

大跨度钢结构施工过程的数值模拟与二次开发

胡鹏华¹, 张文津^{2,3*}, 胡晓华², 金华建³, 贾宝莹², 李相辰², 李云²

(1. 浙江大学建筑工程学院, 杭州 310058; 2. 中建八局浙江建设有限公司, 杭州 310000;

3. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 大跨度钢结构空间造型丰富, 施工阶段结构的传力路径与最不利受力位置动态变化。为解决施工过程结构分析与安全复核时建模计算流程繁琐的问题, 基于 AutoCAD 与 ANSYS 软件开发了大跨度钢结构一键式建模、计算与结果读取的插件。该插件采用 C# 语言调用 AutoCAD .NET 框架, 读取并输出大跨度钢结构图纸文件中的模型信息, 自动生成结构有限元建模、计算与结果读取的 APDL 命令流, 可用于大跨度钢结构施工过程的数值模拟与安全评估。以某单层球面网壳结构为例验证了所开发的大跨度钢结构建模分析插件的有效性, 使用该插件快速建立了有限元分析模型, 并复核了结构在施工阶段的内力和变形。研究表明, 单层球面网壳结构在施工全过程中满足强度和稳定性要求, 内力和变形在安全范围内且满足设计要求。该插件能够高效、准确地将大跨度钢结构信息由 CAD 软件传递至 CAE 软件, 完成施工过程的数值模拟与安全评估。

关键词: 大跨度钢结构; 施工模拟; 生死单元; 二次开发; 有限元模型

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)01-0106-08

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20230804001

Construction Simulation and Plugin Development of Long-Span Steel Structures

HU Penghua¹, ZHANG Wenjin^{2,3*}, HU Xiaohua², JIN Huajian³,

JIA Baoying², LI Xiangchen², LI Yun²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. Zhejiang Construction Co. Ltd. of China Construction Eighth Engineering Division, Hangzhou 310000, China;

3. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

*Corresponding author: 1150744@tongji.edu.cn

Abstract: In the realm of long-span steel structures, there exists a diverse array of spatial configurations, and during the construction phase, the load transmission pathways and locations of maximum stress dynamically evolve. To address the intricacies of structural analysis and safety verification during the construction process, an AutoCAD and ANSYS-based plugin for one-click modeling, computation, and results retrieval of large-span steel structures has been developed. This plugin, utilizing the C# programming language to invoke the AutoCAD .NET framework, reads and extracts model information from drawings of long-span steel structures, and autonomously generates APDL command scripts for finite element modeling, computation, and results extraction. This tool is designed for numerical

收稿日期: 2023-08-04

基金项目: 上海市 2024 年度“科技创新行动计划”启明星项目(24QB2707500)

作者简介:

胡鹏华(1999—), 男, 博士研究生, 主要从事结构工程、空间结构抗风性能评估方面的研究。E-mail: hu_ph@zju.edu.cn。

通信作者:

张文津(1993—), 男, 博士, 工程师, 主要从事建筑钢结构抗震、结构工程数值模拟等方面的研究。

E-mail: 1150744@tongji.edu.cn。

simulation and safety assessment of long-span steel structures during the construction phase. To validate the effectiveness of the developed plugin for long-span steel structure modeling and analysis, a specific single-layer spherical grid shell structure was employed. Using this plugin, a finite element analysis model was rapidly established, and the internal forces and deformations of the structure during the construction phase were verified. The research findings indicate that the single-layer spherical grid shell structure meets the requirements for strength and stability throughout the entire construction process, with internal forces and deformations well-controlled within safe limits and meeting design specifications. The plugin facilitates the efficient and accurate transfer of information from CAD software to CAE software for numerical simulation and safety assessment during the construction process of long-span steel structures.

