榫连结构的高应力梯度及破坏分析

魏大盛 王延荣

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 某燕尾形榫连结构的分析表明叶盘榫齿/榫槽接触区边缘存在较高的应力梯度,接触应力的有限元解同网格疏密程度密切相关.通过建立一系列不同密度网格的模型,对此问题展开有限元建模分析,以改善接触应力的求解精度,同时深入讨论材料弹塑性对接触应力的影响.在弹塑性接触应力分析的基础上,采用断裂力学方法建立了榫连结构高应力梯度位置的破坏分析模型,判断裂纹的萌生及扩展方向,以进行结构的强度及寿命分析.

关 键 词: 榫连结构; 高应力梯度; 破坏; 裂纹萌生; 断裂力学

中图分类号: V 231.91; V 232.3

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2010)10-1184-05

On the high stress gradient and failure analysis of dovetail attachments

Wei Dasheng Wang Yanrong

(School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Studies reveals that high stress gradient exists near the edges of contact in dovetail attachment, of which the numerical solution to contact stress depends on finite element (FE) mesh density. So a set of FE models with different mesh of dovetail attachment were used to analyze the effect of FE modeling on improving the solving accuracy of contact stress. Then the effect due to elasticity and plasticity of materials was discussed. On the basis of elastic-plastic contact stress, a fracture model on the part with high stress gradient was established by means of fracture mechanics, which can be used to determine the direction of crack initiation and propagation and more to evaluate the structural strength and lives.

Key words: dovetail attachment; high stress gradient; fracture; crack initiation; fracture mechanics

航空发动机榫连结构是工程中典型的接触结构,叶片/轮盘在接触界面上产生较大的接触应力,在载荷循环作用下将导致损伤并发生破坏,由此带来的微动疲劳问题在工程上越来越受到重视,特别在接触工作的长寿命构件中较为突出,航空发动机中曾多次出现该类事故[1].

从力学分析角度看,接触问题涉及材料非线性、几何非线性以及边界非线性等多种非线性问题,接触状态也分静态接触、滑动、滚动及撞击等多种情况,工程中这些复杂接触问题的解析解通常不易获得,有限元法是目前处理复杂接触问题的主要数值方法.但对于榫连结构的接触问题,国内以往采用有限元法或其他数值方法的计算结果精度较低,原因是接触区网格划分稀疏,计算结果通常为沿着接触面的应力平均值,没有准确刻画出接触区边缘处的高应力梯度[2-3].文献[4-6]虽然建立了榫连结构接触应力分析的有限元模型,分析了接触区边缘存在的高应力梯度,但分析是限于弹性条件下的,尚未开展塑性分析.另一方面,近期的研究通过试验揭示了榫连结构存在的高应力梯度以及微动疲劳的破坏形式[7-8],但在数值模拟方面如何对微动破坏机制进行建模仍未深入研究.

鉴于此,本文首先采用有限元法模拟了榫连结构接触区边缘的高应力梯度,主要针对有限元网格密度、材料塑性对接触应力的影响进行了研

收稿日期: 2009-08-07

基金项目: 凡舟青年科研基金资助项目(20080403)

作者简介: 魏大盛(1978-),男,黑龙江宁安人,讲师,dasheng.w@163.com.

究;在此基础上,通过在高应力梯度位置预置小裂纹的方式探讨了接触部位的破坏机制及其模式.

1　榫连结构接触区高应力梯度分析

燕尾形榫连结构形式如图 1 所示. 图中几何模型是对称的,左边界为对称面,接触区长度 7 mm,接触面倾角 45°,接触区边缘圆角半径 2 mm. 计算时的边界条件如下:转速为 15 000 r/min;建模时并未考虑的叶片部分产生的拉应力 100 MPa;模型左侧为对称面,x 向位移为 0;轮盘右侧为循环对称平面,其法向位移为 0. 需要说明的是,进行接触应力数值解分析时使用总体坐标,而建立破坏分析模型时则采用了局部坐标.

