

文章编号:1674-8190(2020)03-380-07

# 起落架着陆油气混合缓冲器压力分析

娄锐,折世强,鲁德发,黄立新

(中航飞机起落架有限责任公司 工程技术研究中心,长沙 410200)

**摘要:**飞机起落架在着陆过程中承受较大冲击载荷,致使起落架缓冲器内部承受较高的油压和气压,对缓冲性能有较大影响。首先,在缓冲器轴向载荷的基础上推导缓冲器各腔压力公式;其次,使用二质量系统建立起落架着陆运动微分方程;最后,应用 MATLAB/Simulink 搭建起落架着陆缓冲器压力仿真模型,利用此模型分析不同着陆速度下各腔压力随时间与缓冲器行程的变化规律,及不同正反行程回油孔面积的油腔压力对缓冲性能的影响。结果表明:在不同着陆速度下,各腔的压力在着陆过程的特定时刻呈现一定规律性;正行程回油孔不能太小,保证油液充满回油腔,反行程回油孔不能太大,保证油液充满主油腔;着陆冲击阶段的缓冲器内油压对柱塞的稳定性有影响。

**关键词:**起落架;缓冲器;着陆;压力;主油腔;回油腔;气腔

中图分类号:V226

文献标识码:A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2020.03.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Oleo-pneumatic Mixed Shock Absorber Landing Pressure Analysis of Landing Gear

LOU Rui, SHE Shiqiang, LU Defa, HUANG Lixin

(Research & Development Center, AVIC Landing-gear Advanced Manufacturing Corp., Changsha 410200, China)

**Abstract:** The landing gear of an aircraft bears a large impact load during landing, which causes the internal shock absorber to withstand high oil pressure and air pressure, and the buffer performance is greatly influenced. Firstly, based on the axial load of the buffer, the pressure formula of each cavity of the buffer is deduced. Then, the differential equation of the landing motion of landing gear is established by using the two mass system. Finally, the landing gear buffer pressure simulation model is built by using MATLAB/Simulink, which is used to analyze the variation of the pressure of each chamber with time and buffer stroke at different landing speeds, and the influence of oil chamber pressure on the cushioning performance with different oil return areas. The results show that, at different landing speeds, the pressure of each cavity presents a certain regularity at a specific moment of the landing process; the positive stroke oil return hole should not be too small, ensuring that the oil fills the oil return cavity, and the reverse stroke oil return hole cannot be too large to ensure that the oil fills the main oil chamber; the oil pressure in the buffer during landing process affects the stability of the plunger.

**Key words:** landing gear; shock absorber; landing; pressure; main chamber; recoil chamber; pneumatic chamber

收稿日期:2019-08-15; 修回日期:2019-10-13

通信作者:鲁德发,p0me10@163.com

引用格式:娄锐,折世强,鲁德发,等.起落架着陆油气混合缓冲器压力分析[J].航空工程进展,2020,11(3):380-386.

LOU Rui, SHE Shiqiang, LU Defa, et al. Oleo-pneumatic mixed shock absorber landing pressure analysis of landing gear[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(3): 380-386. (in Chinese)

## 0 引言

现代飞机起落架大多配置油气缓冲器,气体便于压缩储能,有较优的减震性能,油液高速通过节流油孔耗散能量。

起落架着陆动态性能不应仅包括着陆载荷,还应包括缓冲器内部压力特性。某些油气式缓冲器起落架进行落震试验(尤其是储备能量落震)时,出现了柱塞被压溃的现象<sup>[1-2]</sup>;同时,油腔压力还会对缓冲性能有较大影响。因此有必要对起落架着陆缓冲器内部压力进行分析计算。

