

挖掘机虚拟载荷下换向阀开启过程的液动力分析

王安麟, 王 坚, 付志翼

(同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘 要: 为了提高换向阀开启过程的换向性能, 以降低该过程的液动力为目标, 提出液压挖掘机虚拟载荷下开启过程的阀芯结构形态设计方法; 以液压挖掘机整机动态性能试验数据为基础, 将其作业的周期性、随机性载荷特征抽象为具有统计特性的虚拟载荷; 再以虚拟载荷为边界条件, 以降低开启过程阀芯所受液动力为评价标准, 分析不同阀芯结构形态的流固耦合动力学响应, 探讨换向阀阀芯结构优化设计方法。结果表明, 合理等效阀口面积的 U 型槽结构可有效降低不同虚拟载荷下的阀芯液动力。

关 键 词: 换向性能; 虚拟载荷; 液动力; 流固耦合; 结构设计

中图分类号: TH 137.52

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)08-1170-05

Analysis of Flow Forces During Muti-valve's Opening Under Excavator Virtual Load

WANG An-lin, WANG Jian, FU Zhi-yi

(School of Mechanic Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China. Corresponding author: WANG Jian, E-mail: 081674@tongji.edu.cn)

Abstract: To improve the muti-valve's commutation ability and to reduce the valve's flow forces during its opening, the valve structure of a hydraulic excavator under virtual loads was designed. First, the excavator virtual load model was established based on the excavator dynamic test data, and the statistics were used to express the load's periodic and random characteristics. Then, a 3D valve model with the boundary conditions of virtual load was proposed to solve the flow forces during the valve's opening using the fluid structure interaction method. Finally, the flow force response characteristics of different valve spool structures were presented by the model. The results show that the spool with U-groove of moderate equivalent valve orifice area can effectively reduce the flow force under a series of virtual loads.

Key words: commutation ability; virtual load; flow force; fluid-structure interaction; spool design

多路换向阀广泛应用于挖掘机、装载机等工程机械, 同时控制多个执行机构, 可对应于多种工况; 其性能要求为换向过程的可靠性与稳定性。一般情况下, 换向阀在换向过程中, 流量与压力会急剧变化, 容易造成液压冲击, 使得换向阀出现开启力过大及阀芯振动等问题。在此过程中, 稳态液动力与瞬态液动力的变化是影响换向阀换向性能的主要原因^[1]。

在换向阀的研究领域, 大部分研究都将阀与阀所应用的机械相隔离, 忽略整机系统对阀的影

响, 即假设阀的初始流量与压力都是恒定或者有规律变化的; 但事实上, 阀的性能与阀的进出口流量压力变化有着很大的联系^[2]。在换向阀的工作机理研究中, 由于换向阀的开启过程是动态的, 阀芯与液压油是双向耦合的作用, 因此应用流固耦合模型模拟换向阀开启时的动态过程。

本文研究液压挖掘机用多路换向阀的回转联开启性能, 提出以挖掘机整机测试的流量、压力参数为基础, 应用随机理论与统计学建立挖掘机回转工况下的动态虚拟载荷, 以此载荷作为换向阀

的边界条件,建立换向阀的三维有限元模型.以流固耦合理论为基础,研究三种典型的U型槽结构对换向阀回转联开启性能的影响,以减小开启过程的液动力为评价目标.

1 换向阀结构及虚拟载荷

1.1 换向阀结构

多路换向阀为多个阀的组合,以液压挖掘机用多路换向阀的回转联为研究对象,其结构如图1所示.

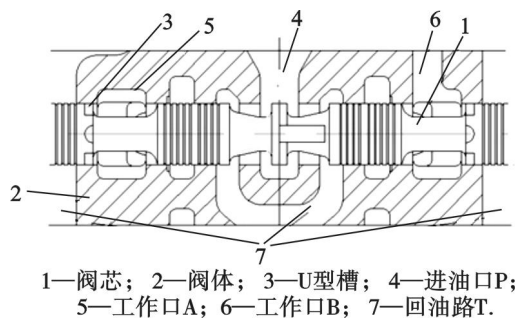


图1 换向阀结构(回转回路)

Fig. 1 Structure of the multiple directional control valve (swing loop)

当换向阀处于中位时,液压油从进油口P流回油箱(P→T);当换向阀左位工作时,液压油从进油口流向工作口A,由A流向工作液压缸,由工作口B流回油箱(P→A, A→B, B→T);换向阀右位工作(P→B, B→A, A→T)同理.换向阀由中位转换到工作位置的过程,即换向阀的开启过程(P→T转换为P→A/B的过程).取P→A腔为研究对象,其简化模型如图2所示.

