复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第27卷 第3期 6月 2010年
Vol. 27 No. 3 June 2010

文章编号：1000-3851(2010)03-0169-08

一种基于复合材料加筋板结构效率的稳定性优化方法

赵 群，丁运亮*，金海波
（南京航空航天大学 飞行器先进设计技术国防重点学科实验室，南京 210016）

摘 要： 提出一种以承载效率最高作为目标的新设计方法，对复合材料加筋板的承载能力进行优化。讨论了不同压缩与弯曲刚度的匹配模式与加筋板临界失稳载荷的关系。将全局失稳载荷、局部失稳载荷与静载荷的接近程度作为结构承载效率的量化标准，通过静载荷的控制，使结构的稳定性向着效率最高的方向优化。以宏观的加筋板压缩与弯曲刚度参数作为设计变量，构建了一种可用于结构效率优化的代理模型，避免了局部最优点的出现，更便于数值寻优。通过有限元分析验证，优化后壁板的临界失稳载荷与所施加的静载荷基本一致，反映出较高的效率，从而验证了该方法的可靠性。

关键词： 复合材料；加筋板；稳定性；承载效率；压缩刚度；弯曲刚度
中图分类号： V251.5 **文献标志码：** A

Buckling optimization method based on structure efficiency of composite stiffened panels

ZHAO Qun, DING Yunliang*, JIN Haibo
(Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense-Advanced Design Technology of Flight Vehicle, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to optimize the carrying capacity of composite stiffened panels, a new design method was proposed using maximum carrying efficiency as an objective. Different compression and bending stiffnesses' matching relationships were discussed for their effects on the critical buckling loads of stiffened panels. The approaching degree of global buckling load, local buckling load and static load was employed as the quantitative standard to scale the structure's carrying efficiency. Under the control of static load, the structural stability was optimized towards the direction of maximum efficiency. An agent model for structure efficiency optimization was built using the panel's macroscopic compression and bending stiffness parameters as variables. This model voids the local optimal point and is more suitable for numerical optimization. The critical buckling load of optimized panel is basically in accordance with the static load applied on it by finite element analysis, which shows a high efficiency and proves the reliability of this method.

Keywords: composite; stiffened panel; buckle; carrying efficiency; compression stiffness; bending stiffness

加筋壁板具有很高的承载效率，是构成大型飞机结构的重要组成部分。随着对民用飞机经济性要求的日益提高，增加有效载荷、减轻结构质量的指标也更为严格。复合材料在航空结构中的大量采用有助于进一步减重，然而将复合材料用于加筋板结构也增加了设计工作的复杂性。虽然目前数值计算技术已十分成熟，但在处理加筋板的设计优化问题时仍存在一些困难：(1)多数考虑稳定性的优化方法将结构的失稳载荷作为约束条件处理，然而，加筋板结构的屈曲模式复杂，复合材料的引入又导致设计变量过多，这些参量之间往往相互耦合，致使优化迭代过程中失稳模式可能发生转变，由于不同的失稳模式对设计变量的敏感性不同，传统的优化模型不容易保证可靠地收敛，因此，要改善优化效果，需要对计算模型进行适当简化，使其能排除不同失稳模式和设计参数的影响，从更宏观的角度反

收稿日期： 2009-07-05；**收修改稿日期：** 2009-10-27
基金项目： 国家自然科学基金(10872091)
通讯作者： 丁运亮，教授，博士生导师，研究方向：飞行器综合设计技术、结构优化设计和复合材料结构分析等 E-mail：dylae@nuaa.edu.cn

映结构的力学特性。(2)为减轻质量，在保证一定安全裕度的条件下，结构设计中通常希望令所有材料都达到极限承载水平，即没有多余的材料浪费，从而达到较高的效率。但如何对复合材料加筋结构的效率作出量化，目前尚没有通用的方法。文献[1]指出，各种失效模式同时发生的结构具有较高的效率。Farrar 等研究者[2]早年针对金属铆接壁板提出过效率因子的概念，Zahorski 等[3]则通过加筋板组合截面的弯曲刚度与具有相等横截面积的矩形截面弯曲刚度的比值来衡量结构效率，但这些理论均建立在蒙皮与加强筋采用同种金属材料的基础上，不便于直接应用于复合材料层板。(3)加筋结构中需要综合考虑加强筋的布局、形状与尺寸的优化，设计变量之间关系复杂，目前通用有限元软件可以在结构稳定性分析中取得理想的效果，但基于稳定性的设计优化功能尚不十分完善。对于加筋结构的设计方法，很多研究者进行了相关的讨论。文献[4]以静力准则为基础，将应变能密度作为删除单元的标准，实现了矩形截面加筋板的拓扑优化。Luigi Iuspa 与 Eugenio Ruocco[5]通过遗传算法优化加强筋的布局。张柱国等[6]通过 Kriging 代理模型进行金属加筋板的布局优化，并考虑了稳定性因素。李烁等研究者[7]利用神经网络实现了复合材料加筋板的设计。文献[8-11]基于均匀化思想讨论了格栅加筋板的等效与优化方法。这些优化模型多以结构质量最轻作为目标，并将稳定性、静强度等准则作为约束，在一定条件下取得了满意的效果。借鉴这些文献的成果，作者以提升结构承载效率为基础，提出将加筋板结构的总体失稳载荷、局部失稳载荷与静载荷的接近程度作为评判结构效率的标准，通过控制静载荷使结构的稳定性向着高承载效率的方向优化，并以结构效率作为响应输出，构建了加筋板稳定性优化的代理模型，提出一种以结构的承载效率作为优化目标的设计方法。计算实验表明这一方法可以实现复合材料加筋结构的稳定性优化，同时发现加筋板压缩-弯曲刚度匹配模式与结构效率之间存在一定关系，对于复合材料加筋结构的设计具有一定参考价值。

