

辨率以及激光的脉冲宽度。此外,也与回波信号的强度、接收器件(如光电倍增管)的频率响应等有关。

另外,根据对地面目标的测距试验,亦可以估计系统的测距精度。我们曾对一个目标(11.576公里,有反射器)进行了32次测距,对回波进行人为衰减,用脉冲前沿不同的部位去关闭计数器,测距的距离值的弥散(均方差)为 ± 2.4 米。

因此我们认为,本系统目前的测距精度约为2~3米左右。

以上试验是很初步的,有待改进。工作中得到紫金山天文台人卫室的大力协助,特表感谢。

参 考 资 料

- [1] C. G. Lehr; *IEEE. Trans. Geosci. Electron.*, **GE-7**, 261 (1969).
- [2] T. E. Megumigal *et al.*, NASA N75-30541(1975)
- [3] Cospar Information Bulletin, No. 76(1976).
- [4] *A. W & S. T.*, **102**, No. 19, 36(1975).
- [5] J. W. Marini, NASA N74-15150(1974).
- [6] D. L. Zanter *et al.*, NASA N76-18435,(1976).

应用激光快速遥测热轧钢带的厚度

丁士豪 华伟亢

(上海交通大学激光研究室)

目前国内不少单位应用电感、电容、射线及微波等多种方法测量各种板材的厚度,但 these 方法都有些共同的弱点,譬如:对材料的性质、温度、轧制过程中材料跳动情况以及轧制速度都有较严的要求,其适应性也不大。尤其在热轧钢带现场高温、快速轧制、钢带剧烈弹跳等恶劣条件下更难以采用这些方法来测量厚度。我们经过一段时间的摸索和试验,发现采用激光测厚方法,能适应其他测厚技术难以适应的热轧测量的条件,适用范围也较广。与其他方法相比,应用激光测厚具有其独特的优点:

(1) 测量速度快。允许被测物以5米/秒左右的速度通过,能在被测物快速运动状态下自动、迅速测出厚度。

(2) 被测物跳动对测量影响较小。被测钢带上下弹跳在25~100毫米(甚至更大)范围内仍能正常地进行测量。

(3) 测量范围较宽。可测0~70毫米不同厚度的材料(以被测材料上下跳动距离不超过最大测量范围为限)。适当选择系统,也可测更厚的材料。

(4) 不受被测材料的温度影响。对冷轧钢带或热轧炽红钢板均能适应。

(5) 测厚精度较高。适当选择系统,相对精度可在 $10^{-2} \sim 4 \times 10^{-5}$ 数量级。

(6) 对被测材料的适应性较强。能用于热轧、冷轧测量各种金属或非金属、绝缘板材、带材等的厚度。

一、基本 原 理

应用光电原理进行测厚是近年来采用的一种较新技术。早期曾采用一种三角测量法,但在许多情况下,这种方法往往受到结构的限制,系统较复杂,且测厚精度也不大。现在

介绍一种改进的三角测量技术——激光偏转法。这种方法再经过适当的信号处理，测厚精度可比一般的三角测量法提高几个数量级。

图1表示激光偏转法测量厚度的原理。这种方法采用了一个激光束偏转器，使激光束作扫描偏转以达到测量目的。

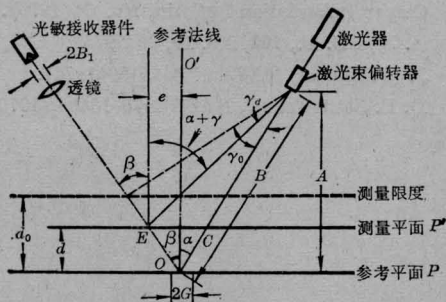


图1 测厚原理

初始时，激光管发射的激光束未经偏转器偏转，直接以入射角 α 射向参考平面 P 上的 O 点，光斑直径为 $2G$ 。预先调整使 O 点正好处于透镜 L 的光轴上。光轴与法线 OO' 夹角为 β 。激光光斑在 O 点处漫反射，在光敏接收器件的光敏面上成像，像斑大小为 $2B_1$ 。当测量平面由参考平面 P 平行位移至 P' 位置时，位移距离为 d ，而激光斑将由 O 点移至 C 点，发自 C 点的散射光不再在光

