

# 基于 FLUENT 的离心加速度下气压场仿真研究\*

陆书圣, 沈润杰\*, 何 闻, 徐冠华  
(浙江大学 机械工程学系, 浙江 杭州 310027)

**摘要:**针对多参数复合环境试验系统中离心加速度会造成气压场分布不均匀的问题,提出了一种添加风扇搅拌来改善气压场分布均匀度的方法。通过研究离心加速度与气压场的耦合机理,以流体运动控制方程和标准  $k-\varepsilon$  湍流模型为基础,建立了环境舱内的流体运动模型。采用有限体积数值分析的方法,对无风扇搅拌和有风扇搅拌两种情况下气压场的分布进行了仿真,研究了风扇搅拌作用对气压场分布均匀度的影响。研究表明,无风扇搅拌作用情况下,离心加速度对环境舱内气压场分布有较大影响;添加风扇搅拌作用后,能有效改善环境舱内气压场分布的均匀度。当风扇风速  $v$  较小时,增大  $v$  其改善气压场分布的效果越明显;但当风扇风速足够大时,若再增大  $v$  则改善气压场分布的效果将不明显。

**关键词:**复合试验;离心加速度;气压场;均匀度

中图分类号:TB71<sup>+</sup>1;TB71<sup>+</sup>2;TH122

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)05-0537-05

## Simulation of pressure field under centrifugal acceleration based on FLUENT

LU Shu-sheng, SHEN Run-jie, HE Wen, XV Guan-hua

(Department of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Considering that centrifugal acceleration will cause the uneven distribution of pressure field in the combined multi-parameter test environmental system, a scheme that adding fan stirring to improve the evenness of pressure field was presented. After the coupling mechanism between centrifugal acceleration and pressure field was studied, a fluid flow model of the environmental chamber was established on the basis of fluid motion equation and standard  $k-\varepsilon$  turbulence model. The distribution of pressure field was simulated in both cases of fan stirring and no fan stirring with the finite numerical analysis method, and the influence of fan stirring on the even distribution of pressure field was discussed. Research results show that without fan stirring centrifugal acceleration has a greater impact on the distribution of pressure field. On the contrary, the uniformity of pressure distribution will be effectively improved by using fan stirring. When the fan speed is low, the higher the fan speed, the more obviously the distribution of pressure field is improved. However, when the fan speed is high enough, the distribution of pressure field will not be much improved with the increase of the fan speed.

**Key words:** combined experiment; centrifugal acceleration; pressure field; degree of uniformity

## 0 引 言

航天装置在发射升空过程中,要经历各种各样的环境变化。为确保航天装置运行过程中的安全性、稳定性,对其内部各种元器件的可靠性提出了越来越高的要求。在实际飞行条件下检测元器件的可靠性,具

有参数可控性差、环境污染、成本高等缺陷<sup>[1]</sup>。因此,在地面进行可靠性加速试验环境技术的研究,具有重要的理论和现实意义。

近年来,我国的可靠性加速试验仅局限于单一线加速度环境、单一温度环境、单一振动环境以及振动与温度的复合环境等。而航天装置在发射升空过程当

收稿日期:2010-12-14

**基金项目:**国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2007AA04Z440);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2009QNA4002);新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-08-0494);浙江省“钱江人才计划”资助项目(2009R10026)

**作者简介:**陆书圣(1985-),男,吉林桦甸人,主要从事振动与测试控制系统方面的研究. E-mail: lushushen8@163.com

**通信联系人:**沈润杰,男,副研究员,硕士生导师. E-mail: shenrunjie@163.com

中,除了做高线加速度运动外,还常伴随着温度、气压、振动、噪声等多因素的动态冲击作用。在多参数复合环境试验系统中,环境舱安装在离心机转盘的远端,离心力场会对环境舱内气压场的分布产生一定的影响。目前离心加速度条件下压力场的研究主要集中在离心泵叶轮内部的流场和轴流风机内部的流场等方面<sup>[2]</sup>,而对离心加速度下气压场分布的研究还不多。因此,有必要掌握气压场在离心力场下的分布规律,采用适当措施改善其分布均匀度。

