

爆炸冲击荷载作用下拱结构动力屈曲研究

康 婷¹, 许金余^{1,2}, 白应生^{1,3}, 孙惠香¹, 杨 慧¹, 史业宏¹

(1.空军工程大学航空航天工程学院,西安,710038;2.西北工业大学,西安,710072;

3.陕西环宇建设工程项目管理有限公司,西安,710032)

摘要 用数值模拟方法,研究了爆炸冲击荷载作用下拱结构的动力屈曲问题,重点分析了拱结构矢跨比对其动力响应和动力屈曲的影响。结果表明:对于矢跨比大于0.1的拱结构,在弹性振动阶段,拱顶位移幅值数量最大,当出现塑性变形以后,结构最大位移点在约1/6拱跨处;当爆炸冲击持续时间在某一范围内时,结构发生动力屈曲以后会出现反直观动力响应,位移幅值-荷载幅值关系曲线出现2个拐点,第1个拐点对应的荷载可看作动力屈曲临界荷载,第2个拐点对应的荷载可看作动力失效荷载。当拱结构的矢跨比小于0.1时,结构发生动力屈曲以后不会出现反直观动力响应,动力屈曲临界荷载即动力失效荷载。当爆炸冲击持续时间一定时,拱结构矢跨比越小,动力屈曲临界荷载越小。

关键词 爆炸冲击,拱结构,动力响应特征参数,动力屈曲,临界荷载

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.06.017

中图分类号 O347 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)06-0079-05

A Study of Dynamic Buckling of Arch Subjected to Explosive Impact

KANG Ting¹, XU Jinyu^{1,2}, BAI Yingsheng^{1,3}, SUN Huixiang¹, YANG Hui¹, SHI Yehong¹

(1.Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China ;2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;3. Shaanxi Huanyu Construction Project Management Ltd. Xi'an 710032, China)

Abstract: The problems of the arch structure dynamic buckling subjected to explosive impact are studied by numerical simulation method. The influence of the arch rise span ration on the dynamic response and the dynamic buckling is analyzed mainly. The results show that when the rise span ration of the arch is more than 0.1, the maximum displacement point is the arch top in the elastic vibration stage at about 1/6 of the arch-span after plastic deformation occurring. When the impact duration changes in a certain range, the counter-intuitive response appears after buckling. There are two corner points in the displacement amplitude vs. load amplitude curve of the arch top. The load corresponding to the first corner point can be seen as the dynamic buckling critical load, and the other corresponding to the second corner point can be seen as the dynamic failure load. When the rise span ration of the arch is less than 0.1, the counter-intuitive response doesn't appear after buckling. The dynamic critical load is namely the dynamic failure load. When

收稿日期:2014-10-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51308540,51208506)

作者简介:康 婷(1977-),女,陕西佳县人,博士,主要从事防护工程教学与研究.E-mail:kangtingxia@126.com

引用格式:康婷,许金余,白应生,等.爆炸冲击荷载作用下拱结构动力屈曲研究[J].空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(6):79-83. KANG Ting, XU Jinyu, BAI Yingsheng, et al. A Study of Dynamic Buckling of Arch Subjected to Explosive Impact[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(6): 79-83.

the impact duration comes to a certain degree, the smaller, the rise span ratio of the arch structure, and the smaller, the dynamic buckling critical load.

Key words: explosive impact; arch; dynamic response characteristic parameters; dynamic buckling; critical load

拱结构在土木工程、防护工程等领域应用非常广泛,研究爆炸冲击荷载作用下拱结构的动力屈曲问题具有十分重要的意义。目前关于拱结构动力屈曲的研究主要集中于浅拱结构^[1-6],涉及的外荷载主要是周期荷载、阶跃荷载和地震等荷载^[7-13],较少分析矢跨比对拱结构动力屈曲的影响。

作用在结构上的动荷载和矢跨比是影响拱结构动力屈曲的 2 个关键因素。爆炸冲击荷载属于强动荷载,作用威力大而持续的时间非常短暂,与一般的动荷载不同,这种荷载作用下拱结构的动力响应常呈现出很强的材料非线性和几何非线性,属于双重非线性问题,计算比较复杂。目前,关于拱结构在爆炸冲击荷载作用下的动力屈曲问题研究并不多见,主要集中于对其动力响应的研究,尤其是研究结构的局部破坏效应。文献^[14~16]基于结构应力分布特点,研究了某一特定爆炸荷载作用下拱结构的动力响应特点和破坏形态等,并未分析爆炸荷载幅值、拱结构矢跨比等因素对结构动力响应的影响。

