

文章编号:1007-6735(2011)01-0075-05

高能金-金碰撞末态带电粒子的赝快度分布

孙玉芬, 姜志进, 娄小辉

(上海理工大学 理学院, 上海 200093)

摘要: 给出了核子-核子碰撞末态带电粒子的赝快度分布函数, 采用 Glauber 模型, 计算出核-核碰撞过程中的平均参与者数、碰撞区域内的旁观者数、带头粒子数以及平均核子-核子碰撞数, 获得了核-核碰撞的末态带电粒子的赝快度分布方程, 与 PHOBOS 合作组 $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV 的金-金碰撞末态带电粒子的赝快度分布的实验结果吻合.

关键词: Glauber 模型; 核-核碰撞; 核子-核子碰撞; 赝快度分布

中图分类号: O 572.2

文献标志码: A

Pseudorapidity distribution of charged particles in Au-Au collisions at high energy

SUN Yu-fen, JIANG Zhi-jin, LOU Xiao-hui

(College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The pseudorapidity distribution function of charged particles in nucleon-nucleon collisions was presented. By using Glauber model, the mean numbers of participants, spectators in collision area, leading particles and binary nucleon-nucleon collisions were calculated. The pseudorapidity distributions of charged particles in nucleus-nucleus collisions are obtained. The theoretical results are consistent with those of the experimental observations in Au-Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV made by the PHOBOS collaboration.

Key words: Glauber model; nucleus-nucleus collision; nucleon-nucleon collision; pseudorapidity distribution

美国布鲁克海文实验室相对论重粒子碰撞机首次运行以来, PHOBOS、STAR、PHENIX 和 BRAHMS 4 个合作组搜集了大量的实验数据^[1-2]. 这些数据为研究核-核碰撞末态带电粒子的属性提供了机会. 从实验结果明显看出: 赝快度分布的宽度和高度随能量的增加而变宽变高; 同一能量的不同对心度 c 碰撞, 赝快度分布的形状相似, 而

高度随对心度 c (碰撞参数 b) 的增大而降低. 为解释观察到的实验现象, 人们提出了很多唯象理论模型, 典型的如: 双柱模型^[3]、热化组合模型^[4] 和三火球模型^[5] 等等, 但有些模型存在自由参数多或者数学过程复杂的缺点. 文献[6-8], 曾讨论了 $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV 和 200 GeV 金-金碰撞末态带电粒子的赝快度分布, 在文献[8]中, 质子-质子碰

收稿日期: 2010-04-15

基金项目: 上海市重点学科建设资助项目(S30501)

作者简介: 孙玉芬(1981-), 女, 硕士研究生. 研究方向: 理论物理.

姜志进(联系人), 教授. 研究方向: 理论物理. E-mail: jzj265@163.com

撞的大快速度区,计算结果与实验数据有偏差,原因可能是没有考虑带头粒子对质子-质子碰撞末态带电粒子赙快速度分布的影响.在文献[6-8]的基础上考虑带头粒子效应,取旁观者和带头粒子的(赙)快速度分布为高斯分布,讨论了 PHOBOS 合作组对 $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV 金-金碰撞的实验结果.

1 核子-核子碰撞的末态带电粒子的赙快速度分布

核子-核子碰撞的数据为分析核-核碰撞提供了有用信息,因此首先讨论核子-核子碰撞末态带电粒子的赙快速度分布.

在核子-核子碰撞过程中,核子相互碰撞损失大量能量,这些能量聚集在质心附近生成末态可测量的带电粒子(主要是 π 介子、 K 介子和质子 p),同时在入射粒子和靶粒子碎裂区分别产生一个粒子,它们具有与入射粒子相同的信号,携带了入射粒子大约 $\frac{1}{2}$ 的碰撞质心能量.在这样的碎裂区中与入射粒子相似的粒子被称为带头粒子^[9].因此,对于核子-核子碰撞的末态带电粒子的赙快速度分布可分为二元核子-核子碰撞和带头粒子两部分.

