

整流罩结构中的新型弹簧设计及性能校核

张梦琦¹, 宋立¹, 王晓龙¹, 徐庆敏¹, 栾贻浩¹, 李洁¹, 李承业²,
王立朋², 王立军¹, 邵明哲^{1*}

(1.天津科技大学 轻工科学与工程学院, 天津 300457; 2.光年探索(江苏)空间技术有限公司,
江苏 苏州 215411)

摘要: **目的** 针对整流罩分离系统的轻量化需求, 设计开发了一种新型复合材料扭杆弹簧, 较传统钢弹簧减重 50%。**方法** 该设计利用内外管体的反方向扭转储存弹性势能, 据此解析弹力与行程等结构参数的理论关系; 根据弹力 15 000 N、行程 150 mm 的实际应用要求, 设计整套扭杆弹簧结构, 并通过有限元仿真进行强度校核。**结果** 该结构所受应力在材料承受范围内, 该设计方案能满足使用需求。**结论** 该设计适用于火箭、导弹整流罩定向分离, 大型设备振动防护和载具的悬挂稳定, 为高性能弹簧的设计和制造提供了新的理论和实践基础。

关键词: 扭杆弹簧; 有限元分析; 复合材料; 结构设计; 强度分析

中图分类号: TB472

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2025)07-0249-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.07.029

Design and Performance Verification of Novel Spring in Fairing Structures

ZHANG Mengqi¹, SONG Li¹, WANG Xiaolong¹, XU Qingmin¹, LUAN Yihao¹, LI Jie¹,
LI Chengye², WANG Lipeng², WANG Lijun¹, SHAO Mingzhe^{1*}

(1. College of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China; 2. Light-year Exploration Space Technology Company, Jiangsu Suzhou 215411, China)

ABSTRACT: In order to meet the lightweight requirements of a fairing separation system, the work aims to design and develop a novel composite torsion spring with weight decreasing by 50% compared to traditional steel springs. In this design, the opposite-direction torsion of the inner and outer tubes was utilized to store elastic potential energy, and based on this, the theoretical relationship between elasticity and stroke, as well as other structural parameters, was analyzed. In practical applications for the specified model, with a support reaction force of 15 000 N and a stroke of 150 mm, the entire torsion spring structure was designed and its strength was validated through finite element simulation. The stress borne by the structure was within the material bearing range, and the design scheme met the use requirements. This design is suitable for directional separation of rocket and missile fairing, vibration protection of large equipment, and suspension stability of high-speed vehicles. It provides a new theoretical and practical foundation for the design and manufacture of high-performance springs.

KEY WORDS: torsion spring; finite element analysis; composite materials; structure design; strength analysis

整流罩是导弹与火箭等运载器中的重要结构, 不仅要在飞行过程中维持运载器的良好气动外形, 还要为卫星、弹头等运载目标提供充足的力、热、电磁防

护性, 使其免受外界环境的影响。不同于一般运输装置, 整流罩与结构母体的分离过程尤为重要, 2011年“辉煌”号卫星以及 2009 年“嗅碳”号卫星均因整流

罩脱离事故而导致发射失败^[1]。另一方面,整流罩运载结构对质量尤为敏感,欧美及俄罗斯的火箭发射成本在 8 000~15 000 美元/kg,我国长征系列火箭进入太空的成本为 6 400 美元/kg^[2],因此,开发新型可靠的轻质弹簧用于整流罩分离十分必要。

