

柔性系固包装系统数值模拟关键技术

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2025.1006

王 虎¹ 唐文评²

1. 湖南弘辉科技有限公司

湖南 株洲 412007

2. 湖南工业大学

包装与材料工程学院

湖南 株洲 412007

摘 要: 对重型包装柔性系固系统的数值模拟分析方法进行了研究。利用 workbench 的 CABLE280 单元模拟捆扎系统中的柔索结构, 探究了该单元对捆扎物几何形状、绳索预紧力、绳索松弛特性的模拟能力。分析了捆扎物几何形状对绳索模拟精度的影响; 设计了绳索松弛特性仿真实验, 研究了 CABLE280 单元对柔索的模拟能力。研究表明: CABLE280 单元能够模拟绳索的预应力及松弛特性, 通过对捆扎物的边缘结构进行几何处理及预应力施加, CABLE280 能够用于模拟包装系统的柔索结构。

关键词: 柔性系固; 数值模拟分析; CABLE280 单元; 松弛特性; 重型包装

中图分类号: TB485.3

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2025)01-0047-9

引文格式: 王 虎, 唐文评. 柔性系固包装系统数值模拟关键技术 [J]. 包装学报, 2025, 17(1): 47-55.

1 研究背景

柔性系固是运输包装中常见的货物固定方式。柔性系固质量轻、柔软易折叠、收缩比例大、在拉伸状态下能够承受较大的载荷, 具有适应性强、保护好、操作简便、成本低、易于存放并可重复使用等优点。先进重型装备或军用装备往往在实际储运前就要探究各个环节的安全性。因此, 研究柔索的力学性能特点和数值模拟方法, 对提高柔性系固装置的安全性, 优化系固方案, 提高运输包装设计效率具有重要意义。柔索动力学模型建模方法主要有连续体法、离散刚体法、绝对节点坐标法。采用连续体法能够较真实地反映柔索的动力学特性, W. Lacarbonara 等^[1]基于柔索的非线性黏弹性本构关系和不可压缩条件, 建立了几何精确的柔索动力学模型。N. Barbieri 等^[2]基于 Euler-Bernoulli 梁模型建立了电缆动力学偏微分方程, 通过施加脉冲激励分析线缆的振动特性。G. Rega^[3-4]对悬索的建模问题及其特有的非线性现象进行分析,

推导了悬索的连续性方程, 给出了悬索线性化模型的解析解。连续体法用非线性偏微分方程数值求解较困难, 主要用于理论分析, 在实际工程中应用较少。

离散化方法将连续的物理量或数学函数转化为有限个数的参量, 以便进行数值模拟。考虑工程应用需进行大量计算, 有限段法和集中质量法对柔索进行离散更有利于数值模拟分析。这两种方法都是将柔索离散成多个刚体, 利用弹性原件和相应的阻尼进行连接, 提高了工程计算的可行性。J. Quisenberry 等^[5]在集中质量模型基础上提出刚性杆模型, 相比于集中质量模型单元, 刚性杆单元的质量分布均匀。T. Takagi 等^[6]应用集中质量方法, 开发了用于渔业捕捞的 NaLA 系统。杨祥云等^[7]利用集中质量法对脐带缆进行简化建模, 得到在采矿车深海布放回收中脐带缆张力随有义波高和谱峰周期的变化规律。赵国伟等^[8]分别用集中质量球单元和杆单元近似柔性网目节点和节点间的网线, 结合 Kawabata 拉伸张力应变模型, 建立了柔性网体的动力学模型, 运动仿

收稿日期: 2024-10-10

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (2023YFC3904603); 湖南省自然科学基金联合基金资助项目 (2022JJ30223)

作者简介: 王 虎, 男, 高级工程师, 主要研究方向为树脂基复合材料, E-mail: wanghoo@qq.com

真结果与实验结果一致。这两种离散方法计算方便,但由于单元为刚性体,因此难以真实反映柔索的本构力学特性,且无法准确描述柔索的大变形运动,为保证精度需要进行密集离散,消耗大量的计算资源,求解效率较低。

绝对节点坐标方法 (absolute node coordinate formulation, ANCF) 以连续介质力学理论为基础,将柔索划分为一系列索梁单元进行建模,可以较为精确地反映柔索本构力学特性,建模精度高且便于计算机程序化。A. A. Shabana^[9] 提出了绝对节点坐标方法,该方法以连续介质力学理论为基础,主要解决大变形柔性体动力学问题。郑茂盛等^[10] 利用 Kelvin-Voigt 模型来解释内层结构的黏弹性特征,将改进的 Yeoh 模型应用于护套层单元当中,提出一种适用于线缆动力学建模的 ANCF 缆索单元。沈剑等^[11] 基于绝对节点坐标法建立了柔性绳索体模型,研究表明,采用绝对节点坐标法能够高效地进行柔性绳索体大变形、大位移运动仿真计算。张越^[12] 的研究表明,ANCF 柔索单元的轴向应变和弯曲应变相互耦合,会影响模型精确性。并提出了一种应变解耦模型,该模型的计算效率和精度更高,应变连续性更好。绝对节点坐标方法的提出使柔索的数值模拟精度和效率显著提高。

