

光学/激光隐身涂层隐身效果综合评价

潘家亮^{1,2} 吕绪良¹ 张拴勤² 卢言利²

(¹ 中国人民解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)
² 总装工程兵科研一所, 江苏 无锡 214035

摘要 光学/激光隐身涂层隐身效果的影响因素较多,难以对其综合隐身效果进行准确的量化评价。为准确量化光学/激光隐身涂层的综合隐身效果,运用层次分析法(AHP)对影响光学/激光隐身涂层隐身效果的各因素进行了权重分配,根据所得权重集运用模糊综合评价方法建立光学/激光隐身涂层的隐身效果综合评价模型,量化涂层的隐身效果。使用光学/激光隐身涂层样品对综合评价模型进行了应用和分析,结果证明该评价模型可以较准确地量化涂层的综合隐身性能,能够为涂层的优选提供科学的决策。

关键词 材料;光学/激光隐身效果;模糊综合评价;层次分析法;隐身涂层

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100113

Stealthy Effectiveness Synthetic Evaluation of Optic/Laser Stealth Coatings

Pan Jiali^{1,2} Lü Xuliang¹ Zhang Shuanqin² Lu Yanli²

¹ *Engineering Institute of Engineer Corps, Chinese People's Liberation Army University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China*

² *The First Engineers Scientific Research Institute of the General Armaments Department, Wuxi, Jiangsu 214035, China*

Abstract The stealthy effectiveness of optic/laser stealth coating is affected by many factors, so it is hard to evaluate its synthetic stealthy effectiveness. To quantize the stealth effectiveness of optic/laser stealth coating exactly, analytic herarchy process (AHP) method acquiring relative weight of the factors which affect the stealthy effectiveness of optic/laser stealth coatings is used, and the stealthy effectiveness synthetic evaluation model of the optic/laser stealth coated by fuzzy synthetic evaluation method is established to quantize the stealth effectiveness of the coatings. The model is applied to some optic/laser stealth coatings samples, the result conforms that the model can quantize the stealth effectiveness of optic/laser stealth coatings accurately, and the model also can provide scientific decision-making for the selective preferences of coatings.

Key words materials; optic/laser stealthy effectiveness; fuzzy synthetic evaluation; analytic herarchy process; stealth coatings

OCIS codes 160.4760; 140.3360; 040.1880; 330.0330

1 引 言

随着各国光学、激光技术水平的不断发展,其在军事中的运用也日趋广泛,特别是光学、激光侦察制导对地面军事目标构成了较大威胁。近年来,光学、激光兼容隐身涂层作为对抗光学/激光侦察制导的

主要手段之一,成为国内外研究的一个热点,也取得了一定的进展^[1~5]。但是由于影响其隐身性能的因素较多,包括色差、光亮度对比、近红外与红光比、近红外亮度、1064 nm 激光反射率以及表面状态等,难以对其光学/激光隐身性能进行综合的量化评价,不

收稿日期: 2010-12-22; **收到修改稿日期**: 2011-02-16

作者简介: 潘家亮(1985—),男,硕士研究生,助理工程师,主要从事隐身材料与涂料等方面的研究。

E-mail: panjial85@hotmail.com

导师简介: 吕绪良(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事伪装理论与伪装材料等方面的研究。

E-mail: xllu1957@126.com

能较好地评价涂层的优劣性,在一定程度上也束缚了其进一步发展。

模糊数学是用数学方法来解决一些模糊问题。所谓模糊问题是指界线不清或隶属关系不明确的问题,人为地用特定的分级标准去评价是不确切的,综合评判的目的是希望能对若干对象按一定意义进行排序,从中挑出最优和最劣对象,这也称为决策过程。模糊数学已在环境科学领域中得到了应用,如用模糊数学方法在环境评价、环境污染物分类和环境区域划分等方面获得了满意的结果^[6~8]。层次分析法(AHP)就是将决策的问题以及和这些问题有关的因素分解成目标、准则和方案等层次,在此基础上进行定性和定量分析的决策方法。目前层次分析法应用已遍及经济、管理、能源政策制定和能源分配、行为科学、军事指挥、运输、农业、教育、人才、医疗和环境等各个领域^[9,10]。本文运用层次分析法对影响光学/激光隐身涂层隐身效果各因素进行了权重分配,根据所得权重运用模糊综合评价方法对涂层的隐身效果建立综合评价模型,量化了涂层的隐身效果,使用光学/激光隐身涂层样品对综合评价模型进行了应用和分析。

