

某空间网壳结构整体提升过程中的不同步影响分析

郭小农^{1,*} 隋正昂¹ 张玉建² 张锦东³

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 中国建筑第八工程局有限公司, 上海 200122;

3. 上海建工集团工程研究总院, 上海 201114)

摘 要 近年来,随着大跨空间网格结构在大型场馆、会展中心以及机场航站楼等项目中的应用不断增多,其安装施工技术也更加成熟。其中,整体提升是应用最为广泛的现代化施工技术之一。然而,在整体提升过程中,因为设备控制系统延时、电压不稳定和其余干扰因素存在,各提升点往往无法在提升过程中保持完全同步。本文以某高铁站房屋盖的空间网壳结构整体提升施工为例,基于蒙特卡洛方法及遗传算法研究了提升不同步对整体提升过程中结构安全性和吊点反力变动的的影响。首先,基于蒙特卡洛方法完成了数万次计算,得出各吊点不同步幅值及其随机分布对网壳结构最大应力及各点反力变动幅值的影响规律。分析结果表明,在各吊点不同步最大幅值相同的情况下,结构最大应力和吊点反力变化幅度满足对数正态分布;随着吊点不同步最大幅值的增加,结构最大应力和吊点反力变化幅度也随之增大,但呈现一定非线性相关性。其次,当吊点不同步最大幅值确定时,采用遗传算法可以得到各吊点不同步幅值的最不利分布;在该最不利分布下,结构的最大应力略高于基于上万次蒙特卡洛分析所得结果。最后,给出了整体提升不同步最大幅值的取值建议,并提出了应对提升不同步的施工措施。

关键词 空间结构, 整体提升, 提升不同步, 蒙特卡洛方法, 遗传算法

中图分类号: TU393 文献标志码: A DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.202601.0018

Analysis of the Effect of Asynchrony in the Integral Lifting Process of A Spatial Reticulated Shell Structure

GUO Xiaonong^{1,*} SUI Zhengang¹ ZHANG Yujian² ZHANG Jindong³

(1.College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2.China Construction Eighth Engineering Bureau Co., Ltd., Shanghai 200122, China;

3.Engineering Research Institute, Shanghai Construction Engineering Group, Shanghai 201114, China)

Abstract In recent years, as large-span spatial reticulated shell structures have been increasingly applied in large-scale venues, exhibition centers, and airport terminals, their installation and construction techniques have become more mature. Among them, the integral lifting technology is one of the most widely used modern construction methods. However, during the integral lifting process, factors such as delays in the equipment control system and voltage instability often prevent all lifting points from remaining fully synchronized. This paper takes the spatial reticulated shell structure of a high-speed railway station as an example and investigates the impact of asynchronous lifting on structural safety and the variation in lifting point reactions during the integral lifting process, based on the Monte Carlo method and genetic algorithm. First, extensive calculations were carried out using the Monte Carlo method to obtain the influence of the asynchronous amplitude and its random distribution at each lifting point on the maximum stress and the variation range of reactions in the reticulated shell structure. The analysis shows that under the same maximum asynchronous amplitude of the

收稿日期: 2024-08-02

* 联系作者: 郭小农,男,工学博士,副教授,主要研究方向为铝合金结构和钢结构。E-mail: guo-xiao-nong@tongji.edu.cn

lifting points, the maximum structural stress and the variation range of the lifting reactions follow a lognormal distribution. As the maximum amplitude increases, the maximum structural stress and the variation range of the lifting reactions also increase, but with a certain nonlinear correlation. Second, once the maximum asynchronous amplitude of the lifting points is determined, the genetic algorithm can be used to identify the most unfavorable distribution of lifting point asynchrony. Under this most unfavorable distribution, the maximum structural stress is slightly higher than the results obtained from extensive Monte Carlo analysis. Finally, recommendations are provided for the maximum allowable asynchronous amplitude during integral lifting, and corresponding construction measures are proposed to mitigate the effects of asynchronous lifting.

Keywords spatial structure, integral lifting, asynchronous lifting, Monte Carlo method, genetic algorithm

0 引言

在我国经济持续增长的背景下,大跨空间钢结构也相应朝着超大、超轻、可变的方向不断发展。对于空间网壳结构而言,目前使用较多的施工方法是整体提升法。该方法将网壳结构在地面拼装完成,然后采用提升设备通过滑轮和吊索将网壳结构提升至设计标高;同时次要结构如屋面板等也可在地面进行安装,因此大幅减少了高空作业量^[1-3]。

自整体提升施工方法出现以来,一个关键问题一直尚未得到明确解决,即施工不同步对整体提升的不利影响应如何确定。由于设备控制系统延时、电压不稳定和其余干扰因素存在,施工不同步通常是难以避免的^[4];而且如果吊点数量较多,各吊点间的不同步幅值也呈现随机分布状态。工程师很难通过概念直观判断出各吊点不同步幅值的最不利分布,也难以估计出这种随机不同步对结构应力状况的影响^[5]。

