

# 1~30 瓦连续激光功率测量

上海灯泡一厂 上海计量测试管理局 复旦大学光学系激光专业

## 提 要

根据生产、科研和计量方面的需要,我们试制了圆盘功率计,用它测量1~30瓦的连续激光功率,并探讨了建立基准组的方法及扩展功率测量上限的方法。基准组的内部比对精度为2%(99%置信限),系统误差不大于2%。利用调制盘及扩大光束的方法可把功率上限扩大到500瓦。

## 一、引 言

随着我国激光技术的发展,激光功率测量日益成为一个急需解决的问题。尤其对于连续CO<sub>2</sub>激光器的功率测量,它不仅与研制大功率激光器件有关,而且与工农业生产中推广使用激光器件有密切的关系。我们从一九七三年十二月开始,试制了圆盘功率计。经过不断的摸索和改进,初步掌握了它的一些制作工艺和使用方法。在上海灯泡一厂党委的支持下,该厂试制了二台,已在生产上使用,进一步考查了它的工作性能。经过近三年的使用,证明该装置性能稳定、复现性好,它不仅适用于实验室,也适用于工厂、车间。我们还为了适应生产、科研的需要,根据车间工人同志的意见,试制了小圆盘功率计,使能更广泛和方便地适合在工厂、车间及实验室使用。同时,把功率测量的上限扩大到500瓦,使它适应于大功率激光器件的研制和生产的需要。

## 二、圆盘功率计的结构和原理

通常用圆盘功率计<sup>[1]</sup>作为1~30瓦激光功率的绝对测试设备。它不仅结构简单、使用方便,而且在100毫瓦时还能保证有一定的准确度,便于与测量小功率的绝对辐射计对接,以比较中、小功率标准。

圆盘功率计的主体由五个部分组成(图1):  
1. 吸热圆盘, 2. 传热导管, 3. 散热器, 4. 加热线圈, 5. 热电堆。吸热圆盘、传热导管和散热器是用整块铝车制出来的。氧化、染黑后,用清漆把加热线圈( $\phi 0.08$ 毫米锰铜丝或康铜丝)粘合在吸热圆盘的背面,阻值约90欧。热电堆用 $\phi 0.08$ 毫米康铜丝和铜丝构成。制作时要注意以下几点: 1. 在吸热圆盘

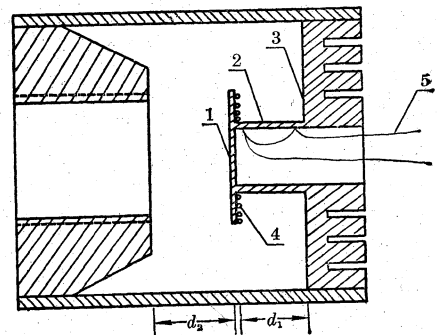


图 1

背面粘贴加热线圈时,应使加热线圈与圆盘紧贴,而且粘结剂尽量少一些,不宜太多、太厚,2.热偶对数可以选用十二对,3.热偶的热端在吸热圆盘下约2~3毫米的圆周上,冷端在传热导管与散热器交界处附近的圆周上,也是用清漆粘贴。

为了探索圆盘功率计的结构参数对测试结果的影响,我们所用的六只圆盘功率计的结构参数是不尽相同的: $d_1=15、20$ 毫米; $d_2=15、20、25$ 毫米;同时,加热线圈的电位引线端也不尽相同。

圆盘功率计的工作原理是这样的:激光照射到吸热圆盘时,可以认为激光功率几乎全为圆盘所吸收(圆盘表面熏有苯黑或烟黑)。圆盘吸收的热量由传热导管传向散热器。热偶输出的大小与入射激光功率有关。遮断激光,在加热线圈中通以电流,使热偶有与激光照射时相同的输出,这时,加热线圈上的电功率就等于入射激光功率。

