DOI: 10.3901/JME.2020.10.235

流体介质中沉没辊模型附加质量和附加阻尼试验研究*

王兴东¹ 胡安¹ 胡漂² 涂琪瑞¹ 李友荣¹ 吴宗武¹

(1. 武汉科技大学冶金装备及其控制教育部重点实验室 武汉 430081;

2. 武汉科技大学汽车 NVH 及声品质工程实验室 武汉 430081)

摘要: 为准确分析不同流体介质中沉没辊模型附加质量和附加阻尼的变化规律, 建立理论计算分析模型, 对 4 种模型在 4 种流体中进行模态试验。利用锤击法, 分别对加杆和不加杆的沉没辊模型进行空气中模态试验, 两者结果一致性较高。加杆沉没辊模型的试验结果分析可知, 水和液压油中前六阶的频响函数曲线峰值明显, 甘油中仅前三阶明显; 甘油的黏度变化对模型固有频率的影响较小, 但随其黏度的增大其附加阻尼因数增加; 随着液体密度增加, 模型各阶振型对应的附加质量因数均呈线性增加, 且当结构的质量和刚度增大时, 其增加的斜率减小; 随着结构密度增大, 模型附加质量因数减小; 所有模型(1, 2)和(2, 2)振型的附加质量因数大于弯曲振型。

关键词: 沉没辊模型; 模态试验; 附加阻尼; 附加质量; 流体密度

中图分类号: TH113

Experimental Investigation of Added Mass and Damping on Model of Sink Roll in Fluid Media

WANG Xingdong¹ HU An¹ HU Li² TU Qirui¹ LI Yourong¹ WU Zongwu¹

(1. Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology,

Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081;

2. Automobile NVH and Sound Quality Laboratory,

Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

Abstract: In order to accurately analyze the change laws of added mass and damping of sink roll models in different fluid media, an analysis model of theoretical calculation is established, and four kinds of models are tested in four kinds of fluids. Using the hammer method, the modal tests in air are performed on the sink roll models with and without rods. Respectively, the result is highly consistent. The analysis of the test results of the tie-in model show that the first six orders of frequency response function curved in water and hydraulic oil are obvious, however only the first three orders are significant in glycerol; the viscosity change of glycerol has little effect on the natural frequency of the model, but the viscosity increases with the increase of the added damping coefficient. With the increase of the liquid density, the corresponding added mass coefficient of each mode of the model increases linearly. Otherwise, when the structure's mass and stiffness increases, the increasing slope decreases. With the increase of structural density, the added mass coefficient of the model decreases; the added mass coefficient of all models (1,2) and (2,2) are greater than the bending mode.

Key words: model of sink rolls; modal test; added damping; added mass; fluid density

0 前言

对于浸没在流体介质中的结构, 会受到流体的

附加质量和附加阻尼的影响, 其模态特性与空气中有较大差别^[1-3]。沉没辊的动态特性对镀锌质量有着重要影响, 准确分析沉没辊模型模态特性, 对该类部件的设计和振动控制具有重要意义^[4-5]。RODRIGUE 等^[6]通过模态试验对在空气中和静水中的水轮机缩比模型进行了研究, 结果表明, 模型的几何形状和水的附加质量造成了固有频率的差异。赵信智^[7]通

* 国家自然科学基金资助项目(51775391)。20190609 收到初稿, 20200310 收到修改稿

过模态试验和有限元分析的方法对水介质中的叶轮进行研究,研究表明水的附加质量对叶轮的固有频率影响较大。NAIK 等^[8]通过流固耦合的方法,得到悬臂梁在流体介质中的模态特性主要与流体的附加质量和附加阻尼有关,而流体附加阻尼的大小主要与流体黏度有关。BERGAUD 等^[9]则通过试验得出了悬臂梁在不同黏度流体中的模态响应。刘瑞骏等^[10]对盛满润滑油的油底壳进行了流固耦合下的有限元计算与模态试验,使用最小二乘法拟合了盛油前后油底壳的瑞利阻尼比例系数,并利用该系数修正有限元模型。