一些学者在梁单元的基础上改进,使用梁单元模拟柔索特性。朱大鹏等^[13] 在 Dombrowski 的基础上研究了梁单元退化成索单元的工况,并给出数值算例进行验证。A. A. Shabana^[9, 14] 基于绝对节点坐标法推导了二维梁单元,采用线性化的应变-位移关系描述单元变形。M. A. Omar 等^[15] 在 A. A. Shabana 的基础上进一步考虑梁的剪切应变,利用横向斜率定义弹性力,提出了二维剪切梁单元。

柔性系固装置能够吸收货物运输过程中产生的

冲击力,有效抑制货物在运输过程中的倾翻或滑动^[16-17]。目前柔索结构数值模拟技术在包装行业应用尚不够充分,基础探索工作有待展开。本文基于实际储运工况,探究了 Workbench 软件 CABLE280 单元对运输包装柔性系固系统的仿真能力,以期为重装备或危险品捆系方案的设计及优化提供参考。

2 柔索在运输包装中的应用与模拟方法

2.1 柔索典型的应用形式

系固和捆扎是柔索最主要的应用形式,系固索具的承载力与系固点强度的校核是系固安全性评估的重要环节。

直接系固是货物运输时的常用系固方法,在直接系固法中,纤维绑带、钢丝绳等索具将货物与运载工具的系固点连接。工程上,通常将索具的断裂强度除以相应的安全系数作为索具的许用强度。通过施加预紧力,对系固点与货物之间施加沿着索具轴向的拉力,从而固定货物。直接系固的索具收紧方式可以是环形收紧(如图 1a),也可以是单根收紧(如图 1b)。环形收紧是利用索具两端接合形成环形结构,该环形结构对系固点进行相互牵拉系固。单根绳索收紧只需要将索具两端分别与系固环进行系固,典型直接系固实例如图 2a 和图 2b 所示。

环形捆扎是用绳索、线、绑带等将物品与底托环绕成一个或多个圈进行捆扎固定,捆扎物之间相互挤压形成摩擦力而相互固定(如图 1c)。典型环形捆扎实例如图 2c 和图 2d 所示。当被捆扎物品形状不规则且捆扎方案较复杂时,其力学响应难以用解析法求解,利用有限元法对捆扎索具进行分析可促进环形捆扎带规格选用的标准化。

