

塔式起重机刚柔耦合多体系统建模与降阶方法^{*}

於祖庆^{1,2} 顾子健¹ 兰朋^{2,3} 田青龙^{1†}

(1. 河海大学 机电工程学院, 常州 213200)

(2. 西安建筑科技大学 西部绿色建筑国家重点实验室, 西安 710055)

(3. 西安建筑科技大学 机电工程学院, 西安 710055)

摘要 为建立准确的塔式起重机多体系统动力学模型, 采用绝对节点坐标缆索单元描述起升机构钢丝绳大变形、大位移动力学行为. 针对绝对节点坐标法质量阵定常而切线刚度阵时变的特点, 将钢丝绳的运动过程划分为若干子区间, 在每个子区间内部对动力学方程采用基于一阶泰勒展开的线性化处理, 从而使得基于模态截断的降阶方法得以应用. 通过运动学约束将塔机钢结构振动方程与钢丝绳大变形动力学方程整合得到整机系统多体动力学方程. 给出了约束方程的线性化处理以及主坐标描述的系统动力学方程格式. 数值算例结果表明本文提出的塔机多体系统动力学建模与降阶方法可以在保证精度的条件下有效地降低系统规模, 提高仿真分析效率.

关键词 塔式起重机, 钢丝绳, 绝对节点坐标法, 模型降阶, 多体系统动力学

中图分类号: O313.7

文献标志码: A

Multibody System Dynamic Modeling and Order Reduction of Tower Crane^{*}

Yu Zuqing^{1,2} Gu Zijian¹ Lan Peng^{2,3} Tian Qinglong^{1†}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213200, China)

(2. State Key Laboratory of Green Building in Western China, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

(3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract In order to build the multibody system dynamic model of the tower crane, the absolute nodal coordinate formulation cable element is used to model the steel wire rope in the hoisting system. As a characteristic of the absolute nodal coordinate formulation, the mass matrix is constant while the tangential stiffness matrix is varying. The whole process of the rope motion is divided into several subdomains. The first order Tylor expansion is applied on the dynamic equation of the rope within each subdomain. Therefore, the order reduction based on modal truncation can be performed. The kinetic constraint is used to integrate the structural vibration equation and the large-deformation equation of the steel wire rope to form the multibody system dynamic equation of the entire tower crane system. The local linearization formulation of the constraint equation is also given. Numerical results demonstrate that the multibody system dynamic modeling and order reduction method proposed in this investigation can effectively reduce the size of the problem and improve the simulation efficiency without losing accuracy.

2023-12-26 收到第 1 稿, 2024-02-25 收到修改稿.

^{*} 国家自然科学基金资助项目(12272123, 12302047), 西部绿色建筑国家重点实验室开放研究基金(LSKF202327)和西部绿色建筑国家重点实验室自主研究课题(LSZZ202209), National Natural Science Foundation of China (12272123, 12302047), Open Research Fund of the State Key Laboratory of Western Green Building (LSKF202327), Independent Research Project of the State Key Laboratory of Western Green Building (LSZZ202209).

[†] 通信作者 E-mail: Tian-ql@hhu.edu.cn

Key words tower crane, steel wire rope, absolute nodal coordinate formulation, model order reduction, multibody system dynamics

引言

塔式起重机(简称塔机)作为建筑行业必不可少的一种起重运输设备,具有作业效率高、作业空间大等诸多其他形式的起重机所不具备的优点,得到了广泛的应用.随着当前建筑工地智能化、无人化的发展趋势,对塔机的轨迹规划、精确就位和摆动控制提出了更高的要求.而目前塔机的控制通常采用较为简单的动力学模型,忽略结构变形并将钢丝绳简化为单摆或双摆.在很多特殊工况和特殊需求下,这种简化将造成较大的计算和控制误差^[1-3].此外,基于动态响应的塔机健康监测以及运行状态参数在线识别^[4]等应用场景均对塔机的动力学精确建模分析的重要性日渐凸显.

塔机本体结构主要包含发生大范围刚体位移和小变形的塔身和吊臂,以及大柔度的起升钢丝绳,多体系统动力学建模较为复杂.兰朋和陆念力以由塔机和皮带输送机组成的塔带机为研究对象,建立了一种基于随动坐标法的输送臂大位移小变形动力学分析模型,并针对转向工况开展了动态特性研究^[5].王蔚佳等将传递矩阵法和柔度法相结合,通过子结构划分建立了塔机动力学分析模型.该模型成功应用于远距离附着塔机的附着装置刚度系数的在线识别^[6].大连理工大学的王欣等建立了一种考虑钢丝绳柔性的塔机仿真系统.该系统采用悬链线方程描述钢丝绳构型和摆动仿真,能够较好地描述塔机整体运动以及碰撞检测^[7].王刚等基于共旋坐标法,对含机构位移起重机主副臂组合臂架结构的几何非线性进行了分析^[8].Rauscher等基于分布质量模型提出了塔机柔性吊臂建模与模态降阶方法^[9].此外,Rauscher等还提出了一种面向塔机在线控制的低自由度多体动力学模型^[10].杨悦等将塔机吊臂等效为欧拉-伯努利梁并考虑自重和结构阻尼,基于拉格朗日方程建立了塔机的刚柔耦合动力学模型.结果表明,该模型可以较为准确地反应塔机的运动过程,并能够近似地描述载荷运动响应^[11].张安琪等建立了起重机-码头三维有限元模型.结合起重机固有振动特性,对有/无起重机的高桩码头动力响应进行对比分析,研究了

地震作用下起重机对码头结构响应的影响^[12].张欣刚等建立了环行起重机刚柔耦合动力学模型,分析了强震作用下部件的跳轨行为以及 stick-slip 现象,揭示了粘滑效应对体系抗震性能的影响^[13].赵阳等提出了面向梁式实体结构的多点凝聚法降阶方法,该方法可以大幅提升计算效率且相对误差不超过 8%^[14].

