

DOI:10.11784/tdxbz202505023

径向密索压环可滑式单层索网成型关键技术

狄增辉^{1,2,3}, 罗斌^{1,2,3}, 阮杨捷^{1,2,3}, 刘欣⁴

(1. 东南大学混凝土与预应力混凝土结构教育部重点实验室, 南京 211189;

2. 东南大学国家预应力工程技术研究中心, 南京 211189;

3. 东南大学土木工程学院, 南京 211189; 4. 南京东大现代预应力工程有限责任公司, 南京 210018)

摘要: 针对 1 种新型径向密索压环可滑式单层索网结构, 介绍了其结构构型、传力机理及成型难点. 针对全结构零状态找形, 提出了索力控制的小弹模法. 针对滑动压环在施工中的复杂性, 提出了“临时固定+高空释放+最终固定”的施工成型方法, 对比优选了滑动支座释放时机及索网牵引锚固方案. 针对其密索体系, 分析了结构成型索力对径向索根数的敏感性, 提出了基于各外联节点误差非独立的误差分析方法并进行了对比验证. 结果表明小弹模法可有效实现索力控制, 索网的位形对环索力的敏感程度高于径向索力, 应控制径向索力进行全结构零状态找形. 采用不同锚固方案时外压环的释放时机有所不同: 分批锚固应在最后一批牵引索长为 0.3 m 时释放, 同时锚固应在牵引索长为 0.5 m 时释放; 分批锚固较同时锚固总锚固力下降了 50.3%. 最终确定了“同步整体提升+分批锚固+高区牵引索长为 0.3 m 时释放滑动支座”的具体施工方案并进行全过程分析, 验证了方案的可行性. 径向索数量是影响密索体系误差敏感性的关键因素, 其与成型态索力偏差呈线性关系: 与径向索力偏差成正比, 与环索力偏差成反比. 基于各外联节点误差非独立的分析方法与传统方法相比, 考虑了相邻径向索外联节点的相对误差, 该方法得到的误差样本更加集中, 连续性更强, 相邻节点间相对误差得到了有效控制, 使索力偏差降低了 60.1%, 得出某工程实例的施工控制指标为: 径向索长为 ± 5 mm; 外联节点分 2 级控制, 其中第 1 级为 ± 25 mm, 第 2 级为 ± 10 mm.

关键词: 密索体系; 可滑动支座; 单层索网; 关键技术; 零状态找形; 施工控制指标

中图分类号: TU394; TU745.2

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2025)12-1302-13

Key Forming Technology for Single-Layer Cable Net with Radial Dense-Cable and Sliding Pressure Ring

Di Zenghui^{1,2,3}, Luo Bin^{1,2,3}, Ruan Yangjie^{1,2,3}, Liu Xin⁴

(1. Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 211189, China;

2. National Prestressed Engineering Research Center, Southeast University, Nanjing 211189, China;

3. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China;

4. Nanjing Dong-Da Modern Prestressed Engineering Co., Ltd., Nanjing 210018, China)

Abstract: Aimed at a novel single-layer cable net structure with radial dense-cable and sliding pressure ring, its structural configuration, force transmission mechanism and forming difficulties were introduced. For the whole-structure zero-state shaping, a small elastic-modulus method for cable force control was proposed. To address the complexity in sliding pressure ring during the construction, a construction method termed “temporary fix + high-altitude release + final fix” was put forward, and the release timing of sliding supports and the cable net traction anchoring schemes were compared and optimized. For the dense-cable net, the sensitivity of the structural forming cable force with respect to the number of radial cables was analyzed, a non-independent error analysis method based on

收稿日期: 2025-05-19; 修回日期: 2025-06-10.

作者简介: 狄增辉(1998—), 男, 博士研究生, dizenghui@seu.edu.cn.

通信作者: 罗斌, seurobin@seu.edu.cn.

基金项目: 湖州市科技计划资助项目(2021ZD2029).

Supported by Huzhou Science and Technology Project (No. 2021ZD2029).

each outer connection joint was proposed, and its effectiveness was verified through comparative studies. The findings suggest that the small elastic-modulus method can effectively achieve cable force control, the configuration of the cable net is more sensitive to the ring cable force instead of the radial cable force, and controlling the radial cable force is an effective strategy for whole-structure zero-state shaping. The release timing of outer pressure ring varies depending on the anchoring scheme. In the case of batch anchoring, the pressure ring should be released when the length of the last batch of traction cable reaches 0.3 m. In contrast, it should be released when the traction cable length is 0.5 m in the case of simultaneous anchoring. Batch anchoring reduces the total anchoring force by 50.3% compared with simultaneous anchoring. Finally, the specific construction scheme of “synchronous overall lifting + batch anchoring + releasing the sliding support when the length of high-zone traction cable is 0.3 m” was determined, and a full-process analysis was conducted to verify its feasibility. The number of radial cables significantly influences the error sensitivity of the dense-cable system, revealing a linear relationship with errors in the structural forming cable force: it is directly proportional to the error in the radial cable force but inversely proportional to that in the ring cable force. Compared with the traditional method, the proposed analysis method which is based on non-independent errors of each outer connection joint considers the relative error of adjacent outer connection joints, and the error samples obtained by this method are more concentrated and exhibit stronger continuity. The relative errors between adjacent joints are effectively controlled, thus reducing the cable force deviation by 60.1%. The construction control indexes of an engineering case are obtained as follows: the radial cable length is ± 5 mm; the outer connection joints are controlled at two levels, i.e., ± 25 mm at the first level and ± 10 mm at the second level.

Keywords: dense-cable system; sliding support; single-layer cable net; key technology; zero-state shaping; construction control index

索网属于柔性结构,其以拉索为主要构件,配以少量受压刚性构件.为了获得较好的刚度,单层轮辐式索网一般设计为马鞍形,又称轮辐式马鞍形单层索网.为适应体育场中部开口的需要,在索网中部设内拉环将径向索联系起来,既形成了封闭的传力路径,又满足了建筑功能.

索网的受力状态包括零状态、初始态和荷载态,张拉过程是指从零状态到初始态,合理的成型方法是初始态建立的关键.成型态与预应力及结构零状态息息相关,按图纸几何施工得到的初始态及荷载态往往与设计形态差异较大,因此索网在施工前通常需要进行零状态找形^[1].

在轮辐式索网成型技术研究方面,郭彦林等^[2]、柴洪伟等^[3]进行了轮辐式索桁架整体张拉试验,模拟了多种张拉方案的可行性.祖坤等^[4]等对轮辐式单双层混合索网低空低应力组装、整体提升安装、分批成组锚固进行了分析,考察了过程中的位形与索力.魏程峰^[5]针对轮辐式单层索网提出了“整体提升+分批锚固”的成型方法.秦正扬^[6]对轮辐式双层索桁架结构关键施工技术进行了研究.Wang等^[7]基于LeciaTS16机器人全站仪,开发了形态自动监控系统(CAMS),并对其稳定性和测量精度进行了验证.

在索网的施工过程中会产生各种随机误差,如索长误差和外压环安装偏差等.对定长索结构施工控

制指标的分析一般考虑索长与外联节点误差.在施工控制指标研究方面,阮杨捷等^[8]通过随机误差分析了索长误差、外联节点误差对索力的影响;邓华等^[9]建立了1种定量评价不同张拉方案对索长误差效应控制效果的分析方法;Wang等^[10]、沈宇洲等^[11]以500 m口径球面射电望远镜索网为背景,假定索长误差、索力误差、外联节点安装误差均符合正态分布,进行了独立和多因素误差耦合分析,得到了各因素的控制指标及敏感程度;王泽强等^[12]研究了单层双向正交索网单根及多根拉索误差对索力的影响;Luo等^[13]统计了多个工程的124根拉索长度,发现索长误差分布并不符合正态分布,提出了M形概率分布;史国梁等^[14]开发了数字孪生仿真平台,对索桁架结构建立了施工误差空间模型,进行了施工误差评估的孪生仿真与模型试验,在一定程度上实现了施工误差智能化评估;An等^[15]提出了1种基于深度支持向量数据的无监督学习方法对索结构的实时早期索力进行预测,通过现场试验表明其索力预测方法具有一定的优越性,但其仅聚焦于索力的预测,对于索长等其他施工控制指标的研究不足.