以上研究均是针对特定结构在流体介质中的模态特性及其与附加质量和附加阻尼的关系,而不同流体以及部件结构的几何形状对于附加质量的影响、流体黏度与附加阻尼的关系尚未有定量的讨论。本文中制备了4根沉没辊模型,分别在4种不同流体介质(空气、水、液压油和甘油)中进行模态试验,分析得到了结构密度、几何形状和流体密度对附加质量因数的影响以及流体黏度与附加阻尼因数的关系。

1 理论分析模型

对于多自由度系统的结构,当结构在真空中时,其自由振动微分方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = 0 \quad (1)$$

式中, $\mathbf{M}$ 为系统质量矩阵; $\mathbf{C}$ 为系统阻尼矩阵; $\mathbf{K}$ 为系统刚度矩阵; $\mathbf{X}$ 为系统位移矢量。

根据式(1),得到结构在真空中的有阻尼固有频率和阻尼比分别为

$$\omega_{d,i} = \sqrt{\frac{\mathbf{K}_i}{\mathbf{M}_i}(1 - \xi_i^2)} \quad (2)$$

$$\xi_i^2 = \frac{\mathbf{C}_i}{4\mathbf{M}_i \cdot \mathbf{K}_i} \quad (3)$$

式中, $\omega_{d,i}$ 为结构第 i 阶固有频率; $\mathbf{K}_i$ 为结构第 i 阶广义刚度; $\mathbf{M}_i$ 为结构第 i 阶广义质量; ξ_i 为结构的第 i 阶阻尼比; 下标 i 为结构第 i 阶模态参数。

当结构浸没在流体介质中时,其自由振动微分方程为

$$(\mathbf{M} + \mathbf{M}_1)\ddot{\mathbf{X}} + (\mathbf{C} + \mathbf{C}_1)\dot{\mathbf{X}} + (\mathbf{K} + \mathbf{K}_1)\mathbf{X} = 0 \quad (4)$$

式中, $\mathbf{M}_1$ 为流体的附加质量矩阵; $\mathbf{C}_1$ 为流体的附加阻尼矩阵; $\mathbf{K}_1$ 为流体的附加刚度矩阵。

比较结构在真空中和流体中的固有频率和阻尼比,分别得到

$$\frac{\xi_i}{\xi_{w,i}} = \frac{\mathbf{C}_i}{\mathbf{C}_i + \mathbf{C}_{1,i}} \sqrt{\frac{\mathbf{M}_i}{\mathbf{M}_{1,i}}} \quad (5)$$

$$\frac{\omega_{d,i}}{\omega_{d,w,i}} = \sqrt{\frac{1 - \xi_i^2}{1 - \xi_{w,i}^2} \cdot \frac{\mathbf{M}_i + \mathbf{M}_{1,i}}{\mathbf{M}_i}} \quad (6)$$

式中,下标 W 为结构在流体中所对应数值。

当结构被流体完全浸没时,流体会顺应结构的任何持续位移。因此,流体的附加刚度可忽略^[11],即 $\mathbf{K}_1 = 0$ 。

定义结构在流体中附加阻尼与在空气中阻尼的比值为附加阻尼因数 λ_i ,再定义流体的附加质量与对应振型下空气中的模态质量之比为附加质量因数 μ_i ^[12],联立式(5)和式(6),解得

$$\lambda_i = \frac{\mathbf{C}_{1,i}}{\mathbf{C}_i} = \frac{\xi_{w,i}}{\xi_i} \cdot \frac{\omega_{d,i}}{\omega_{d,w,i}} \sqrt{\frac{1 - \xi_i^2}{1 - \xi_{w,i}^2}} - 1 \quad (7)$$

$$\mu_i = \frac{\mathbf{M}_{1,i}}{\mathbf{M}_i} = \frac{1 - \xi_{w,i}^2}{1 - \xi_i^2} \left(\frac{\omega_{d,i}}{\omega_{d,w,i}} \right)^2 - 1 \quad (8)$$