1　单向复合材料加筋板的刚度

1.1　层合板面内拉伸/压缩刚度与弯曲刚度系数

经典层合板理论[12]中，设以 x、y 轴构成参考面，复合材料层压板的内力-应变关系式为

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{61} & A_{62} & A_{61} & B_{61} & B_{62} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{61} & B_{62} & B_{66} & D_{61} & D_{62} & D_{66} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \tag{1}$$

其中：F_x、F_y、F_{xy}分别为层压板剖面单位宽度上沿 x 轴、y 轴的拉/压力和面内剪力；M_x、M_y、M_{xy}分别为层板剖面单位宽度上绕 y 轴和绕 x 轴的弯矩以及扭矩；ε_x、ε_y和 γ_{xy}分别为层板中面 x 向、y 向的正应变与面内剪应变；κ_x、κ_y、κ_{xy}代表层板中面沿 x、y 向的曲率和扭率。层合板的刚度矩阵由以下三部分构成：面内刚度系数 A_{ij}，抗弯刚度系数 D_{ij}以及拉弯耦合刚度系数 B_{ij}。在工程设计中，为避免因耦合效应引起固化后的翘曲变形，通常将层合板设计成对称铺层的形式。对称均衡层压板可认为只具有面内的正交各向异性，即 $A_{16}=A_{26}=D_{16}=D_{26}=B_{ij}=0$，则层合板在 x 方向的等效面内拉伸/压缩刚度系数 A_x以及绕 y 轴的等效弯曲刚度系数 D_x可按下式计算：

$$\begin{cases} A_x = A_{11} + \dfrac{2A_{12}A_{16}A_{26} - A_{22}A_{16}^2 - A_{12}^2A_{66}}{A_{22}A_{66} - A_{26}^2} \\ \quad = A_{11} - \dfrac{A_{12}^2}{A_{22}} \\ D_x = D_{11} + \dfrac{2D_{12}D_{16}D_{26} - D_{22}D_{16}^2 - D_{12}^2D_{66}}{D_{22}D_{66} - D_{26}^2} \\ \quad = D_{11} - \dfrac{D_{12}^2}{D_{22}} \end{cases} \tag{2}$$

1.2　复合材料加筋板的轴向刚度

考虑到轴向压缩是引起加强筋失稳的主要载荷，本文中主要讨论加筋板的轴向刚度。对于单向加筋层压板，计算截面刚度需要将其简化为一系列板条元($i=1\sim n$)组成的近似模型[13]。考虑图 1 所示的一块无限宽的壁板，在宽度 w 的范围内均布 N 个加强筋，间距为 b，筋条腹板高度为 H，底部突缘宽度为 d_2，则加筋板在轴向(沿桁条方向)的等效压缩刚度系数等于各板条元压缩刚度的总和在 w 宽度上的平均值：

$$A_{\mathrm{com}} = \frac{1}{w}\sum_{i=1}^{n} A_{xi}w_i = \frac{A_{\mathrm{skin}}w + NA_{\mathrm{sx}}(H+d_2)}{w} \tag{3}$$

式中：A_{com}代表组合截面的等效压缩刚度系数；A_{xi}表示各板条元自身的压缩刚度系数；故 A_{skin}与 A_{sx}

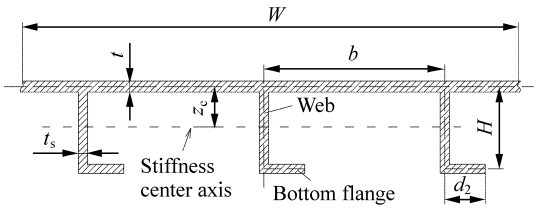

图 1　复合材料加筋板典型截面形式

Fig. 1　Typical composite stiffened panel's section

分别代表蒙皮和加强筋层板的压缩刚度系数；w_i为各板条参考面的跨度，对于蒙皮 $w_i = w$，对于加强筋腹板 $w_i = H$，对于加强筋下突缘 $w_i = d_2$。在材料铺层已知的情况下，层板自身的刚度系数可按式(2)求得，因此加筋板的压缩刚度系数主要取决于加强筋的间距以及截面形状。

