

# 圆柱形扭簧簧圈椭圆度对应力及刚度的影响

姜旭涛,黄志辉,穆云飞

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031)

**摘要:**针对已成型簧圈为椭圆而非标准圆的圆柱螺旋扭转弹簧试验寿命不足的问题,为探究扭簧簧圈椭圆度对扭簧所受最大应力及刚度的影响,提出一种基于 HyperMesh 与 ANSYS 联合仿真的圆柱螺旋扭转弹簧有限元分析方法。在试验工况下,对不同椭圆度簧圈的扭簧进行有限元计算。对有限元计算结果进行分析得出:扭簧簧圈椭圆度对刚度没有影响;扭簧所受最大应力随簧圈椭圆度增大而增大,且二者呈线性关系。

**关键词:**圆柱螺旋扭转弹簧;椭圆度;应力;刚度

**中图分类号:**TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)03-0009-04

## Influence of Ovality of Cylindrical Helical Torsion Spring Coil on Stress and Stiffness

JIANG Xutao, HUANG Zhihui, MU Yunfei

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** To improve the insufficient test life of a cylindrical helical torsion spring made of an elliptical coil instead of a standard circle coil, a finite element analysis method of cylindrical helical torsion spring based on HyperMesh and ANSYS co-simulation is proposed so as to study the influence of the ovality of the cylindrical helical torsion spring coil on the maximum stress and stiffness of the spring. Under the given test condition, the torsion springs with different ovality coils are calculated by finite element method. The analysis of the finite element calculation results show that the ovality of the cylindrical helical torsion spring coil has no effect on the stiffness, and the maximum stress on the torsion spring increases along with the increase of coil ovality, and in between there is a linear relationship.

**Keywords:** cylindrical helical torsion spring; ovality; stress; stiffness

## 0 引言

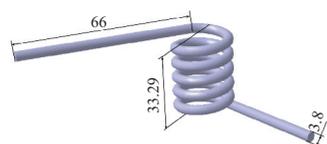
某用于钢琴踏板的圆柱螺旋扭转弹簧(以下简称扭簧),通过钢琴踏板活动,在变载荷应力下工作 50 万次后发生疲劳破坏,与设计要求的疲劳寿命  $N \geq 100$  万次差异较大。因此,对扭簧实物进行检查后发现扭簧簧圈制成了椭圆形,而非标准圆形。为探究扭簧簧圈椭圆度对扭簧部分力学性能的影响,本文就簧圈椭圆度对扭簧所受应力及刚度的影响进行研究与分析。

## 1 标准簧圈扭簧部分力学性能理论计算

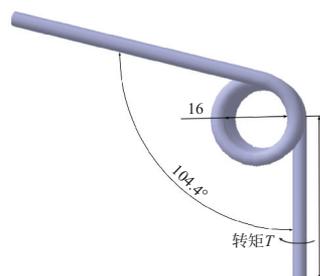
### 1.1 扭簧研究模型介绍

该扭簧顺轴向扭转,使用 SWP-B 琴钢丝材料,总圈数  $n=5.21$ ,初始夹角  $\varphi_0=104.4^\circ$ ,材料直径  $d=3.8$  mm,内径  $D_1=16$  mm,固定侧扭臂  $l_1=66$  mm,施力侧扭臂  $l_2=45$  mm,自由高度  $H=33.29$  mm,安装转矩  $T_1=4599.20$  N·mm,工作转矩  $T_2=6713.87$  N·mm。

在 CATIA 中建立扭簧三维模型时,通过高度  $h=H-d=33.29-3.8=29.49$  mm 以及转数  $n=5.21$  来定义螺旋曲线;将螺旋曲线与两扭臂  $l_1$ 、 $l_2$  接合并将其作为中心曲线,将  $d=3.8$  mm 的圆作为轮廓,定义肋,得到标准簧圈扭簧的三维模型如图 1 所示。



