doi：10.11823/j.issn.1674－5795.2021.01.08

波纹管正弦压力发生技术研究

李天然，王洪博
（航空工业北京长城计量测试技术研究所，北京 100095）

摘　要：针对压力传感器在低温环境下的动态校准需求，以波纹管为核心元件，设计了一种正弦压力发生器，其在常温和低温环境下都具有良好的密封性，生成的正弦压力范围能够覆盖正压与负压。通过改变正弦压力发生器的各项结构参数并进行实验，经分析验证，最终得到了计算正弦压力幅值的经验公式，确定了波纹管作为正弦压力发生器的可行性。

关键词：波纹管；正弦压力；压力传感器
中图分类号：TB9　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1674－5795（2021）01－0042－06

Research on Sinusoidal Pressure Generation Technology of Bellows

LI Tianran，WANG Hongbo
（Changcheng Institute of Metrology and Measurement，Beijing 100095，China）

Abstract：Aiming at the requirement of dynamic calibration of pressure sensor in low temperature environment，a sine pressure generator is designed with bellows as the core components. The pressure generator has good tightness at either room temperature or low temperature. The sine pressure generated by the pressure generator ranges from positive pressure to negative pressure. We adjust the structural parameters of the sine pressure generator and conduct the test. We demonstrate and modify the conclusion of theoretical analysis by the experimental data. Finally，the empirical formula for calculating the amplitude of sine pressure is obtained. The feasibility of bellows as sine pressure generator is proved.

Key words：bellows；sine pressure；pressure sensor

0　引言

动态压力测试技术广泛应用于航空、航天、兵器等国防军工领域，安装在高空飞行器上的压力传感器常处于低温环境下。为了模拟飞行器在平流层的飞行状态，一些低温高雷诺数风洞的工作温度低至－100℃。在风洞实验中，压力传感器被密集安装在风洞进口处和实验模型上，风洞在运行过程中会产生气流脉动压力，实验模型也会激发强烈的脉动压力。在低温环境下，压力传感器的幅值灵敏度、谐振频率、上升时间等动态特性参数会发生改变，直接增大了测量的误差。对于压力传感器，现有的动态校准都只在常温环境下进行，未考虑温度变化带来的影响，校准结果必然存在误差，因此迫切需要开展低温环境下动态压力校准技术的研究。

动态压力的校准需要能生成标准动态压力信号的压力源，即动态压力发生器。现有的常温正弦压力发生器从工作原理上分为谐振式、调制式、气缸－活塞式等[1]。谐振式结构只适用于液体介质[2－10]。调制式结构在工作过程中，压力室内的气体始终处于流动状态，无法在低温下生成正弦压力；气缸－活塞式结构的配合精度受温度影响很大，过大的温差会导致漏气或卡死。本装置需要在常温下存放，在低温下实验，显然一般的调制式结构与气缸－活塞式结构无法满足大温度跨度区间提出的密封性要求。

鉴于压力传感器的低温校准需求日益增长，现有压力发生装置无法在低温环境下工作，本文提出使用波纹管代替气缸-活塞结构，对正弦压力发生器结构进行设计，搭建了实验装置，通过实验数据验证了正弦发生器的可行性。提供了一种新的正弦压力发生装置，为压力传感器的低温校准提供了一种可靠的低温脉动压力源。

1　波纹管生成正弦压力的理论分析

波纹管是一种圆柱形的薄壁弹性壳体，外圆柱面上有多圈横向波纹。波纹管是管路工程的重要元件，因其具有柔性好、质量轻、耐腐蚀等优点，常作为管道的连接和补偿装置，用于轴向、径向和角位移的

补偿。

金属波纹管按加工工艺可分为液压成型波纹管、焊接波纹管；按波的形状可分为 U 型，V 型，Ω 型，S 型，C 型和矩形等，其中 U 型波纹管的应用最为广泛；按波纹管的层数可分为单层波纹管和多层波纹管；按是否安装有加强环可分为加强型波纹管和无加强型波纹管[2]。

