航电设备故障诊断中的决策算法

李 洁 沈士团 孙宝江 齐 怡

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 设计了故障诊断专家系统中的多属性决策算法. 分析了诊断决策算法对诊断效率的影响. 根据各属性对诊断决策的影响, 对属性值进行规范化. 采用线性加权函数来评价各故障的优先级, 利用对故障发生概率的偏好性求解各属性权值. 设计修正向量对评价函数进行修正以满足它在属性边界点上跳变特性. 通过实验分析了该多属性决策算法在不同情况下对诊断效率的提高程度.

关 键 词: 专家系统; 多属性决策; 故障诊断

中图分类号: O 212.5; V 241

文献标识码: A 文章编号: 1001-5965(2007)06-0677-05

Algorithm of decision making for avionic device fault diagnosis

Li Jie Shen Shituan Sun Baojiang Qi Yi

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The multiple attribute decision making (MADM) algorithm for fault diagnosis expert system was put forward. The influence of diagnosis decision-making on the diagnosis efficiency was analyzed. According to the effect of every attribute on diagnosis decision-making, the attributes' value was normalized. The linear additive weighting function was used to evaluate every fault priority. The weight value was determined by the preference information on the probability of fault occurrence. The approach of solving evaluation function correction vector was proposed to satisfy the jump characteristics on attribute boundary points. The enhancement of diagnosis efficiency under different conditions for the MADM algorithm proposed was strengthened by experimental analysis.

Key words: expert systems; MADM; fault diagnosis

由于航电设备的高度复杂性, 对它进行故障诊断通常需要测试和诊断交替进行, 而测试在整个过程中又占用了相对较多的时间, 因此, 在诊断决策过程中, 将预先估计得到的测试代价作为一个影响决策的属性加以综合考虑, 即将多属性决策(MADM, Multiple Attribute Decision Making)应用到故障诊断中, 可以作为提高诊断效率的一个有效手段.

目前, 国内外正在研究或已被广泛应用的多属性决策算法有很多, 例如: 层次加权法(AHP, Analytic Hierarchy Process)[1-2]、ELECTRE (Elimination Et Choice Translation Reality)算法[3-4]、逼近理想解排序算法 (TOPSIS, Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)[5]、证据推理算法 (ER, Evidential Reasoning)[6]等等, 然而, 关于故障诊断中的多属性决策研究并不多: 文献 [7] 将字典法多属性决策应用到故障诊断专家系统中, 字典法过分地强调某一属性的重要性, 失去了多属性决策的意义[8]; 文献 [9]利用证据推理算法在不确定性MADM上的优势实现了设备的工作状态评定和诊断, 尽管航电设备的故障发生具有不确定性, 然而测试方案相对比较规范和固定, 预先得到不同方案的测试代价并不困难; 文献 [10]采用指数形

收稿日期: 2006-07-26

基金项目: "十一五"国防预研项目 (B0520060455)

作者简介: 李 洁 (1979-), 女, 河南商丘人, 博士生, lucy_lj@hotmail.com.

式的评价函数, 各属性对评价函数的非线性影响限制了它的应用范围, 并且该方法对属性的边界条件考虑不够充分.

本文结合航电设备故障诊断的特殊性, 设计了基于故障发生概率和测试代价的多属性决策算法, 采用线性加权评价函数作为诊断决策的测度, 避免了各属性对评价函数的非线性影响; 根据诊断中对故障发生概率偏好的定量分析, 求得属性权值; 由于各属性边界点使评价函数呈跳变特性, 因此设计了修正向量对评价函数进行修正.

1 故障诊断专家系统中的诊断决策

航电设备的复杂性使故障一般都具有很强的隐藏性, 利用专家系统进行一次诊断很难对故障进行精确定位, 需要进一步的测试验证, 这是一个测试和诊断交替进行的过程: "测试"为"诊断"提供了更加具体的故障征兆; "诊断"根据这些故障征兆进行综合推理求得可能的故障原因, 从而又为"测试"指明了后续的验证方向.

