DOI: 10.3901/JME.2014.20.167

“二次源”法阻抗估值算法和数据处理程序设计*

宋月超¹ 徐 兵¹ 杨华勇¹ 刘英杰²

(1. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室 杭州 310027;

2. 广州市特种机电设备检测研究院 广州 510180)

摘要: 针对现有“二次源”法在参考管道上传感器距离是压力波波长整数倍时,泵源估值精度较低,且整个数据处理过程繁琐复杂、费力耗时,导致其不适用于工业应用的问题,提出泵源阻抗估值算法优化模型,并应用 Matlab/GUI 模块编写一套“二次源”法数据处理平台软件,在提高泵源流量脉动的测试精度的同时简化“二次源”法数据处理过程。介绍柱塞泵标准“二次源”法的测试原理,对比几种泵源阻抗估值方法的特点,应用 Matlab/GUI 模块开发优化的“二次源”法数据处理软件,并进行试验验证。结果表明,相比分布参数法,线性衰减技术能够估测全频率处柱塞泵泵源阻抗,估值效率提高了 70%;在保证测试精度的情况下,“二次源”法测试软件简化了标准“二次源”法数据处理过程并节省了 80%的计算时间,为“二次源”法的工业应用提供技术支撑。

关键词: “二次源”法; 泵源阻抗; 线性衰减技术

中图分类号: TH137

Design on Estimation Algorithm of the Pump Source Impedance and the Signal Processing Software for Secondary Source Method

SONG Yuechao¹ XU Bing¹ YANG Huayong¹ LIU Yingjie²

(1. State Key Laboratory of Fluid Power and Transmission, Zhejiang University, Hangzhou 310027;

2. Guangzhou Academy of Special Equipment Inspection & Testing, Guangzhou 510180)

Abstract: It is a fact for the secondary source method that the pump source impedance can't be computed with the current estimation algorithm when the transducer length of the reference pipe is multiple times of the pressure wavelength, and the signal processing is complicated and time consuming, so the secondary source method is inapplicable in industry. For solving the problem, a new estimation algorithm of the pump source is discussed, and a signal processing software based on Matlab/GUI for secondary source method is designed. The test principle of the secondary source method is depicted, and then several evaluation methods of source impedance (such as the linear interpolation method, the weighted linear regression technique and the distributed-parameters method) and its application are discussed. With the Matlab/GUI, a signal processing software for the secondary source method is developed and then validated with test results. It can be concluded from the test results that compared with the distributed-parameter method, the computing time of the source impedance with the weighted linear regression Technique is reduced 70%. At the same test accuracy, the signal processing of the secondary source method is simplified and the computing time is reduced 80% by the software. Therefore, with the signal processing software, the application of the secondary source method in industry is possible.

Key words: secondary source method; source impedance; weighted linear regression technique

0 前言

轴向柱塞泵是液压泵家族重要成员,具有体积小、传递功率大(高压力和高转速)、变量控制方便、

效率高、寿命长等一系列优点^[1],因此广泛应用于工业领域。但是柱塞泵噪声等级也是等工况下各种液压泵中最高的,因此研究柱塞泵噪声具有重要意义。

柱塞泵流体噪声主要由泵源流量脉动激发,受柱塞泵出口管道动态特性影响。柱塞泵出口均值流量较大,且脉动频率较高。目前市场上缺乏能够进

* 国家自然科学基金(51075360)和国家科技支撑计划(2011BAF09B03, 2013BAF07B01)资助项目。20131013 收到初稿,20140715 收到修改稿

行高频流量测试的元件, 现有流量计最高只能测试 300 Hz 动态流量, 即只能测试柱塞泵出口一阶或者二阶的流量脉动, 远不能满足分析、验证高频柱塞泵出口流量脉动的要求, 只能采用间接测试方法。