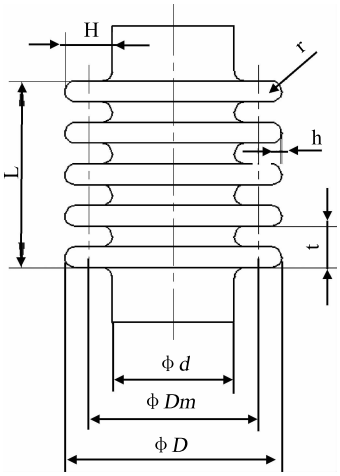


图 1　U 型波纹管结构图

刚度 K 是体现波纹管柔性的重要性能指标，波纹管刚度是指作用在波纹管轴向的力与在该力作用下引起的位移之比，K 值越小波纹管柔性越好。

波纹管为柔性件，能承受集中力、压力、弯矩和扭矩，因此刚度 K 按载荷的种类可分为轴向刚度、弯曲刚度、扭转刚度。在本文中，波纹管一端固定，一端延轴向往复运动，可忽略弯矩和扭矩，只计算轴向刚度。U 型无加强单层波纹管轴向刚度计算的公式[3]为

$$K = \frac{\pi}{24n}\frac{D_m E_b h_p^3 C}{H^3} \tag{1}$$

式中：D 为波纹管的外直径，mm；d 为波纹管的内直径，mm；D_m 为波纹管的平均直径，$D_m = \frac{D+d}{2}$，mm；H 为波高，$H = \frac{D-d}{2}$，mm；h 为波纹管单层理论壁厚，mm；h_p 为波纹管单层实际壁厚，$h_p = h\sqrt{\frac{d}{D_m}}$，mm；$C$ 为形状修正系数，$C = 1/\left[0.046\left(\frac{r}{H}\right)^3 - 0.144\left(\frac{r}{H}\right)^2 + 0.287\left(\frac{r}{H}\right) + 0.082\right]$；$n$ 为波纹管的波纹数；E_b 为设计温度下波纹管材料的弹性模量，MPa。

在恒定的实验条件下，波纹管在其弹性范围内，刚度 K 为定值，即轴向伸缩量与所受的拉压力成正比。因此，沿波纹管轴向施加正弦力，波纹管的长度也将是正弦变化的。

波纹管等效横截面积 $A_{eq} = \frac{\pi}{4}D_m^{\ 2}$，初始容积 $V = A_{eq} \cdot L$，初始压力 P_0。在密闭的波纹管一端施加压力，波纹管长度压缩 Δl，波纹管容积减小为 $V^* = A_{eq} \cdot (L - \Delta l)$。

密闭波纹管内气体物质的量 n 保持不变，普适气体常数 $R = 8.314$ J/(mol · K)，由理想气体状态方程 $pV = nRT$，在绝热状态下，波纹管内气体压力 P^* 与波纹管内容积 V^* 的关系为：$P^*V^* =$ 定值，则

$$P^* = \frac{P_0 V}{V^*} = P_0\frac{L}{L-\Delta l} = P_0 + P_0\frac{\Delta l}{L} \tag{2}$$

在绝热条件下，密闭波纹管在其承压范围内，内部压力变化量 ΔP 与轴向压缩量 Δl 成正比。

因此，将密闭的波纹管一端固定，一端自由，并在自由端施加轴向的正弦力，自由端将会产生正弦规律的伸缩位移，波纹管内部将会产生正弦变化的压力。生成的正弦压力幅值为 $P_0\frac{\Delta l}{L}$，即压力幅值 p 只与初始压力 P_0、波纹管伸缩量 Δl 成正比，与波纹管长度 L 成反比，与波纹管的等效截面积 A_{eq} 无关。

若波纹管还与其他容腔相通，则需考虑这部分恒定的容积。设与波纹管相通的压力室体积为 V_1，式(2)修正为

$$P^* = \frac{P(V+V_1)}{(V^*+V_1)} = P_0\frac{A_{eq}L + V_1}{A_{eq}(L-\Delta l) + V_1} = P_0 + P_0\frac{A_{eq}\Delta l}{A_{eq}(L-\Delta l) + V_1} \tag{3}$$

由式(3)得到生成的正弦压力幅值 p 为

$$p = P_0\frac{A_{eq}\Delta l}{A_{eq}(L-\Delta l) + V_1} = P_0\frac{\Delta l}{(L-\Delta l) + V_1/A_{eq}} \tag{4}$$

考虑有其他压力室与波纹管相通时，波纹管内部仍为正弦变化的压力，但波纹管的等效截面积 A_{eq} 和压力室体积 V_1 也将对压力幅值产生影响。V_1/A_{eq} 越小，即压力室体积 V_1 越小，波纹管等效截面积 A_{eq} 越大，正弦压力幅值越大。同时，压力幅值 p 仍与初始压力 P_0 成正比，波纹管伸缩量 Δl、波纹管长度 L 对压力幅值的影响趋势不变，但比例不再是固定的。

