

# 波纹管动力学分析研究进展

杨慧毅,钟玉平,张小文

(中国船舶重工集团公司第七二五研究所,河南 洛阳 471023)

**摘要:**从理论模型、试验研究及有限元分析等方面回顾了波纹管固有频率、阻尼特性及机械阻抗等动力学参数的研究进展,总结了波纹管动力学响应的有限元分析方法及试验方法,分析了流体诱导振动的研究现状,展望了波纹管动力学研究亟待解决的问题。

**关键词:**波纹管;固有频率;阻尼特性;机械阻抗;动力学响应;流体诱导振动

**中图分类号:**TQ055.81 **文献标识码:**B

## Development of Dynamic Analysis of Bellows

YANG Huiyi, ZHONG Yuping, ZHANG Xiaowen

(Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, China)

**Abstract:** The development of the kinetic parameters such as natural frequency, damping and mechanical impedance of bellows was reviewed from the aspects of theoretical model, experimental study and finite element analysis. The finite element analysis method and test method for the dynamic response of bellows were summarized and fluid induced vibration analyzed. Finally, some problems were pointed out for the future research.

**Keywords:** bellows; natural frequency; damping; mechanical impedance; dynamic response; fluid induced vibration

波纹管主要用于补偿管路或设备因温差或温度波动引起的位移,同时,也可以用作管路及设备中的减隔振元件。随着航空航天、船舶、核电、石化及汽车等行业的发展,燃气轮机、汽轮机、电机等各类动力机械高功率化引发的管路振动也愈加剧烈,对波纹管的减隔振功能提出了更高的要求。国内外现行的波纹管设计标准给出了波纹管的应力及稳定性校核,关于波纹管的振动及减隔振评价问题仅给出了轴向及横向固有频率的预测公式,对振动环境下的波纹管缺少必要的设计依据和判别准则。本研究主要从动力学参数、动力学响应及减隔振评价等方面总结国内外的波纹管动力学研究现状,展望亟待解决的问题。

## 1 波纹管的动力学参数

### 1.1 波纹管的固有频率

波纹管作为管路系统中的柔性元件,容易受到泵阀等激励源的作用而产生振动,其固有的结构形式也使其更易发生流体诱导振动。为避免共振的发生,需要准确预测波纹管的固有频率,这也是进一步对波纹管进行振动响应分析的基础。

DANIELS<sup>[1]</sup>于1966年首次提出采用两端固支的弹性杆模型预测波纹管的轴向固有频率,给出的预测公式中,刚度采用总体轴向刚度,质量包含波纹管内的液体质量。GERLACH<sup>[2]</sup>提出采用多自由度弹簧质量系统预测波纹管的轴向固

收稿日期:2019-07-02

作者简介:杨慧毅,1995年生,男,汉,硕士研究生,主要从事波纹管膨胀节研发;E-mail:huiyi\_yang@163.com.

有频率,给出的公式在预测低阶模态时仅考虑流体静质量,预测高阶模态时同时考虑到了波纹管环壳变形所引起的流体附加质量。黎廷新等<sup>[3]</sup>将波纹管等效为一端固支、一端通过质量块与弹簧相连的弹性杆,采用该模型给出了不同端部条件下的波纹管轴向固有频率。关于波纹管的横向振动固有频率,黎廷新等<sup>[4]</sup>将波纹管等效为两端固支的弹性杆,并给出了预测公式。

关于波纹管振动模态的试验研究,黎廷新等<sup>[5]</sup>采用敲击法与共振法测得了波纹管的轴向及横向固有频率,并与弹性杆模型的计算值进行了对比,说明了计算公式满足工程应用,同时指出,轴向变形量不同时波纹管的动态刚度也有所差异。李春惠等<sup>[7]</sup>将单点正弦激振法实测固有频率与均质杆模型和多自由度弹簧质量系统(离散模型)的计算值进行对比,指出采用多自由度弹簧质量模型预测波纹管的轴向固有频率较为合理。于亚彬等<sup>[8]</sup>采用锤击法测得了波纹管的固有频率及相应振型,并通过动画形象地显示出波纹管的各阶模态。