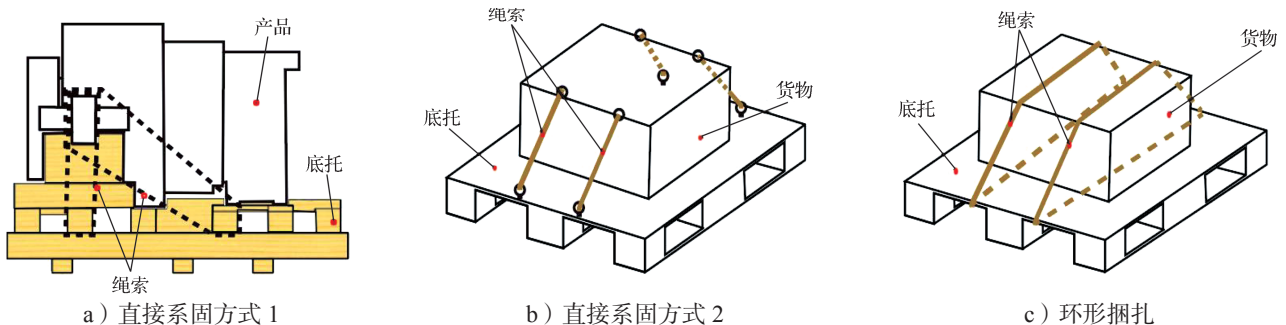


图 1 典型系固及捆扎方式

Fig. 1 Typical fastening and bundling methods

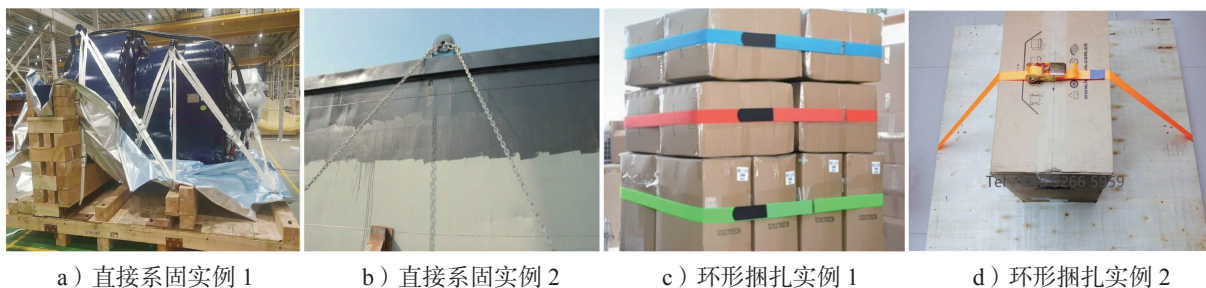


图 2 典型系固及捆扎实例

Fig. 2 Typical examples of fastening and bundling

2.2 柔索预应力模拟方法

ANSYS Workbench 提供的 CABLE280 单元模拟绑带捆扎, 与其他线单元 (如 LINK 180、BEAM 188、BEAM 189 等) 相比, 该单元采用了高阶形函数, 能实现良好的网格收敛性和较粗单元下良好的计算精度。CABLE280 是三维的二次三节点线单元, 单元几何构成如图 3 所示: 包括 I 、 J 、 K 、 L 4 个节点, 其中节点 L 为方向节点; 每个节点有 3 个自由度, 分别为 x 、 y 和 z 方向的平动。由于不受弯矩, 只有平移自由度, 计算效率高。CABLE280 基于混合位移和轴力 (U-F) 函数: 位移采用二阶近似, 轴力采用一阶线性近似。当求解高度非线性的静力学或动力学问题时, 需在大变形模式下计算 (NLGEOM, ON)。绳索模型建模思路: 首先建立线模型, 然后在材料类型选项设置 CABLE280 单元, 再将线单元离散化得到绳索有限元模型, 如图 4 所示。CABLE280 单元初始状态为松弛状态, 单元自由度不能被很好地约束。为了保证物品良好的系固稳定性, 在实际工程中捆扎带会进行预紧。为了提高计算的鲁棒性, 需给绑带施加预紧力。通过表 1 所示命令流给 CABLE280 单元施加初始应力状态, 其中 INISTATE, define, all, all,,,10 表示给所有 CABLE280 单元施加 10 MPa 应力, 则用单元横截面积与应力乘积可得到施加的设定轴力。为了提高实验鲁棒性, 捆系仿真模拟实验所用材料属性为钢丝绳材料属性, 材料参数如表 2 所示。

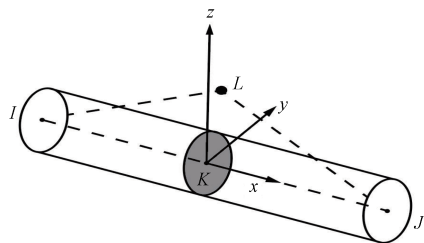


图 3 CABLE280 单元节点示意图

Fig. 3 Schematic diagram of CABLE280 element

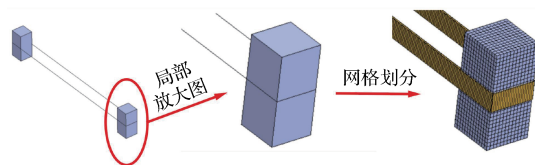


图 4 CABLE280 应用简化模型

Fig. 4 Simplified model for CABLE280 application

表 1 CABLE280 单元预紧力命令流

Table 1 Command flow for pretightening force of CABLE280

序号	命令流
1	allsel, all
2	cmsel, s, cable
3	INISTATE, define, all, all,,,10
4	allsel, all
5	/SOLU

表 2 绳索材料力学属性

Table 2 Mechanical properties of rope materials

构件	弹性模量 /MPa	密度 /(kg·m ⁻³)
绳索	2×10^5	7850

3 捆系工况模拟方法

3.1 直接系固

CABLE280 单元的节点只有平动自由度, 为了验证 CABLE280 单元模拟直接捆系时对捆扎物几何形状的适应性, 设计了 4 组预紧力模拟实验。

实验 1: 使用 CABLE280 单元建立环形绳索, 采用环形收紧方式, 对有一定距离的两个正四棱柱进行系固, 如图 4 所示。对两个四棱柱进行上下两端固定约束, 绳索与柱体表面赋予摩擦接触, 绳索的几何参数和载荷参数如表 3 所示。绳索预紧力为 100 N, 则环形绳索作用下对四棱柱的理论约束力为 200 N。

实验 2: 在实验 1 的基础上, 将四棱柱与绳索接

触的棱添加圆角 $r=10\text{ mm}$ ，其他约束条件和绳索参数保持不变，理论约束力为 200 N 。

实验 3：在实验 2 的基础上将正四棱柱转变成圆柱，圆柱的直径即正四棱柱的边长，其他约束条件和绳索参数保持不变，理论约束力为 200 N 。

实验 4：在实验 3 的基础上，将环形收紧方式简化为单根绳索的收紧方式，单绳索的两端与圆柱的印记面进行多点耦合（multipoint constraint, MPC）处理。为了等效绳索对柱体的约束力效果，将绳索横截面积设置为实验 2 的两倍，其他约束条件保持不变，理论约束力为 200 N 。

表 3 绳索单元模型参数

Table 3 Parameters of flexible cable element model

横截面参数	网格尺寸	绳索预应力载荷	预紧力	约束条件
$1\text{ mm} \times 10\text{ mm}$	1 mm	10 MPa	100 N	柱体两端固定

3.2 直接系固数值仿真结果

图 5 为实验 1~4 的捆扎物变形结果。由图可知，直角四棱柱变形量最大，集中发生在绳索与棱边接触部位；随着捆扎物圆角增大，变形部位由棱边向柱体中心靠近，最大变形量减小。