加筋板截面的总弯曲刚度同样根据各板条元弯曲刚度之和求得。蒙皮-桁条组合截面弯曲刚度的计算可分为以下几种情况。

(1) 当板条的跨度方向平行于中性轴时(如蒙皮以及加强筋底部突缘)，板条自身的弯曲刚度应等于式(2)求得的弯曲刚度系数 D_{xi} 与板条跨度 w_i 的乘积：

$$D_i = D_{xi} w_i \tag{4}$$

(2) 如果板条跨度方向垂直于中性轴，则按照矩形截面的弯曲刚度公式计算，该板条自身的弯曲刚度应等于截面的等效弹性模量与惯性矩[14]的乘积，对于图 1 中的加强筋腹板：

$$D_i = E_{sx} \frac{1}{12} t_s w_i^3 \Rightarrow D_i = \frac{1}{12} A_{sx} H^3 \tag{5}$$

式中：E_{sx}为腹板的等效弹性模量；t_s表示桁条层板的厚度；$E_{sx} t_s$即为该层板的轴向压缩刚度系数，对于加强筋，即为 A_{sx}。

(3) 组合截面中各板条的弯曲刚度包括两部分，一部分为板条自身的弯曲刚度，另一部分是板条相对于组合截面中性轴的弯曲刚度，这部分刚度在计算时需要进行移轴处理，板条元对于加筋板中性轴的弯曲刚度转换值为

$$DL_i = E_{xi} t_i w_i (z_i - z_c)^2 = A_{xi} w_i (z_i - z_c)^2 \tag{6}$$

其中：z_i代表第 i 个板条元自身中性面的高度位置，z_c代表组合截面形心轴高度位置(见图 1)。

(4) 得到各板条元的弯曲刚度后，组合截面的弯曲刚度系数可以表示为单位宽度上所有板条元的弯曲刚度之和：

$$D_{com} = \frac{1}{w} \sum_{i=1}^{n} (D_i + DL_i) \tag{7}$$

因此，在已知蒙皮与加强筋材料铺层的情况下，可将加强筋的轴向刚度表示为与截面参数相关的函数：

$$\begin{cases} A_{com} = \dfrac{1}{w} \displaystyle\sum_{i=1}^{n} A_{xi} w_i \\ D_{com} = \dfrac{1}{w} \displaystyle\sum_{i=1}^{n} (D_i + DL_i) \end{cases} \tag{8}$$

上式为关于 N、H、d_2 的方程组，已知这 3 个参数即可计算加筋板结构的轴向压缩与弯曲刚度系数；反之，若给定 A_{com}与 D_{com}值，已知 N、H、d_2 中任意一项即可求出另外两项。

2　复合材料加筋板的结构效率

2.1　复合材料加筋板的失稳模式与特点

加筋结构的失稳模式复杂，随着结构刚度的变化，不同模式之间会相互转换。本文中主要讨论一种典型的边界条件：矩形加筋板承受轴向压缩载荷，加载边简支，两侧边自由。暂不考虑铆接壁板在钉间的压屈现象，加筋板的失稳模式基本可分为以下三类，它们还可能不同程度地混合在一起。

2.1.1　总体压屈

如果加强筋布置较密，则壁板容易出现全局失稳。这种模式下蒙皮与桁条同时发生总体横向弯曲，变形一致(见图 2(a))。假设外载合力作用在截面形心轴位置，并按各板条元的刚度均匀分配，因而不会引起明显的压弯耦合效应，则总体失稳模式下的临界应变可根据欧拉失稳[15]模型计算：

$$\varepsilon_{cr} = \frac{\pi^2 D_{com} w}{L^2 A_{com} w} = \frac{\pi D_{com}}{L^2 A_{com}} \tag{9}$$

式中：L 为加筋板轴向(沿桁条方向)的长度；$D_{com} w$、$A_{com} w$ 即表示截面在 w 宽度内的总体弯曲刚度与压缩刚度。

2.1.2　蒙皮压屈

桁条数量较少，且刚度较高时一般会出现蒙皮压屈。这种模式通常表现为两个桁条之间的蒙皮波动，其半波长相当于桁条间距(见图 2(b))。蒙皮失稳后，载荷主要通过加强筋传递，直至加强筋也发生压屈破坏。

