

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2017.02.012

临界剪切应力系数曲线适用性研究

Research on Applicability of Critical Shear-stress Coefficients Curves

孙昊 周良道 郭伟毅 李三平 / SUN Hao ZHOU Liangdao GUO Weiyi LI Sanping

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

摘要:

曲板的屈曲问题与材料的弹性模量和泊松比有关,对于机身蒙皮材料 2060-T8E30,曲板临界剪切应力系数曲线的适用性有待研究。基于 Abaqus 的线性静力分析中的 Buckle 算法,以机身蒙皮材料 2060-T8E30 建立了多种构型曲板,对比有限元分析值和曲板临界剪切应力系数曲线,通过分析误差,得出结论:对于 2060-T8E30 材料,可以认为 $d/h = 1.5$ 的 k_s (曲板临界剪切应力系数)曲线相比有限元分析值偏高,误差不大于 15%; $d/h = 2$ 的 k_s 曲线相比有限元分析值偏高,误差不大于 20%; $d/h = 3.5$ 的 k_s 曲线相比有限元分析值偏高,误差不大于 35%。在飞机机身结构常用的参数,即 $d/h = 3.5, Z \leq 20$ 的情况下,当 $Z < 10$ 时, k_s 曲线的适用性较好,误差不大于 10%; 当 $10 < Z \leq 20$ 时, k_s 曲线相比有限元分析值偏高,误差不大于 20%。

关键词: 曲板; 临界剪切应力系数曲线; 有限元; 适用性

中图分类号: V215

文献标识码: A

[Abstract] The modulus and poisson's ratio of material is bound up with problems of buckling in curved panels. The material named 2060-T8E30 is applied in skins of fuselage panels. Applicability of critical shear-stress coefficients curves of curved panels with the material 2060-T8E30 needs research. Based on Abaqus Buckle method in linear statics analysis, dozens types of curved panels with the material 2060-T8E30 were modeled. A comparison between numerical value of finite element analysis and critical shear-stress coefficients curves was conducted. By analyzing errors, the results were attained that for the material 2060-T8E30, k_s (critical shear-stress coefficients of curved panels) curve of $d/h = 1.5$ is relatively higher than k_s^{FEA} (k_s of finite element analysis) and the error is below 15%. k_s curve of $d/h = 2$ is relatively higher than k_s^{FEA} and the error is below 20%. k_s curve of $d/h = 3.5$ is relatively higher than k_s^{FEA} and the error is below 35%. In case of normal parameters of fuselage structures of airplanes, as $d/h = 3.5$ and $Z \leq 20$, k_s curve has a good applicability when $Z < 10$ but is relatively higher than k_s^{FEA} , with the error below 20%, when $10 < Z \leq 20$.

[Keywords] curved panel; critical shear-stress coefficients curve; finite element; applicability

0 引言

结构稳定性在飞机结构设计中至关重要,尤其是对于机身壁板,因为薄壁结构的静强度破坏中很大一部分是由结构失稳引起的。然而科学研究和工程实践发现,对于某些类型的结构,屈曲并不等于失稳破坏,比如加筋壁板。机身壁板属于加筋曲

板,曲板的蒙皮很薄,蒙皮受剪屈曲之后会产生倾斜的波纹^[1],并进入半张力场状态,对角张力系数与临界剪切应力相关。

曲板的临界剪切应力与材料、厚度、轴向长度、环向长度、曲率半径、边界支持条件,临界剪切应力系数等相关。另外屈曲点的判定也有很多种选择,不同的判定方式对初始缺陷的敏感度不同,从而使

试验结果有偏差。

为了验证 NACA TN 2661 的临界剪切应力系数曲线对于机身蒙皮材料 2060-T8E30 的适用性,选取了常用的曲板构型,用 HyperMesh 建立了有限元模型,利用 Abaqus 的 Buckle 线性静力分析得到曲板的临界剪切特征值,从而计算出临界剪切应力系数,然后对比 NACA TN 2661 的临界剪切应力系数曲线,分析有限元计算结果和工程曲线的误差。

1 曲板临界剪切应力的工程分析方法

根据 NACA TN 1348^[2],曲板的临界剪切应力由式(1)给出:

$$\tau_{cr} = k_s \frac{\pi^2 D}{b^2 t} \quad (1)$$

式中: k_s 为临界剪切应力系数,由壁板几何构型和边界条件确定; D 为单位长度壁板的屈曲刚度(N·mm); μ 为泊松比; b 为曲板轴向或环向长度的较小值(mm); t 为曲板厚度(mm)。

