

文章编号: 1003-501X(2011)01-0060-06

光刻物镜恒温水套的小比例模型实验设计

袁文全, 巩 岩, 张 巍, 王学亮, 赵 磊, 倪明阳

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 为了进行光刻物镜恒温水套先期设计分析, 采用相似性原理设计了一个恒温水套的小比例模型实验, 并采用数值仿真的办法, 证明了该小比例模型实验设计方法的正确性。首先根据恒温水套的结构形式给出了传热控制方程。接着对各控制方程进行分析, 得出了稳定传热情况下模型实验设计的相似准则。然后根据相似准则设计了一个光刻物镜恒温水套的 1: 4 小比例模型。最后通过数值仿真分析了 1: 4 小比例模型及原型上的热场分布, 计算结果表明它们之间的热场分布具有相似性。结论表明: 在进行光刻物镜恒温水套小比例模型的稳定传热实验设计时, 需要满足几何相似、雷诺数相似、普朗特数相似、毕奥数相似及边界条件相似。

关键词: 光刻; 比例模型; 相似准则; 数值传热分析; 热分布

中图分类号: TN305.7

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2011.01.012

Downscaling Model Test Design for Constant-temperature Water Jacket of Lithography Lens

YUAN Wen-quan, GONG Yan, ZHANG Wei, WANG Xue-liang, ZHAO Lei, NI Ming-yang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to realize early design of constant-temperature water jacket of lithography lens, a downscaling model test for constant-temperature water jacket is designed with similarity principle, and the method of this downscaling model test design is proved to be correct by numerical simulation. First, governing equations of heat transfer are given based on structure of the constant-temperature water jacket. Then, the governing equations are analyzed, and the similarity criteria of model test design under steady-state heat transfer are derived. Thirdly, a 1:4 downscaling model of a constant-temperature water jacket of lithography lens is designed with the similarity criteria. Finally, thermal distribution in the 1:4 downscaling model and its prototype are analyzed by numerical simulation, and results show that the thermal distribution between them are similar to each other. It can be concluded that the downscaling model test design for constant-temperature water jacket of lithography lens should meet the criteria as follows: geometric similarity, Reynolds number similarity, Prandtl number similarity, Biot number similarity and boundary conditions similarity.

Key words: lithography; scale model; similarity criteria; numerical heat transfer analysis; thermal distribution

0 引 言

高精度投影光刻机的光刻物镜具有较高的数值孔径, 当外界温度波动, 或者由于自身长时间工作引起的温度变化时, 都会由光刻物镜热变形引起焦点的漂移, 造成成像质量下降, 使其无法达到应有的光刻分辨率。因此, 目前一般在高精度光刻物镜外部加装恒温水套^[1], 一方面吸收物镜内部因工作所产生的热量, 使物镜内部镜筒长时间工作温度恒定, 另一方面也使镜片不受外界温度波动的影响, 从而保持光刻物镜的

收稿日期: 2010-07-20; 收到修改稿日期: 2010-10-10

作者简介: 袁文全(1982-), 男(汉族), 河南新乡人。助理研究员, 硕士, 主要从事光机系统设计。E-mail: yuanwenquan@tom.com。

通信作者: 巩岩(1968-), 男(汉族), 吉林梅河口人。研究员, 博士生导师, 主要研究方向短波光学。E-mail: gongy@sklao.ac.cn。

高分辨特性。

对于大型系统或者复杂系统的设计, 一般在先期过程中进行小比例模型实验, 以便查找设计过程中出现的不足, 这一点在核工业^[2]、激光加工^[3]、低温制冷^[4]、飞行器设计^[5]及水下武器设计^[6]等方面都有广泛的应用。而在目前光机系统的热设计中, 虽然对热分析有较多的关注^[7-10], 但一般涉及的传热形式单一, 亦少见有小比例模型实验进行先期验证。对于投影光刻物镜系统的恒温水套来说, 其传热过程涉及了流体的流动状态、流体传热、流固之间换热及固体的热传导问题, 传热形式较为复杂, 且其传热效果对光刻品质有极为重要的影响。因此, 有必要进行小比例模型实验对水套设计进行分析。