(a) 标准簧圈扭簧三维模型轴测视图



(b) 标准簧圈扭簧三维模型俯视图

图 1 标准簧圈扭簧三维模型

基金项目:国家自然科学基金项目(U19A20109)

第一作者简介:姜旭涛(1997—),男,山东烟台人,硕士研究生,研究方向为车辆设计理论及强度分析。

## 1.2 扭簧弯曲应力计算

根据 GB/T 23935—2009《圆柱螺旋弹簧设计计算》<sup>[1]</sup>,该扭簧所受弯曲应力的计算公式为

$$\sigma = K_b \frac{32T}{\pi d^3} \quad (1)$$

式中: $\sigma$ 为扭簧所受的弯曲应力,MPa; $K_b$ 为曲度系数, $K_b = \frac{4C^2 - C - 1}{4C^2(C - 1)}$ ,当顺旋向扭转时,曲度系数  $K_b = 1$ ;  $T$ 为扭簧所受的转矩,N·mm; $d$ 为扭簧的材料直径,mm。

将安装转矩  $T_1$  与工作转矩  $T_2$  分别代入公式(1)中,得:

该扭簧所受最小弯曲应力

$$\sigma_{\min} = 1 \times \frac{32 \times 4\,599.20}{\pi \times 3.8^3} = 853.75;$$

所受最大弯曲应力

$$\sigma_{\max} = 1 \times \frac{32 \times 6\,713.87}{\pi \times 3.8^3} = 1\,246.30。$$

## 1.3 扭簧疲劳极限分析

扭簧在应力循环中的循环特征的计算公式为

$$\gamma = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{T_{\min}}{T_{\max}} = \frac{\varphi_{\min}}{\varphi_{\max}} \quad (2)$$

则该扭簧的循环特征

$$\gamma = \frac{853.75}{1\,246.30} = \frac{4\,599.20}{6\,713.87} = \frac{45.13}{65.88} = 0.69。$$

查得当材料直径  $d = 3.8$  mm 时,SWP-B 琴钢丝的抗拉强度  $R_m$  为 1 810~1 960 MPa<sup>[2]</sup>,取  $R_m = 1\,810$  MPa,则该扭簧的上限应力系数

$$Q = \frac{\sigma_{\max}}{R_m} = \frac{1\,246.30}{1\,810} = 0.69。$$

根据扭转弹簧疲劳极限图(图2)判定规则:若循环特征  $\gamma$  与上限应力系数  $Q$  的交点在图中应力循环  $10^n$  下方,说明该扭簧的疲劳强度  $N > 10^n$  次。

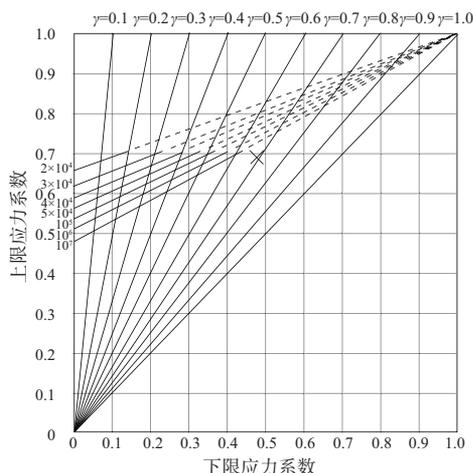


图2 扭转弹簧疲劳极限图

在图2中,该扭簧循环特征  $\gamma$  与上限应力系数  $Q$  的交点在图中  $10^7$  下方,理论上疲劳寿命  $N > 10^7$  次<sup>[3]</sup>。

## 2 标准簧圈扭簧有限元计算

本文通过在 CATIA 建立扭簧三维模型,将扭簧模型以 stp 格式导入 HyperMesh 进行网格划分、赋予材料属性、设置单元属性、建立接触、施加载荷及边界条件,然后输出 cdb 模型,将其导入 ANSYS 进行计算<sup>[4-5]</sup>。

