DOI：10.13700/j.bh.1001-5965.2008.12.013
2008年 12月 北京航空航天大学学报 December 2008
第34卷 第12期 Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics Vol 34 No.12

反作用轮密封罩结构抗屈曲设计计算及试验

赵丽滨 龙丽平 张建宇

(北京航空航天大学 宇航学院，北京 100191) (北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100191)

韩邦成

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院，北京 100191)

摘 要：反作用轮密封罩结构对保证反作用轮正常工作具有重要的作用，其稳定性直接影响反作用轮性能的稳定性.针对某反作用轮密封罩结构，基于通用有限元分析软件 ANSYS，利用特征值屈曲分析和非线性屈曲分析两种方法，通过对影响反作用轮密封罩结构稳定性能的关键因素的定量研究，指出壳面形态是影响密封罩稳定性能的关键因素，提出了该类密封罩结构的设计应采用小凸大凹弧的设计方案，说明了两种屈曲分析方法对该类问题的适用范围.反作用轮密封罩的地面模拟试验结果说明了采用非线性屈曲分析方法预测临界屈曲载荷在工程上是可行的.结果为反作用飞轮密封罩结构以及同类产品的设计提供参考.

关 键 词：稳定性；结构安全；屈曲分析；

中图分类号：V 411.5

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2008)12-1464-05

Numerical and experimental research on buckling design of reaction-wheel's sealed cowling structure

Zhao Libin

(School of Astronautics Beijing University of Aeronautics and Astronautics Beijing 100191, China)

Long Liping Zhang Jianyu

(School of Aeronautic Science and Engineering Beijing University of Aeronautics and Astronautics Beijing 100191, China)

Han Bangcheng

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering Beijing University of Aeronautics and Astronautics Beijing 100191, China)

Abstract: It is significant to ensure stability of the sealed cowling structure which offers a safe work environment for the reaction-wheel. The stability of some kind of sealed cowling structure was quantitatively researched by the eigenvalue buckling technique and nonlinear analysis method based on the general software ANSYS. The shell shape as a key factor to affect the stability of the sealed cowling was pointed. A small protruding arc and large concave arc scheme was presented to design the sealed cowling structures. The application scopes of the eigenvalue buckling analysis and nonlinear buckling analysis were described aimed to the similar structures. The experimental results illustrate the practicability to predict the critical buckling load via nonlinear buckling analysis method in engineering. The researches are useful for the design and buckling analysis of similar structures.

Key words: stability; structure safety; buckling

收稿日期：2007-01-04

基金项目：国家民用航天预研重点资助项目

作者简介：赵丽滨(1976—)，女，黑龙江人，副教授，lbzhao@buaa.edu.cn.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

反作用轮是航天姿态控制系统中飞轮执行机构中惯性轮的一种,它通过控制反作用轮的加速或减速来改变角动量,产生反作用力矩,从而精确地控制卫星等空间飞行器的姿态.反作用轮外壳体结构对保证反作用轮正常工作具有重要的作用,由底座和密封罩两部分组成.底座用于固定安装反作用轮静止部件,提供与卫星安装的机械接口等作用.密封罩保护反作用轮组件清洁,防止电机被空间磁性颗粒污染,防止各种宇宙射线的干扰,并给内部结构提供密封的真空环境等[1].外壳体结构尤其是密封罩结构设计的合理性直接影响到反作用轮性能的稳定性,从而影响飞行器的安全可靠性.

反作用轮密封罩结构的主要失效形式为屈曲破坏,要使该结构在地面试验时保证壳体内部真空环境而不损坏,需要研究影响结构屈曲性能的关键因素,对其进行抗屈曲设计.而对于这种复杂的实际工程结构,设计中没有直接的理论分析结果可借鉴,本文采用大型通用有限元分析软件,对密封罩结构的稳定性能进行定量的数值分析,给出影响密封罩屈曲性能的关键因素以及密封罩屈曲性能的变化趋势,以用于指导密封罩结构的设计,并通过试验来检验不同计算方法的数值分析结果,说明分析方法在密封罩结构屈曲分析中的适用性.

