

毕业答辩讲稿

1

各位老师好，我叫赵海滨。我的本科毕业设计题目是《滚珠丝杠的动力学和摩擦学性能研究》，我的指导老师是孟凡明。

2

滚珠丝杠的功能是将旋转运动转化为直线运动。因为它属于滚动螺旋传动，具有高效率、高精度、低摩擦的特点，因此被广泛应用于航空航天领域和精密机床上。

3

然而目前针对滚珠丝杠的研究主要是采用实验的方法，理论研究也局限在 Hertz 接触方面。从理论方面研究滚珠丝杠的冲击力和摩擦学特性的成果较少。

4

因此本文做了如下工作：滚珠丝杠建模、滚珠丝杠动力学性能和摩擦学性能分析。

5

首先本文根据《现代零部件设计手册》选择公称直径 25mm，滚珠直径 3.175mm 的滚珠丝杠进行建模。但是滚珠丝杠最重要的部分，也就是反向器，在手册中没有参考依据，因此要自行设计。

6

反向器的功能是在滚珠循环一圈后，利用反向槽使得滚珠翻越丝杠牙顶，重新回到初始位置。它保证了滚珠丝杠能够连续工作。

我们将滚珠分布抽象为右图中的空间曲线，就可以借助凸轮的设计方法对反向曲线加以设计。

7

如图所示我们将空间曲线分别向 YZ 平面和 XY 平面投影。可以看到这一部分为螺旋线，因此我们只需要对反向部分加以设计。

8

这是 YZ 平面内的曲线，我们选择升距为双谐曲线，就可以得到 y, z 和 θ 的关系。

9

这是 XY 平面的曲线，为了避免刚性冲击和柔性冲击，我们选择正弦函数，式中 A, B, C 为待定系数，带入速度边界条件和位移边界条件后，就可以得到 x 和 θ 的关系。

10

反向曲线设计完后，我们导入 Solidworks 中建模。这是反向器的模型，这是滚珠分布，这是镶嵌了反向器的螺母，这是滚珠丝杠的装配图。

11

动力学特性分析方面，将位移对时间求导得到滚珠 3 个方向的速度变化，可以看出滚珠在 x,z 方向在反向器内的速度变化较为明显，而 y 方向在反向器内的速度变化不大。

12

对速度求导我们就得到滚珠的加速度变化，可以看出滚珠在反向器内的加速度变化较为剧烈，而在反向器外部加速度变化比较平缓。

13

根据牛顿第二定律 $F=ma$ ，我们将滚珠的加速度乘以质量得到滚珠受力情况，再将一系列滚珠的受力线性叠加，就得到一次循环中受力情况。可以看出滚珠丝杠 z 方向的受力明显大于 x,y 方向的受力。

14

分析原因可以发现，滚珠在 z 方向翻越了丝杠的牙顶。因此要减小滚珠丝杠工作过程中的冲击，首要方法是减小滚珠翻越牙顶所需的位移量。这可以通过减小滚珠直径的方法实现。

15

接下来本文基于 Hertz 接触理论计算了滚珠丝杠的轴向刚度。

16

通过几何关系计算每个滚珠的受力，再结合上述的 Hertz 接触公式，我们就可以计算出滚珠丝杠的轴向变形量。

17

根据刚度的定义，我们就可以计算出轴向刚度和螺旋升角的关系。可以发现螺旋升角对轴向刚度的影响并不明显。这是因为螺旋升角本身的变化范围不大。同时螺旋升角对滚珠的受力情况影响不大，只影响接触点的曲率。

18

同时本文发现滚珠数量和接触角对轴向刚度的影响较为明显，因此增加滚珠数量和接触角是增加轴向刚度的有效途径。

19

通过观察发现轴向载荷和轴向刚度呈 $1/3$ 次方关系。但这个图更重要的是为预紧力的选择提供依据。

20

通过轴向变形和轴向载荷的关系我们可以绘制出不同预紧力下的预紧力关系图。

21

通过定量分析，我们可以看到：预紧力为 P 时，轴向变形为 δ 。当有工作载荷 F 时，剩余预紧力为 F'' ，同时轴向变形有 δF 的变化。为了保证剩余预紧力 F'' 大于 0，我们让 F'' 等于 0 时的载荷为最大工作载荷 F_{\max} ，此时轴向变形为 2δ 。根据这两个公式我们可以得到最佳预紧力为最大工作载荷的 $1/\sqrt{8}$ 。

22

关于摩擦学特性分析，本文首先建立了坐标系和滚珠、油膜、滚道的模型。

23-26

根据牛顿内摩擦定律和连续性方程我们可以推导出点接触弹流润滑的雷诺方程。

27

要求解油膜分布，除了雷诺方程，还需要弹性变形方程、油膜厚度方程和在平衡方程。

28

本文求解雷诺方程用的是有限差分法。利用中差分格式，就可以将针对网格内部节点的偏微分方程转换为线性方程，在将雷诺方程的边界条件 $p(x,y)=0$ 作为补充，方程数量就等于网格节点数，就可以加以求解。

29

初值的选择对迭代计算有很重要的影响，因此压力初始值选择赫兹接触压力，最小膜厚利用膜厚公式选定。

30

雷诺方程中油膜厚度和压力同时存在，由于他们之间相差 15 个数量级，因此为了减小计算误差，必须将它们无量纲化，转换为统一数量级的数字。这是无量纲化的雷诺方程和油膜厚度方程。

31

计算过程我利用 MATLAB 编程实现，选取 x,y 方向各 80 个节点，得到如图所示的油膜厚度，发现出口区有明显的二次压力峰。

32

观察油膜厚度分布发现出口区有明显的颈缩现象。

33

我们分析这个现象，是由于出口与压力急剧减小，导致弹性变形恢复，进而产生颈缩现象，然后在颈缩区前部产生油膜堆积，随着油膜的堆积，产生了二次压力峰。因此我们发现产生二次压力峰的根本原因是流体的动压效应。

34

我们可以看出卷吸速度越大，流体动压效应越明显，二次压力峰越明显，油膜厚度越大。

35

而载荷越大，赫兹接触占据主要地位，流体动压效应越小，因此二次压力峰值越小，油膜厚度越小。

36

观察雷诺方程，当黏度为常数时，乘到方程右端，可以发现黏度和速度对油膜的影响相似。因此黏度越大，二次压力峰越明显，油膜厚度越大。

37

综上所述，可以通过减小滚珠直径的方法减小滚珠循环过程中的冲击
通过减小滚珠直径，增加滚珠数量，增大接触角可以有效增加滚珠丝杠的轴向刚度。

预紧力的选择方面，本文建议选择最大工作载荷的 $1/\sqrt{8}$

摩擦学方面，可以通过增加滚珠数量，减小滚珠载荷，增加滚珠线速度，改良润滑油黏度和黏温特性的方法增加滚珠丝杠的寿命

38

本文的不足之处在于只针对一种反向曲线加以分析，因此以后可以在反向曲线的优化设计方面加以研究。

动力学方面本文将滚珠理想轨迹求导得到速度、加速度和力，而忽略了滚珠和滚道的碰撞。

摩擦学方面本文将黏度、密度和温度视为常数建立的点接触弹流润滑模型较为粗糙，以后可以建立热弹流润滑模型，以及考虑表面粗糙度的模型提高分析的准确性。