

文章编号:1674-8190(2013)03-299-07

壳体动响应阻尼系数的 ALE 数值反演研究

刘超, 孙秦

(西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

摘要: 圆柱壳体作为航空航天工程中的主要结构构形, 对其在空气中运动的阻尼特性进行研究具有重要意义。首先运用有限元软件 LS-DYNA 的任意拉格朗日欧拉算法 (Arbitrary Lagrangian-Eulerian, 简称 ALE) 模块对不同几何尺寸的圆柱壳体在空气中的运动历程进行动响应计算分析, 并通过不同尺度大小空气域对数值计算的准确性进行验证; 然后采用粘性阻尼模型模拟空气作用, 用 Isight 优化软件进行最佳逼近, 反演出与空气对圆柱壳体作用等效的质量阻尼系数和刚度阻尼系数, 并应用于加筋模型和缩小尺寸模型进行验算。结果表明: 用反演系数计算的结果和 ALE 结果吻合良好, 质量和刚度的改变对阻尼系数没有明显影响。

关键词: 有限元方法; 圆柱壳体; 动响应; ALE; 阻尼特性

中图分类号: V214.3⁺6

文献标识码: A

ALE Numerical Inversion Research on Damping Coefficients of Shell's Dynamic Response

Liu Chao, Sun Qin

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Cylindrical shell plays an important role in aerospace engineering, and it is of great significance to research on damping characteristics during its motion in the air. Firstly the dynamic responses of cylindrical shells are analyzed using the Arbitrary Lagrangian-Eulerian(ALE) finite element method in LS-DYNA software, and the validity of the model is verified. Then the equivalent damping coefficients of the system are obtained using inversion method by the Isight software, which are verified by comparing with corresponding models. The results indicate that the inversion damping coefficients can be used to replace the ALE method in simulating cylindrical shell's motion in the air, while the stiffness and mass are of little effect on damping coefficients.

Key words: finite element method; cylindrical shell; dynamic response; ALE; damping characteristics

0 引言

圆柱壳体结构广泛应用于航空航天结构中^[1]。圆柱壳体在空气中运动时, 空气会对结构产生阻力, 消耗结构运动的能量。准确计及这种空气的阻尼作用时, 一般可以使用流固耦合^[2-3]算法, 该计算方法不仅可以得到结构的动态响应, 还能得到大气环境的动态变化, 但流固耦合数值计算相当耗时

间; 而若知道气动阻尼参数, 则可应用结构动力学数值方法, 仅对结构动态过程予以计算, 获得结构的动态行为控制与设计。因此, 获取空气对结构运动的阻尼参数很有必要。

本文首先采用 LS-DYNA^[4] 软件的 ALE 流固耦合^[5-7] 算法模块对不同几何尺寸的圆柱壳体结构进行空气中的结构运动响应分析, 通过取不同大小的空气域尺度对数值计算的准确性进行验算, 并以此作为结构的标准响应数值; 再建立结构动力学有限元模型并进行数值计算, 取标准数值中的时空离散点数值, 依据最小二乘原理, 对动力学模型中的阻尼参数用 Isight 优化软件^[8] 进行最佳逼近反演,

