

文章编号: 1001-9081(2012)11-3149-04

doi: 10.3724/SP.J.1087.2012.03149

基于单投影仪与柱面反射镜的沉浸感显示系统

尹晓晴*, 李 靖, 熊志辉, 王 炜, 张茂军

(国防科学技术大学 信息系统与管理学院, 长沙 410073)

(*通信作者电子邮箱 happyyxq2012@sina.com)

摘要: 在分析传统沉浸感显示系统优缺点的基础上, 设计并实现了一种新型的沉浸感显示系统。该系统使用柱面反射镜对单投影仪投射光线进行反射, 并在弧形背投幕上成像, 能够获得无缝画面, 实现了广角度虚拟场景的连贯显示。通过合理设计柱面反射镜形状, 实现了投影画面在水平方向上的均匀放大。通过对图像进行预变形可以基本消除因投影幕曲率而产生的投影画面形变, 同时采用背投技术使参与者在虚拟场景中活动更加自如。该系统克服了传统的多投影仪或多显示器沉浸感显示系统中存在的图像拼接问题, 且易于构建, 经实验验证能够获得良好的沉浸感显示效果。

关键词: 沉浸感显示系统; 单投影仪; 柱面反射镜; 广角度虚拟场景; 弧形背投幕

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

Immersive display system based on single projector and cylindrical reflector

YIN Xiao-qing*, LI Jing, XIONG Zhi-hui, WANG Wei, ZHANG Mao-jun

(College of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

Abstract: Through analyzing the advantages and disadvantages of traditional immersive display systems, a new immersive display system was designed and implemented. In this system, the light illuminated by one projector was reflected by a cylindrical reflector to a cambered rear projection screen. Seamless projection picture can be obtained and coherent displaying of wide-angle virtual scene could be implemented. By properly designing the surface of cylindrical reflector, it implemented uniform enlargement of the image on the horizontal direction. The distortion of the projection picture caused by the curvature of the screen could be basically removed through prior distortion of projected image and participants could acquire more moving freedom by means of rear projection. This system overcame the problem of image mosaics in traditional multi-projector and multi-display immersive display systems. It is simple for manufacturing and can achieve satisfying immersive display quality, which is verified by the experimental result.

Key words: immersive display system; single projector; cylindrical reflector; wide-angle virtual scene; cambered rear projection screen

0 引言

近年来, 沉浸感显示技术迅速发展, 并广泛应用于远程虚拟会议、模拟训练和三维虚拟游戏等诸多领域。当参与者置身于沉浸感显示系统所营造的虚拟环境中时, 其感觉系统能够以一种与在真实环境中相似的方式进行感知, 获得身临其境的感觉^[1]。文献[2–3]阐述了沉浸感的概念, 对沉浸感显示技术的研究现状进行了分析。目前国内外已有很多关于沉浸感显示系统的研究。大规模显示墙^[4–5]采用多屏技术和多通道并行输出方法, 可以获得一定的沉浸感。但参与者只是观看平面上显示的画面, 而没有置身于虚拟环境中, 因此沉浸感有限。Heden等^[6]和Paul^[7]设计实现了基于投影仪、球面反射镜和弧形投影幕的环绕显示系统, 取得了一定的沉浸感显示效果。曲面沉浸感显示系统 i-Cone^[8]使用四台投影仪对圆锥面投影幕进行正投影, 通过精确调整投影仪位置, 能够获得较好的沉浸感, 但该系统难以实现对图像变形的修正, 且其

正投设计使参与者的活动范围受到较大限制。Nancy等^[9]和Paul^[10]分别设计了一种低成本沉浸感显示系统, 具有易搭建、实现简单的优势。Branislav等^[11]设计了一种多投影仪和多投影幕的沉浸感显示系统, 但画面会产生明显的拉伸形变。运用多投影仪进行图像拼接^[12–15]往往存在几何边缘不匹配、易产生重叠或缝隙以及颜色不一致等问题, 且解决算法一般比较复杂。

为了克服传统的沉浸感显示系统存在的问题, 本文设计了一种基于单投影仪和柱面反射镜的沉浸感显示系统。该系统使用柱面反射镜对投影仪投射光线进行反射, 并成像于弧形背投幕, 通过合理设计柱面反射镜形状与图像预变形的方法, 实现了广角度虚拟场景的连贯显示, 基本消除了投影画面的形变, 同时参与者在虚拟场景中的活动因采用背投技术而更加自由。该系统相比于传统的沉浸感显示系统成本更加低廉, 且结构简单容易搭建。