### 2.1 扭簧有限元模型建立

根据扭簧实际工作情况,将扭簧三维模型导入 HyperMesh 后,建立与扭簧接触处间隙为 0 的销轴。

两者都采用 SWP-B 琴钢丝材料,SWP-B 琴钢丝的材料属性如表 1 所示。

表 1 SWP-B 琴钢丝材料属性

材料	弹性模量/MPa	密度/(t/mm <sup>3</sup> )	泊松比
SWP-B	2.06×10 <sup>5</sup>	7.8×10 <sup>-9</sup>	0.338

根据扭簧实际工作情况,扭簧与销轴之间存在接触,所以需要对接触部分进行非线性接触设置,设置销轴表面为目标面,扭簧表面为接触面。

根据扭簧实际工作情况, $l_1 = 66$  mm 端为固定侧扭臂, $l_2 = 45$  mm 端为施力侧扭臂。在扭簧工作时,固定侧扭臂只在轴向发生位移,而施力侧扭臂由于受转矩  $T$  的作用,只在轴向和转矩方向发生位移,销轴在扭簧工作期间为固定的。对于固定侧扭臂,需在扭臂端面建立一空间直角坐标系,然后将固定侧扭臂上需要约束的节点分配给该局部坐标系,约束固定侧扭臂节点  $U_x$  和  $U_y$  自由度;对于施力侧扭臂,在全局坐标系中约束其  $U_z$  自由度;对于销轴,在全局坐标系中约束其上、下端面的  $U_x$ 、 $U_y$  和  $U_z$  自由度。

在有限元模型中,对扭簧转矩的施加要转化成力乘以力臂,公式为

$$T = FR \quad (3)$$

式中: $F$ 为施加在扭臂的力,N; $R$ 为力臂,mm<sup>[6]</sup>。

扭簧的工作转矩  $T_2 = 6\,713.87$  N·mm,取力臂  $R_1 = 33.75$  mm,由公式(3)得施加在扭臂的力为

$$F = \frac{T_2}{R_1} = \frac{6\,713.87}{33.75} = 198.93。$$

采用 mass 质量单元与 rbe3 刚性单元,将扭簧施力侧扭臂的受力节点耦合为一个受力节点。由于无法对耦合后的节点直接施加垂直于扭臂的载荷,所以需要在扭簧销轴的中心位置建立空间柱坐标系,然后将力  $F$  沿柱坐标系分解为  $F_1 = 50.72$  N,  $-F_2 = 192.35$  N,将其施加在耦合的受力节点上。

HyperMesh 处理后的标准簧圈扭簧有限元模型如图 3 所示。

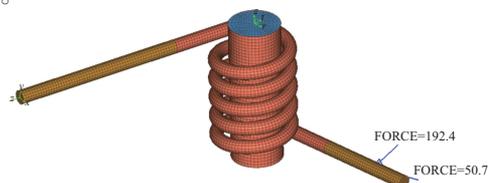


图3 标准簧圈扭簧有限元模型

## 2.2 扭簧有限元模型计算结果

将 HyperMesh 处理的有限元模型导入 ANSYS 进行求解。扭簧 Von-Mises 等效应力云图如图 4 所示。

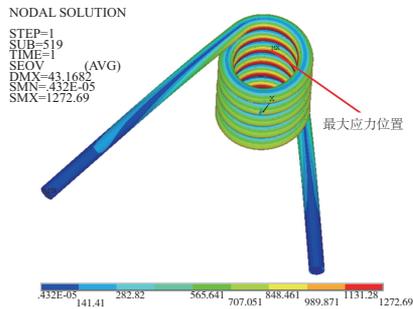


图 4 标准簧圈扭簧 Von-Mises 等效应力云图

由有限元计算结果可知,扭簧所受最大应力为 1 272.69 MPa,位于扭簧内圈扭转处。经测量,扭簧扭转变形角  $\varphi_1 = 56^\circ$ 。根据现代机械设计手册<sup>[7]</sup>,扭转刚度与扭转角的关系式为

$$T' = \frac{T}{\varphi} \quad (4)$$

将扭转变形角代入公式(4)可得有限元计算的扭转刚度为

$$T'_1 = \frac{T_2}{\varphi_1} = \frac{6\ 713.87}{56} = 119.89 \text{ N} \cdot \text{mm}/(^{\circ})。$$

