

# 桥梁挠度光电成像测量系统的光度学特性分析\*

陈伟民 鲁进 夏哲 朱永

(重庆大学光电工程学院, 重庆 400044)

**摘要** 根据桥梁挠度光电成像测量系统的要求, 分别对实际野外工作条件下, 系统的像面照度、成像对比度等光度学特性进行了分析、计算, 讨论了系统的发光靶标、背景光、光电数字摄像机等系统参数与环境之间的相互制约关系, 并讨论了在强烈日光条件下, 用高反射率材料代替发光靶标以提高成像对比度的可能性. 提出了桥梁挠度的光电成像测量系统设计中, 系统参数选择的光度学设计准则.

**关键词** 光度学特性; 照度; 对比度; 成像; 挠度

**中图分类号** TB133 **文献标识码** A

## 0 引言

桥梁的挠度是评价桥梁安全性的重要参数之一. 它是指桥梁上某一横截面处的形心在垂直于轴的方向发生的纵向线位移的大小<sup>[1]</sup>. 大型桥梁的建设和使用都需要对其挠度状况进行长期在线监测, 以防止突发事件的发生. 桥梁挠度的测量方法有多种<sup>[2]</sup>, 光电成像是其中非常重要的一种, 它是将发光靶标与光电数字摄像机分别安装于桥梁的被测点与固定点, 因而具有非接触、测量距离远、测量精度高的优点, 不仅可用于桥梁建设中的施工监控, 还可进行长期在线监测, 具有非常广阔的应用前景. 由于桥梁的挠度监测是在野外环境下进行, 发光靶标将受外界光照环境的影响, 因此如何选择系统各部分的参数, 构建最优的系统, 以保证在任何外界光照环境下, 都能够在摄像机光敏面上获得良好的照度和对比度, 就必须分析系统各个部分之间的约束条件, 以便指导系统的设计.

## 1 系统原理

桥梁挠度光电成像测量系统主要由发光靶标和光电数字摄像机两部分组成. 发光靶标固定在桥梁梁体的待测部位, 光电数字摄像机则通常固定在桥梁的桥墩上, 如图 1 所示. 光电数字摄像机的成像光学系统, 将发光靶标成像在数字摄像机的光敏面上<sup>[3]</sup>. 当桥梁在载荷的作用下发生位移  $\Delta y$  时, 发光靶标亦随桥梁从 A 点移动到 B 点产生  $\Delta y$  的位移, 这就导致发光靶标在摄像机像面上所成像点的位置相应地从 A' 移动到 B' 点产生  $\Delta y'$  的变化量 (如图 1

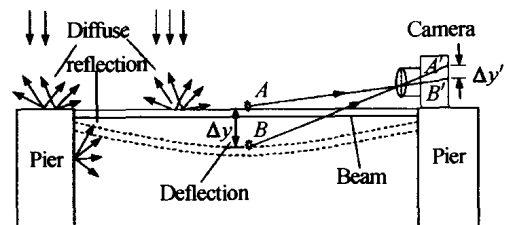


图 1 光电成像挠度测量系统示意图

Fig. 1 Schematic of imaging deflection measuring system

所示). 假设摄像机成像光学系统的放大倍率为  $\beta$ , 则由几何光学的原理可知, 桥梁的挠度变化量与发光靶标在摄像机像面的像点移动量  $\Delta y'$  满足式 (1)

$$\Delta y = \beta \Delta y' \quad (1)$$

由式 (1) 可知, 挠度测量的关键就是确定发光靶标在摄像机像面上的成像点 A'、B', 及由此导致的其在垂直方向的位置变化量  $\Delta y'$ . 为了确定这个变化量  $\Delta y'$ , 发光靶标成像点 A' 和 B' 应能够被摄像机的光敏面识别. 因此, 发光靶标的成像点在摄像机像面上的照度必须要大于摄像机光敏面的灵敏阈<sup>[4]</sup>; 而且由于背景 (一般为桥梁梁体、桥墩以及大桥周围地面等) 在外界光照下将产生漫反射, 当背景的漫反射光进入摄像机的光学系统成像后, 会使发光靶标和背景物成像的对比度降低. 为了合理构建整个系统, 必须对系统的发光靶标在摄像机像面处的像面照度、成像对比度等关键光度学特性进行分析, 以利对系统的设计优化提供依据.

