

微孔法及干涉法在非稳定光学谐振腔调准中的应用

夏 生 杰

(中国科学院力学研究所)

提 要

用微孔法及干涉法对非稳定光学谐振腔反射镜的调准比用望远镜法及其它方法更为简便,精度更高,能获得非稳定腔的稳定输出。它能达到 $1\sim 7$ 微弧度以上的调准精度。

一、前 言

关于小孔耦合输出或部分透过耦合输出激光器稳定光学谐振腔中反射镜的光学调准方法及精度计算,曾在文章[1]中作过详细介绍。由于非稳定光学谐振腔具有大的可控的模式体积,采用共焦结构,可以维持稳定输出平行光。准直后的远场光斑有最强的中心主瓣等优点。在大功率大能量及大费涅尔数的激光器件中得到广泛的应用。这类谐振腔反射镜的调准方法 W. F. Krupke 和 Sooy 在文献[2]、J. Nanlon 和 S. Aiken 在文献[3]及 E. Getger 在文献[4]和 G. Ackenhusen 等在文献[7]中已有介绍。为了实现基模运转,对非稳定谐振腔的光学调准,通常需要 10 微弧度的反射镜调准精度。而正支非稳定腔比负支非稳定腔要求有更高一些的调准精度。这对调准方法及反射镜调节机构的设计都提出了更严格的要求。我们在对非稳定谐振腔的研究中,采用了两种不同于文献[2]中所用的光学调准方法。两种方法的精度都很高,操作程序亦很简便,不用精密的调准仪器就能分别达到 1 和 7 微弧度以上的精度。比起用望远镜作调准仪器的方法有更多的优点。对

各种激励型式的器件、对正支或负支非稳定腔的调准都是适宜的。方法之一就是文献[1]中详述过的“微孔叉丝迭象法”,另一种是“干涉法”。先介绍两种方法的特点及程序。

二、非稳定光学谐振腔中反射镜的调准

(1) 微孔法: 文[1]中介绍的微孔法,虽然只对稳定腔的光学调准作了详细讨论。但是,这一方法对非稳定谐振腔的光学调准,同样是很适用的。方法最主要的三个特点是:“微孔”、“叉丝”和“迭象”。它的原理在文[1]中已述,在此就不重复。这里只讨论在非稳定腔中的应用。我们来研究图1所示正支共焦非稳定腔结构: 谐振腔由凹球面反射镜 M_1 、凸球面反射镜 M_2 及环形耦合输出镜

