

基于 TOPSIS 的故障树综合分析方法研究

饶 毅¹, 徐丙立¹, 荆 涛¹, 赵秀玉¹, 张 飞^{1,2}

(1 装甲兵工程学院 信息工程系, 北京 100072; 2 汕头大学 工学院, 广东 汕头 515063)

摘 要: 针对传统故障树分析得到的诊断序列存在局部最优的问题, 研究提出基于 TOPSIS 的综合分析方法, 以概率重要度、结构重要度、关键重要度为分析指标, 构建集定量与定性为一体的综合分析方法. 同时, 针对 TOPSIS 参数权重主观确定而导致的结果合理性弱的问题, 引入熵权系数定量确定参数权重. 另外, 针对可能出现多个底事件分析结果相同的问题, 提出检测优先级的概念, 对分析结果相同的底事件进行二次排序, 得到准确的诊断序列. 通过实例验证发现, 本方法所生成的诊断序列较传统方法在准确性和科学性方面具有一定的改进效果.

关键词: 故障树分析; TOPSIS; 熵权系数; 检测优先级; 综合分析

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2017)12-0028-06

Research on Fault Tree Comprehensive Analysis Method Based on TOPSIS

RAO Yi¹, XU Bing-li¹, JING Tao¹, ZHAO Xiu-yu¹, ZHANG Fei^{1,2}

(1 Department of Information Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China;

2 Engineering College, Shantou University, Shantou 515063, China)

Abstract: In this paper, a new method based on TOPSIS is proposed, which is based on the comprehensive analysis method of TOPSIS. The importance degree, the importance degree of the structure and the key importance degree are used as the analysis index to construct the integrated and quantitative Analytical method. At the same time, according to the problem that the result of TOPSIS parameter is subjective and the result is weak, the entropy weight coefficient is used to quantitatively determine the parameter weight. In addition, the concept of detection priority is proposed to solve the problem of the same result, and the bottom events with the same analysis result are sorted and the exact diagnosis sequence is obtained. It is found that the diagnostic sequence generated by this method has some improvement effect compared with the traditional method in terms of accuracy and scientificity.

Key words: fault tree analysis; TOPSIS; entropy weight coefficient; detection priority; comprehensive analysis

1 引言

故障树分析法(Fault Tree Analysis, FTA)是装备维修中用于可靠性与故障诊断分析的重要基础,尤其在薄弱环节分析、部件结构优化设计等方面有着广泛有效的应用前景. 通过建立故障树,可以清楚的表现故障路径与作用机理,为认知装备故障原理以及维修人员培训提供支撑. 虽然传统的故障树分析法在航空航天、核能、电子、机械等领域得到广

泛应用. 但是在故障树定量分析存在一定的不足. 传统故障树的定量分析以单一指标值作为分析依据,用以确定诊断序列,这种方式得到的诊断序列具有一定的片面性,同时,基于单一指标对指标值相同的底事件无法进行准确排序. 因此,现有的故障树定量分析尚不能满足故障推理、故障诊断以及快速维修等问题的解决.

TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)是一种常用的多指标决

策方法,它能够解决故障树分析中的定量分析问题,并通过多因子综合分析,提高故障树分析的的科学合理性.然而,TOPSIS 存在指标权重确定主观性大的问题,需要对其指标权重的确定方法进行适应性改造,以支撑故障树的综合分析.

2 故障树综合分析方法构建

故障树分析法在 1961 年由贝尔实验室的 H. A. Watson 提出,经过几十年的发展,已经成为国际公认简单、有效的故障诊断方法^[1].故障树分析法是一种图形演绎的逻辑分析方法,它从系统到部件、从部件到零件,由上而下,找出导致事件产生的所有原因.在故障树分析前,首先需要了解几个概念^[2-3]:

顶事件:位于故障树最顶端的事件,即需要进行分析的事件;

底事件:位于故障树最底层的事件,不能进行再次分解的事件;

中间事件:位于顶事件与底事件之间的所有事件;

定性分析:利用最小割集或最小径集对故障树进行分析,找出可能导致故障发生的组合,为故障诊断提供依据;

定量分析:根据定性分析结果求得系统失效概率及底事件对系统失效的影响大小,包括概率重要度、结构重要度和关键重要度等指标;

概率重要度:底事件发生时,系统处于失效临界状态的概率;

结构重要度:在不考虑其他底层事件是否发生的条件下,该事件在故障树结构中的位置重要程度;

关键重要度:底事件概率的变化对底事件的影响程度.

