

径向滚珠轴承在工程分析中简化方法的研究

王 俊 卢 铿 王家骥

(中国科学院长春光学精密机械研究所 长春 130022)

摘要 结构分析中,尤其是有限元法计算过程中,对轴承的模拟是一个比较难以实现的问题。由于轴承的受力情况比较复杂,导致了轴承内外圈的边界条件及轴承滚珠的受力情况难以正确的确定。现有的大型有限元分析软件对轴承的描述也是比较困难的。本文通过对轴承进行受力分析,利用 Ansys 有限元分析软件对轴承进行模拟,将几种简化方法进行比较,得到了较为正确的结果。

关键词 滚动轴承 有限元 静力学分析

1 引 言

自从有限元法得到充分发展以来,有限元法在结构的静力学分析,动力学分析中得到了广泛的应用。有限元法的基本思想是将整体结构模型简化,并加以离散化,形成若干个单元及离散的节点构成的有限元模型。然后通过插值函数,用节点的位移来描述单元内各点的位移(位移有限元法)。通过建立位移连续性方程及力的平衡方程,形成有限元分析的数学模型。对于静力学分析,有:

$$KX = F \quad (1)$$

其中 K 为刚度矩阵, X 为节点位移矩阵, F 为载荷矢量。对于动力学分析,动力学基本方程为:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F \quad (2)$$

其中 M 、 C 分别为质量矩阵和阻尼矩阵,其他与(1)式中相同。

现有的大型有限元分析软件包通常能够实现结构的离散化,利用插值函数建立有限元模型的质量矩阵,刚度矩阵,阻尼矩阵及载荷矢量。工程分析人员利用现有的程序方便地进行结构的静力学特性及动力学性能分析。但若工程分析者不具备良好的理论基础或对结构的正确认识,往往会导致较大的误差甚至错误的产生。这主要由于以下几点原因:

1. 对于结构的简化, 由于往往待分析结构比较复杂, 若使有限元模型与实际模型完全一致是相当困难的, 比如各构件的铰接点, 螺栓连接点等都很难正确的描述;
2. 用离散的结构来代替真实连续结构是建立在插值函数的基础之上的。如有限元网格划分的不合理, 插值函数的误差将会增大, 这必将影响计算精度;
3. 边界条件的确定是比较困难的, 它需要坚实的专业知识;
4. 由于结构的复杂性, 阻尼难以被正确的描述, 导致有限元模型与实际结构的阻尼不一致。

对于轴承问题, 同样存在着以上几方面的问题, 造成滚珠轴承工程分析中的较大误差的存在, 而且现有的简化方法都一定程度上存在着一些其他方面的缺陷:

1. 模态综合法: 计算力学中曾用模态综合法来计算轴承问题, 这种方法首先计算轴承外圈及连接部件的模态, 再计算轴承内圈及连接部件的模态, 利用模态综合技术将两者综合, 得到综合结构的模态。模态综合法原理上比较接近轴承的真实边界条件, 但其计算量大, 而且现有的有限元分析程序如 Ansys, Patran, Sap 等很难实现这种方法。
2. 以空间三维杆单元代替轴承滚动部件的方法: 由于轴承滚动部件只承受径向力, 而三维空间杆单元也只是承受轴向力, 所以这种简化方法在一定程度上来说是合理的, 但由于轴承滚动部件只承受径向压力作用, 而杆单元却能同时承受轴向拉力及压力的作用, 所以这种方法又有其不合理的因素, 特别是轴承实际上可以以其轴线为轴自由回转, 而这种方法模拟出的轴承失去了这一特性。

本文通过对滚动轴承进行受力分析, 并对三维间隙元的特性加以研究, 提出用三维间隙元来模拟滚动轴承的分析方法, 用模拟结果来和三维杆单元模拟结果进行对比, 发现本文提出的方法更为合理。

2 滚动轴承的受力分析

根据弹性力学, 整个轴承的受力情况见下图:

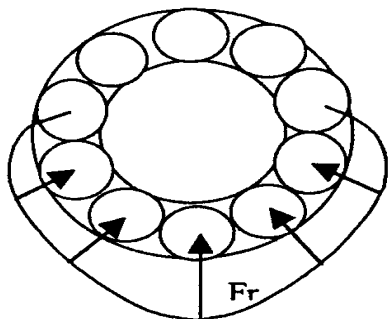


Fig. 1 The load in the ball of the bear

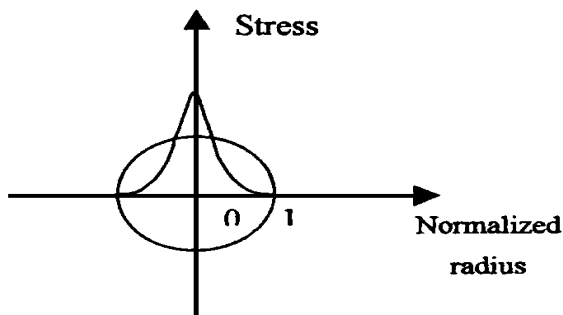


Fig. 2 Stress distribution of the ball

Table.1 The load and the displacement of the ball (Unit: kgf; mm)

load	1	2	3	4	5	10	15
displacement	5.5E- 5	1. 1E- 4	1.6E- 4	2. 2E- 4	2. 7E- 4	5. 5E- 4	8. 22E- 4
load	20	30	40	50	100	200	500
displacement	1. 1E- 3	1. 64E- 3	2. 19E- 3	2. 7E- 3	5. 5E- 3	1. 1E- 2	2. 74E- 2

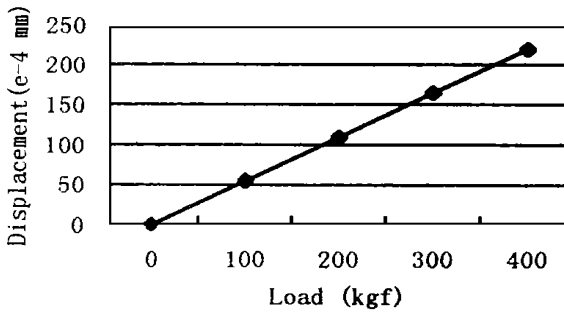


Fig.3 Displacement vs. load curve

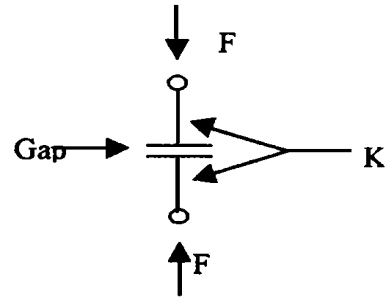


Fig.4 3D gap element

通过轴承受力情况分析可知,当轴承受受到径向力时,滚动轴承下半圈滚动体受力,每个滚动体的受力都为径向力(如图1所示)根据弹性力学假设,滚动轴承的单个滚动部件受外界静压力后的变形情况如图3所示。由图可见,滚动轴承的滚动部件的变形与所受外力成正比(符合弹性力学假设)。

3 静力学分析中的简化

3.1 用三维空间杆单元来代替滚珠的情况

由于杆单元也只承受轴向力,所以,它与滚动轴承滚珠的受力情况相似。静力学等效的关键在于等效体与被等效件的静强度一致。本文采用了杆截面积优化法,以杆单元两节点间的位移为目标函数,以杆件的最大许用应力为约束条件,以杆件横截面积为设计变量,寻找最优的横截面积,使得杆单元受力后的力与位移关系曲线与滚动轴承滚珠的力与位移关系曲线一致。通过计算,长度 10mm、直径 8.8157mm 的杆件与直径为 10mm 的滚珠力与位移关系曲线是一致的。

3.2 三维间隙元的受力情况分析

图4是三维间隙元的原理图,三维间隙元相当于一个中间断开的线性弹簧,当间隙元受到压力时,间隙闭合,弹簧起作用;当间隙元受到拉力时,间隙增大,弹性元件不起到任何作用,所以三维间隙元只承受沿弹簧长度方向的压力。