收稿日期: 2012-04-13; 修回日期: 2012-05-23。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61175006, 61175015, 60803101, 60872150)。

作者简介: 尹晓晴(1989–), 男, 山东德州人, 硕士研究生, 主要研究方向: 虚拟现实、多媒体信息系统; 李靖(1990–), 男, 山西吕梁人, 硕士研究生, 主要研究方向: 虚拟现实、多媒体信息系统; 熊志辉(1976–), 男, 江西南昌人, 副教授, 博士, 主要研究方向: 数字图像处理、全景成像、嵌入式系统; 王炜(1973–), 男, 陕西宝鸡人, 教授, 博士, 主要研究方向: 多媒体信息系统、虚拟现实; 张茂军(1971–), 男, 湖北黄梅人, 教授, 博士生导师, 博士, 主要研究方向: 虚拟现实、多媒体信息系统、视频图像处理。

1 系统结构与原理

1.1 系统结构

系统由一台投影仪、柱面反射镜、弧面背投幕和个人计算机组成,如图1所示。图中A为计算机,B为投影仪,C为柱面反射镜,D为投影幕。

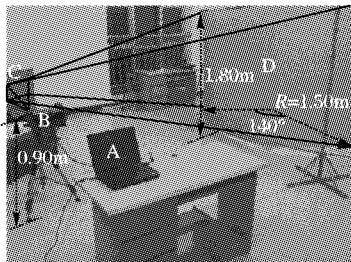


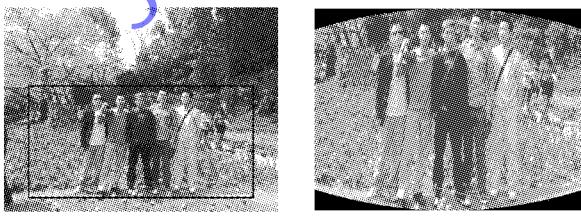
图1 系统构成

观察者位于弧形背投幕圆心所在的一侧,可以被弧形背投幕半包围。投影仪和柱面反射镜位于弧面另一侧。投影仪发出的光线经柱面反射镜反射后,在弧形背投幕上成像,背投幕上画面视野为 140° 。

弧面背投幕是高为1.80 m、底面半径为1.50 m的圆柱侧面的一部分,通过将背投幕布固定在钢制圆柱框架上制作而成。背投幕上画面长为 $1.50 \times 140 \times \pi / 180 = 3.67$ m,宽为1.80 m,长宽比为 $3.67 / 1.80 = 2.04$ 。投影仪镜头中心距地面0.90 m,投影光轴平行于地面。投影仪投影张角为 29° ,投影长宽比为4:3。柱面反射镜通过将镀铬不锈钢片机器加工成指定形状得到,镜面垂直于水平地面。

1.2 系统原理

为了实现背投幕上画面长宽比为2.04的显示要求,首先需要截取长宽比为2.04的场景图像作为显示画面,如图2(a)所示。在截取时要满足场景图像的实际尺寸为3.67 m \times 1.80 m。由于投影仪的投影长宽比仅为 $4/3 = 1.33$,因此首先需要在水平方向上对截取图像进行均匀压缩,再由投影仪投射。投影光线经柱面反射镜反射后成像于弧形背投幕上。通过合理设计柱面反射镜形状,可以使弧形背投幕上的画面在水平方向上实现均匀放大。场景图像在水平方向上经过均匀压缩和放大后,可以按照现实世界中的比例显示。此时背投幕上的投影画面消除了水平方向上的形变,而垂直方向上的画面形变可以通过在垂直方向上进行图像变换消除。水平方向上的均匀压缩和垂直方向上的变换构成了图像的预变形过程,预变形后图像如图2(b)所示。