收稿日期: 2012-10-12; 修回日期: 2012-12-13

通信作者: 刘超, liuchao060010@163.com

最终获得高精度结构动力学模型的粘性阻尼系数(质量阻尼系数和刚度阻尼系数)。

1 动力学算法概述

LS-DYNA 在计算流固耦合问题时一般采用 ALE^[9] 算法。该算法采用结构域的 Lagrange 网格和大气区域的 Euler 网格,并按时程步长在两种算法间进行自动重分区,采用伴随重映射(即对流过程)的 Lagrange 时间步概念,空间网格中则采用以下三种方法之一来实现对流过程:①对于合适的网格变形不进行重新分区;②由于严重的网格变形,执行重分区以恢复至初始形状;③执行重分区至更为合适的网格形式,且保持网格的拓扑形不变。即 ALE 列式先执行一个或几个 Lagrange 时步计算,此时单元网格随材料流动而产生变形,然后执行 ALE 时步计算:①光滑步,保持变形后的物体边界条件,对内部单元进行重分网格,网格的拓扑关系保持不变;②对流步,将变形网格中的单元变量(密度、能量、应力张量等)和节点速度矢量传输到重分后的新网格中。这样就可以将 Euler 网格与全 Lagrange 有限元网格方便地耦合起来,以处理流体与结构在各种复杂载荷条件下的相互作用问题。在 ALE 算法应用中,结构运动本身并不考虑阻尼力的作用,而由对空气流体的计算获得与结构变形及其速度耦合的外部作用力,即结构运动的外部阻尼力。

引入粘性阻尼求解结构动力响应的有限元离散化数值计算方程为

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = Q \quad (1)$$

式中: M 为质量矩阵; C 为阻尼矩阵; K 为刚度矩阵; Q 为作用于结构上的等效节点载荷列阵; U 为位移向量; \dot{U} 为速度向量; \ddot{U} 为加速度向量。

结构在空气中运动时,结构运动能量的消耗主要来自空气对结构的阻尼力作用,该阻尼力大小一般与振动速度幅值成正比,而方向与振动速度方向相反^[10]。该阻尼模型为粘性阻尼模型,是工程中应用最广泛的阻尼模型,能较好地模拟空气、水等流体对结构的耗能作用^[11-12]。实际分析中,要精确确定阻尼矩阵相当困难,通常将实际结构的阻尼矩阵简化为质量矩阵和刚度矩阵的线性组合,即

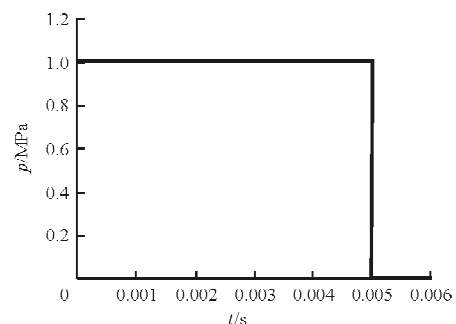
$$C = \alpha M + \beta K \quad (2)$$

式中: α 为质量阻尼系数; β 为刚度阻尼系数。 α 和 β 是不依赖于频率(速度)的常数,在 LS-DYNA 中应用关键字 * DAMPING_PART_MASS 和 * DAMPING_PART_STIFFNESS 来定义。LS-DYNA 中的质量阻尼(mass damping)用于抑制低频的结构振动模式,也有抑制刚体模式的效应;刚度阻尼(stiffness damping)主要抑制高频的数值振荡^[13]。

2 ALE 耦合模型与计算结果

一般情况下,计算流体力学空气域的尺度是结构尺度的 10 倍时,即可认为流场的边界效应对计算精度影响很小。但对于流固耦合瞬态响应分析,其计算量将变得非常大,为减小成本,本文对 5 倍空气域流场进行对比分析,以此减小计算量。首先采用 5 倍空气域作为初始计算模型,再用 10 倍空气域模型对其结果的有效性进行验证,之后采用加筋结构和几何尺寸缩小后的模型验证刚度改变对阻尼参数的影响。

模型 1 采用 5 倍空气域,为初始计算模型,包括圆柱壳体和空气域两部分。圆柱壳体直径为 1 600 mm,高度为 2 500 mm,厚度为 15 mm。有限元节点数为 441 个,四边形壳单元数量为 400 个。材料选用铝,密度为 $2.7 \times 10^{-9} \text{ t} \cdot \text{mm}^{-3}$,泊松比为 0.3,弹性模量为 70 000 MPa。空气域的尺寸为 8 000 mm × 8 000 mm × 12 000 mm,采用变尺度网格, solid164 六面体实体单元,节点数为 337 392 个,单元数为 322 770 个。数值计算采用形心单点积分的 ALE 算法。加载方式为在圆柱壳体两对称侧边上加载 1 MPa 的阶跃推力,作用时间 5 ms,如图 1 所示,节点 1 为圆柱壳体底端右端点。



