

文章编号:1007-2780(2010)06-0919-06

基于二维方孔光栅的平面三维显示

孔令胜^{1,2},王天聪¹,蔡 盛^{1,2},钟 兴¹,
张 雷¹,徐 开¹,金 光¹,乔彦峰¹,贾继强¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033,E-mail:kongling@mail.ustc.edu.cn;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

摘 要:一维狭缝光栅实现平面三维显示具有低成本、光栅参数易于改变和无需对焦的优点,但存在遮挡画面影响亮度的缺点;二维透镜阵列具有全视差且深度感知自然的优点,但存在显示像素低和观察视角小的缺点。为了同时兼顾上述两种方案的优点,结合一维狭缝光栅和二维透镜阵列提出了一种基于二维方孔光栅的平面立体显示方案。Lighttools 软件仿真实验结果表明:基于二维方孔光栅的平面三维显示原理可行,其像质因子略小于一维狭缝光栅的像质因子,但继承了一维狭缝光栅和二维透镜的优点,是实现平面三维显示的一种新的发展方向。

关 键 词:平面三维显示;纵横视差;像质因子

中图分类号: TN27 **文献标识码:** A

Flat-Panel 3D Display Based on 2D Square Hole Barrier

KONG Ling-sheng^{1,2},WANG Tian-cong¹,CAI Sheng^{1,2},ZHONG Xing¹,
ZHANG Lei¹,XU Kai¹,JIN Guang¹,QIAO Yan-feng¹,JIA Ji-qiang¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,

Changchun 130033,China,E-mail:kongling@mail.ustc.edu.cn;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039,China)

Abstract: One-dimension slit barrier for flat-panel 3D(three-dimension) display has some advantages of low cost and changing parameters easily and no need to focus, but it has a little lower brightness because of blocking light. Two-dimension lens array has the advantages of full parallax and natural depth perception, but its viewing-resolution and viewing-angle are limited. In order to combine the advantages of the above-mentioned two kinds of scheme, a new flat-panel 3D display scheme based on 2D(two-dimension) square hole barrier is proposed according to one-dimension slit barrier technology and two-dimension lens array scheme in the paper. The results of simulating experiment of Lighttools indicate that the image quality factor of 2D square hole barrier is slightly less than one-dimension slit barrier's, but it has the advantages of one-dimension slit barrier technology and two-dimension lens array, and it is a new direction of development for flat-panel 3D display.

Key words: flat-panel 3D display; longitudinal and horizontal parallax; image quality factor

1 引 言

三维显示技术是虚拟现实的关键技术之一,已成为当前世界上显示技术领域研究的一个热点。三维显示技术分为全息三维显示和非全息三维显示。非全息三维显示技术中的平面三维显示技术由于在人们的生活娱乐中有广泛的需求,已成为科研人员深入探索和研究的重点,目前国内外已有很多原理样机及产品推出^[1]。

平面三维显示技术主要有障栅前置和后置两种。后置障栅具有串扰较低的优点,前置障栅具有较好的均匀度和有效宽度^[2-3]。光栅前置由于操作简单而成为广泛应用的方法,目前主要分为3种:一维狭缝光栅、一维柱透镜和二维透镜阵列。狭缝光栅相对于另两种透镜光栅具有制作成本低、光栅参数易于改变和不需要对焦的优点,但由于其属于通过遮挡画面来完成分光,故亮度会有所损失^[4]。二维透镜阵列的优点是能够提供横向双目视差和纵向单眼运动视差且深度感知自然,而其他两种只能有横向的双目视差;但是,二维透镜阵列三维显示的像素、视角和深度感知范围都有很大的限制^[5]。

本文针对上述3种光栅的优缺点提出了一种基于二维方孔光栅的新的平面立体显示方法。其基本原理是结合一维光栅和二维透镜阵列的三维显示原理,利用二维方孔光栅达到左右和上下的分光效果,以提供平面三维显示的横向双眼视差和纵向的单眼运动视差。二维方孔光栅既具有一维狭缝光栅制作成本低、光栅参数易于改变和无需对焦的优点,同时又能像二维透镜阵列一样能提供横向双目视差和纵向单眼运动视差。

