

空间相机支杆组件的随机振动分析与试验研究

邹 艳^{1,2}, 吴清文¹, 董得义¹, 刘宏伟¹, 贾海涛^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所空间光学部, 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)



摘 要: 根据结构件随机振动的原理, 利用 MSC.NASTRAN 有限元分析软件, 对某空间相机碳化硅支杆组件进行了模态分析、随机激励下的加速度响应和峰值应力响应分析。研究了峰值等效原理在随机振动峰值应力预测上的应用, 并进行了相关的地面振动试验。依据试验获得结构阻尼, 修正有限元模型。将分析与试验数据进行了对比, 结果表明该工程分析方法和途径是合理可行的。

关键词: 随机振动; 有限元法; 加速度响应; 应力响应; 随机振动试验

中图分类号: V414 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2009) 16-5009-04

Research on Analysis and Test of Random Vibration on Tripodic Supporting Structure of Space Camera

ZOU Yan^{1,2}, WU Qing-wen¹, DONG De-yi¹, LIU Hong-wei¹, JIA Hai-tao^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: According to the theory of random vibration analysis on structure components, the modal analysis, acceleration response and peak value of stress response prediction for random vibration on a tripodic supporting structure of a space camera were conducted with MSC.NASTRAN finite element software. The peak value of stress response on random vibration was studied based on the peak value equivalent theory. The relative vibration test was done in the lab condition. Damp of the structure was obtained using the date of test, and the finite element model was corrected. The analysis and test results show that the method and technical route mentioned on response prediction for random vibration is reasonable and feasible.

Key words: random vibration; finite element method; acceleration response; stress response; random vibration test

引 言

星上载荷的随机振动来源于卫星所承受的随机激励。这种激励通过卫星外壳(或整流罩)和飞行器结构传到卫星上, 形成随机振动环境作用到卫星的各部位, 直接影响设备的性能和可靠性^[1]。

为考查星上载荷在随机振动环境中的可靠性, 需要进行相关的地面振动试验, 但试验的成本高、周期长、难度大, 所以必须寻求一种更加有效的办法对其可靠性进行考查^[2]。在国外, 1990 年 Thampi 和 Vidyasagar 采用有限元方法对某空间站舱段进行了随机振动分析^[1-3]; 在国内, 90 年代后才逐渐进行随机振动响应的专题研究, 并取得了进展^[4-6]。北京特种机电研究所就曾利用有限元法对再入飞行器主动段的随机振动和再入段的气动噪声进行了响应预示^[1,6]。利用有限元法, 计算在随机激励载荷作用下的结构响应, 并依此进行结构设计与优化, 可以并且已经取得了良好的结果。

本文针对某空间相机支杆组件的模拟件, 应用 MSC.NASTRAN 有限元分析软件, 进行了加速度和应力响应分析, 结合振动试验, 切实的考核结构在随机振动载荷下的承受能力。

1 随机振动响应分析相关原理

采用 MSC.NASTRAN 基础强迫运动的直接激励法, 分别在连接板底面施加三个轴向的单位频谱激励, 得到频率响应函数, 再根据输入的随机载荷谱, 用 MSC.NASTRAN 中的随机振动分析模块对频率响应结果进行后处理。依此能够获得结构在随机载荷作用下的加速度响应及应力响应的功率谱密度曲线和均方根值^[7]。

而通过大量的分析及相关试验发现, 考核结构强度时, 除了关心应力响应的均方根值外, 还需考虑随机振动过程中的峰值应力。我们从早期随机振动试验做法获得启发, 利用随机振动和正弦振动之间的峰值等效原则, 将随机振动中的峰值应力转化到正弦振动中来获取。

1.1 随机激励响应基本原理

对于单自由度线性系统受随机激励作用时, 其动力学方程为:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (1)$$

