

文章编号 1004-924X(2009)02-0280-06

# 基于涂料性能参数的红外隐身技术

陈 翊, 张 健, 王艳武, 杨 立

(海军工程大学 船舶与动力学院动力工程系, 湖北 武汉 430033)

**摘要:**根据数值传热学的方法模拟了目标表面温度分布,分析了隐身涂料的性能参数(短波吸收率  $\alpha_s$ 、长波吸收率  $\alpha_l$  与表面发射率  $\epsilon$ )对目标表面温度的影响;模拟了这些性能参数对红外探测系统作用距离的影响。分析结果表明:上述 3 种性能参数均会对目标表面温度产生影响。 $\alpha_s$ 、 $\alpha_l$  与表面温度成正比, $\epsilon$  与表面温度成反比,影响幅度可达 10% 左右;探测系统作用距离与背景温度、气象条件、探测器性能等多种因素相关,根据实际情况调整涂料性能参数可使作用距离最小。这些结果基本满足红外隐身涂料设计、选型与使用方面的实际需求。

**关键词:**红外隐身技术;隐身涂料;性能参数;作用距离

中图分类号:TN213;TJ765.5 文献标识码:A

## Infrared stealth technology based on performance parameters of camouflage coating

CHEN Xuan, ZHANG Jian, WANG Yan-wu, YANG Li

(Academy of Ship and Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** On the basis of the method of numerical heat transfer, the surface temperature of target was simulated. Then, the influence of the performance parameters of camouflage coating (shortwave absorptivity  $\alpha_s$ , longwave absorptivity  $\alpha_l$ , emissivity  $\epsilon$ ) on the surface temperature of target was analyzed. Finally, the influence of these performance parameters on the lock-on range of infrared detection system was also analyzed. The analytical results show that all of performance parameters would affect the temperature of target.  $\alpha_s$  and  $\alpha_l$  are in direct proportion to the temperature of target, and  $\epsilon$  is in inverse proportion to that, the influencing range could reach to 10%. Moreover, the lock-on range of detection system correlates to background temperature, weather condition, capability of detector and so on, and adjusting the performance parameters to the practical condition can shorten the lock-on range to least. These results can satisfy the practical requirements of design, selection and application of infrared camouflage coating.

**Key words:** infrared stealth technology; camouflage coating; performance parameter; lock-on range

收稿日期:2008-03-05;修订日期:2008-05-08.

基金项目:海军工程大学自然科学基金资助项目(No. HGDJJ05009)

### 1 引言

近年来,由于红外搜索与跟踪系统(IRST)的性能大为提高<sup>[1-2]</sup>以及精确制导武器的大量使用,对军事目标的生存能力提出了更高的要求。军事专家普遍认为,未来战场上,目标一旦被发现和识别即等于被摧毁。因此,对于军事目标红外隐身、红外伪装以及红外对抗技术的研究已成为国内外各大研究机构争相研究的领域之一<sup>[3-5]</sup>。

以涂料的形式对目标实现红外隐身是红外技术应用的一个重要方面。西方国家早在上世纪 70 年代末 80 年代初就将隐身涂料技术应用于战斗机的研制与生产,并已向其它领域渗透。国内 80 年代以后逐步开展隐身涂料的基础研究。就发展现状来看,红外隐身涂料研究历史较短,基本还处于探索阶段;就研究方向来看,研究重点主要集中在低发射率涂料的研制上<sup>[6-7]</sup>,没有对涂料的其它性能参数(大气长波吸收率与太阳短波吸收率)以及参数间的优化关系展开充分的研究,不能满足实际的需求。本文在目标表面温度模拟结果的基础之上,分析了涂料的性能参数短波吸收率 $s_s$ 、长波吸收率 $s_l$ 与发射率 $\epsilon_l$ 对目标表面温度以及红外探测系统作用距离的影响。其研究成果对红外隐身涂料的设计、选型与使用都具有比较重要的实际意义。

### 2 隐身涂料对目标表面温度场的影响

对目标表面温度的模拟是本文研究的基础。为了实现动态模拟,本文提出以下几条假定<sup>[8]</sup>: (1) 由于目标的长、宽尺寸远大于厚度尺寸,将三维导热问题简化为一维问题来处理; (2) 目标材料为各向同性的均匀材料; (3) 假定目标室内空气温度不变; (4) 忽略目标内壁间的辐射换热与外壁面的汽化潜热。目标围护结构的导热微分方程与求解边界条件分别为:

导热微分方程<sup>[9]</sup>:

$$\frac{\partial t(x,t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 t(x,t)}{\partial x^2}, \quad (1)$$

内表面边界条件:

$$-\left[ \frac{\partial t(x,t)}{\partial x} \right]_{x=l} = h_{in}(t_{win} - t_{fin}), \quad (2)$$

外表面边界条件:

$$-\left[ \frac{\partial t(x,t)}{\partial x} \right]_{x=0} = q_{sun} + q_{sur} + q_{co}, \quad (3)$$

其中,  $x$  为目标围护结构沿厚度方向上的坐标;  $t(x,t)$  为时刻  $t$  时  $x$  位置处 的温度;  $a$  为热扩散率;  $\lambda$  为导热系数;  $h_{in}$  为内表面对流换热系数;  $t_{win}$  为内壁面温度;  $t_{fin}$  为室内气温; 短波辐射换热量为  $q_{sun} = s_s H_T$ ;  $s_s$  为涂料短波吸收率;  $H_T$  为目标表面接收到的总太阳辐照度; 长波辐射换热量为  $q_{sur} = \epsilon_l (H_{sky} + H_g) - W_{wout}$ ;  $H_g$  为地表辐照度;  $\epsilon_l$  为长波吸收率;  $H_{sky}$  为天空辐照度;  $W_{wout}$  为外表面辐射出射度;  $q_{co}$  为外壁面对流换热量。

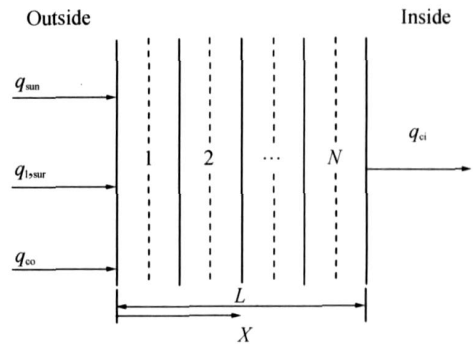


图 1 简化计算模型

Fig. 1 Simplified calculation model

将目标围护结构沿厚度方向分为  $N$  层, 每层间隔处为一节点, 加上内外表面上各一节点共  $N + 1$  个节点, 两虚线间为一单元(如图 1 所示), 采用有限体法对  $N + 1$  个节点方程进行离散<sup>[10]</sup>。离散后的目标结构瞬态热平衡过程可表达为:

$$C\dot{T} + KT = Q, \quad (4)$$

其中,  $K$  为传导矩阵;  $C$  为比热矩阵;  $T$  为节点温度向量;  $\dot{T}$  为温度对时间导数;  $Q$  为节点热流率向量。

经计算可以得出目标外壁面的温度分布, 在此基础之上, 分析得出短波吸收率 $s_s$ 、长波吸收率 $s_l$ 与发射率 $\epsilon_l$ 对外壁面瞬时温度的影响, 如图 2 ~ 图 4 所示。

分析结果表明: 隐身涂料的短波吸收率 $s_s$ 、长波吸收率 $s_l$ 与发射率 $\epsilon_l$ 都会对目标表面温度产生非常明显的影响,  $s_s$ 、 $s_l$  取值越大, 目标表面温度越高; 而  $\epsilon_l$  取值越大, 目标表面温度越低。其中  $s_s$  只会影响目标白天的表面温度, 而  $s_l$  与  $\epsilon_l$  将会影响目标全天的表面温度。