弹簧是一种常见且极为重要的机械部件,广泛应用于吸收冲击、控制运动以及维持预定力量和应力水平。现有的几种类型弹簧已得到广泛应用,包括压缩弹簧、牵引弹簧和扭转弹簧^[3-5]。传统弹簧大多由金属制成,金属弹簧强度高、适用范围广,但在电化学稳定性、储能密度方面还有较大提升空间。当前,通过使用纤维增强聚合物复合材料替代传统的钢弹簧,进而实现减质及提升弹簧弹力十分可行^[6-20]。詹博文等^[7]提出一种复合材料螺旋弹簧“材料-结构-性能”集成设计方法,设计的复合材料弹簧方案比金属弹簧质量减少 34.4%; Stephen 等^[11]研究了钢、S-玻璃环氧树脂复合材料和环氧-碳预浸料复合材料作为汽车悬架弹簧的适用性,表明复合材料的强度质量比远高于钢弹簧,且质量减少 75%~80%; Chen 等^[12]研究了 3 种具有单向、多股和缠绕织物结构增强体的轻质聚合物基复合材料螺旋弹簧,对比同性能钢弹簧,它们质量分别仅为钢弹簧的 75%、63%和 49%;郭妍等^[14]针对汽车悬挂系统使用的传统弹簧容易产生扭杆弯曲、硬度不均等现象,采用芳纶纤维设计了一种新型复合材料扭杆弹簧。上述研究表明,复合材料制成的弹簧相比传统金属弹簧具有更高的比刚度、比强度以及更优越的抗疲劳性能,同时极大地减小了弹簧质量,在飞行器、汽车等高速载具中具有显著优势。另一方面,复合材料弹簧产品目前尚集中在加工工艺较为简单的弹簧板、鳍状弹簧,在制造大型螺旋弹簧过程中仍存在一些技术难题亟需解决,如成型工艺较复杂、纤维铺层的方向和角度控制具有一定难度、复材螺旋弹簧的尺寸和形状较难保持一致等。

针对这些问题,本文结合火箭整流罩中弹簧分离系统的具体应用,基于结构力学原理和有限元分析方法,提出了一种新型复合材料扭杆弹簧设计方案。该设计综合了金属材料与复合材料的优势,采用复合材料筒式结构代替弹簧螺旋结构,规避了复合材料制成螺旋形状的工艺复杂性。其实际应用在某型号整流罩上,将现有的钢弹簧质量减少 50%以上。文中首先阐述了复合材料扭杆弹簧的部件结构组成;随后分析了该弹簧的理论弹性性能;针对某型号火箭整流罩的具体设计要求,进行了结构参数设计优化,并通过理论计算和仿真对设计进行了校核。

1 扭杆弹簧结构设计及原理

本文设计的新型扭杆弹簧如图 1 所示,主要由导

轨部件、扭杆部件、套筒连接构成。其中,下端扭杆通过内外管体反方向扭转储存弹性势能,通过延伸扭臂与上端导轨接触,导轨的倾斜角决定了弹性势能的释放速度,体现为支反力的大小,该支反力还受到扭臂在导轨上的摩擦影响。

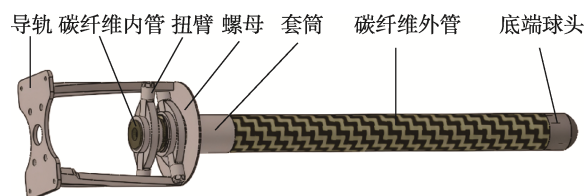


图 1 扭杆弹簧结构

Fig.1 Structure of torsion spring

导轨部件如图 2a 所示,由左右 2 根支臂和顶端 1 块支撑板焊接构成。图 2b 展示了支臂及其展开图,平面展开形状可看成四边形,四边形的侧边为扭臂在轨道上的接触面,即扭臂的运动路径,该路径通过螺旋线切削而成,螺旋线的圈数及螺距来源于弹簧的预设压缩行程及内外管体扭转角;主要设计参数为轨道长度 h 以及 $\theta_{内}$ 和 $\theta_{外}$,轨道长度 h 与弹簧的压缩行程一致,在解除固定销钉后弹簧移动并释放弹性储能。 $\theta_{内}$ 和 $\theta_{外}$ 分别为 2 条螺旋线展开平铺时与轴的夹角。由于外管具有更大的半径,同等扭转角度时其表面承受的应力更大,因此外管的最大偏转角小于内管,故轨道两侧并不对称,其倾斜角 $\theta_{内} > \theta_{外}$ 。

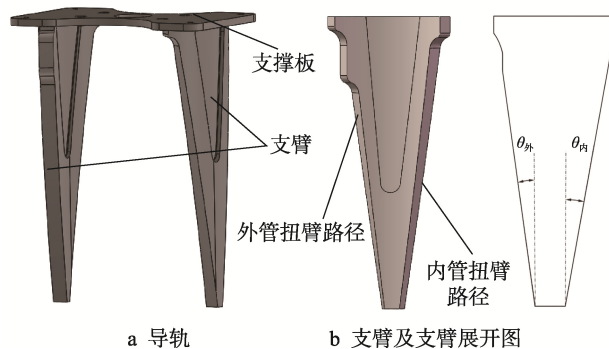


图 2 导轨及导轨支臂结构

Fig.2 Structure of guide rail and guide rail support arm

扭杆部分由内外管体、螺母和扭臂组成。如图 3a 所示,外管为空心结构,内管为嵌套在外管中的实心管体,二者间留有空隙。内外管体通过底端螺纹配合实现连接,上端分别通过螺纹配合连接各自的螺母,每个螺母 2 侧连接 2 根扭臂,如图 3b 所示。