近年来,为适应体育场建筑需求,出现了1种新型的大尺度椭圆开口的单层索网结构,其长、短轴差异较大,在压环处形成过渡环,将整个屋盖分为内、外圈两个部分,并在内、外圈之间设置滑动支座,故

称为接力组合式结构. 因其长、短轴差异较大, 沿着内环连接点处的角平分线密集布置拉索, 既使拉压环之间的内力达到平衡, 也使环索不平衡力几乎为零. 因径向密集布置拉索及压环可滑动的特点, 称该结构为径向密索压环可滑式单层索网.

针对该新型单层索网成型技术, 现有研究还存在不足. 对于施工控制指标, 传统方法仅考虑索长与外联节点误差, 二者均假设为满足正态分布的随机误差, 且各索长、各外联节点误差间相互独立, 未考虑到各外联节点间相对误差. 现有的一些智能化分析方法如数字孪生和深度学习等也仅聚焦于简化的模型试验或者单一的分析指标(如索力等), 在实际应用中仍存在一定的局限性. 因此, 上述方法并不适用于该密索结构的施工控制指标分析. 本文指出该新型索网结构的成型难题, 并对其关键技术展开研究: 针对全结构零状态找形, 提出了控制索力的小弹模法; 针对索网提升, 提出了临时固定滑动支座的施工方法; 针对现有施工控制指标分析方法的不足, 提出了基于各外联节点间误差非独立的误差分析方法, 以期完善该类结构的成型技术及施工控制指标体系.

1 径向密索压环可滑式单层索网结构

1.1 结构概况

无锡奥体中心体育场屋盖钢结构由外圈悬挑桁架

架和内圈轮辐式单层索网组合而成, 如图 1 和图 2 所示. 外圈内环与内圈外环在平面投影重合, 提供给内圈单层索网结构良好的几何和刚度边界. 内圈的单层索网由环索、径向索和可滑动的外压环组成. 在径向密集布置 128 根径向索使得拉环和压环的每段折线的夹角相等, 根据规格与所处位置分为高区径向索 1、中区径向索 2 和低区径向索 3. 内外圈屋面通过可滑动支座(图 3)连接, 形成径向密索压环可滑式单层索网体系, 支座力学参数见表 1.

1.2 传力机理与成型态索力分布

内圈单层轮辐式索网为自平衡体系, 通过找形优化确定拉索预应力, 使压环在自重作用下成为轴心受压构件, 仅在可变荷载作用下产生弯矩, 通过双曲抛物面形成屋面结构平面外的刚度, 抵抗重力和风吸

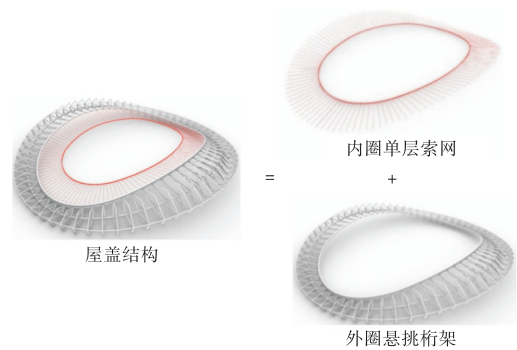


图 1 屋盖结构组成

Fig.1 Composition of roof structure

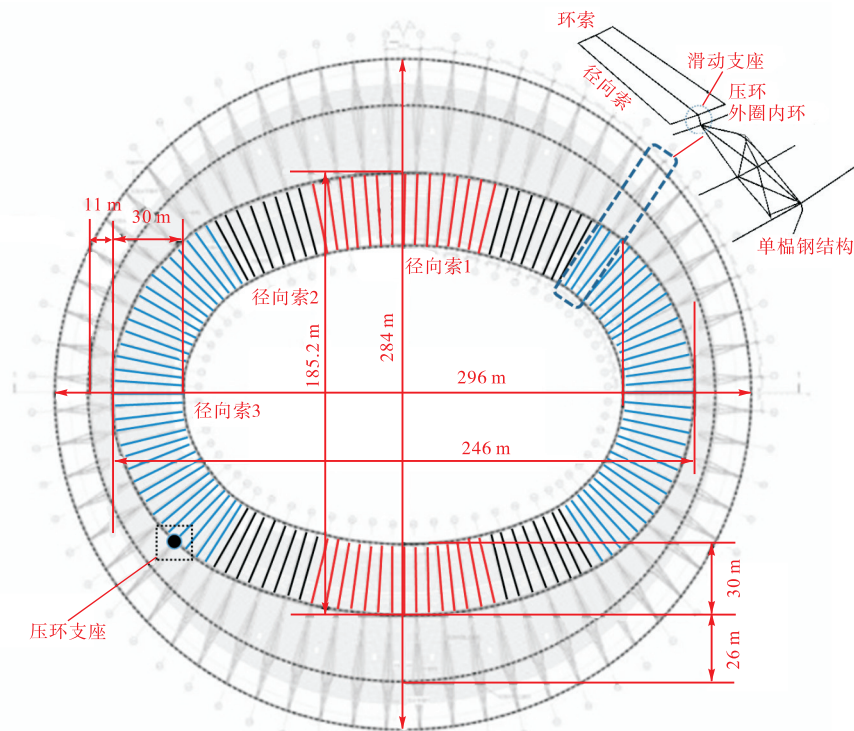


图 2 屋盖平面布置

Fig.2 Roof plan layout

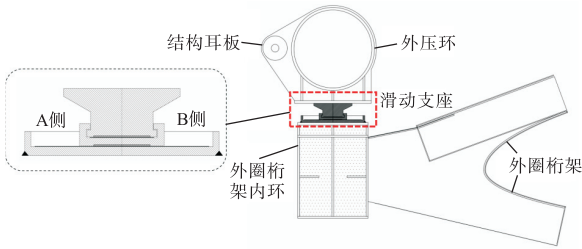


图 3 压环滑动支座

Fig.3 Sliding support of pressure ring

表 1 滑动支座设计参数

Tab.1 Design parameters of sliding support

参数	设计值
压力/kN	2 000
拉力/kN	500
剪力/kN	1 500
滑动量/mm	250

力。由于内圈为自平衡体系，因此压环处仅需布置支座与外圈桁架相连。为保证水平力的有效传递，在结构 4 个主轴线设水平切向约束，内圈结构的荷载均通过支座传递到外圈桁架。

由索网成型态索力分布(图 4)可知，索网成型态径向索力范围为 533 ~ 1061 kN。环索力范围为 2 655 ~ 2 712 kN，环索力基本一致。由于长、短轴差异较大，径向索力差异较大：长轴处径向索力大，位于低区；短轴处径向索力小，位于高区；在四心拟合椭圆拟合位置处径向索力有突变。

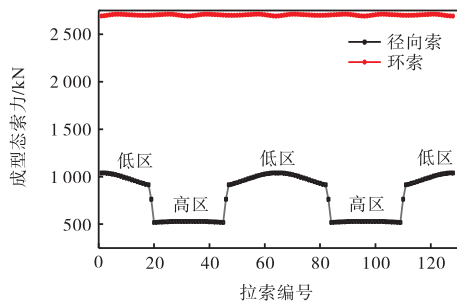


图 4 索网成型态索力分布

Fig.4 Distribution of forming cable forces

1.3 成型技术难题

1.3.1 全结构零状态找形

外压环在张拉时应处于可滑动状态，且结构径向布置为密索体系，所以索网成型态对零状态的精度非常敏感。此外，设计恒载态下的平衡位形并不是设计初始位形，两者存在一定的差异，因此难以同时保证零状态找形的位形与索力。

1.3.2 可滑动压环在施工中的复杂性

在施工中，索网从地面被逐步牵引提升至高空，

最后被张拉成型，并非一次成型计算。在设计计算时，可以始终保持压环径向处于可滑动状态来计算分析。在施工阶段计算分析时，需考虑牵引提升及张拉锚固的全过程，若保持压环始终处于可滑动状态，则无法估计压环的滑动状态及滑动量。如图 5 所示，在提升过程中各支座滑动方向并不一致，有向场内滑动和向场外滑动，且各支座在不同提升高度下会往复滑动，滑动量远超滑动支座的允许滑动量。然而，施工分析只能模拟数个特定工况下的滑动情况，因此在整个施工阶段均保持压环处于滑动状态并不可行。

