

激光成像引信在空空导弹中的应用

董康生, 曹林平, 韩统, 黄汉桥, 蔡佳

(空军工程大学航空航天工程学院, 陕西西安, 710038)

摘要 针对激光成像引信在空空导弹中的应用要解决引信前倾角和引信探测距离的设计问题, 在分析激光成像引信推扫成像原理的基础上, 建立了激光引信脚印尺寸模型和引信前倾角与探测距离模型, 通过仿真得到了最佳引信前倾角和探测距离的设计指标: 最佳引信前倾角为 $15^{\circ} \sim 40^{\circ}$, 相应最佳引信探测距离为 $70 \sim 24$ m。

关键词 激光成像引信; 空空导弹; 引信前倾角; 探测距离; 引战配合

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.02.010

中图分类号 TN95 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)02-0042-05

Application Research on Laser Imaging Fuze in Air-to-air Missiles

DONG Kang-sheng, CAO Lin-ping, HANG Tong, HUANG Han-qiao, CAI Jia

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Laser imaging fuse has a strong anti-stealth and anti-electromagnetic interference capacity. In the application of laser imaging fuse to air-to-air missile the design problems of fuse front rake and fuse detection range have to be solved. Based on analyzing the principle of the push-broom method laser imaging fuse, the measurement model of laser footprint size and the mathematic model of fuse front rake and fuse detection range are established. The design criterion of fuse front rake and fuse detection range and their relationship to fuse-warhead match by simulation in variety conditions are acquired, which provide a reference in theory to the application of laser imaging fuse in air-to-air missile.

Key words: laser imaging fuse; air-to-air missile; fuse front rake; detection range; fuse-warhead match

现代空空导弹要求引信不仅能在全高度、全天候、全环境条件下对高机动目标与复杂电磁背景、对弹目交会状态和目标易损部位进行较好的识别, 而且还要能对炸点进行精确控制, 能与定向战斗部进行紧密的配合。激光成像引信的突出优点就是具有有效地抗各种电子干扰能力和超强的反隐身能力^[1]。目前已有激光成像引信技术以其高抗干扰性、目标方位及其部位识别能力受到格外重视, 成为引信在复杂战术环境下自主进行目标探测和实施战

斗部定向起爆的关键技术^[2-4]; 文献^[5~6]对激光探测和激光引信成像技术进行了研究, 提出了新的探测方法。研究^[7-8]表明激光引信在线阵扫描成像体制下, 目标距离像的空间立体感和层次感很强, 目标强度像的轮廓分明, 有利于改善引战配合性能。能较好地满足引信对成像与识别的实时性与准确性的要求。

但是, 激光成像引信在空空导弹上的应用却缺乏研究, 尤其是对引信前倾角和探测距离对引战配

收稿日期: 2012-10-30

基金项目: 航空科学基金资助项目(20105196016)

作者简介: 董康生(1988-)男, 江西乐平人, 硕士生, 主要从事无人飞行器作战系统与技术研究。

E-mail: kgddks@163.com

合的影响研究不足。基于导引头、引信、战斗部一体化设计方法,引信根据导引头获得的目标速度和位置信息以最佳的成像角对目标进行激光成像,战斗部再依据引信获得的目标信息实施精确起爆,给目标以最大的杀伤。引信前倾角和探测距离影响着整个引战配合过程。

本文在分析激光推扫成像原理的基础上,建立了对空引信激光脚印尺寸模型和引信前倾角与探测距离模型,分析了模型的约束条件,并进一步仿真研究了引信前倾角、探测距离、弹目相对速度和速度夹角对脱靶量、拦截距离、拦截时间、成像时间及成像图像大小的影响,研究了引信前倾角与探测距离对引战配合的影响关系,最后得到了最佳引信前倾角和探测距离设计指标。

1 激光引信推扫成像工作原理

激光成像探测是通过激光束对目标进行照射,目标的反射回波经光电成像探测器接收,通过信号处理获取目标的反射强度信息、目标至探测器的距离和速度信息,进而获得区别于背景的目标强度图像、距离图像和多普勒(速度)图像^[8]。激光推扫成像探测技术是指利用弹目相对飞行作为一维扫描,通过线阵探测器件的一行多点的并行激光探测完成另一维扫描,从而达到激光推扫简易成像的目的^[10-11],激光简易推扫成像示意图见图 1。

