

封装对螺旋线圈发射器互感梯度的影响*

刘振祥¹, 杨 栋¹, 蒋雅琴¹, 沈 志¹, 杨丽佳², 欧阳建明¹

(1. 国防科技大学 理学院, 湖南 长沙 410073;

2. 国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要:互感梯度是决定线圈炮加速力的主要因素。本文以螺旋线圈炮为例,建立了计算互感梯度的二维有限元模型,对四种不同属性的封装材料和封装尺寸对互感梯度的影响做出了分析和比较,并给出了不同的封装材料及尺寸下封装的电流密度和磁场分布图。分析表明,互感梯度受到封装材料电导率和磁导率的双重制约。电导率决定了封装中感应涡流的大小;磁导率决定了对磁场的加强程度。减小封装与线圈的间距,导磁材料的磁场加强效果更好,而导电材料的涡流效应也更明显;增加封装的厚度,导磁材料可以更好地增强磁场,但由于电阻更小,导电材料涡流效应更明显。为了实现互感梯度的最大化,可以在减小封装与驱动线圈间距并增加封装厚度的情况下,使用高磁导率的硅钢片制作封装,硅钢片的厚度应该尽量小,从而削弱涡流效应。

关键词:电磁发射;线圈炮;封装;互感梯度

中图分类号:TM303.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2013)05-0135-05

Effects of shielding on helical coilgun inductance gradient

LIU Zhenxiang¹, YANG Dong¹, JIANG Yaqin¹, SHEN Zhi¹, YANG Lijia², OUYANG Jianming¹

(1. College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Opto-electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The inductance gradient is the most important parameter for coilgun design. By establishing a two-dimensional finite element model, effects of four shield materials with different dimensions and distance between coils and shield on inductance gradient were investigated. The coil's current distribution and magnetic field distribution under different shields were presented. Analysis shows that the inductance gradient is affected both by material conductivity and permeability. The conductivity determines the induced eddy current in the shield. The permeability determines the degree of strengthening the main magnetic field. By reducing the distance between driving-coils and shield, the magnetic materials enhance the magnetic flux better, but more eddy currents are induced in the shield conductor. By increasing the thickness of the shield, the magnetic materials enhance the magnetic flux better, but more eddy currents are induced in the conductive materials due to the decreasing resistance. In order to achieve the maximum inductance gradient, high permeability silicon steel sheets can be used as the shield, the distance between coils and shield should be reduced, and the thickness of silicon steel sheets should be as small as possible to reduce eddy current effects.

Key words: electromagnetic launching; Coilgun; shield; inductance gradient

线圈型电磁发射器在结构上更利于发射大质量弹丸。由于具有多匝,相当于同一电流利用了多次,线圈炮比轨道炮的推力更大、效率更高;但复杂的结构也带来了控制的难题。螺旋线圈发射器(HEML)采用轨道馈电、局部激励以及单匝换向,很好地解决了线圈炮的同步控制问题,其基本结构原理如图1所示^[1]。固定于封装上的驱动线圈及线圈内的两根馈电轨道构成螺旋线圈炮的炮体。螺旋线圈炮封装将炮体和外界隔离开,并在发射过程中平衡驱动线圈的径向张力,避免因驱动线圈变形导致电刷接触失败。更为重要的是,

封装作为边界,决定了炮体内部的电磁环境,在线圈材料和尺寸一定的情况下,封装材料的选择及其尺寸直接影响线圈炮的互感梯度。互感梯度是指沿驱动线圈和弹丸线圈轴向单位长度的互感变化值。线圈炮的加速力 $F = M' I_a I_p$ ^[2],与驱动线圈和弹丸线圈的互感梯度成正比,互感梯度是线圈炮加速性能的重要参数。因此,了解不同属性的材料作封装时互感梯度的变化情况及同一材料下封装尺寸对互感梯度的影响,对线圈炮的设计与制造非常重要。

