

## 资源约束下飞机消耗件随机型联合补充研究

张帅<sup>1,2</sup>, 滕克难<sup>1</sup>, 徐吉辉<sup>1</sup>, 李季颖<sup>1</sup>

(1. 海军航空工程学院, 山东烟台 264001; 2. 中国人民解放军92957部队, 浙江舟山 316000)

**摘要:** 消耗件供应保障是飞机综合保障的重要内容, 基于多项联合补充对飞机消耗件供应保障进行研究。根据飞机保障实际, 扩展了随机型联合补充模型, 建立了资源约束下消耗件随机型联合补充模型。针对随机型联合补充迭代算法处理资源约束问题的局限性, 修正了基本订购周期倍数的取值范围, 提出了基于种群特征、个体特征和种群进化阶段的自适应遗传算法。最后结合文献实例, 进行了仿真分析。

**关键词:** 军用飞机; 消耗件; 联合补充问题; 自适应遗传算法

**中图分类号:** E92 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2016)02-0099-05

## Joint Replenishment Problem of Aircraft Consumptive Items Under Resource Constraint

ZHANG Shuai<sup>1,2</sup>, TENG Ke-nan<sup>1</sup>, XU Ji-hui<sup>1</sup>, LI Ji-ying<sup>1</sup>

(1. Naval University of Aeronautics and Astronautics, Yantai 264001, China;

2. No. 92957 Unit of PLA, Zhoushan 316000, China)

**Abstract:** The consumptive item supply support, which is very important for military aircraft integrated logistic support, is studied based on the multi-item joint replenishment. According to the aircraft support practice, the stochastic joint replenishment model is expanded, and a consumptive item stochastic joint replenishment model under resource restriction is established. With consideration of the limitation of stochastic joint replenishment iterative algorithm when processing the resource constraint problem, the range of the basic cycle time multiple is modified. A new improved adaptive genetic algorithm is proposed based on the genetic population characteristics, the individual characteristics and the population evolution phase. An example is simulated and analyzed based on some literatures.

**Key words:** military aircraft; consumptive item; joint replenishment problem; adaptive genetic algorithm

### 0 引言

飞机消耗件种类多、数量大, 有效的备件保障事关军事效益和经济效益。同一供应商会提供多种备件, 可以通过多品种联合补充在满足军事需求的前提下使费用最小。多品种联合补充问题(JRP)是指对从同一供应商订购的多项物品进行联合订购, 以减少订购次数, 便于运输调度, 降低库存成本, 提高库存服务水平<sup>[1]</sup>。根据消耗件需求特征, 可将JRP分为确定型和随机型。确定型JRP模型的假设比较苛刻, 现实中, 更多的是随机型JRP<sup>[2]</sup>。装备维修保障的理论和实践证明, 消耗件需求过程近似为泊松过程<sup>[3]</sup>, 因此, 假设飞

机消耗件需求服从泊松分布。

典型JRP解决方法包括可订购点( $m_i, c_i, M_i$ )策略<sup>[4]</sup>和定周期( $T, M_i$ )策略<sup>[5]</sup>。可订购点策略可以近似求得最优解, 但是模型复杂, 参数难以确定<sup>[6]</sup>。JRP主要包括订购成本和库存持有成本。由于消耗件需求的不确定性, 以及缺货成本难以衡量, 因此, 实际工作中经常将服务水平作为随机型JRP的约束条件<sup>[7]</sup>, 如缺货率、缺货量和满足率等<sup>[8]</sup>。针对军用飞机消耗件保障实际, 采用定周期策略进行随机型消耗件库存配置。

### 1 资源约束随机型联合补充模型

#### 1.1 确定型联合补充模型

确定型JRP假设备件需求均匀, 不允许缺货, 没有数量折扣, 库存持有成本是线性。定义如下符号:  $T$ 为基本补货间隔期( $a$ );  $S$ 为每次补货主要订购成本;  $C_{TC}$

为所有备件项的年总成本,包括订购成本和库存持有成本; $i=1,2,\dots,n$ 为消耗件项标志, $n$ 为消耗件总项数; $D_i$ 为消耗件项  $i$  的年均需求量(件/a); $h_i$ 为消耗件项  $i$  的单位持有成本; $s_i$ 为每次订购消耗件项  $i$  的次要订购成本; $Q_i$ 为消耗件项  $i$  的订购数量; $T_i$ 为消耗件项  $i$  的订购间隔期(a)。每项消耗件  $i$  的订购周期  $T_i$  都是基本订购周期  $T$  的  $k_i$  倍,即  $T_i = k_i T$ ,消耗件项  $i$  的订购数量  $Q_i = T_i D_i = T k_i D_i$ 。年总成本模型为

$$C_{TC}(T,K) = C_H + C_O = \frac{T}{2} \sum_{i=1}^n k_i D_i h_i + (S + \sum_{i=1}^n s_i/k_i)/T \quad (1)$$

