

For citation: Zhu Hongwei. Finite element analysis of motion pair of ball screw based on ABAQUS // Grand Altai Research & Education — Issue 2 (22)'2024 (DOI: 10.25712/ASTU.2410-485X.2024.02) — EDN: <https://elibrary.ru/BJKOG>

UDK 510.25

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF MOTION PAIR OF BALL SCREW BASED ON ABAQUS

*Zhu Hongwei*¹

1 Hubei Digital Textile Equipment Key Laboratory, Wuhan Textile University, Wuhan, 430073, China
E-mail: 1012638251@qq.com

Abstract. With the development of science and technology, the application field of ball screw is more and more extensive, in order to achieve higher precision, efficiency of transmission, and better sensitivity and synchronization, the ball screw must be studied more deeply, this paper will be through finite element analysis, research and analysis of various data under the force state of the ball screw. Specifically, this paper models the 3D model of the ball screw by modeling the professional modeling software SolidWorks, followed by finite element analysis on the Abaqus CAE software. The ball screw model includes balls, screws, nuts, and washers. The Abaqus software is used to analyze the force situation between the balls, nut raceways, and nut raceways when the ball screw is affected by axial force. After simulation analysis, the data that can be used for reference are obtained, which provides technical support for the design and optimization of ball screws.

Keywords: all screw; finite element analysis; mechanical deformation; simulation

基于 ABAQUS 的滚珠丝杠运动副有限元分析

*朱宏伟*¹

1 武汉纺织大学, 湖北省数字化纺织装备重点实验室, 中国, 武汉, 430073
E-mail: 1012638251@qq.com

摘要: 随着科技的发展, 滚珠丝杠的应用领域越来越广泛, 为了实现更高精度, 效率的传动, 以及更好的灵敏度和同步性, 必须对滚珠丝杠进行更深入的研究, 本文将通过有限元分析, 研究分析滚珠丝杠副受力状态下的各种数据. 具体来讲, 本文是通过在专业建模软件 SolidWorks 上对滚珠丝杠三维模型进行建模, 接着在 Abaqus CAE 软件上进行有限元分析. 其中滚珠丝杠模型包括滚珠, 丝杠, 螺母和垫片, 在 Abaqus 软件上分析滚珠丝杠受到轴向力影响后, 滚珠, 螺母滚道和螺母滚道之间的受力情况. 经过仿真分析, 得到了可以参考的数据, 为滚珠丝杠的设计与优化提供技术支持.

关键词: 滚珠丝杠副; 有限元分析; 受力变形; 仿真模拟

0 引言

丝杠与螺母之间以滚珠为滚动体的螺旋传动机构就是我们常说的滚珠丝杠, 它的构成并不复杂, 它由丝杠, 螺母, 滚动体和滚珠及滚珠返回装置构成, 圆弧形的螺旋槽的加工位置一般在丝杠与螺母的相对位置上, 一旦丝杠和螺母装配在一起, 螺旋槽就会转化为螺旋滚道, 滚珠沿着滚道滚动, 并在反向器上完成一周运动. 相比于传统的滑动螺旋传动, 滚珠螺旋副传动的突出之处在于: 以滚动摩擦代替滑动摩擦, 使丝杠和螺母之间的相对运动变成滚动, 其优点与滚动轴承代替滑动轴承一样, 大大减少接触部位的摩擦 [1].

1 滚珠丝杠的工作原理

滚珠丝杠作为一种精度与效率都很高的传动装置, 不仅将滑动摩擦转换为滚动摩擦, 同时也改变了传动方式, 将旋转运动转换为了直线运动. 它的基本组成部分为螺母, 丝杠和滚珠等, 如图1所示 [2].