陈志华等^[6]在对大跨度桁架结构进行滑移法安装分析时发现,结构同步滑移时,整体的变形和应力比较小,但在不同步滑移时,结构将产生较大的应力和变形,并根据施工经验给出了不同步滑移的最大限值为 50 mm。祝瑞麟^[7]为模拟真实的不同步提升工况,对钢桁架的 24 个吊点施加随机分布的强迫位移,结果显示在各不同步工况下结构应力较大的杆件始终出现在同一位置;对这些应力较大的杆件进行加固,即可提高施工过程的安全性。杨兵^[8]考虑了提升不同步对大跨度结构施工应力的影响,将提升过程分为水平提升和翻转提升两个阶段;通过计算,得到了水平提升阶段提升点设置对结构内力变化的影响程度。在翻转

提升过程中,结构的最大应力随着不同步幅值和结构倾斜角度的增大而增大。

但以上对不同步提升的相关研究,有些是直接设定不同步幅值进行计算,有些是取少许随机不同步幅值组合进行计算,未能清晰表达出提升不同步对于结构最大应力以及吊点反力的影响规律。鉴于此,本文以某高铁站房屋盖的空间网壳结构为例,基于蒙特卡洛方法及遗传算法研究了提升不同步对整体提升过程中结构安全性和吊点反力变动的影响。

1 工程概况

本文算例以莱荣高铁某站房屋盖结构的施工为背景。该站房为新建莱西至荣成铁路的重要站点,站点由站台雨棚和站房两部分组成。站房建筑面积约 10 000 m²,结构总高约 21 m,最大纵向柱距为 18 m,最大横向柱距为 12 m。下部主体结构为钢筋混凝土框架,上部网壳造型为双曲面,网壳总重 372 t,材料牌号为 Q355B,网壳弦高 3.5 m,基本尺寸约 3 m×3.2 m。网壳杆件具体规格见表 1 所示。

网壳的约束条件为周边固定铰支座,放置于下部混凝土框架柱顶,荷载取值有自重荷载和马道荷载的恒荷载,未考虑活荷载和风荷载的作用。由于该网壳具有面积大、跨度大、高度大及单体量较大等特点,同时由于工期紧张、施工场地条件受限,综合考虑后决定采用整体提升法进行安装。该网壳结构整体提升部分的三维模型如图 1 所示。

网壳整体提升的步骤为^[9]:①网壳在地面拼装胎架上散拼完成;②提升架及液压设备安装,利用钢绞线将提升点和提升设备连接;③经过分级

表1 网壳杆件规格表
Table 1 Reticulated shell members specification table

序号	规格/mm
1	$\phi 60 \times 4$
2	$\phi 75.5 \times 4$
3	$\phi 88.5 \times 4$
4	$\phi 114 \times 4$
5	$\phi 133 \times 5$
6	$\phi 140 \times 8$
7	$\phi 159 \times 10$
9	$\phi 159 \times 12$
10	$\phi 180 \times 12$
11	$\phi 219 \times 14$

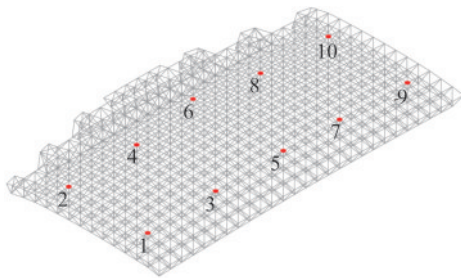


图1 网壳整体提升部分的三维模型图

Fig.1 Three-dimensional model of the integral lifting part of the reticulated shell

加载试提升并静止 4 h 后开始正式提升；④以 10 cm/h 的提升速率缓慢平稳进行整体提升，直至网壳达到设计标高；⑤补装支座周围杆件；⑥缓慢卸载使网架落位于混凝土框架柱顶。具体提升吊点编号如图 2 所示。

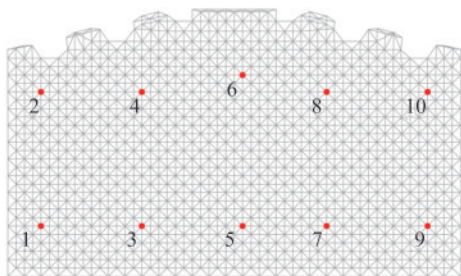


图2 整体提升吊点编号图

Fig.2 Integral lifting points numbering diagram

整体提升施工过程中，主要难点为提升面积较大，各点的提升反力分布并不均匀，给提升过程的力和位移控制带来较大难度。在施工方案设计时，对屋盖结构整体提升的过程进行力学分析，前提假定的是各提升点之间的位移是绝对同步的，即提升点之间不存在高差，所有提升点在施工全