## 3 椭圆簧圈扭簧有限元计算

在弹簧成型过程中,由于工装及加工的原因,使得簧圈成了椭圆,且每个弹簧的椭圆度都不一致。本文采取等距取样的原则,以 0.5 mm 为抽样距离进行簧圈椭圆度的取值,首先选取簧圈椭圆度  $e$  为 0.5 mm、1.0 mm、1.5 mm 的扭簧并对其进行有限元计算。将有限元计算结果进行分析拟合,得到簧圈椭圆度与扭簧所受最大应力呈线性关系的结论。为了验证结论的准确性,选取簧圈椭圆度  $e$  为 3.0 mm 的扭簧进行有限元计算。

椭圆簧圈扭簧三维模型如图 5 所示。

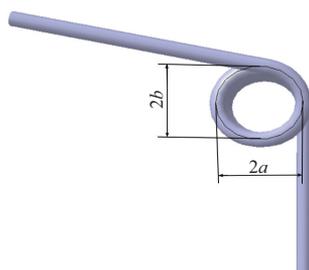


图 5 椭圆簧圈扭簧三维模型

### 3.1 椭圆簧圈扭簧三维模型建立

在椭圆中,椭圆度与椭圆长、短轴的关系式为

$$e = 2a - 2b \quad (5)$$

式中: $e$  为椭圆度,mm; $a$  为椭圆长半轴,mm; $b$  为椭圆短半

轴,mm。

椭圆周长公式为

$$C_1 = 2\pi b + 4(a-b) \quad (6)$$

构造椭圆簧圈扭簧时,需保证椭圆簧圈与标准簧圈周长相同,即

$$2\pi b + 4(a-b) = \pi D \quad (7)$$

将 4 组椭圆度  $e$  分别代入公式(5)中,并与公式(7)联立,得到各组椭圆簧圈的参数如表 2 所示。

表 2 椭圆簧圈参数 单位:mm

椭圆度	长半轴	短半轴
0.5	9.99	9.74
1.0	10.08	9.58
1.5	10.17	9.42
3.0	10.45	8.95

利用计算所得参数在 CATIA 中分别构造对应椭圆度的椭圆簧圈扭簧。

### 3.2 椭圆簧圈扭簧有限元模型建立

采用与 2.2 中标准簧圈扭簧有限元模型相同的方式分别对各组椭圆簧圈扭簧进行网格划分,单元、材料、接触设置及约束和载荷的施加。

### 3.3 椭圆簧圈扭簧有限元模型计算结果

将 HyperMesh 处理的有限元模型导入 ANSYS 进行求解。各组椭圆簧圈扭簧 Von-Mises 等效应力云图分别如图 6-图 9 所示。

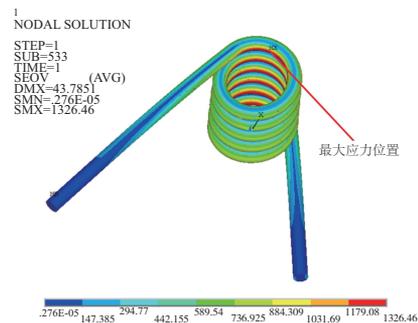


图 6 0.5 mm 椭圆度扭簧 Von-Mises 等效应力云图

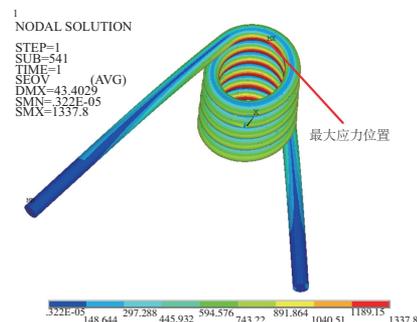


图 7 1.0 mm 椭圆度扭簧 Von-Mises 等效应力云图

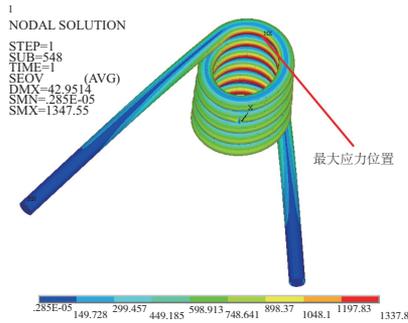