现有的塔机动力学建模研究主要关注起重机金属结构,很少考虑钢丝绳在工作时会发生的大位移、大变形动力学行为.而含有大柔度绳索的机械系统动力学建模与分析一直是难点问题.刘延柱提出了一种基于高斯原理的杆网系统动力学建模方法^[15].高一鸣等人针对海上横向补给系统中恒张力高架索提出了一系列的动力学建模与仿真分析方法^[16].大连理工大学徐金帅等人提出了一种面向全地面起重机超起结构拉绳静力学计算的空间悬索几何非线性计算方法^[17].而考虑动态效应时,如果钢丝绳的摆动与塔机金属结构振动耦合,则会带来难以预料的后果.以传统有限元为理论基础的结构振动与浮动坐标法均无法准确描述其动力学特性.与传统有限元方法不同,绝对节点坐标法(Absolute Nodal Coordinate Formulation, ANCF)采用节点在绝对坐标系下定义的位置与梯度向量作为其节点坐标,可以导出全量平衡方程.其中系统质量阵定常且不含科氏力与离心加速度项.基于欧拉-伯努利梁理论的空间 ANCF 缆索单元最早由 Sugiyama 等^[18]提出,随即被广泛应用于多种工程问题的动力学分析,如高速铁路输电线-受电弓接触及找形分析^[19],绳索缠绕接触^[20],高压线缆架设事故分析^[21],钢丝绳-滑轮系统^[22]等、空间绳网捕获系统^[23]等.蔡正政等基于绝对节点坐标方法,研究了驱动扭杆参数、阻力扭簧参数,以及不同飞行姿态对折叠翼展开过程动响应与展开锁定后冲击响应的影响^[24].相较于传统有限元已经有比较成熟的基于模态的降阶方法,ANCF 因其弹性力为当前构型的非线性函数导致切线刚度阵时变,无法直接求取模态.为此,学者们也展开了一系列的研究工作. Tang 等对 ANCF 动力学方程采用了连续分段线性化处理并结合固定界面模态综合法对结构进行降阶

处理^[25]. Tian 等人则将自由界面模态综合法引入 ANCF 的模态降阶并得到了成功的应用^[26]. 在求解方法方面, 张笑笑等采用萤火虫算法求解多体系统微分一代数方程, 该方法精度高、算法设计简单, 可以较好地保证能量精度^[27]. 任辉等详细介绍广义 α 族积分器和 BDF 族积分器的算法细节, 指出各种算法的优缺点以及可能的改进方向^[28].

本文拟建立一种考虑大柔度钢丝绳与结构耦合效应的塔机多体动力学模型. 通过运动学约束实现塔机结构与钢丝绳的连接, 引入系统动力学方程线性化方法使其适用于基于模态截断的降阶策略. 最终得到一种高效、准确的塔机动力学分析模型.

1 钢丝绳建模与降阶

1.1 运动学描述

本研究采用基于欧拉-伯努利梁的 ANCF 缆索单元对钢丝绳建模. 单元采用首尾节点处的全局位置向量及沿轴向的梯度向量为节点坐标, 总自由度为 12. 单元中心轴线上任意点的全局坐标为 $\mathbf{r} = \mathbf{S}\mathbf{e}$. 其中, \mathbf{e} 为单元节点坐标向量, \mathbf{S} 为形函数矩阵:

$$\mathbf{S} = [\mathbf{S}_1 \mathbf{I}_{3 \times 3}, \mathbf{S}_2 \mathbf{I}_{3 \times 3}, \mathbf{S}_3 \mathbf{I}_{3 \times 3}, \mathbf{S}_4 \mathbf{I}_{3 \times 3}] \quad (1)$$

其分量表达式为:

$$\begin{cases} \mathbf{S}_1 = 1 - 3\xi^2 + 2\xi^3 & \mathbf{S}_2 = l(\xi - 2\xi^2 + \xi^3) \\ \mathbf{S}_3 = 3\xi^2 + 2\xi^3 & \mathbf{S}_4 = l(-\xi^2 + \xi^3) \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\xi = x/l$ 为表征单元内任意点的无量纲物质点坐标, l 为单元初始构型长度. 单元质量阵为:

$$\mathbf{M}^e = \int_V \rho \mathbf{S}^T \mathbf{S} dV \quad (3)$$

其中, ρ 为密度. 同时, 单元弹性能表达式为:

$$U = \frac{1}{2} \int_0^l EA \epsilon_{xx}^2 dx + \frac{1}{2} \int_0^l EI \kappa^2 dx \quad (4)$$

