

文章编号: 0258-7025(2001)04-0365-04

具有特殊衍射强度分布的二元 位相光栅设计^{*}

高春林 虞 钢

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

提要 介绍了几种可形成特定衍射强度分布的 Dammann 位相光栅。在迭代设计中采用了模拟退火算法。对相位元件的输出特性进行了描述,同时分析了误差产生的原因。最后讨论了在金属表面激光改性处理中该类元件作为光束变换器件的应用。

关键词 二元位相光栅 模拟退火算法 光束变换

中图分类号 TG 665 D 436.1 **文献标识码** A

Design of Binary Phase Gratings with Specific Intensity Distribution of Output

GAO Chun-lin YU Gang

(Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract Several Dammann phase gratings are introduced for forming specific diffractive intensity output distributions. Simulated annealing algorithm is used to design the elements. The output characters of the elements are described and the reason of errors is analyzed. The elements acting as beam transformer in metal surface laser modification are discussed too.

Key words binary phase element, simulated annealing algorithm, beam transform

1 引 言

高功率激光材料加工在工业领域中得到了广泛的应用。其中,在金属表面的激光改性过程中通常对激光束提出特定强度分布的要求,而采用普通的光学聚焦系统将很难实现^[1]。从我们的实验结果看,使用衍射光学元件把激光束变换成点阵或网格状分布进行金属表面的激光热处理,可以同时提高金属表面的力学性能和处理速度。而制造误差会影响元件的衍射效率、各衍射级的相对光强分布和零级光的强度。在实际应用中,强的零级光强分布是最大的影响因素,有可能导致金属表面局部过度处理而损坏。为了使光束变换后的强度分布既满足表面处理的相变要求,又不能使金属表面出现熔化和气化现象,零衍射级的强度必须控制在一定的范围。我们设计了去除强衍射零级的元件。此外,根据金

属模具材料表面处理的不同要求,还设计了强度间隔缺级分布的衍射元件。

在设计和计算阶段考虑了衍射效率、相对光强分布和中央零级的消除。中央零级低输出设计可补偿因加工误差引起的零级增强,而间隔缺级的元件可获得大的单次加工面积。在衍射光学元件设计中采用的各种迭代算法中(例如 Gerchberg-Saxton(G-S)算法, Yang-Gu(Y-G)算法,模拟退火法(SA)和基因遗传算法等)^[2],我们采用了模拟退火法来进行元件的设计。设计过程和结果对进一步扩展二元光学元件的应用领域具有重要意义。本文利用柔性传输多轴联动激光加工装置^[3]进行了应用实验,并给出了几个金属表面处理的应用实例。

2 基本原理

2.1 Dammann 光栅

衍射光栅的工作原理是以光的衍射理论为基础,通过对光波前的调制,叠加成为所需要的振幅和位相分布。由于 Dammann 位相光栅制造简便和较

^{*} 国家自然科学基金(批准号:69678007)和中国科学院院长基金资助课题。

收稿日期:1999-12-21;收到修改稿日期:2000-02-21

高的衍射效率,近年来得到了广泛的应用。这是一种两台阶的二元位相光栅,只需要单模板一次刻蚀加工,从而避免了模板套刻的对准误差。但位相突变点位置误差和刻蚀深度引起的位相误差,会使 Dammann 光栅的中央零级明显较强。我们所设计的二维 Dammann 光栅中,其零级的光强比其他级的平均光强有相当大的减少并在金属表面激光改性中获得理想的应用效果。

2.2 模拟退火法

1953 年, Metropolis 等使用蒙特卡洛方法模拟一个多原子系统,这个系统的能量随着温度逐渐下降到零度能达到全局的最小值。1982 年, Kirkpatrick 等提出一种对 Metropolis 算法进行迭代的组合优化算法,这种搜索算法就被称为模拟退火法^[4]。模拟退火法是一种类似于寻找复杂物理系统的低能态的优化算法。它的特点是能够避免陷入能量较高的局部极值,减慢降温速度可以使系统有可能跳出局部极值点。在模拟退火法的实际应用中,如何确定评价函数和降温方式是问题的关键。评价函数主要是考虑两个因素的协调,即衍射效率和光强值对目标值的偏离。系统的能量评价函数可定义为 E , 给定

温度值,并改变单元取值,然后计算系统的新的能量值 E' 。如果 $E' < E$, 则接受单元值的改变;如果 $E' > E$, 则以一定的概率接受单元值的改变。

