

波纹管流体诱导振动研究进展

闫松¹, 谭永华², 陈建华¹

(1. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100; 2. 航天推进技术研究院, 陕西 西安 710100)

摘要: 波纹管输运高速流体时经常会发生疲劳破坏, 流体诱导波纹管振动是导致波纹管疲劳破坏的重要因素之一。通过归纳总结国外相关研究成果, 阐述了流体诱导振动的机理: 液体诱导波纹管振动属于漩涡脱落诱导振动; 气体诱导波纹管振动属于声振荡-弹性耦合振动。根据研究结果提出了抑制振动的措施。

关键词: 波纹管; 流体诱导振动; 涡脱落; 啸声

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2014) 02-0016-06

Research progress of flow-induced vibration of bellows

YAN Song¹, TAN Yong-hua², CHEN Jian-hua¹

(1. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China;

2. Academy of Aerospace Propulsion Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract: Fatigue failure of bellows occurs quite often when they carry fluids at high speed. Fluid-induced vibration is one of the important factors of the fatigue failure. In China, there is less research on this problem at present. The relevant research achievements abroad are summarized in this paper. The mechanism of flow-induced vibration is introduced. The liquid-induced vibration of bellows belongs to the vortex shedding induced vibration, while the gas-induced vibration of bellows belongs to acoustic and elastic coupling vibration. The vibration suppression measures are proposed in this paper on the basis of the research achievements.

Keywords: bellows; fluid-induced vibration; vortex shedding; whistling

0 引言

波纹管是管壁具有褶皱形状的圆柱形薄壁件, 安装在管路系统中通过波纹处的变形吸收管路的变形。波纹管的薄壁褶皱特征使得其在保持局部刚性的同时, 整体又有柔韧性, 因此广泛应

用于液体火箭发动机、通风系统以及热交换器中。

柔性波纹管的流体诱发振动可能导致疲劳失效, 经常性地损坏高速流动的流体管路^[1]。波纹管在工作过程中, 内部流体的流动是复杂的非定常湍流流动, 过流表面为曲面。波纹管作为弹性

收稿日期: 2013-02-18; 修回日期: 2013-08-07

作者简介: 闫松 (1988—), 男, 硕士, 研究领域为液氧煤油火箭发动机动力学

元件, 其内部非定常流动与波纹管结构相耦合, 激发出振动和噪声。振动的幅值很难预测, 频率可以高达上千赫兹。波纹管内部高于疲劳极限的交变应力可以使波纹管在几秒内失效。

目前国内对波纹管的研究主要集中在对波纹管结构强度、刚度和稳定性分析方面, 而对波纹管流体诱导振动的研究较少。本文主要回顾了国外流体诱导波纹管振动的相关研究, 阐述了液体和气体诱导波纹管振动机理的不同。按照流体诱导波纹管振动机理的不同, 可分为液体诱导振动和气体诱导振动 2 类。

1 液体诱导振动

液体诱导波纹管振动在航天系统应用中尤为突出。波纹管组件很早就已成功应用于运载器和火箭发动机管路中, 其尺寸范围很宽, 工作条件也各不相同。航天系统中设计使用的波纹管吸收了工业上所用的波纹管方面的经验。然而, 航天系统中使用的波纹管, 其内部流体流速大、压力高、温度变化大且工作条件很苛刻, 在相同的尺寸下对其承载能力的要求要远高于工业用波纹管。同时, 航天系统中采用的波纹管为了减轻重量, 往往直径较小, 壁厚较薄, 如果流体流动与波纹管结构相耦合, 就可能导致波纹管在短时间内疲劳失效。