MORISHITA 等<sup>[9]</sup>认为波纹管横向振动的剪切效应可以忽略,但包含流体质量在内的转动惯量是不可忽略的,并据此推导出了单个波纹管的横向振动固有频率。JAKUBAUSKAS<sup>[10]</sup>指出 MORISHITA 模型比 EJMA 公式的预测值低了 20%,考虑环壳变形的附加质量差别会更大,也从侧面说明了转动惯量对波纹管横向振动的影响较大。JAKUBAUSKAS 等<sup>[11]</sup>建立了波纹管轴向振动的流体附加质量模型,将波纹管的流体附加质量分为流体静质量和波纹管环壳变形两部分。结果表明,环壳变形产生的附加质量随模态数的增加变得越来越重要,对较长波纹管的一阶模态影响较小,对较短的波纹管一阶模态影响较大。关于波纹管的横向振动, JAKUBASKAS 等<sup>[12]</sup>建立了波纹管横向弯曲振动的理论模型,模型考虑了转动惯量以及流体附加质量的影响。对模型预测值与 EJMA 值进行了对比,并且进行了流体为气体、静水及流动水的波纹管试验,指出 EJMA 由于忽略转动惯量和环壳变形附加质量,本质上会过高地估计波纹管的固有频率。BROMAN 等<sup>[15]</sup>将波纹管等效为轴向刚度相等的当量直管,推导了波纹管的轴向、横向及扭转固

有频率。当量直管模型的有限元计算结果与 JAKUBASKAS 等的模型及实验结果的对比表明,当量管模型与实验结果误差在 5% 以内,且两个模型预测结果相差不大,验证了当量管模型满足工程应用。KADAM 等<sup>[16]</sup>采用 Matlab 建立不同端部条件的均质杆模型进行数值分析,并利用有限元软件建立了实体单元波纹管有限元模型进行分析,结果表明,在所考虑的边界条件下,6 个和 7 个波的数值及有限元分析结果匹配的很好,且两端固定条件比一端固定一端自由条件下的前 6 阶轴向振动的固有频率高。

综上所述,国内外现行标准的波纹管固有频率预测公式是基于梁模型推导的,公式形式简单,但计算结果误差较大。JAKUBAUSKAS 等建立的模型误差虽小,但需要结合数值方法,计算过程繁琐。梁模型计算公式的适用范围及 JAKUBAUSKAS 模型的工程化应用是波纹管固有频率预测需要解决的问题。

## 1.2 波纹管的阻尼特性

波纹管的阻尼特性主要采用有限元和试验的方法进行分析,相关的研究主要集中在压力及波纹管的波形参数对其阻尼特性的影响。

钟玉平等<sup>[17]</sup>采用 I-DEAS 软件对高阻尼无加强 U 形波纹管进行有限元分析,并进行了试验验证,研究指出,层间粘弹阻尼对波纹管固有频率影响较小,但可以抑制共振处的峰值,能够较好地提高波纹管的减振性能,这与王世伟等<sup>[18]</sup>的研究结果一致。聂雷等<sup>[19]</sup>通过试验及有限元对比了不同形式波纹管的阻尼比,同时通过有限元计算了波纹管的频响曲线,结果表明,结构尺寸相同的波纹管加强环及层间阻尼材料能够提升波纹管的减振效果。李长治等<sup>[20]</sup>采用有限元法并结合试验研究了波纹管的波形尺寸及阻尼材料对波纹管减振效果的影响,研究指出,层间的阻尼材料会降低波纹管的动态刚度和阻尼系数,同时指出层间的粘性阻尼材料能够有效地衰减高频振动。

李德雨<sup>[21]</sup>针对 4 种不同形式的波纹管,采用有限元及试验研究了波纹管阻尼比随介质压力的变化规律,结果显示,波纹管的阻尼比随压力的升高而增加。宋江涛等<sup>[22]</sup>采用锤击法研究了不同的水介质压力对波纹管阻尼特性的影响

规律,结果显示,波纹管的阻尼与压力载荷呈非线性的关系,在低压及高压处非线性较为严重,中间部分也基本呈现出阻尼比随压力的升高而增加的趋势。

杨明辉等<sup>[23]</sup>采用有限元及试验研究了多层波纹管的等效阻尼,研究指出,多层波纹管的等效阻尼随波高的增加而增加,随壁厚及波距的增加而减小,直径变化影响不明显;同时研究了集中力载荷及介质压力对多层波纹管损耗因子的影响规律。