根据理论力学中关于柔索约束的受力特性可知，实验 1~3 环形系固的绳索对柱体的系固力等于 2 倍

绳索轴力；实验 4 简化成单根绳后，绳索对柱体的系固力应等于绳索的轴力，即柱体的约束反力应等于绳索轴力。

实验 1~4 中不同模型数值仿真计算结果云图如图 6 所示，约束反力数值模拟计算结果与理论结果的对比如表 4 所示。对比分析表明，实验 1 的绳索轴力与理论预紧力误差较大，约为 22.71% ，表明 CABLE280 单元对直角捆扎物模型的系固模拟能力较差。分析认为，CABLE280 单元的节点只有 3 个自由度，即 x 、 y 和 z 方向的平动，不能承受弯矩，在单元之间出现较大的横向位移变化时，会造成不理想的模拟效果，容易出现较大的计算误差。在实际应用中，为了防止绑带在拐角处的应力过高而破坏，一般在捆绑拐角处设有圆角过渡处理。基于实际工程中圆角过渡的启发，实验 2 对直角部位进行过渡圆角 $r=10\text{ mm}$ 处理，实验 2 绳索的轴力为 99.49 N ，对柱体的总约束反力为 198.91 N ，与理论值的误差约为 0.55% ；实验 3 中绳索的轴力为 97.58 N ，对柱体总约束反力为 195.01 N ，与理论值的误差约为 2.50% ；实验 4 中绳索的轴力为 199.96 N ，对柱体总约束反力为 199.96 N ，与理论值的误差约为 0.02% 。绳索简化模型利用绑定接触关系模拟系固点，建模效率较高。

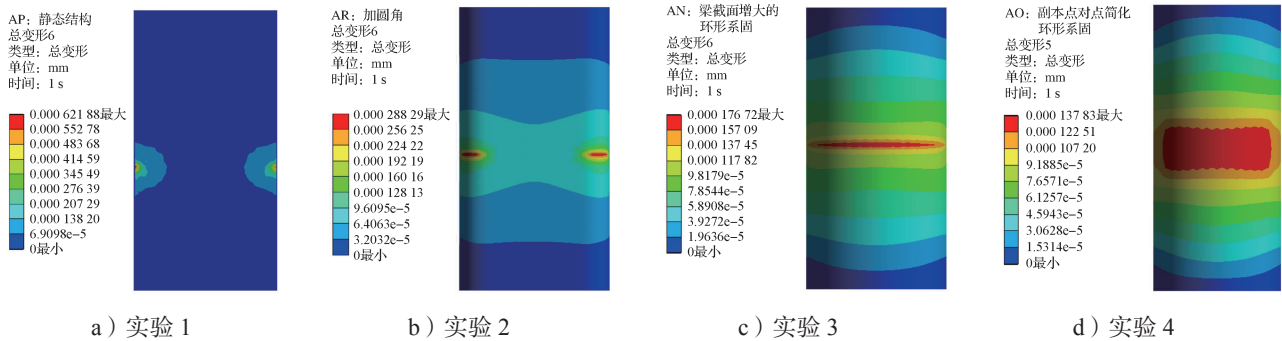
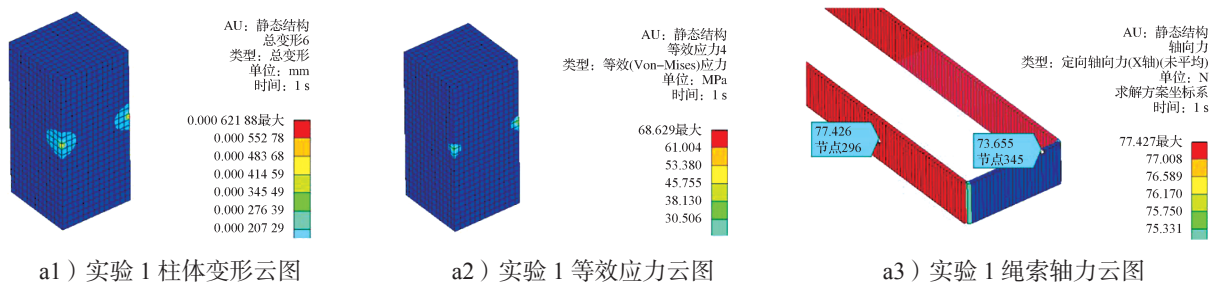