在投影光刻物镜恒温水套的小比例模型实验设计中, 主要目的是要满足水套模型与原型之间热场分布的相似关系。因此, 除了需要满足两系统之间的几何相似外, 还需要满足两系统之间的动力相似、热力学相似等相似准则。本文通过对流体运动方程、流固换热方程及固体热传导方程的分析, 得出了稳定传热情况下水套模型与原型之间的相似准则; 并根据这些相似准则, 设计了一个光刻物镜恒温水套的 1: 4 小比例模型实验。最后, 通过数值仿真实验, 发现模型与原型之间的热场分布具有较好的相似性, 验证了该模型实验设计方法的正确性。

1 水套模型设计的相似准则

1.1 控制方程

根据粘性不可压缩流体的控制方程, 忽略体积力和内热源, 得到描述水套内冷却水运动及热传递的控制方程^[11]如下:

$$\text{动量方程:} \quad -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{u} = \frac{d\mathbf{u}}{dt} \quad (1)$$

$$\text{能量方程:} \quad \frac{dT}{dt} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \nabla^2 T \quad (2)$$

其中: μ 为水的粘度, ρ 为水的密度, p 为动水压力, $\mathbf{u}$ 为水流速度矢量, T 为冷却水温度场函数, t 为时间, c 为水的比热, λ 为水的热传导系数, ∇ 为哈密顿算子, d/dt 为实导数表示项, 即:

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{u} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{v} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{w} \frac{\partial}{\partial z}$$

而在冷却水与水套内壁之间, 根据水的粘性条件, 在水套内壁表面处的传热是以导热形式进行的。图 1 描述了冷却水流过水套内壁时的温度曲线, 图中水套表面温度比冷却水温度高, 它们之间的温度差引起了能量交换, 从而形成温度分布。

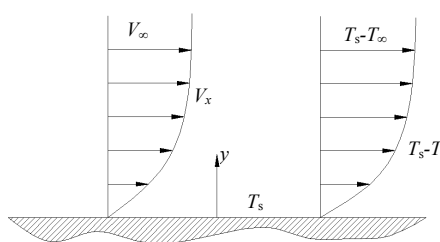


图 1 冷却水的速度和温度分布

Fig.1 Velocity, temperature distribution of cooling water

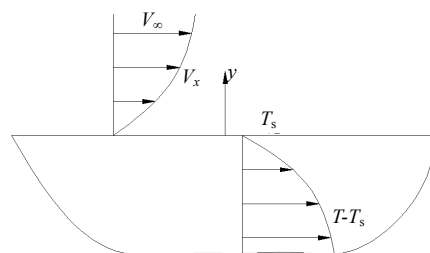


图 2 水套内壁温度分布

Fig.2 Temperature distribution in the wall of water

从图 1 来看, 在水套内壁表面处, 冷却水的换热形式主要以热传导的方式进行。其传热微分方程为

$$q_y = -\lambda A \frac{\partial(T - T_s)}{\partial y} \bigg|_{y=0} \quad (3)$$

水套内壁和冷却水之间的换热率可以写作:

$$q_y = hA(T_s - T_\infty) \quad (4)$$

其中: q_y 是表面法向方向上的换热率, λ 为冷却水的热传导系数, A 为冷却水与水套之间的接触面积, h 为流换热系数, T 为冷却水温度场函数, T_s 为水套壁面处水的温度, T_∞ 为冷却水内部温度。

在水套壁面内部, 热量以热传导的方式进行, 其温度分布如图 2。分析可知壁面的传热微分方程为

$$q_y = -kA \frac{\partial(T - T_s)}{\partial y} \Big|_{y=0} \quad (5)$$

其中: q_y 是表面法向方向上的换热率, k 为水套材料的热传导系数, A 为冷却水与水套之间的接触面积, T 为壁面内部温度场函数, T_s 为水套壁面处温度。