2.1.3　加强筋上的局部失稳

这种模式下加强筋先于蒙皮发生失稳，通常表现为腹板上的短波长压屈以及桁条的长波长扭转失

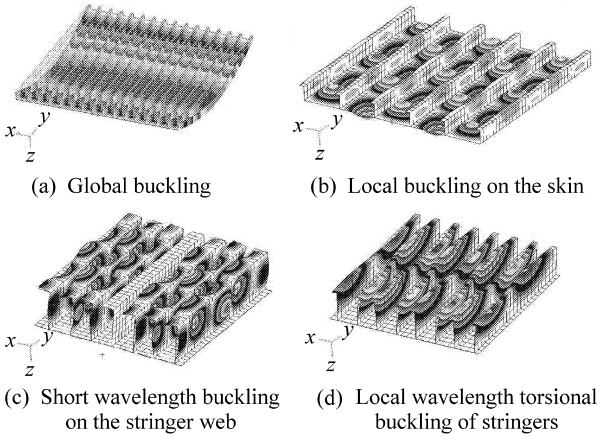

图 2　加筋板总体失稳与局部失稳模式

Fig. 2　Global and local buckling modes of stiffened panels

稳(见图 2(c)、2(d))。桁条发生屈曲后，结构只依靠蒙皮一般不足以承担全部载荷，蒙皮也会立即失稳。当筋条过高时，容易先于蒙皮发生失稳，这种结构的材料利用效率不高，设计时应尽量避免出现此类情况。

由于复合材料的特殊性，组成复合材料壁板的各板条元的边界条件不能像金属铆接壁板一样简化为简支或固支约束，因而不容易找到一般化的经验公式用于准确预测局部失稳载荷，复合材料加筋结构的局部失稳应变需通过有限元分析得出。

2.2　结构刚度对失稳模式的影响

设材料与铺层已知，研究不同的压缩刚度与弯曲刚度对加筋结构失稳模式的影响。蒙皮的铺层顺序为$[\pm 45/0_3/45/0_3/-45/90/0]_S$，加强筋铺层顺序为$[\pm 45/0_3/45/90/-45/0_2]_S$。单层纤维力学性能见表 1。

壁板总体尺寸为 500 mm×500 mm，均布 9 根加强筋，在有限元建模程序 PATRAN 环境下建立图 1 中截面形式的加筋板有限元模型，沿筋向施加压缩载荷，合力定义在截面形心轴位置，通过多点约束将载荷分配到端面各节点上，加载边简支，两侧边悬空，进行稳定性分析，通过该软件的二次开发模块编制参数化建模程序进行反复计算，统计不同截面所对应的结构刚度与失稳载荷。图 3 反映了壁板的刚度与失稳模式的关系。

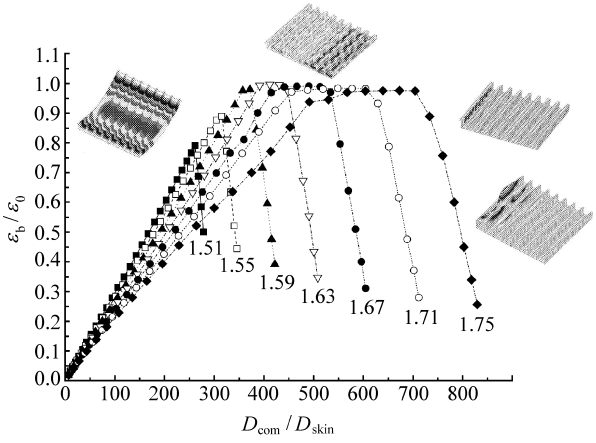

图 3　复合材料壁板刚度与失稳载荷的关系

Fig. 3　Relationship between composite stiffened panels' stiffnesses and their buckling loads

如图 3 所示，横轴表示组合截面抗弯刚度系数 D_{com}与蒙皮自身弯曲刚度系数 D_{skin}的比例。位于同一条曲线上的点，组合截面的压缩刚度系数 A_{com}与蒙皮压缩刚度系数 A_{skin}的比值相同。因此，如果材料铺层已知，则同一条曲线上的点具有相等的横截面积与结构质量。可以看到 D_{com}/D_{skin}的值比 A_{com}/A_{skin}高 2 个数量级以上，说明加强筋在不显著增加质量的情况下可以大幅提升蒙皮的抗弯刚度。图中纵轴使用了无量纲化的比值 $\varepsilon_b/\varepsilon_0$反映结构的抗失稳性能，$\varepsilon_b$为加筋壁板出现失稳时蒙皮的临界应变，$\varepsilon_0$代表在桁条位置施加简支约束的蒙皮所对应的临界失稳应变。曲线的变化趋势表明加筋板的抗失稳能力同时受到结构的压缩、抗弯刚度的影响：当压缩刚度较小(质量较轻)时，无论如何调整弯曲刚度，结构的临界失稳应变均处于较低的水平；而当压缩刚度增加到一定程度后，结构的临界载荷将达到最高值。曲线基本反映出壁板失稳模式随刚度变化而发生的转变。在有限的宽度上，该壁板属非对称结构，因此有限元分析结果呈现出不对称的失