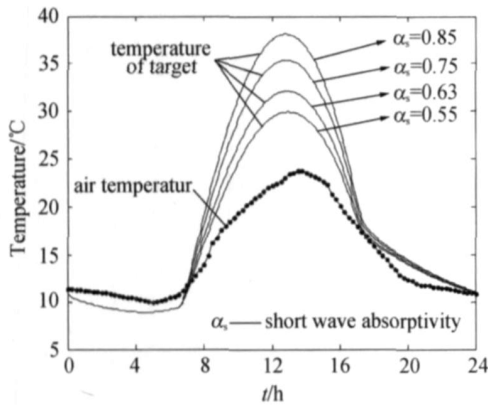


图 2  $\alpha_s$  对目标表面温度的影响

Fig. 2 Influence of  $\alpha_s$  on temperature of target

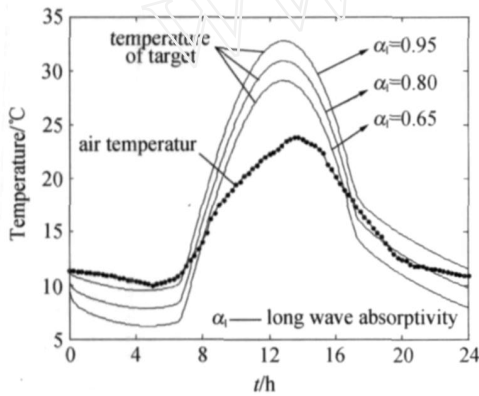


图 3  $\alpha_l$  对目标表面温度的影响

Fig. 3 Influence of  $\alpha_l$  on temperature of target

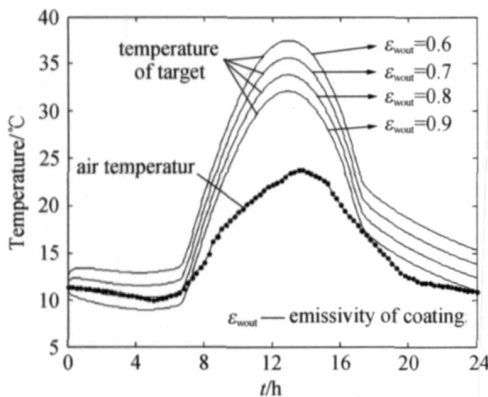


图 4  $\epsilon_w$  对目标表面温度的影响

Fig. 4 Influence of  $\epsilon_w$  on temperature of target

### 3 隐身涂料对作用距离的影响

目前,对点目标(目标张角小于红外系统的瞬时视场)的视距估算方法很多,本文采用基于系

统噪声等效温差 NETD 计算作用距离<sup>[11]</sup>:

$$R = \left[ \left| \frac{J \cdot a(R)}{\text{NETD} \cdot N \cdot \text{NSR}} \right| \right]^{1/2}, \quad (5)$$

其中,  $R$  为作用距离;  $J$  为目标与背景的波段辐射强度差;  $a(R)$  为大气透过率;  $\theta$  为瞬时视场立体角;  $N$  为辐射亮度差; NETD 为系统噪声等效温差; NSR 为系统信噪比。

目标的辐射强度包括自身的辐射和对环境辐射的反射。设目标的面积为  $A_t$ , 目标温度为  $T_t$ , 目标表面发射率为  $\epsilon_t$ , 探测器工作波段内能量百分比为  $\tau$ , 在探测器工作波段内环境的辐照度为  $H_c$ , 则目标的辐射强度  $J_t$  为:

$$J_t = \epsilon_t A_t T_t^4 + (1 - \epsilon_t) \frac{H_c A_t}{\tau}, \quad (6)$$

由于目标并没有充满探测器的瞬时视场,即进入探测器的瞬时视场内的辐射能量还包括背景的辐射。符合小面源条件的背景面积  $A_b$  为  $R^2 - A_t$ ,  $\epsilon_b$  为背景发射率,  $T_b$  为背景温度, 则背景提供的辐射强度  $J_b$  为:

$$J_b = \epsilon_b A_b T_b^4 + (1 - \epsilon_b) \frac{H_c A_b}{\tau}, \quad (7)$$

当目标在探测器瞬时视场内时,目标和背景提供的总辐射强度  $J$  为:

$$J = J_t + J_b, \quad (8)$$

当目标不在探测器瞬时视场内时,只有背景提供辐射能量。此时进入探测器的辐射强度为:

$$J = \epsilon_b T_b^4 \frac{R^2}{\tau} + (1 - \epsilon_b) \frac{H_c R^2}{\tau}, \quad (9)$$

则目标与背景的波段辐射强度差  $J$  为:

$$J = J_t - J_b, \quad (10)$$

将式(6)~(10)代入式(5)得:

$$R = \left[ \left| \frac{J \cdot a(R)}{\text{NETD} \cdot N \cdot \text{NSR}} \right| \right]^{1/2} = \left[ \left| \frac{\epsilon_t T_t^4 - \epsilon_b T_b^4 - (\epsilon_t - \epsilon_b) H_c}{\text{NETD} \cdot N \cdot \text{NSR}} A_t a(R) \right| \right]^{1/2}, \quad (11)$$