式中: m , c , k 分别为质量, 阻尼和刚度; $F(t)$ 为随机激励。

收稿日期: 2008-06-06

修回日期: 2008-08-08

作者简介: 邹艳(1983-), 女, 湖北公安人, 硕士生, 研究方向为光学精密工程中随机振动的响应预测; 吴清文(1968-), 男, 四川简阳人, 研究员, 博导, 研究方向为光学精密工程的 CAD/CAE 技术应用及热控制技术; 董得义(1979-), 男, 天津人, 硕士, 研究方向为 CAD/CAE 技术应用; 刘宏伟(1971-), 男, 吉林通化人, 硕士, 研究方向为 CAD/CAE 技术应用; 贾海涛(1982-), 男, 河北唐山人, 硕士生, 研究方向为有限元模型修正技术。

系统的传递函数 $H(\omega)$, 幅频特性 $|H(\omega)|$, 响应的自谱 $S_x(\omega)$, 响应的均方值 ψ_x^2 分别为:

$$H(\omega) = \frac{1}{k - m\omega^2 + ic\omega} \quad (2)$$

$$|H(\omega)| = \frac{1}{k\sqrt{(1-s^2)^2 + (2\zeta s)^2}} \quad (3)$$

$$S_x(\omega) = |H(\omega)|^2 S_F(\omega) \quad (4)$$

$$\psi_x^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |H(\omega)|^2 S_F(\omega) d\omega \quad (5)$$

其中: $s = \omega/\omega_0$, ω_0 为系统固有频率, $\zeta = c/2\sqrt{km}$ 为系统阻尼比, $S_F(\omega)$ 为激励谱。

对于线性弱阻尼系统 (当 $\zeta \ll 1$ 时), 由式(3)可知幅频特性曲线在 ω_0 附近有很尖的峰值, 则 $|H(\omega)|^2$ 有更尖的峰值。当 $S_F(\omega)$ 为较平坦形状时, 由式(5)知对 ψ_x^2 的贡献主要来自共振频率附近的小区间内, 因此可近似以 ω_0 处的激励谱 $S_F(\omega_0)$ 代替 $S_F(\omega)$, 亦即近似认为系统受到功率谱密度 $S_0 = S_F(\omega_0)$ 的白噪声激励。还可从式(4)看出, 即使 $S_F(\omega)$ 为较平坦的宽带, 但响应谱主要集中在 ω_0 附近的窄带内^[8]。

1.2 峰值等效原理

随机振动控制系统问世以前, 绝大部分的随机振动试验都是由正弦扫描振动试验代替的。模拟平稳随机振动环境的正弦扫描振动试验条件, 是基于模拟随机和正弦激励的响应及响应引起的破坏效果而得到的。其中二者的响应峰值等效决定了正弦扫描试验量级^[9]。

基础激励的单自由度系统, 其运动方程为:

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{x}_0) + k(x - x_0) = 0 \quad (6)$$

式中: x_0 为基础激励位移; x 为相应位移。

对正弦振动, 其响应的加速度峰值为:

$$\ddot{x}_{s\max} = Qa_s \quad (7)$$

式中: a_s 为正弦激励加速度峰值; Q 为放大因子。

对于窄带随机振动, 其响应的加速度峰值由 MILES^[1,10] 方程得:

$$\ddot{x}_{r\max} = 3\sqrt{\frac{1}{2}\pi f_n A Q} \quad (8)$$

式中: f_n 为系统固有频率; A 为固有频率处基础加速度的功率谱密度; Q 为动态放大因子; 系数 3 代表 3σ 的概率上限, 即超过该响应的概率为 0.26%。