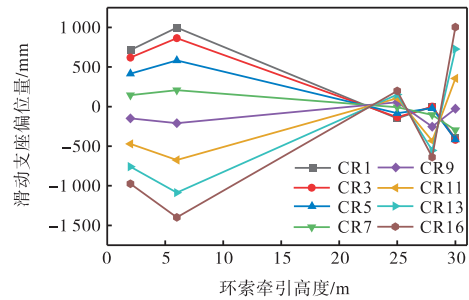


图 5 不同牵引高度下的支座偏位量

Fig.5 Deflection of support at different traction heights

1.3.3 确定施工控制指标

对于已有轮辐式单层索网结构，其平面投影接近于正圆形，且径向索根数较少，分布分散，如苏州奥体中心屋盖索网径向索共 40 根，间距约为 12 m^[8]。然而，径向密索式索网的径向索达到上百根，根与根间距仅 2 ~ 5 m，该结构对于误差十分敏感，对误差限值的要求极高。

对于外联节点误差分析，传统方法假设单个外联节点在各个工况的误差满足正态分布，且各外联节点误差之间相互独立^[8-15]。

径向密索索网的索力受径向索间距影响很大，假设外联节点坐标安装误差为 ± 10 mm，各节点误差相互独立，则可能在某两个相邻节点间的误差差值为 20 mm，即一个节点的误差为 10 mm，另一个节点的误差为 -10 mm。此时，与这两个节点相连的径向索索力偏差达到极值，说明该结构的误差控制指标为相邻节点间误差差值，并非各节点的安装误差限值。若同样按照传统方法进行分析，就会对外联节点坐标的安装精度提出更加严格的要求。

针对上述成型技术难题，本文从找形方法、滑动支座释放时机、索网牵引锚固方法、基于各外联节点误差非独立的施工控制指标分析 4 个方面开展研究：首先，进行全结构零状态找形；其次，在确定零状态后，开展滑动支座释放时机和索网张拉锚固的方法研

究;最后,基于索网张拉成型态,研究适用于密索体系索网的施工控制指标分析方法.全文的技术路线如图 6 所示.

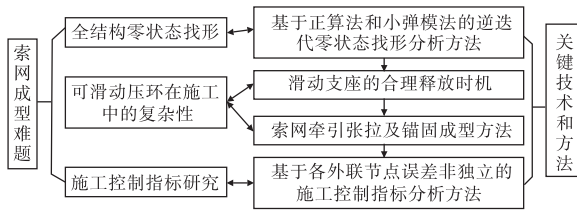


图 6 技术路线图

Fig.6 Technology roadmap

1.4 数值模型

1.4.1 模型构成与单元类型

采用 ANSYS2019 R3 建立结构数值模型,见图 7,构件的单元类型及材料属性见表 2 和表 3.

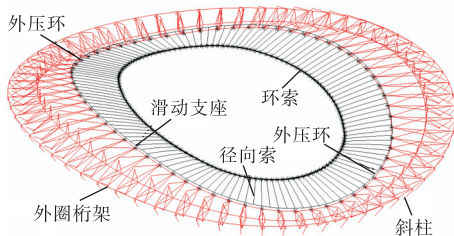


图 7 结构数值模型

Fig.7 Numerical model of structure

表 2 构件的单元类型

Tab.2 Element types of components

构件	单元类型	备注
索	Link180	两端铰接
支撑架	Link180	两端铰接,仅受压
外压环,斜柱	Beam188	两端固接
钢构	Beam188	部分两端固接,部分两端释放
弹簧	Combin14	—
索夹	Mass21	—

表 3 材料属性

Tab.3 Material properties

材料	密度/ (kg/m ³)	弹性模量/ MPa	线膨胀系数	泊松比
索	9 606	2.060 × 10 ⁵	1.2 × 10 ⁻⁵	0.3
钢	8 566	1.600 × 10 ⁵	1.2 × 10 ⁻⁵	0.3
混凝土	2 700	2.275 × 10 ⁴	1.2 × 10 ⁻⁵	0.2

1.4.2 滑动支座模拟方法

根据图 3 可知,支座滑动量有一定范围.当滑动量在范围内时,支座仅承受压力或拉力;当滑动量达到设计最大值时,支座将承受压力、拉力及剪力.在计算模拟时,若不约束外压环的径向滑动量,任其自由滑动,滑动量可能会超过设计滑动量,且无法模拟得到支座所承受的剪力,与实际情况不符合.因此,

在计算模拟时采用如图 8 所示方法对滑动支座进行模拟.

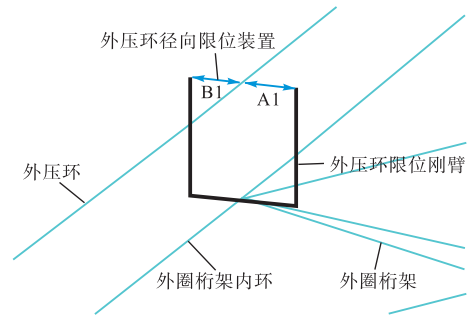


图 8 限位装置的模拟

Fig.8 Simulation of limit devices

如图 8 所示,在外圈桁架与外压环的连接点处建立两个外伸刚臂,通过仅受压的径向限位装置连接外伸刚臂与外压环.采用限位单元长度变化来模拟支座的滑动,单元长度的变化通过“降温法”来模拟,支座的允许滑动量 A1、B1 即为单元的长度变化 Δ ,根据式(1)计算单元应变 ϵ ,根据式(2)计算等效温差 ΔT ,即限位单元的模型长度与无应力长度之差就是支座允许滑动量.例如:当外压环向场外滑动时,外侧限位单元受压,内侧限位单元受拉,因单元被设置为仅受压,当滑动量小于 A1 时,外侧限位单元尚未被压缩到其无应力长度,因此两侧的限位单元均无内力;当滑动量大于 A1 时,外侧限位单元被压缩到其无应力长度,外侧单元受压,内侧限位单元因受拉而无内力.

$$\epsilon = \frac{\Delta}{L} \tag{1}$$

式中 L 为限位单元的长度.

$$\Delta T = \frac{\epsilon}{\alpha} = \frac{\Delta}{\alpha L} \tag{2}$$

式中 α 为线膨胀系数.

2 全结构零状态找形方法

2.1 基于正算法的迭代法

正算法是指顺施工过程的计算方法.基于正算法的迭代法可用于满足既定位形、边界条件及预应力分布的索网零状态位形的找形分析,其基本原理为:将计算位形与目标位形进行对比,根据位形差反向调整结构初始位形.由式(3)和式(4)分别得到位形差及索力差,迭代策略如式(5)所示.反复迭代,直到二者满足目标要求,迭代完成.

$$\mathbf{X}_i + \mathbf{X}_F = \mathbf{X}_p - \Delta \mathbf{X}_i \quad i \geq 1 \tag{3}$$

$$\Delta F_i = F_i - F \quad i \geq 1 \quad (4)$$

$$X_i = X_{i-1} - \Delta X_{i-1} \quad i \geq 2 \quad (5)$$

式中： X_i 为第 i 次迭代的初始位形； X_F 为第 i 次迭代在预应力作用下的节点位移； X_p 为目标位形； ΔX_i 为第 i 次迭代在预应力作用下的位形与目标位形的位形差； F_i 为第 i 次迭代的平衡索力； F 为目标索力； ΔF_i 为第 i 次迭代的平衡索力与目标索力的索力差。

在迭代法零状态找形中，为使基于零状态计算得到的索力与目标索力一致，采用小弹模法，其基本原理如下。

单元应变一般包括初应变 ε_i 、热应变 ε_t 和弹性应变 ε_e ，在一段拉索处于静力平衡态时，在各种应变作用下所产生的单元总应变 ε_a 表示为

$$\varepsilon_a = -\varepsilon_i + \varepsilon_e + \varepsilon_t \quad (6)$$

该段拉索索力大小 F 一般由两部分构成：一是施加的等效预张力，即初应变及热应变所引起的索力；二是由拉索两端节点坐标变化引起的预应力损失，即弹性应变 ε_e 引起的索力变化。因此， F 可表示为

$$F = \varepsilon_a EA = (-\varepsilon_i + \varepsilon_e + \varepsilon_t)EA \quad (7)$$