本文以螺旋线圈炮为例,建立了计算互感梯

* 收稿日期:2013-01-25

基金项目:国家部委资助项目

作者简介:刘振祥(1967—),男,山东昌乐人,副教授,博士,E-mail:lzx_hunan@sina.com

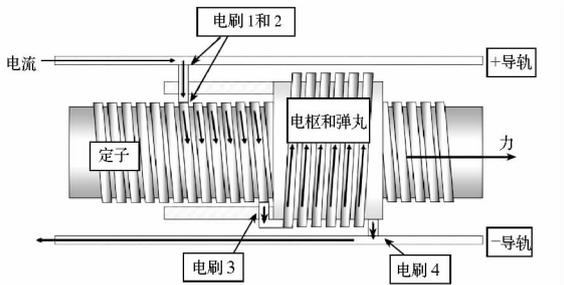


图 1 HEML 基本结构示意图

Fig.1 Basic structure of the HEML

度的二维有限元模型,对四种不同属性的封装材料和封装尺寸对互感梯度的影响做出了分析和比较,得出了最适合作封装的材料电磁特性及封装的结构尺寸。

1 二维瞬态有限元仿真

1.1 瞬态分析理论

有限元法是一种以变分原理或加权余量法为基础的数值方法^[3]。在 2 维 XY 问题中,矢量 J 和 A 仅有 z 方向一个分量。对于似恒电磁场,由安培环路定律:

$$\nabla \times (\mathbf{H} - \mathbf{H}_c) = \mathbf{J}_s + \mathbf{J}_e$$

整理得

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J}_s + \sigma \mathbf{E} + \nabla \times \mathbf{H}_c \\ \nabla \times \nu \nabla \times \mathbf{A} &= \mathbf{J}_s + \sigma \left(-\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla V \right. \\ &\quad \left. + \nu \times \nabla \times \mathbf{A} \right) + \nabla \times \mathbf{H}_c \quad (1) \\ &= \mathbf{J}_s - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \sigma \nabla V + \sigma \nu \\ &\quad \times \nabla \times \mathbf{A} + \nabla \times \mathbf{H}_c \end{aligned}$$

其中 \mathbf{H}_c 为永磁体矫顽力, ν 为运动物体的速度, \mathbf{A} 为磁矢势, V 为电势, ν 为磁阻率, \mathbf{J}_s 为源电流密度, \mathbf{J}_e 为涡电流密度。

Maxwell 2D 瞬态求解器采用一个参考系,固定在模型某一部分,使速度为零。由于运动物体固定在自身坐标系,偏时间导数变成 \mathbf{A} 的全时间导数,因此运动方程(1)变为

$$\nabla \times \nu \nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{J}_s - \sigma \frac{d\mathbf{A}}{dt} - \sigma \nabla V + \nabla \times \mathbf{H}_c \quad (2)$$

从而,磁矢势在每一时间段有限元模型中每一点都可获得。

1.2 二维有限元模型

利用 Maxwell 2D 进行瞬态电磁场分析,模型如图 2 所示。图 2 为轴对称的 RZ 二维模型,弹丸、驱动线圈和封装均由图中的矩形绕 z 轴旋转而成。当线圈匝密度较密时,可以将线圈作为一

整块处理。

驱动线圈通电部分长度:40mm,线圈半径:60mm;弹丸线圈长度:40mm,弹丸线圈半径:56mm(即弹丸线圈与驱动线圈间隙 1mm)。弹丸线圈、驱动线圈厚度为 3mm;封装厚度为 t ,封装与驱动线圈间隙为 d 。仿真中将弹丸、驱动线圈设置为导体绕组,不需考虑其涡流效应;而封装设置为实心导体,需要考虑其涡流效应。弹丸、驱动线圈分别设置为图 3(b)波形电流的正值(方向向里)和负值(方向向外)。

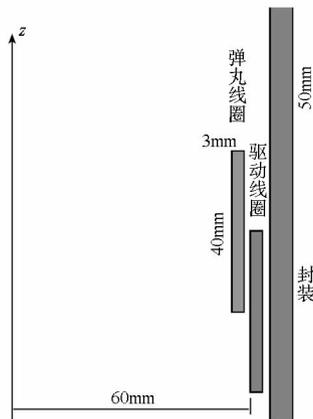
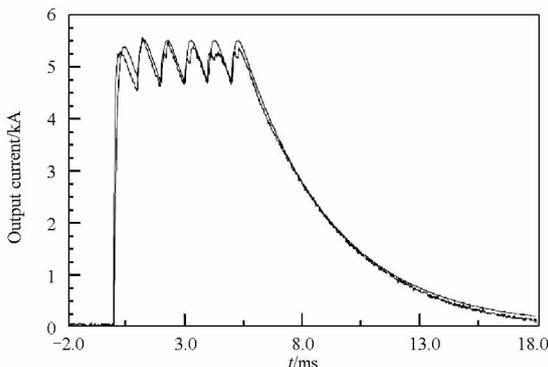


