

文章编号:1000-582X(2011)07-020-08

多股簧的设计计算及有限元仿真分析

萧 红,王时龙,周 杰,冯治恒,雷 松

(重庆大学 机械传动国家重点实验室,重庆 400044)

摘 要:根据多股簧的成形过程,分析了单股钢丝中心线的空间结构,在现有几何参数基础上计算了钢索分布圆半径、钢丝螺旋倍数和钢丝中心线的轨迹扫描参数。提出了基于特征扫描的多股簧辅助设计方法,通过一个扫描步即可得到多股簧单股钢丝中心线的模型,并给出了基于 PROE 软件的建模方法。在上述多股簧设计计算的基础上,采用模型结果,给出了多股簧加载过程中弹簧和钢丝应力应变特性的 ABAQUS 有限元仿真分析。分析结果显示了多股簧承载时钢丝的应力应变特性、钢丝截面的应力分布情况、加载速率对多股簧簧圈振动的影响,弥补了现有多股簧分析和测试手段的不足,为多股簧的生产加工和性能实验提供有效的指导。

关键词:多股簧;几何设计;有限元法;应力分析

中图分类号:TH135

文献标志码:A

Design calculation and finite element simulation analysis of stranded wire helical springs

XIAO Hong, WANG Shi-long, ZHOU Jie, FENG Zhi-heng, LEI Song

(The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University,
Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: The spatial structure of single wire is analyzed based on the forming process of stranded wire helical springs. Additionally, three parameters are derived from the existing foundation, including distribution circle radius of strand, spiral parameter of single wire and track scanning parameter. The aided design method of stranded wire helical springs based on feature scanning is put forward in which the centerline model of single wire can be obtained through one scanning step and the modeling method is given based on PROE code. The simulation analysis for spring in loading is performed by using ABAQUS code based on the calculation results. The finite element analysis results show the stress-strain ability of wire and the stress distribution of the section. The affects of loading rate on vibration of coils is also found. The results can make up for the deficiency of existing methods and give more beneficial assistance for production processing and performance test of the stranded wire helical springs.

Key words: stranded wire helical springs; geometry design; finite element method; stress analysis

收稿日期:2011-02-17

基金项目:国家杰出青年科学基金(50925518);国家自然科学基金项目(50775226);国家“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2009ZX04001-081 和 2009ZX04011-041);教育部科学技术研究重点项目(109129);重庆市科技攻关计划项目(CSTC2009AC3049)

作者简介:萧红(1979-),女,重庆大学博士研究生,主要从事多股簧的成形加工方法研究。

王时龙(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail)slwang@cqu.edu.cn。

多股簧是一类具有良好减振能力、疲劳寿命长和强度高的特殊螺旋弹簧,一般作为自动武器的复进簧使用。多股簧一般是由几股钢丝组成,每股钢丝在空间上都是二次螺旋形式,结构复杂,现有的几何参数满足不了多股簧设计和建模的需求,需要加入新的计算参数。

目前,有限元模拟和仿真技术日趋成为设计制造和性能测试的有效手段^[1-2]。在钢丝绳、多股簧这类多股缆线的研究中,Imanishi 等^[3]为解决钢丝绳缠绕的不均匀性提出了一种动态仿真方法。Sun, Wang 等^[4-6]研究了钢丝绳捻制成形后钢丝的残余应力情况,分析中考虑了捻线之间的摩擦和不同的接触状态。马军等^[7-8]研究了钢丝绳在拉伸变形过程中股内钢丝间的载荷分布情况。因此,通过有限元方法在钢丝绳的研究中取得了很大的进展。但是针对同样是螺旋结构的多股簧在承受冲击载荷时的簧圈振动情况和钢丝之间接触状态的应力分布、应变情况还未见有相关的有限元分析研究。由于有限元分析软件的自身建模功能有限,因此需要借助于 PRO/E、CATIA 和 UG 等三维建模软件进行多股簧的辅助建模,再将模型结果导入有限元分析软件中作为分析模型使用。多股簧建模的关键在于弹簧中各股钢丝中心曲线的建立,目前多股簧建模采用的方法过于繁琐^[9]。因此,在对多股簧几何参数设计的基础上,基于 PRO/E 软件,借助螺旋扫描功能进行多股簧建模的辅助设计,并使用有限元分析软件 ABAQUS 对多股簧的承载变形情况进行了模拟分析。