典型的推扫式激光三维成像系统有美国的 MAPLA 系统和 SOE 系统。

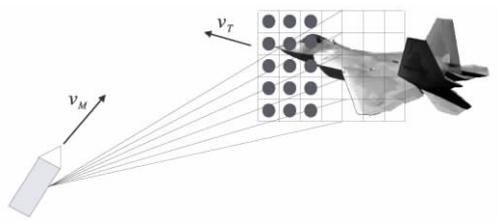


图 1 激光推扫成像示意图
Fig. 1 Diagrammatic drawing of laser pushbroom imaging

激光推扫成像系统原理框图见图 2。窄脉冲形成电路产生一定频率和脉冲宽度的基准信号,经半导体激光器驱动电路驱动后控制 m 元的线性半导体激光器阵列产生 m 束一定波长、所需脉冲重复频率和脉冲宽度的激光,经扩束发射光学系统后,对飞行目标进行照射,投射在目标区的光斑为长扁椭圆或长条矩形。飞行目标反射回的 n 路激光回波进入接收光学系统,由 m 元的 PIN 线性光电探测器阵列并行接收后产生微弱的电信号,该电信号经过并行

前置放大电路和并行可变增益放大电路放大。通过测量往返飞行时间,得到目标上 n 点的距离值,对距离值进行伪彩色或灰度编码,就生成了目标的简易三维距离像。由于飞行目标上不同的距离值代表不同的部位,通过对目标距离图像的计算处理,就可以得到目标易损部位或形心位置,从而实施战斗部的精确引爆。

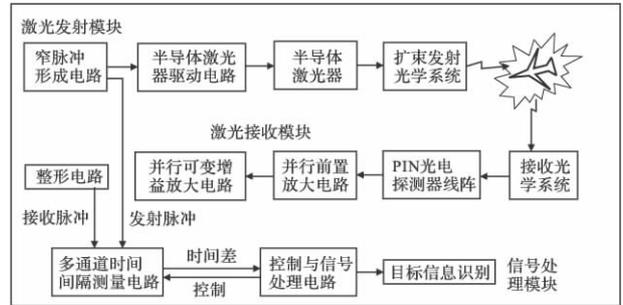


图 2 激光推扫成像系统原理框图
Fig. 2 Principle (block) diagram of laser push-broom imaging system

2 激光成像引信建模

2.1 激光脚印尺寸模型

成像引信对空探测脚印示意图见图 3。它是一个激光脚印的放大图,激光脚印的大小由弹目距离、激光前倾角、激光发散角决定。

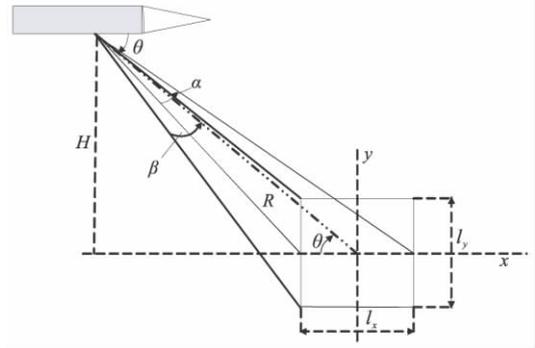


图 3 激光脚印尺寸
Fig. 3 Laser footprint size

图 3 中, θ 为激光引信前倾角, l 为弹目距离, H 为飞行高度, α 为激光纵向散射角, β 为横向散射角, l_x 、 l_y 为激光照射到目标 x 、 y 方向上的大小,即激光脚印的长和宽。

由图中几何关系可得:

$$l_x = \frac{H}{\tan(\theta - \frac{\alpha}{2})} - \frac{H}{\tan(\theta + \frac{\alpha}{2})} = \frac{2\alpha l \sin\theta}{1 - \cos 2\theta} \quad (1)$$

$$l_y = \beta l \quad (2)$$

激光脚印的尺寸:

$$s = \frac{2\alpha\beta l^2 \sin\theta}{l_x l_y (1 - \cos 2\theta)} \quad (3)$$

若激光阵列元数为 m , 扫描列数为 n , 则激光成像平面像素为 mn , 成像平面的大小为 $S = (ml_y)(nl_x)$ 。但实际引信成像中, 成像角不是前倾角 θ , 而是 γ , 见图 4 和式(10)。