图 2 HEML 的 Maxwell 2D 模型图

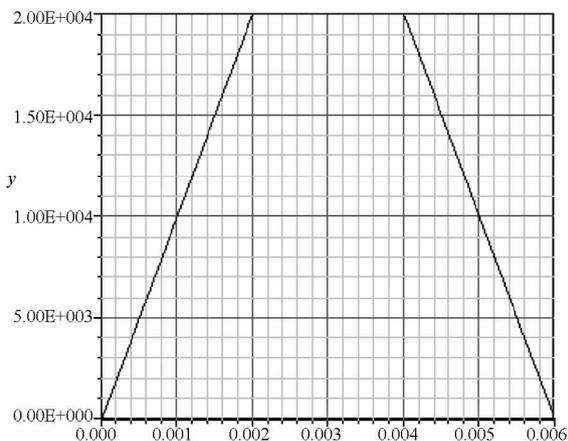
Fig.2 Maxwell 2D model of the HEML

HEML 理想的工作电流为平顶波形。发射之初,电流很快上升到最大值,加速过程中,电流保持不变,使弹丸一直处于最大加速力并减小加速力的波动,在弹丸出口之前,使电流逐渐减小为零,避免炮口电弧烧蚀并增加炮的能量转化效率。实际中脉冲形成网络(PFN)产生的典型波形如图 3(a)所示,为一个相对恒定的脉宽约 5ms 的电流脉冲^[4]。因此在仿真过程中采用了图 3(b)所示的类似平顶波,研究电流变化的三个典型阶段(上升、恒定和下降沿)封装中涡流的变化等具有重要意义。



(a) PFN 产生的电流波形

(a) Current waveform of PFN



(b) 仿真中的电流波形

(b) Current waveform of the simulation

图 3 HEML 的工作电流波形

Fig. 3 Current waveform of the HEML

2 封装对互感梯度的影响

2.1 封装为非导电非导磁材料

非导电非导磁材料封装(如环氧树脂、空气等)对互感梯度没有影响。仿真得到的互感梯度值为 $872\mu\text{H}/\text{m}$, 与实际的 HEML 互感梯度值(几百 $\mu\text{H}/\text{m}$)接近^[5], 其电磁场分布如图 4。这种封装情况的磁场分布与不考虑封装时磁场分布相同。

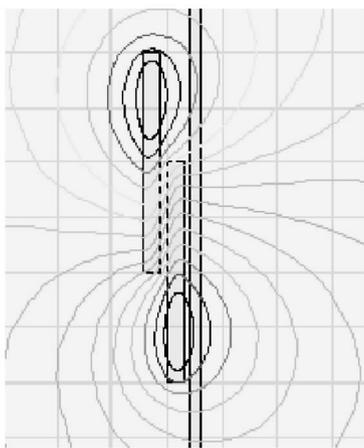


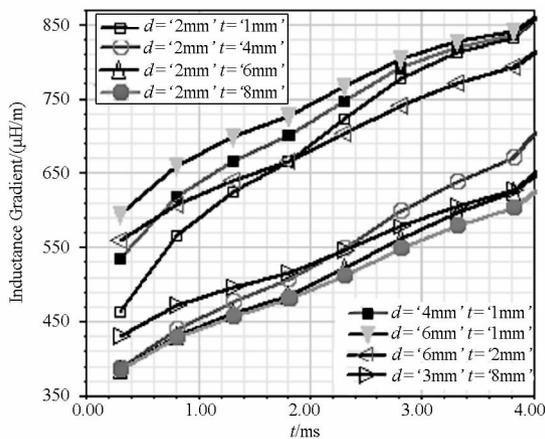
图 4 封装为非导电非导磁材料时磁力线分布

Fig. 4 Magnetic flux distribution of the nonconductive-nonmagnetic shield

2.2 封装为导电非导磁材料

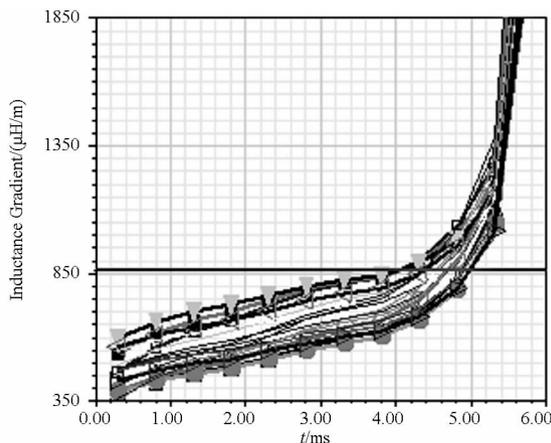
将封装材料设置为铜,其电导率为 $5.8e7\text{S}/\text{m}$, 相对磁导率为 1。改变参数分别为 $d = 2, 3, 4, 6\text{mm}$, $t = 1, 2, 4, 6, 8\text{mm}$, 得到对应的互感梯度随时间的变化关系如图 5。