Keywords: long-span steel structure; construction simulation; birth-death element; secondary development; finite element model

大跨度钢结构具有内部空间宽敞、造型丰富及空间布置灵活等优点,因此被广泛应用于体育场馆、高铁站房、机场航站楼、大剧院、会展中心等大型公共建筑中^[1-4],在城市经济发展的蓝图中^[5]发挥重要作用。由于大跨度钢结构通常具有较大的覆盖面积且大多采用曲面造型,在设计与建造的过程中必须借助有限元软件开展全过程数值模拟^[6-7]。为保证计算结果能够准确地反映结构的力学性能,应将大跨度钢结构的材料、截面、施工阶段分组等信息真实映射到结构有限元模型中,前期处理的工作量巨大。此外,不同CAD、CAE软件具有各自的优点和适用场景,实际设计建造过程中往往需要采用多种软件,共同完成大跨度钢结构的数值模拟与计算分析。实现模型信息在不同软件之间精准、高效地传递对于降低计算成本、提高建造效率、保障数据精度具有重要意义。

AutoCAD是一款在工程领域使用最广泛的计算机辅助设计软件,具有强大的图形编辑和二次开发功能^[8]。基于AutoCAD软件二次开发能够有效提取图纸信息,简化建模流程。邓凯^[9]采用VBA语言开发板材数控文件插件,实现了在AutoCAD软件中直接批量读取异形带孔板材零件号、材质、厚度、零件数量等信息,加快了文件下发速度;徐贤德^[10]基于C++语言和ObjectARX封装类开发软件包进行AutoCAD软件二次开发,满足了铁路桥墩设计绘图中实体填充要求,研发的桥梁桥墩设计参数化系统显著提高了出图效率。在大跨度钢结构施工过程的数值分析中^[11],可以基于AutoCAD线图文件和其他格式信息文件,将模型转换到有限元软件中进行进一步分析。如果通过人工手动操作实现这一过程,不仅工作量巨大而且难以保障精准程度^[12]。

为实现大跨度钢结构有限元模型的快速建模与计算分析,基于CAD信息提取与CAE一体化生成的思路,采用AutoCAD.NET框架二次开发技术,本文编写了大跨空间钢结构参数化建模插件。该插件能自动读取大跨度钢结构的构件信息,通过AutoCAD线图一键式生成ANSYS有限元模型。该插件可快速建立大跨度钢结构

有限元分析模型,同步开展施工过程的数值模拟。以某大跨度单层网壳结构为例,使用该插件建立了ANSYS分析模型,采用生死单元法对不同施工阶段结构的力学性能展开分析,评估该网壳结构的施工安全性。

1 大跨度钢结构建模插件

1.1 建模程序框架

1.1.1 开发平台

基于AutoCAD软件二次开发可实现工程图纸的快速生成、参数化设计、数据交互和统计分析等功能,提高设计效率和工程管理效率。目前,AutoCAD软件二次开发的方式主要有ADS、AutoLISP、ObjectARX、VBA及AutoCAD.NET等。其中,AutoLISP和VBA两种开发方式的难度低,但对AutoCAD软件的开发能力远不及ADS、ObjectARX和AutoCAD.NET的开发能力^[13],无法实现高级API访问、底层事件处理和完善的异常处理^[14]。

为高效提取模型信息,选用AutoCAD.NET框架和C#语言进行二次开发,利用.NET框架的面向对象特性、易于维护和升级等优势,结合.NET Framework中功能强大的库与接口,可满足预期功能。

1.1.2 插件功能

本插件可以实现以下功能:

(1) 精细提取CAD信息,构建数字化结构信息框架。自动识别AutoCAD图层名称,从结构线图中提取结构节点坐标、节点编号、构件节点的拓扑关系、施工步骤划分方式、材料参数和构件截面参数等信息,为下一步建模、计算、分析提供数据基础。

(2) 部分结构信息参数化,满足多工况计算分析和结构设计优化的需求。自动设置节点编号、构件编号、施工步骤构件分组编号、单元类型编号、材料编号和截面编号等,将荷载组合系数、单元划分段数及单元类型编号参数化,便于展开不同工况下结构的参数化计算。

(3) 计算结果的自动输出。直接读取并输出结构在不同施工步骤状态下内力和变形的对应数据。

1.1.3 系统设计

本插件的统一建模语言类图和设计思路如图1~2所示。根据C#程序系统设计遵循的通用原则,将程序按照功能分割成不同功能部分以实现代码复用,有助于提高程序的可维护性和增强系统扩展性。因此根据设计思路将程序分为结构信息提取和建模命令生成两大模块,并分别为两大模块编写方法,同时采用变量LayerTable、LineTable、PointTable和TotalTable分别存储图层、构件、节点和总体4个层次的结构模型信息以便于后续读取。调用钢结构建模插件,可在AutoCAD软件中增加2条功能命令:通过“get2excel”命令提取结构信息并存入Excel文件中,通过“ansysmodel”命令基于提取的建模信息生成ANSYS APDL建模命令存入建模文件。

