

水冷式积分球功率计*

孙祉伟 李伟 孙同坤 孙传香

(中国科学院力学研究所)

【提要】 本文介绍了用粗糙面作为漫反射面的水冷式积分球功率计。经标准能量计标定, 具有响应时间快 (10^{-1} 秒)、重复性好 (优于 1%)、可测激光功率范围大 (数瓦—千瓦) 等特点。该功率计标定误差小于 $\pm 5\%$, 测量激光输出时, 与国家标准大功率计之差在 1% 以内。

一、引言

目前红外激光功率计, 一般响应时间都比较长。例如流水功率计、圆盘功率计等, 虽都能测量大功率, 但其读数时间大部分在一分钟左右。而研制的水冷式积分球功率计 (见图 1), 所用真空热电偶探测器的响应时间可达到 10^{-1} 秒, 并可随时监视激光器输出功率的变化。

一般响应时间快, 线性好的红外探测器比较娇气, 接收面积很小, 不宜用来直接测量激光功率。而积分球则能把入射的激光束, 经球壁的漫反射面发散分布在整个球面上, 用一快速探测元件在球壁局部地方“取样”以测量整个激光束的功率。因此积分球提供了应用高精度、快速探测元件的途径。其关键是由于大功率激光照射时, 采用什么样的漫反射面。用粗糙金属面代替传统漫射面的方案, 可以直接承受大功率激光的辐照。加工这种粗糙面有多种方法, 如研磨、喷砂、粘结或烧结金属粒等。用喷砂或研磨法加工简单又经济, 只要适当掌握加工条件, 可用以测功率。而研制的流水冷却积分球体, 则能连续接收入射激光, 保持球壁温度稳定及不致被强光损坏。

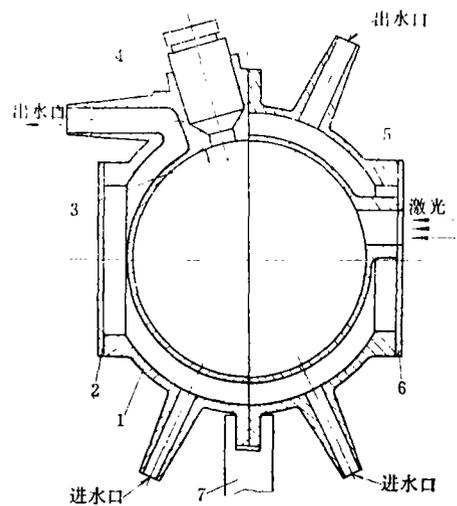


图1 功率计剖视图

1—半球壳(1) 2—封板(1) 3—档板 4—真空热电偶 5—半球壳(2) 6—封板(2) 7—支柱

* 本文于 1980 年 1 月收到。

该功率计实测了数瓦至千瓦级的激光功率,其测速、量程,使用方便等优于国内相应大功率计(比较情况见表1)。它是一种新型的激光功率计。

表1 与国内大功率计的性能比较

功率计名称	测量范围	读数时间	标定方式	误差	备注
流水功率计	10~200瓦	1分钟	电自标	±3%	标准计
圆盘功率计	1~30瓦	1.5分钟	电自标	±3%	标准计
圆盘功率计	1~300瓦 (配衰减盘)	1.5分钟	电自标	±7%	产品
流水功率计	~几百瓦	2分钟	电自标	±6%	产品
球形流水功率计	~几百瓦	1分钟	电自标	±3%	研制品
水冷积分球功率计	数瓦~千瓦	小于2秒	比对标定	±5%	研制品

二、结构原理

图1给出本装置的示意图。球腔是由两个双层半球壳合成。整个球固定在一个底座上。球壳用导热性良好且表面能自然形成氧化铝稳定保护层的铝材铸成,其内壁加工成粗糙表面。粗糙面上颗粒的平均线度约为40微米时即可获得较好的漫反射性能。球腔内径200毫米,激光入射窗口直径30毫米。入射窗口的轴线与球心相距25毫米,真空热电偶的“取样”孔安排在球内第二次漫反射的中心,而第一次漫反射又照射不到的地方。为了更有效地避免第一次漫反射光进入“取样”孔而造成不均匀性,在“取样”孔边缘靠近第一次照射区一侧设置一个高5毫米的弧形遮光片(见图1)。选用的真空热电偶为:VTH5/7K,窗口材料:KRS-5,响应时间:40毫秒。