现行的国内外标准并不涉及波纹管的阻尼特性,建立波纹管的阻尼比与波纹管的波形参数及工况条件之间的关系是波纹管阻尼特性评价所面临的问题。

### 1.3 波纹管的机械阻抗

在减隔振设计中,利用机械阻抗来预测波纹管的隔振效果是一种有效的方法。熊永华等<sup>[24]</sup>通过试验获得了波纹管的机械阻抗曲线,机械阻抗曲线的最小值与有限元分析的共振频率相对应,说明了利用有限元方法获取波纹管动态参数的可行性。李双印等<sup>[25]</sup>将多层波纹管等效为刚度及重量相近的单层波纹管,采用有限元方法得到了金属挠性接管的机械阻抗,与试验结果的对比表明,机械阻抗的计算值与实测值虽有一定的偏差,但变化的趋势一致,研究指出,采用有限元分析机械阻抗可以满足工程应用。波纹管机械阻抗研究较少,需建立统一的试验方法及合理的有限元分析方法以评价波纹管的动力学特性。

## 2 波纹管的动力学响应

### 2.1 波纹管的谐响应分析

波纹管谐响应分析是波纹管抗震及减隔振设计的基础。日本学者 MORISHITA 等<sup>[26]</sup>建立了金属波纹管简化动力学分析方法,推导了正弦激励下加速度、位移及应力的最大值以预测波纹管的地震响应;并对波纹管及含波纹管的管系进行了试验验证,结果表明,简化方法虽有一定的误差,但可以满足工程应用。吴宏煜<sup>[27]</sup>对波纹管膨胀节进行了位移响应分析,研究指出,合理地布置波纹管膨胀节可以明显衰减激振振幅。

韩舒洁<sup>[28]</sup>采用 ANSYS 分析了波纹管的位移响应,指出波纹管具有较好的吸振能力;对波纹管进行瞬态振动分析的结果表明,承受冲击时波纹管在第一或第二个波的波谷处最易发生破坏。HORNUNG 等<sup>[29]</sup>对传送低温推进剂管线用的金属波纹管进行了振动试验,研究给出了不同正弦扫波下的波纹管最大响应幅值。

### 2.2 波纹管的流体诱导振动

输流管路的振动是典型的流固耦合问题,而波纹管环壳处的流体流动更为复杂,流体诱导振动现象更加严重。GERLACH 等<sup>[30-31]</sup>在 20 世纪 70 年代进行了金属波纹管内部流体诱导振动的相关研究,指出波纹管环壳涡街脱落是波纹管轴向振动的激励源,并通过流体可视化的实验进行了验证。结果表明,Strouhal 数(特征尺寸为波谷宽度)在 0.10~0.25 范围内,流体诱导振动现象较为明显,并且 Strouhal 数约为 0.18 时流体诱导振动响应达到峰值。在上述研究基础上,GERLACH 等<sup>[32]</sup>提出采用有效力系数预测涡街脱落力,同时结合动态放大因子和模态因子给出了适用于工程计算的流体诱导振动所产生的应力。

1972 年,BASS 等<sup>[33]</sup>将 GERLACH 的研究工作拓展到了低温流体,对波纹管流体诱导振动进行了试验研究和理论分析,以期对波纹管抗振性能进行预测。研究发现,低温流体在环壳内部形成的局部气化,可降低波纹管环壳处的涡街脱落力,降低幅度与所含流体特性及热传导率有关。此外,还讨论了在波纹管外侧的外部结露、结冰及冷凝液体对阻尼特性的影响,给出了一种存在外部冷凝物时预测减振效果的方法。

ROCKWELL 等<sup>[34]</sup>提出波纹管环壳处周期性空洞引起的不稳定剪切层激励机理。Gidi 等<sup>[35]</sup>研究验证了剪切层激励机理。

WEAVER 等<sup>[36]</sup>在 20 世纪 90 年代针对 Inconel600 材料的波纹管进行试验研究,研究表明,Strouhal 数(特征尺寸为波距)约为 0.45 时,流体诱导振动响应达到峰值。同时针对不能设置导流筒场合减缓流体诱导振动的方法进行了相关的试验研究,结果表明,金属丝编织物能有效地消除振动,增加集中质量可消除低阶模态,波纹管内流体形成,旋转流对流体诱导振动无