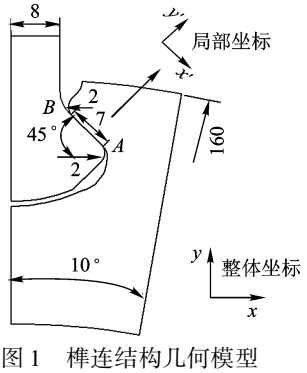


图 1　榫连结构几何模型

1.1　弹性接触应力分析

本文的先期研究侧重于榫连结构接触应力的精细分析,且在线弹性条件开展. 图 2 中给出了稀疏网格及加密网格的接触区应力分布结果:稀疏网格对应的计算结果精度较低,见图 2 中的曲线 1;网格加密后则可以反映接触区边缘(图 1 中 A, B 点)的高应力梯度特征,见图 2 中的曲线 2,该曲线表明,接触区边缘有较高的应力梯度,该处峰值应力很大;应力数值解同网格疏密程度相关,曲线 3 的网格密度高于曲线 2[9].

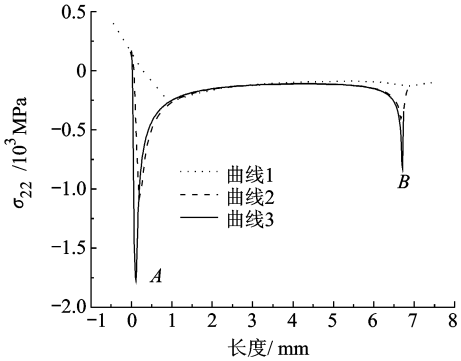


图 2　稀疏网格同加密网格 σ_{22} 计算结果对比

1.2　弹塑性接触应力分析

弹性接触应力计算结果表明榫连结构的高应力梯度处已进入塑性,研究材料塑性对高应力梯度及破坏的影响十分必要. 轮盘材料选用 FGH95 粉末高温合金,室温弹性模量为 214 GPa,泊松比为 0. 3. 材料屈服应力为 1 193 MPa,材料模型采用多线性各向同性强化模型,见图 3.

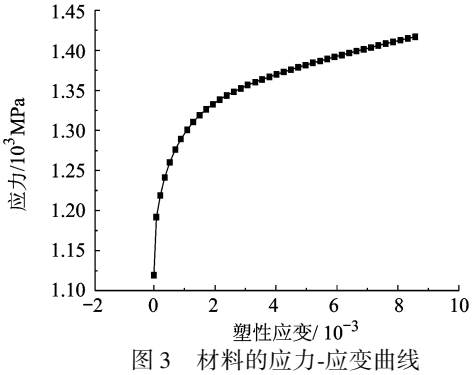


图 3　材料的应力-应变曲线

建立两种不同网格密度的有限元模型,接触区网格数目分别为 400 及 500 个,表 1 中给出了不同模型的弹塑性应力计算结果及误差分析,两种模型计算结果之间的误差在 5% 以下,表明网格密度可以满足塑性接触应力分析的要求. 不难看出,求得的峰值应力很高,许多文献的数值模拟结果验证了这一点. 同时 FGH95 粉末高温合金强度很高、弹性模量较大,材料进入塑性后强化明显,这些都是导致塑性峰值应力较高的原因.

表 1　弹塑性接触应力计算结果　　MPa

网格	σ_{11}	σ_{22}	σ_{12}	σ_{eq}	主应力
Ⅰ	−1 684	−1 668	−708. 5	1 318	−2 125
Ⅱ	−1 742	−1 747	−716. 2	1 324	−2 171

注:应力分量 σ_{11},σ_{22},σ_{12},等效应力 σ_{eq} 及主应力的相对误差分别为 3.4%,4.7%,1.1%,0.5%,2.2%.

图 4 及图 5 中给出了弹性条件下摩擦系数 $\mu=0$ 及塑性条件下摩擦系数分别为 $\mu=0$,$\mu=0.3$ 时的高应力梯度情况,可以看出:塑性缓和了高应力梯度状况,应力有所松弛;摩擦系数提高,峰值应力降低,此情况对应力分量 σ_{11} 的影响较为显著.

图 6、图 7 为摩擦系数 $\mu=0.3$ 时的等效塑性应变 ε_{eq} 及塑性剪切应变分量 ε_{12},可以看出:

塑性区最大宽度约 150 μm,最大等效塑性应变位置距接触面的垂直距离为 60 μm,塑性区很小,这是塑性条件下应力梯度仍然很高的原因.

