

# 微型机械旋转运动动态参数测试仪研究

杨近松 张二星

(中国科学院长春光学精密研究所, 长春 130022)

**摘要** 在“微型机械旋转运动动态参数测试仪”研制过程中采用微动光阑提取微电机动态信号,此微动光阑连续可调,直至闭合,其微调量比普通光阑小几倍至一个数量级,可提取光束直径在0~2mm以内的光信号,再配以光敏接收器的选择和部份机械结构的设计,成功地实现了微弱动态信号的提取,这对尚处于摸索阶段的微图形动态测量具有重要意义。

**关键词:** 微机械; 动态测量; 微弱动态信号提取; 微动光阑; 光敏接收器

## 1 引言

微电机作为典型的MEMS一直为微机械领域研究的热点,许多从事微机械研究的国家往往以微电机为范例来显示其微机械发展的水平和实力,目前,国内外微电机系统在设计原理和制作技术上取得了一定的进展,但在微电机动态性能测试方面开展的工作并不深入,报导也少。为此,中科院在研制微静电马达过程中建立了“微机械旋转运动动态参数测试技术”的课题,并将此课题列为“八五”重点项目,由长春光机所负责研制“微型机械旋转运动动态参数测试仪”。这对于我国开展微电子机械系统的研究中关于微电机、齿轮、曲柄等构件旋转运动特征的探讨具有重要意义。目前,国外尚未发现有关微型机械动态参数测试仪的研制报导,大多数微电机的动态测量只是处于实验室阶段,而这项课题的研究在我国则属首次。微电机转子转速的检测是实现微机械电子系统中闭环控制的关键。国外多采用片外成像检测法测量微电机转速,清华大学通过在微马达转子下面集成光伏器件实现了对微马达转速的片内检测。在研制“微机械旋转运动动态参数测试仪”过程中以微弱光电动态信号的提取为主要研究任务。

## 2 微电机动态参量测量原理

微电机动态测量的特点在于:1)微小目标;2)动态测量。就要求微电机动态测量系统具有无接触测量和较强的噪声免疫能力。

考虑到微电机动态测量的特点,我们将反射式光电转速测量装置与图像跟踪器件组合,组成了微电机动态参量测量系统,其测量原理见图1。

光源光线经转向镜 1 至目标,反射的光被目标调制成为光脉冲信号,经转向镜 2 分为两路光束,一路进入光敏接收器,形成电脉冲信号,由计数系统接收,计数并测时间,求得转速,另一路光束则进入 CCD 摄像机,对微电机动态过程实时测量。

### 3 测量装置的设计与选择

从微电机动态测量原理图可看出,测量装置的设计与选择包括光学系统、测速标记、光敏接收器、图像跟踪器件。

#### 3.1 光学系统

我们选用江南光学仪器厂生产的 XJZ—6 正置式金相显微镜作为测量系统的光学部份,利用该显微镜可在反射光照明下进行明场观测与摄影。图 2 给出了该显微镜反射照明系统图。由光源发出来的一束光线经聚光镜会聚在孔径光阑叶片上,再经第一透镜 4、第二透镜 5、平面半镀铝反射镜 6 到第三透镜(7、8)至物镜照射在试样表面,经试样反射回来又进入物镜、第三透镜(7、8),透过平面半镀铝反射镜 6、补偿透镜 9,一路经转向棱镜 10 到达目镜 15 的焦面上,另一路经棱镜 11 至接收像面。该显微镜所用光源为 12V50W 钨卤素灯。

#### 3.2 测速标记

我们模拟实际情况制成各种尺寸的测速标记,其中常用的为  $6 \times 6 \mu\text{m}^2$  标记,标记为金膜,背景为抛光的硅或二氧化硅。

#### 3.3 图像跟踪器件

采用这部份装置的主要目的是对低速回转运动和任意曲线运动实时测量,由于 CCD 摄像机具有体积小、重量轻、灵敏度高优点,可方便地与光学显微镜组合在一起使用,我们选用高灵敏度、高分辨率的 CCD 面阵列作为目标动态实时测量器件,其主要参数为:响应时间 50 帧/秒;最低照度 0.02 勒克司;分辨率 600 个电视行。

