

激光在动平衡中的应用

荣烈润 郝玉庆

提 要

激光在动平衡中的应用,还是一项较新的技术。本文对用调Q激光脉冲去重(汽化)和非调Q脉冲去重的特点作了初步介绍。对于具有高生产率的“两级平衡法”和“横向激励大气压二氧化碳激光器的平衡系统”作了介绍。最后对于进一步工作提出了一些看法。

一、动平衡概况

在具有高速转动部件(例如:陀螺马达、电动机、喷气发动机、轴、活动件等)的所有精密机械和仪器上,产生的功能误差(如,陀螺仪上的漂移效应)和干扰性的摆动常常是由于残留在转动部件内的不平衡量所引起的。因而进行精密的动平衡,也就是要达到转动部件的旋转轴与中心惯性轴尽量重合(以下简称平衡),对于提高陀螺系统(特别是惯性导航系统)和转动部件的精度和寿命有着特别重大的意义。

实现平衡的传统方法,是通过动平衡机上的一定的指示设备(有瓦特计式、示波管式和仪表式)和电气系统测出被平衡工件的不平衡量的大小和相位。然后,把工件从平衡机上拿下来,用去除一定材料(钻头打孔)或者加上一定配重的方法来进行平衡,多次重复以上过程,直至达到所期望的平衡精度为止。这种平衡法有如下缺点:

- (1) 平衡精度在很大程度上取决于操作者的熟练程度;
- (2) 劳动强度比较高;
- (3) 工件在平衡过程中要多次起动、去重和停车。所以,生产率比较低,也影响使用寿命;
- (4) 去除的金属切屑容易粘在转动部件的高灵敏度轴承上,损伤轴承精度;
- (5) 工件不能在高速(工作)转动状态下打孔去重实现平衡,影响平衡精度。

近十年来,激光技术有了很大的发展。激光技术的发展也为激光用于自动平衡开辟一条途径。在配备一定的电气线路下,利用激光的高能能够使残留在高速转动工件内的不平衡金属材料汽化而实现自动平衡。激光平衡法具有很多优点,它基本上克服了传统平衡法的缺点。值得注意的是,它有可能实现对新型气浮陀螺和静电陀螺的平衡(在激光用于平衡之前,国外曾报导用电子束加工来实现平衡,但对静电陀螺就不能采用此法,因为在平衡过程中要产生电磁场的干扰偏转。同时还需要抽真空系统和高压系统,所以,限制了它的使用)。

二、激光动平衡机的研制现状

(1) 概述

对大多数激光动平衡机来说,主要由以下几部分组成:激光器、激光高压电源、测量线路

(测量不平衡量的大小和相位)、控制线路、被平衡工件的驱动电源和动平衡机(见图1)。

通过计算知道,要对陀螺马达或转动工件进行激光平衡,对激光脉冲的宽度(以下简称脉宽)有一定的要求。就以24000转/分的中、小型陀螺马达为例,要使激光脉冲能在其上把材料汽化成很小一“点”,脉宽不能大于20微秒,否则就达不到“点状去重”。要达到“点状去重”,必须满足下式:

$$2\pi Rnt_p \leq d$$

式中, R 为激光脉冲辐射在转动工件上的那点离开旋转轴线的距离(毫米); n 为转动工件的转数(转/秒); t_p 为激光脉宽(秒); d 为用脉宽为 t_p 的激光脉冲辐射在静止工件上的孔径(毫米)。

一般要达到几十微秒数量级的脉宽通常采用调 Q 的方法来压缩脉宽(当然,这样窄的脉宽不采用调 Q 也能达到,见下叙述),如果不压缩脉宽,会在陀螺马达上把材料汽化成一个弧状的斑痕,我们称为“弧状去重”。但是,不管点状还是弧状,经过几次去重都能对转动工件实现平衡。当然,对于不同特性(转速、大小)的工件应采取不同的脉宽来实现点状或者弧状去重。

(2) 调 Q 去重法

实现调 Q 去重主要有下面两种方法:

(a) 红宝石作为激光工作物质,电光开关(KDP 和 KD^*P)作为调 Q 元件。

特点是,脉宽较窄,每个脉冲的去重量很小,虽然重复频率可以较高,但总的去重量还是很小的(几个毫克)。

(b) 铍玻璃作为激光工作物质,旋转棱镜作为调 Q 元件。

特点是,电气线路少,比较简单,但重复频率低,每个脉冲的去重量不大,总的去重量也不大(几个毫克)。

以上两个方法都是使用调 Q 固体激光器产生的窄脉冲来汽化材料达到平衡。总的效率是低的,这是由于当激光能量超过一定的功率密度极限时,就要形成高密度的等离子区,它不是吸收能量,就是反射能量。所以,这个等离子区产生的现象限制了每个调 Q 激光脉冲的材料汽化量。对于由脉宽为 $5 \sim 50$ 毫微秒的调 Q 脉冲所产生的完全汽化面积要比对应脉冲汽化面积稍微大些,但是,深度非常浅,通常不超过几个微米。有人观察了脉宽为 600 微秒和 44 毫微秒的调 Q 激光脉冲对几种金属材料汽化的深度,如下表所示。

材料汽化深度

材 料	10^9 瓦/厘米 ² 44 毫微秒调 Q 脉冲	5000 焦耳/厘米 ² 600 微秒普通脉冲
不 锈 钢	1.1 微米	610 微米
黄 铜	2.5	780
铝	3.6	780
铜	2.2	900
镍	1.2	580

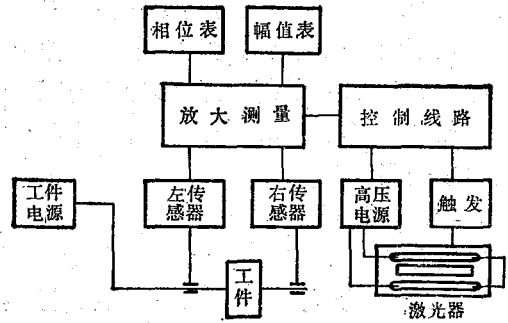


图1 方框原理图

我们通过对调 Q 脉冲用于材料 (主要是黄铜) 汽化的研究和实验发现汽化深度确实很浅, 去重量不大。但是调 Q 脉冲辐射在工件上产生的斑坑要比普通脉冲的大。斑坑有较亮的光泽, 并在斑坑边缘的某些部位堆积着部分没有完全被汽化飞溅出去的重新凝固的材料。

如果要用调 Q 脉冲来进行去重 (汽化) 平衡就需要大量的脉冲数和高重复频率。这在具体应用中是很浪费的。

(3) 非调 Q 去重法

由上述可知, 调 Q 去重法的总效率是很低的。那么, 是否有在工件上汽化的弧度是较小的, 去重量又较大的非调 Q 的去重法呢? 我们认为如下四种方法就是基本上能满足这些要求的非调 Q 的去重法。

(a) 高电压低电容法

此法主要是缩短脉冲氙灯的发光时间和增强氙灯的发光强度, 从而来压缩激光脉宽, 一般可以达到 100~200 微秒。此法生产率高又比较简单, 在目前实用价值较高。

(b) 双脉冲法

此法的基本原理就是使用两套电源设备来两次激发工作物质 (两次激发的时间间隔很短)。第一充电网络供激发激光器至阈值用。当工件的要去除材料的那部分通过激光光路时,

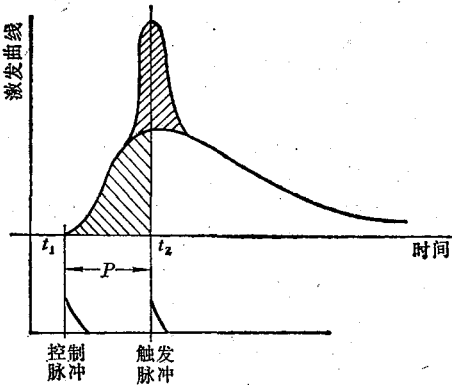


图 2 波形图

及时发出控制信号。当激光器激发至阈值时, 控制信号延迟一段时间 P (图 2), 就产生一个触发信号; 这个触发信号将第二充电网络联至激光器上, 使得第二充电网络的能量都激发在激光器内发出激光脉冲。由于第二充电网络具有很短的时间参数, 因此, 得到较窄的激光脉宽, 能实现弧度较小的弧状去重。此法的特点是, 电气线路比较复杂和控制精度要求较高。