(a) 载荷作用时间

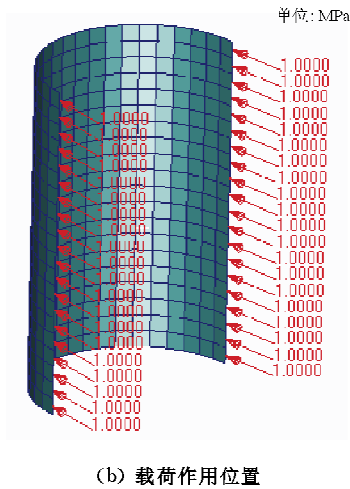


图 1 载荷条件及作用位置

Fig. 1 Load condition and acting position of load

模型 2 采用 10 倍空气域,目的是通过取不同空气域尺度大小对数值计算的准确性进行验算。空气域的尺寸为 16 000 mm × 16 000 mm × 24 000 mm,采用发散式网格,节点数为 1 081 584 个,单元数为 1 048 207 个。其材料属性和加载情况与模型 1 相同。

模型 3 为横向加筋结构,目的是验证质量和刚度改变对阻尼参数的影响。在模型 1 的圆柱壳体上,沿高度方向平均分布三个高度为 50 mm,厚度为 2 mm 的矩形剖面环向加强筋,其他条件与模型 1 相同。

模型 4 为几何尺寸缩小后的模型,目的是验证几何尺寸改变对于阻尼参数的影响。圆柱壳体直径为 800 mm,高度为 1 250 mm,厚度为 7.5 mm。节点数为 121 个,四边形壳单元数为 100 个。空气域的尺寸、材料属性、网格划分和加载情况均与模型 1 相同。

ALE 算法模型如图 2~图 4 所示。

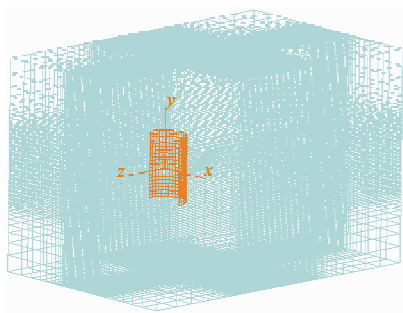


图 2 初始模型(5 倍空气域)

Fig. 2 Initial model(the fivefold air domain)

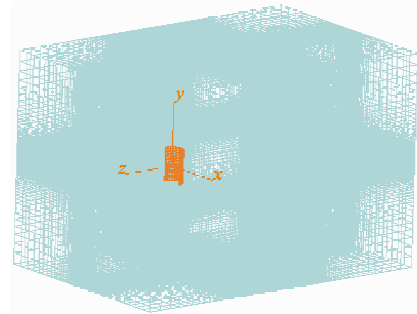


图 3 验证模型(10 倍空气域)

Fig. 3 Validation model(the tenfold air domain)

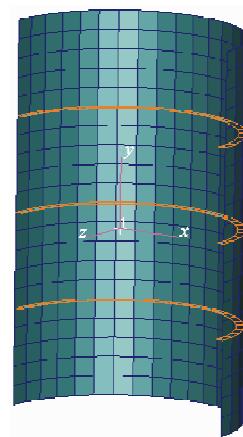


图 4 加筋结构

Fig. 4 Stiffened structure

对于空气介质,使用状态方程描述其力学特性。模型中,空气密度取 $1.25 \times 10^{-12} \text{ t} \cdot \text{mm}^{-3}$,动力粘性系数为 $1.746 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$,状态方程采用线性多项式

$$P = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E \quad (3)$$

式中: C_i 为本构方程系数, $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0, C_4 = C_5 = 0.4; \mu = \rho / \rho_0 - 1, \rho, \rho_0$ 分别为空气的当前密度和原始密度; E 为空气的比内能。