Budiansky-Roth 准则是目前应用最为广泛的结构动力屈曲判别准则。应用 B-R 准则时,如何合理地选择结构的动力响应特征参数,特别是如何判定“结构响应的巨大变化”,并没有统一的标准,也鲜有文献论述。

本文对爆炸冲击荷载作用下拱结构的动力屈曲问题进行了研究。

1 计算模型

在对防护工程结构进行设计计算时,其计算简图常取为两铰拱结构,见图 1。模型参数见文献^[17]。计算中,材料简化为理想弹塑性材料模型,采用广义 Misses 屈服条件判断结构的屈服状态,由于爆炸冲击时间非常短暂,可不考虑阻尼的影响。

远场爆炸作用下,通常认为结构受到的荷载是均匀分布的,爆炸冲击荷载简化为三角形脉冲:

$$\begin{cases} q(t) = P_0(1 - t/t_0) & , 0 \leq t \leq t_0 \\ 0 & , t > t_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: t_0 为荷载作用时间; p_0 为荷载的峰值。

用三维显示动力分析有限元程序 ANSYS/LS 进行数值分析,有限元模型见图 1。

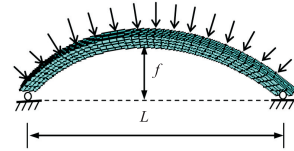


图 1 拱结构示意图

Fig.1 Arch structure sketch map

2 计算结果与分析

2.1 动力响应特点

爆炸冲击荷载一般持续时间较短,结构最大反应将出现在爆炸冲击消失以后的自由振动阶段。在稳定的自由振动阶段,位移时程曲线最低点至静平衡位置的距离定义为位移幅值 y_{max} 。若荷载作用时间一定,当爆炸冲击荷载幅值 P_0 由小到大逐渐变化时,可得到一系列对应的位移幅值 y_{max} 。对于矢跨比 $f/L > 0.1$ 和 $f/L \leq 0.1$ 的拱结构,位移幅值 y_{max} 和荷载幅值 p_0 的关系曲线(以下简称“位移-荷载曲线”)具有不同的变化规律,为此本文分成 2 部分进行讨论。下文各图中若位移(幅值)为负值,表示该点位于结构静平衡位置的下方, y_{dmax} 表示拱顶部位的位移幅值。

2.1.1 矢跨比 $f/L > 0.1$ 的拱结构

取爆炸冲击持续时间 $t_0 = 0.05$ s,拱结构矢跨比 $f/L = 0.2$,结构自振周期 $T = 0.174$ s,拱上各点位移-荷载曲线见图 2。

根据计算,当爆炸冲击荷载 $P_0 < 1.8$ MPa 时,拱结构在振动过程中,拱上各点的变形均为弹性变形,应力应变服从线弹性虎克定律,拱结构处于弹性振动阶段。由图 2(a)可知,拱上各点位移幅值随外荷载的增加而增大,拱顶是竖向位移最大点,且各点位移-荷载曲线几乎是直线。当 $P_0 \geq 1.8$ MPa 时,结构出现塑性变形,拱顶位移-荷载曲线出现明显转折,拱顶不再是结构的最大位移点,结构的最大位移点在约 1/6 拱跨处(以下称拱肩)。

随着爆炸冲击荷载的进一步增大,拱顶与拱上其余各点的位移-荷载曲线有很大不同。下面重点分析拱顶的位移-荷载曲线。

由图 2(b)可见,拱顶部位的位移-荷载曲线出现 2 个拐点。

第 1 个拐点 $P_0 = 4.4$ MPa。当荷载幅值 $P_0 \leq$

4.4 MPa 时,拱顶位移幅值随着外荷载的增加而增大,拱结构的动平衡位置在静平衡位置的下方。当荷载幅值由 $P_0 = 4.4$ MPa 增加到 $P_0 = 4.405$ MPa 时,拱顶位移-荷载曲线的斜率出现了显著变化。斜率由正值变为负值。