2.2 引信前倾角与探测距离模型

基本假定条件: ① 导弹和目标的速度在同一平面内且速度方向与各自纵轴方向相同; ② 导引头在 200 m 处进入导引盲区, 导弹和目标均做匀速直线运动。

弹目交会示意图见图 4, 图中, ψ 为导弹与目标速度夹角, ϵ 为弹目视线角, γ 为激光成像前倾角或激光成像角, v_M, v_T 分别为导弹和目标的飞行速度, v_R 为相对速度, φ 为相对速度的方向角, θ 为激光引信的前倾角, L 为激光脉冲探测距离, D 为探测点与拦截点的距离, 也称拦截距离, R 为脱靶量。空空导弹末制导通常采用比例导引, 即 $\dot{\psi} = k\dot{\epsilon}$, k 通常取 2~6, $\dot{\epsilon}$ 为弹目视线角角速度, $\dot{\psi}$ 为导弹角速度, 也就是导弹运动方向始终追踪目标方向。

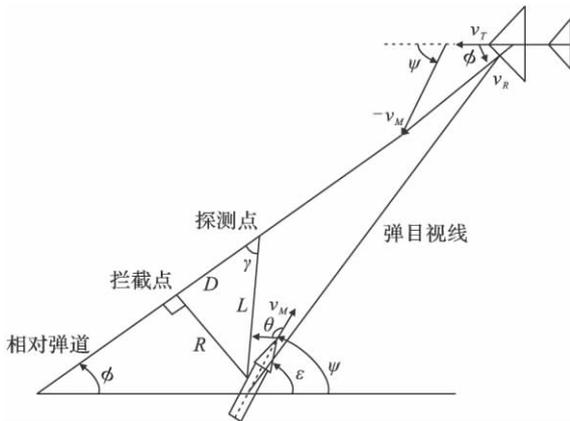


图 4 弹目共面交会示意图

Fig. 4 Diagrammatic drawing of missile and target coplanar intersection

由图 4 可得:

$$v_R = \sqrt{v_M^2 + v_T^2 - 2v_T v_M \cos(\pi - \psi)} \quad (4)$$

$$\cos\varphi = \frac{v_T^2 + v_R^2 - v_M^2}{2v_T v_R} \quad (5)$$

$$\varphi = \arccos \frac{v_T - v_M \cos(\pi - \psi)}{v_R} \quad (6)$$

$$R = \cos\left(\frac{\pi}{2} + \varphi - \theta - \psi\right)L \quad (7)$$

$$D = \cos(\psi + \theta - \varphi)L \quad (8)$$

$$\gamma = (\psi + \theta - \varphi) \quad (9)$$

而式(1)则变为:

$$l_x = \frac{2aR \sin\gamma}{1 - \cos(2\gamma)} \quad (10)$$

2.3 激光成像引信模型约束分析

1) 定义探测点与拦截点之间的距离为引信拦截

距离 D , 目标在 D 段的飞行时间称为引信拦截时间 $T_d, T_d = D/v_R$ 。为满足成像、图像处理及破片飞行时间的要求, $T_d \geq 12$ ms。

2) 设成像及图像处理时间为 T_o , 破片飞散时间为 t , 且 $t = R/v_o$, 爆炸延迟时间为 t , 则 $T_d \geq (T_o + t + t)$, 即 $D \geq (T_o + t + t)v_R \geq (T_o + t)v_R$ 。通常破片平均飞行速度为 $v_o = 1800$ m/s。

3) 战斗部杀伤距离 R_o 是有限的, 有效杀伤时 $R_o \geq R$, 由式(7)、式(9)知 $\sin\gamma L \leq R_o$ 。通常战斗部杀伤半径 $R_o = 12 \sim 18$ m。

4) 激光可成像时间 $T_c = a/v_R$, a 为目标的长度。为满足目标易损部位或形心的计算精度要求, 在 T_c 时间内要成两幅图像, 每幅图像成像时间 $t_o \leq \frac{a}{2v_R}$ 。激光脉冲重复频率 $f_c = \frac{n}{t_o} \geq \frac{2nv_R}{a}$, n 为扫描列数, 图像处理时间 $T_o \approx 2t_o$ 。

3 仿真与分析

3.1 引信前倾角与探测距离

当导弹与目标相互平行时, 即 $\varphi = \psi = 0^\circ$, 是引信探测距离设计的极限条件之一。假定在此条件下, 导弹末端速度为 1000 m/s, 目标飞行速度为 600 m/s, 用 Matlab 仿真得到战斗部杀伤半径 $R_o = 15$ m 和 $R_o = 18$ m 情况下引信前倾角与引信探测距离和拦截时间之间的关系见图 5~6。