美国早在 20 世纪 60 年代就开展了波纹管流体诱导振动的相关研究^[2-9]。在土星 5 运载器第 2 次飞行期间, 其中的 1 台二级 J-2 发动机发生故障导致提前关机; 同一次飞行, 三级的 J-2 发动机在地球轨道上起动失败。这些异常最后查明是由于流体诱导振动导致波纹管疲劳失效引起的。这些失效案例促使美国对流体诱导波纹管振动问题进行了广泛研究, SWRI (Southwest Research Institute) 调查分析了超过 50 个不同种类的挠性软管和管路样本^[6]。

液体激励波纹管振动的经典试验结果如图 1 所示。随着波纹管内部流体速度从零缓慢增加, 依次激发出波纹管轴向各阶模态。每一阶振动模态在一定的流速范围内被激发, 最大交变应力发生在该流速范围的中心附近。

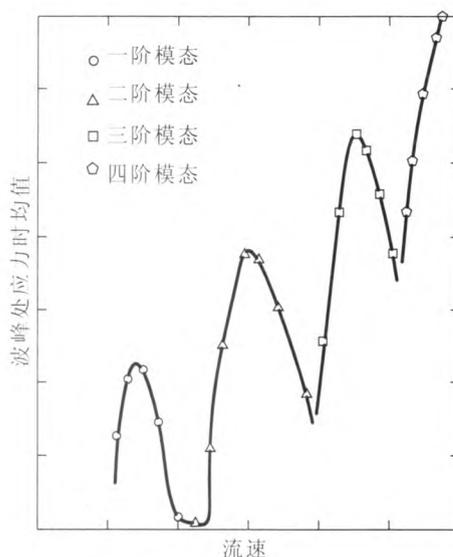


图 1 流动激起的四阶振动模态及对应的波纹管应力
Fig. 1 Flow-excited four-order vibration mode and corresponding stress of bellows

波纹管轴向振动的各阶模态如图 2 所示, 横坐标表示波纹管轴线, 纵坐标表示波纹管各点的轴向振动大小。一阶模态波纹管中点位置轴向振动最大, 并且波纹管所有点振动是同相的。二阶模态在波纹管 1/4, 3/4 位置振动位移最大, 并且在波纹管中点两侧振动是反向的。

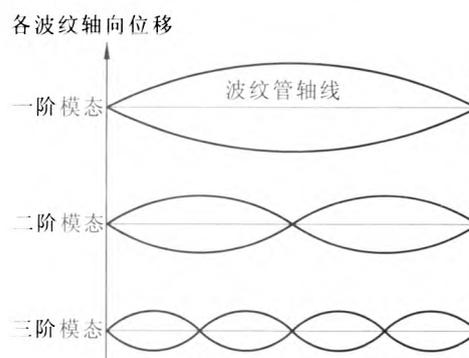


图 2 波纹管轴向振动模态

Fig. 2 Longitudinal vibration mode of bellows

如图 3 所示, 早期的流动可视化试验观察到了波纹管波谷处有明显漩涡不断脱落, 确认了流体在波纹管内壁波谷处的涡脱落是造成振动的机理。斯德罗哈数 (St) 是表征涡脱落频率的无量纲数, 可以很好地描述涡脱落频率、来流速度和几何构型三者之间的关系:

$$St=fL/v \quad (1)$$

式中： f 为涡脱落频率； L 为特征尺寸； v 为流体流速。

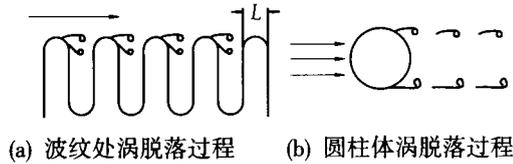


图3 涡脱落过程

Fig. 3 Vortex shedding process

试验表明，流体诱导波纹管振动和流体流经两端固支的弹性圆柱体形成的涡激振动两者的 St 数都在 0.2 附近，这说明流体诱导波纹管振动也是一种涡激振动。当涡脱落的频率与波纹管的某一阶轴向固有频率相一致时，就会发生强烈振动。基于试验结果，波纹管流体诱导振动是波纹管结构和流体涡产生和脱落过程的动态耦合^[7]。