过程中总是处于同一水平面。然而在实际提升过程中，虽然穿心式液压千斤顶在计算机控制下进行提升动作^[10]，用以保证所有提升点在提升过程中的同步性。但是，由于数据传输反馈和油缸动作等其他因素之间存在的延时现象，将会导致位移反馈不及时或者油缸压力和行程控制产生误差，使得在实际提升过程中各提升点之间不能保证绝对的同步。对于大跨度空间钢结构，在整体提升的过程中，各提升点之间的不同步将会导致结构受力状态发生变化。因此为了保证结构提升过程中的安全性，防止提升不同步对结构杆件的强度和结构整体稳定性产生较大的不利影响^[11]，有必要对结构在提升过程中提升点不同步产生的高差限值加以研究。

2 数值分析模型

2.1 模型建立

为得到整体提升过程中结构的力学状态和各提升点反力，采用 ANSYS 软件建立网壳结构的有限元模型。网壳结构的杆件均为二力杆，采用 Link180 单元模拟。为了考虑提升点不同步时某些吊索的松弛情况，提升吊索采用只拉不压的 Link10 单元模拟，其截面刚度和实际吊索等效。由于本文主要目的是分析提升不同步的影响，而且实际整体提升施工过程归类于慢速时变力学范畴，本质是在模拟结构整体提升过程中的拟静态场景，故将材料本构关系均设置为线弹性，且不需要考虑稳定性问题。本模型在所选取的吊点上方施加刚度较大的吊杆，同时在吊点的 x 、 y 方向分别设置了较小刚度的弹簧单元，用于消除模拟提升过程中结构的刚体位移。恒荷载为结构自重，由于马道在整体提升前已经安装，故还施加了马道荷载，结构并未考虑活荷载或风荷载。结构的有限元模型及其约束条件如图 3 所示。不同步提升幅值通过顶部提升点的强迫位移施加。

2.2 均匀同步提升时的分析结果

为对后续网壳结构不同步提升分析做准备，先计算出网壳结构在整体均匀同步提升工况下的结果。结构的变形和应力图见图 4，各吊点的反力结果见表 2。根据计算结果可知，均匀同步提升时网壳结构的较大挠度发生在网壳的中心和前

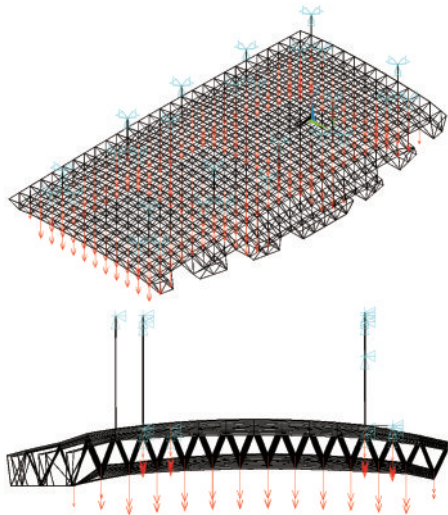
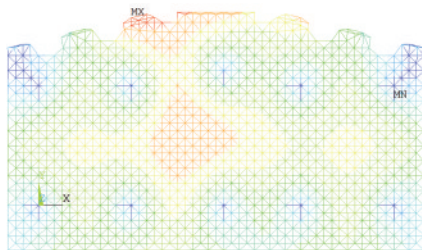


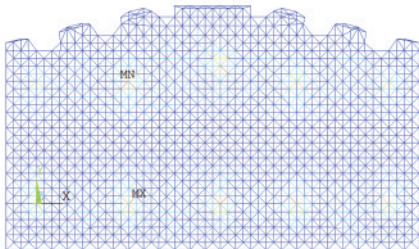
图3 数值分析模型图

Fig.3 Numerical analysis model

中区两个位置,10个吊点所围区域整体变形较大,最大挠度为61 mm。此外网壳结构的最大应力为99 MPa,吊点周围的几根杆件应力较大,这是由于吊点集中力传递至附近杆件所致。由表2可知,10个吊点的反力较为接近,结构两侧吊点反力稍低。



(a) 变形图



(b) 应力图

图4 结构同步提升时的变形图及应力图

Fig.4 Deformation diagram and stress diagram of the structure during synchronous lifting

2.3 不同步提升时的分析结果

通过查阅相关规范《重型结构和设备整体提升技术规程》^[12],并未找到关于不同步幅值的明确规定,为论证不同步提升时的影响不可忽略,按表

表2 吊点反力表

Table 2 Lifting points reaction table

吊点编号	吊点反力/kN
1	201.73
2	183.34
3	240.69
4	291.30
5	207.71
6	261.98
7	218.98
8	258.87
9	204.52
10	186.05

3数值进行随机设定各吊点不同步幅值,进行计算分析后发现网壳结构最大应力增加到218.6 MPa,相比同步提升时增加了120%。6号和8号提升点的反力分别为602.79 kN和529.41 kN,相比于同步提升时分别增加了130%和100%。若本工程采用的提升千斤顶额定提升重量为50 t,在不同步幅值全部小于25 mm时,部分吊点反力已经超过额定提升重量,由此可见,提升不同步的影响较大。因此有必要对该问题进行深入研究。