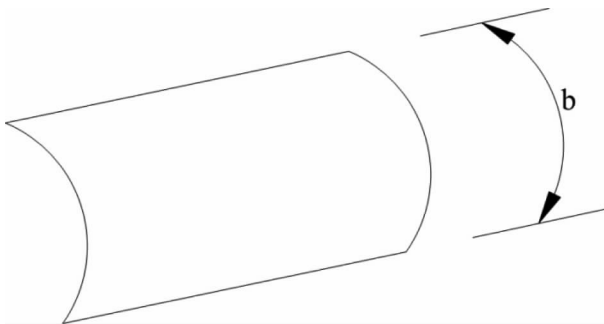


图1 曲板较短边 b

壁板的屈曲刚度 D 表示为:

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\mu^2)} \quad (2)$$

根据 NACA TN 2661^[3],曲板的曲率参数 Z 表示为:

$$Z = \frac{h^2}{Rt} \sqrt{1-\mu^2} \quad (3)$$

式中: E 为弹性模量(MPa); R 为曲板的曲率半径(mm)。

此处, h 为曲板环向长度(mm),即桁距; d 为曲板轴向长度(mm),即框距,且 $h < d$ 。

图2 表示的是简支曲板的临界剪切应力系数-曲率参数的 k_s - Z 曲线。

临界剪切应力 τ_{cr} 可以写成^[4]:

$$\tau_{cr} = k_s \frac{\pi^2 E h^2}{12 R^2 Z^2} \quad (4)$$

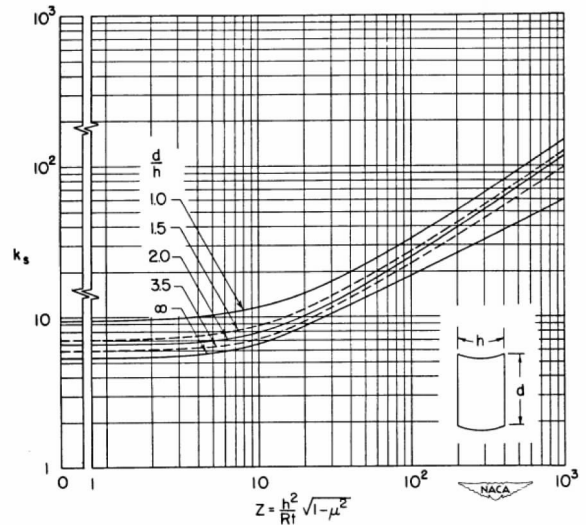


图2 简支曲板的临界剪切应力系数曲线

或

$$\tau_{cr} = \frac{k_s \pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t}{h}\right)^2 \quad (5)$$

2 曲板的结构尺寸

目前,民用飞机机身蒙皮典型结构中,曲板的几何构型为:曲率半径 $R=1\ 980$ mm,厚度 $t=1.3$ mm;选取一系列不同的环向长度 h 和轴向长度 d ,见表1。

表1 曲板几何构型

d /mm	h /mm	d/h	Z
110.77	73.85		2
175.50	117.00		5
247.50	165.00		10
350.29	233.53	1.5	20
655.33	436.89		70
783.27	522.18		100
1 356.67	904.45		300
147.70	73.85	2	2
234.00	117.00		5
330.00	165.00		10
467.05	233.53		20
873.78	436.89		70
1 044.37	522.18		100
1 808.89	904.45		300
258.47	73.85		2
409.50	117.00		5
577.50	165.00		10
817.35	233.53	3.5	20
1 529.11	436.89		70
1 827.64	522.18		100
3 165.57	904.45		300

2060-T8E30 材料的弹性模量 $E = 72\ 400\text{MPa}$, 泊松比 $\mu = 0.33$ 。

d/h 选取了 1.5、2、3.5, 对应图 2 中给出的这三种取值的对应曲线; Z 选取了 2、5、10、20、70、100、300 这样的整数, 图 2 中横坐标 Z 是对数刻度, Z 取整数, 易于确定其准确位置; 纵坐标同样是对数刻度, 尽量选取纵坐标易于确定的点, 减小观察引起的误差。