敏器件上成像。此时，若用偏转器将激光束转过 γ_a 角，使激光在被测平面 P' 上的光斑由 C 点移至光轴上的 E 点，激光斑又重新在光敏器件上聚焦成像。转角 γ_a 与距离 d 有一定的关系。若激光束最大偏转角为 γ_0 ，则可推算得，厚度的测量范围（即测量极限）为：

$$d_0 = B \frac{\sin \gamma_0 \cdot \cos \beta}{\sin(\alpha + \beta + \gamma_0)} \quad (1)$$

如果选择 $\alpha = \beta = 45^\circ$ ；并当最大偏转角 γ_0 适当小时

$$\text{由: } \quad \text{tg } \gamma_0 \approx \bar{\gamma}_0 \quad \text{及} \quad B = \frac{A}{\cos \alpha}$$

则可得：

$$d_0 = A \cdot \bar{\gamma}_0 \quad (2)$$

$\bar{\gamma}_0$ 是用弧度表示的最大偏转角， A 则为偏转器与参考平面间的距离。此式表明：在一定条件下，测量平面平行位移的距离 d ，是与使激光斑重新在光敏器件上聚焦成像时激光束所需偏转的角度 γ_a 成正比的。

二、测量装置

整个测量系统如图2所示。采用一般的氩-氟激光器作激光源。光敏接收器件可用光敏二极管、光敏三极管或光电倍增管等。由于电光偏转晶体国内还在研制中，偏转角

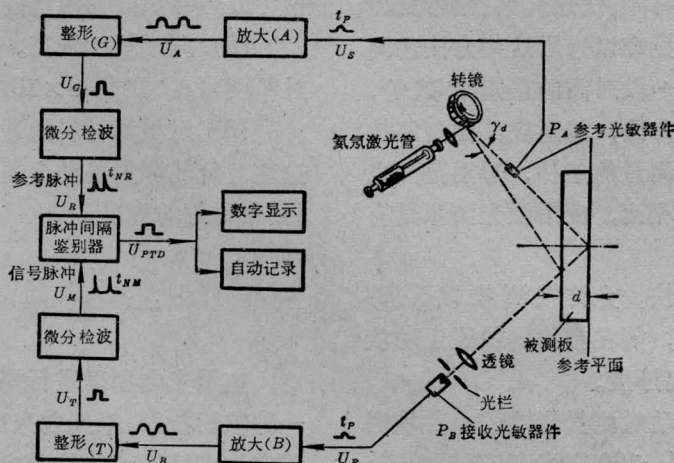


图2 激光束偏转法测厚原理方框图

度不大,不能满足偏转法测厚对偏转角度 $4\sim 5^\circ$ 的要求。为此我们用转镜作为激光束偏转器,由恒速同步电机带动柱形多面体转镜,入射的激光束经镜面反射作扫描偏转。

根据式(2),测量平面的位移 d 决定于激光束偏转角度 γ_a 。图2所示的系统,系将偏转角度 γ_a 转换为电量后进行测量,并经过信号处理,以提高测量精度。

为了计量偏转角 γ_a ,要在偏转角为零处取得一参考信号,它相应于被测平面处于参考平面处(即:被测板厚度 $d=0$)。为此,在激光束起始偏转的地方放一参考的光敏器件 P_A (见图2)。当未经偏转的激光束射至它的光敏面上时,产生一个参考脉冲 U_s 。在转镜以恒速运转时,入射的激光束经转镜的镜面反射,连续进行扫描,每扫过参考光敏器件 P_A 一次,就输出一参考脉冲,它相应于测量的起始点(即:转角 $\gamma_a=0$)时的标志。测量时,当激光束转了某个 γ_a 角通过一个测量点时,它就在光敏接收器件 P_B 上成像,产生一个宽度为 t_p 的信号脉冲 U_p 。参考脉冲与信号脉冲的时间间隔就是测量平面位移的度量,或者是参考平面上某一物体厚度 d 的度量。这样,只要测出 U_s 与 U_p 这两个脉冲的时间间隔,就可知道厚度 d 了。