1 多股簧几何参数计算

1.1 多股簧钢丝的空间几何结构

目前多股簧加工多采用几股钢丝在一定张紧力作用下拧成钢索的同时绕心轴绕制而成,各股钢丝历经拧钢索和绕弹簧两个过程。分析多股簧的结构,如图 1 所示,对于绕成多股簧的任一钢丝,皆可认为是绕多股簧中心线的规律性螺旋缠绕,所以钢丝的空间几何形状与多股簧的中心线相关,而多股簧三维模型建立的关键在于钢丝中心线模型的建立。多股簧现有的几何参数表征了多股簧的几何特征,对于钢索和单股钢丝的几何特征还需要进一步进行计算,以满足多股簧生产设计和有限元分析建模的需要。因此,所需求解的几何参数围绕钢丝中心线相对于弹簧(或钢索)中心线的缠绕关系展开,主要包括求解钢丝中心线相对于弹簧中心线的螺旋半径,也就是直钢索的分布圆半径和钢丝中心线围

绕弹簧中心线螺旋缠绕的相关参数。

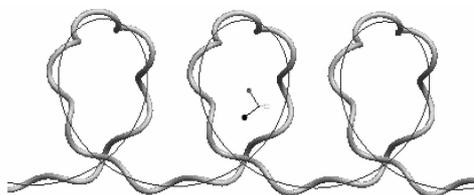


图 1 弹簧中心线和钢丝中心线的缠绕关系

1.2 钢索分布圆半径

多股簧钢索的分布圆半径参数 r 是指垂直于直钢索中心线的截面内,过同层钢丝中心点的圆的半径,其取值与钢索捻角和直径的大小有关,是影响多股簧性能的重要参数之一。现有参考资料对于钢索分布圆半径的计算多采用先假定钢索捻角,将钢丝截面椭圆化相切的近似方法,如图 2 所示(3 股钢丝为例)^[10]。经过本文的理论研究并借助于 CAD 软件精确建模得知,3 股钢丝钢索的实际截面模型如图 3 所示。因此现有计算方法不但求解过程繁琐,结果数据不准确,只能近似计算钢索的分布圆半径,也对多股簧建模的效率和准确性产生影响。

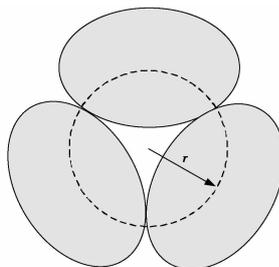


图 2 3 股钢丝钢索截面近似模型

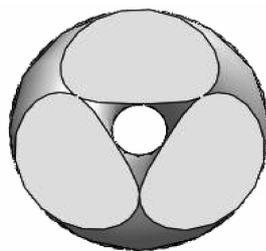


图 3 3 股钢丝钢索截面实际模型

无中心层的钢索一般为 2~4 股钢丝控制而成。对于有中心层的钢索,其各层钢丝的分布圆半径大小取决于中心层钢索的分布圆半径和外层钢丝直径的大小,所以多股簧钢索分布圆半径的计算主要针对无中心层的钢索。在工程应用中,3 股钢丝控制

的钢索常作为中心层来使用,笔者以 3 股钢丝为例进行推导计算,其他情况方法类似。

如图 4 所示,建立直角坐标系 $oxyz$,定义钢索中单股钢丝中心线的螺旋半径为 r ,螺旋升角为 β ,极角为 φ ,由一般螺旋线的性质可知钢丝中心线的方程为^[11]

$$\left. \begin{aligned} x &= r \cos \varphi, \\ y &= r \sin \varphi, \\ z &= r \varphi \tan \beta. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

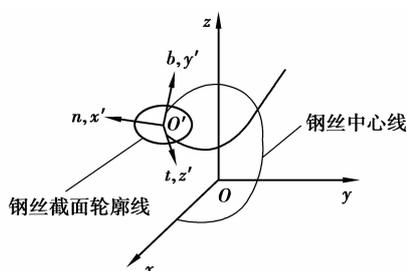


图 4 钢索钢丝中心线的模型图

沿钢丝中心线建立随动坐标系 $o'x'y'z'$, x' 轴与钢丝中心线的法向量 n 同向,且平行于 oxy 平面, y' 轴与钢丝中心线的副法向量 b 同向, z' 轴与钢丝中心线的切向量 t 同向。令钢丝直径为 d ,钢丝截面轮廓线的极角为 φ ,则钢丝的横截面方程为

$$\left. \begin{aligned} x' &= \frac{d}{2} \cos \varphi, \\ y' &= \frac{d}{2} \sin \varphi, \\ z' &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