面源目标所成的像已至少充满探测器的一个成像单元。对式(5)进行修正可以得出探测器对于面源目标的作用距离:

$$R = \left[ \left| \frac{J \cdot a(R)}{\text{NETD} \cdot N \cdot \text{NSR} \cdot K_n} \right| \right]^{1/2}, \quad (12)$$

$$K_n = (A_t / R^2) / (A_d / f^2), \quad (13)$$

其中,  $A_d$  为单元探测器面积,  $f$  为焦距。

式(11), (12) 是关于作用距离  $R$  的隐函数, 需要运用迭代法求解。从式(11) 可以看出, 当系统参数 NETD、NSR、目标面积  $A_t$ 、环境辐照度  $H_e$ 、背景温度  $T_b$  以及  $\epsilon_t$  一定时, 作用距离  $R$  与目标表面温度  $T_t$  和  $\alpha_t$  相关。由上节分析结果可知涂料的性能参数  $\alpha_s$ 、 $\alpha_l$  与  $\alpha_t$  均能影响目标的表面温度, 所以分析得出它们对作用距离  $R$  的影响(如图 5 ~ 图 7 所示)。

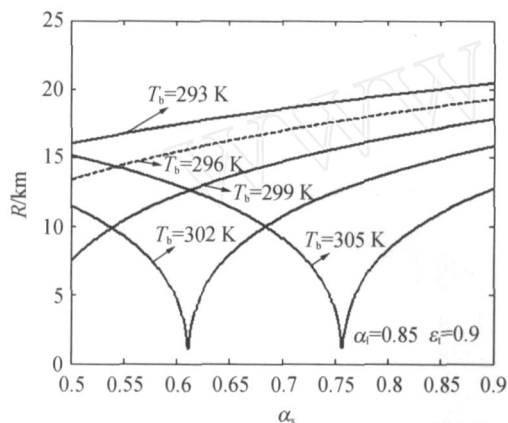


图 5  $\alpha_s$  对 8~12  $\mu\text{m}$  波段作用距离的影响

Fig. 5 Influence of  $\alpha_s$  on lock-on range at 8~12  $\mu\text{m}$

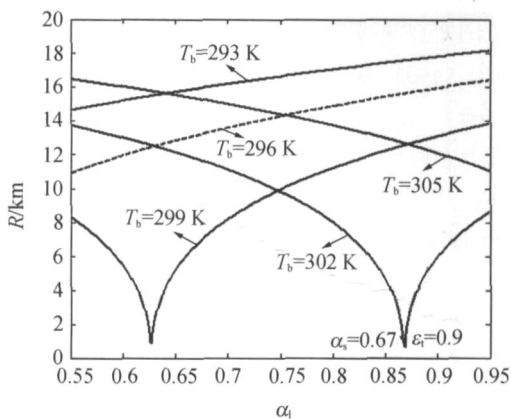


图 6  $\alpha_l$  对 8~12  $\mu\text{m}$  波段作用距离的影响

Fig. 6 Influence of  $\alpha_l$  on lock-on range at 8~12  $\mu\text{m}$

探测器工作波段为 8 ~ 12  $\mu\text{m}$ , 目标投影面积  $A_t = 12 \text{ m}^2$ , 信噪比  $\text{NSR} = 4.5$ , 系统的噪声等效温差  $\text{NETD} = 0.1 \text{ K}$ , 探测器瞬时视场角  $\Omega = 1 \times 10^{-8} \text{ rad}^2$ 。

图 5 ~ 图 7 中, 虚线表示计算时刻 (3:00pm) 真实背景温度  $T_b = 296 \text{ K}$  下, 红外探测系统作用距离随隐身涂料性能参数变化的关系曲线。秋季