结构在含有自由表面的流体中运动,附加阻尼表征结构在流体中扰波所损耗的能量,大小与物体运动的速度相关,附加质量表征对周围流体的动能做功,大小与物体运动的加速度相关。两者共同组成了流体施加到结构上的流体力^[8]。

在不同流体介质中,结构的附加质量因数与流体的密度、结构的密度以及结构的振型有关^[13],那么

$$\mu = \frac{\mathbf{M}_1}{\mathbf{M}} = D(\rho_l, \rho_s, \mathbf{A}_i) \quad (9)$$

式中, D 为函数的一种映射关系, ρ_l 为流体的密度, ρ_s 为结构的密度, $\mathbf{A}_i$ 为结构在流体中的第 i 阶模态振型。

2 试验研究

2.1 试验装置

为测试沉没辊模型在流体介质中的振动特性,以某钢厂热镀锌线实体沉没辊为研究对象^[1, 4-5],按 1:8 缩比为沉没辊模型进行试验模态分析。图 1 给出了沉没辊模型基本尺寸参数,以及在流体介质中的空间位置。

图1 沉没辊模型尺寸参数(mm)

浸没在流体介质中的沉没辊模型，通过软弹簧绳悬挂在刚性台架上。试验装置示意图见图 2，水箱中的加热装置加热流体，温度计测量流体温度。试验系统部分实物，如图 3 所示。

图 2 试验系统示意图

图 3 模态试验部分实物

试验系统由沉没辊模型、弹性绳、台架、水密型单向加速度传感器(灵敏度: 10.34 mV/m/s^2 ，质量小于 8 g)、模态力锤(PCB 086C03，灵敏度: 2.25 mV/N)、Siemens LMS Test lab 数据采集前端、笔记本电脑和 Siemens LMS Test lab 17A 软件组成。沉没辊模型表面测点共 30 个，布置见图 4。

图 4 沉没辊模型测点布置

本次试验共有 4 根沉没辊模型，外形尺寸完全相同，仅材质与辊身壁厚 Δ 不同，详见表 1，流体介质的物性参数如表 2 所示。

表 1 沉没辊模型相关参数

序号	壁厚/mm	材质	密度/(kg/m ³)	弹性模量/ GPa	泊松比
1	5	Q235	7 850	200	0.30
2	10				
3	5	铝合金 6063	2 700	70	0.33
4	10				

表 2 流体物性参数表

流体	密度/(kg/m ³)	黏度/(Pa · s)	声速/(m/s)
液压油(68 号)	889	0.060 45	1 530
水	1 000	0.001	1 480
甘油(浓度 95%)	1 260	0.612	1 900

2.2 加杆试验

由于力锤在敲击沉没辊模型时，会使静止流体产生运动，影响试验结果。为提高结果的准确性，本次测试将一根钢制细杆(质量 8 g ，小于传感器质量)一端黏贴在辊身测点上，另一端伸出液面。

为验证该方法的可行性，分别进行了空气中增加和不增加钢制细杆的沉没辊模型模态测试。用力锤敲击细杆的一端，依次更换传感器的位置测量 30 个测点的响应。试验现场如图 5 所示，图 6 给出了加杆与不加杆两者频响函数曲线和振型图的对比。

图 5 沉没辊模型加杆模态试验现场图

图 6 沉没辊模型加杆与不加杆频响函数曲线

对于轴对称结构存在大量重根模态^[14]，图 6 中前六阶为 3 对重根模态；轴类零部件的模态振型可用 (m, n) 表示：轴向半波数 m 与周向波数 n ^[15]；空气中第 1、2 阶振型为(1, 2)，第 3、4 阶振型为弯曲振型，第 5、6 阶振型为(2, 2)。

由图 6 可看出，两者在前六阶(频响函数曲线前 3 个峰值)的变化趋势几乎一致；加杆后沉没辊模型频响函数峰值会向左移动，阶数越高两者峰值的差距越大；两条曲线的峰值对应的振型相同。对于高