## 1.2 随机型联合补充模型

假设消耗件需求预测误差服从正态分布。对于任一项消耗件,设定安全库存量为

$$S_s = z_i \sigma_i \sqrt{k_i T + L_i} \quad (2)$$

式中: $L_i$ 为消耗件项  $i$  的订购提前期; $\sigma_i$ 为消耗件项  $i$  的单位时间预测标准差; $z_i$ 为  $\sigma_i$  的乘子,是确保服务水平正态分布分位数。

消耗件项  $i$  的安全库存量的单位时间库存持有成本为  $S_s h_i$ ,所有消耗件的安全库存量库存持有成本加上定周期模型成本构成了随机型需求的总成本  $C_{TC}$ ,即

$$C_{TC}(T,K) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{k_i D_i h_i T}{2} + z_i \sigma_i h_i \sqrt{k_i T + L_i} \right) + (S + \sum_{i=1}^n s_i/k_i)/T \quad (3)$$

式中,各符号含义同确定型模型。

对于随机型联合补充问题,文献[9]运用启发式算法(EKA算法)进行求解,该算法最早由 Silver 提出,并被 Kaspi 和 Rosenblatt 进一步发展。算法中,具有最小独立补充周期  $T_j^*$  的消耗件项补充最频繁,设定其为基本补充周期,并令其  $k_j = 1$ 。对于其他消耗件项  $i$ ,令  $k_j = q$ ,则

$$\sqrt{q(q-1)} \leq T_i^*/T \leq \sqrt{q(q+1)} \quad (4)$$

进一步重新确定  $T_j$  的值为

$$T_j = \left( 2(S + \sum_{i=1}^n s_i/k_i) / \sum_{i=1}^n h_i k_i (D_i + z_i \sigma_i / \sqrt{k_i T_0 + L_i}) \right)^{1/2} \quad (5)$$

该启发式算法的具体过程如下所述。

1) 确定

$$T_i^* = \sqrt{\frac{2s_i}{h_i (D_i + (z_i \sigma_i / \sqrt{T_{0i} + L_i}))}} \quad (6)$$

式中,  $T_{0i} = \sqrt{\frac{2s_i}{h_i D_i}}$ ,  $i=1, \dots, n$ 。

2) 确定具有最小  $T_i^*$  值的消耗件项,将其标记为 1,令  $k_i = 1$ 。

3) 计算

$$T = (2(S + s_1) / h_1 (D_1 + z_1 \sigma_1 / \sqrt{T_0 + L_1}))^{1/2} \quad (7)$$

式中,  $T_0 = \sqrt{\frac{2(S + s_1)}{h_1 D_1}}$ 。

4) 计算确定整数  $k_i = q$ (整数),满足

$$\sqrt{(q-1)q} \leq (T_i^*/T) \leq \sqrt{q(q+1)} \quad i=2, \dots, n \quad (8)$$

5) 计算

$$T = (2(S + \sum_{i=1}^n s_i/k_i) / \sum_{i=1}^n h_i k_i (D_i + z_i \sigma_i / \sqrt{k_i T_0 + L_i}))^{1/2} \quad (9)$$

式中,  $T_0 = \sqrt{2(S + \sum_{i=1}^n s_i/k_i) / \sum_{i=1}^n h_i k_i D_i}$ 。

6) 重复4)和5),直到满足要求或者式(3)中的总成本不再降低。

## 1.3 资源约束随机型联合补充模型

实际工作中,飞机消耗件保障工作是在一定的环境约束下进行的。因此,对上述定周期随机模型进行扩展,增加约束条件,得到资源约束随机型联合补充模型

$$C_{TC}(T,K) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{k_i D_i h_i T}{2} + z_i \sigma_i h_i \sqrt{k_i T + L_i} \right) + (S + \sum_{i=1}^n s_i/k_i)/T \quad (10)$$

约束为

$$\sum_{i=1}^n D_i k_i T g_i \leq G \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^n D_i k_i T b_i \leq B \quad (12)$$

