

编号: 0174

内 部

科学技术成果报告

摆轮激光平衡机的研究

科学技术文献出版社

刊登国内、外广告启事

我社出版的科技刊物，学科较全，专业较广。为给国内、外各厂矿、企业、科研单位、大专院校等刊登广告提供方便，决定从即日起开辟广告栏，欢迎选用。

有关刊登广告的具体手续、价目及刊物，详见我社的“承办国内广告业务暂行办法”及“承办国外广告业务暂行办法”。此项业务请直接与我社广告组联系，统一办理。

(社址：北京和平街北口 电话：46局4504)

邮政编码：100013

科学技术文献出版社

科学技术成果报告

摆轮激光平衡机的研究

(内部发行)

编辑者：中国科学技术情报研究所

出版者：科学技术文献出版社

印刷者：中国科学技术情报研究所印刷厂

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

开本：787×1092¹/₁₆ 印张：2 字数：51,2千字

插图 1

1970年10月北京第一版第一次印刷

印数：1—1,580册

科技新书目：175—28

统一书号：15176·510 定价：0.36元

目 录

一、用激光束平衡小惯量旋转体的途径.....	(1)
二、激光器设计及平衡机理.....	(6)
三、传感器及信号处理.....	(14)
四、摆轮激光平衡机的整机电气原理.....	(20)
五、JBP摆轮激光平衡机研究成果.....	(26)

摆轮激光平衡机的研究

天津大学 王明时 代品忠

一、用激光束平衡小惯量旋转体的途径

随着精密机械的发展,对工作于旋转状态的小惯量旋转体的平衡问题提出了越来越高的要求。这是因为,平衡质量的优劣将直接关系到仪器的使用寿命和精度。用于导航系统中的陀螺转子及小型电机的转子,其转速每分钟可达几千—几万转,如果残存着微小的不平衡质量,就会产生相当大的动量矩,致使仪器的精度和寿命大大降低。即使工作在低转速的钟表摆轮,如果未进行良好的平衡,也将使计时的精度大大降低。所以,如何对小惯量旋转体进行高精度、高效率的平衡,一直是人们研究的课题。本文将着重研究那些轴向尺寸远比其直径小的小惯量旋转体的平衡问题。

设如图1所示的圆盘状旋转体,其重心 O' 偏离旋转轴 O 的距离为 e ,则把质量 m 和重心偏离距离 e 的乘积 me 称为偏重。对这种盘状旋转体的平衡,多半是在相应的位置上去除一定的质量来进行的。因此,任何平衡方法,都包含若两个内容,其一是测量偏重大小及其位置,其二是以某种加工手段去除其偏重。过去,对圆盘状旋转体的平衡,大体上可归纳为两种方法:

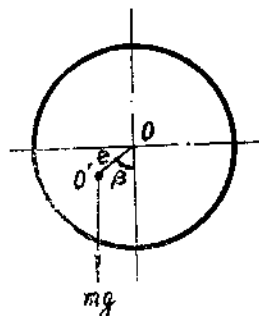


图 1

一是重力法:把被平衡体支承在支承上,在不平衡力矩 $mg \sin \beta$ 的作用下,使偏重转到最下方(即 $\beta = 0$ 处),然后在旋转体的下部通过钻、铣的办法去掉偏重。由于这种方法是靠下摆的速度来判断偏重大小和估计偏重位置,而且去重也是凭经验进行的,故平衡精度甚低。目前闹钟摆轮的平衡仍采用此法。

二是动力法:即通过旋转体的转动来测出偏重大小及偏重位置,并由测量电路测出偏重值及偏重方位,然后由此量来控制机械部分,在相应的位置去除相应的质量。这是一套自动平衡系统,无论是平衡精度和效率,都大大提高了。但由于平衡仍是由测量和加工两分解工序组成的,所以在生产效率上仍不能令人满意。而且平衡精度也受加工机械精度的限制。另外,对平衡机的机械部分的加工精度要求甚高,成本也昂贵。

激光技术的发展,为研制新型平衡机提供了新的途径。激光是激光物质在接受了辐射光能后,通过粒子能级的跃迁和光放大而产生的一束发散非常小的高能光束,设光束的发散角为 θ ,在用焦距为 f 的聚焦镜把激光聚焦时,其焦点的直径则为: $S = f\theta$,由于其发散角极小,所以能够把几毫米直径的激光束中的能量集中在几平方微米的面积上。从而使功率密度最低限度增大六个数量级。当把这样高的功率密度聚焦在金属上时,将立即使金属融化或汽化,从而达到了去除偏重的目的。如一个以长200mm,直径为10mm的钽玻璃为工作物质的激光器,其输出能量为10焦耳时,输出一个激光脉冲,就将在铜质的闹钟摆轮上去除约1~2mg的金属。激光除了具有去除金属的功能外,尤其可贵的是其去除金属的方式,是在不接触被平衡物的情况下,通过光脉冲的照射来进行的。这个特点之所以可贵,是因为它提供

了把在平衡工艺中过去一直运用的“测量”和“平衡”两道工序合而为一的可能性，即在测量被平衡体偏重大小和位置的同时就进行了平衡加工。另外，由于激光能量是可以控制的，如果在偏重信息和激光器之间建立一套按一定函数关系而工作的控制系统，并使控制系统按照偏重的值来控制激光器的输出能量，这就形成了把测量、平衡加工两道工序合成一道工序的高效率、高精度的自动平衡机的崭新模式。我们就是在上述设想下，对闹钟摆轮激光平衡机进行研制的。在本文中阐述用激光进行平衡的可行性，并对在激光平衡技术中几个关键性问题做进一步探讨。

激光束对小惯量旋转体的平衡，就其去重方式而言，可分为三种方案，一是按偏重量平衡法；二是定量平衡法，即按很小的固定量多次去除金属，直趋平衡；三是前两方案的综合，即分级定量平衡法。

(一) 按偏重量平衡法：

1. 原理方块图（按偏重平衡法的基本原理）

所谓按偏重进行平衡是指：激光器每次输出的激光脉冲的能量，是由偏重的即时值决定的。因而每次去除的不平衡量是不同的，其平衡系统的原理如方框图 2 所示。

把被平衡旋转体支承在特制的音叉形支承上，当被平衡体在气流作用下旋转时，由磁电式转换器拾取其偏重信号，为了获得在同一转速下的偏重量，采用选频放大器，选出特定频率的信号，并加以放大。被放大后的偏重信号分别送到幅值处理电路和相位处理电路。幅值处理电路的作用是把偏重信号转换成和偏重成