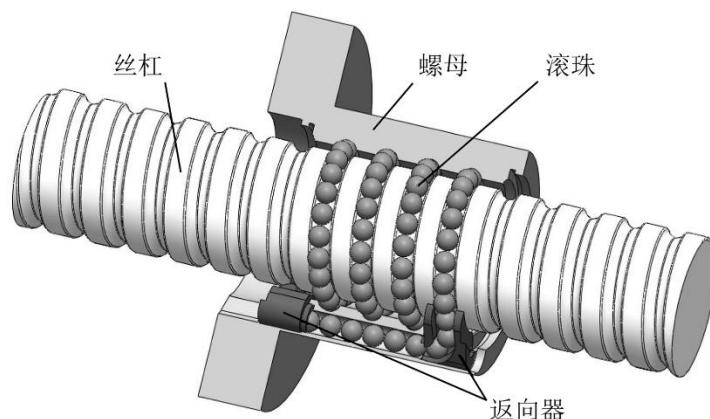


图1 滚珠丝杠副的组成
Figure 1. Composition of Ball Screw Pair

丝杠在外力的作用下, 进行旋转运动时, 滚珠会在滚道内滚动, 同时丝杠上的螺纹会使滚珠和螺母一起旋转. 相较于普通的丝杠在螺纹上滑动, 滚珠丝杠的滚动将会减少丝杠与螺母之间的摩擦力, 提高机械的传动效率. 此时原动机的运动形式, 运动及动力参数就会转变为执行部分所需要的运动形式, 运动及动力参数, 也就是从旋转运动转换为了直线运动 [3].

2 在 SolidWorks 中建立滚珠丝杠模型

通过 SolidWorks 软件进行建模 [4], 分别建立丝杠, 螺母, 滚珠, 垫片的模型, 接着进入 SolidWorks 中的装配模块中, 将上述的四种零件组装好, 根据滚珠丝杠的工作原理, 可知当丝杠旋转时, 丝杠上的螺纹将推动滚珠和螺母一起旋转, 故先在螺母与丝杠之间建立 "螺旋", 为了保证滚珠丝杠中的滚珠也随着丝杠和螺母的转动而转动, 这里选择以垫片为基准, 通过垫片的转动来带动丝杠和滚珠的转动, 将垫片面与滚珠原点进行 "重合" 配合, 接下来同样需要通过垫片带动

丝杠的转动，故必须要对垫片和丝杠施加配合，不过首先需要计算垫片转动一圈，滚珠该转动多少，也就是垫片和丝杠之间的齿轮比率如图2所示。

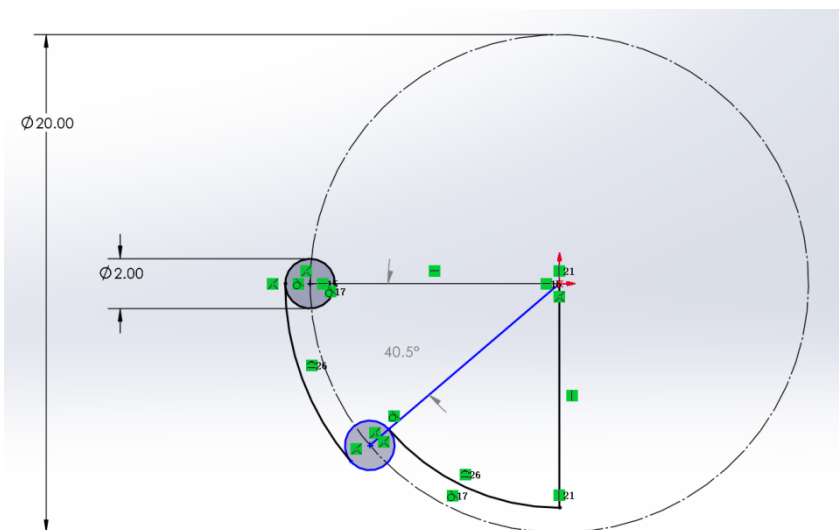


图2 弧度测量
Figure 2. Arc measurement

将外圆弧和内圆弧约束为相等的长度，可以测量出两个滚珠之间的角度为 40.5° ，一共 90° ，也就是说垫片旋转 360° ，滚珠旋转 $40.5 \times 4^\circ$ 。

点击 "配合" 命令，点击 "机械" → "齿轮"，选取垫片的侧面和丝杠的螺纹面，比率为上述计算的 $360:162$ ，最后点击 "反向"。

选择 "链阵列" 命令，链路径选取螺旋线，链组选择滚珠，点击 "填充路径"，注意 "路径对齐平面" 十分重要，仔细观察出滚道应与哪个平面对齐，再进行对路径的填充，装配好的滚珠丝杠模型如图3所示。