表3 随机输入的吊点不同步幅值表

Table 3 Table of asynchronous amplitude values of lifting points

吊点编号	不同步幅值/mm
1	6.8
2	24.8
3	21.6
4	3.2
5	24.5
6	24.6
7	2.3
8	1.5
9	3.3
10	7.1

图5给出了不同步提升时结构的最大变形图和应力图。从图5可以看到,由于各吊点提升不同步,结构的最大变形位置发生了改变,最大应力位置也发生了改变。其中,应力最大位置发生改变的原因是,由于6号点提升幅值大于其他吊点,故6号点反力增加较多,从而使结构最大应力出现在该吊点附近。

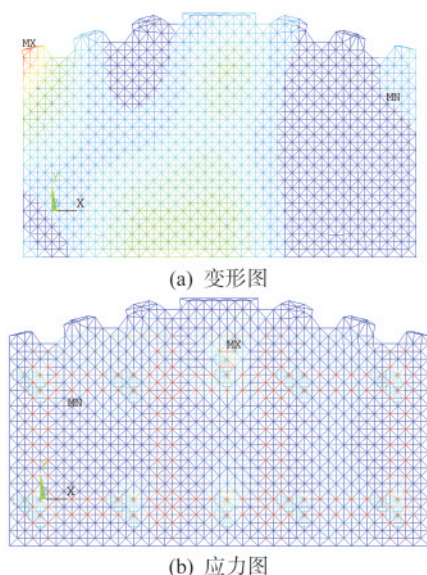


图5 由表3中不同同步幅值得到的结构最大变形图及应力图

Fig.5 The maximum deformation diagram and stress diagram of the structure obtained from the synchronous amplitude in table 3

3 基于蒙特卡洛方法的计算结果分析

3.1 计算结果概述

本文假设各提升点的提升幅值为相互独立的随机变量,然后基于蒙特卡洛方法对该问题进行了数万次分析。首先将各提升点的幅值记为 a_i ($i=1\sim 10$),并记 $[a]$ 为10个吊点幅值的最大值;在进行每次分析时,各提升点幅值为满足正态分布的 $0\sim[a]$ 之间的值。

为分析提升不同步对结构应力的影响,提取同步提升结构最大应力和不同步提升时结构的最大应力作对比,定义最大应力放大系数 k_σ 如式(1)所示:

$$k_\sigma = \sigma_{\max}^{[a]} / \sigma_{\max}^0 \quad (1)$$

式中: σ_{\max}^0 为同步提升网壳结构最大应力; $\sigma_{\max}^{[a]}$ 为最大不同步幅值为 $[a]$ 时的结构最大应力,文中 $[a]=5\sim 100$ mm。

为分析提升不同步对吊点反力的影响,提取同步提升结构时各吊点反力和不同步提升时各吊点反力,定义吊点反力放大系数 k_{R_i} 如式(2)所示:

$$k_{R_i} = R_i^{[a]} / R_i^0 \quad (2)$$

式中: R_i^0 为同步提升时第 i 个吊点的反力; $R_i^{[a]}$ 表示最大不同步幅值为 $[a]$ 时第 i 个吊点的反力。

3.2 结构的最大应力放大系数的分布规律

接下来以不同同步幅值 $[a]=25$ mm的计算结果为例,来分析提升点不同同步幅值随机分布时,结构的最大应力放大系数 k_σ 的分布规律。本文完成了10 000次 $[a]=25$ mm的蒙特卡洛分析,得到10 000个结构最大应力比 k_σ ,并画出其频数分布直方图(图6)和概率密度分布函数图(图7)。从图7可以看出, k_σ 的分布更加符合对数正态分布。通过 χ^2 拟合优度检验可知, k_σ 符合对数正态分布。