3 有限元分析

3.1 有限元模型的建立

本文将矩形曲板简化为壳单元组成的二维模型, 单元类型为 S4R, 网格大小约 10mm, 利用 HyperMesh 平台对表 1 中的 11 种曲板构型分别做有限元模型, 用以计算不同构型曲板的临界剪切应力。 $D = 175.5\text{mm}$ 、 $h = 117\text{mm}$ 、 $d/h = 1.5$ 、 $Z = 5$ 的曲板为例, 其有限元模型如图 3 所示。

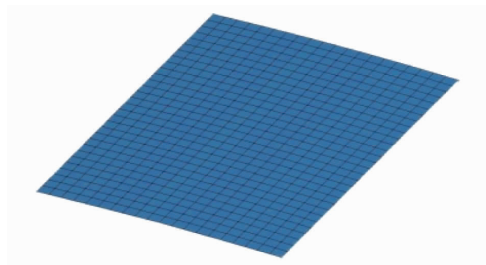


图 3 曲板有限元模型示例

3.2 边界条件和加载方式

曲板的边界条件是四边简支, 在 Abaqus 中使用柱坐标系, 约束设置为: 四边 $U_1 = 0$, 并且一角 $U_2 = 0$, 另一角 $U_3 = 0$ 。表示四边的径向位移为 0, 并且一角的环向和轴向位移为 0, 另一角的轴向位移为 0, 如图 4 所示。

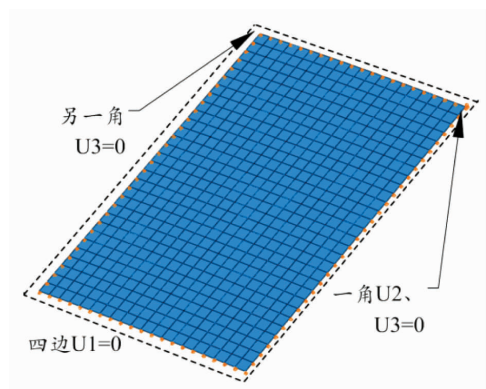


图 4 曲板边界条件

曲板的加载方式是四边均布剪切载荷 $q = 1\text{N/mm}$, 如图 5 所示。

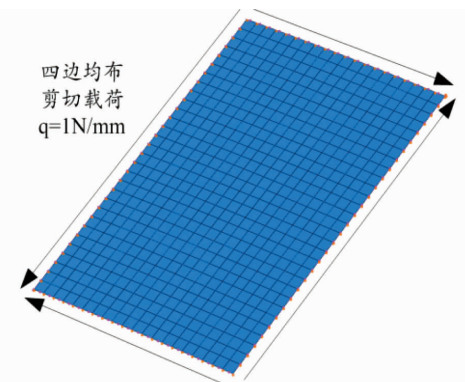


图 5 曲板加载方式

使用的分析步类型是“Buckle”, 特征值求解器选用的是“Lanczos”, 可以快速求解屈曲载荷特征值, 易收敛^[5]。

3.3 有限元计算结果及误差分析

3.3.1 计算过程示例

以 $d = 175.5$ 、 $h = 117$ 、 $d/h = 1.5$ 、 $Z = 5$ 的曲板为例, 其一阶至三阶屈曲特征值的应力云图如图 6 ~ 图 8 所示。

