

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.12.011

悬索桥 AS 法架设主缆索股股内误差分析与评定

谭沸良^{*1}, 唐茂林², 谢文昌³

(1. 四川交大工程检测咨询有限公司, 四川 成都 610000; 2. 西南交通大学, 四川 成都 610000;
3. 四川绵九高速公路有限责任公司, 四川 绵阳 621000)

摘要:为解决我国山区悬索桥主缆索股运输问题以及减小主缆锚固系统尺寸,考虑主缆架设空中纺丝法(AS法)对位于运输条件差山区、超大跨径的悬索桥建设的适应性,以我国内陆首次采用AS法施工主缆的阳宝山特大桥为依托,对AS法架设主缆索股股内误差进行分析和评定,旨在为国内AS法架设主缆的设计、施工及误差评定标准的制订提供借鉴。通过理论分析和数值模拟,并结合现场实测数据,对AS法架设主缆索股股内误差的主要因素进行定量分析。根据猫道的弹性伸长量和丝股的无应力长度对应关系推导了猫道变形影响误差计算的简化理论公式,分别采用简化公式与数值模拟方法计算阳宝山特大桥索股架设长度。通过现场实测温度并运用统计学原理,分析主缆纺丝过程中索股钢丝温差变化规律。对比分析PPWS法索股误差控制要求,结合现场实施误差控制情况,提出AS法架设索股股内误差的控制标准。结果表明:索股股内误差的主要影响因素是猫道变形和索股钢丝温差;采用简化公式计算索股架设长度,与采用数值模拟方法计算结果的误差在可接受范围内,能快速获取猫道初步设计及架设过程调整参数;计算温度变化影响误差时索股纺丝温差取值与主缆跨度成相对正比例关系,不同跨度悬索桥可根据主缆跨度按比例取值;根据不同桥梁跨径,AS法架设索股股内误差的控制标准可按不超过5%取值。

关键词:桥梁工程;主缆架设;AS法;索股误差;误差评定

中图分类号:U445.46

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2023)12-0089-08

Analysis and Evaluation on Internal Error of Main Cable Strand Erection by AS Method for Suspension Bridge

TAN Fei-liang^{*1}, TANG Mao-lin², XIE Wen-chang³

(1. Sichuan Jiaoda Engineering Testing Consulting Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610000, China;
2. Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610000, China;
3. Sichuan Mianjiu Expressway Co., Ltd., Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: In order to solve the transportation problem and to reduce the size of the anchorage system of main cable strands in mountainous suspension bridge, considering the adaptability of air spinning method (AS method) for the construction of suspension bridges located in mountainous areas with poor transportation conditions and large span, the internal error of main cable strands by AS method for suspension bridges is analyzed and evaluated based on Yangbaoshan grand bridge, which is the first bridge in China Mainland by using AS method for main cable construction and provides reference for the design, construction and error evaluation standard for suspension bridges by AS method. Based on theoretical analysis, numerical simulation and on-site measurement data, the main factors affecting the internal strand errors of the AS main cable quantitative analysis are investigated. According to the relationship between the elastic elongation of the catwalk and the stress-free length of the strand, a simplified theoretical formula for calculating the influencing

收稿日期:2022-02-24

基金项目:贵州省交通运输厅2020年度科技项目(2020-122-032);中国交通建设股份有限公司科技研发项目(2019-ZJKJ-12)

作者简介(*通讯作者):谭沸良(1987-),女,重庆奉节人,硕士.(773738730@qq.com)

error of catwalk deformation is derived, simplified formula and numerical simulation method are used to calculate the length of cable strands of Yangbaoshan grand bridge. The variation rule of temperature difference of cable strand steel wire during main cable spinning is analyzed by means of field temperature measurement and statistical principle. By comparing and analyzing the requirements of error control of PPWS cable strand and combining with the actual situation of error control, the control standard of internal error of cable strand by AS method is put forward. The result shows that (1) the main factors affecting the internal error of cable strands are the deformation of catwalk and the temperature difference of cable strands; (2) the error between the simplified formula and the numerical simulation method is within the acceptable range, that can quickly obtain the parameters of the initial design and the adjustment of the erection process; (3) the influencing error of calculation temperature variation is that the temperature difference value of cable strands spinning is proportional to the span of main cable, and the value of different span suspension bridges can be proportional to the span of main cable; (4) according to different bridge spans, the error control standard of AS method can be determined by less than 5%.

Key words: bridge engineering; main cable erection; AS method; strand error; error evaluation

0 引言

悬索桥主缆架设 AS 法自从近代悬索桥开始兴建以来,一直沿用至今,在多个国家和地区的桥梁建设中得到了广泛应用。例如,早在 1931 年建成的美国乔治·华盛顿大桥^[1-3],以及 1998 年建成的丹麦大贝尔特东桥^[4](跨径为(535+1 624+535) m),都采用了 AS 法。近年来韩国的多座悬索桥也是采用 AS 法施工主缆,如 2012 年建成的韩国光阳大桥^[7-10]。欧美国家在悬索桥主缆架设中普遍采用 AS 法,已有研究综合考虑制造因素、设计因素、成本因素等方面,对比分析 PPWS 法和 AS 法两种施工方法^[11],认为二者都是相对通用的施工方法,工程师应根据具体情况进行选择。中国悬索桥建设起步较晚,普遍采用在日本应用比较成熟的 PPWS 法施工,并已形成一套完整的工业生产体系。国内针对 AS 法施工悬索桥的参考资料较少,仅限于对相关施工方法^[12]、机械设备的定性介绍,关键的施工数据、控制参数都需要用实际工程去验证。