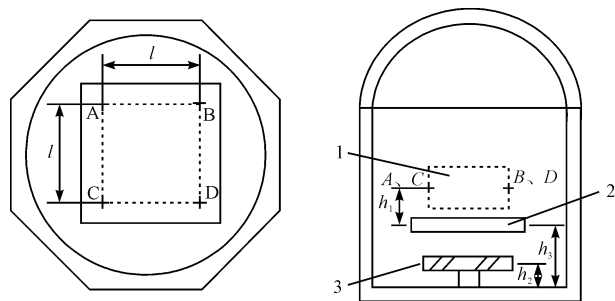
近年来,计算流体力学(CFD)技术的快速发展和测试手段的进步,为深入研究流体复杂的流动提供了有利的手段<sup>[3]</sup>。本研究采用专业化的 CFD 分析软件 FLUENT,建立环境舱内的流体模型,通过三维有限体积方法,对离心加速度下的气压场进行数值仿真,并分析离心力场下环境舱内的气压场分布规律。

## 1 环境舱模型的建立

### 1.1 物理模型

环境舱为航天装置元器件提供可靠性加速试验环境,其内部要实现离心加速度、温度、振动、气压以及噪声的复合试验环境。其中离心机产生高线加速度环境,环境舱的进出气口产生压力环境。

环境舱的剖面模型如图 1 所示,环境舱  $x-y$  剖面结构如图 1(a) 所示,A~D 为 4 个传感器测点,各测点均匀地安放在元件平台的上方,并处于同一平面内;环境舱  $y-z$  剖面结构如图 1(b) 所示,其中 1 为环境控制区域,2 为元件放置平台,3 为搅拌风扇。



(a) 环境舱  $x-y$  剖面结构

(b) 环境舱  $y-z$  剖面结构

图 1 环境舱内部结构

传感器测点到元件平台的垂直距离  $h_1 = 40$  mm,相邻传感器测点之间的距离  $l = 90$  mm。元件平台用于放置待检测元件,其下方的风扇用于加速环境舱内的强迫对流,改善离心力场下气压场分布的不均匀性。风扇到环境舱底部的垂直距离  $h_2 = 30$  mm,元件平台到环境舱底部的垂直距离  $h_3 = 80$  mm。

环境舱内部流体的流动区域并不复杂,可以用

GAMBIT 软件根据实际尺寸建立环境舱内的流体模型。环境舱内的 3/4 流体模型如图 2 所示,其有效直径为 220 mm,有效高度为 220 mm,重力加速度的方向为  $z$  轴负方向。本研究将模型导入 FLUENT 软件中并设置相应的边界条件,以进行求解计算。

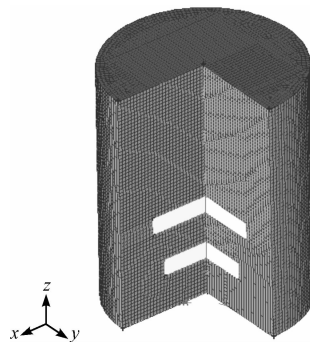


图 2 环境舱流体模型

### 1.2 数学模型

任何流动问题都要满足质量守恒方程,即连续性方程,其在直角坐标系中的微分形式如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程也是任何流动系统都必须满足的基本定律,数学表达式为:

$$\delta_F = \delta_m \frac{dv}{dt} \quad (2)$$

标准  $k-\varepsilon$  模型<sup>[4]</sup>是目前使用最广泛的湍流模型,本研究模拟环境舱内流体为可压缩气体,计算基于有限体积法<sup>[5]</sup>,选用 SIMPLE 法进行压力速度耦合,离散为二阶迎风格式<sup>[6]</sup>,模型为标准模型<sup>[7]</sup>,其控制方程如下:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (4)$$

式中: $k$ —单位质量湍动能,  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ;  $\varepsilon$ —单位质量湍动能耗散率,  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ;  $\rho$ —流体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $t$ —时间,  $\text{s}$ ;  $x_j$  ( $j = 1, 2, 3$ )—3 个方向;  $u_i$  ( $i = 1, 2, 3$ )—3 个方向流速,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $\mu$ —流体动力粘度;  $\mu_t$ —湍流粘性系数,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $G_k$ —平均速度梯度引起的湍动能产生,  $\text{N}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $G_b$ —浮力影响引起的湍动能产生,  $\text{N}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $Y_M$ —可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响,  $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^3)$ ;  $G_{1\varepsilon}$ ,  $G_{2\varepsilon}$ ,  $G_{3\varepsilon}$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$ —常数,取  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ,  $C_{3\varepsilon} = 0$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ ; 不考虑源项,取  $S_k = 0$ ,  $S_\varepsilon = 0$ 。