图 5 捆扎物位移云图

Fig. 5 Displacement nephogram of tied objects



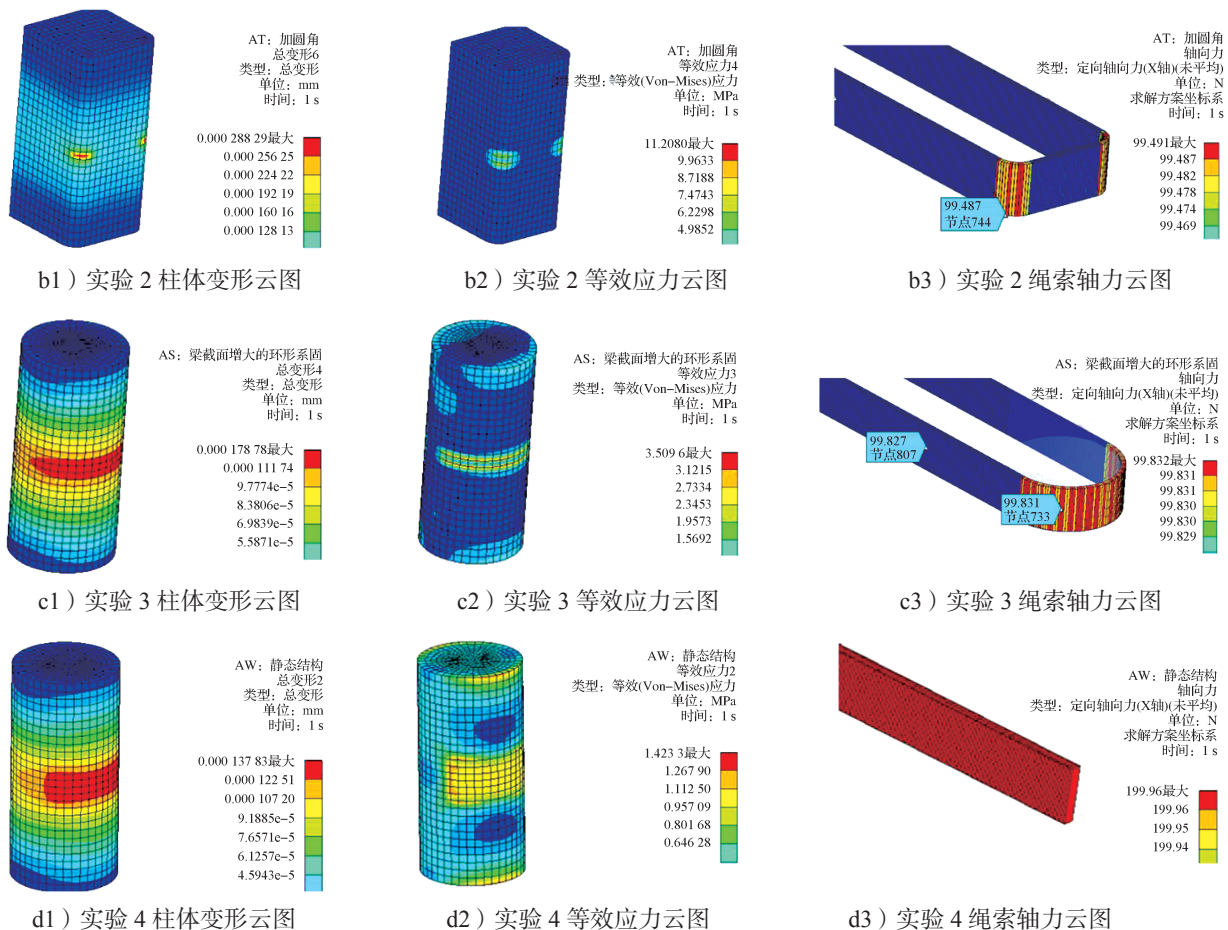


图 6 不同实验模型数值模拟计算结果云图

Fig. 6 Nephogram of numerical simulation results for different experimental models

表 4 直接系固约束反力仿真结果与理论值对比

Table 4 Comparison between simulation results and theoretical values of direct binding constraint reaction force

实验	约束反力 /N		误差 /%
	仿真结果	理论值	
实验 1	154.58	200	22.71
实验 2	198.91	200	0.55
实验 3	195.01	200	2.50
实验 4	199.96	200	0.02

3.3 环形捆扎仿真工况

将 3.1 节中所述的边缘圆角处理方法应用于环形捆扎工况, 对 A、B、C、D 4 个货物进行捆扎工况模拟, 如图 7 和图 8 所示。对图 8 所示的四棱柱棱角与绳索接触部位添加圆角处理, 给绳索施加 10 N 的预紧力, 绳索与长方体表面赋予摩擦接触关系。

模拟计算结果如图 9 和图 10 所示。由图 9 可知, 预紧力的作用表现为捆绳轴力, 捆绳轴力仿真计算结

果为 9.738 N, 与所施加预紧力结果较吻合。

对 AB 组合面与 CD 组合面的作用反力进行提取, 得到反力值为 19.37 N。根据理论力学可知, 柔性索受力方向始终沿绳索的轴线方向, AB 组合面与 CD 组合面之间的作用力理论值为 20 N, 仿真结果与理论结果较吻合。结果表明: 直接系固法仿真结果得出的圆角改进方法可以应用于环形捆扎工况分析, 在计算形状较简单模型的捆扎力时, 得到的计算结果与理论值误差较小。该仿真方法可将绳索进一步应用于更复杂的工况计算。

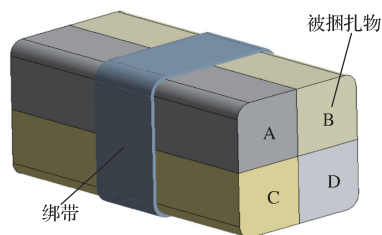


图 7 环形捆扎模型

Fig. 7 Circular bundling model

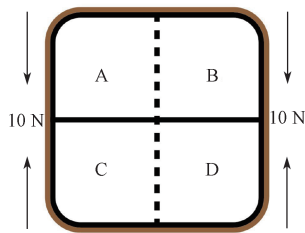


图 8 环形捆扎受力分析

Fig. 8 Force analysis of circular bundling

D: 副本静态结构
轴向力
类型: 定向轴向力(X轴)(未平均)
单位: N
求解方案坐标系
时间: 1 s
变形比例因子: 1.0(真实尺度)