1.2 相似准则推导

为了得出冷却水传热的相似准则, 需要对其控制方程进行无量纲化, 具体采用的无量纲如下:

$$\rho^* = \frac{\rho}{\rho_0}, \quad \mu^* = \frac{\mu}{\mu_0}, \quad \mathbf{u}^* = \frac{\mathbf{u}}{u_0}, \quad v^* = \frac{v}{u_0}, \quad w^* = \frac{w}{u_0}, \quad x^* = \frac{x}{L_0}, \quad y^* = \frac{y}{L_0}, \quad z^* = \frac{z}{L_0}, \quad t^* = \frac{t}{t_0}, \quad T^* = \frac{T}{T_0},$$

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{\lambda_0}, \quad c^* = \frac{c}{c_0}, \quad p^* = \frac{p}{p_0}, \quad \text{其中 } p_0 = \rho_0 u_0^2 \text{ 为动水压力。}$$

方程(1)、(2)化简为

$$-\frac{u_0 t_0}{L_0} \frac{1}{\rho^*} \nabla p^* + \frac{\mu_0 t_0}{\rho_0 L_0^2} \frac{\mu^*}{\rho^*} \nabla^2 \mathbf{u}^* = \frac{d\mathbf{u}^*}{dt^*} \quad (6)$$

$$\frac{dT^*}{dt^*} = \frac{\lambda_0 t_0}{\rho_0 c_0 L_0^2} \frac{\lambda^*}{\rho^* c^*} \nabla^2 T^* \quad (7)$$

取下列无量纲数:

$$\text{Fo} = \frac{\mu_0 t_0}{\rho_0 L_0^2}, \quad \text{Re} = \frac{\rho_0 u_0 L_0}{\mu_0}, \quad \text{Pr} = \frac{\mu_0 c_0}{\lambda_0}$$

式中: Fo 为傅里叶数(Fourier number), Re 为雷诺数(Reynolds number), Pr 为普朗特数(Prandtl number), 则方程(6)、(7)可以表述为

$$-\text{ReFo} \frac{1}{\rho^*} \nabla p^* + \text{Fo} \frac{\mu^*}{\rho^*} \nabla^2 \mathbf{u}^* = \frac{d\mathbf{u}^*}{dt^*} \quad (8)$$

$$\frac{dT^*}{dt^*} = \frac{\text{Fo}}{\text{Pr}} \frac{\lambda^*}{\rho^* c^*} \nabla^2 T^* \quad (9)$$

对于式(3)、(4), 由于水套内壁上的换热率必须等于水套内壁表面处冷却水的热传导率, 因此两式必然相等, 即:

$$hA(T_s - T_\infty) = -\lambda A \frac{\partial(T - T_s)}{\partial y} \Big|_{y=0} \quad (10)$$

引入长度参数 L 并整理可得:

$$\frac{hL}{\lambda} = \frac{\partial(T_s - T)/\partial y|_{y=0}}{(T_s - T_\infty)/L} \quad (11)$$

同理, 对于公式(4)、(5)可得:

$$\frac{hL}{k} = \frac{\partial(T_s - T)/\partial y|_{y=0}}{(T_s - T_\infty)/L} \quad (12)$$

可见公式(11)、(12)均为无量纲表达式, 因此可取下列无量纲数:

$$\text{Nu} = \frac{hL}{\lambda}, \quad \text{Bi} = \frac{hL}{k}$$

式中: Nu 为努谢尔数(Nusselt number), 可以看做冷却水对流热阻与其传导热阻的比值; Bi 为毕奥数(Biot number), 可理解为冷却水对流热阻与水套壁上传导热阻的比值。

由于本模型实验设计主要验证稳定传热条件下水套内壁上的温度场分布, 而在稳定传热的情况下, 温

度场分布与时间无关。因此，在本次模型实验设计中不要求傅里叶数相似。另外由于努谢尔数可以表示为雷诺数和普朗特数的函数^[11]，即：

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr})$$

(13)