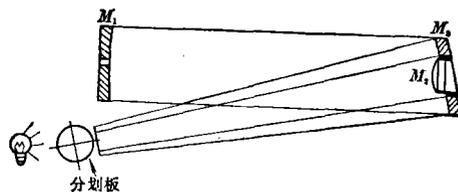


图1 正支非稳定腔

收稿日期: 1978年1月24日

M_3 组成。环镜可以是平面镜或是凹面镜会聚输出。

方法的第一特点是“微孔”。在设计及加工非稳腔结构时,需要事先在凹镜 M_1 中心处钻一直径 1 毫米的微孔。若是用对可见光透明的材料作基底的反射镜,可以将反射镜中心直径 1 毫米处,在镀反射膜层时遮挡掉,或是在镀好膜层后,在中心刮除直径 1 毫米的膜层,使之透过可见光并能用眼睛观察。在激光器输出窗口的位置,放一块刻有十字圆形分划线的分划板,如图 2 所示。操作者通过 M_1 镜中心微孔来观察调准结果。当激光器件已装好上述三片反射镜后,调节程序就可进行。首先调节被照明的环镜 M_3 ,使十字圆形分划线与明亮光环同心,十字线准确对称分割光环,如图 3。这时,可以认为环镜 M_3 的反射光轴与凹凸反射镜组成的谐振腔轴线重合,当激光器运转时,输出光可以从指定位置输出。一般操作者可以将十字圆形分划线与光环的对准偏差控制在分划线宽以内。如果借助一台望远镜,通过镜 M_1 微孔观察时,由于影象放大许多倍,相应地提高了对称分割圆环的精度。第二步是调节凸镜 M_2 。将照明灯移去照亮 M_1 镜微孔,调节 M_2 镜,使 M_1 镜微孔的反射象居中。这一步用一氦-氖激光束来完成会更方便些。将一束氦-氖光从镜 M_1 微孔射入并落至镜 M_2 中心上,使激光束与谐振腔轴重合。调节 M_2 镜可使反射光返回至 M_1 镜中心处。这时,凸镜 M_2 的光轴基本上处于谐振腔轴上了。最后一步是调节镜 M_1 。将照明灯移回原位。操作者从镜 M_1 微孔中可以看到除环镜 M_3 反射的第一次十字圆形分划线对称分割的光环外,还有许多依次变小的光环,每个光环有自己的十字分划线,不过并不对称分割光环而已,如图 4。当不断调节镜 M_1 时,可以看到所有小光环逐渐与大光环完全同心,所有十字线全都对准。此后,可以反复适当调节 M_2 镜,使最后的迭象图只有一个十字分划线对称分

割的完整的同心圆,如图 5。用一台望远镜来观察迭象图,会使图中十字叉丝更加准确地对准,调准精度可进一步提高。这一方法同样具有文[1]中所提的优点。使非稳腔在高调准精度下运转。

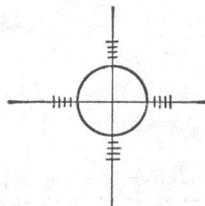


图 2 十字图形分划板

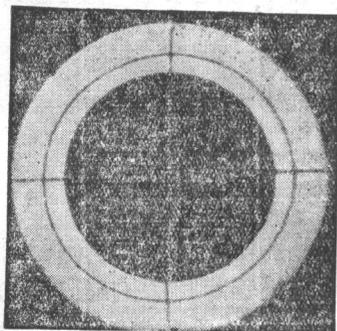


图 3 十字线对称分割光环

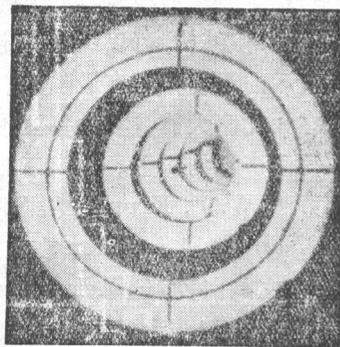


图 4 未调准时的迭象图(多个依次变小的光环)