2　实验平台搭建

正弦压力发生器由初始压力调节单元和正弦压力

发生单元两部分组成。初始压力调节单元改变压力室内的初始压力值，此压力值即为生成正弦压力的平均值；正弦压力发生单元在平均压力的基础上，生成频率、幅值均可调的正弦压力信号。

本装置结构上采用相连通的波纹管与压力室，波纹管负责生成正弦压力，压力室安装有动态压力传感器，监测整个腔室内部的压力变化。

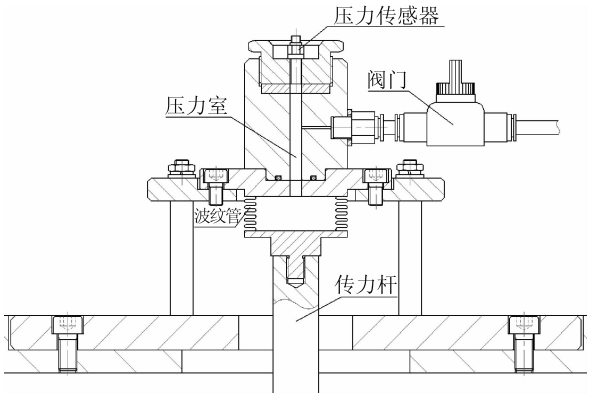


图 2　正弦压力发生器结构示意图

2.1　初始压力调节单元

初始压力调节单元选用数字压力控制器，型号 PACE6000。首先用气路将数字压力控制器的输出端与压力室连通，调节数字压力控制器，将指定的压力的气体输出至压力室内。然后关闭阀门，即可保证压力室内的气体的量恒定不变。

2.2　正弦压力发生单元

本装置选用的振动源为某公司的 ET－6－230 型振动台，可提供最大 6 kN 的正弦力，频率最高可达 3500 Hz。振动台的主要技术参数见表 1。

表 1　振动台技术参数

参数名称	参数值
工作频率范围/Hz	1～3500
额定正弦激振力/kN	6
最大空载加速度/$m \cdot s^{-2}$	1000
最大速度/$m \cdot s^{-1}$	1.8
最大位移/mm	51
垂直台面最大负载/kg	300
动圈部分有效质量/kg	6

振动台靠输入的正弦激励电压产生振动，为保证激励电压的稳定精确，选用 Agilent 33220A 信号发生器作为信号源，并由计算机中的实验程序控制。

波纹管一端固定，并连通至压力室，另一端密封，通过传力杆与振动台面相连。在关闭阀门后，振动台通过传力杆带动波纹管密封端做正弦规律的轴向往复运动，如同气缸—活塞装置，反复压缩波纹管和压力室内的气体，生成正弦变化的压力值。

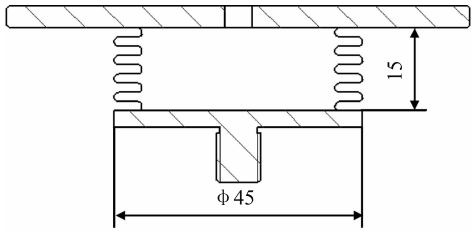
压力室的一端安装压力传感器，选用 ENDEVCO 8510 系列压阻式压力传感器，其动态性能好，分辨力高。上升时间短，谐振频率高，适合测量高频变化的压力信号。压力传感器输出电压信号经过信号调理仪放大，通过计算机中的采集程序完成采集。

3　波纹管结构设计

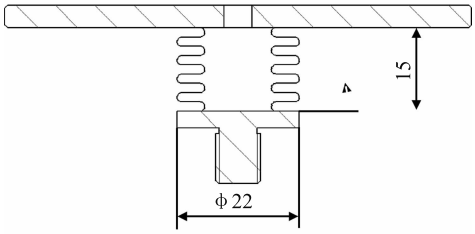
考虑到波纹管式正弦压力发生器在低温环境下的应用需求，波纹管材料选用 0Cr18Ni9，为奥氏体不锈钢，具有以下优点：①力学性能稳定，特别是有良好的冲击韧度和相对伸长率。②金相组织稳定性，以保证零件尺寸与形状的稳定。③材料具有较低的弹性模量温度系数和线膨胀系数，可以保证低温下刚度的稳定。