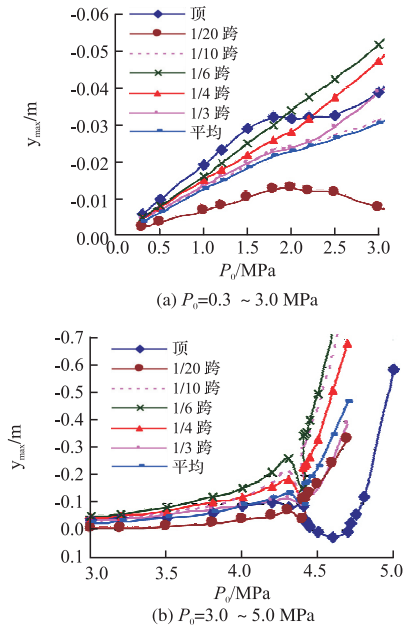


图 2 拱上各点位移幅值与爆炸荷载幅值关系
Fig.2 The displacement amplitude vs. load amplitude curve of the several points on the arch

同时图 3(b)中拱顶部位出现塑性变形,由于拱肩两侧塑性较迅速发展,向内侧移,使拱顶部位上凸,振动模式发生了变化。由图 4 也可以看出, $P_0 = 4.405$ MPa 时爆炸冲击荷载幅值较 $P_0 = 4.4$ MPa 有一微小增大,但是位移响应却出现了剧烈的变化。根据 B-R 动力屈曲判定准则,认为结构已发生了动力屈曲。因此 $P_0 = 4.4$ MPa 可看作结构发生动力屈曲的临界点。

第 2 个拐点是 $P_0 = 4.6$ MPa。其结构在 4.405 MPa $< P_0 < 4.7$ MPa 范围内,由图 3(b)、图 3(c)可以看出,拱结构以上凸振动为主,出现了反直观动力响应。

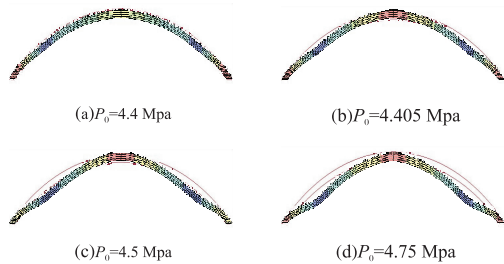


图 3 拱结构振动模式 ($t = 0.336$ s)
Fig.3 Arch vibration mode ($t = 0.336$ s)

由图 4 可见,当荷载幅值增加到 $P_0 = 4.6$ MPa 时,反直观动力响应达到最强,而后随着外荷载的进

一步增大,反直观动力响应逐渐减弱。若外荷载继续增大,结构塑性变形迅速发展(图 3(d)),拱顶位移幅值的数量突然增大,结构完全丧失承载能力,出现压溃破坏。因此,第 2 个拐点 $P_0 = 4.6$ MPa 对应结构反直观动力响应的最强点,可看作动力失效临界荷载。

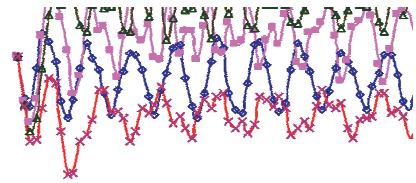


图 4 拱顶位移响应曲线 ($f/L = 0.2$)
Fig.4 The displacement vs. time curve of the arch top

由以上分析可见,对于矢跨比 $f/L > 0.1$ 的拱结构,在弹性振动阶段,拱顶的竖向位移最大,而结构出现塑性变形以后,距拱脚约 $1/6$ 拱跨处竖向位移最大。

拱顶部位的位移-荷载曲线出现 2 个拐点。第 1 个拐点对应的荷载可看作是动力屈曲临界荷载,第 2 个拐点对应的荷载可看作是动力失效荷载。

当作用在拱结构上的荷载小于结构的动力屈曲临界荷载时,首先在距拱脚约 $1/6$ 拱跨处和拱顶部位出现塑性变形,此时结构的整体刚度仍较大,弹性恢复力较大,爆炸冲击消失以后,结构将在动平衡位置做自由振动。当作用在结构上的荷载超过动力屈曲临界荷载时,结构的塑性区迅速扩展,结构的整体刚度降低较多,弹性恢复力较弱,拱顶部位位移较大,不能使结构向荷载反向作大幅振动,若荷载继续增大,结构将出现突然压溃破坏。因此在这 2 种情况下,结构均表现为正常的动力响应。