表 1　单层纤维主要力学性能

Table 1　Mechanical properties of a single layer

E_{11}/GPa	E_{22}/GPa	μ_{12}	ρ/(kg·m^{-3})	G_{12}/GPa	G_{23}/GPa	G_{13}/GPa	Single layer thickness/mm
125	7.8	0.32	1700	4.0	3.6	4.0	0.125

稳变形。曲线左侧的爬升段对应了壁板的总体宽柱失稳，在这种模式下，结构的临界失稳载荷基本满足式(9)的关系，随着抗弯刚度的增加，结构的承载能力得到加强。顶部较平坦的一段曲线对应了蒙皮局部失稳，从这一段可以看出，一旦壁板蒙皮出现失稳，一定范围内的结构质量与刚度的变化对承载能力起不到明显的改善效果，蒙皮的临界失稳应变基本保持不变。曲线右侧的下降段反映了桁条的局部失稳，说明过高的抗弯刚度会导致加强筋先于蒙皮发生屈曲，反而会削弱结构的承载能力。根据以上分析，高效的壁板设计应对应到图中曲线的左侧部分，因为该部分代表较轻的质量和恰当的刚度匹配关系，此时材料用量以及刚度的增加确能提高结构的承载能力。

2.3　结构效率的量化指标

设加筋板承受筋向压缩载荷 P(折算成单位宽度上的等效载荷，单位 N/mm)，壁板横截面的压缩刚度系数为 A_{com}、弯曲刚度系数为 D_{com}，则可以求出以下三种应变值：(1)如果壁板发生全局失稳，临界应变 ε_{g} 可由式(9)给出；(2)如果出现局部失稳，临界应变 ε_{l} 可通过有限元计算求得；(3)对应于给定外载荷 P 的情况，若假设结构不出现屈曲，则结构在该静力作用下的轴向应变为

$$\varepsilon_P = P/A_{\mathrm{com}} \tag{10}$$

高效的结构应尽可能使 $\varepsilon_{\mathrm{g}}=\varepsilon_{\mathrm{l}}=\varepsilon_P$，因此，可以认为 ε_{g} 与 ε_{l} 越接近 ε_P，结构效率越高。判断临界失稳载荷与静载荷的接近程度可通过以下方法实现。

如图 4 所示，横轴表示局部失稳应变与静载荷应变的比值 $\varepsilon_{\mathrm{l}}/\varepsilon_P$，纵轴表示全局失稳应变与静载荷应变的比值 $\varepsilon_{\mathrm{g}}/\varepsilon_P$。假设有一壁板 A，其截面压缩刚度系数与弯曲刚度系数已经求得，于是可首先确定图中 P 点的位置，P 点对应了式(10)得出的静载荷应变，该点横纵坐标值均为 1，代表 $\varepsilon_{\mathrm{g}}=\varepsilon_{\mathrm{l}}=\varepsilon_P$ 的最高效结构。然后，求得壁板 A 的局部失稳应变 $\varepsilon_{\mathrm{l}A}$ 与全局失稳应变 $\varepsilon_{\mathrm{g}A}$，分别计算这 2 个参数与 ε_P 的比值，可在图中得到横纵坐标分别为 $\varepsilon_{\mathrm{l}A}/\varepsilon_{PA}$ 与 $\varepsilon_{\mathrm{g}A}/\varepsilon_{PA}$ 的 A 点，计算 A 点到 P 点的距离即可判断该壁板的失稳载荷与静载荷的接近程度。本文中将此距离值称为失稳载荷与静载荷的偏离度：

$$dis = \sqrt{(1-\varepsilon_{\mathrm{g}A}/\varepsilon_{PA})^2+(1-\varepsilon_{\mathrm{l}A}/\varepsilon_{PA})^2} \tag{11}$$

dis 值始终为正，该值越小，结构效率越高。图中 B 点对应了另一壁板，$dis_2<dis_1$，说明加筋板 B 所对应的压缩/弯曲刚度的匹配关系更趋近于令各种失效模式同时发生，因此 B 点效率高于 A 点。对于一组代表不同结构刚度的输入变量 D_{com} 与 A_{com}，则总能找到一组值对应到结构失稳载荷与静载荷最接近的位置，这组值即代表设计空间内最高效的结构。