#### 3.4 光敏接收器

##### 3.4.1 像面光能量计算

探测器接收光的强弱决定于像面照度,照度表示被照明的表面单位面积上所接受的光能量,在均匀照明下,公式表示为:

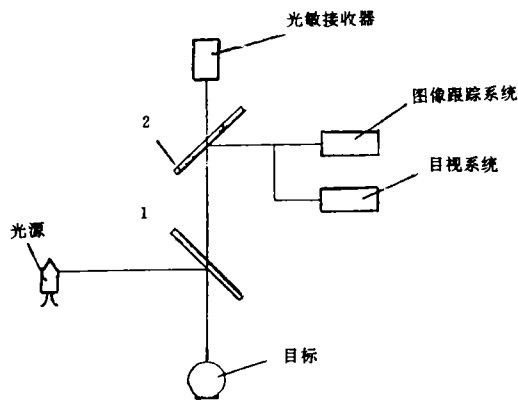


图 1 微马达动态测量系统光路图

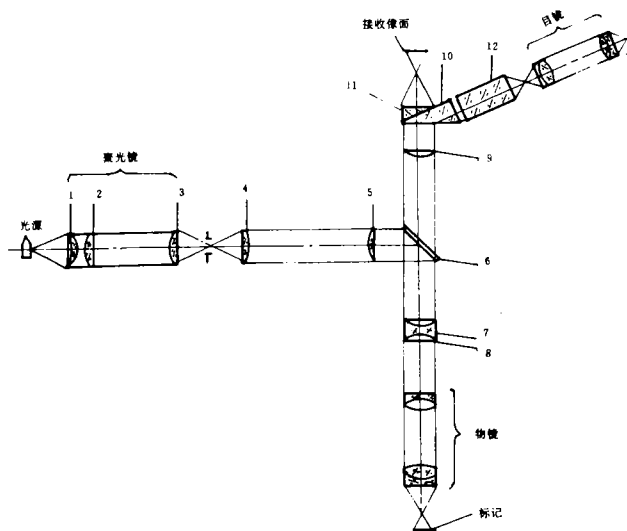


图 2 XJZ—6 正置式金相反射照明系统

$$E = F/S$$

式中  $E$  为光敏面照度;  $F$  光通量;  $S$  光照面积。

根据上述照度原理, 计算了光敏接收器、CCD 摄像机接收像面处照度值。对照光学系统图,  $H=36$ ,  $l=30$ , 具体计算数据见表 1。

从光源发出的总光通量, 由  $\Omega_1$  (聚光镜对光源所张立体角)、 $\tau_1$  (光源至物面的光学系统透过率) 决定到达物面的光通量, 以物面的标记作光源, 由  $\Omega_2$  (标记对物镜所张立体角) 与  $I_2$  (标记反射光强) 得出其反射的光通量, 再由  $\tau_2$  (标记至光敏接收器像面处透过率)、 $\tau_3$  (标记在 CCD 相机像面处透过率) 决定到达光敏接收器像面与 CCD 相机像面光通量, 由照度公式  $E = F/S$  得出:

光敏接收器像面照度  $E = 11.28$  勒克司

CCD 摄像机像面照度  $E = 4.3$  勒克司

表 1

部件名称	材料	透镜厚度和棱镜展开厚度	与空气接触面数
聚光镜	冕	8	2
	冕	1	2
	冕	1	2
透 镜	冕	4	2
	冕	3	2
	冕	1	1
	冕	2	1
	冕	2	2
40 物镜	冕	2.33	2
	冕	3.84	2
	冕	3.20	2
	冕	2.80	2
	冕	2.90	2
半反射平面镜	冕	1.14	2
补偿镜	冕	3	2
转向棱镜	冕	35.51	2
	冕	16	2
双目棱镜	冕	66	2
10×目镜	冕		
接目镜 1	冕	2.5	1
	冕	4.9	1
场镜	冕	3.14	2