式中： E 为弹性模量； A 为截面积。

当以降温方式施加等效预张力时，式(7)可简化为

$$F = (\varepsilon_e + \varepsilon_t)EA \quad (8)$$

将 $\varepsilon_t = -\alpha\Delta T$ 代入上式，则式(8)又可表示为

$$F = -\Delta T\alpha EA + \varepsilon_e EA \quad (9)$$

小弹模法的总体分析思路可分为两步。第 1 步，在小弹模工况下使用等效预张力求得目标索力。修改需要找力的索的弹性模量，以缩小千分之一为例，即 $E' = 0.001E$ ，则式(9)中 $\varepsilon_e EA$ 变为 $\varepsilon_e E'A \approx 0$ ，为使等效预张力等于目标索力，将线膨胀系数放大相应倍数，即 $\alpha' = \alpha E/E'$ ，此时对需要找力的索施加等效温差并求解，则等效预张力就是平衡后的索力，也就是目标索力，即 $F \approx -\Delta T\alpha'E'A$ 。第 2 步，在原弹模工况下求得新的等效预张力。将弹性模量和线膨胀系数恢复，同时维持小弹模与正常弹模条件下平衡后的索力 F 不变，按式(10)求解新的等效预张力所对应的等效温差 $\Delta T'$ ，即

$$\Delta T' = -[F/(EA) - \varepsilon'_e]/\alpha \quad (10)$$

式中 ε'_e 为原弹模下的弹性应变。

2.2 分析方案

找形目标为： $-10 \text{ mm} \leq \text{位形偏差} \leq 10 \text{ mm}$ ，

$-5\% \leq \text{索力偏差} \leq 5\%$ 。为保证达到目标索力，确定了 3 种索力控制方案，如表 4 所示。根据上述原理，对 3 种方案进行分析。

表 4 找形分析方案

Tab.4 Analysis scheme of shaping

方案编号	内容
1	仅控制径向索力
2	仅控制环索力
3	同时控制径向索力及环索力

2.3 分析结果对比

由图 9(a)和(b)中竖向位形偏差可知：3 种方案外压环的位形偏差均小于 5 mm；方案 1 环索的偏差最小，精度达到 8 mm，且随着迭代次数的增加，位形偏差基本不变；方案 2 环索的偏差适中，随迭代次数的增加，偏差逐渐减小，精度达到 13 mm；方案 3 环索的偏差最大，随迭代次数的增加，偏差波动较大，精度只达到 19 mm。

图 9(c)和(d)为外压环和环索的径向位形偏差，可以发现：随迭代次数的增加，方案 1、2 的外压环径向位形偏差基本稳定，且偏差值较小，均为 3 mm；方案 1、2 的环索最小偏差分别为 3 mm、9 mm；随迭代次数的增加，方案 3 外压环和环索的偏差均较大，且波动较大，最小偏差均为 38 mm。

图 9(e)和(f)为环索力及径向索力偏差，从总体上看，3 种方案的环索力偏差均小于 5%，而径向索力偏差只有方案 1、3 小于 5%，方案 2 随着迭代次数的增加，径向索力偏差超过了 5%的索力目标。

2.4 小结

就位形而言，方案 1 偏差满足目标要求，方案 2 基本满足，方案 3 偏差过大而不满足要求，方案 1、2 优于方案 3；就索力而言，方案 1、3 索力偏差满足要求，方案 2 的径向索力偏差过大而不满足要求。综合考虑位形及索力，方案 1 为最优。

表 5 为采用方案 1 进行找形的索力对比。由表 1 可知，径向索力、环索力均小于目标索力才能保证结构位形达到目标要求，进一步说明了设计恒载态下的平衡位形与设计初始位形存在一定的差异，位形达到图纸几何时所对应的平衡索力与设计恒载态下的平衡索力有差异。因此，方案 3 同时控制环索力、径向索力时位形偏差过大，难以满足要求。进一步可知，位形偏差对于环索力的敏感程度高于径向索，因此推荐控制径向索力进行零状态找形。

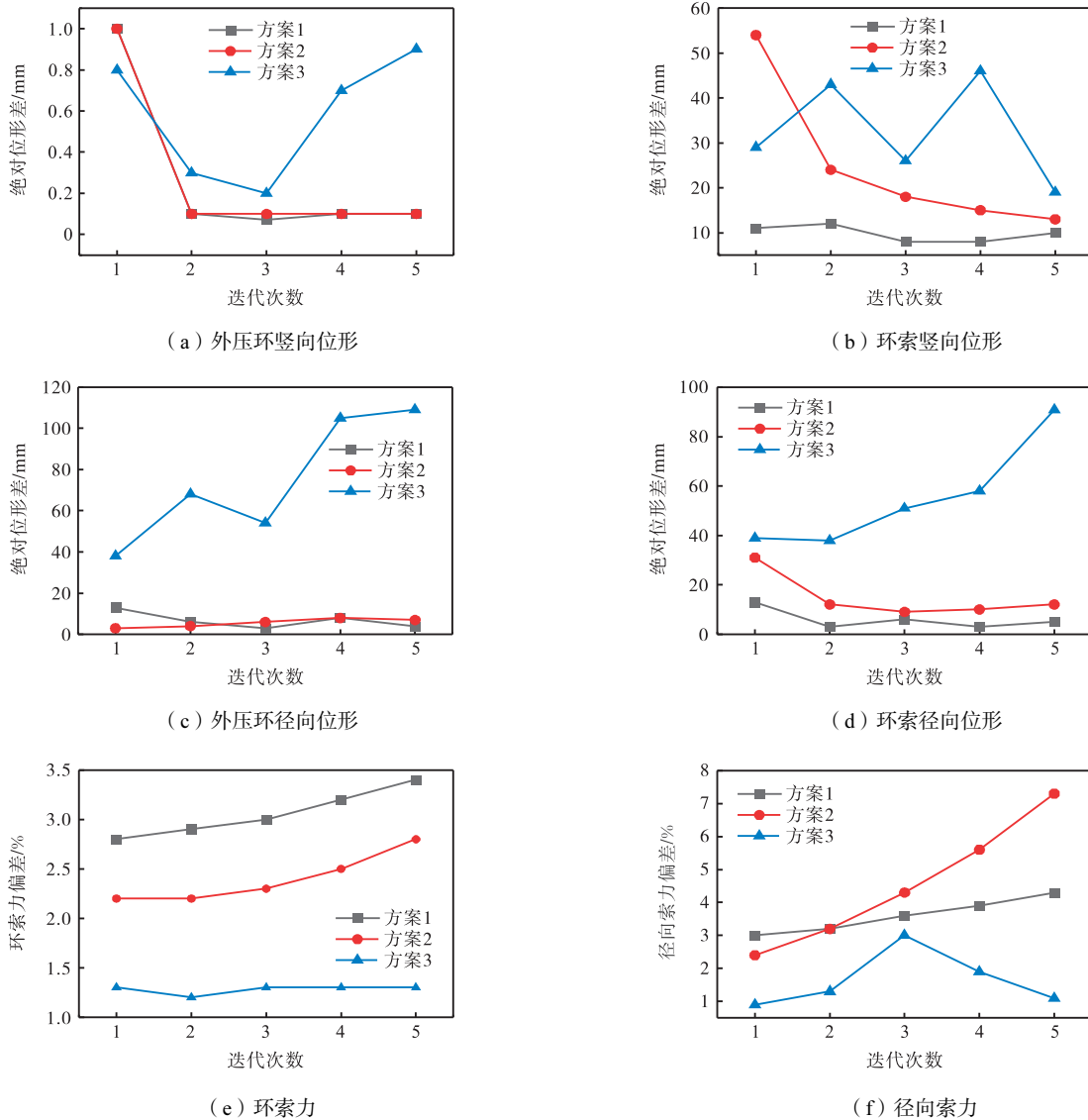


图 9 形态偏差

Fig.9 Morphological deviations

表 5 索力对比

Tab.5 Comparison of cable force

拉索部位	目标索力/kN	恒载完成态索力/kN	偏差/%
径向索	533 ~ 1 061	514 ~ 1 040	-3.6 ~ -2.0
环索	2 655 ~ 2 712	2 610 ~ 2 630	-3.0 ~ -1.7