国外,N. M. Vaezi 等<sup>[3]</sup>利用 MATLAB 建立起落架落震、滑跑、通过坡道的动力学模型,对飞机重心速度和位移进行分析;R. Lernbeiss 等<sup>[4]</sup>建立了考虑起落架弹性的落震模型,表明起落架弹性的作用不仅会影响作用在起落架上载荷,还会影响刹车过程;Z. Terze 等<sup>[5]</sup>建立了考虑飞机气动性能,考虑轮胎转动的非线性起落架落震动力学模型。国内,刘锐琛<sup>[6]</sup>、豆清波等<sup>[7]</sup>通过落震试验测量气腔压力的方法研究了油气式起落架气体压缩多变指数的变化规律;聂宏等<sup>[8]</sup>、隋福成等<sup>[9]</sup>、荆志伟等<sup>[10]</sup>对起落架缓冲器的载荷数学模型进行了研究;齐丕骞等<sup>[11]</sup>结合试验对油气式起落架气体多变指数和油孔流量系数进行了识别;牟让科等<sup>[12]</sup>对一种基于弹簧自适应控制油孔面积的缓冲器动力特性进行了研究,油孔面积根据油孔上、下腔的压力差和油针弹簧刚度进行自动调节;吴志光等<sup>[13]</sup>采用遗传算法对缓冲性能进行优化;李占科等<sup>[14]</sup>对双气腔油气式缓冲器充填容差进行仿真分析;浦志明等<sup>[15-16]</sup>、邵一舟等<sup>[17]</sup>、王成龙等<sup>[18]</sup>对油孔的阻尼特性进行研究。

上述研究中,大部分只对缓冲性能、流体参数进行研究,并未对整个着陆过程中缓冲器内部压力规律和压力对强度、缓冲特性的影响进行研究。

本文针对起落架着陆过程,首先推导起落架缓冲器各腔压力;其次使用二质量系统建立起落架着陆运动方程;然后应用 MATLAB/Simulink 对某型飞机主起落架着陆情况进行仿真并得到缓冲器各腔压力结果;最后针对不同面积的回油孔进行压力对比,并分析缓冲阶段油压对柱塞强度的影响。

## 1 缓冲器内部压力分析

对于缓冲器内部各腔压力的研究做出如下假设和简化:①不考虑缓冲器内部摩擦力;②不考虑

航向载荷的影响;③只考虑缓冲器垂直方向运动;④不考虑油液的压缩和结构的膨胀。

本文研究的缓冲器构造如图1所示,特点为单气腔、油气混合、配置油针。

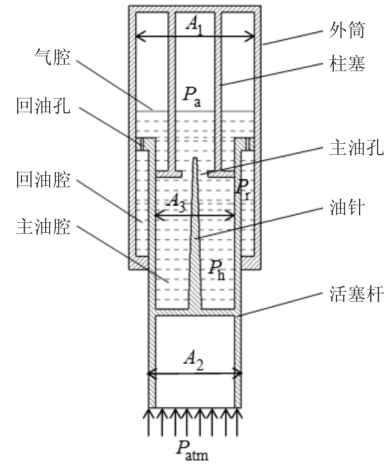


图1 缓冲器内部压力分析与构造

Fig. 1 Pressure analysis of shock absorber and structure

缓冲器轴向载荷  $F_s$  如式(1)所示<sup>[7]</sup>,此公式适用于缓冲器运动过程中,油液充满主油腔和回油腔。

$$F_s = P_a \times (A_1 - A_3) + P_h \times A_3 - P_r \times (A_1 - A_2) - P_{atm} \times A_2 \\ = P_a \times (A_1 - A_3) + (P_a + \Delta P_{h-a}) \times A_3 - (P_a - \Delta P_{a-r}) \times (A_1 - A_2) - P_{atm} \times A_2 \quad (1)$$

式中: $A_1$ 为缓冲器外筒内径形成的面积; $A_2$ 为缓冲器活塞杆外径形成的面积; $A_3$ 为缓冲器活塞杆内径形成的面积,如果配置油针应去除油针截面积; $P_a$ 为气腔压力; $P_h$ 为主油腔压力; $P_r$ 为回油腔压力; $P_{atm}$ 为大气压力。

根据气体压缩多变过程有:

$$P_a = P_0 \times \left( \frac{V_0}{V_0 - S \times A_2} \right)^n \quad (2)$$

式中: $V_0$ 为初始气体体积; $P_0$ 为缓冲器初始压力; $S$ 为缓冲器行程。

根据流体局部节流理论,主油腔与气腔压差,气腔与回油腔压差分别如式(3)和式(4)所示。

$$\Delta P_{h-a} = \begin{cases} \frac{\rho A_3^2 v^2}{2C_{dp}^2 f^2} & (v > 0) \\ -\frac{\rho A_3^2 v^2}{2C_{dn}^2 f^2} & (v \leq 0) \end{cases} \quad (3)$$

$$\Delta P_{a-r} = \begin{cases} \frac{\rho (A_1 - A_2)^2 v^2}{2C_{drp}^2 f_{rp}^2} & (v > 0) \\ -\frac{\rho (A_1 - A_2)^2 v^2}{2C_{drn}^2 f_{rn}^2} & (v \leq 0) \end{cases} \quad (4)$$