本文专家系统的诊断推理部分采用模糊乘积推理机[11]: 若关于第 k 个故障的有效规则个数为 M, 故障征兆 A 的个数为 N, 则第 k 个故障在论域(故障发生概率)上的隶属度函数 $\mu_{B_k'}(P)$ 如式(1). 其中, $\mu_{A_i^l}(x_i)$ 表示第 i 个征兆在论域 U_i (测试指标取值范围)上关于第 l 个规则的隶属度函数, $\mu_{B_k^l}(P)$ 表示第 k 个故障在论域(故障发生概率)上关于第 l 个规则的隶属度函数, $\mu_{A'}(\boldsymbol{X})$ 表示实测征兆向量在论域 U(测试指标向量取值范围)上的隶属度函数.

$$\mu_{B_k'}(P) = \max_{l=1}^{M}\left[\sup_{X\in U}\left(\mu_{A'}(\boldsymbol{X})\prod_{i=1}^{N}\mu_{A_i^l}(x_i)\,\mu_{B_k^l}(P)\right)\right] \quad (1)$$

其中, $U=U_1\times\cdots\times U_N$; $\boldsymbol{X}=(x_1\quad x_2\quad\cdots\quad x_N)$.

第 k 个故障关于规则 l 在故障发生概率上的模糊集中心记作 $\overline{P}_k^l$, 对实测征兆向量进行单值模糊化, 并对故障发生概率 P 做中心解模糊可得第 k 个故障发生的概率:

$$P_k = \frac{\sum_{l=1}^{M}\overline{P}_k^l\left(\prod_{i=1}^{N}\mu_{A_i^l}(x_i)\right)}{\sum_{l=1}^{M}\left(\prod_{i=1}^{N}\mu_{A_i^l}(x_i)\right)} \quad (2)$$

由式(2)可以得到各个故障发生的概率, 专家系统根据概率的大小, 明确各个故障的优先顺序, 为下一步测试验证的方向作出决策. 然而, 在实际诊断中经常会遇到如下两种情况:

1) 多个故障的发生概率相差很小, 不存在某一故障在发生概率上具有绝对优势;

2) 不同故障对应的测试代价相差很大, 决策的结果直接影响故障诊断的效率.

因此, 诊断决策需要采用多属性决策综合考虑每个故障的发生概率和需要为此付出的测试代价, 以提高诊断的效率. MADM 与诊断测试的关系见图 1.

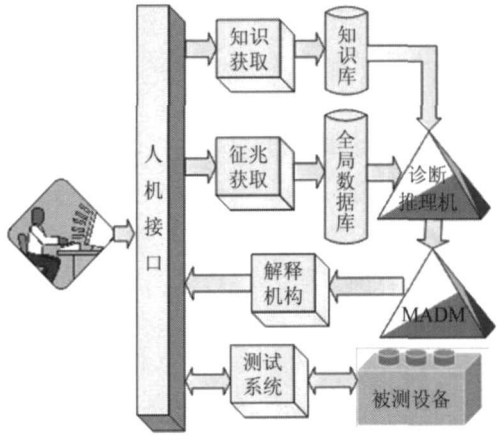


图 1 故障诊断专家系统中的多属性决策

2 各属性的规范化表示方法

本文的决策属性包括: 故障概率和测试代价. 前者属于效益型属性, 即概率越大故障优先级越高; 后者属于成本性属性, 即代价越小故障优先级越高.

对属性的规范化方法有很多[12]: 极变差法、线性变换法、向量规范法等. 由于故障概率属性的边界值对评价函数的影响比较特殊, 例如: 当故障概率为 0时, 表示该故障肯定不会发生, 不需要考虑测试代价属性, 评价函数值应当是当前故障集中所有故障中最小的或是 0; 当故障概率为 1时, 表示该故障肯定会发生, 对于同一故障集中其他概率小于 1的故障, 评价函数值都应小于该故障或为 0. 因此本文采用式(3)的方法[12]来规范化上述属性.

由式(3)不难看出: 当且仅当故障概率为 1时, 它的规范化值 u_{pi} 为 1. 若某次决策的故障集中不存在概率为 1的选项, 则它们的规范化值也都小于 1, 对于其他的属性边界值也有同样的结果, 避免了只要属性在当前故障集中为极值, 规范化值就为 1或 0的情况, 这更加便于评价函数对边界情况的处理.

$$\left.\begin{aligned} u_{pi} &= \frac{P_i - P_{VP}}{P_{VG} - P_{VP}} \\ u_{ti} &= \frac{T_i - T_{VP}}{T_{VG} - T_{VP}} \end{aligned}\right\} \quad (3)$$

其中, P_i 和 T_i 分别表示第 i个故障的发生概率和测试代价; P_{VG}和 P_{VP}分别表示故障发生概率的理想最优值——1和最劣值——0, T_{VG}和 T_{VP}分别表示测试代价的理想最优值和最劣值.

