

# 基于 PAM-CRASH 的飞机着舰拦阻 系统动力学仿真分析

党晓艳, 黄超广, 冯震宙

(航空工业第一飞机设计研究院, 西安 710089)

**摘要:** **目的** 研究拦阻和着舰过程中拦阻钩的动态响应, 为拦阻钩的多冲动力学分析提供依据。**方法** 运用 PAM-CRASH 软件建立着舰拦阻冲击动力学的有限元模型, 将整个过程分解为着舰和拦阻两个不同的阶段, 考虑柔性体的建模方法。**结果** 通过仿真分析, 得到拦阻着舰过程中响应最大的位置, 得到绳索拦阻的最大载荷。**结论** 针对飞机拦阻钩结构动力学模型, 就其啮合过程进行了动力学仿真, 考虑飞机的航向及下沉速度综合作用下拦阻绳索的动态响应, 探索了柔性拦阻绳索结构的动力学模拟方式。

**关键词:** PAM-CRASH; 拦阻; 柔性; 冲击; 有限元

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2020.09.003

**中图分类号:** TU311.3; TU352.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2020)09-0015-06

## Dynamics Simulation Analysis of Carrier Aircraft Landing Arresting Based on PAM-CRASH

DANG Xiao-yan, HUANG Chao-guang, FENG Zhen-zhou

(AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the dynamic response of the hook during arresting and landing, so as to provide the basis for the multi-impact dynamics analysis of hook. PAM-CRASH software was used to establish the finite element model of impact dynamics for landing arresting to divide the entire process of decomposition to two different stages, and the modeling method of flexible body was considered. Through simulation, the maximum response of the position in the process was obtained and the maximum load of rope was gotten. For the dynamics model of aircraft arresting hook, the dynamics simulation is carried out on the meshing process. Considering the dynamic response of arresting rope under the action of aircraft heading and sinking speed, the dynamic simulation method of flexible arresting rope structure is explored.

**KEY WORDS:** PAM-CRASH; arresting; flexibility; impact; FEM

舰载飞机的弹射起飞及拦阻着舰是典型的结构动力学问题之一,也是关系到航母及舰载飞机的关键安全因素。拦阻着舰过程(图1)通常被认为是舰载飞机事故率最高的阶段,因此,拦阻着舰动力学一直备受关注<sup>[1]</sup>。舰载飞机通常通过尾钩钩住拦阻索,

拦阻装置产生阻尼力,飞机在阻尼力的拦阻索产生的阻尼力作用下滑行至停止最终制动。在此种复杂情况下着舰,很可能出现上索失效,结构或载荷问题导致拦阻钩或者索损坏。据相关文献统计,进场阶段事故中由于着舰末端过程产生的动力学问题导致事故

收稿日期: 2020-07-07; 修订日期: 2020-08-05

Received: 2020-07-07; Revised: 2020-08-05

作者简介: 党晓艳(1982—),女,高级工程师,主要研究方向为飞机结构动力学。

**Biography:** DANG Xiao-yan(1982—), Female, Senior engineer, Research focus: aircraft structure dynamic.

占40%以上<sup>[2]</sup>。

美国的“尼米兹”号航母，号称是世界上最大的航空母舰，其甲板长度也不过300m，而真正能用于着陆的实际长度大约200m左右<sup>[3]</sup>。舰载飞机要成功降落，合理可靠安全的拦阻系统设计至关重要，拦阻系统的设计初源正是基于舰载意外原因冲出跑道的飞机进行拦阻而产生，最终达到正常着陆。拦阻钩（图2）主要用于捕捉并钩住舰上拦阻装置的拦阻索，保证飞机的短距离制动。

拦阻钩的特点是沿飞机航向过载极大，飞机的着舰冲击载荷及动能会通过拦阻钩将冲击载荷梁传递到舰载机的机体<sup>[4-5]</sup>。最早进行舰上拦阻的美国人采用两端放置砂包的方式而产生了第一代重力型拦阻装置MK1。

由于舰载飞机的着陆方式是撞击式的，因此拦阻钩会承受很大的冲击载荷，高强度钢丝<sup>[6]</sup>可以保证拦阻过程的载荷传递且不会产生断裂破坏，并且在使用数十次后就进行更换<sup>[7]</sup>。一般来说，拦阻索直径为35mm。1955年美国超级航母的拦阻系统已经可以拦停以150节速度啮合、20t的着舰质量。