式中： $\rho$  为油液密度； $f$  为主油孔面积； $C_{dp}$ 、 $C_{dn}$  分别为正反行程主油孔流量系数； $f_{rp}$ 、 $f_{rm}$  分别为正反行程回油孔面积； $C_{drp}$ 、 $C_{drm}$  分别为正反行程回油孔流量系数； $v$  为缓冲器错位速度。

正行程时，缓冲器各腔压力关系为  $P_h \geq P_a \geq P_r$ ，反行程时，缓冲器内部的压力关系为  $P_r \geq P_a \geq P_h$ 。

### 2 着陆运动微分方程

支柱式起落架着陆模型可以简化成二质量系统，如图 2 所示，其中  $M$  为上部质量， $m$  为下部质量， $F_s$  为缓冲器载荷， $L$  为上部质量受到的升力， $V$  为轮胎垂直载荷， $a_1$  和  $a_2$  分别为上部质量和下部质量的加速度。

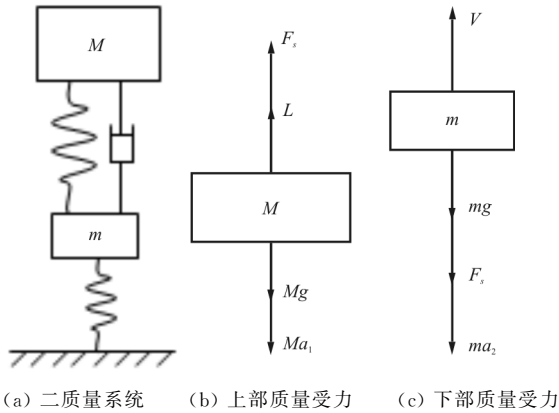


图 2 二质量系统和受力分析

Fig. 2 Two mass system and force analysis

起落架着陆运动可以分成两个阶段，第一个阶段为机轮触地到缓冲器开始错位瞬间，由于缓冲器内部充满高压气体，上部和下部质量组成一体并视为单质量运动，运动方程为

$$a_1 = a_2 = \frac{V + L - (M + m)g}{M + m} \quad (5)$$

缓冲器轴线载荷的计算公式为

$$ma_2 = V - F_s - mg \quad (6)$$

第二个阶段为缓冲器开始压缩之后，缓冲器轴向载荷大于缓冲器高压气体载荷，缓冲器开始错位。

上部和下部质量运动方程为

$$\begin{cases} Ma_1 = F_s + L - Mg \\ ma_2 = V - F_s - mg \end{cases} \quad (7)$$

式中： $V = (1 + C \dot{\delta})K\delta$ ，其中  $C$  为轮胎垂直振动当量阻尼系数， $K$  为轮胎垂直刚度， $\delta$ 、 $\dot{\delta}$  分别为轮胎变形量和变形速率。

### 3 仿真模型

应用 MATLAB 软件编写 Equation, Kinematic, Shock absorber 和 Tire 函数文件，应用 Simulink 仿真模块搭建起落架着陆缓冲器内部压力仿真模型，如图 3 所示。函数文件 Equation 用于模拟式(5)~式(7)，函数文件 Shock absorber 用于模拟式(1)~式(4)，函数文件 Tire 用于模拟轮胎载荷，函数文件 Kinematic 用于模拟上部和下部质量的运动关系。

使用某型飞机主起落架分别进行 1.83、2.44、3.05、3.66 m/s 下沉速度的缓冲器各腔压力仿真。起落架上部质量  $M = 25\ 000$  kg，下部质量  $m = 400$  kg，升力系数为 1，缓冲器初始充气压力  $P_0 = 2.6$  MPa，初始充气体积  $V_0 = 11.3$  L，气体多变指数  $n = 1.15$ ，活塞杆外径形成的面积  $24\ 806$  mm<sup>2</sup>，外筒内径形成的面积  $32\ 219$  mm<sup>2</sup>，正行程回油孔面积  $332$  mm<sup>2</sup>，反行程回油孔面积  $50$  mm<sup>2</sup>，油液密度  $850$  kg/m<sup>3</sup>，油孔流量系数 0.8，轮胎垂直刚度  $1\ 785$  N/mm，轮胎垂直振动当量阻尼系数  $0.04$  s/m，其余的缓冲器结构参数如表 1 所示。

