

伸出量可控液压缸中滚珠丝杆的力学分析与仿真

陈燕君¹, 吴榕¹, 侯恩光²

(1.厦门大学 物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005;

2.闽西职业技术学院 机械工程系, 福建 龙岩 364021)

摘要: 该文介绍了一种活塞杆伸出量可控的液压缸, 该缸利用滚珠丝杆副将活塞杆的直线位移转化为丝杆的角位移, 再由旋转编码器对该角位移进行测量, 经过反推计算可得到活塞杆伸出量的大小, 为保证测量的准确性和控制的精确性, 需要对测量的误差进行补偿。该文在 Pro/E 中建立了丝杆的实体模型, 并导入到 ANSYS 中, 通过热-结构耦合分析得到某一温度下丝杆的伸长量, 再经过对数据的分析以及线性化, 可作为控制程序中误差补偿的参考数据来应用。

关键词: 液压缸; 位置可控; 滚珠丝杆副; ANSYS 耦合仿真

中图分类号: TH137; TP271+3 文献标识码: A 文章编号: 1008-0813(2013)02-0077-03

Mechanical Analysis and Simulation in about Ball Screw in Extended Controllable Hydraulic Cylinders

CHEN Yan-jun¹, WU Rong¹, HOU En-guang²

(1.School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2.Minxi Vocation & Technical College, Longyan 364021, China)

Abstract: This paper introduces a kind of hydraulic cylinder with the protrude volume of piston rod controllable, the cylinder by using the ball screw to translate linear displacement of piston rod into angular position of screw rod to measure. Measured results are outputted by a grating or magnetic grating angular displacement transducer. To ensure the control precision, need to compensate for measurement error. This paper using Pro/E software to finish the entity modeling and import into ANSYS software, through the temperature-structure coupling analysis, getting the screw elongation in a temperature. At last by the analysis of data and linear, the result data can be used as a control program application in error compensation.

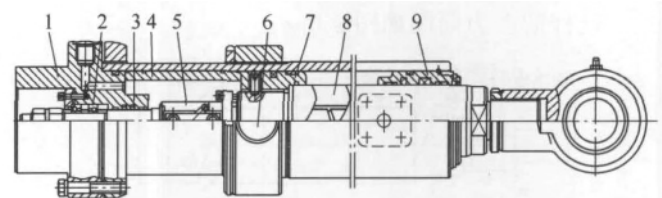
Key words: hydraulic cylinder; position control; ball screw; ANSYS coupling simulation

0 引言

带位置传感器、活塞杆行程可以控制的液压缸近年来发展迅速, 在轧钢压下系统、冶金锅炉的送料液压系统、煤矿液压支柱、注塑推进机构中运用广泛。本文介绍了一种将活塞杆的直线位移转化为滚珠丝杆角位移来测量的方法, 接着对滚珠丝杆的受力进行了分析, 最后将丝杆的实体模型导入 ANSYS 中进行仿真, 得到某温度下丝杆受热膨胀的伸长量。

1 检测方法

工作原理如图 1 所示。液压缸活塞杆的左端盖钻有深孔, 滚珠丝杆一端伸入到深孔内, 丝杆螺母依靠活塞杆左端面定位, 并用六角紧固螺钉固定。左端盖设有台阶孔, 丝杆采用一端固定一端自由的安装方式, 在左



1-缸底 2-角接触轴承 3-斯特封 4-活塞隔圈 5-滚珠丝杆
6-铰轴 7-活塞 8-活塞杆 9-导向套

图 1 液压缸原理图

端的台阶孔内采用两套 25°角接触轴承支撑丝杆, 轴承成对并且面对面安装, 隔圈在轴承压盖的压紧力下可对轴承进行轴向预紧并对丝杆定位。通孔采用斯特封密封, 这种密封具有自密封能力和自润滑性, 与金属表面无粘着作用, 最大可承受 30MPa 的压力, 使用寿命长, 适合旋转运动轴的密封。丝杆的螺母用六角螺钉紧固在活塞杆的左端, 并采用铸铁隔圈保护螺母。丝杆的一端从左端盖伸出, 当高压油推动活塞往复运动时, 活塞杆上的螺母做跟随运动, 由于丝杆的轴向位移被限制, 丝杆在螺母的带动下只能产生角位移, 这个角位移

收稿日期: 2012-06-06

作者简介: 陈燕君(1989-), 女, 福建龙海人, 硕士研究生, 主要研究方向为 CAD/CAM。

传输到编码器的主轴上，根据编码器产生脉冲的个数可以反推出活塞杆的直线位移。滚珠丝杆的摩擦系数极小，再加上采用大导程丝杆，螺旋角足够大，可以轻松得到丝杆的旋转运动。

2 滚珠丝杆的力学模型

液压缸的额定压力设为 16MPa，丝杆公称直径为 $\phi 25\text{mm}$ ，导程为 25mm，螺旋升角 β 为 17.66° ，角接触轴承的摩擦系数 μ_2 为 0.002，压力角 ψ 为 25° ，斯特封的摩擦系数 μ_1 为 0.01，丝杆的滚动摩擦系数 μ 为 0.005。