由正弦和随机响应峰值等效有:

$$\ddot{x}_{s\max} = \ddot{x}_{r\max} \quad (9)$$

模拟随机振动的正弦激励的加速度峰值为:

$$a_s = \frac{\ddot{x}_{r\max}}{Q} = 3\sqrt{\frac{\pi}{2Q} f_n A} \quad (10)$$

式(10)为应力计算中随机振动峰值应力与 1g (即 1 个重力加速度) 频响应力最大值比较时的等效放大倍数。

本文中的模型近似为线性弱阻尼系统, 输入随机载荷谱为较平坦的宽带。依据上面的理论, 基于窄带随机的加速度峰值表达式, 以及依据峰值等效原则转化得到的正弦激励的

加速度峰值来计算随机振动应力响应峰值是可行的途径。

2 支杆组件的有限元模型

2.1 有限元模型描述

根据支杆组件简化后模拟件的几何模型建立结构的有限元模型, 如图 1 所示。碳化硅支杆组件模拟件包括: 支杆、上下框以及连接头。根据这些零件的特点主要采用六面体单元进行划分, 在个别拐角处采用楔形单元过渡, 该有限元模型共有节点 29,739 个, 体单元 16,850 个。

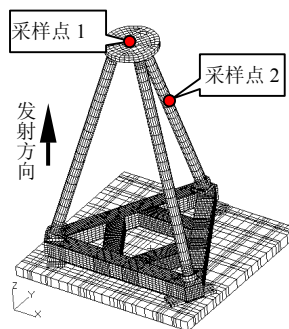


图 1 支杆组件有限元模型

2.2 阻尼选取及分析中采样点选取

结构阻尼对响应有重要的影响。考虑结构特征, 所用材料, 各构件间的连接关系, 依据经验, 初步确定 x , y 向的结构阻尼选择为 0.03, z 向的结构阻尼选择为 0.05。

依据预测危险部位及关心区域, 综合考虑结构特征 (如对称性), 振动试验中选择在顶盖中部, 及某支杆外侧中部稍偏上位置布置加速度传感器。对应振动试验中布置传感器的位置, 在理论分析中选择 7707, 482 号节点, 分别称之为采样点 1, 采样点 2, 位置见图 1。

2.3 材料属性

支杆组件由多个零件组成, 主要构件有底板、支杆、接头、上板等。材料属性见表 1。

表 1 材料属性

材料	密度 ρ 10 ³ kg/m ³	弹性模量 E MPa	抗拉强度 σ_b MPa	泊松比 μ
碳钢	7.81	196098	686	0.26
碳化硅	3.05	350000	350	0.17
碳纤维	1.6	90000	4900	0.3
不锈钢	7.9	184000	540	0.3
铝合金	2.8	66640	412	0.33

2.4 载荷及边界条件

施加如表 2 所示的随机振动载荷谱, 输入总均方根加速度值 6g, 振动试验中持续时间 2min。

表 2 随机振动输入条件

频率范围(Hz)	20—100	100—600	600—2000
PSD	3dB/oct	0.044g ² /Hz	-12dB/oct

在方案设计阶段安排的地面振动试验中,设计的夹具(连接板)及试验时支杆模拟件的固定方式见图 2。理论分析时将连接板与支杆组件一起分析,并依据振动试验中模型约束的螺钉孔位置,在分析时约束连接板与振动台连接的点,具体位置见图 3。

