

剪切阀式磁流变阻尼器动态特性实验研究

*张进秋¹, 陆念力¹, *王光远¹, 吕建刚²

(1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 军械工程学院, 河北 石家庄 050003)

摘 要: 介绍了剪切阀式磁流变阻尼器的结构和工作原理, 基于平板模型得出了其阻尼力的计算公式。对自行研制的剪切阀式磁流变阻尼器的阻尼力、电流、位移、速度和频率等动态特性进行了实验研究。结果表明剪切阀式磁流变阻尼器的阻尼力随控制电流的增大呈非线性增加, 阻尼力可调系数随电流变化连续可调。在相同振幅下, 阻尼器的可调倍数随频率增大而降低, 阻尼力随振动频率的增大而增大。通过深入分析该型阻尼器的动力特性, 为其在车辆悬挂系统半主动控制中的应用奠定了基础。

关键词: 车辆工程; 阻尼器; 磁流变液; 动态特性; 实验研究

中图分类号: TJ810.332 文献标识码: A

EXPERIMENTAL STUDY OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF SHEAR-VALVE MODE MRF DAMPER

*ZHANG Jin-qiu¹, LU Nian-li¹, WANG Guang-yuan¹, LU Jian-gang²

(1. Harbin Institute Of Technology, Harbin 150090, China; 2. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: The structure and principle of shear-valve mode Magnetorheological fluid (MRF) damper are introduced in this paper. According to the flat-panel model, the damping force calculation formula of MRF damper is obtained. The dynamical characteristics of MRF damper such as damping force, displacement, velocity, frequency and electric current are studied experimentally. Results show that damping force of shear-valve MRF damper increases non-linearly with the increase of control electric current. And the adjustable coefficient k can be modified continually against the current. Under the same amplitude, coefficient k decreases with the increase of vibrating frequency, and the damping force increases with the frequency. The present work lays down a foundation for its application in the semi-active vibration control of vehicle suspension systems.

Key words: vehicle engineering; damper; magnetorheological fluid (MRF); dynamic characteristic; experimental study

1 引言

磁流变液(Magnetorheological Fluids, 简称MRF)属可控流体, 是当前智能材料研究的一个重要分支^[1,2,3]。在无外场作用时, 其具有良好的流动性, 而在强磁场作用下, 磁流变液可在毫秒级时间

内转变为具有高粘度、低流动性的 Bingham 体。其表观粘度可增加两个数量级以上, 呈现类似固体的力学性质, 且这种变化是连续、可逆的。采用这种智能材料制作的阻尼器具有出力大、体积小、响应快、结构简单、阻尼力连续顺逆可调、易于与计算

收稿日期: 2003-06-18; 修改日期: 2003-08-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(50038010)

作者简介: *张进秋(1963), 男, 河北兴隆人, 副教授, 博士后, 主要从事车辆工程和振动控制研究(E-mail: zhangjq63@yahoo.com.cn);

陆念力(1955), 男, 广西隆安人, 教授, 博士, 主要从事机械动力学与结构分析研究;

王光远(1924), 男, 河南温县人, 教授, 中国工程院院士, 主要从事工程软件设计理论研究;

吕建刚(1964), 男, 河北赵县人, 教授, 博士, 主要从事实验力学及车辆工程研究

机结合实现智能化控制等优点,因此它已经成为振动控制的新一代高性能阻尼驱动装置,在汽车、履带车辆、海洋平台以及土木工程等半主动控制减振领域有着很大的应用潜力^[4,5,6,7]。

目前,国内外已经研制出具有商业推广前景的磁流变阻尼装置,并完成了一些汽车及土木工程结构振动控制实验。为了工程应用的需要,本文对自行设计制作的剪切阀式磁流变阻尼器进行了实验研究,分析了其动力学特性,为其在车辆悬挂系统半主动控制的应用奠定基础。

2 磁流变阻尼器结构及工作原理

磁流变阻尼器的结构形式主要有流动模式(Flow Mode)、剪切模式(Shear Mode)和挤压模式(Squeeze Mode)。本文主要研究剪切与阀式相结合的剪切阀型结构,剪切阀式阻尼器采用类似活塞缸式的结构,但活塞与缸体内壁间存在环形间隙,按结构可分为单出杆活塞缸结构和双出杆活塞缸结构,分别如图1(a)、(b)所示。