国内外学者针对柱塞泵流体噪声间接测试方法进行了大量的研究。20 世纪 80 年代初, 巴斯大学 BOWNS 等^[2-3]首先提出应用不同长度和管径的管道测试液压泵泵源阻抗和泵源流量脉动的方法。这种方法测试装置简单, 但是需要测试许多不同长度管道(优选法之后为 9 根)才能求得泵源阻抗和泵源流量脉动, 测试过程异常耗时、繁琐。日本神奈川大学 KOJIMA 等^[4-5]提出采用双系统双压力测试泵源流量脉动和泵源阻抗。该方法测试过程中忽略了油液黏性摩擦的影响, 因此测试精度较低, 且测试过程复杂。20 世纪 90 年代初, 林雪平大学 PETTERSSON 等^[6-7]提出两点测试法测试液压泵泵源流量脉动, 本测试方法不需要引入“二次源”, 测试系统非常简单, 但是由于阻抗计算公式适应于截面简单的长直管道, 因此针对复杂管道(复杂管道定义为管径沿管道延伸方向改变的管道, 简单管道定义为管径在管道延伸方向不变的管道), 测试精度不高。然后林雪平大学 ERICSON 等^[8-9]提出采用“近源”法测试复杂泵出口管道流量脉动, 测试过程中需要在近配流盘出口处安装一个高频压力传感器。近源测试法不需要采用特别方程计算复杂出口管道泵源阻抗, 因此数据处理方式简单。但此种方法对于复杂管道高频泵源流量脉动的测试精度不高, 需要进一步改善。

“二次源”法^[10-11]是基于波的传递理论和管道动态特性, 假设泵源阻抗和泵源流量脉动并联, 通过测试与柱塞泵相连管道高频压力信号, 推导出柱塞泵泵源阻抗和泵源流量脉动。数据采集过程中, 为保证测试精度和范围, 要求选用材质一致, 长直硬管道; 压力传感器要能够在高压、高频情况下, 精确测试 10 倍于柱塞泵频率谐波; “二次源”信号要具有周期性, 为保证测试精度, 最好能够变频调节, 且频率范围大于 10 倍柱塞泵基频; 数据处理过程中, 由于测试要求柱塞泵频率与“二次源”频率不等, 因此需要针对柱塞泵频率估测泵源阻抗。“二次源”法可用于测试具有复杂管道、高频大流量液压泵泵源阻抗和泵源流量脉动, 测试精度高, 测试过程简单, 测试时间短等一系列优点。但是“二次源”法对测试元件精度要求高, 数据处理过程复杂, 计算耗时长, 因此需要具备专业知识的人员处理, 不适于应用在工业环境下。

本文针对“二次源”法存在的问题进行深入研

究, 提出一种阻抗估值算法的优化模型, 开发一种基于 Matlab/GUI 程序的软件, 以提高计算精度, 简化数据处理过程, 减少计算时间。首先简析“二次源”法测试原理, 给出几种典型的阻抗估值算法, 以提高“二次源”法估值效率。给出“二次源”法数据处理过程, 并基于 GUI 软件, 建立“二次源”法数据处理过程的人机交互界面, 并给出相应计算步骤。分析泵源阻抗和泵源流量脉动测试结果, 证实该 GUI 测试界面能够快速获得测试结果, 方便“二次源”法的工业应用。

1 “二次源”法测试原理

1.1 “二次源”法测试原理

“二次源”法是基于波的传递理论和管道动态特性, 测试泵源阻抗和泵源流量脉动的标准方法。测试过程中假设被测泵泵源流量和泵源阻抗并联, 测试原理如图 1 所示。图 1 中, Q_E 为柱塞泵出口流量; p_E 为柱塞泵出口压力; Z_E 为柱塞泵管道出口处阻抗; Q_s 为被测泵泵源流量; Z_s 为泵源阻抗; l 为与被测泵相连参考管道长度; Z_T 为终端阻抗; Q_A 为辅助泵流量。

图 1 “二次源”法测试原理简图

柱塞泵泵源流量脉动可用式(1)计算^[1]

$$Q_E = Q_s - p_E / Z_s \quad (1)$$

阻抗测试时, 被测泵和“二次源”泵同时打开, 取“二次源”泵频率处高频压力 $p_{m,i}$, 应用式(2)来计算泵源阻抗^[12]

$$Z_{SM,i} = Z_0 \frac{t_2 s_{1,1} - t_1 s_{2,1} + t_1 s_{2,2} - t_2 s_{1,2}}{t_2 s_{1,1} - t_1 s_{2,1} - t_1 s_{2,2} + t_2 s_{1,2}} \quad (2)$$