(a) 截取图像

(b) 预变形后图像

图2 场景图像截取与预变形

投影仪投射预变形图像,投影光线经柱面反射镜反射后成像于背投幕上,观察者在弧形背投幕圆心所在一侧体验沉浸感效果。

系统工作原理如图3所示。

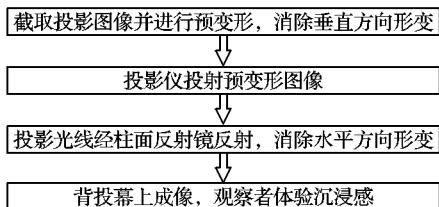


图3 系统工作原理

2 柱面反射镜的设计

为了获得良好的沉浸感,投影幕上显示的画面应该是真实比例的。直接用投影仪进行投影画面会产生拉伸形变,因此对投影图像预先进行一定的变形。

在使用沉浸感显示系统显示实时画面时,要尽量简化图像变形算法,减少计算时间消耗。可以通过将一部分图像变形功能设计到镜面形状上来实现这种简化。如果设计好的镜面能够在水平(或垂直)方向上对画面进行均匀放大,则在该方向上只需要对投射图像进行简单的均匀压缩。在两个方向上同时对画面进行均匀拉伸的镜面加工难度很大,但在一个方向上均匀拉伸相对容易。由于广角度画面的水平方向包含了更多信息,因此通过设计反射镜形状实现水平方向上的均匀拉伸,而在垂直方向上通过图像变形进行修正。

以投影仪镜头光心O为原点建立笛卡尔坐标系,如图4所示。

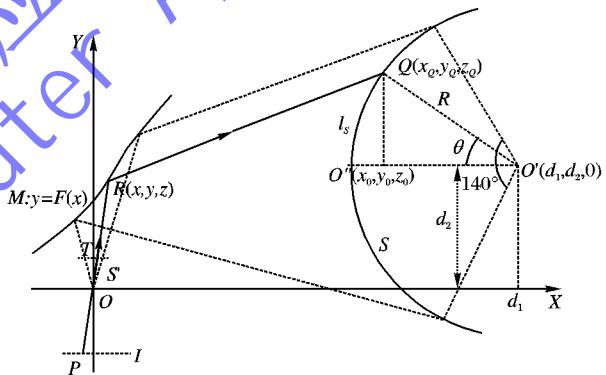


图4 系统光路图(俯视图)

图4中,所有光线均经过O点,投影仪光轴沿Y轴方向。光线经过反射镜M反射后,投射在弧面投影幕S上成像。设像平面上某一个像素点为P,光线PO经反射镜上R(x,y,z)点反射后,到达弧形投影幕S上的Q(x_Q, y_Q, z_Q)点。

根据光线折反射与传统的透镜小孔成像原理,对于像平面上任意一个像素点,一定存在投影画面上一点与之一一对应。设投影幕上的图像为 Img_1 ,图像中心为 $O''(x_0, y_0, z_0)$ 。将 Img_1 设计为关于直线 $l: x = x_0, y = y_0$ 对称。

假设在O点正前方(Y轴正方向)有一个垂直于y轴的虚拟成像面 S' , S' 与y轴交于点V,如图5所示。由投射光线的对称性可知,V是 S' 上投影图像的中心,与真实投影画面中心 O'' 相对应。由于过点V的光线及其反射光线都在 XOY 平面上,因此 $z_0 = 0$ 。设O到 S' 的距离为 $|OV| = 1$ cm,则V点坐标为(0,1,0)。假设投射在 S' 上的图像为 Img_2 ,以 Img_2 为考察对象,研究投影幕S上的图像放大效果。设投影仪投影张角为 2γ ($\gamma = 14.5^\circ$),求得在假想情况下虚拟成像面上画面长度为 $|OV| \times 2\tan\gamma = 0.52$ cm。光线OR交虚拟成像面于T点,设R点和T点在 XOY 平面上的投影分别为 R' 和 T' ,由 R' 和 T' 向X轴做垂线,垂足分别为 R'', T'' 。下面研究R点和Q点的坐标之间需

要满足的关系。

光线 OR 可以在图像 Img_1, Img_2 上分别形成像点 Q 和 T 。以 Img_1, Img_2 的中心 O'' 和 V 为原点, 分别在投影面内建立坐标系, 则 Q 相对于 O'' 和 T 相对于 V 的坐标之间应满足放大倍数关系。

设 T 的 X 坐标为 x_T , 则 T 相对于 V 的水平坐标为 $x_T - 0 = x_T$ 。设投影幕圆弧对应的圆心为 $O'(d_1, d_2, 0)$, 弧形投影面 S 对应半径为 $r = |O'Q'|$, Q 在 XOY 平面上投影为 $Q'(x_Q, y_Q, 0)$, $\angle O''O'Q' = \theta$, 则 Q 相对于 O'' 的水平坐标为弧长 $l_s = r\theta = r \arcsin((y_Q - d_2)/r)$, 可以得到 $y_Q = r \sin(ax/ry) + d_2$, 代入圆方程得 $x_Q = d_1 - r \cos(ax/ry)$ 。