套筒与导轨部件底端焊接在一起,主要作用是在弹簧安装前连接导轨部分与扭杆部分,同时防止扭杆部分晃动。底端球头与外管管体通过过盈配合连接,主要作用是避免弹簧因侧向力而滑动或位移,减少弹簧在工作台或固定基座上的摩擦和磨损,从而提高弹簧的寿命。

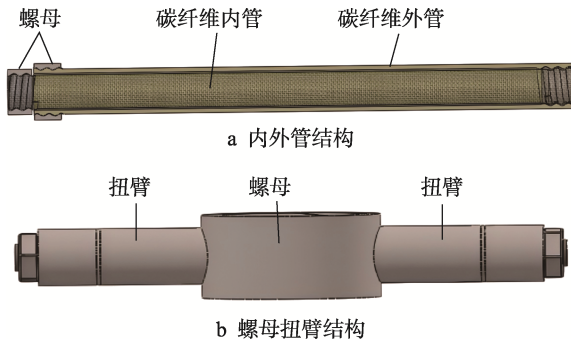


图 3 内外管连接及螺母结构

Fig.3 Connection of inner and outer pipes and nut structure

具体工作流程如下: 当扭杆部件受外力向上提拉时, 扭臂部分沿导轨支臂的既定路径向上运动, 与内管连接的螺母扭臂沿着导轨顺时针扭转, 带动内管同向旋转; 与外管连接的扭臂沿导轨逆时针扭转, 带动外管同向旋转, 直到扭杆部件运动到预定的压缩行程。图 4 展示了压缩后的弹簧结构。当外力卸除后, 管体会趋向恢复至其原始形态, 进而释放弹性势能。该力学过程使该复合材料扭杆弹簧能实现与传统螺旋弹簧相同的功能, 即在轴向提供推力, 完成相似的弹性运动效果。



图 4 扭杆弹簧压缩后结构

Fig.4 Structure of torsion spring after compression

在该结构中, 弹性势能的存储主要依赖复合材料管体的扭转, 使用内外套管同时反方向、等扭矩扭转, 通过特定支架 (即导轨) 将扭转力转换成轴向推力。当不考虑摩擦等能量损耗时, 其转换关系见式 (1)。

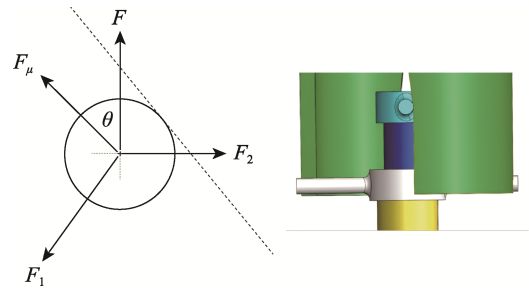
$$dw = Fdl = Td\alpha \quad (1)$$

式中: w 为功; F 为弹力; l 为弹簧压缩行程; T 为内外管扭矩; α 为复材管体扭转角度。

弹簧在预压缩和释放弹力的过程中, 扭臂与导轨接触部位会受到摩擦力的影响。考虑到摩擦力的因素, 根据扭杆弹簧的运动过程需对扭臂与导轨接触部位进行受力分析。以扭臂为分析对象, 如图 5 所示, 假设斜虚线为导轨路径, 圆面对应扭臂末端面, 运动过程中扭臂会受到 3 个分离力的影响。

图 5 中: F_1 为导轨路径对扭臂的正压力; F_2 为水平方向的扭转力; F_μ 为沿导轨路径方向的摩擦力。其中 F_μ 为滑动状态下的库仑摩擦力, 可由正压力表示为 $F_\mu = \mu F_1$ [21]。图 5 受力可表示为式 (2)。

$$\begin{cases} \mu \cos \theta F_1 + F = \sin \theta F_1 \\ \mu \sin \theta F_1 + \cos \theta F_1 = F_2 \end{cases} \quad (2)$$