由于这一测量法是依据激光斑散射光在光敏器件的光敏面上成像以产生信号脉冲(或参考脉冲)的,测量点激光斑的大小对测量无疑是具有很大影响的。当激光束入射至被测平面上时,形成一直径为 $2G$ 的激光斑(见图1),它在光敏器件上散射成像,形成大小为 $2B_1$ 的光点,而光敏器件光敏面激活区的直径为 $D_p=2R_p$ (半径)。一般说,直径 D_p 比像点大小 $2B_1$ 要大得多。当激光束偏转时,激光斑以某一速度 V_p 扫过光敏面 D_p ,激光像点 $2B_1$ 在光敏面上有一段停留时间 t_p ,或者说,像点 $2B_1$ 在 t_p 时间内扫过光敏面 D_p ,使光敏器件产生一宽度为 t_p 的信号脉冲。显然,脉冲宽度 t_p 是光束偏转速度的函

数。此外, t_p 不仅取决于激光像点 $2B_1$ 的大小,而且还与光敏面直径 $2R_p$ 成正比。在激光束偏转速度、像点 $2B_1$ 及光敏面 $2R_p$ 大小均确定的情况下,激光光斑聚焦在光敏器件上这段时间 t_p 就是激光束通过每一测量点时所需的最小测量时间。处于偏转时间小于 t_p 以内的二个测量点通常是难以分辨的,其脉冲信号将重迭。

在激光束整个偏转周期 τ 内,能进行有效测量的测量点数目 ρ (或者说,分辨率)是由这最小测量时间 t_p 决定的。即,可分辨的测量点数为:

$$\rho = \frac{\tau}{t_p} \quad (3)$$

无疑,脉冲持续时间 t_p 愈大,则测量分隔点数 ρ 愈少,测量就愈粗;相反, t_p 愈小,则测量点数 ρ 愈多,测量分隔就愈精细,测量精度就相应提高。

激光束整个偏转周期 τ 是与激光束最大偏转角 γ_0 相对应的(在这段时间内激光束恰好转过 γ_0 角),反映在厚度上,则相应于测到的厚度为 d_0 (式 $d_0=A\sqrt{\gamma_0}$)。因此,每一测量分隔点能测出的厚度(最大测量精度) δ 则为:

$$\delta = \frac{d_0}{\rho} \quad (4)$$

由此可见,增加测量分隔点数可以提高测量精度(每一测量点能分辨出的最小距离 δ 减小)。但测量点数 ρ 的增加是受到最小测量时间 t_p 限制的。前已提到, t_p 与像点大小 B_1 及光敏面半径 R_p 有关。当 $R_p=B_1$ 时,物体厚度的最大测量精度只能达到激光光斑半径的大小,即: $\delta=G$ 。要进一步提高精度,必须大大减小激光光斑半径 G 。但要大大缩小激光斑弥散圆半径是困难的,即使光斑半径缩小到0.1毫米,最大测量精度至多也只能达到0.1毫米。因此靠缩小激光斑这种途径是无法大幅度提高测厚精度的。

激光偏转法测厚最终是通过测出参考脉冲与信号脉冲的时间间隔来反映厚度的。要

提高精度,必须从缩短单位测量时间着手,使测量分隔点数目 ρ 增加。既然信号脉冲宽度 t_p 是受偏转速度、光斑大小和光敏面直径等多种因素限制的,如果我们在这种测量原理的基础上,采用信号处理的方法取信号脉冲边沿时间(上升沿),则脉冲宽度将大大缩短,测量分隔点数 ρ 随即增加,测量精度 δ 就有显著的提高;而且 ρ 和 δ 这时与光敏面直径 D_p 及激光光斑 $2G$ 大小无关。