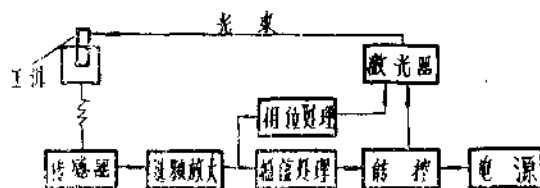


图 2

一定函数关系的直流电平，并用此电平去控制供给激光器的能量，以保证激光器的存储能量与偏重量成比例。相位处理电路是为了消除前级放大线路所造成的相移而设计的。由于从相位处理电路输出的信号代表着偏重的位置，故利用它作为触发激光器的信号。激光器在触发脉冲作用下出光，则在被平衡体的偏重位置上去除了和偏重成比例的金属。可见，由于每次输出的激光脉冲能量是比例于偏重信号的，也就是说，每次去除的偏重量是不同的。通过若干的激光脉冲，使被平衡体逐渐进入允许的残留偏重范围内，使之达到平衡，图 3 表示了这种方案的偏重被消除的过程。

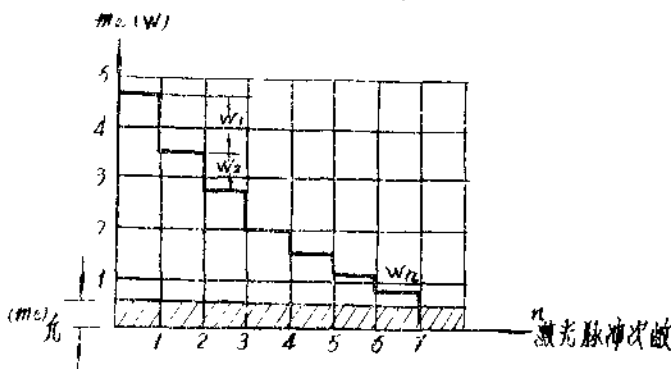


图 3

可见，这种平衡方案在初始瞬间的激光脉冲具有很大的能量 W_1 ，随着接近允许的不平衡量，脉冲能量逐渐减小，即：

$$W_1 > W_2 \dots \dots > W_n$$

为此，必需在偏重量的即时值和激光器控能电路之间建立反馈系统。

2. 反馈系统的分析

以图 4 所示的反馈系统考虑，应根据各环节间所遵循的关系，求出变换电路所应模拟的函数关系 $eP = f(E_p)$ 来。

控能电路是由扫描电路控制两只可控硅来进行调压的, 经过变压器升压和桥式全波整流电路, 把电能贮存在电容器组 C 上, 当高压触发脉冲使得氙灯电离而点燃时, 则激励钎玻璃使之产生激光, 所以激光的能量 W 是和电容组的容量 C 和充电电压 U_c , 满足下列关系式:

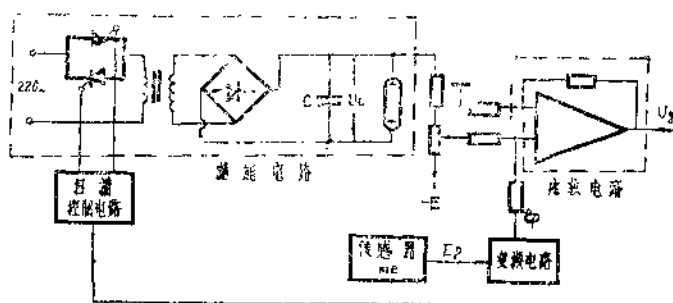


图 4

$$W = \frac{1}{2} C U_c^2$$

设取样电路的取样电压为 $\frac{U_c}{\beta}$, 由变换电路供给比较器的信号为 e_p , 那么, 比较电路的输出值 U_{sc} 应为:

$$U_{sc} = K \left(\frac{U_c}{\beta} + e_p \right)$$

其中, K 为运算放大器闭环放大倍数。

设 U_g 为关闭扫描电路 (即使供能电路停止对电容组 C 充电) 的电压值, 并令 $U_{sc} = U_g$, 则:

$$U_{sc} = U_g = K \left(\frac{U_c}{\beta} + e_p \right)$$

即:

$$e_p = \frac{U_g}{K} - \frac{U_c}{\beta}$$

这就是关闭扫描电路时, U_c 和 e_p 间应满足的关系式, 其中 U_g 为某一确定值。为了求得 $e_p = f(E_p)$, 首先求出 E_p 和 me 之间的关系来。

E_p 是由转换器输出、比例于偏重 me 的, 可以通过实验求出表示 $E_p = K_1 me$ 关系的图形, (如图 5 所示)。

此后, 应在已制成的激光器上, 通过反复实验, 求出去重和充电电压的曲线, 设其关系如图 6 所示。

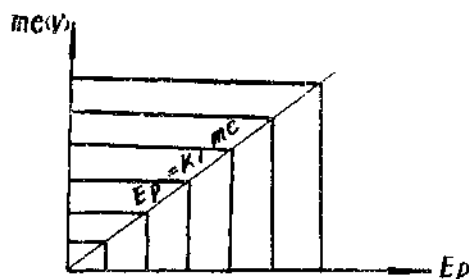


图 5

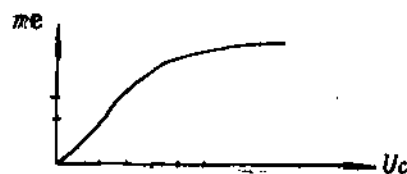


图 6

按公式中 e_p 和 U_c 的关系, 把表示电压值的横座标用 e_p 代换, 并按表示 $E_p = K_1 me$ 之图 5 中表

示 me 的相同比例尺做图7。在图5和图7上,取出不同的 me 值所对应的 e_p 和 E_p 值,就获得了函数变换器所应模拟的函数关系 $e_p=f(E_p)$,如图8所示:

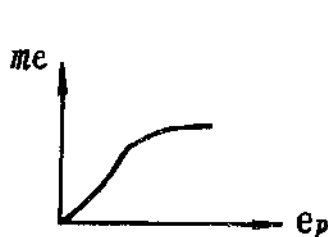


图 7

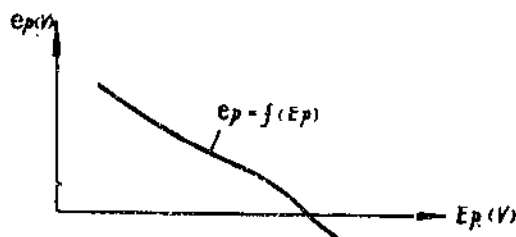


图 8

按此关系设计函数变换电路,在有某一偏重 me 时,则产生相应的 E_p ,经函数变换器转换成电压 e_p ,由 e_p 来和充电电压随时比较,当充电电压达到激光器应具有相应能量时,由比较电路输出 U_g ,关闭供能电路,此时激光器电容器上存储的能量将比例于偏重 me 之大小,待触发脉冲来时,激光器去除的质量也就比例于偏重量。在理想情况下,激光器去除的质量甚至可等于偏重量。

这种按偏重比例去重方案,其最大的优点,是可以提高平衡效率,但是由于采用了比较复杂的反馈系统,就必然使得整个系统复杂化,成本也较高。另外,对激光器也有着出光范围大,输出能量必须稳定的要求。由于采用了函数变换器,而在模拟此函数变换关系时也必然会产生误差,这种误差也必将以激光能量的变化而反映到去重上。

(二) 定量平衡法

这种方案不需要反馈系统,激光器发出的激光脉冲能量在平衡过程中大小不变。即 $W_1 = W_2 = \dots = W_n$ 。

图9(a)是定量去重的原理方块图,在此种方案中,不需建立控能电路与偏重信号间的反馈系统。图中幅值处理电路仅相当于一个判别偏重量是否超过允许残留偏重的甄别电路,只要偏重的即时值大于允许残留偏重,供能电路就对电容器组充电,且充电电压数值一定,其平衡过程如图9(b)所示。

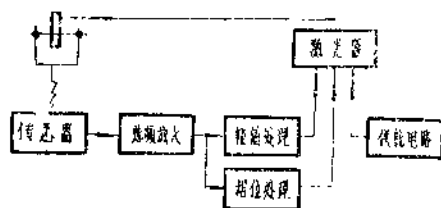


图 9(a)

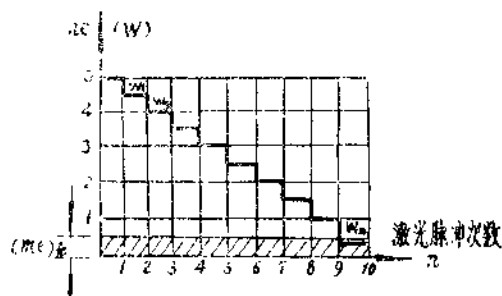


图 9(b)

在这样的平衡系统中,激光脉冲的输出能量是稳定的,因而每次去除的质量也是一定的,激光输出能量的选择由允许残留偏重 $(me)_允$ 来决定。

设 G_0 为对应允许残留偏重 $(me)_允$ 的质量,则激光器每个脉冲的去重量 G 应满足

$$G \leq 2 G_0$$

例如,在平衡闹钟摆轮时,允许的残留质量 $G_0=0.8mg$,则应设计一每次出光能去除不大于 $2 \times 0.8=1.6mg$ 的激光器,如果在平衡过程中,第 n 个脉冲去重后,摆轮上仍残留 $1.0mg$ 的质量,那么,在第 $n+1$ 的脉冲又去除 $1.6mg$ 后,其残留质量将变成 -0.6 ,其偏重位置改变了 180° ,但残留质量却落在允许的范围之内。这种方案的优点在于系统简单,对激光器的要求也较低。其主要缺点是平衡效率较低。通过以上两种方案的讨论,可以看出:生产率和平衡精度往往是对立的,以定量平衡法为例,要想提高其精度,则要求激光器每次去除的质量少,因为精度和最后一次出光去除的质量有关(不考虑位置误差),这就必然增加出光的次数,从而引起生产率的下降。

(三) 分级定量去重平衡法

分级定量去重平衡法是在定量去重平衡方案的基础上,着眼解决平衡精度与效率之间的矛盾而发展起来的。用这种方法平衡被平衡物时,视偏重大小,可以输出具有两种(或两种以上)去重能力的激光脉冲。当平衡过程开始,被平衡物偏重较大时,激光器输出能量都较大,以去除较多的金属;当偏重逐次减小到某确定数值 $(me)_1$ 时,激光器被自动调节到输出较小的能量,如图10所示。由图可知, $(me)_1$ 数值的确定应与激光器输出较大能量时的去重能力相当。显然,由于在接近允许残留偏重时改用了能量甚小的脉冲去重,其平衡精度将提高,这是由于平衡精度取决于最后一次去重量的大小的缘故。

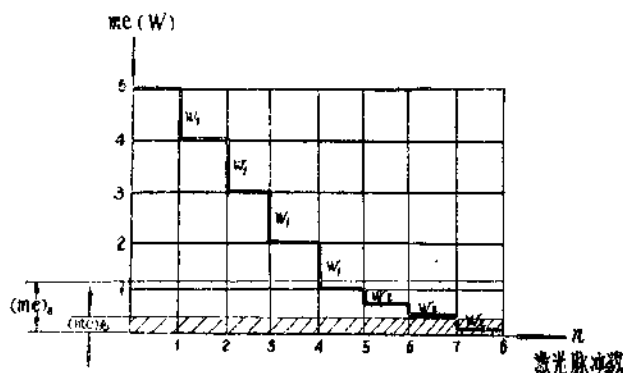


图 10

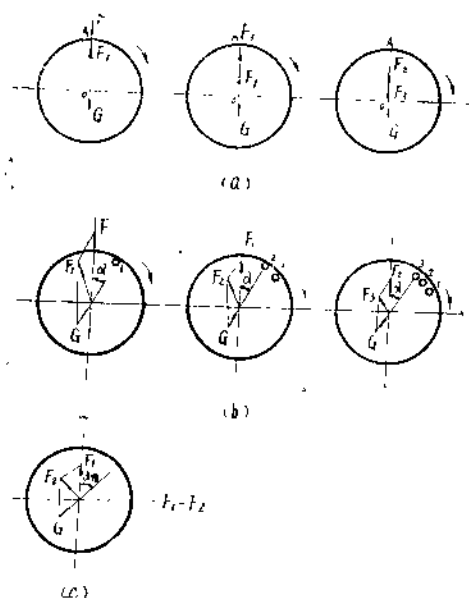


图 11

互成一定距离的盲孔,且表面光洁度也好。

用激光束平衡旋转体时,激光束焦点在被平衡体上的位置,将直接影响生产率。设在图11(a)中, A 点为偏重位置,并用矢量 F 表示偏重大小,用 G 表示激光器每次去除的质量。那么,把激光器的焦点对准 OA 线上,其去重最为显著,而且每次都去掉 G 毫克($F-F_1=G$),可以用最少的次数平衡好,从而提高了生产率。