图1 舰载机典型拦阻过程  
Fig.1 Typical arresting process of carrier aircraft



图2 F-35的A型空军型和C型海军型拦阻钩  
Fig.2 Arresting hook with config A for the air force and config C for the navy of F-35

## 1 拦阻钩工作原理

目前最具有代表性的是美国的MK7系列液压缓冲式拦阻装置<sup>[8]</sup>，其系统组成有：拦阻索、拦阻索支撑系统、拦阻机系统、滑轮缓冲系统、钢索尾端缓冲系统、钢索系统、定长冲跑控制系统、复位系统以及油液冷却系统等。图3为MK7型拦阻系统示意图。

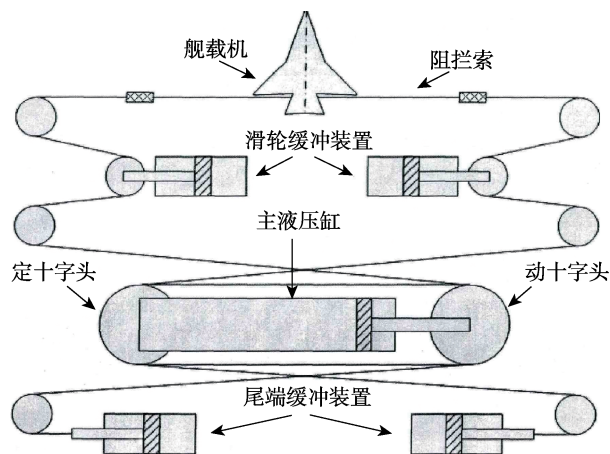


图3 MK7型拦阻系统示意  
Fig.3 Schematic diagram of arresting system of MK7

拦阻钩在飞机着陆时在很短的时间内放下，并由纵向缓冲器压紧在道面上，然后钩住绳索，随后带动拦阻机工作，在规定的时间内或距离内耗散掉飞机的动能，以使其很快停下来。柔性绳索与舰载机的拦阻钩在瞬间接触过程中，由自由状态开始张紧，这是由于拦阻钩在接触点产生了拦阻拉力，但由于飞机的前向运动，使得拦阻钩拉力垂直于绳索。着舰时拦阻钩啮合拦阻索的速度和着舰姿态不仅关系到作用在飞机结构上的载荷大小，还关系到飞机在着舰甲板上滑行制动能力和座舱视角以及逃逸复飞的能力。

## 2 理论基础

绳索动力学问题是高度非线性的问题。1956年Ringleb<sup>[8]</sup>建立的应力传播的波动方程是通过研究柔性绳索端部突然受纵向冲击后的行为，在此过程中，得到了应力波纵波速度传播的速度，以及求应力以及质点运动速度的公式。

$$c = (1 + \frac{\sigma_0}{E}) \sqrt{\frac{E}{\rho_0}} \quad (1)$$

式中： $c$ 为纵波速度； $E$ 为索的弹性模量； $\rho_0$ 为索在零应变时的密度； $\sigma_0$ 为索的初始应力。

$$\frac{u}{c} = \frac{\frac{\sigma - \sigma_0}{E}}{1 + \frac{\sigma_0}{E}} \quad (2)$$

式中： $u$ 为质点运动速度； $\sigma$ 为索的应力。

当绳索受到斜碰撞时，绳索的运动及应力传播行为，弯折波传播的波速以及横波波速，绳索中的应力及碰撞角度、初始应力、碰撞速度以及绳索参数则存在以下关系：

$$\left(\frac{V_0}{c_0}\right)^2 + \frac{2V_0}{c_0} \left( \sqrt{\frac{\sigma}{E} \left(1 + \frac{\sigma}{E}\right) - \frac{\sigma - \sigma_0}{E}} \right) \cos \phi = 2 \frac{\sigma - \sigma_0}{E} \sqrt{\frac{\sigma}{E} \left(1 + \frac{\sigma}{E}\right) - \left(\frac{\sigma - \sigma_0}{E}\right)^2} \quad (3)$$