模型中主要通过时间步长、沙漏控制算法、单元尺寸和流固耦合参数设置来保证计算结果的稳定性与准确性。本文采用 4 号刚性沙漏控制类型。在耦合参数设置中,采用罚函数法耦合方式^[7]。

圆柱壳体 5 倍空气域模型和 10 倍空气域模型的 ALE 计算结果对比如图 5~图 7 所示。初始模型、加筋结构和缩小几何尺寸模型的 ALE 计算结果如图 8~图 10 所示。

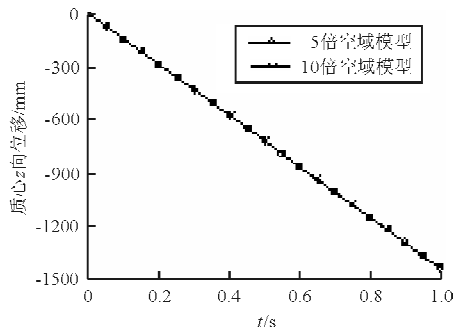


图5 不同空气域模型质心 z 向位移
Fig. 5 z-displacement curves of centre of gravity

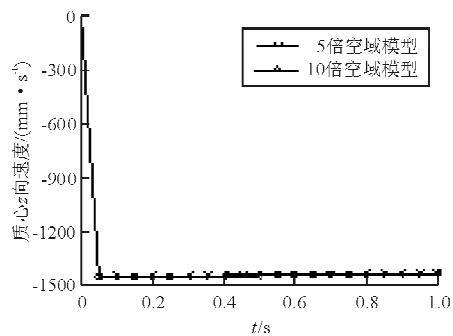


图6 不同空气域模型质心 z 向速度
Fig. 6 z-velocity curves of centre of gravity

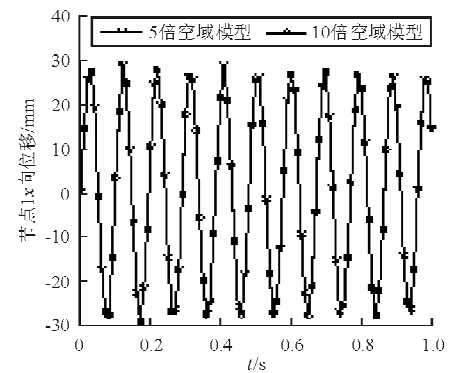


图7 不同空气域模型节点 1x 向位移
Fig. 7 x-displacement curves of node 1

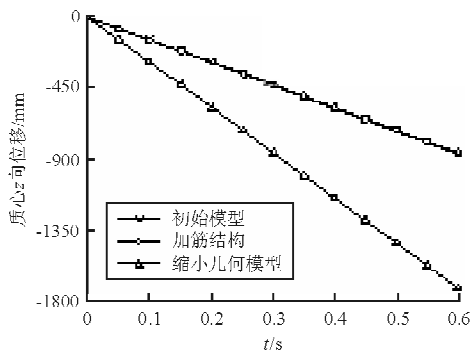


图8 不同结构质心 z 向位移
Fig. 8 z-displacement curves of centre of gravity

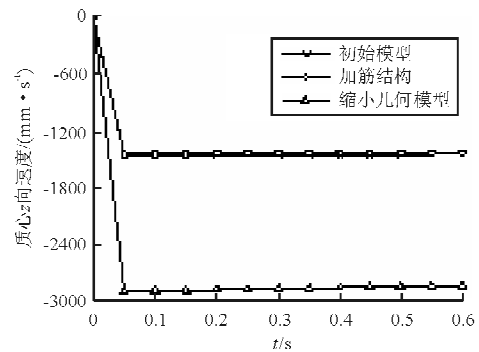


图9 不同结构质心 z 向速度
Fig. 9 z-velocity curves of centre of gravity

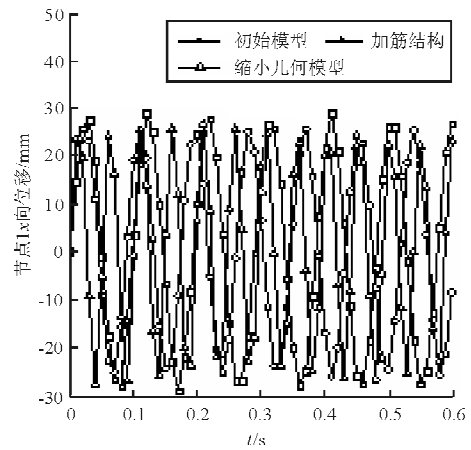


图10 不同结构节点 1x 向位移
Fig. 10 x-displacement curves of node 1

从图5~图10可以看出:柱体表现出明显的呼吸特性,即圆柱壳体在载荷作用下发生的收缩和扩张运动;考虑空气作用后,柱体沿呼吸方向运动的振幅逐渐减小,质心沿载荷方向的位移和速度也明显减小;数值模拟结果基本一致,其中质心位移误差为0.20%,质心速度误差为0.12%,呼吸运动方向(x向)位移最大误差为0.34%,表明用5倍空气域模型进行数值模拟是有效的;对于加筋结构和缩小尺寸模型,由于刚度和质量的变化,运动频率明显变快,而呼吸运动方向的振幅也比初始圆柱壳体小;而对于加筋结构,由于筋条质量仅占壳体质量的0.77%,所以质心结果没有明显变化,而振幅则明显减小,这主要表现为刚度改变对结构运动的影响。