从文献[10]可知,二元核子-核子碰撞的末态带电粒子的快速度分布为

$$\frac{dN_{NN}^{\text{Bina}}(\sqrt{s_{NN}})}{dy} = \frac{C(\sqrt{s_{NN}})}{1 + \exp\left[\frac{|y| - y_0(\sqrt{s_{NN}})}{\Delta(\sqrt{s_{NN}})}\right]} \quad (1)$$

式中 $\Delta(\sqrt{s_{NN}})$ 、 $C(\sqrt{s_{NN}})$ 和 $y_0(\sqrt{s_{NN}})$ 都是 $\sqrt{s_{NN}}$ 的函数,分别影响着分布的宽度、高度和峰的位置,文中取

$$\begin{aligned} \Delta(\sqrt{s_{NN}}) &= 0.0655 \ln(\sqrt{s_{NN}}) + 0.1930 \\ y_0(\sqrt{s_{NN}}) &= 0.7487 \ln(\sqrt{s_{NN}}) - 0.6668 \\ C(\sqrt{s_{NN}}) &= 0.3463 \ln(\sqrt{s_{NN}}) + 0.7452 \end{aligned}$$

带头粒子的快速度分布满足高斯分布

$$\frac{dN_{\text{Lead}}}{dy} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(|y| - y_0)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2)$$

式中 y_0 指带头粒子快速度分布峰的位置.对于不同质心能量的质子-质子碰撞, σ 取同一常数值 0.6. y_0 在 $\sqrt{s_{NN}} = 23.6$ GeV、45.2 GeV 和 200 GeV 的质子-

质子碰撞中分别取常数 2.26、2.64 和 3.78.赙快速度 η 与快速度 y 之间的关系为

$$\left. \begin{aligned} y &= \frac{1}{2} \ln \left[\frac{\sqrt{p_T^2 \cosh^2 \eta + m^2} + p_T \sinh \eta}{\sqrt{p_T^2 \cosh^2 \eta + m^2} - p_T \sinh \eta} \right] \\ \frac{dN_{NN}(\sqrt{s_{NN}})}{d\eta} &= \sqrt{1 - \frac{m^2}{m_T^2 \cosh^2 y}} \frac{dN_{NN}}{dy} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 m 表示 π 介子、 K 介子和质子 p 的平均质量, p_T 是三者的平均横向动量, m_T 是三者的平均横向质量.由式(3)得核子-核子碰撞末态带电粒子的赙快速度分布为

$$\frac{dN_{NN}(\sqrt{s_{NN}})}{d\eta} = \sqrt{1 - \frac{m^2}{m_T^2 \cosh^2 y}} \cdot \left(\frac{dN_{NN}^{\text{Bina}}}{dy} + \frac{dN_{\text{lead}}}{dy} \right) \quad (4)$$

图 1 给出了 $\sqrt{s_{NN}} = 23.6$ GeV、45.2 GeV 和 200 GeV 的质子-质子碰撞的末态带电粒子的赙快速度分布,实线是式(4)的计算结果,实点、三角形和圆圈是实验结果^[11].由图可知式(4)能很好地描述核子-核子碰撞末态带电粒子的赙快速度分布.与文献[8]中核子-核子碰撞相比,考虑带头粒子效应后,结果大大改善.

2 重离子碰撞中的参与者数、旁观者数、带头粒子数和二元核子-核子碰撞数

利用 Glauber 模型^[8],计算参与者数、碰撞区域内的旁观者数、带头粒子数和二元核子-核子碰撞数,文献[6-8,12]给出了详细的计算过程,这里只作简单介绍.