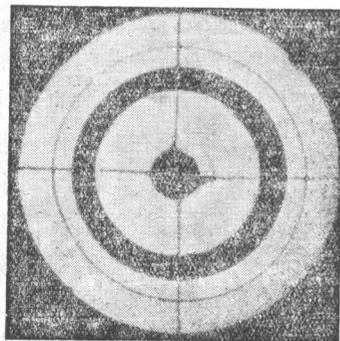


图 5 完全调准时的迭象图

(2) 干涉法: 在干涉原理中我们知道, 非远心光束在两个平行的反射镜面中来回多次反射形成的干涉现象。它的干涉条纹将是一组同心而镜度较大的圆环。如果两个反射面中之一是球面, 那末, 任一光束沿两个圆形反射镜几何中心入射的光线, 在两个反射面间多次反射后亦形成许多圆形干涉条纹。当两个反射镜光轴不重合时, 所有干涉圆环, 由于镜轴的偏离, 多次反射后的光线是偏离反射镜几何中心的。偏角足够大时, 干涉环会逸出镜面, 且反射次数越来越少。如果两反射镜光轴重合, 则所有圆形干涉条纹对于两个反射镜中心是同心的。将这一现象用于非稳定腔的调准中来。设图 1 所示为非稳定腔结构。同样, 在镜 M_1 中心钻有微孔。它的调准程序如下: 首先用一氦-氖激光束从 M_1 镜中心射入并调节光束使其落至 M_2 镜中心上。此时, 可以认为氦-氖激光束与谐振腔轴重合。第二步是调节镜 M_2 。使反射光斑调至 M_1 镜中心上。由于凸镜 M_2 将激光束发散, 反射至镜 M_1 上的光斑变大, 不容易清晰地判别出反射光斑与 M_1 镜是否同心。如果在设计时考虑好微孔尺寸, 那末, 通过微孔的激光束将产生小孔衍射。这样, 射到 M_2 镜上的光斑并非圆斑而是一组同心衍射环。经 M_2 镜反射后, 在 M_1 镜上又是一组发散了衍射环。依赖这些圆环与 M_1 镜的中心孔及外圆轮廓取得同心就比较容易。如果允许在凹镜 M_1 的对方有观察孔, 用望远镜对 M_1 镜上的对准状态进行放大观察, 同心度的调节将更加准确。第三步是调节 M_1 镜。当镜 M_1 的反射光逐渐调至 M_2 镜中心时, 环形输出镜将输出一个环形光斑, 其位置可能并不准确处于输出窗口上, 可以暂不管它。继续调节镜 M_1 , 在环形光斑上会出现许多圆形干涉条纹。这是由于相干性很好的氦-氖激光束, 在凹凸两个反射面中作多次反射而成的干涉条纹。这和法布里——珀罗干涉仪中出现的锐度很大的等倾干涉条纹是类似的。在未调准

时, 这些圆条纹对圆形反射镜是偏心的, 与输出光斑不同心, 如图 6。当完全调准时, 所有圆形干涉条纹对环形输出光斑是完全同心的, 如图 7 所示。此后, 可以调节环镜 M_3 , 使输出光斑准确处于输出窗口上。这一步调节并不影响凹凸反射镜的调准状态。由于非稳定谐振腔反射镜之间距离较大, 且凹凸镜本身又组成一具灵敏度高的干涉仪。腔中透明介质有轻微扰动, 或者两个反射镜间距有波长量级的变化都会引起干涉条纹的晃动。镜面的任何缺陷都会引起干涉条纹的畸变和毛刺。最后的干涉条纹并不是十分理想的圆环。由于这一方法是观察锐度很大的圆形干涉条纹与光环的同心度。所以很直观, 操作也很简便。利用可见的输出光斑, 还可以准确安置靶子或其它测量设备。其缺点是要非常精确判别不是理想圆轮廓的干涉条纹与环形光斑的同心度还较困难。尽管这样, 这一方法还是能达到 7 微弧度的调准精度。同时

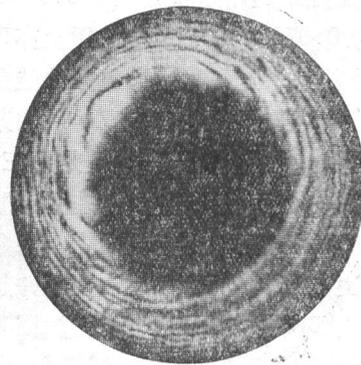


图 6 未调准时干涉环不同心

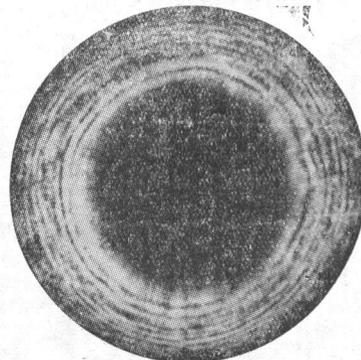


图 7 调准时干涉环与光环同心

也是一种很适用的方法。下面我们将详细讨论两种方法的精度。

三、对两种方法精度的讨论

对微孔法的精度计算与文[1]中所述是相似的，这只是微孔法在非稳定腔中的应用而已。最后的调准精度仍取决于迭象图中数个环象上十字叉丝的对准程度。在用一台望远镜代替人眼直接观察迭象图时，由于图中十字叉称的放大，可观察到更精细的结构，调准精度也能进一步提高