评价函数 E 中包括衍射效率相关的函数 F 和输出点阵分布相关的函数 G ,

$$E = \alpha F + \beta G \quad (1)$$

$$F = (1 - P_{\Sigma})^2 \quad (2)$$

这里 α 和 β 为权重系数,可根据实际要求选取。(2)式中 P_{Σ} 为所需要的衍射级的归一化强度和,也相当于衍射效率。

$$G = \sum_{m=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} (P_m - \bar{P}_m \cdot P_{\Sigma})^2 \quad (3)$$

(3)式是设计 $N \times N$ 点阵分布,其中 P_m 是 m 衍射级的计算强度, \bar{P}_m 是 m 衍射级的目标强度。

此外,还要考虑算法的收敛性。通过调整权重值来改变侧重。对于具体权重值的分配,主要根据具体应用要求和在实际设计中来调整。

在设计一个 5×5 均匀点阵输出的元件时,系统地进行了各种系数比实验,结果如表 1。可以看出不同的权重值的分配对衍射效率有较大影响。如果参数选择不当,设计结果很难收敛到目标值。

表 1 衍射效率与 α 和 β 不同组合的关系

Table 1 Experimental values of α and β

	1	2	3	4	5	6
α	0.20	0.35	0.40	0.50	0.70	0.80
β	0.80	0.65	0.60	0.50	0.30	0.20
Diffraction efficiency/%	71.9	75.6	80.3	82.4	77.9	77.8

降温过程的控制参数包括初始温度、温度函数、重复次数和终止判据。通常选择一较高的初始温度,并给定温度函数为几何温度函数,由于其简洁性,与实际退火过程类似。降温速度慢更易获得满意的解,但计算时间会增加。重复次数是每一温度下重复计算的次数,终止判据是结束循环的条件,有时也可以在固定的迭代次数内结束。正确的选择评价函数与降温过程控制参数,可以获得好的设计结果。

2.3 误差分析

我们使用的是均匀点阵分布器件。若中央零级强度远大于其他衍射级强度,在激光束功率密度较大时,较强的强度分布会导致金属表面的热蚀破坏,这在工件表面强化处理中是不允许的。

对于 Dammann 光栅, Jahns 等详细研究了影响其

衍射效率的参数,也研究了过度曝光和深度误差^[5]。从理论上讲,在元件的加工制作过程中,刻蚀深度误差产生的位相误差量 e 引起零级的增加非常明显,即使很小的位相误差也会导致很强的零级光强。这也是器件的输出偏离设计结果的主要原因。

3 设计结果

实际的器件输出结果与设计的偏差是由难以避免的加工误差造成的,因此从设计阶段就考虑对加工误差的补偿将可能得到较好的结果。避免强零级的改进设计方法就是在设计阶段就使零级强度尽量低。然而,这常使迭代算法不易收敛,所以应仔细选择评价函数和退火方案。我们设计了一个输出 3×3 的强度分布的器件,选择 $\alpha = 0.3, \beta = 0.7$ 进行设计。图 1 显示了评价函数随迭代次数的增加而下降

的趋势,可以看出在迭代 100 次时就已经基本收敛。

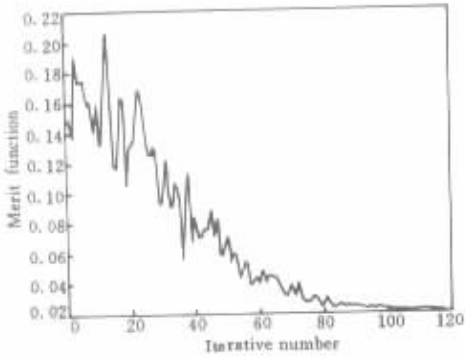


图 1 评价函数随迭代次数的变化

Fig.1 Merit function vs iterative number

表 2 是实际的设计结果例子。表中数据为归一化相对光强。

表 2 3×3 低零级元件的输出分布值

Table 2 3×3 low-zero order output

M/N	-1	0	1
-1	0.0892	0.0776	0.0870
0	0.0915	0.0002	0.0915
1	0.0870	0.0776	0.0892

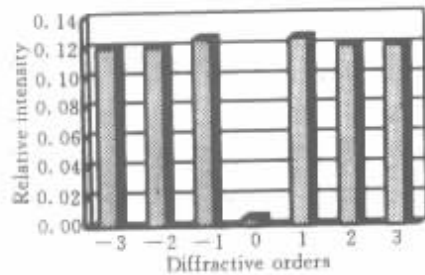


图 2 低零级输出光强分布

Fig.2 Output intensities of the low-zero order element

另一个实际表面处理用到的元件为中央零级低的均匀分布 7×7 点阵,设计参数选为 $\alpha = 0.35$, $\beta = 0.65$ 。设计结果如图 2 所示,零级输出远低于其他衍射级。