假设积分球内壁为理想的漫反射面,具有均匀的漫反射系数 ρ ;又假设入射窗口及“取样”孔的面积相对球内表面面积可以忽略。则真空热电偶接收的激光功率 P_1 可以近似的由下式给出:

$$P_1 = P \times \rho \times \frac{\rho}{1 - \rho} \times \frac{S}{4\pi R^2} \quad (1)$$

其中: P 为入射激光功率; S 为真空热电偶受光面积; R 为球腔半径。

已知真空热电偶输出电压 U 与所接收的激光功率 P_1 的关系为:

$$P_1 = U / D \quad (2)$$

D 为真空热电偶灵敏度。由(1)、(2)两式可得:

$$P = \frac{U}{D} \times \frac{1 - \rho}{\rho} \times \frac{4\pi R^2}{S} \quad (3)$$

令:

$$K = \frac{1}{D} \cdot \frac{1 - \rho}{\rho} \cdot \frac{4\pi R^2}{S} \quad (4)$$

则(3)式可写成:

$$P = KU \quad (5)$$

若已知 D 、 ρ 、 R 、 S ，由 (4) 式可以估算出比例系数 K 值。本装置 K 值估算为： 2×10^4 瓦/伏。

由于积分球的粗糙金属面并非严格的兰伯特 (Lambert) 面，同时， ρ 值的测量误差，球壁开孔及球壳加工的偏差等都会影响 K 的估算。所以实际的 K 值是由标准能量计比对标定者得到的，其值为 1.55×10^4 瓦/伏。与估算值基本相符。

三、标 定

水冷式积分球功率计可作相对测量，本身不能自标。为满足测量要求，采用电自标的 73-1 鼠笼能量计，以连续输出 CO_2 激光器为光源进行比对标定。标定过程：待使用的激光器输出稳定后，先由 73-1 接收激光束，测得功率为 P'_i ；然后水冷式积分球功率计接收同一光束，得到输出读数 U_i 在 15 秒钟内完成。间隔 15 分钟重复以上过程。得到一系列 P'_i-U_i 值，列于表 2 中。由 (5) 式可算得一系列 K_i 值。假设所用激光器的输出在 15 秒内是不变的 (实际上激光器输出功率的变化在 30 秒内小于 1%)。归纳实验数据得到：

$$K = \bar{K} = \sum_{i=1}^{15} \frac{K_i}{15} = 15.5 \text{ 瓦/毫伏}$$

上述标定工作在约 40 瓦光源条件下进行，在测量几百瓦以上的激光输出

时，主要看真空热电偶线性如何。为此进行了线性实验。将真空热电偶直接接收聚光灯辐射与接收经过衰减 20 倍的同一光源辐射进行比较。再改变光源强度，重复上述测量。实验结果列于表 3。由实验看出，读数 \bar{U}_2 在 10 毫伏以内线性很好，但超过 20 毫伏以后随着辐照强度的增加，线性变差了，需用实验结果对 K 值进行非线性修正。图 2 是据实验数据作出 $K-U$ 曲线。图中的 U 就是表 3 中的 U_2 。所以在进行测量时，先由功率计测量输出 U 值从图 2 中查得相应的 K 值，再由 (5) 式计算出所测的激光功率。

表 2 比对标定实验结果

实验序号	73-1 测量值 P'_i (瓦)	功率计测量值 U_i (毫伏)	$K_i = P'_i/U_i$ (瓦/毫伏)
1	41.1	2.64	15.6
2	41.0	2.61	15.7
3	41.5	2.62	15.8
4	41.1	2.69	15.3
5	39.6	2.59	15.3
6	40.5	2.66	15.2
7	41.7	2.70	15.4
8	41.2	2.65	15.6
9	40.2	2.63	15.3
10	41.0	2.61	15.7
11	39.1	2.54	15.4
12	39.1	2.53	15.5
13	38.4	2.50	15.4
14	41.2	2.65	15.6
15	40.8	2.64	15.4
平均			15.5

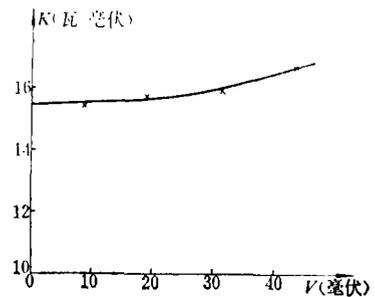


图 2 K 值修正曲线

表 3 真空热电偶线性实验

实验序号	辐射强度	通过衰减器读数 \bar{U}_1 (毫伏)	直接接收读数 \bar{U}_2 (毫伏)	\bar{U}_2/\bar{U}_1	$K = 15.5 \times \bar{U}_1/\bar{U}_2 \times 20$ (瓦/毫伏)
1~5	I_1	0.441	8.84	20.05 ± 0.09	15.5
6~8	I_2	0.973	19.25	19.77 ± 0.05	15.7
9~11	I_3	1.623	31.39	19.34 ± 0.10	16.0
12~14	I_4	2.345	43.60	18.59 ± 0.06	16.7