影响。

### 2.3 波纹管的减隔振效果评价

有关金属波纹管和橡胶挠性接管的减隔振效果评价,国内外的相关研究较少。王强等<sup>[38]</sup>通过试验测得了船用往复泵管路中挠性接管的插入损失,结果表明,挠性接管能有效衰减管路系统的机械振动,但对管路的流体脉动压力无影响。梁向东<sup>[39]</sup>通过试验研究了挠性接管不同工作压力下的振级落差,结果表明,不同的静压力对挠性接管的减隔振效果影响不大,而流体压力脉动激励会导致挠性接管的减隔振性能随压力的升高而降低。邓亮等<sup>[41]</sup>通过试验研究了不同压力下挠性接管的振级落差和插入损失,结果表明,挠性接管可有效衰减管路的振动及结构噪声。王育平等<sup>[42]</sup>对典型通海管路进行了试验研究,结果表明,流速对加速度振级落差有很大的影响。

综上所述,波纹管的动力学响应主要通过有限元及试验进行研究,理论研究较少,缺乏波纹管动力学响应与波纹管参数之间的关系,波纹管流体诱导振动方面,GERLACH等已建立了评价方法。关于波纹管的减隔振评价,不同的约束方式及不同的载荷条件下,波纹管的振级落差及插入损失结果往往不同,建立统一的试验方法来评价波纹管的减隔振性能是目前所面临的技术难题。

## 3 波纹管的振动分析

关于波纹管的振动分析,现行的国内外标准还不够完善,可见的文献资料中仅涉及波纹管的流体诱导振动分析方法、测试流程及验收要求。1990年,美国航天航空局颁布了MSFC-SPEC-626-1990<sup>[43]</sup>,该标准规定了含波纹管及柔性软管管路流体诱导振动的测试流程。1991年,美国航天航空局颁布了波纹管及柔性软管的流体诱导振动设计标准MSFC-DWG-20M02540E-1991<sup>[44]</sup>,该标准是在GERLACH等<sup>[30]</sup>的研究成果上形成的,标准中规定了含波纹管及柔性软管管路流体诱发振动的分析方法。依据这两个标准可以预测波纹管及柔性软管的疲劳寿命、固有

频率和流体诱导振动的共振流量。2012年,美国航天发射项目颁布了流体诱发振动柔性管和波纹管设计要求SLS-RQMT-166<sup>[45]</sup>,该标准规定了飞行及地面系统(保障设备及地面设施)中所有波形金属波纹管及柔性管的设计和验收要求。

## 4 结束语

关于波纹管的动力学参数,国内外现行的设计标准仅给出了轴向及横向固有频率的预测公式,而波纹管的阻尼比及机械阻抗等参数尚未有计算公式;波纹管的动力学响应目前缺乏统一的试验方法及合理的有限元分析方法,对振动环境下的波纹管缺少必要的设计依据和判别准则。对于波纹管动力学的进一步研究,可以从以下几个方面入手:

(1)建立准确的波纹管固有频率预测方法。确定波纹管的固有频率不仅是为了解决共振问题,也是对波纹管进行振动响应分析的基础。由于现行标准将波纹管等效为梁模型,固有频率计算公式的适用性及精确性还需要进一步研究。

(2)确定波纹管的固有频率、阻尼比及机械阻抗等动力学参数,建立合理的波纹管动力学分析方法。波纹管的流体诱导振动研究已较为成熟,并且已有相关的标准规范。为了评估振动状态下的波纹管的可靠性,需要建立合理的试验及有限元方法对波纹管进行动力学分析。

(3)建立统一的波纹管减隔振评价方法。目前评价波纹管减隔振效果的指标主要是振级落差及插入损失,但内部介质的压力及状态、管路的支撑条件等因素对试验结果的影响尚不明确,需要建立统一的试验及分析方法以更好地评价波纹管的减隔振性能。

### 参考文献:

- [1] DANIELS V R. Dynamic aspects of metal bellows[J]. The Shock and Vibration Bulletin, 1966: 107-124.
- [2] GERLACH C R. Flow-induced vibrations of metal bellows [J]. Journal of Engineering for Industry, 1969: 1196-1202.
- [3] 黎廷新,李添祥. 波纹管的轴向自振频率[J]. 石油化工设备, 1985, 14(10): 9-16.