对于一定碰撞区域内的 $A-B$ 核碰撞的平均参与者数为

$$\bar{N}_{\text{Part}} = \frac{\int N_{\text{Part}}(\mathbf{b}) d^2 \mathbf{b}}{\int d^2 \mathbf{b}} \quad (5)$$

式中 $N_{\text{Part}}(\mathbf{b})$ 是碰撞参数为 $\mathbf{b}$ 的一次 $A-B$ 核碰撞中的参与碰撞的核子总数.由质子-质子碰撞知,每个参与者产生一个带头粒子,因此在金-金碰撞中,带头粒子数为

$$\bar{N}_{\text{Lead}} = \frac{1}{2} \bar{N}_{\text{Part}} \quad (6)$$

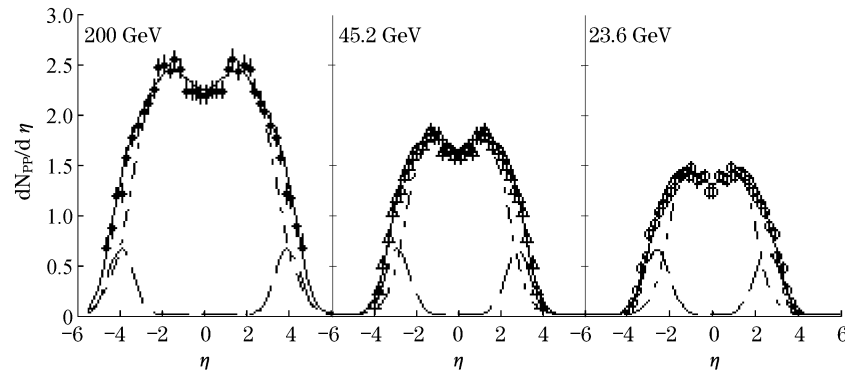


图 1 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV、45.2 GeV 和 23.6 GeV 质子-质子碰撞的末态带电粒子的赝快度分布

Fig.1 The pseudorapidity distributions of charged particles in proton-proton collisions

at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV、45.2 GeV and 23.6 GeV.

碰撞区域内的旁观者数为

$$\bar{N}_{\text{Spec}} = \bar{N}_{\text{Total}} - \frac{\bar{N}_{\text{Part}}}{2} \quad (7)$$

$\bar{N}_{\text{Total}}$ 是每个核在碰撞区域内的平均总核子数.

另外,一定碰撞区域内的平均二元核子-核子碰撞数为

$$\bar{N}_{\text{NN}} = \frac{\int N_{\text{NN}}(\mathbf{b}) d^2 \mathbf{b}}{\int d^2 \mathbf{b}}$$

式中 $N_{\text{NN}}(\mathbf{b})$ 是碰撞参数为 $\mathbf{b}$ 的一次 $A-B$ 核碰撞中的非弹性二元核子-核子碰撞数.

表 1 给出了 $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV 金-金碰撞中的碰撞参数 $\mathbf{b}$ 、碰撞区域内的总的核子数 $\bar{N}_{\text{Total}}$ 、平均参与者数 $\bar{N}_{\text{Part}}$ 、碰撞区域内的平均旁观者数 $\bar{N}_{\text{Spec}}$ 以及平均二元核子-核子碰撞数 $\bar{N}_{\text{NN}}$. 对心度 c 是根据金-金碰撞过程中总的非弹性碰撞截面 $\sigma_{\text{AuAu}}^{\text{in}} = 6.9 \times 10^{-28} \text{ m}^2$ [2] 的百分比定义的. 表中括号内为 PHOBOS

表 1 $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV 金-金碰撞的碰撞参数 $\mathbf{b}$ 、

$\bar{N}_{\text{Total}}$ 、 $\bar{N}_{\text{Part}}$ 、 $\bar{N}_{\text{Spec}}$ 和 $\bar{N}_{\text{NN}}$.

Tab.1 The impact parameter $\mathbf{b}$ 、 $\bar{N}_{\text{Total}}$ 、 $\bar{N}_{\text{Part}}$ and $\bar{N}_{\text{Spec}}$ for different centrality bin in Au-Au collision at $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV.

