

# 用激光测量电机瞬态特性的新方法

孙渝生

(上海激光技术研究所)

## 提 要

本文提出采用激光多普勒测速技术测量微电机启动特性的新方法, 简要介绍它的基本原理, 着重讨论了测试精度及跟踪速率等若干问题, 并进行了初步实验。这一方法的优点是不必向电机施加负载, 测量精度高, 测试时间快。

## 一、工作原理

通常, 可用激光多普勒测速仪测量旋转物体的转速, 但这只适用于测量它们正常运转时的转速, 而无法测出它们启动时的速度变化。本文介绍的方法能测量微电机启动时的瞬态过程, 测出这一段时间内角速度的变化, 其测试原理图见图1, 激光束通过以 $\omega_s$ 旋转的圆盘光栅, 产生零级及各级衍射光, 仅采用 $\pm 1$ 级衍射光, 将光束分为强度相等的两束, 它们对于入射光将分别产生频移:  $\pm f_s = N\omega_s$ , 其中 $N$ 为光栅圆周上的总刻线数。这两束光经 $l_1$ 和 $l_2$ 会聚至被测的新轴表面, 会聚角为 $\theta$ , 它们的散射光由 $l_3$ 和 $l_4$ 收集, 送至光电倍增管阴极面。

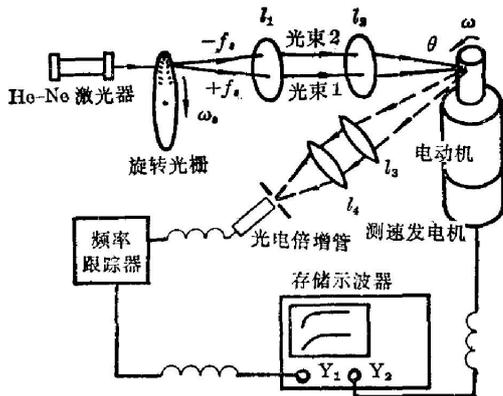


图1 微电机转速启动特性的测试装置原理图  
Fig. 1 Principle diagram of the device for measuring the starting-characteristic of the micromotor

在微电机启动之前, 转轴静止不动, 此时两束光本身之间相差 $2f_s$ 的频率, 所以转轴散射光之间也具有频差 $2f_s$ , 由于光外差作用, 光电倍增管将差拍频率为 $2f_s$ 的光信号转为电流信号, 这时频率跟踪器输出的模拟电压所对应的角速度为零。频率跟踪器工作时, 这一模拟电压正比于输入频率, 其数值随角速度线性增加。

当供电回路接通、电机启动后, 转轴开始转动, 由于多普勒效应, 接收到的频率中将再添加一个频率 $f_D$ , 即

$$f_0 = 2f_s + f_D, \tag{1}$$

$f_D$ 称为多普勒频率,  $f_D = \left(\frac{2}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2}\right) \cdot R\omega$ , 其中 $\lambda$ 为激光波长,  $\omega$ 为转轴角速度,  $R$ 为转轴半径。由于 $f_D$ 从零开始连续上升, 所以式(1)所示的频率就能从 $2f_s$ 开始, 然后被牢固地跟

