

Research on cable tension monitoring during the construction process of a certain axle less Ferris wheel

Hong Zhang^{1*} Yapeng Guo² Shuai Chen² Ting Wang³

1.School of Architectural Engineering Tianjin University, Tianjin, 300350, China

2.Tongji Engineering Consulting Co., Ltd., Shanghai, 200082, China

3.Beijing Municipal Road and Bridge Co., Ltd., Beijing, 100032, China

4.Tianjin Land Sea Surveying and Mapping Co., Ltd., Tianjin, 300110, China

Abstract

With the increase of ferris wheel structure scale, its complexity is also greatly increased, the monitoring of cable force in the construction stage is particularly critical. Taking a shaftless Ferris wheel as the research object, this paper aims to deeply discuss the key problems of cable force monitoring and numerical simulation in the construction process. The increase of structure diameter, the expansion of project scale, the extension of construction period, and the large number of rods and other factors have caused adverse effects on the control of construction cable force. In view of this, the frequency method is proposed to monitor the cable stress during construction. The tensile force of the structure in different construction stages is obtained by numerical calculation, and the monitoring value is compared with the design value. The results show that the error rate between the cable force monitoring data and the design value ranges from -3.824% to 9.720%, which can meet the requirement of 10%. This study is helpful to better grasp the characteristics of cable force variation in Ferris wheel construction, and provides an effective guarantee for the safe construction of Ferris wheel structure.

Keywords

shaftless ferris wheel; construction monitoring; cable force monitoring

某无轴式摩天轮施工过程中索力监测研究

于丽娜¹ 张红^{2*} 郭亚鹏³ 史青法⁴

1. 天津大学建筑工程学院, 中国·天津 300350

2. 上海同济工程咨询有限公司, 中国·上海 200082

3. 北京市政路桥股份有限公司, 中国·北京 100032

4. 天津市陆海测绘有限公司, 中国·天津 300110

摘 要

随着摩天轮结构规模的增大,其复杂性也大大增加,施工阶段的索力监测显得尤为关键。本文以某无轴式摩天轮为研究对象,旨在深入探讨施工过程中的索力监测与数值模拟的关键问题。结构直径增加、工程规模扩大、施工周期延长、以及杆件众多等多方面因素复合,对施工索力控制造成了不利影响。鉴于此,本文提出基于频率法对施工过程中的拉索应力进行监测。通过数值计算得到结构在不同施工阶段的张拉索力,并将监测值与设计值进行对比分析。结果表明,索力监测数据与设计值的误差率分布于-3.824%~9.720%,均在满足规范规定的10%以内的要求。本研究有助于更好地掌握摩天轮施工中的索力变化特性,为摩天轮结构安全施工提供了有效保障。

关键词

无轴式摩天轮; 施工监测; 索力监测

1 引言

随着城市建设的不断发展,摩天轮作为一种独特而壮观的建筑形式在城市景观中日益占据重要地位^[1]。然而,随着摩天轮结构规模的逐渐增大和复杂度的提高,其施工过程中所涉及的索力监测问题也显得尤为关键^[2]。

特别地,无轴式摩天轮结构区别于传统的轮辐式摩天轮结构,是一种“既大跨又高耸”的、复杂的大型钢结构^[3]。无轴式摩天轮结构的施工效应影响是施工过程中需要注意的关键性问题^[4]。索力监测^[5]是诸多钢结构工程施工监测的重要组成部分。

索力是通过施加预应力来调整拉索,增强结构的承载力,进而保证结构的整体稳定性^[6]。在进行预应力拉力时,必须保证拉索的拉力达到设计要求,才能使拉索发挥有效作用。鉴于此,本文针对某无轴式摩天轮结构开展了施工过程

【作者简介】于丽娜(1991-),女,中国河北唐山人,硕士,讲师,从事结构健康监测研究。

中的索力监测研究。

常见索力监测方法包括：振动频率法、磁通量法、油压表、压应力法等^[7]。其中，振动频率法具有灵敏性高、实时性强和适用性广的优势，被广泛应用于钢结构索力检测与监测。因此，本研究使用频率法^[8]来进行索力的测量，以便能够准确地捕捉结构的振动频率和振幅变化，从而精确推断结构的受力状况。

2 工程概况

潍坊白浪河大桥摩天轮^[9]，其主体结构嵌入于桥梁中央，高度达到 145 m，成为全球最高的无轴式摩天轮之一。这种设计不仅展示了创新性，还彰显了轮桥共用的高效性。该摩天轮的外围轮廓直径为 125 m，顶部结构断面直径为 5 m，底部结构断面直径为 15 米，总用钢量接近 5000 吨。这座建筑在高度、结构设计和用材方面都展现了卓越的工程技术，彰显了中国在大型工程和建筑领域的领先地位，也成为了城市的地标性建筑与新名片。

3 索力监测相关内容

3.1 频率法基本原理

频率法是一种间接测量拉索索力的方法，利用拉索的振动频率与拉索的索力之间的关系进行测量。频率法的实施过程如图 2 所示。在拉索张拉施工过程中，可应用频率法监测拉索强度，该方法具有易操作、速度快、成本低等特点，且可长期监测完成张拉的拉索^[10]。