3 滑动支座的合理释放时机

3.1 分析方案

针对可滑动外压环在施工中的复杂性,为保证在张拉时压环处于滑动状态,提出“临时固定+高空释放+最终固定”的成型方法:临时固定是指在牵引提升时将滑动支座临时固定;在锚固阶段,将支座释放使其处于滑动状态,让其在径向索力作用下充分滑动,通过压环平衡掉索网的拉力;锚固完成后,再将支座最终固定。针对滑动支座高空释放时机,对牵引

索长分别为 0.5 m、0.3 m 和 0.1 m 时释放进行对比分析,对比方案见表 6。

表 6 滑动支座释放方案

Tab.6 Release schemes of sliding supports

方案编号	内容
1	分批锚固+高区牵引索长为 0.5 m 时释放
2	分批锚固+高区牵引索长为 0.3 m 时释放
3	分批锚固+高区牵引索长为 0.1 m 时释放
4	同时锚固+牵引索长为 0.5 m 时释放
5	同时锚固+牵引索长为 0.3 m 时释放
6	同时锚固+牵引索长为 0.1 m 时释放

3.2 分析结果

从支座位移来看,分批锚固释放支座时,随牵引索长的减小,释放后支座的滑动量逐渐减小;同时锚固释放支座时,在牵引索长分别为 0.5 m 和 0.3 m 时释放后支座滑动趋势几乎相同,在牵引索长为 0.1 m

时滑动量明显减小,如图 10 所示.

从释放所需的顶推力来看,随牵引索长的减小,6 种方案所需的顶推力均呈现增大的趋势,但 3 种分批锚固方案顶推力差异不大,3 种同时锚固方案顶推力差异较大,如图 11 所示.

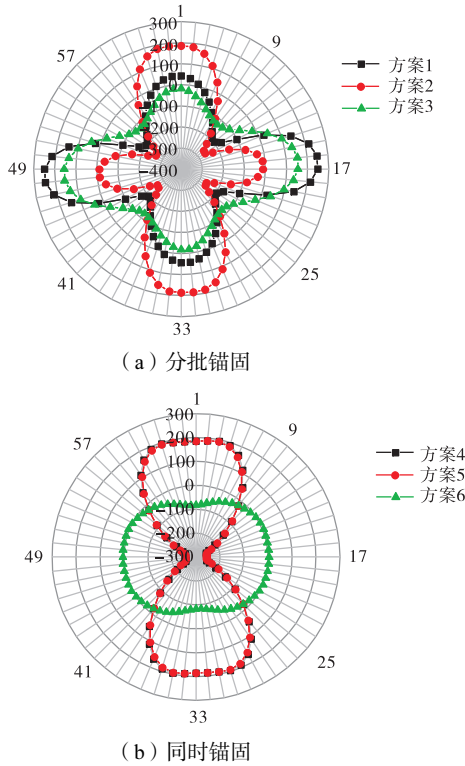


图 10 支座径向位移(单位:mm)

Fig.10 Radial displacement of supports (unit: mm)

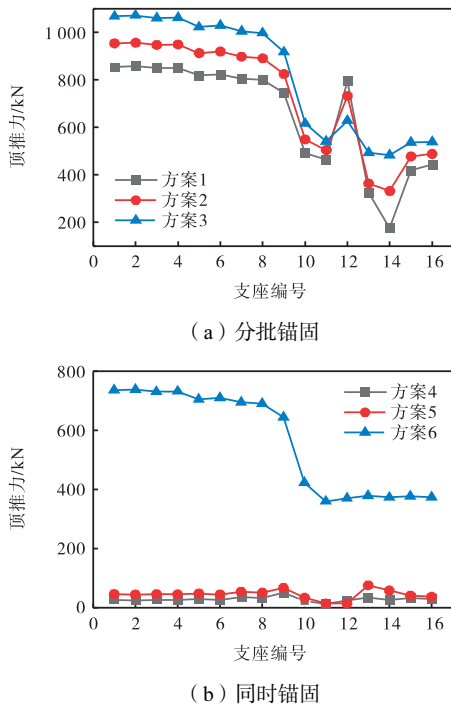


图 11 支座释放顶推力

Fig.11 Pushing force of releasing supports

外压环通常为轴心受压,由图 12(a)可知,同时锚固较分批锚固可以有效降低压环应力,但两类方案下压环应力均较小. 由图 12(b)可知,从整体来看,两类方案支座释放后外压环弯矩均随牵引索长度的减小而减小,原因在于: 支座释放越晚,索力就越接近设计索力,释放后弯矩就越小;从两者对比来看,同时锚固时外压环弯矩小于分批锚固时的对应值,此外,随牵引索长度的减小,分批锚固与同时锚固时外压环的最大弯矩差值越来越小,在牵引索长度为 0.3 m 和 0.1 m 时两种方案的弯矩差值相当.

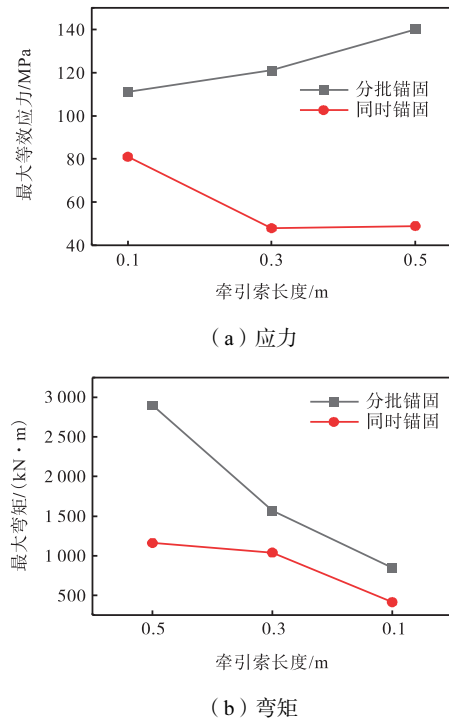


图 12 外压环结构响应

Fig.12 Structural response of outer pressure ring

3.3 小结

不同锚固方案外压环的释放时机有所不同. 在支座滑动量、压环应力均满足要求的前提下,采用分批锚固时,在 0.5 m 时释放外压环的弯矩过大,在 0.3 m 时释放时不利弯矩则会明显减小,在 0.1 m 时释放虽然弯矩仍会有所降低,但变化不明显. 因此,应在 0.3 m 时进行释放. 采用同时锚固方案时,在牵引索长度分别为 0.5 m、0.3 m 和 0.1 m 时外压环的弯矩均很小,但牵引索长为 0.5 m 时的支座释放顶推力最小,因此,应在牵引索长度为 0.5 m 时进行释放.

4 索网牵引提升与锚固成型方法

4.1 分析方案

牵引提升及锚固方案直接影响到过程中外压环

的受力状态及位移情况. 针对牵引提升和锚固, 采取表 7 中两种方案进行对比分析.

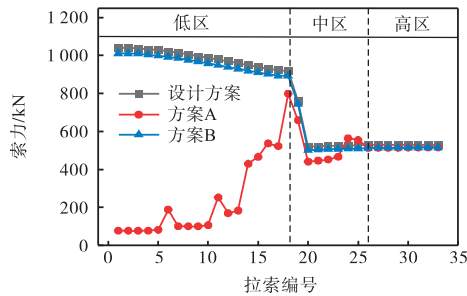
表 7 牵引提升锚固方案

Tab.7 Traction lift anchoring schemes

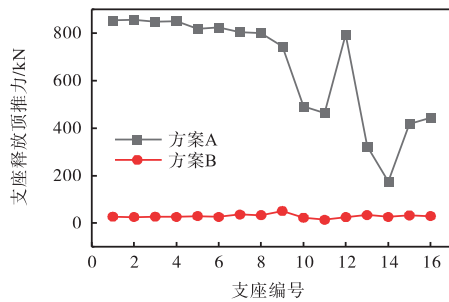
方案编号	内容
A	同步整体牵引提升,分批锚固
B	不同步整体牵引提升,同时锚固

4.2 分析结果

由图 13(a)可知,方案 B 的锚固力在低、中、高区与设计索力基本一致,略小于设计索力,而方案 A 在低、中、高区的锚固力与设计索力差异较大. 方案 A、B 的总锚固力分别为 12 507 kN、25 159 kN,方案 A 较方案 B 降低了 50.3%,因锚固设备的型号与锚固力有关,就锚固力而言,方案 A 更加经济. 两种方案下,释放滑动支座所需顶推力见图 13(b),方案 A、B 所需总顶推力分别为 10 518 kN、471 kN,方案 B 小于方案 A,原因在于方案 B 释放后外压环的径向位移均接近 250 mm,变形更均匀,如图 14 所示,因此释放时所需要的顶推力就更小.