在悬索桥主缆架设过程中,受制造工艺和环境的影响,单根索股内存在钢丝长度误差,会对主缆的受力的均匀性产生不利影响,因此,索股股内误差的控制与评定是施工质量的重要保障。尤其是 AS 法施工是将缆索的成股制造由厂内搬到施工现场,受现场架设因素影响,索股股内钢丝长短差控制与分析评定比 PPWS 法更为复杂。尽管 AS 施工方法在国际上应用成熟,但国内没有相应的实践与研究,没有相应的 AS 法架设主缆的误差控制参数取值依据和误差实测数据。

考虑我国山区悬索桥主缆索股运输问题以及节约锚固系统尺寸,国内开始尝试悬索桥主缆 AS 法的设计与施工,以阳宝山特大桥为起点,首次采用 AS 法施工主缆,获得了大量宝贵的测量测试数据。本研究即以阳宝山特大桥为依托,基于索股股内误差的主要影响因素:猫道变形和索股温差,通过理论分析和数值模拟,并结合现场实测数据,对 AS 法架设主缆索股股内误差进行定量分析,旨在填补国内悬索桥主缆 AS 法架设过程理论分析、误差控制与质量评定的空白,为国内 AS 法架设主缆的设计、施工及误差评定标准的制订提供借鉴。

1 AS 法架设股内误差概述

1.1 阳宝山特大桥介绍

阳宝山特大桥主桥采用主跨 650 m 单跨钢桁架悬索桥,主缆计算跨度为(170+650+210) m,主跨垂跨比为 1/10。为解决山区悬索桥主缆索股运输困难等问题,大桥主缆设计采用空中纺线法(AS 法)进行主缆架设。

全桥共 2 根主缆,主缆中心间距 36.0 m。每根主缆中,从贵阳岸锚碇到黄平岸锚碇通长索股有 36 股,贵阳岸边跨设 2 股背索。每根通长索股由 320(336)根直径为 5.35 mm、公称抗拉强度为 1 860 MPa 的高强度镀锌钢丝组成。贵阳岸的背索由 192 根直径为 5.35 mm、公称抗拉强度为 1 860 MPa 的高强度镀锌钢丝组成。

1.2 AS 法施工简介

主缆架设 AS 法有多种方式:全张力法、低张力法、恒张力法等,其中以恒张力法应用最广泛且效

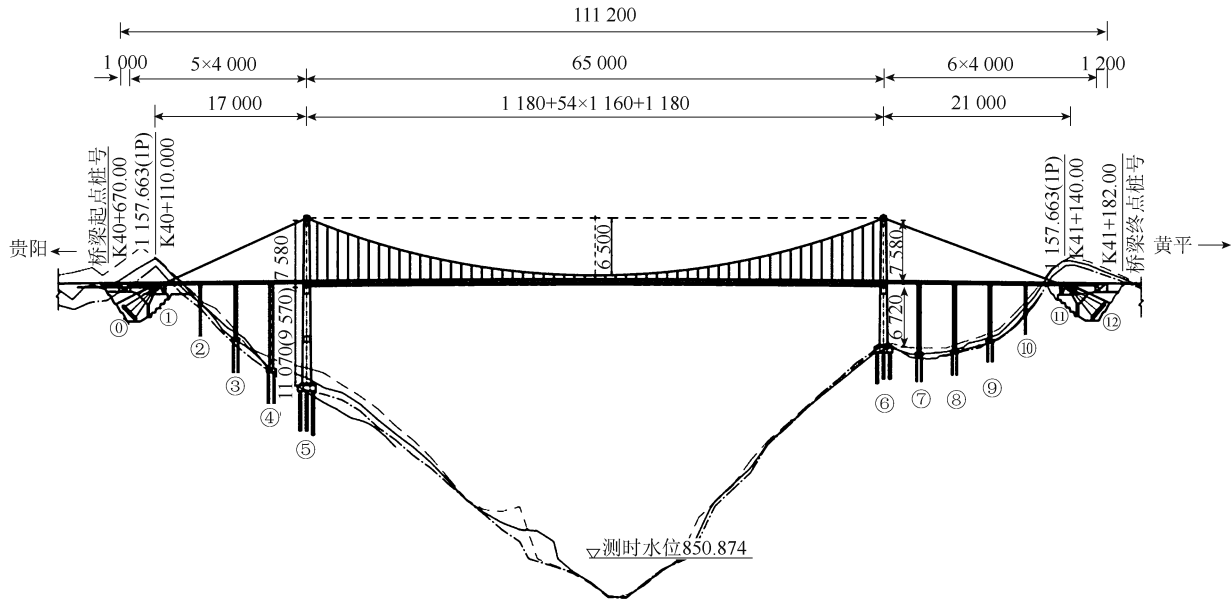


图 1 阳宝山特大桥立面布置图 (单位: cm)

Fig. 1 Facade layout of Yangbaoshan grand bridge (unit: cm)

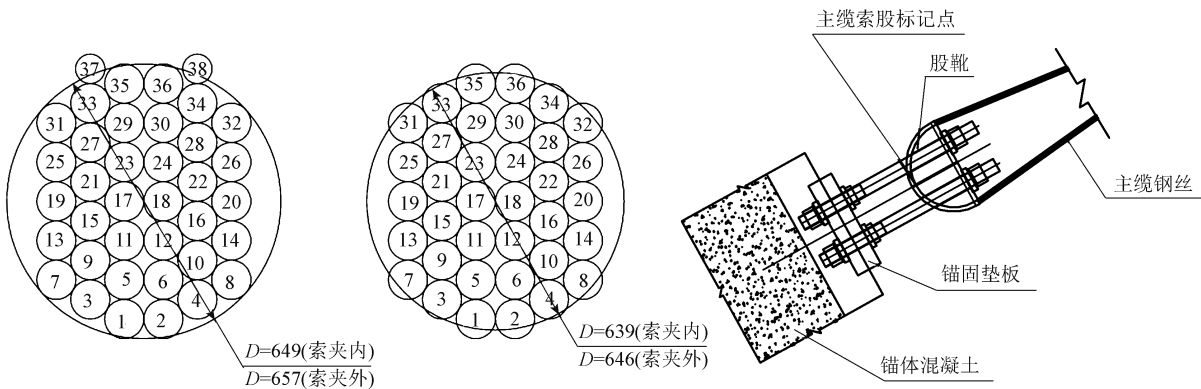


图 2 阳宝山特大桥主缆索股布置及锚固结构图

Fig. 2 Schematic diagrams of main cable strand arrangement and anchorage structure of Yangbaoshan grand bridge