## 2 像面照度计算

假设发光靶标是一个余弦辐射体, 则由应用光学的原理可知, 当一个亮度为  $L$  且主光线和光轴夹角为  $\omega$  的发光靶标 B, 向平面孔径角为  $U$  的立体角范围内发出的光经透过率为  $K$ 、焦距为  $f$  的光学系统成像为 B' 后, 其亮度变为  $L'$ , 若像方孔径角为  $U'$ , 则发光靶标在摄像机光敏面上成像点的照度  $E'$  可表示为<sup>[4]</sup>

\* 国家科技攻关项目 (2002BA105C)、重庆市重大科技攻关专项 (7289)

Tel: 023-65111847 Email: wmchen@cqu.edu.cn

收稿日期: 2003-11-10

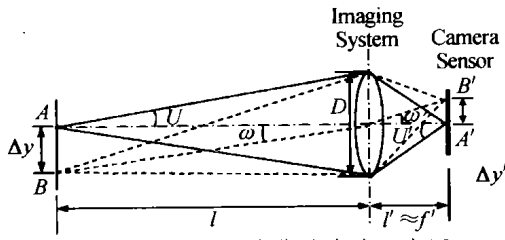


图2 光标靶成像的光路示意图  
Fig. 2 Schematic of source imaging

$$E' = K\pi L \sin^2 U' \cos^4 \omega' \quad (2)$$

由于桥梁的跨度一般为几十米到上百米,成像光学系统的孔径  $D$  一般为厘米级,而且由于摄像机的光敏面的尺寸一般比成像光学系统的孔径更小,因此可将式(2)简化为

$$E' = K\pi L \left(\frac{D}{2f}\right)^2 = \frac{1}{4}K\pi L \left(\frac{1}{F}\right)^2 \quad (3)$$

要使发光靶标在摄像机像面所成像点的照度大于光敏面的灵敏阈  $E_c$ , 必须有  $E' > E_c$ , 即

$$L > \frac{4E_c F^2}{\pi K} \quad (4)$$

由式(4)可知,发光靶标的亮度  $L$  应由发光靶标所成像点在数字摄像机光敏面上的灵敏阈  $E_c$  和成像光学镜头的参数(包括光透过率  $K$  和光圈  $F$  数)来平衡,其目的是选择合适的发光靶标的亮度  $L$  和成像光学镜头的参数使平衡后的像面照度大于光敏面的灵敏阈  $E_c$ . 图3所示的就是当灵敏阈  $E_c$  取值为 1 lx 时,发光靶标亮度  $L$  的取值与光学镜头的光圈  $F$  数和透过率  $K$  所必须满足的关系. 可以看到,对于一个已经选定的光电数字摄像机,光透过率  $K$  和光圈  $F$  数皆为固定常数,要使发光靶标在摄像机像面上所成像点的照度大于光敏面的灵敏阈  $E_c$ , 就只能使发光靶标的亮度大于某个极限,否则数字摄像机将不会有信号输出. 而根据式(4)可知,选择摄像机光电灵敏度高(即灵敏阈  $E_c$  小),且摄像镜头的  $F$  数小(即相对孔径  $D/f$  大)、透过率  $K$  高的高档摄像机,或者选择发光亮度  $L$  高的光源作为发光靶标,将是满足式(4)的主要途径. 相对而言,选

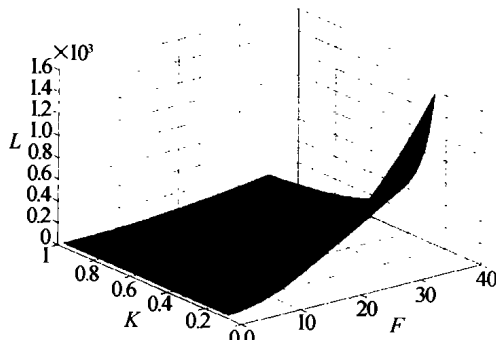


图3 当  $E_c = 1 \text{ lx}$  时,光标靶亮度和镜头光圈数及光透过率之间的关系

Fig. 3  $L$  vs.  $F$  and  $K$ , while  $E_c = 1 \text{ lx}$

择发光亮度  $L$  高的光源作为发光靶标更为简单、廉价、易行.