阶模态, 两条曲线的差别增大。

表 3 给出了两种模型前六阶的固有频率与变化率($100\% \times (\text{不加杆模型频率} - \text{加杆模型频率}) / \text{不加杆频率}$), 变化率最大为 2.0%, 说明加杆对沉没辊模型前六阶模态分析结果的影响可忽略。

2.3 试验结果及分析

测试出了 4 根沉没辊模型在 4 种不同流体介质中的模态特性。本文研究同一振型下与空气中相比, 不同液体对沉没辊模型模态的影响, 因此未按模态阶次顺序作比较, 而按空气中前六阶模态振型(1,

2)、弯曲和(2, 2), 对比模型在不同液体介质中相应的模态频率。

表 4~7 分别为沉没辊模型在空气、液压油、水和甘油介质中的模态频率、振型和阻尼比。相比于空气中, 液体黏度较大及数据分析方法的局限性^[16], 会出现沉没辊模型部分模态遗失。随着流体密度的增加(空气、液压油、水、甘油的密度依次增加), 沉没辊模型的固有频率减小; 随着流体黏度的增加(空气、水、液压油、甘油的黏度依次增加), 模型的模态阻尼比增大。

表 3 沉没辊模型在空气中(加杆与不加杆)试验前 6 阶固有频率

阶数	1	2	3	4	5	6
不加杆频率/Hz	1 886.3	1 889.9	3 222.1	3 224.9	3 880.8	3 904.9
加杆频率/Hz	1 847.4	1 873.7	3 190.3	3 200.0	3 870.3	3 976.7
变化率(%)	2.0	0.9	1.0	0.8	0.3	-1.8

表 4 1#辊模态试验结果

振型	空气		液压油		水		甘油	
	频率/Hz	阻尼比(%)	频率/Hz	阻尼比(%)	频率/Hz	阻尼比(%)	频率/Hz	阻尼比(%)
(1, 2)	1 886.3	0.07	1 415.3	0.45	1 356.4	0.22	1 183.14	2.73
	1 889.9	0.04	1 434.4	0.44	1 373.6	0.27	1 287.7	1.50
弯曲	3 222.1	0.16	2 851.9	0.89	2 719.9	0.22	2 684.7	6.4
	3 224.9	0.19	2 989.8	0.84	2 848.2	0.27	—	—
(2, 2)	3 880.8	0.14	3 287.2	0.27	3 135.1	0.57	2 947.8	9.16
	3 904.9	0.11	—	—	3 256.1	0.37	—	—

表 5 2#辊模态试验结果

振型	空气		液压油		水		甘油	
	频率/Hz	阻尼比(%)	频率/Hz	阻尼比(%)	频率/Hz	阻尼比(%)	频率/Hz	阻尼比(%)
(1, 2)	3 583.6	0.09	3 041.5	0.36	2 948.8	0.57	2 802.2	5.85
	3 594.6	0.06	—	—	2 975.3	0.23	—	—
弯曲	3 538.3	0.19	3 304.1	0.24	3 204.5	0.72	2 964.0	3.81
	3 544.7	0.14	3 331.1	0.45	3 240.5	0.41	—	—
(2, 2)	5 235.9	0.14	4 535.4	0.41	4 418.8	0.40	3 199.4	3.85
	5 299.3	0.04	—	—	4 475.4	1.72	3 283.3	3.84

表 6 3#辊模态试验结果

振型	空气		液压油		水		甘油	
	频率/Hz	阻尼比(%)	频率/Hz	阻尼比(%)	频率/Hz	阻尼比(%)	频率/Hz	阻尼比(%)
(1, 2)	1 876.4	0.14	1 080.7	1.40	990.2	0.66	910.6	3.58
	1 880.6	0.11	1 116.4	1.42	1 091.3	0.38	949.5	2.93
弯曲	3 143.8	0.30	2 503.4	0.70	2 265.9	0.47	2 045.6	4.98
	3 172.7	0.24	—	—	2 313.8	0.81	2 141.0	3.75
(2, 2)	3 597.5	0.49	2 623.5	1.44	2 381.6	0.45	2 219.6	2.84
	3 608.2	0.29	2 651.1	0.89	2 495.5	0.50	2 289.2	3.04

