

高速列车减振器结构 参数对性能的影响分析

吴建斌 李人宪 段艳文

西南交通大学, 机械工程学院, 成都 610031

摘要: 减振器内部流道尺寸、节流阀的开启时刻、开阀速度和最大开度等参数是影响减振器性能的关键。为了研究相关参数对减振器阻尼特性的影响规律, 以高速列车某型二系垂向减振器为研究对象, 利用外部台架试验测量和内部流场三维动态仿真计算相结合的方法获得了不同参数下阻尼力的变化曲线, 得到了常通孔尺寸、节流阀开阀时刻、开阀速度和最大开度对阻尼特性曲线的影响规律。在此基础上计算分析了减振器在不同运动速度下的外特性, 获得了减振器运动速度与节流阀开启情况的关系, 可为高速列车减振器的结构设计提供参考。

关键词: 高速列车; 液压减振器; 仿真分析; 节流阀

中图分类号: U260.34²

文献标识码: A

文章编号: 1672-4747(2015)03-0070-06

DOI: 10.3969/j.issn.1672-4747.2015.03.012

Impaction of High-speed Train Damper's Structure Parameters on Its Performance

WU Jian-bin LI Ren-xian DUAN Yan-wen

School of Mechanical Engineering,

Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

Abstract: Damper's performance mainly depends on the factors including inner passageway's size, throttle's opening time, moving speed and maximum shift etc. In order to know how these factors influence it, an analysis model was established based on a second-vertical damper of the high-speed train. The variation curves of damping force were obtained during the calculation process by altering damper's structure parameters, through combining the bench test and 3D dynamic simulation of damper's inner flow field. Therefore, it became clear how these factors, including normal hole's size, throttle's movement speed and maximum shift, influenced the damping characteristic curves. On this basis, a further study on damper's external characteristic under different cosine velocities was done. The relationship between

收稿日期: 2014-12-02.

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20100184110002)。

作者简介: 吴建斌(1990-), 男, 福建莆田人, 西南交通大学硕士研究生。

piston's movement and throttle's opening condition then was acquired. The conclusions acquired may provide a useful reference for the structure design of high-speed train damper.

Key words: High-speed train, hydraulic damper, simulation analysis throttle

0 前言

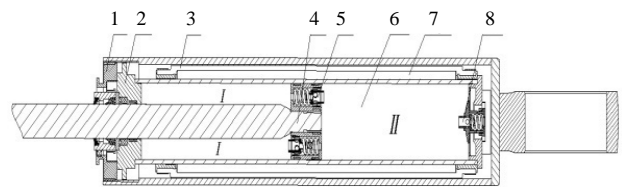
随着高速列车的快速发展,列车运行稳定性问题和舒适性问题的突出。液压减振器作为机车车辆悬挂系统的关键部件,其性能直接影响列车运行的平稳性和舒适性。国内自主研发的机车减振器主要有 ZS 和 JF 系列以及 3A 型减振器,性能上只能满足普通速度列车的要求。随着列车速度的提高,国产机车减振器由于寿命短、性能差,无法满足高速列车的需求,目前我国高速列车上的液压减振器几乎全部依靠进口^[1]。然而进口减振器价格昂贵、维修费用高,也使我国高速列车的制造受制于人。

高速列车减振器的动力学性能主要由示功特性 ($F-S$ 特性) 和速度特性 ($F-V$ 特性) 表达。而液压减振器动力学性能的实现是靠油液流动阻力产生的,减振器内部流道尺寸、节流阀开阀规律、活塞运动速度和油液温度等参数是影响减振器性能的关键。国内研究人员围绕减振器的试验分析、数学模型的建立和仿真、参数化设计等方面也曾做了一些研究^[2],但是减振器结构参数如何影响其示功图的形状,如何影响其速度特性,还不十分清楚,从而使高速列车液压减振器的设计带有一定的盲目性。本文拟通过对某型垂向减振器内部流场的动态过程进行三维仿真分析,研究相关结构参数对减振器性能的影响规律,为减振器的设计提供一种快速有效的方法。

