

[制造·使用·改进]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.04.017

FOCKE 硬盒包装机烟组推耳 静动态特性对比研究

杨忠泮^{1*}, 徐勇¹, 靳岚^{2,3}, 谢黎明^{2,3}, 梁小玲¹

(1. 甘肃烟草工业有限责任公司 兰州卷烟厂, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 数字制造技术与应用
省部共建教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 3. 兰州理工大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要:为探究 FOCKE 硬盒包装机烟组输送元件烟组推耳的结构优劣性,在分析烟组推耳的结构布局及特征的基础上,课题组建立了 FOCKE 701 推耳、FOCKE FC800 推耳和 FOCKE SSB 推耳的三维模型。通过分析烟组推耳在额定速度工况下的工作载荷与约束条件,利用 ANSYS Workbench 对 3 种结构的烟组推耳进行了静力学及模态分析,获得了 3 种烟组推耳的仿真试验最大位移量及修正计算最大位移量、最大应力值及位置以及前 6 阶固有频率及振型,并分别计算静、动态比刚度效能。其结果表明:当竖直筋上部连接处采用半径大于 9 mm 的圆角,下部连接处宽度与固定端等宽时,可以有效减小应力集中;SSB 推耳的静态比刚度效能为 96.5,分别比 701 与 FC800 高 30 倍和 39 倍;3 种推耳的前 6 阶振型基本相同,其中 SSB 推耳动态比刚度效能为 14.9,分别比 701 与 FC800 高 68.6% 和 68.9%;SSB 烟组推耳是最优支撑结构。文中研究能为卷烟直包机的烟组推耳设计提供有价值参考。

关键词:烟草机械;FOCKE 包装机;烟组推耳;有限元分析;静动态特性;比刚度效能

中图分类号:TS43 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2019)04-0088-07

Comparative Study of Static and Dynamic Characteristics of Cigarettes Pushing Lugs for FOCKE Packer

YANG Zhongpan^{1*}, XU Yong¹, JIN Lan^{2,3}, XIE Liming^{2,3}, LIANG Xiaoling¹

(1. Lanzhou Cigarettes Factory, Gansu Tobacco Industrial Co. Ltd., Lanzhou 730050, China;

2. Key Laboratory of Digital Manufacturing Technology and Application of Ministry of Education,

Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. School of Mechanical and

Electronical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to get the relative merits among three kinds of cigarettes pushing lugs in FOCKE Packer, based on the introduction of structure characteristics and layout of cigarettes pushing lug. Research projects' group built the 3D model of cigarettes pushing lugs for FOCKE 701, FOCKE FC800 and FOCKE SSB. Through analyzing cigarettes pushing lug's working load and constraint conditions under the condition of rated speeds, finite element software ANSYS Workbench was used to simulate the static analysis and modal analysis of them. The results of simulating calculation maximum displacement and correcting calculation maximum displacement, the maximum equivalent stress value and position, the first six natural frequencies and modes for three kinds of cigarettes pushing lugs were obtained. Secondly the static and dynamic specific stiffness structural efficiency (SSSE) were calculated separately. The results show that in the position of upper vertical reinforcement joint adopts radian rounded-corned of 9 mm, and in the position of lower vertical reinforcement joint adopts the design of equal width with fixed end, these methods can effectively decrease the stress concentration. The value of SSB cigarettes pushing lug's static SSSE is 96.5, which has a 30 times higher value of 701's static SSSE, and it also has a 39 times value of FC800's static SSSE. The three cigarettes pushing lugs have same first six

收稿日期:2019-02-18;修回日期:2019-05-05

第一作者简介:杨忠泮(1990),男,甘肃兰州人,工学硕士,助理工程师,主要从事机械结构优化及卷烟包装机的维护管理。

E-mail:363583280@qq.com。

natural modes basically, including value of SSB cigarettes pushing lug's dynamic SSSE is 14.9, it has a 68.6% higher value of 701's dynamic SSSE, and it also has a 68.9% higher value of FC800's dynamic SSSE. SSB cigarettes pushing lug is optimal support structure. This research has some theoretical guiding significance for the design of FOCKE packer.