当作用在结构上的荷载介于动力屈曲临界荷载和动力失效荷载之间的时候,会发生反直观动力响应^[11]。

2.1.2 矢跨比 $f/L \leq 0.1$ 的拱结构

拱结构的矢跨比 $f/L \leq 0.1$ 时,在相同的爆炸冲击荷载作用下,结构的动力响应特点与矢跨比 $f/L > 0.1$ 的拱结构有很大不同。图 5 为矢跨比 $f/L = 0.1$ 时拱结构塑性变形发展云图,图 6 为拱上各点的位移-荷载曲线。

根据计算,当爆炸冲击荷载 $P_0 < 1.4$ MPa 时,拱上点的应力均未达到屈服应力,拱结构处于弹性振动阶段。随着爆炸冲击荷载的进一步增大,拱顶处首先出现塑性变形,然后是拱脚直至扩展到整个

结构(图 5)。

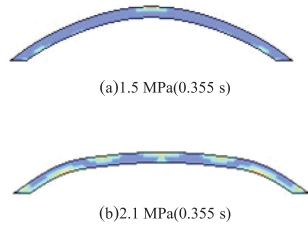


图 5 塑性变形云图($f/L = 0.1$)

Fig.5 Cloud chart of plastic deformation

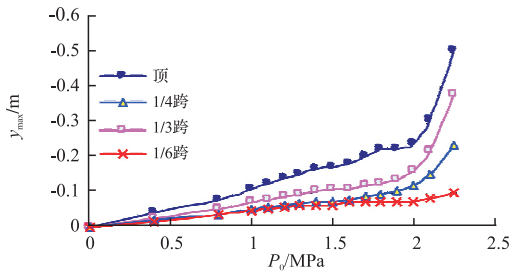


图 6 位移幅值与爆炸荷载幅值关系曲线($f/L = 0.1$)

Fig.6 The displacement amplitude vs. load amplitude curve of the certain points($f/L = 0.1$)

由图 6 可以看出,在整个变形发展过程中,拱顶处的位移幅值数量最大,结构各点的位移幅值数量随着外荷载的增加而增大,且均为负值,即拱结构的动平衡位置在静平衡位置的下方,拱结构以下凹振动为主,并未出现反直观动力响应。当 $P_0 \geq 2.0$ MPa 时,除 1/6 拱跨处以外,其他各点位移荷载关系曲线出现明显转折,认为结构发生了动力屈曲。

由以上分析可见,拱结构的矢跨比 $f/L \leq 0.1$ 时,在爆炸冲击荷载作用下,拱顶位移幅值最大,是结构的最危险部位。拱顶位移-荷载曲线只出现一个拐点,对应的荷载即可看作动力屈曲临界荷载。结构发生动力屈曲以后,并不出现反直观动力响应。

2.2 拱结构矢跨比对动力屈曲的影响

由以上分析可见,在爆炸冲击荷载作用下,拱结构矢跨比对其动力响应特点和动力屈曲模态具有显著影响。为了进一步研究了拱结构矢跨比对动力屈曲的影响,进行了详细计算分析。取爆炸冲击持续时间为 0.125 s,计算得不同矢跨比下拱顶位移幅值与荷载幅值关系曲线见图 7。

由图 7 可见,爆炸冲击持续时间一定时,图中曲线从左到右拱结构矢跨比越小,动力屈曲临界荷载越小,拱顶位移幅值越小,反直观动力响应程度逐渐减弱,动力屈曲临界荷载与动力失效荷载的差距越小。如矢跨比 $f/L = 0.15$ 的拱结构,动力屈曲临界荷载为 $P_0 = 2.3$ MPa,动力失效荷载为 $P_0 = 2.44$ MPa。当拱结构的矢跨比 $f/L \leq 0.1$ 时,结构发生动力屈曲以后将不会出现反直观动力响应。可见矢跨

