文章编号：1001-1455(2014)04-0397-07 **DOI**：10.11883/1001-1455(2014)04-0397-07

蜂窝夹层板撞击极限方程预测能力的提升*

贾光辉，欧阳智江，蒋 辉
（北京航空航天大学宇航学院，北京 100191）

摘要：蜂窝夹层板撞击极限方程是空间碎片撞击航天器风险评估的关键技术，目前描述其预测能力的指标主要有总体、安全预测正确率和绝对、相对误差。基于 131 个蜂窝夹层板的实验数据，分别描述各个预测指标在方程系数空间的变化特征，并采用层次化思路进行方程预测指标提升的探讨。结果发现，进行方程优化时，预测概率型指标可精确优化，而预测误差型指标可快速优化；总体预测正确率作为首要预测指标可优先用于研究航天器的在轨防护特性，而安全预测正确率作为首要指标则可优先用于其设计安全性。

关键词：爆炸力学；预测误差；撞击极限方程；蜂窝夹层板；预测正确率；预测指标
中图分类号：O389 **国标学科代码**：1303599 **文献标志码**：A

在空间碎片超高速碰撞问题的研究中，撞击极限方程一直是最主要的研究内容之一，也是航天器空间碎片撞击风险评估失效判断的依据[1]。获取具有较高精度的撞击极限方程，是航天器防护结构安全性分析的重要保证，也是研究航天器遭受空间碎片超高速撞击后的损伤概率、进行航天器防护结构设计和优化的重要基础[2]。蜂窝夹层板结构具有轻质、比强度高、比刚度高、抗震、隔热、隔音等性能优点，在卫星板式结构中的应用可占 80%～90%，对卫星具有重要的作用[3]。

当前描述撞击极限方程的指标主要有两类：一类以预测概率为基础，如总体预测正确率和安全预测正确率；另一类则以预测错误的实验直径与方程预测直径之间的偏差为基础，如绝对预测误差、相对预测误差。撞击极限方程的误差对风险评估结果有很大影响[4-5]。为此，本文中，将对撞击极限方程的预测指标分别阐述，分析蜂窝夹层板撞击极限方程的各预测指标在方程系数空间的变化特征，以期为方程预测指标的提升提供参考。

1 蜂窝夹层板撞击极限方程及预测指标

1.1 蜂窝夹层板撞击极限方程简介

蜂窝夹层板的撞击极限方程初始主要通过修正 Whipple 结构的撞击极限方程获得[6]，如 Christiansen 撞击极限方程，在 1992 年以后就被频繁用于蜂窝夹层板碎片撞击的风险评估[7]。该方程由 3 个速度段函数组成，分别为弹道段、超高速段和由弹道段和超高速段线性插值得到的中速段（3 km/s$<v_n<$7 km/s）：

$$d_c=\left(\frac{t_w\ (\sigma/40)^{0.5}+t_b}{0.6\ (\cos\theta)^{5/3}\rho_p^{0.5}v^{2/3}}\right)^{18/19} \qquad v_n\leqslant 3\ \text{km/s} \tag{1}$$

$$d_c=\frac{3.918t_w^{2/3}S^{1/3}\ (\sigma/70)^{1/3}}{\rho_p^{1/3}\ (v\cos\theta)^{2/3}\rho_b^{1/9}} \qquad v_n\geqslant 7\ \text{km/s} \tag{2}$$

式中：d_c 为撞击极限方程的预测直径，v_n 为弹丸沿靶板法向的速度分量，v 为速度，θ 为撞击角度，t_b 为前板厚度，t_w 为后板厚度，ρ_b 为前板密度，ρ_p 为弹丸密度，σ 为面板屈服应力，S 为前后面板间距。

* **收稿日期**：2013-01-04；**修回日期**：2013-04-17
基金项目：国家空间碎片专题项目（K020110-1/3/6）
作者简介：贾光辉（1965— ），男，副教授，硕士生导师。

蜂窝夹层板的前后面板有铝合金材料和碳纤维复合材料(CFRP)两种类型,对 CFRP 面板,式(1)~(2)中 t_b 和 t_w 均采用等面密度的铝板厚度计算,即:$t_b=t_{b,CFRP}\rho_{CFRP}/\rho_{Al}$,$t_w=t_{w,CFRP}\rho_{CFRP}/\rho_{Al}$。