Keywords: tobacco machinery; FOCKE packer; cigarettes pushing lug; FEA (Finite Element Analysis); static and dynamic characteristics; specific stiffness structural efficiency

德国 FOCKE 公司研制的直包式硬盒包装机是国内烟草工业企业广泛使用的卷烟包装机组之一^[1]。卷烟硬盒包装机从双通道的 FOCKE FC800 (800 包/min) 到 FOCKE 701 (1 000 包/min), 再到异型单通道的 FOCKE SSB (16 支全开硬盒包装, 330 包/min)^[2], 生产效率和包装形式在逐步发展改进, 但同时也对机组零部件的运行性能和使用寿命提出了更高要求。其中, 关于在烟组成形输送与铝箔纸包装的工序技术的实现中, 胡波等^[3]在铝箔纸烟包推手机构的运动特性方面做了部分的研究; 王雷华^[4]对卷烟直包机的凸轮式柔和推送机构的运动学进行了研究; 汤达伟等^[5]对推耳结构进行了静力学分析与尺寸优化研究。但是, 这些研究仅仅只是针对特定型号卷烟包装机的烟组输送部件或烟组推耳进行的, 缺乏从同系列的机型中间, 以相同功能部件的结构相似性角度, 考虑烟组推耳结构设计对其静动态性能的影响。FOCKE 公司在包装机的设计理念上注重继承性和系列化, 为此, 课题组以 FOCKE 701、FOCKE FC800 和 FOCKE SSB 的 3 种机型的烟组推耳为研究对象, 分析推耳作为输送部件的结构及截面特征等, 对比不同推耳的结构特点, 利用 ANSYS 有限元软件对 3 种类型的烟组推耳结构进行静动态特性的分析, 获得较优的结构设计布局, 为烟组推耳部件的结构设计提供参考。

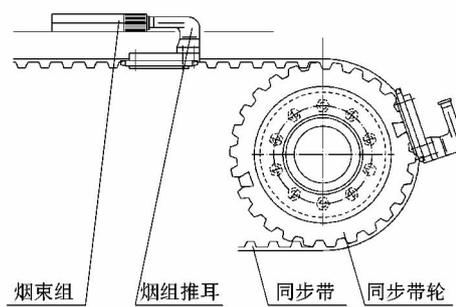
1 烟组推耳的结构特征

1.1 卷烟直包机烟组输送部件组成及工作形式

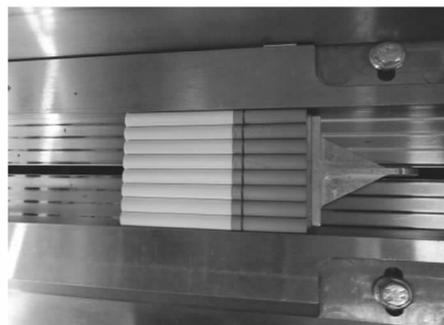
烟组推耳作为 FOCKE 系列直包机专有的烟组输送装置, 一套烟组输送同步带上同时安装有 24~28 件推耳, 并且在包装的间歇运动中要实现高速运动和准确定位。推耳输送同步带安装在烟组通道的外面, 推耳底座通过横梁与输送同步带连在一起, 而且输送同步带是连续运动的, 并由主传动轴驱动, 如图 1 所示。输送部件的功能是将烟支组从烟支转塔中取走, 并且沿着烟支组导轨进行平行输送, 并在进入折叠套口前完成铝箔纸的包裹。

1.2 烟组推耳的结构

如图 2 所示, 依次为 FOCKE 701、FOCKE FC800 和 FOCKE SSB 的 3 种烟组推耳。烟组推耳的结构属



(a) 烟组输送部件结构



(b) 烟组推耳工作状态

图 1 烟组输送部件及推耳结构示意图

Figure 1 Cigarettes transport parts and pushing lugs

于空间的板系或梁板组合结构。按照空间布局以及功能结构可以划分为 3 部分, 即上部在输送通道内与烟组接触的水平推板, 中部在通道间隙运动并起到支撑推板的竖直筋, 下部与横梁连接的固定端。