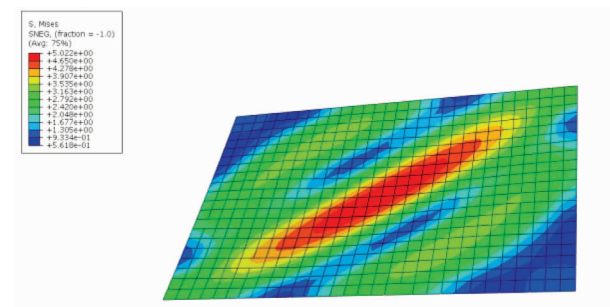


图 6 特征值 = 78.341

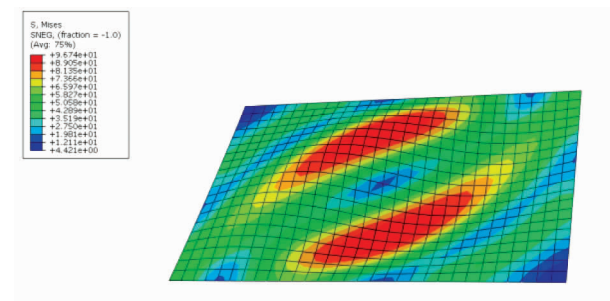


图 7 特征值 = 89.152

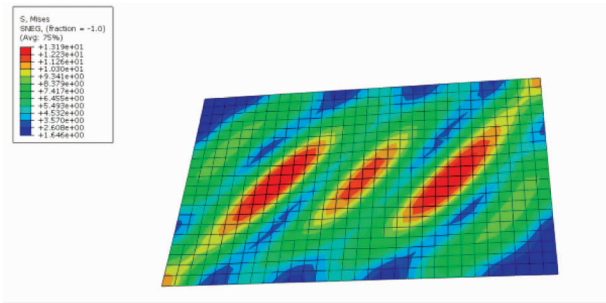


图8 特征值 = 162.05

选取图6的特征值78.341作为一阶屈曲载荷特征值。计算临界剪切应力的有限元分析值 τ_{cr}^{FEA} ，计算公式如下：

$$\tau_{cr}^{FEA} = \frac{\lambda q}{t} \quad (6)$$

式中： λ 为屈曲载荷特征值， q 为均布剪切载荷kN/mm， t 为曲板厚度(mm)。

经计算得到示例曲板的临界剪切应力的有限元分析值：

$$\tau_{cr}^{FEA} = 60.26\text{MPa}。$$

再由式(5)推算出临界剪切应力系数 k_s^{FEA} ，经计算得：

$$k_s^{FEA} = 7.31。$$

根据曲板的几何构型 $d/h = 1.5$ 、 $Z = 5$ ，在图2中读取临界剪切应力系数 $k_s = 7.8$ 。

根据误差计算公式：

$$\Delta = \left(\frac{k_s^{FEA}}{k_s} - 1 \right) \times 100\% \quad (7)$$

计算误差为：-6.3%。

3.3.2 $d/h = 1.5$ 的曲板

由上面的计算过程示例，利用Abaqus有限元软件分别计算 $d/h = 1.5$ ，不同曲率系数 Z 的曲板临界剪切应力系数 k_s^{FEA} ，再根据图2读取其临界剪切应力系数 k_s ，计算误差百分比，结果见表2。

表2 曲板临界剪切应力系数计算值对比

Z	k_s (有限元)	k_s (工程方法)	误差
2	7.2	7.1	1.8%
5	7.3	7.8	-6.3%
10	7.8	8.9	-12.0%
20	9.5	11.0	-13.8%
70	20.5	21.0	-2.4%
100	24.6	27.0	-9.0%
300	54.9	55.0	-0.2%

经过观察分析，误差绝对值多数超过5%，由图9可以看出在 $Z = 20$ 附近， k_s 的有限元分析值和工程方法曲线读取值偏离程度较大，工程方法曲线读取值普遍高于有限元分析值。对于2060-T8E30材料，可以认为 $d/h = 1.5$ 的曲板临界剪切应力系数曲线相比有限元分析值偏高，误差不大于15%。

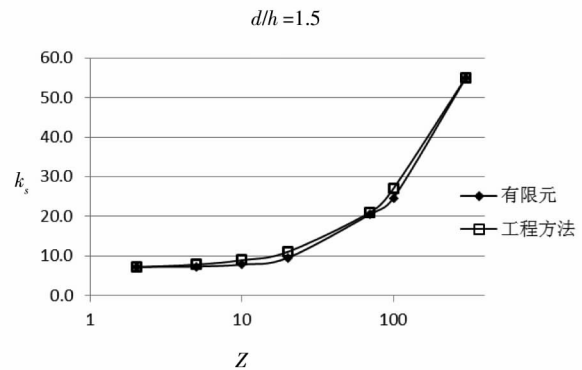


图9 曲板临界剪切应力系数计算值对比

3.3.3 $d/h = 2$ 的曲板

利用Abaqus有限元软件分别计算 $d/h = 2$ ，不同曲率系数 Z 的曲板临界剪切应力系数 k_s^{FEA} ，再根据图2读取其临界剪切应力系数 k_s ，计算误差百分比，结果见表3。

表3 曲板临界剪切应力系数计算值对比

Z	k_s (有限元)	k_s (工程方法)	误差
2	6.7	6.7	0.1%
5	7.0	7.0	-0.6%
10	7.2	8.0	-10.1%
20	8.4	10.0	-16.4%
70	16.5	20.0	-17.3%
100	22.3	24.5	-8.9%
300	43.9	50.0	-12.1%