## 2 资源约束随机型联合补充算法

EKA 算法适用于无约束定周期随机型模型,应用于有约束模型时,需要对算法进行改进,对于多约束问题,这个过程和计算都异常复杂。下面在对相关参数修正的基础上,给出改进的自适应遗传算法(ZAGA算法)解决这个问题。

### 2.1 种群的编码、解码及可能的解空间

模型中变量包括基本订购周期  $T$  和周期乘子  $k_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ )。采用实数编码形式,一个解  $K$  对应着一个实数向量  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,并采取如下编码转换形式

$$k_i = k_i^{LB} + [(k_i^{UB} - k_i^{LB} + 1) \times x_i] \quad (13)$$

式中: $[A]$ 为向下取整符号;整数  $k_i^{UB}$  和整数  $k_i^{LB}$  分别为  $k_i$  的上下界。结合 Goyal 方法,给出修正的上下界为

$$k_i^{LB} (k_i^{LB} - 1) \leq \frac{2s_i}{(D_i + (z_i \sigma_i / \sqrt{T_{0i} + L_i})) h_i T_{\max}^2} \leq k_i^{LB} (k_i^{LB} + 1) \quad (14)$$

$$k_i^{UB}(k_i^{UB} - 1) \leq \frac{2s_i}{(D_i + (z_i\sigma_i/\sqrt{T_{0i} + L_i}))h_i T_{\min}^2} \leq k_i^{UB}(k_i^{UB} + 1) \quad (15)$$

式中,  $T_{0i}$  的定义见式(7),  $T_{\max}$  和  $T_{\min}$  定义为

$$T_{\max} = (2(S + \sum_{i=1}^n s_i) / \sum_{i=1}^n h_i (D_i + z_i\sigma_i/\sqrt{T_0 + L_i}))^{1/2} \quad (16)$$

$$T_{\min} = (2s_i/h_i (D_i + z_i\sigma_i/\sqrt{T_{0i} + L_i}))^{1/2} \quad (17)$$

式中,  $T_0$  的定义为

$$T_0 = (2(S + \sum_{i=1}^n s_i) / \sum_{i=1}^n (h_i D_i))^{1/2} \quad (18)$$

当  $K$  确定时, 可以确定  $T$  的值。

对式(10) 关于  $T$  求导, 并令其等于零得

$$T^0 = (2(S + \sum_{i=1}^n s_i/k_i) / \sum_{i=1}^n h_i k_i (D_i + z_i\sigma_i/\sqrt{k_i T_0 + L_i}))^{1/2} \quad (19)$$

对于约束条件, 可以分别得到由其确定的时间  $T^1$  和  $T^2$  为

$$T^1 = G / \sum_{i=1}^n D_i k_i g_i \quad (20)$$

$$T^2 = B / \sum_{i=1}^n D_i k_i b_i \quad (21)$$

$C_{TC}$  最小时  $T$  值为<sup>[10]</sup>

$$T^*(K) = \min\{T^0, T^1, T^2\} \quad (22)$$

## 2.2 初始种群

初始种群采取随机产生方式, 在区间  $[k_i^{LB}, k_i^{UB}]$  内, 随机生成基因值  $x_i$ ,  $x_i$  与实际值  $k_i$  的对应关系见式(13)。  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  构成种群的一个染色体(个体), 即问题解空间中的一个解。重复染色体生成过程, 直至满足种群规模要求。

## 2.3 适应度函数

适应度函数用于判断个体或解的优劣。由于消耗件 JRP 中, 目标函数值为最小, 需要对其进行修正, 令下式为个体  $j$  的适应度函数, 即

$$f_j^t = C_{TC\max} - C_{TCj}^t \quad (23)$$

式中:  $f_j^t$  为第  $t$  代种群中个体  $j$  的适应度值;  $C_{TCj}^t$  为第  $t$  代种群中个体  $j$  的总费用;  $C_{TC\max}$  为到第  $t$  代种群为止个体的最大费用。

## 2.4 选择

选择是从种群中选择生命力好的新个体的过程。经典的轮盘赌选择误差较大, 本文采用更好的竞争选择方法。竞争选择基于轮盘赌方法, 先计算出种群中个体的选择概率, 然后运用轮盘赌方法从种群中选取  $r$  个个体(本文设  $r=2$ ) 竞争, 选择最好的个体进入新种群, 直至新种群个体数达到种群规模。