图 5(a) 中, $d = 2, 3$ 的互感梯度曲线主要分布在图下方, 下方 4 条曲线 t 值较大; $t = 1, 2$ 的曲线主要分布在图上方, 上方 4 条曲线 d 值较大。



(a) 4ms 前

(a) Before 4ms



(b) 6ms 前

(b) Before 6ms

图 5 封装为导电非导磁材料时封装

尺寸对应互感梯度与时间的关系

Fig. 5 Inductance gradient vs conductive-nonmagnetic shield size and time

(1) 封装厚度 t 越小, 间隙 d 越大, 则互感梯度越大。 $t = 1, d = 6$ 曲线互感梯度最大。因为在电流的上升沿, 封装中的涡流降低了互感梯度。封装与线圈间隙 d 越大, 涡流的回拉力减小; 封装厚度减小, 封装回路电阻增大, 涡流减小。

图 5(b) 中, 水平直线为无封装时的互感梯度 ($872\mu\text{H}/\text{m}$)。

(2) 电流上升沿, 封装中的涡流降低了互感梯度, 对弹丸产生回拉力。而 4ms 后, 电流处于下降沿, 封装中涡流提高了互感梯度, 对弹丸产生推进力。图 6 给出了 $d = 1, t = 2$ 结构不同时刻封装的涡流分布。

(3) 线圈重叠部分封装的感应涡流不明显, 封装主要受邻近线圈电流变化的影响。

(4) 电流上升沿及平沿 ($0 \sim 4\text{ms}$), 封装下部分感应涡流为正, 对弹丸产生回拉力。下降沿

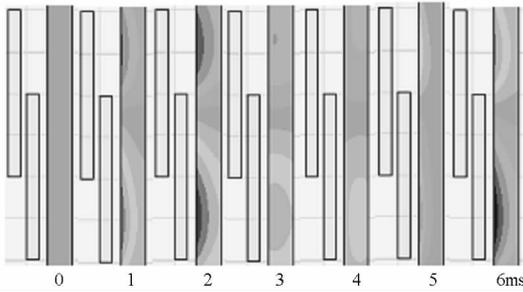


图 6 封装为导电非导磁材料时封装中的涡流变化
Fig.6 Eddy current in the conductive-nonmagnetic shield

(4ms 后), 封装下部分涡流为负, 增强推进力。

(5) 电流上升沿 0ms 后即在封装内产生感应电动势, 由于封装的时间常数, 封装中涡流绝对值在 2ms 达到最大值。电流平沿 2ms 后感应电动势为零, 由于时间常数, 封装中涡流延续到 4ms 接近 0。下降沿 4ms 后, 产生感应电动势, 由于时间常数, 封装中涡流在 6ms 达到最大值。

(6) 封装上、下部分的感应涡流有助于平衡弹丸、驱动线圈向外的径向张力^[6]。

2.3 封装为导电导磁材料

将封装材料设置为铁, 其电导率为 $1.03e7S/m$, 相对磁导率为 4000, 改变参数分别为 $d = 1, 2, 4, 6, 8, t = 2, 3, 4, 6$, 得到对应的互感梯度随时间的变化关系如图 7。

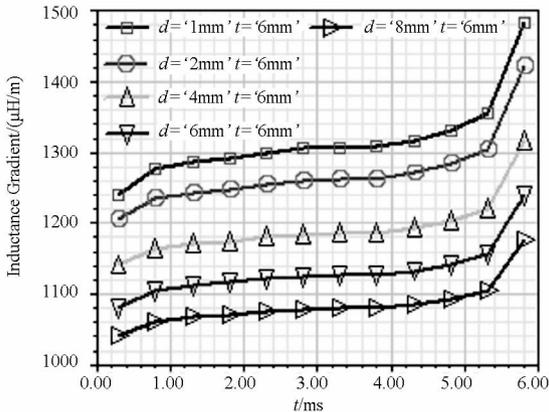


图 7 封装为导电导磁材料时封装尺寸对应互感梯度与时间的关系
Fig.7 Inductance gradient vs. conductive-magnetic shield size and time