四、讨 论

水冷式积分球功率计标定的重复性由下式给出:

$$\text{重复性} = \sum_{i=1}^{15} \frac{|\bar{K} - K_i|}{15 \cdot \bar{K}} = 0.9\%$$

标定时误差来源:

73-1 鼠笼能量计本身误差小于 $\pm 3\%$; 激光输出不稳定性 30 秒内小于 $\pm 1\%$; 读数 U_i 的误差小于 $\pm 0.3\%$; K 值非线性修正引进误差小于 $\pm 0.5\%$; 此外, 实验表明, 当光束入射角度改变 $\pm 3^\circ$ 或平移 ± 3 毫米时, 其读数变化不超过激光器输出不稳定 $\pm 1\%$ 的范围。实际测量时, 对光状态远远优于上述情况, 所以对光偏差可以忽略。综合上述各项误差得到本功率计标定误差小于 $\pm 5\%$ 。

功率计经过中国计量科学院国家大功率计标准鉴定。鉴定结果 $K = 15.6$ 瓦/毫伏(详见表 4) 重复性优于 1%。设计者标定的 K 值与鉴定值相差小于 1%, 在误差范围以内。

该功率计经标定后即可独立进行测量, 只需定期进行 K 值标定复核。

表 4 国家标准鉴定实验结果

实验序号	中国计量院国家标准大功率计测量值 瓦	本工率计测量输出 U 值 毫伏	鉴定积分球功率计的 K 值 瓦/毫伏
1	93.57	6.01	15.57
2	91.72	5.96	15.38
3	91.86	5.93	15.49
4	86.96	5.54	15.70
5	93.50	5.93	15.77
6	92.74	5.92	15.67
7	93.12	5.97	15.60
8	93.92	5.97	15.73
9	92.75	5.97	15.54
平均	92.24	5.911	15.6

表 5 对 CO₂ 三折叠激光器输出测量实验结果

放电电流 毫安	直接测量值		加衰减器测量值			测量的衰减倍数 \bar{B}'	\bar{B}'/B
	毫伏	瓦	衰减倍数 B	毫伏	瓦		
20	7.06	110	2.143	3.29	123	2.136 ± 0.005 0.2%	0.997
25	7.84	122		3.67	123		
30	8.87	138		4.16	139		
35	9.61	150		4.52	151		
38	10.29	161	5.00	2.06	160	4.99 ± 0.033 0.7%	0.998
35	9.75	152		1.98	154		
30	9.50	148		1.90	148		
25	8.79	137		1.74	136		
20	7.46	116		1.50	117		

该功率计已实测数瓦至千瓦激光输出,性能良好。表 5 给出对 CO_2 三折叠激光器输出测量实验结果。在测量横向流动电激励激光器输出 1.1×10^3 瓦激光功率时,采用直接接收和配合使用 10 倍旋转盘衰减器两种方法测量得到一致的结果。千瓦激光功率直接照射过的球腔部位经检查未发现异常,证明功率计在测量范围内使用是可靠的。

该功率计在所测功率不太大时(如 200 瓦以下),积分球体也可不加水冷,这时球壁温度在连续光照下会有较明显的缓慢上升,热探测器读数也有小量飘移。所以要采用短时间曝光法,每次测量曝光 1—2 秒。用读取曝光前后的差值来核算相应功率。表 5 数据就是在不加水冷情况下测的。

A Water-cooled Integrating Sphere Laser Power Meter

Sun, Chih-wei

Li, Wei

Sun, Tung-kun

Sun, Chuan-hsiang

(Institute of Mechanics Academia Sinica)

ABSTRACT: A water-cooled integrating sphere laser power meter, using metallic rough surface for its diffusely reflecting surface, has been described in this paper. The power meter is calibrated by a reference energy meter and has the following special advantages: fast response (10^{-1} sec), better reproducibility ($<1\%$) and wide measuring range (from 1 to 10^3 W). The resulting difference between the meter and national standard high power meter in measuring the same laser output is within 1%.