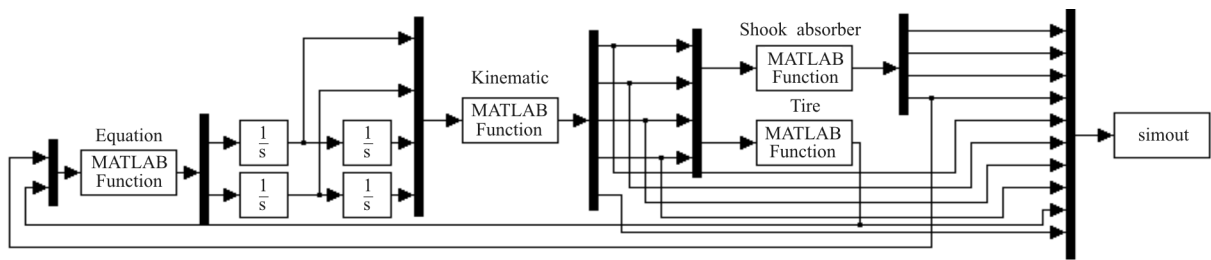


图 3 Simulink 仿真框图

Fig. 3 Simulink simulation sketch

表 1 缓冲器行程相关的主油腔参数

Table 1 Main chamber parameters relevant to shock absorber travel

absorber travel		
缓冲器行程/mm	主油腔压油面积/mm <sup>2</sup>	主油腔油孔面积/mm <sup>2</sup>
0	15 193	745.3
10	15 193	745.3
15	14 771	323.2
100	14 700	252.1
310	14 593	144.8
360	14 584	135.8
400	14 460	12.3

3.05 m/s 下沉速度着陆撞击产生的各腔压力如图 4 所示,可以看出:撞击发生时,由于缓冲器内压作用,缓冲器没有错动,气腔、主油腔和回油腔三腔压力相等并为  $P_0$ ;随着缓冲器压缩气体,气腔压力开始升高,由于撞击初始缓冲器错动速度较大,主油腔压力快速升高,回油腔压力先降低后升高,在 0.3 s 附近三腔压力相等,说明错动速度为 0,缓冲器行程达到最大值,缓冲器正行程结束;反行程开始,回油腔压力升高,主油腔压力开始降低,主油腔压力曲线和回油腔压力曲线在 0.5 s 至 0.6 s 之间出现转折,说明缓冲器此刻具有压缩量,轮胎脱离地面。

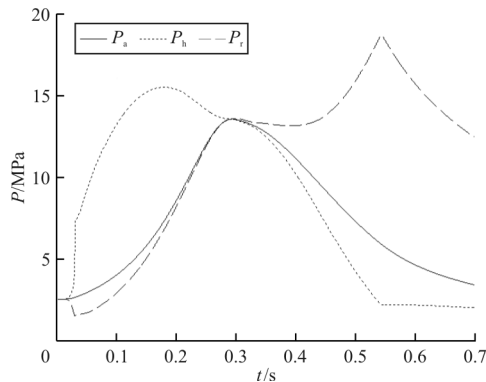


图 4 3.05 m/s 下沉速度缓冲器各腔压力时间历程

Fig. 4 Pressure of shock absorber changed with time at 3.05 m/s

不同下沉速度下各腔压力对比如图 5~图 7 所示,可以看出:随着下沉速度的增加,气腔最大压力、主油腔最大压力、回油腔最大压力都增大,并且气腔压力和回油腔压力峰值提前出现;回油腔最小

压力随下沉速度增加而减小。

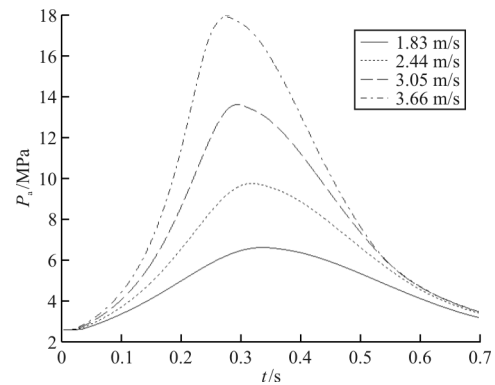


图 5 不同下沉速度气腔压力时间历程( $P_a$ )