## 2.5 交叉和变异

对经过选择的个体进行交叉和变异操作。采用单

点交叉, 实验证明单点交叉具有与其他交叉相当的性能, 却需要更少的计算时间<sup>[10]</sup>。交叉操作后, 进行变异操作。采用自适应交叉和变异: 进化初期, 种群具有较大的多样性, 高适应度个体具有较小的交叉率和变异率, 使其不被破坏, 保持高阶模式较强的生存能力; 低适应度个体具有较高的交叉率和变异率, 有利于全局搜索, 增加产生新模式的机会, 促使产生更优的新个体。随着进化持续, 种群趋于收敛, 整体适应度不断提高, 此时, 不断增加高适应度个体交叉率, 使其优良基因可以遗传到下一代, 同时, 增加高适应度个体的变异率, 降低陷入局部最优的可能; 对于低适应度个体, 不断降低其交叉率, 利于种群收敛, 同时, 保持其较高的变异率, 以利于产生新个体, 淘汰较低适应度个体。自适应遗传算法模型为

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - \frac{(f' - f_{avg})}{(f_{max} - f_{avg})} [P_{c2} - P_{c0} \cdot \sin\left(\frac{(t + \mu)}{(T + \mu)} \cdot \frac{\pi}{2}\right)] & f' \geq f_{avg} \\ P_{c1} + P_{c0} \cdot \frac{(f' - f_{avg})}{(f_{max} - f_{avg})} \sin\left(\frac{(t + \mu)}{(T + \mu)} \cdot \frac{\pi}{2}\right) & f' < f_{avg} \end{cases} \quad (24)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} - \frac{(f - f_{avg})}{(f_{max} - f_{avg})} [P_{m2} - P_{m0} \cdot \sin\left(\frac{(t + \mu)}{(T + \mu)} \cdot \frac{\pi}{2}\right)] & f \geq f_{avg} \\ P_{m1} & f < f_{avg} \end{cases} \quad (25)$$

式中:  $t$  为种群当前进化代数;  $T$  为种群进化总代数;  $f'$  为交叉操作的父代个体中具有较大适应度个体的适应值;  $f_{avg}$  为种群平均适应度;  $\mu$  为调节系数;  $P_{c1} = 0.9$ ,  $P_{c2} = 0.3$ ,  $P_{c0} = 0.1$ ,  $P_{m1} = 0.5$ ,  $P_{m2} = 0.3$ ,  $P_{m0} = 0.1$ 。

采取精英保留策略, 如果  $t$  代群体的最优个体次于  $(t-1)$  群体中的最优个体, 则将后者插入当代种群替换掉最劣个体, 确保当代最优个体不被“破坏”, 顺利进入下一代, 保证种群优化收敛<sup>[11]</sup>。

## 2.6 控制参数的选取

主要参数包括染色体长度  $L$ 、种群规模  $m$ 、交叉概率  $p_c$  和变异概率  $p_m$  等。由于是实数编码, 染色体长度  $L$  取决于问题中变量个数; 种群规模一般为 20 ~ 200, 与染色体长度之比保持在 1.5n 以上为宜; 交叉概率  $p_c$  一般取值为 0.4 ~ 1.0; 变异概率一般取值为 0.000 1 ~ 0.1, 或 1/染色体长度<sup>[12]</sup>。对交叉概率  $p_c$  和变异概率  $p_m$  采取自适应控制策略。

## 3 应用分析

以文献[9]中的数据进行模型和算法应用分析, 由于此文献中的模型无约束, 因此, 放宽文中模型约束, 使之等效于无约束模型。同时, 与文献[13]中的自适应混合差分进化算法(AHDE 算法)进行对比分

析。基本数据如表1所示。

表1 基本数据  
Table 1 Basic data

Items	1	2	3	4	5	6
$s_i$	1.8	2.0	1.2	3.2	3.1	2.7
$c_i$	0.35	0.40	0.60	0.25	0.15	0.30
$h_i$	0.4	1.0	0.8	0.2	0.8	0.2
$D_i$	2900	1850	2750	1600	3200	1400
$z_i$	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64
$\sigma_i$	500	500	500	500	500	500
$L_i$	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
$B_i$	6	6	6	6	6	6
$G_i$	8	8	8	8	8	8
$B$	200 000					
$G$	2 000 000					
$S$	10					

ZAGA 算法中,由于有6项消耗件,因此,染色体长度为6,种群规模设为30,  $T=300, \mu=100$ 。重复运行50次,取每步进化的平均值,仿真得到运行结果。结果对比如表2所示。

