

文章编号: 1000-4750(2012)11-0339-05

飞机越界阻滞过程中乘客安全性分析

王 云¹, 郑小平¹, 黄拳章^{1,2}

(1. 清华大学航天航空学院, 北京 100084; 2. 西安高科技研究所, 西安 710025)

摘 要: 飞机越界工程材料阻滞系统是用来防止飞机冲出跑道的专用设备, 该系统必须保证乘客在阻滞过程中的安全性。该文通过合理的简化建立了阻滞过程中乘客安全性分析的动力学模型, 将问题归结为一组非线性动力学方程。然后, 通过相空间变换将问题转化为一阶非线性微分方程组, 采用 Runge-Kutta 方法对方程组进行数值求解, 且开发了相应的仿真程序。仿真算例表明: 该文建立的动力学模型和计算结果是合理可信的, 利用该文方法可以进行阻滞过程中乘客安全性的评价。

关键词: 飞机越界; 工程材料阻滞系统; 动力学模型; 数值仿真; 乘客安全性分析

中图分类号: V351.11 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.03.0150

PASSENGER SAFETY ANALYSIS DURING THE ARRESTING PROCESS FOR AIRCRAFT OVERRUN

WANG Yun¹, ZHENG Xiao-ping¹, HUANG Quan-zhang^{1,2}

(1. School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Xi'an Hi-tech Institute, Xi'an 710025, China)

Abstract: The Engineered Materials Arresting System (EMAS) is used to prevent aircraft from overrunning the end of the runway and it must ensure the safety of the passengers during the arresting process. A dynamic model of the EMAS for passenger safety analysis is constructed as a set of nonlinear dynamic equations. Then, by phase-space transformation, the model is transformed into first-order nonlinear differential equations, which are numerically solved by Runge-Kutta method, and a simulation program is also completed. An example is presented to illustrate that the present method is reasonable and creditable, with which the safety of the passengers during the arresting process can be estimated.

Key words: aircraft overrun; Engineered Materials Arresting System (EMAS); dynamic equations; numerical simulation; passenger safety analysis

工程材料阻滞系统 (Engineered Materials Arresting System, EMAS) 是用于阻滞大型飞机越界的专用设备^[1]。该系统在美国已得到较为广泛的应用, 且在实际使用中发挥了巨大作用^[2-4]。我国关于 EMAS 系统的研究尚处于起步阶段。王云等^[5]、常虹、王维^[6-7]和李丰羽等^[8]对 EMAS 系统的动力学模型和阻滞力的计算进行了研究。

EMAS 系统的基本工作原理是通过机轮与阻滞材料作用, 飞机向前的动能被逐渐耗散, 从而减速并逐渐平稳、安全地停止下来^[2,4,9]。由于在阻滞过

程中飞机的速度急剧减小, 乘客将受到巨大的惯性力作用。因此, 在 EMAS 系统设计的过程中要求对乘客的安全性进行科学的评估。然而, 关于阻滞过程中乘客安全性和舒适性的研究目前国内外尚没有公开文献报道, 相关的研究主要集中于汽车和高速列车, 并且建立了相应的评价标准^[10-13]。兰海涛^[14]和孙维汉^[15]、施少波^[16]分别对汽车正面和侧面碰撞情况下乘客的安全性进行了仿真研究。王钧利、马春燕^[17]认为可采用路面不平整度和加速度值作为评价汽车乘客振动舒适性的评价指标。

收稿日期: 2011-03-22; 修改日期: 2011-07-27

通讯作者: 郑小平(1958-), 男, 陕西西安人, 副教授, 博士, 从事计算固体力学研究(E-mail: zhengxp@mail.tsinghua.edu.cn).

作者简介: 王 云(1983-), 男, 安徽宿松人, 博士生, 从事计算固体力学研究(E-mail: wangyun07@mails.tsinghua.edu.cn);

黄拳章(1981-), 男, 河南南阳人, 博士生, 从事计算固体力学研究(E-mail: huangqz06@mails.tsinghua.edu.cn).