3　决策评价函数及权值的求解

在多属性决策的应用研究中, 可以采用评价函数作为测度来衡量各个备选方案的优劣, 评价函数的形式多种多样, 常用的有[13]: 线性加权函数、加权偏差函数、几何平方函数、费效比函数、功效系数函数等等. 考虑到故障诊断中故障概率和测试代价在非边界点上具有偏好独立性, 并对决策影响呈线性关系, 本文采用线性加权函数作为评价函数, 如下式:

$$v_i = w_p u_{pi} + w_t u_{ti} \tag{4}$$

其中, $w_p + w_t = 1$; w_p 表示故障概率的权值; w_t 表示测试代价的权值.

根据式 (3)可得规范化后的诊断决策矩阵 $\boldsymbol{U}$见表 1, 结合式 (4)可得决策评价向量 $\boldsymbol{V}$, 如

$$\boldsymbol{V} = \boldsymbol{U}^{\mathrm{T}} \times \boldsymbol{W} \tag{5}$$

其中, $\boldsymbol{V} = (v_1 \quad v_2 \quad \cdots \quad v_n)^{\mathrm{T}}$; $\boldsymbol{W} = (w_p \quad w_t)^{\mathrm{T}}$.

表 1　规范化的决策矩阵

属性	故障集				
	u_1	u_2	u_3	…	u_n
故障概率	u_{p1}	u_{p2}	u_{p3}	…	u_{pn}
测试代价	u_{t1}	u_{t2}	u_{t3}	…	u_{tn}

本文根据故障诊断中对故障发生概率的偏好性确定权值[10], 一般情况下: 当某一故障的发生概率高出其他故障发生概率的量大于 ξ时, 就可以忽略测试代价的影响, 认为该故障优于其他故障.

首先考虑故障集中各故障的测试代价存在差异的情形. 不失一般性, 从故障集的 n个故障中任取故障 i和故障 j, 评价函数值分别为 v_i 和 v_j, 当 $u_{pi} \geqslant u_{pj} + \xi$时, 必有 $v_i \geqslant v_j$, 即

$$w_p u_{pi} + w_t u_{ti} \geqslant w_p u_{pj} + w_t u_{tj} \tag{6}$$

故障的发生概率与测试代价相互独立, 因此, 为保证决策对故障概率的偏好性: 当 $u_{pi} \geqslant u_{pj} + \xi$时, 有

$$\min_{l=1}^{n}\left(w_p u_{pi} + w_t u_{tl}\right) \geqslant \max_{l=1}^{n}\left(w_p u_{pj} + w_t u_{tl}\right) \tag{7}$$

当 $u_{pi} = u_{pj} + \xi$时, 上式中的等号成立, 即

$$w_p\left(u_{pj} + \xi\right) + w_t \min_{l=1}^{n}\left(u_{tl}\right) = w_p u_{pj} + w_t \max_{l=1}^{n}\left(u_{tl}\right) \tag{8}$$

由于, $1 = w_p + w_t$, 代入式 (8)得

$$\left.\begin{aligned} w_p &= \phi/(\xi + \phi) \\ w_t &= \xi/(\xi + \phi) \end{aligned}\right\} \tag{9}$$

其中

$$\phi = \max_{l=1}^{n}\left(u_{tl}\right) - \min_{l=1}^{n}\left(u_{tl}\right) \tag{10}$$

当故障集中各故障的测试代价不存在差异, 即 $\phi = 0$时, 式 (9)不再适用, 测试代价不对决策造成影响, 权值应为: $w_p = 1$, $w_t = 0$.

4　求解修正向量

故障概率和测试代价的边界值会使评价函数呈跳变特性, 这有别于一般的多属性决策, 因此, 本文通过求解修正向量, 对边界条件下的评价函数进行修正, 下面分别讨论各属性边界值对评价函数的影响.