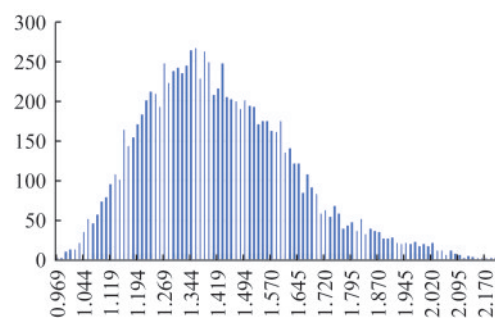


图6 $[a]=25$ mm时 k_σ 的频数分布直方图

Fig.6 Histogram of frequency distribution when $[a]=25$ mm

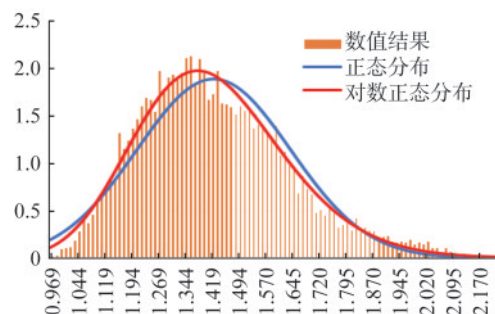


图7 $[a]=25$ mm时 k_σ 的概率密度分布函数图

Fig.7 The probability density function graph when $[a]=25$ mm

同理,可以得出 $[a]$ 为其余数值时,结构的最大应力放大系数仍然满足对数正态分布。表4给出了 $[a]=5\sim 100$ mm时,结构最大应力放大系数 k_σ 的最大值、平均值、标准差、对数平均值、对数标准差。从表4可以看出,随着不同步幅值限值的增加,结构的最大应力放大系数也逐步增加。图8给出了 $[a]=5\sim 100$ mm时 k_σ 的概率密度分布函数图,图9给出了 $[a]=5\sim 100$ mm时 k_σ 95%保证率最大值的变化的情况。从图8可以看到,随着幅值 $[a]$ 的增加,对数平均值不断增大,其离散度也不断增加,图9的结果也展示了相同的结果。

表 4 不同步幅值情况下结构最大应力放大系数的统计特征

Table 4 Statistical characteristics of maximum stress amplification coefficients of structures under asynchronous amplitude values

不同步幅值[a]/mm	最大应力/MPa	k_{σ} 最大值	k_{σ} 平均值	k_{σ} 标准差	k_{σ} 对数平均值	k_{σ} 对数标准差	k_{σ} 95% 保证率
0	99.005	1.000	1.000	0.000	—	—	—
5	116.738	1.179	1.039	0.041	0.038	0.040	1.108
10	141.748	1.432	1.126	0.081	0.116	0.071	1.263
15	166.750	1.684	1.221	0.123	0.195	0.099	1.430
20	191.745	1.937	1.320	0.167	0.270	0.124	1.605
25	218.602	2.208	1.420	0.211	0.340	0.146	1.784
50	286.693	2.895	1.807	0.322	0.575	0.178	2.381
75	318.088	3.213	2.064	0.365	0.701	0.183	2.723
100	383.774	3.876	2.243	0.439	0.770	0.194	2.970

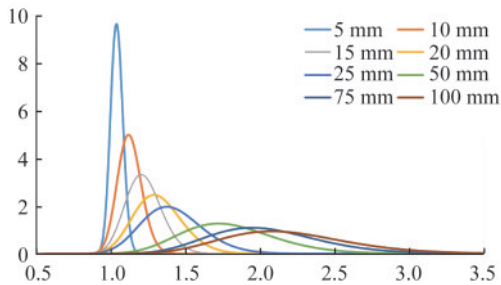


图 8 [a]=5~100 mm 时 k_{σ} 的概率密度分布函数图

Fig.8 Probability density distribution function graph of the maximum stress ratio coefficient when [a]=5~100 mm

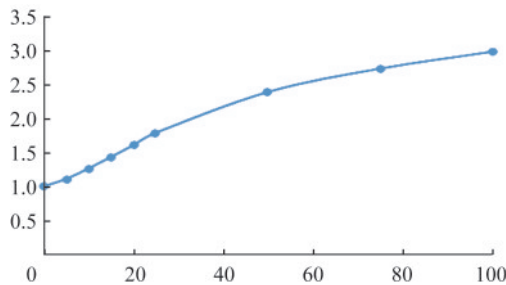


图 9 k_{σ} 95% 保证率最大值随 [a] 的变化规律

Fig.9 Variation law of the maximum stress ratio coefficient of 95% guarantee rate with [a]

3.3 结构的吊点反力放大系数的分布规律

同样,对 10 个提升点反力分布进行规律总结。由于提升点数据较多,且网壳结构两侧的提升点反力变化相对较小,故选取 [a]=25 mm 时网壳中部 6 号吊点的反力进行分析。

在蒙特卡洛各个最大幅值的整体提升不同步模拟中,5、6 号点在 [a]≥20 mm,有时会得到反力为 0 的结果。这是因为当中间提升点幅值较小而相邻两侧提升点幅值过大时,中间提升点处的吊

索可能出现松弛现象。而且模型在吊杆单元设置了只拉不压特性,使得反力最小为 0,否则甚至可能因为两边幅值过大反力点被拉起成负值。图 10 给出了 [a]=25 mm 时 6 号吊点的反力放大系数 k_{R6} 的频数分布直方图,图 11 给出了 k_{R6} 的频数概率密度分布函数图。通过 χ^2 拟合优度检验可知, k_{R6} 符合正态分布。同理,表 5 给出各个不同步幅值 [a]=0~100 mm 时,6 号吊点反力放大系数 k_{R6} 的统计特征参数。

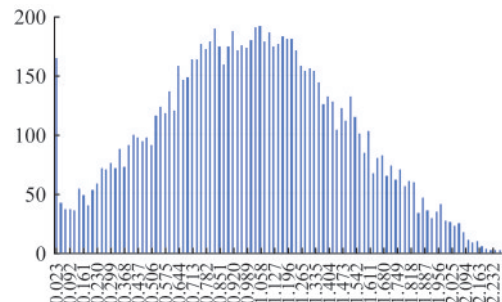


图 10 [a]=25 mm 时 k_{R6} 的频数分布直方图

Fig.10 Histogram of frequency distribution of reaction coefficient at lifting point 6 when [a]=25 mm