如果如图11(b)所示的,激光器的焦点不在偏重位置上,而是对准在偏离偏重位置一个 α 角,则在第一次去重后,可由 F 和 G 组成的合力求出新的偏重 F_1 ,第二次出光后,偏重变成了 F_2 ,可见, $F_n-F_{n+1}<G$ 。所以,当被平衡物的偏重不大时,显然,把激光的聚焦点对准偏重位置最为适宜。而在被平衡物的偏重很大,甚至把盘状旋转体加工成透孔尚未平衡时,则宜采用把聚焦点偏离偏重位置为好,这种方法将在被平衡体边缘上打出若干个相

在选取偏离角度时,以相邻的两盲孔不相重叠为宜。如果偏离平衡位置甚大时,其平衡效率则逐渐降低。如果偏离角度达到了:

$$\alpha_{\text{临}} = \arccos \frac{G}{2F} \text{ 时, (其中 } G \text{ 为激光每次的去重量, } F \text{ 为偏重的即时值), 虽然每次去}$$

重为 G , 但偏重不会降小, 如果偏离的角度大于 $\alpha_{\text{临}}$ 时, 偏重将越来越大。如图 11—c。

二、激光器设计及平衡机理

(一) 激光器的选择

通过实测得知, 闹钟摆轮的偏重一般在 5×10^{-3} 克·厘米左右。也就是说, 为了使摆轮达到平衡, 一般需在摆轮轮缘上去除 5 毫克左右的金属。(在距旋转轴为 9 毫米的轮缘上去重)

我们又对用手工平衡的摆轮进行测量发现, 其允许残留偏重为 1.1×10^{-3} 克·厘米。以此统计数字为依据, 我们把用激光进行平衡的残留偏重定为 0.8×10^{-3} 克·厘米, 即在轮缘上仍允许存在 0.9 毫克的金属, 换句话说, 即在轮缘上如残存 0.9 毫克金属的话, 其产生的偏重将在误差范围之内。

据此要求, JBP 采用定量去重法对摆轮进行平衡。为了保证在每个摆轮的几次出光中最后一次出光后的残留量小于或等于 0.9 毫克, 则应设计激光束的每次去重量小于或等于 1.8 毫克。这是一具中等功率的激光器。

选择波长为 1.06μ 的钕玻璃做为工作物质。

据国外资料, 每次出光去重 1.8 毫克的激光束其能量应大于 8 焦耳, 我们选择 10 焦耳。

钕玻璃棒尺寸的确定:

设: 激光输出能量为 10 焦耳

钕玻璃每立方厘米输出为 0.7 焦耳。

长径比: 10:1~20:1

计算: 由输出能量求所需钕玻璃体积 V :

$$\text{则 } V = \frac{10 \text{ 焦耳}}{0.7 \text{ 焦耳}/\text{cm}^3} = 14 \text{ cm}^3$$

选棒的直径 $\phi = 1 \text{ cm}$

$$\text{则棒长 } l = \frac{V}{S} = \frac{14}{\pi \cdot 0.5^2} \approx 18 \text{ cm,}$$

考虑到棒两端的固定需长 1 cm, 故选 $l = 20 \text{ cm}$ 。按破坏阈值校验:

$$\text{最小允许截面积 } S_1 = \frac{10 \text{ 焦耳}}{1 \text{ 焦耳}/\text{mm}^2} = 10 \text{ mm}^2$$

$$\text{而实际截面积 } S = \pi \cdot 0.5^2 = 75.5 \text{ mm}^2$$

$$S \gg S_1, \text{ 故符合要求。}$$

激光是通过氙灯来进行能量转换的, 把电容上存储的电, 通过氙灯变成光能使钕玻璃产生粒子数翻转产生激光。中间的各级转换都损失掉相当一部分能量, 因而, 其效率仅为 1% 左右。因此要求输出 10 焦耳能量的激光器, 其输入电能为

$$W_e = \frac{W_L}{1\%} = \frac{10}{1\%} = 1000 \text{ 焦耳}$$

我们采用了极间距 $l=200\text{mm}$, $d=12\text{mm}$ 的直管氙灯。

(二) 主电路各参数的分析计算

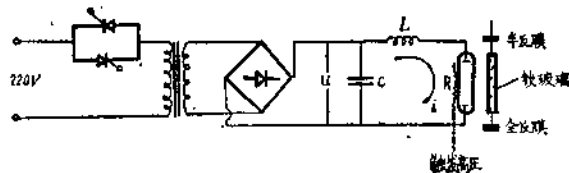


图 12

主电路的简图如图12所示。由电网供给的 220V 交流电源，经可控硅调压后送给整流电路，整流后，电能存贮在电容器C上，当氙灯受到约15000伏高压激励时，电容C上的电荷通过氙灯放电，氙灯光谱在可见区域基本上是连续谱，光强最大处约在5000埃左右，但在激发玻璃时只有3500埃至 8500 埃之间的几段辐射是有用的，因此，获得一个理想的氙灯出光脉冲，使其充分的辐射玻璃，以期提高转换效率是十分重要的。

氙灯出光脉冲的形状，是由放电回路的参数 C，电感 L 和电阻 R 来决定的。所以，选择氙灯出光脉冲问题就变成了如何恰当地选取放电回路的参数问题。

下面，通过如图13所示的放电回路的分析来恰当的选择电容 C，电感 L。

设 $R=\text{常数}$

放电回路方程为：

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt - U_c = 0$$

$$\text{设} \quad \alpha = \frac{R}{2L}, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$\text{则} \quad K = \frac{\alpha}{\omega_0} \text{ 被称为阻尼因子}$$