3 阻尼参数反演

工程上,一般用引入粘性阻尼的动力学微分方

程来求解结构的动响应。本文采用结构动力学有限元模型,针对结构运动的速度和位移,取标准模拟结果中的时空离散点数值,采用最小二乘原理,对动力学模型中的阻尼参数用 Isight 优化软件进行最佳逼近反演,得到结构动力学模型的粘性阻尼系数。具体实现方法为:先将 LS-DYNA 软件集成到 Isight 软件中,将 K 文件作为输入文件,节点 1 和质心的位移速度文件作为输出文件;将 5 倍空气域模型的 ALE 计算结果作为标准值,设置质量阻尼系数和刚度阻尼系数为设计变量,设置节点 1 在第 2、5、8、11 次运动到最大位移时的呼吸方向(x 向)位移和质心的沿加载方向(z 向)的运动位移、速度作为输出变量;目标函数为其与 5 倍空气域模型 ALE 标准值的最小误差,优化算法采用 Hooke-Jeeves 算法^[14]。其中,设计变量质量阻尼系数的范围为 $0 \sim 1.0$,刚度阻尼系数的范围为 $0.01 \sim 0.30$,初始值分别取为 0.10 和 0.05 。具体可表现为求以下形式优化问题的最优解。

$$\min \sum_{i=1}^4 [(\bar{x}_i - x_i)^2 + (\bar{v}_{iz} - v_{iz})^2 + (\bar{x}_{iz} - x_{iz})^2]$$

subject to: $0 \leq \alpha \leq 1.0$
 $0.01 \leq \beta \leq 0.3$ (4)

式中: \bar{x}_i, x_i 分别为节点 1 在 x 向运动位移的 ALE 和反演结果; \bar{v}_{iz}, v_{iz} 分别为质心 z 向速度的 ALE 和反演结果; \bar{x}_{iz}, x_{iz} 分别为质心 z 向位移的 ALE 和反演结果。

对于圆柱壳体模型,将其 5 倍空气域模型 ALE 计算结果作为标准结果,使用 Isight 软件对单纯结构动力学模型进行最佳逼近后,得到的粘性阻尼系数最优解为质量阻尼 $\alpha = 0.042$,刚度阻尼 $\beta = 0.056$ 。

将反演参数设置为各模型 LS-DYNA 的 K 文件中的相应阻尼系数,验算阻尼参数的有效性。其中,圆柱壳体 5 倍空气域模型 ALE 计算结果与反演参数计算结果的对比如图 11~图 13 所示。

