

· 自动化技术 ·

起落架磁流变减振系统的特性分析研究

黄琦, 李华琳, 陈勇, 李坚

(电子科技大学自动化工程学院 成都 611731)

【摘要】大型飞机的安全研究,起落架是保障飞机起飞与降落安全的关键部件,该文根据起落架的减振系统对其进行动力学特性分析。由于磁流变阻尼力的出现,导致了起落架磁流变减振系统成为了非线性系统,为了研究系统特性,通过对其非线性部分线性化,构造出起落架磁流变减振系统的动力学数学模型,分析不同阻尼比下机身位移、机身加速度、起落架位移和起落架动载荷的频率响应,并对跑道的随机路面激励时域特性分析,这对起落架磁流变减振系统结构设计和减振系统优化控制具有重要意义。

关键词 频域响应; 起落架; 磁流变减振系统; 时域分析

中图分类号 TP13; TH703.6

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.06.014

Analysis of the Characteristics of Landing Gear with MR Fluid Damper System

HUANG Qi, LI Hua-lin, CHEN Yong, and LI Jian

(School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

Abstract Landing gear of aircraft is the key component to ensure safety during the process of takeoff and landing. This paper analyzes the dynamic characteristics of the landing gear system. Because of the inclusion of MR fluid, the landing gear damper system becomes a nonlinear system. In order to study the characteristics of the system, this paper builds the mathematical model of the landing gear damper by linearizing the nonlinear system. Based on the model, the frequency response of aircraft body displacement, aircraft body acceleration, landing gear displacement, and tire dynamic loading of the landing gear are analyzed. And the time-domain response of random road excitations is also analyzed. These analyses would be helpful in structure designing of the landing gear with MR damper and the advanced control of the damper system.

Key words frequency response; landing gear; MR fluid damper system; time domain analysis

飞机起飞和降落时会受到地面巨大的冲击力,为了减少路面冲击对飞机造成的不良振动,起落架上安装了减振的装置,小型飞机用弹簧减振,大型飞机则用液压减振器减振。但是现在飞机安全事故中,因起落架故障造成的事故占相当比例,因此,急需一种新型智能减振器可调节、自适应地缓解路面的冲击力。

近年来,磁流变减振器已经成为国内外的研究热点^[1-5],磁流变减振器可以根据路面作用力的大小和飞机的运动状态,在毫秒级的时间内自适应改变减振器参数使其性能达到最优。目前,磁流变减振器已经应用到了高端车上,如凯迪拉克的赛威和奥迪的“TT”跑车等,但飞机上的应用我国还处于空

白。国内有中国民航大学、西北工业大学、重庆大学等,对磁流变减振器进行了一些磁流体特性分析。磁流变减振器在起落架中的推广和应用需要解决的关键技术就是减振器的结构设计、控制策略两部分,这两个关键技术是建立在起落架磁流变减振系统特性分析基础上的。

因此,本文在起落架的动力学特性基础上建立起落架磁流变减振系统的非线性数学模型,并对其进行线性化,分析不同阻尼比下机身位移、机身加速度、起落架位移和起落架轮子动载荷的频率响应,并对跑道的随机路面激励时域特性进行分析,为起落架磁流变减振系统的结构设计和优化控制提供依据。

收稿日期: 2009-06-04; 修回日期: 2009-10-14

基金项目: 教育部博士点专项基金(200806141056); 四川省应用基础研究项目(2009JY0008); 四川省青年基金(09ZQ026-009)

作者简介: 黄琦(1976-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事分布式检测技术、电力系统方面的研究。

1 起落架磁流变减振系统动力学分析

在起落架的动力学特性基础上建立的起落架磁流变减振系统的非线性数学模型^[6-8]如图1所示, 其中 M_u 是机身质量, M_d 是起落架质量, K_s 为弹簧刚度, K_t 为起落架轮子刚度, X_u 为机身垂直位移, X_d 为起落架垂直位移, X_r 为跑道路面输入垂直位移, C_0 是零磁场磁流体的粘滞系数。

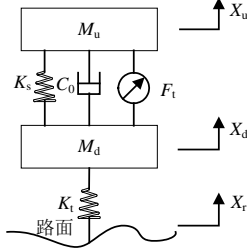


图1 起落架磁流变减振系统

依据牛顿第二定律, 得到系统的微分方程为:

$$\begin{cases} M_u d^2 X_u + C_0(dX_u - dX_d) + K_s(X_u - X_d) - F_t = 0 \\ M_d d^2 X_d + C_0(dX_d - dX_u) + K_s(X_d - X_u) - K_t(X_r - X_d) + F_t = 0 \end{cases} \quad (1)$$

