

轨道参数对载人飞船遭遇空间碎片碰撞风险影响

余庆波¹,王海福¹,王辉²,肖艳文³

1. 北京理工大学;爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081

2. 中国兵器科学院,北京 100089

3. 总装备部武汉军代局驻襄樊地区军代室,湖北襄樊 441021

摘要 采用自主开发的轨道碎片风险评估及防护系统(MODRASS),对载人飞船遭遇空间碎片碰撞风险进行仿真评估和分析,给出轨道倾角、轨道高度及运行姿态等因素对载人飞船遭遇空间碎片碰撞风险的影响特性。结果表明,载人飞船在不同倾角的轨道上遭遇空间碎片碰撞风险不同,在170°倾角轨道上,载人飞船遭遇的碰撞数最多,而在20°~60°及110°左右倾角的轨道上,载人飞船遭遇空间碎片碰撞的情况明显改善,不同轨道倾角下的碰撞风险差别可达10倍以上。载人飞船在不同轨道高度上遭遇空间碎片碰撞风险差异很大,在轨道高度为1400km时,载人飞船遭遇空间碎片碰撞数最多;而在轨道高度为200km时,载人飞船遭遇空间碎片碰撞数仅410881个,相差两个数量级。此外,载人飞船以不同姿态运行时,遭遇空间碎片碰撞风险不同,且遭遇空间碎片碰撞的区域也出现明显变化,可以通过调整载人飞船的运行姿态减小空间碎片威胁。

关键词 载人飞船;空间碎片;风险评估

中图分类号 V414

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)02-0034-05

Effect of Orbit Parameters on Manned Spacecraft Impact Risk Against Orbital Debris

YU Qingbo¹, WANG Haifu¹, WANG Hui², XIAO Yanwen³

1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology; Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

2. China Academy of Defense Science and Technology, Beijing 100089, China

3. Military Representative Office in Xiangfan, General Armament Department, Xiangfan 441021, Hubei Province, China

Abstract The Meteoroid and Orbital Debris Risk Assessment and Shielding System (MODRASS) is used to simulate and assess the impact risk of manned spacecraft against orbital debris. The influencing factors of the impact risk of manned spacecraft include orbit inclination angle, orbital altitude and spacecraft attitude. It is shown that different inclination angles affect the impact risk of manned spacecraft against orbital debris in the orbit in the manner that in the orbit with 170° inclination angle, the manned spacecraft may encounter the most frequent collisions; in the orbit with inclination angle between 20° and 60° and also near 110°, the impact risk would decrease greatly. The collision risk at different orbital altitudes could have a difference of above 10 times. At the orbital altitude of 1400km, the manned spacecraft would encounter most frequent collisions; however, at the orbital altitude of 200km, the number of collisions is reduced to 410881, a difference of two orders of magnitude. In addition, the operating attitude of the manned spacecraft also affects the impact risk against the orbital debris and the collision area. So adjusting the operating attitude of the manned spacecraft can reduce the threat of orbital debris.

Keywords manned spacecraft; orbital debris; risk assessment

收稿日期: 2009-08-12

基金项目: 爆炸科学与技术国家重点实验室基金项目(20080231)

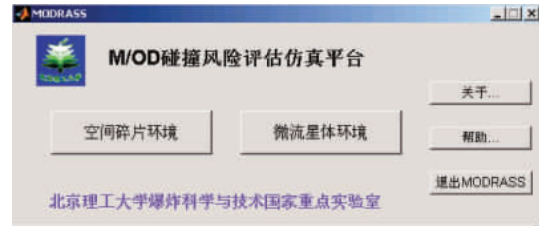
作者简介: 余庆波,博士研究生,研究方向为新概念弹药技术和航天器防护技术,电子信箱:bard217@sina.com;王海福(通信作者),教授,研究方向为新概念弹药与高效毁伤技术、常规战斗部技术及航天器失效机制与防护技术,电子信箱:wanghf@bit.edu.cn

0 引言

随着航天技术的迅速发展,空间环境日益恶化,流星体和空间碎片(M/OD)超高速碰撞成为威胁航天器安全在轨运行的重要因素^[1-5]。空间碎片与在轨航天器发生碰撞时,巨大的碰撞动能足以导致航天器结构破坏、功能失效甚至灾难性事故发生^[6-11],因此空间碎片碰撞风险仿真评估成为航天器设计中的关键技术。本文采用自主开发的空间碎片风险评估及防护系统(Meteoroid and Orbital Debris Risk Assessment and Shielding System, MODRASS),对某载人飞船遭遇空间碎片碰撞风险进行仿真。分析可知,当载人飞船形状一定时,影响载人飞船在轨风险的主要影响因素为载人飞船运行姿态、轨道倾角和轨道高度,因此本文针对此三要素进行研究,并获得了它们对载人飞船在轨风险的影响规律。