故障树的构建是在一定工作环境和条件下,将最不希望发生的或者人为指定的事件作为故障树分析的顶事件,根据系统的组成和结构,通过分析导致顶事件发生的直接事件作为中间事件,以中间事件为分析目标,将导致中间事件发生的事件作为下一级中间事件,逐层分析直至不能再分解为止,以最后分析的事件作为底事件.将顶事件、中间事件、底事件用适当的逻辑门自上而下逐级连接起来就构成了该顶事件的故障树.

这种方法既能分析硬件故障,也可以对于其他环境或者任务因素进行分析.对建立的故障树通过定性分析进行简化,得到导致系统故障的所有原因,并求出最小割集即得出可能的失效模式以及故障

组合.随后对分析结果进行定量分析,对各评价指标进行定量计算,根据各底事件的失效概率计算出概率重要度、结构重要度、关键重要度等定量分析指标.根据计算结果,选择某一指标值作为分析依据确定故障诊断序列,故障树分析流程如图 1 所示.



图 1 传统故障树分析方法

在传统的故障树分析中,定量分析一般只计算出评价指标中的其中一个,通常以关键重要度作为诊断序列的排序依据,根据指标的数值大小确定诊断序列,而通过该指标得到的序列只能表示在该指标下的最优序列,选择不同的重要度作为排序依据得到的序列不尽相同,因此得到的诊断序列具有一定的片面性.

进行故障树分析,其目的就是在故障发生时,为故障诊断提供参考,以便快速确定故障原因并排除故障.故障树定量分析的评价指标有多个,基于此,对于故障树定量分析的结果,可以将其作为一个综合分析系统. TOPSIS 法常应用于有限方案多指标综合分析中,能在众多备选方案中选择出综合性能最佳的方案.在故障树定量分析中,可以将每个底事件作为一个备选方案,三个重要度作为评价指标,应用 TOPSIS 对其进行分析,使每一个底事件都得到一个综合分析值,根据综合分析值的大小进行排序,得到诊断序列.

在基于 TOPSIS 的综合分析中,每个指标都需要赋予一定的权重.在综合分析中,指标权重的确定是至关重要的环节,直接决定了分析结果的准确性.根据文献^[4]给出的定义以及计算方法可以分别计算出结构重要度、关键重要度和概率重要度等所有指标^[4],但是各指标的权重无法计算.在指标权重确定方法中,主观分析法是最常用的权重确定方法,主观分析法以专家评判结果得到权重,该方法主观分析受人为因素影响较大,难以满足实际评价过程中对权重的定量需求,为减少人为因素对评价结果的影响,本文拟采用熵权法确定各指标权重.

对故障树定量分析结果进行综合处理后,可能存在综合分析结果相同的底事件,对于该类型底事件如何进行排序也是综合分析中不可忽视的问题,特别是在大型复杂系统的分析中,底事件多,综合分析结果相同的可能性更大,本文从排查路径以及故障检测时间出发,提出检测优先级的概念,用于对综

合分析结果相同的底事件进行二次排序,使综合分析结果更加科学合理。

基于 TOPSIS 的故障树综合分析方法流程如下:采用熵权法定量确定各指标权重,根据计算结果,采用 TOPSIS 对结果进行分析,如果存在综合分析结果相同的底事件,采用检测优先级进行二次排序,得到综合评价的结果,根据分析结果得出诊断序列。如图 2 所示。

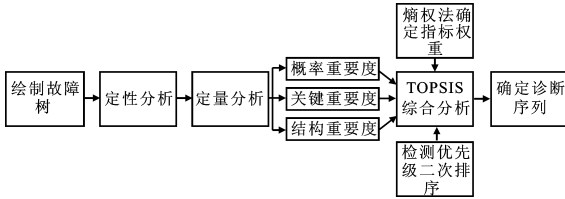


图 2 基于 TOPSIS 的故障树综合分析方法

3 基于熵权法的指标权重确定方法

将故障树定量分析作为多指标的综合分析过程,各个指标之间的重要程度是不同的,相对重要度代表了指标对分析结果的影响大小,通常以权重表示。熵(Entropy)是热力学的概念,由克劳修斯提出,用于度量系统的无序程度^[5]。自香农将其引用到通讯工程并形成信息论以后,在工程技术等多个领域应用广泛。熵是对系统状态的不确定性的一种度量^[6]。与系统状态是时时对应的,在多指标的综合评价体系中,一个指标的熵越小,表明其变异程度越大,包含的信息也就越大,其熵权系数也就越大,该指标在分析过程中的重要度也就越大。指标的熵越大,其变异程度越小,其包含的信息也就越小,指标的重要度也越小。