起落架磁流变减振系统通过改变减振器的阻尼系数产生相应的可调阻尼力 F_t , 它是非线性的, 其非线性的影响主要是由于磁流变液在外加磁场下的非线性、回滞性和饱和性引起的。为了能够使减振器的可调范围大, 往往选择性能优越的磁流变液, 尽可能使磁流变减振器工作范围在磁流变液的线性区间。

通过实验分析, 可调阻尼力 F_t 与磁流变液的励磁电流 i 之间的函数关系为:

$$F_t = f(i) \cdot \text{sgn}(v) \quad (2)$$

式中 $f(i)$ 是利用最小二乘法经试验拟合的与磁流变液的励磁电流 i 有关的多阶函数; $\text{sgn}(v)$ 为活塞头运动方向符号函数, $v = (dX_d - dX_u)$ 为活塞头运动速度。考虑磁流变液流动特性, F_t 等效为粘滞阻尼力:

$$F_t = C_t v \quad (3)$$

式中 C_t 为磁流变液粘滞系数, 由磁流变液的励磁电流来调节, 其变化能够有效地反映磁流变液阻尼力的变化。

将磁流变减振器的可调阻尼力 F_t 分段线性化:

$$C_t = \frac{F_t}{(dX_d - dX_u)} = \frac{f(i) \cdot \text{sgn}(v)}{(dX_d - dX_u)} \quad (4)$$

当 $C_t = 0$ 时, 模型为一般起落架的力学模型, 将其代入式(1), 得:

$$\begin{cases} M_u d^2 X_u + (C_0 + C_t)(dX_u - dX_d) + K_s(X_u - X_d) = 0 \\ M_d d^2 X_d + (C_0 + C_t)(dX_d - dX_u) + K_s(X_d - X_u) - K_t(X_r - X_d) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

在零初始条件下, 对式(5)进行拉普拉斯变换, 得:

$$\begin{cases} (M_u s^2 + (C_0 + C_t)s + K_s)X_u(s) = [(C_0 + C_t)s + K_s]X_d(s) \\ (M_d s^2 + (C_0 + C_t)s + K_s + K_t)X_d(s) = [(C_0 + C_t)s + K_s]X_u(s) + K_t X_r(s) \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)得机身位移 X_u 相对于跑道路面输入 X_r 的传递函数为:

$$\frac{X_u(s)}{X_r(s)} = \frac{K_t[(C_0 + C_t)s + K_s]}{\Delta(s)} \quad (7)$$

由式(6)得起落架轮子位移 X_d 相对于跑道路面输入 X_r 的传递函数为:

$$\frac{X_d(s)}{X_r(s)} = \frac{K_t[M_u s^2 + (C_0 + C_t)s + K_s]}{\Delta(s)} \quad (8)$$

由式(7)得机身加速度 \ddot{X}_u 相对于跑道路面输入 X_r 的传递函数为:

$$\frac{d^2 X_u(s)}{X_r(s)} = \frac{K_t s^2 [(C_0 + C_t)s + K_s]}{\Delta(s)} \quad (9)$$

由式(8)得起落架轮子动位移 $X_d - X_r$ 相对跑道路面输入 X_r 的传递函数为:

$$\frac{X_d(s) - X_r(s)}{X_r(s)} = \frac{K_t[M_u s^2 + (C_0 + C_t)s + K_s]}{\Delta(s)} - 1 \quad (10)$$

由式(7)和式(8)得起落架动位移 $X_u - X_d$ 相对于跑道路面输入 X_r 的传递函数为:

$$\frac{X_u(s) - X_d(s)}{X_r(s)} = \frac{-K_t M_u s^2}{\Delta(s)} \quad (11)$$

其中:

$$\Delta(s) = M_u M_d s^4 + (M_u + M_d)(C_0 + C_t)s^3 + [K_s M_d + (K_s + K_t)M_u]s^2 + K_t(C_0 + C_t)s + K_s K_t$$

通过对起落架磁流变减振器的可调阻尼力线性化, 得到相对于路面激励的机身位移、机身加速度, 起落架位移和起落架动载荷的传递函数, 为分析不同阻尼比下起落架减振器的特性提供了方便, 同时也有利于磁流变起落架控制策略的优化。