1.2 撞击极限方程预测指标简介

1.2.1 预测概率型指标

针对某类结构开展空间碎片的地面物理撞击实验时,可将总物理撞击实验个数记为 M,物理实验中包含且仅包含被撞击结构的未失效和失效两类情况。将未失效实验数据个数记为 M_{nf},失效实验数据个数记为 M_f,则有 $M=M_{nf}+M_f$。

引入方程预测正确的总个数 M'、方程预测正确的未失效个数 M'_{nf}、方程预测正确的失效个数 M'_f,则撞击极限方程对物理实验结果的预测概率型指标可表述为总体预测正确率和安全预测正确率:

$$P_t=\frac{M'_{nf}+M'_f}{M_{nf}+M_f}=\frac{M'}{M} \tag{3}$$

$$P_s=1-\frac{M_f-M'_f}{M_{nf}+M_f}=1-\frac{M_f-M'_f}{M} \tag{4}$$

显然,P_t 和 P_s 同时与未失效和失效数据相关,具有全局性特点,可统称为综合预测指标。

1.2.2 预测误差型指标

针对预测错误的数据进行误差描述,可进一步判别方程的预测能力和预测精度。

绝对误差型指标为:

$$S^2=\sum_{i=1}^{n}k_i\ (d_{ci}-d_i)^2 \tag{5}$$

式中:S^2 代表绝对误差平方和,k_i 代表方程预测第 i 个物理实验的精确性(当方程正确预测实验结果时 k_i 取 0,反之则取 1),d_i 代表物理实验给出的弹丸直径,d_{ci} 为方程预测所获得的临界弹丸直径。绝对误差平方和 S^2 是关于总体实验数据的平均值,其平方根即代表了绝对误差的大小。在预测率相同的前提下,若绝对误差越小,则撞击极限方程的预测精度就会越高。

相对误差型指标为:

$$f^2=\sum_{i=1}^{n}k_i\left(\frac{d_{ci}-d_i}{d_i}\right)^2 \tag{6}$$

相对误差平方和 f^2 是关于总体实验数据平均值,其平方根即代表了相对误差的大小。在预测率相同的前提下,若相对误差越小,撞击极限方程的预测精度也就越高。

2 预测指标在方程系数空间的分布

为便于分析,共调研获得 131 个采用 CFRP 面板的蜂窝夹层板撞击实验数据,其中有文献[8]的 55 个数据、文献[9]的 3 个数据、文献[10]的 35 个数据、文献[11]的 38 个数据。

由文献[12]可知,添加系数是提出新方程的一个简单思路。因此,分别在方程弹道段(式(1))和超高速段(式(2))等号右边乘以一个整体系数,并将该系数(包含低系数 λ_1 和高系数 λ_2)作为参数,相对于原方程(式(1)和式(2),其系数均为 1)设定新方程的系数变化范围为 ±100%(即为 0~2,精度取 0.001),则基于调研得到的 131 个实验数据,对系数采用穷举法自编程序,可计算预测指标在参数空间的量化结果。

图 1 为预测概率型指标在系数空间的等值线。指标 P_t 在系数空间的等值线分布以“同心”分层现象为主,系数太大或太小对应的 P_t 都比较小,当正确率大于 80%时,系数区间相对比较离散;而指标 P_s 在系数空间的等值线分布呈现“线性”分层特性,无明显的中心,其左下角区域的安全预测正确率可达 100%,即系数越大 P_s 越小。

图 2 为预测误差型指标在系数空间的等值线。指标 S^2 和 f^2 在系数空间的等值线的“同心”分层现象都很明显,且等值线比指标 P_t 和 P_s 更光滑,小误差区域都集中在中下部,即系数太大或太小对应的误差都比较大。