本文通过合理的假设和简化,如仅考虑飞机在竖直平面内的运动、机身作为刚体、起落架和座椅简化为弹簧阻尼器和乘客简化为质量块等,建立了阻滞过程中乘客安全性分析的动力学模型。通过相空间变换将模型转化为一阶非线性微分方程组,采用开发的仿真程序实现了模型的数值仿真。

1 动力学模型

1.1 简化模型

飞机冲入阻滞区的过程是一个复杂的过程,为建立阻滞过程中乘客安全性分析的动力学模型,除采用文[5]中的假设和简化外,还需增加以下简化,如图1所示。

1) 座椅简化为弹簧阻尼器,弹性系数为 k_3 ,阻尼系数为 c_3 ,与机身质心的距离为 D_3 。

2) 乘客简化为质量为 m_1 的质量块,与座椅固连,在平衡状态下质心高度为 H_1 。

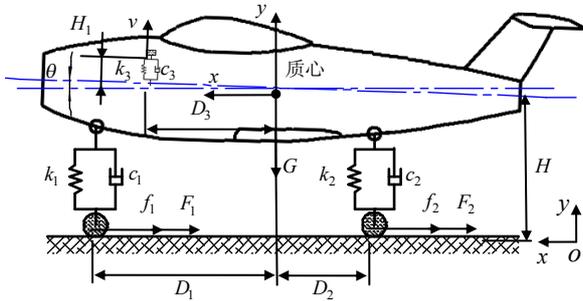


图1 EMAS系统模型

Fig.1 Model of the EMAS

1.2 动力学方程

如图1所示,选取飞机质心的位移 x 和位移 y 、飞机轴线与水平面的夹角 θ 和乘客相对机身竖直方向的位移 v 为广义坐标,建立阻滞过程中乘客安全性分析的动力学模型。

1.2.1 系统动能

不考虑起落架和机轮的质量,系统的动能由机身和乘客的动能组成。由文[5]可知,机身动能为:

$$T_1 = \frac{1}{2}m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2}J_o\dot{\theta}^2 \quad (1)$$

式中: m 为机身质量; J_o 为机身绕质心的转动惯量。

乘客简化为质量块,且与座椅固连,其动能主要为 x 方向和 y 方向的平动动能。

$$T_2 = \frac{1}{2}m_1[(\dot{x} - D_3\dot{\theta}\sin\theta - \dot{v}\sin\theta - v\dot{\theta}\cos\theta)^2 + (\dot{y} + D_3\dot{\theta}\cos\theta + \dot{v}\cos\theta - v\dot{\theta}\sin\theta)^2] \quad (2)$$

则系统总动能为:

$$T = \frac{m}{2}(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2}J_o\dot{\theta}^2 + \frac{m_1}{2}[(\dot{x} - D_3\dot{\theta}\sin\theta - \dot{v}\sin\theta - v\dot{\theta}\cos\theta)^2 + (\dot{y} + D_3\dot{\theta}\cos\theta + \dot{v}\cos\theta - v\dot{\theta}\sin\theta)^2] \quad (3)$$

1.2.2 系统势能

系统的势能包括机身和乘客的重力势能,以及弹簧阻尼器的弹性势能。取平衡状态下地面为零势能面,则机身和乘客的重力势能为:

$$V_1 = mgy + m_1g(y + D_3\sin\theta + v\cos\theta) \quad (4)$$

由文[5]可知,对于起落架为三点式布局的飞机,起落架弹簧的弹性势能为:

$$V_2 = \frac{k_1}{2}[l_1 - (y + D_1\sin\theta)]^2 + \frac{k_2}{2}[l_2 - (y - D_2\sin\theta)]^2 \quad (5)$$