### 3.4.2 光敏接收器选择

光敏接收器是将光信息转换为电信号的一种器件, 它将决定整个光电系统的灵敏度、精度、动态响应等。从微图形动态测量角度出发, 在光谱响应、时间响应、灵敏应、噪声等方面综合考虑, 选择光敏接收器。为便于光敏接收器选择, 表 2 列出了常用光电器件的主要参量。

在频率响应满足系统要求下, 选择增益高的光敏器件对提高系统灵敏度有益。光敏三极管具有较高的内部增益, 其感光面积小, 电路结构简单, 成体低, 另外光敏三极管的外形尺寸和质量是十分小的, 而与其它种类的光电器件相比较, 具有相当大的优越性, 这也是允许它可以成功地应用于本测量系统的原因所在。

我们选用的光敏三极管为 30U52, 其光照特性如图 3, 由光能量计算结果得出光敏三极管接收像面处光照度  $E = 11.28$  勒克司 ( $40\times$ ), 由图 3 知, 此时像面照度值处于光敏三极管线性

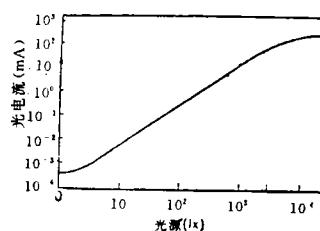


图 3 光敏三极管光照特性曲线

工作范围内。

表 2 常用光电器件的主要参量

类 型	光谱范围( $\mu\text{m}$ )	灵敏度(A/W)	响应时间(S)
硅光敏二极管	0.4~1.1	0.4~0.6	$10^{-9}\sim 10^{-7}$
硅光敏三极管	0.4~1.1	20~50	$10^{-6}\sim 10^{-5}$
硅光电池	0.4~1.1	0.18~0.3	$10^{-6}\sim 10^{-3}$
光电倍增管	紫外~远红外	1~100	$10^{-7}$
光电位置敏感器	0.3~1.1	0.5~0.6(900nm)	$10^{-6}\sim 10^{-5}$
光敏二极管阵列	0.4~1.1		较长
CCD 成像器件	0.4~1.1		较长

#### 4 微弱转速信号提取

在光电探测过程中,由于目标微小,使信号光被淹没于杂光噪声中,我们采用的方法是在光敏接收器前设置光阑,消除杂光,但普通光阑片数多、孔径大、调节量不够小,因此自行设计了微动光阑。此光阑的设计思想有三点:1)能实现微量调节;2)光阑叶片尽可能少;3)光阑能处于完全闭合状态。基于以上设计思想,微动光阑结构原理如图 4。微动光阑与普通光阑的不同之处在于光阑片形状上,它是由 6 片呈对称分布的光阑片组成,在小孔微调的情况下,光孔为近似于圆的正六边形,使光均匀入射。微动光阑的动作原理与普通光阑相同。此光阑的最大光孔直径为 2.2 mm,由活动环上的限位螺钉 6(图 6)来实现。光阑的最小孔径理想值为零。

通过上述设计的光阑,可实现光孔径值连续可调,微调量在 0~0.0864mm 范围内单一变化,并能实现孔径值趋近于零。为便于实际应用中调节光阑,本文经粗略计算得出活动转角  $\theta$  与光孔面积  $S$  及光孔半径  $r$  之间的关系,具体数值见表 2,普通光阑活动环每转  $1^\circ$ ,微调量  $\Delta r$  为零点几毫米,这要比表 3 所列数值高几倍至一个数量级,可见我们设计的光阑微动效果是明显的。

微动光阑设计是整个测量系统的关键,它不同于一般的置于探测器前的小孔光阑,它的光孔半径能实现连续可调直至闭合,可让  $\Phi 2\text{mm}$  以内不同大小的信号光束通过,能有效地截取杂光,提取信号。