式中 Z_0 ——管道特征阻抗。

$$Z_0 = \sqrt{\rho K \xi / A}$$

$$s_{kl} = \sum_{m=1}^3 \overline{f_k(x_m)} f_l(x_m)$$

$$t_k = \sum_{m=1}^3 p_{m,i} \overline{f_l(x_m)}$$

$$f_1(x) = \exp(-\gamma x)$$

$$f_2(x) = \exp(\gamma x)$$

$$\gamma = j\omega\sqrt{\rho\xi/K}$$

$$\xi = \sqrt{K_1 + (8K_2/jN_s^2)}$$

$$N_s = (d/2)\sqrt{2\pi f/\nu}$$

式中 ρ ——油液密度;
 K ——有效体积模量, 可通过查表获得;
 A ——管道有效截面积;
 γ ——波的传递系数;
 ω ——角频率;
 ξ ——管道黏性影响系数;
 N_s ——波的剪切系数;
 d ——参考管道直径;
 f ——频率;
 ν ——油液运动黏度;
 K_1, K_2 ——波的剪切系数的函数。

当 $N_s \geq 8$ 时

$$K_1 = 1 + (\sqrt{2}/N_s) \quad K_2 = 0.425 + 0.175N_s$$

当 $N_s < 8$ 时

$$K_1 = 1.333 - 4.66 \times 10^{-3} N_s^2 + 2.73 \times 10^{-4} N_s^3$$

$$K_2 = 1.0 - 0.020 3N_s^2 - 7.81 \times 10^{-4} N_s^3$$

通过式(2)获得结果是“二次源”泵频率处的泵源阻抗, 因此要获得柱塞泵频率处的泵源阻抗, 需要依据现有测试数据估测得出, 本文将在第 1.2 节给出几种典型泵源阻抗估值方法。

流量脉动测试时, 被测泵打开, “二次源”泵关闭, 应用式(3)计算柱塞泵泵源流量^[12]

$$Q_{s,i} = [(F_i + G_i)(1/Z_{SM,i} + 1/Z_0)] \quad (3)$$

$$F_i = \frac{t_1 s_{2,2} - t_2 s_{1,2}}{s_{1,1} s_{2,2} - s_{2,1} s_{1,2}}$$

$$G_i = \frac{t_2 s_{1,1} - t_1 s_{2,1}}{s_{1,1} s_{2,2} - s_{2,1} s_{1,2}}$$

1.2 阻抗估值算法

本节将讨论几种柱塞泵泵源阻抗估值方法, 并给出其应用范围。

1.2.1 线性插值法

线性插值法被认为是最简单的阻抗建模方法。首先测试柱塞泵相近频率处泵源阻抗, 然后通过线性差值方法得到柱塞泵要求频率处的泵源阻抗。柱

塞泵相近频率如下^[12]

$$(f_i - f_0/10) < f_L < f_i \quad (4)$$

$$f_i < f_H < (f_i + f_0/10) \quad (5)$$

式中 f_0 ——测试泵的基频;

f_i ——测试泵的第 i 次谐波频率;

f_L ——低于测试泵第 i 次谐波且相邻的谐波频率;

f_H ——高于测试泵第 i 次谐波且相邻的谐波频率。

由此可以看出这种测试方法需要一个可变频率的“二次源”, 因此测试系统费用较高。

1.2.2 集中/分布参数模型法

集中/分布参数模型法是标准推荐的一种泵源阻抗估值方法。

集中参数模型, 当测出一组柱塞泵泵源阻抗值时, 绘制阻抗值的幅频和相频特性曲线。如果泵源阻抗相频特性曲线一直保持负值, 采用集中参数模型^[12]