表 7 4#辊模态试验结果

振型	空气		液压油		水		甘油	
	频率/Hz	阻尼比(%)	频率/Hz	阻尼比(%)	频率/Hz	阻尼比(%)	频率/Hz	阻尼比(%)
(1, 2)	3 934.9	0.31	3 002.5	0.93	2 893.7	1.29	2 473.5	4.12
	3 962.2	0.23	3 015.2	1.29	2 976.8	1.09	—	—
弯曲	3 527.3	0.22	2 783.2	0.65	2 703.9	0.76	2 373.8	5.81
	3 532.9	0.17	2 837.9	0.39	2 753.1	0.61	2 379.2	2.03
(2, 2)	4 710.2	0.20	3 247.4	0.68	3 028.8	1.26	2 771.2	5.59
	4 725.9	0.39	3 274.0	2.99	3 077.9	1.30	—	—

图 7 空气中 1#辊模态稳态图及模态置信判据图

图 8 水中 1#辊模态稳态图及模态置信判据图

图 9 液压油中 1#辊模态稳态图及模态置信判据图

图10 甘油中1#辊模态稳态图及模态置信判据图

从模态稳态图中(图7~10)可看出,四组频响函数曲线峰值明显,说明试验结果较理想^[16]。当沉没辊模型在空气中时,前六阶模态能清楚识别,峰值明显;相比于空气中,模型浸没在液体中的模态测试,都会有部分模态遗失,且在甘油中得到的频响函数毛刺明显。

从模态置信判据图(图7~10)可看出,4种介质中各阶模态相互独立,说明试验结果为真实模态,无虚假模态。但在水中第1、2阶和第5、6阶模态有10%的相关度,在甘油中第4、5阶有22.7%的相关度。

为得到同一液体黏度变化对沉没辊模型固有频率的影响,加热水箱中甘油,按其温度分别为室温(20℃)、30℃、40℃和50℃四种工况,进行模态试验。

图11给出了1#沉没辊模型在不同温度甘油中的频响函数曲线,带宽取0~2500 Hz,分析频响函数曲线第一个峰值。从图11中可看出,随着温度升高、甘油黏度减小,模型第1阶固有频率值增大。

图11 1#辊在不同温度下的频响函数曲线

表8给出了1#沉没辊模型第1阶固有频率与甘油黏度的变化关系^[17]。1#模型固有频率随甘油黏度变化较小,黏度为0.523 Pa·s所测得的固有频率与黏度为0.067 Pa·s所测得的固有频率之差仅为

45.07 Hz。这与文献[6]的结论相似,即同一种液体黏度的改变对沉没辊模型模态固有频率的影响非常小,基本可忽略。

表8 1#辊固有频率与甘油黏度变化

温度/℃	20	30	40	50
黏度/(Pa·s)	0.523	0.237	0.121	0.067
固有频率/Hz	1 183.14	1 200.12	1 225.48	1 228.21

3 沉没辊模型模态特性影响因素分析

3.1 附加阻尼影响因素分析

当沉没辊模型浸没在流体介质中时,附加阻尼主要与流体的黏度有关^[9]。由于在甘油介质中,模型模态测试结果在前两阶最为准确,所以选择第1阶模态进行分析。图12给出了4根沉没辊模型第1阶模态附加阻尼因数和黏度的变化关系。

图12 甘油黏度对沉没辊模型附加阻尼因数的影响

从图12中可看出,随甘油黏度值增大,4根沉没辊模型第1阶模态附加阻尼因数均增加。1#与2#模型的材质和外形尺寸相同、仅壁厚不同,1#模型的附加阻尼因数明显大于2#模型,3#与4#模型也存在相似现象,其根源应为模型的刚度。1#与3#模型的几何尺寸相同、仅材质不同,1#模型的附加阻尼