式中： $V_0$  为碰撞速度； $\phi$  为碰撞角度。

通常由于拦阻钩在绳索上会产生滑移，波由于阻尼作用的衰减效应以及非无限加载率时绳索张力的峰值，绳索的不同构造形式等相关因素对绳索峰值应力的影响，最终得到峰值应力与绳索弹性模量和绳索密度与金属横截面积之比的关系：

$$\sigma = 1.36 \times 10^7 \left( \frac{\rho}{Ag} \right)^{1.2} \left( \frac{1}{E} \right)^{0.2} + 5.0 \times 10^{-3} E \quad (4)$$

在计算中绳索材料采用钢制。在 PAM-CRASH 中，提供了一种专门模拟绳索的材料模型（非线性拉伸杆单元）。该材料定义中有两个重要参数，一个是刚度系数  $K=EA$ （ $E$  为材料的弹性模量， $A$  为杆单元的横截面积）。另一个是初始应变值  $\epsilon_0$ ，当  $\epsilon_0$  为负值时表示拦阻索处于松弛状态， $\epsilon_0$  为正值时表示拦阻索处于张紧状态。

### 3 仿真分析

#### 3.1 着舰冲击分析

对拦阻钩着舰进行了动力学建模<sup>[9-11]</sup>，见图 4。模型中飞机取最大着舰质量，考虑航向啮合速度和下沉速度，当飞机迎角为  $0^\circ$  时，拦阻钩与舰面夹角取  $58.60^\circ$ 。表 1 为着舰过程中拦阻钩上的应力应变情况，图 4 为钩臂上的应力时间历程，图 5 为着舰瞬间缓冲器的载荷时间历程，图 6 为着舰瞬间作用在缓冲器上的载荷时间历程。

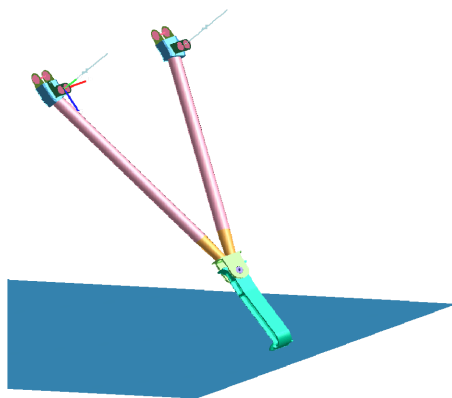


图 4 着舰状态冲击模型  
Fig4 Impact model of landing status

表 1 钩臂在着舰过程中的应力应变情况  
Tab.1 Stress and strain of the hook arm during landing

位置	应力/MPa	
	钩臂与缓冲器连接根部	钩臂靠近销子钩头位置
左上	471.42	542.34
左下	324.78	524.65
右上	467.46	524.21
右下	342.24	469.57