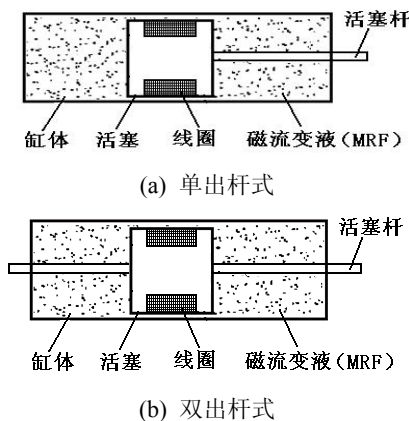


图1 剪切阀式的阻尼器简图

Fig.1 Sketch of shear-valve damper

阻尼器内腔充满了磁流变液,活塞的移动引起流体通过环形间隙而流动,磁流变液在剪切模式下工作,活塞在工作缸内作往复直线运动,活塞内部的线圈在电流作用下会在缸体与活塞间的间隙内产生沿活塞半径的径向磁场。当活塞相对于缸体发生相对运动,挤压磁流变液迫使其流过缸体与活塞间的间隙时,在没有磁场作用的状态下,磁流变液以牛顿流体作粘性流运动,符合牛顿流体的本构关系;当加上磁场后,磁流变液就会瞬间由牛顿流体转变为粘塑性体,粘度呈数量级地提高,流体的流动阻力增加,表现为具有一定屈服应力的类似于固体的本构关系,可用宾汉姆体^[8,9,10]本构关系进行描述:

$$\tau = \tau_y(H) \operatorname{sgn}\left(\frac{du}{dy}\right) + \eta \cdot \left(\frac{du}{dy}\right) \quad (1)$$

式(1)中, τ 是磁流变液的剪应力; $\tau_y(H)$ 是磁流变液的屈服剪应力; η 是流体的动力粘度; $\frac{du}{dy}$ 为速度梯度,右式第一项称为库仑剪应力,第二项称为粘滞剪应力。显然,剪应力必须达到MRF的屈服剪应力,才会产生粘塑性流动,形成库仑剪应力。而且 $\tau_y(H)$ 与磁场强度有关,随着磁场强度的改变而变化,所以,屈服剪应力可由磁场进行控制。

采用单出杆活塞缸结构,一方面需要考虑体积补偿;另一方面活塞杆在缸体内处于悬臂状态,稳定性差,因而需设计良好的活塞杆支承结构,并有限制外载作用方向的措施。而采用双出杆活塞缸结构,一方面可省去活塞杆体积补偿器;另一方面活塞通过活塞杆支撑在缸体两端,活塞的稳定性很好,可用于制造大阻尼力的阻尼器。

3 磁流变阻尼器阻尼力计算模型

由剪切阀型阻尼器的结构可知,液体流经缸筒与活塞的间隙 h 很小,仅有1~2mm,此值与活塞的周长以及活塞的轴向长度 L 相比非常小,因此可将其结构简化为图2所示平板结构。

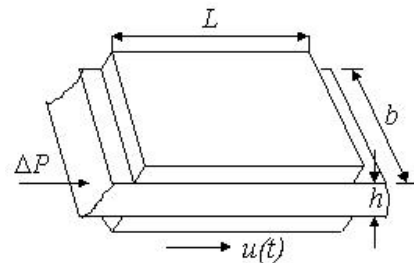


图2 剪切阀式阻尼器阻尼力计算简化图

Fig.2 Calculating model of damping force of shear-valve damper

根据剪切阀型阻尼器的结构和工作原理可知,磁流变液在阻尼器内的运动形式可以分为两种情况来考虑:一方面,活塞挤压缸体中一侧的磁流变液,使其压力增高,使阻尼器两侧腔内产生压力差,该压力差使磁流变液通过缝隙流向缸体中活塞的另一侧,称为压差流动或泊肃叶流动(Poiseuille);另一方面,由于缸体与活塞之间的相对运动,拖动磁流变液从一侧流向另一侧,称为剪切流动,或库埃特流动(Couette)。所以,剪切阀式磁流变阻尼器的总的阻尼力将由阻尼力 F_p 和 F_s 合成。