剪切应变分量 ε_{12} 的正、负应变之间形成了剪切带并与接触面成一定角度,循环载荷作用下,与金属疲劳时表面产生的剪切带作用相似,这可能成为榫连结构高应力梯度处裂纹萌生的一个关键因素,本文也正是基于此建立失效模型.

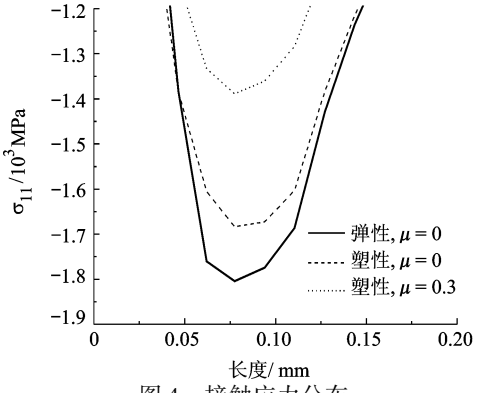


图 4 接触应力分布 σ_{11}

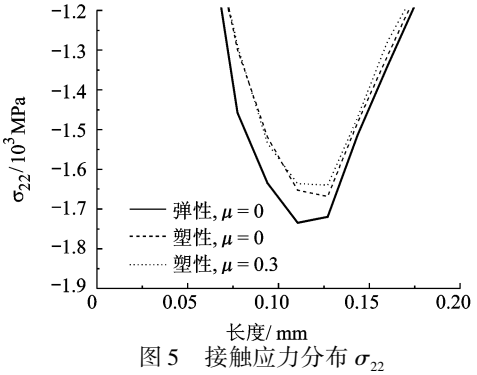


图 5 接触应力分布 σ_{22}

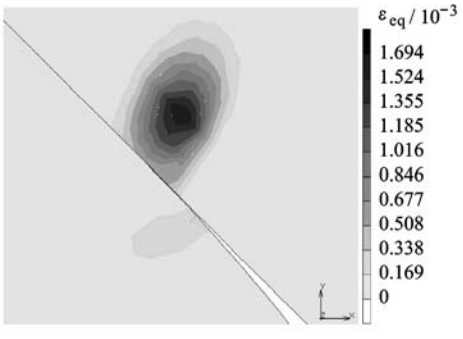


图 6 等效塑性应变分布

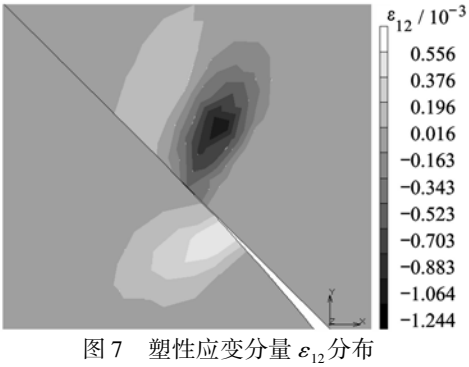


图 7 塑性应变分量 ε_{12} 分布

2 破坏形式分析及建模

2.1 破坏模型的建立

结合塑性分析结果,建立如图 8 所示的榫连结构破坏分析模型. 图中 A 点为接触区下边缘点,也是最大峰值应力位置;θ 为裂纹可能的萌生方向,与图 7 中的剪切线位置一致,约在 100° ~ 120°之间;σ 为微动疲劳载荷,在其作用下 BC 线成为裂纹可能的扩展方向.

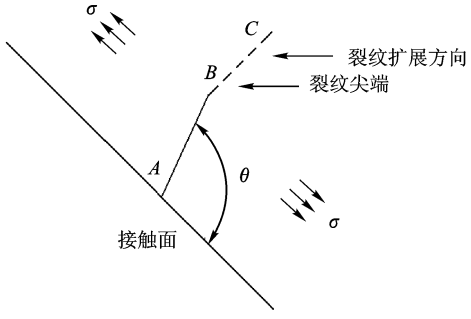


图 8 榫连结构破坏分析模型

首先,采用预置微小裂纹的方式研究榫连结构的裂纹萌生,在轮盘高应力梯度位置 A 处建立了 6 个不同方向的裂纹,裂纹形式如图 9 所示,图中 θ 取为 45°,60°,90°,110°,120°及 135°,裂纹长度为 60 μm(此值参考了最大塑性应变位置到接触面的距离),以此判断裂纹的萌生方向.

