

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0412-03

# 用检流计式光学扫描器实现高速扫描

成向阳, 王 骥, 张宁波

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所 可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 光学扫描器总是被要求在一定的频率下扫描一定的角度, 而检流计式光学扫描器的最高扫描频率和扫描角度两个参量是矛盾的。用受迫振荡的二阶微分方程来描述检流计的动态特性, 从理论上分析了检流计式扫描器在正弦波扫描方式下的传递函数, 求解可知正弦波驱动函数下的扫描运动还是相同频率正弦波, 推导出扫描角度倒数平方可用频率平方的二次函数表示, 从实验上测量检流计的扫描频率和扫描角度的关系, 从而为寻找高速扫描提出依据。根据理论分析和实验数据的结果, 提出适用于小角度扫描的小反射镜设计思想, 并进行了实验验证。

**关键词** 测试计量仪器; 检流计式光学扫描器; 传递函数; 扫描频率; 扫描角度

中图分类号 TH74

文献标识码 A

## Study to Get High Frequency Scanning Using Galvanometer Optical Scanner

CHENG Xiang-yang, WANG Qi, ZHANG Ning-bo

(Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** Optical scanner is often used to scan through certain angle at certain frequency; but a galvanometer optical scanner can scan at higher frequency with smaller angle. This paper uses the second order of differential equation for damped oscillation describing the dynamic characteristic of galvanometer, analyzing the transfer function of galvanometer scanner under a harmonic driver force. The solution indicates that the scanning under harmonic drive is still a harmonic oscillation at the same frequency. The reciprocal square of scanning angle can be expressed as a function of frequency square. Measured the scanning angle under a certain frequency, accordingly providing a reference to achieve high frequency scanning. Basing on the above result of analysis and experiment, bring forward a design idea of smaller scanning reflector to fit smaller angle scanning, and carrying on experiment to prove the feasibility.

**Key words** instrument for measurement and metrologic; galvanometer optical scanner; scanning frequency; scanning angle

## 1 引言

作为技术最为成熟的检流计式光学扫描器, 在许多前沿应用中(比如激光雷达), 其技术指标相对于要求的指标还处在滞后状态。如何使用现有的光学扫描器达到尽可能高的扫描速度要求, 就需要从理论上对扫描器的动态特性等作较全面的了解, 从实验上总结扫描器可以达到的最高工作指标。

在实际应用中, 扫描角度越大, 其能达到的最高扫描频率就越低。针对这一矛盾, 本文用受迫振荡的二阶微分方程来描述检流计的动态特性, 从理论上分析了检流计式扫描器在正弦波扫描方式下的传递函数, 求解可知正弦波驱动函数下的扫描运动还是相同频率正弦波, 扫描角度倒数平方可用频率平方的二次函数表示。从实验上测量了 M3 检流计式扫描器在各种扫描频率下的扫描角度, 根据理论分析结果, 对数据进行拟合处理, 从而可以预计各频率

下的扫描角度。结论是扫描频率到 200Hz 时, 扫描角度只能达到  $\pm 5^\circ$  左右。

由于现在市场上的扫描器反射镜都是针对大角度(比如光学偏转  $\pm 30^\circ$ ) 扫描设计的。另外检流计的扫描频率与转动惯量的平方根成反比。根据这两点, 本文提出采用削减反射镜横向尺寸, 设计转动惯量小适用于小角度扫描的反射镜, 从而可以达到更高频率。

## 2 检流计式扫描器的传递函数分析

### 2.1 扫描器的传递函数

检流计的动态特性可以用受迫振荡的二阶微分方程来描述, 即

$$KI = K_s \theta + D \frac{\partial \theta}{\partial t} + J \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad (1)$$

其中  $I$  为驱动电流,  $K_s$  为弹性系数,  $D$  为转子的阻尼系数,  $J$  为转动惯量,  $\theta$  为转动角度,  $K$  为加载电流

在磁场中产生的扭矩常数。微分方程的解就是检流计的传递函数。

不考虑实际器件中一定程度地存在的扭矩与加载电流之间的非线性,也不考虑扭矩与转角之间的非线性,求解微分方程的解,即得出对应的扫描器实际扫描角位置函数 $\theta(t)$ 。

驱动电流为正弦波时: $I=I_0\cos(2\pi ft)$ , $2f$ 对应扫描频率,则微分方程的解为

$$\theta=A\exp\left(-\frac{D}{2J}t\right)\exp[j(\omega t+\phi_0)]+\theta_0\exp[j(2\pi ft+\phi)] \quad (2)$$

(2)式由阻尼振荡和等幅振荡两部分组成,只需考虑当系统随时间增加逐渐形成稳定的等幅振荡后的情况。

$$\theta=\theta_0\exp[j(2\pi ft+\phi)] \quad (3)$$

可见稳定后扫描器系统的扫描频率与驱动指令频率相同,扫描幅度为

$$\theta_0=\frac{KI_0/J}{\sqrt{[K_s/J-(2\pi f)^2]^2+(D^2/J^2)(2\pi f)^2}} \quad (4)$$

## 2.2 扫描频率和指令幅度对扫描角度影响的实验研究

暂且认为给出的扫描指令函数与经过扫描器的控制板生成的驱动函数成正比,即两者可认为等同。频率从 40 Hz 到 230 Hz 变化,指令幅度分别为  $\pm 0.75$  V,  $\pm 1.0$  V,  $\pm 1.5$  V,  $\pm 2.0$  V,测量各种情况下经过扫描器投射到接收屏上的扫描光线长度  $l$ ,从而推算出实际扫描的角度。