根据烟组成形的“7-6-7”或“8-8”排列方式, 推耳上部的水平推板前端形状分别有 H 型和矩形 2 种形式, 水平板后端形状采用三角形, 工作时向竖直筋传递载荷; 中部竖直筋从 yoz 平面看, 主要有矩形和直角梯形 2 种形状, 并且竖直筋作为承上启下的部分, 连接处采用圆角处理; 下部固定端的形状 3 种推耳分别采用了单侧嵌入、双侧嵌入以及定位销 3 种不同的安装形式。

2 烟组推耳工作载荷计算

2.1 烟组推耳载荷及约束分析

对烟组推耳所受载荷及约束的分析是实现正确有限元分析的前提。烟组在通道内由推耳进行输送的形式如图 3 所示。在输送的过程中, 推耳底部固定在输

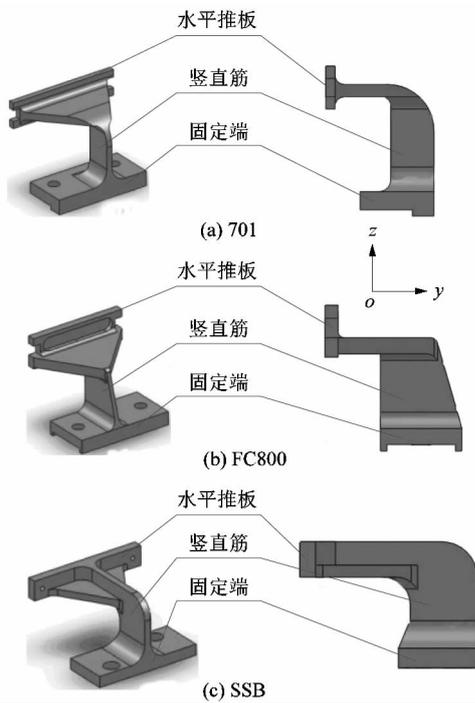


图2 烟组推耳外形与结构图
Figure 2 Shape and structure of cigarettes pushing lugs

送带组件上,随带传动进行运动;烟组在推耳水平推板、通道侧导板与底底板支撑下进行移动。位于烟支导轨上方的移动式盖板用作上部导轨和挤塞检测器。如果烟组发生倾斜或阻塞则将上盖板顶起,由此可使接近开关被触发从而引起停机保护。推耳在输送烟组的过程中主要承受来自烟组的反推力 F_f 、摩擦力 f_m 以及通道的挤压力 F_j 共3种载荷形式。

- 1) 反推力计算: $F_f = F_c = m \cdot n \cdot g$ 。
- 2) 摩擦力计算: $f_m = F_c \cdot \mu = m \cdot n \cdot g \cdot \mu$ 。
- 3) 挤压力计算:

$$\delta_{ys} = \frac{d \cdot a - D_{td}}{d \cdot a};$$

$$S_{jy} = d \cdot h \cdot \delta_{ys};$$

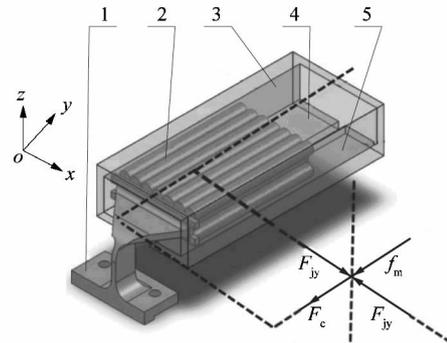
$$\rho = \frac{m}{\pi (d/2)^2 \cdot l};$$

$$M_{jy} = S_{jy} \cdot h \cdot \rho。$$

综上, $F_{jy} = M_{jy} \cdot g = \frac{4 \cdot d \cdot h^2 \cdot \delta_{ys} \cdot g \cdot m}{\pi \cdot d^2 \cdot l}$ 。