踪,直至稳速值止,于是跟踪器的输出模拟电压就能反映微电机转速上升时的变化规律。

## 二、测试精度

微电机启动特性如图 2 所示,一般是一阶时间常数的过渡过程,在本文所述的测试方法中,它的测试精度主要取决于三个因素:频移量及其稳定性,跟踪精度和被测转轴同心度。

频移量的精度取决于旋转光栅转速的稳定度,采用磁滞同步电机作为拖动源,可使转速稳定度高于 0.4%。

频率跟踪器的跟踪精度由其环路参数决定,图 3 为它的方块图及其传递函数,其中  $K_A$ 、 $K_B$ 、 $K_D$ 、 $K_v$  为比例系数,  $T_A$  及  $T_0$  为其中两个惯性环节的一阶时间常数,  $\Delta f_0$  是输入频率的变化增量,  $\Delta f_v$  为跟踪器输出频率增量,环路工作时,  $\Delta f_v$  紧随  $\Delta f_0$  而变化,这一系统的开环传递函数为  $H_0(s) = \frac{-K}{(T_0s+1)(T_As+1)}$ , 其中  $K = K_A K_B K_D K_v$ ,  $s$  为拉普拉斯算子,可以推得:其闭环传递函数为:  $H_c(s) = \frac{\Delta f_v}{\Delta f_0} = \frac{K}{(T_0s+1)(T_As+1) + K}$ , 令式中  $s=0$ , 得静态传递系数:

$$\frac{\Delta f_v(0)}{\Delta f_0(0)} = \frac{K}{K+1} \quad (2)$$

在设计跟踪器时,  $K$  的取值很大,一般约为 500,所以式(2)表明:当输入一频率变化值  $\Delta f_0$ , 跟踪器输出变化  $\Delta f_v$ , 两者基本相等。

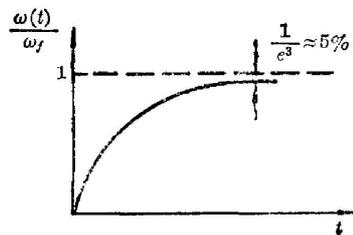


图 2 微电机转速特性  
Fig. 2 Starting characteristic of the micromotor

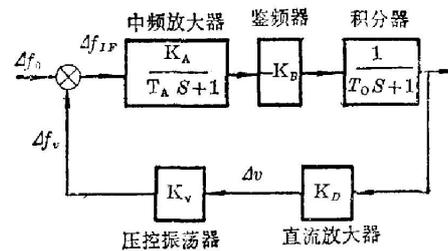


图 3 频率跟踪器环路方框图  
Fig. 3 Block diagram of the frequency tracker

又可推得,跟踪器的相对误差为:

$$\frac{\Delta f_{IF}}{\Delta f_0} = \frac{-[T_0 T_A s^2 + (T_0 + T_A)s + 1]}{T_0 T_A s^2 + (T_0 + T_A)s + (K+1)}$$

令式中  $s=0$ , 得

$$\frac{\Delta f_{IF}}{\Delta f_0} = \frac{-1}{K+1} \quad (3)$$

若取  $K=500$ , 则式(3)表明:跟踪器频率跟踪的精度可望高于 0.2%。然而,在测微电机启动特性时,  $V \propto f_v$ , 被测转速由模拟电压  $V$  表征。实际上,  $V$  与  $f_v$  的转换由压控振荡器实现,它的输出频率正比于输入电压,所以测量精度与压控振荡器的线性度有关,按目前的电子技术,可以使它的线性度优于 1%,这样,对跟踪器输出的模拟电压而言,环路跟踪精度可达 1%。

影响测量精度的另一因素为被测电机转轴的同轴度,即径向跳动,转轴的偏心使实际的转动半径变化,从而带来测量误差,由于一般微电机旋转时的径向偏差可控制在  $20\mu\text{m}$  之内,这样,对于几毫米直径的转轴来讲,所引起的转速测量误差亦可望小于 1%。

综上所述,考虑几种影响测量精度的因素,可以预计:总的角速度测量精度可望高于 2~3%。

### 三、跟踪速率

在测试过程中,测量仪器能否响应被测角速度的变化,主要取决于跟踪器的跟踪速率。据前所述:当输入信号频率  $f_0$  变化时,跟踪器输出模拟电压亦成比例地跟着变化,由图 3 可以推导:环路在大幅度频率调制输入时,最高跟踪频率为:  $f_{k\max} = \frac{K_0 K_D K_v}{4K_0 f_{D0} T_0}$ , 其中  $K_0$  为输入信号频率调制系数,  $f_{D0}$  为输入信号平均频率,  $T_0$  为积分器时间常数,  $K_0$  为频率鉴别器中鉴相器的相位鉴别灵敏度,其值包含于  $K_B$  之中。