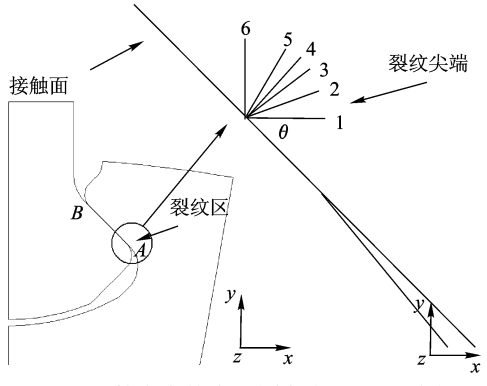


图 9 轮盘考核点不同方向的预置裂纹

图 10 中给出了不同方向裂纹尖端应力强度因子 K 的计算值,可以看出:对于Ⅰ型裂纹,小于 90°方向的斜裂纹所对应的应力强度因子 K_{I} 为正值,而大于 90°方向则为负值;对于Ⅱ型裂纹,大

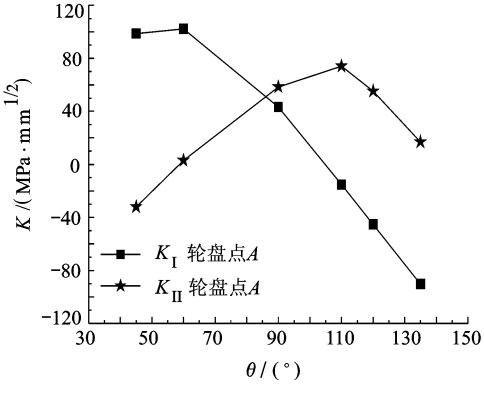


图 10 不同方向裂纹尖端的应力强度因子

部分为正值,从接触区的应力状态来看,此处裂纹为剪切型,110°方向的斜裂纹所对应的应力强度因子 K_{II} 最大,此计算结果同塑性分析时剪切线的方向是一致的,也是裂纹最可能的萌生方向.

其次,在萌生方向判定的基础上,分析裂纹可能的扩展方向. 采用最大正应力准则,认为裂纹沿着周向应力达到最大主应力的方向扩展. 裂纹尖端极坐标系下应力 σ_θ 取最大值的条件为

$$\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} = 0 \qquad (1)$$

结合裂纹尖端应力分布,可得裂纹方向角方程:

$$K_{\mathrm{I}} \sin \varphi + K_{\mathrm{II}}(3\cos \varphi - 1) = 0 \qquad (2)$$

对于本文研究的榫连结构,根据求得的应力强度因子值 K_{I} ,K_{II} ,可以求得轮盘裂纹扩展方向角 φ 为 66.7°.

2.2　模型的验证

榫连结构的微动疲劳破坏经常出现在叶片榫头处,而前面仅以轮盘榫槽作为对象,还应该对叶片榫头高应力梯度位置的裂纹萌生及扩展形式进行探讨,并以此作为模型的检验. 图 11 中给出了叶片考核点位置 B 处预置的微小裂纹,裂纹方向取为 45°,60°,90°,110°,120°,135°.

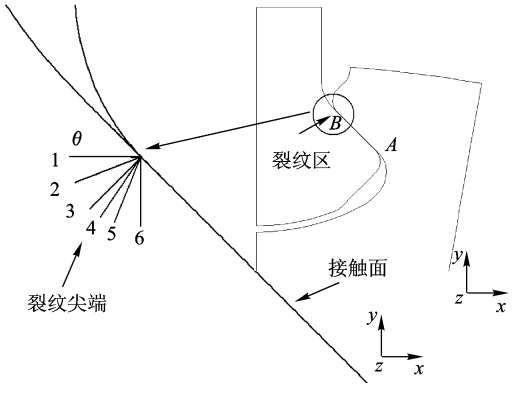


图 11　叶片考核点不同方向的预置裂纹

图 12 给出了叶片考核点不同方向裂纹尖端应力强度因子的计算值,可以看出:对于 II 型剪切裂纹,110° ~ 135°方向之间的斜裂纹所对应的应力强度因子最大,这也是裂纹最可能的萌生方向.