4) 烟组推耳承受总工作载荷 $F_{t0} = F_f + f_m + F_j$ 。式中:由于一束烟组的质量相对较小(在13.9~17.4g之间),根据经验得知反推力与重力绝对值大致相同,所以将 F_c 为烟组重力等于 F_f ; m 为烟支质量, n 为烟支数量, g 为重力加速度, μ 为摩擦因数, d 为烟支直

径, a 为顶排烟支数量, l 为烟支长度, h 为烟组高度, ρ 为烟支密度, δ_{ys} 为烟组进入成型通道后在宽度方向上受到被压缩量, D_{td} 为烟组输送通道宽度, S_{jy} 为被挤压面积, M_{jy} 为被挤压质量。



1—推耳;2—烟组;3—上盖板;4—底底板;5—侧导板。

图3 烟组推耳在输送通道内工作载荷
Figure 3 Supported working load by cigarettes pushing lugs

2.2 烟组推耳总工作载荷计算

将 FOCKE 701、FOCKE FC800 和 FOCKE SSB 3 种机型生产的不同牌号烟支参数、烟组及通道尺寸参数代入上述公式,计算得到由反推力、摩擦力和挤压力对推耳的总工作载荷、平均载荷以及各推耳载荷与平均值偏差百分数,如表1所示。

由于推耳材料为硬质铝合金,根据计算得到推耳在实际工况下其承受载荷及应力值是远远小于材料的弹性极限与屈服强度,所以推耳的载荷与位移关系满足 σ - ε 曲线图中的线弹性阶段要求^[6]。通过计算3种推耳的载荷平均值偏差百分数,在3种推耳施加平均载荷获得仿真试验结果后,对其进行修正计算,即可获得各推耳的总体变形量。

表1 烟组推耳总工作载荷

Table 1 Total working load created by cigarettes pushing lugs

名称	总载荷/N	平均载荷/N	载荷平均值偏差/%
701	0.251		+5.46
FC800	0.246	0.238	+3.36
SSB	0.219		-7.98

注:载荷平均值偏差百分数=(计算数值-平均数值)/平均数值。

3 烟组推耳静力学及模态分析

3.1 静力学分析

建立3种推耳的三维模型,采用四面体网格划分

方法,网格单元尺寸设为 1 mm,对各推耳的竖直筋上下连接处圆角进行网格规范精细处理。添加约束条件为推耳底面固定支承,材料选用硬质铝合金,并在推耳的水平推板部位施加载荷。经过求解得