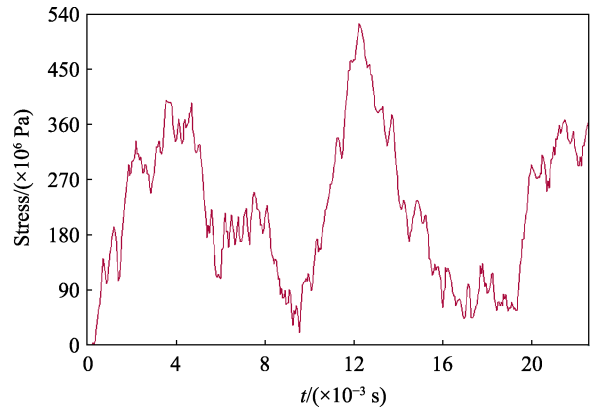


图 5 钩臂上的应力时间历程  
Fig.5 Stress-time of the hook arm

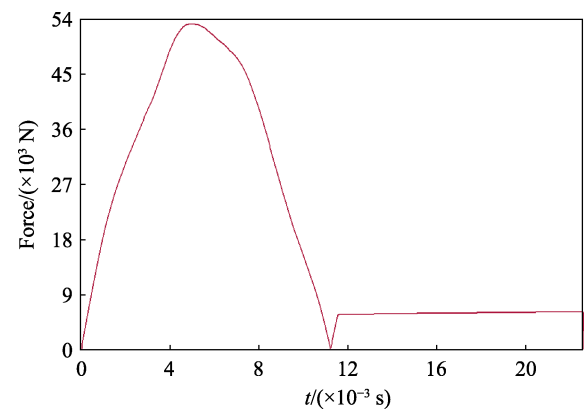


图 6 着舰瞬间缓冲器载荷时间历程  
Fig.6 Force-time of the absorber at landing moment

#### 3.2 拦阻冲击分析

针对某型预警机试验状态拦阻过程进行了瞬态冲击分析，建立的有限元模型见图 7。缓冲器载荷采用和着舰冲击一致的状态，拦阻索长度取 1 m，两端固支。

图 8 和图 9 所示为拦阻瞬间钩弯根处和绳索上的应力云图。

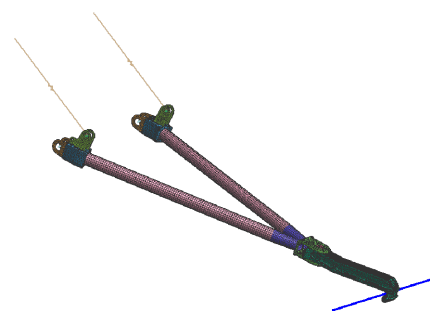


图 7 拦阻瞬态冲击有限元模型  
Fig.7 Finite element model for arresting transient impact

#### 3.3 着舰拦阻冲击分析

拦阻着舰过程中的计算状态同 3.1 小节一致。图

10 为着舰拦阻全过程的动力学模型。图 11 为拦阻过程动态示意图。图 12 和为拦阻过程中钩弯跟处的应力云图。在此次计算中，销子和拦阻钩设置接触。

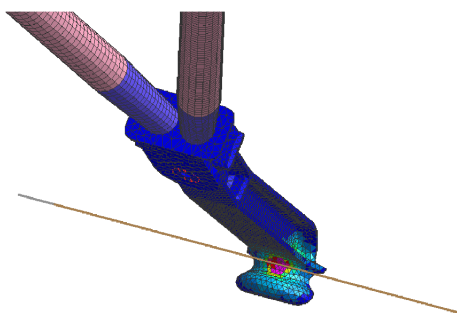


图 8 接触瞬间钩弯根处应力云图  
Fig.8 Stress cloud of the hook root at contact moment

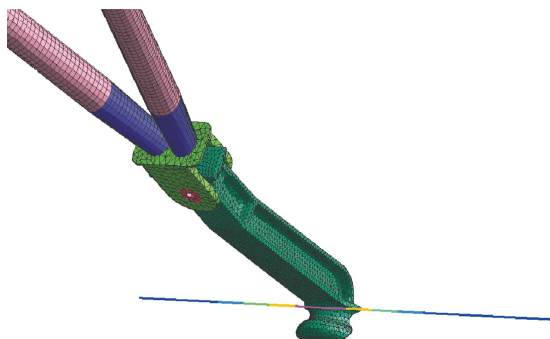


图 9 接触瞬间绳索轴向力云图  
Fig.9 Axial force cloud of the cable at contact moment

在拦阻过程中，拦阻钩和中间的销子因为存在间隙，啮合过程中首先接触，待钩头接触绳索，钩头弯曲部分产生较大应力。表 2 为最终的计算结果，最大应力发生的位置有两处，一处是钩头弯曲和绳索接触位置，一处是拦阻钩和中间的销子接合处，最大应力值为 1620 MPa。

钩弯根处在 0.06 ms 时出现冲击应力峰值，接触后大约 39 ms 时应力峰值锐减，可认为机体缓冲装置起到作用。但是在钩头杆位置的应力时间历程完全不同，其中的间隙和啮合使得此处产生连续冲击。