以共焦型正支非稳定谐振腔作例子对调准精度作一分析。设图1所示结构，镜 M_1 的曲率半径 $R_1=16$ 米，镜 M_2 的曲率半径 $R_2=-14$ 米，镜 M_3 汇聚输出 $R_3=2.6$ 米。计算出以被照明环为物的各次反射象的位置及视角比，见表1。从表中看出，随反射次数增多，圆环象越来越小。视角比由 0.533×10^{-3} 至第六象 0.0798×10^{-3} 。迭象图上亦可看出逐次变小的象。这和稳定谐振腔的迭象图不同。在稳定腔迭象图中会出现居后的某几次象比第一次象大的情况，图8即是第三、五次象比第一次象大的照片。在非稳定腔中输出一圆环，这正好适于逐次变小的象居于环的中心空位处。反射象逐次变小并趋于一个值，这由不同的曲率组合来定。图9所示就是计算出的各环宽度及重迭情况。它和实拍照片图7是相符的。

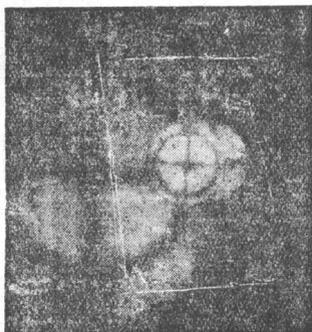


图8 稳定腔迭象图

表1 以照明圆环为物的计算值

序	物距 s	象距 s'	放大率 M	总放大率 $M_{总}$	视角比 $\times 10^{-3}$
1	1	-1.14	1.14	1.14	0.533
2	2.14	-1.64	0.767	0.873	
3	2.64	-3.94	1.49	1.30	0.263
4	4.94	-2.89	0.585	0.761	
5	3.89	-7.56	1.945	1.48	0.173
6	8.56	-3.86	0.45	0.666	
7	4.86	-12.4	2.55	1.70	0.127
8	13.4	-4.6	0.344	0.584	
9	5.6	-18.65	3.33	1.945	0.099
10	19.65	-5.16	0.262	0.51	
11	6.16	-26.8	4.35	2.22	0.0798
12	27.8	-5.59	0.201	0.446	
13	6.59	-37.4	5.68	2.53	0.0659
14	38.4	-5.92	0.154	0.39	
15	6.92	-51.3	7.4	2.88	0.055
16	52.3	-6.17	0.118	0.34	
17	7.17	-69.0	9.63	3.27	0.0467
18	70.0	-6.36	0.091	0.297	
19	7.36	-92.0	12.5	3.71	0.0399
20	93.0	-6.5	0.07	0.26	
21	7.5	-120	16	4.16	0.0344

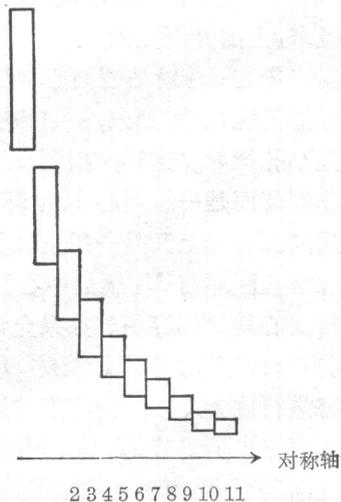


图9 各次圆环象在完全调准时的重迭图(计算值)

$R_1=16$ 米, $R_2=-14$ 米, $L=1$ 米, $R_3=2.6$ 米

在调准了的迭象图5上清楚地看出了十字丝的对准，并且可以测出十字丝的对准误差及光环尺寸。

在作调准精度估算时，假设镜 M_1 和 M_2

处于对准状态。正支非稳定腔的反射镜曲率半径远大于腔长，两个反射镜一为汇聚凹镜一为发散凸镜。当任一反射镜作微小的角度变化时，光束仅在光腔轴和反射镜光轴附近来回反射。这时，可以把二反射镜近似地当作二平面镜来处理，如图10。如果镜 M_2 偏转 θ 角，则在镜 M_1 及 M_2 上各次反射象点的位移为：