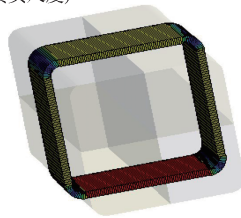
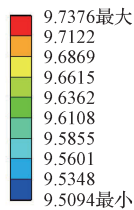


图 9 环形捆扎物体间压力分布情况

Fig. 9 Distribution of pressure between circular bundled objects

D: 副本静态结构
压力
类型: 压力
单位: MPa
时间: 1 s
变形比例因子: 1.0(真实尺度)

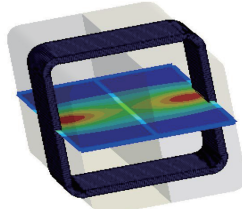
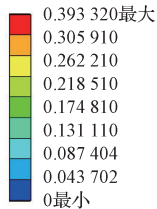


图 10 环形捆扎轴力结果

Fig. 10 Axial force results of circular binding

4 松弛特性仿真实验

4.1 松弛特性仿真实验工况

绳索松弛特性表现为: 初始张紧状态下绳索拉伸刚度较大, 表现出线弹性特性; 绳索两端从相互远离到相互靠近的过程中, 绳索的拉伸刚度逐渐减小直至接近于零, 表现为绳索由拉紧状态变成松弛状态, 绳身在重力作用下自然下垂。实际的纤维绳索具有不可抗压性和松弛特性, 为了验证 CABLE280 单元可以模拟该绳索特性, 设计实验模型如图 11 所示。图中底部滑板与两边系固墙连为一个整体, 中间的正方体滑块置于中心位置并与底部滑板摩擦接触, 滑块两

端分别通过两条绳索连接到系固墙体。首先对绳索施加 400 N 的预紧力, 墙体外侧与滑板底面均设置固定约束, 加速度场为一个标准的重力加速度和水平向左的加速度。为了使滑块出现滑动, 加速度大小应足以克服滑块与底部滑板的静摩擦力。若滑块向右滑动, 右侧绳索出现松弛特性, 说明 CABLE280 单元具有较好的绳索松弛特性模拟能力。绳索和滑块赋予材料属性如表 5 所示, 载荷参数如表 6 所示。

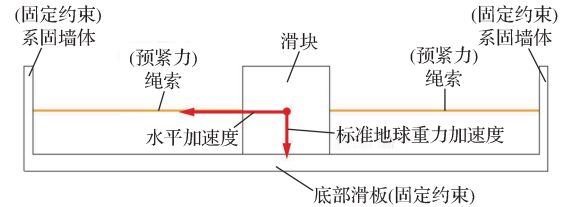


图 11 绳索松弛特性仿真模型示意图

Fig. 11 Schematic diagram of simulation model for

rope slack characteristics

表 5 松弛实验材料属性

Table 5 Properties of slack experimental materials

构件	弹性模量 /MPa	密度 /(kg·m ⁻³)	尺寸	横截面积
滑块	2×10^5	7850	1000 mm × 1000 mm × 1000 mm	
绳索	2×10^5	7850		400 mm ²

表 6 松弛实验载荷参数

Table 6 Load parameters for slack experiment

标准地球重力加速度	水平加速度	摩擦系数	预紧力
9806 mm/s ²	2500 mm/s ²	0.2	400 N

4.2 松弛特性仿真结果

根据理论计算, 物体重力为 76 977.10 N, 受到水平向左的摩擦力为 15 395.42 N, 水平加速度载荷产生向右的惯性力为 19 625.00 N, 惯性力比摩擦力大 4229.58 N。仿真结果如图 12~16 所示。由图 12 可知, 右绳发生松弛类型变形, 左绳轴力最大为 4520.8 N。结合图 14~15 可知, 时间达到 1.8 s 左右时, 右绳在短时间内发生松弛波动。如图 13 的云图所示, 变形量最后稳定在 9.3408 mm, 最大位移处于右绳中间段, 呈下垂状态, 与松弛特性比较相符。

上述结果表明: 当时间到达 1.8 s 附近时, 滑块开始经过短暂的滑动后停止, 左绳轴力以较快速度增加, 达到 4520.8 N 左右时趋于稳定, 右绳轴力下降到 0; 系统稳定后, 右绳变形量呈中间高、两边低的特点, 变形状态表现为中间下垂状态。以上特性与绳索的松弛特性相吻合, 表明 CABLE280 对绳索的松弛特性具有较好的模拟能力。