经过观察分析，误差绝对值多数超过5%，由图10可以看出在 $Z > 10$ 时， k_s 的有限元分析值和工程方法曲线读取值偏离程度较大，工程方法曲线读取值普遍高于有限元分析值。对于2060-T8E30材料，可以认为 $d/h = 2$ 的曲板临界剪切应力系数曲线相比有限元分析值偏高，误差不大于20%。

3.3.4 $d/h = 3.5$ 的曲板

利用Abaqus有限元软件分别计算 $d/h = 3.5$ ，不同曲率系数 Z 的曲板临界剪切应力系数 k_s^{FEA} ，再

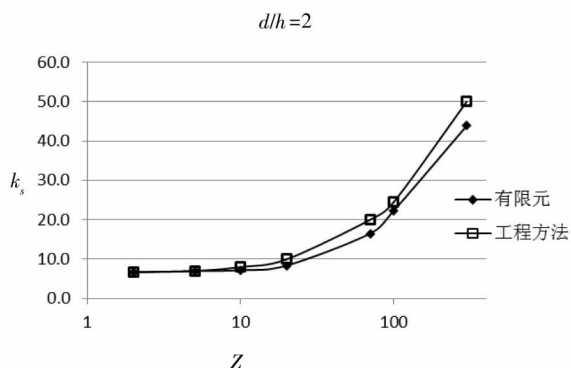


图 10 曲板临界剪切应力系数计算值对比

根据图 2 读取其临界剪切应力系数 k_s , 计算误差百分比, 结果见表 4。

表 4 曲板临界剪切应力系数计算值对比

Z	k_s (有限元)	k_s (工程方法)	误差
2	5.9	6.0	-2.1%
5	6.5	6.4	2.0%
10	6.5	7.0	-7.3%
20	7.7	9.1	-15.1%
70	12.6	18.0	-29.8%
100	15.5	22.5	-31.1%
300	38.8	45.0	-13.8%

经过观察分析, 误差绝对值多数超过 5%, 由图 11 可以看出在 $Z > 20$ 时, k_s 的有限元分析值和工程方法曲线读取值偏离程度较大, 工程方法曲线读取值普遍高于有限元分析值。对于 2060-T8E30 材料, 可以认为 $d/h = 3.5$ 的曲板临界剪切应力系数曲线相比有限元分析值偏高, 误差不大于 35%。

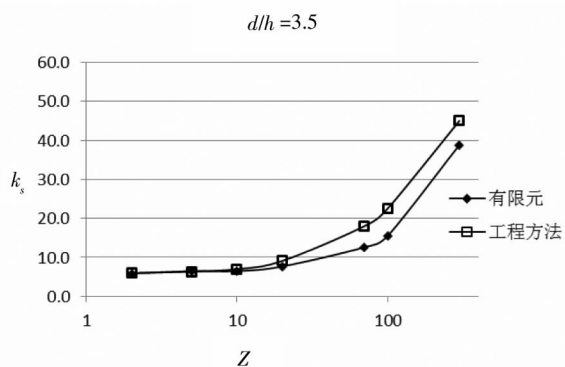


图 11 曲板临界剪切应力系数计算值对比

根据 NACA TN 1348, 在其试验验证章节中, 试验件几何构型分布在 $Z > 100$ 的范围内, 试验获得

的临界剪切应力系数普遍低于临界剪切应力系数曲线。这说明本文中有限元分析值普遍低于临界剪切应力系数曲线的现象是有试验支持的, 曲板临界剪切应力系数的有限元分析值 k_s^{FEA} 更加接近试验值。

3.3.5 飞机常用曲板构型

由于飞机机身结构常用的 d/h 值为 3.5, 曲率参数 Z 在 20 以下, 为了验证 $d/h = 3.5, Z \leq 20$ 时的临界剪切应力系数曲线的适用性, 选取 $d/h = 3.5, Z = 5 \sim 20$ 的一部分整数, 计算其对应曲板的临界剪切应力系数 k_s , 与临界剪切应力系数曲线读取的 k_s 对比, 分析误差。曲板构型如表 5, 计算结果见表 6。

表 5 $d/h = 3.5, Z = 5 \sim 20$ 的曲板构型

d/mm	h/mm	d/h	Z
409.5	117.0	3.5	5
448.0	128.0		6
483.4	138.1		7
517.0	147.7		8
548.5	156.7		9
577.5	165.0		10
633.1	180.9		12
683.8	195.4		14
731.1	208.9		16
775.4	221.5		18
817.3	233.5		20