1 液压减振器的基本结构和工作原理

某型高速列车垂向液压减振器的基本结构如图 1 所示,由压力缸、密封装置、活塞、底阀等部件组成。活塞上有 4 个阻尼节流阀(以下简称节流阀),减振器的压缩和拉伸过程分别由 2 个节流阀(见图 2)来控制。这两组节流阀根据工作过程分别定义为压缩节

流阀和拉伸节流阀。节流阀由心阀、调节螺母、阀弹簧组成。调节螺母用于调节弹簧压缩量兼导向作用,油液压力和弹簧作用力共同控制心阀的位移量。心阀上有常通孔和节流孔,常通孔一直处于导通状态,节流孔在心阀移动到某一位置时开启。减振器拉伸运动时(活塞左移),上腔油液体积减小,压力增大,心阀在油压作用下使弹簧压缩,节流阀孔开启,活塞上腔的一部分油液经节流阀孔流入下腔。随着油压增大,心阀位移增大使弹簧压缩量增大,节流孔的开启面积增大,流入下腔的油量增多,此时减振器的阻尼力也增大。常通孔的流动阻力与节流阀孔的流动阻力共同影响减振器阻尼力的大小。压缩过程中节流阀开启过程和拉伸时一样,一部分油液经节流阀流向上腔,另一部分油液经底阀上的卸荷阀流入储油缸。另一方面,由于活塞运动速度不同,油液流经常通孔和节流阀孔时的节流效果也将不同,因此活塞运动速度也会影响减振器的阻尼特性^[3]。



1—挡盖; 2—导向座; 3—气囊; 4—活塞及活塞杆; 5—节流阀; 6—工作缸; 7—储油缸; 8—底阀组件

图 1 某垂向液压减振器的基本结构

Fig.1 Structure of the hydraulic damper

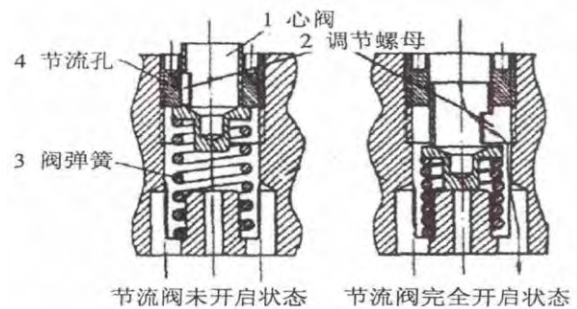


图 2 节流阀的基本结构

Fig.2 Structure of the throttle valve

2 计算模型

2.1 几何模型

减振器内部是油液的封闭流场,随着活塞与活塞杆的运动,流场各部分空间尺寸发生变化。为仿真减振器内部时时变化的流场空间,采用移动网格技术来实现减振器动态流场。图3为某垂向减振器的内流场计算模型。流场分为两部分:工作缸及活塞区域网格设定为动网格区域,储油缸及底阀区域设定为固定区域。

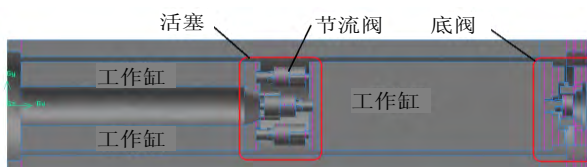


图3 减振器整体流场几何模型

Fig.3 Model of damper's flow field

图4为节流阀区域局部网格图。

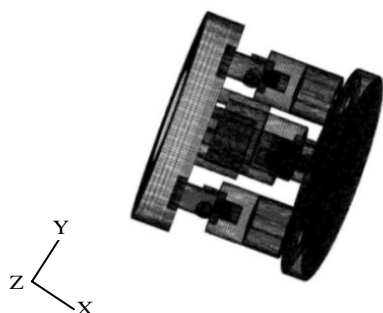


图4 节流阀网格

Fig.4 Grid of throttle valve

2.2 基本假设及计算参数设定

减振器的内部流场非常复杂,因此对减振器流场的分析是基于以下一些假设:

- (1) 油液为不可压缩流体。
- (2) 油液在减振器的一个工作循环过程中温度不变。
- (3) 忽略缸内压力变化引起减振器刚性构件的变形。
- (4) 忽略减振器各元件之间的摩擦力影响。