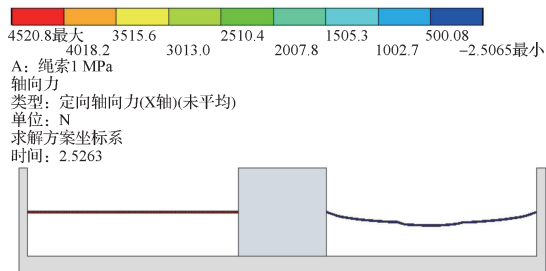


图 12 松弛模型绳索轴力结果

Fig. 12 Axial force results of the slack model rope

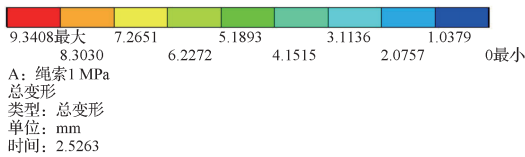


图 13 松弛模型整体变形结果

Fig. 13 Overall deformation results of the relaxation model

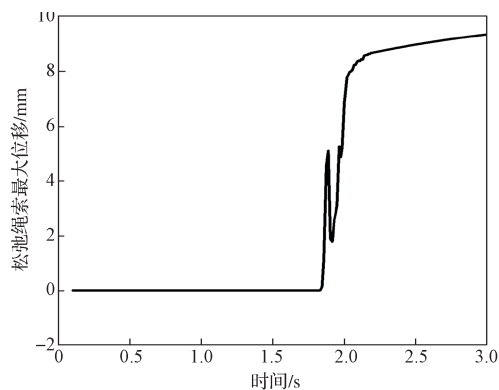


图 14 松弛绳索最大位移变化曲线

Fig. 14 Maximum displacement variation curve of slack rope

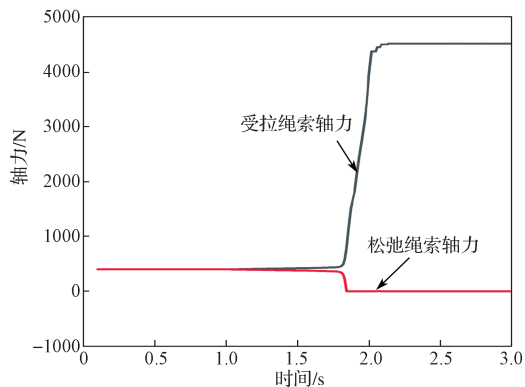


图 15 受拉绳索与松弛绳索轴力变化曲线

Fig. 15 Axial force variation curve of curve of tension rope and relaxation rope

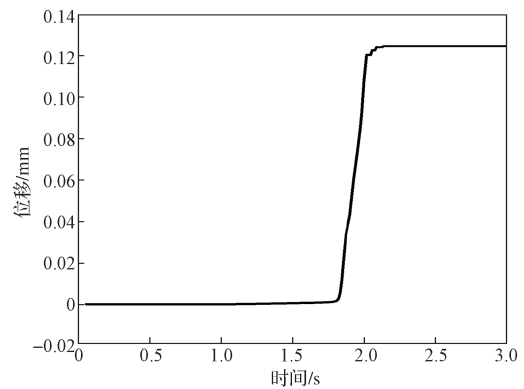


图 16 滑块位移变化曲线

Fig. 16 Displacement variation curve of slider

5 柔性系固仿真模拟实际应用

图 17 为某机电产品储运装置及绳索系固示意图, 该绳索的额定承载能力为 50 000 N, 将环形系固简化成直接系固。图 18 为左右侧绳索系固位置与对应绳索编号, 绳索横截面尺寸为 10 mm × 50 mm, 对其施加 10 MPa 预应力, 即 5000 N 预紧力, 绳索与产品采用 MPC 绑定约束方式。

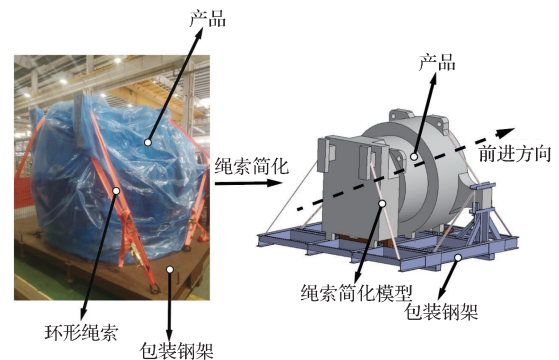


图 17 产品储运装置及系固绳索简化示意图

Fig. 17 Simplified schematic diagram of product storage and transportation device and fastening rope

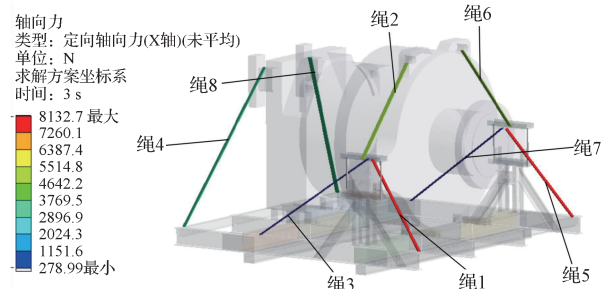


图 18 系固绳索编号及轴力结果图

Fig. 18 Number and axial force results of the fixed rope

仿真模拟工况：对产品储运装置的钢架底部进行固定支撑约束，产品与包装设置 0.4 的摩擦接触，施加前进方向 0.8g 的加速度，产品有向后运动趋势。绳索网格尺寸为 20 mm，各绳索的轴力计算结果如表 7 所示。表 7 轴力结果表明，水平冲击工况下，各绳索均满足额定承载能力要求。

表 7 绳索的应轴力计算结果
Table 7 Calculation results of axial stress of ropes

绳索 编号	1	2	3	4	5	6	7	8
轴力 / N	8132.7	4825.9	279.0	3572.1	8122.4	4984.0	308.2	3575.9