$$Z_{SM,i} = c_1 / (j f_i) \quad (6)$$

对于 n 组谐波来说, 系数 c_1 要取最优值以减少模型和测试结果之间平方和误差, 可用式(7)表示

$$c_1 = (1/n) \sum_{i=1}^n \text{Im}(Z_{s,i} f_i) \quad (7)$$

式中 $Z_{s,i}$ ——频率为 f_i 时, 被测泵泵源阻抗。

分布参数模型, 当泵源阻抗表现出明显的反共振特性, 即振幅达到最小值时, 相位从负值变换到正值, 采用分布参数模型

$$Z_{SM,i} = c_1 / (j \tan(c_2 f_i)) \quad (8)$$

对于 n 组谐波, 系数 c_1 和 c_2 要取最优值以减少模型和测试结果之间的平方和误差, 可通过以下方法获得。

估计反共振值出现的频率, c_2 初始值设定为

$$c_2 = \pi / (2 f_n) \quad (9)$$

c_1 初始值设定为 0.5 倍共振频率处幅值。应用以下方法对系数进行修正。

设 $k=1, 2$

$$c_{k, \text{NEW}} = c_{k, \text{OLD}} + \beta_c \Delta c_k \quad (10)$$

式中 β_c ——松弛因子, 一般取 0.7。

修正值 Δc_k 可以通过下列方程得到

$$\Delta c_1 = (t_2 s_{1,2} - t_1 s_{2,2}) / (s_{1,1} s_{2,2} - s_{1,2} s_{2,1}) \quad (11)$$

$$\Delta c_2 = (t_1 s_{2,1} - t_2 s_{1,1}) / (s_{1,1} s_{2,2} - s_{1,2} s_{2,1}) \quad (12)$$

对于 n 组谐波

$$\begin{cases} t_k = \sum_{i=1}^n \operatorname{Re}(\alpha_i \bar{\sigma}_{k,i}) \\ s_{k,i} = \sum_{i=1}^n \operatorname{Re}(\bar{\sigma}_{k,i} \sigma_{l,i}) \end{cases} \quad (13)$$

式中 $\alpha_i = jZ_{s,i} \sin(f_i c_{2,OLD}) - c_{1,OLD} \cos(f_i c_{2,OLD})$;

$\sigma_{1,i} = -\cos(f_i c_{2,OLD})$;

$\sigma_{2,i} = jZ_{s,i} f_i \cos(f_i c_{2,OLD}) + f_i c_{1,OLD} \sin(f_i c_{2,OLD})$ 。

如果不满足条件 $|\Delta c_k| \leq c_{k,OLD} \times 10^{-3}$, 则设定 $c_{k,OLD} = c_{k,NEW}$ 。利用上述方程进行重复迭代运算知道满足精度要求。

1.2.3 线性衰减法

这种测试方法通过减小测试值与估算值之间的差值, 获得柱塞泵频率的阻抗值。估值误差可用式(14)计算^[13]

$$E = \sum_{i=1}^n W_i |y_i - Y_i|^2 \quad (14)$$

式中 $x_i = (f_i - f)/f_{BAND}$;

$W_i = \exp(-x_i^2)$;

$Y_i = \alpha_0 + \alpha_1 x_i + \alpha_2 x_i^2$ 。

f_{BAND} 是加权带宽, 直接影响着泵源阻抗的估值精度, 需要合理估值。通过反复调整 a_0 值, 最小化估值误差, 进而求得相频的估值 Y_0 。 a_0 , a_2 和 a_3 可以通过式(15)计算

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n W_i & \sum_{i=1}^n W_i x_i & \sum_{i=1}^n W_i x_i^2 \\ \sum_{i=1}^n W_i x_i & \sum_{i=1}^n W_i x_i^2 & \sum_{i=1}^n W_i x_i^3 \\ \sum_{i=1}^n W_i x_i^2 & \sum_{i=1}^n W_i x_i^3 & \sum_{i=1}^n W_i x_i^4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n W_i y_i \\ \sum_{i=1}^n W_i y_i x_i \\ \sum_{i=1}^n W_i y_i x_i^2 \end{pmatrix} \quad (15)$$

“二次源”法测试系统如图 2 所示。由图 2 可知, 通过截止阀通断控制泵源阻抗和泵源流量脉动测试过程, 变频柜用来控制液压泵的转速。

图 2 “二次源”法测试系统

2 “二次源”法数据处理标准化

根据“二次源”法测试原理可知, 要获得柱塞泵泵源阻抗和泵源流量脉动, 首先需要采集与柱塞泵相连参考管道的压力信号, 且阻抗和流量脉动测试时要保证稳态工况, 即柱塞泵进、出口静压、缸体转速和斜盘倾角保持不变。“二次源”法数据处理过程如图 3 所示。