率最高, 阳宝山特大桥即采用恒张力 AS 法架设技术。所谓恒张力 AS 法是指主缆钢丝在自由悬挂张力 80%~85% 的恒张力状态下纺丝。主缆钢丝 15%~20% 的重量由猫道系统承担, 纺丝过程中钢丝在配重塔处张力恒定, 纺丝轮将钢丝牵引到对岸锚靴处套入锚内再沿原路返回。去程死丝沿着猫道架设于成型器上, 活丝作用于支撑滑轮上; 回程再将活丝沿着猫道架设于成型器上, 然后绕到当岸锚靴位置, 形成闭合回路。活丝由丝盘出来经过张力平衡塔后, 以某一固定张力存在于整体纺丝体系中, 受钢丝自身重量影响, 钢丝在不同位置张力不同, 但在稳定的配重塔控制下, 纺丝过程中钢丝在某一定点位置的索力会维持不变。图 3 为恒张力 AS 法纺丝设备及施工过程示意图。

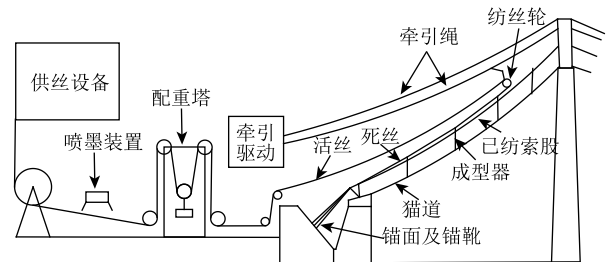


图 3 恒张力 AS 法示意图

Fig. 3 Schematic diagram of AS method with constant tension

1.3 AS 法索股股内误差来源

不论主缆采用何种架设方法, 单股索股内钢丝总会存在长短不齐的情况, 从而带来钢丝受力不均、孔隙率不达标等一系列问题, 所以应对索股股内误差进行控制。韩国光阳大桥^[13]在对主缆架设施工总

结时提出,主缆架设过程中索股股内误差来源主要包括:(1)猫道变形;(2)温度变化;(3)纺丝张力;(4)风荷载。前两种因素是造成悬索桥主缆索股股内误差的主因,影响比例达80%以上,是采用AS法施工主缆不可避免的;后两种影响因素为次要因素,张力差和风荷载存在一定偶然性,且可以通过在施工现场设置相应的纠偏措施避免。本研究主要对前面两种因素进行分析。

2 猫道变形引起的股内误差

2.1 猫道变形影响误差分析

AS法施工的猫道相当于是纺丝施工胎架系统,由于纺丝过程中钢丝有部分重量需要猫道承担,而猫道为一个柔性结构,在受到竖向力的作用下会产生变形,随着纺织丝股的增多,猫道逐渐向下变形。在纺织主缆索股钢丝时,承担部分钢丝重量的胎架一直有向下沉降的趋势,丝股层与层之间就在不同高度的胎架上成型。这就导致纺丝过程的各层钢丝存在长度差,且随着纺丝的进行,最顶层和最底层钢丝长度差会逐渐累积,这是猫道变形引起索股股内钢丝长短差的主要来源。

假定钢丝自由悬垂放置于单支点上,如图4所示,索股端部提供恒定的水平拉力,根据抛物线水平索力与索垂度的近似关系式:在 H 恒定而支撑点小变形的基础上,索垂度 f 基本维持不变。存在支撑点高差 C 的情况下,索股长度可近似表达为^[14]:

$$s = L \left(1 + \frac{C^2}{2L^2} + \frac{8f^2}{3L^2} \right) \quad (1)$$

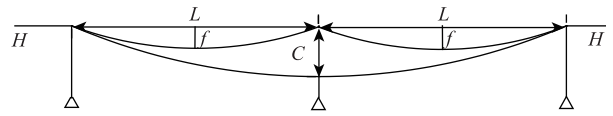


图4 钢丝放置于单支点示意图

Fig. 4 Schematic diagram of wire placing on single fulcrum

当索股支撑点高差 C 变大时,索股长度 S 增大,这只是对于单支点的情况。依此类推,对于AS法的多支点情况,也存在同样问题,将多支点看作是单支点的组合,且支点之间存在相互影响,即随着支点高度的变化,架设钢丝长度也会随之变化。

2.2 猫道变形影响简化计算方法

悬索桥主缆纺丝的猫道上存在多个支点,假设支点纵向均匀分布,在架设过程中猫道的变形意味着每个支点的高度变化。将上述单支点情况转换为多支点考虑,既要考虑整体,也要兼顾局部,整体是指整个结构的下挠趋势(猫道变形),局部是指局部两支点间钢丝的垂度保持不变(纺丝控制张力恒定)。如图5所示,在纺丝过程中,由于钢丝重量部分作用于猫道上,猫道因受力而弹性伸长,猫道产生变形,整体趋势为下挠变形。猫道因受力的弹性伸长导致固定于猫道上承受丝股重量的装置(成型器)发生位移,这就导致支撑丝股的支撑点位置改变,丝股长度也会随着改变。