1 仿真平台

基于 Matlab-GUI 技术自主开发的 MODRASS 是一套具有良好用户界面的空间碎片风险评估及防护设计仿真软件,可运行于 Windows 98/2000/XP/Vista 等系统平台。MODRASS 集成了 ORDEM 2000 及 TrueGrid 等相关服务软件,可用于空间碎片/微流星体碰撞风险评估、空间碎片/微流星体失效风险评估、航天器建模、航天器防护结构有效性评估以及防护结构优化设计等。MODRASS 按空间环境划分为两大分系统:空间碎片环境和微流星体环境,其主框架如图 1 所示,用户界面如图 2 所示,图中只给出空间碎片分系统的用户界面,



(a) 主界面

(a) Main interface



(b) 空间碎片分系统

(b) Orbital debris subsystem

图 2 MODRASS 用户界面

Fig. 2 User interface of MODRASS

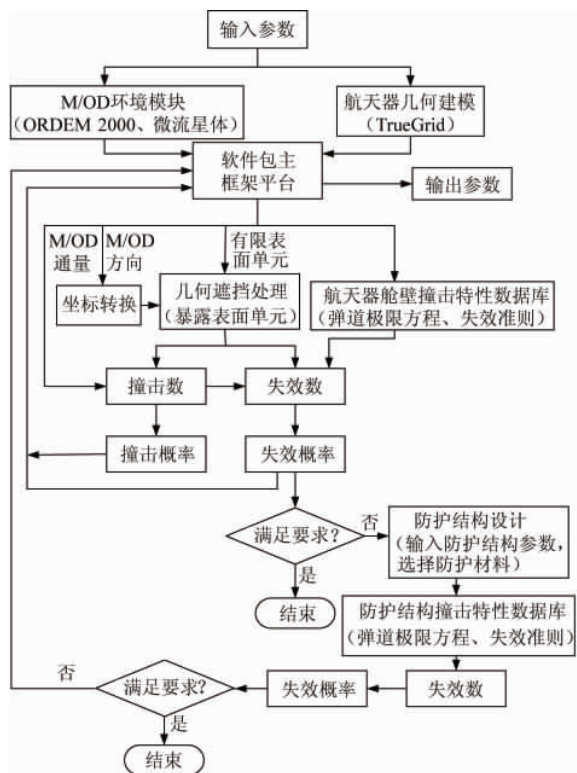


图 1 MODRASS 主框架

Fig. 1 Main framework of MODRASS

微流星体界面与空间碎片界面稍有不同,因篇幅限制,不再详述。

2 航天器建模

航天器建模是进行空间碎片碰撞风险评估的重要部分,直接影响仿真精度。在建立航天器模型时,首先应建立航天器几何模型,然后进行网格划分获得有限元模型。简化后的载人飞船几何模型如图 3 所示,采用 TrueGrid 进行网格划分的有限元模型如图 4 所示。综合考虑计算准确性与经济性,在满足计算精确的前提下,尽可能减少计算量,即减少网格

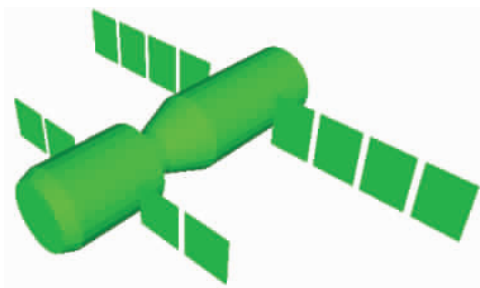


图 3 载人飞船几何模型

Fig. 3 Geometric model of manned spacecraft

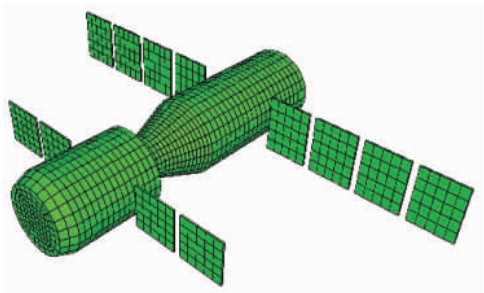


图 4 载人飞船有限元模型

Fig. 4 Finite element model of manned spacecraft

划分。本文对载人飞船采用主体部分较密,其他部分稍疏的方法进行网格划分,共计 2464 个网格。空间碎片环境数据采用美国宇航局 (NASA) 的 ORDEM 2000 空间碎片模型作为 MODRASS 的输入,主要分析大于 0.1mm 空间碎片对载人飞船的碰撞风险。载人飞船发射时间为 2009 年,在轨时间 1 年。