通过以上的分析可知,滚动轴承的单个滚动部件的受力情况与三维间隙元的受力情况基本一致,所以,用三维间隙元来代替滚动轴承的滚动部件是合理的。所不同的是滚动轴承的滚动部件有质量,而三维间隙元无质量的存在。滚动轴承滚珠受力与变形成正比,这与三维间隙元的线弹性性能是一致的,所以找到正确的三维间隙元的弹性系数,便可满足三维间隙元与滚

动轴承的静力学等效问题。若令三维间隙元的初始间隙为零, 则三维间隙元的弹性系数将是上图滚动轴承外力与变形关系曲线的斜率。通过计算, 三维间隙元的弹性系数为 18181.8182kg/mm 时, 便与滚动轴承滚珠在静力学上是等效的。

3.3 图 5 所示结构理论解

图 5 是一根两端以轴承支撑的轴, 轴的中点处受到径向载荷作用。为了分析图 5 所示结构各种简化方法的合理性, 下面从材料力学的角度对该结构进行分析: 首先将中间轴按简支梁进行计算 (见图 6):

根据材料力学理论, 简支梁的受力变形 f_{shaft} 可以按下式进行计算:

$$f_{\text{shaft}} = PL^3 / (48EI) \quad (3)$$

其中: P 为作用于轴的中点的集中载荷, L 为轴的长度, E 为材料的弯曲弹性模量, I 为轴的截面惯性矩。

然后, 对滚动轴承滚动体的变形进行分析: 滚动轴承滚动体的受力情况见图 7。

由于只有滚动轴承的下半圈的滚动体受力, 而其受力情况又按余玄分布, 所以可先求出支反力即滚珠所承受的径向力, 再求得滚珠的变形 f_{ball} 。

最后, 求出滚动轴承支撑的轴的受力变形为:

$$f = f_{\text{shaft}} + f_{\text{ball}} \quad (4)$$

最后求出的理论计算值列于表 2 中。

3.4 数值分析

本文分别以三维实体构成的球体、三维空间杆单元及三维间隙元代替轴承滚动体的真实结构, 计算相同边界条件下的转轴中点的变形情况 (见表 2)。其中, 三维实体球、三维空间杆单元和三维间隙元的数量和空间分布都是与实际结构一致, 三维实体球直径 10mm ; 三维空间杆单元直径 8.8157mm , 长度 10mm ; 三维间隙元弹性系数 18181.8182kgf/mm ; 转轴直径 20mm , 长度 200mm 。各种单元材料特性皆为铝合金)。