对于剪切流动,其阻尼力计算公式为:

$$F_s = L\pi D\tau = L\pi D\tau_y + \frac{L\pi D\mu}{h}u(t) \quad (2)$$

对于压差流动, 其阻尼力计算公式为:

$$F_p(t) = \Delta P \cdot A_p \\ = \frac{12\eta LA_p}{\pi Dh^3} A_p u(t) + \frac{3L\tau_y}{h} A_p \operatorname{sgn}[u(t)] \quad (3)$$

由式(2)、(3)叠加可得式(4)剪切阀式磁流变阻尼器阻尼力的计算公式。

$$F(t) = \left(\frac{12\eta LA_p^2}{\pi Dh^3} + \frac{L\pi D\eta}{h} \right) u(t) \\ + \left(\frac{3LA_p}{h} + L\pi D \right) \tau_y \operatorname{sgn}[u(t)] \quad (4)$$

式(4)中 A_p 为活塞受到压力的有效面积; $u(t)$ 为活塞与缸体的相对流速; D 为活塞的直径; d 为缸壁厚, L 为活塞的长度; h 为空气间隙(工作间隙); η 是流体的动力粘度。

由公式(4)可以看出剪切阀式磁流变阻尼器阻尼力可以看作两项, 其中第一项与流体的动力粘度和流速有关, 基本反映的是普通流体的粘滞特性, 可称之为粘性阻尼力, 第二项与流体的屈服剪应力有关, 可称之为库仑阻尼力。是磁流变阻尼器的可调阻尼力, 反映了磁流变阻尼器特殊的电控特性。库仑阻尼力与粘滞阻尼力之比为阻尼力可调整系数, 我们定义为磁流变阻尼器的可调系数 k 。由式(4), 可得可调系数 k 的计算式为:

$$k = \left(\frac{3LA_p}{h} + L\pi D \right) / \left(\frac{12\eta LA_p^2}{\pi Dh^3} + \frac{L\pi D\eta}{h} \right) u_m \\ \approx \frac{3LA_p}{h} / \frac{12\eta LA_p^2}{\pi Dh^3} u_m = \frac{\pi Dh^2 \tau_y}{4\eta A_p u_m} \quad (5)$$

式(5)中 u_m 是阻尼器活塞与缸体的最大相对速度。对式(5)中各项的量纲进行分析, 可发现由于 η 通常为零点几个 $\text{Pa} \cdot \text{s}$, 而 τ_y 却为几 kPa 至几 $+\text{kPa}$, 所以式(5)中分子远大于分母。这说明磁流变阻尼器工作时, 如果磁流变体材料的性能足够的好, 其阻尼力将主要由磁场产生的库仑阻尼力提供。当磁流变材料及外界施加的磁场强度一定时, τ_y 为一定值, 这时可调系数 k 将随最大相对速度 u_m 的变化而变化^[11,12,13]。当 u_m 的数值较小时, 相当于磁流变阻尼器工作在较低频段时, 可获得较大的可调系数 k 。

4 磁流变阻尼器实验研究

为研究剪切阀式磁流变阻尼器的动力特性, 本

文使用中国科学院力学研究所非线性力学开放实验室的 MTS 810 材料实验机对自行设计制作的剪切阀式双出杆磁流变阻尼器进行了性能实验, 实验装置如图 3 所示。



图 3 磁流变阻尼器实验图

Fig.3 Experimental setup of MRF damper

该阻尼器的几何参数如下: 活塞直径 $D=56\text{mm}$; 活塞杆直径 $d=28\text{mm}$; 间隙宽 $h=2\text{mm}$; 线圈绕线总长度 $L=114.276\text{m}$ 。灌入自行配制的动力粘度为 $0.85 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 的磁流变液。根据履带车辆悬挂系统的工况, 在频率为 0.25Hz , 0.5Hz , 1Hz ; 振幅为 $\pm 20\text{mm}$, $\pm 30\text{mm}$ 下分别对阻尼力—电流, 阻尼力—位移和阻尼力—速度关系进行了实验研究。