1　屈曲分析方法

屈曲分析主要研究结构在特定载荷作用下的稳定性及确定结构失稳的临界载荷及屈曲模态[2—3].对于标准的球形壳,可以通过线弹性的理论临界失稳解析解来分析,而对于密封罩等工程用不规则形状壳体结构,其抗屈曲特性一般通过有限元方法来得到数值解.用有限元方法进行稳定性分析包括两种方法,特征值屈曲分析和非线性屈曲分析.特征值屈曲分析用于预测一个理想弹性结构的理论屈曲强度(分叉点),而不考虑任何非线性和初始扰动,如图 1所示.

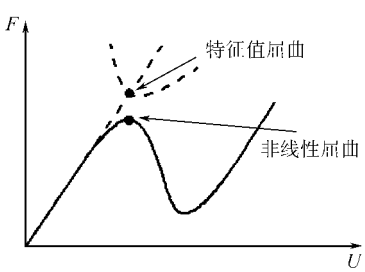


图 1　特征值屈曲和非线性屈曲

特征值屈曲基于经典的特征值问题,可以预测失稳载荷的上限,而所关心的真实失稳载荷要通过非线性分析得到.一般采用弧长法分析非线性屈曲问题,因为弧长法不仅可以得到更精确的失稳载荷,还可以追踪凸弧型壳结构的后屈曲路径.弧长法的迭代方程可以表示为

$$\mathbf{K}_i^{\mathrm{T}}\Delta\mathbf{u}_i = \lambda_{i+1}\mathbf{F}^{\mathrm{a}} - \mathbf{F}_i^{\mathrm{nr}} \tag{1}$$

式中,$\mathbf{K}_i^{\mathrm{T}}$为切线刚度矩阵;$\mathbf{F}^{\mathrm{a}}$为载荷步 n所施加的载荷;$\mathbf{F}_i^{\mathrm{nr}}$为载荷步 n迭代步 i的单元应力所计算的内部载荷;λ_{i+1}为载荷因子;$\Delta\mathbf{u}_i$为迭代步 i的位移增量,如图 2所示有

$$\left.\begin{aligned}\lambda_{i+1} &= \lambda_n + \lambda_i - \Delta\lambda\\ \mathbf{u}_{i+1} &= \mathbf{u}_n + \Delta\mathbf{u}_n + \Delta\mathbf{u}_i\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

把式(2)代入式(1)中,方程可以写为

$$\Delta\mathbf{u}_i = \Delta\lambda\Delta\mathbf{u}'_i + \Delta\mathbf{u}''_i \tag{3}$$

式中,$\Delta\mathbf{u}'_i = (\mathbf{K}_i^{\mathrm{T}})^{-1}\mathbf{F}^{\mathrm{a}}$;$\Delta\mathbf{u}''_i = -(\mathbf{K}_i^{\mathrm{T}})^{-1}\mathbf{R}_i$;$-\mathbf{R}_i = (\lambda_i + \lambda_n)\mathbf{F}^{\mathrm{a}} - \mathbf{F}_i^{\mathrm{nr}}$;弧长半径在该载荷步 n是不变的,$l_i = l_{i-1} = \cdots = l_1$,可通过人为给定,弧长半径满足下列等式,其中 β为缩放因子.

$$l_i^2 = \lambda_i^2 + \beta\Delta\mathbf{u}_n^{\mathrm{T}}\Delta\mathbf{u}_n \tag{4}$$

有了式(3)和式(4),可以得到 Δλ和 $\mathbf{u}_{i+1}$,从而进行下一步的迭代.

虽然特征值屈曲分析一般得到是非保守解,但由于其简单快捷,得到的临界载荷可以作为非线性屈曲分析加载的重要参考,屈曲模态可以用来作为非线性屈曲分析中的初始几何缺陷,因此本文采用这两种方法来研究密封罩结构的稳定性.