式中: $l_1 = \frac{mgD_2}{(D_1 + D_2)k_1} + H$, $l_2 = \frac{mgD_1}{2(D_1 + D_2)k_2} + H$ 。

根据平衡状态和运动状态下的受力分析,座椅弹簧的总压缩量为:

$$\Delta y_3 = l_3 - v \quad (6)$$

式中, $l_3 = \frac{m_1g}{k_3} + H_1$ 。座椅弹簧的弹性势能为:

$$V_3 = \frac{1}{2}k_3(l_3 - v)^2 \quad (7)$$

则系统的总势能为:

$$V = mgy + m_1g(y + D_3\sin\theta + v\cos\theta) + \frac{k_1}{2}[l_1 - (y + D_1\sin\theta)]^2 + \frac{k_2}{2}[l_2 - (y - D_2\sin\theta)]^2 + \frac{k_3}{2}(l_3 - v)^2 \quad (8)$$

1.2.3 Rayleigh 耗散函数

起落架和座椅简化为弹簧阻尼器,系统中存在粘性摩擦力,系统的 Rayleigh 耗散函数为:

$$\Psi_q = \frac{c_1}{2}(\dot{y} + D_1\dot{\theta}\cos\theta)^2 + \frac{c_2}{2}(\dot{y} - D_2\dot{\theta}\cos\theta)^2 + \frac{c_3}{2}\dot{v}^2 \quad (9)$$

1.2.4 动力学方程

将动能 T 、势能 V 和 Rayleigh 耗散函数 Ψ_q 代入 Lagrange 方程,得到系统的动力学模型如下式所示:

$$(m + m_1)\ddot{x} - m_1(D_3\sin\theta + v\cos\theta)\ddot{\theta} - m_1\sin\theta\ddot{v} - 2m_1\cos\theta\dot{v}\dot{\theta} + m_1v\sin\theta(-D_3\cos\theta)\dot{\theta}^2 = -F_1 - 2F_2 - f_1 - 2f_2 \quad (10a)$$

$$(m + m_1)\ddot{y} + m_1(D_3\cos\theta - v\sin\theta)\ddot{\theta} + m_1\cos\theta\ddot{v} + (c_1 + 2c_2)\dot{y} + (c_1D_1 - 2c_2D_2)\dot{\theta}\cos\theta +$$

$$(k_1 + 2k_2)y + (k_1D_1 - 2k_2D_2)\sin\theta - m_1(v\cos\theta + D_3\sin\theta)\dot{\theta}^2 - 2m_1\sin\theta\dot{\theta}\dot{v} = k_1l_1 + 2k_2l_2 - (m + m_1)g \quad (10b)$$

$$(J_0 + m_1D_3^2)\ddot{\theta} - m_1(D_3\sin\theta + v\cos\theta)\ddot{x} + m_1(D_3\cos\theta - v\sin\theta)\ddot{y} + m_1D_3\ddot{v} + (c_1D_1 - 2c_2D_2)\dot{y}\cos\theta + (c_1D_1^2 + 2c_2D_2^2)\dot{\theta}\cos^2\theta + (k_1D_1\cos\theta - 2k_2D_2\cos\theta + F_1 + 2F_2 + f_1 + 2f_2)y + (k_1D_1^2 + 2k_2D_2^2)\sin\theta\cos\theta - m_1gv\sin\theta + 2m_1v\dot{\theta}\dot{v} + m_1v^2\ddot{\theta} + m_1gD_3\cos\theta - (k_1D_1l_1 - 2k_2D_2l_2)\cos\theta = 0 \quad (10c)$$

$$-m_1\sin\theta\ddot{x} + m_1\cos\theta\ddot{y} + m_1D_3\ddot{\theta} + m_1\ddot{v} + c_3\dot{v} + k_3v - m_1v\dot{\theta}^2 + m_1g\cos\theta = k_3l_3 \quad (10d)$$