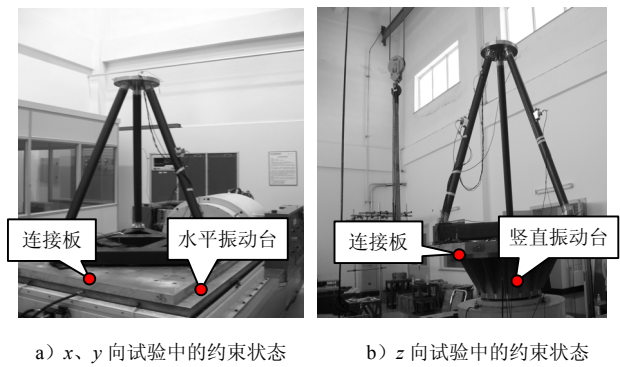


图 2 试验中支杆组件边界条件

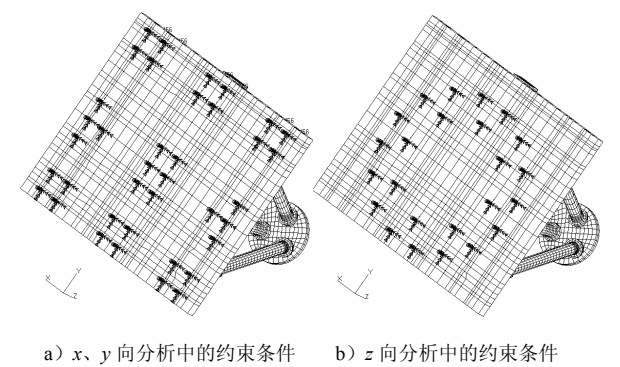


图 3 分析中支杆组件边界条件

3 理论计算结果与试验验证

3.1 模态分析

考核结构动态刚度特性,首先需要进行模态分析。分析与试验结果及其对比见表 3。从表中可以看出工程分析得到的三个方向结果与试验吻合的都很好,在工程分析允许误差 10%的范围之内。导致这一误差的主要原因分析如下:1)分析建模时适当的简化(如倒角,孔等处的简化)导致计算模型与试验模型质量上的偏差;2)计算模型的输入参数与实际参数的数据差带来的模型计算误差,如材料属性,该模型中对复合材料碳纤维的处理等;3)计算模型对实际模型在连接刚度上的模拟存在偏差,如螺钉连接的简化及对模型中多处胶粘的处理等。

表 3 模态数据

坐标轴	工程分析 (Hz)	试验测试 (Hz)	相对误差
x	124	117	6.0%
y	124	117	6.0%
z	272	267	1.9%

3.2 随机振动响应分析

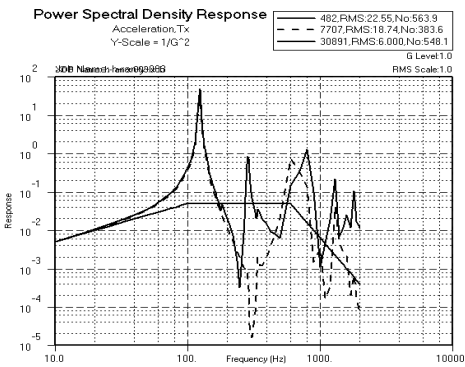
3.2.1 加速度响应分析

模态分析结果显示 z 向基频相对较高,故结构在随机振动载荷作用下,重点考察了 x, y 向的响应情况。各采样点在分析和试验中的加速度响应曲线如图 4 所示。分析曲线给出了采样节点和某一激励节点的响应情况;试验曲线给出了采样点处传感器通道,控制通道,及三个激励限制通道的信号曲线。

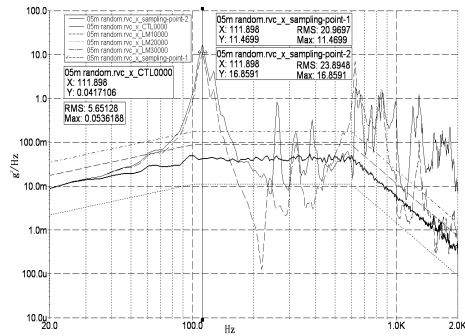
试验中,加载达到量级后激励会在输入要求的 6g 附近浮动,而给出试验曲线为停机时刻的响应状态。由图 4 中控制通道的响应知激励加载正确。比对分析与试验曲线可知,二者曲线形状近似,特别是在一阶频率处吻合较好,只是结构经过了多次振动激励作用,一阶频率下降了约 5Hz。