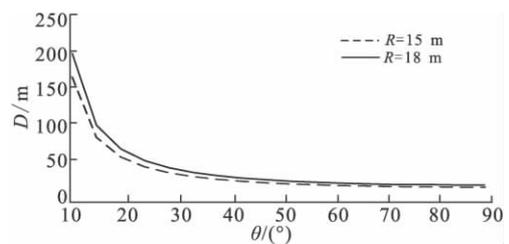


图 5 引信前倾角与激光探测距离的关系

Fig. 5 Relationship between fuse front rake and laser detection range

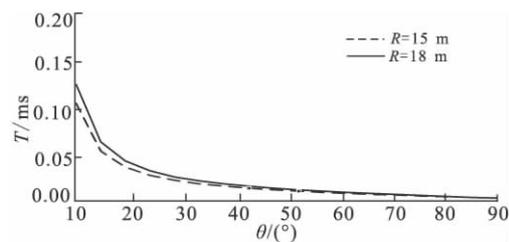


图 6 引信前倾角与拦截时间的关系

Fig. 6 Relationship between fuse front rake and detection time

由图 5 可以看出引信前倾角小于 10° 时, 激光探测距离大于 100 m。激光探测距离越长, 所需的发

射能量越多,激光脉冲产生装置要求就越高;且前倾角太小,工程上安装难度很大。因而引信前倾角要大于 10° 。由图 6 知,引信前倾角为 40° ,拦截时间为 11.2 ms;引信前倾角为 50° ,拦截时间为 7.8 ms。对于激光成像引信,为满足激光成像、图像处理、引爆决策、破片飞行等时间要求,拦截时间要大于 10 ms。因而引信前倾角不能小于 40° 。

综上所述,引信前倾角最佳设计为 $15^\circ \sim 40^\circ$,相应探测距离最佳设计为 70~24 m。

3.2 不同弹目交会情况对引战配合的影响关系

仿真条件假定:导弹末端速度为 1 000 m/s,定向战斗部杀伤半径为 18 m,破片平均飞行速度为 1 800 m/s,激光成像引信前倾角为 20° ,引信探测距离为 53 m,引信线性阵列为 24,成像像素为 24×30 ,激光散射角 $\alpha\beta$ 为 $5 \text{ mrad} \times 5 \text{ mrad}$;目标为某隐身飞机,飞行速度为 600 m/s,目标尺寸为 $16 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 5.5 \text{ m}$ 。探测点距离为引信发现目标时弹目距离。

经 Matlab 仿真得到在弹目速度夹角 $\phi = 30^\circ$ 和 $\phi = 45^\circ$ 时,探测点距离对的拦截时间、脱靶量、成像角、相对速度、成像时间影响,见表 1~2。

表 1 $\phi = 30^\circ$ 仿真结果

Tab 1 $\phi = 30^\circ$ simulation results

L/m	T_d/ms	R/m	$\gamma/(\circ)$	$V_R/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	T_c/ms
50	27.6	25.8	31.1	1548	12.9
40	22.1	20.6	31.1	1548	12.9
30	16.6	15.5	31.1	1548	12.9
20	11.1	10.3	31.1	1548	12.9

表 2 $\phi = 45^\circ$ 仿真结果

Tab 2 $\phi = 45^\circ$ simulation results

L/m	T_d/ms	R/m	$\gamma/(\circ)$	$V_R/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	T_c/ms
50	27.0	29.7	36.5	1 486	13.5
40	21.6	23.7	36.5	1 486	13.5
30	16.2	17.8	36.5	1 486	13.5
20	10.8	11.9	36.5	1 486	13.5

比较表 1 和表 2 可知,拦截时间随速度夹角的增加而减小,脱靶量随速度夹角的增加而增加,成像角随速度夹角的增加而增加,相对速度随速度夹角的增加而减小,成像时间随速度夹角的增加而增加。当目标距离导弹小于 20 m 时,激光引信成像时间不足,无法满足成像需求,此时引信应根据距离和速度信息直接对战斗部实施引爆。

经计算,激光脉冲扫描频率 $f_0 = 2 \text{ kHz}$,激光脚印尺寸大小 $s = l_y l_x = 150 \times 275 (\text{mm}^2)$,成像图片大小 $S = (24 l_y) \times (30 l_x) = 3.6 \times 8.2 / \text{m}^2$ (宽 \times 长) 与目标尺寸相匹配,能满足对目标成像要求。