2 模糊评价方法及模型

综合评判是指从众多的单一评判中获得对某类对象的整体评价,本文运用一级综合评价模型。利用一级模型进行综合判断的步骤如下^[6~8]:

- 1) 确定评判对象的因素集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$;
- 2) 给出评价集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$;
- 3) 单因素评判,即建立一个从 $U \sim V$ 的模糊映射为

$$f: U \rightarrow F(V),$$

$$x_i \rightarrow \frac{r_{i1}}{v_1} + \frac{r_{i2}}{v_2} + \dots + \frac{r_{im}}{v_m}, \quad (1)$$

式中 $0 \leq r_{ij} \leq 1; i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$ 。

由 f 诱导出模糊关系,利用隶属度方法,得到判断矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

4) 综合评判

由层次分析法给出各对象因素权重集为

$$A = [a_1, a_2, \dots, a_n], \quad (3)$$

则可以得到评价结果集合为

$$B = AR = [b_1, b_2, \dots, b_m], \quad (4)$$

评价原则采用模糊综合指数法,模糊综合指数(SI)表示为

$$K_{SI} = BS, \quad (5)$$

式中 S 为等级标准向量, $S = \{\text{评判等级指标}\} = [s_1, s_2, \dots, s_m]^T$ 。

3 光学/激光隐身涂层模糊综合评价

3.1 评价单元及评价因素确定

以光学/激光隐身涂层为评价单元。在选取评价因素时,遵循主导因素原则、稳定性原则和相对独立性原则。基于上述原则,针对各侦察制导方式基础上,根据隐身涂层评价的实践,选取色差、光亮度对比、近红外与红光比、近红外亮度、1064 nm 激光反射率以及表面状态 6 个评价因素。得到评价对象因数集 $U = [u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6]$ 。

3.2 评价标准及单因素评判原则

1) 评价标准

根据涂层隐身设计原则,以及各评价因素达到隐身要求满意程度,对各评价因素制定评价标准如表 1 所示,得到评价标准集 $V = [v_1, v_2, v_3, v_4, v_5]$; 根据每一评价标准指标满意隐身要求程度给定一指标分数,对于不满足隐身要求设定其指标分数为 0。

表 1 评价标准

Table 1 Evaluation standard

Index mark	Level	Colour difference / NBS	Apparent brightness contrast	Ratio of NIR & red light	NIR brightness contrast	1064 nm reflectance	Surface state /level
1	1	1	0.02	7	0.04	0.1	1
0.9	2	1.5	0.04	6.5	0.08	0.15	2
0.8	3	2	0.06	6	0.12	0.2	3
0.7	4	2.5	0.08	5.5	0.16	0.25	4
0.6	5	3	0.1	5	0.2	0.3	5

2) 单因素评判原则

涂层的隐身性能是一个模糊的标准,用隶属度来刻画分界线较为合理,以各指标的5级标准作为5个级别的隶属函数^[6]。以评价因素色差为例得

$$r_{11} = \begin{cases} 0 & u_1 > 1.5 \\ \eta(1.5 - u_1) & 1 < u_1 < 1.5 \\ 1 & u_1 < 1 \end{cases}$$

$$r_{12} = \begin{cases} 0 & u_1 > 2; u_1 < 1 \\ \eta(u_1 - 1) & 1 < u_1 < 1.5 \\ \eta(2 - u_1) & 1.5 < u_1 < 2 \end{cases}$$

$$r_{13} = \begin{cases} 0 & u_1 > 2.5; u_1 < 1.5 \\ \eta(u_1 - 1.5) & 1.5 < u_1 < 2 \\ \eta(2.5 - u_1) & 2 < u_1 < 2.5 \end{cases}, (6)$$

$$r_{14} = \begin{cases} 0 & u_1 > 3; u_1 < 2 \\ \eta(u_1 - 2) & 2 < u_1 < 2.5 \\ \eta(3 - u_1) & 2.5 < u_1 < 3 \end{cases}$$

$$r_{15} = \begin{cases} 0 & u_1 < 2.5 \\ \eta(u_1 - 2.5) & 2.5 < u_1 < 3 \\ 0 & u_1 > 3 \end{cases}$$