但是在实际工程中,发光靶标的亮度也不能太高,否则将会使摄像机像面的照度高于光敏面的饱和照度  $E_s$ , 从而可能影响发光靶标像点位置的识别准确率. 因此有

$$\frac{4E_c F^2}{\pi K} < L < \frac{4E_s F^2}{\pi K} \quad (5)$$

此外,由于桥梁的挠度监测是在野外环境下进行,发光靶标将受外界光照环境的影响. 在强烈的外界光照下,作为背景的环境照度往往很高,因此当发光靶标和背景物经过数字摄像机的成像光学系统成像后,发光靶标的信息很容易被背景的信息淹没. 因此,发光靶标和背景所成像应有一定的对比度,以达到正确区分目标和背景的目的<sup>[5]</sup>.

### 3 对比度讨论

在进行桥梁的挠度测量时,背景一般为桥梁梁体、桥墩以及大桥周围地面等,它们可近似认为是反射率  $\rho_B$  可知的漫反射体. 因此在外界光照度为  $E_E$  时,它们产生的环境亮度  $L_B$  为<sup>[6]</sup>

$$L_B = \frac{1}{\pi} \rho_B E_E \quad (6)$$

由于背景为漫反射体,即余弦辐射体,因此背景所成像在像面上的照度  $E'_B$  可以根据式(3)计算

$$E'_B = K L_B \left(\frac{D}{2f}\right)^2 = k \rho_B E_E \left(\frac{D}{2f}\right)^2 \quad (7)$$

对于一个位数为 8 位的 A/D 转换器,在进行像点的灰度值设定时,是将饱和照度下的像点的灰度值设定为 255,灵敏阈照度时像点的灰度值设定为 1,而将灵敏阈照度以下的像点的灰度值设定为 0. 因此,发光靶标的像点的灰度值  $G_o$  和背景的像点的灰度值  $G_B$  分别为

$$G_o = 255 \times \frac{(E' - E_c)}{(E_s - E_c)} \quad G_B = 255 \times \frac{(E'_B - E_c)}{(E_s - E_c)} \quad (8)$$

由于数字摄像机光敏面的灵敏阈一般为勒克斯的数量级,则式(8)可简化为

$$G_o = 255 \times \frac{E'}{E_s} \quad E_B = 255 \times \frac{E'_B}{E_s} \quad (9)$$

图像中发光靶标的像点与背景的灰度反差,称为对比度. 对于数字摄像机而言,其光敏面上发光靶标的像点与背景的对比度可表示为

$$C = \frac{G_o - G_B}{G_o + G_B} = \frac{E' - E'_B}{E' + E'_B} \quad (10)$$

将式(3)和式(7)代入,可得

$$C = \frac{L - L_B}{L + L_B} = 1 - \frac{2\rho_B E_E}{\pi L + \rho_B E_E} \quad (11)$$

由对比度的定义知道,若发光靶标和背景成像的对比度越大,则发光靶标和背景的反差越大,发光靶标和背景越容易区分. 因此,发光靶标和背景成像的对比度应大于某一个阈值  $C_c$ , 否则将不能把发光靶标和背景区分开. 根据式(11)可得发光靶标和背景成像的对比度  $C$  与发光靶标亮度  $L$  和背景亮度为  $L_B$  之间的关系如图 4 所示.