3 仿真结果和分析

3.1 运行姿态对碰撞数的影响

以大于 0.1mm 的空间碎片为例,通过仿真说明航天器运行姿态对碰撞数的影响。假设载人飞船运行轨道为国际空间站 (ISS) 所在轨道,对载人飞船 8 种不同运行姿态遭遇空间碎片碰撞风险进行分析。该轨道空间碎片分布如图 5 所示,仿真结果如图 6 所示,不同姿态下载人飞船遭遇空间碎片典型碰撞风险如图 7 所示。

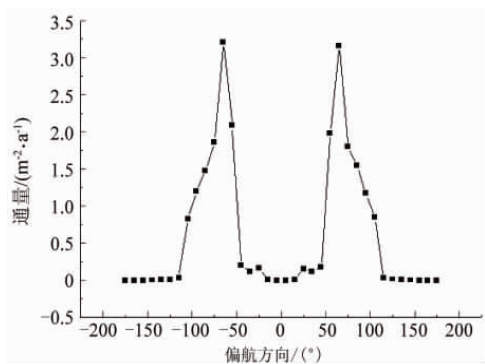


图 5 国际空间站所在轨道通量分布

Fig. 5 Flux distribution in the ISS orbit

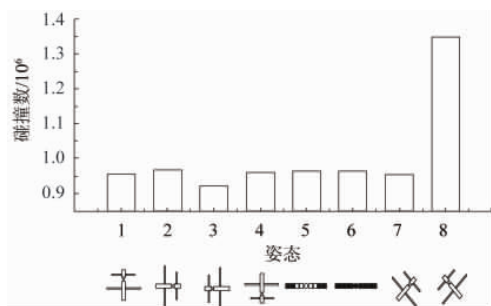
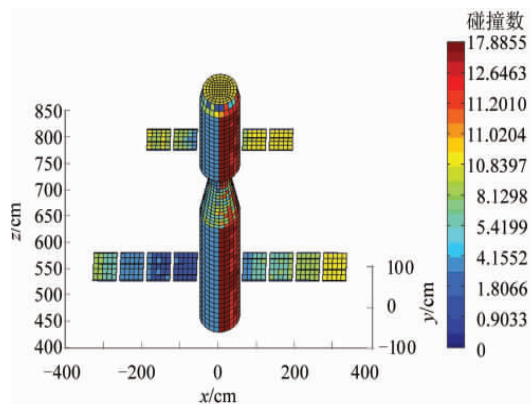


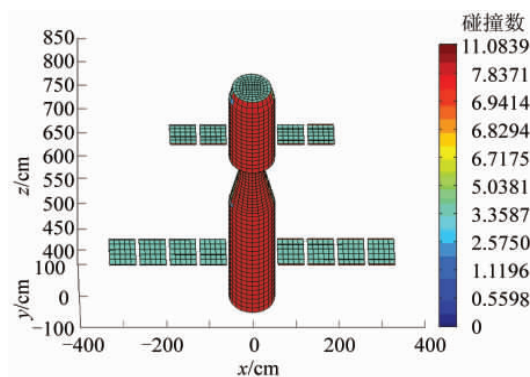
图 6 不同姿态下载人飞船遭遇空间碎片碰撞数

Fig. 6 Collision of manned spacecraft with OD in different attitudes



(a) 第 3 种姿态

(a) The third attitude



(b) 第 8 种姿态

(b) The eighth attitude

图 7 不同姿态下典型碰撞分布情况

Fig. 7 Typical collision distribution in different attitudes

从图 5 可以看出, 国际空间站所在轨道空间碎片主要分布在 $-50^{\circ} \sim -100^{\circ}$ 和 $50^{\circ} \sim 100^{\circ}$ 两个区域内, 而在其他区域内碎片通量分布基本为零, 即载人飞船的主要碰撞威胁来自这两个区域。由图 6、图 7 可知, 载人飞船以不同姿态运行时, 遭遇空间碎片碰撞风险不同, 且遭遇空间碎片碰撞的区域也出现明显变化, 因此可以通过调整载人飞船的运行姿态减小空间碎片威胁。根据风险评估结果, 对特定运行姿态下载人飞船采取针对性防护, 不仅能有效实现载人飞船防护任务, 同时可减少防护面积, 增大有效载荷。

