50GrV 弹簧片在温室传动机构中的性能分析

文 | 苏建民 翟彦春 山东省高校设施园艺实验室

在现代新型温室结构中，50GrV 弹簧片在动力与输出之间起主要连接作用，是广泛应用的弹性元件，50GrV 弹簧片自身的性能是影响动力传输的关键因素。50GrV 弹簧片为动力传输的关键零件，其变形与阵型频率、传动平稳、传动效率有较大关联。从使用角度出发，针对 50GrV 弹簧片使用情况进行详细分析与模拟，从而找出现有工况下的变形与阵型。

50GrV 弹簧的结构形状较一般弹簧复杂，但其工作过程相对简单，其在运行承载时存在大变形特性，从而导致了几何变化非线性。随着现代计算机水平的不断提高，CAE 被广泛应用，其优点则是计算精度高，且突破了传统研究方法中的人为假设，即不需要做事先的假定，也能够利用计算机软件模拟构件的实际工作状况。50GrV 弹簧作为温室传动关键零件，为了研究其工况，提高工作效率，本文运用 CAE 中应用较为广泛的 ANSYS Workbench 软件对其静力学非线性行为和模态进行了分析。

一、理论分析

利用有限元法分析弹簧薄片大变形非线性特性及振动特性，对区域空间进行离散，根据给出的节点位移、单元内位移 u、v、w：

$$u(x,y,z,t)=\sum_{i=1}^{n}N_i(x,y,z)u_i(t)$$

$$v(x,y,z,t)=\sum_{i=1}^{n}N_i(x,y,z)v_i(t)$$

$$w(x,y,z,t)=\sum_{i=1}^{n}N_i(x,y,z)w_i(t)$$

表述成矩阵如下：

$$a=Nq^e$$

式中：

$$a=\begin{bmatrix}u(x,y,z,t)\\ v(x,y,z,t)\\ w(x,y,z,t)\end{bmatrix}$$

$$q^e=\begin{bmatrix}q_1\\ q_2\\ .\\ q_n\end{bmatrix}\quad q_{i=}\begin{bmatrix}u_i(t)\\ v_i(t)\\ w_i(t)\end{bmatrix}\ (i=1,2,\dots,n)$$

单元基本矩阵、刚度、质量和阻尼矩阵组成整个矩阵系统，从而得到模态求解基本方程：

$$[K]\{\phi\}=\omega_i^2[M]\{\phi_i\}$$

式中，[K] 是刚度矩阵；{ϕ1} 是第阶模态的阵型向量；ωi 是第阶模态的固有频率；[M] 是质量矩阵。

通过分块 Lanczos 法自动采用稀疏矩阵方程求解。

二、基于 Design Modeler 参数化弹簧片模型的建立

1、弹簧片实体建立

本文采用的是自下而上的建模方式，在 Design Modeler 中利用 Sketching 模块，绘制弹簧片曲线模型，然后利用 Modeling 模块建立薄片，如图 1 所示。

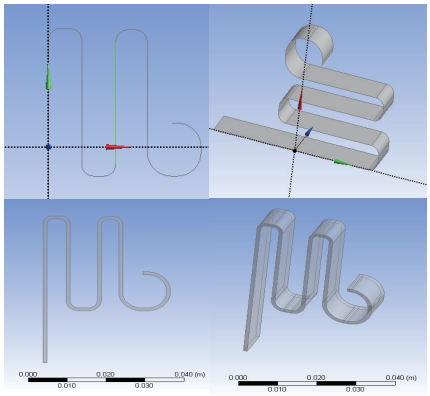

图 1 弹簧片实体模型

2、有限元模型的建立

50GrV 弹簧片为弹簧钢材料，其他参数如表 1 所列，厚度 1mm 较薄，为了分析数据的准确性采用 Solid185 类型单元分析，为了更好节省模型有限元的计算时间，以及空间，提高数据计算精度，本模型采用 Mapped Mesh 法划分网格生成 Hexa 映射网格，侧面划分为两层（Nodes：17 228，Elements：2 676），如图 2 所示。

表 1 模型各参数数据

材料	弹性模量	泊松比	厚度	密度
弹簧钢 50GrV	2.17×10^{11}Pa	0.29	1mm	7850kg/m^3

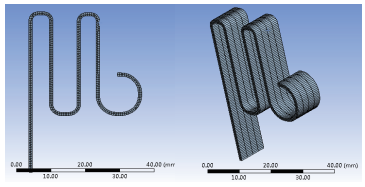

图 2 有限元模型的建立

3、边界条件的设定

针对弹簧片分析，忽略结构惯性力和阻尼对结构的影响，远端进行位移约束。远端位移约束是一种特殊的边界条件，它可以在实体模型上施加三个转动的自由度约束，远端位移的转动位移约束的转动中心为作用对象的中心位置，本实例约束方法为约束平动，并释放转动。