从随动坐标系 $o'x'y'z'$ 到固定坐标系 $oxyz$ 的空间坐标轴变换公式为^[9]

$$\left. \begin{aligned} x &= a_1 + a_{11}x' + a_{21}y' + a_{31}z', \\ y &= a_2 + a_{12}x' + a_{22}y' + a_{32}z', \\ z &= a_3 + a_{13}x' + a_{23}y' + a_{33}z'. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中:

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cos \varphi \\ r \sin \varphi \\ r \varphi \tan \beta \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \sin \beta & -\sin \varphi \sin \beta \\ -\sin \varphi & -\cos \varphi \sin \beta & \cos \varphi \sin \beta \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \end{bmatrix}. \quad (5)$$

把式(2)、(4)和(5)代入式(3)中,整理可得钢丝

横截面轮廓线的方程为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(r - \frac{d}{2} \cos \varphi\right) \cos \varphi + \frac{d}{2} \sin \beta \sin \varphi \sin \varphi \\ \left(r - \frac{d}{2} \cos \varphi\right) \sin \varphi - \frac{d}{2} \sin \beta \sin \varphi \cos \varphi \\ r \varphi \tan \beta + \frac{d}{2} \cos \beta \sin \varphi \end{bmatrix}. \quad (6)$$

求解钢索截面内钢丝的轮廓线方程,可知公式(6)中 $z=0$,并且 3 股钢丝的轮廓线处于相切状态(见图 3),取其中一股钢丝的轮廓线方程,采用对分法,使用 MATLAB 软件编程,进行分布圆半径的数值求解。

1.3 钢丝螺旋倍数

钢丝螺旋倍数 c 定义为多股簧的一个簧圈内,钢丝中心线绕弹簧中心线的螺旋圈数,其值大小与多股簧的结构参数有关。

若令多股簧中心线的半径为 R ,多股簧的螺旋升角为 α ,多股簧中心线的极角为 θ ,由一般螺旋线的性质可知,多股簧的节距为 T ,则

$$T = 2\pi R \tan \alpha. \quad (7)$$

多股簧节距 T 对应于多股簧中心线的长度为

$$L = T / \sin \alpha = 2\pi R / \cos \alpha. \quad (8)$$

将多股簧的一个簧圈展开成钢索,则钢索节距 t 为

$$t = 2\pi r \tan \beta. \quad (9)$$

钢索的高度 L' 为

$$L' = ct = 2\pi rc \tan \beta. \quad (10)$$

由于 $L=L'$,即

$$2\pi R / \cos \alpha = 2\pi rc \tan \beta. \quad (11)$$

对公式(11)整理,考虑弹簧全部长度,可得

$$c = R / r \cos \alpha \tan \beta = \varphi / \theta. \quad (12)$$

钢丝螺旋倍数的取值影响多股簧的性能。 c 值越大,钢丝与钢丝之间的接触线区域越大,多股簧的刚性特性也就越明显。

1.4 轨迹扫描参数 trajpar

多股簧单股钢丝的中心线是绕弹簧中心线的螺旋,对于钢索而言,钢丝的拧角大小和钢丝缠绕倍数 c 有关,其关系如由图 5 所示。

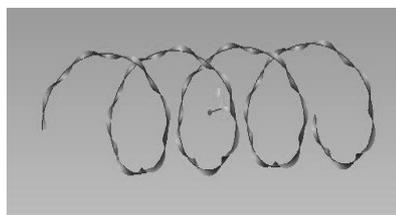


图 5 弹簧中心线和钢丝中心线的缠绕关系

使用 PRO/E 螺旋扫描功能生成多股簧中心线特征时,使用参数 Trajpar 控制钢丝中心线的扫描轨迹,可以通过一个扫描步得到单股钢丝的中心线模型,大大提高多股簧的建模速度。Trajpar 参数表征 Pro/E 扫描特征的长度百分比,扫描开始时 trajpar 取值为 0,扫描结束时 trajpar 取值为 1,其值从 0 到 1 呈线性规律变化。在建立单股钢丝围绕弹簧中心线的螺旋缠绕特征时,若多股簧的拟建模圈数为 n ,根据钢丝中心线相对弹簧中心线的缠绕关系和一般螺旋线的几何性质,确定螺旋特征的扫描关系式为