2 基于二维方孔光栅的立体显示原理及评价标准

2.1 二维方孔光栅立体显示原理

二维方孔光栅本质是通过两个狭缝方向正交的一维狭缝光栅组合而成的,又因为两个一维光栅狭缝正交导致其左右分光过程和上下分光过程完全独立,故二维方孔光栅在水平和竖直两个方向分别遵循一维狭缝光栅原理。下面先介绍一维狭缝光栅的立体成像原理^[6]。

一维狭缝光栅将位置错开的左右眼图像光分开,使观看者在不带任何眼镜或头盔等辅助设备

的情况下,左右眼可以分别看到具有视差的左右眼图像,原理图如图1所示。根据双目视差原理,观看者在大脑将左右眼图像融合成立体图像,从而实现立体显示效果^[7]。

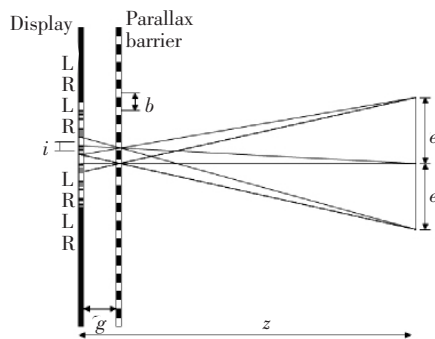


图1 一维光栅原理图

Fig. 1 Principle of one-dimension barrier

由三角形相似得:

$$\begin{aligned} b &= 2i \left(\frac{z-g}{z} \right) \\ z &= g \left(\frac{e+i}{i} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

其中, b 为狭缝缝距; i 为图像像素大小; z 为观看者到显示图像距离; e 为瞳距,一般取65 mm; g 为图像和一维狭缝光栅的距离。

二维方孔光栅为两个狭缝方向正交的一维狭缝光栅的叠加,如图2所示。计算方法为横向、纵向分别按一维狭缝光栅原理计算,横向光栅产生纵向单眼运动视差,纵向光栅产生横向双目视差。

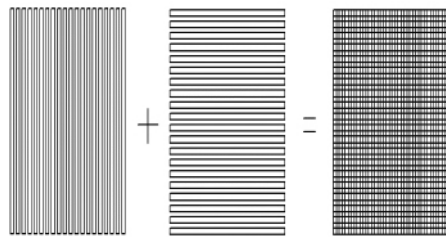


图2 二维方孔光栅等效图

Fig. 2 Equivalent of 2D square hole barrier

2.2 平面三维显示像质评价标准^[8]

关于平面三维显示的像质评价方法,本文采用最近提出的一种左右视区照度比值因子积方法,认为三维显示的像质与进入左右眼正确图像的量有关。在两视点显示中,两个比值因子如下:

$$C_L = \frac{Y_{BRWL}(\theta_L, \varphi_L) - Y_{BRBL}(\theta_L, \varphi_L)}{Y_{WRBL}(\theta_L, \varphi_L) - Y_{BRBL}(\theta_L, \varphi_L)} = \frac{1}{\chi_L} \quad (2)$$

$$C_R = \frac{Y_{BRWL}(\theta_R, \varphi_R) - Y_{BRBL}(\theta_R, \varphi_R)}{Y_{WRBL}(\theta_R, \varphi_R) - Y_{BRBL}(\theta_R, \varphi_R)} = \frac{1}{\chi_R} \quad (3)$$

式(2)中, $Y_{BRWL}(\theta_L, \varphi_L)$ 为右眼图像不亮、左眼图像亮时,左眼视区的亮度; $Y_{WRBL}(\theta_L, \varphi_L)$ 为右眼图像亮、左眼图像不亮时,左眼视区的亮度; $Y_{BRBL}(\theta_L, \varphi_L)$ 为左右眼图像都不亮时,右眼视区的亮度。式(3)中, $Y_{BRBL}(\theta_R, \varphi_R)$ 为右眼图像不亮、左眼图像亮时,右眼视区的亮度; $Y_{WRBL}(\theta_R, \varphi_R)$ 为右眼图像亮、左眼图像不亮时,右眼视区的亮度; $Y_{BRBL}(\theta_R, \varphi_R)$ 为左右眼图像都不亮时,右眼视区的亮度。