图 13 为叶片榫头接触表面的塑性应变 ε_{12},也可以看到明显的塑性剪切带. 可以看出,榫连结构在循环载荷的作用下,其高应力梯度位置裂纹以一定的角度 θ 在塑性剪切的作用下逐渐萌生,并在循环载荷作用下以一定的角度 φ 扩展.

当然,θ,φ 值同榫连结构的几何形式及载荷

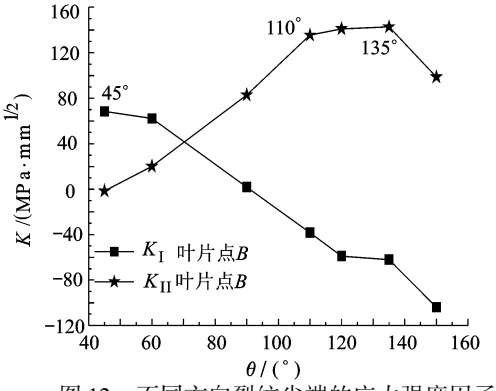


图 12　不同方向裂纹尖端的应力强度因子

有关,对于叶片榫头考核点 B,其裂纹萌生角约为 135°,按 2.1 节中的方法可求得扩展角为 62.5°,这同国外许多试验研究结果具有一定的相似性,见图 14,图中裂纹扩展方向(18°)同本研究的分析结果(17.5°)十分接近. 值得注意的是,图 13 及图 14 中的点 A,B,C 对应于图 8 中的相应点.

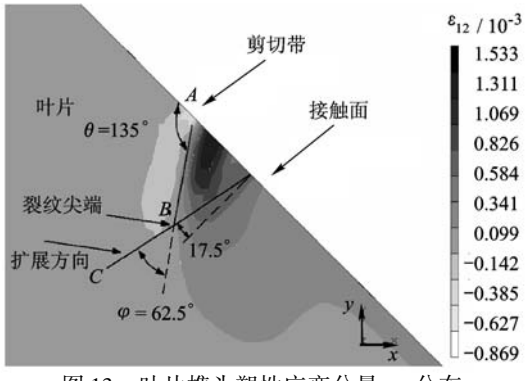


图 13　叶片榫头塑性应变分量 ε_{12} 分布

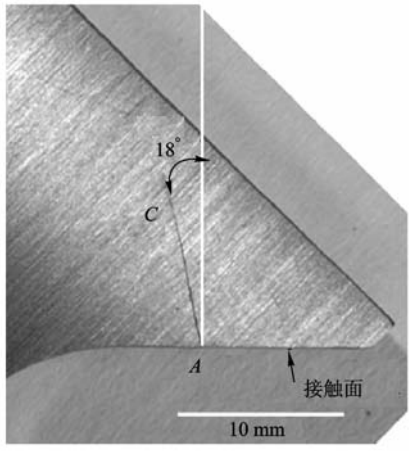


图 14　榫连结构微动疲劳试验[10]

3　结　论

本文采用有限元法对燕尾形榫连结构接触应力展开分析,重点考察了材料弹塑性对接触应力的影响,建立了高应力梯度的破坏分析模型,得出了一些具有实际意义的结论:

1）榫连结构接触区边缘存在显著的应力梯度,这是产生微动疲劳磨损的重要因素;

2）采用有限元方法求解接触应力时,接触区边缘的网格密度对数值结果影响显著,虽然高应力梯度处的塑性峰值应力很高,但塑性区很小,同弹性应力相比松弛程度较小,塑性条件下的应力梯度依旧很高;

3）高应力梯度处的塑性剪切带是裂纹萌生的重要原因,以此为基础建立的失效分析模型,可用于判断榫连结构高应力梯度位置处的裂纹萌生及扩展方向.

本文以接触应力分析作为基础,基于断裂力学方法建立的榫连结构破坏分析模型,可通过预置微小裂纹的方式进行结构的强度及寿命分析.