$$sd\# = (\text{trajpar} * 360 * c * n) + \gamma, \quad (13)$$

式中:sd# 代表扫描特征的草绘尺寸变量; γ 为钢丝中心线扫描时起始角度的相位差,其值大小与钢丝股数 m 的关系为

$$\gamma = 2\pi/m. \quad (14)$$

2 多股簧 PRO/E 几何建模

2.1 多股簧结构确定和参数计算

考虑到建立多股簧中心线和弹簧中心线时的螺旋方向问题,PRO/E 建模的第一步首先要确定多股簧的结构类型。为了保证多股簧工作时,各股钢丝保持接触状态,承受压缩载荷的多股簧的钢索旋向与弹簧的旋向相反,故将其定义为左拧右缠和右拧左缠 2 种结构形式,承受拉伸载荷的多股簧的钢索旋向与弹簧的旋向相同,则将其定义为左拧左缠和右拧右缠 2 种结构形式。笔者以应用广泛、课题组重点研究的左拧右缠的 3 股压缩弹簧为例,其几何参数如表 1 所示。

表 1 多股簧几何参数

参数	数值
钢丝直径 d/mm	1.5
钢索节距 t/mm	10
多股簧中径 D/mm	34
多股簧节距 T/mm	20

如图 6 所示,通过 MATLAB 程序计算可知钢索螺旋升角 $\beta = \pi/2 - 29.756^\circ = 60.24^\circ$,钢索直径 $d_s = 3.3197 \text{ mm} = 2r + d$,故钢索分布圆半径 $r = 0.91 \text{ mm}$ 。

由式(7)计算可得多股簧螺旋升角 α 为

$$\alpha = \arctan(T/2\pi R) = \arctan(20/2 * \pi * 17) = 10.6^\circ.$$

由式(12)计算可得多股簧的螺旋倍数 c 为

$$c = R/r \cos \alpha \tan \beta =$$

$$17/0.91 * \cos 10.6^\circ * \tan 60.24^\circ = 10.9.$$

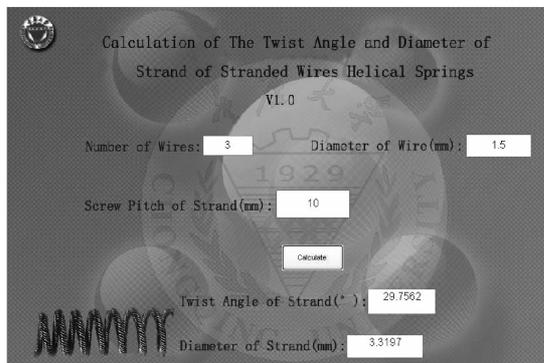


图 6 钢索分布圆半径计算结果

因为 $m=3$,由式(14)可知 $\gamma = 2\pi/m = 120^\circ$ 。建模时,若令 3 股钢丝中心线的扫描起始角度分别为 $0^\circ, 120^\circ$ 和 240° ,建模圈数 $n=10$,由式(13)可得各股钢丝的扫描关系式分别为

$$sd1 = (\text{trajpar} * 360 * 109);$$

$$sd2 = (\text{trajpar} * 360 * 109) + 120^\circ;$$

$$sd3 = (\text{trajpar} * 360 * 109) + 240^\circ.$$

2.2 多股簧 PRO/E 建模

以 PRO/E3.0 为例建立多股簧钢丝中心曲线模型。新建一个零件,插入螺旋扫描中的曲面选项,根据多股簧的各个参数,依次定义属性、扫描轨迹和螺距选项。在绘制截面时,如图 7 所示,在轨迹端点处构建 $r = 0.91 \text{ mm}$ 的圆和截面线段,创建关系式 $sd1 = (\text{trajpar} * 360 * 109)$ 作为扫描路径,同时生成多股簧的中心线和第一股钢丝的中心曲线。以多股簧中心线为扫描轨迹,同样方法完成其余 2 股钢丝的中线曲线模型。以钢丝截面 $d = 1.5 \text{ mm}$ 对 3 股钢丝的中心曲线模型进行实体扫描完成多股簧几何模型如图 8 所示。