由图 3 可知, 泵源阻抗和泵源流量脉动测试时, 都需要对原始压力信号进行滤波和时域频域转换, 因此可以合并进行处理。为了快速获得柱塞泵频率处泵源阻抗, 需要仔细选择阻抗估值算法。

根据上述分析, 采用 GUI 模块提供的基本程序给出“二次源”法数据处理平台如图 4 所示。

由图 4 可知, 本界面是一个数据处理与图形显示可同时出现的过程, 主要分为采样数据读取和滤波、时域/频域转换、阻抗测试、阻抗估值和流量测试几步。在每一步执行过程中具有提示对话框提示

图 3 “二次源”法数据处理过程

本步处理步骤,以及下一步将要进行的步骤。另外给出绘图模块,以实时改变绘图效果。

图4 “二次源”法数据处理平台

本界面主要操作过程如下所述。

(1) 采样工况设定,根据实际测试工况设定柱塞泵进、出口压力、斜盘倾角,“二次源”泵转速。

(2) 测试数据读取,分为阻抗测试和流量测试两种情况,然后保存读取的采样数据到一个新的文件夹。

(3) 数据处理,选择一种合适的滤波方法,对采样数据进行滤波,以删除波形中不必要的干扰。本界面提供5种不同的滤波方法,限幅滤波、限速滤波、高通滤波、低通滤波和带通滤波。

(4) 时域/频域转换,将滤波压力从时域压力转换为频域压力,为“二次源”频率处阻抗值获得提供数据。

(5) 阻抗测试,应用“二次源”阻抗公式计算“二次源”频率处泵源阻抗。

(6) 阻抗估值,选用一种合适方法估测柱塞泵频率处泵源阻抗,本界面提供5种估值方法,线性差值法、集中参数法、分布参数法、线性衰减法。

(7) 流量测试,重新读取流量测试中的采样数据,通过滤波、时域/频域转换,应用上述阻抗估值获得的泵源阻抗值计算流量脉动。

通过上述过程可以实现柱塞泵泵源阻抗和泵源流量脉动的快速计算。

3 数据分析

本节将给出不同阻抗估值算法下柱塞泵频率处泵源阻抗,对比不同估值算法的计算精度和计算效率,分析的人机交互界面计算结果,证实线性衰

减法“二次源”法数据处理平台的有效性。

3.1 阻抗估值算法分析

不同阻抗估值算法下柱塞泵频率处泵源阻抗如图5所示。

图5 不同估值方法下的柱塞泵泵源阻抗

由图5可知,线性衰减法和分布参数法都能预测柱塞泵反共振特性,且线性衰减法估值更接近线性插值法,即“二次源”频率处柱塞泵泵源阻抗测试值,因此可以推测线性衰减法具有更高的估值精度。除此之外,由于分布参数法采用迭代方式获得泵源阻抗,线性衰减技术采用线性方程计算泵源阻抗,因此同工况下线性衰减法能够快速获得柱塞泵泵源阻抗。当传感器距离是压力波长整数倍时,分布参数法不能计算泵源阻抗,而线性衰减技术计算时间与其他工况却没有差别。综合考虑,与分布参数法(国际标准化组织(ISO)推荐)相比,线性衰减技术计算效率提高了70%。

Bath大学的EDGE等^[10-11]是“二次源”法的提出者,曾做过相似的试验,其泵为柱塞泵,排量为 $68 \text{ m}^3/\text{r}$,柱塞泵出口压力为10 MPa,转速为1900 r/min,柱塞泵泵源阻抗如图6所示。

对比图5和图6可知,与本文所测柱塞泵相似,该柱塞泵在此种工况下存在反共振特性,即当振幅达到最小值时,相位从负值变换到正值。同时两种不同泵的数量级相差较小,因此用线性衰减技术可

以获得较精确的泵源阻抗。

图 6 柱塞泵阻抗

3.2 软件可行性分析

本文提出应用 GUI 软件编写“二次源”法数据处理平台,以简化测试流程,节省计算时间。本界面是一个交互式界面,每一步完成之后,结果均可以直接显示在绘图窗口,因此可以直接判断出采样压力是否合理,数据处理方式是否满意;同时通过窗口操作节省了数据读取、保存和显示所用时间,因此“二次源”法数据处理时间得以减少。