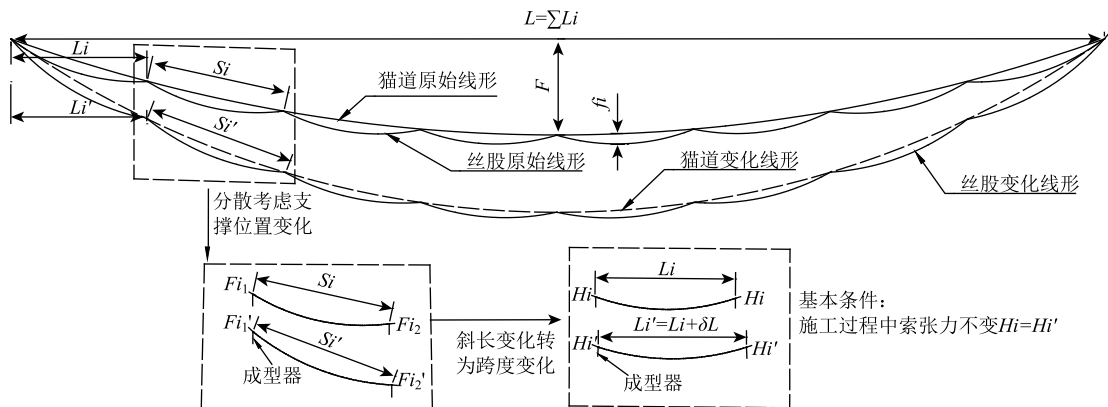


图5 钢丝放置于多支点示意图

Fig. 5 Schematic diagram of wire placing on multi-fulcrums

由于以上改变通常是一个微小变化,在此基础上,猫道与钢丝的相对位置关系保持不变,如此就可以根据猫道的变化来推导丝股的变化。

对猫道而言,纺丝过程中猫道弹性伸长,猫道的斜长 S_i 发生变化;对纺丝而言,支撑其支点位置

发生改变,但钢丝张力恒定不变。

猫道的有应力长度和丝股长度存在一个相对应的关系,不同的是猫道靠弹性伸长来改变其形状,丝股靠增加长度来改变其形状,并最终达到一个平衡状态,可以理解为猫道的弹性伸长量和丝股的无

应力长度存在必然的联系, 且此联系可以通过公式推导出来。

将猫道 2 个成型器之间的斜长看作钢丝横向跨度 L , 将钢丝张力看作是恒定的水平力 H , 则可以将当前问题简化为: 钢丝在水平张力一定的情况下由于跨度变化导致索长变化的问题。

将两成型器之间的斜长改变看作是跨度 L_i 的改变, 此时只存在跨度变化, 无高差变化, 将式 (1) 对 L 取导可得:

$$ds = \left[1 - \frac{8}{3} \times \left(\frac{f}{L} \right)^2 \right] dL. \quad (2)$$

假设钢丝刚好和成型器接触且传递的竖向荷载为 0, 则猫道和钢丝线形完全平行, 猫道长度和丝股长度相等, 猫道因弹性伸长而导致的丝股长度改变一致, 此时可以认为是自由悬挂状态。但在实际纺丝架设时, 钢丝张力恒定为自由悬挂张力 80% ~ 85%, 如果将自由悬挂的钢丝水平力表达为:

$$H = \frac{ql^2}{8f} = \frac{GL}{8f}, \quad (3)$$

$$\frac{f}{L} = \frac{G}{8H}, \quad (4)$$

式中 G 为钢丝重量, 通常悬索桥猫道的矢跨比在 (1/8 ~ 1/12) 之间, 若此时钢丝张力减少到 80% ~ 85%, 从斜向看钢丝水平力的变化也在 80% ~ 85% 之间, 则此时的钢丝的矢跨比可表达为:

$$\frac{F}{L} = \frac{G}{8\partial H} = \frac{G}{8H} \times \frac{1}{\partial}. \quad (5)$$

钢丝张力取值在 80% ~ 85% 之间。将式 (4)、(5) 代入式 (2), 则在两个成型器之间猫道伸长量变化 ΔS_m 与丝股长度变化 ΔS_s 的比值可以表达为:

$$\frac{\Delta S_m}{\Delta S_s} = \frac{1 - \frac{8}{3} \times \left(\frac{F}{L} \right)^2}{1 - \frac{8}{3} \times \left(\frac{F}{L} \right)^2 \times \left(\frac{1}{\partial} \right)^2}. \quad (6)$$

对式 (6) 进行分析可知, 矢跨比越小, $\frac{\Delta S_m}{\Delta S_s}$ 的值就越趋向于 1; ∂ 的值越趋向于 1 时, $\frac{\Delta S_m}{\Delta S_s}$ 的值就越趋向于 1。对矢跨比 $\frac{F}{L}$ 在 (1/8 ~ 1/12) 之间, ∂ 取值在 80% ~ 85% 之间, 计算得出 $\frac{\Delta S_m}{\Delta S_s}$ 的值在 (1.007 3 ~ 1.025) 之间, 即可以表达为: $\Delta S_m \approx \Delta S_s$, 对一般悬

索桥计算误差在 2.5% 以内, 则纺丝过程索股长度变化量可以表达为:

$$\Delta S = \sum_{i=1}^n \Delta S_s = \sum_{i=1}^n \Delta S_m. \quad (7)$$

最终把纺丝钢丝长度改变量变化转化为猫道因受力的弹性伸长量, 而猫道的弹性伸长最直观的表现表现为猫道跨中标高变化, 至于猫道跨中标高与索长关系已有很多文献阐述, 这里就不再进行具体介绍。