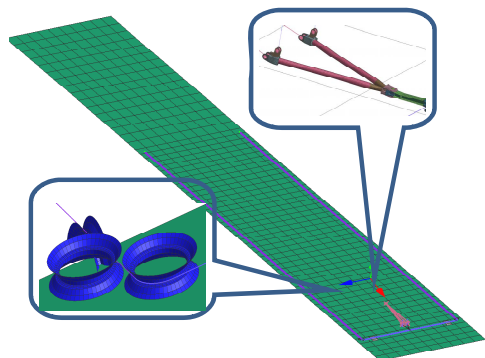


图 10 着舰拦阻模型  
Fig.10 Landing arresting model

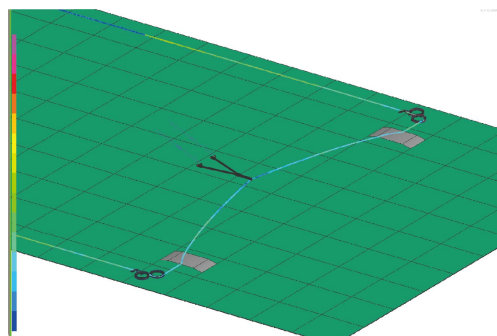


图 11 着舰拦阻过程示意  
Fig.11 Landing arresting process

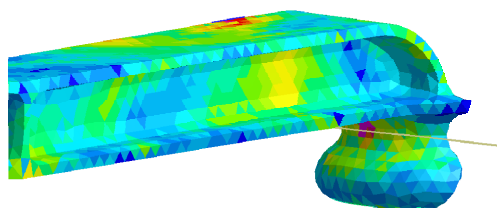


图 12 钩弯根处的最大应力状态  
Fig.12 Maximum stress of the hook root

表 2 计算结果

Tab.2 Calculation result

来源	最大等效应力/MPa		塑性应变		绳索轴力/kN
	弯根	钩头	弯根	钩头	
文献	1822.22	1687.20	0.128	0.053	500
本文	1620	1293.67	0.075	0.009	294

拦阻冲击全过程的分段计算为 3.1 小节的着舰冲击和 3.2 小节的拦阻冲击，3.1 小节为未考虑拦阻的情况，而 3.2 小节则未考虑拦阻索的应力波传递及长度影响。其计算结果具有局限性。

## 4 结论

- 1) 着舰冲击过程中，钩臂处最大应力发生在钩臂靠近销子连接处。
- 2) 着舰冲击过程中，钩头最大应力发生在钩头弯钩两侧，最大值为 1467.89 MPa，未超过材料的极限应力。
- 3) 在着舰过程中，舰体较刚硬，因此计算结果可能偏大。
- 4) 缓冲器在着舰过程中起到了一定作用，承受的瞬间载荷大小为 53 000 N 左右。
- 5) 拦阻冲击过程中，材料的变形均发生在弹性段。
- 6) 拦阻过程中，最大应力发生的位置有两处，一处是钩头弯曲和绳索接触位置，一处是拦阻钩和中间的销子接合处，最大应力值为 1620 MPa。

## 5 展望

舰载机的着舰拦阻冲击是一个非常严酷的过程, 对飞机的拦阻钩、起落架、机体以及舰上拦阻系统都是极其严峻的考验, 拦阻钩和绳索的冲击, 拦阻索内应力波的传播等都是需要进一步讨论的问题<sup>[12-15]</sup>。本文的拦阻钩和机体连接为弹性模型, 因此在随后的工作中还需要进行进一步深入研究以下问题:

完成全历程拦阻仿真, 目前因为计算规模巨大, 仅完成 75 ms 的计算历程;

基于仿真数据, 结合试验数据对比, 进行模型修正, 对模型的动态特性进行分析, 研究拦阻过程中飞机的拦阻索拉力等相关参数之间的内在联系<sup>[16]</sup>;

将波动传载理论与计算仿真相结合, 分析飞机尾钩挂索后应力波在拦阻索中的传播过程, 以及应力波在甲板滑轮处的反射与传播<sup>[17-19]</sup>;

