

基于非线性有限元的网套补偿器轴向刚度特性及计算方法研究

王亚军¹, 陈鼎铭², 方红荣², 贺启林², 周浩洋²

(1. 中国航天电子技术研究院, 北京 100094;
2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 网套补偿器在航天管路系统中广泛使用, 补偿器的轴向刚度是其基本力学参数, 然而其复杂的微结构特征使得轴向刚度呈现强烈的非线性。为实现对网套补偿器轴向拉伸全过程的仿真计算, 从钢丝网套入手, 基于钢丝的螺旋梁模型, 分析了轴向长度、螺旋角及网套直径对轴向刚度的影响, 结果表明轴向长度和螺旋角将显著影响轴向刚度; 分析了边界条件的影响, 结果表明在计算轴向刚度时固定边界与约束径向位移的循环边界可以互换。结合网套刚度分析的结论, 提出了基于接触关系的子网套刚度分析方法, 解释了拉伸时轴向刚度非线性变化原因, 进一步建立了2/N波纹管-螺旋梁复合模型以及2/N单波-单旋螺旋梁复合模型用于不同刚度阶段的有限元计算。算例结果表明, 仿真获得的力-位移曲线与试验曲线一致性较好, 高刚度阶段的轴向刚度误差为3.40%。

关键词: 补偿器; 轴向刚度; 非线性; 有限元

中图分类号: V431

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2024) 01-0008-12

Research on Mesh Sleeve Compensator Axial Stiffness Characteristics and Calculation Methods Based on Nonlinear Finite Element Analysis

WANG Yajun¹, CHEN Dingming², FANG Hongrong², HE Qilin², ZHOU Haoyang²

(1. China Aerospace Electronics Technology Research Institute, Beijing 100094, China;

2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: The mesh sleeve compensator is widely used in aerospace pipeline systems, and the axial stiffness of the compensator is its basic mechanical parameter. However, its complex microstructure characteristics make the axial stiffness exhibit strong nonlinearity. To achieve simulation calculation of the entire axial stretching process of the mesh sleeve compensator, this article starts with the steel wire mesh sleeve and analyzes the influence of axial length, helix angle, and mesh sleeve diameter on axial stiffness based on the spiral beam model of the steel wire. The results show that axial length and helix angle will significantly affect axial stiffness; The influence of boundary conditions was analyzed, and the results showed that the fixed boundary and the cyclic boundary of constrained radial displacement can be interchanged when calculating axial stiffness.

收稿日期: 2023-10-13; 修订日期: 2024-01-05

基金项目: 民用航天预先研究项目 (D030102)

作者简介: 王亚军 (1966—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为飞行器总体设计。

通信作者简介: 陈鼎铭 (1996—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为增压输送系统设计与仿真研究。

Based on the conclusion of the stiffness analysis of the mesh sleeve, a sub mesh sleeve stiffness analysis method based on contact relationship was proposed, explaining the nonlinear changes in axial stiffness during stretching. A 2/N corrugated pipe spiral beam composite model and a 2/N single wave single spindle spiral beam composite model were further established for finite element calculation at different stiffness stages. The results of the example show that the force displacement curve obtained from simulation is in good agreement with the experimental curve, and the axial stiffness error in the high stiffness stage is 3.40%.

Key words: Compensator; Axial stiffness; Nonlinearity; Finite element analysis

0 引言

网套补偿器是航天管路系统中广泛采用的管配件,其主要功能是减振、补偿位移。在工程实际中,钢丝网套补偿器往往承受包括温度载荷、位移载荷、内压载荷以及冲击载荷等不同形式的载荷,是管路结构中容易破坏的部位^[1]。为设计高性能、高可靠性的钢丝网套补偿器,以满足日益提高的工程需求,必须对其力学性能开展深入、全面的研究。

补偿器力学分析的难点在于复杂的微结构特征:网套补偿器由波纹管与钢丝网套焊接组合而成,钢丝网套又由多锭钢丝编织而成,受载时网套和波纹管之间将发生强烈相互作用,使得网套补偿器的刚度表现出强烈的非线性^[2]。