## 2.3 数据及误差分析

设变量  $X=(2\pi f)^2$ ,  $Y=l/\theta_0$ ,则(4)式变成

$$Y=\frac{J^2}{K^2}X^2+\left(\frac{D^2}{K^2}-\frac{2JK_s}{K^2}\right)X+\frac{K_s^2}{K^2} \quad (5)$$

把实验数据列入图 1 中,并进行最小二乘法数据拟合,可估计出几个常数的值,从而预估扫描器在各频率下的扫描角度。

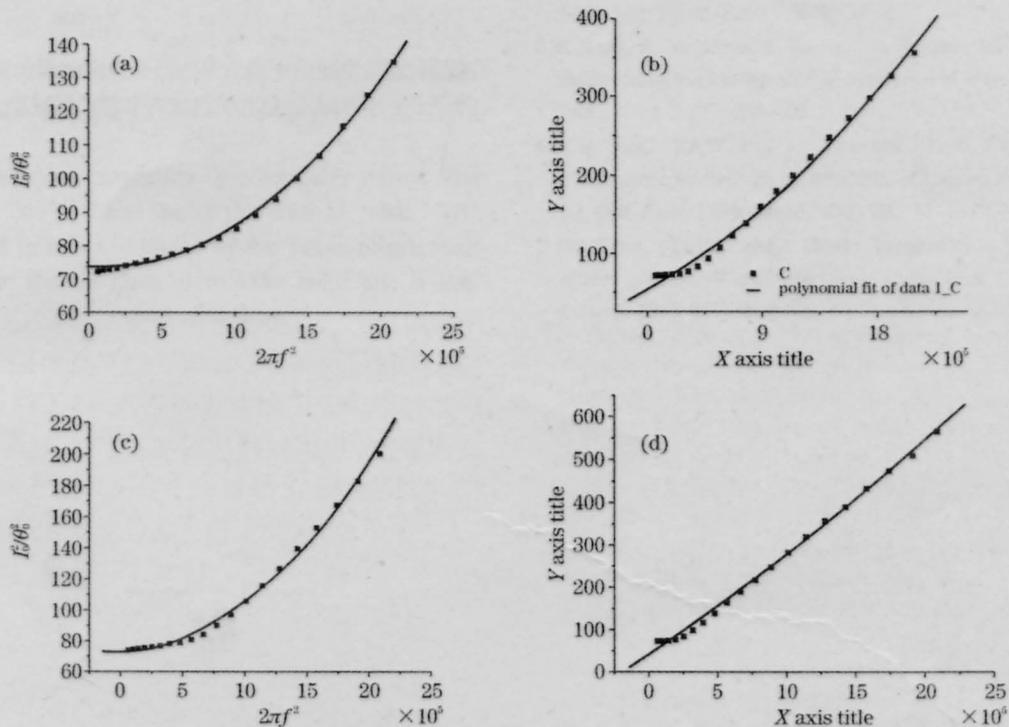


图 1 指令为  $\pm 0.75$  V(a),  $\pm 1.5$  V(b),  $\pm 1.0$  V(c),和  $\pm 2.0$  V(d)的正弦波的实验数据最小二乘法分析

Fig.1 Polynomial regression for data obtained under a  $\pm 0.75$  V(a),  $\pm 1.5$  V(b),  $\pm 1.0$  V(c) and  $\pm 2.0$  V(d) sine wave command

数据表明,在指令幅度为  $\pm 0.75$  V 和  $\pm 1.0$  V 时,实验值拟合得很好。幅度增大时,拟合曲线出现一定偏差。可能是指令幅度增大时,转子的阻尼变大引起的。

由于实验进行的是单次测量,长度测量时采用坐标纸做标记,因红光打在纸上很耀眼,端点不能非常明确,不可避免会造成误差。每次长度测量的误

差应在 10 mm 范围内。测量到的长度范围为:600~2500 mm,根据推导各点的误差不一样,频率越高,误差越大。

## 3 高速小角度扫描的实现

### 3.1 扫描频率与转动惯量的关系

振镜的扫描频率取决于固有振荡频率,其固有

振荡频率越高,振镜扫描频率的上限也越高。振镜带反射镜时的固有振荡频率 $f_n$ 取决于转子转动惯量与反射镜转动惯量之和 $J$ 和转子本身的弹性系数 $w$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{w}{J}} \quad (6)$$

根据(6)式分析,当一个扫描器所带反射镜的转动惯量变小时,其最高扫描频率随之上升。

以 Cambridge Technology 公司提供的的数据为例,同一扫描器配带不同尺寸反射镜时,扫描频率和转动惯量基本满足关系式(6)。

### 3.2 小反射镜扫描

市场上的扫描器都是针对大角度扫描设计的,其反射镜的尺寸都是考虑某一尺寸光束做 $\pm 20^\circ \sim \pm 30^\circ$ 扫描偏转时不超出镜面。这就要求反射镜尺寸较大,比如驱动 20 mm 光束偏转 $\pm 20^\circ$ 时光斑覆盖范围在 20.00 mm $\times$ 34.87 mm 椭圆;偏转 $\pm 5^\circ$ ,则光斑覆盖实际尺寸在 20.00 mm $\times$ 26.11 mm 椭圆。

根据以上计算设计加工的 20 mm 光束适用的小反射镜,转动惯量比相同光束适用的产品降低一半,根据所用扫描器转子惯量的大小,扫描频率均有不同程度的增加。也可用于转子惯量较小的扫描器,以达到更高的扫描频率。