(5) 不考虑漏油和气穴现象。

减振器实际工作时的运动为随机运动,但减振器在试验台架进行测试时的外部激励为余弦运动,计算中模拟的就是这种运动状态^[4]。计算中给减振器加载与台架试验相同的余弦运动 $v=A\cos(2At/S)$, 式中 A 为余弦速度幅值, S 为振动幅值。此外,油液流经常通孔和节流孔时存在强烈的节流效应,流动处于紊流状态,计算中采用 $k-\varepsilon$ 两方程标准紊流模型进行分析。计算加载的工况和油液参数如表1和表2所示。

表1 计算加载工况

Tab.1 The parameters setting during calculation

速度幅值 $A/(m/s)$	活塞运动振幅 S/mm
0.1	50
0.3	50
0.5	50

表2 计算过程油液参数

Tab.2 The oil properties during calculation

温度/ $^{\circ}C$	密度/ (kg/m^3)	粘度/ $(Pa\cdot S)$
20	850	0.018 73

3 减振器结构参数对阻尼特性的影响

本文研究的减振器在 $20^{\circ}C$ 下台架试验得到的阻尼特性如图5所示,试验加载余弦速度幅值为 $0.1m/s$ 。根据曲线的变化规律将每 $1/4$ 周期的阻尼特性曲线分成三段(见图5)。第一段对应节流阀开阀前的阻尼特性,此时油液只经常通孔流出,阻尼特性应该只与

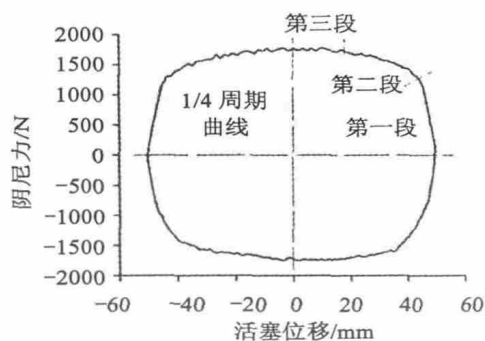


图5 试验工况下的阻尼特性曲线

Fig.5 The damping force curve under the test condition

常通孔尺寸相关。第二段为节流阀开启阶段，减振器阻尼特性取决于开阀规律；第三段阻尼力的变化基本上趋于稳定，节流阀的开启过程基本结束，阻尼力的极值应该取决于节流阀的最大开度。由此可以做出以下预测：影响减振器阻尼特性的结构参数主要是常通孔的尺寸、节流阀的开阀时刻、节流阀的开阀速度和最大开度。

3.1 常通孔尺寸的影响

采用不同的常通孔尺寸可计算获得不同斜率的阻尼特性曲线（见图 6），长通孔尺寸越小，阻尼特性曲线变化越陡。经反复计算，当常通孔直径为 0.9mm 时，计算阻尼特性曲线与实验曲线的第一段基本一致，实际测绘所得的常通孔尺寸为 0.92mm，进一步验证了仿真的正确性。计算结果也说明常通孔的尺寸影响第一段阻尼特性曲线的走势。

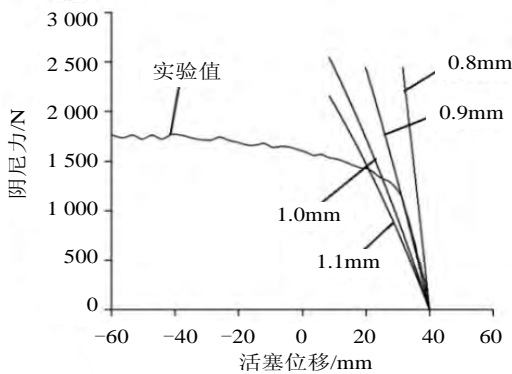


图 6 常通孔尺寸对阻尼特性斜率的影响
Fig. 6 The influence of normal's size

3.2 开阀速度的影响

示功图试验曲线与节流阀开阀前计算曲线的脱离点（见图 6），就应该是节流阀的开阀时刻，但节流阀以什么速度开启仍然是未知的。为获得节流阀的开启规律，我们在仿真计算中利用自编控制程序改变节流阀的开阀时刻及开阀速度，以获得开阀速度对阻尼特性曲线的影响规律。不同的开阀速度条件下计算阻尼特性曲线如图 7 所示。