2 起落架磁流变减振系统的频率响应分析

考虑式(5)系统的传递函数, 略去阻尼和外加激励, 得到系统的无阻尼微分方程为:

$$\begin{cases} M_u d^2 X_u + K_s (X_u - X_d) = 0 \\ M_d d^2 X_d + K_s (X_d - X_u) - K_t (X_r - X_d) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

设起落架减振系统在 $t=0$ ，初始条件为 $X(0) = X_0$ ， $dX(0) = dX_0$ 时的解为 φ ，则式(12)为：

$$(K - \omega^2 M)\varphi = 0 \quad (13)$$

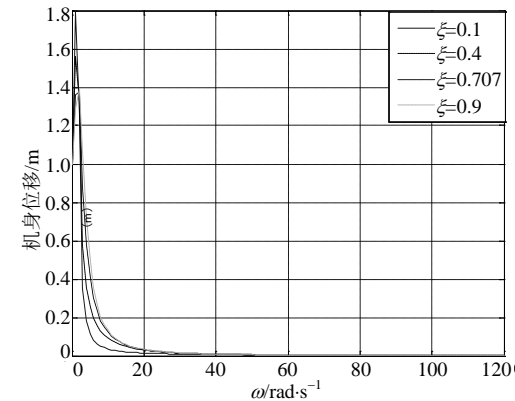
式中 $M = \begin{bmatrix} M_u & 0 \\ 0 & M_d \end{bmatrix}$ ； $K = \begin{bmatrix} K_s & -K_s \\ -K_s & K_s + K_t \end{bmatrix}$ 。从而得到起落架减振系统的无阻尼固有共振频率为：

$$\omega_{1,2} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\frac{K_s}{M_u} + \frac{K_s + K_t}{M_d} \pm \sqrt{\left(\frac{K_s}{M_u} + \frac{K_s + K_t}{M_d} \right)^2 - \frac{4K_s K_t}{M_u M_d}} \right]} \quad (14)$$

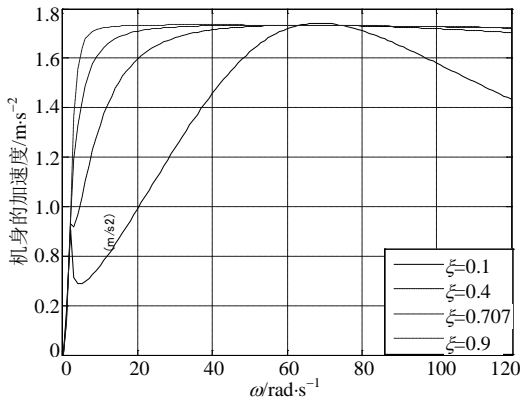
以波音747为例，其空机重量为180 000 kg，最大起飞重量是360 000 kg，则设波音747起落架磁流变减振系统的参数选择为： $M_u = 300\ 000\text{ kg}$ ， $M_d = 1\ 000\text{ kg}$ ， $K_s = 8 \times 10^5\text{ N/m}$ ， $K_t = 4 \times 10^6\text{ N/m}$ ，起落架磁流变减振系统的阻尼比为：

$$\xi = \frac{C_0 + C_t}{2\sqrt{K_s M_u}} \quad (15)$$

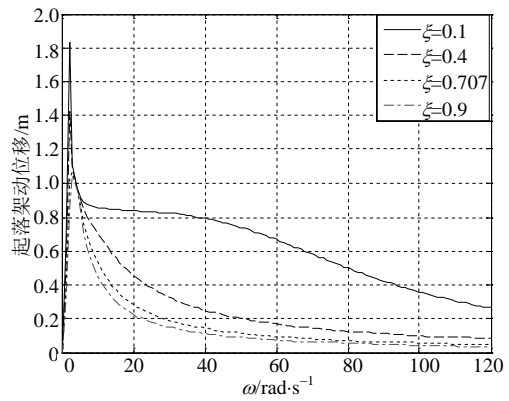
依据起落架磁流变减振系统的传递函数，通过设置系统不同的阻尼比，利用Matlab仿真得到机身位移、机身加速度、起落架动位移和起落架轮子动载荷在不同阻尼比下的幅频特性曲线，如图2所示。