进一步建立全机弹性体拦阻模型, 了解拦阻对机体结构的影响<sup>[20]</sup>。

### 参考文献:

- [1] 柳钢. 舰载飞机着舰拦阻钩碰撞及拦阻动力学研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009: 50-51.  
LIU Gang. Investigation on Arresting Dynamics for Carrier Based Aircraft with Consideration of Arresting Hook Bounce[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009: 50-51.
- [2] 聂宏, 彭一明, 魏小辉, 等. 舰载飞机拦阻动力学研究综述[J]. 航空学报, 2014, 35(1): 1-12.  
NIE Hong, PENG Yi-ming, WEI Xiao-hui, et al. Overview of Carrier-based Aircraft Arrested Deck-landing Dynamics[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Science, 2014, 35(1): 1-12.
- [3] DE Book K. A New Aircraft/Ship Mating System[C]//AIAA/SNAME Advanced Marine Vehicles Conference. San Lego: [s. n.], 1974.
- [4] GJB 67A—2008, 中国人民解放军总装备部军用飞机结构强度规范 第 4 部分: 地面载荷[S].  
GJB 67A—2008, The PLA General Armament Department. Military Airplane Structural Strength Specification Part 4: Ground loads[S].
- [5] 飞机设计手册起飞着陆系统设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.  
Takeoff and Landing System Design[M]. Beijing: Aviation Industry Press.
- [6] 冯飞, 常正, 聂宏, 等. 飞机柔性对前起落架摆振的影响分析[J]. 航空学报, 2011, 32(12): 2227-2235.  
FENG Fei, CHANG Zheng, NIE Hong, et al. Analysis of Influence of Aircraft Flexibility on Nose Landing Gear Shimmy[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(12): 2227-2235.
- [7] HAN X H, HUA L. Comparison between Cold Rotary Forging and Conventional Forging[J] Mech. Sci. Technol, 2009, 23: 2668-2678.
- [8] 王海东, 毕玉泉, 杨炳恒, 等. MK7-3 阻拦装置拦阻特点分析[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(9): 2038-2042.  
WANG Hai-dong, BU Yu-quan, YANG Bing-heng, et al. Characteristic Analysis of MK7-3 Arresting Gear[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(3): 2038-2042.
- [9] DENG Xiao-bin, HUA Lin, HAN Xing-hui. Three-dimensional FE Modelling Simulation of Cold Rotary Forging of Piral Bevel Gear [J]. Ironmaking and Steel Making, 2011, 38(2): 101-111.
- [10] DENG Xiao-bin, HUA Lin, HAN Xing-hui, et al. Numerical and Experimental Investigation of Cold Rotary Forging of a 20CrMnTi Alloy Spur Bevel Gear[J]. Materials and Design, 2011, 32: 1376-1389.
- [11] HUSBANDS T B, BEAN D L. Evaluation of Barrier Cable Impact Pad Materials, ADA204356[R]. Vicksburg: Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg MS Structures Lab, 1988.
- [12] BRODERSEN R, SAUER G. A self-compensating Aircraft Recovery System, AIAA: 90-3273 Aircraft Design[C]//Systems and Operations Conference, Dayton, OH: AIAA, 1990.
- [13] 孙安, 黄沛天. 也谈完全非线性碰撞和恢复系数[J]. 大学物理, 2001, 20(3): 9-14.  
SUN An, HUANG Pei-tian. On the Completely in Elastic Collision and the Coefficient of Restitution[J]. College Physics, 2001, 20(3): 9-14.
- [14] MLKHALUK D, VOLNOV L, BOROVKOV A. Finite Element Modeling of the Arresting Gear and Simulation of the Aircraft Deck Landing Dynamics[C]//Proceedings of the 7th European LS-DYNA Conference. St, Petersburg: DYNA more GmbH, 2009.
- [15] 李启明, 冯蕴文, 于立明. 飞机拦阻着陆动力学分析与仿真[J]. 计算机仿真, 2010, 27(1): 27-31.  
LI Qi-ming, FENG Yun-wen, YU Li-ming. Kinetics Analysis and Simulation of Aircraft Arrested Shore-landing[J]. Computer Simulation, 2010, (27): 27-31.
- [16] 曹淑华. 飞机拦阻器的液压系统设计及仿真研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2002.  
CAO Shu-hua. Hydraulic System Design and Simulation Research of Aircraft Arresting System[D]. Shenyang: Northeastern University, 2002.
- [17] 张鑫, 李玉龙, 刘元镛, 等. 飞机对中和偏心拦阻钩索动力学分析[J]. 机械强度, 2008, 30(4): 549-554.  
ZHANG Xin, LI Yu-long, LIU Yuan-yong, et al. Arresting

- Hook and Cable Dynamics of Aircraft Arrest Landing on or off Center[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2008, 30(4): 549-554.
- [18] 罗明聪. 柔性梁与刚性地面碰撞动力学研究及仿真[D]. 南京: 南京理工大学 2006: 36-37.
- LUO Ming-cong. Dynamic Simulation and Research of Impact between the flexible and Rigid Surface[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006: 36-37.
- [19] 杨全伟. 舰载飞机拦阻钩载荷实测方法研究[J]. *航空学报*, 2015, 36(4): 1162-1168.
- YANG Quan-wei. Research on Flight Measurement Method of a Carrier-based Aircraft Hook Loads[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(4): 1162-1168.
- [20] 洪嘉振. 计算多体动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 44-49.
- HONG Jia-zhen. Computational Dynamics of Multibody System[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999: 44-49.