基于涡脱落理论，NASA 建立了流体诱导波纹管振动的数学模型，提出了估算给定波纹管几何尺寸和来流速度下的流体诱导动应力的半经验方法^[8]。该方法将波纹管每半个波等效为集中质量，各集中质量之间采用弹簧连接，通过计算波纹管固有频率，以及涡脱落频率，求得激起的波纹管模态阶数，在此基础上估算波纹管应力。同时编制了计算波纹管流体诱导交变动应力的计算程序。该方法对高压挠性软管以及刚度较大的自由金属波纹管的预测较为准确。应用该方法对土星/阿波罗运载器上所有使用的波纹管进行了计算，以判断流体诱导振动问题是否存在。此后，NASA 完善了试验数据，进一步修正了模型中的系数，提高了精度^[9]。

在国内，罗宏瀚基于商用软件 ANSYS，建立了流体诱导波纹管振动的计算模型，比较研究了波纹管参数、流动等性质对振动的影响，定性地分析了不同条件下振动的特征，并根据计算结果提出了波纹管流固耦合的减振方法^[10]。

2 气体诱导振动

气体流经波纹管时的流场特性与液体流经波纹管时的流场特性有显著不同，特别是在高速流

动条件下，气体流经波纹管会产生独特的啸声（Whistling）现象。气动声学载荷可以通过产生附加的波纹管声学模态增加波纹管自由度数。当声学共振条件建立时，波纹管产生显著的振动响应，振动远比由于涡脱落导致的振动要强得多。

对空气和氟利昂进行的流动测试试验研究表明，2 种介质流经波纹管时表现出相同的声学特性。随着波纹管中空气和氟利昂流动速度的增加，波纹管几乎没有响应，直到流动速度增加到某一临界值，波纹管突然产生显著的振动，并且从整个测试回路中伴随着很强的声辐射，表明了此时声学共振的存在。因为声波在氟利昂中的流动速度大约为空气中流动速度的一半，激发声共振所需要的氟利昂的临界流动速度是空气的一半。声速的减小意味着共振频率的减小，因此需要较小的流动速度来建立共振条件。由于波纹管与声振型相耦合，声振载荷可能增加波纹管系统的自由度数，通过流体系统传递很大的压力波。这些声共振除产生噪声外，还可能显著地增加流动诱发振动产生的应力，这是由于声共振和压力脉动与漩涡脱落过程相耦合而产生的力的放大引起的。由于气体诱导振动的复杂性，目前研究集中在波纹管中气体诱导声学共振的研究。

波纹管的发声现象作为科学研究的主题已经有近一个世纪了。早期的波纹管是作为乐器使用的，波纹管中的流动-声交互作用是十分复杂的。最近一段时期，波纹管用于海上输运天然气的柔性立管，有时候发现波纹管仅仅在工作几个小时后就发生了泄漏^[11]。波纹管的失效泄漏与波纹管中产生的高频压力脉动有关，管路中的噪声并不是主要考虑的内容，但波纹管高频压力振荡导致管路疲劳泄漏却是一个值得关注的问题。对于解决对策，有人提出控制管内气体的流速，因为只有当气体流速增大到某一“临界速度”时才会激发出声；也有人提出通过增加设备强度使得可以承受噪声和振动。但无论从哪方面考虑，深入理解气体诱导发声的机理都是重要的。

如图 4 所示，当气体流过波纹管各个波纹处，气体扰动会激发出某种波长的声波，并且这种扰动是等距分布在波纹管各个波纹处。这种条

件将会放大某种波长的声波, 因为声波向各个方向传播, 在衰减完之前将到达另外一个声源, 同相的声源叠加在一起。如果仅仅考虑轴向的传播, 就有可能产生声学驻波。基于这种分析, 管子的柔韧性并不是产生声振的必要条件。实际上, 波纹管是弹性结构, 将会受到某种波长的声波影响, 如果波纹管结构的某阶固有频率和声波的频率接近, 波纹管振动将会和声学振荡发生耦合, 造成结构疲劳破坏。当流动介质为液体时, 由于液体中声速很大 (波长较大), 因此难以满足驻波形成的条件。