考虑到补偿器中波纹管的相关分析方法已经比较成熟,钢丝网套的分析方法是目前的研究重点。盛冬平等^[3]、张程^[4]、杨燕等^[5]在补偿器仿真时使用基于节点耦合的梁单元建立了网套模型,评估了网套补偿器的静动力学特性。基于梁单元的网套建模方法对结构进行了较多简化,计算效率高,但难以保证准确性,且不能计算轴向变形时刚度较低的阶段。一些学者使用实体单元将网套的细观编织结构引入仿真模型,Rial等^[6]、Huang等^[7]建立了网套的实体模型,计算了补偿器的轴向拉伸刚度。网套实体模型比梁模型更符合实际结构,但对计算资源的要求极高,并且在轴向拉伸量较大时难以收敛。另有学者尝试建立金属丝网套的均质化本构,Hachemi等^[8]在非线性正交异性层合板本构中引入了编织角变化,以体现网套拉伸过程中的非线性行为,但在拉伸曲线后半段偏差较大。胡牧原等^[9]进一步引入了基于试验数据的编织角加速系数以增强刚度非线性。

本文以网套补偿器这一复杂工程元件为研究对象,通过简化钢丝网套模型,使用仿真方法研

究了网套的轴向刚度特性。建立了基于接触关系的补偿器有限元仿真模型,实现了对网套补偿器轴向拉伸全过程的静刚度分析。

1 钢丝网套轴向刚度分析

钢丝网套结构是补偿器轴向刚度特性的非线性来源,也是分析难点。本文建立了网套的简化分析模型——螺旋梁模型,通过有限元仿真方法计算了几何参数对其轴向刚度特性的影响,研究了边界条件对螺旋梁轴向刚度的影响。

1.1 网套简化分析模型——螺旋梁模型

1.1.1 螺旋梁模型简介

网套轴向变形时由于轴向对称性和反对称性,其中钢丝的响应在统计意义上是相同的,因此在轴向变形计算时,可以以单根钢丝为分析对象。网套的细观编织结构使得钢丝的路径比较复杂,难以用简单的数学公式描述。若忽略钢丝的卷曲,则钢丝的路径可简化为螺旋线(见图1),使分析难度大大降低。

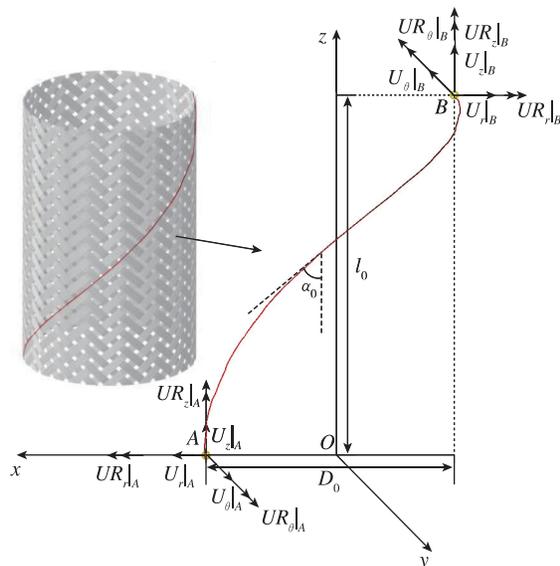


图 1 螺旋梁模型示意图

Fig. 1 Spiral beam model of wire cloth

简化之后, 钢丝的路径几何由中心线的螺旋角 α_0 、金属丝螺旋直径 D_0 、网套轴向长度 l_0 这 3 个几何参数确定。对于由 N 锭、每锭 m 根钢丝编织而成的网套, 其轴向刚度 K_z 可由单根钢丝轴向刚度 K_s 叠加得到

$$K_z = mNK_s \quad (1)$$

使用空间梁单元建立螺旋梁仿真模型, 对其进行轴向 (图 1 中 z 方向) 变形响应分析。作为分析算例的网套规格见表 1。

表 1 网套参数表

Tab. 1 Mesh sleeve parameters

网套直径 D_0/mm	网套数 $N/\text{锭}$	每锭钢 丝数 $m/\text{个}$	钢丝直径 d/mm	编织角 $\alpha_0/^\circ$	轴向长度 l_0/mm
64.0	60	10	0.3	48	95.3