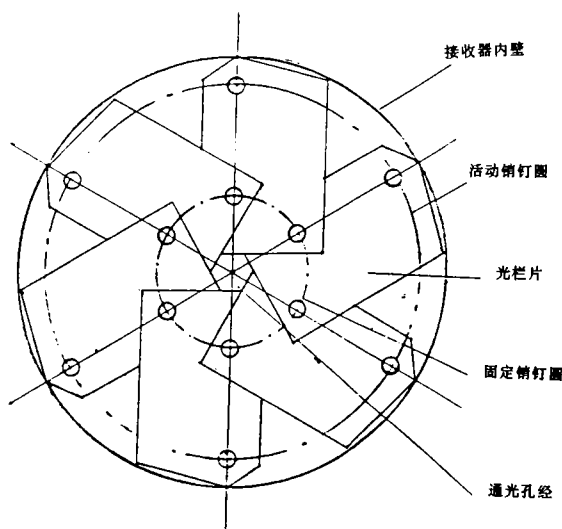


图 4 微动光阑结构原理

表 3 微动光阑使用数据表

$\theta^\circ$	$r(\text{mm})$	$\Delta r(\text{mm})$	$S(\text{mm})$
$\theta^\circ$	1.1	0.01/1°	3.80
5°	1.049	0.01/1°	3.38
10°	0.897	0.05/1°	2.31
15°	0.650	0.05/1°	1.00
20°	0.313	0.07/1°	0.21

## 5 信号处理方法

目前的数字法转速测量系统中,处理转速信号的脉冲数字电路一般有两种类型:测量频率和测量周期。测频法适合于测量频率较高的信号,测周法适合于测量频率较低的信号,因被测电机的额定转速在 50~5000r/min 范围内,故转速信号处理方法采用测周法。

整个信号处理系统的控制由单片机来完成,利用 A/D 转换将信号数字化,确定电机运行过程中的转速,根据需要输出结果和打印动态曲线,测试数据可送入微机的进行动态分析,在此基础上还能进一步确定电机运行的角位移量  $\theta(t)$ 、角速度  $\omega(t)$ 、角加速度  $\varepsilon(t)$  等动态参量。