根据各指标数值的变化程度,利用信息熵这一工具,计算各指标的权重^[7]。对于一个指标,其对应 n 个底事件,且每个底事件对应的概率为 P_i ($i = 1, 2, \dots, n$),评价该指标的熵为:

$$E = - \sum_{i=1}^n P_i \ln P_i \quad (1)$$

式中, P_i 满足

$$\sum_{i=1}^n P_i = 1, 0 \leq P_i \leq 1$$

在故障树分析中,设有 m 个底事件,每个底事件对于 n 个指标,通过数据采集或者专家评判,计算出这 n 个指标的值。设第 i 个底事件的第 j 个指标值为 x_{ij} ,可以得到初始决策矩阵:

$$X = (x_{ij})_{m \times n}$$

(1) 对初始决策矩阵

$$X = (x_{ij})_{m \times n}$$

做标准归一化处理得到标准矩阵

$$Y = (y_{ij})_{m \times n} \quad (2)$$

式中: $y_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^m x_{ij}$ ($1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$)

(2) 由上述标准矩阵可计算第 j 个指标的熵值

$$e_j = - \frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m y_{ij} \ln y_{ij} \quad (3)$$

(3) 计算第 j 个指标的权重

$$w_j = \frac{1 - e_j}{n - \sum_{j=1}^n e_j} \quad (4)$$

4 检测优先级确定方法

优先级(priority)最早应用于计算机分时操作系统对多个作业程序的处理,是决定各个作业程序接受系统资源的优先等级的参数,根据优先等级确定作业程序处理的先后顺序。基于此,本文提出检测优先级的概念,检测优先级指在故障排除过程中,综合分析结果相同的底事件在排故过程中的优先等级。由定义可知,检测优先级的应用时机是故障排除过程中,应用的对象是综合分析结果相同的底事件,综合分析结果不同的底事件可以直接根据优先级的大小确定序列。对于优先级的确定流程如下及图 3 所示:

(1) 综合分析结果相同的各底事件处于同一拆卸路径中时,在路径中靠前的底事件优先级高,靠后的底事件优先级低;

(2) 综合分析结果相同的底事件处于不同拆卸路径时,以故障检测时间为依据,故障检测时间短的底事件优先级高,故障检测时间长的底事件优先级低;

(3) 综合分析结果相同的底事件中,底事件中既有处于同一拆卸路径的,又有处于不同拆卸路径时,首先比较在各条路径上的底事件数量,分为两种情况:第一种是不同路径上包含的底事件数量不同时,底事件数量多的路径优先级高,底事件数量少的路径优先级低,其次对处于同一路径下的底事件按照原则(1)确定各底事件的优先级;第二种情况是当不同路径包含底事件数量相同时,按照检测时间确定优先级,遵循原则(2)。故障检测时间短的路径优先级高,时间长的优先级低,然后对同一路径下的底事件按照原则(1)确定优先级;

(4)根据确定的优先级,对综合分析结果相同的底事件进行排序.

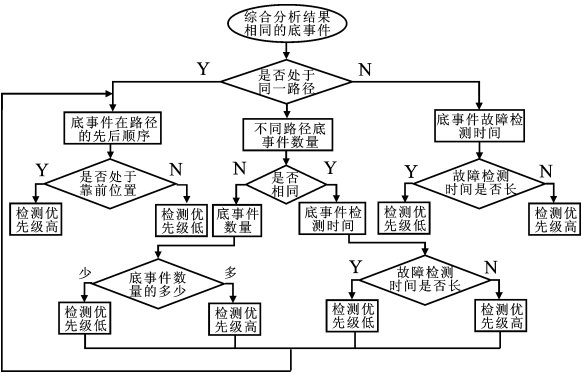


图3 检测优先级确定流程图

在实际应用过程中,根据具体情况,结合以上检测优先级确定原则对综合分析结果相同的底事件进行二次排序,形成最终的诊断序列.