高电压低电容法和双脉冲法都是弧状去重, 在工件上留下小弧度的斑痕, 这和传统的点状去重 (打孔) 是不同的, 但是, 弧状去重和点状去重相比, 我们认为有如下三个优点:

(i) 从空气动力学观点来看, 经过弧状去重平衡后, 工件表面能保持为一个连续过渡的表面。所以, 当工件高速转动时, 流经工件表面的空气流是一个层流而不是紊流 (如果打的是孔, 就会产生紊流)。这样, 对工件及其轴承的受力都是有利的。

(ii) 从空气动力学观点来看, 能提高航空陀螺马达的平衡精度 (因为如果航空陀螺马达是在地面上有紊流影响下进行点状去重平衡的话, 则在高空使用时, 由于空气稀薄, 紊流消失, 会使已平衡的工件变成不平衡, 降低了精度)。

(iii) 工件的强度不会受到较大的损伤。

(c) 旋转光路跟踪法

此法实际上就是使激光光束在整个脉宽内始终跟踪着高速转动的被平衡工件所需要去除的那部分物体, 在整个跟踪时间内激光基本上能不断地汽化不平衡量。优点是, 汽化的是小弧度, 每个脉冲汽化的材料较多; 缺点是, 转动声音较大, 整个结构复杂。

旋转光路跟踪法可分两种:

(i) 外切式跟踪法

聚焦的激光光束运动的线速度要与被平衡工件的线速度相近。优点是,转速较低。如,对于24000转/分的陀螺马达来说,需要跟踪的转速大约3000~5000转/分就可以了。缺点是,对于较长的激光脉宽,不能在整个脉宽内都有汽化材料产生(这是由于聚焦激光光束离开转动工件造成的)。

(ii) 同轴式跟踪法

聚焦的激光光束运动的角速度要与被平衡工件的角速度相近。转动工件与旋转光路要同轴。优点是,即使对于较长的激光脉宽,也能在整个脉宽内都有汽化材料产生。缺点是,转速较高(与转动工件的转速相近),声音较大。一种尺寸的旋转光路只能适合于一种转动工件的平衡,没有通用性。

(d) 横向激励大气压二氧化碳激光器用于去重

采用横向激励大气压二氧化碳激光器来平衡陀螺马达和其他转动工件具有如下优点:

(i) 有较高的重复频率。能容易地达到陀螺马达每转一周即产生一个激光脉冲的这样高的重复频率。

(ii) 脉宽可以通过改变气压的大小进行调整。典型的脉宽可从0.2~10微秒内调整。基本上能实现极小弧度的去重。

(iii) 由于重复频率很高,所以生产率较高。使用横向激励大气压二氧化碳激光系统采用250次/秒的重复频率,能量为300毫焦耳的激光脉冲对陀螺马达进行平衡是可行的。在汽化材料时,为了在低峰值功率、高能量和工件上的小弧度等三方面均能兼顾,选用3微秒的脉宽。图3表示使用横向激励大气压二氧化碳激光器的平衡系统的简化方框图。这种高重复频率的激光器能达到40毫克/分的材料去除率。因此,这样一个系统既可用作粗平衡,又可用作精平衡。在电动机到喷气发动机的任何快速转动装置的平衡中都能够容易地应用这个系统。

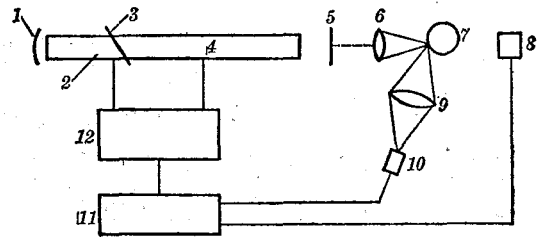


图3 使用横向激励大气压CO₂激光器的平衡系统简化方框图

- 1、5—普通光学谐振器的反射镜；2—低压CO₂激光器；3—布儒斯特窗；4—横向激励CO₂激光器；6—聚焦透镜；7—陀螺马达；8—陀螺马达位置传感器和不平衡量传感器；9—反射信号接收透镜；10—高功率热电探测器；11—计算机；12—激光控制