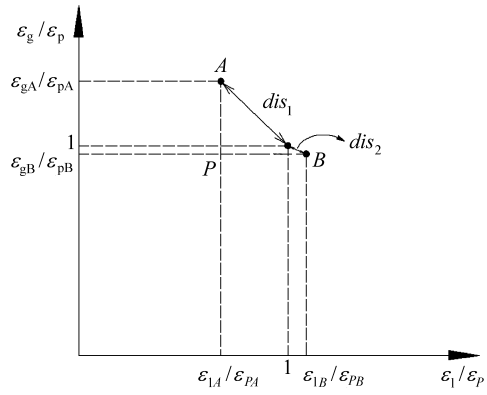

图 4　临界失稳载荷与静载荷的接近程度

Fig. 4　Approaching degree of critical buckling load and static load

3　基于代理模型的加筋板效率优化

3.1　反映加筋板承载效率的代理模型

代理模型的计算量明显低于有限元模型，同时可以达到与有限元模型相接近的精度，基于代理模型的优化，可以显著提高计算效率。然而，由于截面尺寸与失稳模式间的复杂关系，代理模型中容易出现局部最优点，影响优化结果的可靠性，因此构建代理模型时应尽量使用关系简单的参数。本文作者认为，直接将宏观的结构刚度作为输入变量，并以结构效率作为响应输出，从整体角度研究结构形式与抗失稳能力的关系，可以使代理模型得到简化，避免了因设计参数过多且相互耦合而影响寻优效果的问题。设某加筋板结构蒙皮与桁条材料参照 2.2 节给出的定义，给定轴向压缩载荷 $P=1500$ N/mm，寻找能承受这一载荷的效率最优的壁板。在设计空间内随机选取 200 个样本点，结合有限元分析与解析计算的方法求解各点对应的结构刚度与临界应变值，设计参数的取值范围见表 2。对样本点进行拟合，将组合截面与蒙皮弯曲刚度系数的比值作为 x 轴，二者压缩刚度系数的比值作为 y 轴，失稳载荷与静载荷的偏离度 dis 值作为 z 轴，可以得到图 5 所示的等高线。

表 2　样本点对应的结构参数取值范围

Table 2　Value range of structure parameters in the sample points

Stiffener number N	Web height h/mm	Flange width d_2/mm
9～11	10～40	7～25

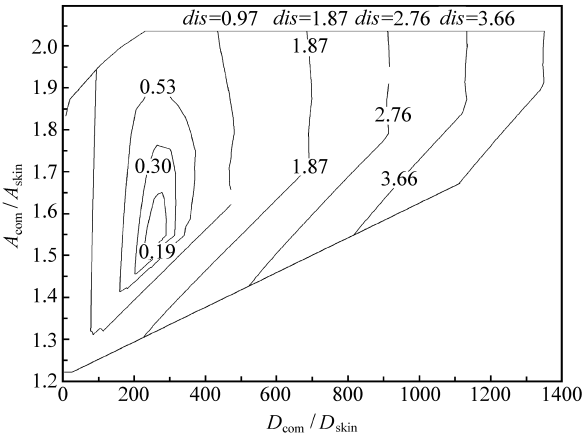

图 5　加筋板承载效率与压缩/弯曲刚度的关系

Fig. 5　Relationship between stiffened panels' carrying efficiency and their compression/bending stiffnesses

图 5 反映了在不同的压缩与弯曲刚度匹配模式下，加筋壁板的全局失稳应变、局部失稳应变以及静载荷 P 所引起的结构应变的接近程度，即结构效率。从等高线的趋势可以看出该优化问题具有唯一的全局最优解，以此为基础建立的代理模型适于通过可行方向法快速寻优。这说明采用宏观的力学参数作为设计变量可以使代理模型得到一定的简化，进而降低后续的数值优化的成本。

3.2　考虑稳定性的结构效率优化

本文中复合材料加筋板优化的目标为：在给定的载荷要求下，找到效率最高的布局形式。针对优化目标，本文中提出基于结构效率代理模型的加筋板稳定性优化方法，主要步骤如下。

(1) 确定轴向压缩设计载荷 P(N/mm)，优化后的壁板应能承受这一载荷而不发生屈曲。

(2) 在设计空间内随机选取一系列截面参数作为样本点，计算结构的 ε_g、ε_p 与 ε_l 值，其中 ε_g、ε_p 分别通过式(9)与式(10)得出，ε_l 经有限元分析得出。样本点数量较多，因此需要编写相应的参数化建模程序，根据输入的设计参数自动实现建模与计算功能。

(3) 计算样本点临界失稳应变与静载荷应变的偏离度 dis，将其作为输出响应，并以 D_{com}/D_{skin} 与 A_{com}/A_{skin} 作为输入变量构建代理模型，该模型反映了结构效率随刚度变化的分布规律。

(4) 基于代理模型，通过数值优化算法寻优，找到满足给定载荷要求的效率最高(dis 值最小)的结构压/弯刚度匹配关系，确定 D_{com}/D_{skin} 与 A_{com}/A_{skin} 值，并根据蒙皮的刚度解出 D_{com} 与 A_{com}。