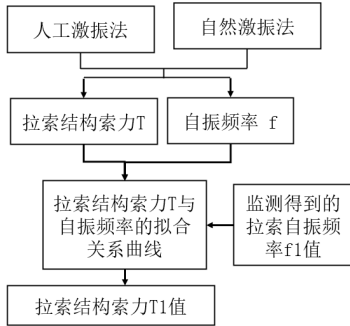


图 2 频率法测量流程图

本文通过修正索力计算公式测量拉索自振频率^[11]。该方法可以降低抗弯刚度、边界条件、拉索垂度、温度等因素对计算精度的影响，满足施工现场的精度要求。

T-f 关系曲线^[12]是利用弦振动原理得到的，拉索动力微分方程为：

$$E \frac{\partial^4 \eta(x,t)}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 \eta(x,t)}{\partial x^2} - \Delta T \frac{\partial^4 y}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 \eta(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

式中： EI 为拉索的抗弯刚度； $\eta(x,t)$ 为 y 方向上的振动位移； T 为拉索拉力； ΔT 为振动产生的索力增量； m 为拉索单位长度质量。

拉力 T 较小时，拉索的垂度较大，此时索力增量 ΔT 的

影响不能被忽略。但对于二阶及以上的高阶振型，索力增量 ΔT 对拉索的影响相对较小，可忽略不计。此时，式（1）近似为：

$$EI \frac{\partial^4 \eta(x,t)}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 \eta(x,t)}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 \eta(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (2)$$

根据分离变量法，式（2）可表示为

$$\eta(x,t) = \varphi(x)q(t) \quad (3)$$

将式（3）代入式（2），得

$$EI \frac{d^4 \phi(x)}{dx^4} - T \frac{d^2 \phi(x)}{dx^2} - m \omega^2 \phi(x) = 0 \quad (4)$$

式中， ω 为固有振动圆频率。

式（4）的一般解为：

$$\varphi(x) = A_1 \sinh(\beta x) + A_2 \cosh(\beta x) + A_3 \sin(\alpha x) + A_4 \cos(\alpha x) \quad (5)$$

其中， $\alpha^2 = ((\xi^4 + \gamma^4) - \xi^2)^{1/2}$ ； $\gamma^4 = \frac{m \omega^2}{EI}$ ； $\beta^2 = ((\xi^4 + \gamma^4) + \xi^2)^{1/2}$ ； $\xi^2 = \frac{T}{2EI}$ 。

当拉索两端为铰接，索力可进一步表示为：

$$T = \frac{4m l^2 f_n^2}{n^2} - \frac{n^2 \pi^2 EI}{l^2} \quad (6)$$

式中， n 为拉索自振频率的阶数； f_n 为拉索第 n 阶的自振频率； l 为拉索的长度。

忽略拉索抗弯刚度的影响，式（6）可进一步简化为：

$$T = \frac{4m l^2 f_n^2}{n^2} \quad (7)$$

3.2 钢索张拉

张拉设备：采用 4 个油压泵同步进行张拉操作，每个泵都由一位工作人员操控。

张拉原理：拉索工装通过加液压油泵，将推力施加到索头上。只有在扳手的作用下，索头才会转动，当推力与索头的力等于拉索的拉力时，索头与拉索之间的距离就会慢慢变小。这样，拉索受到了拉力，就能完成张拉^[13]。

张拉分级和顺序：预应力拉索分为 4 组，每组 3 根，共计 12 根。拉索规格为 $\Phi 7*265$ ，双层 PE 保护层，最大张拉力为 2000 kN。拉索呈双轴对称形式，保证了主体结构稳定性。

在进行钢索张拉之前，由于结构的刚度较小，需要设置支撑来分担并承担结构的自重，以确保结构的稳定性。一旦张拉完成，随着结构逐步达到设计的刚度，胎架可以被移除^[14]。由于张拉索和结构之间存在相互影响，在选择任何一种张拉方式时，都需要对整个施工过程进行全面的模拟分析。选择合适的张拉方案不仅关乎张拉的效率和可操作性，还直接涉及结构的安全性^[15]。

为了确定最合适的张拉方案，我们参考了其他工程的施工技术。具体的，第一级张拉是在结构拼装过程中进行的，通过张拉工装对拉索进行预紧。在钢结构安装完成后，遵循分级对称张拉^[16]的原则，依次对 12 根拉索进行第二级和第

三级的张拉。这一施工流程是充分考虑了工程的实际情况，以确保结构在施工过程中既能够高效完成，又能够保障结构的安全性。

该方案通过分层张拉，可以逐步接近结构设计要求的状态，施工周期短，张拉过程简单，操作方便。

3.3 索力监测

索力监测定于中午时段进行，该时段天气无风且施工现场设备运行较少，监测过程受环境影响小。具体的温度约为 22 ℃，这一时段的选择旨在最大程度减少环境因素对索力测量的影响。首先，对采集到的频率进行过滤和预处理。然后，计算拉索的实际索力。索力监测数据如表 1 所示。这样的监测安排和处理步骤有助于确保索力测量的准确性和可靠性，为后续的工程施工提供重要的技术支持。表 2 为图 5 所述张拉方案下计算得到的拉索张拉设计值。