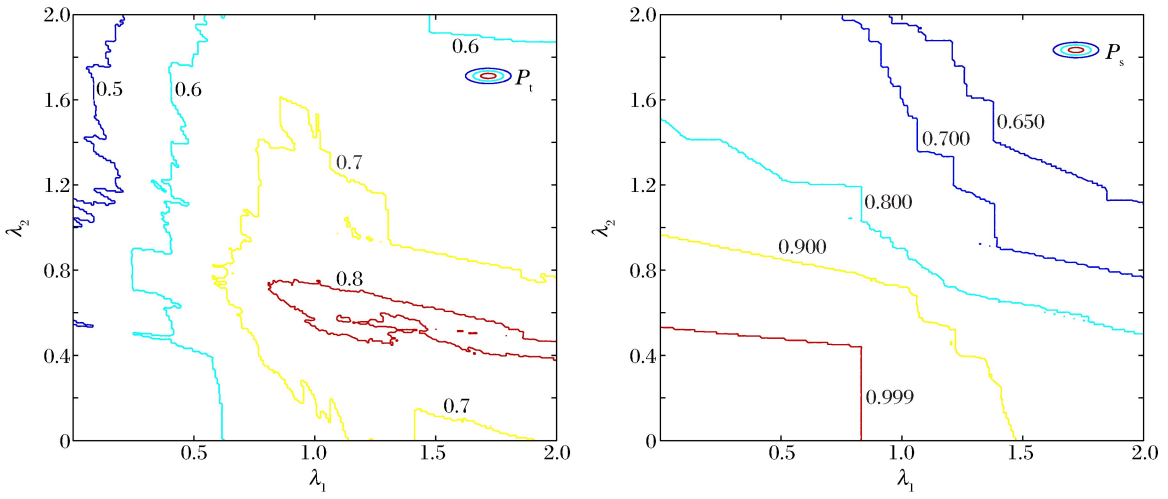

图 1　预测概率型指标等值线

Fig. 1　Contours of the predicted probability indicators

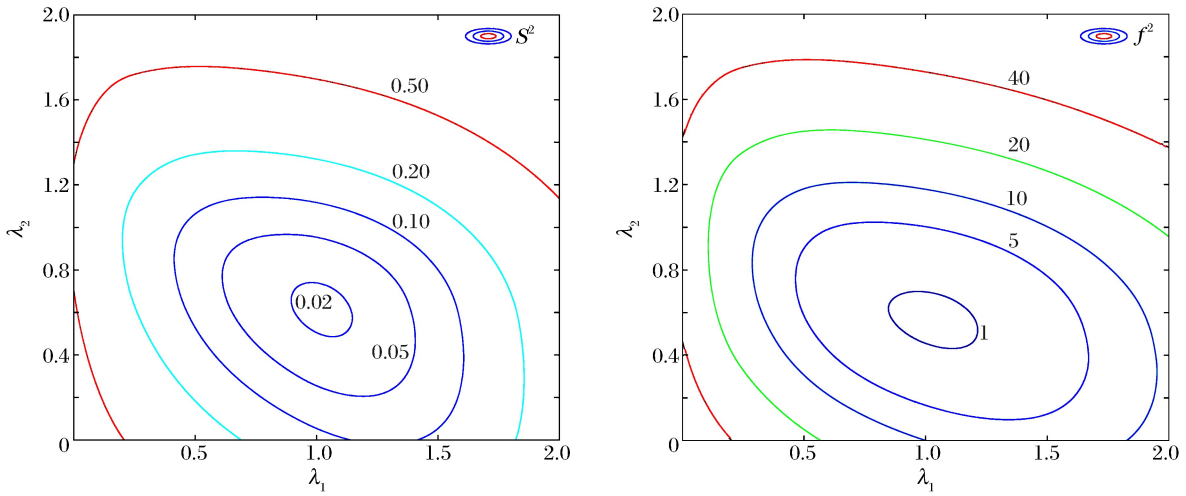

图 2　预测误差型指标等值线

Fig. 2　Contours of the prediction error indicators

3　方程预测能力的提升

3.1　提升途径的分析

上述两类预测指标，分别描述了撞击极限方程对物理实验数据的正误个数的预测结果以及错误预测时方程预测的临界直径与对应实验直径的偏差情况。若将预测概率型指标作为首要指标、预测误差型指标作为次要指标，可以在得到较高预测正确率的前提下，获得预测误差相对较小的撞击极限方程。而若将预测误差型指标作为主要指标、预测概率型指标作为次要指标，则获得的结果预测误差较小，但预测正确率可能较低。