2.3 简化计算方法的应用

运用到实桥主缆架设过程计算, 以阳宝山特大桥为例, 在单根索股纺丝过程中不调整猫道时, 由猫道跨中的变形情况可以推算出索股的长度差。用两种不同的方式计算, 第 1 种为用猫道弹性伸长替代的近似解法, 第 2 种为数值仿真模拟计算结果。两种计算方法比较如表 1 所示。

表 1 阳宝山特大桥纺丝长度变化计算方法比较

Tab. 1 Different calculation methods for spinning wire length change of Yangbaoshan grand bridge

位置	跨中下挠/ m	$\Delta h/\Delta s$	简化计算	仿真 计算	简化计算 综合误差/%
贵阳边跨	0.072	8.66	0.008	0.009	7.621
中跨	0.113	2.16	0.052	0.048	-8.989
黄平边跨	0.084	7.07	0.012	0.013	8.606

第 1 种近似计算方法的综合误差呈现出边跨偏小, 中跨偏大的情况, 且误差均大于之前推导的 2.5%, 这是由于成型器作用力在猫道上分布不均导致。在计算猫道长度与矢度关系时考虑猫道承受均布荷载, 但在 AS 法实际纺丝过程中, 成型器对猫道的作用是局部集中荷载, 这就使得跨中标高变化和索长关系存在一定的计算误差。在中跨跨中部位正好布置有一个成型器, 第 1 种近似方法计算出中跨跨中位移偏大, 所以计算出的钢丝长度偏大; 边跨跨中部分正好处于两个成型器之间, 第 1 种近似方法计算出边跨跨中位移偏小, 所以计算出钢丝长度偏小。这也就验证了综合误差的结果。

从计算结果来看, 第 1 种近似计算方法的综合误差都在 10% 以内, 这对初步拟定主缆架设方案时定性分析的作用是非常大的。通过简单的计算, 能快速获取 AS 法架设参数, 避免进行复杂的数值仿真分析计算, 为桥梁设计、前期猫道方案设计、纺丝过程猫道绳的调整方案设计提供参考。

需要说明的是, 阳宝山大桥采用仿真分析确定猫道在纺丝过程中的变形参数, 理论计算与现场测

试变形吻合,但由于仿真分析要模拟出每层钢丝架设与猫道的接触与受力关系,操作复杂,不适用于初期猫道概念设计,所以本研究提出近似计算的方法。

3 温度变化引起的股内误差

由于AS法施工通常是在白天连续不间断作业,钢丝从出丝到架设完成,存在多种温度变化影响。纺丝长短误差的主要影响因素包括钢丝去程死丝与已纺钢丝的温度差和回程活丝与已纺钢丝温度差。如果已纺钢丝与正在纺的活丝或者死丝存在温度差,将会导致索股中钢丝长短不一。

3.1 索股钢丝温差的合理取值

对温度差引起的误差分析应从温度差的合理取值入手,通过现场实测统计,分析现场纺丝过程中温度变化规律。图6和图7对阳宝山特大桥在白天纺丝过程中的钢丝温度以及环境温度进行统计,由于纺丝通常在白天天气较好的环境下进行,钢丝温度受光照影响,已纺钢丝受光照充分,温度最高,正在纺织的活丝和死丝由于刚从丝盘出来,温度有渐变升高的过程,但通常都小于已纺钢丝温度。

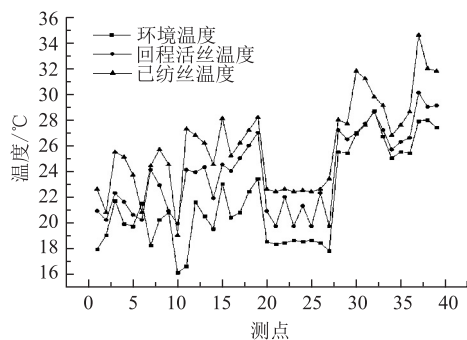


图6 调整死丝时温度统计

Fig. 6 Temperature statistics while adjusting dead wire

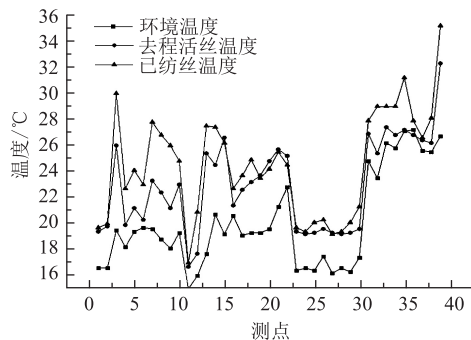


图7 调整活丝时温度统计

Fig. 7 Temperature statistics while adjusting moving spinning wire

白天进行纺丝施工温度差规律为:环境温度<

死丝温度<已纺钢丝温度;环境温度<活丝温度<已纺钢丝温度;活丝与已纺钢丝的温差>死丝与已纺钢丝的温差。

考虑温度影响的股内钢丝长度不均主要是由于当前纺织钢丝与已纺钢丝存在温度差导致,统计当前纺织活丝与已纺钢丝的温度差如图8所示,温差基本服从正态分布,两者温度差集中在0~4℃之间,温差均值2.08℃,总体标准差1.28,置信度为95%的置信区间温差为[1.6℃, 2.5℃],可以认为在进行纺织钢丝温度与已纺钢丝温度差不超过2.5℃。