镜 M_1 反射点	镜 M_2 反射点
No.1 $2\theta L$	$4\theta L$
No.2 $2\theta L+6\theta L$	$4\theta L+8\theta L$
No.3 $2\theta L+6\theta L+10\theta L$	$4\theta L+8\theta L+12\theta L$
\vdots	\vdots
No.N $2N^2\theta L$	$2(N^2+N)\theta L$

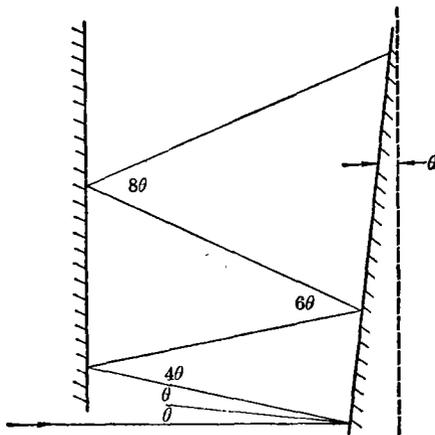


图10 平面镜间反射

从以分划线为物的计算中(表2)，可以看出在第七次象以后的视角比及明视距离上的十字丝线宽均小于人眼的角分辨极限(不加望远镜)。因此，可以用第六象上的叉丝来判别调准精度。在此 $N=6$ 。故在镜 M_1 上第六光束中心偏离反射镜几何中心为 $2N^2\theta L=72\theta L$ 。从图1中知腔长 $L=1000$ 毫米。设镜 M_2 角偏转 $\theta=5\times 10^{-6}$ 弧度(即1秒)，则偏离量为0.36毫米。对于两条线对接法对准来说，这个量是人眼容易判别的。同样，在镜 M_2 偏离量为0.42毫米。如果用带测微分划的望远镜去观察，可以测出实际偏离量，从而确定出所调器件的实际调准精度。按光

学仪器手册[6]规定：“对于两线相对接法对准，一般对准误差为 $10''$ ，有人可达 $3\sim 5''$ ，要求分象线不大于 $1''$ ”。对于分象线为 $1'$ 的线宽，在明视距离上约为0.07毫米。 $10''$ 为0.012毫米。如果迭象图上最细十字丝线宽0.07毫米，那末一般人能分辨出0.012毫米偏差，折算出调准精度为 $0.033''$ (即 0.165×10^{-6} 弧度)。实际上微孔法分划线宽约1毫米。表2中给出第六象十字丝线宽0.0682毫米。如果我们用第六叉丝与第五叉丝作对接对准。一根线宽0.082毫米，一根0.0682毫米，即使按对接偏差为细线宽度本身尺寸，算出的调准精度也能在 0.95×10^{-6} 弧度。因此，用微孔法调准光腔时，能够把调准精度控制在1微弧度左右，如果加望远镜时还会得到更高的精度。用干涉法时，要判别第六光斑的偏离在0.5毫米以内比较困难，使一组圆形干涉条纹同心精度控制在0.5毫米，这时的调准精度能达到7微弧度。