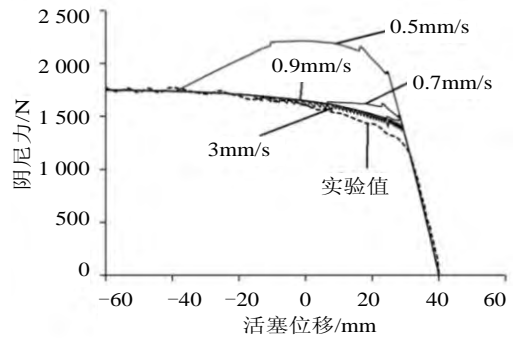


图 7 节流阀开阀速度对阻尼特性的影响
Fig. 7 The influence of throttle's speed

开阀速度过小时，节流阀的卸荷速度太慢，不足以抵消因活塞速度增大引起的阻尼力增大，相应段的阻尼力值偏大，曲线局部突起，开阀速度越小，突起区域越大。开阀速度太大时，节流阀的卸荷速度过快，若要保持阻尼特性曲线走势必须停止开阀以减缓阻尼力的下降趋势，直到阻尼力值（由于活塞运动）进一步增大后再继续开阀，此时节流阀的开阀过程就出现时断时续的现象，阻尼力值也呈上下波动（见图 8）。

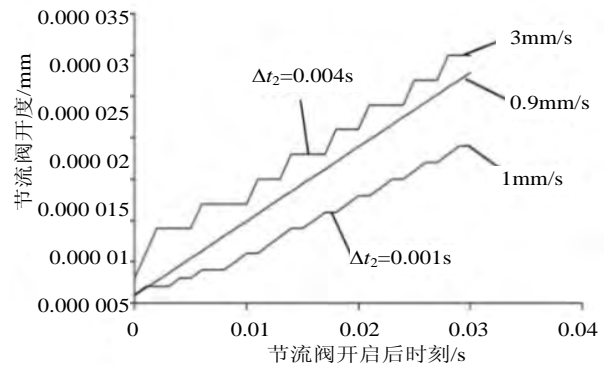


图 8 不同开阀速度下节流阀开度的变化曲线
Fig. 8 The curve of throttle's shift in different speeds

计算结果说明，节流阀的开阀速度必须与减振器活塞的运动速度相“匹配”，才有可能实现所希望的减振器阻尼特性。

3.3 节流阀最大开度的影响

节流阀的最大开度会影响减振器阻尼力的最大

值。节流阀采用不同最大开度的计算结果如图 9 所示。节流阀的最大开度越小，阻尼力最大值越大，阻尼特性曲线水平段整体上移。对于所分析的减振器，当节流阀的最大开度为 0.1645mm 时，计算结果与试验曲线基本一致。

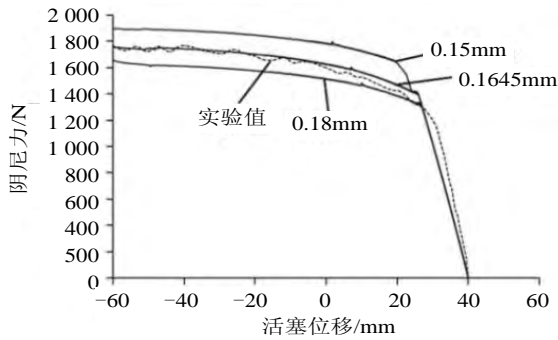


图 9 阀门开度对阻尼特性幅值的影响

Fig.9 The influence of valve's shift on damping force

4 活塞运动速度对阻尼特性的影响

减振器的阻尼特性不仅仅与内部结构参数有关，还与活塞（杆）的运动速度相关。不同活塞运动速度条件下，减振器将呈现不同的阻尼特性。因此，还必须研究活塞运动速度对阻尼特性的影响，即减振器的速度特性。活塞在不同余弦速度下的阻尼特性曲线和速度特性曲线如图 10、11、12 所示。活塞运动速度越大，产生的阻尼力越大，开阀前阻尼特性曲线的变化越陡，阻尼力消耗的功也越多（曲线包围的面积）。