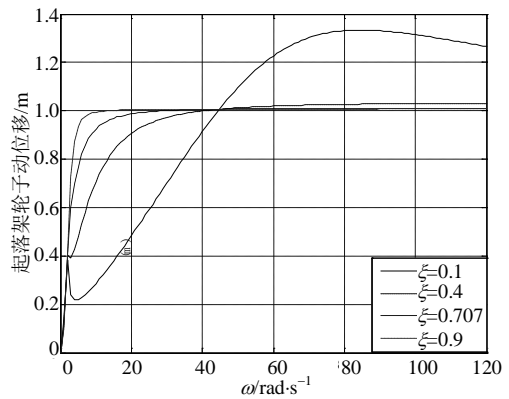
a. 机身位移幅频



b. 机身加速度幅频特



c. 起落架动位移幅频特性



d. 起落架轮子动位移幅频特性

图2 起落架的幅频特性

由图2可以看出，在阻尼比 $\xi=0.1$ 时波形的两个尖峰，即为起落架减振系统的两个固有共振频率，因此，将横坐标按照其固有的共振频率分为低频段(0到第一共振频率)、中频段(第一共振频率与第二共振频率之间)和高频段(大于第二共振频率)。从图2a可以看出，在系统低频段，随着起落架减振系统阻尼比的增大，机身位移迅速减小；而在中高频段，随着阻尼比的变化，机身位移变化不大，且随着频率的增大，机身位移逐渐减小，在第二共振频率处不出现波峰，机身位移比较平稳，趋近于零。从图2b可以看出，在低频段，随着阻尼比的增大，机身加速度减小；在中频段和高频段，随着阻尼比的增大，机身加速度增大，机身加速度变化量不大，加速度基值较大；在第二共振频率处，且阻尼比 $\xi=0.1$ 时，有个尖峰，随着路面输入频率的增大而减小并趋于稳定。从图2c可以看出，在整个频段内，起落架动位移随着阻尼比的增大而减小，尤其是在低频段起落架动位移减小很明显。从图2d可以看出，在低频段，随着阻尼比的增大，起落架轮子动位移减小；在中频段，随着阻尼比的增大，起落架轮子动位移增大；在高频段，随着阻尼比的增大，起落架轮子动位移减小程度变缓。

由此可知，在低频段，机身位移、机身加速度、起落架动位移和起落架轮子动位移都随着阻尼比的增大而减小，因此，在低频段应设置较大的阻尼比。在中频段，由于机身的加速度和起落架的动位移随着阻尼比的增大而增大，考虑到中频段是人体的敏感频段，应设置小的阻尼比以提高飞机的舒适性和安全性。在高频段，机身加速度随着阻尼比的增大而增大，起落架的动位移随着阻尼比的增大而减小，因此，高频段阻尼比的设定由具体情况而定，考虑乘坐的舒适性要求，应设置小的阻尼，考虑操纵的稳定性要求，应设置较大的阻尼比。

3 跑道随机路面激励时域特性分析

3.1 跑道路面输入仿真

跑道路面输入大致可以划分为随机路面和冲击路面两类^[9-10]。随机路面是指沿道路方向的连续激励。对于连续型随机路面，一般采用空间频率功率谱密度函数以及相应的时域表示形式加以描述。冲击路面是指在较短时间内的离散事件，并且有较高的强度，如平坦道路上的凸包和凹坑。一般采用脉冲信号、阶跃信号和半波正弦信号进行描述，把测量得到的随机数据 X_r ，经数据处理得到路面功率谱密度^[11-13]，本文采用滤波白噪声作为随机路面的输入模型，其数学模型为：

$$G_x(n) = G_x(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-w} \quad (16)$$

式中 n 为空间频率，表示每米长度中包含的波数； n_0 为参考空间频率， $n_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$ ； $G_x(n_0)$ 为路面不

平度系数； w 为频率指数，确定每段功率谱斜线的斜率，取值由路面谱的频率结构确定，分级路面谱的频率指数 $w = 2$ 。

为了分析研究起落架时域的动态特性，需要进一步把频域内的统计特性转变为时域内的时间序列。于是路面轮廓可以由功率谱密度为 $2\pi n_0 \sqrt{G_x(n_0)}v$ 的白噪声通过一个积分器产生，建立其Simulink仿真模型，如图3所示。