表 2

序	s 物距	s' 象距	M 放大率	$M_{总}$ 总放大率	视角比 $\times 10^{-3}$	物和象的明视 尺寸(毫米)
1	1	4.34	4.34	4.34		十字丝线宽1
2	5.34	11.33	2.12	9.22	0.748	0.187
3	12.33	4.47	0.363	3.34		
4	5.47	17.3	3.15	10.5	0.574	0.143
5	18.3	5.06	0.277	2.9		
6	6.06	25	4.17	12.1	0.465	0.126
7	26	5.51	0.212	2.57		
8	6.51	34.9	5.37	13.3	0.384	0.096
9	35.9	5.85	0.163	2.25		
10	6.85	47.6	6.96	15.65	0.328	0.082
11	48.6	6.12	0.126	1.97		
12	7.12	64.8	9.1	17.95	0.273	0.0682
13	65.8	6.33	0.096	1.72		
14	7.33	87.4	11.9	20.5	0.232	0.058
15	88.4	6.48	0.0734	1.5		
16	7.48	115	15.4	23.1	0.199	0.0498
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots

因此，用上二方法，可以容易地将调准精度分别控制在1和7微弧度或更高一些。这样高的精度，对腔体结构及调节机构的设计

提出了更严的要求。往往由于调节机构的弹性变形或有小的热梯度也能在迭象图上明显看出失调来。这样, 希望有刚性很大的结构和微动螺丝来组成调节机构, 并且应对调节机构作热屏蔽或强迫冷却以减小热梯度。在此还不包含反射镜本身的热畸变。这都是使用两种方法时对设计加工提出的要求。

四、结 论

上述两种方法, 对于非稳定光学谐振腔的调准, 无论在精度上和应用中都是很满意的。它有简捷的调准程序, 有直观的调准效果, 不用精密仪器及高技术水平的操作。两种方法可以在同一器件上采用, 并互相校核调准结果。与文献[2~4]中方法比较, 他们的方法都需要在谐振腔体中加入光阑或安置 45° 反射镜。这就使腔体结构设计复杂化。调准程序繁琐或是需要高精度的调焦望远镜。实验之后想再去核对一下失调情况就变得非常困难。而现用两种方法, 除有一片反射镜中心损失全镜面积的千分之几的反射部分外, 它并不需要为了调准而在腔体中加入或移去任何附加元件, 对任何腔结构都适用, 核对实验后的失调情况很方便。干涉法对校靶更具有明显的优点, 精度比文献中介绍的几种方法都高。因此它是两种有效、适用而精度高的调腔方法。

最近, John G. Ackenhusen 等^[7]也采用了类似的镜片中心钻孔来调腔的方法。他们未给出调准精度, 而只是从最后在热敏

纸上烧蚀斑的均匀上来判别调节的准确与否。但他们的中心钻孔的调准方法已用于 Lumonics model No. TEA-601 CO₂ 激光器件中。他们认为这类方法比早期使用的试凑法(Trial-and-error)有更大的光束输出而迅速。我们在研究中早期就采用了微孔法, 因为它的精度可控制在1微弧度以内, 腔总是在最佳状态下运转, 除非外界强烈振动及镜面热畸变引起失调。我们作过功率测量试验, 发现早期出光功率水平很高, 而后期由于多种其他因素导致功率有所下降, 当停止运转并立即复查对准状态时, 用这一调腔方法可以很容易发现这是由于对准有些失调而引起的。对于小孔引起的损耗, 我们每次都同时做了实验。在小孔处和主输出窗口处各放一相应功率水平的测量元件。所得结果, 证实主输出功率与小孔损耗之比为万分之五。因此, 基本不影响主光束功率水平, 可以忽略小孔损耗。

参 考 文 献

- [1] 夏生杰,《激光》, 1975, 2, No. 3, 25~32.
- [2] W. F. Krupke, *IEEE J. Quant. Electr.*, 1969, **QE-5** No. 12, 575~586.
- [3] J. Nanlon, S. Aiken; *Appl. Opt.*, 1974, **13**, No. 11, 2461.
- [4] E. Getger; AD-A015583, 1975.
- [5] A. H. 查哈里也夫斯基, 谢勤等译, “干涉仪”, 科学出版社.
- [6] “光学仪器设计手册”(上册), 国防工业出版社.
- [7] J. G. Ackenhusen, D. G. Steel; *Rev. Sci. Instrum.*, 1977, **48**, No. 12, 1719.