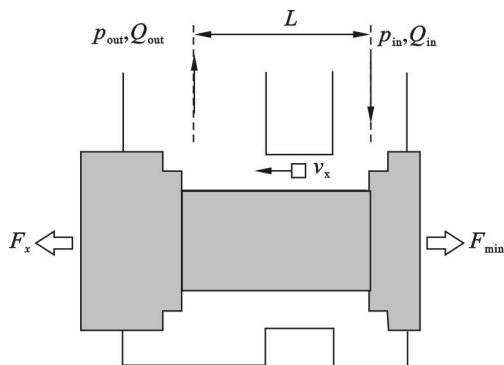


图2 工作腔简化模型

Fig. 2 Working chamber model simplified

换向阀的换向过程中,流量、压力变化剧烈,阀的操纵性能由弹簧、阀芯结构、流道布置等因素决定.开启阀芯所需的最小开启力受多个因素影响,可表示为

$$F_{\min} = F_s + F_t + F_x + F_f + F_d.$$

式中: F_s 为稳态液动力^[3], $F_s = \rho Q^2 \cos\theta / A_c$, Q 为流量, ρ 为流体密度, A_c 为阀口面积, θ 为射流角; F_t 为瞬态液动力, $F_t = L c_0 \omega \sqrt{2\rho\Delta p} dx_v/dt$, L 为流程, c_0 为流量系数, ω 为阀口面积梯度, Δp 为阀口前后压差; F_x 为弹簧力, $F_x = F_0 + kx_v$, F_0 为预压缩力, k 为弹簧刚度, x_v 为开度; F_f 为摩擦力,一般为0.2 N到0.5 N; F_d 为液压卡紧力,在阀芯结构设计合理的条件下, F_d 一般很小,可以忽略不计.所以,换向阀P→A腔的阀芯最小开启力为

$$F_{\min} \approx \rho \frac{Q^2}{A_c} \cos\theta + L c_0 \omega \sqrt{2\rho\Delta p} \frac{dx_v}{dt} + F_0 + kx_v.$$

1.2 液压挖掘机虚拟载荷模型

液压挖掘机整机动态性能试验是指在挖掘机现场作业的条件下,直接通过传感器及数据采集仪器测定记录整机各部分参数.测试以实际作业为基础,因此试验结果能真实反映挖掘机对多路换向阀的性能需求.

多路换向阀与挖掘机整机系统是一个相互影响的系统,因此多路换向阀的研究应以挖掘机的实际工况为基础^[4].挖掘机是一种载荷剧烈变化的周期性循环作业机械,其载荷性质由土壤、操纵习惯、运行工况等多方面所决定.回转回路有大量的试验数据,若针对所有试验数据进行研究,将会耗费大量的时间,因此需要建立一个对应于挖掘机实际工况的虚拟载荷谱.

挖掘机的工作具有周期循环性很强的特点,因此具有统计特性与随机特征.图3为挖掘机整机试验中回转工况的载荷,可以看出,载荷有明显的周期性与随机振动性.压力载荷是一个典型的非平稳随机信号,这一信号可表示为

$$F(t) = E[F(t)] + F_0(t).$$

式中: $F(t)$ 为多路阀阀口压力; $E[F(t)]$ 为压力载荷的数学期望,即趋势项; $F_0(t)$ 为压力载荷的随机项分量,是一个中心化了的平稳随机分量,即随机项.

小波变换是近三十年发展起来的一种先进的时频分析方法^[5],对于同一幅能谱图,在信号变化剧烈的地方其时间分辨率较高,在信号变化缓慢的地方时间分辨率较低而频率分辨率较高.小波变化能兼顾信号的缓变与激变,因此采用小波变换的方法分离试验数据的随机项与趋势项,分别建立随机项载荷谱与趋势项载荷谱^[6].图4为挖掘机整机测试的阀开启过程阀口压力及采用小波分析后的趋势项与随机项.