式中： f_1 、 f_2 为前后轮所受地面的摩擦力； F_1 、 F_2 为前后轮所受阻滞力，计算方法与文[5]相同。

2 数值计算方法

假定飞机在冲入阻滞区后，阻滞区能按设计要求使飞机比较平稳地减速，从而可以假设机身绕质心的转角 θ 为小量，即 $\sin\theta \approx \theta$ ， $\cos\theta \approx 1$ 。将摩擦力的表达式^[5]代入式(10)，并写成矩阵形式得到：

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = F \quad (11)$$

式中：

$$M = \begin{bmatrix} m+m_1 & 0 & -m_1D_3\theta - m_1v & -m_1\theta \\ & m+m_1 & m_1D_3 - m_1v\theta & m_1 \\ & & J_0 + m_1D_3^2 + m_1v^2 & m_1D_3 \\ \text{对称} & & & m_1 \end{bmatrix},$$

$$K = \begin{bmatrix} 0 & a_3 & a_4 & 0 \\ 0 & b_3 & b_4 & 0 \\ 0 & d_3 & d_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_3 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 0 & a_1 & a_2 & 0 \\ 0 & b_1 & b_2 & 0 \\ 0 & d_1 & d_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_3 \end{bmatrix},$$

$$q = (x \quad y \quad \theta \quad v)^T,$$

$$F = (\hat{F}_1 - \bar{F}_1 \quad \hat{F}_2 - \bar{F}_2 \quad \hat{F}_3 - \bar{F}_3 \quad \hat{F}_4 - \bar{F}_4)^T,$$

$$\begin{cases} a_1 = -\mu_0c_1 - 2\mu_Bc_2 \\ a_2 = -\mu_0c_1D_1 + 2\mu_Bc_2D_2 \\ a_3 = -\mu_0k_1 - 2\mu_Bk_2 \\ a_4 = -\mu_0k_1D_1 + 2\mu_Bk_2D_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} b_1 = c_1 + 2c_2 \\ b_2 = c_1D_1 - 2c_2D_2 \\ b_3 = k_1 + 2k_2 \\ b_4 = k_1D_1 - 2k_2D_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} d_1 = c_1D_1 - 2c_2D_2 \\ d_2 = c_1D_1^2 + 2c_2D_2^2 \\ d_3 = k_1D_1 - 2k_2D_2 + \mu_0k_1l_1 + 2\mu_Bk_2l_2 + F_1 + 2F_2 \\ d_4 = k_1D_1^2 + 2k_2D_2^2 \\ d_5 = -\mu_0c_1 - 2\mu_Bc_2 \\ d_6 = -\mu_0c_1D_1 + 2\mu_Bc_2D_2 \\ d_7 = -\mu_0k_1D_1 + 2\mu_Bk_2D_2 \\ d_8 = -\mu_0k_1 - 2\mu_Bk_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \hat{F}_1 = -F_1 - 2F_2 - \mu_0k_1l_1 - 2\mu_Bk_2l_2 \\ \bar{F}_1 = (m_1v\theta - m_1D_3)\dot{\theta}^2 - 2m_1\dot{\theta}\dot{v} \\ \hat{F}_2 = k_1l_1 + 2k_2l_2 - mg - m_1g \\ \bar{F}_2 = -(m_1v + m_1D_3\theta)\dot{\theta}^2 - 2m_1\theta\dot{\theta}\dot{v} \\ \hat{F}_3 = k_1D_1l_1 - 2k_2D_2l_2 - m_1gD_3 \\ \bar{F}_3 = d_3\dot{y}y + d_6\dot{\theta}y + d_7y\theta + d_8y^2 + 2m_1v\dot{\theta}\dot{v} - m_1g\theta v \\ \hat{F}_4 = k_3l_3 - m_1g \\ \bar{F}_4 = -m_1v\dot{\theta}^2 \end{cases}$$