因数明显大于 3#模型, 2#与 4#模型也存在相似现象, 但随甘油黏度增大差异明显加剧。因所有模型辊表面加工质量完全一致, 造成这种差异是两种材料的弹性模量和密度共同作用的, 应深入讨论。

3.2 附加质量影响因素分析

3.2.1 流体密度对附加质量的影响

本节试验分别对沉没辊模型在 3 种液体介质中进行了模态试验, 由于模型在流体介质中前两阶模态测试结果最为准确, 结合图 7~10 的结果, 取频带 0~2 500 Hz 分析不同流体介质对附加质量的影响。图 13 仅给出了 1#沉没辊模型在不同介质中的频响函数曲线。

从图 13 中可看出, 沉没辊模型在空气中频响函数峰值对应的频率值最大, 而在甘油中的最小, 且频响函数的峰值所对应的频率随流体介质密度的增大而减小。

试验测出了 4 根沉没辊模型分别在空气、液压油、水和甘油中的各阶模态频率、振型和阻尼比, 通过式(8)计算得到模型在不同流体密度中附加质量因数, 图 14 分别为 4 根沉没辊模型前六阶振型的附加质量因数随不同流体密度的变化关系。

图 13 1#辊在不同流体介质中的频响函数曲线

图 14 流体密度对沉没辊模型附加质量因数的影响

从图 14 中可看出, 随着流体密度的增加, 沉没辊模型各阶振型对应的附加质量因数均会增加, 且变化趋势呈线性增长。图中斜率最大的是 3#模型, 其质量与刚度较小, 而斜率最小的是 2#模型, 其质量与刚度较大。这说明结构的质量和刚度越大时, 流体密度的变化对其附加质量因数的影响就越小。

图 14a 中可看出, 对于低阶模态, 4 根沉没辊

模型的附加质量因数随着流体密度的变化斜率接近; 但随着模态阶数的增加, 其斜率变化较为明显 (图 14b 和图 14c)。

3.2.2 沉没辊模型壁厚和材质对附加质量的影响

为进一步研究在不同液体介质中, 沉没辊模型刚度和材质变化对附加质量的影响, 对试验结果进行了分类, 给出了表 9。

表 9 4 根沉没辊模型各阶模态附加质量因数

介质	振型	5 mm 钢	10 mm 钢	5 mm 铝	10 mm 铝
水	(1, 2)	0.962 1	0.476 6	2.634 8	1.230 1
	弯曲	0.362 6	0.218 2	0.824 7	0.701 8
	(2, 2)	0.532 2	0.427 1	1.281 7	1.418 4
液压油	(1, 2)	0.776 3	0.388 3	2.014 7	0.971 4
	弯曲	0.276 5	0.146 8	0.577 1	0.606 2
	(2, 2)	0.393 8	0.341 9	0.880 4	1.103 8
甘油	(1, 2)	1.369 2	0.635 5	3.246 2	1.530 7
	弯曲	0.440 4	0.425 1	1.361 9	1.208 0
	(2, 2)	0.733 2	1.678 2	1.626 9	1.889 0

从表 9 中可看出,对于不同材质的沉没辊模型,各阶模态的附加质量因数随着模型密度的增加而减小,铝制模型各阶模态的附加质量因数显著大于钢制模型;对于同一材质的模型,(1, 2)振型的附加质量因数随着模型壁厚的增加而减小,壁厚为 5 mm 的模型的附加质量因数大于壁厚为 10 mm 的模型;所有模型(1, 2)和(2, 2)振型的附加质量因数显著大于弯曲振型。

4 结 论

本文测试了 4 组沉没辊模型在不同流体介质中自由状态下的模态特性,对试验结果进行分析,得到了流体的附加阻尼与附加质量对模型模态变化的影响,对类似沉没辊结构部件的减振和结构优化有较大的参考价值。具体研究结论如下。

(1) 利用锤击法,分别对两类沉没辊模型进行空气中的模态试验,结果表明加杆对模型前六阶模态分析结果的影响可忽略;从加杆模型的试验结果分析可知,水和液压油前六阶的频响函数曲线峰值明显,各阶模态相互独立,无虚假模态,而甘油仅前三阶的频响函数曲线峰值明显。