式中, E 为杨氏模量, A 和 I 分别为单元截面的面积和极惯性矩. $\epsilon_{xx} = |\mathbf{r}_x| - 1$ 为单元轴向应变, $\kappa = |\mathbf{r}_x \times \mathbf{r}_{xx}| / |\mathbf{r}_x|^2$ 为轴线曲率. \mathbf{r}_x 与 \mathbf{r}_{xx} 分别为轴线方向的一阶与二阶梯度向量. 将弹性能对单元节点坐标求偏导可得单元广义弹性力:

$$\mathbf{Q}_e = \frac{\partial U}{\partial \mathbf{e}} = \mathbf{Q}_s + \mathbf{Q}_\kappa \quad (5)$$

其中, \mathbf{Q}_s 与 \mathbf{Q}_κ 分别为与轴向拉伸和弯曲相关的广义弹性力. 由于在本研究中拟需要采用模态截断的

方法对钢丝绳降阶, 因而需要进一步推导单元切线刚度阵, 即变形能对单元节点坐标的二阶导数. 其表达式详见参考文献[23].

1.2 动力学方程线性化

作为 ANCF 的优势之一, 单元质量阵为常值矩阵, 故由其组装而成的系统质量阵为定常. 而弹性力则为单元节点坐标的高度非线性函数, 导致切线刚度阵也将随单元的当前构型变化, 从而使得传统基于模态截断的降阶手段无法应用. 为此, 将钢丝绳的整个运动过程划分为若干子区间, 如图 1 所示. 在每个子区间内对系统进行线性化处理, 从而使得进行模态求取和截断成为可能.

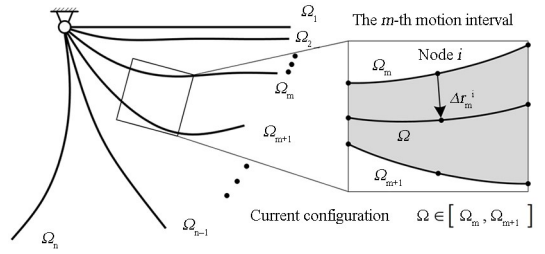


图 1 运动子区间的划分
Fig. 1 Subdomains of the motion

设钢丝绳系统动力学方程为:

$$\mathbf{M}_R \ddot{\mathbf{e}}_R + \mathbf{Q}_R(\mathbf{e}_R) = \mathbf{F}_R \quad (6)$$

其中, \mathbf{M}_R 为钢丝绳质量阵, \mathbf{e}_R 为广义坐标向量, \mathbf{Q}_R 为由当前构型决定的弹性力, \mathbf{F}_R 为作用在钢丝绳上的广义外力. 图 1 中 $\Omega_1 \sim \Omega_N$ 代表钢丝绳整个运动过程中的 N 个离散时间点上的构型, 由此可划分出 $N-1$ 个子区间. 设当前构型 Ω' 处于其中第 m 个子区间 $\Omega' = [\Omega_m, \Omega_{m+1}]$, 则节点坐标向量 \mathbf{e}_R 可表示为:

$$\mathbf{e}_R = \mathbf{e}_{R_m} + \Delta \mathbf{e}_R(t) \quad (7)$$

需要指出, 对于当前构型来说, Ω_m 是已经求解完成的构型, 故而只有增量 $\Delta \mathbf{e}_R$ 是已经求解完成的构型, 故而只有增量是时变的. 式(7) 对时间求导数, 可得 $\dot{\mathbf{e}}_R = \Delta \dot{\mathbf{e}}_R$ 及 $\ddot{\mathbf{e}}_R = \Delta \ddot{\mathbf{e}}_R$. 将广义弹性力在 Ω_m 附近做一阶泰勒展开:

$$\mathbf{Q}_R(\mathbf{e}_R) = \mathbf{Q}_{R_m} + \frac{\partial \mathbf{Q}_{R_m}}{\partial \mathbf{e}_R} \cdot \Delta \mathbf{e}_R(t) \quad (8)$$

定义 $\mathbf{K}_{R_m} = \partial \mathbf{Q}_{R_m} / \partial \mathbf{e}_R$ 为钢丝绳系统的切线刚度阵. 将式(8)代入公式(6), 可得线性化的钢丝绳动力学方程:

$$\mathbf{M}_R \cdot \Delta \ddot{\mathbf{e}}_R + \mathbf{K}_{R_m} \Delta \mathbf{e}_R = \mathbf{F}_R - \mathbf{Q}_{R_m} \quad (9)$$

其中,下角标 m 表示该变量在当前运动子区间起点 Ω_m 处取值.不难看出,在当前子区间内钢丝绳的刚度阵不再时变,具备了应用模态降阶的基本条件.为保证动力学分析的精度,子区间的划分需要遵循一定的条件.设当前构型下钢丝绳上任一节点 j 相对于其在子区间起始构型下的空间位置增量为 $\Delta \mathbf{r}^j = \mathbf{r}^j - \mathbf{r}_m^j$,则定义如下准则:

$$\max(\|\Delta \mathbf{r}^j\|_2) \leq \delta, j=1, \dots, n \quad (10)$$

式中, n 为钢丝绳总节点个数.即当所有节点位置变化的最大值超过某一预先设定的阈值 δ 时,需要将当前构型固定为当前子区间终点,同时也是下一子区间起点.利用当前节点坐标值更新系统的切线刚度阵并重新求取模态.