式中： μ_B 为刹车引起的附加摩擦系数； μ_0 为机轮与地面的考虑滑动和滚动摩擦的摩擦系数^[18]。

为对式(11)进行求解，通过相空间变换 $u = (\dot{q} \quad q)^T$ 得到一阶非线性微分方程组：

$$A \frac{du}{dt} = Bu + Q \quad (12)$$

式中：

$$A = \begin{bmatrix} M & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & I \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -C & -K \\ I & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$Q = (F \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0)^T.$$

式(12)为一阶非线性微分方程组，本文采用经典四阶 Runge-Kutta 方法求解，每一个求解步需要进行多次迭代计算，直到式(13)满足为止。

$$\max_{1 \leq i \leq 8} |\Delta u_i| = \max_{1 \leq i \leq 8} |u_i^{(k+1)} - u_i^{(k)}| < \varepsilon \quad (13)$$

式中： k 为迭代次数； ε 为设定的很小的常数。

3 仿真算例

3.1 初始条件

采用 Runge-Kutta 方法迭代求解式(12)所需初始条件设为 $u_{1,0}=30.0\text{m/s}$ ， $u_{2,0}=0$ ， $u_{3,0}=0$ ， $u_{4,0}=0$ ， $u_{5,0}=0$ ， $u_{6,0}=6.17\text{m}$ ， $u_{7,0}=0$ ， $u_{8,0}=0.4\text{m}$ 。

3.2 仿真参数

本文仿真算例采用的飞机参数、乘客和座椅参数分别如表 1 和表 2 所示。仿真算例中前后轮摩擦系数相同，实际情况下并不相同，且同一机轮进入阻滞区前后摩擦系数也不相同。阻滞区结构的设计与文[5]相同。

表 1 飞机参数

Table 1 Parameter of aircraft

名称	符号	值
飞机质量	m	$288.7717 \times 10^6 \text{g}$
绕质心转动惯量	J_0	$88.333080 \times 10^9 \text{g} \cdot \text{m}^2$
质心距前轮距离	D_1	26.56m
质心距后轮距离	D_2	4.94m
质心距地面距离	H	6.17m
前轮弹性系数	k_1	8.0MN/m
前轮阻尼系数	c_1	40.0kN · s/m
后轮弹性系数	k_2	8.0MN/m
后轮阻尼系数	c_2	40.0kN · s/m
地面摩擦系数	u_0	0.1
刹车附加摩擦系数	u_B	0.1
轮子宽度		0.368m

表 2 乘客和座椅参数

Table 2 Parameter of passenger and chair

名称	符号	值
乘客质量	m_1	60.0kg
座椅弹簧系数	k_3	2000.0N/m
座椅阻尼系数	c_3	100.0N · s/m
座椅与机身质心距离	D_3	20.0m

3.3 仿真结果

图 2 为乘客在 x 方向承受的过载曲线，乘客位于飞机质心之前 20m 处， x 方向的过载呈非线性变化，最大过载略大于 1g，且乘客在 x 方向承受的过载与机身对应位置 x 方向的过载基本相同；图 3 为乘客在 y 方向承受的过载曲线， y 方向的过载变化比较剧烈，但是相对 x 方向的过载而言很小，即在整个过程中乘客主要承受的是 x 方向的过载。从图 3 中还可以看出，通过座椅的减振作用可有效降低乘客在 y 方向承受的过载峰值，改善在竖直方向的颠簸程度，因此，设计合理的座椅可显著提高阻滞过程中乘客的安全性。

图 4 为在阻滞过程中乘客位于机身不同舱段时在 y 方向承受的过载曲线。从图 4 中可以看出，在机身质心之前靠近质心的位置(如 $D_3=0\sim 10\text{m}$)，乘客在 y 方向承受的过载峰值较小，而在机身质心之前远离质心和机身质心之后的位置(如 $D_3=20\text{m}$ 和 $D_3=-10\text{m}$)乘客在 y 方向承受的过载较大。因此，对于本文采用的仿真数据，在阻滞过程中，相对于机身