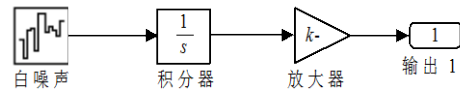


图3 随机路面的输入仿真

对于C级路面，取路面不平度系数 $G_x(n_0) = 256 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{m}^{-1}$ ，并设飞机降落的速度为 72 m/s ，其生成的随机路面轮廓如图4所示：

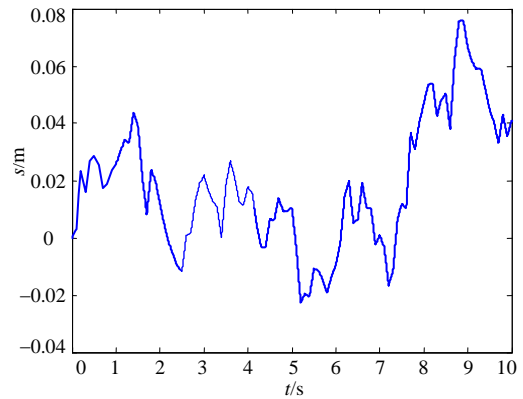


图4 随机路面输入的时域模型仿真

3.2 起落架系统仿真

利用起落架动力学微分方程和随机路面输入模型建立仿真模型如图5所示。

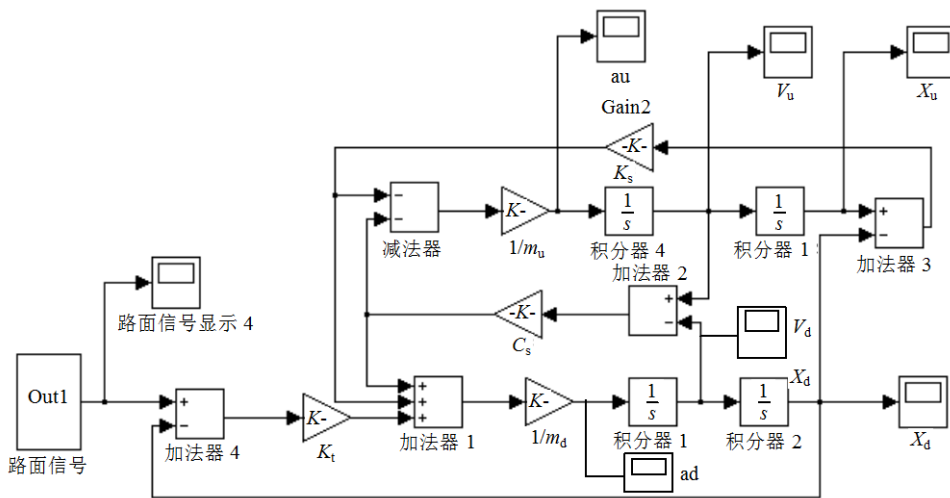


图5 起落架系统仿真模型

考虑到人体对飞机着陆过程的平顺性和舒适性，最主要是通过感觉机身振动的频率和强度评价

的。参考C级路面，飞机着陆后某一时刻速度为72 m/s，通过改变起落架的阻尼参数，得到系统不同阻尼比下机身振动的加速度如图6所示。

从图6可以看出，在C级路面，飞机速度为72 m/s时，调节起落架的阻尼比，得到起落架阻尼比在 $\xi=0.1$ 时，机身的加速度幅值最小，证明此时机身的平顺性和舒适性最好。通过调节不同的路面输入激励和系统不同的阻尼比能够得到不同级别路面的最佳阻尼比，从而为起落架磁流变减振系统的结构设计和优化控制提供依据。