3.2 轨道倾角对碰撞数的影响

针对高度为 400km、倾角为 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 范围内的轨道, 采用 MODRASS 对载人飞船遭遇空间碎片碰撞风险进行仿真。选取 20° 、 50° 、 80° 、 110° 、 140° 、 170° 等 6 种不同倾角的轨道进行仿真。不同倾角轨道空间碎片分布如图 8 所示, 仿真结果如图 9 所示, 不同倾角下载人飞船遭遇空间碎片典型碰撞风险如图 10 所示。

从图 8 可以看出, 不同轨道倾角上空间碎片通量分布不同, 在轨道高度为 400km 的轨道上, 空间碎片通量随着轨道倾角的变化而变化, 其主要变化趋势为空间碎片通量随着轨道倾角的增加而增加。由图 9、图 10 可知, 载人飞船在不同倾

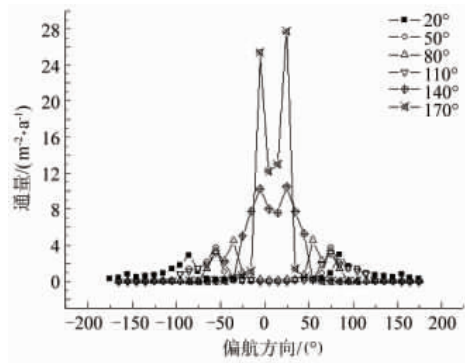


图 8 不同倾角轨道上空间碎片分布情况 ($\geq 0.1\text{mm}$)
Fig. 8 Distribution of space debris in different orbit inclination angles ($\geq 0.1\text{mm}$)

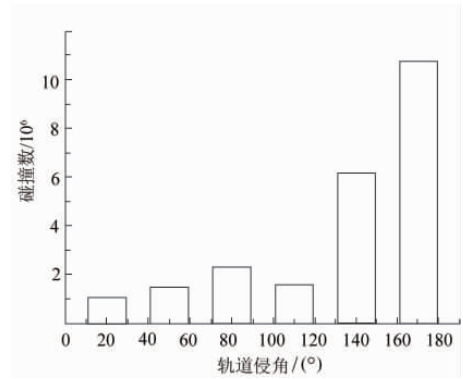


图 9 不同倾角轨道上载人飞船遭遇空间碎片碰撞数
Fig. 9 Collision of manned spacecraft with OD in different orbital inclination angles

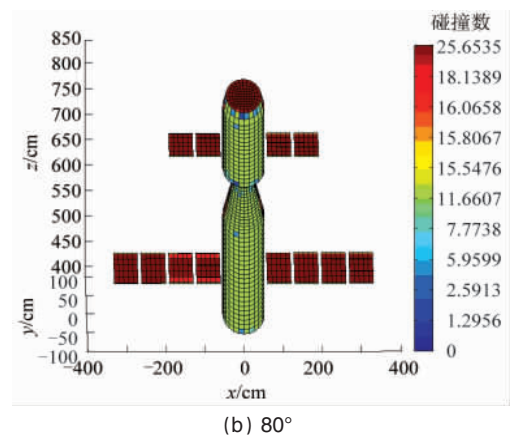
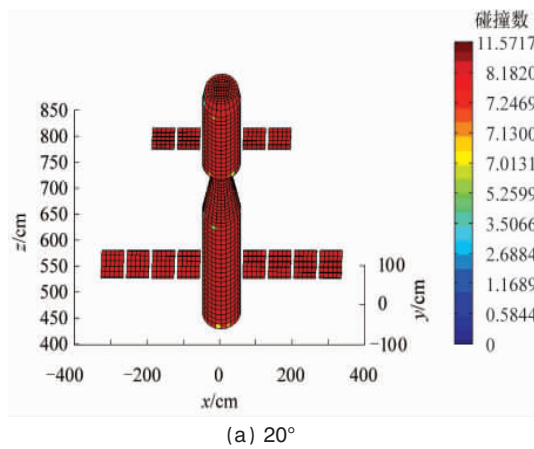


图 10 不同轨道倾角下典型碰撞分布情况
Fig. 10 Typical collision distribution in different orbital inclination angles