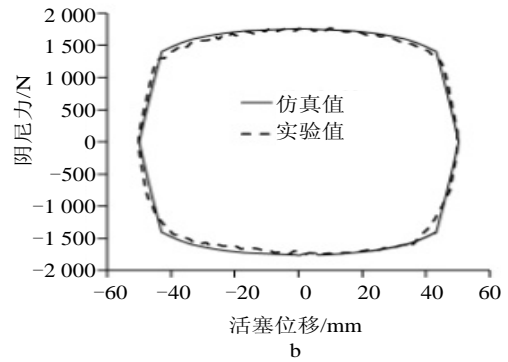
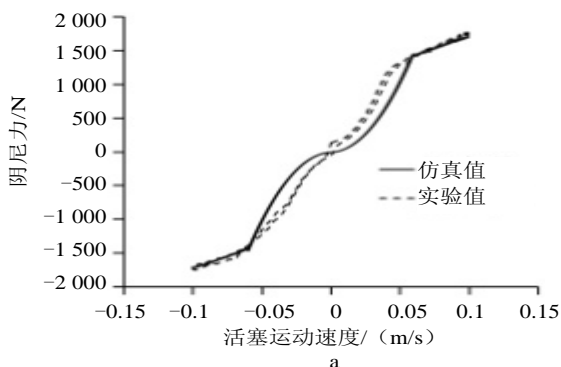


图 10 余弦速度幅值为 0.1m/s 的外特性曲线

Fig.10 The damping force curve when speed cosine is 0.1m/s

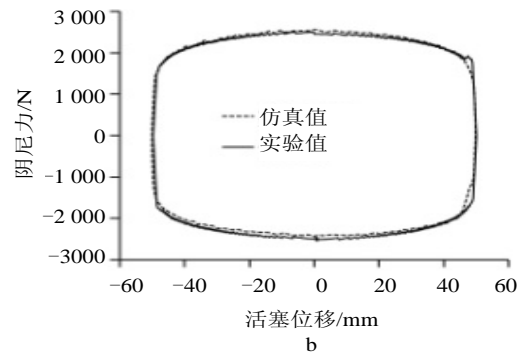
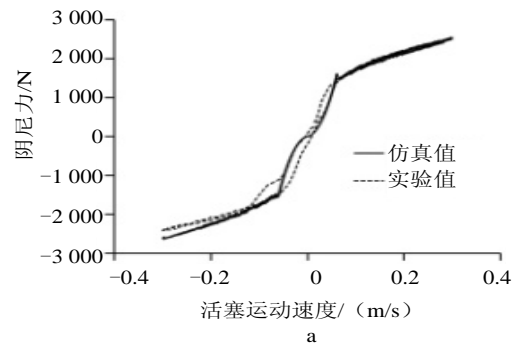
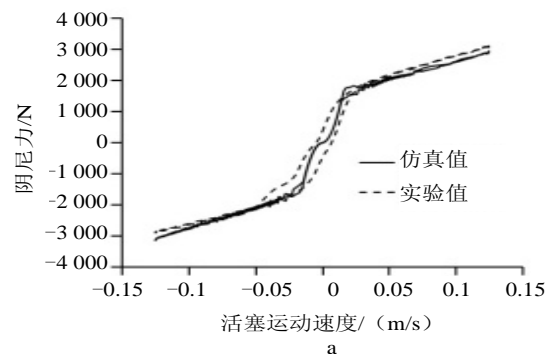