滚珠丝杆在逆传动时的效率满足公式(1)：

$$\eta = \frac{1 - \mu \tan \beta}{1 + \mu \tan \beta} \quad (1)$$

将数据带入公式 1 可以求得丝杆的效率 $\eta=0.98$ 。

丝杆逆传动时所需要的外部轴向载荷满足公式(2)：

$$F_a = \frac{2\pi M}{\eta L} \quad (2)$$

式中 M ——负载转矩；

L ——滚珠丝杆导程。

滚珠丝杆需要克服的负载转矩包括两个部分，其一为高压油挤压斯特封的 O 形圈而对丝杆产生的摩擦阻力矩 M_2 ，其二为角推力轴承在轴向载荷下所产生的摩擦转矩 M_1 ，即：

$$M = M_1 + M_2 \quad (3)$$

2.1 丝杆受力分析图解

丝杆的受力简图如图 2 所示。

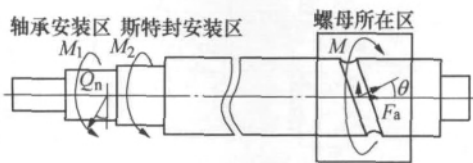


图 2 滚珠丝杆受力分析

图中 Q_n ——轴承滚珠产生的正压力；

F_a ——丝杆所受的轴向驱动力。

在 16MPa 的额定压力下，密封圈所产生的摩擦转矩由公式(4)求得：

$$\begin{aligned} N_0 &= \pi d d_0 p_0 / 2 \\ F &= N_0 \mu_1 \\ M_2 &= Fd / 2 \end{aligned} \quad (4)$$

轴承的摩擦力矩由公式(5)求得：

$$M_1 = Q_n \mu_2 r \quad (5)$$

驱动力矩 M 及轴向力 F_a 由公式(6)得：

$$M = F_a \tan \theta \cdot R$$

$$F_a = Q_n \sin \psi \quad (6)$$

联合公式(3)(4)(5)(6)可以求得 M_1 、 M_2 、 M 、 F_a 、 Q_n 分别为：0.058N·m、3.258N·m、823N、1951N。

将所得的数据带回公式(2)，验证是正确的。

3 滚珠丝杆的结构与热耦合分析

3.1 热仿真的意义

滚珠丝杆要保持较高的传动精度，其正常工作温度是在常温 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。现代高精度的数控机床都需要采用热补偿系统对传动丝杆的温度误差进行补偿，以达到高精度的传动效果。

笔者在设计中将丝杆的用法推陈出新，首先是将丝杆的正传递变成了逆传递，其次是在恶劣条件下使用滚珠丝杆。液压缸中，油液的温度变化范围非常大，从开启机器到预热过后再到正常工作，跨度有 60°C 之多，如果是高压大流量系统，温升会更高。对于巨大的温升，滚珠丝杆又安装在液压缸内部，不可能采取强制冷却的措施，其温度只能跟随油液的变化而变化，在这种工况下对油液的温度监测与适当的温升补偿是必不可缺少的。丝杆的热误差补偿可以采取预补偿的方法，即在定位误差中，预补偿一定的值，以抵消热变形误差。

3.2 滚珠丝杆结构与热耦合有限元分析

本文采用间接耦合法对丝杆在某一温度下的伸长量进行仿真，先对丝杆进行瞬态热分析再进行结构分析。根据能力守恒原理，瞬态传热的有限元解为公式(7)：

$$[C]\{T\} + [K]\{T\} = \{Q\} \quad (7)$$

式中 $[K]$ ——热传导矩阵，包含导热系数、热对流系数及辐射率和形状系数；

$[C]$ ——比热容矩阵；

$\{T\}$ ——节点温度向量；

$\{T\}$ ——温度对时间的导数；

$\{Q\}$ ——节点热流率向量。

当然需要选择适当的时间步长，步长太小，解中可能会出现振荡现象，步长太大，温度梯度不能精确计算，在本分析中温度载荷通过阶梯载荷的形式加载到模型上。

分析的基本步骤如下：

将在 Pro/E 中创建的丝杆实体模型导入 ANSYS 中，丝杆的倒角、退刀槽以及螺纹等细节部分都省略，这样有利于网格的生成，选用线性单元 solid90 并采用智能网格对实体进行分网，单元变长设置为 2。输入丝杆材料特性，弹性模量为 $2.2 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ，泊松比为

(下转第 82 页)

清洁度指标》，或根据各工程机械厂自身的企 业标准。

对于液力传动清洗过滤装置本身，如要求提供油液污染度达到 GB/T14039-2002 (ISO 4406:1999, MOD)19/17/14(相当于 NAS 1638 8 级)，或者更高，只需要提高主循环回油过滤滤芯精度，这样变矩器清洁度也能达到更高的要求，但是清洗成本也会相应的提高。

5 小结

液力清洗过滤装置是针对目前液力传动装置（特别是液力变矩器）高污染、难清洗的现状和清洗成本高的特点而设计的，实践证明，不仅清洗成本相对低廉，而且能很好的控制清洗油液的污染度和液力传动装置的清洁度。