1.1.2 螺旋梁模型可靠性验证与误差修正

采用文献[10]中管状编织结构几何建模方法建立表 1 中钢丝网套的编织单胞仿真模型 (见图 2), 分别对内部无约束工况及内部具有刚性芯工况下螺旋梁模型和单胞模型进行仿真分析, 以验证螺旋梁模型在模拟网套单独拉伸及与内部芯轴接触时与单胞模型的误差。

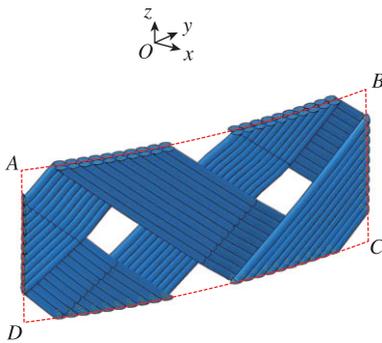
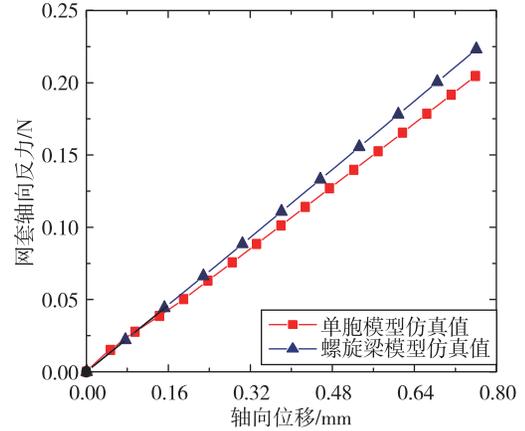


图 2 钢丝网套编织单胞仿真模型

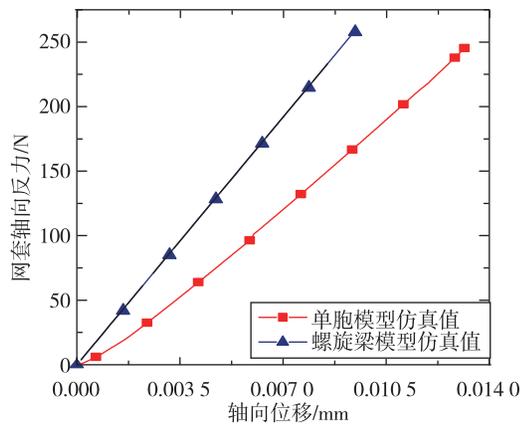
Fig. 2 Simulation model of steel wire mesh sleeve unit cell

用两种仿真模型得到的两种工况下网套轴向拉伸的力-位移曲线见图 3。

由图 3 及表 2 可知, 网套单独拉伸时螺旋梁模型得到的轴向刚度结果和编织单胞差别较小; 而在内部有刚性芯时, 螺旋梁得到的刚度要显著大于编织单胞, 此时有必要对螺旋梁进行修正, 以使其轴向刚度与编织单胞相等。本文采用将螺旋角从 α_0 修正至 γ_0 的方式使其轴向刚度与编织单胞等效, 按照此方式在内部有芯轴时, 表 1 中网套的编织角由 48° 增大至 52.857° 。



(a) 无内部约束



(b) 内部刚性芯约束

图 3 钢丝网套力-位移曲线仿真结果对比

Fig. 3 Comparison of force-displacement curves simulation results of steel wire mesh sleeve

表 2 钢丝网套轴向刚度仿真结果对比

Tab. 2 Comparisons of axial stiffness simulation results of steel wire mesh sleeve