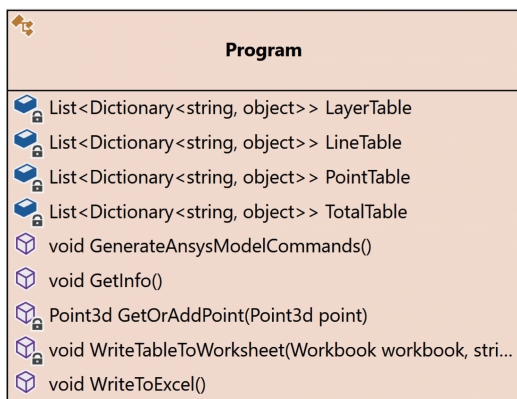


图1 统一建模语言类

Fig. 1 Unified modeling language class

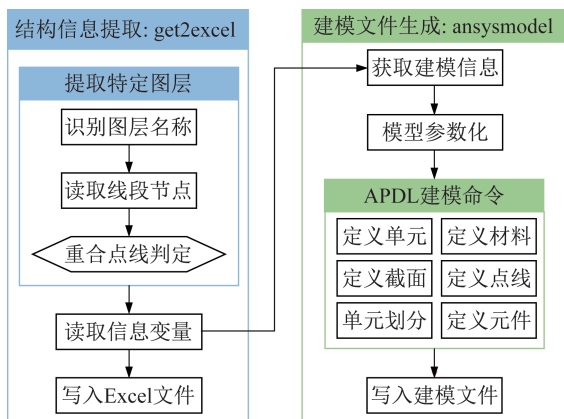


图2 程序系统设计思路

Fig. 2 Program system design approach

1.2 结构信息提取

1.2.1 图层命名规则

为使程序高效、精准地读取AutoCAD软件中的结构信息,定义AutoCAD线图文件中的图层命名规则,以

储存构件单元类型、施工步骤划分、材料属性、截面类型及对应尺寸等信息。图层命名格式如下: E Num S Num Mc/Ms Num H/R/P/C/T/FC/FR Num×Num×Num×Num,其中Num代表具体数值,H/R/P/C/T/FC/FR后参数个数根据截面选择。图层命名规则中各参数含义介绍如下:

(1) 单元类型编号为“E Num”。E为有限元模型中的单元类型,Num为ANSYS模型中的单元类型编号。如“E2”表示该图层所对应的线段在ANSYS模型中采用编号为2的单元类型进行模拟。

(2) 施工步骤划分编号为“S Num”。S为按照不同施工步骤划分的有限元模型构件分组,Num为ANSYS模型中的构件分组编号。如“S2”表示该图层所对应的线段在有限元模型中被划入编号为2的单元分组。

(3) 材料属性编号为“Mc/Ms Num”。Mc/Ms为有限元模型中材料类型:Mc表示混凝土,对应Num数值表示混凝土牌号;Ms表示钢材,对应Num数值表示钢材屈服强度,单位为MPa。如Ms345表示屈服强度为345 MPa的钢材,Mc30表示C30混凝土。

(4) 截面类型及对应尺寸为“H/R/P/C/T/FC/FR Num×Num×Num×Num”。“H/R/P/C/T/FC/FR”表示不同截面形状,其后各Num数值顺次指代截面详细尺寸,具体对应关系如表1所示。

以图层“E2S1Ms345H340×250×9×14”为例,该编号表示图层构件在ANSYS有限元模型中采用2号单元类型,划分入编号为1的施工步骤分组,采用屈服强度为345 MPa的钢材,构件截面为H型钢,其截面高度 h 为340 mm,翼缘宽度 $b=250$ mm,腹板厚度 $t_w=9$ mm,翼缘厚度 $t_f=14$ mm。

本插件未要求在图层名称中设置节点刚接、铰接或半刚接等连接信息,故节点自由度依赖于设定单元类型编号对应的单元类型。对于大跨度钢结构中少数特殊连接节点可通过修改输出命令流文本后设置。