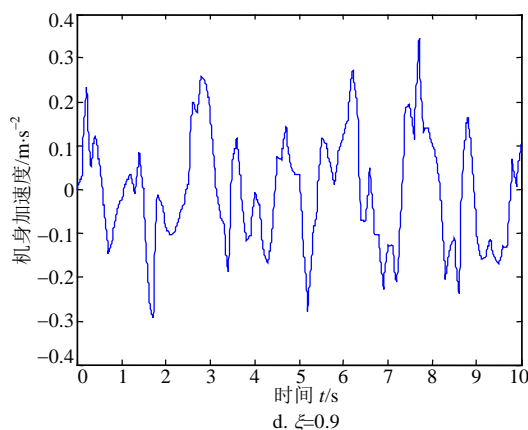
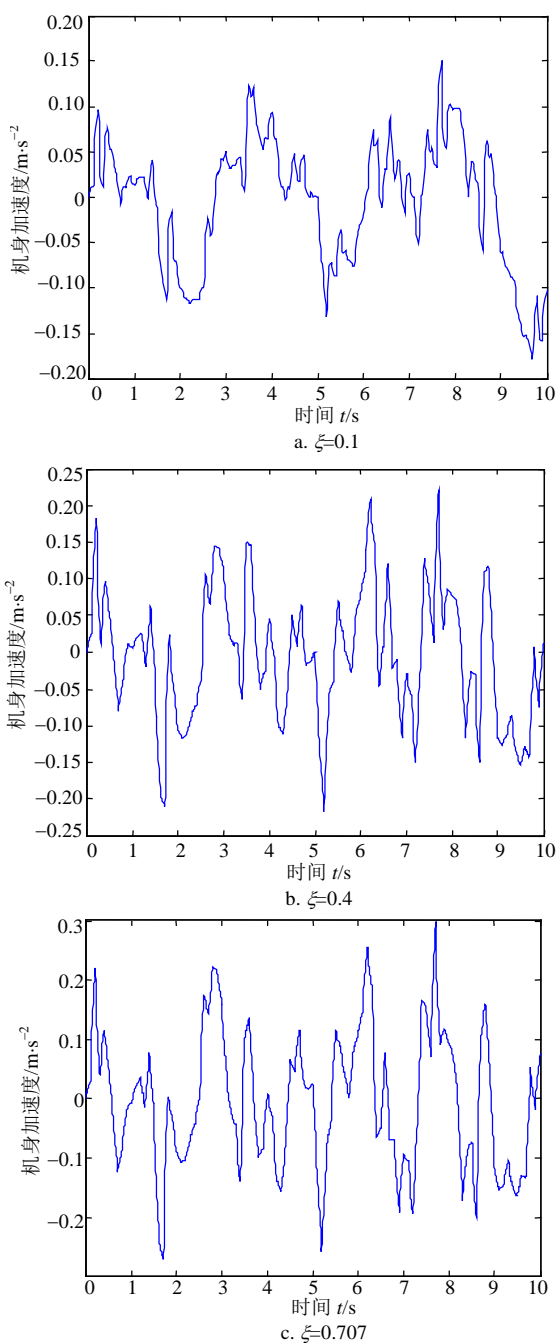


图6 不同阻尼比下的机身加速度

4 总结

本文从起落架的动力学特性分析出发，分析不同阻尼比下机身位移、机身加速度、起落架动位移和起落架轮子动位移的幅频特性，建立了随机路面输入的时域模型和起落架减振器模型，并在一定速度下，得到不同阻尼比下机身加速度的时域特性。

针对起落架减振器的固有共振频率，详细分析了不同频段改变系统的阻尼比对起落架减振器特性的影响，针对不同的路面激励，通过可调阻尼力得到最优的阻尼比，兼顾飞机操纵稳定性和舒适性，提高飞机的安全性。

参考文献

- [1] 徐冬苓, 李玉忍. 飞机起落架数学模型的研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(4): 831-833.
XU Dong-ling, LI Yu-ren. Mathematical model research on aircraft landing gear[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(4): 831-833.
- [2] CHOI Young-tai, WERELEY N M. Vibration control of a landing gears system featuring[J]. Journal of Aircraft, 2003, 40(3): 432-439.
- [3] CARLSO J D, CATANZARITE D M, St CLAIR K A. Commercial Agneto-Rhellogical Fluid Devices[C]// Proceedings of the 5th International Conference on ER Fluids, MR Suspensions and Associated Technology. Singapore: [s.n.], 1996.
- [4] CARLSO J D, CATANZARITE D M, St CLAIR K A. Commercial magnetorheological fluid devices[J]. International Journal of Modern Physics B, 1996, 10, (23-24): 2857-2865.
- [5] RAKHBA S, HONG S, SANKAR T S. Analysis of a passive sequential hydraulic damper for vehicle suspension[J]. VSD, 1990, 19: 289-312.
- [6] CHOI S B, LEE H S, HONG S R, et al. Control and response characteristics of a magneto-theological fluid for passenger vehieles[J]. SPIE, 2000, 3985: 438-433.