图 8 1.5 mm 椭圆度扭簧 Von-Mises 等效应力云图

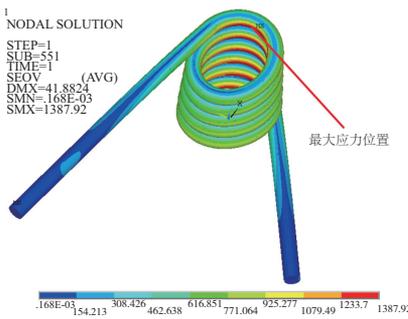


图 9 3.0 mm 椭圆度扭簧 Von-Mises 等效应力云图

整理得各组扭簧有限元计算结果如表 3 所示。

表 3 各组扭簧有限元计算结果

椭圆度/mm	扭转角/(°)	刚度/(N·mm/(°))	应力/MPa
0	56	119.89	1 272.69
0.5	56	119.89	1 326.46
1.0	56	119.89	1 337.80
1.5	56	119.89	1 347.55
3.0	56	119.89	1 387.92

## 4 有限元计算结果分析

### 4.1 簧圈椭圆度对刚度的影响

由表 3 可知,扭簧刚度不随簧圈椭圆度的变化而变化,即簧圈椭圆度对扭簧刚度没有影响。

### 4.2 簧圈椭圆度对应力的影响

以簧圈椭圆度  $e$  为横轴,以应力  $\sigma$  为纵轴,将表 3 中各组椭圆度所对应的应力值进行拟合,得到拟合曲线  $\sigma = 24.72e + 1312.85 (e > 0)$ ,如图 10 所示。

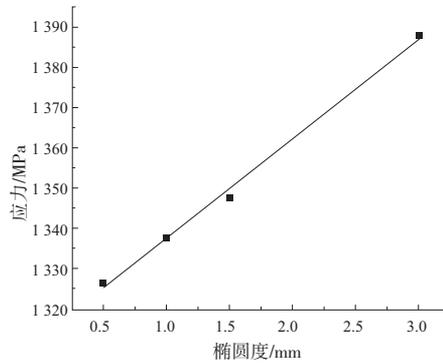


图 10 簧圈椭圆度与所受最大应力关系拟合曲线

## 5 结语

1) 扭簧簧圈椭圆度对扭簧的刚度没有影响。

2) 扭簧所受最大应力随扭簧簧圈椭圆度的增大而增大,且两者呈线性关系;在本文选取的模型中,扭簧椭圆度与所受最大应力的线性关系式为  $\sigma = 24.72e + 1312.85 (e > 0)$ 。

### 参考文献:

- [1] GB/T 23935—2009 圆柱螺旋弹簧设计计算 [S].
- [2] JIS G3522—1991 钢琴丝材 [S].
- [3] 陈秋琳,冯永明,林小慰. 制动踏板回位扭簧断裂分析及改善[J]. 内燃机与配件,2019(13):52-53.
- [4] 曾攀. 有限元基础教程[M]. 北京:高等教育出版社,2009.
- [5] 贺李平,肖介平,龙凯. ANSYS14.5 与 HyperMesh12.0 联合仿真有限元分析[M]. 北京:机械工业出版社,2014.
- [6] 武清玺,徐鉴. 理论力学[M]. 3 版. 北京:高等教育出版社,2016.
- [7] 秦大同,谢里阳. 现代机械设计手册 第 6 卷[M]. 北京:化学工业出版社,2011.

收稿日期:2021-02-09