(5) 将截面的压缩与弯曲刚度系数带入式(8)，解出加筋板截面尺寸参数。

4　优化算例

蒙皮与桁条采用 2.2 节定义的材料铺层，寻找能承受 $P=1500$ N/mm 载荷的效率最高的壁板布局形式，在 ISIGHT 环境下构造结构效率的二阶响应面代理模型，通过该软件内嵌的改进可行方向法(Modified Method of Feasible Directions)寻优。模型的精度通过外部迭代实现，即每轮迭代结束后通过一次有限元计算检验最优点的精度，若误差不满足要求则将有限元计算结果作为新的样本点加入样本点集并更新代理模型，如此反复循环从而令代理模型保持精度，直至最优解在两次相邻迭代中的误差满足给定的容限范围。此方法优化结果如下：

$$\begin{cases} D_{com}/D_{skin} = 275 \\ A_{com}/A_{skin} = 1.59 \\ D_{com} = 4.31\times10^{7}\ \mathrm{N\cdot mm} \\ A_{com} = 3.92\times10^{5}\ \mathrm{N\cdot mm} \\ dis = 0.14 \\ \mathrm{mass} = 2.232\ \mathrm{kg} \end{cases}$$

将优化后的压缩与弯曲刚度系数带入式(8)求解加筋板的布局与尺寸参数。代理模型是根据 9、10、11 筋 3 种布局形式的样本点建立的，因此，对应于 $N=9$，$N=10$，$N=11$，可解出 3 种不同的尺寸参数(见表 3)。根据优化结果重新建立壁板的有限元模型，施加 $P=1500$ N/mm 的压缩载荷以及与优化模型相同的边界约束，在 PATRAN/NASTRAN 环境下重新进行屈曲分析，用以检验优化结果的精度。不同布局下结构的质量与临界失稳因子 e 见下表，这里结构的临界失稳因子定义为临界失稳载荷 P_{cr} 与结构当前所受静载荷 P 的比值 P_{cr}/P。另外，作为对比的参照，根据文献[6]提出的方法，直接以截面尺寸 N、H、d_2 作为输入变量，以临界失稳因子 e 与结构质量作为响应构建传统的 Kriging 代理模型，目标为结构质量最轻，同时将 $e>1$

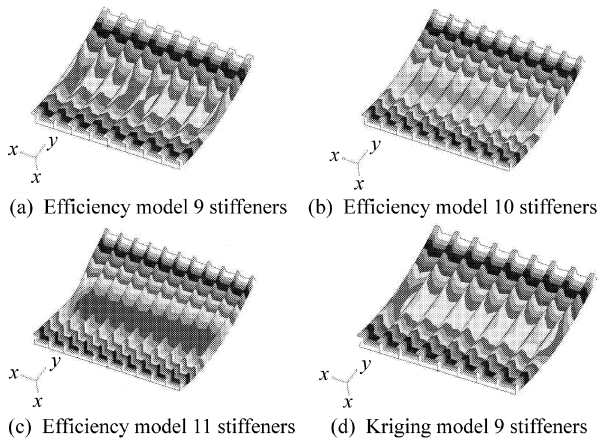

图 6　优化布局的一阶失稳模态

Fig. 6　1st order buckling modes of optimized configurations

作为约束条件，直接通过遗传算法进行优化，优化结果同样列在表 3 中。

由于样本点、优化算法、输入输出参数等存在差别，2 种代理模型的计算结果难以做到完全相同，但如表 3 所示，基于 2 种模型得出的结构质量与屈曲模态是基本相符的，从而验证了本文中方法的有效性。传统的代理模型直接将具体尺寸作为设计变量，因而一般只能找到一种最优方案，而结构效率模型的优化结果是壁板截面的刚度匹配关系，对应这种关系可以有若干种相似的布局与尺寸。表 3 中可以看出 11 筋布局方案相对较优，但从总体上看，对应了最优压缩/弯曲刚度关系的 3 种验算模型质量与上文优化结果是基本一致的。在 1500 N/mm 的压缩载荷作用下，结构的一阶失稳因子 $e\approx1$，说明失稳临界载荷与所施加的静载荷十分接近，优化后的结构达到了较高的材料利用率。图 6 为优化后壁板的 1 阶失稳模态，图 6(a)～6(c)为结构效率模型的优化结果，图 6(d)为参照文献[6]中方法得到的结果，可以看出壁板基本都呈现出总体宽柱失稳的模式，对应了图 3 中左侧曲线的上升段。

根据以上分析可知，对于考虑加筋板稳定性的设计问题，高效的结构形式趋向于出现总体失稳，此时蒙皮与加强筋均达到自身的临界载荷，材料利用率较高。而出现局部失稳的结构表明蒙皮或加强筋有一方没有发挥出承载的极限水平，材料没得到充分利用。在全局失稳模式下结构的刚度与临界载荷基本满足欧拉失稳模型，因此只要适当选择结构的压缩-弯曲刚度匹配关系，可能有多种布局方案均能满足优化目标。