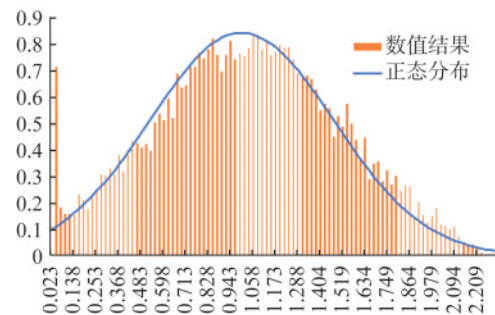


图 11 [a]=25 mm 时 k_{R6} 的概率密度分布函数图

Fig.11 Probability density function diagram of reaction coefficient at lifting point 6 when [a]=25 mm

表5 不同步幅值情况下 k_{R6} 的统计特征Table 5 Statistical characteristics of k_{R6} under asynchronous amplitude values

不同步幅值 $[a]/\text{mm}$	6号点最大反力/kN	k_{R6} 最大值	k_{R6} 平均值	k_{R6} 标准差	k_{R6} 95%保证率最大值
0	261.980	1.000	1.000	0.000	—
5	330.594	1.262	0.996	0.0954	1.153
10	399.251	1.524	0.999	0.191	1.313
15	467.952	1.786	0.998	0.286	1.468
20	536.770	2.049	0.998	0.382	1.626
25	602.787	2.301	0.999	0.474	1.779
50	673.913	2.572	1.024	0.753	2.263
75	703.175	2.684	1.036	0.865	2.459
100	767.865	2.931	1.037	0.920	2.550

对比图 11 和图 7 可知,结构的最大应力放大系数服从对数正态分布,而吊点反力放大系数服从正态分布。吊点处的提升幅值是 10 个相互独立的满足正态分布的随机变量,而结构最大应力放大系数是这 10 个随机变量的非线性函数,因此其分布规律可能更为复杂。然而,吊点反力放大系数仅受到临近吊点提升幅度的影响较大,即是临近若干个随机变量的函数,其分布规律可能更加接近正态。

3.4 提升不同步最大幅值的确定

前文已经确定了结构最大应力放大系数和结构吊点反力放大系数的分布规律,即可在此基础上确定不同步幅值的限值。在确定限值时,通常应考虑两方面因素。其一是在提升过程中结构的安全性应得到保证,即结构的最大应力不应超过一定限值,这可以通过结构最大应力放大系数确定;其二是提升过程中选定好的千斤顶设备不能超载,这可以通过吊点反力放大系数确定。另外,提升不同步幅值的限值也不宜过小,这是因为设备延时、电压变化等因素无法避免,故该幅值的确定需要为实际施工的可操作性留出一定的空间。

以本工程为例,从结构最大应力去考虑,最大不同步幅值应满足式(3):

$$k_{\sigma_{\max}} \cdot \sigma_{\max}^0 \leq f = 310 \text{ MPa} \quad (3)$$

式中 $k_{\sigma_{\max}}$ 为 k_{σ} 的最大值, f 为 Q355B 钢材的强度设计值。

若从网壳结构提升点反力去考虑,应满足式(4):

$$261.98 \times k_{R6\max} \leq 500 \text{ kN} \quad (4)$$

式中 $k_{R6\max}$ 为 6 号提升点的最大反力比。

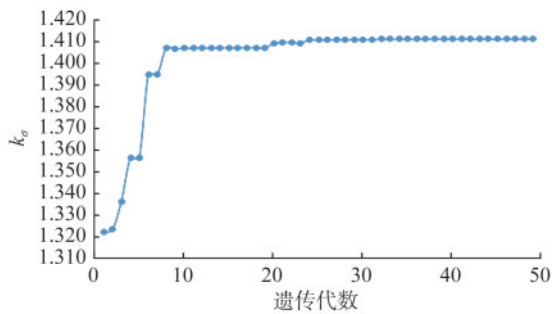
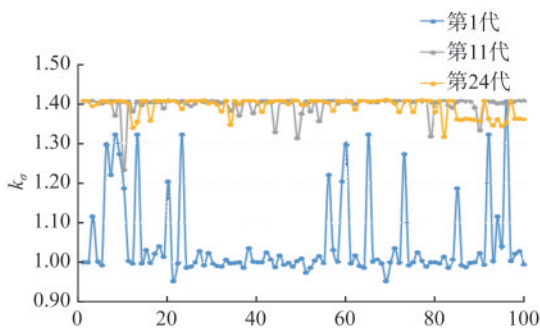
当 $[a]=100 \text{ mm}$ 时,具有 95% 保证率的吊点反