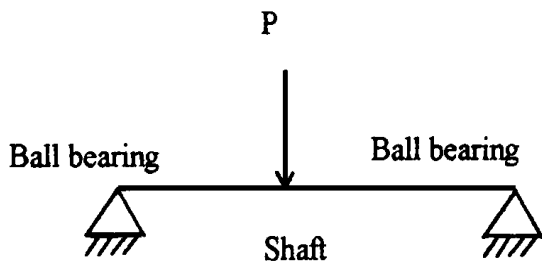


Fig. 5 Simply supported shaft

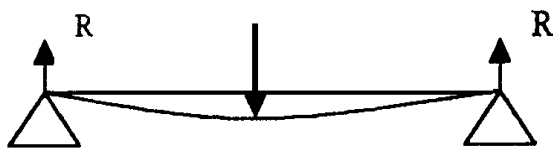


Fig. 6 Displacement of the shaft

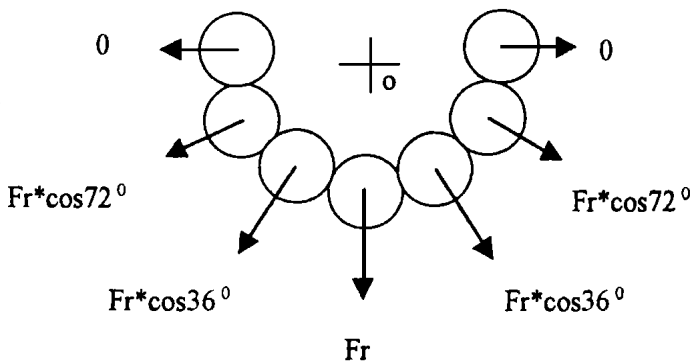


Fig. 7 The load of the ball

Table. 2 The static analysis result with different element

load element	10kgf	20kgf	30kgf	40kgf	50kgf
theoretical value	7.17E-4	1.434E-3	2.151E-3	2.868E-3	3.585E-3
3D-solid	6.46E-4	1.292E-3	1.946E-3	2.571E-3	3.121E-3
error	10.99%	10.99%	10.53%	11.55%	14.87%
truss	6.47E-4	1.292E-3	1.944E-3	2.571E-3	3.122E-3
error	10.82%	10.99%	10.65%	11.55%	14.83%
3D-gap	6.96E-4	1.396E-3	2.092E-3	2.788E-3	3.481E-3
error	3.02%	2.72%	2.82%	2.87%	2.99%

由上表可见,用三维间隙元简化的计算结果要比用实体球及三维空间杆单元简化的计算结果大,即位移量大,这是因为实体球及三维空间杆单元的简化方法引入了球体及杆的拉力和压力作用,从而给结构增加了刚度,而三维间隙元考虑了实际结构中的间隙的存在。从与理论计算结果相比较来看,用三维间隙元计算的误差最小,而其他两种简化方法计算误差较大,所以说,用三维间隙元简化轴承进行计算更合理。

4 结 论

本文通过分析计算,解决了滚动轴承的静力学的简化计算问题,可以使原本较为复杂的结构变得简捷而提高计算效率。在静力学分析中,可以用三维球体、三维空间杆单元和三维间隙元来模拟实际结构的滚动体,用三维球体得到的单元数较多(每个滚动体要划分成若干个三维实体单元),使计算模型增大,用三维空间杆单元需要首先进行截面积的优化,而三维间隙元是非线性单元,运算速度较慢,在分析计算时可根据实际情况对这三种单元进行选用。当对计算结果精度要求不太严格时,可以选用三维实体元和三维空间杆单元,其中应优先选用三维空间杆单元;当对计算结果误差要求较严格时,应选用三维间隙元,尽管其运算速度较慢,但其结果能满足精度要求。

参 考 文 献

- 1 王彬. 振动分析及应用. 海潮出版社, 1992
- 2 库克著 R D, 程耿东等译. 有限元分析的概念和应用. 北京: 科学出版社, 1989
- 3 傅志方. 振动模态分析与参数辨识. 北京: 机械工业出版社, 1989
- 4 陈塑寰. 结构振动分析的数值方法. 长春: 吉林科学技术出版社, 1996
- 5 Ma Zheng-Dong. Topological Optimization Technique for Free Vibration Problems. Journal of Applied Mechanics, 1995, 62
- 6 宋天霞. 大型复杂结构优化设计计算. 武汉: 华中理工大学出版社, 1989
- 7 User's Manual, Ansys Engineering Analysis System Version 4.4, Swanson Analysis Systems, Houston, 1989

A Study on the Simplifying Method of Ball Bearing in Structural Analysis

WANG Jun, LU E, WANG Jia-Qi

(*Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022*)

Abstract

It is a very difficult problem to simulate ball bearing in structural analysis or in the finite element analysis correctly. Because the working condition of the ball bearing is very complex, the boundary conditions of the balls, inner and outer rings of the ball bearing are difficult to define. The static and dynamic analysis of ball bearing is carried and the simplifying method of the ball bearing is studied with the finite element analysis program-Ansys.

Key words: Ball bearing, Finite element method, Static analysis

王 俊 男, 中国科学院长春光学精密机械研究所博士研究生。1994年毕业于吉林工业大学汽车与拖拉机专业, 1997年获得吉林工业大学工学硕士学位, 1997年考入中国科学院长春光学精密机械研究所攻读博士学位。