质心之前远离质心和机身质心之后的位置，乘客位于机身质心之前靠近质心处的安全性较高。

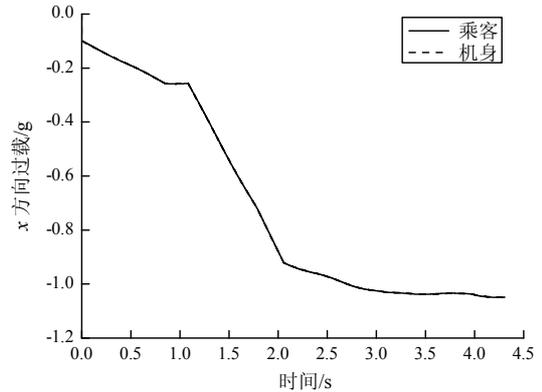


图 2 x 方向过载($D_3=20\text{m}$)

Fig.2 Passenger acceleration of direction x ($D_3=20\text{m}$)

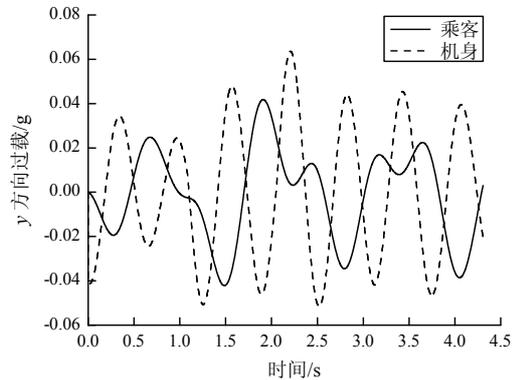


图 3 y 方向过载($D_3=20\text{m}$)

Fig.3 Acceleration of direction y ($D_3=20\text{m}$)

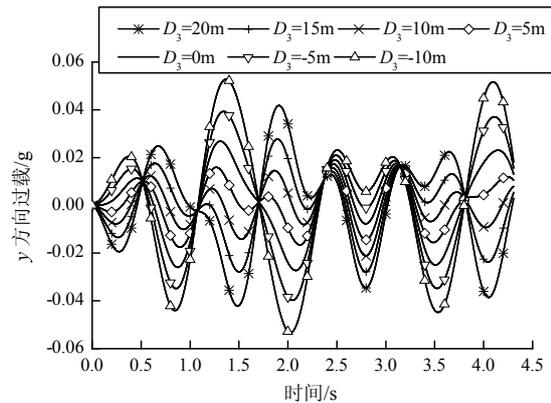


图 4 y 方向过载(D_3 改变)

Fig.4 Acceleration of direction y (D_3 change)

4 结论

本文通过假设和简化，建立了 EMAS 系统乘客安全性分析的动力学模型，开发了相应的数值仿真程序。仿真算例给出了阻滞过程中乘客在水平和垂直方向上所承受的过载随时间变化的历程曲线。结果表明：文中所给出的阻滞系统设计方案是合理可