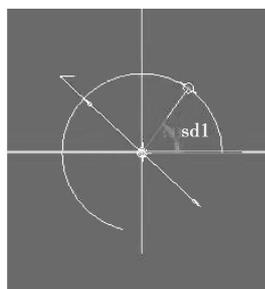


图 7 钢丝扫描截面草绘图

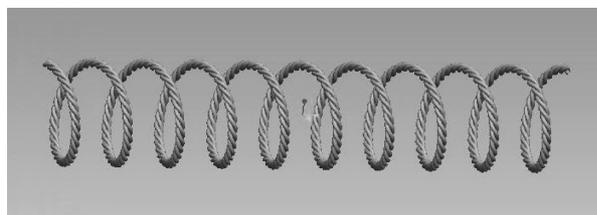


图 8 多股簧三维模型

3 多股簧有限元分析

3.1 多股簧有限元模型

将 PROE 多股簧几何模型保存为 STEP 格式文件,在 ABAQUS6.8 中使用 import 命令将其导入。合理简化多股簧静载实验装置,在 ABAQUS 里新建离散刚体部件导杆固定装置和压块与多股簧进行装配,几何模型如图 9 所示。



图 9 实验装置几何模型

分析可知,多股簧加载时的应力应变情况属于几何非线性弹塑性问题。钢丝的密度 $\rho = 7.8 \times 10^{-9} \text{ T/mm}^3$,杨氏模量 $E = 2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$,泊松比 $\nu = 0.3$,应力应变数据通过万能材料试验机对钢丝进行单向拉伸实验测得。为了避免出现“沙漏模式”和体积自锁的数值问题,对钢丝采用线性非协调实体单元 C3D8I 类型和六面体形状进行网格划分,对导杆固定装置和压块采用离散刚体单元 R3D4 进行网格划分。为防止多股簧承载时钢丝松散,多股簧制成品的端头部分会进行铜焊工艺处理,ABAQUS 仿真时,在弹簧两端的钢丝截面选取节点施加点-面耦合约束。导杆部分位置固定,且是刚体,在其参考点施加固定边界条件,限制整个部件的空间位移。对压块部件在参考点对其施加 z 方向的速度边界条件。钢丝之间的摩擦产生的阻尼作用是多股簧优于单股簧的原因所在,故钢丝与钢丝之间设置摩擦参数,且忽略钢丝与导杆和压块部件之间的摩擦影响。根据以上设定,由表 2 给出多股簧有限元分析的具体边界条件。整个实验装置的有限元模型如图 10 所示,钢丝有限元模型如图 11 所示。

表 2 多股簧有限元分析边界条件设定

名称	类型	接触特性	单元类型	边界条件	
				施加位置	类型
导杆(die)	离散型刚体	面接触,忽略摩擦	R3D4	RP of die	几何边界条件: ENCASTRE
压块(punch)	离散型刚体	面接触,忽略摩擦	R3D4	RP of punch	速度边界条件: $v_1 = v_2 = 0$, $v_3 = -8 \text{ m/s}$, $v_{R1} = v_{R2} = v_{R3} = 0$
钢丝(wire)	柔性体	面接触,钢丝之间设为 $f = 0.1$,与其他部件之间忽略摩擦	C3D8I	RP of wire1 RP of wire2	RP of wire1 与钢丝端面 coupling 约束,RP of wire2 与钢丝端面 coupling 约束



图 10 实验装置有限元模型

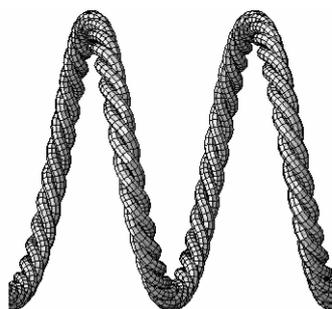


图 11 钢丝有限元模型局部放大图

3.2 计算结果及讨论

图 12 为承载时多股簧的变形情况,簧圈的变形由被压缩端向另一端传递,有限元仿真结果显示了簧圈响应的动态过程。被压缩簧圈的应力分布不均匀,最大应力簧圈的位置随着多股簧的形变而变化,与多股簧动态分析理论相符^[12]。