- [4] 黎廷新,胡坚,岑汉钊,等.膨胀节自振频率的计算与测试[J].化工与通用机械,1983(6):44-52.
- [5] 黎廷新,胡坚,岑汉钊,等.波纹管的轴向自振频率与刚度性能的研究[J].华南工学院学报,1985,13(2):34-41.
- [6] 黎廷新,胡坚,岑汉钊,等.多波波纹管的自振频率[J].华南工学院学报,1985:40-44.
- [7] 李春惠,芮光雨,罗仕发.波纹管膨胀节的振动分析和试验研究[J].石油化设备,1983,15(12):17-23.
- [8] 于亚彬,吴宏煜,陈伟.波纹管振动模态的计算域试验研究[J].振动工程学报,2004(z2),17:747-749.
- [9] MORISHITA M, IKAHATA N, KITAMURA S. Dynamic analysis methods of bellows including fluid-structure interaction [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1989,168:149-157.
- [10] JAKUBAUSKAS V F. Transverse vibrations of bellows expansion joints[D]. Hamilton: McMaster University, 1995.
- [11] JAKUBAUSKAS V F, WEAVER D S. Axial vibrations of fluid-filled bellows expansion joints [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1996,118:484-490.
- [12] JAKUBAUSKAS V F, WEAVER D S. Transverse vibrations of bellows expansion joints. Part I: fluid added mass [J]. Journal of Fluids and Structures, 1998(12):445-456.
- [13] JAKUBAUSKAS V F, WEAVER D S. Transverse vibrations of bellows expansion joints. Part II: beam modal development and experimental verification [J]. Journal of Fluids and Structures, 1998(12):457-473.
- [14] JAKUBAUSKAS V F, WEAVER D S. Transverse natural frequencies and flow-induced vibrations of double bellows expansion joints [J]. Journal of Fluids and Structures, 1999(13):461-479.
- [15] BROMAN G I, JONSSON A P, HERMANN M P. Determining dynamic characteristics of bellows by manipulated beam finite elements of commercial software [J]. Pressure Vessels and Piping, 2000,77:445-453.
- [16] KADAM A B, GADERWAR S P, GAWANDE S H. Numerical and analytical investigation on the effect of dynamic characteristics of metal expansion bellows [J]. Journal of Mechanical and Civil Engineering, 2017:27-39.
- [17] 钟玉平,陈同彪.高阻尼无加强 U 形减振波纹管研究[J].压力容器,2005,22(7):21-24.
- [18] 王世伟.减振降噪波纹管有限元分析[J].压力容器,2004(z1):31-34.
- [19] 聂雷,杜发荣. U 型金属波纹管动态特性实验研究[J].石油机械,2004,32(5):4-6.
- [20] 李长治.金属波纹管隔振特性的研究[D].洛阳:河南科技大学,2013.
- [21] 李德雨.波纹管动态特性及试验研究[D].洛阳:河南科技大学,2005.
- [22] 宋江涛.水介质压力载荷对减振降噪波纹管粘弹阻尼影响试验研究[J].矿山机械,2006,34(10):105-107.
- [23] 杨明辉.流固耦合下多层波纹管等效阻尼的研究[D].洛阳:河南科技大学,2012.
- [24] 熊永华,杜发荣,钟玉平.金属波纹管的动态特性分析与振动试验研究[J].中国机械工程,2008,19(10):1177-1180.
- [25] 李双印,王斌斌,张小文,等.第十五届全国膨胀节学术会议论文集[C].合肥:合肥工业大学出版社,2018.
- [26] MORISHITA M, IKAHATA N, KITAMURA S. Simplified dynamic analysis methods for metallic bellows expansion joints [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1991,113:504-510.
- [27] 吴宏煜.波纹管膨胀节动力学特性的研究[D].南京:南京航空航天大学,2003.
- [28] 韩淑洁.金属软管力学性能的非线性有限元法研究[D].南京:南京航空航天大学,2005.
- [29] HORNUNG T, ORY H, HORNUNG E. Dynamics behaviour of metallic bellows used in compensators at feed system fluid lines [C]. Spacecraft Structures, Materials and Mechanical Testing, 2005.
- [30] GERLACH C R, Schroeder E C. Study of minimum pressure loss in high velocity duct systems; interim technical report NO.1; NAS8-21133 [R]. National Aeronautics and Space Administration, 1969.
- [31] GERLACH C R, BASS R L III, HOLSTER J L, et al. Flow-Induced vibration of bellows with internal cryogenic fluid flows; Interim technical report NO.2; NAS8-21133 [R]. National Aeronautics and Space Administration, 1970.
- [32] GERLACH C R. Vortex excitation of metal bellows [J]. Transaction of the ASME, 1972: 87-94.
- [33] BASS R L, HOLSTER J L. Bellows vibration with internal cryogenic fluid flows [J]. Transaction of the ASME, 1972:70-75.
- [34] ROCKWELL D, NAUDASCHER E. Review-self-sustaining oscillations of flow past cavities [J]. Transactions of the ASME, 1978:152-165.
- [35] GIDI A, WEAVER D S. A model study of flow induced bellows vibration [C]. Proceedings of 6th International Conference on Flow Induced Vibration, 1995:497-503.
- [36] WEAVER D S. Flow-induced vibration and stability of bellows [C]. Proceedings of 1st International Conference on Engineering Aero-Hydroelasticity, 1989: 37-46.