Fig. 5 Pneumatic chamber pressure changed with time at different drop velocities( $P_a$ )

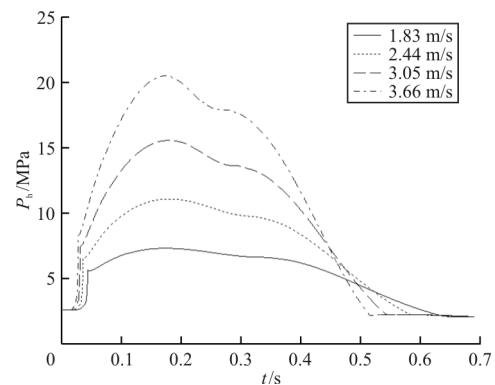


图 6 不同下沉速度主油腔压力时间历程( $P_h$ )

Fig. 6 Main chamber pressure changed with time with different drop velocities( $P_h$ )

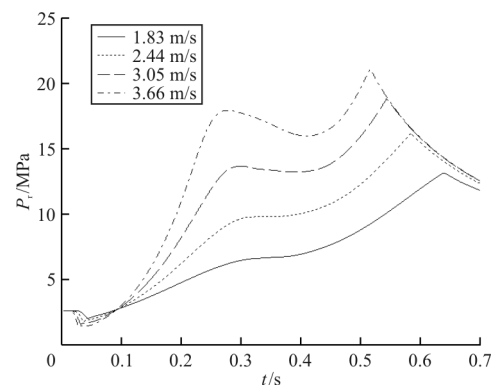


图 7 不同下沉速度回油腔压力时间历程( $P_r$ )

Fig. 7 Recoil chamber pressure changed with time at different drop velocity( $P_r$ )

### 4 柱塞和活塞杆稳定性问题

柱塞轴向稳定性问题出现在着陆时的正行程, 主要承受主油腔和气腔压力差, 受压示意图如图 8(a)所示; 活塞杆径向稳定性问题出现在着陆时的反行程, 承受回油腔和主油腔压力差, 受压示意图如图 8(b)所示。

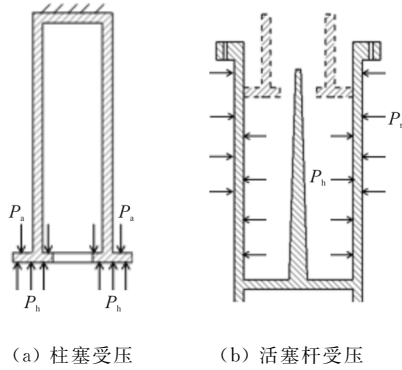


图 8 柱塞和活塞杆稳定性压力示意图  
Fig. 8 Restricted tube and sliding tube stability pressure sketch

不同下沉速度主油腔气腔压差随行程关系曲线图如图 9 所示, 可以看出: 压差按照顺时针随行程变化, 最大压差随下沉速度增加而增加, 最大压差出现时的缓冲器行程随下沉速度增加而增加。

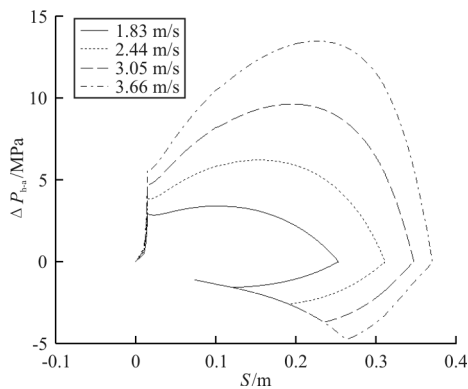


图 9 不同下沉速度主油腔气腔压差随行程关系  
Fig. 9  $\Delta P_{ba}$  changed with  $S$  at different drop velocity

不同下沉速度回油腔主油腔压差随行程关系如图 10 所示, 可以看出: 压差按照逆时针随行程变化, 最大压差随下沉速度增加而增加, 最大压差出现时的缓冲器行程随下沉速度增加而增加。