图 2 就是按照这种方法构成的原理方框图。光敏器件 P_B 发出的信号脉冲 U_p 经过自动增益控制放大器 B 达到恒定脉冲高度 U_B ,经触发电路 T 整形,变换成方波 U_T ,然后经微分、检波,取出与方波上升沿相应的正向尖峰脉冲 U_M ,其脉宽时间一般在 200 毫微秒之内 ($t_N < 200$ 毫微秒)。同样,参考脉冲 U_s 亦经相同处理,形成参考尖脉冲 U_R 。尖脉冲 U_M 和 U_R 再分别送入触发器(脉冲间隔鉴别器)内,由触发器输出同尖脉冲 U_M 与 U_R 的时间间隔相应的方波。图 3 表示测厚时各脉冲的时间关系与波形图。鉴别器输出的脉冲宽度 t_a 是个函数,在偏转角 γ_a 较小 ($\text{tg } \gamma_a \approx \bar{\gamma}_a$) 及 $\alpha = \beta = 45^\circ$ 条件下, t_a 与物体厚度成正比:

$$d = K t_a \quad (5)$$

厚度 d 可以立即通过电子计数器以脉宽 t_a 的函数读出, K 以仪器的常数标出,或经转换后

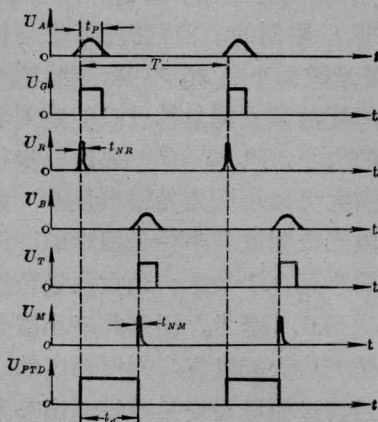


图 3 测厚时各脉冲的时间关系及波形图

直接以厚度数字显示出来。如果连续测量,信号也可用自动记录仪以曲线形式读出。

前面介绍的是以被测物始终紧贴参考平面上为基本条件的,而实际情况往往不可能如此。对于上下弹跳不定的钢板等物体,只需在被测物上下两边同时测量,得出上下两个不同 d 的量度,经电子系统迭加运算后,即可得到钢板实际厚度,以数字形式直接显示出来,从而排除了被测物上下跳动的影响。为了保证测量时上下两边的转镜同步偏转,需采用同步电源,以消除外界电网电源变动或被测物上下弹跳给测量带来不必要的误差;上下两边接收信号还需经适当的门控电路后再行运算、计数、显示。图 4 为两边测量的原理方框图。

三、试验情况

在热轧钢带的测厚现场,往往存在各种杂散光源,如车间内的日光、灯光以及炽热钢板发出的炽红强光。在一般情况下,各种背景杂散光对有效信号光的接收常有较严重的干扰,甚至杂散光强度远远超过接收的信号幅度,以致需采用一些有效措施(如光信号的调制等)来消除背景光的干扰。为了了解激光束偏转法测厚时背景杂散光对接收信号的影响,以及这种测厚技术对热轧钢带的适应

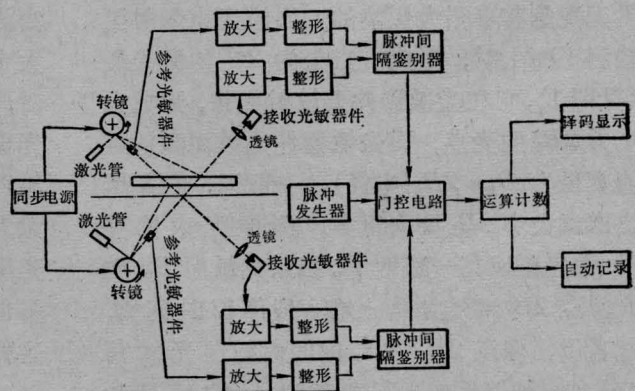


图 4 激光束偏转法测厚(两边测量)原理方框图

性,我们作了单边测量的原理性试验。具体光路如图5。用1毫瓦的氦-氖激光管作为光源,转镜则用直径 $\phi 60$ 毫米的24面体镜鼓。考虑到试验安装地位,激光束经反射镜二次反射后射向转镜。转镜则安装在可调速的伺服电机上,以试验激光束在不同偏转速度下信号接收情况。转镜与被测钢板测量点距离约0.5米。接收信号的光敏器件则用GDB-23型光电倍增管。被测激光信号经焦距 $f=62$ 毫米凸透镜聚焦,并经孔径 $\phi 0.1$ 毫米的光阑和波长6328埃窄带滤色片在光电倍增管上成像。