将分析与试验的加速度响应数据进行对比分析,见表 4。从表中可以看出,采样点处的误差均为负值,也即分析结果均较试验值偏小,分析体现出一定的保守性,其主要原因分析如下:1)在建模过程中,对实际模型连接刚度的模拟偏高;2)阻尼选取偏大。

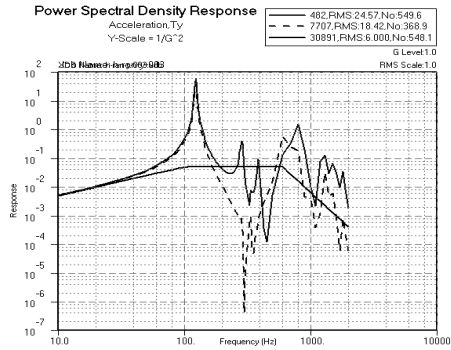
阻尼的初始选择是经验值 0.03,而通过实际模型在 0.2g 振动扫描试验的结果,采用半功率法计算得 x 向阻尼为 0.022, y 向阻尼为 0.017。由于该系统近似为线性系统,忽略非线性阻尼因素,将 0.2g 扫频所得阻尼值作为模型的结构阻尼输入参数,对模型修正后进行动力学分析。将修正后的计算值与试验值比较,见表 5。从表 5 中可以看出,模型修正后的结果与试验结果更接近了,说明了修正的有效性。



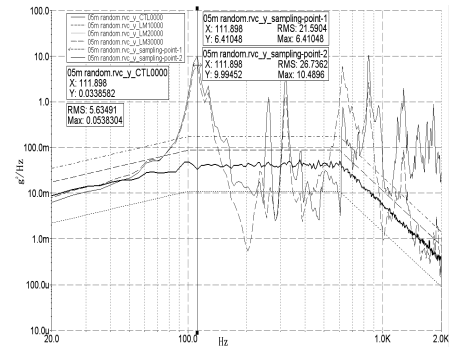
a) 分析中 x 向加速度响应曲线



b) 试验中 x 向加速度响应曲线



c) 分析中y向加速度响应曲线



d) 试验中y向加速度响应曲线

图 3 加速度响应曲线

表 4 模型修正前的加速度响应

采样点	考察值	x 向		y 向	
		Arms(g)	放大倍数	Arms(g)	放大倍数
1	分析	18.70	3.12	18.40	3.07
	试验	20.97	3.50	21.59	3.60
	误差	-10.83%		-14.77%	
2	分析	22.60	3.77	24.60	4.10
	试验	23.90	3.98	26.74	4.46
	误差	-5.44%		-8.00%	

表 5 模型修正后的加速度响应

采样点	考察值	x 向		y 向	
		Arms(g)	放大倍数	Arms(g)	放大倍数
1	分析	19.80	3.46	21.60	3.77
	试验	20.97	3.50	21.59	3.60
	误差	-5.6%		0.04%	
2	分析	24.10	4.20	28.80	5.03
	试验	23.90	3.98	26.74	4.46
	误差	0.8%		7.7%	

3.2.2 应力响应分析

结构的应力响应计算情况见表 6；x、y 向做 1g 频响分析时碳化硅支杆部分的应力云图见图 5。将随机振动下的峰值应力转化到正弦振动中获取，最重要的一点就是计算峰值等效放大倍数，可由式（10）计算得，其中： $f_n=124\text{Hz}$ ， $A=0.044\text{g}^2/\text{Hz}$ ， $Q=1/0.03$ （0.03 为试验前结构阻尼未知时的经验值）。获得随机振动的峰值应力后，将其与材料的许用应力比较，进而判断结构的可靠性。参考 1g 频响应力云图获