5 基于熵权系数的 TOPSIS 综合分析模型构建

TOPSIS 即逼近理想点排序法,是一种以逼近理想解作为最优决策方案,解决多因素决策方案的排序方法^[8].其基本原理是确定待解决问题的“理想解”和“负理想解”,所谓“理想解”,就是把各指标的最优值集中作为一个最佳方案,是理想中的最好方案.“负理想解”是把所有指标的最差值集中产生的一个方案,是极力避免的一个方案.无论是“理想解”还是“负理想解”,都是虚拟的,现实中不可能存在的.通过与“理想解”和“负理想解”分别进行比较,同时综合熵权法确定指标的权重系数得到目标与理想解的距离,按照距离值的大小,以距离“理想解”近同时离“负理想解”远的程度作为排序依据,对目标进行排序.得出最佳的诊断序列^[9].

在故障树分析中,设有 m 个底事件,每个底事件对于 n 个指标,通过数据采集或者专家评判,计算出这 n 个指标的值.第 i 个底事件的第 j 个指标值为 r_{ij} ,其中 $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$,综合上述熵权的 TOPSIS 综合评价方法模型如下:

(1) 初始决策矩阵

$$R = (r_{ij})_{m \times n} \tag{5}$$

(2) 进行归一化处理得标准矩阵

$$H = (h_{ij})_{m \times n} \tag{6}$$

(3) 加入熵权的标准矩阵

$$H = [\omega_j h_{ij}]_{m \times n} \tag{7}$$

(4) 根据底事件的各指标确定理想解为 s^* , 负

理想解为 s^- , 设 s^* 、 s^- 分别为理想解 s^* 、负理想解 s^- 的第 j 个指标值.

$$s_j^* = \begin{cases} \max r_{ij} & j \text{ 收益型} \\ \min r_{ij} & j \text{ 成本型} \end{cases} \tag{8}$$

$$s_j^- = \begin{cases} \max r_{ij} & j \text{ 成本型} \\ \min r_{ij} & j \text{ 收益型} \end{cases} \tag{9}$$

在故障树定量分析中,需要找出故障发生概率最大的底事件,因此作为收益型处理.

(5) 计算各底事件到理想解与负理想解的距离,分别以 d^* 、 d^- 表示第 i 个底事件到理想解、负理想解的距离.

$$d_i^* = \sum_{j=1}^n \omega_j (s_{ij} - s_j^*)^2, i = 1, 2, \dots, m \tag{10}$$

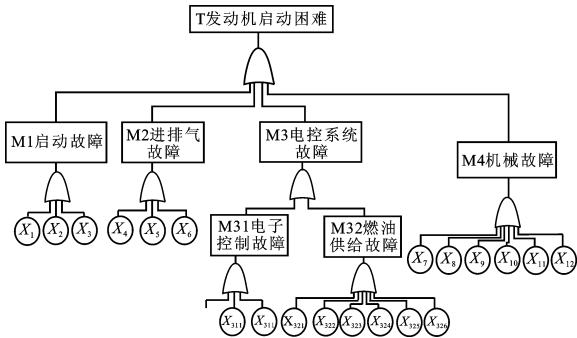
$$d_i^- = \sum_{j=1}^n \omega_j (s_{ij} - s_j^-)^2, i = 1, 2, \dots, m \tag{11}$$

(6) 按相对贴近度 C_i 对底事件进行排序,排在前面的底事件为优先诊断底事件.

$$C_i = d_i^- / (d_i^- + d_i^*), i = 1, 2, \dots, m \tag{12}$$

6 实例验证

故障树定量分析主要是通过底事件计算顶事件的发生概率,以此来分析故障的失效概率,常用重要度指标来分析,一般包括概率重要度、结构重要度、关键重要度.通过对《可靠性实用指南》以及文献^[10]的研究,结合其中的发动机不能启动故障树模型作为研究对象,对上述方法进行实验验证,发动机不能启动故障树如图4所示^[10].



归一化处理可得
 $X =$

$$\begin{bmatrix} 0.038 & 0.038 & 0.038 & \dots & 0.153 & 0.153 & 0.153 \\ 0.155 & 0.31 & 0.155 & \dots & 0.078 & 0.155 & 0.155 \\ 0.137 & 0.034 & 0.137 & \dots & 0.239 & 0.205 & 0.171 \end{bmatrix}^T$$