相对于传统的串扰评价方法,这种新的评价方法的优点在于其把三维像质量化。当 C_R 和 C_L 同时最大时,三维像质最好。把两个比值因子联立如式(4)所示,以作为 C_R 和 C_L 同时最大的一种标准,这对于三维像质的整体评价非常有用。

$$C^{3D} = \sqrt{C_R(\theta_R, \varphi_R) \times C_L(\theta_L, \varphi_L)} \quad (4)$$

式(4)给出了评价左右眼立体像质的量化值。文献[8]中并未分析三维像质最优时 C^{3D} 的大小,所以这里也只把 C^{3D} 作为不同障栅方案像质评价的对比标准,分别对一维竖光栅和二维方孔光栅进行 Lighttools^[9] 实验仿真,并对二者 C^{3D} 的大小进行比较。二维透镜阵列在视差图获取及处理方面与遮挡式光栅有所不同,故本文并未对二维透镜阵列进行仿真对比。

3 仿真实验及讨论

3.1 两视点一维狭缝光栅

一维斜光栅是当今平面三维显示应用最广泛的方法,但是为了仿真和对比的方便,本文采用一维竖光栅作为仿真对比实验对象(图3)。利用照明设计软件 Lighttools^[9] 进行仿真,光源用一组横向像素为 5 mm 的朗伯光源组成,狭缝宽度为 4 mm,观察距离设为 1 500 mm,瞳距为 65 mm,即: $i=5$ mm, $z=1$ 500 mm, $e=65$ mm。由式(1)可以得出: $g=107$ mm, $b=9.29$ mm。

根据上述所得数据,将图像源放置在 $z=1$ 500 mm 处,障栅放置在 $z=1$ 493 mm 处,此时最佳观察区为 $z=0$ mm 处。首先在理论最佳观察距离处放置平面接收器模拟照度计,平面接收器纵向长度为 5 mm 以仿真瞳孔大小的进光量,横向长度为 600 mm 以接收多个左右眼视区,此平面接收器等效于一个长 600 mm 的线照度计。

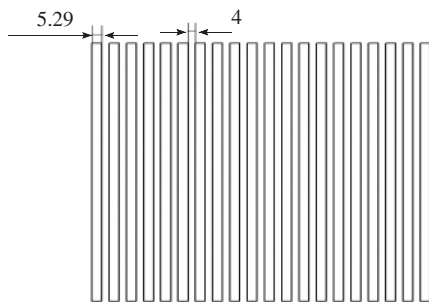


图3 一维狭缝光栅图

Fig. 3 One-dimension slit barrier

分别点亮左右眼图像列并采集其照度,把照度数据导入数据处理软件 Origin 进行处理,以横向位置为 x 轴并以照度为 y 轴,再把左右眼图像列的曲线整合在一起,如图4所示。

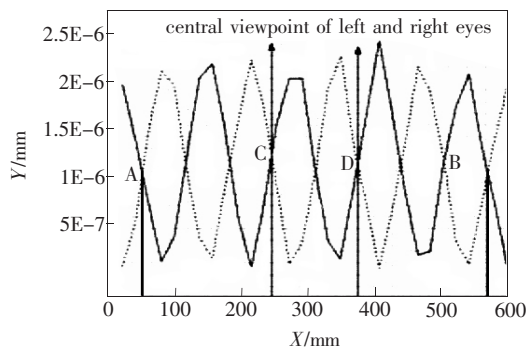


图4 一维左右眼视区曲线

Fig. 4 Curve of the one-dimension viewport of left and right eyes

由图4可以看出,左右视区宽度大致相同。A、B为两曲线的左右边缘交点,可以看出 $x_A - x_B = 521$ mm。两交点之间的视区数为 8, $(x_A - x_B)/8 = 65$ mm,与预期计算结果基本一致。由此可根据图4曲线,在左右视区分别求出 C_R 、 C_L 。为讨论方便,现取中间的一对左右眼视区(图4中两条直线之间区域),以上图两曲线的交点 C、D 为左右眼的视区分界,分别对左右视区的 4 条曲线积分求面积即为左右图像在左右视区的照度。下面根据式(2)、(3)^[8] 算出两视点一维狭缝光栅的 C^{3D} 。仿真实验 Y_{BRBL} 值为理想值 0,利用 Origin 中的积分功能分别算出各值。