选择不同的 C、L 和 R，则 α 、 ω_0 、K 将不同，其解有三，

$$1) \text{ 当 } K = \frac{\alpha}{\omega_0} = 1 \text{ 时, } \frac{R}{2L} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ 则 } R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$$

此状态为临界阻尼状态，其放电电流

$$i(t) = \frac{U_c}{L} \cdot t \cdot e^{-\alpha t}$$

其电容的放电电压 U_c 和放电电流 i ，及闪光波形如图14— α, b 曲线 $K=1$ 所示；

$$2) \text{ 当 } \frac{\alpha}{\omega_0} < 1 \text{ 时, 即 } R < 2\sqrt{\frac{L}{C}} \text{ 其放电电流 } i \text{ 为}$$

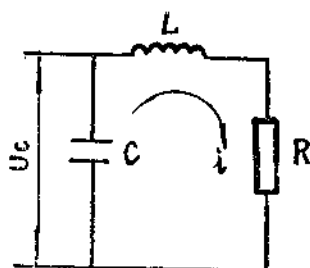


图 13

$$i(t) = \frac{U_c}{L\omega} \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sin \omega t$$

$$\text{其中 } \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$$

其波形如图19-a,b中 $K < 1$ 所示呈衰减振荡状态;

3) 当 $\frac{\alpha}{\omega_0} > 1$ 时, 放电电流 i 为

$$i(t) = \frac{U_c}{L} \left[\frac{1}{\alpha_1 - \alpha_2} (e^{\alpha_1 t} - e^{\alpha_2 t}) \right]$$

呈过阻尼状态如图14-a,b中之 $K > 1$ 所示, 由上述三种状态可见, 当 $K < 1$ 时呈振荡状态, 将出现几次闪光, 如图14-c $K < 1$ 所示, 不符合我们要求。

当 $K > 1$ 时呈过阻尼状态, 闪光时间加长, 能量利用率降低。

当 $K = 1$ 时, 闪光只出现一次, 而且能量集中的充分释放出来, 所以这是脉冲氙灯放电回路的最佳状态。

故其最佳状态为 $K = 1$ 即 $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 状态。

但方程7中的 R 在实际上不是线性的, 因氙灯内阻为一动态负载, 如图15, 故方程为非线性方程, 把方程归一化为无量纲方程: 则

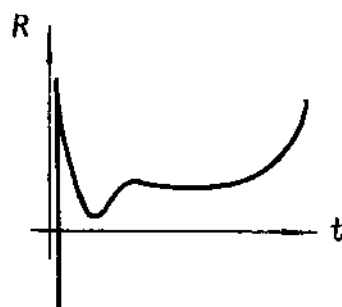


图 15

$$T = \sqrt{LC}$$

$$\text{则阻尼因子为 } \alpha = -\frac{K_0}{(U_c Z_0)^{\frac{1}{2}}}$$

图16为方程在选取 α 为不同值时的解

在 $\alpha = 0.75$ 时相应于临界阻尼状态, 这是我们需要情况。

$$\text{由 } W_e = \frac{1}{2} C U_c^2 \quad \alpha = \frac{K_0}{(U_c \cdot Z_0)^{\frac{1}{2}}} \quad \text{二式}$$

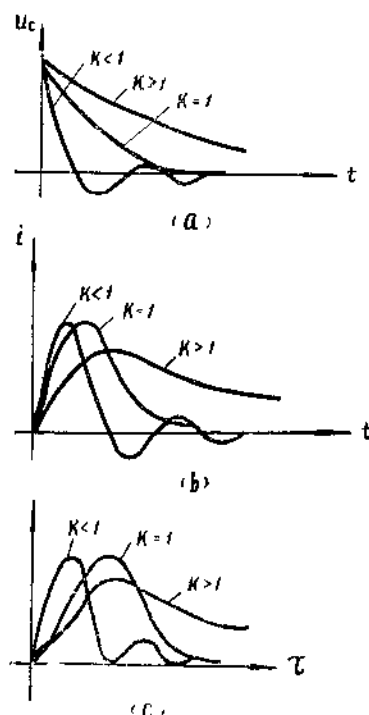


图 14

$$\frac{dI}{d\tau} + \alpha |I|^{\frac{1}{2}} + \int_0^\tau I d\tau = 1$$

$$\text{做相应代换 } Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$i = I \frac{U_c}{Z_0}$$

$$\tau = \frac{t}{T}$$

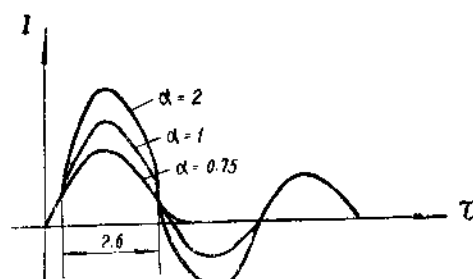


图 16

消去 U_c 并考虑 $Z_0^3 = \frac{T^2}{C^2}$

$$\text{得: } C = \sqrt[3]{\frac{2W_e \alpha^4 T^2}{K_0^4}}$$

同时在 $\alpha=0.75$ 时, 取峰值电流的 $1/3$ 处对应的的时间间隔为放电脉冲持续宽度, 由解的曲线可得: $\tau=2.6$, 则由 $\tau = \frac{t}{T}$ 得脉冲宽度时间为: $t=2.6T$, 又 $T=\sqrt{LC}$