式中 η 为归一化系数。

由此得到单因素判断矩阵 R 的第一行,依次对对象因数集合中各因数根据判断标准,使用隶属度分界,可得判断矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} & r_{45} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} & r_{54} & r_{55} \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} & r_{64} & r_{65} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

3.3 层次分析法建立权重集

层次分析法就是将决策的问题以及和这些问题有关的因素分解成目标、准则、方案等层次,在此基础上进行定性和定量分析的决策方法。该方法是 T. L. Saaty^[9,10] 于 20 世纪 70 年代提出来的,主要特征是合理将定性定量的决策结合起来,按照思维、心理的规律把决策过程层次化、数量化。

3.3.1 建立层次结构模型

分别针对地面目标所面对的侦察方式和侦察波段建立准则层,以光学/激光隐身涂层的影响因素建立方案层,如图 1 所示。

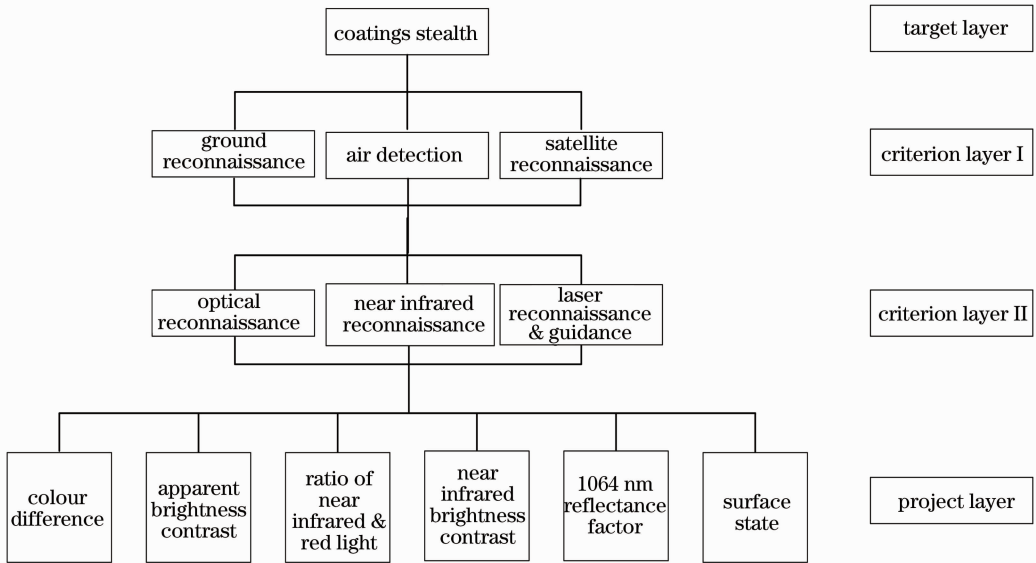


图 1 层次结构图

Fig. 1 Hierarchical structure figure

3.3.2 建立比较矩阵

构造好层次分析模型后,针对某一层来讲,在比较第 i 个元素与第 j 个元素相对上一层某个因素的重要性时,使用数量化的相对权重 a_{ij} 来表示,假设共有 n 各元素参与比较,则矩阵: $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 称为比较矩阵。

3.3.3 单准则下相对权重计算及比较矩阵一致性检验

对于专家填写后的判断矩阵,利用特征根法导出单一准则下元素相对权重。在实际中要求判断矩阵满足大体上的一致性,需进行一致性检验。只有通过检验,才能说明判断矩阵在逻辑上是合理的,才

能继续对结果进行分析。一致性检验的步骤如下：

1) 计算一致性指标(CI)为

$$Q_{CI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (8)$$

式中 λ_{\max} 为比较矩阵最大特征根, n 为矩阵阶数。

2) 查表确定相应的平均随机一致性指标(RI)。据判断矩阵不同阶数如表 2 所示, 得到平均随机一致性指标。

表 2 平均随机一致性指标(1000 次计算结果)