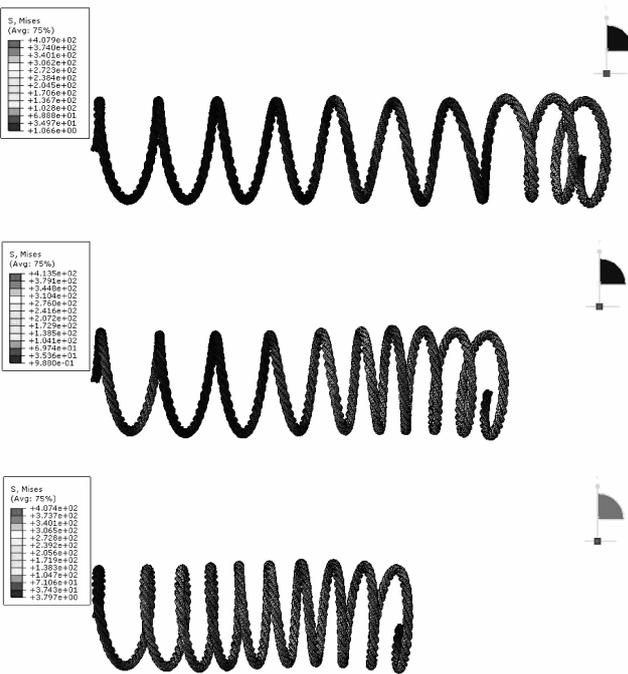


图 12 多股簧承载时的簧圈变形情况

图 13 为多股簧钢索截面随不同旋转角度的等效应力分布情况。分析可知,等效应力由外向内逐渐变化,且呈同心圆状分布。塑性区分布在钢丝表面区域,弹性区分布在钢丝中心区域。塑性区域包围着弹性区域,并逐步过渡到弹性区域。而在钢丝绳拉伸变形的研究中发现^[7-8],钢丝绳的截面等效应力呈层状分布,应力值由丝中心向两侧逐渐增大。由此可以得知,虽钢丝在结构上都属于二次螺旋结构,但多股簧在承载冲击时的形变特性与钢丝绳承载拉伸时的形变特性并不相同。

在钢丝互相接触区域的等效应力值较大。钢丝的接触区域一般在弹簧径向的内侧,承受载荷时,由于钢索旋向和多股簧绕向相反,钢丝之间互相挤压,有研究资料表明^[13],随着钢丝间摩擦力的增大,接触应力也呈相应增加的趋势。而且,在多股簧冲击试验中,也可以看到股间钢丝接触面间存在着磨损,原因在于钢丝之间呈线接触状态,多股簧承载时钢丝之间的微动摩擦所致,与钢丝的微动磨损实验情况一致^[14]。

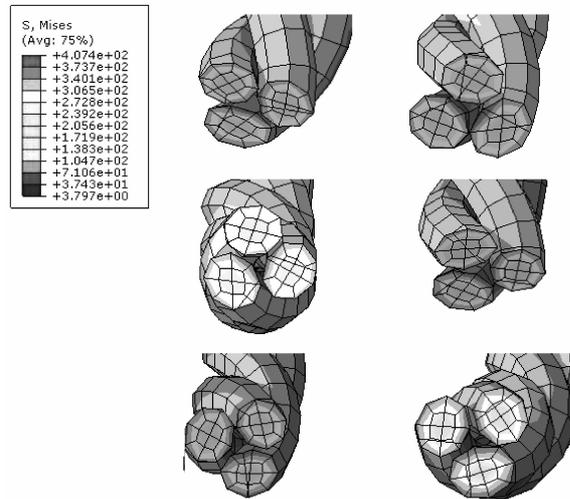


图 13 多股簧 Y 截面不同旋转角度应力分布情况

如图 14 对于单股钢丝来说,应力应变也具有规律性。其一,钢丝应力应变水平分布不均匀,随着钢丝的位相沿长度方向变化,这是由于钢丝材料在承受载荷时的波动效应所致。其二,应力的分布在不同的簧圈上具有一致性,在每个簧圈上也成规律性变化,与多股簧的微分理论研究相符^[11]。其三,多股簧单股钢丝的截面应力(如图 13 所示)分布趋势与普通圆柱螺旋弹簧截面应力分布相同。