(2) 基于甘油的黏温特性进行了模态试验,其黏度变化对沉没辊模型固有频率的影响较小,但其附加阻尼因数随其黏度的增大而增加。

(3) 随着流体密度的增加,4 根沉没辊模型各阶振型对应的附加质量因数均呈线性增加;当结构的质量和刚度增大时,其附加质量因数增大的斜率减小。

(4) 在 3 种液体介质中,随着沉没辊模型结构密度的增大,附加质量因数会逐渐减小;所有沉没辊模型(1, 2)和(2, 2)振型的附加质量因数要显著大于弯曲振型。

参 考 文 献

- [1] 王兴东,黄毫军,李友荣,等. 沉没辊装置液固耦合数值模拟及振动实验[J]. 北京科技大学学报, 2016, 38(12): 1778-1783.
- [2] WANG Xingdong, HUANG Haojun, LI Yourong, et al. Liquid-solid coupling numerical simulation and vibration experiment of sunken roller device[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2016, 38(12): 1778-1783.
- [3] VALENTIN D, PRESEA A, EGUSQUIZA E, et al. Experimental study on the added mass and damping of a disk submerged in a partially fluid-filled tank with small radial confinement[J]. Journal of Fluids & Structures, 2014, 50: 1-17.
- [4] VALENTIN D, PRESEA A, EGUSQUIZA E, et al. Experimental study of a vibrating disk submerged in a fluid-filled tank and confined with a nonrigid cover[J]. Journal of Vibration & Acoustics, 2017, 139(2): 021005.
- [5] 王兴东,刘灿灿,李友荣,等. 热镀锌线沉没辊装置振动分析与结构优化[J]. 华中科技大学学报, 2017, 45(12): 118-122.
- [6] WANG Xingdong, LIU Cancan, LI Yourong, et al. Research on vibration analysis and structure optimization of sink roll in hot-dip galvanizing line[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2017, 45(12): 118-122.
- [7] 黄毫军,王兴东,李友荣,等. 热镀锌沉没辊装置振动固有特性影响因素研究[J]. 机械科学与技术, 2016, 35(2): 187-191.
- [8] HUANG Haojun, WANG Xingdong, LI Yourong, et al. A study of influential factors on vibration inherent characteristics of sink roll device of hot dip galvanized[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2016, 35(2): 187-191.
- [9] RODRIGUE C G, EGUSQUIZA E, ESCALER X, et al. Experimental investigation of added mass effects on a Francis turbine runner in still water[J]. Journal of Fluids & Structures, 2006, 22(5): 699-712.
- [10] 赵信智. 核主泵叶轮湿模态特性分析与实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [11] ZHAO Xinzhi. Analysis and experimental research on wet modal characteristics of nuclear main pump impeller[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [12] NAIK T, LONGMIRE E K, MANTELL S C. Dynamic response of a cantilever in liquid near a solid wall[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2003, 102(3): 240-254.
- [13] BERGAUD C, NICU L. Viscosity measurements based