这样，结合上述分析可知：要保证光刻物镜恒温水套模型与原型之间的温度场分布相似性，需要满足下列相似准则：

- 1) 几何相似；
- 2) 动力相似：雷诺数(Reynolds number)相似；
- 3) 热力学相似：普朗特数(Prandtl number)、毕奥数(Biot number)相似；
- 4) 边界条件相似。

2 水套实验设计及数值仿真

2.1 水套原型

水套的原型采用双进双出的双水道系统，为减小系统热阻，直接在物镜筒上剖出水道来形成水套内壁以增强系统的温控能力。而为防止外界温度变化对水套的影响，在水套外壁上添加绝热层包覆。其设计的具体结构如图 3、4 所示，其中图 3 为水套结构的说明图，阴影部分为水套主体结构，具体尺寸如表 1 所示；图 4 为水套系统的草绘图，详细说明了水套的结构形状。

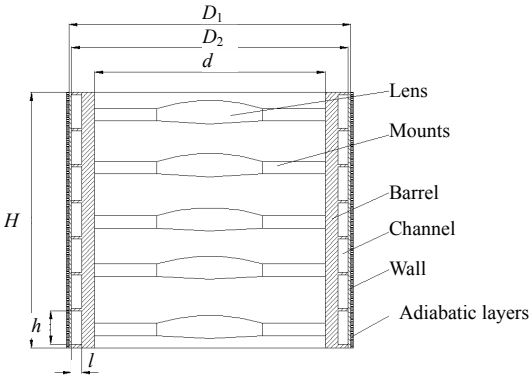


图 3 水套结构说明
Fig.3 Structure of water jacket

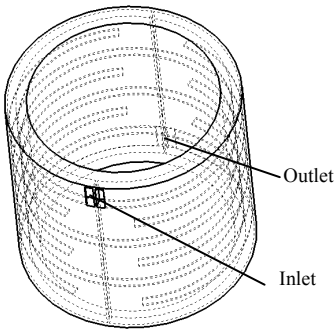


图 4 水套草绘
Fig.4 Sketch of water jacket

表 1 水套尺寸

Table 1 Dimensions of water jacket mm

D_1	D_2	d	H	h	l
550	540	450	495	65	20

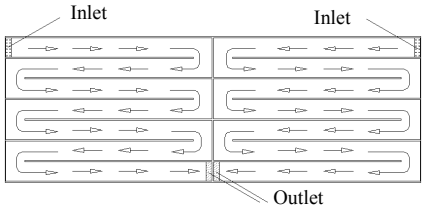


图 5 水套内的冷却水流动
Fig.5 Flow of cooling water in water jacket

图 4 中，沿两水道进水口处中心母线将水套切开，则其冷却水的流动结构展开如图 5 中所示，图 5 中空心箭头指向为水流方向。

整个水套系统采用结构钢，冷却水为去离子水，具体物理性能参数如表 2 所示。

表 2 材料物理性能

Table 2 Physical properties of materials

Materials	Density/(kg/m ³)	Specific heat/(J/kg·K)	Thermal conductivity/(W/m·K)	Viscosity/(Pa·s)
Steel	7.854×10 ³	4.34×10 ²	60.5	-
Water	9.97×10 ²	4.182×10 ³	0.606 9	8.899×10 ⁻⁴

2.2 水套的工作环境

由于光刻物镜内镜片发热量较小，且镜筒内部有保护气体流动产生对流换热，使镜筒内壁上的受热较为均匀。因此，可以假设镜筒内壁上为均匀热载荷。另外，水套外壁上有绝热层包覆，且其冷却能力主要由冷却水贡献，因此，除镜筒内壁外，其它壁面可假定为绝热的。冷却水的入口处温度恒定，流量均匀。具体的工作环境说明如表 3 所示。