设计的波纹管由法兰盘、波纹管、端盖三部分组成。为保证波纹管与法兰盘、端盖之间的密封性及连接的紧固性，作为优选，法兰盘、波纹管、端盖之间通过焊接连接。法兰盘中心开有与压力室相连的通孔，法兰盘周围有沉头孔，使用螺钉与基座固定。端盖通过螺纹副与传力杆连接，跟随振动台面做正弦规律的轴向往复运动。

振动台工作时，随着振动频率的增大，振动台面位移会显著减小。且在振动频率不变的情况下，增加振动台面上连接的负载，也会减小振动台面的位移。振动台在高频工作时的往复位移很小，在 2000 Hz 下的位移仅为 0.287 mm。而正弦压力幅值又与振动位移成正比，随着频率的增高，正弦压力幅值迅速下降。同时，当波纹管自由端的位移不变时，由式(4)可以得出，波纹管长 L 越大，其内部压力变化越小，将显著降低正弦压力的幅值。因此，要在满足波纹管压缩极限的前提下尽量降低波纹管长。本文设计了两只尺寸不同的波纹管 a、b，波纹管结构如图 3 所示，基本尺寸见表 2，其法兰结构完全相同，可以安装在装置中做比对实验。



(a) 波纹管a



(b) 波纹管b

图 3　波纹管结构图

表 2　波纹管基本参数　　mm

波纹管	外径 D	内径 d	壁厚 h	波高 H	管长 L
a	45	35	0.2	5	15
b	22	18	0.2	2	15

4　波纹管正弦压力发生实验及结果分析

4.1　不同直径波纹管实验

在初始压力为常压时，安装波纹管 a，在 1 ~ 2000 Hz下进行实验，通过压力传感器测量压力室内的气体压力变化。然后更换波纹管 b，进行同样的实验。测得的正弦压力幅值及波形失真度见表 3。

表 3　不同直径波纹管生成的正弦压力幅值及失真度

f/Hz	波纹管 a		波纹管 b	
	p/kPa	失真度/%	p/kPa	失真度/%
1	20.686	10.039	7.916	4.131
10	16.337	7.089	8.309	3.101
50	14.266	8.451	9.289	5.047
100	10.867	4.313	4.705	9.238
200	4.800	2.196	2.077	3.650
300	2.802	3.439	1.191	11.381
400	1.745	4.128	0.704	9.670
500	0.958	27.289	0.484	31.933
600	0.552	8.932	0.376	16.104
700	0.407	7.383	0.200	44.302
800	0.340	1.441	0.140	67.827
900	0.298	2.124	0.090	75.505
1000	0.265	2.375	0.160	52.113
1200	0.266	3.506	0.025	28.040
1400	0.493	0.916	0.003	18.979
1600	0.448	3.031	0.017	10.229
1800	0.123	7.403	0.023	33.477
2000	0.063	21.342	0.031	42.382