表2 结果对比  
Table 2 Comparison of results

数据来源	ZAGA 算法	AHDE 算法	EKA 算法	最优结果
最小成本	1 549.499 3	1 549.499 3	1 549.50	1 549.22
基本订购周期	0.048 9	0.048 9	0.048 8	0.047 6
$K$	1, 1, 1, 2, 1, 2	1, 1, 1, 2, 1, 2	1, 1, 1, 2, 1, 2	1, 1, 1, 2, 1, 2

从结果看出,ZAGA 算法和 AHDE 算法均可以取得较好的结果,近似等于最优结果。与 EKA 启发式算法相比,ZAGA 算法和 AHDE 算法更为简洁,降低了求解难度,且可以处理带有资源约束的随机型 JRP 问题。ZAGA 算法与 AHDE 算法进化过程如图1所示。

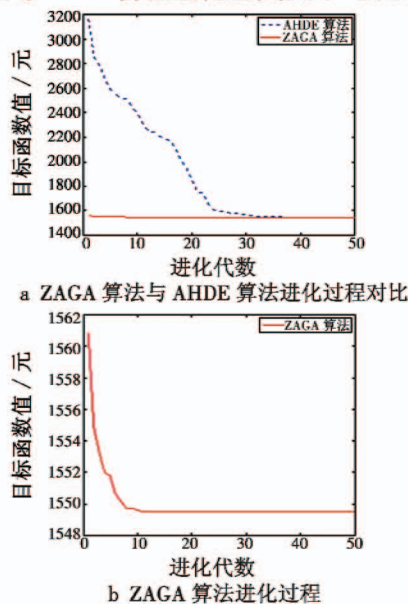


图1 算法进化过程

Fig.1 Evolution process of algorithms

由图1可以看出,ZAGA 算法和 AHDE 算法相比,可以更快地收敛于近似最优解,前者一般进化10代左右即可收敛于近似最优解,后者则需要35代左右。一方面是ZAGA 算法有效压缩了搜索空间,提高了搜索效率,而文献[13]中 AHDE 算法则人为设定搜索空间,增加了搜索难度,延长了搜索时间;另一方面,ZAGA 算法不仅考虑了种群进化的阶段性特点,还考虑了种群中个体的特性差异,而 AHDE 算法则只考虑了种群进化阶段性特点,没有考虑种群内部个体间的差异和种群进化阶段特征对种群内部个体的影响。因此,ZAGA 算法具有更优的效能。

### 4 结论

消耗件供应是飞机保障的重要内容。根据飞机保障实际,建立了带有资源约束的随机型消耗件联合补充模型。针对 EKA 算法在解决资源约束随机型联合补充问题时的局限性,设计了改进的自适应遗传算法。通过与 EKA 算法和 AHDE 算法的仿真对比分析,验证了 ZAGA 算法可以求得近似最优解,同时,具有优秀的求解性能,降低了算法的求解难度,提高了求解速度,从而证明了模型和算法的正确性和有效性,对于提高飞机消耗件供应保障能力具有积极的意义。

### 参考文献

- [1] AKSOY Y, ERENGUC S S. Multi-item inventory models with coordinated replenishments: a survey [J]. International Journal of Operations and Production Management, 1988 (8): 63-73.
- [2] ESMAIL M. Supply interruptions in a lost-sales inventory system with random lead time [J]. Computers & Operations Research, 2003, 30(3): 411-426.
- [3] 张建荣,于永利,张柳,等. 维修器材联合订货的库存决策模型[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(1): 109-112. (ZHANG J R, YU Y L, ZHANG L, et al. Inventory decision model of joint ordering policy with maintenance materials [J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(1): 109-112.)
- [4] BALINTFY J L. On a basic class of multi-item inventory problems [J]. Management Science, 1964, 10 (2): 287-297.
- [5] ATKINS D R, IYOGUN O. Periodic versus "can-order" policies for coordinated multi-item inventory systems [J]. Management Science, 1988 (34): 791-796.
- [6] NIELSEN C, LARSEN C. An analytical study of the Q(s, S) policy applied to the joint replenishment problem [J]. European Journal of Operational Research, 2005, 163 (3):