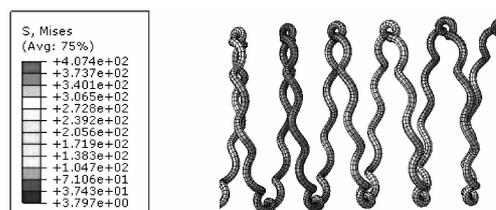


图 14 单股钢丝的应力分布

加载速度对多股簧的簧圈振动影响较大。如图 15 所示,若加载速度过大,簧圈内部的波动效应使得簧圈振动传播速度比载荷速度快,导致加载端簧圈出现压并现象^[15-16],以及过大的塑性变形,从而影响多股簧的使用寿命,应避免这种情况的出现。



图 15 多股簧的局部簧圈压并

4 结 论

1) 钢索截面分布圆半径公式的理论推导, 确定了多股簧精确的计算模型。对钢丝螺旋倍数的研究可知, 螺旋倍数越大, 钢索的拧索角就越小, 多股簧的刚性也就越大。

2) 确定了多股簧承载时有限元分析的各种边界条件并进行仿真分析, 得出了考虑摩擦的钢丝截面及表面的应力分布情况, 且钢丝的形变沿轴向长度呈现的不同变化。本文的研究是以 3 股钢丝为例, 属于单层弹簧, 对于具有中心股的多层螺旋弹簧, 钢丝之间的接触特性就更为复杂。使用有限元方法可以更为直观地研究同层和同层钢丝之间及不同层钢丝之间的载荷分布情况。

3) 多股簧的动态性能是研究重点, 尤其是载荷速度对簧圈振动的影响, 需要合理的取值。通过仿真分析得知, 本文研究中, 压块速度在 5~8 m/s 内时, 多股簧都能得到较好的动态性能。

4) 多股簧设计时, 可以根据使用要求选取和计算多股簧的各种参数, 然后进行动态模拟仿真, 通过分析预先确定多股簧参数的取值是否合理。

5) 多股簧的成形工艺和卸载回弹是影响多股簧尺寸精度的重要原因, 进一步可通过建立多股簧的有限元模型进行回弹的仿真研究。

参考文献:

- [1] 周杰, 华俊杰, 阳德森, 等. 可控拉深筋高强度钢板盒形件拉深工艺数值仿真[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(6): 43-48.
ZHOU JIE, HUA JUN-JIE, YANG DE-SEN, et al. Deep drawing simulation for high-strength steel box of controllable drawbead [J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(6): 43-48.
- [2] 张旭, 周杰. 高强度钢保险杠成形工艺及回弹控制的数值模拟优化[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(9): 104-108, 188.
ZHANG XU, ZHOU JIE. The numerical simulation in optimization and springback control of high strength steel bumper forming process [J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(9): 104-108, 188.
- [3] IMANISHI E, NANJO T, KOBAYASHI T. Dynamic simulation of wire rope with contact [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23(4): 1083-1088.
- [4] SUN J F, WANG G L, ZHANG H O. Elasto-plastic contact problem of laying wire rope using FE analysis[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 26(1/2): 17-22.
- [5] SUN J F, WANG G L, ZHANG H O. FE analysis on the laying process of wire rope based on parametric design[J]. Wire Journal International, 2005, 38(6): 60-64.
- [6] WANG G L, SUN J F, ZHANG H O. FE analysis of frictional contact effect for laying wire rope[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 202(1/3): 170-178.
- [7] 马军, 葛世荣, 张德坤. 钢丝绳股内钢丝的载荷分布[J]. 机械工程学报, 2009, 45(4): 259-264.
MA JUN, GE SHI-RONG, ZHANG DE-KUN. Load distribution on the unit of the wire rope strand. [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(4): 259-264.
- [8] 马军, 葛世荣, 张德坤. 钢丝绳股内钢丝应力-应变分布的计算模型及数值模拟[J]. 机械工程学报, 2009, 45(11): 277-282.
MA JUN, GE SHI-RONG, ZHANG DE-KUN. Calculating model and numerical simulation of stress-strain distribution of wires within strands[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(11): 277-282.
- [9] 王时龙, 任伟军, 周杰, 等. 多股螺旋弹簧的空间曲线模型研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(11): 1269-1272.
WANG SHI-LONG, REN WEI-JUN, ZHOU JIE, et al. Study on 3D curve model of multi-stranded wire helical springs [J]. Chinese Mechanical Engineering, 2007, 18(11): 1269-1272.
- [10] 张东文. 弹簧设计与制造工艺新技术及质量监控实用手册[M]. 北京: 中国科学文化音像出版社, 2003: 182-200.
- [11] 王时龙, 萧红, 周杰, 等. 多股螺旋弹簧的微分几何研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(17): 2089-2093.
WANG SHI-LONG, XIAO HONG, ZHOU JIE, et al. Research on differential geometry of stranded wire helical springs [J]. Chinese Mechanical Engineering, 2009, 20(17): 2089-2093.
- [12] 闵建军, 王时龙. 多股螺旋弹簧动态设计方法[J]. 中国机械工程, 2007, 18(8): 895-899.
MIN JIAN-JUN, WANG SHI-LONG. Dynamic design method for stranded wire helical spring [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 18(8): 895-899.
- [13] 孙建芳, 王桂兰, 张海鸥. 考虑接触摩擦的金属捻线捻制成形过程的计算机模拟[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(7): 1746-1750.
SUN JIAN-FANG, WANG GUI-LANG, ZHANG HAI-OU. Numerical simulation for laying wire rope with friction contact [J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(7): 1746-1750.