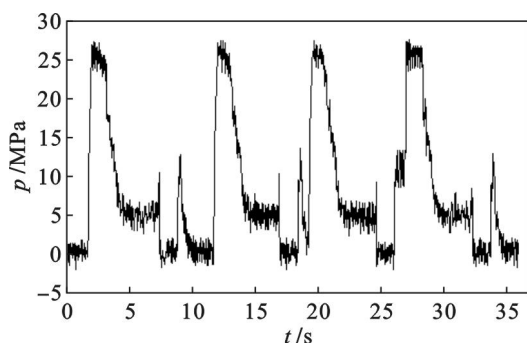


图3 挖掘机整机试验(回转回路)的阀口载荷
Fig. 3 Load of the valve port in excavator test (swing loop)

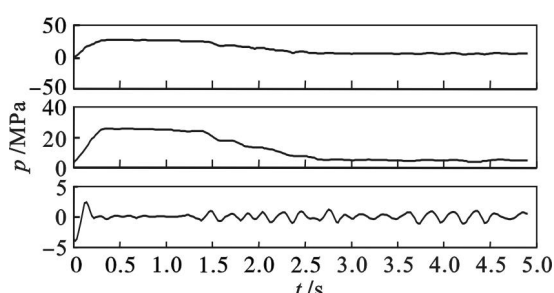


图4 采用小波变换分离阀开启过程载荷的趋势项与随机项

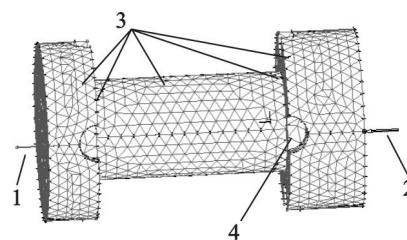
Fig. 4 Trend item and random item of the load decomposed by wavelet discrete in valve opening

虚拟载荷谱,即用系列的趋势项与随机项来表示挖掘机的实际工况;其中趋势项代表了挖掘机工作的具体工况(斗杆、动臂、回转等),随机项代表了液压系统特性、操作习惯及工作环境的随机变化量等。

2 以虚拟载荷为边界条件的换向阀数学模型

多路换向阀的开启过程是一个动态的过程,与传统的流体仿真模型不同的是开启时阀芯的速度变化很大,阀芯的运动及变形会对流体产生很大的影响。流固耦合(fluid-structure interaction, FSI)理论是研究固体在流场作用下的动力学状态或者固体变形、运动对流体影响的重要方法,该理论综合考虑了固体与流体的运动特性,解决了很多液压元件的理论问题,因此采用流固耦合理论建立换向阀的模型^[7-8]。

换向阀阀芯模型如图5所示,阀芯模型考虑了换向阀所受的弹簧力、操纵力以及U型槽,在模拟阀芯开启运动时,决定阀芯运动状态的是阀芯的受力。

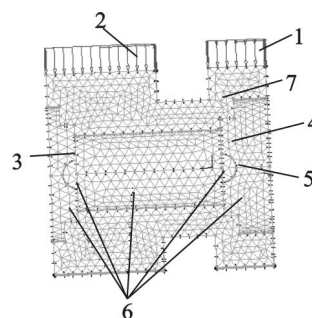


1—弹簧力;2—操纵力;3—流固耦合面;4—U型槽。

图5 换向阀阀芯模型

Fig. 5 Spool model

换向阀流体1/2模型如图6所示。



1—入口流量 Q_{in} ;2—出口压力 p_{out} ;3,4—液动力计算面A1,A2;5—U型槽;6—流固耦合面;7—开度 x_v 。

图6 换向阀流体模型

Fig. 6 Fluid model

将阀芯模型计算出的位移加载到流体边界上,同时将流体的作用力加载到阀芯模型上,即采用双向流固耦合的方法求解。对于阀芯模型,设置阀芯操纵力 $F=150\text{ N}$,弹簧刚度为 $5\,000\text{ N/m}$ 。对于流体模型,液压油黏度为 $0.036\text{ m}^2/\text{s}$,不可压缩牛顿流体;入口流量峰值 $Q_{in}=60\text{ L/min}$,出口负载为挖掘机虚拟载荷 $20\sim 30\text{ MPa}$,分析阀的开度 $x_v=0\sim 4\text{ mm}$ 时阀芯所受液动力。阀芯所受液动力由流体模型的流固接触面的反作用力求得。