1) $u_{pi} = 0$. 当故障发生概率的规范化值为 0时, 该故障肯定不会发生, 忽略测试代价, 直接将其评价函数值修正到最小值 0, 设修正向量 $\Delta^1 = (\delta_1^1 \quad \delta_2^1 \quad \cdots \quad \delta_n^1)$, 则

$$\left.\begin{aligned} \delta_i^1 &= 0 \quad u_{pi} = 0 \\ \delta_i^1 &= 1 \quad \text{其他} \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

2) $u_{pi} = 1$. 当故障发生概率的规范化值为 1时, 该故障必然发生, 对任何概率小于 1的故障, 无法通过测试代价来补偿, 决策的结果仅取决于那些发生概率等于 1的故障评价函数值, 对于发生概率小于 1的故障评价函数值应修正为 0, 因此, 设修正向量为 $\Delta^2 = (\delta_1^2 \quad \delta_2^2 \quad \cdots \quad \delta_n^2)$, 则

$$\left.\begin{aligned} \delta_i^2 &= 0 \quad u_{pi} < 1, \text{且} \max_{l=1}^{n}\left(u_{pl}\right) = 1 \\ \delta_i^2 &= 1 \quad \text{其他} \end{aligned}\right\} \tag{12}$$

3) $u_{ti} = 1$. 当故障的测试代价规范化值为 1时, 该故障的测试代价为 0, 认为凭借操作人员的经验和感观可以直接判定故障原因或提供下一步诊断所需的故障征兆, 分为该故障发生概率大于 0和等于 0两种情况来考虑.

若该故障的发生概率大于 0, 则其他测试代价大于 0并且发生概率不为 1的故障都可以暂不考虑, 将其评价函数值修正到 0, 决策偏好于测试代价为 0的故障. 设修正向量 $\Delta^3 = (\delta_1^3 \quad \delta_2^3 \quad \cdots \quad \delta_n^3)$, 则

$$\left.\begin{aligned} \delta_i^3 &= 0 \quad u_{ti} < 1, u_{pi} < 1, \text{且} \max_{l=1}^{n}\left(u_{tl}\right) = 1 \\ \delta_i^3 &= 1 \quad \text{其他} \end{aligned}\right\} \tag{13}$$

若该故障的发生概率等于 0, 则 $\Delta^3 = \Delta^1$.

4) $u_{ii}=0$ 故障集中存在测试代价最大的故障,仅仅是数值上的最大,并不对决策的评价函数产生跳变性影响,不需要进行修正.

定义向量乘为 $\otimes$,设 $\boldsymbol{A}=(a_1\ a_2\ \cdots\ a_n)$, $\boldsymbol{B}=(b_1\ b_2\ \cdots\ b_n)$, $\boldsymbol{C}=(c_1\ c_2\ \cdots\ c_n)$,如果 $c_i=a_i\times b_i$, $i=1,2,\cdots,n$,则 $\boldsymbol{C}=\boldsymbol{A}\otimes\boldsymbol{B}$.

根据 1)~4)的分析,可得最终的修正向量 Δ,以及修正后的评价函数向量 $\boldsymbol{V}'$:

$$\Delta=\Delta^1\otimes\Delta^2\otimes\Delta^3 \tag{14}$$

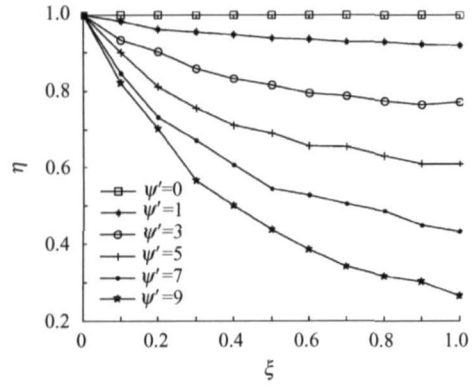
$$\boldsymbol{V}'=\boldsymbol{V}\otimes\Delta \tag{15}$$