### 三、建立基准组的方法

激光功率、能量标准是用特定的探测器件来规定的,它与长度、质量基准不同,而与电压基准相似,因此需要建立相应的基准组。建立基准组前要解决二个问题:1.特定探测器件的复现性,也就是按一定的工艺规程制作的探测器件是否相互一致,即基准组是否能复现,2.确定基准组内部比对方法。在我们所用的六只圆盘功率计中,为了探索结构参数对测试结果的影响,结构参数不尽相同,但对工艺规程则作了统一规定,然后由三个单位各自按规程制作。因此既考核了圆盘功率计的复现性,也考核了结构参数的影响。基准组的内部比对方法是用一稳定光源来进行的,六只圆盘功率计依次测量同一稳定光源的输出功率。数据处理方法则采用标准电池组内部比对的方法<sup>[2]</sup>。

六只圆盘功率计依次编号为1、2、3、4、5、6。按短程、长程的顺序测量同一稳定光源的输出功率(按顺序相邻的两只圆盘功率计的对比测量为短程;如12,23,34, ..., 61等等;相间的两只圆盘功率计的对比测量为长程,如13,24,35, ..., 62等等),得表1。 $A_i$ 表示第*i*只圆

表 1

单位:瓦

$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$A_{ij}=A_i-A_j$
3.95 <sub>13</sub>	3.99 <sub>50</sub>	3.91 <sub>45</sub>	3.97 <sub>84</sub>	3.84 <sub>36</sub>	3.89 <sub>90</sub>	-0.04 <sub>37</sub>
3.93 <sub>43</sub>						3.88 <sub>37</sub>
	3.95 <sub>95</sub>	3.90 <sub>79</sub>	3.94 <sub>73</sub>	3.82 <sub>93</sub>	3.85 <sub>71</sub>	+0.07 <sub>03</sub>
	3.95 <sub>54</sub>	3.91 <sub>23</sub>	3.92 <sub>55</sub>	3.83 <sub>12</sub>	3.85 <sub>71</sub>	-0.02 <sub>30</sub>
			3.94 <sub>45</sub>	3.82 <sub>51</sub>	3.85 <sub>71</sub>	-0.03 <sub>99</sub>
					3.86 <sub>63</sub>	+0.06 <sub>37</sub>
					3.88 <sub>23</sub>	+0.09 <sub>62</sub>
3.88 <sub>59</sub>					3.86 <sub>63</sub>	+0.04 <sub>55</sub>
3.86 <sub>67</sub>					3.88 <sub>23</sub>	-0.02 <sub>59</sub>
	3.93 <sub>16</sub>				3.86 <sub>63</sub>	-0.06 <sub>03</sub>
					3.88 <sub>23</sub>	+0.00 <sub>01</sub>
					3.88 <sub>23</sub>	-0.04 <sub>33</sub>

$$\bar{A}=3.90_{53} \text{ 瓦。}$$

注:表中的 $A_i$ 值都是两次测量的平均值,例如在(12)时,测量顺序是 $A_1、A_2、A_2、A_1$ ,然后以 $A_1、A_2$ 的平均值列入表中。

盘功率计测得的稳定光源的功率输出值,  $a_i$  表示以基准组的平均值  $A$  ( $A = \sum A_i/n$ ) 为标准时的第  $i$  只圆盘功率计的改正率, 即

$$A = A_i(1 + a_i)。$$

由表 1, 用最小二乘法计算得  $a_i$  值为

$i$	1	2	3	4	5	6
$a_i$	0%	-1.0%	+0.3%	-1.1%	+1.5%	+0.3%

对比精度可用下法算得:

$A_{ij}$	(12)	(13)	(23)	(24)	(34)	(35)
测量值 (1)	-0.04 <sub>37</sub>	+0.01 <sub>98</sub>	+0.07 <sub>08</sub>	-0.02 <sub>30</sub>	-0.03 <sub>99</sub>	+0.06 <sub>37</sub>
计算值 (2)	-0.04 <sub>04</sub>	+0.01 <sub>02</sub>	+0.05 <sub>06</sub>	-0.00 <sub>16</sub>	-0.05 <sub>22</sub>	+0.04 <sub>61</sub>
$\Delta A_{ij} =  (1) - (2) $	0.00 <sub>33</sub>	0.00 <sub>96</sub>	0.02 <sub>02</sub>	0.02 <sub>14</sub>	0.01 <sub>23</sub>	0.01 <sub>76</sub>
$A_{ij}$	(45)	(46)	(56)	(51)	(61)	(62)
测量值 (1)	+0.09 <sub>62</sub>	+0.04 <sub>55</sub>	-0.02 <sub>59</sub>	-0.06 <sub>08</sub>	+0.00 <sub>01</sub>	-0.04 <sub>88</sub>
计算值 (2)	+0.09 <sub>83</sub>	+0.05 <sub>25</sub>	-0.04 <sub>58</sub>	-0.05 <sub>63</sub>	+0.01 <sub>05</sub>	-0.05 <sub>09</sub>
$\Delta A_{ij} =  (1) - (2) $	0.00 <sub>21</sub>	0.00 <sub>70</sub>	0.01 <sub>99</sub>	0.00 <sub>45</sub>	0.01 <sub>04</sub>	0.00 <sub>21</sub>

$$\text{对比精度}^* = 1.96 \sqrt{\sum (\Delta A_{ij})^2} = 0.07_{71} \sim 2\%$$

上述结果是相当满意的, 即对比精度为 2%。六只圆盘功率计的改正率  $a_i$  的最大值也仅 1.5%。因此, 可以认为圆盘功率计的一致性是很好的, 即用圆盘功率计建立的基准组是可以复现的。

#### 四、圆盘功率计与 1# 绝对辐射计的对比

在激光功率测量中, 不同的功率范围是用不同的基准组来保持的。1~30 瓦的功率范围是以圆盘功率计作为基准, 而绝对辐射计可作为小功率测量的基准。虽然它们都以国际焦耳/秒作为计量单位, 但由于基准件不同, 二个不同范围的基准组的功率计量值是否一致, 能反映这二个不同基准组之间或它们自身是否有系统误差存在。因此, 我们把这二个不同范围的基准在对接区进行对比。在 100 毫瓦处的对比结果如下:

单位: 毫瓦

次 数	1	2	3	4	5
圆盘功率计** $P_1$	105.45	101.16	102.75	101.95	105.51
1# 绝对辐射计*** $P_2$	103.67	100.23	101.66	99.58	104.38
$P_1/P_2$	1.01 <sub>7</sub>	1.00 <sub>9</sub>	1.01 <sub>1</sub>	1.02 <sub>4</sub>	1.01 <sub>1</sub>

\* 在本文中, 都以 99% 置信限表示误差范围。

\*\* 5 号圆盘功率计在上注三厂使用, 所以这是其余 5 只圆盘功率计的平均值。

\*\*\* 已经用给出的改正值 1/0.97 进行改正 (实际上, 这是 6328Å 时的改正值)。

$$\frac{P_1}{P_2} = 1.014 \pm 2.8\%$$

从上面的对比结果,可以得出如下几点:

1. 1\* 绝对辐射计的示值偏低约 1.4%,这是合理的。因为它熏的是烟黑,适用于可见光部分;在红外、近红外时,吸收率就差一些。圆盘功率计熏的是苯黑,它适用于红外、近红外,在可见部分则差一些。由于对比时使用的溴钨灯的色温是 3200°K,辐射光谱的峰值波长  $\sim 9000\text{\AA}$ ,所以苯黑的吸收率比烟黑的高,1\* 绝对辐射计必然得出偏低的结果。

2. 由于 1\* 绝对辐射计的上限仅为 100 毫瓦,这样就不能在一个对接区内进行对比,只能在 100 毫瓦这一点上对比,而这时的圆盘功率计输出不大,因此对比精度约为 3%。