2 整机建模

塔式起重机作为含有小变形塔身—吊臂结构以及大变形钢丝绳的多体系统,需要采用不同的理论基础对各部分建模并通过运动学约束连接在一起.如图 2 所示,设塔机变幅小车位置坐标为 \mathbf{r}_p ,钢丝绳端点的位置坐标为 \mathbf{r}_q .二者占据相同的空间位置,故约束方程为 $\mathbf{C}:\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_q = \mathbf{0}$.

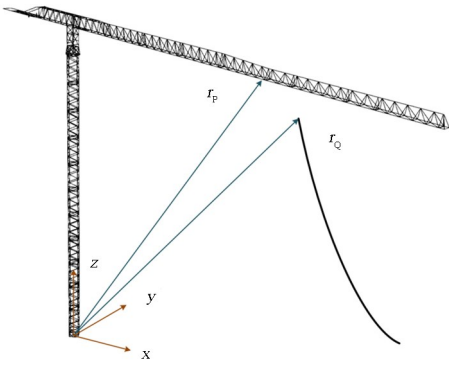


图 2 塔机结构与钢丝绳的运动学约束

Fig. 2 Constrains between the tower crane and the steel rope

首先定义 \mathbf{e}_c 、 \mathbf{M}_c 、 \mathbf{K}_c 、 \mathbf{F}_c 分别为塔机钢结构有限元列式的广义坐标、质量阵、刚度阵与广义外力.则整机多体系统动力学方程为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \mathbf{M}_c & \\ & \mathbf{M}_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{e}}_c \\ \ddot{\mathbf{e}}_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_c \mathbf{e}_c \\ \mathbf{Q}_R \end{bmatrix} + \mathbf{C}_e^T \boldsymbol{\lambda} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_c \\ \mathbf{F}_R \end{bmatrix} \\ \mathbf{C}(\mathbf{e}_c, \mathbf{e}_R) = \mathbf{0} \end{cases} \quad (11)$$

其中, \mathbf{C}_e 为约束对整机节点坐标向量求导所得雅各比矩阵, $\boldsymbol{\lambda}$ 为拉格朗日乘子.对动力学方程中的约束力项 $\mathbf{C}_e^T \boldsymbol{\lambda}$ 进行线性化处理可得:

$$\mathbf{C}_e^T \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{C}_{e_m}^T \boldsymbol{\lambda}_m + \frac{\partial \mathbf{C}_{e_m}^T}{\partial \mathbf{e}} \boldsymbol{\lambda}_m \Delta \mathbf{e} + \mathbf{C}_{e_m}^T \Delta \boldsymbol{\lambda} \quad (12)$$

在本研究中,约束方程定常,故而式(12)表达式右侧第二项为零.则整机多体系统动力学方程线性化处理后的表达式可以由式(11)按照式(9)的格式加入塔机钢结构部分增广得到:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \mathbf{M}_c & \\ & \mathbf{M}_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \ddot{\mathbf{e}}_c \\ \Delta \ddot{\mathbf{e}}_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_c & \\ & \mathbf{K}_{R_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{e}_c \\ \Delta \mathbf{e}_R \end{bmatrix} + \\ \mathbf{C}_{e_m}^T \Delta \boldsymbol{\lambda} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_c \\ \mathbf{F}_R \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{Q}_{R_m} \end{bmatrix} - \mathbf{C}_{e_m}^T \boldsymbol{\lambda}_m \\ \mathbf{C}(\mathbf{e}_c, \mathbf{e}_{R_m}) + \mathbf{C}_{e_m} \Delta \mathbf{e} = \mathbf{0} \end{cases} \quad (13)$$

分别对塔机钢结构和钢丝绳进行模态降阶,设 Φ_c 、 Φ_{R_m} 分别为当前子区间内塔机结构和钢丝绳的截断模态矩阵, $\mathbf{p} = [\mathbf{p}_c, \mathbf{p}_R]$ 为主坐标向量.则整机广义坐标在当前子区间内的增量与主坐标有如下关系:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{e}_c \\ \Delta \mathbf{e}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_c & \\ & \Phi_{R_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p}_c \\ \mathbf{p}_R \end{bmatrix} = \mathbf{T}_m \mathbf{p} \quad (14)$$

式(13)中的整机多体系统动力学方程可以写成由主坐标表达的形式:

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{M}} \ddot{\mathbf{p}} + \bar{\mathbf{K}}_m \mathbf{p} + \mathbf{C}_p^T \Delta \boldsymbol{\lambda}_p = \bar{\mathbf{Q}}_{p_m} \\ \mathbf{C} + \mathbf{C}_{p_m} \Delta \mathbf{p} = \mathbf{0} \end{cases} \quad (15)$$

式中:

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} \Phi_c^T \mathbf{M}_c \Phi_c & \\ & \Phi_{R_m}^T \mathbf{M}_R \Phi_{R_m} \end{bmatrix} \\ \bar{\mathbf{K}}_m = \begin{bmatrix} \Phi_c^T \mathbf{K}_c \Phi_c & \\ & \Phi_{R_m}^T \mathbf{K}_{R_m} \Phi_{R_m} \end{bmatrix} \\ \bar{\mathbf{Q}}_{p_m} = \mathbf{T}_m^T \begin{bmatrix} \mathbf{F}_c \\ \mathbf{F}_R \end{bmatrix} - \mathbf{T}_m^T \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{Q}_{R_m} \end{bmatrix} - \mathbf{T}_m^T \mathbf{C}_{p_m}^T \boldsymbol{\lambda}_{p_m} \end{cases} \quad (16)$$