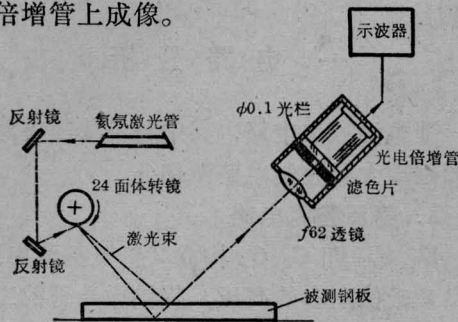


图5 激光偏转原理试验图

我们首先在室内做了一次接收试验。明亮的室内有阳光入射到被测钢板上,用连续偏转的激光束扫描被测钢板,以测试背景杂散光(日光)对被测的光信号强度的干扰大小。光电倍增管接收到输入光信号,立即输出相应的电脉冲信号。试验发现日光的干扰很小而输出的激光信号脉冲幅度较大,甚至不加任何放大可直接将光电倍增管输出信号用示波器测试。激光偏转速度从0~600次/秒改变时,所接收到的信号波形清晰。室内日光灯照射下,灯光对接收信号的干扰也很小。

另外还做了一次热轧钢板接收试验,以判别炽热钢板发出的强烈光辐射对激光测试信号接收的影响。试验的器材仍如上,而在被测钢板的背面用乙炔焰加热。连续偏转的激光束扫描被测钢板,钢板由冷态加热至近白炽状态(约1000°C左右),用示波器接收光电倍增管输出信号。见信号脉冲波形始终清晰可辨,而此时用肉眼已无法辨见氦-氖激光

红色光斑扫描痕迹,只能看到炽热钢板发出刺眼的炽红强光。钢板在冷态时,信号脉冲幅度约为0.5伏,炽热钢板下约为0.3伏左右。偏转速度改变及被测物温度剧变时,信号脉冲幅度大小远大于强杂散光干扰幅度。

根据以上试验,足以说明这种测厚技术用于热轧钢带时能有效地接收被测信号,并排除背景光的干扰影响。

综上所述,这种测厚技术测量元件远离被测物体,测量时不同被测物直接接触;工作时双边测量,能有效地排除测厚时热轧钢带高温、强烈光辐射及急剧弹跳的影响。

这种测厚法测量速度也较快,转镜偏转速度可按需要选定。例如:选用1500转/分同步电动机带动24面体转镜,则激光束偏转速度为:

$$V = \frac{1500}{60} \times 24 = 600 \text{ 次/秒}$$

也就是说每秒对钢带测量600次,这种测量速度对于钢带5米/秒的轧制速度是完全能适应的。实际上偏转速度可按现场不同情况与要求选择。

激光偏转法测厚的精度一般在 $1 \times 10^{-3} \sim 10^{-2}$ 毫米。例如选择转速为1500转/分同步电动机,24面体转镜,其偏转速度为600次/秒。若选定转镜与参考平面间距离 A 为0.8米左右,尖脉冲宽度 $t_{NR} = t_{NM} < 200$ 毫微秒,则 d_0 为75毫米,最大测量精度 δ 达5丝。

用转镜作偏转元件会带来一定的误差,此外,激光颤噪效应,转镜加工精度以及测厚装置的加工、安装都可能引起一定的误差。

参 考 资 料

- [1] Kerr, J.R., "A laser, thickness monitor", *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-5**, p. 333-339 (1969)
- [2] V. Bodlaj, "Remote measurement of the thickness, distance and velocity of objects by means of a piezoelectric laser beam deflector" «Proceedings of the First European Electro-Optics Markets and Technology Conference», Geneva, 13-15 September 1972, p. 284