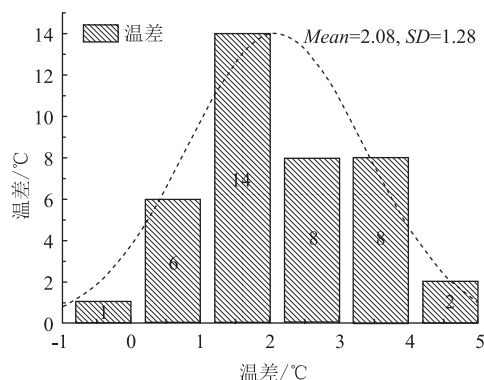


图8 活丝温度与已纺钢丝温度差分布

Fig. 8 Distribution of temperature differences between moving and finished spinning wire

当前纺织活丝和已纺钢丝的温差主要是钢丝暴露的时间差决定的,若桥梁跨度越大,纺丝往返的时间越长,钢丝间的温差就越大。韩国光阳大桥主缆跨径布置为(357.5+1545+357.5)m,其在进行纺丝计算时温差取值是5℃;阳宝山大桥主缆跨径布置为(170+650+210)m,主缆长度接近韩国光阳大桥1/2,从现场温度分布测试数据看,温差计算取值为2.5℃,刚好是韩国光阳大桥的1/2。这也进一步验证了纺丝温差取值和主缆跨度成相对正比例关系,在其他悬索桥进行AS法施工时,可以根据主缆跨径初步确定钢丝温差取值范围。

3.2 钢丝温差引起的钢丝长度差计算

钢丝受温度会存在热胀冷缩,钢丝的线膨胀系数 α 取值为 $1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,设钢丝长度为 S ,钢丝间温差为 Δt ,则由钢丝间温度差引起的钢丝长度差 ΔS_t 表达为:

$$\Delta S_t = S \times \alpha \times \Delta t. \quad (8)$$

统计阳宝山特大桥各跨在温度温差为2.5℃时丝股长度误差,如表2所示,温度引起的丝长误差在总误差范围中占比在15%以内。

不同于两端固定索股温度差导致的误差分析方

法, AS 法施工钢丝要确保钢丝在一定初始配重张力下的所有支撑点可滑动, 在纺丝过程中, 虽然在纺钢丝与已纺钢丝存在温度差, 但在钢丝可随意滑动的假定下, 不同温度下钢丝线形始终是一致的。这对现场钢丝相对标高调整或者误差判断造成很大影响, 再加上现场纺丝速度快, 从而导致在施工过程中很难通过温度修正计算来达到调整索股钢丝长短差的目的, 所以对温度的影响控制侧重于控制温差范围, 降低其他误差影响范围。

表 2 温差为 2.5 °C 时钢丝长度差

Tab. 2 Wire length variations at 2.5 °C temperature difference

位置	总长度/m	温度影响 丝长/m	索股抗拉强度的 1.0% 的应力伸长值 (规范限值) /m	温度引起 丝长误差 占比/%
贵阳边跨	185.464	0.002	0.017	13.09
中跨	664.889	0.008	0.062	12.87
黄平边跨	222.331	0.003	0.021	12.70

4 AS 法主缆索股股内误差评定

对索股股内钢丝长短差的控制和评价, 查阅国

内关于索股制造和桥梁施工规范, 2011 年版《公路桥涵施工技术规范》(JTG TF50—2011) 要求的索股内钢丝间的长短差的允许误差相当于抗拉强度的 1.0% 的应力伸长值, 由于所用钢丝的抗拉设计强度不同, 计算出此指标在长度误差 1/10 000~1/12 000 之间。新修订《公路桥涵施工技术规范》(JTG 3650—2020) 修改为预制索股的技术指标应符合《悬索桥预制主缆丝股技术条件》(GB/T36483—2018) 的相关规定, 即索股内钢丝长度误差小于 1/12 000, 明确《公路桥涵施工技术规范》所表达的索股内钢丝长度误差是指 PPWS 法架设的预制平行钢丝索股。

参考国外相关资料, 索股股内误差通常是以成桥应力偏差范围进行标定的, AS 法架设的主缆股内成桥应力总偏差控制在 4%~5% 之间, 和国内 PPWS 法索股内钢丝间的长短差控制相比, 两者都是以应力偏差作为评定指标, 不同的是前者是以成桥应力为基准, 后者是以抗拉强度应力为基准。将国内部分桥梁的抗拉强度指标换算成成桥应力指标如表 3 所示。

表 3 国内悬索桥成桥索股平均应力与设计抗拉强度统计

Tab. 3 Statistics of cable strands' average stress and designed tensile strength in China

桥名	主跨/m	设计主缆抗拉 强度 R_m /MPa	成桥主缆平均 应力 σ_m /MPa	抗拉强度应力 误差指标/%	换算为成桥状态应力误差 指标 (R_m/σ_m) /%
虎门二桥坭洲水道桥	1 688	1 770	656	1	2.70
南京长江四桥	1 418	1 670	617	1	2.71
赤水河红军特大桥	1 200	1 860	592	1	3.14
贵瓮高速清水河大桥	1 130	1 770	559	1	3.17
万州驸马长江大桥	1 050	1 770	577	1	3.07
南溪长江大桥	820	1 670	513	1	3.26
贵黄高速阳宝山大桥	650	1 860	560	1	3.32

应力误差对应的是钢丝长度差, 在钢丝长度差一致的情况下, 索股钢丝各个阶段的应力可以按照线性关系等比例换算, 成桥状态应力误差指标换算公式为:

$$\frac{\mu_{\text{成桥}}}{\mu_{\text{极限}}} = \frac{R_m}{\sigma_m}, \quad (9)$$

式中, $\mu_{\text{成桥}}$ 为成桥应力指标换算值; $\mu_{\text{极限}}$ 为抗拉强度应力指标, 取 1%; R_m 为设计主缆抗拉强度; σ_m 为成桥主缆平均应力。