(a) 锚固力



(b) 支座释放顶推力

图 13 锚固力和支座释放顶推力

Fig.13 Anchorage force and pushing force of releasing support

4.3 小结及工程应用

轮辐式单层索网的特点为长轴径向索力高于短轴对应值,基于此特点,分批锚固时可首先将长轴径向索进行锚固. 此时,索网整体尚处于比较松弛的状态,可以通过一个较小的力将其锚固. 综上所述,方案 A 总锚固力与总顶推力之和更小,因此方案 A 为

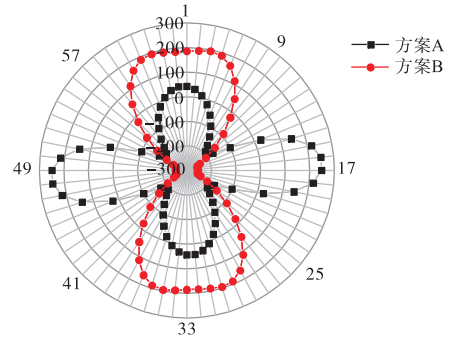


图 14 方案 A、B 下支座径向位移(单位: mm)

Fig.14 Radial displacement of supports under schemes A and B (unit: mm)

更优. 根据滑动支座释放时机、牵引锚固方案的对比优选,确定“同步整体提升+分批锚固+牵引索长为 0.3 m 释放滑动支座”的施工方案. 针对该工程实例,进行全过程施工分析. 基于索网马鞍面的特点,将索网分为低、中、高 3 个片区,分别对应低区径向索 3、中区径向索 2 和高区径向索 1,如图 2 所示,将滑动支座进行编号,如图 15 所示,牵引锚固过程中从低区到高区依序锚接,将全过程分为 16 个分析工况.

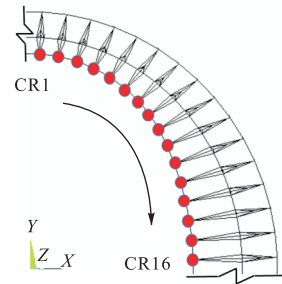


图 15 滑动支座编号(以 1/4 索网为例)

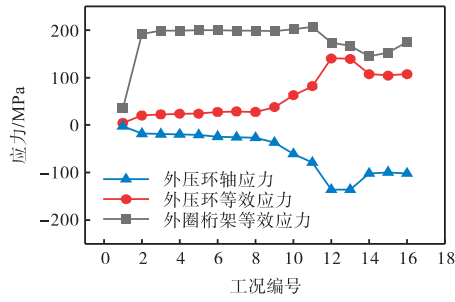
Fig.15 Serial numbers of sliding supports (with 1/4 of cable net as an example)

由施工成型态与设计成型态索力对比(表 8)可知,与设计成型态相比,索力最大偏差仅为-3.0%. 由图 16(a)可知,全过程中外圈桁架、外压环的最大等效应力分别为 207 MPa、140 MPa,处于弹性状态,应力水平较低,结构安全. 由图 16(b)可知,全过程中结构竖向、径向变形均在合理范围内. 由图 17(a)可知,支座释放后压环滑动量为-191.3 ~ 254.4 mm,支座 CR1、CR2、CR3、CR14、CR15、CR16 向场外滑动,其余支座向场内滑动,支座 CR16 达到限位. 由图 17(b)可知,支座最大剪力、拉力、压力分别为 861.81 kN、21.7 kN、-653.9 kN,均满足受力要求.

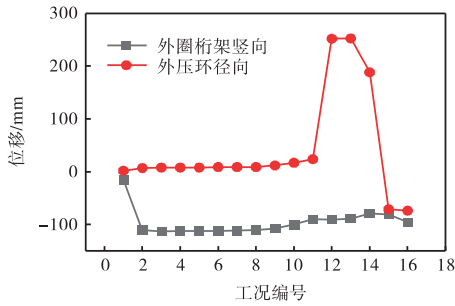
表 8 施工成型态与设计成型态索力对比

Tab.8 Comparison of cable forces between construction and design patterns

拉索部位	施工成型态索力/kN	设计成型态索力/kN	偏差/%
径向索	516.8 ~ 1 040.0	533.0 ~ 1 061.0	-3.0 ~ -2.0
环索	2 630.0 ~ 2 640.0	2 655.0 ~ 2 712.0	-2.7 ~ -0.9



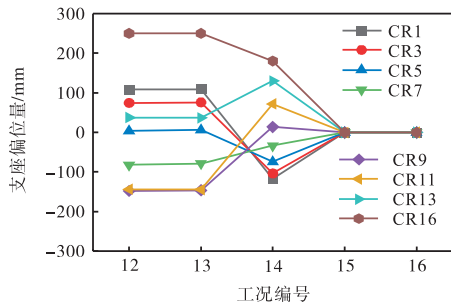
(a) 应力



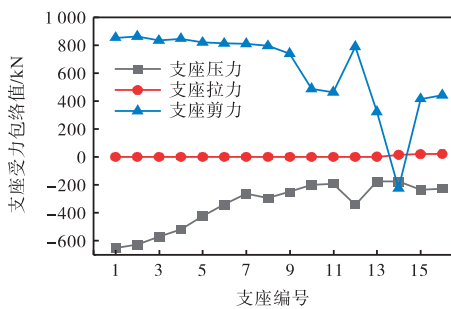
(b) 位移

图 16 结构响应

Fig.16 Structural responses



(a) 位移

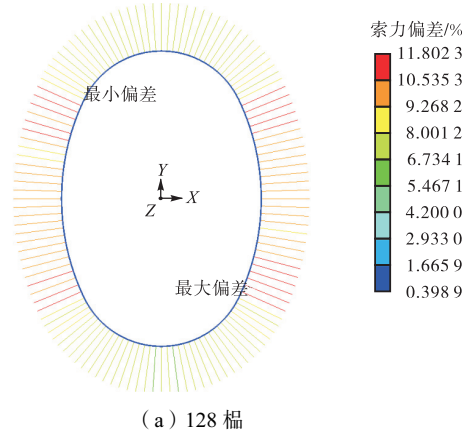


(b) 受力

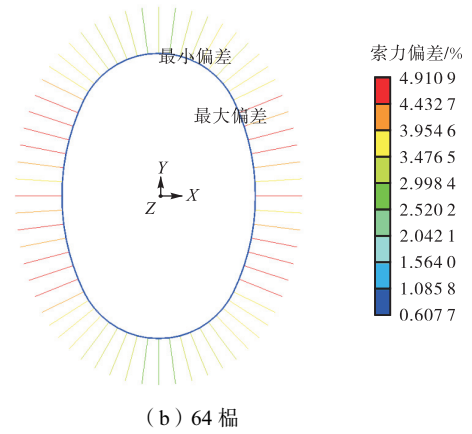
图 17 支座响应

Fig.17 Response of supports

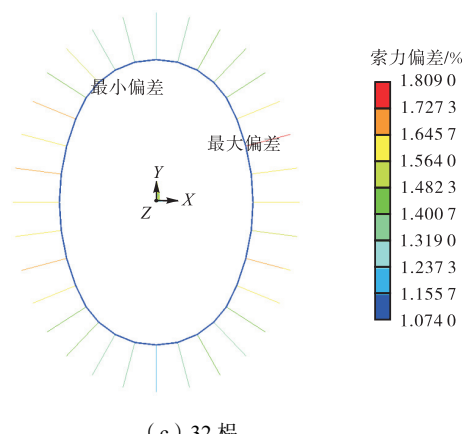
持总索截面与总预应力不变的前提下,分别建立含有 128 根、64 根、32 根径向索的索网来对比分析,对 3 个模型均考虑径向索长误差、外联节点坐标误差为 $\pm 10\text{ mm}$,分析结果见图 18 和图 19.