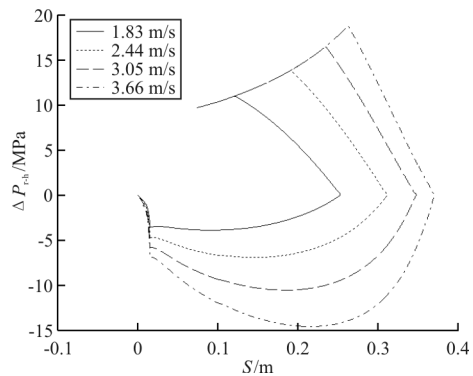


图 10 不同下沉速度回油腔主油腔压差随行程关系  
Fig. 10  $\Delta P_{rh}$  changed with  $S$  at different drop velocities

### 5 回油孔面积改变分析

根据图 7 回油腔最小压力随着下沉速度增加而减小的现象, 进行如下预测, 下沉速度增加到一定程度或者保持下沉速度不变而正行程回油孔面积减小到一定程度, 使得回油腔压力小于零。

回油孔面积改变分析包括两方面内容: ①减小正行程回油孔面积; ②增加反行程回油孔面积。具体情况如表 2 所示。

表 2 回油孔面积改变情况  
Table 2 Situation of recoil orifice changing

改变情况	$f_{rp}/\text{mm}^2$	$f_m/\text{mm}^2$	$v_{drop}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
基准	332	50	3.66
减小 $f_{rp}$	200	50	3.66
增加 $f_m$	332	100	3.66

不同正行程回油孔功量图如图 11 所示。

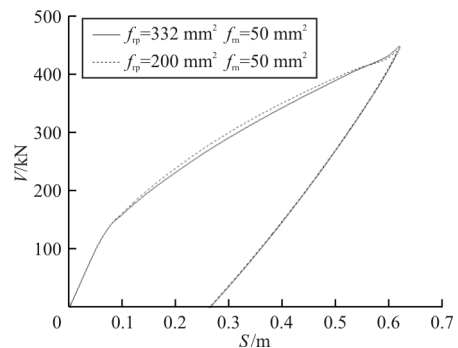


图 11 不同正行程回油孔功量图  
Fig. 11 Tire force changed with CG travel at different positive recoil orifices

从图 11 可以看出: 减小  $f_{rp}$  可以增加正行程阻

尼,使得功量图更加饱满,轮胎最大载荷减小,提高缓冲效率; $f_{rp}$ 为  $200\text{ mm}^2$  的载荷较  $332\text{ mm}^2$  的载荷更小。

不同正行程回油孔回油腔压力时间历程如图 12 所示,可以看出:减小  $f_{rp}$  的回油腔压力在着陆撞击初始阶段为负,说明较快的缓冲器压缩速度或者较小的  $f_{rp}$  使得油液不能完全充满回油腔,影响缓冲器反行程缓冲效果,同时也说明缓冲器载荷计算公式(1)不适用此种情况。

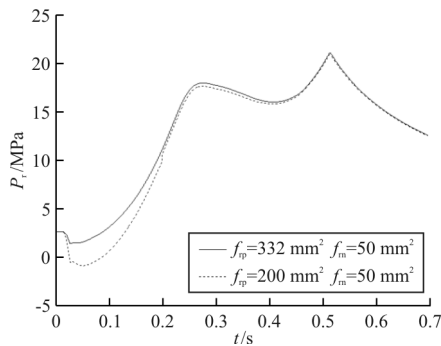


图 12 不同正行程回油孔回油腔压力时间历程  
Fig. 12 Recoil chamber pressure changed with time at different positive recoil orifices

不同反行程回油孔功量图如图 13 所示,可以看出:增加  $f_m$  使得反行程阻尼变小,反行程轮胎垂直载荷降速变缓,因此不能判断哪条曲线更优。

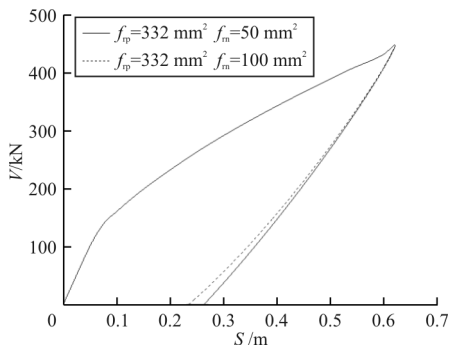


图 13 不同反行程回油孔功量图  
Fig. 13 Tire force changed with CG travel at different negative recoil orifices