5 实验验证

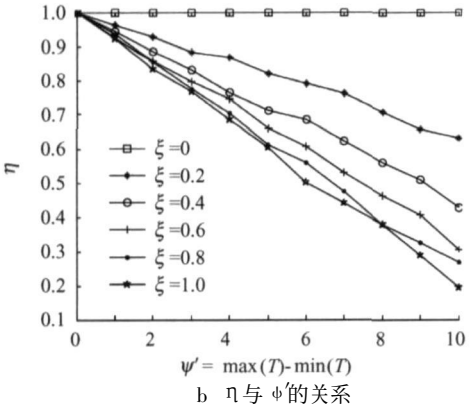
针对不同的 ξ和 ϕ,本文随机抽取 1 000组诊断决策方案,每组方案的故障集由 10个故障组成,运用多属性决策算法进行评价函数的计算,取最优解作为决策结果,并将结果的平均测试代价与用 MADM 算法之前的平均测试代价比较得出

$$\eta=\frac{\overline{T}_{\mathrm{MADM}}}{\overline{T}} \tag{16}$$

实验中,测试代价被量化为 11个等级,全局最小值为 0,全局最大值为 10.图 2中的 ϕ'表示规范化前的故障集中最大测试代价与最小测试代价之差,由式(3)、式(10)可得: $\phi'=10\times\phi$.



a η与 ξ的关系



b η与 ϕ'的关系

图 2 采用 MADM 算法前后的测试代价与 ϕ', ξ的关系

当 $\xi=0$时,决策者对故障发生概率的偏好达到最大,认为概率是诊断决策的唯一考虑因素,忽略测试代价的影响,多属性决策的结果与概率单属性决策的结果一致,即 $\eta=1$;当 ξ逐渐增大时,决策者对故障发生概率的偏好逐渐减小,测试代价在决策中的地位逐渐提高,因此,η越来越小,多属性决策前后的诊断效率相差逐渐增大,见图 2a 例如:对于 $\phi'=7$,当 ξ取 0.3和 0.5时,MADM 提高诊断效率分别为 33%和 46%.当 $\phi'=0$时,故障集中的各故障测试代价无差异,测试代价不对决策产生影响,MADM 使用前后的平均测试代价相同,即 $\eta=1$;当 ϕ'逐渐增大,同一故障集中的测试代价差异随之增大,η越来越小,MADM 提高诊断效率的效果逐渐显著,见图 2b 例如:对于 $\xi=0.2$,当 ϕ'取 6和 8时,MADM 提高诊断效率分别为 21%和 30%.

综上,应用多属性决策的诊断效率要优于一般的决策,即 $\eta<1$.在 $\xi=0$或 $\phi'=0$的两种极端情况,MADM 的诊断效率与一般决策相同,即 $\eta=1$,由此可见,一般的决策方法是 MADM 在极端情况下的特例.

6 结束语

本文分析了诊断决策在故障诊断专家系统中的作用,根据航电设备故障诊断过程中测试与诊断交替进行的特性,设计了基于评价函数的多属性决策算法,将测试代价作为一个决策属性与故障概率综合考虑来求取最优故障解.多属性决策的评价函数采用线性加权形式,基于诊断决策对故障概率的偏好性求解属性权值;通过对属性边界值情况的分析,设计了评价函数修正向量的求解方法.由实验结果分析,可以证明本文的多属性决策算法在多数情况下可以明显地提高诊断效率.

参考文献 (References)

[1] Moghaddam M P, Sheikh-El-Eslam M K, Jadid S. A MADM framework for generation expansion planning in small electricity Firms[C]//2005 IEEE Power Engineering Society General Meeting. New York: IEEE, 2005, 1: 185-189

[2] Dey P K. Decision support system for inspection and maintenance: a case study of oil pipelines[J]. IEEE Transactions on Engineer Management, 2004, 51(1): 47-56

[3] Zhang Tiefeng, Yuan Jinsha. Decision-aid for power distribution system planning problem susing ELECTRE III[C]//The 7th Int

tional Power Engineering Conference. Singapore: IEEE Press, 2005: 1-5

[4] 吴彩虹, 陈常青. 区间数多属性决策的一种 ELECTRE方法[J]. 长沙: 长沙大学学报, 2005, 19(5): 14-17
Wu Caihong, Chen Changqing. ELECTRE method for multiple attribute decision making with intervals[J]. Changsha: Journal of Changsha University, 2005, 19(5): 14-17 (in Chinese)

[5] Wang Y, Eghoneimy E, GruverW A, et al. A fuzzy multiple decision support for jag selection[C]//Proc of the IEEE Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society-NAFIPS'04. Banff Alberta, Canada: IEEE Press, 2004, 2: 27-30

[6] Huynh V N, Nakamori Y, Ho T B, et al. Multiple-attribute decision making under uncertainty: the evidential reasoning approach revisited[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 2006, 36(4): 804-822