- [14] 刘启跃,张伟,郭俊,等. 线接触条件下微动摩擦特性的研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(7): 729-732.
LIU QI-YUE, ZHANG WEI, GUO JUN, et al. Investigation of fretting friction characteristics under line contact[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, 17(7): 729-732.
- [15] SWIESKOWSKI H P. Design and application of stranded wire springs[J]. Springs, 2000, 39(2): 65-66, 68-69.
- [16] 闵建军,王时龙. 多股螺旋弹簧动态计算分析[J]. 机械工程学报, 2007, 43(3): 199-203.
MIN JIAN-JUN, WANG SHI-LONG. Analysis on dynamic calculation of stranded wire helical spring[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(3): 199-203.

(编辑 张 苹)

(上接第 19 页)

- HE YU-LIN, LIU HUA, DU JING. Simulation study of stochastic fluctuating wind field for wind turbine blades[J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(10): 1126-1131.
- [7] WANG X D, SHEN W Z, ZHU W J, et al. Shape optimization of wind turbine blades[J]. Wind Energy, 2009, 12(8): 781-803.
- [8] BADREDDINNE K, ALI H, DAVID A. Optimum project for horizontal axis wind turbines 'OPHWT'[J]. Renewable Energy, 2005, 30(13): 2019-2043.
- [9] 刘雄, 陈严, 叶枝全. 水平轴风力机风轮叶片优化设计模型研究[J]. 汕头大学学报: 自然科学版, 2006, 21(1): 44-49.
LIU XIONG, CHEN YAN, YE ZHI-QUAN. Research on the HAWT rotor blades optimization [J]. Journal of Shantou University: Natural Science Edition, 2006, 21(1): 44-49.
- [10] 韩中合, 吴铁军. 基于遗传算法的风力机叶片优化设计[J]. 动力工程, 2008, 28(6): 955-958.
HAN ZHONG-HE, WU TIE-JUN. Optimal design of wind turbine blades based on genetic algorithm [J]. Journal of Power Engineering, 2008, 28(6): 955-958.
- [11] 贺德馨. 风工程与工业空气动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [12] GLAUERT H. Airplane propellers [M]. New York: Dover, 1963.
- [13] SHEN W Z, MIKKELSEN R, SORENSEN J N, et al. Tip loss correction for wind turbines computations[J]. Wind Energy, 2005, 8(4): 457-475.
- [14] FUGLSONG P, BAK C. Development of the Riso wind turbine airfoils[J]. Wind Energy, 2004, 7(2): 145-162.
- [15] TIMMER W, VAN T P. Summary of the Delft University wind turbine dedicated airfoils[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2003, 125(4): 488-496.
- [16] 王旭东, 陈进, 张石强, 等. 风力机叶片翼型线集设计理论研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(2): 211-228.
WANG XU-DONG, CHEN JIN, ZHANG SHI-QIANG, et al. Integration study on airfoil profiles for wind turbines [J]. Chinese Mechanical Engineering, 2009, 20(2): 211-228.

(编辑 张 苹)