图 11 余弦速度幅值为 0.3m/s 的外特性曲线

Fig.11 The damping force curve when speed cosine is 0.3m/s



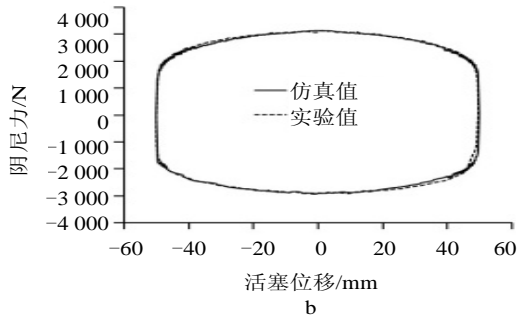


图 12 余弦速度幅值为 0.5m/s 的外特性曲线

Fig. 12 The damping force curve when speed cosine is 0.5m/s

节流阀的开启取决于油液的压力和阀弹簧的刚度, 活塞运动速度的变化会影响油腔内油液的压力变化规律, 从而影响节流阀的开启规律^[5]。图 13 为不同余弦速度下节流阀开度随位移的变化曲线, 表 3 列

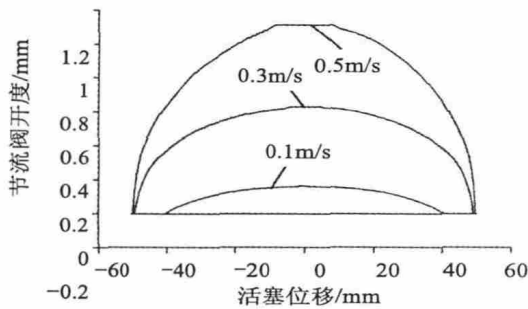


图 13 不同余弦速度下节流阀开度曲线

Fig. 13 Throttle's shift curves of different speed cosines

表 3 不同速度下节流阀的开启状态

Tab. 3 The throttle's conditions at different speeds

速度幅值/ (m/s)	节流阀开度/mm	开阀阻尼力/N
0.1	0.164	1325.8
0.3	0.63	1326.5
0.5	1.11	1332.6

参考文献

[1] 杨国桢, 王福天. 机车车辆液压减振器[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.
 [2] 丁问司, 巫辉燕. 铁道车辆油压减振器三维流场动态仿真[J]. 机械工程学报, 2011, (6): 130-137.
 [3] 梁志杰, 于兰英, 陈留等. SS₈ 机车一系垂向减振器仿真系统的研究[J]. 机车电传动, 2002, (3): 24-27

出了不同余弦速度下节流阀的开阀阻尼力和阀门开度。计算结果表明, 活塞运动速度增大, 节流阀的开启时刻会提前, 最大开度会增大, 但是开阀阻尼力基本相同。说明节流阀的开阀速度快慢主要由弹簧刚度决定, 开阀阻尼力大小与弹簧预紧力有关, 阀门开度则由弹簧压缩量决定。

5 结 论

(1) 通过试验加仿真分析方法, 得到了减振器内部结构参数对减振器阻尼特性的影响规律: ①常通孔尺寸的大小影响节流阀开启前阻尼特性第一段曲线的(走势)斜率, 常通孔尺寸越小, 曲线斜率越大; ②节流阀的开阀速度影响阻尼特性曲线第二段变化趋势: 开阀速度太小, 阻尼力值将会大于设计值; 开阀速度太大, 节流阀的开启会出现时断时续现象, 相应的阻尼力也产生波动。开阀速度的合理选择决定了阻尼特性曲线的变化; ③节流阀的最大开度影响减振器阻尼力的最大值, 最大开度越小, 阻尼力最大值越大, 阻尼特性曲线整体上移。

(2) 减振器速度特性的计算分析表明: 活塞运动速度越大, 阻尼力幅值越大, 开阀前阻尼特性曲线的变化越陡, 阻尼力消耗功也越多(示功图曲线包围的面积); 随着活塞运动速度的增大, 节流阀的最大开度增大, 节流阀开启时刻提前, 节流阀的开阀速度也发生变化。

(3) 节流阀的开启时刻和开阀速度快慢取决于心阀内部的弹簧刚度, 要实现所希望的节流阀开启时刻和开启速度, 弹簧刚度与减振器内部阻尼力之间的匹配关系是必须了解清楚的环节, 也是我们后续工作须认真研究的课题。

(中文编辑: 刘娉婷)