3. 从上述的对比结果及烟黑、苯黑的吸收率的差异来看,可以认为这二个不同范围的功率计量值是一致的。

## 五、上限的扩展

功率计的功率测量上限一般是受下面二个因素制约的: 1. 功率计探测部分的温升不宜太高,一般是采用衰减盘或水冷的方法来提高功率计的测量上限; 2. 探测部分的最大承受功率密度, (对能量计来说,相应的是最大承受峰功率)。例如经过氧化处理的铝表面,虽然它的表面瞬时承受温度远高于铝,可达 1000°C 以上,但是它的最大承受功率密度仍仅约 500 瓦/厘米<sup>2</sup>,这一局限性是不能用衰减盘或水冷的方法来克服的。常用的方法是: (i) 分光板分束<sup>[3]</sup>, (ii) 扩大激光光束,例如倒锥、积分球等方法。下面具体讨论我们所用的圆盘功率计的测量上限的扩展方法。

1. 首先,我们用衰减盘来降低探测部分的温升。显然,当使用 1/20 的衰减盘时(即具有一个 18° 开口的调制盘),则 600 瓦激光功率经衰减后照射到圆盘功率计上产生的温升,与 30 瓦激光功率直接照射时的相同。当然,调制盘应满足这样的要求,

$$\text{调制重复频率} > 10 \times \frac{1}{t_{\text{下降}}}$$

圆盘功率计的  $t_{\text{下降}} \doteq 10$  秒,所以调制重复频率应高于 1 次/秒。我们使用的衰减盘的转速是 2800 转/分,减光 20 倍的扇板具有一个 18° 的开口,所以调制频率是

$$\frac{2800}{60} \sim 46 \text{ 次/秒} \gg 1 \text{ 次/秒}。$$

2. 如果单从探测部分的温升来考虑功率测量的上限问题,似乎用了水冷或衰减盘的方法就可以把功率上限扩大到几百瓦、上千瓦。这是不确当的,因为它还得受最大承受功率密度的制约。所以,对于几百瓦、上千瓦的激光功率测量,一般都采用分光板分束或扩大激光光束的方法。

由于单模激光光束呈高斯型分布,所以当激光功率为  $P$  瓦,半宽度为  $w$  厘米时,它的峰功率密度为  $2P/\pi w^2$  瓦/厘米<sup>2</sup>,光束直径(包括 99% 的功率输出)为  $3w$ 。设  $P=200$  瓦,  $w=5$  毫米,则峰功率密度  $\sim 510$  瓦/厘米<sup>2</sup>  $> 500$  瓦/厘米<sup>2</sup>。因此,单用衰减盘的方法是不能用圆盘功率计测量半宽为 5 毫米的 200 瓦单模激光器的输出功率的,还须采取降低峰功率密度的措施。由于圆盘功率计的入射孔径达  $\phi 50$  毫米,我们可以方便地用透镜表面镀金的方法来扩大光束。显然,经扩大后的光束直径  $3w_r$  应小于 50 毫米,即

$$w_p < \frac{50}{3} \sim 17 \text{ 毫米。}$$

设经过扩大后的光束半宽为 15 毫米, 则与激光功率  $P$  相应的最小半宽度  $w$  如下表所示

$P$ (瓦)	100	500	1000
$w$ (毫米)	0.85	4.2	8.5

因此, 使用 1/20 衰减盘衰减后, 经镀金表面反射扩大成  $\phi 45$  毫米的光束照射到圆盘功率计, 就可用圆盘功率计测量 500 瓦单模激光器的输出功率。

## 六、误差估计

圆盘功率计的误差主要由下面几部分组成: 1. 圆盘功率计的系统误差, 2. 基准组的内部比对精度, 3. 其他, 例如反射率改正的误差、电测误差等。现分别讨论如下:

### 1. 圆盘功率计的系统误差

为了估计圆盘功率计的系统误差, 我们把它分成两部分, 即与输出大小无关的部分 (称为系统误差中的固定部分), 及与输出大小有关的部分。因为前者的大小可用衰减法来估计, 后者则主要由电光不等价引起。

#### (i) 系统误差中的固定部分

估计这部分误差的方法是: 固定激光照射在圆盘功率计上的位置, 测量激光直射及经衰减盘衰减后的激光功率的比值, 然后与衰减盘的衰减比进行比较。它们二者之间的差异, 反映了系统误差中的固定部分的大小。实测结果差异小于 0.5%, 在测量误差范围之内, 可以忽略不计。

#### (ii) 电光不等价引起的系统误差

产生这一不等价的原因有三个: (1) 热偶位置, (2) 电定标线圈及电位引线的位置, 及 (3) 圆盘功率计的设计及制作中的问题。

热偶位置引起的电光不等价误差可用圆周分布误差来表示。测量方法是用透镜把光源聚焦到圆盘功率计的吸热圆盘的圆心, 以此值作为中心值, 然后移动功率计, 使在吸热圆盘上依次形成  $\phi 15$ 、 $\phi 30$  和  $\phi 50$  毫米大小的光斑。以中心值为标准, 计算得其他光斑大小时的改正值。测量结果如下\*:

序 号	光 斑 直 径 (毫 米)		
	$\phi 15$	$\phi 30$	$\phi 50$
改 正 值			
1	0.2%	2.0%	2.8%
2	0.8%	2.0%	
3	0%	0.7%	1.7%
4	1.1%	2.0%	2.4%
6	-0.9%	1.3%	2.9%

\* 圆盘 2 的正面也贴有加热线圈, 所以  $\phi 50$  毫米时的数据未测。圆盘 5 因在上注三厂使用, 未进行这一测试。

从上表可以看出,即使 $\phi 50$ 毫米的光斑,即全照射,它与中心值的差异也不大于3%,所以,按上表的改正值进行改正后的误差小于1%。

其次,电定标线圈的位置引起的电光不等价误差用圆盘2来估计。圆盘2的吸热圆盘的正、反面都各自贴有加热线圈,观测分别用正、反面加热线圈进行电定标时的差异,测量结果如下:

热偶输出 (微伏)	电定标功率 (瓦)	
	上加热线圈	下加热线圈
990	9.31	9.34
1460	13.93	13.97

两者的差异仅约0.3%。至于电位引线位置引起的误差,从实测结果(6只中有3只圆盘功率计的电位引线的位置是不同的)及理论分析<sup>[4]</sup>来看,它是可以忽略的。

综上所述,经过改正后的圆盘功率计的测量值的系统误差不大于2%。当然,最好与相应的能量计进行对比,这一工作还有待于进行。但是,从前面的测试结果及根据我们制作圆盘功率计的经验,和比较不同导热管长度的圆盘功率计及试制的 $\phi 100$ 毫米(外径)的小圆盘功率计的情况来看,圆盘功率计的系统误差不大于2%。

## 2. 基准组内部比对精度

根据现有的条件,基准组内部比对精度为2%,这与光源的不稳定性有关。改善光源的稳定性,估计可以进一步提高对比精度。

## 3. 其他

### (i) 反射率改正的误差

我们使用的吸收材料是苯黑,或烟黑,因此须对反射率引进的误差进行改正。按实测反射率值进行改正,改正后的误差不大于1%。

### (ii) 电测误差

由于

$$P = \frac{E}{E_1} \frac{V_s V_1}{R_s}$$

式中的 $E$ 和 $E_1$ 分别是测量、电定标时的热偶输出( $E \approx E_1$ ); $V_s$ 、 $V_1$ 则分别是电定标时标准电阻 $R_s$ 和加热线圈上的电位降。由于 $E$ 、 $E_1$ 是用电位差计测量的,而且 $E \approx E_1$ ,所以 $E/E_1$ 的测量误差可以忽略不计。 $V_s$ 、 $V_1$ 用PZ8数字式电压表测量,则电测的最大误差为