抗拉强度的 1.0% 的应力误差相当于成桥主缆应力偏差 2.7%~3.3%, 跨度越大, 推算的成桥应力状

态允许误差越小。中国规范规定的股内误差推算到成桥主缆应力差均值为 3%, 较国外 AS 法架设控制的应力偏差要小。对阳宝山大桥, 在猫道变形和丝股温差作用下, 纺织 1 股主缆钢丝误差如表 4 所示。只考虑猫道和温度两种影响因素, 猫道变形影响更大, 占比达 85%, 温度影响占比 15%。

此计算虽然没有考虑猫道调整的有利影响, 但同时忽略其他因素导致的索股误差, 如纺丝时风的影响、钢丝输出张力不均、人为调整失误等。对于阳宝山特大桥这种跨度较小的悬索桥, 通过调整猫道绳, 可以把纺丝主缆股内应力总偏差控制在 3% 以内。而对跨度较大的悬索桥, 受环境因素影响

表 4 阳宝山大桥在猫道变形和钢丝温差综合作用的
股内误差计算

Tab. 4 Calculation results of strand intrnal error under both
catwalk deformation and temperature difference of
Yangbaoshan grand bridge

位置	猫道变形 引起误差 E_a	钢丝间温差 引起的误差 E_b	总误差 $E_c =$ $E_a + E_b$	阳宝山成桥 股内应力 弹性伸长 量 ΔL	偏差 ($E_c / \Delta L$) / %
贵阳边跨	0.009	0.002	0.011	0.516	2.132
中跨	0.048	0.008	0.056	1.774	3.157
黄平边跨	0.013	0.003	0.016	0.621	2.576

更不利，如果还是按照厂内制造 PPWS 法的控制指标，显然是偏高的，造成资源浪费。韩国光阳大桥在 AS 法纺丝过程中主缆股内应力总偏差控制在 5% 以内，可以为我国的 AS 法纺丝控制指标提供参考。根据桥梁跨径不同，AS 法架设的主缆股内应力总偏差可控制在 3%~5% 之间。针对不同跨径桥梁，跨径在 1 000 m 以内，股内应力偏差可控制在 3%~4% 之间；跨径在 1 000 m 以上，股内应力偏差可控制在 4%~5% 之间。总体来说，股内应力总偏差在 5% 以内都不会对结构造成显著的不利影响。

5 结论

(1) 以中国内陆首座采用 AS 法架设主缆的悬索桥为背景，从纺丝施工过程和计算理论出发，结合现场实测数据，分析 AS 法架设主缆索股股内误差的来源，明确猫道变形和索股钢丝温差是造成索股股内钢丝长度差的主要原因。

(2) 通过理论推导和计算，明确猫道变形与丝股长度变化的关系，同时提出丝股长度变化的近似计算方法，为 AS 法施工悬索桥设计计算和主缆架设方案选定提供理论基础。

(3) 通过现场实测温度并运用统计学原理，得出主缆纺丝过程中索股钢丝温差变化规律，结合国外桥梁的温差取值，可以根据主缆跨径参数合理选取钢丝温差的取值，为桥梁的设计计算和主缆架设过程控制提供依据。

(4) 通过分析国内 PPWS 法架设主缆的股内误差评定标准，计算阳宝山大桥在纺丝过程中股内误差范围，结合国外 AS 法架设主缆股内误差取值，提出国内 AS 法架设主缆索股股内误差评定标准。

参考文献：

References:

[1] 钱冬生, 陈仁福. 大跨悬索桥的设计与施工 [M].

成都: 西南交通大学出版社, 2015.

QIAN Dong-sheng, CHEN Ren-fu. Design and Construction of Spanning Suspension Bridges [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2015.

[2] HOWARD E E, SORWARZ C T, LINDNTJAL G, et al. Discussion of “George Washington Bridge: General Conception and Development of Design” [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1933: 97 (1): 417-427.

[3] TRIVEDI A, LYNCH M. Main Cable Strand Inspection of the George Washington Bridge [J]. Structural Engineering International, 1996, 6 (1): 37-40.

[4] 周履. 大贝尔特东桥及其主缆工程的详细设计 [J]. 世界桥梁, 1995 (3): 203-212.

ZHOU Lü. Detailed Design of Great Belt East Bridge and Its Main Cable Project [J]. World Bridges, 2011 (5): 1-3.

[5] OSTENFELD K. Design of the Great Belt East Bridge [J]. Structural Engineering International, 1995, 5 (4): 218-220.

[6] 丹吉姆辛. 大贝耳特海峡东桥 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2008.

DANJI Mu-xin. Great Belt East Bridge [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2008.

[7] 金芝艳. 韩国光阳大桥设计 [J]. 世界桥梁, 2011 (5): 1-3, 10.

JIN Zhi-yan. Design of Yi Sun-sin Grand Bridge in South Korea [J]. World Bridges, 2011 (5): 1-3, 10.

[8] 侯光阳. 韩国李舜臣大桥设计与施工方法创新 [J]. 中外公路, 2013, 33 (4): 114-116.

HOU Guang-yang. Design and Construction Method Innovation of Yi Sun-sin Grand Bridge in South Korea [J]. Journal of China and Foreign Highway, 2013, 33 (4): 114-116.

[9] LEE M J, KIM S C, SEO Y H, et al. The Yi Sun-sin Bridge: Innovative Solutions for Suspension Bridges [J]. Structural Engineering International, 2012, 22 (1): 32-35.

[10] JUNG J H, MOON J H, JEONG S W. Yi Sun-sin Bridge: A Challenging Method for Catwalk Erection [C] // Congress of the IABSE. Seoul: International Association for Bridge and Structural Engineering, 2012: 1-8.