图7为阀处于某开度时,U型槽附近的速度矢量图。可以看出U型槽与阀内有明显的涡流。图8为换向阀开启过程的粒子轨迹图,即在阀内取3个微小的流体粒子,模拟粒子的流动轨迹。

该模型可以模拟阀开启时的动态过程,表现流体的流动状态、固体的运动状态,为阀芯的结构设计提供理论依据。

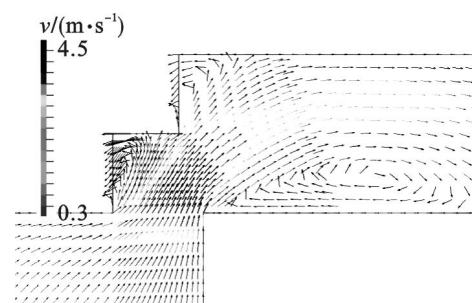


图7 换向阀某开度时的速度矢量图

Fig. 7 Velocity vector plot in a certain opening

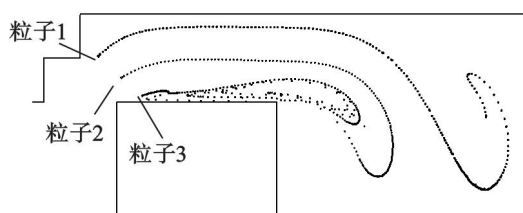


图 8 换向阀开启过程的粒子轨迹图

Fig. 8 Particle trace plot during the valve's opening

3 换向阀阀芯结构优化设计

3.1 挖掘机回转工况下的虚拟载荷

多路换向阀的研究应当结合挖掘机的实际工况,故换向阀结构设计的第一步是明确其工作的环境.换向阀模型的边界条件应当与挖掘机的实际工况相对应.在挖掘机回转虚拟载荷谱中提取两种典型的趋势项与随机项作为换向阀的边界条件(见图 9).

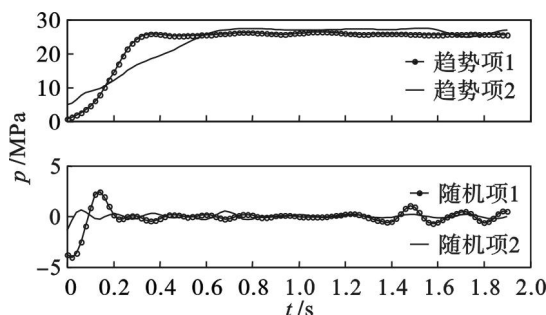


图 9 挖掘机虚拟载荷两种趋势项与随机项

Fig. 9 Two different trend and random items of the excavator virtual load

将两种趋势项与两种随机项组合为 4 种工况:①趋势项 1、随机项 1;②趋势项 2、随机项 1;③趋势项 1、随机项 2;④趋势项 2、随机项 2.

3.2 U 型槽结构

阀芯上的节流槽对改善阀的性能、减小阀的液动力有很大的作用. U 型槽是应用广泛的节流槽之一. U 型槽的结构如图 10 所示,其参数有半径 r 与深度 h . 换向阀的流量与压力变化取决于流量系数与阀口面积. 阀口面积 A_c 的变化对阀芯的液动力有很大的影响,故 U 型槽对阀芯结构的影响用最大等效阀口面积 S 来表示^[9]:

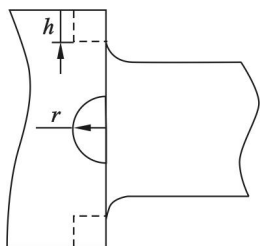


图 10 U 型槽结构

Fig. 10 Structure of the U-groove

$$S = 1 / \sqrt{4 / \pi^2 r^4 + 1 / r^2 h^2}.$$

3 种不同类型的 U 型槽结构见表 1.