## 2 划分网格及确定边界条件

### 2.1 划分网格

网格生成技术是流体区域离散技术中的一个关键步骤,其划分质量对 FLUENT 软件的计算精度和计算效率有直接的影响<sup>[8-9]</sup>。前处理软件 GAMBIT 提供结构化网格、非结构化网格及混合网格,根据流体模型的复杂程度选择相应的网格划分方法。由于环境舱的流体模型相对规则,可以将模型分块后采用结构化网格来进行划分,划分后的网格数为 824 000 个。

### 2.2 确定边界条件

环境舱在离心机上做旋转运动,环境舱的中心到离心机的中心距离  $d = 0.523$  m。本研究设计离心机的最大转速  $n = 150$  r/min,则环境舱的最大角速度  $\omega = 15.71$  rad/s。

环境舱密闭性良好,其流体模型的边界默认为 wall 条件,内部流体设置为 ideal—gas 模型。本研究设置环境舱内的压力初始值  $P_0 = 1.0 \times 10^5$  Pa,重力加速度  $g = 9.8$  m/s<sup>2</sup>,方向为沿 Z 轴负方向。

假设环境舱内空气以较小的马赫数  $M$  流动<sup>[10]</sup>,本研究选择 coupled 方式对速度和压力进行耦合求解, $k \sim \varepsilon$  湍流模型选择 k-epsilon 模型<sup>[11]</sup>。

## 3 仿真结果与分析

本研究分两种情况进行数值仿真,即不加风扇搅拌的情况和加风扇搅拌的情况,分别得到两种情况下的环境舱内气压场的分布。

### 3.1 不加风扇搅拌的情况

在不考虑加风扇搅拌的情况下,本研究设置相应的边界条件,以及求解计算的时间迭代步长和迭代次数,当仿真到  $t = 16$  s 时,残差曲线已收敛,得到的仿真结果如图 3、图 4 所示。

环境舱在离心加速度的作用下,其内部的流体受到离心力的作用,向远离旋转中心的一端运动,使环境舱的远端压力增大,靠近旋转中心的一端压力减小。环境舱所受到的离心力方向为由低压区指向高压区。从图 3 可以知道,离心力造成环境舱水平方向的压力分布不均匀。从图 4 可知,重力作用和离心力作用对垂直方向的压力分布影响较小,可用上述 4 个传感器测量元件放置区域的压力值。

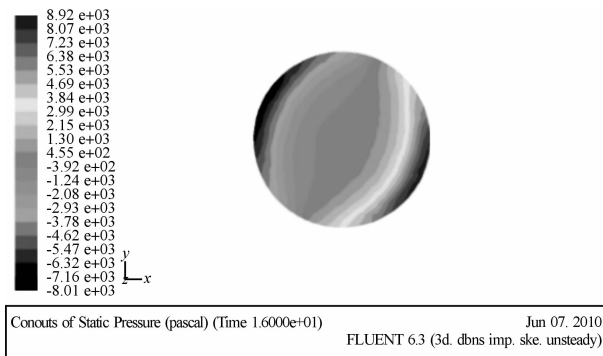


图 3 环境舱水平压力分布云图

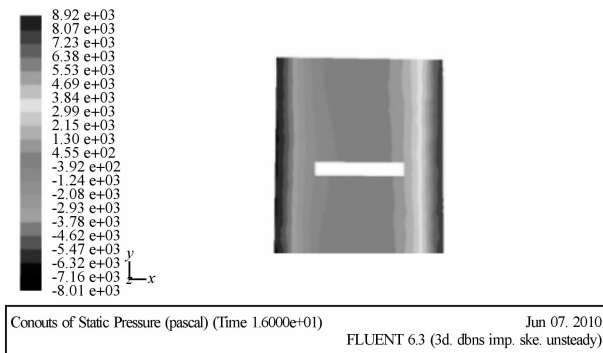


图 4 环境舱垂直压力分布云图

### 3.2 加风扇搅拌的情况

从上面的仿真结果可知,不加风扇搅拌的情况下,环境舱内的压力场分布具有很大的不均匀性。添加风扇搅拌可以增强环境舱内流体的强迫对流,本节通过对不同风扇风速下的流场进行仿真,观察环境舱内压力场分布的改善情况。