Remote Displacement 约束弹簧片底边，X、Y、Z 约束位移为 0；Rotation X、Y 约束为 0；Rotation Z 为 Free；Displacement 位移约束弹簧片侧面，X Component 为 13mm，Y Compont、Z Componentent 为零。

```
CEWRITE,file,ce,,INTE
*get,_nmodalsolproc,active,0,numcpu
fini
/nopr
*get,_numnode,node,0,count
*get,_numelem,elem,0,count
*get,_MAXELEMNUM, elem,0,NUM,MAX
*get,_MAXNODENUM, node,0,NUM, MAX,,,INTERNAL
*get,_MAXELEMTYPE, etyp, 0, NUM, MAX
*get,_MAXREALCONST, real, 0, NUM, MAX
/gopr
*get,_wallsol,active,,time,wall
/post1
/nopr
*dim,_direction,CHAR,6,1
_direction(1)=‘X’
_direction(2)=‘Y’
_direction(3)=‘Z’
_direction(4)=‘ROTX’
_direction(5)=‘ROTY’
_direction(6)=‘ROTZ’
*get,_nummodes,active,0,set,nset
*do,i_mode,1,_nummodes
*do,j_component,1,6
*get,PFACT_%i_mode%_%j_component%,MODE,%i_
mode%,PFACT,,DIREC,_direction(%j_component%)
*enddo
*enddo
/gopr
```

三、静力学大变形分析

通过施加位移约束等边界条件，我们得到了弹簧片大变

投稿邮箱 cadcam@idnovo.com.cn IMCHINA@idnovo.com.cn

形变形数据如表 2 所列和图 3 所示，以及弹簧片大变形变形应力数据如表 3 所列和图 5 所示。

表 2 弹簧位移约束变形数据

Time [s]	Minimum [mm]	Maximum [mm]
0.1	1.59×10^{-4}	1.336
0.2	3.13×10^{-4}	2.675 7
0.3	4.64×10^{-4}	4.018 8
0.4	6.11×10^{-4}	5.364 9
0.5	7.54×10^{-4}	6.713 6
0.6	8.93×10^{-4}	8.064 5
0.7	1.03×10^{-3}	9.417 3
0.8	1.16×10^{-3}	10.772
0.9	1.29×10^{-3}	12.127
1	1.42×10^{-3}	13.484

表 3 弹簧片应力数值

Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [MPa]
0.1	0.147 83	90.672
0.2	0.362 29	184.48
0.3	0.743 45	281.19
0.4	1.053 6	380.6
0.5	1.361 8	482.54
0.6	1.636 8	586.87
0.7	1.913 1	693.46
0.8	1.266 4	802.21
0.9	1.271 1	913.03
1	2.446	1025.9