- 721-732.
- [7] PIRKUL H, ARAS O A. Capacitated multiple item ordering problem with quantity discounts [J]. IIE Transactions, 1985, 17(3):206-211.
- [8] 郭霖瀚,王恺,王严. 多级多层维修器材供应链需求建模与仿真[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(10):2038-2043. (GUO L H, WANG K, WANG Y. Multi-indenture multi-echelon spare part supply chain requirement modeling and simulation[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(10):2038-2043.)
- [9] EYNAN A, KROPP D H. Periodic review and joint replenishment in stochastic demand environments [J]. IIE Transactions, 1998, 30(11):1025-1033.
- [10] KHOUJA M, MICHALEWICE Z. A comparison between genetic algorithms and the RAND method for solving the joint replenishment problem[J]. Production Planning & Control, 2000, 11(6):556-564.
- [11] DE GIOVANNI L, PEZZELLA F. An improved genetic algorithm for the distributed and flexible job-shop scheduling problem [J]. European Journal Operation Research, 2010, 200(2):395-408.
- [12] 李敏强,寇纪淞,林丹,等. 遗传算法的基本理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2002:174. (LI M Q, KOU J S, LIN D, et al. Basic theory and application of genetic algorithm[M]. Beijing: Science Press, 2002:174.)
- [13] 王林,陈璨,曾宇容. 资源约束情况下随机性联合采购模型的差分进化算法[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(7):1541-1546. (WANG L, CHEN C, ZENG Y R. Differential evolution algorithm for stochastic joint replenishment model with resource constraint[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(7):1541-1546.)

(上接第93页)

明胶光栅最低。同时,曝光量对体全息光栅的衍射特性也有着显著的影响,随着曝光量的增加,体光栅的峰值波长变短,噪声增大。由此可见,不同记录材料形成的体全息光栅具有不同的衍射特性,分别具有不同的应用价值。在体全息光栅的研究中,全息记录材料的选取至关重要。本实验对比分析了3种常用明胶所制成的体全息光栅的衍射特性,讨论了各自的适用范围,为全息工作者对明胶类型的选择提供了依据。

### 参 考 文 献

- [1] BOFFI P, UBALDI M C, PICCININ D, et al. 1550 nm volume holography for optical communication devices[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(10):1355-1375.
- [2] ZHENG G W, TAN J C, HE Y L, et al. Low-pass spatial filtering for continuous-wave laser beam by reflection volume phase gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6):1554-1559.
- [3] 熊良文,哈流柱,彭必先,等. 不同类型的明胶对 DCG 全息图的衍射效率影响的研究[J]. 感光科学与光化学, 1997, 15(1):32-38. (XIONG L W, HA L Z, PENG B X, et al. A study on effect of different gelatins on diffraction efficiency of dichromated gelatin holograms[J]. Photographic Science and Photochemistry, 1997, 15(1):32-38.)
- [4] 于松嘉. 全息记录材料的某些研究和进展[J]. 影像技术, 1999(2):7-9. (YU S J. Some researches of holographic materials and their advancements [J]. Image Technology, 1999(2):7-9.)
- [5] 陶世荃,江竹青,万玉红,等. 光学体全息技术与应用[M]. 北京:科学出版社,2013:6-7. (TAO S Q, JIANG Z Q, WAN Y H, et al. Optical volume holographic technology and application[M]. Beijing:Scienc Press, 2013:6-7.)
- [6] ENDO A, YADA T, MAEJIMA T, et al. Relationship between molecular weight and exposure characteristics of dichromated gelatin [J]. Journal of the Society of Photographic Science and Technology of Japan, 1984, 47:329.
- [7] LIM Y H, KOBAYASHI H, OKAWA Y, et al. Relationship between photographic characteristics and molecular weight distribution of dichromated gelatin[J]. Photographic Science and Engineering, 1993, 41(6):203-205.
- [8] 彭必先,熊良文,陈丽娟. DCG 全息研究进展[J]. 功能材料, 1997, 28(5):446-454. (PENG B X, XIONG L W, CHEN L J. The development of studies on DCG holography[J]. Functional Materials, 1997, 28(5):446-454.)
- [9] 周海宪,程云芳. 全息光学[M]. 北京:化学工业出版社,2006:28-29. (ZHOU H X, CHENG Y F. Holographic opticals[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006:28-29.)
- [10] 孙青荣,李荣. 全息图像实验的噪声及衍射效率[J]. 新余高专学报, 2003, 8(2):13-15. (SUN Q R, LI R. The noise and diffraction efficiency of the hologram experiment[J]. Journal of Xinyu College, 2003, 8(2):13-15.)