8.1 施工机械的安全控制措施

(1) 操作人员必须按照拉伸器说明书规定，严格按照工作前的检查制度和工作中注意观察及工作后的检查保养制度，做到：工作前检查、工作中观察、工作后保养。

(2) 严禁对运转中的机械设备进行维修、保养调整等作业。

8.2 高处作业的安全技术措施

(1) 所有进入施工现场的人员必须戴好安全帽，并按规定配戴劳动保护用品，或安全带等安全工具。

(2) 施工作业搭设的扶梯、工作台、脚手架、护身栏、安全网等，必须牢固可靠，并经验收合格后方可使用。

(3) 人员在主缆及索夹上方作业时需佩戴安全带，安全带无处挂放时，需在主缆上设置防坠绳。

(4) 作业用的料具应放置稳妥、小型工具应随时放入工具袋，上下传递工具时，严禁抛掷。

9. 环保措施

(1) 张拉前仔细检测个液压管路密封情况，及时采取措施防止液压油泄漏，更换液压管路接头时，必须使用接油托盘，防止液压油滴落到江水中污染长江水体。

(2) 在猫道上每隔 300m 设置一个垃圾箱，将生活、生产垃圾归类堆放，禁止在桥面上随意抛洒垃圾。

10. 效益分析

10.1 经济效益分析

新建连镇铁路五峰山长江特大桥索夹张拉采用了分级同步张拉安装方法，实现了大直径主缆索夹同步张拉，有效提高了张拉效率，减少了张拉次数，与同类型索夹张拉施工对比，效率提高了 50%，减少了 2 轮次张拉作业，同时减少了过程检查，节约费用约 50 万元。

其中卷扬机租赁费 10 万元，人工费 20 万元，综合管理费 20 万元。

10.2 社会效益分析

索夹分级同步张拉在大直径主缆索夹安装施工中的成功实施，为索夹安装提供了一种更好的选择，能够更有效的保障索夹张拉质量，具有良好的借鉴意义。

施工过程中无安全及质量事故发生；确保了主缆索夹安全、快速、优质的完成，得到了各方的好评，为类似索夹施工提供了宝贵的经验。

11. 应用实例

11.1 应用实例

本工法在新建连镇铁路五峰山长江特大桥索夹施工中得到应用实践。2019 年 7 月至 2019 年 9 月施工，共完成 254 个索夹共 3900 根螺杆的张拉，为后期吊索安装及钢梁架设施工提供安全保障。

按照此工法张拉后对数据进行整理、分析，以下选取下游侧 67 号索夹进行分析说明。

表 11-1 67#索夹螺杆张拉力统计表

方向	螺杆编号	张拉后手摇泵数据	张拉后检测紧固力 (t)	张拉 24 小时检测紧固力 (t)	张拉 72 小时检测紧固力 (t)
上游侧 螺杆	1	112.7	110.7	80.2	78.3
	2	111.9	110.1	79.8	71.2
	3	112.3	110.3	90.3	84.7
	4	109.8	108.7	79.3	75.6
	5	107.8	106.5	85.3	76.0
	6	113.8	111.0	88.1	86.9
	7	111.5	109.8	86.4	84.3
	8	107.8	108.8	78.3	71.6
	9	110.3	106.4	81.3	77.4

方向	螺杆编号	张拉后手摇泵数据	张拉后检测紧固力 (t)	张拉 24 小时检测紧固力 (t)	张拉 72 小时检测紧固力 (t)
	10	110.1	105.6	82.5	78.9
下游侧 螺杆	11	111.2	109.2	92.5	90.3
	12	110.5	106.7	87.6	85.7
	13	112.5	108.5	90.4	87.3
	14	113.6	110.6	89.7	77.9
	15	109.8	105.8	93.3	89.7
	16	111.1	106.4	88.2	78.7
	17	108.9	103.2	87.2	82.3
	18	108.8	108.6	85.6	77.9
	19	110.2	105.0	82.3	72.3
	20	111.7	106.3	91.1	82.3
平均值		111	108	86	80