- on experimental investigations of composite cantilever beam eigenfrequencies in viscous media[J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(6): 2487-2491.
- [10] 刘瑞骏, 郝志勇, 郑旭, 等. 流固耦合对油底壳振-声特性的影响研究[J]. 北京理工大学学报, 2017, 37(1): 37-41. LIU Ruijun, HAO Zhiyong, ZHENG Xu, et al. Effect of fluid-solid coupling on the vibration acoustic characteristics of oil pan[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2017, 37(1): 37-41.
- [11] RODRIGUEZ C G, EGUSQUIZA E, ESCALER X, et al. Experimental investigation of added mass effects on a Francis turbine runner in still water[J]. Journal of Fluids & Structures, 2006, 22(5): 699-712.
- [12] KWAK M K, AMABILI M. Hydroelastic vibration of free-edge annular plates[J]. Journal of Vibration & Acoustics, 1999, 121(1): 26-32.
- [13] LIANG C C, LIAO C C, TAI Y S, et al. The free vibration analysis of submerged cantilever plates[J]. Ocean Engineering, 2001, 28(9): 1225-1245.
- [14] 夏金凤. 制动盘模态特性及其影响因素分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- XIA Jinfeng. Analysis of modal characteristics and influence factors of brake discs[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [15] MAHERI M R, SEVERN R T. Experimental added-mass in modal vibration of cylindrical structures[J]. Engineering Structures, 1992, 14(3): 163-175.
- [16] 顾培英, 邓昌, 吴福生. 结构模态分析及其损伤诊断[M]. 南京: 东南大学出版社, 2008.
- GU Peiying, DENG Chang, WU Fusheng. Structural modal analysis and damage diagnosis[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2008.
- [17] 全国图算学培训中心. 化学化工物性数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- National Tutoring Training Center. Chemical properties data book[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013.
- 作者简介: 王兴东(通信作者), 男, 1970 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为机械设计和工业自动化检测技术、机械振动理论、振动分析与控制。
E-mail: wangxingdong@wust.edu.cn

第 9 届上银优秀机械博士论文奖——佳作奖

飞秒激光直写加工柱面微透镜阵列的方法研究

作者: 罗 志

毕业学校: 中南大学

指导教师: 段吉安

柱面微透镜阵列在叠阵半导体激光器快慢轴准直、裸眼 3D 成像、平行加工等领域有着广泛应用。针对半导体激光器领域: 随着输出功率增大, 尺度缩小; 用于准直的透镜单元宽度由目前 500 μm 朝 100 μm 内缩减, 长度维持 mm 量级, 基材朝石英玻璃等高强度材料发展。目前适用于单元宽度 100 μm 以内透镜阵列制造的方法均受限于聚合物材料, 且受占空比小、效率低等缺陷影响, 均难以满足工业发展需求。飞秒激光以其超快、超强的独特优势, 可对所有材料实现冷加工, 且加工尺度小、精度高、质量好, 为石英玻璃表面透镜阵列的制造提供了选择。目前基于飞秒激光的微加工, 多采用逐点法, 其核心问题: 效率低。本论文致力于基于飞秒激光采用一定的方式实现微透镜轮廓面的直接成形加工, 满足材料要求的同时, 极大地提升制造效率。主要内容如下。

(1) 提出基于光束整形拟合待加工轮廓面的超快激光制造新方法: 试验研究发现飞秒激光直写成形微结构, 其轮廓与激光焦斑处的空间光强分布外形基本一致; 遂提出基于贝塞尔整形拟合待去除结构轮廓面的柱面微透镜阵列直写加工新方法(待去除结构截面轮廓接近于贝塞尔光束光强分布包络外形; 毗邻两次直写加工, 可于中间直接成形透镜单元)。

(2) 提出基于贝塞尔光束的精确整形技术与光路设计方法: 首先确立基于锥透镜的贝塞尔光束产生方式; 然后对实际整形过程的光束变换进行仿真分析, 揭示了结构误差对光强分布的影响规律(锥透镜顶角误差主要影响前半部分, 且横向轮廓失真显著; 边界衍射效应主要影响后半部分, 且随光束的传播而越发显著), 探究了整形光学元件位置偏移的影响机制, 发现特定的位置偏移量可使焦斑处光强分布趋于理想结果; 最后依据理论分析, 搭建了整个直写加工系统。

(3) 完成柱面微透镜阵列的成形制造与尺寸、面型可控加工: 首先试验验证了透镜阵列的高效直写成形制造, 结果表明透镜单元尺寸大幅降低、高强度基材的加工可行; 然后实现了透镜单元尺寸、面型的可控制造(单元尺寸在 18 μm 至 60 μm 范围内连续可控, 且与脉冲能量呈线性变化关系; 单元面型实现了圆弧面型与抛物面型的制造, 有效改善了透镜相差); 最后对成形柱面微透镜阵列的光学性能进行了检测, 结果表明透镜阵列表面质量高、聚焦能力强、具有高效平行微加工的能力。