根据公式(3) 计算熵值

$$e_1 = 1.088\ 252, e_2 = 1.083\ 63, e_3 = 1.098\ 135$$

由公式(4) 可计算出权重为

$$w_1 = 0.326\ 837, w_2 = 0.309\ 72, w_3 = 0.363\ 442$$

根据各组参数指标,可得

$$s^+ = [0\ 0\ 0]$$

$$s^- = [1\ 1\ 1]$$

将 w_j 和 s^* 的数据带入式(9),得到理想解的加权距离:

$$\begin{aligned} d^* = & (0.937\ 1\ 0.928\ 8\ 0.937\ 1\ 0.867 \\ & 0.985\ 7\ 0.981\ 2\ 0.985\ 7\ 0.985\ 3\ 0.978\ 3 \\ & 0.978\ 9\ 0.977\ 3\ 0.984\ 1\ 0.985\ 6\ 0.986\ 7 \\ & 0.985\ 7\ 0.984\ 1\ 0.938\ 0\ 0.935\ 5\ 0.943\ 9 \\ & 0.964\ 0\ 0.961\ 0\ 0.965\ 0\ 0.961\ 5\ 0.961\ 0) \end{aligned}$$

同理可得 d^-

$$\begin{aligned} d^- = & (0.882\ 9\ 0.866\ 7\ 0.882\ 9\ 0.973\ 9 \\ & 0.971\ 9\ 0.963\ 0\ 0.971\ 9\ 0.971\ 0 \\ & 0.957\ 7\ 0.958\ 8\ 0.955\ 6\ 0.968\ 7 \\ & 0.971\ 6\ 0.973\ 9\ 0.971\ 9\ 0.968\ 7 \\ & 0.884\ 5\ 0.879\ 6\ 0.896\ 3\ 0.931\ 1 \\ & 0.925\ 2\ 0.933\ 1\ 0.926\ 2\ 0.925\ 2) \end{aligned}$$

将得到的加权距离带入式(10),得到最终评价结果:

$$\begin{aligned} & (0.485\ 0\ 0.482\ 7\ 0.485\ 0\ 0.496\ 7\ 0.496\ 4 \\ & 0.495\ 3\ 0.496\ 4\ 0.496\ 3\ 0.494\ 6\ 0.494\ 8 \\ & 0.494\ 4\ 0.496\ 0\ 0.496\ 4\ 0.496\ 7\ 0.496\ 4 \\ & 0.496\ 0\ 0.485\ 3\ 0.484\ 6\ 0.487\ 0\ 0.491\ 3 \\ & 0.490\ 5\ 0.491\ 6\ 0.490\ 6\ 0.490\ 5) \end{aligned}$$

根据 TOPSIS 综合评价原理, C_i 取值越大越好,以得到底事件诊断顺序为:

$$[x_2\ x_5\ (x_1\ x_3)\ x_4\ x_6\ (x_8\ x_{11})\ x_{10}\ x_7\ x_9\ x_{223}\ x_{222}\ x_{213}\ (x_{231}\ x_{235})\ x_{215}\ x_{232}\ (x_{212}\ x_{214}\ x_{234})\ (x_{211}\ x_{233})\ x_{221}]$$

以上序列中,括号内的代表综合分析结果相同的底事件,结合检测优先级的定义以及确定流程, x_1 与 x_3 处于不同的拆卸路径,按照故障检测时间确定检测优先级, x_1 的故障检测时间相对于 x_3 较短,因此 x_1 的检测优先级高于 x_3 ,同理可对 (x_8, x_{11}) 、 (x_{231}, x_{235}) 、 $(x_{212}, x_{214}, x_{234})$ 、 $(x_{211},$

$x_{233})$ 分别进行二次排序,得到最终的诊断序列如下:

$$[x_2\ x_5\ x_1\ x_3\ x_4\ x_6\ x_{11}\ x_8\ x_{10}\ x_7\ x_9\ x_{223}\ x_{222}\ x_{213}\ x_{235}\ x_{231}\ x_{215}\ x_{232}\ x_{212}\ x_{214}\ x_{234}\ x_{233}\ x_{211}\ x_{221}]$$

以关键重要度作为评价指标,得出由单一指标确定的诊断序列为:

$$[x_2\ x_5\ (x_1\ x_3\ x_{213}\ x_4)\ (x_8\ x_{11})\ (x_{223}\ x_{231}\ x_{235}\ x_{10})\ (x_{211}\ x_{212}\ x_{214}\ x_{215}\ x_{221}\ x_{222}\ x_{232}\ x_{233}\ x_{234}\ x_6\ x_7\ x_9)]$$

对比综合分析确定的序列与单一指标确定的序列,得到的诊断序列在前部分大体相同,说明两种方法得到诊断序列在确定高发底事件上是一致的,但是单一指标确定的诊断序列存在很多指标值相同的底事件,根据单一指标的确定原则无法对指标值相同的底事件进行准确排序,因此通过单一指标的方法得到的是不明确的诊断序列.而综合分析法通过多指标的综合分析,大幅减少了分析结果相同的底事件数量,对于剩余分析结果相同的底事件通过检测优先级进行二次排序得到精确的诊断序列.因此,通过综合评价方法得到的诊断序列更加符合实际的维修过程,对故障诊断、快速维修有重要的指导作用.