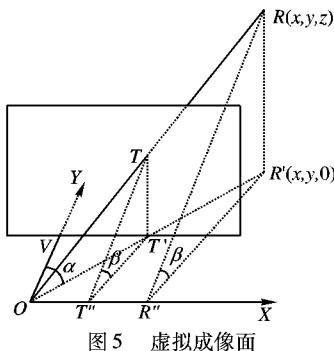


图 5 虚拟成像面

设 $\angle VOT' = \alpha$, 由几何关系, $x_T = |OV| \tan \alpha = \tan \angle OR'R'' = x/y$ 。设定 Img_1 相对于 Img_2 水平方向的放大倍数为 a , 则:

$$ls = ax_T \quad (1)$$

根据光的反射定律列方程, 光路如图 6 所示。

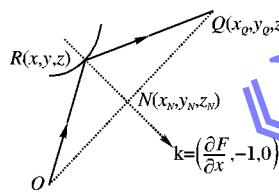


图 6 光路示意图

入射光线为 OR , 反射光线为 RQ , 连接 OQ , 设柱面反射镜表面法线与 OQ 的交点为 $N(x_N, y_N, z_N)$ 。设柱面反射镜在 XOY 平面上投影为曲线 $y = F(x)$, 则法线 RN 的方向向量为 $k = (\frac{dF}{dx}, -1, 0)$, 设 $RN = tk$, 则可设 N 点坐标为 $(x + \frac{dF}{dx}t, y - t, z)$, 其中 $t > 0$ 。 $ON = (x + \frac{dF}{dx}t, y - t, z)$, $OQ = (x_Q, y_Q, z_Q)$, 根据 O, N, Q 共线, 有:

$$(x + \frac{dF}{dx}t)y_Q = (y - t)x_Q \quad (2)$$

$$(y - t)z_Q = zy_Q \quad (3)$$

由式(3)得 $t = \frac{(yx_Q - xy_Q)}{\frac{dF}{dx}y_Q + x_Q}$, 则:

$$x_N = x + \frac{dF}{dx}t = \frac{x_Q(x + \frac{dF}{dx}y)}{x_Q + (\frac{dF}{dx}y_Q)}$$

在图 3 中, 由几何关系可知: $\frac{OR}{RQ} = \frac{ON}{NQ}$, $|OR| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, $|RQ| = \sqrt{(x_Q - x)^2 + (y_Q - y)^2 + (z_Q - z)^2}$ 。

又由 $\frac{ON}{NQ} = \frac{x_N}{x_Q - x_N}$, 联立解得:

$$\frac{dF}{dx} = \frac{s_1(x_Q - x) - s_2x}{s_2y - s_1(y_Q - y)} \quad (4)$$

其中: $s_1 = |OR| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, $s_2 = |RQ| = ((x_Q - x)^2 + (y_Q - y)^2 + (z_Q - z)^2)^{\frac{1}{2}}$ 。

由式(4)可得:

$$\frac{z}{y_Q} = \frac{y - t}{y_Q} = \frac{\frac{dF}{dx}y + x}{\frac{dF}{dx}y_Q + x_Q} \quad (5)$$

联立式(5)、(6)可以得到:

$$\frac{dF}{dx} = \frac{s_1'(x_Q - x) - s_2'x}{s_2'y - s_1'(y_Q - y)} \quad (6)$$

其中: $s_1' = \sqrt{x^2 + y^2}$, $s_2' = \sqrt{(x_Q - x)^2 + (y_Q - y)^2}$ 。设置初始条件 $F(0) = c$, 运用数值方法联立求解微分方程, 即可得到反射镜面垂直投影在 XOY 平面上的形状曲线。

3 图像修正

由于设计出的柱面反射镜只能使投影画面满足水平方向上的均匀放大, 因此在垂直方向上会产生一定的形变。下面通过投影图像变形来修正垂直方向上的形变。

在图 4 中, 首先假设可以满足垂直方向上的均匀放大, 设 T 的 Z 坐标为 z_T^* , 则 T 相对于 V 的垂直坐标为 $z_T^* - 0 = z_T^*$ 。 Q 相对于 O'' 的垂直坐标为 $z_Q - z_0 = z_Q$ 。