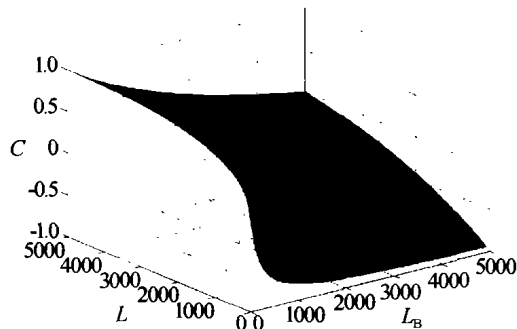


图 4 对比度、光标靶亮度和背景亮度之间的关系  
Fig. 4  $C$  vs.  $L$  and  $L_B$

由式(11)及图 4 可以看到,由于背景的反射率  $\rho_B$  和外界光照度  $E_E$  是无法人为选择与改变的,因此,在外界光照强烈(即  $E_E$  大)的情况下,要提高系统的成像对比度  $C$ ,只能通过提高发光靶标的亮度  $L$  来实现. 若后续图像处理系统能正确获取发光靶标图像所需的对比度阈值为  $C_c$ 、强烈的背景亮度为  $L_B$ ,则由式(11)可得发光靶标的亮度  $L$  必须满足下列条件

$$L > \frac{(1 + C_c)L_B}{1 - C_c} \quad (12)$$

由图 4 及式(12)可以看到,对于同一个发光靶标,当外界光照度增大时,成像的对比度将急剧降低. 因此,要在此条件下获得足够的对比度,就必须要求发光靶标具有很高的亮度. 例如,当强烈的日光直射时,外界照度可高达  $1.24 \times 10^5$  lx,若假设背景的反射率为 0.2,则可计算出背景的亮度为  $7894$  cd/m<sup>2</sup>,若假设对比度阈值  $C_c$  取为 0.2,则可计算出发光靶标的亮度必须大于  $11841$  cd/m<sup>2</sup>,而这样高亮度的光源在实际中往往无法得到. 因此在强烈的日光直射下,简单采取提高发光靶标亮度  $L$  的方法是行不通的,必须寻求另外的途径来解决.

## 4 利用反光靶标改善强烈日光条件下的成像状况

### 4.1 反光靶标及其反射特性

由于日光照射使得背景物的亮度  $L_B$  增加,但发光靶标的亮度  $L$  保持不变,就导致了发光靶标的成像对比度  $C$  下降. 但如果发光靶标的亮度  $L$  能够像背景的亮度  $L_B$  一样随着日光照度  $E_E$  的增加而增

加,则就能保持发光靶标的成像对比度  $C$  不变. 为此,可考虑采用一种反射率远高于背景反射率  $\rho_B$  的材料形成的反光靶标来代替发光靶标,这样,当外界光照使背景亮度  $L_B$  提高的同时,也将使反光靶标的亮度  $L$  提高,从而可避免由于强烈光照使成像对比度减小的问题. 对反光靶标来讲,反射率是其关键指标.

假设反光靶标为一个反射率为  $\rho_R$  的漫反射体,则当外界在反光靶标处的照度为  $E_E$  时,其产生的亮度  $L_R$  和它在摄像机像面处的成像照度  $E'_R$  分别为

$$L_R = \frac{1}{\pi} \rho_R E_E \quad (13)$$

$$E'_R = K \rho_R E_E \left( \frac{D}{2f} \right)^2 \quad (14)$$

由式(10)可知,此时反光靶标和背景在摄像机像面处的成像对比度  $C$  为

$$C = \frac{E'_R - E'_B}{E'_R + E'_B} = \frac{\rho_R - \rho_B}{\rho_R + \rho_B} \quad (15)$$

由此可得成像对比度  $C$  与背景物反射率  $\rho_B$  和反光靶标的反射率  $\rho_R$  比值之间的关系如图 5. 因为

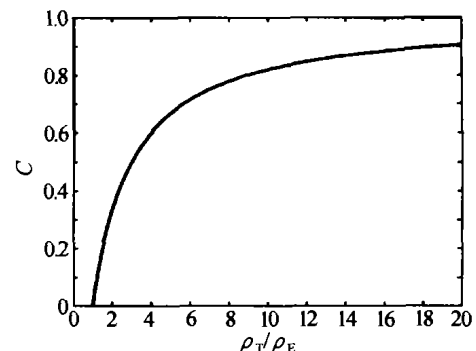


图 5 图像对比度与目标和背景反射率之比的关系  
Fig. 5  $C$  vs.  $\rho_R/\rho_E$

只有当成像对比度  $C$  大于某一阈值  $C_c$  时,才能进行后续图像处理、求出反光靶标的位置,因此可根据图 5,由该阈值  $C_c$  确定反光靶标反射率  $\rho_R$  必须满足的条件是

$$\rho_R > \frac{(1 + C_c)\rho_B}{1 - C_c} \quad (16)$$

假设背景物的反射率为 0.2,则根据式(16)及图 5 知,当选择反光靶标的反射率  $\rho_R = 0.6$  时,对比度可达到 0.5,这样可完全满足对反光靶标和背景的成像对比度要求.