(1) 阻尼力—电流变化曲线

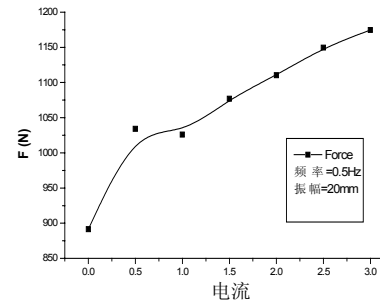


图 4 阻尼力随电流变化曲线

Fig.4 Relationship curve of damping force vs. current

图 4 为阻尼器的阻尼力随所加电流值变化的实验值及其 B 样条拟合曲线。阻尼器的振动频率为 0.5Hz , 振幅为 20mm 。可以看出, 剪切阀式磁流变阻尼器的阻尼力随电流的增大明显增大, 这也是磁流变优良特性的最直观体现。但这种增长趋势并非线性, 随电流的进一步增加, 阻尼力的增长幅度有所下降。

(2) 不同频率下阻尼力—位移关系曲线

图 5 为不同频率下阻尼器阻尼力与位移关系曲

线, (a)、(b)、(c)对应的振动频率分别为 0.25Hz, 0.5Hz, 1Hz, 振幅为 20mm; 曲线组由内到外对应的电流分别为 0A, 0.5A, 1A, 1.5A, 2A, 2.5A, 3A。

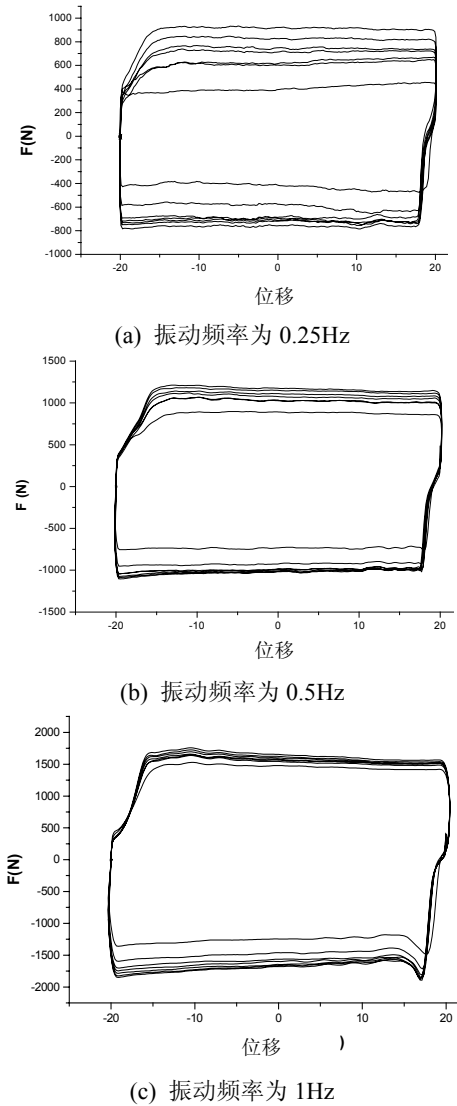


图 5 不同频率下阻尼力—位移关系曲线

Fig.5 Relationship curve of damping force vs. displacement for different frequency

由图 5 可以看出, 阻尼器的滞回曲线非常饱满, 有较强的耗能减振特性。每种频率下, 大电流对应的阻尼器的最大阻尼力与小电流对应的最小阻尼力之比, 即阻尼器的阻尼力可调系数随电流变化连续可调, 在低频(0.25Hz)下阻尼器的阻尼力可调系数约为 3。另外从三组不同频率下阻尼力与位移的关系曲线对比可以看出在相同振幅下, 阻尼器的可调倍数随频率增大有所减小。

(3) 不同振幅下阻尼力变化曲线

图 6 为不同振幅下阻尼力变化曲线, 阻尼器的

振动频率为 0.5Hz, 由内向外振幅依次为 2.5mm, 5mm, 7.5mm, 10mm, 15mm, 20mm, 30mm; 阻尼器的所加电流为 2.5A。