通过比较表 1、表 2 我们知道,导引头在追踪目标过程中,应努力减小彼此的速度夹角,只有速度夹角在一定的范围内,脱靶量才能够满足杀伤目标的要求,速度夹角越小战斗部杀伤机会和概率都会增加。

4 结论

1) 最佳引信前倾角为 $15^\circ \sim 40^\circ$,相应最佳引信探测距离为 70~24 m;

2) 导弹在追踪目标的过程中,应该努力减小与目标的速度夹角,以提高战斗部的杀伤机会和杀伤概率;

3) 拦截时间随速度夹角的增加而减小,脱靶量随速度夹角的增加而增加,成像角随速度夹角的增加而增加,相对速度随速度夹角的增加而减小,成像时间随速度夹角的增加而增加。

参考文献(References):

- [1] 洪流,梁谦.激光成像引信技术研究[C]//2003 年全国光电技术学术交流会论文集.武汉:中国宇航学会光电技术专业委员会,2003:572-576.
HONG Liu, LIANG Qian, Study on laser imaging fuze technology[C]//2003 annual symposium on photoelectric technology. Wuhan: Chinese astronautics photo-electronic committee, 2003: 572-576. (in Chinese)
- [2] Stann B L, Abou Auf A, Ruff W, et al. Line imaging lidar using a laser-diode transmitter and FM/CW radar principles for submunition applications[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4035: 192-203.
- [3] Marino R M, Davis W R, Rich G C, et al. High-resolution 3D imaging laser radar flight test experiments [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5791: 138-151.
- [4] 孙志慧,邓甲昊,闫小伟.国外激光成像探测系统的发展现状及其关键技术[J].科技导报,2010,28(4): 74-79.
SUN Zhihui, DENG Jiahao, YAN Xiaowei. Progress and current state of the development of laser imaging detection system and its key techniques[J]. Science & technology, 2010, 28(4): 74-79. (in Chinese)
- [5] 魏斌,郑链,王克勇,等.一种激光引信成像探测新方法[T].光电工程,2005,32(1):36-39.
WEI Bin, ZHENG Lian, WANG Keyong, et al. A new method for detecting plane target by imaging in laser fuze[J]. Opto-electronic engineering, 2005, 32(1): 36-39. (in Chinese)
- [6] 李番,邬双阳,杨红果,等.激光雷达多元阵列探测技术[J].红外与激光工程,2009,38(2):95-99.
LI Fan, WU Shuangyang, YANG Hongguo, et al.

- Multi-element array detecting technology of lidar[J]. Infrared and laser engineering, 2009, 38(2): 95-99. (in Chinese)
- [7] 闫小伟, 邓甲昊, 孙志慧. 线阵扫描式激光成像探测系统建模与仿真[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(4): 456-459.
- YAN Xiaowei, DENG Jiahao, SUN Zhihui. Modelling and simulation of laser imaging system based on linear array detection[J]. Transactions of Beijing institute of technology, 2010, 30(4): 456-459. (in Chinese)
- [8] Vaidyanathan M, Blask S, Higgins T, et al. Jigsaw phase III: a miniaturized airborne 3-D imaging laser radar with photon-counting sensitivity for foliage penetration[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6550: 1-12.
- [9] 闫小伟, 邓甲昊. 三维激光成像探测系统建模与仿真[J]. 科技导报, 2011, 29(8): 28-32.
- YAN Xiaowei, DENG Jiahao. Modeling and simulation of 3D laser imaging detection system[J]. Science & technology, 2011, 29(8): 28-32. (in Chinese)
- [10] Stann B L, Aliberti K, Carothers D D, et al. A 32×32 pixel focal plane array lidar system using chirped amplitude modulation[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5412: 264-272.
- [11] 孙志慧, 邓甲昊, 闫小伟. 线阵推扫式激光成像引信探测技术[J]. 光电工程, 2009, 36(3): 16-21.
- SUN Zhihui, DENG Jiahao, YAN Xiaowei. Linear array push-broom method in laser imaging fuze detection technology[J]. Opto-electronic engineering, 2009, 36(3): 16-21. (in Chinese)

(编辑: 田新华)