1.2.2 结构信息重构

基于给定的图层命名规则,将单元信息、阶段信息、材料信息和截面信息等输入大跨度钢结构的线模文件,结构模型信息由图层名和几何对象两种形式存储。考虑到图纸质量问题和建立结构有限元分析模型的流程,有必要对图纸的几何信息进行审查,并从节点、构件、图层等多个层次重构结构信息。

增加节点和线段重合判定的功能模块,保证程序在导出模型信息过程中的冗余度与可靠性,如图3所示。其中,重合节点判定模块通过设定阈值 d_0 ,若新节点 i 与已有节点 j 的距离小于此阈值则判定为同一点;重复线段判定模块中设置线段两节点编号对为 $\langle ij \rangle$,若新线段

表1 截面属性设置
Table 1 Section property settings

代号	截面类型	Num 参数含义	截面形状
H	工字形截面	$h \times b \times t_w \times t_f$	
R	空心矩形截面	$h \times b \times t_w \times t_f$	
P	圆管截面	$D \times t$	
C	槽形截面	$h \times b \times t_w \times t_f$	
T	T形截面	$h \times b \times t_w \times t_f$	
FC	实心圆截面	D	
FR	实心矩形截面	$h \times b$	

两节点编号与已有线段两节点编号一致则判定为重复线段。

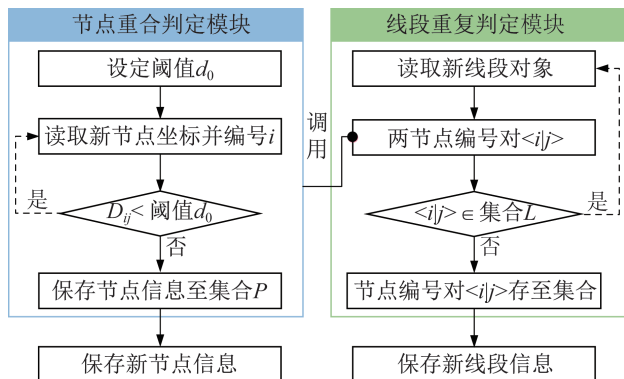


图3 节点和线段重合判定

Fig. 3 Judgement of joint and line segment overlap

分别依据结构总体信息、节点信息、构件信息和图层信息从CAD文件的几何对象中读取数据,并按照图层命名规则读取单元信息、元件信息、材料信息和截面信息,存储于Excel文件的不同表格,如图4所示。

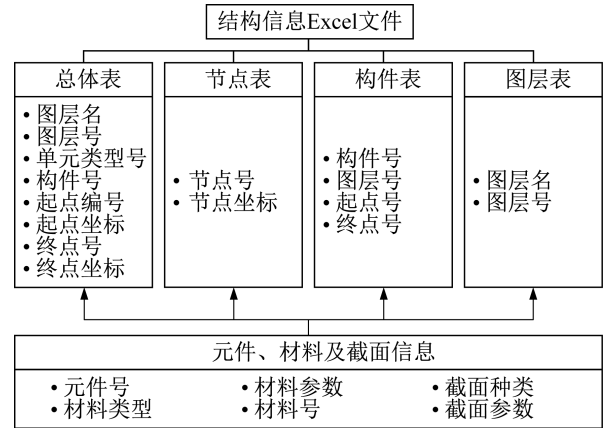


图4 结构信息 Excel文件组成

Fig. 4 Composition of structural information Excel file

1.3 建模文件生成

1.3.1 结构模型参数化

ANSYS软件提供的参数化设计语言APDL可用于结构有限元模型的自动计算和批量分析。将AutoCAD二次开发技术与ANSYS APDL建模方法结合,从结构图纸文件中提取建模信息,按照图层对应关系建立有限元分析模型,设定存储模型信息的数组和变量,自动实现大跨度钢结构模型的参数化计算、分析与结果输出。整个过程自动化、参数化,显著提高了大跨度钢结构施工过程数值模拟的效率。

1.3.2 建模命令流生成

实现大跨度钢结构APDL建模包括以下步骤:

- (1) 确定结构形状和构件属性的主要参数,作为建模的基本输入信息。
- (2) 依据选定参数,构建相应模型信息的数组和变量,部分结构信息实现参数化。
- (3) 基于模型信息数组和变量,生成ANSYS模型的参数化建模语言文本,实现线段定义、材料和截面属性赋予、划分单元、施工步骤分组等相应操作。
- (4) 根据结构施工步骤的分组信息,采用生死单元的方法,生成APDL计算分析和结果输出的命令流。

APDL命令流的生成流程如图5所示。在后续加载与结构分析等操作中,此过程生成的模型均可通过调整参数进行快速迭代修改。整个生成流程保证了建模准确性和设计灵活性,提升了大跨度钢结构模型分析的效率。

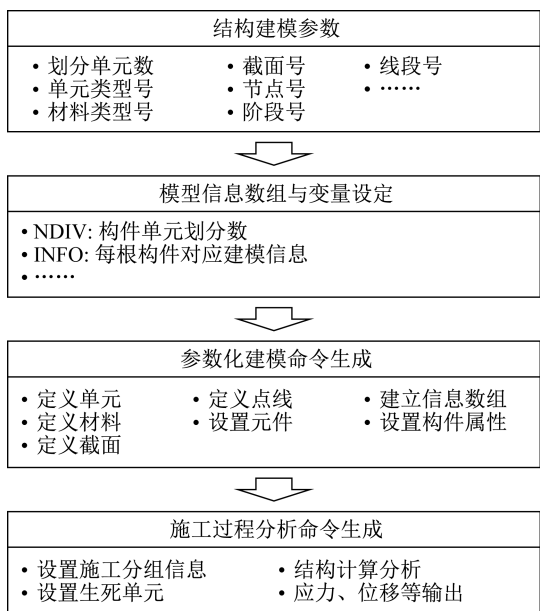


图5 结构参数化建模流程

Fig. 5 Structural parametric modeling process

2 案例验证

2.1 工程概况

以某单层球面网壳结构为例。该结构纵向跨度为83.0 m, 横向跨度为52.1 m, 高度为16.3 m, 建筑面积约为3 243 m²。该单层网壳如图6所示, 采用凯威特-联方型网格, 内14环为三向网格型球面网壳(凯威特K6型), 外2环为联方型网格。

为保障结构的施工安全和安装精度, 需要开展结构施工过程分析以验算施工工况的安全性。该单层球面网壳分为12个安装片, 结构施工吊装分区如图7所示。

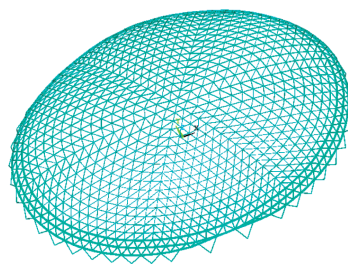


图6 结构示意图

Fig. 6 Configuration of whole structure

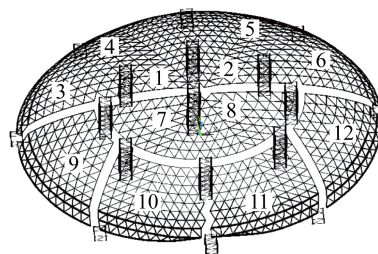


图7 结构吊装分区

Fig. 7 Structural hoisting zone

按照由内向外安装的顺序, 该单层球面网壳结构按照14个步骤进行施工, 各工况说明如表2所示, 各施工步骤如图8所示。

2.2 施工过程数值模拟

使用本插件自动建立ANSYS计算模型, 自动定义14个施工步骤。材料本构为理想弹塑性模型; 采用BEAM189单元模拟构件, 考虑剪切变形的影响; 每根构件均划分为5段, 能够准确地描述构件的变形与内力; 底部V形支撑与地面均采用铰接。