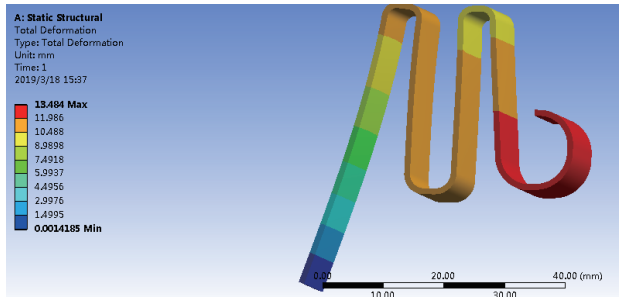

图 3 弹簧片变形位移

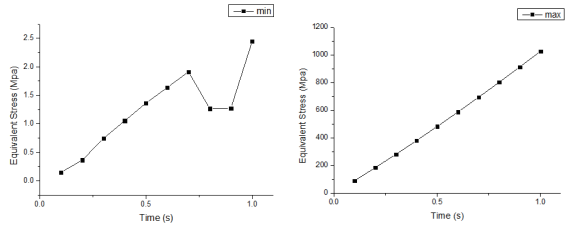

图 4 弹簧片最小和最大变形曲线

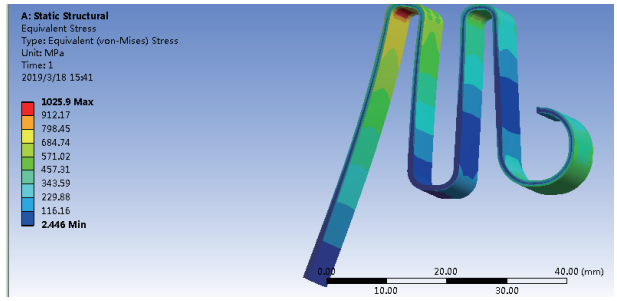

图 5 弹簧片应变效果

通过表 2 和图 4 我们发现 50GrV 弹簧片的最大变形和最小变形均呈近似线性变化，这为传动机构在传动装置的设计、传动平稳性的要求以及传动效率的提高等方面提供一定的参考价值。通过表 3 和图 6 我们发现 50GrV 弹簧片的最小应力与最大应力并不随位移的变化而一致变化，最小应力有一个拐点，最大应力近似成线性变化，但是并非线性。在 0.5s 左右应力变化变缓，之后呈现近似线性变化，这为 50GrV 弹簧片的设计、疲劳及应用寿命的计算提供了有力参考。

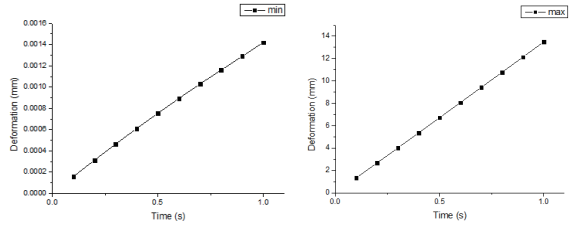

图 6 弹簧片最小和最大应力图

四、预应力模态分析

为了减小 50GrV 弹簧片在工作过程中的共振，对其进行预应力下的模态分析，得到其固有频率和阵型图。如下为弹簧前 6 阶阵型图（如图 7~ 图 9 所示），及固有频率，如表 4 所列。

```
/solu
antype,,restart,,,perturbation
/title,tanhuangpian--Modal (B5)
perturb,modal,,CURRENT,DZEROKEEP
! pre-stress modal analysis,
only keep zero bcs in case future MSUP
solve, elform
! Generate matrices needed for perturbation analysis
modopt,lanb,6
outres,erase
outres,all,none
outres,nsol,all
mxpand
! default expand in case of complex solution
! check interactive state
*get,ANSINTER_,active,,int
*if,ANSINTER_,ne,0,then
/eof
*endif
```

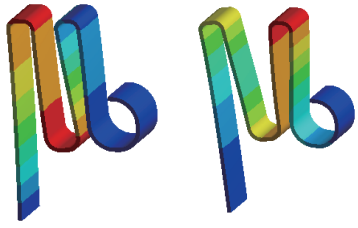

图 7 弹簧片 1、2 阶阵型

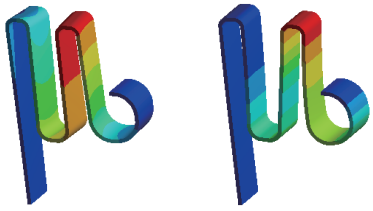

图 8 弹簧片 3、4 阶阵型

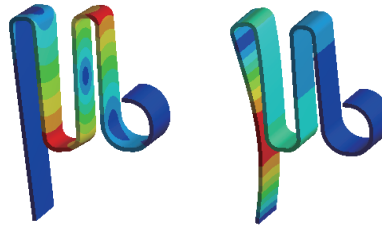

图 9 弹簧片 5、6 阶阵型

表 4 弹簧片前 6 阶固有频率

Mode	1	2	3	4	5	6
Frequency [Hz]	327.16	452.55	699.29	1046.1	1050.9	1350.9

通过表 4 和图 7~ 图 9，可以看出虽然弹簧片的厚度较薄，但其阵型的变化并不是全方位的，第 1、2 阶弹簧变化主要发生在中部，第 3、4 阶弹簧变化比较均匀，是一个整体的变化，第 5、6 阶弹簧变化主要发生在固定端。弹簧的阵型变化并不是每一阶都是全方位的，弹簧振动根据频率不同，主要振动发生部位也不同。这一变化为电机选择以及弹簧结构设计提供理论依据。

五、结论

（1）确定大变形条件下的刚性位移和变形位移，结合大挠度及大转角算例，对比理论解析解，Ansys 分析最大误差均在 5% 以内。

（2）基于 Ansys Workbench 的建模仿真，通过模态分析和非线性大变形分析获得弹簧片的共振频率、位移及应力，简化计算求解，从而对实验研究和理论分析具有一定的指导作用。

（3）电机工作频率为 80~120Hz，弹簧片设计频率避开了电机工作频率，电机工作时不发生共振，通过 ANSYS Workbench 软件仿真共振对应的前 6 阶固有频率，从而为优化弹簧片结构和电机工作频率的选择提供依据。

投稿邮箱 cadcam@idnovo.com.cn IMCHINA@idnovo.com.cn