将波纹管 a、b 分别生成的正弦压力幅值与对应的频率作折线图，如图 4 所示。

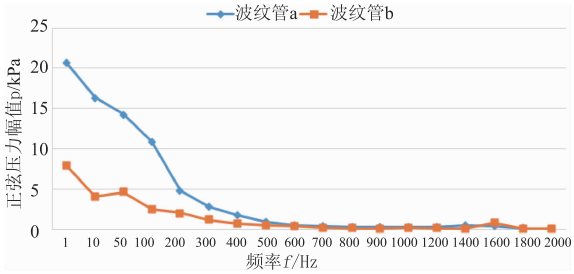


图 4　不同直径波纹管生成的正弦压力幅值

由图 4 可知，随着频率的增高，波纹管生成的正弦压力幅值迅速衰减。在相同的频率下，使用的波纹管等效截面积越大，生成的正弦压力幅值越大。

将波纹管 a 和波纹管 b 的每一组正弦压力幅值与对应的正弦失真度做图，如图 5 所示。

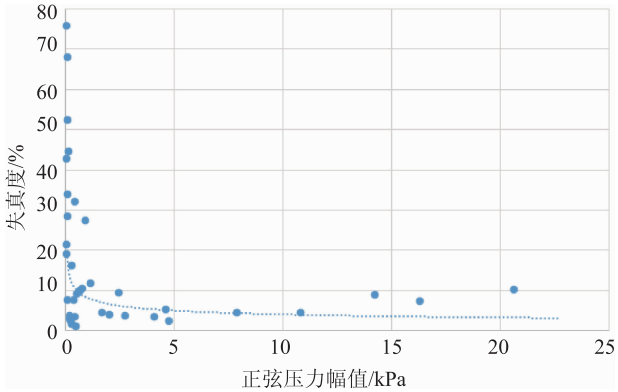


图 5　正弦压力幅值与对应的波形失真度

波纹管所生成的正弦压力波形的失真度与压力幅值有关。过大的波型失真度对应的正弦压力幅值较小，信噪比低，可以通过改进波纹管结构来提高压力幅值，达到降低失真度的目的。从实验数据来看，在任何频率下，正弦压力幅值在 0.25 ~ 10 kPa 时对应的波形失真度可以保持在 5% 以下，正弦波形质量最好。

4.2　不同振动位移实验

在初始压力为常压时，安装波纹管 a，在 1，100，1000 与 2000 Hz 的频率下，在功放的增益保持不变的情况下改变信号电压，通过压力传感器测量压力室内的正弦压力幅值，实验结果如图 6 所示。

由实验数据计算得到 1，100，1000，2000 Hz 频率下的正弦压力幅值与激励电压峰峰值的线性度分别为：1.906%，0.965%，0.367%，0.840%，即正弦压力发生器的压力幅值与激励电压幅值成正比。同时，振

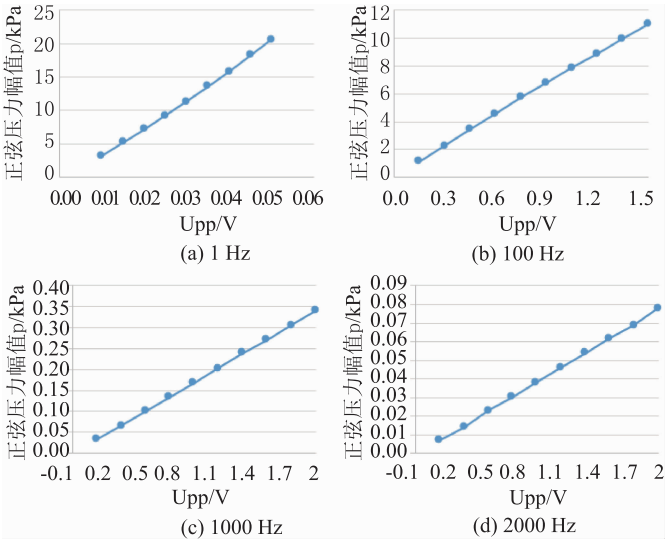


图 6　不同激励电压生成的正弦压力幅值

动台在频率不变时，振动位移与激励电压幅值成正比。因此，在频率不变时，波纹管内部的正弦压力幅值与振动位移成正比。

4.3　不同初始压力实验

安装波纹管 a，调节数字压力控制器，输出绝对压力 50 kPa 的初始压力至压力室内，关闭阀门，在 1 ~ 2000 Hz 内每隔 50 Hz 进行一次实验。同样的，调节初始压力为绝对压力 200 kPa，在 1 ~ 2000 Hz 内每隔 50 Hz进行一次实验。图 7 为正弦压力发生器在不同初始压力下生成的压力幅值，放大 500 ~ 2000 Hz 频段内的折线图，得到图 8。

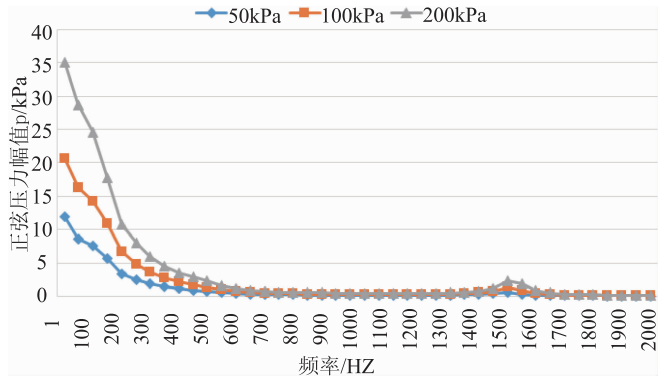


图 7　不同初始压力生成的的正弦压力幅值

由图 7 中同一频率下不同初始压力生成的正弦压力幅值关系，可以证明式(4)的推论。得到正弦压力幅值与初始压力 P_0 呈线性正相关，但同一频率下压力幅值的比例与初始压力的比例不同。这是由于波纹管内