不同反行程回油孔主油腔压力时间历程如图 14 所示,可以看出:增加  $f_m$  的主油腔反行程压力在轮胎脱离地面之前已经为负,说明增加  $f_m$  降低了对缓冲器伸展行程的控制,使得油液不能完全充满主油腔,影响着陆第二次撞击的缓冲效果,同时也说明缓冲器载荷计算公式(1)不适用此种情况。

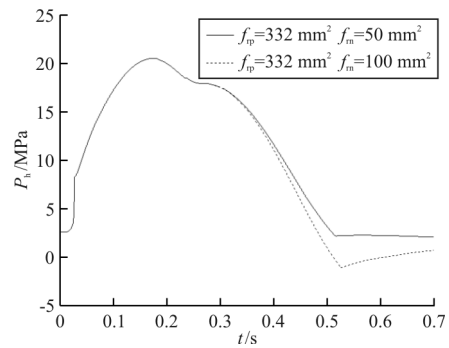


图 14 不同反行程回油孔主油腔压力时间历程  
Fig. 14 Main chamber pressure changed with time at different negative recoil orifices

计算起落架着陆性能时,不应仅考虑载荷,需要综合考虑缓冲器内部压力变化情况;设计缓冲器参数时, $f_{rp}$  不能太小,保证正行程油液充满回油腔, $f_m$  不能太大,保证反行程油液充满主油腔;如果出现油液不能充满油腔的情况,公式(1)不能用来计算缓冲器载荷。

## 6 结 论

(1) 在缓冲过程中,最大气腔压力出现在最大缓冲器行程,最大回油腔压力出现在轮胎离开地面时刻,最小回油腔压力出现在着陆撞击开始阶段,随着下沉速度的增加各腔最大压力和最大压差相应增加。在  $0.2\sim 0.3\text{ s}$  附近,缓冲器正行程结束。在  $0.5\sim 0.6\text{ s}$  附近,轮胎脱离地面。

(2) 在本实例中,正行程回油孔面积  $f_{rp}$  为  $200\text{ mm}^2$  的载荷较  $332\text{ mm}^2$  的载荷更小;反行程回油孔面积  $f_m$  为  $100\text{ mm}^2$  的载荷较  $50\text{ mm}^2$  的载荷更小。

(3) 在起落架缓冲支柱设计过程中,应综合考虑缓冲器各腔压力结果,使得油腔压力不能出现负值;正行程回油孔不能太小,保证油液充满回油腔,反行程回油孔不能太大,保证油液充满主油腔。

(4) 本文对起落架着陆过程中缓冲器内部压力变化进行研究,为缓冲器内装件强度分析特别是柱塞和活塞杆稳定性分析提供了条件。

## 参考文献

[1] SAE International. Landing gear structures and mechanisms; ARP1311C[S]. Warrendale, PA: A-5B Gear, Struts and Couplings Committee, 2009.