(a) 128 根



(b) 64 根



(c) 32 根

图 18 索力偏差

Fig.18 Deviation of cable force

由图 19 可知:当径向索数量减少到原来的 50% 时,径向索力最大偏差减小了 58.5%,环索力最大偏差有所增大;当径向索数量减少到原来的 25% 时,径向索力最大偏差减小了 84.8%,环索力最大偏差仍有所增大.由此可见,径向索数量越多,相邻径向索间距越小;径向索力偏差越大,环索力偏差越小.径向

5 基于各外联节点误差非独立的施工控制指标分析

5.1 形态偏差对径向索数量的敏感性

为了研究径向索间距对误差敏感性的影响,在保

索的数量与索力偏差成线性关系,具体而言,其与径向索力偏差成正比,与环索力偏差成反比,原因在于当相邻两捆径向索的间距比较小时,当某一根索力发生微小的变化,与之相邻的径向索也会发生比较明显的松弛或者紧绷,因此索力变化较大。

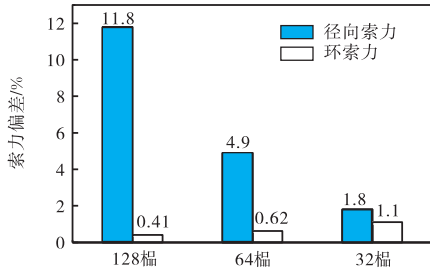


图 19 索力最大偏差

Fig.19 Maximum deviation of cable force

5.2 非独立误差样本的生成及误差分析

基于密索体系对外联节点相对误差较为敏感的特点,本文提出了基于各外联节点坐标误差非独立的误差分析方法.图 20 为误差样本的生成过程及误差分析流程,其特点为:控制相邻节点间误差差值,以第 1 个节点的误差样本为基础,逐步生成后续节点的误差样本,因此各节点间的误差样本是非独立的,是由上一个节点误差样本与随机生成的误差差值叠加而成,主要包括以下步骤。

步骤 1 明确外联节点误差 2 级控制标准值 S_1 和 S_2 、外联节点总数 n 、误差工况总数 m ; 根据 S_1 生成首个节点误差样本向量 $\mathbf{E}_{1,*}^W = [e_{1,1}^W, e_{1,2}^W, \dots, e_{1,m}^W]^T$, 随机误差 $e_{1,j}^W$ 服从正态分布 $e_{1,j}^W \sim N(0, \sigma_{S_1}^2)$, $1 \leq j \leq m$, σ_{S_1} 为第 1 级误差标准差,由式(11)计算得到,即

$$\sigma_{S_1} = S_1 / 2 \quad (95\% \text{ 保证率}) \quad (11)$$

步骤 2 根据 S_2 生成误差值 $e_{i,j}^R$ ($1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m$), 误差值服从正态分布 $e_{i,j}^R \sim N(0, \sigma_{S_2}^2)$, σ_{S_2} 为第 2 级误差标准差,由式(12)计算得到,即

$$\sigma_{S_2} = S_2 / 2 \quad (95\% \text{ 保证率}) \quad (12)$$

步骤 3 根据式(13),由 $\mathbf{E}_{1,*}^W$ 和 $e_{i,j}^R$ 逐步生成后续节点误差,即

$$e_{i+1,j}^W = e_{i,j}^W + e_{i,j}^R \quad (13)$$

步骤 4 检验首尾外联节点相对误差是否小于 S_2 , 不满足则重新生成首个节点误差样本。

步骤 5 最终形成 m 个工况、 n 个节点的外联节点误差矩阵,即

$$\mathbf{E}^W = \begin{bmatrix} e_{1,1}^W & \cdots & e_{n,1}^W \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{1,m}^W & \cdots & e_{n,m}^W \end{bmatrix}$$

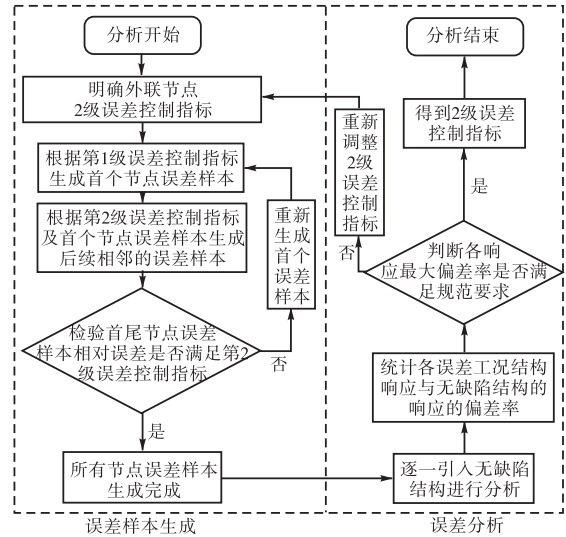


图 20 非独立误差样本的生成及误差分析

Fig.20 Generation of non-independent error samples and error analysis

根据上述外联节点误差样本的生成方法,以外联节点位误差 $\pm 25 \text{ mm}$ 为例.传统方法生成的误差样本更加分散,相邻节点间误差最大差值达到了 50 mm .本文方法通过控制相邻节点间的误差差值在 10 mm 以内,得到的误差分布更加集中,连续性更强,验证了该方法的有效性,见图 21。

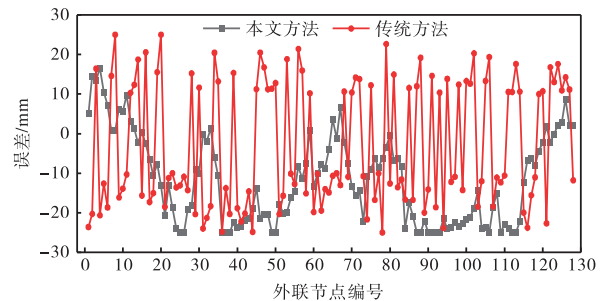


图 21 外联节点误差分布

Fig.21 Error distribution of external connection joints

将本文方法与传统方法生成的误差引入无缺陷结构进行对比分析,结果见图 22.由图 22 可知:本文方法计算后得到的索力偏差最大值为 8.1% ,传统方法经计算后得到的索力偏差最大值为 20.3% ,本文方法使索力偏差降低了 60.1% 。

5.3 工程验证

本文方法可通过控制相邻外联节点坐标在安装时的精度得以实现.将该方法与索长误差耦合进行分析,得出具体的施工控制指标.因本工程中环索长误差为非敏感性因素,又考虑到环索为可调节索,因此在耦合误差时不考虑环索长误差,仅考虑径向索长误差及外联节点误差,依据《建筑索结构工程施工

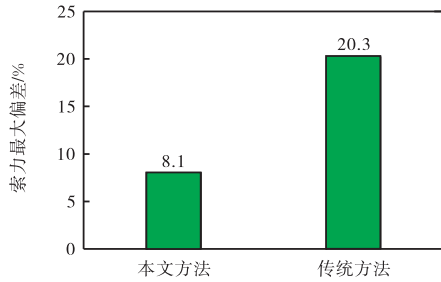


图 22 本文方法与传统方法得到的索力最大偏差对比
Fig.22 Comparison of maximum deviation of cable force between proposed and traditional methods

标准》(T/CECS 1341—2023)^[16], 设定双重误差控制目标见表 9(此处索力允许偏差 $\pm 10\%$ 是指在施工阶段的成型态索力偏差), 设置 3 种误差耦合工况见表 10. 图 23 为 3 种工况下的索力最大偏差和位移最大偏差. 由图 23 可知, 工况 F3 的索力和位移偏差均超过了限值要求, 工况 F1、F2 的索力与位移偏差均小于限值要求, 因此取工况 F2 作为施工控制指标.