$$\therefore t=2.6\sqrt{LC}$$

但闪光是功率的概念,

$$\text{取闪光宽度 } t_L = 2.2T = 2.2\sqrt{LC}$$

$$\text{则 } L = \frac{t_L^2}{2.2^2 C}$$

$$\therefore U_c = \sqrt{\frac{2W_e}{C}}$$

上述几个关系式即为设计放电回路的依据。

根据上面分析, 确定各参数的具体值。

由工艺要求, 拟在摆轮轮缘上由激光去重的光斑的弧长 $\widehat{ab}$ 不大于 $1.75mm$, 如图17。

设光斑直径 $=0.5mm$

则出光时间对应的摆轮弧长 $\widehat{ab} = 1.75 - 0.5 = 1.25mm$

设光斑距中心半径 $=9mm$ 则 $\widehat{ab}$ 弧长对应的摆轮转角

$$\angle \alpha = \frac{360^\circ \times 1.25}{2\pi \cdot 9} = 8^\circ$$

摆轮在加工时转速 为 $24 \sim 28$ 转/秒

取 28 转/秒 则转一周需时 $T = \frac{1}{28} = 36ms$

激光出光时间 $t_L = \frac{36 \times 8^\circ}{360^\circ} = 0.8ms$

$$\text{则 } T = \frac{t_L}{2.2} = \frac{0.8}{2.2} = 0.37ms$$

据放电回路的放电理想状态, 选取 $\alpha=0.75$

则由氙灯尺寸, 极间距 $l=200mm$, 内径 $D=12mm$

$$\text{求得: 灯的电阻系数 } K_0 = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot K \cdot \frac{l}{D}$$

$$= 1.1 \times 1.37 \times 17 = 20.4$$

其中 K 为氙等离子体电阻率系数

据公式:

$$\begin{aligned} C^3 &= \frac{2W_e \alpha^4 T^2}{K_0^4} = \frac{2 \times 1000 \times 0.75^4 \times (0.37 \times 10^{-3})^2}{20.4^4} \\ &= 0.52 \times 10^{-9} \end{aligned}$$

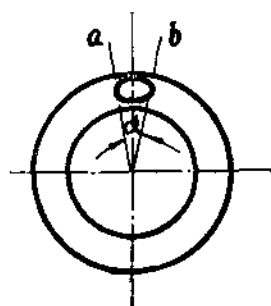


图 17

则 $C=800\mu f$

电感L的选取

利用公式 $T=\sqrt{LC}$

则 $L=\frac{T^2}{C}=\frac{t_c^2}{2.2^2 C}=170\text{微亨}$

已知激光输入能量需 $W_e=1000\text{焦耳}$

而 $W_e=\frac{1}{2}CU_c^2$

则 $U_c=\sqrt{\frac{2W_e}{C}}=\sqrt{\frac{2\times 10^3}{800\times 10^{-6}}}\approx 1600V$

上述即为满足闪光最佳状态要求的各参数值。

(三) 激光器的结构

我们采用了椭圆形腔体, 共横断面尺寸如图18, 椭圆长轴为72mm, 短轴62.3mm, 棒和灯分别置于椭圆的两个焦点上, 焦点距离为37mm, 在腔体内壁附有0.2mm厚的银箔, 用锡焊在壁上, 并抛光至镜面, 钹玻璃棒装在玻璃套管内并通水冷却。

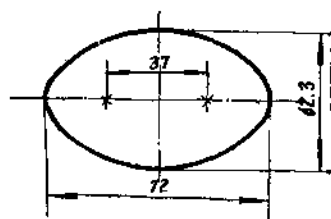


图 18

氙灯的灯极接头我们过去采用较复杂的螺纹连接件, 因电流大, 在螺纹处产生了严重烧蚀现象, 大大地增加了接触电阻, 影响了闪光, 后来我们改进成为如图19所示结构。

灯极接头采用三种不同直径的薄壁紫铜管由铜焊接在一起制成, A、B为焊接接口, 冷却水由端口流入, 由侧面水嘴流出, 这种结构不仅简单, 而且大大地提高了允许通过的电流。

(四) 摆轮表面盲孔形成机理

静止的摆轮, 在受到激光光束加工时, 将产生复杂的盲孔。孔的断面形状大体上如图20所示。

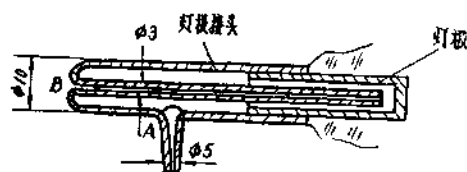


图 19

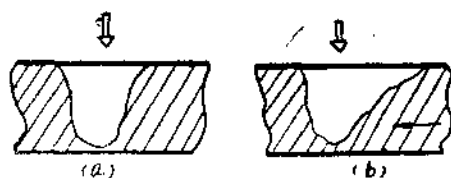


图 20

以一定转速旋转的摆轮, 共孔形呈人眼形, 而且其深度由深变浅。

孔的形状(深度及直径)主要取决于激光束和加工物接触时的初始条件。这些条件主要是: 激光辐射能量 W_L ; 激光脉冲宽度 t_L ; 聚焦镜组的焦点相对被加工表面的位置 Δf ; 聚焦光学系统的焦距 f 以及被加工材料的热物理性能(热传导率 λ , 热扩散率 α , 蒸发温度 C 和蒸发潜热等)。

在上述各参数中又可划分为两类: W_L 、 f 、 Δf 、 t_L 是属于激光器的工艺参数。这些参数中的每一个都将对功率密度 q 产生重大影响。例如: 当 $q\approx 10^6\text{瓦/cm}^2$ 时主要是热传导机理。而在 q 达到 $10^8\sim 10^9\text{瓦/cm}^2$ 时, 则转换成热爆炸机理。所以, 工艺参数的改变将直接改

变着孔形和去除金属的质量。另一类是属于被加工物的热物理特性参数。在上述各工艺参数固定的情况下,加工不同热物理性能的材料时,也将产生不同的孔形和不同的去除量。表1示出了几种常用材料的热物理特性。

表1 各种材料的热物理特性

	钨	铜	铝	炭 钢	玻 璃	氧化铝	金 刚 石
热传导率 λ 卡/cm·℃·S	0.31	0.93	0.44	0.11	0.0024	0.0065	0.33
比 热 C 卡/g·℃	0.04	0.0914	0.272	0.118	0.20	0.18	0.12
热扩散率 α cm ² /s	0.530	1.14	0.668	0.12	0.058	0.009	0.95
融 点 ℃	3373	1084	659	1400	1000	2000	3700
蒸发温度℃	5390	2850	2600				
融 解 热 卡/cm ³	850	447	270	680			
蒸发潜热 卡/cm ³		10500	6800				

由表1可以看出,在激光器工艺参数一定的情况下,加工热传导率低、比热低、热扩散率低和蒸发潜热低的材料是容易的,如炭钢、玻璃等。而加工铜是较困难的。虽然它的比热和融解热并不高,但它的热传导率和热扩散率和蒸发潜热是甚高的。这就使得它能非常快的把热量传走,而相当于减小了激光束的功率密度。而传导率甚小的玻璃、炭钢等是宜于用激光束来加工的。