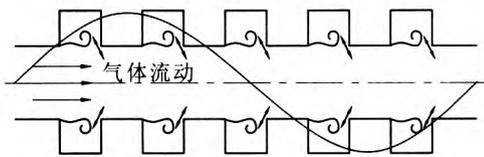


图 4 剪切层及二阶轴向声学驻波示意图

Fig. 4 Schematic diagram of shear layers and second-order axial acoustic standing wave

目前大部分关于波纹管声振的研究基于试验结果^[12-14]。如图 5 所示, 随着气体速度从零开始增加, 波纹管中轴向各阶声振型依次被激发, 啸声主频也逐渐增加, 但表现为阶跃式增加, 并且只有当流体速度大于某一值时, 波纹管中才可能激发出声音。Cadwell 通过对不同类型波纹管测试, 发现对于直径较小的波纹管, 雷诺数 (基于波距) 大于 500 时才有可能发声^[15]。Cermak 发现管路中的基频很难被激励^[16]。

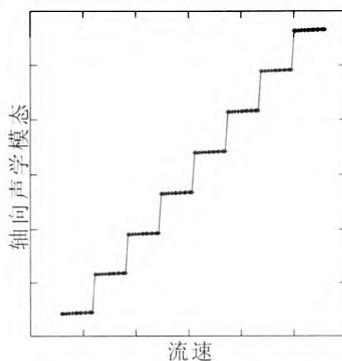


图 5 主频随流速变化规律

Fig. 5 Variation of dominant frequency with flow velocity

另外一个研究的热点是管路中声源的位置。文献 [17] 通过使用光管代替不同位置的波纹管部分来确定声源位置, 认为声源位于声学驻波的速度波腹, 而 Kristiansen 和 Wiik 的试验表明, 只有将一段波纹管放置于光管的入口端时, 管中才可能激发出显著的声音; 对于全波纹的管子, 声源位于声学驻波的压力波腹处^[18]。

Nakamura 和 Fukamachi 试验表明空气流经两端开口的波纹管时, 声音频率与流速成正比, 也就是说 St 数近似为常数^[19]; Weaver 和 Ainsworth 指出 St 数一般大于 0.45; 文献 [20-21] 通过大量的试验表明 St 数在 0.45~0.6 之间, 其中特征尺寸基于波距。

除了试验研究, 也有学者对流体诱导波纹管发声现象进行了建模分析^[22-23]。文献 [24] 考虑能量平衡, 基于涡-声理论建立了预测啸声现象的模型。该模型预测的 St 数和实际符合较好, 但过高估计了压力脉动的幅值。

针对波纹管内的流动振荡特性, 开展了一些数值仿真研究。在湍流模型的选取上, 传统的湍流模型在处理时间平均问题上可以得到合理的结果, 但是不适于解决波纹管内的非稳态流动问题。大涡模拟在处理这类问题上精度要远远优于 RANS, 是未来一段时间波纹管内流场仿真的发展趋势。Mihaela Popescu, Stein Tore Johansen 和 Wei Shyy 等人对气体流经波纹管的研究采用了大涡模拟数值方法, 仿真计算结果捕捉到波纹管产生的声学驻波, 仿真所得 St 数和试验数据吻合良好^[25-26]。

3 波纹管防振措施

无论是液体还是气体, 当流体速度低于“临界流速”, 波纹管振动较弱, 但临界速度一般较小, 严重制约了波纹管运输流体的能力。工程中波纹管流体诱导振动的防振措施主要有以下几点:

1) 采用多层波纹管。多层波纹管层与层之间的摩擦阻尼可以抑制振动, 但如果波纹管固有频率和流体激励频率相吻合, 仍会产生强烈振动。

2) 增加外部阻尼。在波纹管外部加入铠装环可以抑制流体诱导振动,但带来的问题是波纹管组件结构质量大幅增加。对直径较小波纹管,可以在外部加金属编织网套,波纹管和网套之间的摩擦阻尼可以抑制振动。

3) 流动衬套。波纹管内部增加导流筒可以解决流体诱导振动问题,但需要注意的是加入导流筒会使得管路压降、结构质量增加,同时导流筒本身也会疲劳失效。

4 结束语

液体诱导波纹管振动属于漩涡脱落诱导振动, NASA 给出了估算波纹管交变应力和疲劳寿命的半经验方法,精度较高;气体诱导波纹管振动,气体会激发声学共振,声振载荷可能增加波纹管系统的自由度,情形要复杂的多,目前较多的研究是对于波纹管内部声学共振的研究。采用大涡模拟对波纹管内部流场的数值仿真成为探索波纹管内部流体-声交互作用机理的重要手段。

参考文献:

- [1] ECKARD T D. Liquid rocket lines, bellows, flexible hoses, and filters, NASA-SP-8123[R]. USA: NASA, 1978.
- [2] GERLACH C R. Study of minimum pressure loss in high velocity duct systems, NASA-CR-91525[R]. USA: NASA, 1967.
- [3] GERLACH C R. Flow-induced vibrations of metal bellows, ASME PAPER 69-VIBR-5[R]. USA: ASME, 1969.
- [4] GERLACH C R, SCHROEDER E C. Study of minimum pressure loss in high velocity duct systems, NASA-CR-102499[R]. USA: NASA, 1970.
- [5] BASS R L, HOLSTER J L. Bellows vibration with internal cryogenic fluid flows, ASME PAPER 71-VIBR-14 [R]. USA: ASME, 1971.
- [6] GERLACH C R. Vortex excitation of metal bellows, ASME PAPER 71-VIBR-22[R]. USA: ASME, 1971.
- [7] MARRIS A W. A review of vortex streets, periodic wakes, and induced vibration phenomena[J]. Journal of Basic Engineering, 1964 (86): 165-196.
- [8] DANIEL C M, FARGO C G. Fatigue failure in metal bellows due to flow-induced vibrations, MFS-18383[R]. USA: NASA, 1969.
- [9] SACK L E, NELSON R L, MASON D R, et al. Prediction of flow-induced failure of braided hoses and bellows, MFS-19004[R], USA: NASA, 1972.
- [10] 罗宏瀚. 借助有限元分析对输流波纹管元件的减振研究[J]. 矿山机械, 2008, 36(3): 52-56.
- [11] GOYDER H. On the modeling of noise generation in corrugated pipes[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2010 (132): 1-7.
- [12] DEBUT V, ANTUNES J, MOREIRA M. Experimental study of the flow-excited acoustical lock-in in a corrugated pipe[C]// Proceedings of 14th International Congress on Sound Vibration. Cairns, Australia: ICSV, 2007: 123-133.
- [13] KRISTIENSEN U R, MATTEI P, PINHDE C, et al. Measurements on tones generated in a corrugated flow pipe with special attention to the influence of a low frequency oscillation[C]// 34th Scandinavian Symposium on Physical Acoustics. Geilo, Norway: [s.n.], 2011: 1-7.
- [14] BELFROID S P C, SHATTO D P, PETERS R M C A M. Flow induced pulsations caused by corrugated tubes [C]// 2007 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference. San Antonio, Texas: ASME, 2007:1-9.
- [15] CADWELL L H. Singing corrugated pipes revisited[J]. American Journal of Physics, 1994, 62(3): 224-227.
- [16] CERMARK P. On the sound generation in flexible metal hoses with spiraling grooves [J]. Phys Z, 1922 (23): 394-397.
- [17] GOLLIARD J, TONON D, BELFROID S. Experimental investigation of the source locations for whistling short corrugated pipes[C]//Proceedings of the ASME 2010 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting and 8th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels. Montreal, Canada: ASME, 2010: 11-20.
- [18] KRISTIENSEN U R, WIJK G A. Experiments on sound generation in corrugated pipes with flow[J]. J Acoust Soc Am, 2007, 121 (3): 1337-1344.
- [19] NAKAMURA Y, FUKAMACHI N. Sound generation in corrugated tubes [J]. Fluid Dyn Res, 1991 (7): 255-261.
- [20] WEAVE D S, AINSWORTH P. Flow induced vibration in bellows[C]// International Symposium on Flow-induced Vibration and Noise. Chicago: [s.n.], 1998 : 205-214.