预测概率型指标有 2 个，即 P_t 和 P_s；预测误差型指标也有 2 个，即 S^2 和 f^2。因此，可反映方程整体预测情况的指标有 P_t、P_s、S^2 和 f^2。由预测指标在方程系数空间的变化特征分析可知，P_t 或 P_s 的最高值可能不止一个，而 S^2 和 f^2 的最小值唯一。综合起来，预测概率型和预测误差型指标的排列组合、可能的预测指标体系序列见表 1。

根据表 1 中的三级预测指标体系，撞击极限方程建模寻优时应首先寻求一级指标最优的解集，然后在该集合中寻找二级指标最优的子集，最后在子集中寻求三级指标最优的解，作为撞击极限方程最终的建模结果。

表 1 预测指标体系列表

Table 1 List of predictor systems

体系	一级指标	二级指标	三级指标	体系	一级指标	二级指标	三级指标
1	P_t	P_s	S^2	4	P_s	P_t	f^2
2	P_t	P_s	f^2	5	S^2	—	—
3	P_s	P_t	S^2	6	f^2	—	—

3.2 提升方法的应用

采用穷举法获得的蜂窝夹层板撞击极限方程预测指标在其方程系数空间的变化特征，分别采用表 1 中的 6 个预测指标体系进行逐级寻优，可以对三级预测指标体系在方程待定参数求解方面的应用进行分析。

采用预测指标体系 1 和 2 进行分析，各指标在系数空间的等值线取较优值的局部放大图，如图 3 所示。由一级指标，最大 P_t 应在预测率为 84% 以内区域内；由二级指标，靠近左下角的 P_s 较高。则以一级指标为主、二级指标为次的最优解应在 P_t 为 84% 的下面区域内。由三级指标，越靠近 $S^2=0.02$（体系 1）或者 $f^2=1$（体系 2）区域中心点，预测误差会越小。经编程、得到最优结果为图 3 中的五角星点。