表 1 索力监测值

拉索编号	测得频率（Hz）	计算索力（kN）
GS-1	0.890568	1475.987936
GS-1a	0.878853	1437.411499
GS-1’	0.888352	1468.651674
GS-1a’	0.912546	1618.412272
GS-2	0.918906	1681.58655
GS-2a	0.927734	1762.199407
GS-2’	0.943469	1830.217452
GS-2a’	0.943593	1834.571666
GS-3	0.942389	1828.491866
GS-3a	0.944078	1859.784738
GS-3’	0.956987	1929.535329
GS-3a’	0.918963	1814.634159

表 2 拉索张拉设计值

拉索千斤顶	第 1 级 (kN)	压力值 (MPa)	第 2 级 (kN)	压力值 (MPa)	第 3 级 (kN)	压力值 (MPa)
GS-1-41/46	407	6.5	1611	27.1	2010	34.4
GS-1a-45/35	407	5.8	1611	28.1	2010	33.7
GS-1’-40/43	407	6.5	1611	28.1	2010	33.5
GS-1a’-44/38	407	6.5	1611	26.6	2010	33.4
GS-2-41/46	359	5.7	1412	25.0	1767	30.6
GS-2a-45/35	359	6.1	1412	26.1	1767	32.1
GS-2’-40/43	359	5.7	1412	25.1	1767	31.1
GS-2a’-44/38	359	5.7	1412	24.6	1767	30.2
GS-3-41/46	313	4.9	1259	22.4	1568	27.2
GS-3a-45/35	313	5.2	1259	22.1	1568	27.2
GS-3’-40/43	313	4.9	1259	21.6	1568	26.7
GS-3a’-44/38	313	4.9	1259	21.5	1568	26.3

注：以 GS-2-41/46 为例，GS-2 表示二号拉索，41/46 表示千斤顶对应编号

3.4 数据分析

表 3 中索力监测数据与设计数据的对比分析能够更好

的评估结构的性能和安全性^[17]。通过验证索力监测数据与设计预期是否一致，可以检测结构在实际运行中是否存在问题或受到了外部影响。此外，对比数据还有助于了解结构实际的负载情况，为未来的维护和改进提供有益的信息。最终，索力监测数据与设计数据的对比分析有助于提前发现潜在问题、指导结构的运营和维护工作，确保结构的可靠性。

表 3 监测数据与设计数据对比分析

拉索编号	测量计算索力	设计索力（kN）	存在误差
GS-1	1475.987936	1568	5.868%
GS-1a	1437.411499	1568	8.328%
GS-1’	1468.651674	1568	6.336%
GS-1a’	1618.412272	1568	-3.215%
GS-2	1681.58655	1767	4.834%
GS-2a	1762.199407	1767	0.272%
GS-2’	1830.217452	1767	-3.578%
GS-2a’	1834.571666	1767	-3.824%
GS-3	1828.491866	2010	9.030%
GS-3a	1859.784738	2010	7.473%
GS-3’	1929.535329	2010	4.003%
GS-3a’	1814.634159	2010	9.720%

根据监测结果分析：其中，拉索 GS-1a’ 监测索力为设计值的 -3.215%，拉索 GS-2’ 监测索力为设计值的 -3.578%，拉索 GS-2a’ 监测索力为设计值的 -3.824%，处于超张拉状态^[17]；其中，共计 9 根拉索的索力值均略低于设计值，最小误差为 0.272%，最大误差为 9.720%。分析原因，主要是受现场监测条件影响，拉索没有进行超张拉，导致油缸缩回后索力值较小。该误差范围仍符合规范规定的 10% 范围以内。

4 结语

拉索是摩天轮结构的重要构件，其索力的大小直接关系到结构的受力分布、变形和安全状态。本文以某无轴式摩天轮为研究对象，基于频率法开展了施工过程索力监测研究。通过将索力监测值与设计值进行比较，可以得出：索力监测数据与设计值的误差率分布于 -3.824%~9.720%，均满足规范要求；这意味着结构中的拉索正处于设计阶段规定的张力水平，表明结构在受力方面表现出良好的稳定性和合格的工程性能。通过对拉索进行实时监测和频率法的精确计算，可确保结构的受力状态得到有效的控制，为摩天轮结构安全施工提供了有效保障。

参考文献

[1] 刘哲,苏思丽,王成博.无轴式摩天轮结构温度效应分析与合拢温度研究[J].空间结构,2020,26(02):64-71.
[2] 贾贵磊,刘哲.大型摩天轮施工模拟与应力监测[J].特种结构,2016,33(06):17-22.
[3] 孙婧妍.高温电阻应变片应力监测可靠性测试实验研究[D].武汉大学,2022.