- [2] BENJAMIN M, COOK F E. Analysis of landing-gear behavior: NACA-TR-1154[R]. Washington, D. C. : NACA, 1952.
- [3] VAEZI N M, MAHJOUB M S, RAHMATI S. Shock suspension system review and analysis of airplane during landing[J]. Majlesi Journal of Mechanical Engineering, 2011 (4): 33-44.
- [4] LERNBEISS R, PLOECHL M. Simulation model of an aircraft landing gear considering elastic properties of the shock absorber[J]. Journal of Multi Body Dynamics, 2007, 221 (1): 77-86.
- [5] TERZE Z, WOLF H, SLOBODAN J. Dynamic simulation of landing aircraft[C]// 2003 ECCOMAS Thematic Conference on Advances in Computational Multibody Dynamics. Lisboa: [s. n.], 2003: 1-10.
- [6] 刘锐琛. 飞机起落架强度设计指南[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1989: 721-724.  
LIU Ruichen. Aircraft landing gear strength design guidelines[M]. Chengdu: Sichuan Science & Technology Press, 1989: 721-724. (in Chinese)
- [7] 豆清波, 史惟琦, 牟让科, 等. 基于落震试验的油一气式起落架气体压缩多变指数变化规律研究[J]. 实验力学, 2015, 30(2): 215-220.  
DOU Qingbo, SHI Weiqi, MU Rangke, et al. Oil-gas landing gear gas compress polytropic index variation laws research based on drop test[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(2): 215-220. (in Chinese)
- [8] 聂宏, 魏小辉. 飞机起落架动力学设计与分析[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2013.  
NIE Hong, WEI Xiaohui. Dynamic design and analysis of aircraft landing gear[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2013. (in Chinese)
- [9] 隋福成, 陆华. 飞机起落架缓冲器数学模型研究[J]. 飞机设计, 2001(2): 44-51.  
SUI Fucheng, LU Hua. Mathematical model of aircraft landing gear buffer[J]. Aircraft Design, 2001(2): 44-51. (in Chinese)
- [10] 邢志伟, 刘广. 飞机起落架缓冲机理模型研究[J]. 机床与液压, 2011, 39(15): 130-132.  
XING Zhiwei, LIU Guang. Modeling of buffering mechanism of aircraft landing gear[J]. Machine Tools and Hydraulic Pressure, 2011, 39(15): 130-132. (in Chinese)
- [11] 齐丕骞, 牟让科. 飞机起落架缓冲性能分析、试验、设计一体化技术[J]. 航空学报, 1998, 19(3): 332-334.  
QI Piqian, MU Rangke. Integration of shock-absorber performance analysis, test and design of aircraft landing gear[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1998, 19 (3): 332-334. (in Chinese)
- [12] 牟让科, 齐丕骞, 吴启荣. 一种自适应双腔缓冲器动力特性研究[J]. 应用力学学报, 2001, 18(s1): 96-100.  
MU Rangke, QI Piqian, WU Qirong. Investigation for the dynamic behavior of a dual chamber energy-absorber with adaptive control[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2001, 18(s1): 96-100. (in Chinese)
- [13] 吴志光, 陈杰平, 张陈荣. 基于遗传算法的起落架缓冲器变截面油针优化设计研究[J]. 航空工程进展, 2018, 9(1): 43-48.  
WU Zhiguang, CHEN Jieping, ZHANG Chenrong. Research on optimization design of variable cross-section oil needle of landing gear buffer based on genetic algorithm[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2018, 9 (1): 43-48. (in Chinese)
- [14] 李占科, 刘天辉. 双气腔油气式缓冲器充填容差仿真分析[J]. 计算机仿真, 2014, 31(10): 52-56.  
LI Zhanke, LIU Tianhui. Simulation and analysis of filling tolerance of double-chamber oil-gas buffer[J]. Computer Simulation, 2014, 31(10): 52-56. (in Chinese)
- [15] 浦志明. 某起落架缓冲器阻尼装置特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.  
PU Zhiming. Characteristics of a landing gear buffer damper[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)
- [16] 浦志明, 魏小辉. 起落架缓冲器常油孔阻尼性能分析[J]. 系统仿真技术, 2014, 10(2): 125-129.  
PU Zhiming, WEI Xiaohui. Characteristics analysis of a landing gear buffer damper[J]. System Simulation Technology, 2014, 10(2): 125-129. (in Chinese)
- [17] 邵一舟, 魏小辉, 聂宏, 等. 基于流固耦合方法的起落架缓冲器阻尼特性研究[J]. 机械设计与制造, 2015(5): 1-4.  
SHAO Yizhou, WEI Xiaohui, NIE Hong, et al. Study on the damping characteristics of landing gear based on fluid-solid coupling method[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2015(5): 1-4. (in Chinese)
- [18] 王成龙, 邱志伟, 曾庆良, 等. 基于模拟退火算法的多孔式液压缓冲器阻尼孔优化[J]. 液压与气动, 2019, 33(4): 57-62.  
WANG Chenglong, QIU Zhiwei, ZENG Qingliang, et al. Damping hole optimization of porous hydraulic buffer based on simulated annealing algorithm[J]. Hydraulic and Pneumatic, 2019, 33(4): 57-62. (in Chinese)

### 作者简介:

娄锐(1985—),男,硕士,工程师。主要研究方向:起落架缓冲性能和地面载荷分析。

折世强(1968—),男,学士,研究员。主要研究方向:起落架缓冲性能和地面载荷分析。

鲁德发(1969—),男,学士,高级工程师。主要研究方向:起落架强度设计。

黄立新(1969—),男,大专,高级工程师。主要研究方向:起落架结构设计。

(编辑:丛艳娟)