在阴天外界光照条件  $E_E$  不太强时、甚至夜间光照条件  $E_E$  极弱的条件下,反光靶标在摄像机像面所成像点的照度  $E'_R$  都必须高于数字摄像机光敏面的灵敏阈  $E_c$ . 因此根据式(4)和式(6)可知,反光靶标的反射率  $\rho_R$  还必须满足下式

$$\rho_R > \frac{4E_c F^2}{K E_E} \quad (17)$$

为了能够在阴天无强光、晴天强日光直射的不同极限条件下,既满足成像的对比度要求、又满足成像的灵敏度要求,反光靶标的反射率  $\rho_R$  必须由式(16)和式(17)同时确定。

#### 4.2 发光靶标和反光靶标组合

仔细考察式(16)与(17)可知,式(16)完全可以确定一个值,满足白天强光照条件下的光度要求。但式(17)中,外界光照在反射靶标处的照度  $E_E$  是一个很小的数值,这可能使得分母可能接近甚至小于分子,显然这两个反射率要求中,只有强光照条件下前一个能够保证,而弱光条件下的后一个则难以保证。因此反射靶标只适合在晴天强烈的日光照射下使用,而不适合在夜间外界光照很弱的阴天、夜间条件下使用。但与之相反,发光靶标则只适合在夜间外界光照很弱的阴天、夜间条件下使用,不适合在晴天强烈的日光照射下使用。因此要满足桥梁全天候的监测要求,就必须采用两者的组合,即白天采用反光靶标、夜间采用发光靶标;且反光靶标的反射率、发光靶标的发光亮度分别满足上述式(16)、(4)。由于传统的光电成像桥梁挠度监测方法只考虑了发光靶标,而没有采用反射靶标,因此传统的方法中在选择发光靶标的发光亮度时,不仅要考虑到摄像机光敏面的灵敏阈,更主要的是要考虑到应满足强烈光照条件下的对比度,而此时的发光亮度往往比只考虑满足摄像机光敏面的灵敏阈时的发光亮度高很多。

两者的具体组合形式采用图6所示的结构。图中主要的结构是一个箱体,将其设计为箱体是为了使靶标更容易固定在桥梁上,而箱体的大小可根据实际的需要来设计。发光靶标是放置在箱体表面正中开的一个孔内,孔的大小可根据发光靶标的大小来确定,发光靶标的电源则通常设计于箱体内部。在箱体表面除了孔的地方喷上高反射率的材料作为反射靶标。在晴天强烈的日光照射下可切断发光靶标的电源,单独使用反射靶标;而在外界光照很弱的阴天、夜间下,接通发光靶标的电源,使用发光靶标。这样,即可实现发光靶标和反光靶标的组合来实现全天候实时监测桥梁的挠度。

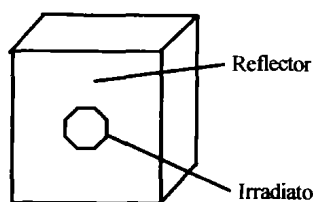


图6 发光靶标和反射靶标的组合  
Fig.6 Combinational target

但是,在实际桥梁工程应用中,组合靶标可能安

置于桥梁的边缘、不锈钢的挂轮上等等其它一些反射率很高的地方。这样在强烈的日光照射下,可能出现摄像机的光敏面无法正确识别出靶标。因此,只是考虑用发光靶标和反射靶标的组合,在某些场合有时仍然可能不能完全满足现场测量的环境要求。为此,需要对图6所示的组合靶标结构进行进一步优化。根据以上特点,可以考虑在反射靶标的周围镶上一个低反射率的黑边(如图7所示),相当于给反射靶标加上一个黑色的背景。这样,在强烈的日光照射下,即使环境背景的反射率很高,反射靶标周围始终存在一黑色的背景,就可以显著提高摄像机的光敏面对反射靶标的正确识别率。而且通过实验,也证明了镶上黑边后的组合靶标,在任何气候和背景环境下都能满足像面照度和成像对比度两个主要的光度学特性的要求,达到了全天候实时监测桥梁挠度的目的。