- [21] 丁力.铜-铁爆炸复合板及其在家电方面的应用[J].稀有金属材料与工程,1988(1):56.
- [22] 胡小冬,李晓丹.实验炉用银钢复合板钟罩制造要点分析[J].化工机械,2018,45(4):492-494.

=====

(上接第 90 页)

- [41] YUAN S J, PEHKONEN S O. Surface characterization and corrosion behavior of 70/30 Cu-Ni alloy in pristine and sulfide-containing simulated seawater [J]. Corrosion Science, 2007, 49(3): 1276-1304.
- [42] CHEN S, PENG W, ZHANG D. Corrosion behavior of copper under biofilm of sulfate-reducing bacteria [J]. Corrosion Science, 2014, 87(5): 407-415.
- [43] LIANG R, AYDIN E, LE B S, et al. Anaerobic biodegradation of biofuels and their impact on the corrosion of a Cu-Ni alloy in marine environments [J]. Chemosphere, 2018, 195: 427-436.
- [44] 王蚁.海水冷却系统的腐蚀及其控制[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [45] NORTH R F, PRYOR M J. The protection of Cu by ferrous sulphate additions [J]. Corrosion Science, 1968, 8(3): 149-157.
- [46] TAHER A M, JARJOURA G, KIPOUROS G J. Effect of iron as alloying element on electrochemical behaviour of 90:10 Cu-Ni alloy [J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2011, 50(4): 425-438.
- [47] CHAUHAN P K, GADIYAR H S. An XPS study of the corrosion of Cu-10Ni alloy in unpolluted and polluted sea-water; the effect of FeSO<sub>4</sub> addition [J]. Corrosion Science, 1985, 25(1): 55-68.
- [48] 王家瑢. 凝汽器铜管硫酸亚铁成膜防腐及工艺 [J]. 黑龙江电力, 1996 (4): 217-218.
- [49] 蒋斌.B10 铜镍合金在静态和动态模拟海水中的腐蚀防护对策研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [50] 马启国, 肖稳, 陈散兴, 等. 纯铁对 B10 和 B30 铜合金在模拟海洋环境中的阴极保护 [J]. 腐蚀与防护, 2016, 37(10): 793-796.
- [51] 王虹斌, 赵进刚, 韩冰. 舰船冷却设备的防腐对策. 腐蚀科学与防护技术 [J], 2002, 14(6): 359-361.
- [52] 施方乐, 黄雷. 铜镍合金海水管路牺牲阳极加装设计 [J]. 造船技术 [J], 2019 (4): 53-56.

=====

(上接第 95 页)

- [37] WEAVER D S, ANISWORTH P. Flow-induced vibration in bellows [J]. ASME Journal of Pressure Vessel Technology, 1995, 111: 402-406.
- [38] 王强, 胡明, 姚本炎, 等. 船用往复泵管路减振技术研究 [J]. 船舶工程, 2002(1): 27-31.
- [39] 梁向东. 不同工作压力下挠性接管减振特性试验研究 [J]. 噪声与振动控制, 2001(5): 44-46.
- [40] 梁向东, 付爱华. 非金属阻尼与挠性接管在管路减振中的作用 [J]. 噪声与振动控制, 2002(2): 30-32.
- [41] 邓亮, 周炜, 何琳. JYXR 型挠性接管减振性能试验研究 [J]. 船海工程, 2002(4): 9-12.
- [42] 王育平, 彭旭. 船舶通海管路系统振动的理论与试验分析 [J]. 噪声与振动控制, 2004, (6): 18-21.
- [43] MSFC-SPEC-626-1990, Test control document for assessment of flexible lines for flow induced vibration [S].
- [44] MSFC-DWG-20M02540E-1991, Assment of Flexible Lines for Flow Induced Vibration [S].
- [45] SLS-RQMT-166-2012, Flexhose and bellows design requirements for flow-induced vibration [S].