力放大系数为 2.969 8,此时对应的结构最大应力为 294 MPa,仍然小于材料的强度设计值 310 MPa;因此,仅考虑结构施工应力时最大提升不同步幅值 $[a]$ 可以取 100 mm。然而,本项目在提升时,各提升点的千斤顶额定提升重量为 50 t,6 号点反力最大,由表 2 可知,均匀提升时其反力为 261.98 kN;当 $[a]=20 \text{ mm}$,具有 95% 保证率的吊点反力放大系数为 1.626 3,此时反力为 510.0 kN,已经大于额定提升重量。因此,若考虑吊点设备额定提升重量这一因素,最大提升不同步幅值可以取 15 mm。综上可知,本项目的最大提升不同步幅值 $[a]$ 应取 15 mm。

4 基于遗传算法的计算结果分析

在实际工程中,基于蒙特卡洛方法来确定最大不同步幅值所需计算量过于庞大,因此本文探寻了更加高效便捷的计算方法。遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是一种启发式智能算法,其基本原理是仿效生物界中的“物竞天择、适者生存”的演化过程来解决问题^[13-14]。具体操作是将问题建模为一个种群遗传进化的过程,在每代的个体中进行选择、交叉和变异等遗传操作,模拟自然界的遗传过程,使得种群中的个体不断进化,从而找到问题的最优解^[15]。

在采用遗传算法进行运算时,应首先确定合理的种群数量^[16]。本问题中有 10 个独立的随机变量,取种群数量为 100,最大遗传代数 50,交叉率为 0.8,变异率为 0.1,共计计算 4 800 余次迭代过程结束。图 12 给出了 $[a]=10 \text{ mm}$ 时 k_{σ} 的遗传算法优化过程,图 13 则展示了 $[a]=10 \text{ mm}$ 时 50 代中具有代表性的 3 个遗传代数的 k_{σ} 迭代过程。

图 12 $[a]=10$ mm 时 k_{σ} 的遗传算法优化过程Fig.12 Genetic algorithm optimization process of k_{σ} when $[a]=10$ mm图 13 $[a]=10$ mm 时典型子代 k_{σ} 的迭代过程Fig.13 Iteration process of partial descendant of k_{σ} when $[a]=10$ mm

将遗传算法的寻优结果与第 3 节中蒙特卡洛方法的最优结果进行对比, $[a]=10$ mm 时 k_{σ} 蒙特卡洛方法最优解为 1.432, 遗传算法找寻的最优解为 1.411, 差距不大。而且, 遗传算法在 10 代之前就已经计算出了 1.407 的较优结果, 此时的总计算次数不到 1 000 次。因此, 在找寻网壳结构整体提升不同步最大幅值的问题上, 遗传算法的寻优效率高于蒙特卡洛方法。 $[a]=10$ mm 时具有 95% 保证率的 k_{σ} 为 1.263, 因此遗传算法在种群数量为 100 时, 最大遗传代数设置为 10 代即可轻松达到要求, 从而可更快地找出结构的不同步最大幅值。

5 结 论

本文以某高铁站房屋盖的空间网壳结构整体提升施工为例, 对 10 个提升点施加不同最大幅值的数万次蒙特卡洛方法计算, 得出了各吊点不同步幅值及其随机分布对网壳结构最大应力及各点反力变动幅值的影响规律; 之后为加快计算效率, 使用遗传算法对网壳结构整体提升不同步工况下的最大应力进行结果对照, 通过分析得到以下结论:

(1) 设置最大不同步幅值 $[a] \leq 25$ mm 时, 网壳结构的不同步提升工况下的最大应力相较于同步提升时增加了 120%, 6 号提升点的反力增加了 130%, 由 291.68 kN 增加到 529.41 kN, 由此可知不同步提升影响较大, 有必要进行进一步研究。

(2) 结构的最大应力放大系数 k_{σ} 和 6 号吊点的反力放大系数 k_{R6} 均随着不同步幅值 $[a]$ 的增加而增大。 $[a]=25$ mm 时 k_{σ} 和 k_{R6} 的概率密度分布函数通过 χ^2 拟合优度检验分别符合对数正态分布和正态分布。最大应力放大系数受 10 个相互独立的满足正态分布的随机变量影响, 概率密度分布较为复杂。吊点反力放大系数仅受到临近吊点提升幅度的影响, 其分布规律更加接近正态。

(3) 根据对计算结果中不同步最大幅值具有 95% 保证率的结构最大应力放大系数和吊点反力放大系数的综合考虑, 给出本工程中结构的最大不同步幅值限值为 15 mm。

(4) 为加快蒙特卡洛方法对网壳结构整体不同步最大幅值的计算过程, 使用遗传算法对 $[a]=10$ mm 时的 k_{σ} 进行寻优计算, 最终在种群数量为 100, 遗传代数 10 代以内即可找到满足 95% 保证率的 k_{σ} 。遗传算法更适用于结构规模更大、吊点布置更加复杂的整体提升不同步验算, 可有效降低计算量, 提升效率。

根据以上分析结果, 本文为其他空间网格结构整体提升施工确立整体提升不同步限值, 以及各提升点的重要性分析提供了新方法。今后可更加合理地根据实际工程项目精细化布置安装设备和监测设备, 有效地提高工程项目的经济性和安全性。