(下转第890页)

建议 s 取3附近的值。通过实验结果可以看出, 当结构元素中的可调参数 $s=3$ 时, 与已有的形态学角点检测算法相比, 该算法检测出的图像中角点的位置更精确。

参 考 文 献

- [1] GAO X, SATTAR F, VENKATESWARLU R. Multiscale corner detection of gray level images based on Log-Gabor wavelet transform[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems for Video Technology, 2007, 17(7): 868-875.
- [2] GAO X, SATTAR F, VENKATESWARLU R. Corner detection of gray level images using gabor wavelets[C]//The IEEE International Conference on Image Processing. Singapore: IEEE, 2004: 2669-2672.
- [3] HARRIS C, SATEPHENS M J. A combined corner and edge detector[C]//In Alvey Vision Conference. Manchester: [s.n.], 1988: 147-152.
- [4] SMITH S M, BRADY J M. SUSAN—a new approach to low level image processing[J]. International Journal of Computer Vision, 1997, 23(1): 45-78.
- [5] JIN Q. A novel adaptive approach to process binary fingerprint images using directional morphological operations[J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2009, 7(2):129-132.
- [6] LAGANIERE R. A morphological operator for corner detection[J]. Pattern Recognition, 1998, 31(11): 1643-1652.
- [7] SOBANIA A, EVANS J P O. Morphological corner detector using paired triangular structuring elements[J]. Pattern Recognition, 2005, 38(7): 1087-1098.
- [8] DINESH R, GURU D S. Corner detection using morphological skeleton: an efficient and nonparametric approach[M]. Heidelberg: Springer, 2006.
- [9] CHANG Xing-zhi, GAO Li-qun, LI Yang. Corner detection based on morphological disk element[C]//Proceedings of the 2007 American Control Conference. New York, USA: [s.n.], 2007: 1995-1999.
- [10] AGAM G. Regulated morphological operations[J]. Pattern Recognition, 1999, 32(6): 947-971.
- [11] SHIH F Y, CHUANG C F, GADDIPATI V. A modified regulated morphological corner detector[J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26(7): 931 - 937.

编辑 漆 蓉

(上接第874页)

- [7] WENTSCHER H. Design and analysis of semi-active landing gears for transport[J]. Aircraft, 1996, (1): 134-157.
- [8] 赵 亮, 文桂林, 韩 旭, 等. 基于磁流变阻尼器的车辆半主动悬架最优控制的研究[J]. 汽车工程, 2008, (4): 340-344.
ZHAO Liang, WEN Gui-lin, HAN Xu, et al. An investigation into the optimal control of vehicle semi-active suspension based on magnetorheological damper[J]. Automotive Engineering, 2008, (4): 340-344.
- [9] 檀润华, 陈 鹰, 路甬祥. 路面对汽车激励的时域模型建立及计算机仿真[J]. 中国公路学报, 1998, 6(3): 96-102.
TAN Run-hua, CHEN Ying, LU Yong-xiang. The mathematical models in time domain for the road disturbances and the simulation[J]. China Journal of Highway and Transport, 1998, 6(3): 96-102.

- [10] BURTON A W. Apractical application of MATLAB: Automotive semi-active suspension design[J]. IEE Control Engineering, 1993, 48: 23-43.
- [11] 何亚东, 黄金枝. 智能磁流变(MR)阻尼器半主动控制的研究. 振动工程学报[J]. 2003, 16(2): 198-202.
HE Ya-dong, HUANG Jin-zhi. Study on structural intelligent semi-active control based on MR damper[J]. Journal of Vibration Engineering, 2003, 16(2): 198-202.
- [12] SHEPHERD A, CATT T, COWLING D. The Simulation of aircraft landing gear dynamics[C]//ICAS, Congress, 18th. Beijing, China: [s.n.], 1992: 1317-1327.
- [13] YANG Guang-qiang. Large-scale magneto-theological fluid damper for vibration mitigation: Modeling testing and control[D]. Indian a: University of Notre Dame, 2001.

编辑 漆 蓉

(上接第879页)

- HU Chang-hua, LI Guo-hua, LIU Tao, et al. System analysis and design based on MATLAB 6.X-Wavelet analysis [M]. 2nd ed. Xi'an: Xidian University Press, 2004.
- [9] LAWRENCE R R. A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition[J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(2): 257-286.
- [10] ZHENG W S, LAI J H, YUEN P C. GA-fisher: a new lda-based face recognition algorithm with selection of principal components[J]. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics, 2005, 35(5): 1065-1078.

编辑 漆 蓉