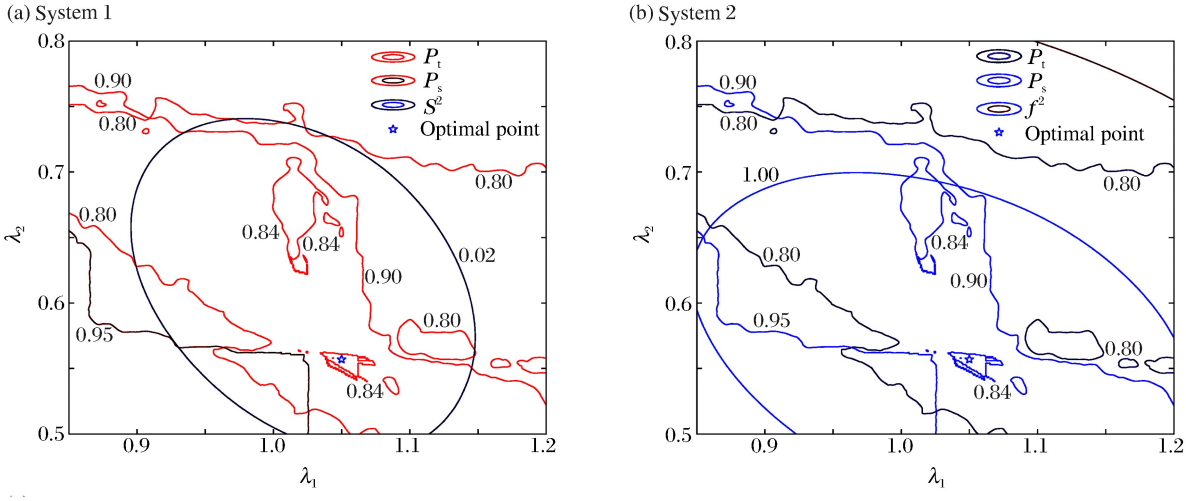

图 3 预测指标体系 1 和 2

Fig. 3 Predictor system 1 and 2

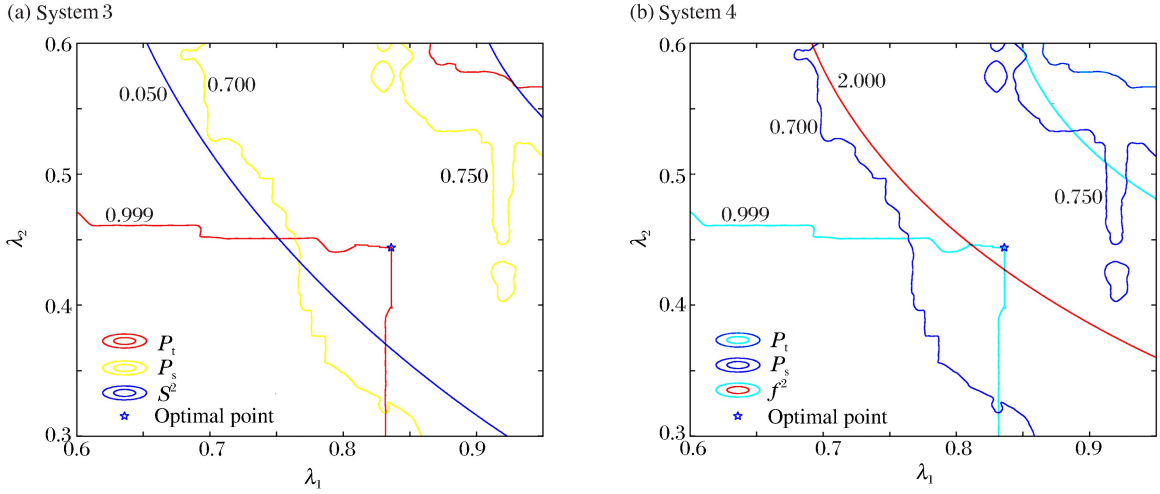

图 4 预测指标体系 3 和 4

Fig. 4 Predictor system 3 and 4

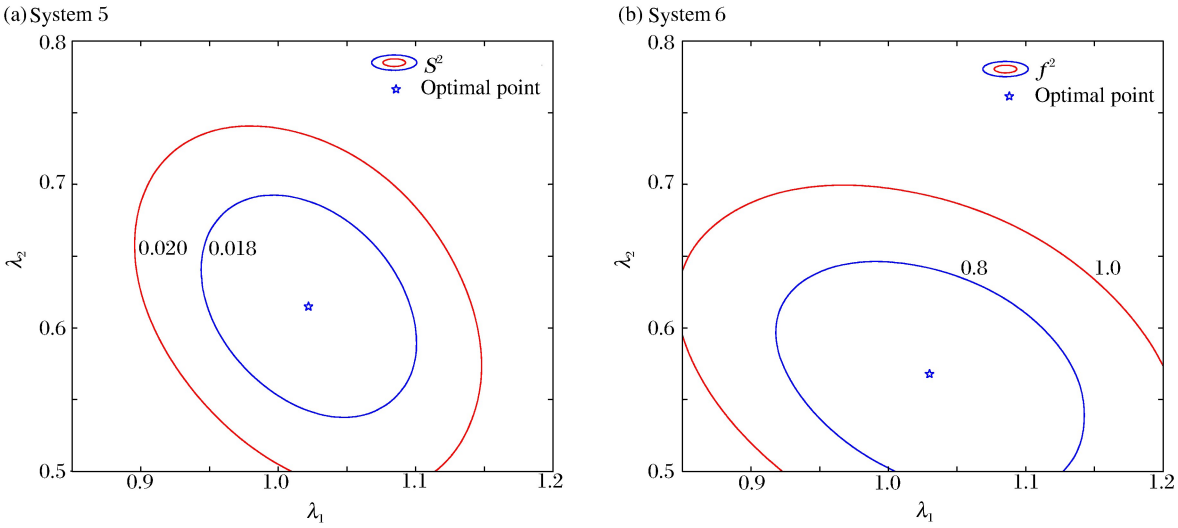

图 5　预测指标体系 5 和 6

Fig. 5　Predictor system 5 and 6

图 4 为预测指标体系 3 和 4 各指标在系数空间的等值线取较优值的局部放大图。由一级指标，最大 P_s 应在预测率为 99.9%以上的左下角区域；由二级指标，靠近中下部分的 P_t 较高。则以一级指标为主、第二级指标为次的最优解应在 P_s 为 99.9%以上的靠近中间的区域。由三级指标，靠近 $S^2=0.02$（体系 3）或者 $f^2=1$（体系 4）时，预测误差比较小，图 4 中的五角星点为最终的最优结果。