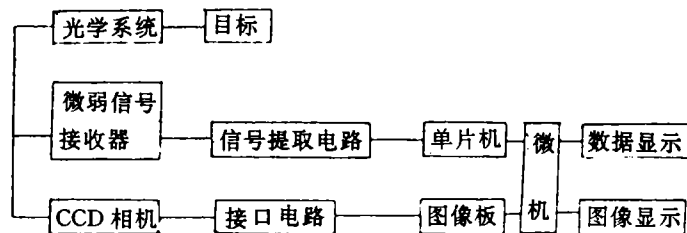


图 5 微马达动态参量测量系统原理框图

综上所述,微马达动态参量系统用图 5 所示的原理框图来表示。

## 6 部份机械结构设计

### 6.1 光敏接收器调整

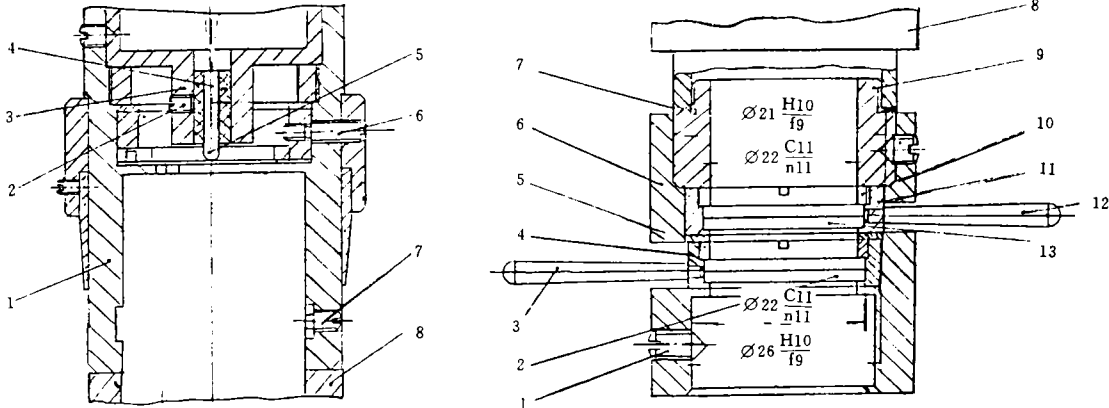
图 6 给出了光敏接收器的调整机构。光敏三极管处于圆筒状夹块 4 中,夹块 4 与接收器底座 3 之间有可调间隙,在夹块 4 两侧的调整螺钉 2,通过调节螺钉 2 可使夹块与接收器底座的间隙发生变化,以调整光敏探头对准光斑。

光敏三极管 5 的感光面应位于接收像面处,以便最大限度地利用光能,光敏三极管的轴向位置是靠调整圈 8 来调整的,通过修调整圈 8,使光敏三极管有最大输出光电流,旋转轴位螺钉 7 实现光敏接收器的轴向定位。

## 6.2 光能量调节器设计

在 CCD 相机前设计能量调节器,将过强的辐射光按一定比例,将其强度衰减到 CCD 相机的线性区范围内,能量调节器的原理是采用偏振光装置。

光能量调节器工作原理见图 7,偏振片 2 由压圈 5 固定在镜框 4 中,与手柄 3 组成了起偏器,偏振片 13 压圈 10,镜框 11 和手柄 12 组成了检偏器,可在镜座 6 内自由转动。信号通过起偏器而成为偏振光,旋动手柄 12 使检偏镜 13 与起偏镜 2 成一角度  $\alpha$ ,以调节入射光强为适合



1. 联接筒 2. 调整螺钉 3. 接收器底座  
4. 夹块 5. 光敏三极管 6. 限位螺钉  
7. 轴位螺钉 8. 调整圈

图 6 光敏接收器调整机构

1. 限位螺钉 2. 偏振片 3. 手柄(下) 4. 镜框 5. 压圈  
6. 镜座 7. 修整圈 8. CCD 摄相机 9. 联接件 10. 压圈  
11. 镜框 12. 手柄(上) 13. 偏振片

图 7 能量调节器工作原理

的照度,使 CCD 相机有良好的线性输出。通过修整修整圈 7 来解决 CCD 相机的像面坐标与工作台平面坐标重合问题,能量调节器在轴向上的位置由限位螺钉 1 调整。