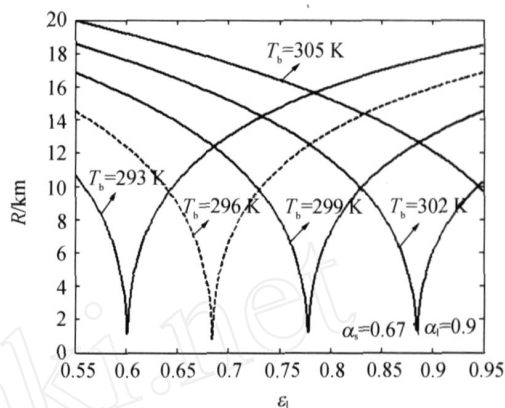


图 7  $\alpha_t$  对 8~12  $\mu\text{m}$  波段作用距离的影响

Fig. 7 Influence of  $\alpha_t$  on lock-on range at 8~12  $\mu\text{m}$

某日, 天气晴朗, 下午 3:00 时刻目标与背景温差很大, 而降低目标表面涂料的短波吸收率  $\alpha_s$  与长波吸收率  $\alpha_l$  可以降低目标表面温度, 减小目标与背景温差, 所以作用距离  $R$  随  $\alpha_s$ 、 $\alpha_l$  的降低而减小(如图 5 与图 6 中虚线所示)。涂料的发射率对作用距离的影响是比较复杂的, 从式(11) 可以看出作用距离  $R$  分别与  $\alpha_t$ 、 $T_t$  成正比, 但目标表面温度  $T_t$  随涂料发射率  $\alpha_t$  的增大而降低, 这就导致了如图 7 中虚线所示, 作用距离随涂料发射率的增大而先减小后增大, 存在一个最佳发射率  $\alpha_{opt}$  使得作用距离最小。

从图 5 ~ 图 7 中可以看出背景温度对作用距离曲线的影响是非常明显的, 所以在考虑目标红外隐身时, 背景温度  $T_b$  对涂料性能参数的选取是至关重要的。考虑到  $\alpha_s$ 、 $\alpha_l$  与  $\alpha_t$  的取值为 0 ~ 1, 于是可以断定对应涂料的 3 种性能参数分别存在一个最大背景温度  $T_{bmax}^i$  与最小背景温度  $T_{bmin}^i$  ( $i = 1, 2, 3$  分别对应于短波、长波吸收率与发射率) 使得当背景温度介于这两值之间时, 分别存在最佳涂料短波吸收率  $\alpha_{spt}^i$ 、长波吸收率  $\alpha_{lpt}^i$  与发射率  $\alpha_{opt}^i$  使得作用距离最小, 而且背景温度越高,  $\alpha_{spt}^i$ 、 $\alpha_{lpt}^i$  与  $\alpha_{opt}^i$  的取值越大。当背景温度低于与性能参数相对应的  $T_{bmin}^i$  时, 作用距离随性能参数的减小而减小; 反之, 当背景温度高于对应的  $T_{bmax}^i$  时, 作用距离随性能参数的减小而增大。经过计算可以得出  $T_{bmin}^1 = 290 \text{ K}$ ,  $T_{bmax}^1 = 308 \text{ K}$ ,  $T_{bmin}^2 = 292 \text{ K}$ ,  $T_{bmax}^2 = 303 \text{ K}$ ,  $T_{bmin}^3 = 275 \text{ K}$ ,  $T_{bmax}^3 = 305 \text{ K}$ 。

## 4 结 论

军事目标的生存能力的强弱将极大地影响未来战争的格局,所以对涂料红外隐身技术的研究是十分迫切和有意义的。通过本文的研究与分析,可以得出以下主要结论:

(1) 隐身涂料的性能参数会对目标表面温度产生非常明显的影响,影响幅度可达 10 左右,合理调整涂料的性能参数可以有效降低或消除目标与背景的辐射特征差异。

(2) 探测系统作用距离与背景温度、气象条件、探测器性能等多种因素相关,根据实际情况调整涂料性能参数可使作用距离最小。

(3) 目标与背景的温差是决定目标红外隐身效果的重要因素。当温差低于一定值时(这个值由红外探测器系统参数 NETD、NSR 等确定),可以调节隐身涂料性能参数使得目标与背景的辐射特征差异完全消除;反之,当温差高于一定值时,合理调节隐身涂料性能参数也只能减小目标与背景的辐射特征差异。