表 9 形态控制目标

Tab.9 Morphological control targets

目标类型	目标允许偏差
索力	$\pm 10\%$
位形	$\pm 2 \times \text{悬挑跨度} / 1\ 000 = \pm 60\ \text{mm}$

表 10 误差耦合工况

Tab.10 Error coupling conditions

工况编号	索长误差/mm	外联节点 2 级误差/mm
F1	± 5	第 1 级 ± 20 , 第 2 级 ± 10
F2	± 5	第 1 级 ± 25 , 第 2 级 ± 10
F3	± 5	第 1 级 ± 30 , 第 2 级 ± 10

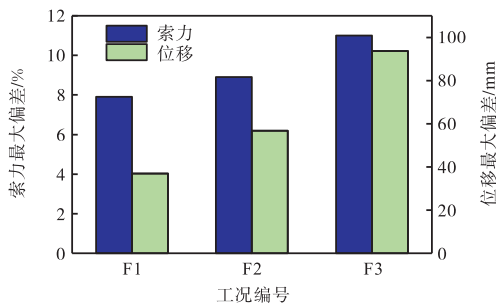


图 23 3 种工况下的索力最大偏差和位移最大偏差
Fig.23 Maximum deviations of cable force and displacement under three conditions

6 结论

本文介绍了 1 种新型大跨屋盖结构——径向密索压环可滑式单层索网, 分析了结构构型、传力机理及成型难点并针对其成型关键技术展开研究, 主要结论如下.

(1) 介绍了基于正算法的零状态找形迭代代法,

提出了找形过程中索力控制的小弹模法, 给出了其实现原理及计算公式. 分析结果表明: 本文所提出的小弹模法可以很好地实现索力控制; 轮辐式单层索网成型位形对环索力的敏感程度高于其对径向索力的敏感程度, 应采用控制径向索力的方式进行找形.

(2) 针对压环可滑动这一特点, 提出了“滑动支座临时固定+高空释放+最终固定”的施工方法. 不同锚固方案滑动支座的释放时机有所不同: 分批锚固应在最后一批牵引索长为 0.3 m 时释放, 同时锚固应在牵引索长为 0.5 m 时释放.

(3) 分批锚固较同时锚固的总锚固力下降了约 50.3%, 确定了“整体提升+分批锚固+高区牵引索长度为 0.3 m 时进行滑动支座释放”的施工方案并进行了施工全过程分析, 发现各个关键过程的结构响应均处在合理范围内.

(4) 径向索间距是影响误差敏感性的关键因素, 其与径向索力偏差成正比, 与环索力偏差成反比; 提出了基于各外联节点坐标安装误差非独立的误差分析方法, 与传统方法相比, 该方法得到的误差样本更加集中, 连续性更强, 相邻节点间相对误差得到了有效控制, 使索力偏差降低了 60.1%. 基于研究成果得出某工程实例的误差控制指标为: 径向索长 $\pm 5\ \text{mm}$, 约为索长的 1/6 000; 外联节点误差分 2 级控制, 其中第 1 级为 $\pm 25\ \text{mm}$, 约为索长的 1/1 200, 第 2 级为 $\pm 10\ \text{mm}$, 约为索长的 1/3 000.

(5) 针对此类压环可滑结构, 为保证滑动支座的安全可控, 提出临时固定滑动支座的方法. 若能通过控制提升过程中各牵引索力, 使各牵引索力始终成一定比例, 即可使得压环在提升过程中的滑动处于可控范围内, 避免出现大幅不可控的滑动, 确保在施工全过程都处于滑动状态.

参考文献:

[1] Zhang N Y, Luo B, Zhu L, et al. Research on the forming technology of a novel type structure of double-layer orthogonal cable net with a large opening[J]. Structures, 2024, 63: 106371.

[2] 郭彦林, 田广宇, 王 昆, 等. 宝安体育场车辐式屋盖结构整体模型施工张拉试验[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(3): 1-10.

Guo Yanlin, Tian Guangyu, Wang Kun, et al. Tensioning experiment on spoke structural roof of Bao'an Stadium[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(3): 1-10(in Chinese).

[3] 柴洪伟, 潘 钦, 曹国宗. 车辐式结构张拉方案与关键技术研究[J]. 空间结构, 2011, 17(2): 54-58.

- Chai Hongwei, Pan Qin, Cao Guozong. Research on the tension program and key technology of wheel-spoke structure[J]. *Spatial Structures*, 2011, 17(2): 54-58(in Chinese).
- [4] 祖坤, 罗斌, 胡炎浩, 等. 轮辐式单-双层混合索网结构成形关键技术研究[J]. *建筑结构学报*, 2023, 44(4): 141-149.
- Zu Kun, Luo Bin, Hu Yanhao, et al. Research on key technology for formation of spoke tension structure with single-double-combined layer cable[J]. *Journal of Building Structures*, 2023, 44(4): 141-149(in Chinese).
- [5] 魏程峰. 轮辐式马鞍形单层索网结构整体提升施工关键技术研究[D]. 南京: 东南大学土木工程学院, 2016.
- Wei Chengfeng. Key Technology of Integrity-Lifting Construction of Monolayer Spoke-Type Cable-Net of Saddle Shape[D]. Nanjing: School of Civil Engineering, Southeast University, 2016(in Chinese).
- [6] 秦正扬. 轮辐式双层索桁架结构力学性能分析与关键施工技术研究[D]. 南京: 东南大学土木工程学院, 2021.
- Qin Zhengyang. Performance Analysis and Key Technology Research of Spoke Type Double Cable Truss[D]. Nanjing: School of Civil Engineering, Southeast University, 2021(in Chinese).
- [7] Wang F, Di Z H, Zhang N Y, et al. Analysis of construction process and configuration automatic monitoring for the spoke-type single-layer cable net structure[J]. *Buildings*, 2024, 14(8): 2523.
- [8] 阮杨捷, 罗斌, 魏程峰, 等. 轮辐式马鞍形单层索网结构索长和外联节点坐标组合随机误差影响分析[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(2): 310-315.
- Ruan Yangjie, Luo Bin, Wei Chengfeng, et al. Combined random error effect analysis of cable length and outer-linked-node coordinates of spokewise saddle-shaped monolayer cable net structure[J]. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*, 2018, 48(2): 310-315(in Chinese).
- [9] 邓华, 宋荣敏. 面向控制随机索长误差效应的索杆张力结构张拉分析[J]. *建筑结构学报*, 2012, 33(5): 71-78.
- Deng Hua, Song Rongmin. Pretensioning analysis of cable-strut tensile structures for controlling effect of random cable length errors[J]. *Journal of Building Structures*, 2012, 33(5): 71-78(in Chinese).
- [10] Wang L L, Ding M M, Ruan Y J, et al. Error influence simulation of the 500 m aperture spherical radio telescope cable-net structure based on random combinations[J]. *Sustainability*, 2023, 15(20): 15061.
- [11] 沈宇洲, 罗斌, 谢国瑞, 等. FAST 反射面索网支撑结构误差敏感性分析和多误差耦合分析[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(17): 10-16.
- Shen Yuzhou, Luo Bin, Xie Guorui, et al. Error sensitivity analysis and multiple error coupling analysis of FAST cable-net supporting structure[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(17): 10-16(in Chinese).
- [12] 王泽强, 周储君, 周黎光, 等. 单层双向正交索网结构索长误差敏感性分析及控制限值研究[J]. *建筑结构*, 2021, 51(20): 68-75.
- Wang Zeqiang, Zhou Chujun, Zhou Liguang, et al. Study on sensitivity analysis of cable length errors and control limits of single-layer bidirectional orthogonal cable-net structure[J]. *Building Structure*, 2021, 51(20): 68-75(in Chinese).
- [13] Luo B, Sun Y, Guo Z X, et al. Multiple random-error effect analysis of cable length and tension of cable-strut tensile structure[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2016, 19(8): 1289-1301.
- [14] 史国梁, 刘占省, 路德春, 等. 索桁架结构施工误差评估的孪生仿真与模型试验[J]. *建筑结构学报*, 2024, 45(4): 107-119.
- Shi Guoliang, Liu Zhansheng, Lu Dechun, et al. Twinning simulation and model test for construction error assessment of cable truss structures[J]. *Journal of Building Structures*, 2024, 45(4): 107-119(in Chinese).
- [15] An Y H, Xue Z L, Li B B, et al. Deep-SVDD-based real-time early warning for cable structure[J]. *Computers & Structures*, 2024, 290: 107185.
- [16] T/CECS 1341—2023 建筑索结构工程施工标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2023.
- T/CECS 1341—2023 Standard for Construction of Cable Structure in Buildings[S]. Beijing: China Planning Press, 2023(in Chinese).

(责任编辑:武立有)