[7] Liu Shih Yaug, Chi Sheng Chai. Enhanced inference strategy for machine fault diagnosis system using hill-climbing approach[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Piscataway, NJ: IEEE, 1995, 3: 2633-2638

[8] 陈珽. 决策分析[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 178-186
Chen Ting. Decision making analysis[M]. Beijing: Science Press, 1987: 178-186 (in Chinese)

[9] Tang W H, Spurgeon K, Wu Q H, et al. Relative condition ranking of transformers using evidence theory[C]//2004 International Conference on Power System Technology. Singapore: IEEE Power Engineering Society, 2004, 2: 1679-1683

[10] Qi Yi, Shen Shituan, Li Yihua, et al. Sequential diagnostic strategy for the diagnosis of complex systems[C]//IEEE Conference on Computers, Communications, Control and Power Engineering: Proceedings of IEEE TENCON'02. Beijing: IEEE Press, 2002, 3: 1662-1666

[11] 王立新. 模糊系统与模糊控制教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 70-109
Wang Lixin. A course in fuzzy systems & control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 70-109 (in Chinese)

[12] 刘树林, 邱菀华. 多属性决策基础理论研究[J]. 系统工程理论与实践, 1998(1): 38-43
Liu Shulin, Qiu Wanhua. Studies on the basic theories for MADM[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 1998(1): 38-43 (in Chinese)

[13] 徐玖平, 李军. 多目标决策的理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 84-86
Xu Jiuping, Li Jun. Multiple objective decision making theory and methods[M]. Beijing: TsingHua University Press, 2005: 84-86 (in Chinese)

(责任编辑: 娄　嘉)

(上接第 **671**页)

当然, 实际中影响拼接的因素很多, 例如: 相机参数是否准确、图像获取是否精确、重叠度是否合适、插值倍数是否恰当等都会影响拼接精度和难度. 此外, 如何提高算法运算速度, 如何实现拼接后大信息量数据压缩, 如何满足实时绘制要求等都是需要进一步深入研究的问题.

参考文献 (**References**)

[1] Chen S E. QuickTime VR—an image-based approach to virtual environment navigation[C]//Proc of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM Press, 1995: 29-38

[2] Szeliski Richard, Shum Heung-Yeung. Creating full view panoramic image mosaics and environment maps[C]//Proc of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive techniques. New York: ACM Press, 1997: 251-258

[3] Mundhenk T N, Michael J R, Ernest L H, et al. Techniques for fisheye lens calibration using a minimal number of measurements[C]//David P Casasent. Proc of the SPIE Conference on Intelligent Robotics and Computer Vision. Boston: [s.n.], 2000(11): 8-9

[4] 李学庆, 孟祥旭, 杨承磊, 等. 一个基于球面映射的视景生成系统[J]. 系统仿真学报, 2001, 13(s): 129-132
Li Xueqing, Meng Xiangxu, Yang Chenglei, et al. A system of creating full view panoramic mosaics based on sphere modal[J]. Journal of System Simulation, 2001, 13(s): 129-132 (in Chinese)

[5] 华顺刚, 张静, 欧宗瑛. 基于图像绘制的球面全景图生成及自动拼接技术研究[J]. 大连理工大学学报, 2003, 43(5): 640-644
Hua Shungang, Zhang Jing, Ou Zongying. Constructing full-view spherical panoramic image using automatic matching by image-based rendering[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2003, 43(5): 640-644 (in Chinese)

[6] Duplaquet Marie Lise. Building large image mosaics with invisible seam-lines[C]//Proc of the SPIE Conference on Visual Information Processing. Orlando, Florida: [s.n.], 1998(3387): 369-377

[7] Jang Kyung-ho, Jung Soon-ki, Lee Min-ho. Constructing cylindrical panoramic image using equidistant matching[J]. IEE Electronics Letters, 1999, 35(20): 1715-1716

[8] 钟力, 张茂军, 孙立峰, 等. 360度柱面全景图像生成算法及其实现[J]. 小型微型计算机系统, 1999, 20(12): 899-903
Zhong Li, Zhang Maojun, Sun Lifeng, et al. Algorithm and implementation for 360-degree cylindrical panoramic image[J]. Mini-Micro Systems, 1999, 20(12): 899-903 (in Chinese)

(责任编辑: 娄　嘉)