为了获得较大的单次加工面积,提高效率,设计了一种间隔缺级的元件,设计控制参数为 $\alpha = 0.2$, $\beta = 0.8$,结果如图 3 所示,在相同的焦长条件下实际输出光束的面积增大,提高了加工效率。

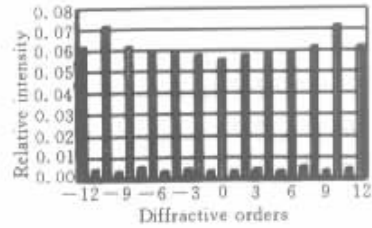


图 3 间隔缺级输出

Fig.3 Output intensities of the missing order element

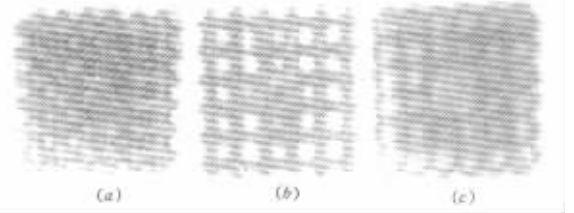


图 4 使用衍射元件在金属表面形成的强度分布图样

Fig.4 Intensity distribution patterns formed on metal surface by using DOE's

图 4 为利用二元位相光栅在 T10 钢表面上形成的周期变化图样,面积大约为 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 。图 4(a)(b)(c)分别是在焦点附近不同位置上的表面处理结果,(a)是焦点后 1 mm,(b)是焦点前 1 mm,(c)是在焦点上。从图上可看出明显的不同。对不同位置的处理结果在力学性能上的差别有待进一步研究。图 5 为剖面图,从剖面图中可明显地看出强化后的硬化层周期形状分布并对应于衍射级的周期分布。周期强化特点包括降低接触面摩擦系数,减少其内部由裂纹、空洞引起的破坏,使硬化层不容易剥落。同时还可以看出在形成周期性表面改性过程中没有发生金属表面的形貌变化。通过进一步的力学性能实验,发现材料表面特性有很大改善。



图 5 金属表面强化的剖面图

Fig.5 Cross-section view of the metal surface being hardened

4 结 论

在金属激光表面处理中,衍射光学元件的采用增强了处理效果。从设计阶段对输出结果和加工误差考虑补偿是行之有效的方法。模拟退火法仅在选择合适的评价函数和降温方式时才能更好地发挥作用。一般来说理论上可获得任意的输出分布。我们认为设计一个低零级的光栅可以在应用时减少制造误差引起的实际零级增强。利用间隔缺级的设计可以扩大单次加工的面积,提高处理效率。利用二元光学元件进行激光表面处理,处理表面的粗糙度增加不大,生成了强化组织,目前的硬化层深度从 $50 \sim 400 \mu\text{m}$,显微硬度测量表明表面硬度提高 $2 \sim 6$ 倍。

参 考 文 献

- 1 G. Yu, C. L. Gao, Y. Q. An. Diffractive Optics Enhancing Laser Performance in Surface Modification. Veli Kujanpää and Dr. John Ion, 7th Nolamp Conference in Laser Processing of Materials, Lappeenranta: Acta Universitatis and Lappeenrantaensis, 1999. 545 ~ 551
- 2 Jin Guofan, Yan Yingbai, Wu Minxian *et al.*. Binary Optics. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. 8, 55 ~ 56 (in Chinese)
- 3 Yu Gang, Wang Hongcai, Zhang Fenglin *et al.*. A laser machine equipment with flexible transform and multi-axis. Chinese Patent, Accepted, Application Number: ZL98101217. 5. 1998 (in Chinese)
- 4 S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt Jr., M. P. Vecchi. Optimization by simulated annealing. *Science*, 1983, **220**(4598) 671 ~ 680
- 5 J. Jahns, M. M. Downs, M. E. Prise *et al.*. Damman gratings for laser beam shaping. *Opt. Eng.*, 1989, **28**(12): 1267 ~ 1275