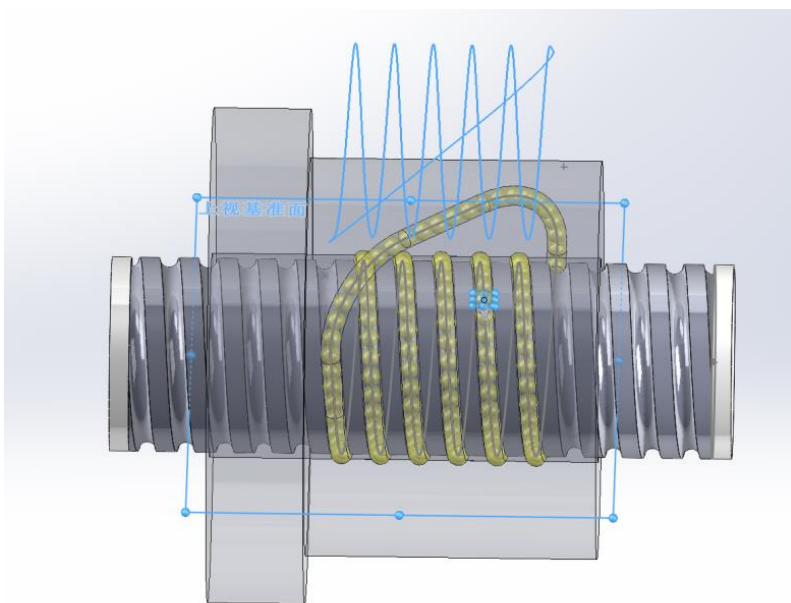


图3 滚珠丝杠模型
Figure 3. Ball screw model

3 滚珠丝杠副有限元仿真

3.1 模型的优化

为了减少 Abaqus 软件的计算时间, 同时避免计算中断的情况发生, 需要对滚珠丝杠的三维模型进行更改, 将原本复杂的模型进行简化处理. 丝杠的长度对于我们要研究的受力情况来说影响较小, 为了减少计算的负担, 可以通过其长度来实现 [5].

关于滚珠丝杠副的受力分析, 本文主要是通过观察丝杠和螺母上的滚道与滚珠的受力情况, 因此这里去除螺母上的反向器. 由于相互作用的增多, 计算量增多的同时, 还会出现其它问题, 所以可以减少滚珠的数量, 这样有利于仿真分析的效率.

3.2 有限元仿真

在 Abaqus 中导入模型之后, 在材料管理器中创建 45 号钢, 其中密度为 $7.85E-09$, 杨氏模量为 $2.09E+05$, 泊松比为 0.269, 屈服应力为 355, 塑性应变为 0.

创建截面 "section-1", 类别定义为 "实体", 类型选取 "均值", 接着指派截面到每一个部件上.

进入 step 模块, 点击创建分析步, 选择 "动力, 显式", 为了减少计算量, 加快仿真的效率, 在 "基本信息" 里将 "时间长度" 修改为 $1E-03$, 剩余的 "增量", "质量缩放" 和 "其它" 按照默认设置.

在网格模块中进行网格划分, 网格划分的目的是将复杂的几何形状简化为易于处理的网格元素, 以便进行数值模拟, 选择 "部件", 首先对滚珠进行划分, 点击 "拆分几何元素" 命令, 选择一次 "三个点" 和两次 "垂直于边", 将滚珠拆分成黄色, 设定 "全局种子" 为 3, 同时指派网格控制属性为四面体, 将 132 颗滚珠进行网格划分.

同理将螺母和丝杠的 "全局种子" 设定为 3, 然后点击 "为边布种" 命令, 将丝杠和螺母上的滚道面的种子设定为 1.5, 指派网格控制属性为四面体, 进行网格划分.

接着创建相互作用和载荷, 点击 "创建参考点", 选择 "耦合" 命令, 把所有的自由度勾选上, "控制点" 和 "表面" 选取为参考点和螺母侧面.

创建相互作用属性, 选择 "切向行为", 在摩擦公式中选择为 "罚", 摩擦系数设置为 0.15, 法向行为为默认.