图 5 为预测指标体系 5 和 6 各指标在系数空间的等值线取较优值的局部放大图。由于预测指标体系 5 和 6 各只有一个指标，因此最优结果应在 $S^2=0.02$（体系 5）或者 $f^2=1$（体系 6）的中心位置，即图 5 中的五角星点。

3.3　提升结果的对比

通过计算，最终方程优化前与采用不同预测指标体系优化后的对比结果见表 2。

由表 2 可见，采用不同预测指标体系对蜂窝夹层板撞击极限方程进行优化后，P_t 和 P_s 全部提高，说明优化过程是从全局的角度提高方程的预测正确率；S^2 和 f^2 都减小了，说明优化过程趋于提升全局预测精度。

表 2　方程优化前后对比

Table 2　Comparison of the equations before and after optimization

体系	λ_1	λ_2	P_t/%	P_s/%	S^2	f^2
优化前	1.000	1.000	72	76	0.061 5	4.932 4
1	1.050	0.557	85	95	0.017 5	0.691 0
2	1.050	0.557	85	95	0.017 5	0.691 0
3	0.836	0.444	73	100	0.038 5	1.835 8
4	0.836	0.444	73	100	0.038 5	1.835 8
5	1.022	0.615	83	92	0.016 8	0.730 3
6	1.030	0.568	82	92	0.017 3	0.686 9

在本文所采用的实验数据[8-11]范围内，预测指标体系 1 和 2 优化得到的结果一致，说明预测概率型指标作为首要指标、预测误差型指标作为次要指标时，预测概率型指标对优化结果起主导作用，预测误差型指标对结果没有影响（预测指标体系 3 和 4 具有类似结论）。预测指标体系 5 和 6 优化得到的结果有所不同，预测误差的类型对优化结果有一定影响（系数、预测概率型指标以及预测误差型指标相差都在 10%以内）。

从全局的角度出发，对比预测指标体系 1～6 的优化结果发现，体系 1 和 2 比体系 3 和 4 的 P_t 高 12%而 P_s 低 5%，S^2 和 f^2 也都比较小，说明两类指标体系各有侧重点，体系 1 和 2 的优化结果适用于防护结构的工程预测，而体系 3 和 4 则可应用于防护结构的设计过程。体系 5 和 6 的优化结果相差不大，比体系 1 和 2 的 P_t 和 P_s 略低，说明在对方程精度要求不大的情况下，可以采用预测指标体系 5 或 6 对方程进行快速优化。

从表 2 中系数的优化结果发现，体系 3 和 4 相对比较独立，这是因为体系 3 和 4 中首先追求的是 P_s 的最高值，也就是对单边的失效数据的预测结果更重视；而体系 1 和 2 与 5(或 6)相对比较接近，这是由于主要关注的都是方程对全局数据的预测情况。理论上，P_t 越高，S^2 和 f^2 会越小，然而物理实验具有一定的随机性，总是存在个别的不可靠数据点，因此体系 1 和 2 与 5(或 6)往往不会在同一个点。由蜂窝夹层板撞击极限方程的特性可知，弹丸的撞击速度不同，其临界直径的变化也很大，导致 S^2 和 f^2 的最低点位置一般不会重合，也就说明体系 5 和 6 的优化结果一般不一样。

通过以上的对比说明，基于实验数据，在弹道段和超高速段分别添加系数，并根据需求的差异采用不同的预测指标体系全局综合优选，可以有针对性地提高撞击极限方程相应的预测能力。

4 结 论

通过分析蜂窝夹层板撞击极限方程的预测指标在其方程系数空间的表现特征，并采用不同预测指标体系提升方程的预测能力，结果发现：

(1)撞击极限方程的预测能力可采用预测概率型指标和预测误差型指标进行对比分析。

(2)基于实验数据，将蜂窝夹层板撞击极限方程参数化，并采用图示方法描述预测指标在方程系数空间的等值线，有助于更加直观地分析预测指标的特性。

(3)预测概率型指标能够精确进行方程的优化，而预测误差型指标可用于快速优化方程。

(4)在注重航天器在轨防护特性的情况下，总体预测正确率应作为一级预测指标；而在注重设计安全性的前提下，安全预测正确率可提升为一级指标。

参考文献：

[1] Christiansen E, Lambert M, Stokes H. IADC protection manual[Z]. Germany: Inter Agency Debris Committee, 2002.