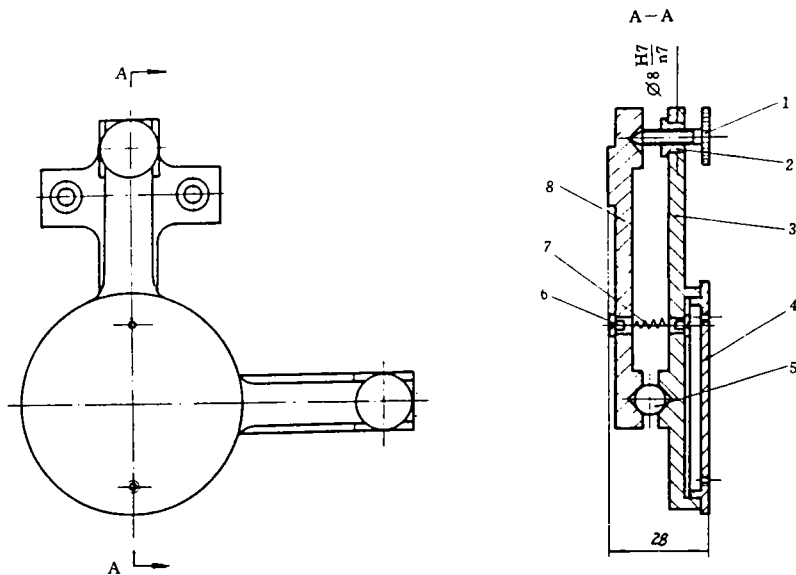
## 6.3 微调水平工作台

固定的水平工作台由于制造、安装上的误差,难免有微小倾角而使光不能垂直入射于被测电机转子的表面,因此背景照度不均匀,在微电机旋转时,形成一个附加的正弦(余弦)信号。我们在显微镜原有的固定工作台上设计安装可以微调的工作台,其结构原理见图 8。

微调水平工作台是利用杠杆原理调节水平的,钢球 5 被限定于杠杆 3 与底板 8 的锥坑内,旋动调节螺钉 1,在弹簧 7 牵引下,杠杆 3 绕钢球 5 作微小量转动,从而工作台 1 成水平。

## 7 结 论

微马达转子转速的检测是实现微机械电子系统中闭环控制的关键。根据微机械动态测量的特点(微小目标、动态测量),采用了反射式光电转速测量原理,并在此基础上建立了微马达



1. 滚花螺钉 2. 螺母 3. 杠杆 4. 工作台面 5. 钢球  
6. 固定钉 7. 弹簧 8. 底板

图8 微调水平工作台结构设计

动态参量测量系统,此测量系统具有无接触,对电机运行过程无干扰,精度高,量程广等特点。本文在重点解决微弱转速信号提取的问题上,设计了微动光阑提取法。微动光阑连续可调并能闭合,微调量以微米计(0~0.0864mm),可提取光束直径为2mm以内任意大小的光信号,与精心选择的光敏接收器合用组成了性能优良的微弱转速信号接收器,为实现微弱动态信号的提取起到了保证作用。

#### 参考文献

- [1]L. S. Fan, Y. C. Tai, and R. S. Muller, IC-Processed electrostatic micromotors. Sensors and Actuators. 1989, 20(1/2): 41-47
- [2]M. Mehregang, S. D. Senturia, J. H. Lang, and P. Nagarkar, Micromotor Fabrication. IEEE Trans. Electron Devices, 1992, ED-39(9): 2060
- [3]S. F. Bast, M. Mehregang, L. S. Tarrow, J. H. Lang, and S. D. Senturia, Electric Micromotor Dynamics. IEEE Trans. Electron Devices, 1992, ED-39(3), 566
- [4]K. J. Gabriel, F. Behi, R. Mahadevan and M. Mehregang, In situ Friction and Wear Measurements in Integrated polysilicon Mechanisms. sensors and Actuators, 1990, A21-A23: 184
- [5]应闰兰等编译,工程检测基础,上海:同济大学出版社,1987
- [6]蒋筑英等著,光学系统成像质量评价及检验文集. 中国计量出版社,1988
- [7]刘振豆编,光电技术. 北京:北京理工大学出版社,1990
- [8]史锦册等编著,光电子学及其应用. 北京:机械工业出版社,1991

## Study on Instrument of Revolving Micromachine Dynamic measurement

Yang Jinsong, Zheng Erxing

(*Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of sciences, Changchun 130022*)

### Abstract

In accordance with the measuring characteristic, a scheme of untouched measurement based on the optoelectronic measurement principle in reflect style is presented. The focal point of the work is drawing faint revolving signal, thus designed a precision optical fence, which may be continuously adjusted until to be closed. its fine tuning quantity is much less than ordinary optical fence (so far as to reach a order of magnitude), using this optical fence may pick up the signal that light spot diameter in range of 0 to 2mm. Adopting this precision optical fence, cooperating with choosing correctly photoelectric receiver and designing a part of mechanical structure, realized the drawing to faint revolving signal. This is importance for micropicture dynamic measurement in the stage of exploring.

**Key words:** Micromachine, Dynamic measurement, Faint revolving signal drawing, Precision optical fence, Photosensitive receiver