5　结　论

(1) 将结构总体失稳载荷、局部失稳载荷与静载荷的接近程度作为衡量结构效率的标准，以效率最高作为目标，可以实现复合材料加筋板的稳定性优化。

(2) 将加筋板结构的压缩与弯曲刚度参数作为输入变量，结构承载效率作为输出响应，以此为基础构建的代理模型可以避免出现局部最优点，代理模型的形式得到简化，从而更利于数值寻优。

(3) 与只考虑静强度的设计不同，加入局部稳定性因素后，加筋结构的极限载荷存在上限，不会随着结构刚度的提高无限增加。如果加筋板蒙皮出现局部失稳，一定范围内的结构质量与刚度的变化不能显著提高结构的临界失稳应变。

(4) 对于考虑加筋板稳定性的设计问题，在给定设计载荷的条件下，以总体宽柱失稳为主要屈曲模式的结构具有更高的材料利用率。因此，只要符合最优的压缩/弯曲刚度匹配关系，基本满足优化目标的设计方案可能存在多种。

表 3　代理模型的优化结果

Table 3　Optimization results of the agent models

	D_{com}/D_{skin}	A_{com}/A_{skin}	e	Mass/kg	N	H/mm	d_2/mm
Structural efficiency agent model using MFD	275	1.59	0.941	2.236	9	26.60	18.10
	275	1.59	1.005	2.233	10	27.95	12.10
	275	1.59	1.038	2.231	11	30.45	5.89
Kriging agent model using GA	324	1.57	1.161	2.241	9	31.24	12.36

参考文献：

[1] Niu Michael C Y. Airframe structural design [M]. Hong Kong: Conmilit Press, 1988: 149.

[2] Farrar D J. The design of compression structures for minimum weight [J]. Journal of the Royal Aeronautical Society, 1949, 11: 1041-1052.

[3] Zahorski Adam. Effects of material distribution on strength of panels[J]. Journal of the Aeronautical Sciences, 1944, 7: 247-253.

[4] 陈塑寰，麻　凯. 板壳加筋结构的组合优化[J]. 吉林大学学报，2008，38(2)：388-392.
Chen Suhuan, Ma Kai. Combined optimization method of plate-shell structures with stiffeners[J]. Journal of Jilin University, 2008, 38(2): 388-392.

[5] Luigi Iuspa, Eugenio Ruocco. Optimum topological design of simply supported composite stiffened panels via genetic algorithms [J]. Computers & Structures 2008, 86: 1718-1737.

[6] 张柱国，姚卫星，刘克龙. 基于进化 Kriging 模型的金属加筋板结构布局优化方法[J]. 南京航空航天大学学报，2008，40(4)：497-500.
Zhang Zhuguo, Yao Weixing, Liu Kelong. Configuration optimization method for metallic stiffened panel structure based on updated Kriging model [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2008, 40(4): 497-500.

[7] 李　烁，徐元铭，张　俊. 基于神经网络响应面的复合材料结构优化设计[J]. 复合材料学报，2005，22(5)：134-140.
Li Shuo, Xu Yuanming, Zhang Jun. Composite structural optimization design based on neural network response surfaces [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(5): 134-140.

[8] 吴德财，徐元铭，万　青. 先进复合材料格栅加筋板的总体稳定性分析[J]. 复合材料学报，2007，24(2)：168-173.
Wu Decai, Xu Yuanming, Wan Qing. Global buckling load analysis of grid stiffened composite panels[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(2): 168-173.

[9] 张志峰，白瑞祥，陈浩然. 用于 AGS 结构分析的混合法[J]. 复合材料学报，2008，25(4)：168-173.
Zhang Zhifeng, Bai Ruixiang, Chen Haoran. New hybrid method for composite grid structures analysis [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(4): 168-173.

[10] Samuel Kidanea, Guoqiang Li, Jack Helms, et al. Buckling load analysis of grid stiffened composite cylinders [J]. Composites, 2003, 34(B): 1-9.

[11] Navin Jaunky, Norman F Knight Jr. Optimal design of grid-stiffened composite panels using global and local buckling analyses [J]. Journal of Aircraft, 1998, 35(3): 478-486.

[12] Jones Robert M. Mechanics of composite materials [M]. Washington: Scripta Book Company, 1975: 152-162.

[13] 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，2002：137-141.

[14] Benham P P, Crawford R J. Mechanics of engineering materials[M]. Beijing: Longman Scientific & Technical World Publishing Corporation, 1989: 597-599.

[15] 刘鸿文. 材料力学：下册[M]. 第 3 版. 北京：高等教育出版社，2002：151-153.