Table 2 Average random consistency index
(calculate 1000 times)

Order of matrix	RI
1	0
2	0
3	0.52
4	0.89
5	1.12
6	1.26
7	1.36
8	1.41
9	1.46
10	1.49
11	1.52
12	1.54
13	1.56
14	1.58
15	1.59

3) 计算一致性比例(CR)并进行判断得

$$Q_{CR} = \frac{Q_{CI}}{Q_{RI}}, \quad (9)$$

式中 Q_{RI} 为平均随机一致性指标, 当 $Q_{CR} < 0.1$ 时, 认为判断矩阵的一致性是可以接受的, $Q_{CR} > 0.1$ 时, 认为判断矩阵不符合一致性要求, 需要对该判断矩阵进行重新修正。

3.3.4 合成权重计算

设已计算出第 $k-1$ 层 n_{k-1} 个元素相对于目标的合成权重为^[11]

$$\mathbf{w} = [\omega_1^{(k-1)}, \omega_2^{(k-1)}, \dots, \omega_{n_{k-1}}^{(k-1)}]^T, \quad (10)$$

再设第 k 层的 n_k 个元素关于第 $k-1$ 层的第 j 个元素 ($j=1, 2, \dots, n_{k-1}$) 的单一准则排序权重向量为

$$\mathbf{u}_j^{(k)} = [u_{1j}^{(k)}, u_{2j}^{(k)}, \dots, u_{n_k j}^{(k)}]^T, \quad (11)$$

式中对应第 k 层的 n_k 个元素是完全的。当某些元素不受 $k-1$ 层第 j 各元素支配时, 相应位置用零补充, 于是得到 $n_k \times n_{k-1}$ 矩阵为

$$\mathbf{U}^{(k)} = \begin{bmatrix} u_{11}^{(k)} & u_{12}^{(k)} & \dots & u_{1n_{k-1}}^{(k)} \\ u_{21}^{(k)} & u_{22}^{(k)} & \dots & u_{2n_{k-1}}^{(k)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ u_{n_k 1}^{(k)} & u_{n_k 2}^{(k)} & \dots & u_{n_k n_{k-1}}^{(k)} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

利用(11)和(12)式可得到第 k 层 n_k 个元素关于目标层的合成权重为

$$\mathbf{w}^{(k)} = \mathbf{U}^{(k)} \mathbf{w}^{(k-1)}, \quad (13)$$

分解可得

$$\mathbf{w}^{(k)} = \mathbf{U}^{(k)} \mathbf{U}^{(k-1)} \dots \mathbf{U}^{(3)} \mathbf{w}^{(2)}, \quad (14)$$

将(14)式写成分量形式有

$$\omega_i^{(k)} = \sum_{j=1}^{n_{k-1}} u_{ij}^{(k)} \omega_j^{(k-1)}, \quad i = 1, 2, \dots, n_k. \quad (15)$$

各层元素对目标层的合成排序权重向量是否可以满意接受, 同样需要进行综合一致性检验。

3.4 综合评价

对于涂层隐身性能的各影响因素, 根据由层次分析法给出各对象因素权重集 \mathbf{A} 则可以得到评价结果集合为

$$\mathbf{B} = \mathbf{A}\mathbf{R} = [b_1, b_2, \dots, b_5]. \quad (16)$$

根据表 1 中给出的参数, $\mathbf{S} = \{\text{评判等级指标}\} = [1, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6]^T$, 评价原则采用模糊综合指数法, 模糊综合指数表示为

$$\mathbf{K}_{SI} = \mathbf{B}\mathbf{S}, \quad (17)$$

根据模糊综合指数值判断涂层隐身优劣性。

4 模型应用及结果分析

4.1 权重获取

由相关专业工作经验的专家给出各层的比较矩阵后, 根据其工作年限对各矩阵进行加权综合, 得到一组比较矩阵数据。对比较矩阵进行一致性判断后, 分层获取其对上一层权重, 经最终加和, 得到方案层对于目标层的合成权重矩阵为

$$\mathbf{A} = [a_1, a_2, \dots, a_6] = [0.1672, 0.1526, 0.1394, 0.1788, 0.2543, 0.1078]. \quad (18)$$