### 参考文献:

- [1] 吴晗平. 掠海红外动态点目标图像仿真系统[J]. 光学精密工程, 2007, 15(8): 1275-1279.  
WU H P. Image simulation system of dynamic infrared point targets sweeping on sea surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8): 1275-1279. (in Chinese)
- [2] 王广平, 许廷发, 倪国强, 等. 多 ADSP-TS201 红外弱小目标实时检测跟踪系统的硬件设计[J]. 光学精密工程, 2007, 15(6): 941-944.  
WANG G P, XU T F, NI G Q, *et al.* Hardware design of infrared dim target real time detection and tracking system based on multiple ADSP-TS201 [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6): 941-944. (in Chinese)
- [3] 李蔚恒, 王庆林, 杨承志, 等. 红外诱饵及其对抗空空红外导弹仿真研究[J]. 微计算机信息, 2007, 23(10): 196-198.  
LI W H, WANG Q L, YANG CH ZH, *et al.* Study of airborne infrared bait and countermeasures to air-to-air missile simulation [J]. *Control & Automation*, 2007, 23(10): 196-198. (in Chinese)
- [4] MURZINA M V, A, FARRELL J P, AKTSI-PETROV O A, *et al.* Hyperspectral characterization of the adjustable nano-coating system [J]. *SPIE*, 2005, 5769: 145-153.
- [5] CHIBA K, TAKAHASHI T, KAGEYAMA T, *et al.* Low-emissivity coating of amorphous diamond-like carbon/Ag-alloy multilayer on glass [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2005, 246: 48-51.
- [6] 杜永, 邢宏龙, 陈水林. 热红外隐身涂料的研究进展[J]. 涂料工业, 2007, 37(2): 51-55.  
DU Y, XING H L, CHEN SH L. Research progress of thermal infrared camouflage coatings [J]. *Paint & Coatings Industry*, 2007, 37(2): 51-55. (in Chinese)
- [7] 李全明, 张梅, 邱发贵. 防中远红外伪装涂料的作用机理及发展趋势[J]. 化纤与纺织技术, 2006, 34(3): 29-33.  
LI Q M, ZHANG M, QIU F G. The mechanism of action and development trend of camouflage coating used for preventing intermediate infrared ray [J]. *Chemical Fiber & Textile Technology*, 2006, 34(3): 29-33. (in Chinese)
- [8] 李红梅, 金伟良, 叶甲淳, 等. 建筑围护结构的温度场数值模拟[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(6): 93-98.  
LI H M, JING W L, YE J CH, *et al.* Temperature field simulation of building envelopes [J]. *Journal of Building Structures*, 2004, 25(6): 93-98. (in Chinese)
- [9] 杨世名, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.  
YANG S M, TAO W Q. *Heat Transfer* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1998. (in Chinese)
- [10] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.  
TAO W Q. *Numerical Heat Transfer* [M]. Xi'an: Xi'an University of Jiao Tong Press, 2001. (in Chinese)
- [11] 路远, 凌永顺, 吴汉平, 等. 地面目标的红外被动测距研究[J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23(1): 77-80.

LU Y, LING Y SH, WU H P, *et al.*. Study on passive distance measurement of ground objects by infrared radiation [J]. *Journal of Infrared and*

*Millimeter Waves*, 2004, 23 (1) :77-80. (in Chinese)

#### 作者简介:



陈 翺(1981 - ) ,男,湖北武汉人,博士研究生,主要从事目标红外特征模拟及其隐身对抗等方面的研究。E-mail: chenxuan1116 @tom. com.

王艳武(1977 - ) ,男,湖北汉川人,博士研究生,主要从事红外故障诊断及导热反问题方面的研究。Email: wangy-angwu2 @163. com.

#### 导师简介:

杨 立(1962 - ) ,男,重庆市人,教授,博士生导师,主要从事目标红外特征模拟及其隐身对抗、热力系统红外故障诊断等方面的研究。E-mail: lyang39 @hotmail. com

张 健(1979 - ) ,男,河北石家庄人,博士研究生,主要从事流体工程仿真计算方面的研究。Email: zhj406 @yahoo. com. cn.

#### 下期预告

## 二维快速控制水冷反射镜装置设计

邵 帅<sup>1,2</sup>,高云国<sup>1</sup>,郭 劲<sup>1</sup>,宣 明<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院,北京,100039)

设计了一种新型二维快速控制水冷反射镜装置。首先,根据高功率激光反射镜的设计和制作原则,对反射镜进行了设计分析,采用主动水冷铜镜,实现了减小镜面热畸变提高光束质量的功能。然后,分别从机械结构、驱动器和控制系统、角度检测元件 3 方面对装置进行了设计。试验测试结果表明,二维快速控制水冷反射镜装置工作稳定、可靠,稳定精度  $< 1$  ;同时,具有质量轻、转动惯量小、谐振频率高、响应速度快、动态滞后误差小等优点。此装置设计合理,可满足对激光传输方向的精确实时控制和对光束整体倾斜方向进行校正要求。