设 $\angle TT''T' = \beta$, 由几何关系知 $z_T^* = |T'T''| \tan \beta = \tan \beta = \tan \angle PP''P' = z/y$ 。设 Img_1 相对于 Img_2 垂直方向的放大倍数为 b , 则希望满足如下关系:

$$z_T^* = z_Q/b \quad (7)$$

设实际情况下 S' 上对应于 Q 的点 z 坐标为 z_T , 结合式(5)有:

$$z_T = \frac{z}{y} = (z_Q(\frac{dF}{dx}y + x)) / ((\frac{dF}{dx}y_Q + x_Q)y) \quad (8)$$

垂直方向上图像压缩比例为:

$$\frac{z_T}{z_T^*} = (b(\frac{dF}{dx} + x_T)) / (\frac{dF}{dx}y_Q + x_Q) \quad (9)$$

设投影仪张角为 2γ 。在投影图像中, 像素 P 相对于图像中心的水平坐标为 x_p (像素), 图像每行像素个数为 $2m$, 则由几何关系知: $x_T = x_p \tan \gamma/m$ 。

设图像在水平坐标 x_p 处的任意一个像素的纵坐标为 y_p , 变形后该像素纵坐标为 y_p' , 设图像在 x_p 处垂直方向压缩系数为 $c(x_p) = y_p'/y_p$ 。根据实际投射图像与虚拟成像面图像的成比例关系, 可知:

$$c(x_p) = (b(\frac{dF}{dx} + \frac{x_p \tan \gamma}{m})) / (\frac{dF}{dx}y_Q + x_Q) \quad (10)$$

按照上述方法在垂直方向上对图像进行压缩, 可以基本消除最终投影画面在垂直方向上的变形。

在实际应用中, 如果允许图像在垂直方向上存在少量误差, 则在图像预变形过程中可以采用简单的变换模型: $c(x_p) = -ax^2 + b$ ($a, b > 0$), 实验表明这种简单的变换方法仅会产生微小的误差, 能够满足沉浸感显示要求。

4 实验结果

投影画面总长度为 3.67 m, 虚拟投影画面长度为 0.52 cm, 水平放大倍数为 $a = (3.67 \times 100)/0.52 = 705.8$ 。设置 $d_1 = 600.00$ cm, $d_2 = 50.00$ cm, $F(0) = c = 47$ cm。垂直方向

上放大倍数为 $b = (1.80 \times 100) / 0.52 \times 3/4 = 461.5$ 。根据上述参数计算得到柱面反射镜形状, 反射镜面垂直投影在 XOY 平面上的形状曲线如图 7 所示。沉浸感显示效果如图 8。

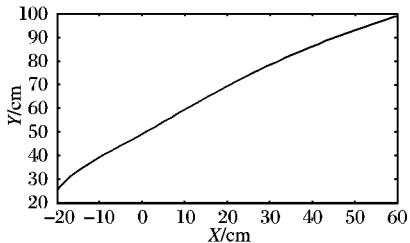


图 7 反射镜面在 XOY 平面上垂直投影曲线

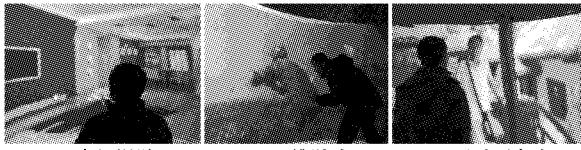


图 8 沉浸感显示效果

5 结语

为了克服传统沉浸感显示系统中多投影仪或多显示器图像拼接困难以及运动范围受限等不足, 本文设计并实现了一种基于单投影仪和柱面反射镜的沉浸感显示系统。该系统通过合理设计柱面反射镜形状和图像预变形, 基本消除了投影画面的形变, 实现了广角度虚拟场景的连贯显示。投影实验表明该系统能够获得良好的沉浸感显示效果。

本系统中反射镜实现了水平方向上投影画面的均匀放大, 而垂直方向上通过图像修正消除形变。在加工精度足够高的情况下, 可以制作在水平和垂直方向上都能对画面进行均匀放大的反射镜面, 使图像变形算法得到进一步的简化, 这是该系统进一步改进的方向。

参考文献:

- [1] MEL S, ANTHONY S, YIORGOS C. 计算机图形学与虚拟环境 [M]. 程成, 徐玉田, 译. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [2] 黄东军, 伯斯科, 陈斌华. 沉浸感显示技术研究[J]. 计算机系统应用, 2007, 16(3): 43–46.
- [3] MANIA K, CHALMERS A. The effects of levels of immersion on memory and presence in virtual environment : a reality centered ap-

proach[J]. CyberPsychology Behavior, 2001, 4(2) : 247–264.