图 7 中曲线按 $d = 1, 2, 4, 6, 8$ 值从上到下明显分成五簇, 每簇由 $t = 2, 3, 4, 6$ 四条几乎重合的曲线构成。分析可得:

(1) 导磁材料对磁场的增强作用相对其涡流效应的影响更大, 互感梯度主要取决于封装与线圈的间隙 d 。所以在线圈炮的设计中, 应尽量减小间隙 d 。

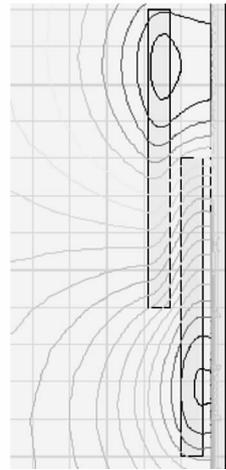


图 8 封装为导电导磁材料时 2ms 磁力线分布
Fig.8 Magnetic flux distribution of the conductive-magnetic shield at 2ms

与图 4 无涡流的情况比较, 图 8 中涡流的产生必抵制磁场在封装内的透入。在封装边界面, 磁力线接近垂直进入导磁介质; 而导磁介质内, 磁力线接近平行于边界面, 集中分布于封装内表面。设空气区域 $\mu_1 = \mu_0 = 1$, 封装区域 $\mu_2 = \mu_{Fe} = 4000 \gg \mu_1$, 由边界条件得 $(\tan\theta_1)/(\tan\theta_2) = (\mu_1/\mu_2) \sim 0$ ^[3], 要求 θ_1 接近 0° 或 θ_2 接近 90° 。

(2) 封装内磁场和涡流产生集肤效应, 使封装内表面磁场和涡流密度较高, 线圈炮内磁场比较集中。 μ 和 σ 愈大时, 透入深度 $\Delta = \sqrt{2/(\omega\mu\sigma)}$ 愈小, 集肤效应越明显^[3]。

2.4 封装为导磁非导电材料

将封装材料设置为铁, 修改其电导率为 $0S/m$, 相对磁导率为 4000, 改变参数分别为 $d = 1, 4, 6, 8, t = 2, 4, 6$, 得到对应的互感梯度随时间的变化关系如图 9。

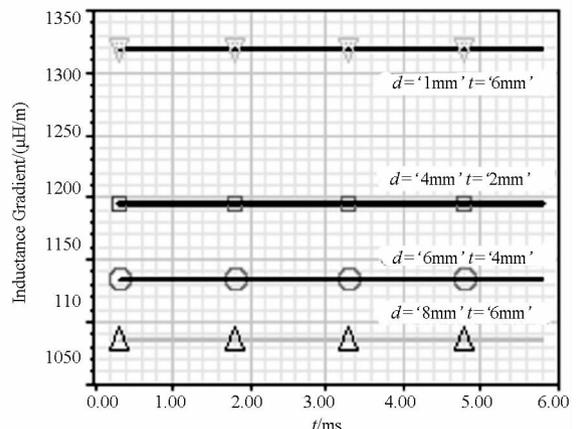


图 9 封装为导磁非导电材料时封装尺寸对应互感梯度与时间的关系
Fig.9 Inductance gradient vs nonconductive-magnetic shield size and time

(1) 由于没有涡流产生,图中互感梯度不随时间变化,其大小接近导电导磁材料封装时电流平沿的互感梯度值。

(2) 间隙 d 越小,封装厚度 t 越大,则互感梯度越大。 $d=1, t=6$ 曲线互感梯度最大。减小封装与线圈的间隙 d , 增加封装厚度 t , 导磁材料的磁场加强效果更好。因此可以采用硅钢叠片,当叠片厚度足够小的时候可以尽量减小材料的电导率,使得封装内的感应涡流被削弱,从而充分利用其导磁性能^[7]。

3 结论

以螺旋线圈炮为例,对四种不同属性的封装材料和封装尺寸对互感梯度的影响做出了分析和比较,结论如下:

(1) 线圈炮互感梯度受到封装材料电导率和磁导率的双重制约。电导率决定了封装中感应涡流的大小;磁导率决定了对磁场的加强程度。

(2) 线圈炮互感梯度与封装结构有关。减小封装与线圈的间距,导磁材料的磁场加强效果更好,而导电材料的涡流效应也更明显;增加封装的厚度,导磁材料可以更好地增强磁场,但导电材料由于电阻更小,涡流效应更明显。