到 3 种烟组推耳总位移云图如图 4 所示,3 种推耳结构最大等效应力及位置云图如图 5 所示。

推耳静力学分析结果及比刚度效能计算如表 2 所示,表中负值代表在直角坐标系中各坐标轴的负方向。

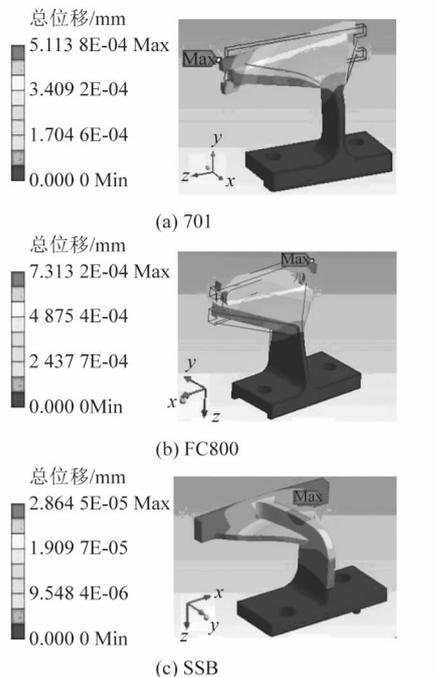


图 4 3 种烟组推耳结构总位移云图

Figure 4 Total deformation images of cigarettes pushing lugs

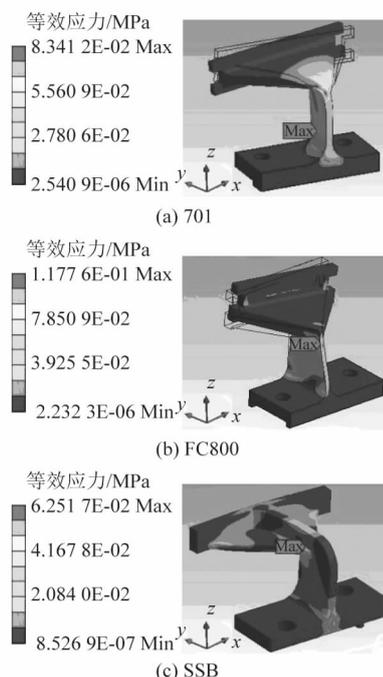


图 5 3 种烟组推耳结构最大等效应力及位置云图

Figure 5 Maximum equivalent stress value and location of cigarettes pushing lugs

表 2 推耳结构静力学分析结果

Table 2 Result of static analysis of cigarettes pushing lugs

名称	质量/kg	最大应力/ MPa	最大变形/ μm					静态比刚度效能
			仿真试验 变形总量	修正计算后 变形总量	仿真试验 中 x 方向	仿真试验 中 y 方向	仿真试验 中 z 方向	
701	0.042	0.083	0.511	0.538	-0.348	-0.287	0.156	3.10
FC800	0.039	0.117	0.731	0.755	-0.010	0.176	-0.391	2.38
SSB	0.025	0.063	0.029	0.026	0.001	-0.015	-0.025	96.50

静态比刚度效能^[7]与补偿计算后变形总量计算公式为:

1) 静态比刚度效能

$$\varepsilon = \frac{E}{B_{\max} m_{te}}$$

2) 补偿计算后变形总量

$$\eta_{bc} = \eta_{tz} (1 + \lambda)$$

式中: ε 为静态比刚度效能,数值越大表示零件的静态比刚度结构效能越好; E 为材料的弹性模量; B_{\max} 为零件的最大变形量; m_{te} 为零件质量; η_{bc} 为零件补偿计算后变形总量; η_{tz} 为零件仿真计算后变形总量; λ 为载荷

平均值偏差百分数。

根据图 4~5 及表 2 分析结果可知:

1) 701 推耳处于匀速推送烟组的工况下,总体的最大变形出现在上部水平推板的左端,修正计算后最大变形量为 0.538 μm ,最大变形方向为 X 方向,主要的变形形式为上部水平推板在 XOY 平面的扭转;推耳的最大等效应力、应变发生在中部竖直筋与下部固定端连接处内侧,最大应力值为 0.083 MPa,竖直筋与上部水平推板外圆角半径为 15 mm。

2) FC800 推耳处于匀速推送烟组的工况下,总体的最大变形出现在上部水平推板的右端,修正计算后

最大变形量为 0.755 μm,最大变形方向为 Z 方向,主要的变形形式为上部水平推板在 XOZ 平面的扭转;推耳的最大等效应力、应变发生在上部水平推板与中部竖直筋连接处外侧,最大应力值为 0.117 MPa,竖直筋与上部水平推板外圆角半径为 5 mm。

3) SSB 推耳处于匀速推送烟组的工况下,总体的最大变形出现在上部水平推板的右端,修正计算后最大变形量为 0.026 μm,最大变形方向为 Z 方向,主要的变形形式为上部水平推板在 XOZ 平面的上下摆动;推耳的最大等效应力、应变发生在上部水平推板与中部竖直筋连接处外侧,最大应力值为 0.063 MPa,竖直筋与上部水平推板外圆角半径为 9 mm。

综上所述,701 与 SSB 推耳在上部水平推板与中部竖直筋连接处,均采用了半径大于 9 mm 的圆角,该种结构可以有效减小该处的应力集中;FC800 与 SSB 推耳在中部竖直筋与下部固定端连接处,采用与固定端等宽度连接方式,可以有效减少该处的应力集中;