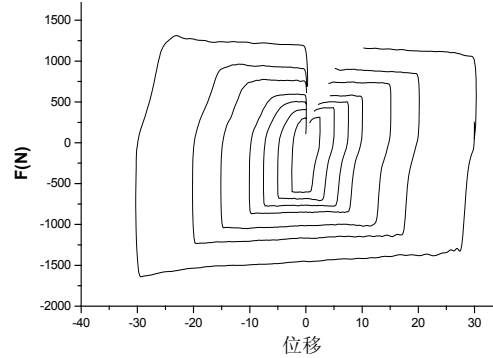


图 6 不同振幅下阻尼力变化曲线

Fig.6 Curve of damping force for different amplitude

由图 6 可看出, 阻尼力的峰值及阻尼特性都随着振幅的增大而升高。在大振幅时, 曲线不闭合主要是因为实验过程中没有对位移进行归零, 所以数据采集不是从零点开始的。

图 5、图 6 在一般情况下其阻尼力-位移曲线应为近似椭圆型, 上下对称, 本次实验与此不符。分析其原因除去与阻尼器结构本身有关外, 主要原因是自制的磁流变材料本身性能欠佳造成的。由磁流变材料的本构方程及其应力-应变关系, 其流变特性通常被分为预屈服区和后屈服区, 如图 7 所示。

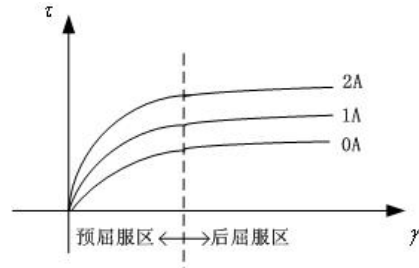


图 7 磁流变材料的屈服区

Fig.7 Yield field of MRF material

在后屈服区, 其剪应力近乎呈平直的直线关系, 本次实验的阻尼力-位移曲线呈矩形, 说明阻尼器主要工作在后屈服区域而不是预屈服区。另外, 材料的沉降稳定性不好, 沉积在活塞两侧的沉淀层不同可能是造成曲线上下不对称的原因之一; 而且, 振幅增大, 同样条件下活塞速度也增大, 这时惯性力产生的影响可能会较大。

(4) 阻尼力与速度关系曲线

图 8 为阻尼器的阻尼力与速度关系曲线, 阻尼器振动频率为 1Hz, 电流分别为 0A, 1A, 2A, 3A。由图 8 可以看出, 阻尼器的阻尼力随速度的增大而增

大, 在高速区近乎成线性关系。

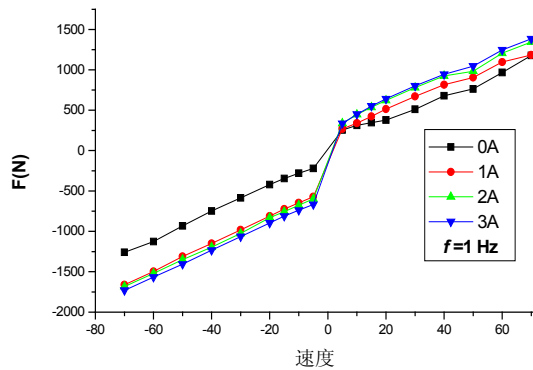


图8 阻尼力-速度曲线

Fig.8 Curve of damping force vs. velocity

(5) 频率对阻尼力的影响曲线

图9为频率对阻尼力的影响曲线, 阻尼器所加的电流为 2.5A。曲线组由内到外频率分别为 0.25Hz, 0.5Hz, 1Hz。由图9可以看出, 随着振动频率的增大, 阻尼器的最大阻尼力增加。

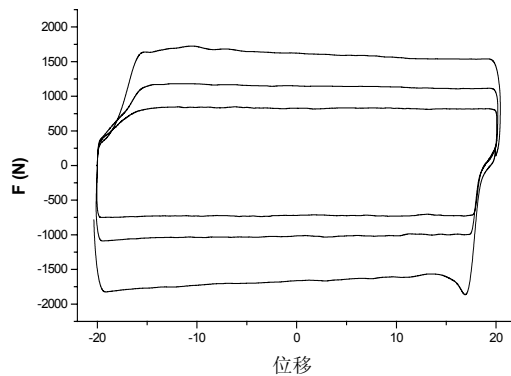


图9 频率对阻尼力的影响曲线

Fig.9 Curve of frequency vs. damping force

5 结论

通过对剪切阀式磁流变阻尼器的结构和工作原理的介绍, 给出了基于平板模型阻尼力的计算公式, 通过对自行研制的剪切阀式磁流变阻尼器动态特性实验研究, 可得出以下主要结论:

剪切阀式磁流变阻尼器的阻尼力随电流的增大明显增大, 但这种增长趋势并非线性, 可用分段线性关系近似描述这种关系。

剪切阀式磁流变阻尼器具有较强的耗能减振特性, 阻尼力可调系数随电流变化连续可调, 在相同振幅下, 阻尼器的可调倍数随频率增大而降低。

剪切阀式磁流变阻尼器的阻尼力随速度的增

大而增大, 在高速区近乎成线性关系。随着振动频率的增大, 阻尼力增加。

参考文献:

- [1] Ashour and Rogers C A J. Intelligent material systems and structure [J]. Smart Structure and Material, 1996, 7: 123-126.
- [2] J.David Carlson Cary, Michael J Chrzan, Raleigh both of NC, Frank James Girard Pa. Magnetorheological fluid devices [P]. United States Patent: 5284330,1994-02-08
- [3] 汪建晓, 孟光. 磁流变液装置及其在机械工程中的应用[J]. 机械强度, 2001, 23(1): 50-56.
Wang Jianxiao, Meng Guang. MRF device and application in machine engineering [J]. Mechanism Intensity, 2001, 23(1): 50-56. (in Chinese)
- [4] Katsuki Sunakoda, Hiroshi Sodeyama, Norio Iwata, Hideo Fujitani. Dynamic characteristics of magnetorheological fluid damper [J]. Smart structure and Material, 2000, 3989: 194-203.
- [5] Carlson J D, Weiss K D. Growing attraction to magnetic fluids [J]. Machine Des., 1994, 8: 61-64.
- [6] 欧进萍, 关新春. 磁流变耗能器及其性能[J]. 地震工程与工程振动, 1998, 18(3): 74-81.
Ou Jinping, Guan Xinchun. MRF damper and performance [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1998, 18(3): 74-81. (in Chinese)
- [7] 汪建晓, 孟光. 磁流变液阻尼器用于振动控制的理论及实验研究[J]. 振动与冲击, 2001, 20: 39-45.
Wang Jianxiao, Meng Guang. Theory and experimental study of vibration control using MRF damper [J]. Vibration and Impact, 2001, 20: 39-45. (in Chinese)
- [8] Dug-Young Lee, Norman M. Wereley. Analysis of electro-and magnetorheological flow mode dampers using Herschel-Bulkley model [C]. SPIE Conference on smart structures and materials 2000: damping and isolation, vol.3989: 244-253.
- [9] Xiong Chao, Lu Jiangang. The Study on Character of Magnetorheological Fluids and Magnetorheological Damper [C]. ICNM-IV. Vol. 1, 2002.
- [10] 关新春, 欧进萍. 磁流变耗能器的阻尼力模型及其参数确定[J]. 振动与冲击, 2000, 20(1): 5-8.
Guan Xinchun, Ou Jinping. Model of damping force and selecting parameters for MRF absorber [J]. Vibration and Impact, 2000, 20(1): 5-8. (in Chinese)
- [11] 熊超, 吕建刚. 剪切阀式履带车辆磁流变减振器阻尼特性分析与测试[J]. 测试技术学报, 2002, 16: 37-42.
Xiong Chao, Lu Jiangang. Analysis and measurement of damping performance of MRF shear-valve dampers for tracked vehicles [J]. Journal of Measurement Technology, 2002, 16: 37-42. (in Chinese)
- [12] 郭大蕾, 胡海岩. 基于磁流变阻尼器的车辆悬架半主动控制研究——建模与直接自适应控制[J]. 振动工程学报, 2002, 15(1): 10-14.
Guo Dalei, Hu Haiyan. Study of semi-active vibration control of vehicle suspension system using MRF dampers [J]. Journal of Vibration Engineering, 2002, 15(1): 10-14. (in Chinese)
- [13] 翁建生, 胡海岩, 张庙康. 磁流变液体的流变力学特性试验和建模[J]. 应用力学学报, 2000, 17(3): 1-5.
Weng Jiansheng, Hu Haiyan, Zhang Miaokang. Test and model for rheological performance of MRF [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2000, 17(3): 1-5. (in Chinese)