得结构在随机激励下的应力分布情况，预测结构薄弱部位。

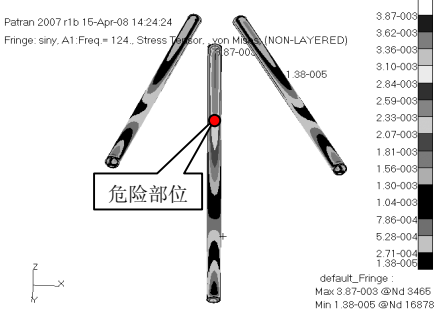
在随机振动试验结束后，检查结构并进行 0.2g 回扫，结果显示结构完好无损，证明该结构能经受此动力学环境的考验。理论分析的安全性预测结果与试验结果一致。

表 6 应力响应

方向	峰值等效放大倍数	1g 频响最大应力 (MPa)	随机振动峰值应力 (MPa)	安全性预测
x	1.52	35.22	53.53	安全
y	1.52	37.96	57.71	安全



a) y 向应力云图



b) x 向应力云图

图 4 1g 加载下的应力响应云图

4 结论

利用 MSC.NASTRAN 有限元分析软件，依据实体结构，重点考察结构的连接关系及边界条件，建立有限元模型并完成模态及随机振动响应分析，还进行了相关的地面振动试验，并对计算结果与试验结果进行了对比分析。

得出结论如下：

- a) 模态分析结果与试验扫频结果基本一致，说明该有限元模型可靠有效；
- b) 随机振动加速度响应的分析结果与试验结果基本一致，特别是调整阻尼后分析与试验结果更加接近，说明阻尼的计算方法是可行的；
- c) 对于结构在随机激励下的峰值应力响应研究，文中只是定性的给出了结论，即分析计算的安全性预测与试验后结构无损伤的结果一致性说明，将随机振动的峰值应力转化到正弦振动中获取的方式是有效的，下一步工作可以量化的对随机振动应力响应进行更深入的研究。

采用分解算法,设备的使用确定后,需要确定相应操作任务的批量的值,以使目标函数最优。根据设备分配约束,在任意时刻,任何闲置设备只能开始一个加工作业,并且在任意时刻任何一个未加工的作业都不能中断一个正在加工的作业,0-1 变量 X_{it} 中至多有 $i \cdot H = 20$ 个非零,从而相应子问题的连续变量 B_{it} 至多有 20 个需要确定,其余为零,子问题的规模降低一半以上,原模型与连续子规划的变量数与约束数目对比在表 4 中列出。由于此问题中连续子优化问题是线性的,可以调用 MATLAB 或 LINGO 的线性规划函数方便快捷地求得此设备使用情况下的最优解,最终分解算法求得的最好解为 1567.5。

表 3 算法性能对比

ALGORITHM	Optimal	Computation
Branch and Bound	1526	2^{16} nodes
Searching Algorithm	1516	800×30 points
Variable separation	1567.5	100×30 sub-problems

表 4 MIP 和子问题的变量和约束数目对比

	MILP	Sub-LP
Number of integer variables	40	
Number of continuous variables	40	≤ 20
Number of middle variables	20	20
Number of constraints	112	≤ 35

4 结论

在多目的间歇生产调度形成的 0-1 混合整数规划模型中,存在 0-1 变量的竞争约束,且 0-1 变量和部分连续变量具有对应关系,若 0-1 变量取零则与之相对应的连续变量可以不必考虑。将优化问题分解为 0-1 变量的组合主问题和连续变量的子优化问题,主、子优化问题的规模减至原问题的一半甚至更小。而 0-1 变量的竞争约束将 0-1 变量分成不相关的组,利用分组遗传算法,其特殊的适应分组问题的编码方式使产生的 0-1 变量解均满足竞争约束。在一组确定的 0-1 变量取值下的连续子优化问题中,与取值为零的 0-1 变量相应的连续变量不必考虑,约束也得到简化,可以采用较成熟的中小规模算法。从计算复杂度角度进行的分析表明,当求解算法的复杂度 $O(f(\cdot))$ 的函数增长速度大于 2^n 的增长速度,且连续变量个数 m , 0-1 变量个数 n 均大于阈值 ξ 时,