6 结论

本文利用 ANSYS 的 CABLE280 单元设计不同实验对重型包装系固绳索进行了数值模拟，并与理论计算值进行对比，可得以下主要结论：

1) 系固结构的直角会影响 CABLE280 单元的绳索模型计算精度；对直角或锐角添加圆角处理，可以降低模型仿真计算的轴力与理论计算值之间的误差。利用圆角处理可以模拟环形捆扎工况，提取内部受力、压力情况，对环形捆扎用料计算具有重要意义。

2) 将环形系固模型简化成直接系固模型，可以减少复杂捆系工况数值分析的工作量，可操作性强，计算结果与理论值之间误差较小；但是 MPC 多点耦合使系固点刚度偏高，系固部位有一定的变形和应力误差。

3) CABLE280 单元能够对绳索松弛特性进行真实的模拟，能够达到工程应用要求。

4) 本研究验证了 ANSYS 的 CABLE280 单元可用于运输包装柔性系固的仿真计算，为包装系统柔性系固方案的设计及安全评估提供了新的解决思路。

参考文献：

[1] LACARBONARA W, PACITTI A. Nonlinear Modeling of Cables with Flexural Stiffness[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2008(1): 1-21.
[2] BARBIERI N, DE SOUZA JÚNIOR O H, BARBIERI R. Dynamical Analysis of Transmission Line Cables. Part 1: Linear Theory[J]. Mechanical Systems and Signal

Processing, 2004, 18(3): 659-669.
[3] REGA G. Nonlinear Vibrations of Suspended Cables: Part I: Modeling and Analysis[J]. Applied Mechanics Reviews, 2004, 57(6): 443-478.
[4] REGA G. Nonlinear Vibrations of Suspended Cables: Part II: Deterministic Phenomena[J]. Applied Mechanics Reviews, 2004, 57(6): 479-514.
[5] QUISENBERRY J, ARENA A. Discrete Cable Modeling and Dynamic Analysis[C]//44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston: AIAA, 2006: 424.
[6] TAKAGI T, SHIMIZU T, SUZUKI K, et al. Validity and Layout of “NaLA”: A Net Configuration and Loading Analysis System[J]. Fisheries Research, 2004, 66(2/3): 235-243.
[7] 杨祥云, 吕海宁, 杨建民, 等. 深海采矿车布放回收中脐带缆轴向张力响应特性研究 [J]. 海洋工程, 2023, 41(5): 128-138.
[8] 赵国伟, 熊会宾, 黄海, 等. 柔性绳索体展开过程数值模拟及实验 [J]. 航空学报, 2009, 30(8): 1429-1434.
[9] SHABANA A A. An Absolute Nodal Coordinate Formulation for the Large Rotation and Deformation Analysis of Flexible Bodies[R]. Chicago: University of Illinois, 1996: 23-26.
[10] 郑茂盛, 陈建平, 童明波. 一种新开发的 ANCF 绳索单元 [J]. 科学技术与工程, 2024, 24(8): 3063-3071.
[11] 沈 剑, 韩 峰, 陈 放, 等. 基于绝对节点坐标法的柔性绳索体建模仿真研究 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16(31): 1-7.
[12] 张 越. 基于 ANCF 的柔索动力学建模与自适应计算研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
[13] 朱大鹏, 路英杰, 汤家力, 等. 大变形索梁单元在多元体动力学框架下的应用 [C]//2007 全国结构动力学学术研讨会论文集. 北京: 清华大学工程力学系, 2007: 85-111.
[14] SHABANA A A. Definition of the Slopes and the Finite Element Absolute Nodal Coordinate Formulation[J]. Multibody System Dynamics, 1997, 1(3): 339-348.
[15] OMAR M A, SHABANA A A. A Two-Dimensional Shear Deformable Beam for Large Rotation and Deformation Problems[J]. Journal of Sound Vibration, 2001, 243(3): 565-576.

- [16] 张立群, 黄雨促. 重大件货物多式联运技术分析及应
用 [J]. 物流技术, 2019, 38(9): 96-102.
- [17] 黄雨促. 基于 ANSYS 的海工重大件刚性系固分析 [J].

船舶工程, 2020, 42(3): 123-127.

(责任编辑: 邓光辉)

Key Technology in Numerical Simulation of Flexible Securing Packaging System

WANG Hu¹, TANG Wenping²

(1. Hunan Honghui Technology Co., Ltd., Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. College of Packaging and Materials Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: A numerical simulation analysis method was studied for the flexible securing system of heavy-duty packaging. The CABLE280 element of workbench was used to simulate the flexible cable structure in the bundling system, and the simulation ability of this element in the geometric shape of the bundling object, the pre tension force of the rope, and the relaxation characteristics of the rope were explored. The influence of the geometric shape of the tied object on the accuracy of rope simulation was analyzed. The simulation analysis experiment on the relaxation characteristics of flexible cables was designed and the simulation ability of the CABLE280 element in flexible cables was studied. The analysis results indicate that the CABLE280 element can simulate the pre stress and relaxation characteristics of ropes. By geometrically processing the edge structure of the tied object and applying pre stress, CABLE280 can be used to simulate the flexible cable structure of packaging systems.

Keywords: flexible securing; numerical simulation analysis; CABLE280 element; relaxation characteristics; heavy-duty packaging