创建相互作用, 为了避免太多接触作用, 要选择所有的滚珠面, 而框选所有的面又会导致不连续, 因此这里选择通用接触. "表面" 选择所有的面, "全局属性指派" 为上一步创建的相互作用属性.

点击 "创建载荷", 选择 "弯矩", "区域" 选取创建的参考点, 其中的 CM1 为 $2E+06$, CM2, CM3 都为 0, "幅值" 为瞬时.

创建两个边界条件, 其中螺母是关于 x 方向转动, 丝杠则为关于 x 方向转动和移动. 在螺母边界条件的上创建幅值, 类型为 "表", "时间/频率1" 为0, "幅值1" 为0, "时间/频率2" 为1E-03, "幅值2" 为1, 如表1 所示.

表1 幅值

Table 1. amplitude

	时间/频率	幅值
1	0	0
2	0.001	1

点击 "创建作业", 并进行提交后, 可在监控中查看进度.

3.3 仿真结果

通过 Abaqus 仿真分析, 得出了滚珠丝杠副系统中丝杠, 滚珠, 螺母的接触应力图, 如图3, 图4, 图5 所示.



图4 滚珠接触应力图

Figure 4. Ball contact stress diagram

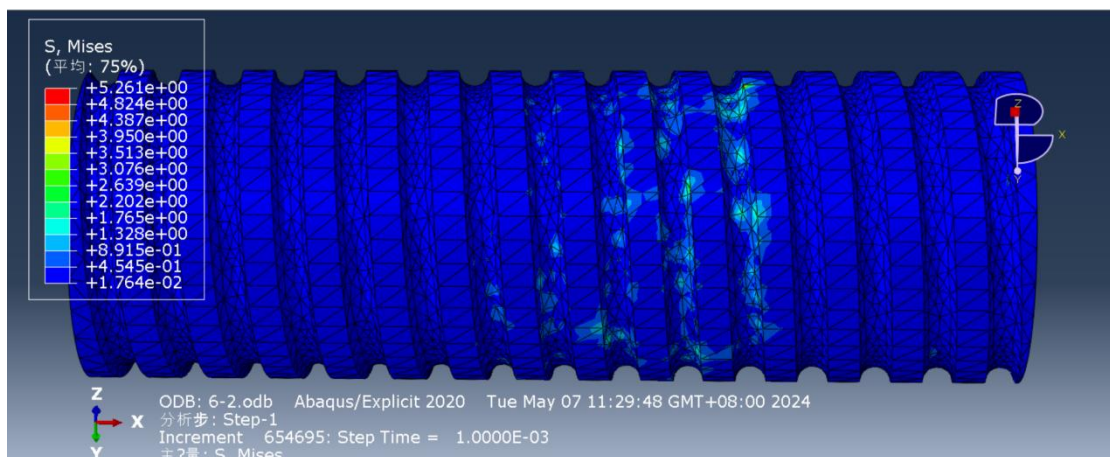


图5 丝杠滚道接触应力图

Figure 5. Contact stress diagram of screw raceway

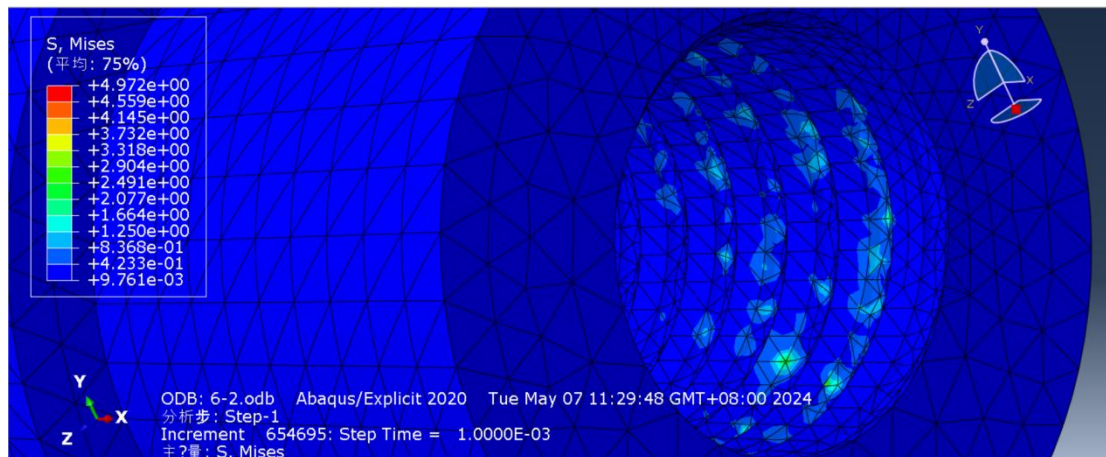


图6 螺母滚道接触应力图

Figure 6. Contact stress diagram of nut raceway

通过理论分析和相关资料的学习,并结合 Abaqus 分析得出的结果可知:接触应力基本上集中分布在滚珠与滚道接触的区域.图4为滚珠的接触应力图,从图中可以看出,每个滚珠上受到的应力基本相同,滚珠与滚道面接触时,可以看作是点接触,因此它们之间的接触面积是非常小的,根据应力的计算公式来看,当 F 相同时, A 越小,接触应力也就会越大,从图4中可以得出:最大应力值为 $2.364 \times 101 \text{MPa}$.图5展示了丝杠的接触应力分布,该丝杠受到外部拉力和轴向力的作用,因此其最大应力值为 5.261MPa .图6则展示了螺母滚道的接触应力情况,最大应力为 4.972MPa .从上述三张图中可以明显看出,滚珠与丝杠,螺母的接触点处承受的应力最大.

4 结束语

本文基于一些基础理论来对滚珠丝杠系统的接触应力进行分析,通过建立滚珠丝杠的三维模型,在有限元软件中进行仿真分析,最后根据滚珠丝杠中不同零件的数据分析,为开发高性能滚珠丝杠副打下基础.