工况	轴向刚度 (螺旋梁模型) / ($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$)	轴向刚度 (编织单胞模型) / ($\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$)	(编织单胞轴向刚度/螺旋梁轴向刚度)
无内部约束	0.271	0.287	0.944
内部刚性芯约束	19.596	27.351	0.716

1.2 几何参数对轴向刚度的影响

1.2.1 轴向长度 l_0

螺旋角 α_0 、网套直径 D_0 以及钢丝直径 d 与表 1 中网套相同, 建立不同轴向长度 l_0 的螺旋梁有限元仿真模型。工程实际中的网套边缘通常使用边条焊接固定, 在轴向变形时两端径向、环向以及转动自由度都被固定, 只存在轴向位移。因此仿真时螺旋梁端点边界位移和转角条件如下

$$\begin{aligned}
 U_r|_A &= U_r|_B = 0 \\
 U_\theta|_A &= U_\theta|_B = 0 \\
 U_z|_A &= 0, U_z|_B = W_z \\
 UR_r|_A &= UR_r|_B = 0 \\
 UR_\theta|_A &= UR_\theta|_B = 0 \\
 UR_z|_A &= UR_z|_B = 0
 \end{aligned} \quad (2)$$

仿真获得的力-应变曲线见图 4。曲线图表明，不同长度的螺旋梁在轴向拉伸时力-应变曲线差别十分明显。相同轴向应变的情况下，螺旋梁的初始轴向长度越长轴向力越小，即其刚度与轴向长度 l_0 之间并非线性关系。

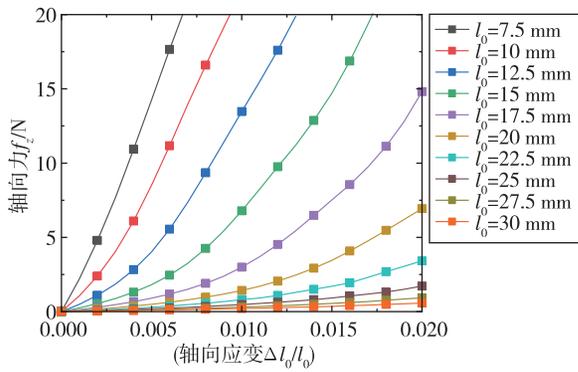


图 4 不同轴向长度下螺旋梁轴向拉伸力-应变仿真曲线
Fig. 4 Axial tensile stress-strain simulation curves of helical beams with different axial lengths

对于特定长度的螺旋梁，其拉伸曲线在弹性范围内随着轴向应变增大，曲线斜率也随之升高。这由几何非线性导致，拉伸过程中梁的大变形（见图 5）影响了刚度。轴向长度较短的螺旋梁（如 $l_0 = 7.5$ mm 时的曲线）在较大轴向力范围内刚度变化较小，轴向长度较长的螺旋梁（如 $l_0 = 27.5$ mm 和 $l_0 = 30$ mm 时的曲线）在较大的应变范围内刚度变化也较小。而轴向长度适中的螺旋梁具有最显著的几何非线性。

从仿真结果中提取轴向应变为 0.001 时的轴向反力，拟合初始的小变形范围内的轴向刚度（见图 6）。由图 6 可知，螺旋梁处于较小轴向长度的范围时，刚度对轴向长度较为敏感，此时刚度随初始长度增加而急剧减小；螺旋梁的初始轴向长度较大时，轴向刚度极低，并且刚度随长度增加而减小的趋势也放缓。

通过提取螺旋梁变形时的应变能仿真值可以解释造成上述现象的原因。在螺旋梁中总的应变能中由拉伸变形贡献的应变能可表示为

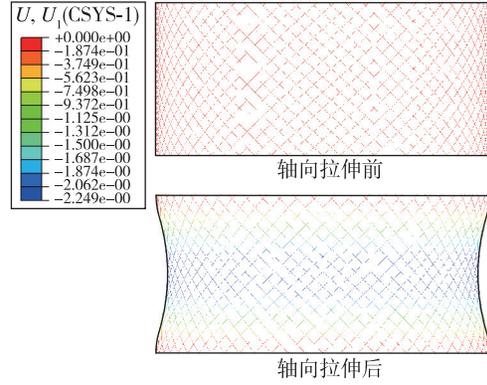


图 5 $l_0 = 30$ mm 螺旋梁拉伸变形位移云图
(结果经柱坐标系下 z 轴旋转阵列展示)