- [21] KOPEV V F, MIRONOV M A, SOLNTSEVA V S. Sound generation, amplification and absorption by air flow through waveguide with periodically corrugated boundary [C]// Forum Acoustic 2005 Conference. [S.l.]: [s.n.], 2005: 111-114.
- [22] DEBUT V, ANTUNES J, MOREIRA J. Flow-acoustic interaction in corrugated pipes: time-domain simulation of experimental phenomena [C]// 9th International Conference on Flow-Induced Vibration. Prague: Czech Republic, 2008: 113-123.
- [23] POPESCU M, JOHANSEN S, SHYY W. A Model for flow-induced acoustics in corrugated pipes [C]// 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando, Florida: AIAA, 2009: 1-14.
- [24] TONON D, LANDRY B J T, BELFROID S P C, et al. Whistling of a pipe system with multiple side branches: Comparison with corrugated pipes[J]. Journal of Sound and Vibration, 2010 (329): 1007-1024.
- [25] POPESCU M, JOHANSEN S, SHYY W. Flow-induced acoustics in corrugated pipes[J]. Commun Comput Phys, 2011, 10(1):120-139.
- [26] POPESCU M, JOHANSEN S. Acoustic wave propagation in low Mach flow pipe, AIAA2008-0063[R]. USA: AIAA, 2008.

(编辑: 陈红霞)

(上接第 6 页)

- [3] HOFER R R. High-specific impulse operation of the BPT-4000 Hall thruster for NASA science missions, AIAA-2010-6623[R]. USA: AIAA, 2010.
- [4] GRYS K D, FISHER J, WILSON F, et al. 4.5 kW Hall thruster system qualification status, AIAA-2004-3603[R]. USA: AIAA, 2004.
- [5] WITZBERGER K, MANZELLA D. Performance of solar electric powered deep space missions using hall thruster propulsion, AIAA-2005-4268[R]. USA: AIAA, 2005.
- [6] KAMHAWI H, HAAG T, PINERO L. Overview of the development of a low cost high voltage Hall accelerator propulsion system for NASA science missions, AIAA-2011-5520 [R]. USA: AIAA, 2011.
- [7] FLORENZ R, GALLIMORE A D, PETERSON P Y. Developmental status of a 100-kW class laboratory nested channel Hall thruster, IEPC-2011-246[R]. [S.l.]: IEPC, 2011.
- [8] AKIMOV V N, BAIDAKOV S G, GALAYKO V N. Development of KM-5 HALL effect thruster and its flight testing onboard GEO spacecraft "EXPRESS-A4" [J]. Progress in Propulsion Physics, 2009 (1): 411-424.
- [9] CORNU N, MARCHANDISE F, DARNON F, et al. The PPS 1350-G qualification demonstration: 10500 hrs on the ground and 5000 hrs in flight, AIAA-2007-5197[R]. USA: AIAA, 2007.
- [10] KOCH N, HARMANN H-P, KORNFELD G. Status of the THALES high efficiency multi stage plasma thruster development for HEMP-T 3050 and HEMP-T 30250, IEPC-2007-110[R]. [S.l.]: IEPC, 2007.

(编辑: 张永秀)