边界条件与不加风扇的情况基本相同,只需添加一个风扇条件即可。在 FLUENT 软件中风扇的风速通过设置风扇两端的压力差  $P$  完成,当仿真到  $t = 16$  s 时,残差曲线已收敛,则不同风扇风速条件下的压力分布云图如图 5 所示。

随着风扇两端压差的不断增大,风扇风速也会相应增大。由图 5 仿真结果可以看出,当风扇风速较小时,其强迫对流作用对环境舱内的压力分布影响不大;当风扇风速较大时,其强迫对流作用明显,能够有效地使环境舱内的压力分布更加均匀。不同风扇压差相对应的流场相对运动速度云图如图 6 所示。

本研究将上述仿真数据导入到 tecplot 软件中,提取到不同风速下 4 个传感器测点的仿真数据如表 1 所示。表中数据为相对压力值,即相对环境舱初始压力  $P_0 = 1.0 \times 10^5$  Pa 而言,其单位为 Pa。本研究在同一风速条件下计算 4 个测点之间的最大差值  $\Delta P_{\max}$ ,以此来评定压力场分布的均匀性,计算结果如表 1 所示。

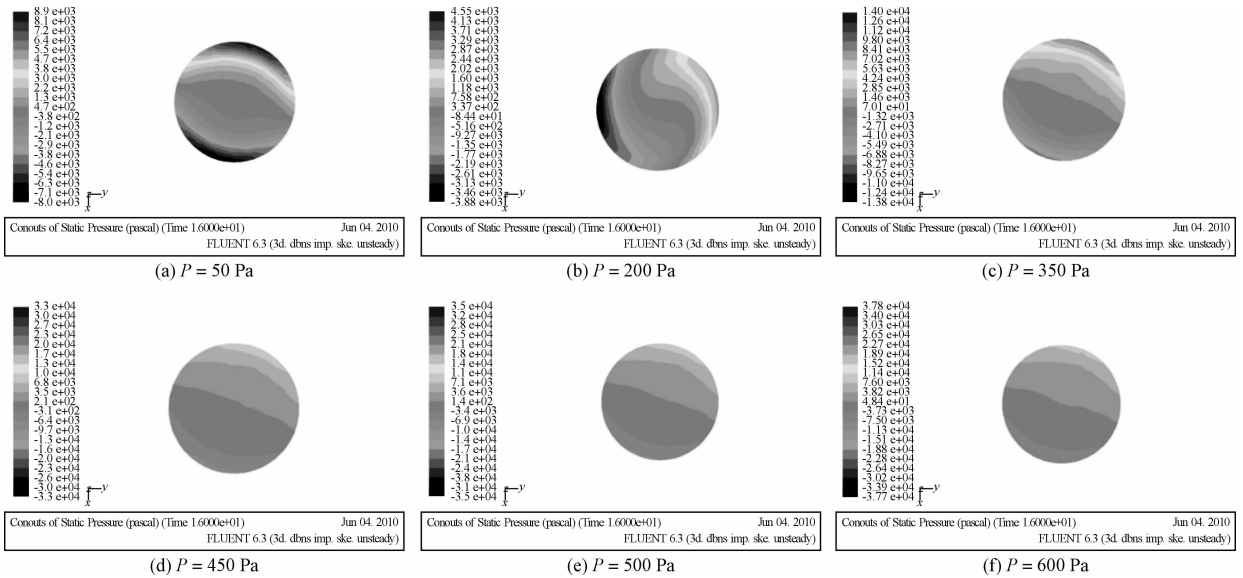


图 5 不同风扇风速条件下的压力分布

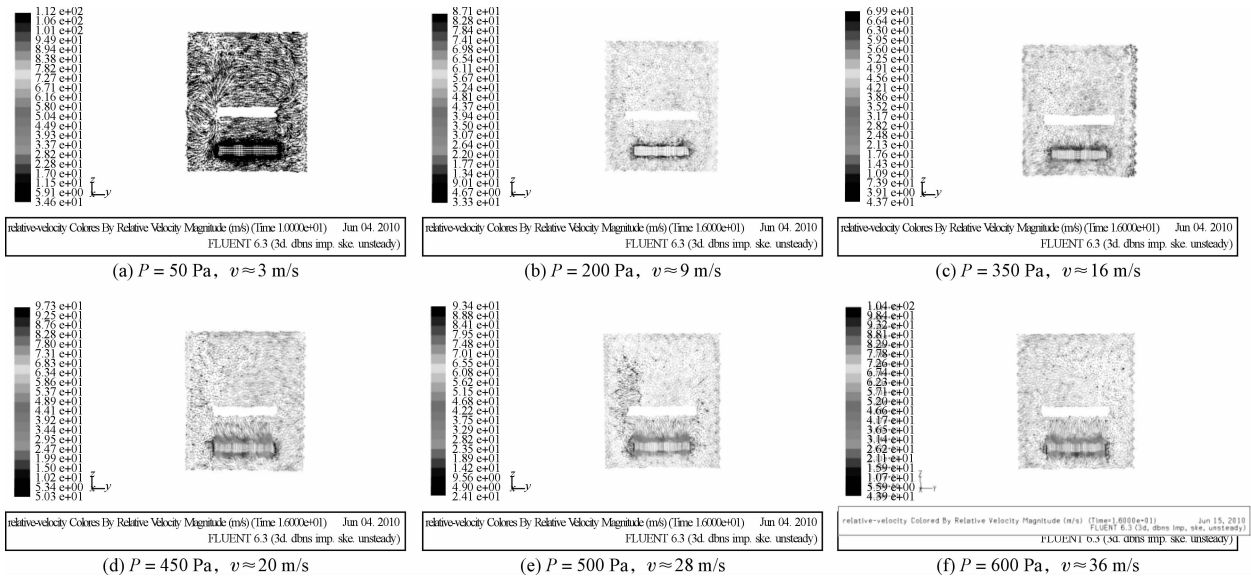


图 6 不同风扇压差相对应的流场相对运动速度云图

表 1 不同传感器测点的相对压力值 Pa

风速 $v$ /(m/s)	测点 A	测点 B	测点 C	测点 D	最大压差 $\Delta P_{\max}$
0	3 647.29	1 355.56	-1 884.30	-3 803.64	7 450.93
3	3 329.63	1 247.95	-1 794.38	-3 749.37	7 079
9	2 280.54	1 085.69	-1 357.82	-1 611.24	3 891.78
16	1 647.33	1 166.41	-578.19	-1 047.81	2 695.14
20	1 373.45	1 287.88	752.65	211.49	1 162.19
28	1 287.45	1 262.72	832.11	259.67	1 027.78