[11] FHWA-NHI-11-023, Design Guidelines for Arch and Cable-supported Signature Bridges [S].

[12] 赵国辉. 悬索桥主缆施工牵引系统研究 [D]. 西安: 长安大学, 2004.

ZHAO Guo-hui. Research on Main Cable Construction Traction System of Suspension Bridge [D]. Xi'an: Chang'an University, 2004.

(下转第 153 页)

- [9] DUBEY D, MEHRA A. Pareto-optimal Solutions for Multi-objective Flexible Linear Programming [J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2016, 30 (1): 535-546.
- [10] CHEN L, GAN W, LI H, et al. Solving Multi-objective Optimization Problem Using Cuckoo Search Algorithm Based on Decomposition [J]. Applied Intelligence, 2021, 51 (1): 143-160.
- [11] 张劲泉, 刘渊, 申强, 等. 美国、日本、英国桥梁技术状况评定方法分析 [J]. 公路交通科技, 2022, 39 (9): 75-83.
ZHANG Jin-quan, LIU Yuan, SHEN Qiang, et al. Analysis on Bridge Technical Condition Evaluation Methods of USA, Japan and UK [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39 (9): 75-83.
- [12] PARK J, KIM K Y. Meta-modeling Using Generalized Regression Neural Network and Particle Swarm Optimization [J]. Applied Soft Computing, 2017, 51: 354-369.
- [13] ABDELMAKSOU D A M, BALOMENOS G P, Becker T C. Parameterized Logistic Models for Bridge Inspection and Maintenance Scheduling [J]. Journal of Bridge Engineering, 2021, 26 (10): 04021072.
- [14] 李宏男, 董皓璐, 李超. 基于全寿命周期抗震性能的桥梁结构维修决策方法研究进展 [J]. 中国公路学报, 2020, 33 (2): 1-14.
LI Hong-nan, DONG Hao-lu, LI Chao. Research Progress on Life-cycle Performance-based Seismic Maintenance Decision Method for Bridge Structures [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33 (2): 1-14.
- [15] CJJ 99—2017, 城市桥梁养护技术标准 [S].
CJJ 99—2017, Technical Standard of Maintenance for City Bridge [S].
- [16] FIORILLO G, GHOSN M. Structural Redundancy, Robustness, and Disproportionate Collapse Analysis of Highway Bridge Superstructures [J]. Journal of Structural Engineering, 2022, 148 (7): 04022075.
- [17] SRISAILA A, RAJANI D, MADHAVI M V D N, et al. An Improved Data Generalization Model for Real-time Data Analysis [J]. Scientific Programming, 2022, 2022: 4118371.
- [18] 颜全哲, 魏津昌, 上官萍, 等. 公路混凝土梁桥寿命期养护优化策略分析 [J]. 公路交通科技, 2019, 36 (2): 95-102.
YAN Quan-zhe, WEI Jin-chang, SHANGGUAN Ping, et al. Analysis on Optimal Maintenance Strategy for Highway Concrete Girder Bridges during Service Life [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36 (2): 95-102.
- [19] JTG/T 3832—2018, 公路工程预算定额 [S].
JTG/T 3832—2018, Budget Quota for Highway Engineering [S].
- [20] MITRA S, HASANUZZAMAN M, SAHA S. A Unified Multi-view Clustering Algorithm Using Multi-objective Optimization Coupled with Generative Model [J]. ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data, 2020, 14 (1): 1-31.
- (上接第96页)
- [13] CHOI H S, MOON J H, JEONG S W. The Current Status of Cable Erection and Improvements for Spinning Works of Yi Sun-Sin Grand Bridge [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2011, 59 (7): 22-29.
- [14] 唐茂林. 大跨度悬索桥空间几何非线性分析与软件开发 [D]. 成都: 西南交通大学, 2003.
TANG Mao-lin. Spatial Geometric Nonlinear Analysis and Software Development of Long Span Suspension Bridges [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003.
- [15] JTG/TF50—2011, 公路桥涵施工技术规范 [S].
JTG/TF50—2011, Technical Specification for Construction of Highway Bridge and Culverts [S].
- [16] JTG T 3650—2020, 公路桥涵施工技术规范 [S].
JTG/T 3650—2020, Technical Specification for Construction of Highway Bridge and Culverts [S].
- [17] GB/T 36483—2018, 悬索桥用主缆平行钢丝索股 [S].
GB/T 36483—2018, Main Cable Paralleled Wire Strands for Suspension Bridge [S].
- [18] 刘新华, 戴建平, 金仓, 等. 悬索桥空中纺线法架设主缆施工技术 [J]. 公路交通技术, 2021, 37 (4): 94-106.
LIU Xin-hua, XIAN Jian-ping, JIN Cang, et al. Construction Techniques for Main Cable Erection of Suspension Bridge by Air Spinning Method [J]. Technology of Highway and Transport, 2021, 37 (4): 94-106.
- [19] 郭瑞, 杨博, 全增毅, 等. 基于悬索桥空中纺线 (AS) 法架设主缆的猫道设计与施工关键技术 [J]. 公路, 2021, 66 (8): 163-169.
GUO Rui, YANG Bo, TONG Zeng-yi, et al. Design and Construction of Catwalk for Main Cable Erection Based on Air Spinning (AS) Method of Suspension Bridge [J]. Highway, 2021, 66 (8): 163-169.
- [20] 袁远, 翟晓亮, 冯云成, 等. AS法主缆锚靴位置钢丝受力安全性能分析 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2021, 41 (3): 86-94.
YUAN Yuan, ZHAI Xiao-liang, FENG Yun-cheng, et al. Analysis of Safety Performance of Steel Wire at Strand Shoe of Main Cable Erected by AS Method [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2021, 41 (3): 86-94.