通过对滚珠丝杠副的应力进行对比分析,发现滚珠的应力相较于丝杠和螺母都要大一些,而丝杠与螺母则相差不大,因此在设计滚珠丝杠时,滚珠所选用的材料的强度和硬度,以及采用的加工工艺都要相较于丝杠与螺母进行调整和适配,来增加滚珠丝杠的耐用程度,延长使用寿命.

参考文献

- [1] 孙奎洲,周金宇.数控机床滚珠丝杠副优化设计[J].机床与液压,2010,38(20):7-9+41.
- [2] 汤文成,徐楠楠.滚珠丝杠副发展及研究现状[J].机械设计与制造工程,2016,45(04):11-14.
- [3] 朱双霞,张红钢.机械设计基础[M].重庆大学出版社:201608.
- [4] 张云杰,郝利剑.SOLIDWORKS 2021 中文版基础入门一本通[M].电子工业出版社:202110.
- [5] 徐光远,潘国义,陶卫军,等.基于 Pro/E 和 ANSYS Workbench 的滚珠丝杠副造型与有限元分析[J].组合机床与自动化加工技术,2014,(04):1-5. DOI:10.13462/j.cnki.mmtamt.2014.04.001.

References

- [1] Sun Kuizhou, Zhou Jinyu. Optimization Design of Ball Screw Pair for CNC Machine Tool [J]. Machine Tool and Hydraulic, 2010, 38 (20): 7-9+41.
- [2] Tang Wencheng, Xu Nannan Development and Research Status of Ball Screw Pair [J] Mechanical Design and Manufacturing Engineering, 2016,45 (04): 11-14
- [3] Zhu Shuangxia, Zhang Honggang. Fundamentals of Mechanical Design [M]. Chongqing University Press: 201608.
- [4] Zhang Yunjie, Hao Lijian. SOLIDWORKS 2021 Chinese Basic Introduction [M]. Electronic Industry Press: 202110.
- [5] Xu Guangyuan, Pan Guoyi, Tao Weijun, et al. Ball screw pair modeling and finite element analysis based on Pro/E and ANSYS Workbench [J]. Combination Machine Tool and Automation Processing Technology, 2014, (04): 1-5. DOI: 10.13462/j.cnki. mmtamt. 2014.04.001.