液力清洗过滤装置同样也适合变速箱、齿轮箱等高污染传动装置的清洗和维护。

(上接第 78 页)

0.28, 密度为 $7.8 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$, 热膨胀系数为 $1.3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 热导率为 $7 \times 10^{-2} \text{ W/(mm}\cdot^\circ\text{C)}$, 比热容为 $448 \text{ J/(kg}\cdot^\circ\text{C)}$ 。设定分析类型为 transient analysis, 再设定载荷步与载荷子步以及输出控制选项, 接下来施加温度载荷, 丝杆整体施加 25°C 的始温, 再选者丝杆的整体表面施加对流及温度载荷, 对流系数为 $6.5 \times 10^{-4} \text{ W/(mm}^2\cdot^\circ\text{C)}$, 温度载荷为 75°C , 载荷施加完毕接着进行求解, 得到一个 rth 文件。热分析完成后接着做结构分析, 改变分析类型, 单元类型自动变成 solid95, 删除对流边界载荷, 给有限元模型施加刚才得到的节点温度载荷即 rth 文件, 接着在丝杆的螺纹紧固部分施加 X 轴向位移约束, 最后进行求解再保存结果。通过 ANSYS 的后处理器可以查看丝杆在 75°C 时的变形情况, 变形云图和端点的位移-时间历程曲线如图 3~图 5 所示。

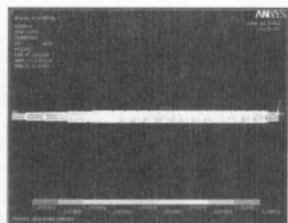


图 3 丝杆在 75°C 时变化量的等效变形云图

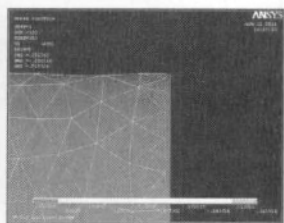


图 4 端部的伸长量放大效果图

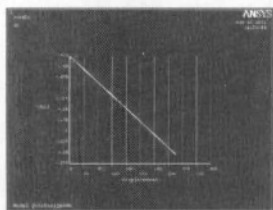


图 5 端部 $X=0$ 处节点的位移-时间历程曲线

参 考 文 献

- [1] 机械设计手册编委会. 机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [2] 徐小涛, 等. 工程机械液压系统油液污染控制[J]. 流体传动与控制, 2005, (6).
- [3] JB/T9711-2001, 单级向心涡轮液力变矩器通用技术条件[S].
- [4] GB/T17948-1998, 液压颗粒污染分析-从工作系统管路中提取液样[S].
- [5] GB/Z 20423-2006/ISO/TS 16431:2002, 液压系统总成-清洁度检验[S].
- [6] GB/T 14039-2002, 液压传动 油液 固体颗粒污染等级代号[S].
- [7] GB/T 20079-2006, 液压过滤器技术条件[S].
- [8] GB/T 18853-2002, 液压传动过滤器-评定滤芯-过滤性能的多次通过方法[S].
- [9] 耿艳辉, 詹晨菲. 液压系统长大管路的清洗[J]. 液压气动与密封, 2012, (5).

从图 3 中可以看出右端面的最大变形量为 0.252563 mm , 这个数据也可以从图 5 得到印证, 图 5 为右端面 $x=0$ 处某一节点从 $25^\circ\text{C} \sim 75^\circ\text{C}$ 温升时的时间-位移曲线, 该数据基本能与云图对应。同时, 根据经验公式 $\Delta l = \alpha \cdot \Delta T \cdot l$ 可以计算求得变化量为 0.2505 mm , 说明该仿真结果是可信的。

在液压缸的某个位置安装温度传感器, 实时监测缸内油温, 基于以上的有限元计算, 即可以实时补偿由于环境温度上升带来的测量误差。

4 结束语

本文在计算滚珠丝杆受力模型的基础上对滚珠丝杆的有限元模型进行简化, 再基于 ANSYS 的热-结构耦合仿真得到丝杆由 25°C 升 75°C 时的长度变化量, 按照这种方法, 可以在工作温度的区间仿真一系列的温度点, 最后将结果数据线性化, 可以得到丝杆的温度-伸长量曲线, 再将这条曲线所蕴含的数据编辑到补偿程序中去进行实时补偿, 可以减小由温度带来的测量误差。

参 考 文 献

- [1] 马少杰, 袁军堂, 等. 液压盘式制动器制动活塞的密封机理研究[J]. 润滑与密封, 2002, (3).
- [2] 马少杰, 袁军堂. 摩托车盘式制动器制动缸密封结构的设计[J]. 摩托车技术, 1999, (3).
- [3] 成大先, 等. 机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008, (3).
- [4] 张葵, 李建华. 球轴承摩擦力矩的分析计算[J]. 轴承, 2001, (1).
- [5] 厦门大学. 一种带位置传感装置的液压缸: 中国, 201110095084 [P]. 2011-07-13.
- [6] 唐兴伦, 等. ANSYS 工程应用教程——热与电磁篇[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.