表 3 小模型实验设计
Table 3 Small model test design

Items	Prototype	Model	Scale	Principle
Geometric dimensions	L	L/4	4:1	Geometric similarity
Materials	Steel/water	Steel/water	-	Prandtl number similarity
Velocity of water	0.03 m/s	0.12 m/s	1:4	Reynolds number similarity
Heat flux on inner wall of barrel	2 W/m ²	8 W/m ²	1:4	Biot number similarity
Conditions of other walls	Adiabatic	Adiabatic	-	Boundary conditions similarity
Temperature of water at inlet	295 K	295 K	1:1	Boundary conditions similarity

2.3 水套 1：4 小模型实验设计

依据 1.2 中所得到的相似条件设计恒温水套的 1：4 小模型实验，其参数如表 3 所示(注：表 3 中的 L 泛指原型中一切几何尺寸)。

2.4 数值仿真验证

由于边界条件及模型均具有对称性，因此可沿两进、出水口中心母线将模型切开，并建立 1/2 分析模型进行数值仿真，具体分析模型如图 6 所示。

采用 ANSYS-CFX 分别对水套的原型及模型进行数值仿真，得出镜筒内壁热场分布。图 6 中，若以镜筒内壁在出水口处的底边点为坐标原点，定义竖直方向为高度方向，底端水道逆流方向为长度方向，则镜筒内壁上热等温线如图 7、图 8 所示(注：图 7、图 8 中等温线的单位为 K)。

由于网格划分差异及数值运算精度的误差，且计算结果中热场分布值域过窄(值域范围小于 0.005 K)，在计算精度受限的情况下，图 7、图 8 中所描述水套内壁上等温线的形状略有差异，但等温线的值域及其所包络位置差异较小；同时，由于光刻镜头要求的热场分布值域范围小于 0.01 K，而上述计算结果是满足设计需求的。因此，综合图 7、图 8 判定：水套原型和 1：4 小比例模型在对应位置上的温度具有较好的一致性。这也表明，采用 1.2 中得出的相似准则进行 1：4 水套小比例模型实验设计是可行的。

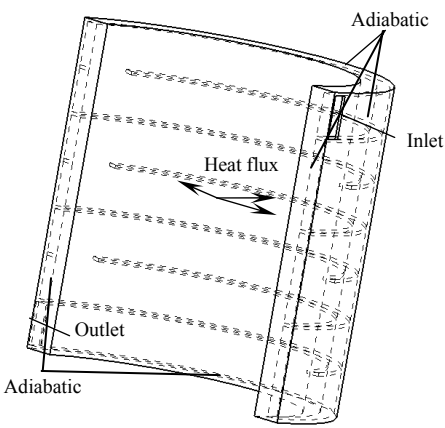
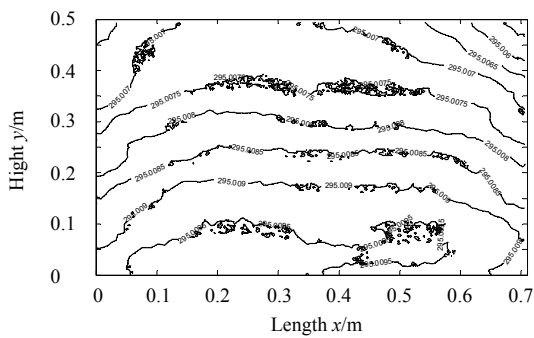


图 6 1/2 分析模型
Fig.6 1/2 analysis model



3 结 论

为了进行光刻物镜恒温水套先期设计分析, 需要进行小比例模型实验加以验证。本文利用相似性原理, 对光刻物镜恒温水套的传热控制方程进行了分析, 得出了稳定传热情况下恒温水套模型比例实验设计的相似准则, 即: 在满足几何相似、雷诺数(Reynolds number)相似、普朗特数(Prandtl number)相似、毕奥数(Biot number)相似及边界条件相似条件下, 光刻物镜恒温水套的小比例模型与原型之间的热场分布具有相似关系。同时, 根据上述相似准则设计了一个光刻物镜恒温水套 1: 4 小比例模型实验, 数值仿真分析结果表明小比例模型与原型之间的热场分布具有相似性关系。因此, 可基于上述相似准则设计光刻物镜恒温水套的小模型实验, 为其前期设计提供可行性实验数据。