Fig. 5 Spiral beam tensile deformation displacement nephogram with $l_0 = 30$ mm (the results are displayed by z-axis rotation array in cylindrical coordinate system)

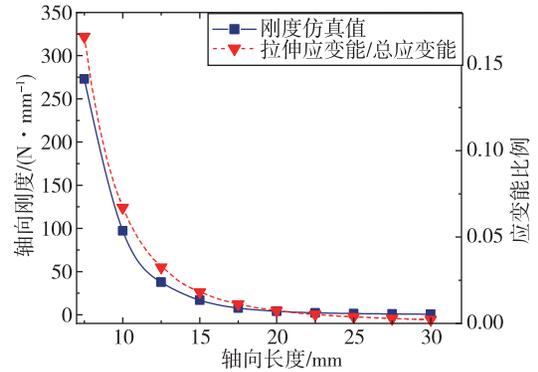


图 6 螺旋梁初始轴向拉伸刚度与轴向长度的关系
Fig. 6 Relationship between initial axial tensile stiffness and axial length of spiral beam

$$E_N = \frac{1}{2} \int_0^L \frac{1}{4} \pi d^2 \epsilon_N \sigma_N ds \quad (3)$$

其中， L 为螺旋梁的总弧长， ϵ_N 为沿梁的中心线切向应变， σ_N 为沿梁的中心线切向应力。

由弯曲、扭转和剪切变形贡献的应变能则为

$$E_M = E_{total} - E_N \quad (4)$$

对于 Euler-Bernoulli 梁，计算时忽略了剪切变形，因此只存在拉伸应变能和弯扭应变能。从仿真结果提取的各轴向长度下，螺旋梁内拉伸应变能与总应变能的比值见图 6 中的红色虚线，可见拉伸应变能占总应变能比例越高，螺旋梁的轴向刚度也相应越大。这表明螺旋梁刚度随轴向长度的非线性变化主要是内部变形模式的转变导致的。螺旋钢丝轴向长度较大时拉伸变形很小，主要依靠弯扭实现轴向伸长，此时刚度很低。而轴向长度很小时，轴向拉伸时钢丝内主要发生拉伸变形，

刚度要高得多。

1.2.2 螺旋角 α_0

轴向长度 l_0 、网套直径 D_0 以及钢丝直径 d 与表1中网套相同, 建立不同螺旋角 α_0 的螺旋梁仿真分析模型。仿真获得的力-应变曲线如图7所示。曲线图表明, 螺旋角越小, 螺旋梁轴向刚度越大, 同时拉伸曲线越接近线性。

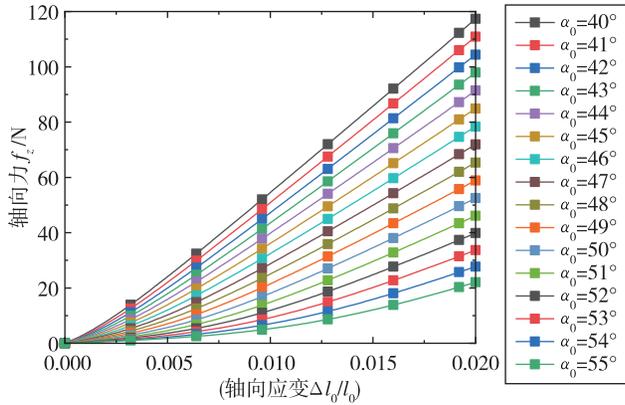


图7 不同螺旋角下螺旋梁轴向拉伸力-应变仿真曲线

Fig. 7 Simulation curves of axial tensile force strain of spiral beam under different spiral angles