在左视区内:

$$Y_{BRWL}(\theta_L, \varphi_L) = 2.110 \times 10^{-3} \text{ lm}$$

$$Y_{WRWL}(\theta_L, \varphi_L) = 6.820 \times 10^{-4} \text{ lm}$$

在右视区内:

$$Y_{WRBL}(\theta_R, \varphi_R) = 2.240 \times 10^{-3} \text{ lm}$$

$$Y_{BRWL}(\theta_R, \varphi_R) = 6.100 \times 10^{-4} \text{ lm}$$

$$C^{3D} = \sqrt{C_R(\theta_R, \varphi_R) \times C_L(\theta_L, \varphi_L)} = 11.36$$

下面用工作视场较大的 Cook 三片式光学系统模拟人眼进行图像接收仿真实验^[8]。图像源为对三角形(图 5),加上光栅后,理论上左右眼只能看到奇偶像素列的三角图像。

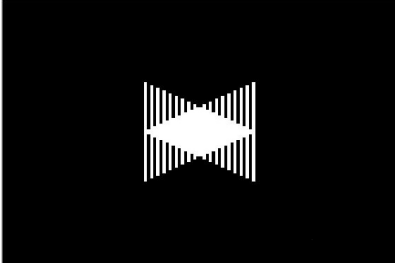


图 5 三角图像

Fig. 5 Image of triangle

系统仿真时,把照度计换成两个 cook 三片式系统,如图 6 所示。

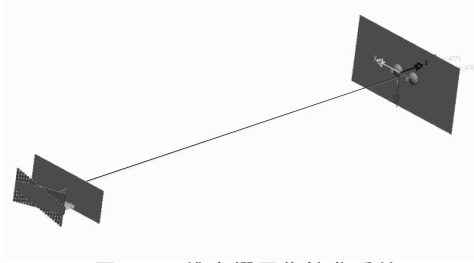


图 6 一维光栅图像接收系统

Fig. 6 System of receiving image of one-dimension barrier

经 Lighttools 仿真后的接收图像如图 7 所示。

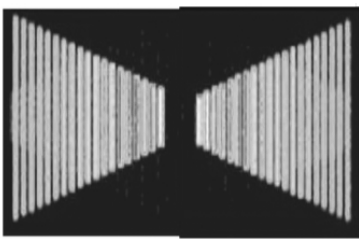


图 7 一维光栅仿真图像

Fig. 7 Image of simulation of one-dimension barrier

由图 6 可以定性地观察到左右视差图像,用以验证左右视区接收视差图像。

3.2 二维方孔光栅

二维方孔光栅等效为两个一维光栅正交叠加

而成,两个一维光栅参数与上述设置相同(图 2)。依照一维光栅仿真线照度计方法,在二维方孔光栅系统中,分别在最佳视区处的横向和纵向放置线照度计,纵向照度图如图 8 所示,横向照度图如图 9 所示。

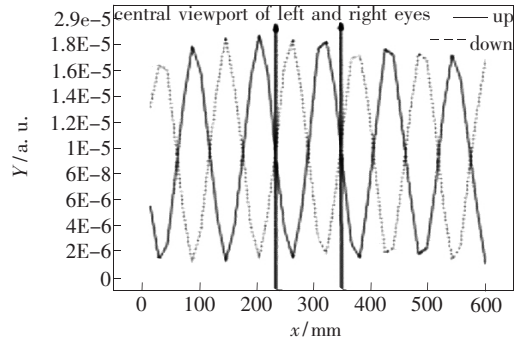


图 8 二维横向左眼视区曲线

Fig. 8 Curve of the two-dimension longitudinal viewport of left and right eyes

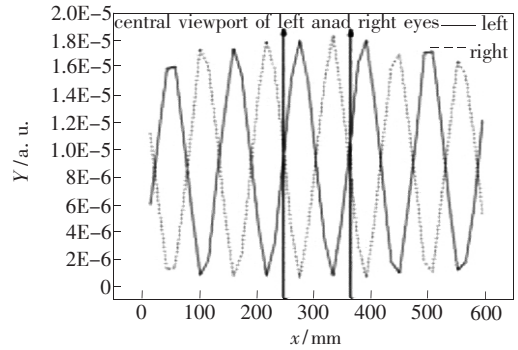


图 9 二维横向右眼视区曲线

Fig. 9 Curve of the two-dimension horizontal viewport of left and right eyes

依照一维光栅方法可求出此时三维图像的像质因子^[7]。

在上视区内:

$$Y_{BRWL}(\theta_L, \varphi_L) = 8.773 \times 10^{-4} \text{ lm}$$

$$Y_{WRWL}(\theta_L, \varphi_L) = 3.131 \times 10^{-4} \text{ lm}$$

在下视区内:

$$Y_{WRWL}(\theta_R, \varphi_R) = 8.574 \times 10^{-4} \text{ lm}$$

$$Y_{BRWL}(\theta_R, \varphi_R) = 2.963 \times 10^{-4} \text{ lm}$$

$$C^{3D} = \sqrt{C_R(\theta_R, \varphi_R) \times C_L(\theta_L, \varphi_L)} = 8.11$$

在左视区内:

$$Y_{BRWL} = 8.363 \times 10^{-4} \text{ lm}$$

$$Y_{WRWL} = 2.759 \times 10^{-4} \text{ lm}$$

在右视区内:

$$Y_{WRWL} = 8.296 \times 10^{-4} \text{ lm}$$

$$Y_{BRWL} = 2.628 \times 10^{-4} \text{ lm}$$
$$C^{3D} = \sqrt{C_R(\theta_R, \varphi_R) \times C_L(\theta_L, \varphi_L)} = 9.57$$

由一维和二维的 C^{3D} 对比可知,二维方孔光栅的三维图像像质有所降低。这是由于多了一维分光之后,图像亮度降低造成的。另外,由视区曲线可以看出图像照度有所减小,这是由于二维遮挡率比一维要多的原因。下面是成像仿真实验,光源由图 10 左边的 4 幅图合成右边的图像。

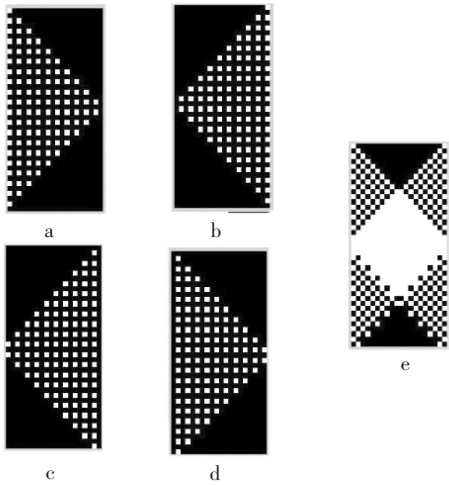


图 10 4 幅图像的合成图
Fig. 10 Synthesis image of four images

二维光栅系统的仿真模型较一维光栅系统在纵向多了两个 Cook 三片式结构,以接收左右视差图和上下视差图,系统如图 11 所示。

经 Lighttools 仿真后,所接收的图像如图 12 所示。

仿真接收图 12 得到了预想的 4 幅图像,以此

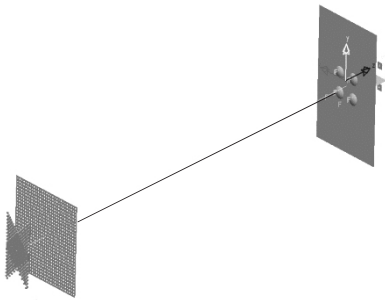


图 11 二维光栅图像接收系统
Fig. 11 System of receiving image of two-dimension barrier

参 考 文 献:

[1] 孔令胜,南敬实,荀显超.平面三维显示技术的研究现状 [J].中国光学与应用光学,2009,2(2):112-118.

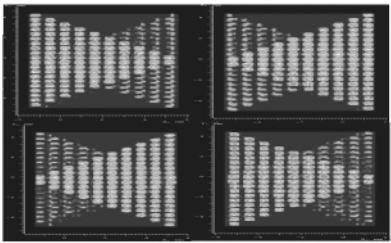


图 12 二维光栅仿真图像
Fig. 12 Image of simulation of two-dimension barrier

定性验证了横向双目视差和单眼运动视差。这里要补充说明的是,一维和二维情况下的照度计所设像元数皆为 80×80 ,所以二维情况下的点图比一维情况下的线图像质要差一些。