应当指出,为了在尽可能短的平衡时间内达到很高的平衡精度和具有最大的去除率,有人采用了“两级平衡法”。

首先进行初级平衡,转动工件是以较低的转速转动的。这时就可以采用较精平衡时脉宽略长些的脉冲去汽化材料,这样,既有较高的去除率,又不增加汽化的弧度。所以,用很少的激光辐射次数就能完成初级平衡。随着平衡精度的不断提高,将工件转速上升到工作转速,再用较初级平衡脉宽略短些的脉冲去汽化材料达到精密平衡。

(4) 在目前激光动平衡中存在的问题

(a) 激光脉冲辐射工件产生的汽化材料的排除问题,到目前为止还没有一个完善的解决办法。归纳起来,大体上有如下几个解决办法:

(i) 用高压气流吹;

(ii) 在聚焦透镜前使用宝石保护玻璃。对粘附在宝石上的汽化材料用尼龙刷子刷去后可继续使用;

(iii) 在聚焦透镜前采用一种移动的能透光的聚脂树脂薄膜专门用来粘附汽化材料, 保护聚焦透镜。

(b) 采用激光平衡的工件, 在汽化掉材料的地方出现光洁度不太高的现象。

(c) 用激光对具有非连续表面的工件(如, 涡轮叶片转子)进行弧状去重平衡时, 生产率要有所降低。

(5) 高精度激光动平衡机必须具备的基本条件

激光在动平衡中的应用, 主要是利用激光迅速而方便地去除(汽化)不平衡量的优点, 如果没有高精度的动平衡机给出精确的不平衡量的大小和相位, 以及没有较高的重复精度, 就不能发挥激光去重的优点。因此, 要提高激光动平衡机的精度必须具备以下三个基本条件:

(a) 机械振动系统是动平衡机的主要部分。机械振动系统要有最佳的结构参数, 使得两个校正面得到有效的分离, 传感器对转动工件不平衡量的反应要灵敏、可靠和信噪比高。

(b) 设计的电子线路, 要尽量提高对信号频率的选择性和减小转动工件转速变化的影响。实践证明, 相敏放大器能较好地满足这些要求, 测量出精确和可靠的不平衡量的相位, 及时触发激光器。

(c) 激光脉冲要有较高的去除量, 并且当剩余不平衡量较小时, 电子线路能自动而精确的控制激光器, 使其输出能量自动减小。

三、结 论

1) 随着激光重复精度的提高, 在今后的平衡中, 应尽量用非调 Q 去重法来代替调 Q 去重法。用弧状去重平衡(当然弧度是较小的)来代替点状去重平衡。

2) 在目前使用固体激光器情况下, 对于转速小于 24000 转/分不平衡量小于 15 毫克的转动工件, 宜采用高电压低电容的小弧度去重来实现平衡, 既简单, 又有较高的去除率。

3) “两级平衡法”对于提高生产率和平衡精度是有效的。在转动工件的不平衡量小于 30 毫克的情况下宜采用此法。

4) 横向激励大气压二氧化碳激光器输出的激光脉宽为 0.5~10 微秒, 很适宜于转速范围为 24000~60000 转/分的转动工件实现极小弧度去重平衡, 是一种很有实用价值的激光器, 对今后发展高精度、高生产率的激光动平衡机带来了有利条件。

参 考 资 料

- [1] W. Holzapfel, *Laser + Elektro-Optik*, 1973, 3, s. 25~31.
- [2] A. Jacques Beaulieu, *Electro-Optical Systems Design*, No. 5, 1973, p. 36~37.
- [3] J. F. Ready, *Effects of High-Power Laser Radiation*, 1971, p. 109~114.
- [4] "Selected Papers On Laser Applications in Industry" 1971, 8, p. 26.
- [5] "United States Patent Office" 3, 482, 075.
- [6] "United States Patent Office" 3, 472, 998.
- [7] 岛川正宪: "机械の研究", 24, No. 1, 1972, 39~40 页
- [8] Un-Chul Paek and Francis P. Gagliano, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, QE-8, No. 2, 1972, p. 112~119.
- [9] *Control Engineering*, 17, No. 3, 1970, p. 55.
- [10] *Steel*, July. 25, 1966, p. 28~29.