- [4] LI KAI, CHEN HAN, CLARK D W, et al. Building and using a scalable display wall system[J]. IEEE Transactions on Computer Graphics and Applications, 2000, 20(4) : 29–37.
- [5] 梁嘉华, 董科军. 多屏显示墙可视化技术研究[J]. 中国科技信息, 2010(7): 99–101.
- [6] HENDEN C, CHAMPION E, MUHLBERGER R, et al. A surround display warp-mesh utility to enhance player engagement[C]// ICEC 2008: Entertainment Computing, LNCS 5309. Berlin: Springer, 2009: 46–56.
- [7] PAUL B. Spherical mirror: a new approach to hemispherical dome projection[J]. Planetarian, 2005, 34(4) : 6–9.
- [8] SIMON A, GÖBEL M. The i-Cone TM : A panoramic display system for virtual environment[C] // Proceedings of the 10th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2002: 3–7.
- [9] NANCY P Y, WILLIAM C T. Inexpensive immersive projection [C] // Proceedings of 2008 Virtual Reality Conference. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2008: 237–240.
- [10] PAUL B. Low cost projection environment for immersive gaming [J]. Journal of Multimedia, 2008, 3(1) : 41–46.
- [11] BRANISLAV S, CSABA S, STANISLAV S. The some problems solution by construction of multi-screen projection system[J]. Jounal of Computer Science and Control Systems, 2009, 2(1) : 57–60.
- [12] HASHIMOTO N, JEONG S, TAKEYAMA Y, et al . Immersive multi-projector display on hybrid screens with human-scale haptic and locomotion interfaces[C]// Proceedings of the 2004 International Conference on Cyberworlds. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2004: 361–368.
- [13] 陈柳叶, 常辉, 戴树岭. 多投影仪拼接显示技术综述[C]// 第四届全国虚拟现实与可视化学术会议论文集. 大连: 大连海事大学出版社, 2004: 250–254.
- [14] HARLYN B, ZEYU L. Camera and projector arrays for immersive 3D video[C]// Proceedings of the 2nd International Conference on Immersive Telecommunications. New York: ACM, 2009: 1–6.
- [15] HARVILLE M, CULBERTSON B, SOBEL I, et al. Practical methods for geometric and photometric correction of tiled projectors on curved surfaces[C]// Proceedings of the 2006 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2006: 5.

(上接第 3148 页)

参考文献:

- [1] DIFFIE W, HELLMAN M E. New directions in cryptography[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1976, 22(6): 644–654.
- [2] MATSUMOTO T, TAKASHIMA Y, IMAI H. On seeking smart public-key distribution systems[J]. Transactions on IECE, 1986, 69(2): 99–106.
- [3] MENEZES A, QU M, VANSTONE S. Some new key agreement protocols providing mutual implicit authentication [C]// SAC'95: Proceedings of the Second Workshop on Selected Areas in Cryptography. New York: ACM, 1995: 22–32.
- [4] LAW L, MENEZES A, QU M, et al. An efficient protocol for authenticated key agreement[J]. Designs, Codes and Cryptography, 2003, 28(2): 119–134.
- [5] KRAWCZYK H. HMQV: A high-performance secure Diffie-Hellman protocol [C]// CRYPTO 2005: Proceedings of the 25th International Cryptology Conference, LNCS 3621. Berlin: Springer-Verlag, 2005: 546–566.

- [6] 赵建杰, 谷大武. eCK 模型下可证明安全的双方认证密钥协商协议[J]. 计算机学报, 2011, 34 (1): 47–54.
- [7] LAMACCHIA B, LAUTER K, MITYAGIN A. Stronger security of authenticated key exchange [C]// Proceedings of the 1st International Conference on Provable Security. Berlin: Springer-Verlag, 2007: 1–16.
- [8] LAUTER K, MITYAGIN A. Security analysis of KEA authenticated key exchange protocol [C]// Public Key Cryptography 2006, LNCS 3958. Berlin: Springer, 2006: 378–39.
- [9] 杨小东, 王彩芬. 前向安全的单向门限代理重签名[J]. 计算机应用, 2011, 31(3): 801–804.
- [10] 高海英. 高效的基于身份的认证密钥协商协议[J]. 计算机应用, 2012, 32(1): 35–37.
- [11] 周四方. 一种新的双方认证密钥协商协议的安全性分析[J]. 计算机应用, 2011, 31(11): 2994–2996.
- [12] 侯孟波, 徐秋亮. 身份基认证密钥协商协议的分析与改进[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(7): 25–28.