公式(15)中,约束方程对主坐标的雅各比矩阵 \mathbf{C}_p 可以按照求导的链式法则分块求取:

$$\mathbf{C}_p = \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial \mathbf{p}} = \left[\frac{\partial \mathbf{C}}{\partial \mathbf{p}_c}, \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial \mathbf{p}_R} \right] = \left[\frac{\partial \mathbf{C}}{\partial \mathbf{e}_c} \Phi_c, \frac{\partial \mathbf{C}}{\partial \mathbf{e}_R} \Phi_{R_m} \right] \quad (17)$$

需要指出的是,由于塔机钢结构部分采用了传统有限元为理论基础,其质量阵刚度阵均为定常.而作为 ANCF 的特点,钢丝绳质量阵也不随时间和构型而变化.因此,在每个运动子区间的终点处,

都只需要更新钢丝绳的切线刚度阵 \mathbf{K}_R 并重新计算钢丝绳在下一区间内的模态 Φ_R , 而后更新系统方程并求解即可. 该方程为指标-3 微分-代数方程, 可以选取 NewMark 法、广义 α 法等常用微分-代数方程数值求解方法进行计算.

3 仿真与分析

以图 2 所示某品牌 T8036 型平头式塔机为例, 开展虚拟样机仿真验证. 该型号塔机最大起升高度为 66m, 额定负载力矩 410t·m, 最大吊重 12.5t, 最大工作幅度 80m, 此时最大吊重为 3.6t. 该型塔机采用 35W * 7-20-1960/(GB8918-2006) 型钢丝绳, 直径 20mm. 行走小车与吊钩自重合计 3.044t. 塔机配重为 32.6t, 配重幅度为 22m. 塔机结构使用三维剪切梁单元离散, 模型共有节点 701 个, 单元 1500 个. 在该算例中, 塔机结构保留前 100 阶模态. 钢丝绳悬垂部分长度 60m, 采用 120 个 ANCF 缆索单元离散, 保留 50% 的模态自由度. 施加载荷与幅度的组合为: 组合 1——80m-3.6t; 组合 2——32.8m-12.5t. 两种组合下钢丝绳均采用 2 倍率起吊. 选取初始偏摆角分别为 2.3° 和 3°. 仿真时间设置为 20s. 两种载荷组合下吊重的 x 位移、驾驶室的 x 位移以及吊臂末端竖直位移如图 3~图 8 所示. 图 9 和 10 为均方根(RMS)误差, 其计算方法为所有节点在两种不同算法下的位置误差平均值:

$$\Delta_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \|r_{\text{R-ANCF}}^j - r_{\text{F-ANCF}}^j\|} \quad (18)$$

R-ANCF 和 F-ANCF 分别指代模态缩减算法和全自由度计算所得结果.

由图 9 和图 10 可以看出, 最大绝对误差不超过 0.15m, 相对误差不超过 0.25%, 具有较高的计算精度. 图 11 为塔机在两种载荷组合下的计算时间对比, 可以看到计算时间大大减少, 有效提高了计算效率. 对比两种不同的初始摆角可以看出, 本文所提出的方法能够较好地表现出两种不同的初始条件对塔机变形的影响. 对比两种不同的载荷组合可以看出, 更大的吊重激发了结构更高频率的振动. 而载荷组合 1 下司机室和吊臂末端的位移曲线有着相比组合 2 更大的峰值, 是因为此时幅度很大, 吊具和变幅小车自重带来的附加弯矩起到的作用更明显. 仿真结果表明, 本文所提出的方法可以在较高的仿真效率的前提下具有较好的计算精度. 图 12 为塔机在两种

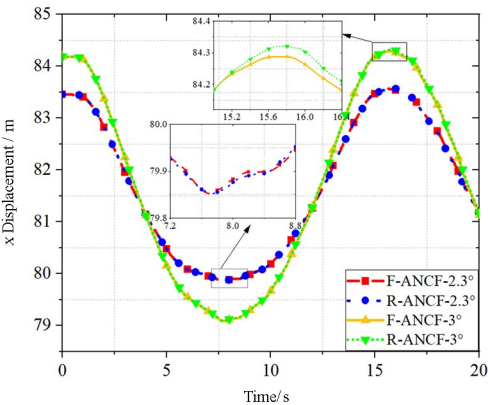


图 3 载荷组合 1 下吊重的 x 位移
Fig. 3 x displacement of the payload under Combination 1

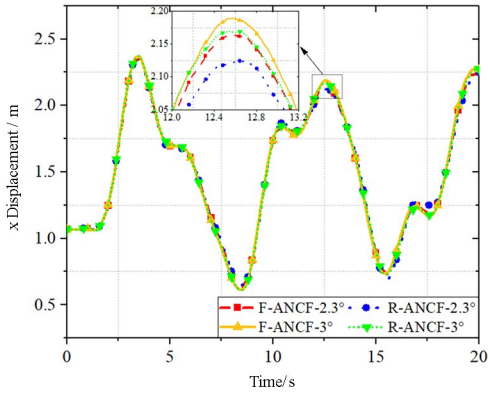


图 4 组合 1 下司机室的 x 位移
Fig. 4 x displacement of the driver's room under Combination 1