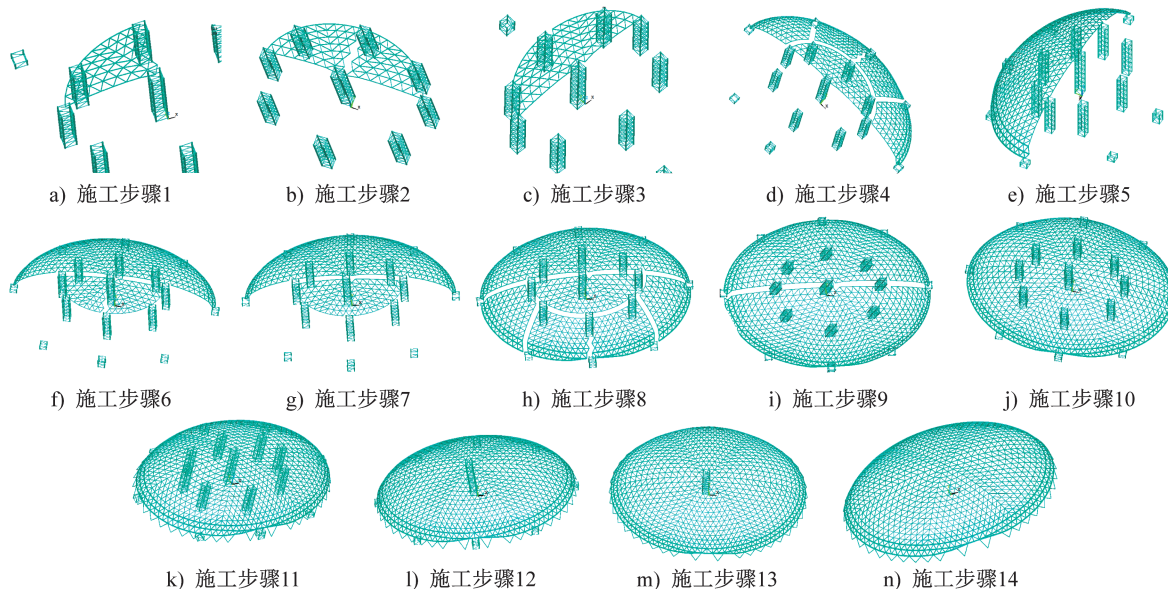


图8 施工全过程结构示意图

Fig. 8 Diagram of whole construction process

表2 施工步骤

Table 2 Construction stages

编号	施工步骤及分析工况的说明
1	吊装片1(落位后的变形内力及稳定性验算)
2	吊装片2(落位后的变形内力及稳定性验算)
3	焊接片1~2间的嵌补件,进行整体工况验算
4	依次分别吊装片3~6,进行整体工况验算
5	焊接片1~6之间嵌补件,对北侧结构进行整体工况验算
6	依次分别吊装片7~8,进行整体工况验算
7	焊接片7~8间的嵌补件,进行整体工况验算
8	依次分别吊装片9~12,进行整体工况验算
9	焊接片7~12间嵌补件,对南侧结构进行整体工况验算
10	焊接南北结构之间的嵌补件,进行整体工况验算
11	V形柱安装就位后的验算
12	卸载第1步:卸载外围一圈8个胎架
13	卸载第2步:卸载内侧一圈8个胎架
14	卸载第3步:卸载中央胎架

2.3 施工过程分析

根据施工方案,采用生死单元法对此单层球面网壳的14个施工工况开展数值模拟,结构最大轴力与最大应力的结果如表3所示。由计算结果可知:

表3 施工过程结构最大轴力与应力

Table 3 Maximum axial force and stress of structure during construction process

施工步骤编号	最大轴力/kN	最大应力/MPa
1	74.7	131.0
2	66.9	114.0
3	71.2	113.0
4	116.1	110.0
5	200.4	93.8
6	218.8	159.0
7	218.1	153.0
8	234.0	152.0
9	253.0	107.0
10	219.8	87.9
11	62.7	23.3
12	75.7	23.9
13	104.0	25.9
14	104.8	26.0

(1) 结构最大轴力集中于结构环向构件,各阶段最大应力均小于构件设计强度,满足主体结构强度要求。

(2) 胎架构件最大轴力不超过100 kN,小于胎架构件稳定承载力,满足胎架稳定性承载力要求。

(3) 结构在施工步骤6、7、8的过程中应力最大,应力集中于胎架支承位置的个别杆件,施工时应当予以关注。

(4) 完成卸载后,构件应力比小于0.1,结构内力水平相对较低。

不同施工步骤中结构竖向位移结果如表4所示。结构最大位移出现在网壳最外16环节点(施工步骤10)以及靠近第3/4环的节点(其余施工步骤)。单层球面网壳在施工全过程中的最大位移为0.11 m,挠跨比为1/718,小于《空间网格结构技术规程》(JGJ 7—2010)^[16]规定的挠跨比限值1/400,符合规范要求。