(3) 为了实现互感梯度的最大化,可以在减小封装与驱动线圈间距并增加封装厚度的情况下使用高磁导率的硅钢片制作封装,硅钢片的厚度

应该尽量小,从而削弱涡流效应。

参考文献 (References)

- [1] Engel T G, et al. Efficiency and scaling of constant inductance gradient DC electromagnetic launchers[J]. IEEE Trans. Magn., 2006, 42(8): 2043-2051.
- [2] 王莹,肖峰. 电炮原理[M]. 北京:国防工业出版社, 1995: 94.
WANG Ying, Xiao Feng. Principle of electric gun [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995: 94. (in Chinese)
- [3] 汤蕴璆,梁艳萍. 电机电磁场的分析与计算[M]. 北京:机械工业出版社, 2010: 169, 12, 92.
TANG Yunqiu, LIANG Yanping. Analysis and calculation of electromagnetic field in motor [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2010: 169, 12, 92. (in Chinese)
- [4] Nunnally C W, et al. Results from a 750 kJ computer controlled sequentially-fired pulse forming network [J]. IEEE Trans. Magn., 2006, 42(8): 419-422.
- [5] Engel T G, et al. Development of a medium-bore high-efficiency helical coil electromagnetic launcher [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2004, 42(5): 1893-1895.
- [6] 杨栋,沈志. 螺旋线圈电磁发射器径向受力仿真与电极设计[J]. 电工电能新技术, 2011, 30(3): 47-50.
YANG Dong, SHEN Zhi. Simulation of the helical coil electromagnetic launcher's radial force and the design of armature [J]. Advance Technology of Electrical Engineering and Energy, 2011, 30(3): 47-50. (in Chinese)
- [7] 刘守豹,阮江军. 封装对轨道炮电感梯度的影响[J]. 电工电能新技术, 2009, 28(4): 42-45.
LIU Shoubao, RUAN Jiangjun. Influence of shielding on rail gun induction gradient [J]. Advance Technology of Electrical Engineering and Energy, 2009, 28(4): 42-45. (in Chinese)
- [8] 肖倩,罗守山,陈萍,等. 半诚实模型下安全多方排序问题的研究[J]. 电子学报, 2008, 36(4): 709-714.
XIAO Qian, LUO Shoushan, CHEN Ping, et al. Research on the problem of secure multi-party ranking under semi-honest model [J]. Chinese Journal of Electronics, 2008, 36(4): 709-714. (in Chinese)
- [9] 李顺东,戴一奇,游启民. 姚氏百万富翁问题的高效解决方案[J]. 电子学报, 2005, 33(5): 769-773.
LI Shundong, DAI Yiqi, YOU Qimin. An efficient solution to yao's millionaires' problem [J]. Chinese Journal of Electronics, 2005, 33(5): 769-773. (in Chinese)
- [10] Boudot F, Schoenmakers B, Traor'e J. A fair and efficient solution to the socialist Millionaires' problem [J]. Discrete Applied Mathematics, 2001, 111(SI): 23-36.
- [11] Bresson E, Catalano D, Pointcheval D. A simple public key cryptosystem with a double trapdoor decryption mechanism and its applications [J]. Aciacrypt 2003, LNCS 2894, Berlin: Springer-Verlag, 2003: 37-54.
- [12] Bresson E, Chevassut P, et al. Provably secure authenticated group Diffie-Hellman key exchange [J]. ACM Transactions on Information and System Security, 2007, 10(3): 421-454.

(上接第 123 页)

- [6] Yao A. Protocols for secure computation [C]//Proceedings of the 23rd IEEE Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS), IEEE, 1982, 160-164.
- [7] Goldreich O, Micali S, Wigderson A. Proofs that yield nothing about their validity-or-all languages in NP have zero-knowledge proof systems [J]. Journal of the ACM, 1991, 8(1): 691-729.
- [8] 肖倩,罗守山,陈萍,等. 半诚实模型下安全多方排序问题的研究[J]. 电子学报, 2008, 36(4): 709-714.
XIAO Qian, LUO Shoushan, CHEN Ping, et al. Research on the problem of secure multi-party ranking under semi-honest model [J]. Chinese Journal of Electronics, 2008, 36(4): 709-714. (in Chinese)
- [9] 李顺东,戴一奇,游启民. 姚氏百万富翁问题的高效解决方