对于圆柱壳体模型和刚度改变后的模型,用反演参数和 5 倍空气域 ALE 计算的质心 z 向位移、质心 z 向速度和节点 1 的 x 向位移的数值对比如表 1~表 3 所示。

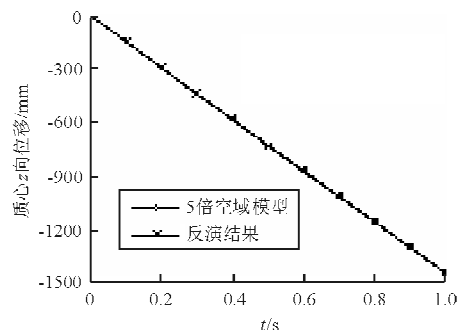


图 11 质心位移 ALE 和反演结果

Fig. 11 z -displacement curves of centre of gravity

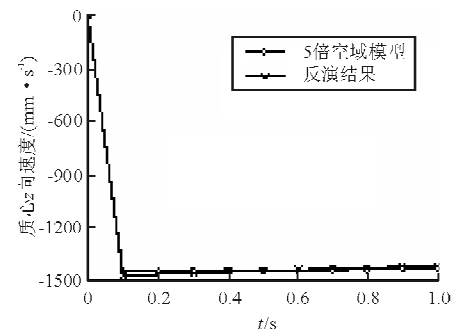


图 12 质心速度 ALE 和反演结果

Fig. 12 z -velocity curves of centre of gravity

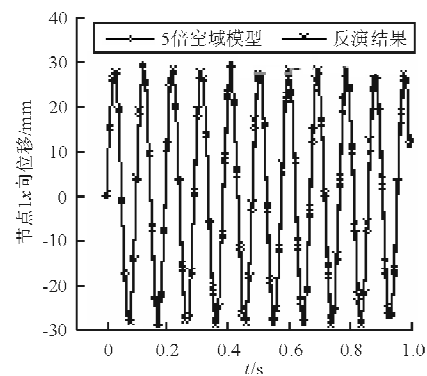


图 13 节点 1 位移 ALE 和反演结果

Fig. 13 x -displacement curves of node 1

表 1 初始模型的反演参数计算结果和 ALE 结果
 Table 1 Inversion and ALE results of initial model

项 目	质心 z 向位移/mm	质心 z 向速度/ (mm · s ⁻¹)	节点 1 x 向位移/mm
ALE 结果	-1 442.8	-1 435.7	26.973
反演参数计算结果	-1 445.9	-1 419.4	28.115
误差/%	0.21	1.13	4.23

表2 加筋结构的反演参数计算结果和 ALE 结果
Table 2 Inversion and ALE results of reinforced structure

项 目	质心 z 向 位移/mm	质心 z 向速度/ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	节点 $1x$ 向 位移/mm
ALE 结果	-1 429.5	-1 422.1	24.435
反演参数计算结果	-1 430.8	-1 404.5	25.604
误差/%	0.09	1.24	4.78

表3 缩小几何尺寸模型的反演参数计算结果和 ALE 结果
Table 3 Inversion and ALE results of scaled model

项 目	质心 z 向 位移/mm	质心 z 向速度/ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	节点 $1x$ 向 位移/mm
ALE 结果	-1 433.5	-2 851.7	24.27
反演参数计算结果	-1 457.5	-2 899.3	25.51
误差/%	1.67	1.24	5.10