表 6 $Z = 5 \sim 20$ 的曲板临界剪切应力系数计算值对比

Z	k_s (有限元)	k_s (工程方法)	误差
5	6.5	6.4	2.0%
6	6.4	6.4	0.5%
7	6.5	6.5	0.1%
8	6.5	6.7	-2.9%
9	6.6	7.0	-5.7%
10	6.5	7.0	-7.3%
12	6.9	7.6	-8.9%
14	7.1	8.0	-11.7%
16	7.4	8.4	-12.4%
18	7.6	8.9	-14.7%
20	7.9	9.3	-15.1%

经过观察分析, $Z \leq 20$ 时, $(k_s - k_s^{FEA})$ 递增, 误差绝对值范围 0.1% ~ 15.1%。

当 $10 < Z \leq 20$ 时, 误差绝对值多数大于 10%, k_s 相对 k_s^{FEA} 偏高。对于 2060-T8E30 材料, 可以认为 $d/h = 3.5$ 的曲板临界剪切应力系数曲线相比有限

元分析值偏高,误差不大于20%。

当 $Z < 10$ 时,误差绝对值不超过10%。对于2060-T8E30材料,可以认为 $d/h = 3.5$ 的曲板临界剪切应力系数曲线的适用性较好,误差不大于10%。

4 结论

本文基于Abaqus的线性静力分析中的Buckle算法,对蒙皮材料2060-T8E30建立了多种构型曲板,进行了有限元分析和工程方法分析的对比,验证了曲板临界剪切应力系数曲线的适用性。

对 $d/h = 1.5$ 、 $d/h = 2$ 、 $d/h = 3.5$ 的三种典型 d/h 的曲板,每种分别选取 $Z = 2$ 、 5 、 10 、 20 、 70 、 100 、 300 七种曲率参数进行模型构建,验证了21种构型的曲板临界剪切应力系数曲线的适用性。

结果表明:对于2060-T8E30材料,可以认为 $d/h = 1.5$ 的曲板临界剪切应力系数曲线相比有限元分析值偏高,误差不大于15%; $d/h = 2$ 的曲板临界剪切应力系数曲线相比有限元分析值偏高,误差不大于20%; $d/h = 3.5$ 的曲板临界剪切应力系数曲线相比有限元分析值偏高,误差不大于35%。

为了进一步验证在飞机机身结构常用的参数,即 $d/h = 3.5$ 、 $Z \leq 20$ 时曲板临界剪切应力系数曲线的适用性,增加了 $d/h = 3.5$ 、 $Z = 5 \sim 20$ 的11种构型的曲板,进行了屈曲计算和误差分析。

结果表明:对于2060-T8E30材料,在飞机机身结构常用的参数,即 $d/h = 3.5$ 、 $Z \leq 20$ 的情况下,当 $Z < 10$ 时, $d/h = 3.5$ 的曲板临界剪切应力系数曲线的适用性较好,误差不大于10%;当 $10 < Z \leq 20$ 时, $d/h = 3.5$ 的曲板临界剪切应力系数曲线相比有限元分析值偏高,误差不大于20%。

参考文献:

- [1] 崔德刚. 结构稳定性设计手册[M]. 北京:航空工业出版社,1996.
- [2] Batdorf S B, Stein M, Schilderout M. Critical shear stress of curved rectangular panels[R]. NACA TN 1348, 1947.
- [3] Khun P, Peterson J P, Levin L R A. A summary of diagonal tension part I: methods of analysis[J]. NACA TN 2661, 1952.
- [4] 牛春匀,冯振宇,程小全,等. 实用飞机结构应力分析及尺寸设计[M]. 北京:航空工业出版社,2009.
- [5] 江丙云,孔祥宏,罗元元. ABAQUS工程实例详解[M]. 北京:人民邮电出版社,2014.

作者简介

孙昊 男,硕士。主要研究方向:机体强度设计;E-mail: sunhao2@comac.cc

周良道 男,博士,研究员。主要研究方向:飞机设计;E-mail: zhouliangdao@comac.cc

郭伟毅 男,本科,高工。主要研究方向:机体强度设计;E-mail: guoweiyi@comac.cc

李三平 男,博士,研究员。主要研究方向:有限元技术;E-mail: lisanping@comac.cc