角的轨道上遭遇空间碎片碰撞风险不同,在倾角为 170° 的轨道上,载人飞船遭遇的碰撞数最多,达到了 10753719,而在倾角为 $20^\circ\sim 60^\circ$ 及 110° 左右的轨道上,载人飞船遭遇空间碎片碰撞的情况明显改善,仅为 170° 轨道的 $1/10$ 左右。因此在选择载人飞船轨道时,应选择该倾角区域的轨道。

3.3 轨道高度对碰撞数影响

采用 MODRASS 平台对轨道倾角为 51.6° 、轨道高度为 $200\sim 2000\text{km}$ 的载人飞船遭遇空间碎片碰撞风险进行仿真。典型轨道空间碎片通量分布情况如图 11 所示,不同轨道高度碰撞数如图 12 所示,典型碰撞分布情况如图 13 所示。

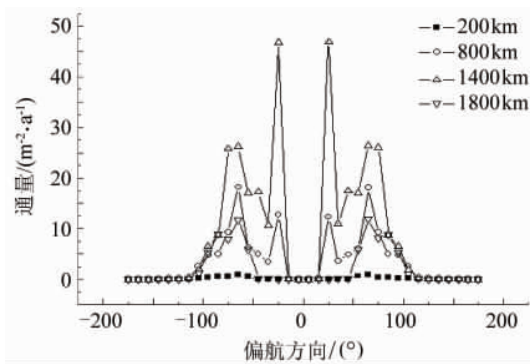


图 11 不同轨道高度空间碎片通量分布情况
Fig. 11 Flux distribution of MOD in different orbital altitudes