表 3 推耳结构固有频率及振型

Table 3 Natural frequency and vibration mode of cigarettes pushing lugs

模态阶数	固有频率/Hz			振型
	701	FC800	SSB	
1	428	375	684	上部水平推板在 zox 面左右摆动,中部竖直筋弯曲变形
2	842	809	1 179	上部水平推板在 xoy 面转动,中部竖直筋扭转变形
3	1 509	2 430	2 107	上部水平推板在 yoz 面上下摆动,中部竖直筋弯曲变形
4	2 374	2 661	3 632	上部水平推板与竖直筋在 zox 面互为反向摆动,中部竖直筋呈 S 型弯曲
5	3 425	6 067	6 912	上部水平推板呼吸振动,中部竖直筋在 yoz 面左右摆动
6	11 058	10 428	12 323	上部水平推板在沿 x 轴弯曲扭转变形

表 4 烟组推耳动态比刚度效能

Table 4 Dynamic specific stiffness structural efficiency of cigarettes pushing lugs

型号	比刚度效能
701	8.84
FC800	8.82
SSB	14.90

表中动态比刚度效能 = 前 6 阶固有频率平均值/结构质量^[9]。

前 3 阶模态振型图如图 6~8 所示。

从图 6~图 8 的前 3 阶振型图中发现,3 种推耳在低阶固有频率方面,701 推耳与 FC800 推耳的前 2 阶固有频率基本靠近,SSB 推耳除了三阶固有频率低于 FC800 推耳,其余各阶固有频率均高于另外 2 种推耳。在振型及变形方面,由于 3 种推耳都是底部固定端约束,而且质量和结构组成基本相同,所以它们的各阶固有频率对应的振型基本一致。3 种推耳的固有频

SSB 推耳的静态比刚度效能最大,其刚度 - 质量比是 3 者中最好的。3 种推耳在与烟组接触的上部水平推板接触面都是变形最显著的位置,但最大应力并未超出材料的许用极限;最大变形也较小,满足结构的定位精度要求。

3.2 模态分析

超高速包装设备在生产过程中的振动与噪声也一直以来是研究的重要内容,为此对烟组推耳结构进行模态分析是非常必要的。通过研究其动态特性,获得对应的固有频率与振型,在设计制造过程中避开其固有频率,使得烟组输送装置运行更稳定,达到降低噪声与延长使用寿命的目的^[8]。

运用 ANSYS Workbench 对 3 种推耳结构进行模态分析,施加底部固定约束,提取其前 6 阶固有频率及振型进行比较分析,详见表 3。烟组推耳动态比刚度效能如表 4 所示。

率均大于 370 Hz,远大于在额定生产速度(单通道 330~500 包/min 条件下)由于间歇运动引起的振动频率,设备生产过程中低阶频率的外部激励不会引起烟组推耳出现共振,而且 SSB 推耳的动态比刚度效能最佳。将 3 种推耳的前 6 阶固有频率绘制成图,如图 9 所示。

4 结论

课题组以 FOCKE 硬盒包装机 701、FC800 和 SSB 的 3 种机型的烟组推耳结构为研究对象,分析了烟组推耳的工作载荷形式以及计算方法,通过有限元软件对 3 种推耳进行了静力学与模态分析。结果表明:

1) 推耳水平推板与竖直筋连接处采用大弧度圆角,竖直筋与固定端连接处采用等宽度连接,综合 2 种结构特征形式可有效改善局部应力集中。

2) 推耳的水平推板与烟组接触面的变形最显著。其中 SSB 推耳静态比刚度效能为 96.5,其静刚度是 3 种型号中最佳的。

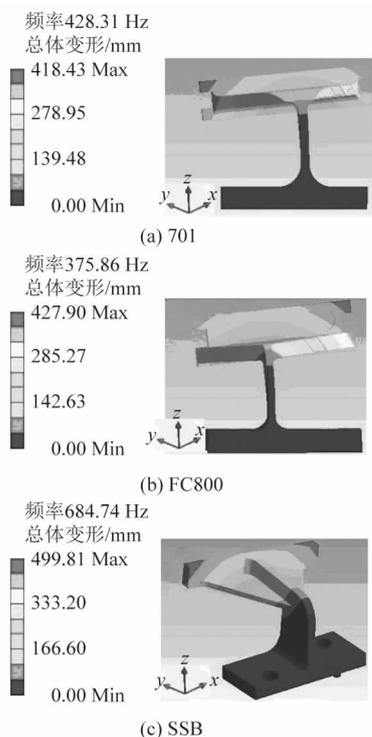


图6 一阶振型图

Figure 6 First mode image of vibration

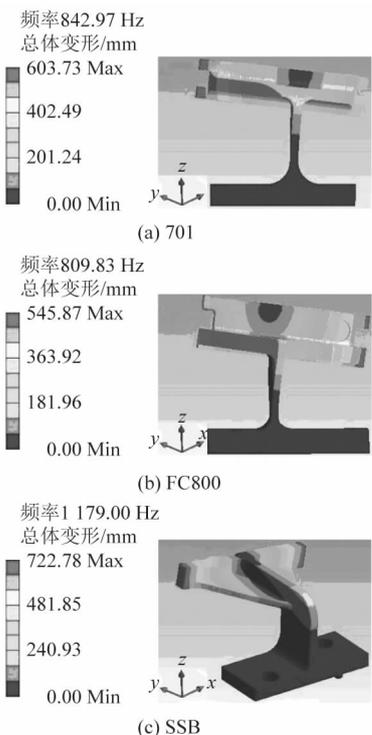


图7 二阶振型图

Figure 7 Second mode image of vibration

3) 推耳的动态特性相似,在设备运行引起的激振下不会引起烟组推耳的共振,其中 SSB 推耳的前 6 阶

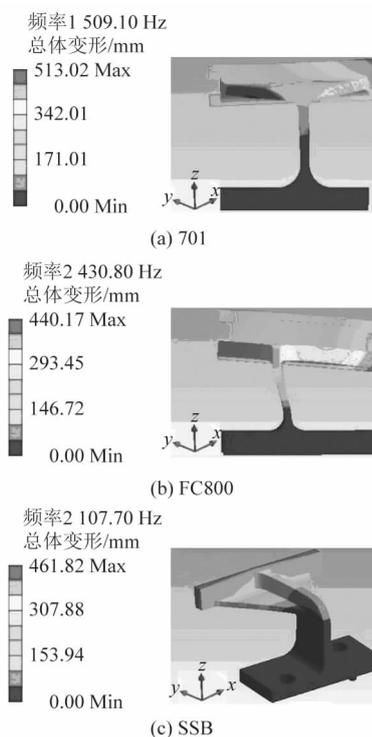


图8 三阶振型图

Figure 8 Third mode image of vibration

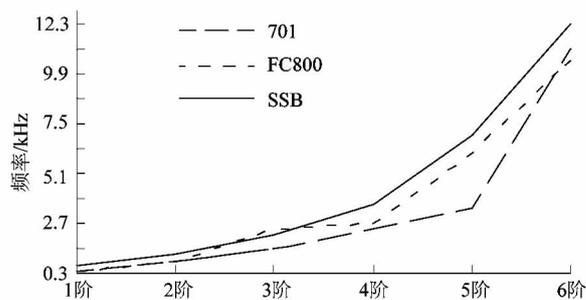


图9 3种结构推耳前6阶固有频率

Figure 9 First six natural frequencies of cigarettes pushing lugs

固有频率略高于其他 2 种,而且 SSB 推耳动态比刚度效能为 14.9,是 3 种型号推耳中最佳的。

因此在直包机的烟组推耳输送装置设计时,应综合考虑推耳结构形式及其静、动态特性等因素,SSB 推耳的结构形式具有较优的力学特性。本文可为国产超高速卷烟直包机的烟组成形输送部件设计提供参考。

参考文献:

[1] 黄德良,龚美华,徐峰. FOCKE FC800 超高速硬盒包装机技术分析[C]//中国烟草学会 2010 年学术年会论文集. 合肥:中国烟草学会,2010:1-7.