图 5 扭臂处受力分析与对应视图
Fig.5 Force analysis and corresponding view at the torsion arm

解式(2)可得式 (3)。

$$F = \frac{F_2 (\sin \theta - \mu \cos \theta)}{\mu \sin \theta + \cos \theta} \quad (3)$$

其中, F_2 可根据材料力学公式得出, 见式 (4)。

$$T = 2RF_2 \quad (4)$$

式中: T 为扭矩; R 为复合材料扭杆圆心到一侧扭臂末端的距离。扭臂扭转运动轨迹可简化如图 6 所示, 将导轨视为圆柱体, 当管体受外力作用发生扭转时, 带动扭臂发生运动, 扭臂运动轨迹则为某一点从圆柱体底端面沿着曲面运动至上端面, 即图中虚线所示, 由运动轨迹虚线、圆柱高和 θ 所对应的圆弧线平铺展开即为图 6 中右图所示情形, 由此可得 θ 的关系式 (5)。

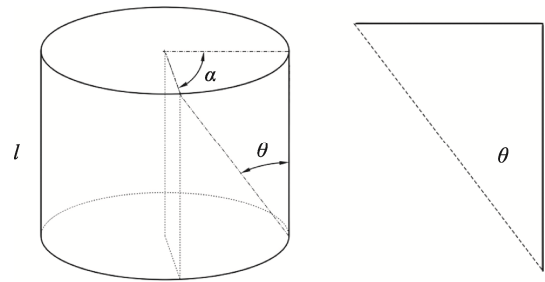


图 6 扭臂运动轨迹

Fig.6 Trajectory of the torsion arm

$$\tan \theta = \frac{\alpha R}{l} \quad (5)$$

由此结合式(3)~(5), 可计算出摩擦力影响下的理论弹力值。

2 弹簧性能校核

在某型号整流罩弹簧分离系统的应用中, 根据设计要求, 单个弹簧需具备 150 mm 的压缩行程, 并能提供 15 000 N 的弹力。为满足此性能需求, 对弹簧进行了详细的结构参数设计, 基本参数见表 1。

表 1 结构尺寸参数

Tab.1 Structural dimension parameters

参数名称	数值	参数名称	数值	参数名称	数值
弹簧压缩前高度	760	外管长度	562	内管扭臂长度	48
径向长度	90	外管直径	46	外管螺母内径	47
横向长度	130	外管壁厚	3.6	外管螺母外径	58
内管长度	589	内管螺母内径	37	外管扭臂长度	43
内管直径	36	内管螺母外径	46	弹簧压缩行程	150

在设计过程中, 内外管体采用碳纤维 T700 (MT700-12K) 作为铺设材料; 螺母与扭臂部分选用经淬火和回火处理的 AISI4140 合金钢, 屈服强度 >800 MPa; 导轨部分采用经热处理的 Aermet100 合金钢, 屈服强度达 1 500 MPa。设计的弹簧总质量仅为 4 kg, 较原有钢弹簧质量 9~10 kg 减少 50% 以上, 极大地满足了轻量化的需求。为确保弹簧的整体强度, 以下对各个关键零件进行仿真强度校核, 确保在实际应用中具备优异可靠性等性能。

2.1 内外管体校核

在该设计中, T700 密度为 1.8 g/cm, 拉伸模量为 120 GPa, 剪切模量为 4.2 GPa, 泊松比为 0.32, 碳纤维的铺层角度采用 $[45^\circ/-45^\circ]$, 并以 6 000 微应变作为基准应变值, 通过应变与碳纤维的弹性模量计算, 得到 720 MPa 作为许用应力标准。

在 ABAQUS 软件中建立管体模型, 采用壳单元 S4R 建模。有限元模型的边界条件和载荷施加情况为: 管体上下端的边框分别通过耦合方式固定在 2 个独立结点上, 下端结点固定约束, 上端结点施加 z 方向的转角。通过静力分析计算, 在许用应力 720 MPa 条件下, 得到对应的扭矩 T 及扭转角度 α , 再基于第 1 节中的 3 个公式, 进一步计算在此条件下的弹力值, 验证是否符合设计要求。滚动摩擦因数 μ 取 0.02, 经多次迭代计算, 确定在内管直径 36 mm、外管直径 46 mm、外管壁厚 3.6 mm、 R 为 65 mm 的情况下, 管体通过扭转转化的弹力达到 15 100 N, 满足设计要求。如图 7 所示, 在此条件下, 内管扭矩为 3.4×10^6 N·mm, 扭转角度为 23.61° ; 外管扭矩为 3.6×10^6 N·mm, 扭转角度为 18.9° 。