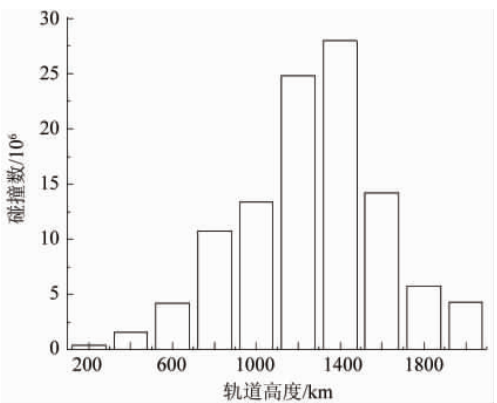


图 12 不同轨道高度碰撞数
Fig. 12 Collision in different orbital altitudes

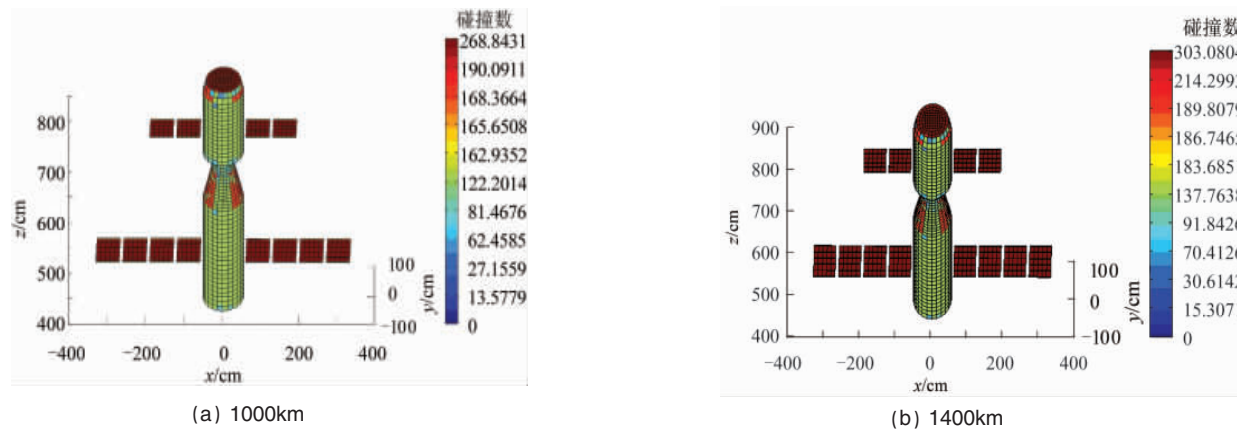


图 13 不同轨道高度上典型碰撞分布情况

Fig. 13 Typical collision distribution in different orbital altitudes

由图 11 可知,空间碎片主要集中分布在轨道高度为 800~1400km 上,其中 1400km 高的轨道上分布最多。而在偏航方向上,空间碎片通量较大的区域为 $-100^{\circ}\sim 100^{\circ}$,峰值出现在 $\pm 30^{\circ}$ 左右。由图 12、图 13 可以看出,载人飞船在不同轨道高度上遭遇空间碎片碰撞风险差异很大,在轨道高度为 1400km 时,载人飞船遭遇空间碎片碰撞数多达 27974511 个,而在轨道高度为 200km 时,载人飞船遭遇空间碎片碰撞数仅有 410881 个,相差两个数量级,因此在选择载人飞船运行轨道时,应避免如 1400km 轨道高度的空间碎片碰撞频发区,而选择相对发生碰撞较少的轨道高度。

4 结论

采用自主开发的 MODRASS 对载人飞船遭遇空间碎片碰撞风险进行仿真,获得了载人飞船运行姿态、轨道倾角以及轨道高度等对载人飞船遭遇空间碎片碰撞的影响特性。得到的主要结论如下。

1) 载人飞船运行姿态对载人飞船遭遇空间碎片碰撞有一定影响,可以通过调整载人飞船运行姿态减小空间碎片对载人飞船的碰撞风险。

2) 轨道倾角对载人飞船遭遇空间碎片碰撞风险影响显著,在高度为 400km 的轨道上,随着轨道倾角的增加,载人飞船遭遇的空间碎片碰撞数也明显增加。

3) 轨道高度是影响载人飞船遭遇空间碎片碰撞风险的重要因素,在倾角为 51.6° 轨道上,高度为 1200~1600km 的轨道区域是空间碎片碰撞的高发区域,在选择航天器运行轨道时,应尽量避免该区域。

参考文献 (References)

- [1] 王海福,余庆波,刘有英.空间碎片风险评估系统[J].北京理工大学学报,2008(12): 1039-1042.
Wang Haifu, Yu Qingbo, Liu Youying. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2008(12): 1039-1042.
- [2] Wang Haifu, Yu Qingbo, Liu Youying. Meteoroid and orbital debris risk assessment and shielding system [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2009(1): 6-10.

- [3] 刘有英,王海福,朵英贤.航天器防护结构弹道极限数值模拟[J].弹箭与制导学报,2005,25(4): 915-918.
Liu Youying, Wang Haifu, Duo Yingxian. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2005, 25(4): 915-918.
- [4] Liou J C, Christiansen E, Corsaro R, et al. ST9 solar sail—A potential meteoroid and orbital debris sensor [J]. *Orbital Debris Quarterly News*, 2005, 9(1): 6-7.
- [5] Wang Haifu, Liu Youying. Performance analysis of shield systems for spacecraft [C]//Proceedings of 2004 International Symposium on Safety Science and Technology. Shanghai, China, 2004: 3006-3009.
- [6] Hyde J, Bernhard R, Christiansen E. STS-114 Micrometeoroid/Orbital Debris (MMOD) post-flight assessment[J]. *Orbital Debris Quarterly News*, 2006, 10(3): 2-3.
- [7] Palmieri D, Faraud M, Destefanis R, et al. Whipple shield ballistic limit at impact velocities higher than 7km/s[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 26: 169-180.
- [8] Liu Youying, Wang Haifu. Corrugation stuffed shield for spacecraft and its performance [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2006, 15 (4): 397-400.
- [9] Christiansen E L, Kerr J H. Mesh double-bumper shield: A low-weight alternative for spacecraft meteoroid and orbital debris protection [J]. *Int J Impact Eng*, 1993, 14: 169-180.
- [10] Christiansen E L, Kerr J H. Ballistic limit equations for spacecraft shielding[J]. *Int J Impact Eng*, 2001, 26: 93-104.
- [11] 余庆波,王海福,王辉.在轨航天器空间几何遮挡算法 [J].科技导报,2009,27(16): 36-39.
Yu Qingbo, Wang Haifu, Wang Hui. *Science and Technology Review*, 2009, 27(16): 36-39.

(责任编辑 代丽)

本期推理小游戏答案

答案:李晓是工程师,王海是博士研究生,张庆是老板。

分析:由条件 2 可知,李晓不是博士研究生,而根据条件 3 也可以知道张庆不是博士研究生,所以王海是博士研究生。根据条件 1,王海的年龄比老板大,而条件 2 中王海比李晓小,所以李晓不是老板,那么张庆是老板,李晓是工程师。