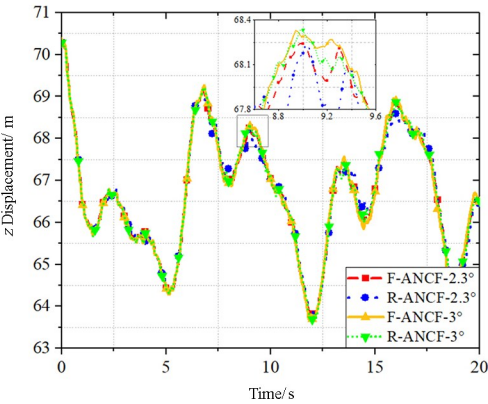


图 5 组合 1 下吊臂末端的 z 位移
Fig. 5 z displacement of the jib tip under Combination 1

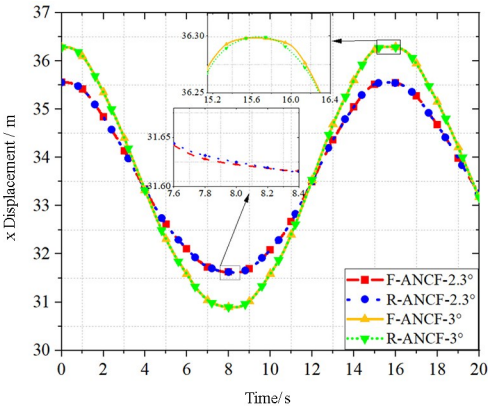


图 6 载荷组合 2 下吊重的 x 位移
Fig. 6 x displacement of the payload under Combination 2

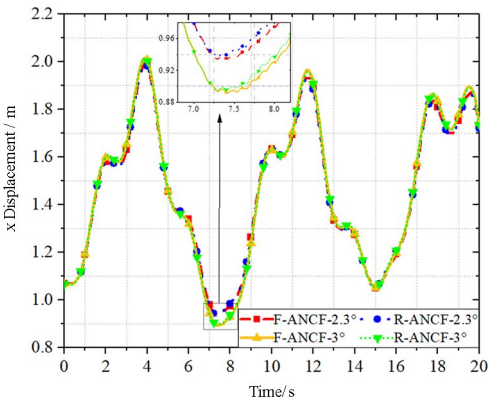


图 7 组合 2 下司机室的 x 位移
Fig. 7 x displacement of the driver's room under Combination 2