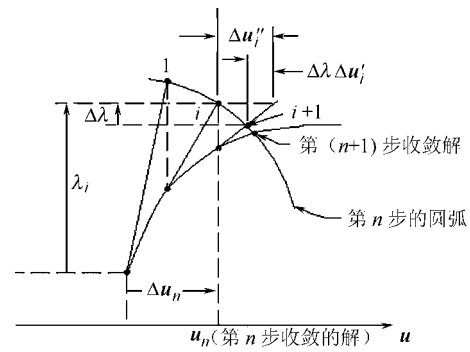


图 2　基于 Newton-Raphson迭代的弧长法

2　反作用轮密封罩结构设计方案

从反作用轮工作情况出发,需将密封罩结构设计为一轴对称的旋转体,为尽量减少密封罩结构的重量,提高其抗屈曲能力,在设计时主要要考虑密封罩的半径、壳面厚度及壳面形态因素,半径大的密封罩抗屈曲能力弱,半径小的密封罩结构抗屈曲性能强,密封罩的半径主要由反作用轮转

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

子结构尺寸确定.对某一确定的反作用转子结构来讲,密封罩的半径 R及罩顶的高度 H是确定的,如图 3所示,在设计时需要主要考虑壳面厚度及壳面形态对抗屈曲能力的影响.图 3给出了密封罩的壳面形态采用凸弧和凸凹弧两种设计方案的母线示意图.为保证密封罩的内部空间,在凸凹弧设计方案中,将把 B′点提高到 B点位置. C点是凸弧和凹弧的分界点,与 A, B点在一条直线上, C点对 AB直线的分割位置不同将形成不同的壳面形态,其对应密封罩结构将具有不同的稳定性能.本文采用特征值分析方法和非线性分析方法分别对凸弧设计方案和不同凸凹弧分割比例的凸凹弧设计方案进行定量分析,以研究壳面形态和壳面厚度对密封罩抗屈曲性能的影响.

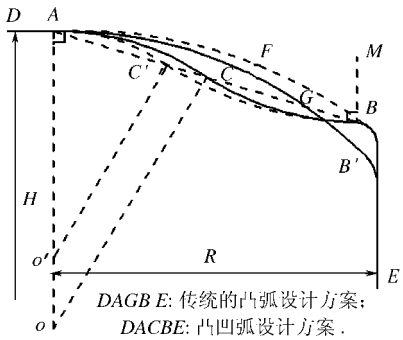


图 3 密封罩剖面母线示意图

3 密封罩结构抗屈曲性能计算

基于通用有限元分析软件 ANSYS采用特征值分析方法和非线性分析方法,对两种设计方案不同参数情况下的密封罩结构进行抗屈曲性能分析.密封罩由 2A12-T4制成,密封罩顶部中央以及与底座相连部分固支约束,采用特征值分析时,在密封罩外表面施加一个大气压的载荷,采用非线性屈曲分析时,在密封罩外表面施加 1.01×10^6 Pa的载荷,图 4为边界约束条件和载荷示意图.对不同壳面厚度、不同壳面形态的密封罩结构采用特征值分析方法和非线性分析方法进行定量研究,对于凸弧设计方案,计算了母线为 DAGB′E和 DAFBE两种情况,如图 3所示,对于凸凹弧设计方案,壳面形态由凸凹弧分界点 C点对 AB线段的分割比例来确定.凸弧 DAFBE方案即对应于凸凹弧设计方案中分割比例为 1的情况.

对于 1.0mm厚的凸弧 DAGB′E型密封罩结构,图 5给出采用特征值方法计算得到的密封罩结构的屈曲模态图,其临界屈曲载荷为 4.01×10^5 Pa.图 6给出采用非线性屈曲分析方法计算得到的结构上某两点处的载荷位移曲线,从图中可以看出,当达到 1.49×10^5 Pa时,两条曲线均出现了拐点,密封罩结构发生失稳,随后进入后屈曲阶段,图 7给出失稳后密封罩结构 y方向的位移云图.