参考文献:

- [1] 陈旭南, 余国彬, 张津. 亚微米光刻物镜的恒温水套, 中国: 00223787.3[P]. 2001-05.
CHEN Xu-nan, YU Guo-bin, ZHANG Jin. A constant-temperature water jacket of sub-micron lithography objective lens, China: 00223787.3[P]. 2001-05.
- [2] 黄志勇, 马昌文, 姚梅生, 等. 10MW 高温堆热气联箱气体混合模拟的相似律 [J]. 原子能科学技术, 1999, **33**(3): 240-246.
HUANG Zhi-yong, MA Chang-wen, YAO Mei-sheng, *et al.* Thermal mixing simulation for the hot gas plenum of the 10MW high temperature cooled reactor [J]. **Atomic Energy Science and Technology**, 1999, **33**(3): 240-246.
- [3] 黄晨光, 陈思颖, 段祝平. 激光辐照下充压圆筒变形的相似律问题 [J]. 强激光与离子束, 2004, **16**(8): 962-966.
HUANG Cheng-guang, CHEN Si-ying, DUAN Zhu-ping. Similarity criterion about deformation and failure of pressurized cylinder subjected to laser irradiation [J]. **High Power Laser and Particle Beams**, 2004, **16**(8): 962-966.
- [4] 汤珂, 张珂, 林小钢, 等. 交变流动传热的相似准则 [J]. 低温工程, 2010, **31**(2): 240-246.
TANG Ke, ZHANG Yu, LIN Xiao-gang, *et al.* Similarity criteria of heat transfer for oscillating flow [J]. **Cryogenics**, 2010, **31**(2): 240-246.
- [5] 高永卫, 乔志德. 螺旋桨风洞实验气动声学相似准则研究 [J]. 西北工业大学学报, 2005, **23**(4): 430-434.
GAO Yong-wei, QIAO Zhi-de. A new propeller aeroacoustic scaling law [J]. **Journal of Northwestern Polytechnical University**, 2005, **23**(4): 430-434.
- [6] 张效慈. 水下爆炸试验相似准则 [J]. 船舶力学, 2007, **11**(1): 108-118.
ZHANG Xiao-ci. Similarity criteria for experiment of underwater explosion [J]. **Journal of Ship Mechanics**, 2007, **11**(1): 108-118.
- [7] 刘斌, 张汉勋, 周维虎, 等. 世博会车载系留气球光电平台的热分析与热设计 [J]. 光电工程, 2010, **37**(6): 126-131.
LIU Bin, ZHANG Han-xun, ZHOU Wei-hu, *et al.* Thermal analysis and design of tethered balloon load opto-electronic platform used in Expo.2010 Shanghai [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2010, **37**(6): 126-131.
- [8] 宋曦, 朱效立, 韦飞, 等. 近地空间下 X/EUV 透射光栅的热力学有限元分析 [J]. 光电工程, 2010, **37**(5): 91-96.
SONG Xi, ZHU Xiao-li, WEI Fei, *et al.* Thermodynamics finite element analysis of X/EUV transmission grating in terrestrial space [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2010, **37**(5): 91-96.
- [9] 于旭东, 张鹏飞, 汤建勋, 等. 机抖激光陀螺温度场的有限元模拟与实验 [J]. 光学 精密工程, 2010, **18**(4): 913-920.
YU Xu-dong, ZHANG Peng-fei, TANG Jian-xun, *et al.* Finite element analysis and experiments of temperature fields of mechanically dithered ring laser gyroscopes [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2010, **18**(4): 913-920.
- [10] 吴雪峰, 丁亚林, 吴清文. 临近空间光学遥感器热设计 [J]. 光学 精密工程, 2010, **18**(5): 1159-1165.
WU Xue-feng, DING Ya-lin, WU Qing-wen. Thermal design for near space optical remote sensor [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2010, **18**(5): 1159-1165.
- [11] JAMES R W, CHARLES EW, ROBERT EW. **Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer** [M]. New York: John Wiley & Sons, 1976.