根据管体所提供的扭矩可计算出压缩过程中所提供推力的变化情况, 如图 8 所示, 压缩行程和推力线性相关, 当压缩行程至 150 mm 时, 所提供弹力满足设计需求。

2.2 内外管螺母、扭臂及导轨校核

通过 2.1 节确定的内外管尺寸, 对螺母和扭臂进行结构设计, 在弹簧完全压缩状态下, 整个螺母和扭臂

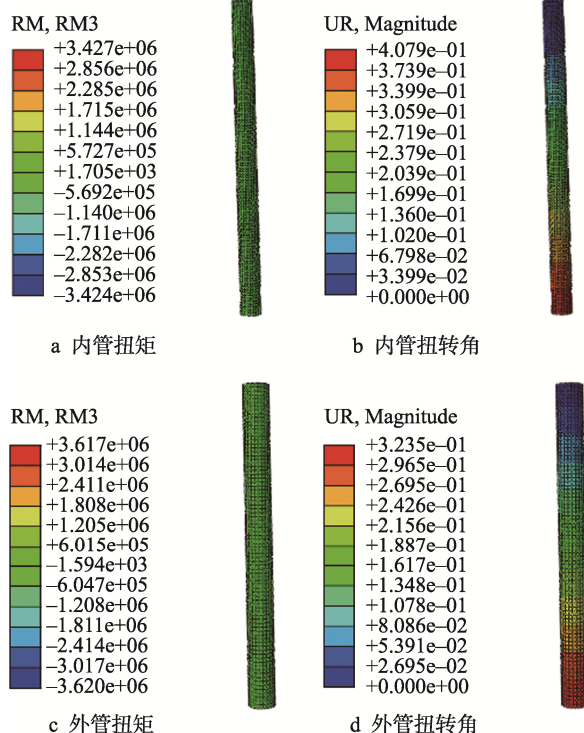


图 7 许用应力下内外管的扭矩和扭转角

Fig.7 Torque and torsion angle of inner and outer pipes under allowable stress

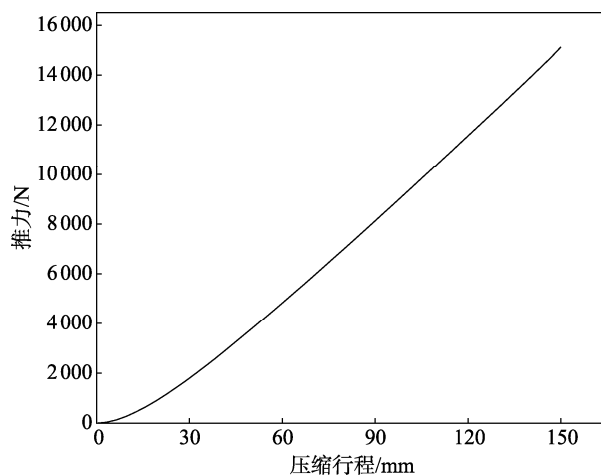


图 8 压缩过程中提供推力变化

Fig.8 Thrust variation provided during compression process

结构受到 3.4×10^6 N·mm 的扭矩。在有限元软件中建立计算模型, 整个模型采用 C3D8 六面体单元建模。根据此时螺母和扭臂的受力状态施加边界条件和载荷, 螺母和扭臂通过共节点连接, 2 根扭臂的末端边框通过耦合方式固定在螺母中心某一结点上, 并释放其 3 个方向的转动自由度; 螺母内壁完全固定约束, 对中心结点施加 y 方向、大小为 3.4×10^6 N·mm 的扭矩。导轨同样采用 C3D8 六面体单元建立有限元模型, 导轨支臂与支撑板通过 Tie 黏接, 模拟其实际安装情况, 仅固定导轨顶端面的几个螺栓孔。当压缩至行