行的,可以满足乘客安全性方面的要求。此外,本文还对乘客位于机身不同舱段时的安全性进行了评价,结果表明:在阻滞过程中,乘客位于机身质心之前靠近质心处的安全性较高。虽然该文是EMAS系统动力学仿真方面的初步研究工作,但是所采用的研究方法对EMAS系统的深入研究具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 王云. 飞机越界工程材料阻滞系统[J]. 国际航空, 2008(7): 64—65.
Wang Yun. Engineered material arresting systems for aircraft overruns [J]. International Aviation, 2008(7): 64—65. (in Chinese)
- [2] International Civil Aviation Organization, North America, Central America and Caribbean Office. Status of engineered materials arresting system installations in the united states, DCA/21-IP/05 [R]. Tortola, British Virgin Islands: ICAO, 2008.
- [3] Filippo W K S, DeLong H. Engineered materials arresting system (EMAS): An alternative solution to runway overruns [C]// Proceedings of the 27th International Air Transport Conference. Orlando, Florida, ASCE, 2003.
- [4] Rosenkrans W. Rethinking overrun protection [J]. Aviationsafety World, 2006(8): 13—19.
- [5] 王云, 郑小平, 姚福印, 姚振汉. 飞机越界阻滞系统动力学模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(7): 1109—1113.
Wang Yun, Zheng Xiaoping, Yao Fuyin, Yao Zhenhan. Dynamic model of the arresting system for aircraft overrun [J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2010, 50(7): 1109—1113. (in Chinese)
- [6] 常虹. 新型飞机道面拦阻系统应用研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2009.
Chang Hong. Application and research on engineering material runway arresting system [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2009. (in Chinese)
- [7] 王维, 常虹. 飞机道面拦阻系统建模分析[J]. 中国民航大学学报, 2009, 27(2): 10—13.
Wang Wei, Chang Hong. Modeling and analysis on soft-ground arresting system for aircraft [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2009, 27(2): 10—13. (in Chinese)
- [8] 李丰羽, 焦宗夏, 桂永全, 雷炜. 飞机软道面安全拦阻系统建模与仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(8): 945—948.
Li Fengyu, Jiao Zongxia, Gui Yongquan, Lei Wei. Modeling and simulation of soft ground arresting system for aircraft [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(8): 945—948. (in Chinese)
- [9] U.S. Department of Transportation. Engineered materials arresting systems (EMAS) for aircraft overruns, 150/5220-22A [R]. Washington: The United States Federal Aviation Administration, 2005.
- [10] ISO 5982, Human exposure to mechanical vibration and shock [S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 1999.
- [11] ISO2631-1: 1997(E), Mechanical vibration and shock-evaluation of human exposure to whole-body vibration [S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 1997.
- [12] GB11551-2003, 乘用车正面碰撞的成员保护标准[S]. 天津: 中国汽车技术研究中心, 2003.
GB11551-2003, The protection of the occupants in the event of a front collision for a passenger car [S]. Tianjin: China Automotive Technology & Research Center, 2003. (in Chinese)
- [13] GB20071, 汽车侧面碰撞的乘员保护标准[S]. 天津: 中国汽车技术研究中心, 2006.
GB20071, The protection of the occupants in the event of a lateral collision [S]. Tianjin: China Automotive Technology & Research Center, 2006. (in Chinese)
- [14] 兰海涛. 汽车正面碰撞离位乘员保护的仿真技术及其应用[D]. 吉林: 吉林大学, 2007.
Lan Haitao. Simulation and investigation of out-of-position's protection in frontal impact [D]. Jilin: Jilin University, 2007. (in Chinese)
- [15] 孙维汉. 汽车横侧主动安全性仿真研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
Sun Weihan. A simulation research on car lateral active safety [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005. (in Chinese)
- [16] 施少波. 客车侧碰有限元仿真分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
Shi Shaobo. Investigation and simulation of coach side crashworthiness using FEM [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2008. (in Chinese)
- [17] 王钧利, 马春燕. 汽车乘客振动舒适性评价指标的研究[J]. 工程力学, 1998, III(增刊): 231—235.
Wang Junli, Ma Chunyan. Study on the evaluation criteria of the vibrational comfort of the passengers [J]. Engineering Mechanics, 1998, III(Suppl): 231—235. (in Chinese)
- [18] 智维列夫, 科柯宁. 航空机轮和刹车系统设计[M]. 邓启明, 译. 北京: 国防工业出版社, 1980: 22—38.
Зворев И И, Коконин С С. Aircraft wheel and brake system design [M]. Translated by Deng Qiming. Beijing: National Defense Industry Press, 1980: 22—38. (in Chinese)