7 结束语

本文将故障树分析多指标的系统进行综合分析,并引入 TOPSIS 进行综合评价,所得到诊断序列是基于多个指标的综合最优序列,有效解决了单一指标评价的局部最优问题.针对评价过程中指标权重难以确定的问题,采用熵权法确定指标权重,避免了权重的主观性,针对综合分析结果相同的底事件,提出检测优先级的概念以及确定原则,对底事件进行二次排序,得到最终准确的诊断序列,将改进的算法应用于发动机不能启动的实例,与传统方法对比,综合评价得到的结果更加科学合理,对故障快速诊断及故障维修有重要的指导意义.

在当前故障树分析方法中,进行定量分析的指标全部基于底事件失效概率计算得出,因此在进行综合评价时,存在指标不全面的问题,影响故障维修效率的因素除了底事件的失效概率还有其他因素,如何构建全面的评价指标体系是今后需要解决的问题;本文提出的检测优先级现在的判断以定性分析为主,如何对该指标进行量化也需要进一步的研究;针对无法得到准确失效概率的故障树如何进行综合

分析,也是今后的研究方向.

参考文献:

[1] 宋保维. 系统可靠性设计与分析[M]. 西安:西北工业大学出版社,2008:112-112.

[2] 鲁锋. 浅谈设备故障分析方法[J]. 冶金自动化,2009,33(1):298-301.

[3] 吕应超. 基于 VC 的故障树分析软件开发与研究[D]. 沈阳:东北大学,2010.

[4] 罗航. 故障树分析的若干关键问题研究[D]. 成都:电子科技大学,2008.

[5] 刘玘玘,汪妮,解建仓. 基于熵权法的城市生态系统健康模糊评价[J]. 武汉大学学报(工学版),2014,47(6):756-757.

[6] 张峰,谢振华,程江涛,等. 改进熵系数法的预警机探测引导能力评估[J]. 火力与指挥控制,2015,40(2):161-164.

[7] 张婕,吴振强,霍成义. 基于熵权系数的 BWIP 网络风险评估方法[J]. 计算机工程与应用,2007,43(15):114-117.

[8] Hsu S S, Lin W Y, Stanley Lee. Group decision making for TOPSIS[C]// Ifsa World Congress & Nafips International Conference. USA: IEEE, 2001 (5): 2712-2716.

[9] 徐达,李闯,李洋. 基于 TOPSIS 的装备维修性定性指标综合评价研究[J]. 航天控制,2014,32(5):92-96.

[10] 孔庆东. 发动机故障诊断虚拟培训系统的开发[D]. 长春:吉林大学,2015.

作者简介:

饶毅 男,(1993-),硕士. 研究方向为计算机仿真. E-mail: raoyimail@163. com.

徐丙立 男,(1975-),博士,副教授. 研究方向为虚拟地理环境等.

荆涛 男,(1978-),硕士,讲师. 研究方向为人机交互与人机功效.

赵秀玉 女,(1975-),博士,讲师. 研究方向为虚拟环境快速构建.

张飞 男,(1989-),硕士. 研究方向为虚拟现实.

(上接第 27 页)

作者简介:

张庆伟 男,(1980-),博士研究生. 研究方向为石墨烯电子器件的研究与设计. E-mail: zqw6868zqw@163. com.

李平 男,(1957-),教授,博士生导师. 研究方向为纳米电子器件与集成电路的研究与设计.

廖永波 男,(1976-),博士,副教授. 研究方向为纳米电子器件与集成电路的研究与设计.

王刚 男,(1981-),博士,讲师. 研究方向为石墨烯电子器件的研究与设计.

曾荣周 男,(1978-),博士研究生. 研究方向为石墨烯电子器件的研究与设计.

王恒 男,(1995-). 研究方向为石墨烯电子器件的研究与设计.

翟亚红 女,(1981-),博士,副教授. 研究方向为纳米电子器件的研究与设计.