表 1 U 型槽结构参数

Table 1 Structure parameters of the U-groove

参数	U 型槽 A	U 型槽 B	U 型槽 C
r/mm	3	3	2.5
h/mm	3	2.5	3
S/mm^2	7.59	6.62	5.96

3.3 结果分析

阀芯结构为 U 型槽 A, 4 种不同工况下求解的液动力见图 11. 对比工况 1 与工况 2 (或工况 3 与工况 4) 可以看出,液动力曲线的变化趋势基本一致,但其幅值明显不同;对比工况 1 与工况 3 (或工况 2 与工况 4) 可以看出,液动力曲线的变化趋势基本一致,但是其幅值与相位皆不同. 将挖掘机载荷分解为趋势项与随机项后可以看出,液动力曲线的峰值由趋势项与随机项共同决定,但趋势项起主要作用,其对应的相位值由随机项决定. 换向阀开启到一定位置后,液动力趋于相等. 这是因为开启初期,趋势项与随机项数值接近,液动力受其共同影响;而开启后期趋势项远大于随机项,液动力由趋势项决定.

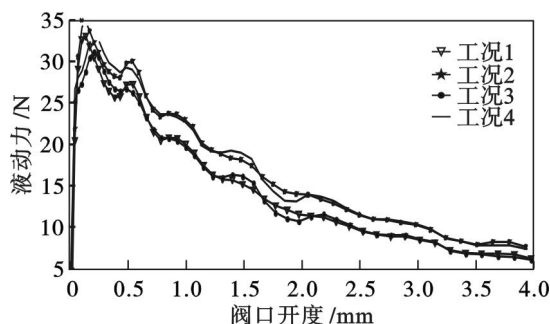


图 11 4 种工况的液动力对比

Fig. 11 Comparison of flow force in four working conditions

换向阀边界条件相同(工况 1)、U 型槽结构不同的液动力对比见图 12. 通过对比分析可以看

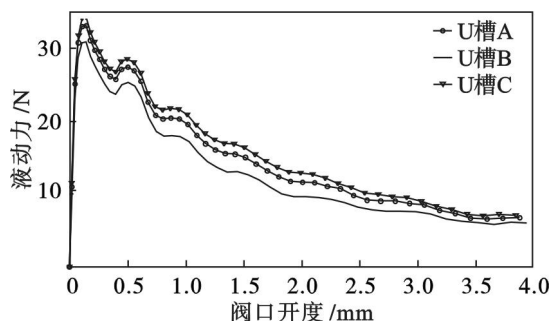


图 12 工况 1 下 3 种 U 型槽的液动力对比

Fig. 12 Comparison of three different U-grooves' flow force in working condition 1

出,不同结构的 U 型槽对液动力的影响不同. U 型槽 B 的等效阀口面积适中,其改善液动力的效果最明显.这是因为 U 型槽结构会改变流量、压力、阀口面积等的变化率等,但是 U 型槽对流体的影响与其面积不成比例关系,面积过大或过小都会增大液动力.

4 种工况下,不同阀芯结构对最大液动力的影响见图 13;阀芯开启过程中最大液动力出现位置见图 14.在不同工况下,U 型槽都能减小液动力,U 型槽 B 的等效阀口面积适中,其改善液动力的效果最明显;与 U 型槽 C 相比,减小液动力约 10%,对于不同的工况,其改善效果都是最佳的.由于虚拟载荷代表了挖掘机同一种挖掘工况(回转)下载荷的大部分变化情况,这表明存在某种结构的 U 型槽对大部分随机变量下的液动力都有明显的改善效果.这是因为,同一种挖掘工况下,趋势项变化很小,而随机项主要影响液动力曲线的相位值,所以相同结构 U 型槽对阀内液动力的影响效果几乎相同.由图 14 可以看出,U 型槽对阀的最大液动力出现时的开度影响较小,这是因为阀在开启时达到液动力峰值的时间很短,U 型槽对于改进该过程的阀的加速度效果不明显.