[2] 袁俊刚，曲广吉，孙治国，等. 空间碎片防护结构设计优化理论方法研究[J]. 宇航学报，2007，28(2)：243-248.
Yuan Jun-gang, Qu Guang-ji, Sun Zhi-guo, et al. Optimization methodology for shield structure against space debris[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(2): 243-248.

[3] 徐福祥. 卫星工程[M]. 北京：中国宇航出版社，2002.

[4] 闫军，郑世贵，范晶岩. 弹道极限确定精度对空间碎片风险评估的影响[C]// 2007 全国结构动力学学术研讨会论文集. 南昌：中国振动工程学会结构动力学专业委员会，2007：309-313.

[5] Schonberg W P, Evans H J, Williamsen J E, et al. Uncertainty considerations for ballistic limit equations[C]// Proceedings of the 4th European Conference on Space Debris. Darmstadt: ESA Publications Division, 2005: 477-482.

[6] Christiansen E L. Design and performance equations for advanced meteoroid and debris shields[J]. International Journal of Impact Engineering, 1993, 14(1): 145-156.

[7] Drolshagen G, Borge J. ESABASE/debris-meteoroid/debris impact analysis technical description[Z]. ESABASE, 1992.

[8] Ryan S, Schaefer F, Destefanis R, et al. A ballistic limit equation for hypervelocity impacts on composite honeycomb sandwich panel satellite structures[J]. Advances in Space Research, 2008, 41(7): 1152-1166.

[9] Lambert M, Schäfer F K, Geyer T. Impact damage on sandwich panels and multi-layer insulation[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 26(1): 369-380.

[10] Taylor E A, Herbert M K, Vaughan B, et al. Hypervelocity impact on carbon fibre reinforced plastic/aluminium

honeycomb: Comparison with Whipple bumper shields[J]. International Journal of Impact Engineering, 1999,23(1):883-893.

[11] Schäfer F, Destefanis R, Ryan S, et al. Hypervelocity impact testing of CFRP/Al honeycomb satellite structures [C]// Proceedings of the 4th European Conference on Space Debris. Darmstadt: ESA Publications Division, 2005: 407-412.

[12] Schäfer F, Schneider E, Lambert M. Review of ballistic limit equations for CFRP structure walls of satellites[C] // Proceedings of the 5th International Symposium on Environmental Testing for Space Programmes. Noordwijk: ESA Publications Division, 2004: 431-443.

Promotion of prediction ability of impact limit equation on honeycomb sandwich panel*

Jia Guang-hui, Ou-yang Zhi-jiang, Jiang Hui

(*School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing* 100191, *China*)

Abstract: Impact limit equations of honeycomb sandwich panel are the key of risk assessment of the spacecraft's impact from space debris. At present, the indicators of prediction ability mainly are the rate of correctly prediction (including the total rate and the safe rate) based on the prediction probability, and prediction error (including the absolute error and the relative error) based on the deviation of diameter predicted. In order to improve the prediction ability of equations, the variation of each predictive indicator in coefficient space of the equations was described based on 131 experimental data of honeycomb sandwich panel from the literature. And hierarchical analysis was used to investigate the promotion of prediction indicators of the equations. The results show that, equation optimization lead to accurately optimization of indicators of prediction probability, quickly optimization of prediction error. The total rate of correctly prediction can be used in the study of spacecraft's in-orbit protective properties as the primary indicator, and the safe rate of correctly prediction can be used in the security evaluation of design as the primary indicator. The prediction ability of the optimized equation has been greatly enhanced compared with the original equation.

Key words: mechanics of explosion; prediction indicator; impact limit equation; honeycomb sandwich panel; rate of correctly prediction; prediction error

* Received 4 January 2013; Revised 17 April 2013

Corresponding author: Jia Guang-hui, jiaguanghui@buaa.edu.cn

(责任编辑　丁　峰)