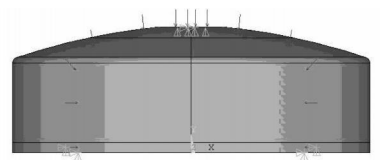


图 4 边界约束条件和载荷示意图

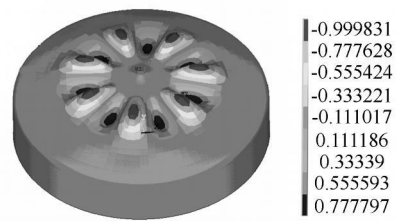


图 5 厚度 1.0mm的凸弧 DAGB′E型密封罩特征值分析的屈曲模态

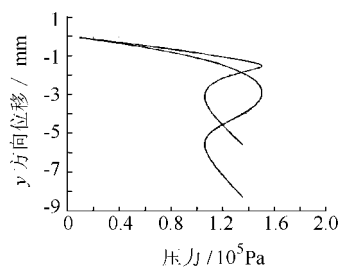


图 6 厚度 1.0mm的凸弧 DAGB′E型密封罩非线性分析的载荷位移曲线



图 7 厚度 1.0mm的凸弧 DAGB′E型密封罩非线性分析的屈曲模态

从图中可以看出,采用特征值分析方法得到的临界载荷与采用非线性分析方法得到的临界载荷数值差别较大,对于凸弧设计方案,特征值分析高于非线性分析结果.

对于不同壳面厚度及不同壳面形态下的密封罩结构计算的临界屈曲载荷结果列于表 1,表 1中比较了 6种凸凹弧设计方案和两种凸弧设计方案的临界屈曲载荷,凸凹弧的分割比例由小逐渐增大,说明凸弧所占比例增加,凹弧所占比例逐渐减小.此处分别列出了分割比例为 0.131, 0.327, 0.523, 0.785, 0.916, 1.000的情况.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　不同壳面厚度、不同壳面形态的密封罩结构的临界屈曲载荷　　10^5 Pa

设计方案		凸凹弧分割比例						凸弧	
		0.131	0.327	0.523	0.720	0.785	0.916	1.000DAFBE	DAGB′E
壳厚 1.0mm	非线性分析	6.08	2.21	1.56	1.71	1.23	1.38	1.18	1.49
	特征值分析	2.3	1.63	0.89	0.75	1.18	3.08	3.09	4.01
壳厚 1.5mm	非线性分析	10.9	5.32	3.55	2.67	2.38	1.81	1.80	2.53
	特征值分析	5.23	2.90	1.70	2.41	3.34	7.24	6.80	8.54

图 8给出了不同壳面厚度情况下临界屈曲载荷随凸凹弧分割比例变化曲线:

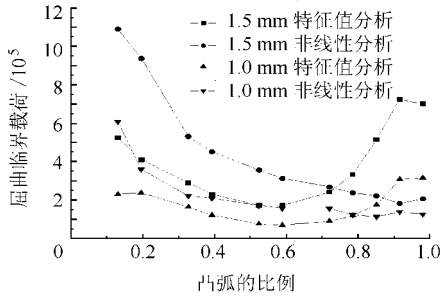


图 8　凸凹弧设计方案的临界屈曲载荷

从表 1和图 8可以看出:随着壳面厚度的增加,密封罩结构的抗屈曲能力大幅度提高;对于凸弧设计方案,特征值计算结果高于非线性分析的计算结果;对于凸凹弧设计方案,当凸凹弧分割比例小于 0.7时,特征值计算结果小于非线性计算结果,当增大凸弧所占比例时,特征值计算结果大于非线性计算结果;对于凸凹弧设计方案,随着凸凹弧分割比例增加,特征值计算结果先降低然后升高,然后再有小幅度下降,而非线性分析结果基本上一直呈现下降趋势,在小凸弧大凹弧情况下,临界屈曲载荷下降显著.在凸凹弧比例达到一定程度时,非线性方法与特征值方法所体现出来的临界屈曲载荷变化规律完全不同.由文献[4]可知,"使结构真正跨掉的载荷将取决于载荷 位移曲线上首次出现的峰值,并且应该是考虑恰当的非线性项后进行分析的结果."因此,在设计密封罩结构时,应该主要参考非线性屈曲的分析结果.