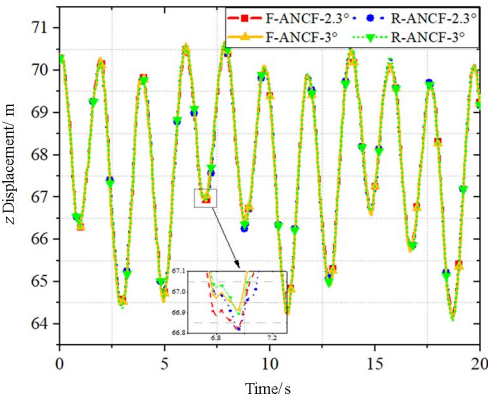


图 8 组合 2 下吊臂末端的 z 位移
Fig. 8 z displacement of the jib tip under Combination 2

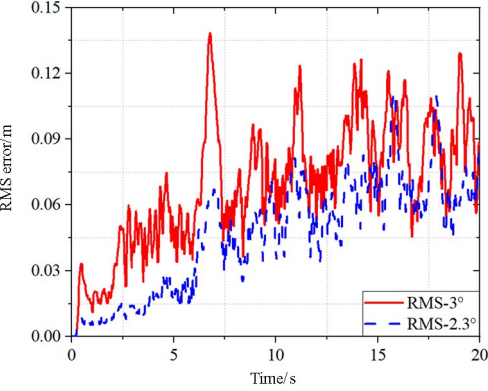


图 9 组合 1 的 RMS 误差
Fig. 9 RMS error of Combination 1

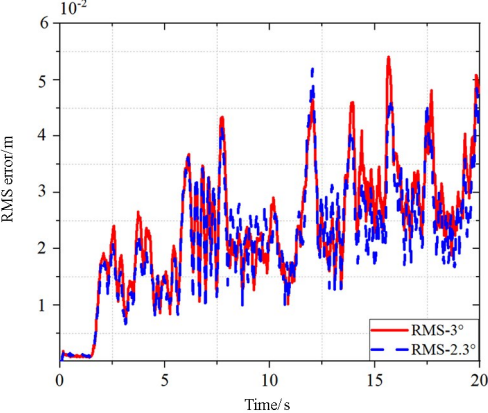


图 10 组合 2 的 RMS 误差
Fig. 10 RMS error of Combination 2

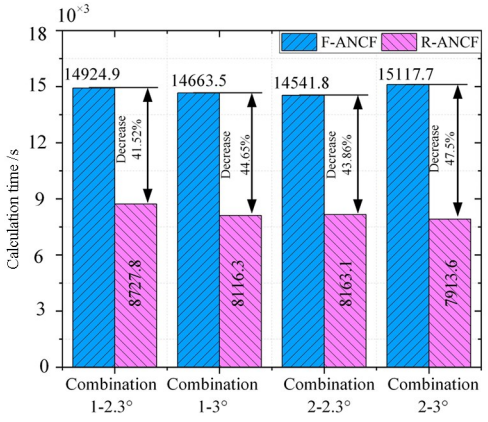


图 11 计算时间对比
Fig. 11 Comparison of calculation time

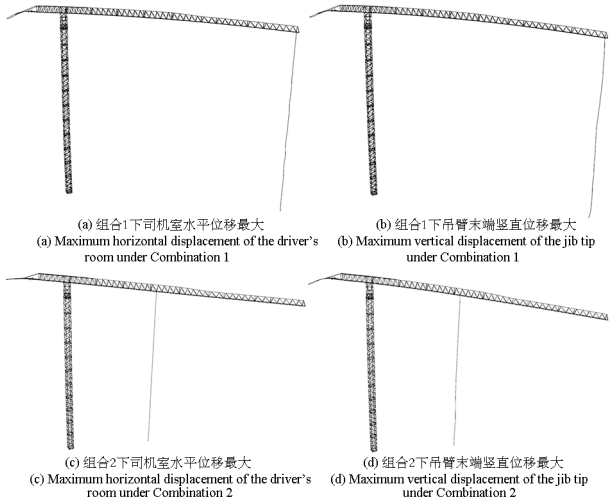


图 12 塔机系统构型
Fig. 12 Configurations of the tower crane system

载荷组合,初始偏摆角为 3° 的条件下,司机室水平位移和吊臂末端竖直位移分别达到最大值时构型图。

4 结论

(1)采用绝对节点坐标法对塔式起重机起升机构钢丝绳进行建模. 针对该方法得到切线刚度阵高度非线性特点,对柔性体运动过程进行运动子区间划分,并在每个子区间内对动力学方程进行基于一阶泰勒展开的线性化处理,从而使得模态降阶方法可以得到应用. 给出了基于当前位移向量无穷范数的子区间更新准则。

(2)采用传统有限元建立塔机结构的动力学振动方程. 引入多体系统动力学中的位移约束方程,将各自模态降阶后的塔机结构和钢丝绳连接起来形成降阶后的系统动力学方程. 给出了约束方程的线性化表达及其对模态坐标的雅各比矩阵表达式。

(3)采用本文提出的方法对某型号平头式塔式

起重机整机模型进行了建模仿真. 分别计算了钢丝绳偏摆角为 2.3° 和 3° 两种初始条件下, 80m-3.6t 和 32.8m-12.5t 两种幅度一吊重组合. 结果表明, 由于行走小车和吊具的存在, 80m 幅度工况具有更大的负载弯矩, 从而导致了更大的结构整体变形. 而在 32.8m 幅度下, 由于吊重质量带来的剪力更大, 激发了结构更高频率的振动. 在仅保留一半钢丝绳模态自由度的条件下降阶模型依然捕捉到了塔机此种动态特性, 表明了本文所提出的几何非线性系统分段线性化降阶方法是可行的.

参考文献

[1] 曹旭阳, 袁靖, 李万里, 等. 起重机变幅运动吊重防摆控制研究[J]. 中国机械工程, 2015, 26(5): 606—611.
CAO X Y, YUAN J, LI W L, et al. Load anti-sway control of luffing motion for cranes [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(5): 606—611. (in Chinese)

[2] CHEN H, FANG Y C, SUN N. An adaptive tracking control method with swing suppression for 4-DOF tower crane systems [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 123: 426—442.

[3] OUYANG H M, TIAN Z, YU L L, et al. Adaptive tracking controller design for double-pendulum tower cranes [J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 153: 103980.

[4] 曹亚琪. 起重机运行状态监测及寿命预测系统设计[D]. 南京: 东南大学, 2016.
CAO Y Q. Design of condition monitoring and fatigue life prediction system for crane [D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese)

[5] 兰朋, 陆念力. 塔带机输送臂转向工况动力学分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2006, 27(3): 345—348.
LAN P, LU N L. Dynamic analysis of tower belt in case of changing conveyer direction [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2006, 27(3): 345—348. (in Chinese)

[6] 王蔚佳, 刘成毅, 钟伟, 等. 混合动态子结构综合法在塔机动力学分析中的应用[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(8): 114—120.
WANG W J, LIU C Y, ZHONG W, et al. Applying hybrid dynamic substructure synthetic method to dynamic analysis for tower crane [J]. Journal of

Chongqing University, 2011, 34(8): 114—120. (in Chinese)

[7] 王欣, 吕玉兰, 曹旭阳, 等. 考虑钢丝绳柔性的塔式起重机仿真系统开发[J]. 计算机工程, 2015, 41(9): 303—310.
WANG X, LV Y L, CAO X Y, et al. Development of tower crane simulation system considering flexibility of wire rope [J]. Computer Engineering, 2015, 41(9): 303—310. (in Chinese)

[8] 王刚, 齐朝晖, 孔宪超. 含机构位移起重机主副臂组合臂架结构几何非线性分析[J]. 工程力学, 2015, 32(7): 210—218.
WANG G, QI Z H, KONG X C. Geometric nonlinear analysis for crane main and sub-boom structures with mechanism displacements [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(7): 210—218. (in Chinese)

[9] RAUSCHER F, SAWODNY O. An elastic jib model for the slewing control of tower cranes [C]//20th World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC). Amsterdam, Netherlands: Elsevier 2017.

[10] SCHLOTT P, RAUSCHER F, SAWODNY O. Modelling the structural dynamics of a tower crane [C]//2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). New York: IEEE, 2016: 763—768.