参 考 文 献

- [1] 郭彦林, 崔晓强. 大跨度复杂钢结构施工过程中的若干技术问题及探讨[J]. 工业建筑, 2004, (12): 1-5, 22.
- GUO Yanlin, CUI Xiaoqiang. Key technical problems and discussion in construction process of larger span steel structures [J]. Industrial Construction, 2004, (12): 1-5, 22. (in Chinese)
- [2] LI Zhiqiang, ZHANG Zhihong, DONG Shilin, et al. Construction sequence simulation of a practical suspen-dome in Jinnan Olympic Center [J]. Advanced Steel Construction, 2012, 8(1): 38-53.
- [3] 王宪刚, 王有志. 风筝造型大跨度双曲面钢网架屋

- 面施工安全性能研究及应用[J].结构工程师,2021,37(5):169-174.
- WANG Xiangang, WANG Youzhi. Research and application on construction safety performance of kite shaped large span hyperbolic steel grid roof [J]. Structural Engineers, 2021, 37 (5) : 169-174. (in Chinese)
- [4] 冯凌斐,李宏武,张星魁,等.高耸结构整体提升施工过程模拟分析[J].建筑结构学报,2023,44(2):284-293.
- FENG Lingfei, LI Hongwu, ZHANG Xingkui, et al. Simulation analysis of construction process of overall lifting of towering structure [J]. Journal of Building Structures, 2023, 44 (2) : 284-293. (in Chinese)
- [5] 雷淑忠,崔节元,刘鑫.大跨度屋面钢桁架提升施工过程分析研究[J].结构工程师,2021,37(3):176-182.
- LEI Shuzhong, CUI Jieyuan, LIU Xin. Analysis and study on the process of lifting construction of a large-span roof steel truss [J]. Structural Engineers, 2021, 37 (3) : 176-182. (in Chinese)
- [6] 陈志华,牛犇,张智升.天津图书馆钢结构关键节点应力监测分析[J].工业建筑,2015,45(2):154-158.
- CHEN Zhihua, NIU Ben, ZHANG Zhisheng. Analysis of stress monitoring results of key joints in steel structure of Tianjin library [J]. Industrial Construction, 2015, 45 (2) : 154-158. (in Chinese)
- [7] 祝瑞麒.重载大跨钢结构多点同步提升施工分析与监控技术研究[D].南京:东南大学,2021.
- ZHU Ruiqi. Research on construction analysis and monitoring technology of multi-point synchronous lifting of heavy load and long span steel structure [D]. Nanjing: Southeast University, 2021. (in Chinese)
- [8] 杨兵.基于整体提升的重型钢桁架施工期结构分析[D].重庆:重庆大学,2015.
- YANG Bing. Analysis of the heavy steel truss structure basing on integral lifting method in construction [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. (in Chinese)
- [9] 张明亮,雷周,曾庆国.液压同步提升技术在大跨度钢桁架施工中的应用[J].建筑施工,2019,41(11):2000-2003.
- ZHANG Mingliang, LEI Zhou, ZENG Qingguo. Application of hydraulic synchronous lifting technology in construction of long-span steel truss [J]. Building Construction, 2019, 41 (11) : 2000-2003. (in Chinese)
- [10] TIAN L, HAO J, WEI J, et al. Integral lifting simulation of long-span spatial steel structures during construction [J]. Automation in Construction, 2016, 70: 156-166.
- [11] ZHAO Z W, ZHU H, LIU H B, et al. Thermal and integral lifting analysis of a lattice shell lighting roof based on genetic algorithm and probabilistic design [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 112: 208-220.
- [12] 重型结构和设备整体提升技术规范:GB 51162—2016[S].北京:中国计划出版社,2016.
- Technical code for integral lifting of heavy structure and equipment: GB 51162—2016 [S]. Beijing: China Planning Press, 2016. (in Chinese)
- [13] 马国丰,张灵祉.基于改进遗传算法的工程施工进度优化[J].土木工程与管理学报,2019,36(5):1-6.
- MA Guofeng, ZHANG Lingzhi. Construction project schedule optimization based on improved genetic algorithm [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2019, 36 (5) : 1-6. (in Chinese)
- [14] 李瑞,李震,杨靖庭,等.基于双向进化遗传算法的管道钢结构支架优化设计[J].结构工程师,2023,39(1):169-175.
- LI Rui, LI Zhen, YANG Jingting, et al. Optimal design of pipeline steel structure support based on bidirectional evolutionary genetic algorithm [J]. Structural Engineers, 2023, 39 (1) : 169-175. (in Chinese)
- [15] AL-TABTABAI H, ALEX A P. Using genetic algorithms to solve optimization problems in construction [J]. Engineering Construction and Architectural Management, 1999, 6(2): 121-132.
- [16] ZHAO Z W, WU J J, LIU H Q, et al. Shape optimization of reticulated shells with constraints on member instabilities [J]. Engineering Optimization, 2019, 51 (9) : 1463-1479.