初始的小变形范围内 (轴向应变 0.001) 的轴向刚度仿真值如图8所示。

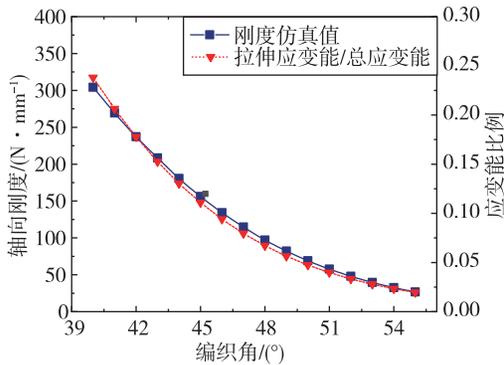


图8 螺旋梁初始轴向拉伸刚度与螺旋角的关系

Fig. 8 Relationship between initial axial tensile stiffness and helix angle of spiral beam

由图8可知, 螺旋梁轴向刚度对初始螺旋角较为敏感, 二者之间为非线性变化关系, 初始螺旋角越大刚度越低。通过对应变能的计算可以发现, 轴向刚度的下降与拉伸应变能比例的下降趋势基本一致, 因此螺旋梁刚度随初始编织角非线性变化的主要原因同样是变形模式的转变。

1.2.3 网套直径 D_0

轴向长度 l_0 、螺旋角 α_0 以及钢丝直径 d 与表1

中网套相同, 建立不同网套直径 D_0 的螺旋梁仿真分析模型。仿真获得的力-应变曲线如图9所示。曲线图表明, 相对于其他参数, 网套直径对螺旋梁轴向刚度影响较小。网套直径越小, 螺旋梁轴向刚度越小。

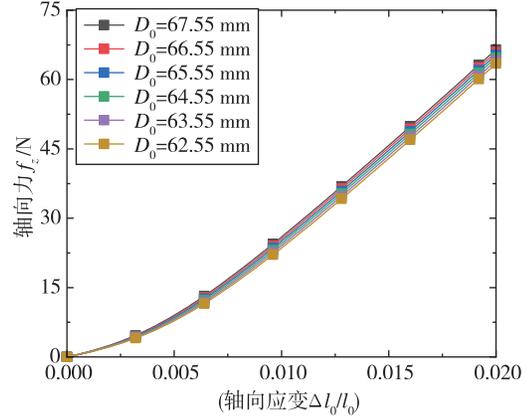


图9 不同直径下螺旋梁轴向拉伸力-应变仿真曲线

Fig. 9 Axial tensile force strain simulation curves of spiral beam with different diameters

初始的小变形范围内 (轴向应变 0.001) 的轴向刚度仿真值如图10所示。

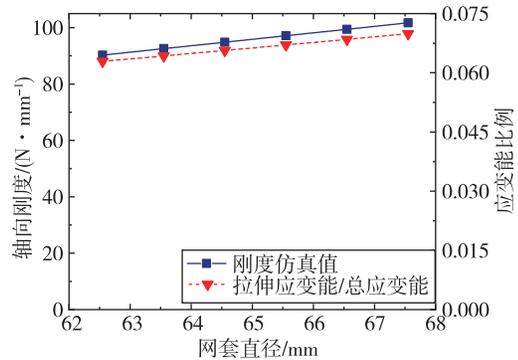


图10 螺旋梁初始轴向拉伸刚度与网套直径的关系

Fig. 10 Relationship between initial axial tensile stiffness of spiral beam and diameter of mesh sleeve

由图10可知, 螺旋梁轴向刚度随着网套初始直径 D_0 线性变化, 刚度随初始直径增大而缓慢升高。对应变能的计算表明, 网套直径对拉伸应变能比例影响较小, 与对刚度的影响趋势一致。

1.3 边界条件对轴向刚度的影响

1.3.1 固定边界与约束径向位移的循环边界

假设一种理想情形: 拉伸轴向长度极大的补偿器时, 由于网套的径向收缩效应 (见图6), 其中的网套将与波纹管接触。波纹管的表面形状复杂, 如果波纹管的刚性很大, 则此时网套相当于受到周期