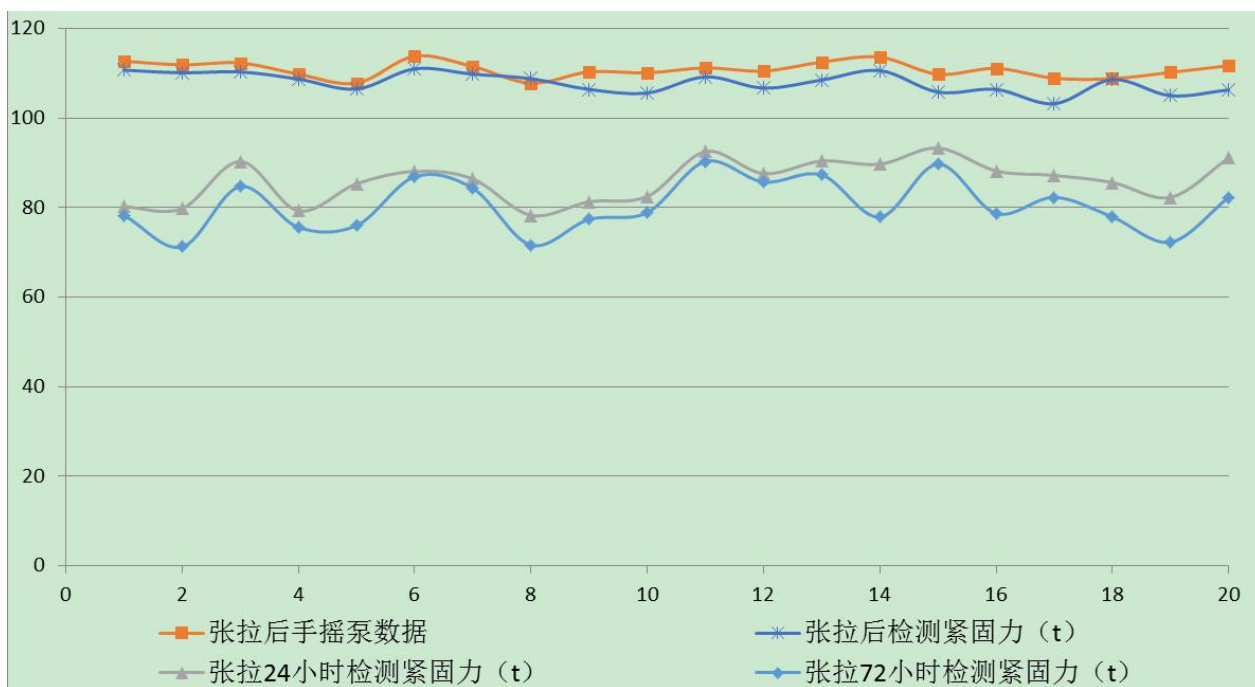


图 11-1 67#索夹螺杆张拉力统计图

张拉完成并经过持荷保压后，我们将所有拉伸器拆除，并同时每个拉杆的轴力采用超声波及手摇泵的方式进行检测，张拉后各拉杆轴力离散程度很小，极差为6t，同步张拉对各螺杆张拉力的控制效果良好。

同时手摇泵检测螺杆平均张拉力为 111t，超声波检测平均张拉力为 108t，手摇泵检测结果略高于超声波检测结果，主要是因为手摇泵本身的检测原理就是“紧扣法”，需要一定程度

的超拧才能得出结果。

通过对比张拉完 24 小时及 72 小时的超声波检测数据，张拉后 24 小时内轴力由 108t 下降为 86t，下降率为 20.3%。再之后的 48 小时内轴力由 86t 下降为 80t，下降率为 7%，下降速度明显减缓并趋于稳定，持荷、保压的效果非常明显，螺杆拉力满足设计要求。

11.2 推广前景

采用传统的分组对称张拉的方式，索夹螺杆一次性张拉到位后螺杆拉力损失较大，一次性合格率低，需进行多次补拉，且同一个索夹的各根螺杆拉力离散性大，拉力分布不均匀。

本工法采用分级同步张拉的方式，每级张拉后都持荷、保压，使主缆内部钢丝充分蠕变、变形，张拉完成后螺杆拉力损失较小，合格率高，同一个索夹上的螺杆拉力分布均匀，索夹受力更为合理。

本工法与传统方法相比，成本优势明显，工作效率高，减少返工次数，张拉后螺杆紧固力均衡、稳定，施工设备简单。该法在新建连镇铁路五峰山长江特大桥索夹施工中成功运用，取得了显著的经济、社会效益。

随着我国悬索桥建设规模越来越大、数量越来越多，尤其是在铁路上越来越广泛的应用，分级同步张拉法会越来越多的应用到相关项目上，作为国内首座公铁两用悬索桥的施工运用，连镇铁路五峰山长江特大桥索夹螺杆张拉施工过程中积累的成功经验可以推广到更多的悬索桥索夹施工中。