在用激光束平衡摆轮时,在轮缘形成盲孔的过程可看作包括下列三阶段:

1. 被平衡摆轮表面吸收激光束能量并将其转换成热能,热量逐渐积累到铜的蒸发温度;
2. 汽化的金属体积迅速膨胀,从逐渐变深的孔中喷出,而形成盲孔。
3. 随激光脉冲的消失,液态金属很快冷凝,边缘可见小毛边。

盲孔的直径由加热区决定。加热区和 $\sqrt{\alpha \cdot \tau}$ 成比例。其中 α 为材料的热扩散系数, τ 为激光脉宽。

在平衡中,摆轮被加工部分温度可达几千度。汽化金属的速度可超过声速。当炽热金属气体与冷空气相接触时,形成了明显地冷凝表面界线,在这个区域内,蒸气的运动伴随着剧烈扩展的湍流。当气化金属喷射出来时,便形成了弱冲击波,冲击波前后面气体的温度和压力均有较大的跃变。当气化金属以400米/秒的速度喷射出去时,使盲孔的孔壁相当光滑,毛边也是很小的。

图21 表示了在激光束能量变化时孔形相应的变化,由图可见,在输入电压为1100V时。仅在摆轮表面打下一个痕迹。随着电压的提高,孔的深度逐渐加深。且孔的底部的直径也逐步加大。当电压达到1750°时,一个激光脉冲就可以把厚2mm的摆轮打穿,通孔的出口处的

孔径呈椭圆形, 口径仅有0.1mm左右。一经成为通孔, 当再提高能量时, 孔形的变化就不显著了。这是由于, 激光能量之一部分由通孔漏掉之故。

不仅能量的变化将改变孔形和去重, 光学系统的焦距和焦点相对摆轮表面的位置也将改变盲孔的形状。焦点相对摆轮表面的位置可分为三种情况:

1. 焦点恰在金属表面, $\Delta f = 0$ 的情况; 如图22, b,
2. 焦点在金属表面外, $\Delta f > 0$ 的情况; 如图22, c,
3. 焦点在金属表面内, $\Delta f < 0$ 的情况; 如图22, a,

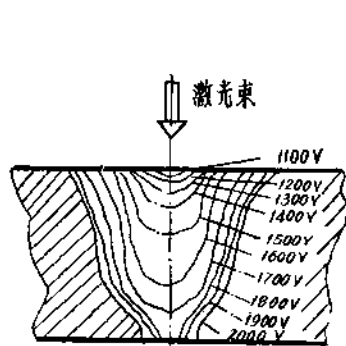


图 21

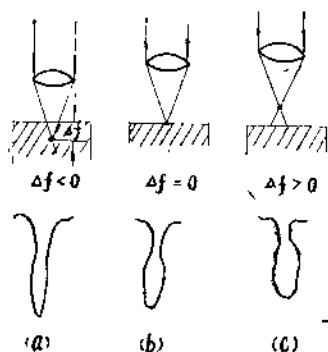


图 22

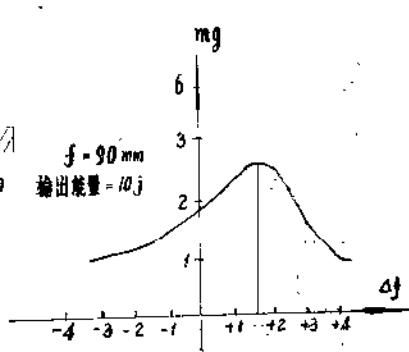


图 23

三种不同的情况使得孔形和去重皆不相同。

当焦点刚好落在金属表面时, ($\Delta f = 0$)。随着相互作用区的破坏, 连续发生激光束的散焦作用, 盲孔越深散焦越严重。由于散焦, 光斑逐渐增大起来, 因而辐射的功率密度 q 也随之下降。

当透镜焦点落到材料内部时, ($\Delta f < 0$), 发生着相反的情况, 盲孔形成的初始过程和 $\Delta f = 0$ 的情况相似, 但当孔深逐渐接近并达到焦点处时, 则开始了更为激烈的相互作用, 此时的功率密度最大, 孔径和孔深急剧增加。金属的极微小的微粒喷出。结果盲孔形状呈细长状。

当焦点落在材料外部距表面有一距离 Δf 时, 所构成孔道剖面的各处直径都比 $\Delta f = 0$ 和 $\Delta f < 0$ 时大的多, 因而去除的金属也最多。

图23 表示了去重和 Δf 之间的关系, 由图可见, 从去重角度看, Δf 在1~2 mm 之间时去重最大, 考虑到摆轮在装配时, 对支承尖端可能有0.5mm的变化量, 故我们选取 $\Delta f = 1.5$ 的状况作平衡位置。

光学系统的焦距也是使孔形变化的重要原因之一。从去重角度讲, 短焦距的去重大。但考虑到严重的飞溅问题, 我们采用了大于60mm的单片聚焦镜。焦距长固然对去重不利, 但也有有利的一面。即在 Δf 有小量变化时, 光斑直径变化较小, 故功率密度变化不大, 也可使去除金属的质量变化较小。

恰当的选择工艺参数不仅是去重之必需, 而且也是获得良好的盲孔表面质量的重要因素。一般而言, 在光斑直径一定的情况下, 功率密度越高, 盲孔表面质量越佳, 这是因为当功率密度高时, 使金属能在极短时间内液化和汽化, 汽化形成一般强烈的喷射气流把液态金属喷射出去的缘故。

在双管显微镜下观察飞溅物时发现, 其中多为球状物, 其直径由0.01mm到0.1mm不等,

此外为一些由球状体粘结而成的，形状像焦煤碴样的颗粒。这些都是液态金属在高速喷射中冷凝形成的。见图24。

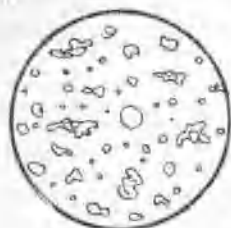


图 24



图 25

用50倍显微镜观察盲孔内表面，如图25所示的盲孔纵断面照片，可以看到多为凸凹不平的，但却是光滑凝状组织，未见似连非连的金属连在表面。只有在能量密度不够时才会产生那种似连非连的金属颗粒的现象。