[11] 杨悦, 曹旭阳, 高顺德. 塔式起重机刚柔耦合动力学模型研究[J]. 机械设计与制造, 2018(1): 79—82.
YANG Y, CAO X Y, GAO S D. Rigid-flexible coupling dynamic modeling of a tower crane [J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(1): 79—82. (in Chinese)

[12] 张安琪, 苏雷, 凌贤长, 等. 地震作用下起重机对高桩码头的动力响应影响[J]. 工程力学, 2021, 38(7): 183—196.
ZHANG A Q, SU L, LING X Z, et al. Influence of crane on dynamic response of pile-supported wharf during earthquake [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(7): 183—196. (in Chinese)

[13] 张欣刚, 王海明, 姚文莉, 等. 考虑粘滑效应的核电站环形起重机地震瞬态响应分析[J]. 工程力学, 2022, 39(4): 39—52.
ZHANG X G, WANG H M, YAO W L, et al. Numerical investigation on seismic transient response of nuclear polar crane considering stick-slip effect [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(4): 39—52. (in

- Chinese)
- [14] 赵阳, 许博谦, 李晓波, 等. 梁式结构动力模型降阶方法及其应用[J]. 动力学与控制学报, 2021, 19(4): 32—38.
- ZHAO Y, XU B Q, LI X B, et al. A dynamic model reduction method of beam-type structures and its application [J]. Journal of Dynamics and Control, 2021, 19(4): 32—38. (in Chinese)
- [15] 刘延柱. 杆网系统基于高斯原理的动力学建模[J]. 动力学与控制学报, 2018, 16(4): 289—294.
- LIU Y Z. Dynamical modeling of a net system of rods based on Gauss's principle [J]. Journal of Dynamics and Control, 2018, 16(4): 289—294. (in Chinese)
- [16] 高一鸣, 马子琦, 刘铸永, 等. 海上横向补给系统多体动力学建模与仿真分析[J]. 动力学与控制学报, 2022, 20(5): 34—40.
- GAO Y M, MA Z Q, LIU Z Y, et al. Multibody dynamics modeling and simulation analysis of offshore alongside replenishment system [J]. Journal of Dynamics and Control, 2022, 20(5): 34—40. (in Chinese)
- [17] 徐金帅, 齐朝晖, 卓英鹏, 等. 一种空间悬索的几何非线性计算方法[J]. 机械工程学报, 2022, 58(9): 147—156.
- XU J S, QI Z H, ZHUO Y P, et al. A geometric nonlinear calculation method for spatial suspension cable [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(9): 147—156. (in Chinese)
- [18] SUGIYAMA H, MIKKOLA A M, SHABANA A A. A non-incremental nonlinear finite element solution for cable problems [J]. Journal of Mechanical Design, 2003, 125(4): 746—756.
- [19] 邱江洋, 梅桂明, 王江文, 等. 基于多柔体动力学理论的接触网找形方法[J]. 工程力学, 2021, 38(6): 246—256.
- QIU J Y, MEI G M, WANG J W, et al. Form-finding method of railway catenary based on the flexible multibody dynamics theory [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(6): 246—256. (in Chinese)
- [20] WANG Q T, TIAN Q, HU H Y. Dynamic simulation of frictional multi-zone contacts of thin beams [J]. Nonlinear Dynamics, 2016, 83(4): 1919—1937.
- [21] GU Y Q, LAN P, CUI Y Q, et al. Dynamic interaction between the transmission wire and cross-frame [J]. Mechanism and Machine Theory, 2021, 155: 104068.
- [22] ZHANG H, GUO J Q, LIU J P, et al. An efficient multibody dynamic model of arresting cable systems based on ALE formulation [J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 151: 103892.
- [23] 刘昊, 魏承, 田健, 等. 空间充气展开绳网捕获系统动力学建模与分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(22): 145—152.
- LIU H, WEI C, TIAN J, et al. Dynamics modeling and analysis of the inflatable net system for space capture [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(22): 145—152. (in Chinese)
- [24] 蔡正政, 孙加亮, 金栋平. 高超声速折叠翼展开动力学研究[J]. 动力学与控制学报, 2022, 20(6): 85—93.
- CAI Z Z, SUN J L, JIN D P. Deployment dynamics of a hypersonic folding wing [J]. Journal of Dynamics and Control, 2022, 20(6): 85—93. (in Chinese)
- [25] TANG Y X, HU H Y, TIAN Q. Model order reduction based on successively local linearizations for flexible multibody dynamics [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2019, 118(3): 159—180.
- [26] TIAN Q L, LAN P, YU Z Q. Model-order reduction of flexible multibody dynamics via free-interface component mode synthesis method [J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2020, 15(10): 101008.
- [27] 张笑笑, 丁洁玉. 萤火虫算法求解多体系统动力学微分—代数方程[J]. 动力学与控制学报, 2021, 19(2): 85—90.
- ZHANG X X, DING J Y. Firefly algorithm for multi-body system dynamics differential-algebraic equations [J]. Journal of Dynamics and Control, 2021, 19(2): 85—90. (in Chinese)
- [28] 任辉, 周平. 多体系统动力学的常用积分器算法[J]. 动力学与控制学报, 2021, 19(1): 1—28.
- REN H, ZHOU P. Implementation details of Dae integrators for multibody system dynamics [J]. Journal of Dynamics and Control, 2021, 19(1): 1—28. (in Chinese)