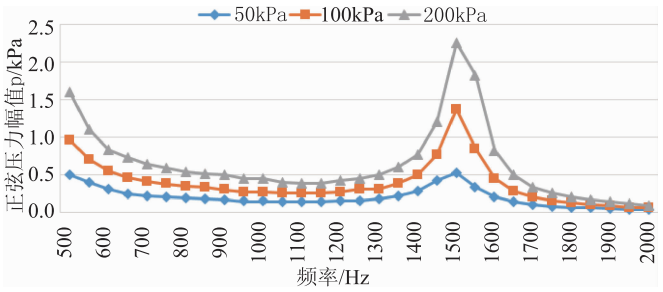


图 8　500 ~ 2000 Hz 下生成的正弦压力幅值

为正压或负压时，实验环境仍为大气压，波纹管内外压的作用会对振动台施加额外的阻力，降低振动台的往复位移。在此引入初始压力修正系数为

$$Z = 1 - 0.00002(P_0 - P_{室})^2 + 0.0085(P_0 - P_{室})$$

修正后的正弦压力幅值计算公式为

$$p = ZP_0 \frac{\Delta l}{(L - \Delta l) + V_1/A_{eq}} \tag{5}$$

图 7、图 8 中的三条曲线在 1500 Hz 处都出现了压力幅值的突然增大，为 1000 ~ 2000 Hz 频段内平均压力幅值的 2 倍以上；同时波形为 1000 ~ 2000 Hz 频段内的失真度最小点。

5　结论

波纹管作为一种应用广泛的弹性管件，在低温或其他特殊条件下，可以替代气缸 - 活塞结构，实现气体介质的正弦压力发生功能。波纹管式正弦压力发生器在 1000 Hz 以下可以生成波形良好的正弦压力波，并且在平均压力为正压和负压下都可以生成正弦压力。

本装置对于初始压力仍有一定的限制。一方面，为提高正弦压力幅值，要求波纹管刚度尽量低，即选用壁厚尽可能薄的波纹管，而壁厚越薄，波纹管的承压能力越低；另一方面，波纹管内外压差不宜过大，否则会在实验过程中对振动台面施加额外的阻力，进一步降低振动台的往复位移。

此外，实验过程中的工作频率为 500 Hz 时，正弦压力波形失真度突增；在 1500 Hz 时，正弦压力幅值显著增大。分析为激振力频率与波纹管固有频率的倍数相同，发生了共振现象，在不同阶数振型的不同导致了不同的实验现象。接下来可对波纹管模型进行模态分析，找出波纹管的各阶固有频率及对应的振型，分析不同振型对生成正弦压力幅值与波形失真度的影响。

参 考 文 献

[1] 国家质量监督检验检疫总局. JJG1142－2017 动态压力标准器[S]. 北京：中国计量出版社，2006.
[2] 马伟，李德雨，钟玉平. 波纹管的发展与应用[J]. 河南科技大学学报(自然科学版)，2004，25(4)：28－31.
[3] 樊大均. 波纹管设计学[M]. 北京：北京理工大学出版社，1988：128－140.
[4] 万宏强，汪亮. 低温环境下波纹管的轴向刚度计算[J]. 机械强度，2009，31(05)：787－790.
[5] 刘江. 管路用多层 U 形波纹管结构参数对性能影响研究[D]. 哈尔滨工业大学机械工程，2012.
[6] 韩淑洁，王心丰. U 型波纹管振动特性的有限元分析[J]. 压力容器，2004，21(11)：23－26.
[7] 李志平，段成红. 波纹管的极限载荷分析[J]. 化工装备技术，2016，37(05)：34－37.
[8] 张庆，王华坤，王心丰. U 型波纹管稳定性非线性有限元分析[J]. 南京理工大学学报，2002，26(3)：270－273.
[9] 于颖，李永生，於孝春，等. 波纹管的结构优化设计[J]. 压力容器，2005，22(12)：22－24.
[10] 宋延丽，罗志恒，李巍. 基于有限元方法分析 U 形金属波纹管膨胀节[C]//第八届全国能源与热工学术年会论文集. 2015.
[11] 陶继增，李程，李欣. 一种新型正弦压力发出器[J]，计测技术，2008(03)：24－25.

收稿日期：2020－12－04；**修回日期**：2021－02－15
基金项目：国家“十三五”技术基础科研项目(JSJL2018205B007)

作者简介

李天然(1994－)，男，黑龙江哈尔滨人，硕士研究生，主要研究方向为动态压力测试与计量技术。