阻抗测试时只需要进行数据读取,然后按下阻抗测试按钮即可获得测试结果,如图 7 所示。

图 7 应用界面进行阻抗测试的计算结果

图 7 给出了通过界面计算出的泵源阻抗,整个过程非常简单,对操纵人员的专业知识掌握度要求较低,因此简化了测试过程,也使“二次源”法更适应于工业应用。

当柱塞泵进口静压为 2 MPa,出口静压为 15 MPa,缸体转速为 1 000 r/min,斜盘倾角为 13°时,

应用线性衰减技术和分布参数法估算柱塞泵泵源阻抗,代入流量公式测试的泵源流量脉动如图 8 所示。

图 8 柱塞泵泵源流量脉动

由图 8 可知,将线性衰减技术获得的泵源阻抗代入泵源流量脉动公式,可以快速获得柱塞泵泵源流量脉动,且与分布参数法获得的柱塞泵泵源流量脉动峰值相近,因此线性衰减技术可以用来准确、快速地估测柱塞泵泵源流量。

当转速为 1 000 r/min,进口压力为 2 MPa,斜盘倾角为 13°,斜盘交错角为 0°时,不同压力下柱塞泵出口流量脉动仿真和测试结果如图 9 所示。

图 9 不同出口压力下柱塞泵流量脉动

由图 9 可知,不论是仿真结果,还是测试结果,随着泵出口压力的增加,柱塞泵出口流量脉动幅值和脉动率升高,脉动均值减小。

当出口压力为 15 MPa,进口压力为 2 MPa,斜盘倾角为 13°,斜盘交错角为 0°时,不同转速下柱塞泵出口流量脉动仿真和测试结果如图 10 所示。由图 10 可知,不论是仿真结果,还是测试结果,随着缸体转速的增加,泵出口流量脉动幅值先减小后增加,流量脉动均值增加。

综合分析图 9 和图 10 可知,应用该数据处理平台可以测试多种工况下柱塞泵泵源流量脉动,且数据处理过程简单。与传统处理方法相比,计算时

间减少了 80%, 因此“二次源”法数据处理平台是可行的。

图 10 不同转速下柱塞泵流量脉动

4 结论

本文分析了“二次源”法测试原理和数据处理过程, 给出了几种典型的泵源阻抗估值算法; 根据 GUI 模块编写了“二次源”法应用程序和人机交互界面, 简化了数据处理过程, 主要结论如下。