从图 11~图 13 及表 1 的对比可以看出:用 Isight 软件反演的阻尼系数计算的结果和 ALE 结果在振幅和周期上基本一致;质心在 z 向的位移误差在 1% 以内,速度误差在 2% 以内,呼吸运动的最大位移误差在 5% 左右,考虑到呼吸运动对阻尼系数的影响远小于由质心运动产生的影响,而且呼吸运动的振幅远小于质心沿 z 向的运动位移,此外还有误差积累造成的影响,故反演的结果是可靠的。对于加筋结构和几何尺寸缩小后的模型,用阻尼系数计算的质心位移误差和速度误差都在 2% 以内,呼吸运动的最大位移误差在 5% 左右,表明反演阻尼系数对于刚度改变后的模型是有效的,结构刚度和质量的改变对于空气域的阻尼参数没有明显的影响,这与理论结果是一致的。对于缩小几何尺寸的模型,采用和其他模型同样的网格尺寸,网格比较稀疏,使得计算精度略有下降,导致结果误差相较于其他模型稍微偏大。反演结果与 ALE 结果有误差的原因在于粘性阻尼是线性的,而实际中空气的阻尼是复杂的,现在还不能用阻尼参数精确模拟。

4 结 论

(1) 圆柱壳体在 5 倍空气域尺度和 10 倍空气域尺度中的运动,二者计算结果基本一致,表明用 5 倍空气域模型进行计算其结果是可靠的。

(2) 反演的阻尼参数计算结果与 ALE 计算结果吻合良好,表明反演的参数是有效的。

(3) 质量和刚度的改变对阻尼参数没有明显影响,考虑空气作用时可以用阻尼系数代替 ALE 方法进行计算。

(4) 本文所探讨的方法对类似问题的研究同样具有参考价值。

参 考 文 献

- [1] 黄雪忠,陈炉云,易宏. 基于遗传算法的加肋圆柱壳结构动力优化分析[J]. 船海工程, 2009, 38(2): 32-35.
Huang Xuezhong, Chen Luyun, Yi Hong. Optimal design of ring-stiffened cylindrical shell based on ISIGHT[J]. Ship and Ocean Engineering, 2009, 38(2): 32-35. (in Chinese)
- [2] 钱若军,董石麟,袁行飞. 流固耦合理论研究进展[J]. 空间结构, 2008, 14(1): 3-15.
Qian Ruojun, Dong Shilin, Yuan Xingfei. Advances in research on fluid-structure interaction theory [J]. Spatial Structures, 2008, 14(1): 3-15. (in Chinese)
- [3] Souli M, Sofiane Y, Olovsson L. ALE and fluid/structure interaction in LS-DYNA[J]. ASME Pressure Vessels and Piping Conference, 2004, 485: 181-187.
- [4] 赵海鸥. LS-DYNA 动力分析指南[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2003: 155-171.
Zhao Haiou. Dynamic analysis guide of LS-DYNA[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2003: 155-171. (in Chinese)
- [5] 白金泽. LS-DYNA 3D 理论基础与实例分析[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 74-103.
Bai Jinze. The theory foundation and examples analysis in LS-DYNA 3D[M]. Beijing: Science Press, 2005: 74-103. (in Chinese)
- [6] 马春生,黄世霖,张金换,等. LS-DYNA 的 ALE 方法在飞船返回舱着陆仿真中的应用[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2006, 46(8): 1455-1457.
Ma Chunsheng, Huang Shilin, Zhang Jinhuan, et al. Simulations of the landing of manned spacecraft with parachutes using the ALE method in LS-DYNA[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2006, 46(8): 1455-1457. (in Chinese)
- [7] 孙琦,周军,林鹏. 基于 LS-DYNA 的弹体撞水过程流固耦合动力分析[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(6): 1498-1501.
Sun Qi, Zhou Jun, Lin Peng. Dynamic analysis of fluid-structure interaction for water impact of projectile using LS-DYNA[J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(6): 1498-1501. (in Chinese)
- [8] 王浩,范启富. 一类基于 iSIGHT 的多学科优化方法研究[J]. 微计算机信息, 2009(34): 179-181.
Wang Hao, Fan Qifu. Research of a type of MDO design