一维光栅的节距为 9.29 mm,而狭缝宽度为 4 mm,由此可知其遮挡率为 $\frac{9.29-4}{9.29}=57\%$,同理二维方孔光栅遮挡率为 $1-\left(\frac{4}{9.29}\right)^2=81\%$,二维方孔光栅较一维竖光栅的遮挡率多,故其显示亮度要小,这在视区照度曲线可以得到验证。由像质因子 C^{3D} 比较可知,二维方孔光栅横纵两方向的 C^{3D} 都要略小于一维竖光栅,原因是亮度损失大和串扰多了一维。在成像仿真实验中,二维比一维图像串扰要多一些,这是由于在一维情况下一幅图的串扰源为另一幅图,而在二维情况下一幅图的串扰源却有 3 幅图。由于像质因子 C^{3D} 并无显著下降,所以二维方孔光栅的串扰问题可以套用一维竖光栅的优化方法,只不过相对于一维情况要求更加苛刻,例如图像亮度要更大、视差图像的视差要更小等。上述仿真实验对比验证了二维方孔光栅理论的可行性。

4 结 论

二维方孔光栅继承了一维狭缝光栅制作成本低、光栅参数易于改变和不需要对焦等优点,同时又能像二维透镜阵列一样提供横向双目视差和纵向单眼运动视差。本文通过 Lighttools 仿真实验验证了其可行性,从而丰富了障栅立体显示原理内容,提供了一种新的实现平面三维显示的发展方向。

[2] Holliman N. *3D Display Systems* [M]. Germany:Springer Verlag, 2005.

[3] Woodgate G, Harrold J, Jacobs M, *et al.* Flat panel autostereoscopic displays-characterisation and enhancement [J]. *SPIE*, 2000,3957, 39570Z:153-164.

[4] 王元庆. 光栅式自由立体显示器光学构成的理论研究[J]. 现代显示, 2003, (3):29-32.

[5] Ozaktas H M, Onural L. *Three-Dimensional Television* [M]. Germany:Springer Verlag, 2008.

[6] Harrold J, Jacobs M, Woodgate G J, *et al.* 3D display systems hardware research [R] . An Update Sharp Technical, Japan;Sharp Laboratories of Europe, 1999.

[7] 王爱红,王琼华,李大海,等. 立体显示中立体深度与视差图获取的关系[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(2):433-438.

[8] Boher P, Leroux T, Bignon T, *et al.* A new way to characterize auto-stereoscopic 3D displays using Fourier optics instrument[J]. *SPIE*, 2009, 72370Z:1-12.

[9] 王之江. 实用光学技术手册 [M]. 北京:机械工业出版社, 2007.

（上接 P850）

例:[12]西安电子科技大学 . 光折变自适应光外差探测方法:中国, 01128777. 2[P/OL]. 2002-03-06[2002-05-28]. <http://211.152.9.47/sipoasp/zljs/hyjs-yx-new.asp?recid=01128777.2&leixin=0>.

电子文献:[序号]主要责任者 . 题名:其他题名信息[文献类型标志] . 出版地:出版者,出版年(更新或修改日期)[引用日期] . 获取和访问路径 .

例:[13]PACS-L: the public-access computer systems forum[EB/OL]. Houston, Tex; University of Houston Libraries, 1989[1995-05-17]. <http://info.lib.edu/pacsl.html>

例:[14]Online Computer Library Center, Inc. History of OCLC [EB/OL]. [2000-01-08]. <http://www.oclc.org/about/history/default.htm>.

- 2. 文后参考文献应在正文中引用该文献处进行标注。
- 3. 关于作者姓名,姓在前,名在后(拉丁文只用缩写);作者 3 人以下应全部列出,4 人以上仅列出前 3 人,其后加“等”(外文加“et al”)。
- 4. 注意参考文献标注的标点符号、次序,并不得缺项。
- 5. 参考文献著录不规范的有可能影响文章的录用。

注:文献类型和电子文献载体标志代码:

文献类型和标志代码

文献类型	标志代码	文献类型	标志代码
普通图书	M	报告	R
会议录	C	标准	S
汇编	G	专利	P
报纸	N	数据库	DB
期刊	J	计算机程序	CP
学位论文	D	电子公告	EB

电子文献载体和标志代码

载体类型	标志代码
磁带(magnetic tape)	MT
磁盘(disk)	DK
光盘(CD-ROM)	CD
联机网络(online)	OL