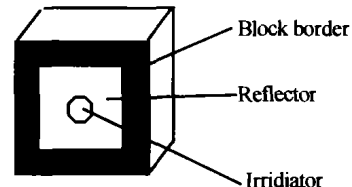


图7 带黑边的发光靶标和反射靶标的组合  
Fig.7 Combinational target with block border

## 5 结论

由前述光度学分析计算可知,在利用光电成像法对桥梁挠度进行监测时,系统若只采用发光靶标,则一般只适合于阴天、夜间等外界光照很弱的情况下,而在强烈光照下的晴天,成像的对比度往往难以满足要求;系统若只采用反射靶标,则可解决发光靶标无法在强烈光照的晴天下工作的问题,但却无法在阴天、夜间等外界光照很弱的情况下工作;而要解决桥梁的全天候挠度监测,必须采用将发光靶标和发射靶标组合使用,即在强烈光照的条件下采用反射靶标,而在外界照度比较低时采用发光靶标,则可同时满足像面照度和成像对比度两个主要的光度学特性的要求,达到桥梁状态的长期在线测量的目的;若在反射靶标的周围镶上黑边,能够使成像的对比度进一步提高,使整个系统更加完善,达到了全天候实时监测桥梁挠度的目的。

### 参考文献

- 1 刘念东. 桥梁健康监测中激光挠度/位移测量[硕士学位论文]. 重庆:重庆大学光电工程学院,2001.1~7  
Liu N D. Study on Laser Deflection/Displacement Measuring System for Bridge Health Monitoring and Its Application. [Dissertation for Master's Degree]. Chongqing: College of Optoelectronic Engineering of Chongqing University, 2001. 1

- ~7
- 2 胡晓东,徐秀芳,陈良益. 光电准直经纬仪的测量控制系统. 光子学报,2001,30(6):765~768  
Hu X D, Xu X F, Chen L Y. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(6):765~768
  - 3 王海晏,杨廷梧,安毓英. 激光水下偏振特性用于目标图像探测. 光子学报,32(1):9~13  
Wang H Y, Yang T W, An Y Y. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(1):9~13
  - 4 王庆友. CCD 应用技术. 天津:天津大学出版社,2002. 27~29  
Wang Q Y. CCD Application Technology. Tianjin: Tianjin University Press, 2002. 27~29
  - 5 王庆友. CCD 应用技术. 天津:天津大学出版社, 2002. 27~29  
Wang Q Y. CCD Application Technology. Tianjin: Tianjin University Press, 2002. 27~29
  - 6 张敬贤,李玉丹,金伟其. 微光与红外成像技术. 北京:北京理工大学出版社,2001. 53~55  
Zhang J X, Li Y D, Jin W Q. Microoptical and Infrared Imaging Technology. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2001. 53~55

## Analysis on the Photometric Characteristics of Imaging Deflection Measuring System for Bridge

Chen Weimin, Lu Jin, Xia Zhe, Zhu Yong

*Department of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044*

Received date:2003-11-10

**Abstract** The calculation of the photometric characteristics such as image plane's illumination and contrast are presented according to the demand of photoelectric imaging deflection measurement system. The relationship between the source, background radiation, optical system and image sensor is analyzed. Illumination and contrast on the image plane of camera are also discussed when replacing the system's source with high reflectivity material or using material with low reflectivity replacing background. The result contributes to putting forward the method of photometric design of photoelectric imaging deflection measurement system.

**Keywords** Photometric characteristics; Illumination; Contrast; Imaging; Deflection



**Chen Weimin** male, Dr. and professor, was born in 1955 in Chongqing, China. His research interesting includes optoelectronic system, optical fiber sensing system and etc.