比 $f/L \leq 0.1$ 的拱结构的动力屈曲模态与一般的拱结构有很大不同。

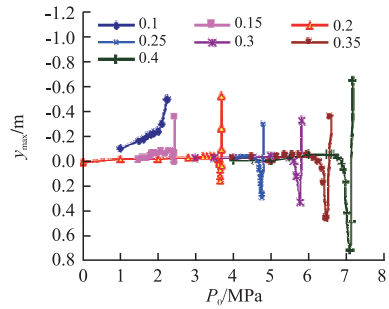


图 7 拱顶位移幅值与荷载幅值关系曲线

Fig.7 The displacement amplitude vs. load amplitude curve of the arch top

3 结论

本文研究发现,矢跨比 $f/L > 0.1$ 和 $f/L \leq 0.1$ 的拱结构,在爆炸冲击荷载作用下的动力响应特点有很大不同。

1)对于矢跨比 $f/L > 0.1$ 的拱结构,在弹性振动阶段,拱顶是结构位移的最大点,当结构出现塑性变形以后,结构的最大位移点不再是拱顶,而是约 1/6 拱跨处。拱顶部位的位移-荷载曲线更具代表性,能够反应拱结构的整个变形发展过程,在研究拱结构的动力屈曲问题时,选择拱顶位移幅值作为动力响应特征参数更为合理。当爆炸冲击持续时间一定时,拱顶位移-荷载曲线有 2 个拐点,第 1 个拐点对应的荷载可看作是动力屈曲临界荷载,第 2 个拐点对应的荷载可看作是动力失效荷载。

2)对于矢跨比 $f/L \leq 0.1$ 的拱结构,拱顶处首先出现塑性变形,然后发展到拱脚直至整个结构。拱顶位移幅值最大,是结构的最危险部位。拱顶位移-荷载曲线只出现一个拐点,对应的荷载即可看作动力屈曲临界荷载,也即动力失效荷载,结构发生动力屈曲以后,并不出现反直观动力响应。

3)爆炸冲击持续时间一定时,拱结构矢跨比越小,动力屈曲临界荷载越小,拱顶位移幅值越小,反直观动力响应程度越弱。当拱结构的矢跨比 $f/L \leq 0.1$ 时,结构发生动力屈曲以后将不会出现反直观动力响应。

参考文献(References):

[1] Xu,J.X, HUANG.H,ZHANG.P.Z,et al. Dynamic Stability of Shallow Arch with Elastic Supports Applied Action in the Dynamic Stability Analysis of Inner Winding of Transformer During Short Circuit[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics,2002,37:909-920.
 [2] J.Yao,B.Q.Song. The Dynamic Elastic Buckling Analysis of Circular Arch with Finite Displacement and Initial Imperfection [J]. J.Comput.