(上接第 5012 页)

参考文献:

- [1] 韩增尧,曲广吉. 航天器宽带随机振动响应分析[J]. 中国空间科学技术, 2002, 2(1): 24-30.
- [2] 毛国斌. 某航天器姿态控制机组随机振动响应分析[J]. 上海航天, 2007, (3): 54-57.
- [3] Thampi S K, Vidyasagar S N. Random vibration analysis of space flight hardware using NASTRAN [K]. USA: GE Government Services.
- [4] 徐孝诚,王成华,韩增尧. 再入飞行器复杂结构随机振动响应分析研究[J]. 强度与环境, 2002, 9: 1-4.

分解算法可以极大地降低求解的计算量。以典型多目的间歇生产调度 0-1MIP 模型进行的仿真实验也说明,分解算法可以较大地降低实际运算的规模和求解难度,提高求解问题的速度和效率。

参考文献:

- [1] Pantelides C C. Unified frameworks for optimal process planning and scheduling [C]// The Second Conference on Foundations of Computer Aided Operations. Colorado: CACHE Publications, 1994: 253-274.
- [2] Pan Ming, Qian Yu, Li Xiuxi. A new milp model for scheduling of sequential multipurpose batch plant [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (S0438-1157), 2006, 57(4): 861-866.
- [3] Zeng SY, Kang LS, Ding LX. A new method of evolutionary algorithm for mixed integer nonlinear optimization problem [J]. Journal of Wuhan University (Nat Sci Ed) (S0253-9888), 2000, 46(5B): 554-558.
- [4] 王涛,李歧强. 基于空间收缩的并行演化算法[J]. 中国工程科学, 2003, 5(3): 57-61.
- [5] 杨维. 现代优化算法及其应用研究[D]. 山东: 山东大学, 2004.
- [6] Falkenauer E. The Grouping Genetic Algorithms-Widening the Scope of the Gas [J]. Belgian Journal of Operations Research Statistics and Computer Science (S0770-0512), 1993, 33(1): 79-102.
- [7] 陈志平,徐宗本. 计算机数学—计算复杂性理论与 NPC、NP 难问题的求解[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 68-96.
- [8] Cook S A. The complexity of theorem-proving procedures [C]// Proceedings of the 3rd Annual ACM Symposium on Theory of Computing. New York, USA: ACM Press, 1971: 151-158.
- [9] Kondili E, Panteledes C C, Sargent R W H. A general algorithm for short-term scheduling of batch operations - MILP formulation [J]. Computers and Chemical Engineering (S0098-1354), 1993, 17(2): 211-227.
- [10] Kennedy J, Eberhart R C. A discrete binary version of the particle swarm algorithm [C]// Proceedings of the World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1997: 4104-4109.
- [11] Shi Y, Eberhart R C. Parameter selection in particle swarm optimization [C]// Proceedings of the 7th Annual Conference on Evolutionary Programming. New York, USA: Springer, 1998: 591-600.
- [12] 董颖,唐加福,许宝栋,汪定伟. 一种求解非线性规划问题的混合粒子群优化算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2003, 24(12): 1141-1144.

- [5] 韩增尧. 弹头再入气动噪声响应研究[D]. 硕士论文, 1996.
- [6] 韩增尧,徐孝诚. 再入飞行器在气动噪声作用下的响应分析[J]. 导弹与航天运载技术, 1997, 225: 1-6.
- [7] 隋允康,杜家政,彭细荣. MSC.NASTRAN 有限元动力分析与优化设计实用教程[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [8] 刘延柱,陈文良,等. 振动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [9] 柯受全,金炯叔,等. 卫星环境工程和模拟试验(下)[M]. 北京: 宇航出版社, 1996.
- [10] Harris C M, Crede C E. Shock and Vibration Handbook [K]. 2nd Edition. USA: McGraw Hill Book Company, Inc., 1976.