程结束时, 导轨所受力最大, 导轨与 4 根扭臂接触部分同时受到垂直于导轨路径向内的扭转力, 大小为 27 000 N, 对导轨与扭臂接触部位分别施加同样大小的集中力载荷。

静力计算结果如图 9 所示, 整个导轨最大 Mises 应力为 1 250 MPa, 考虑到是在导轨局部区域施加较大集中力, 会出现应力集中现象。除此之外, 整个结构上端应力水平 < 900 MPa, 下端支臂应力 < 200 MPa。导轨所选取的高强度钛合金 (Ti-10V-2Fe-3Al) 能确保在该应力下的强度和可靠性, 满足设计要求。2 个结构中, 螺母和扭臂的其他区域应力普遍 < 600 MPa, 采用 AISI4140 合金钢制造, 低于材料的最大许用应力, 整个结构的安全系数 > 1.5, 满足强度要求。

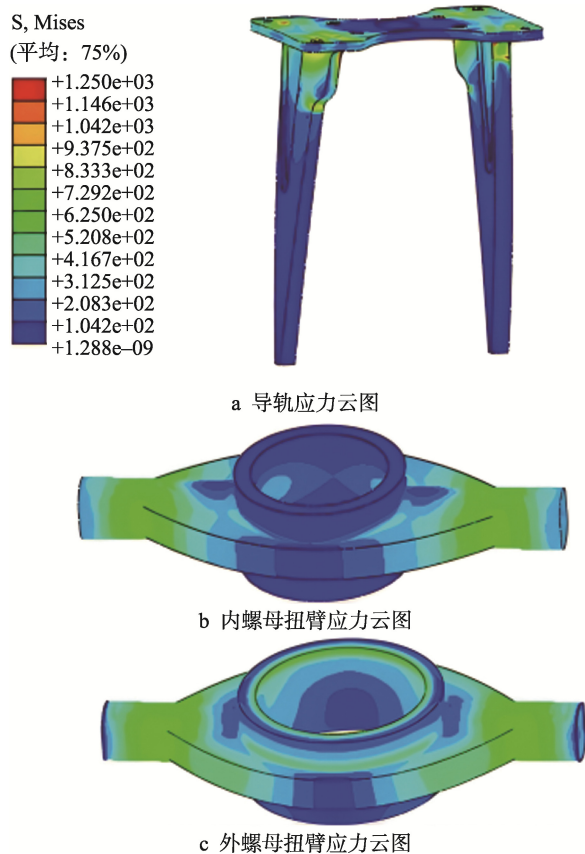


图 9 完全压缩下各部件应力云图
Fig.9 Stress cloud diagram of components under full compression

综上, 弹簧压缩至指定行程后, 各部件应力情况如图 10 所示, 内外螺母部件所受最大应力为 720 MPa, 导轨部件排除掉部分可不做参考的结点后, 整体结构应力 < 1 200 MPa, 均满足各个部件所选材质的强度要求。

2.3 弹簧应用展望

本文设计的扭杆弹簧质量轻、体积小, 不仅可应用于火箭、导弹整流罩的分离过程, 还特别适用于大型包装的缓冲减震结构支撑及各类悬挂结构。

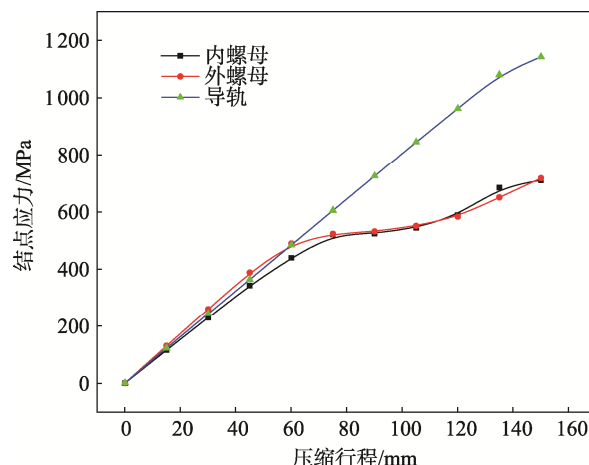


图 10 各部件压缩过程中应力变化
Fig.10 Stress changes of each component during compression

图 11 展示了一种较为典型的缓冲减震结构。在该应用中, 当货物在运输中倾斜角 < 30° 时, 单个弹簧能维持 6 t 的货物不发生侧翻。当运输货物较轻时, 无需通过延长弹簧内外管螺母支臂减小与轨道接触时的应力, 轨道直径可显著减小, 从而大幅降低弹簧质量。通过计算可得, 当每根弹簧的缓冲载荷为 1 t 时, 弹簧直径可缩减至 350 mm, 行程可减短至 100 mm, 质量约为 1 kg。当每根弹簧的缓冲载荷进一步降低至 200 kg 时, 还可通过使用铝合金及 POM、PA 等工程塑料替代原有弹簧结构降低成本和质量。