第二届全国图象图形联合学术会议论文格式

张三¹, 李四²

1. 西北工业大学 XX 学院, 陕西西安, 710072

2. 中科院 XX 研究所, 北京, 100030

E-mail: zhangsan@.nwpu.edu.cn

摘要: 这份说明给出了第二届全国省市级图象图形联合学术会议论文格式第六届全国“信号与信息处理”联合学术会议论文投稿的基本要求。向会议提交的论文原则上不得超过 4 页, 超过的页数另加版面费。摘要不少于 100 个汉字, 关键词用逗号隔开。

关键词: 字体, 格式, 页边距

1 引言

请将论文用纸设置为 210 mm × 297 mm 的 A4 纸, 全篇论文请在“段落”选项中将“行距”设置为“单倍行距”, 每段首行缩进 2 个汉字。一级标题要上下各空一行, 二级标题只需上空一行。所有的图形、表格和公式都必须包括在论文中, 请不要链接到外部的文件。

2 问题描述

2.1 格式

在“页面设置”的“页边距”选项中: “上”为 25 mm, “下”为 31 mm, “左右”为 20 mm, “距边界”中“页眉”设置 13 mm, “页脚”为 20 mm, “文档网格”选“无网格”。正文采用双栏式, 在“格式”的“分栏”选项中, “栏数”设置为 2, “宽度和间距”中“间距”设置为 2 字符, “宽度”设置为 21.95 字符, 然后选择“栏宽相等”。

2.2 字号大小和字体样式

全篇论文选用宋体, 正文部分选用 10 号字。

论文题目字体选宋体加粗, 字号为四号; 作者姓名选小四号字, 作者之间用逗号隔开, 需作者序号时请用数字以上角标形式标注在右上角, 段落间距段前: 0.5 行; 作者单位选小五号字, 单位前面加序号, 后面请写“省市, 邮政编码”, 一级标题选小四号字, 二级标题选五号字, 并且加粗。

3 结果

3.1 表格和图

将图和表格放在每栏的顶部和底部, 避免放在每栏的中间, 大的图和表格可以横跨两栏。

图和表格的文字请用小五号字, 图题和表题请加粗。

表题与上面文字之间空一行, 表题置于表格上方。

请尽量采用 Word 中的绘图工具绘图, 如果有些图无法用 Word

中的绘图工具绘制, 请不要将图题放在您绘制的图中, 必须用 Word 单独排版。为了保证您论文中图的清晰度, 请不要用颜色和灰度图来区分图中的不同含义, 因为是单色印刷, 且灰度图印制出的效果非常不好, 故建议不要采用。

图题放在图的下方, 用“图 1”表示, 图题与下面文字间空一行。

3.2 参考文献

引用的参考文献应用连续的数字在方括号中标出, 参考文献在文中用上角标标注, 该句的标点符号跟在方括号之后, 参考文献的顺序应按在文中出现的顺序排列。

给出的参考文献格式是标准格式, 也是我们希望您能在论文中应用的格式。

3.3 公式

公式排版请用公式编辑器编排, 公式需要用圆括号加数字进行连续编号, 并使编号与每栏的右边线对齐, 参见(1), 如

$$A+B=C \quad (1)$$

注意公式中的符号要事先定义或紧接在公式下给出定义。公式中的变量须用斜体。

3.4 其他

一级标题前请用数字进行标号, 引言和参考文献的字体和字号等同于一级标题, 引言需要标上标号, 参考文献不需标号并居中, 一、二级标题应顶格。

另外, 论文不需要排页码, 投稿请务必用 WORD 文件。

4 结论

对于基金资助请放在第一页的脚注处, 无需使用脚注编号。

参考文献:

- [1] 郭敏, 王红卫, 费奇. 一种分配形供应链在随机需求下订货策略研究. 系统工程与电子技术, 2003, 25(1): 41-43.
- [2] 陈荣秋, 马士华. 生产运作管理. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [3] Chang Guangshu, Xu Jichao. A conceptual model of e-service quality in e-commerce. Proceedings of the 3rd Sino-Korea Bilateral Symposium on Quality, Shanghai, China, 2004, pp78-85.
- [4] Sun Jin, Sadeh Norman. Coordinating multi-attribute procurement auctions subject to finite capacity considerations. Working paper, Carnegie Mellon University, USA, 2004.
- [5] 王志东. 协同应变, 信息化的新趋势. 软件世界, 2004, 209(7). <http://www.sohu.com>