- Struct.Mech.Applic. 1992,9;253-262.
- [3] N.J.Mallon,R.H.B.Fey, H.Nijmeijer. Buckling of A Shallow Arch under Shock Loading Considering the Effects of the Arch Shape[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics,2006,41;1057-1067.
- [4] Fangqi Chen. Bifurcation Analysis of an Arch Structure with Parametric and Forced Excitation[J].Mechanics Research Communications,2007,34(3):213-221.
- [5] Yong-Lin Pi,Mark Andrew Bradford. Dynamic Buckling of Shallow Pin-Ended Arches under A Sudden Central Concentrated Load[J].International Journal of Structural Stability and Dynamics,2008,317(3-5):898-917.
- [6] Chen J S, Liao C Y. Experiment and Analysis on the Free Dynamics of A Shallow Arch After an Impact Load at the End[J].Journal of Applied Mechanics, 2005, 72(1);54-61.
- [7] 韩强,黄怀伟,樊学军.弹性浅拱的非线性动力屈曲[J].华南理工大学学报:自然科学版,2010,38(3):1-7.
HAN Qiang, HUANG Huaiwei, FAN Xuejun. Nonlinear Dynamic Buckling of Shallow Elastic arch[J]. Journal of South China University: Natural Science Edition, 2010,38(3):1-7.(in Chinese)
- [8] Lin J S, Chen J S. Dynamic Snap-Through of a Laterally Loaded Arch under Prescribed End Motion [J]. International Journal of Solids and Structures, 2003, 40 (18) : 4769-4787.
- [3] Chen J S, Lin J S. Dynamic Snap-Through of a Shallow Arch under A Moving Point Load [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2004, 126 (4): 514-519.
- [9] Chen J S, Li Y T. Effects of Elastic Foundation On The Snap-Through Buckling of a Shallow Arch under A Moving Point Load [J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43(14): 4220-4237.
- [10] N.J.Mallon, R.H.B.Fey, H.Nijmeijer.Buckling of a Shallow Arch Under Shock Loading Considering the Effects of the Arch Shape[J].International Journal of Non-Linear Mechanics , 2006,41;1057-1067.
- [11] Pi Yong-Lin, Bradford Mark Andrew, Liang Shuguo. Energy Approach For Dynamic Buckling of an undamped Arch Model Under Step Loading with Infinite Duration [J].International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2010 ,10(3);411-439.
- [12] 易壮鹏,赵跃宇,朱克兆,等.几何缺陷浅拱的动力稳定性分析[J].计算力学学报,2008,25(6):932-938
YI Zhuangpeng, ZHAO Yueyu, ZHU Kezhao, et al. The Dynamic Stability Analysis Of Shallow Arches With Geometrical Imperfections[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2008,25(6):932-938.(in Chinese)
- [13] 陈海龙,范华林,金丰年,等.爆炸荷载作用下地下拱结构动力分析 [J].工程力学,2013,30(4):169-174
CHEN Hailong , FAN Hualin , JIN Fengnian, et al. Forced Vibration of Underground Clamped Arch under Blast Load[J]. ENGINEERING MECHANICS, 2013,30(4):169-174.(in Chinese)
- [14] 冷冰林,许金余,段吉祥等.爆炸荷载作用下拱形结构的动力响应分析[J].弹箭与制导学报,2010,30(3):59-62.
LENG Binglin, XU Jinyu, DUAN Ji xiang. The Analysis of Arch Structure Subjected to Blast Loading[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2010,30(3):59-62.(in Chinese)
- [15] 宋春明,王明洋,王德荣.爆炸荷载作用下柔性动边界拱的动力响应分析[J].兵工学报 2008,29(7):813-818
SONG Chunming, WANG Mingyang, WANG Derong. Analysis of Dynamic Responses of Arches with Flexible Supports Subjected to Blast Loads[J]. Acta Armamentarh,2008,29(7):813-818.(in Chinese)
- [16] 康婷,许金余,白应生,等.爆炸冲击荷载作用下拱结构的弹塑性动力响应研究[J].兵工学报,2013,34(9):1097-1102
KANG Ting, XU Jinyu, BAI Yingsheng, et al. Elastic-Plastic Analysis on Dynamic Response of Arch Subjected to Explosive Impact [J]. Acta Armamentarh, 2013,34(9):1097-1102.(in Chinese)

(编辑:徐敏)

(上接第 78 页)

5 结语

本文建立了战斗双方一方部分成员不具有毁伤能力的随机格斗模型。在进攻方作战单元分组的情况下,给出了计算各方获胜及战斗出现和局的概率的递推算法,同时作为比较给出了进攻方不分组时获胜概率的计算方法。获胜概率只依赖于双方的毁伤率作战单元的比。算例子说明了没有一个进攻方案在任何情况下都绝对占优。

参考文献(References):

- [1] Williams T, Clinton J, Ancker J. Stochastic Duels[J]. Operations Research ,1963,11(5): 807-817.
- [2] Gafarian A V, Ancker C J. The Two-on-one Stochastic Duels[J]. Naval Research Logistics Quarterly, 1984, 31(4):309-324.
- [3] Friedman Y. Optimal Strategy for the One-against-many Battle[J]. Operations Research ,1977,25(5):884-888.
- [4] Kikuta K. A Note on the One-against-many Battle[J]. Operations Research ,1983,31(5):952-956.
- [5] Gafarian, A V, Manion, K R, Some Two-on-Two Homogeneous Stochastic Combats[J]. Naval Research Logistics, 1989,36(6):721-764.
- [6] Kress M. The Many-on-one Stochastic Duel[J]. Naval Research Logistics, 1987,34(5):713-720.
- [7] Jaiswal N K. Probabilistic Analysis of Combat Models[J]. Annals of Operations Research,1987, 9(1): 561-573.
- [8] Parkhideh S, Gafarian A V. General Solution to Many-on-Many Heterogeneous Stochastic[J]. Naval Research Logistics, 1996, 43(7):937-953.
- [9] Liwei L, Jun Y, Zhi G. A Kind of Stochastic Duel Model for Guerrilla War[J]. European Journal of Operational Research,2006,171(2),430-438.
- [10] Brown R H. Theory of Combat; The Probability of Winning[J]. Operations Research,1963,11(3):418-425.

(编辑:徐敏)