参考文献（References）

[1] 何明鉴. 机械构件的微动疲劳[M]. 北京:国防工业出版社,1994
He Mingjian. Fretting fatigue of component[M]. Beijing:National Defense Industry Press,1994(in Chinese)

[2] 温卫东,高德平. 榫头/榫槽接触问题边界元分析[J]. 航空动力学报,1992,7(2):117-120
Wen Weidong,Gao Deping. Analysis of tenon and mortise contact problems by boundary element methods[J]. Journal of Aerospace Power,1992,7(2):117-120(in Chinese)

[3] 郑旭东,蔚夺魁,王兆丰,等. 某型航空发动机涡轮叶片和轮盘榫齿裂纹故障力学分析[J]. 航空发动机,2005,31(3):35-38
Zheng Xudong,Yu Duokui,Wang Zhaofeng,et al. Mechanical analysis of crack failures in turbine blade and disk serration of an aeroengine[J]. Aeroengine,2005,31(3):35-38(in Chinese)

[4] Sinclair G B,Cormier N G,Griffin J H,et al. Contact stresses in dovetail attachments:finite element modeling[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,2002,124:182-189

[5] Sinclair G B,Cormier N G. Contact stresses in dovetail attachments:physical modeling[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,2002,124:325-331

[6] Sinclair G B,Cormier N G. Contact stresses in dovetail attachments:alleviation via precision crowning[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,2003,125:1033-1041

[7] 古远兴. 高低周复合载荷下燕尾榫结构微动疲劳寿命研究[D]. 南京:南京航空航天大学能源与动力学院,2007
Gu Yuanxing. Research on fretting fatigue life of dovetail joint under HCF-LCF load[D]. Nanjing:School of Power and Energy,Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2007(in Chinese)

[8] 刘道新,刘军,刘元镛. 微动疲劳裂纹萌生位置及形成方式研究[J]. 工程力学,2007,24(3):42-47
Liu Daoxin,Liu Jun,Liu Yuanyong. Study on nucleating location and formation of fretting fatigue cracks[J]. Engineering Mechanics,2007,24(3):42-47(in Chinese)

[9] 魏大盛,王延荣. 榫连结构接触面几何构形对接触区应力分布的影响[J]. 航空动力学报,2010,25(2):407-411
Wei Dasheng,Wang Yanrong. Effects of the profile of contact surfaces on the stress distribution for tenon jointing in bladed-disk assemblies[J]. Journal of Aerospace Power,2010,25(2):407-411(in Chinese)

[10] Golden P J,Calcaterra J R. A fracture mechanics life prediction methodology applied to dovetail fretting[J]. Tribology International,2006,39:1172-1180

（编　辑:张　嵘）

（上接第 1183 页）

[3] 肖人彬,王磊. 人工免疫系统:原理、模型、分析及展望[J]. 计算机学报,2002,25(12):1281-1293
Xiao Renbin,Wang Lei. Artificial immune system:principle,models,analysis and perspectives[J]. Chinese Journal of Computers,2002,25(12):1281-1293(in Chinese)

[4] Castro de L N,Timmis J. An artificial immune network for multimodal function optimization[C]//Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation. New York:IEEE Press,2002,1:699-674

[5] Kim J,Bentley P. Towards an artificial immune system for network intrusion detection:An investigation of clonal selection with a negative selection operator[C]//Proceeding of IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC2001). Washington D C:IEEE Press,2001:27-30

[6] Castro de L N, Zuben von F J. Learning and optimization using the clonal selection principle[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation,2002,6(3):239-251

[7] Li Z H,Zhang Y N,Tan H Z. An efficient artificial immune network with elite-learning[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Natural Computation (ICNC25007). Washington D C:IEEE Press,2007,4:213-217

[8] Castro de P A, Zuben von F J. An immune-inspired approach to Bayesian networks[C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS'05). Washington D C:IEEE Computer Society,2005:23-28

[9] Franca de F O, Zuben von F J, Castro de L N. An artificial immune network for multimodal optimization on dynamic environments[C]//Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'05). Washington D C: ACM,2005:289-296

（编　辑:文丽芳）