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta V_s}{V_s} + \frac{\Delta V_1}{V_1} = \frac{1}{2000} + \frac{1}{2000} = 0.1\%$$

电测误差可以忽略不计。

综上所述,用圆盘功率计建立1~30瓦激光功率基准组是切实可行的。根据现有的条件,经过必要的改正后,它所保持的激光功率基准的系统误差不大于2%,测量误差不大于3%(99%置信限)。在30~500瓦区间,还须加上衰减盘及金膜反射率引进的误差,<2%。

## 七、圆盘功率计在工业生产上的应用

由于圆盘功率计具有误差小、性能稳定、复现性好的优点,适用于工厂、车间中测试 $\text{CO}_2$ 激

光管的功率输出。但是,尚存在这样的缺点:体积比较大,所以,上海灯泡一厂根据车间工人同志的要求,试制了外直径为 $\phi 100$ 毫米的小圆盘功率计,并配上 $\times 1000$ 的热偶放大器,用电表直接指示功率值。虽然,小圆盘的散热器缩小了,冷端温度升高,但是,热端温度也随之而升高,因为传热量是与二端温差成正比的,这样,从理论上讲,温差应该不变。实际上,由于周围室温的起伏,还是有一定的影响,但这一影响不超过2%,对生产上来讲,这是完全许可的。

## 八、结 束 语

经过这一阶段的工作,我们探讨了用圆盘功率计建立1~30瓦激光功率计量的基准组的可能性和建立方法,总结了圆盘功率计的工艺规程,为建立基准组做好了准备。同时,使用衰减盘和扩大激光光束的方法,使测量上限扩展到500瓦。但是,为了满足科研、生产上的需要,我们正在把上限扩大到1千瓦,以满足1千瓦以下的 $\text{CO}_2$ 激光器的功率计量要求。所用的方法是:衰减前用GaAs分光板分束,而GaAs分光板的分束比是可以事先测定或由它的折射率来计算的<sup>[3]</sup>;另一种是用镀金倒锥扩班的激光卡计<sup>[3]</sup>。

## 参 考 资 料

- [1] D. A. Jennings, E. D. West; *Rev. Sci. Instrum.*, **41**, 565 (1970).
- [2] J. Wilbur-Ham; *Trans. IEEE*, **IM-22**, 234 (1973).
- [3] D. L. Franzen; *Appl. Opt.*, **14**, 647 (1975).
- [4] P. W. Ballarby; *J. Phys. E. Sci. Instrum.*, **4**, 153 (1971).

## 动态消息

# 四川省召开激光科技规划会议

在举国上下热烈庆祝华国锋同志任中共中央主席、中央军委主席,热烈庆祝以华国锋主席为首的党中央继承毛主席的遗志,采取果断措施,一举粉碎王张江姚反党集团篡党夺权阴谋的历史性胜利的大好形势下,经省委批准,四川省科委、四川省国防工办于一九七六年十二月二日至九日在温江召开了四川省激光科技规划会议。参加会议的有一百一十五个单位,一百二十八名代表。

代表们聚集一堂,热情赞颂英明领袖华主席和以华主席为首的党中央粉碎“四人帮”取得的伟大胜利;愤怒揭发批判“四人帮”搞修正主义,搞阴谋诡计,搞分裂,妄图篡夺党和国家的最高领导权,破坏革命,破坏生产,复辟资本主义的滔天罪行。会议传达了国务院领导同志对七六年六月在北京召开的全国激光科技规划座谈会情况报告的批示和会议的精神;总结交流了文化大革命以来四川省激光科技工作的情况和经验;认真讨论修订了一九七六至一九八五年四川省激光科技发展计划;初步拟订了一九七七年四川省激光科技发展年度计划。同时会议还讨论了关于加强党的领导,加强组织协调工作,加强情报交流等问题。这次会议将有力地促进四川激光技术的迅速发展。