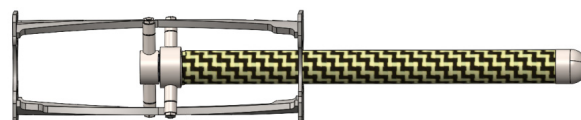


图 11 缓冲减震结构
Fig.11 Cushioning and damping structure

该弹簧较传统弹簧还有一些显著的阻尼应用优势, 特别适用于制造非线性阻尼弹簧^[22]。传统压缩弹簧实现非线性阻尼, 需通过改变弹簧结构、分段制造等复杂手段, 实际应用难度较大。但本文设计的扭杆弹簧, 通过改变轨道坡度、轨道摩擦因数及预载荷强度, 能极为便利地在 $10^{-2} \sim 10^4$ N·s/m 改变弹簧阻尼系数, 还可通过在轨道上加入平行段、限位孔段、光滑/粗糙段进一步丰富该缓冲弹簧或悬挂结构的功能。后续将结合运输包装、悬挂系统实际需求发掘该扭杆弹簧的应用, 本文不予赘述。

3 结论

基于火箭、导弹轻量化的需求背景, 对火箭整流罩分离系统中的弹簧结构进行了再设计优化, 得出结论。

1) 设计了一种新型扭杆弹簧结构, 利用内外管体的反方向扭转储存弹性势能。该结构将复材管体的扭转力通过特定的导轨转化为推力, 实现了与传统弹簧相同的性能; 较传统螺旋形状的弹簧简化了制造过程, 减少了工艺复杂性。

2) 针对该弹簧的工作原理, 对扭臂与导轨接触部位进行了分析计算, 利用材料力学原理建立了该扭杆弹簧理论弹力值的计算公式, 为弹簧性能的优化提供了理论依据。

3) 针对弹簧在某型号整流罩上的应用, 根据每根弹簧需提供 15 000 N 弹力的设计要求, 通过迭代计算设计了一组结构尺寸参数, 并进行强度校核, 确保了不同部件的选材合理性。与传统钢弹簧相比, 设计的复合材料扭杆弹簧质量减少了 50% 以上。所设计的弹簧具备广泛的应用潜力, 可扩展至大型设备振动防护、高速载具悬挂系统等多个领域。

参考文献:

- [1] 佚名. 美“辉煌”号卫星坠入南太平洋[J]. 飞行器测控学报, 2011, 30(2): 36.
Anon. The US Satellite Brilliant Crashed into the South Pacific[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2011, 30(2): 36.
- [2] 钱童心. 实现十公里级火箭回收! 中国商业航天新突破[N]. 第一财经日报, 2024-09-12(A01).
QIAN T X. Achieve 10 km Rocket Recovery! A New Breakthrough in China's Commercial Aerospace[N]. China Business News, 2024-09-12(A01).
- [3] 葛勇, 赵光艺. 碳纤维复合材料圆柱螺旋弹簧力学性能分析[J]. 装备制造技术, 2020(9): 209-212.
GE Y, ZHAO G Y. Analysis of Mechanical Properties of Carbon Fiber Composite Cylindrical Spiral Spring[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2020(9): 209-212.
- [4] 佚名. 碳纤维复合材料螺旋弹簧及其制作方法和成型模具[J]. 高科技纤维与应用, 2017, 42(2): 64.
Anon. Carbon Fiber Composite Spiral Spring and Its Manufacturing Method and Forming Mold[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2017, 42(2): 64.
- [5] WAHL A M. Mechanical Springs[J]. ASME, 1964, 31(1): 159-160.
- [6] CHIU C H, HWAN C L, TSAI H S, et al. An Experimental Investigation into the Mechanical Behaviors of Helical Composite Springs[J]. Composite Structures, 2007, 77(3): 331-340.
- [7] 詹博文, 孙凌玉, 黄彬城, 等. 车用复合材料螺旋弹簧的设计与优化[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(7): 1520-1527.
ZHAN B W, SUN L Y, HUANG B C, et al. Design and Optimization of Automotive Composite Helical Spring[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(7): 1520-1527.
- [8] 谢俊凡. 复合材料螺旋弹簧参数化仿真分析[J]. 工程机械, 2021, 52(8): 49-54.
XIE J F. Parametric Simulation Analysis of Composite Helical Spring[J]. Construction Machinery and Equipment, 2021, 52(8): 49-54.
- [9] AL-QURESHI H A. Automobile Leaf Springs from Composite Materials[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 118(1/2/3): 58-61.
- [10] WATANABE K, TAMURA M, YAMAYA K, et al. Development of a New-Type Suspension Spring for Rally Cars[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 111(1/2/3): 132-134.
- [11] STEPHEN C, SELVAM R, SURANJAN S. A Comparative Study of Steel and Composite Helical Springs Using Finite Element Analysis[C]//2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET). Dubai, United Arab Emirates: IEEE, 2019: 1-6.
- [12] CHEN L, WU L W, FU H J, et al. Design and Performance Evaluation of Polymer Matrix Composite Helical Springs[J]. Polymers, 20, 14(18): 3900.
- [13] 高蕊. 主副式复合材料板簧结构设计及性能验证[J]. 时代汽车, 2020(23): 123-124.
GAO R. Structure Design and Performance Verification of Composite Material Leaf Spring[J]. Auto Time, 2020(23): 123-124.
- [14] 郭妍, 齐禹萌, 田鹭, 等. 一种新型复合材料车用扭杆弹簧设计[J]. 内燃机与配件, 2019(24): 107-108.
GUO Y, QI Y M, TIAN L, et al. Design of a New Composite Torsion Bar Spring for Vehicle[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2019(24): 107-108.
- [15] 樊凯, 李建林, 王遵, 等. 基于 Isight 复合材料板簧的结构优化设计[J]. 纤维复合材料, 2019, 36(3): 28-33.
FAN K, LI J L, WANG Z, et al. Structural Optimization Design of Composite Leaf Spring under Isight[J]. Fiber Composites, 2019, 36(3): 28-33.
- [16] ABUTALIB A R, ALI A, GOUDAH G, et al. Developing a Composite Based Elliptic Spring for Automotive Applications[J]. Materials & Design, 2010, 31(1): 475-484.
- [17] VARMA N, AHUJA R, VIJAYAKUMAR T, et al. De-

- sign and Analysis of Composite Mono Leaf Spring for Passenger Cars[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 46: 7090-7098.
- [18] 王大鹏, 席长飞, 张小燕, 等. 重型卡车复合材料板弹簧的结构设计与分析[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2012(增刊 1): 253-255.
- WANG D P, XI C F, ZHANG X Y, et al. Structural Design and Analysis of Composite Leaf Springs for Heavy-Duty Trucks[J]. *FRP/Composite*, 2012(Sup.1): 253-255.
- [19] 郭红, 周晓伟, 张恒. 复合材料板弹簧的结构设计及其应力场分析[J]. *复合材料学报*, 1996, 13(4): 64-69.
- GUO H, ZHOU X W, ZHANG H. Stress Field Analysis and Structure Design of Composite Material Plate Spring[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 1996, 13(4): 64-69.
- [20] 段汉波, 朱伟. 航空复合材料板簧式缓冲件结构设计[J]. *机电工程技术*, 2011, 40(2): 57-59.
- DUAN H B, ZHU W. The Structural Design of Composite Board Spring Buffered Absorber[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2011, 40(2): 57-59.
- [21] MOSTAGHEL N, DVAIS T. Expression of Coulomb Friction in Dynamic Analysis[J]. *World Earthquake Engineering*, 1998(1): 86-89.
- [22] 王靖岳, 郭胜, 鄂加强. 车辆悬架部件的非线性特性研究进展[J]. *噪声与振动控制*, 2017, 37(4): 74-79.
- WANG J Y, GUO S, E J Q. Advances of Nonlinear Characteristics Research of Vehicle's Suspension Components[J]. *Noise and Vibration Control*, 2017, 37(4): 74-79.