- method using iSGIIT [J]. Microcomputer Information, 2009(34): 179-181. (in Chinese)
- [9] Donea J, Giuliani S, Halleux J P. An arbitrary lagrangian-eulerian finite element method for transient dynamic fluid-structure interactions[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1982, 33(1-3): 689-723.
- [10] Martin Larcher, Giampiero Manara. Influence of air damping on structures especially glass[R]. JRC 57330, Ispra(Italy); European Commission, 2010: 9-27.
- [11] R. 克拉夫, J. 彭津. 结构动力学[M]. 王光远, 等译. 北京: 高等教育出版社, 1981: 103-140.
Clough R, Penzien J. Dynamics of structures[M]. Wang Guangyuan, et al. Translation. Beijing: Higher Education Press, 1981: 103-140. (in Chinese)
- [12] Sondipon Adhikari. Damping models for structural vibration[D]. UK: Trinity College, Cambridge University, 2000.
- [13] LSTC. LS-DYNA Keyword User's Manual[M]. California; Livemore Software Technology Corporation, 2007: 137-170, 587-596.
- [14] 王敏, 朱国荣, 孔祥龙, 等. 用 Hooke-Jeeves 方法进行水文地质参数寻优的研究[J]. 地质论评, 2005, 51(6): 724-727.
Wang Min, Zhu Guorong, Kong Xianglong, et al. A study of optimization for hydrogeologic parameters with hooke-jeeves methods[J]. Geological Review, 2005, 51(6): 724-727. (in Chinese)

作者简介:

刘超(1987—)男, 硕士研究生. 主要研究方向: 飞行器结构设计。

孙秦(1956—)男, 教授, 博导. 主要研究方向: 飞行器设计。

(编辑: 马文静)

(上接第 284 页)

- [3] Fitzgibbon T F. Wing fold actuator system for aircraft: USA, 5310138[P]. 1994-03-10.
- [4] 李元科. 工程最优化设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
Li Yuanke. Optimization principles and techniques for engineering design [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese)
- [5] 李育锡. 机械设计基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 99-102.
Li Yuxi. Fundamentals of machine design [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007: 99-102. (in Chinese)

作者简介:

陈晓亮(1986—), 男, 硕士研究生. 主要研究方向: 飞行器结构设计。

赵美英(1962—), 女, 教授, 博导. 主要研究方向: 飞行器结构设计、复合材料结构分析与设计、智能材料结构设计等。

孟毛毛(1988—), 男, 硕士研究生. 主要研究方向: 复合材料连接结构分析与设计。

万小朋(1962—), 男, 教授, 博导. 主要研究方向: 飞行器总体设计、飞行器结构设计。

(编辑: 马文静)

(上接第 298 页)

- [14] 童贤鑫, 高之恒, 关德新. 帽型复合材料加筋叠层板轴压稳定性分析与试验研究[J]. 航空学报, 1988, 9(5): 255-259.
Tong Xianxin, Gao Zhiheng, Guan Dexin. Analytical and experimental investigations on stability of composite hat-stiffened panels under compression[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1988, 9(5): 255-259. (in Chinese)
- [15] 穆朋刚, 万小朋, 赵美英. 复合材料加筋壁板稳定性分析研究[J]. 机械科学与技术, 2009, 28(9): 1190-1193.
Mu Penggang, Wan Xiaopeng, Zhao Meiyang. A study of the stability of composite stiffened plates[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2009, 28(9): 1190-1193. (in Chinese)
- [16] 中国航空研究院. 复合材料结构稳定性分析指南[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.

Chinese Aeronautical Establishment. Stability analysis of composite structures guide[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2002. (in Chinese)

作者简介:

程家林(1965—), 男, 研究员. 主要研究方向: 飞行器总体设计、结构强度设计。

冯玉龙(1988—), 男, 硕士研究生, 助理工程师. 主要研究方向: 飞机结构设计、复合材料结构设计。

姚卫星(1957—), 男, 教授, 博导. 主要研究方向: 飞行器总体气动-结构的综合设计技术、结构抗疲劳设计、复合材料结构设计、可靠性工程等。

(编辑: 马文静)