(1) 线性衰减技术可以估测各种工况下柱塞泵全频率处泵源阻抗, 且具有较高精度; 与分布参数法相比, 计算效率提高了 70%。

(2) 应用 GUI 人机界面能够标准化“二次源”法数据处理过程, 相同数据处理时间减少 80%, 使“二次源”法更适应于工业应用。

参 考 文 献

- [1] 马吉恩. 轴向柱塞泵流量脉动及配流盘优化设计研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
MA Jien. Study on flow ripple and valve plate optimization of axial piston pump[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.
- [2] BOWNS D E, EDGE K A, MCCADLISH D. Factors affecting the choice of a standard method for the determination of pump pressure ripple[C]// Seminar-Quieter Oil Hydraulics, October, London. 1980: 1-6.
- [3] EDGE K A, WING T J. Measurement of the fluid borne pressure ripple characteristics of hydraulic components[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, Management and Engineering Manufacturing, 1983, 197(B): 247-254.
- [4] KOJIMA E, HYODO N. Characteristics of fluid borne noise generated by a fluid power pump(1st report, Mechanisms of generation of pressure pulsations in axial piston pump)[J]. Bulletin of the JSME, 1982, 25(199): 46-53.
- [5] KOJIMA E. Experimental determining and theoretical predicting of source flow ripple generated by fluid power piston pumps[C]//SAE International Off-Highway and Power plant Congress and Exposition, Milwaukee, USA. SAE Special Publ. Topics in Hydraulics SP-1554, 2000: 73-82.
- [6] PETERSSON M E, WEDDFELT K G, PALMBERG J O S. Methods of reducing flow ripple from fluid power pumps-a theoretical approach[J]. SAE Transactions, 1991, 100(2): 158-167.
- [7] WEDDFELT K. Measurement of pump source characteristics by the two-microphone method[C]//the Second Tampere International Conference on Fluid Power, March, 1991, Tampere University of Technology, Tampere Finland. 1991: 124-132.
- [8] ERICSON L. Measurement system for hydrostatic pump flow pulsations[D]. Sweden: Linköpings Universitet, 2005.
- [9] JOHANSSON A. Design principles for noise reduction in hydraulic piston pumps-simulation, optimization and experimental verification[D]. Sweden: Linköpings Universitet, 2005.
- [10] EDGE K A, JOHNSTON D N. The secondary source method for the measurement of pump pressure ripple characteristics 1. description of method[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A: Journal of Power and Energy, 1990, 204 (1): 33-40.
- [11] EDGE K A, JOHNSTON D N. The secondary source method for the measurement of pump pressure ripple characteristics 2. Experimental results[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A: Journal of Power and Energy, 1990, 204(1): 41-46.
- [12] The International Organization for Standardization. ISO 10767-1-1996 Hydraulic Fluid Power-Determination of Pressure Ripple Levels Generated in System and Components Part 1: Precision method for pumps[S]. London: British Standards Institution, 1996.
- [13] JOHNSTON D N, DREW J E. Measurement of positive displacement pump flow ripple and impedance[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I, Journal of Systems & Control Engineering, 1996,

210(1): 65-74.

E-mail: syc19810807@sina.com

作者简介: 宋月超, 女, 1981 年出生, 博士研究生。主要研究方向为流体传动及控制技术。

徐兵, 男, 1971 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为电液控制。

E-mail: bxu@zju.edu.cn

国家自然科学基金委员会机械工程学科 2012/2013 年度结题项目简介

二硫化钼的形态尺寸效应及其在润滑材料设计中的应用研究*

项目负责人: 胡坤宏(E-mail: hukunhong@163.com)

依托单位: 合肥学院

项目批准号: 50905054

1. 项目简介

形态尺寸不同的二硫化钼(MoS_2)微粒具有不同的润滑性能与润滑机理, 它们之间存在互补协作增强润滑性能的可能。本项目借助化学合成获得了多种形态尺寸的 MoS_2 微粒, 探索了 MoS_2 形态尺寸与摩擦学性能的关系, 以及各种形态尺寸 MoS_2 的润滑机理, 研究了不同形态尺寸 MoS_2 之间的协同润滑效应, 利用 MoS_2 形态尺寸效应指导 MoS_2 纳米微粒的化学合成工艺, 从而实现对不同形态尺寸 MoS_2 的复合, 提高它们的相互分散性, 进一步改善了 MoS_2 润滑剂的摩擦学性能, 研究成果为理解 MoS_2 纳米粒子微观形态尺寸与宏观摩擦学性能的内在联系提供了理论支持, 也为化学合成规整的 MoS_2 球形结构及复合形态 MoS_2 提供了新的途径。

2. 主要创新点及主要研究进展

(1) 系统地研究了不同形态尺寸 MoS_2 在不同润滑体系中的摩擦学性能, 揭示了 MoS_2 的形态尺寸对其摩擦学性能的影响规律, 探索出不同形态尺寸 MoS_2 的润滑机理。

(2) 研究了不同形态尺寸的 MoS_2 之间的协同润滑效应与机理, 提出了利用形态尺寸效应设计高性能固体润滑剂的方法。

(3) 提出了利用化学合成取代机械混合制备具有复合形态 MoS_2 的方法, 利用其他无机氧化物的诱导效应成功实现了对 MoS_2 形态的规整控制。

(4) 发现 MoS_2 的形态尺寸效应不局限于摩擦学领域, 在催化等领域同样会发生作用, 从而提供了一种多功能润滑剂的设计方法。

* 此项目在“第十一届设计与制造前沿国际会议(ICFDM2014)”上作为候选项目推荐参加“国家自然科学基金委员会机械工程学科 2012/2013 年度优秀结题项目”的评选。