对比隐身涂层针对侦察制导威胁分析合成权重矩阵, 对抗目视侦察是是隐身的基础, 目视侦察手段较多, 其权重所占比例 (a_1 和 a_2) 最大; 而光学隐身暴露特征最明显为近红外波段, 且近红外波段波长较长, 近红外所占比例 (a_3 和 a_4) 次之; 随着日益增加的激光侦察制导威胁, 激光波段的重要性不言而喻, 其权重 (a_5) 占约 1/4; 表面状态各波段都有涉及, 占 0.1078。以上分析可以看出, 权重集符合涂层所针对侦察制导的威胁程度, 故获取的权重集合理科学。

4.2 模型应用

使用高斯随机函数, 给出了 6 组样品的光学和激光隐身随机参数, 如表 3 所示。

表 3 随机样品参数
Table 3 Parameter list of random samples

Sample number	Colour difference /NBS	Apparent brightness contrast	Ratio of NIR & red light	NIR brightness contrast	1064 nm reflectance	Surface state /level
1	2.7254	0.0796	6.3252	0.1455	0.0508	3
2	1.9369	0.1014	5.2451	0.1450	0.1258	5
3	1.8759	0.0691	7.3703	0.0508	0.0938	1
4	1.7950	0.0479	4.2885	0.1176	0.4350	1
5	2.7147	0.0718	5.8978	0.1068	0.1384	1
6	3.4897	0.0285	5.7586	0.1702	0.2748	4

观察表 3 给出随机样品参数,每一样品各参数达到指标的程度各不相同,除样品 3 较好,样品 4 较差外,难以直接评价其他各样品隐身效果优劣,并且不能获取样品满足伪装的程度。使用光学/激光隐身效果综合评价模型对 6 样品隐身效果做如下评价:

1) 利用隶属度方法,根据评价准则可得各样品的判断矩阵为

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.5492 & 0.4508 \\ 0 & 0 & 0.02 & 0.98 & 0 \\ 0 & 0.35 & 0.65 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3625 & 0.6375 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad R_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0.1262 & 0.8738 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5098 & 0.4902 \\ 0 & 0 & 0.375 & 0.625 & 0 \\ 0.484 & 0.516 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\
 R_3 &= \begin{bmatrix} 0 & 0.2482 & 0.7518 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.545 & 0.455 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.73 & 0.27 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad R_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0.41 & 0.59 & 0 & 0 \\ 0 & 0.605 & 0.395 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.06 & 0.94 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\
 R_5 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.5706 & 0.4294 \\ 0 & 0 & 0.41 & 0.59 & 0 \\ 0 & 0 & 0.204 & 0.7956 & 0 \\ 0 & 0.33 & 0.67 & 0 & 0 \\ 0.232 & 0.768 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad R_6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.575 & 0.425 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4828 & 0.5172 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.745 & 0.255 \\ 0 & 0 & 0 & 0.504 & 0.496 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

2) 根据由层次分析法给出各对象因素权重集 A 以及(16)式,则可以得到评价结果集合为

$$\begin{aligned}
 B_1 &= [0.2543, 0.0487, 0.2663, 0.3554, 0.0754], \quad B_2 = [0.1231, 0.1523, 0.2131, 0.1828, 0.1761], \\
 B_3 &= [0.6320, 0.0898, 0.2089, 0.0694, 0], \quad B_4 = [0.1078, 0.1716, 0.3270, 0, 0]; \\
 B_5 &= [0.1668, 0.2543, 0.2109, 0.2963, 0.0718], \quad B_6 = [0.0877, 0.0649, 0.0673, 0.4413, 0.1717].
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

3) 由评价指标集合 S 以及(17)式可获取各样品模糊综合指数,随机涂层样品的模糊综合指数为 $K_{S11}=0.8052, K_{S12}=0.6643, K_{S13}=0.9285, K_{S14}=0.5238, K_{S15}=0.8149, K_{S16}=0.6119$ 。

根据光学/激光隐身效果综合评价模型获取的

涂层综合隐身指数,不难看出样品 3 综合隐身效果最好,样品 1 和 5 其次,样品 2 和 6 基本满足隐身要求,样品 4 最差。该模型具有如下优点:

1) 能够对涂层的综合隐身效果进行排序,为涂层的优选提供科学的决策;

2) 对隐身效果相近的涂层,该模型能够较好地
进行分辨,如样品 1 和 5,样品 2 和 6;

3) 该模型还能为涂层隐身效果分级提供合理
的参考。

5 结 论

本文基于层次分析法,运用模糊综合评价方法
评价了光学/激光隐身涂层的综合隐身效果,通过分
析可以得到如下结论:

1) 光学/激光综合评价模型通过科学决策,能
够对涂层的综合隐身效果进行排序,为涂层的优选
提供科学的决策,并能为涂层隐身效果分级提供合
理参考;

2) 层次分析法将定性与定量的决策合理地结
合起来,按照思维、心理的规律把决策过程层次化、
数量化,较准确地获取了影响涂层隐身效果的各元
素权重;

3) 模糊综合评价作为综合决策的数学工具,能
对若干对象按一定意义进行排序,从中挑出最优和
最劣对象,为光学/激光隐身涂层综合隐身效果准确
有效的量化提供保证。

参 考 文 献

- 1 L. Escoubas, J. J. Simon, M. Loli *et al.*. An antireflective silicon grating working in the resonance domain for the near infrared spectral region[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **226**(1-6): 81~88
- 2 Zhang Jing, Li Huili, Zhang Qitu. Present status and development tendency of laser stealth technology[J]. *Materials Review*, 2007, **21**(5): 316~318
张 晶, 李会利, 张其土. 激光隐身技术的现状和发展趋势[J]. *材料导报*, 2007, **21**(5): 316~318

- 3 Lu Yanli, Zhang Shuanqin, Lü Xuliang *et al.*. New research developments of laser stealth materials[J]. *Materials Review Online*, 2008, **3**(5): 5~7
卢言利, 张拴勤, 吕绪良 等. 激光隐身材料的研究新进展[J]. *材料导报网刊*, 2008, **3**(5): 5~7
- 4 Hu Chuanqi. Technology of Stealth Coatings [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. 9
胡传圻. 隐身涂层技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 9
- 5 Zhang Shuanqin, Shi Yunlong, Lu Yanli. Analysis of the spectral properties of $\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{O}_3$ upconversion material[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(4): 2768~2770
张拴勤, 石云龙, 卢言利. 激光吸收钕掺杂上转换材料的光谱特性实验分析[J]. *物理学报*, 2009, **58**(4): 2768~2770
- 6 Yang Lunbiao, Gao Yingyi. Fuzzy Mathematical Theory and its Application [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2005. 6
杨纶标, 高英仪. 模糊数学原理及其应用[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2005. 6
- 7 Li Yuanfeng, Li Zhengsheng, Wang Yang. Multi-criteria performance evaluation of image matching algorithm based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(8): 92~97
李元锋, 李正生, 王 洋. 基于模糊综合评判的多指标匹配算法性能评估[J]. *光电工程*, 2010, **37**(8): 92~97
- 8 Fu Zhaowang, Kou Yingxin, Wang Lin *et al.*. Multi-target threat assessment of air combat based on synthesis fuzzy assessment method [J]. *Electronics Optics & Control*, 2009, **16**(9): 29~32
付昭旺, 寇英信, 王 琳 等. 基于模糊综合评判法的空战多目标威胁评估[J]. *光电与控制*, 2009, **16**(9): 29~32
- 9 T. L. Saaty. Inner and outer dependence in the analytic hierarchy process: the supermatrix and superhierarchy [C]. Porceeding of the 2nd ISAHP, Pittsburgh, 1991
- 10 Guo Junpeng, Wu Yuhua, Li Wenhua. Interval scales analytic hierarchy process based on linear programming[J]. *J. Harbin Institute of Technology*, 2007, **39**(2): 334~336
郭均鹏, 吴育华, 李汶华. 基于线性规划的区间标度层次分析法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2007, **39**(2): 334~336
- 11 Wu Peng. Matlab High - efficient Programming Skills and its Application[M]. Beijing: Beihang University Press, 2010. 6
吴 鹏. Matlab 高效编程技巧与应用: 25 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010. 6