36	1 255.35	1 274.58	883.27	283.29	972.06

根据计算结果绘制的  $\Delta P_{\max} - v$  曲线如图 7 所示, 随着风扇风速的增大, 环境舱内气压场的分布不均匀度减小, 能有效改善气压场分布的均匀性。但是当风速  $v \geq 25$  m/s 时, 若再增大风速  $v$ , 其改善气压场分布不均匀性的效果将不明显。笔者实际选择的风扇最大

风速在 20 m/s 左右, 因此应尽量采用大功率的风扇增加强迫对流的效果。

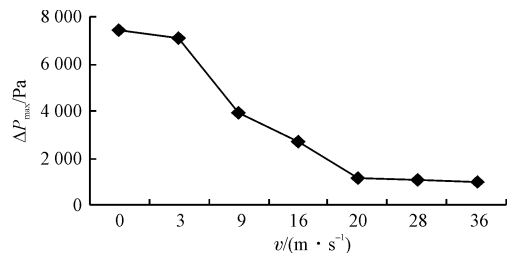


图 7 不同风速下压力不均匀度

## 4 结束语

本研究针对离心加速度条件下气压场分布不均的问题, 探讨了离心加速度与气压场的耦合机理, 对无风

扇搅拌和有风扇搅拌两种情况下气压场的分布规律进行了三维数值模拟,主要得到如下结论:

(1) 离心加速度对环境舱内的压力场有很大的影响。在环境舱运行过程中,靠近回转中心的一侧形成低压区,远离回转中心的一侧形成高压区。离心加速度是造成环境舱内压力分布不均的一个主要因素。

(2) 提出改善离心力作用下压力场均匀性的方法:通过增加风扇使环境舱内的强迫对流作用增强,并由仿真结果可知,应尽量采用功率大的风扇,效果会更好。

### 参考文献 (References):

- [1] 陈谋义. 环境试验的重要性及环境设备的有关问题[J]. 环境技术, 1999, 2(1): 58-62.
- [2] 樊俊才. 离心泵三元流场计算与叶轮计算机辅助设计[J]. 石油机械, 1993(5): 1-4.
- [3] 王保国, 刘淑艳, 黄伟光. 气体动力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005: 25-38.
- [4] RAFFEL M, KOST F. Investigation of aerodynamic effects of coolant ejection at the T railing edge of a turbine blade model by PIV and pressure measurements[J]. **Experiments**