表4 施工过程结构最大竖向位移及位置

Table 4 Maximum vertical displacement and position of structure during construction process

施工步骤编号	最大竖向位移/m	最大竖向位移位置
1	0.042	1号安装片第4环节点
2	0.034	2号安装片第4环节点
3	0.034	1号安装片第4环节点
4	0.035	1号安装片第4环节点
5	0.025	1号安装片第4环节点
6	0.056	8号安装片第4环节点
7	0.053	8号安装片第4环节点
8	0.045	8号安装片第2环节点
9	0.022	8号安装片第4环节点
10	0.110	11号安装片第16环节点
11	0.019	7号安装片第4环节点
12	0.037	8号安装片第4环节点
13	0.045	8号安装片第4环节点
14	0.110	7号安装片第3环节点

3 结论

基于CAD和CAE软件的优势,开发了大跨度钢结构模型转化与参数化分析、计算、出图的插件,对某大跨度单层球面网壳结构的施工全过程开展数值模拟,评估其施工过程的安全性。主要结论如下:

(1) 基于.NET框架进行AutoCAD二次开发的大跨度钢结构建模计算插件,能够快速、准确地提取大跨度钢结构的模型信息,并将其转换为有限元分析模型的建模数据。

(2) 该插件能够将大跨度钢结构的图纸信息(线图)转换为 ANSYS 有限元分析模型,同时完成施工过程的计算分析与结果读取。通过使用该插件对某大跨度球面网壳结构的施工过程进行数值模拟,验证了插件功能的有效性 with 操作的高效便捷性。

(3) 单层球面网壳结构施工全过程的内力和变形符合安全性要求。施工安装片 7~12 时,胎架支承位置个别杆件的应力相对较大,应特别关注。卸载完成后,完整结构的构件应力比小于 0.1,挠跨比小于规范限值 1/400,均满足设计要求。

参考文献:

- [1] 张爱林,方浩,刘学春,等.北京大兴国际机场航站楼大跨度钢结构 C5 区地震响应分析[J].建筑钢结构进展,2021,23(1):25-30.DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.01.004.
ZHANG Ailin, FANG Hao, LIU Xuechun, et al. Seismic responses analysis of long-span steel structure in C5 district of Beijing Daxing international airport [J]. Progress in Steel Building Structures, 2021, 23 (1) : 25-30. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.01.004. (in Chinese)
- [2] 周劭,樊健生,刘宇飞,等.北京大兴国际机场航站楼核心区钢网格结构日照非均匀温度场研究[J].工程力学,2020,37(5):46-54,73. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.07.0374.
ZHOU Meng, FAN Jiansheng, LIU Yufei, et al. Analysis on non-uniform temperature field of steel grids of Beijing Daxing International Airport terminal building core area considering solar radiation [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37 (5) : 46-54, 73. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2019.07.0374. (in Chinese)
- [3] 杜咏,李国强.大跨度建筑钢结构抗火性能研究进展与趋势[J].建筑钢结构进展,2022,24(1):53-66. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.01.006.
DU Yong, LI Guoqiang. Development and tendency of the fire resistance of large-span steel buildings [J]. Progress in Steel Building Structures, 2022, 24 (1) : 53-66. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.01.006. (in Chinese)
- [4] 周进兵,周安全,徐余凌,等.珠海国际会展中心二期屋面大跨度钢箱梁承载性能足尺试验研究[J].建筑钢结构进展,2021,23(12):94-100. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.12.010.
ZHOU Jinbing, ZHOU Anquan, XU Yuling, et al. Full-scale experimental study on the load bearing capacity of a large-span steel box girder in the roof of Zhuhai International Convention and Exhibition Center [J]. Progress in Steel Building Structures, 2021, 23(12) : 94-100. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.12.010. (in Chinese)
- [5] 李国强,王卫永.钢结构抗火安全研究现状与发展趋势[J].土木工程学报,2017,50(12):1-8. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2017.12.001.
LI Guoqiang, WANG Weiyong. State-of-the-art and development trend of fire safety research on steel structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50 (12) : 1-8. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2017.12.001. (in Chinese)
- [6] 蒯蓓蕾,赵文达,曾旭,等.混合结构斜拉索分级张拉施工过程模拟[J].建筑结构,2022,52(增刊1):2984-2988. DOI: 10.19701/j.jzjg.22S1180.
KUI Beilei, ZHAO Wenda, ZENG Xu, et al. Simulation of the construction process of the hybrid structure cable tension by stages [J]. Building Structure, 2022, 52 (Suppl. 1) : 2984-2988. DOI: 10.19701/j.jzjg.22S1180. (in Chinese)
- [7] 丁洁民,姜子钦,何志军.张弦桁架壳体结构施工过程分析[J].建筑结构学报,2022,43(增刊1):1-9. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2022.S1.0001.
DING Jiemin, JIANG Ziqin, HE Zhijun. Analysis on construction process of pre-stressed truss shell structure [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43 (Suppl.1) : 1-9. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.S1.0001. (in Chinese)
- [8] WU J, FRANGOPOL D M, SOLIMAN M. Geometry control simulation for long-span steel cable-stayed bridges based on geometrically nonlinear analysis [J]. Engineering Structures, 2015, 90: 71-82. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.02.007.
- [9] 邓凯.基于 AutoCAD VBA 开发板材 DSTV NC 文件插件研究[J].中国造船,2019,60(4):295-299. DOI:10.3969/j.issn.1000-4882.2019.04.035.
DENG Kai. Development of DSTV NC file plug-in based on AutoCAD VBA [J]. Shipbuilding of China, 2019, 60(4) : 295-299. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4882.2019.04.035. (in Chinese)
- [10] 徐贤德. Auto CAD 二次开发在铁路桥墩设计中的应用[J].铁道工程学报,2014,31(2):56-60. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2106.2014.02.013.
XU Xiande. Application of auto CAD secondary development in railway bridge pier design [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 31 (2) : 56-60. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2106.2014.02.013. (in Chinese)
- [11] 邢正宁,方杉,张广敏.大跨度钢结构复杂曲面屋盖设计案例[J].建筑结构,2023,53(增刊1):379-382. DOI:10.19701/j.jzjg.23S1110.
XING Zhengning, FANG Shan, ZHANG Guangmin. Design case of complex curved roof of large span steel structure [J]. Building Structure, 2023, 53 (Suppl. 1) : 379-382. DOI: 10.19701/j.jzjg.23S1110. (in Chinese)
- [12] 郭小农,COBLENC Thomas,朱劭骏,等.基于多平台的铝合

- 金板式节点网壳设计系统[J]. 建筑钢结构进展, 2019, 21(6): 80-88. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2019.06.010.
- GUO Xiaonong, COBLENCÉ Thomas, ZHU Shaojun, et al. Development of a design system of shells with aluminum alloy gusset joints based on multi-platforms [J]. Progress in Steel Building Structures, 2019, 21(6): 80-88. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2019.06.010. (in Chinese)
- [13] 刘会波, 陈俊涛, 肖明. 基于CAD地形图的初始地应力场反演快速建模程序开发[J]. 岩土力学, 2008, 29(增刊1): 297-302. DOI: 10.16285/j.rsm.2008.s1.139.
- LIU Huibo, CHEN Juntao, XIAO Ming. Program development of rapid modeling for initial stress field back calculation based on CAD relief Map [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29 (Suppl. 1): 297-302. DOI: 10.16285/j.rsm.2008.s1.139. (in Chinese)
- [14] 王永辉, 胡青泥, 李红彩. AutoCAD二次开发方法的研究[J]. 计算机系统应用, 2007, 16(3): 94-96, 100. DOI: 10.3969/j.issn.1003-3254.2007.03.024.
- WANG Yonghui, HU Qingni, LI Hongcai. Research on the methods of AutoCAD secondary development [J]. Computer Systems & Applications, 2007, 16(3): 94-96, 100. DOI: 10.3969/j.issn.1003-3254.2007.03.024. (in Chinese)
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 空间网格结构技术规程: JGJ 7—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Specification for Space Frame Structures: JGJ 7—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)