从上面的分析可以说明:壳面形态是密封罩结构抗屈曲能力的主要影响因素,改变壳面形态基本上不增加结构的重量,而能大幅度的增加结构的抗屈曲性能;增加壳面厚度可以提高密封罩结构的抗屈曲能力,但要以增加结构重量为代价.在密封罩结构设计时首先采用小凸弧大凹弧的设计方案,然后再考虑适当增加壳面厚度.

对于密封罩类结构,当凸凹弧比例较小时,即凹弧占主导地位时,采用特征值分析可以得到保守的结果,如能满足稳定性条件,可以不进行进一步的非线性分析.而当凸凹弧比例比较大时,凸弧占主导地位时,则必须采用非线性分析方法预测结构的临界屈曲载荷值.

4　试验验证

为验证数值分析结果,对厚度 1.0mm的凸弧 DAGB′E型密封罩结构进行密封,然后进行抽真空试验,试验情况如图 9所示,当密封罩内部压力为 71Pa时,该密封罩发生了屈曲失稳,从图 10可以看出,密封罩上表面发生了凹陷.对于该密封罩采用特征值方法分析时,预测临界屈曲载荷为 4.01×10^5 Pa而采用非线性分析方法分析时,预测临界屈曲载荷为 1.49×10^5 Pa.考虑密封罩结构材料及加工缺陷等因素,一般取安全系数为 1.5,则采用非线性屈曲分析方法计算的临界载荷计算值和试验值吻合比较好,可以用于描述密封罩结构的稳定性能.计算临界屈曲模态为理想状态下的屈曲形状,试验中由于材料及加工等因素影响,不可能完全处于理想状态,因此模态形状与计算不完全一致.

对采用凸凹弧设计方案改进设计的密封罩结构进行相同试验,密封罩在内部真空,外部一个大气压情况下未发生失稳破坏.

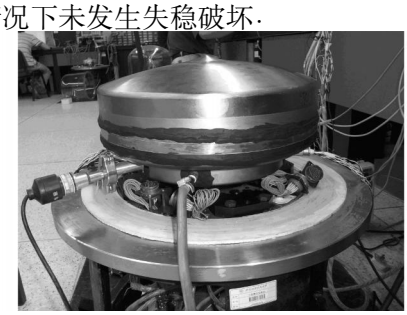


图 9　反作用飞轮地面模拟试验

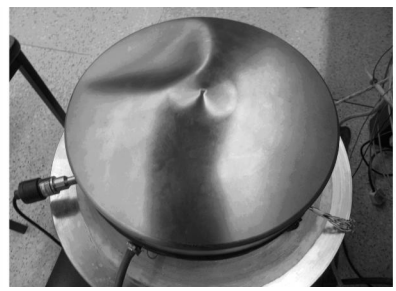


图 10　试验中发生失稳的密封罩

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

5 结 论

本文研究了密封罩抗屈曲性能的主要因素，针对某一型号反作用飞轮的密封罩，对其壳面形态及壳面厚度对结构抗屈曲性能进行定量研究，并通过试验验证了分析方法的可行性.研究表明：壳面形态是密封罩结构抗屈曲能力的主要影响因素，在密封罩结构设计时首先采用小凸弧大凹弧的设计方案，然后再考虑适当增加壳面厚度.

对于密封罩类结构，当壳面形态以凹弧占主导地位时，采用特征值分析方法可以得到保守的结果，如能满足稳定性条件，可以不进行进一步的非线性分析.而当壳面形态以凸弧占主导地位时，必须采用非线性分析方法预测结构的临界屈曲载荷值.

参考文献 (References)

[1] 平菊英，刘胜忠.卫星大动量矩飞轮的设计 [J].上海航天，2002, 1：8－12
Ping Juying Liu Shengzhong Big-momentum flywheel design for satellite[J]. Aerospace Shanghai 2001, 1：8－12(in Chinese)

[2] 崔德刚.结构稳定性设计手册 [M].北京：航空工业出版社，1996：1－12
Cui Degang Structure stability design manual[M]. Beijing：Aviation Industry Press 1996：1－12 (in Chinese)

[3] 陈铁云，沈惠中.结构的屈曲 [M].上海：上海科学技术文献出版社，1993
Chen Tieyun Shen Huizhong Buckling of structures [M]. Shanghai：Shanghai Science and Technology Literature Press 1993 (in Chinese)