**in Fluids**, 1998, 24(5-6): 447-461.

- [5] 李进良, 李承曦, 胡仁喜. 精通 FLUENT 流场分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 103-142.
- [6] SPEZIALE C G, THANGAM S. Analysis of a RNG based turbulence model for separated flows[J]. **International Journal of Engineering Science**, 1992, 30(10): 1379-1388.
- [7] SHIH T H, LIOU W W, SHABBIR A, et al. A new  $k-\epsilon$  eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows: model development and validation[J]. **Computers & Fluids**, 1995, 24(3): 227-238.
- [8] 韩占忠, 王敬, 兰小平. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004: 163-189.
- [9] 徐希彬, 宋文武, 陈祺, 等. 循环泵内部流场数值模拟及研究[J]. 机械, 2010, 37(1): 25-28.
- [10] DENNIS S C R, WALKER J D A. Calculation of the steady flows past a sphere at low and intermediate Reynolds number[J]. **Journal of Fluids Mechanics**, 1971, 48(4): 771-798.
- [11] 王瑞金, 张凯, 王刚. FLUENT 技术基础与应用实例[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 153-175.

[编辑: 张翔]

(上接第 536 页)

汽车的转向能力降低不多以及汽车的行驶速度降幅不大,那么就需要根据实际路面情况选择制动力的大小,然而这种情况会因为变量的耦合以及路面的复杂性而增加制动力控制的难度,实施起来比较困难。但是,由于汽车侧翻的危害性比较大,一般情况下应该遵循侧翻控制优于车道跟随的原则。

在附着系数较小的路面上,侧向加速度达到一定的值以后汽车首先发生侧滑进而容易发生绊倒侧翻。而在大侧向加速度下,附着系数越大,汽车越不容易发生侧滑而首先会发生侧翻,差动制动防侧翻实际上是针对这样的情况提出的,因此,本研究所提出的差动制动防侧翻动力学模型只适用于附着系数较大的路面。

### 3 结束语

本研究通过横向载荷转移率将汽车的纵向运动、侧向运动、横摆运动以及侧倾运动联系起来,建立了一种基于 LTR 的汽车差动制动防侧翻动力学模型,并通过仿真分析了 LTR 对汽车行驶参数的影响。同时通过仿真分析发现,差动制动不仅能够提高汽车的抗侧翻能力,还能够调整汽车的运动姿态。制动力越大,汽车的抗侧翻能力越强,但大制动力会较大地增加汽车的不足转向,因此,实施差动制动必须以制动的最终目

的来调整制动力的大小。

### 参考文献 (References):

- [1] HAC A. Rollover Stability Index Including Effects of Suspension Design[N]. SAE Technical Paper, 2002-01-0965.
- [2] YOON J, YI K. A Roll- Rollover Mitigation Control Scheme Based on Rollover Index[C]. Proceedings of the 2006 American Control Conference, USA, 2006.
- [3] CHEN B, PENG H. Differential-braking-based rollover prevention for sport utility vehicle with human in loop evaluations[J]. **Vehicle System Dynamics**, 2001, 36(4-5): 359-389.
- [4] 金智林, 翁建生, 胡海岩. 基于模糊差动制动的运动型多功能汽车防侧翻控制[J]. 汽车技术, 2008(1): 13-17.
- [5] 宋小文, 李杰, 王松. 一种改进的汽车侧翻模型及其应用研究[J]. 汽车工程, 2009(10): 971-975.
- [6] WILLIAMS D E, HADDAD W M. Nonlinear control of roll moment distribution to influence vehicle yaw characteristics[J]. **IEEE Transactions on Control System Technology**, 1995, 3(1): 110-116.
- [7] JOHANSSON B, GAFVERT M. Untripped SUV Rollover Detection and Prevention[C]. 43<sup>rd</sup> IEEE Conference on Decision and Control, Bahamas, 2004.
- [8] 郭孔辉, 丁海涛. 轮胎附着极限下差动制动对汽车横摆力矩的影响[J]. 汽车工程, 2002, 24(2): 101-104.
- [9] 向丽康, 黄顺根. 汽车制动特性与防抱系统[J]. 天津汽车, 1997(3): 11-14.
- [10] 余志生. 汽车理论[M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2006.

[编辑: 张翔]