上式表示:跟踪器最大跟踪频率反比于积分器时间常数  $T_0$ ,但在设计环路时,为使跟踪系统处于临界阻尼状态,使过渡过程足够快而无超调,应满足不等式:  $\frac{T_0}{T_A} > 4K$ , 所以  $T_0$  的减小受到限制。一般为满足各种速度范围的测量,常把跟踪器分为几个频段,工作频率高的频段其  $T_0$  值小,工作频率低的频段其  $T_0$  值大,所以不同的频段有不同的最高跟踪频率。表 1 列出了国内外常用频率跟踪器各频段的频率范围及最大跟踪频率,从表中可见:频率高的频段仪器的跟踪能力强,在第 5 频段,仪器就能响应毫秒级的变化速率,足以跟踪一般微电机的角速度上升速率,所以在测试时,应依照被测电机的稳定转速,适当选择光学系统中的  $\theta$  角及频移量  $2f_s$ , 使得最高被测频率  $(2f_s + f_{D\max})$  及最低被测频率  $2f_s$  均位于某一恰当的频段之内,此频段的跟踪能力应能满足跟随性的要求,能紧跟电机角速度的上升速率,同时,  $2f_s$  应略高于频段最低工作频率,而稳态转速所对应的  $f_{0\max}$  最好略低于该频段的最高工作频率,这样既保证测试精度,又最大限度地利用各频段宽广的测量范围,以得到高分辨率角速度上升速率的特性曲线。

表 1 频率跟踪器频段、大讯号跟踪频率极限及扫描速率

Table 1. Frequency range tracking frequency limit of large signal and sweeping rate of the frequency tracker

频 数	频 率 范 围	跟 踪 频 率 极 限	扫 描 速 率
1	3~15 kHz	3 Hz	52.5 Hz/ms
2	10~50 kHz	9.75 Hz	600 Hz/ms
3	30~150 kHz	30 Hz	5.25 kHz/ms
4	100~500 kHz	97.5 Hz	60 kHz/ms
5	300 kHz~1.5 MHz	300 Hz	525 kHz/ms
6	1~5 MHz	975 Hz	6 MHz/ms
7	3~15 MHz	3 kHz	52.5 MHz/ms

## 四、实验及结果

根据图 1 所示的测试装置原理图来布置光路和信号处理系统, 对一个微电机的启动特性进行了测试, 其中  $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ ;  $N = 7560$ ;  $\omega_s = 3000 \text{ rpm}$ ;  $\theta = 7^\circ 13.2'$ , 被测微电机型号为 Escap28。

用以上光路及仪器测得的角速度上升曲线由存储示波器记录并拍摄成图 4 的照片, 其上面轨迹为测速仪所测得, 下面轨迹为同轴测速发电机所测得, 从图 4 可见: 两条角速度上升曲线几乎完全一致。

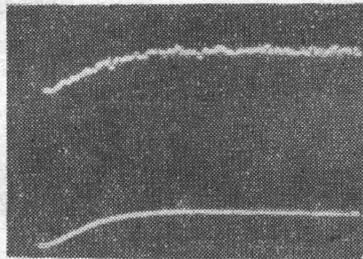


图 4 测速仪(上面轨迹)及同轴测速发电机(下面轨迹)测得的角速度上升曲线

Fig. 4 The rising curve of angular velocity measured by LDV (upper) and generator (lower)

理论和实验均表明: 这一方法将是一种有前途的测试手段。

## Measurement of the transient characteristic of motor by laser Doppler velocimetry

SUN YUSHENG

(The Shanghai Institute of Laser Technology)

(Received 4 July 1983)

### Abstract

This paper offers a new method for measuring the starting characteristic of the micromotor by laser doppler velocimetry. Its basic principle is discribed briefly. Some problems such as the measuring accuracy and tracking rate are emphasized and preliminary experiment is described.

The advantages of this method are that it is unnecessary to load the micromotor, the measuring accuracy is high and the measuring process is fast.