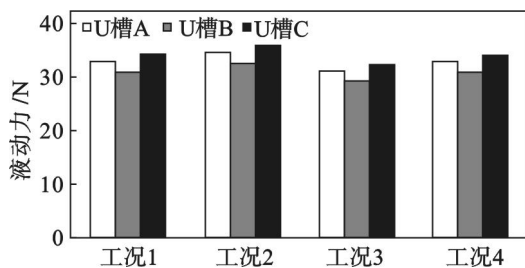


图 13 3 种 U 型槽最大液动力对比

Fig. 13 Comparison of three different U-grooves' max flow force

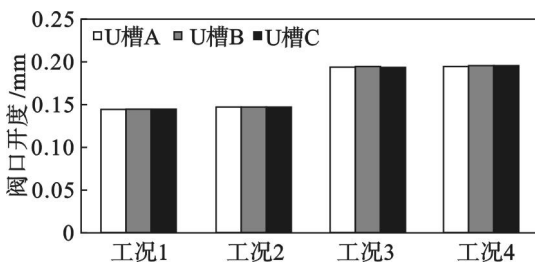


图 14 最大液动力时的阀口开度对比

Fig. 14 Comparison of valve port's opening in max flow force moment

4 结 论

1) 液压挖掘机的载荷具有明显的统计特征,可以通过小波变换将试验载荷分解为趋势项与随

机项;以此建立虚拟载荷谱,作为阀结构设计的边界条件.

2) 换向阀开启过程中,趋势项决定液动力曲线的幅值及主要变化趋势,随机项决定其相位.

3) 以虚拟载荷为边界条件建立的换向阀流固耦合模型可以模拟换向阀开启时的动态过程.

4) 带 U 型槽的阀芯结构能有效减小阀开启时的最大液动力,等效阀口面积适中的 U 型槽结构能更好地改善同一挖掘工况下换向阀的液动力幅值.

参考文献:

- [1] Amirante R, Moscatelli P G, Catalano L A. Evaluation of the flow forces on a direct (single stage) proportional valve by means of a computational fluid dynamic analysis [J]. *Energy Conversion and Management*, 2007, 48(3): 942-953.
- [2] 王安麟, 吴小锋, 周成林, 等. 基于 CFD 的液压滑阀多学科优化设计[J]. 上海交通大学学报, 2010, 44(12): 1767-1772. (Wang An-lin, Wu Xiao-feng, Zhou Cheng-lin, et al. Multidisciplinary optimization of a hydraulic slide valve based on CFD [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2010, 44(12): 1767-1772.)
- [3] Krishnaswamy K, Li P Y. On using unstable electrohydraulic valves for control [J]. *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 2002, 124(1): 183-190.
- [4] 张卫国, 权龙, 程珩, 等. 真实载荷驱动下挖掘机工作装置疲劳寿命研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(5): 35-38. (Zhang Wei-guo, Quan Long, Cheng Hang, et al. Fatigue analysis on working device of excavator driven by practical Load [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(5): 35-38.)
- [5] 王继新, 季景方, 张英爽, 等. 基于小波分形理论的工程车辆时域载荷信号降噪方法[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2011, 41(2): 221-225. (Wang Ji-xin, Ji Jing-fang, Zhang Ying-shuang, et al. Denoising method of time domain load signal of engineering vehicles based on wavelet and fractal theory [J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2011, 41(2): 221-225.)
- [6] 王安麟, 石世宁, 李晓田. 挖掘机动态性能试验及其数据的小波处理方法[J]. 同济大学学报, 2014, 42(1): 115-123. (Wang An-lin, Shi Shi-ning, Li Xiao-tian. Dynamic performance test and wavelet processing method for non-stationary random data of hydraulic excavator [J]. *Journal of Tongji University*, 2014, 42(1): 115-123.)
- [7] Pan X D, Wang G L, Lu Z S. Flow field simulation and a flow model of servo-valve spool valve orifice [J]. *Energy Conversion and Management*, 2011, 52(10): 3249-3256.
- [8] Dutta A, Goyal P, Singh R K. CFD analysis of a hydraulic valve for cavitating flow [J]. *Kerntechnik*, 2012, 77(1): 31-38.
- [9] 冀宏, 王东升, 刘小平, 等. 滑阀节流槽阀口的流量控制特性[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 198-202. (Ji Hong, Wang Dong-sheng, Liu Xiao-ping, et al. Flow control characteristic of the orifice in spool valve with notches [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(1): 198-202.)