盲孔周围的毛边大小一直是激光动平衡技术中人们关心的问题之一。经实验证明，只要正确的选择各工艺参数，并用光栏加以选模，是可以使得其毛边甚小，甚至没有毛边的。

总之，合理的设计激光器，恰当的选择各工艺参数是可以获得令人满意的加工质量的。

(五) 激光器试验及其分析

1. 输出能量试验

通过改变输入电压改变激光器输入能量，用发斗测其输出能量。获得如图26的曲线。当输入电压达到1100V时输出激光，在1900V~1800V之间输入电压和输出能量近似线性关系，超过2KV时变化就缓慢了。我们选用的输入电压范围在1600V~1700V之间。

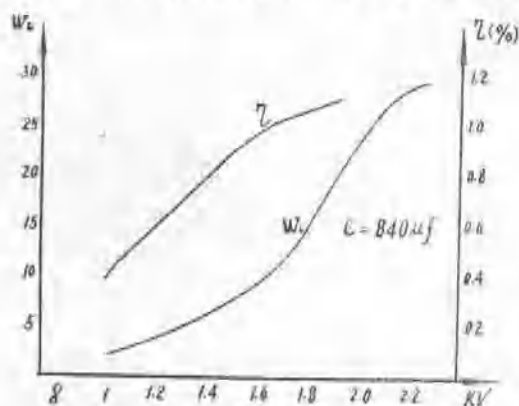


图 26

2. 去重规律

在用激光束平衡旋转体的过程中，主要的因素之一就是确定激光束与摆轮表面相互作用的最佳状态，也就是确定盲孔的几何形状和去除质量与主要工艺参数之间的相互关系。

如前所述，盲孔的孔径 D 、深度 l 及盲孔体积 V 是由激光器输出能量、透镜焦距 f 、焦点相对摆轮表面的相对位置 Δf 和铜的热物理性能决定的。在摆轮材料确定的情况下，

$$D, l, V = F(W_L, f, \Delta f)$$

由于激光束的材料的作用是复杂的，难以用解析的方法表示其间的关系。所以最好的方法还是在固定某些参量的情况下，通过实验来获得能量 W_L 和去除质量间的关系。图27就是在确定的玻璃材料（效率、尺寸一定），确定的腔体和一定的透镜焦距 f 和 Δf 的情况下，获得的输入能量和去金属质量的曲线。

当要求每次出光去除1.6mg金属时，由曲线可得需输入电压为1600V左右，考虑到去重随着出光次数的衰减，我们选取1650V作为工作电压，以使得在几次出光中能量下降的情

况下,接近每次出光去除1.6mg金属的要求。

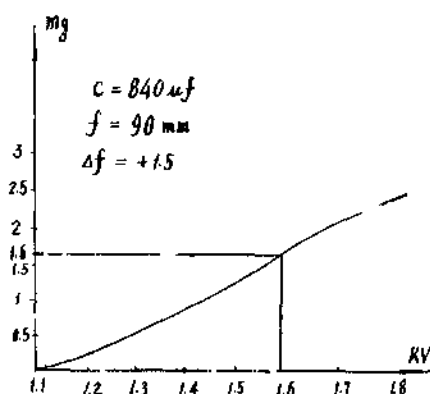


图 27

在平衡闹钟摆轮时发现,在每平衡一个摆轮的过程中从第四、五次出光后去重有衰减现象。经分析,是由于以玻璃为基质的铍玻璃棒热传导不良而形成的热致类透镜效应造成的。虽然当时其输出能量未变,但焦点处的光斑变大,致使能量密度降低进而影响了去重。

这种情况,只要采用热传导率高的磷酸盐铍玻璃棒就可避免。我们采取了改善冷却系统,和加光栏以改善激光模式等措施,去重衰减问题已得到改善。

三、传感器及信号处理

(一) 传感器结构及转换原理

实践表明,在用于闹钟摆轮的激光平衡机中采用亚硬支承的磁电式强迫振动速度传感器是成功的。该传感器的原理示意图如图28所示。1是特制的音叉形支架,用以支承闹钟摆轮。支架由片簧2固定在基座上。在支架的下方装有一个骨架3,在骨架上绕有线圈,并套在永久磁铁的极靴4上,由装配关系保证,当支架在片簧的约束下做铅垂方向振动时,线圈及骨架处于磁隙中间。该振动系统的固有频率设计为84 Hz。平衡过程中摆轮工作频率约为28 Hz。

当不平衡摆轮—其质量中心与旋转中心不重合—置于支架并以高速气流将其吹转后,设摆轮的角速度为 Ω (本文以 Ω 表示角速度为某常数,以 ω 表示角速度不为常数时的瞬时值),摆轮重心偏离旋转轴的距离为 e ,则质量为 m 的摆轮在旋转时所受离心力 F 为:

$$F = me\Omega^2,$$

当 Ω =常数时,离心力 F 与偏重 me 成正比。且该离心力在铅垂方向的投影 $f = me\Omega^2 \cos \Omega t$ 激发了支承系统的强迫振动。

由分析动力学可知,当研究摆轮转速大约为支承系统固有角频率的1/3左右某不大区间的运动规律时,并设在该不大角频率区间内摆轮角速度近似不变,从而忽略摆轮自由转动时因空气阻力、轴劲摩擦等造成的负值角加速度对振动系统的影响,则属于亚硬支承的该系统的强迫振动模式近似表现为弹性力与干扰力相平衡。即:

$$f = xk$$

式中, $f = me\Omega^2 \cos \Omega t$,为激发强迫振动的干扰力; x 为系统的瞬时位移; k 为系统刚度。

于是,系统所受强迫振动可表达为:

$$x = \frac{f}{k} = \frac{\Omega^2}{k} me \cos \Omega t$$

固联在该系统中的线圈切割磁力线的速度为:

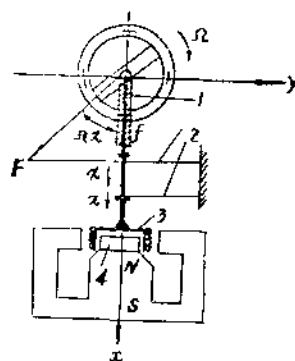


图 28