[4] 诸德超，王寿梅.结构分析中的有限元素法 [M].北京：北京航空航天大学固体所，1990：354
Zhu Dechao Wang Shoumei The finite element method in structure analysis[M]. Beijing：Solid Department of Beijing University of Aeronantics and Astronawtics 1990：354(in Chinese)

[5] 姜维，闵乐宁.动量轮壳体的设计与分析 [J].轴承，2004, 12：4－5
Jiang Wei Min Lening The design and analysis of shell of momentum wheel[J]. Bearing 2004, 12：4－5(in Chinese)

[6] 童晓琳.复合材料层合板的非线性后屈曲分析 [J].北京航空航天大学，1994, 20(2)：174－178
Tong Xiaolin An analysis of nonlinear post-buckling for composite laminates[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics 1994, 20(2)：174－178(in Chinese)

[7] 朱菊芬，初晓婷.一种改进的弧长法及在结构后屈曲分析中的应用 [J].应用数学和力学，2002, 23(9)：961－967
Zhu Jufen Chu Xiaotin An improved arc_length method and application in the post_buckling analysis for composite structure [J]. Applied Mathematics and Mechanic 2002, 23(9)：961－967(in Chinese)

(责任编辑：张 嵘)

(上接第 1455页)

[2] Arvind Kumar Sandip Tiwari A power-performance adaptive low voltage analog circuit design using independently controlled double gate CMOS technology[C]//Proceedings of the 2004 International Symposium on Circuits and Systems Vancouver：the Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc 2004：197－200

[3] Huang Mingfeng Kuo C J Lee Shuenn-Yuh A 5.25 GHz CMOS folded-cascode even-harmonic mixer for low-voltage applications[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 2006, 54(2)：660－669

[4] 吴明明. 2.4GHz CMOS混频器的设计与仿真 [D].哈尔滨：哈尔滨工业大学微电子科学与技术系，2006
Wu Mingming 2.4GHz CMOS design and simulation of mixer [D]. Harbin：Dept of Microelectronics Science and Technology Harbin Institute of Technology 2006(in Chinese)

[5] 刘乾坤.超宽带系统中 CMOS直接下变频混频器的设计和研究 [D].西安：西安电子科技大学微电子学院，2007
Liu Qiankun Design and research on CMOS direct down conversion mixer for UWB system [D]. Xi'an：School of Microelectronics Xidian University 2007(in Chinese)

[6] Pullela R S Sowlati T Rozenblit D Low flicker-noise quadrature mixer topology[C]//Proceedings of the 2006 IEEE International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers Maine：S^3 Digital Publishing Inc 2006：1870－1879

[7] Wu T H Tseng S C Meng C C et al GaInP/GaAs HBT subharmonic gilbert mixers using stacked-LO and leveled-LO topologies[J]. Microwave Theory and Techniques 2007, 55(5)：880－889

[8] 崔福良.蓝牙收发机中混频器电路和镜像抑制电路的分析与设计 [D].上海：复旦大学微电子学系，2004
Cui Fuliang Analysis and design of mixers and image-reject circuits in bluetooth transceiver[D]. Shanghai：Dept of Microelectronics Fudan University 2004(in Chinese)

[9] 陈邦媛.射频通信电路 [M].北京：科学出版社，2004：58
Chen Bangyuan RF communication circuits[M]. Beijing：Science Press 2004：58(in Chinese)

[10] Lee C P Behzad A Dayo Ojo et al A highly linear direct-conversion transmit mixer transconductance stage with local oscillation feedthrough and I/Q imbalance cancellation scheme [C]//Proceedings of the 2006 IEEE International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers Maine：S^3 Digital Publishing Inc 2006：1450－1459

[11] Shevchuk E Kyusun Choi Folded cascode CMOS mixer design and optimization in 70 nm technology[C]//Proceedings of 48th Midwest Symposium on Circuits and Systems Stoughton：The Printing House Inc 2005：943－946

(责任编辑：娄 嘉)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net