$c/\%$	$\mathbf{b}/\text{fm}$	$\bar{N}_{\text{Total}}$	$\bar{N}_{\text{Part}}$	$\bar{N}_{\text{Spec}}$	$\bar{N}_{\text{NN}}$
0~6	0~3.63	196.95	340.80(340 ± 11)	26.55	970.7
6~15	3.63~5.74	195.35	265.65(275 ± 9)	62.425	696.1
15~25	5.74~7.41	184.86	193.88(196 ± 8)	87.92	457.9
25~35	7.41~8.77	164.67	136.79(136 ± 6)	96.275	286.6
35~45	8.77~9.94	141.72	93.40(90 ± 5)	95.02	171.0
45~55	9.94~10.9	119.25	60.7	88.9	95.4

合作组的实验结果^[1]. 由表中数据可以看出,计算的 $\bar{N}_{\text{Part}}$ 与 PHOBOS 合作组所给的结果吻合.

3 核-核碰撞的末态带电粒子的赝快度分布

在核-核碰撞过程中,碰撞核子的质心能量随着碰撞次数的增加而减少,这些损失的能量聚积在质心附近,最终生成末态可测量的带电粒子. 核-核碰撞的末态带电粒子的赝快度分布主要有三部分:一是二元核子-核子碰撞的贡献,二是带头粒子的贡献,三是碰撞区域内的旁观者的贡献.

3.1 二元核子-核子碰撞的末态带电粒子的快度分布

碰撞参数为 $\mathbf{b}$ 的二元核子-核子碰撞的末态带电粒子的快度分布为

$$\frac{dN_{AB}^{\text{Bina}}(\mathbf{b})}{dy} \approx N_{\text{NN}}(\mathbf{b}) \{1 - [1 - T_P(\mathbf{b}) \sigma_{\text{NN}}^{\text{in}}]^{AB}\} \times \frac{dN_{\text{NN}}(\sqrt{s_{NN}}, \mathbf{b})}{dy} \quad (9)$$

式中 $T_P(\mathbf{b})$ 表示单位碰撞截面内发生一次核子-核子碰撞的几率, $\sigma_{\text{NN}}^{\text{in}}$ 为核子-核子非弹性碰撞截面, 计算中 $\sigma_{\text{NN}}^{\text{in}} = 41 \times 10^{-34} \text{ m}^2$, 忽略每次核子-核子碰撞的能量差异, 取相同的质心能量. 事实上, 碰撞参数 $\mathbf{b}$ 越大, $N_{\text{NN}}(\mathbf{b})$ 的值越小 (见表 1), 每次核子-核子碰撞的平均质心能量就越大, 平均质心能量越大对末态带电粒子产率的贡献就越大, $dN_{AB}^{\text{Bina}}(\mathbf{b})/dy$ 应该随着 $N_{\text{NN}}(\mathbf{b})$ 值的减少而增大.

计算中, 所取核子-核子碰撞的质心能量较大, 故引入了能量损失因子 $\beta(\mathbf{b})$

$$\beta(b) = 1 + \alpha(b)[N_{NN}(b) - 1] \quad (10)$$

其中 $\alpha(b)$ 是自由参数, 可根据拟合实验数据决定.

考虑到能量损失, 式(9)可改写为

$$\frac{dN_{AB}^{Bina}(b)}{dy} = \frac{N_{NN}(b) \{1 - [1 - T_P(b) \sigma_{NN}^{in}]^{AB}\}}{\beta(b)} \times \frac{dN_{NN}(\sqrt{s_{NN}}, b)}{dy} \quad (11)$$

3.2 旁观者和带头粒子的快度分布

带头粒子产生于核-核碰撞过程中, 并且它们的能量和动量相对入射粒子损失很少. 没有参与碰撞的核子称为旁观者, 主要分为碰撞区域内和碰撞区域外的旁观者, 后者在碰撞后主要以碎片的形式存在, 对(赝)快度分布没有影响; 碰撞区域内的旁观者由于碰撞作用分裂为核子, 并且只有带电核子被探测到, 也就是说这部分旁观者中, 只有质子对(赝)快度分布有贡献.

旁观者和带头粒子的快度分布服从高斯分布, 形式如下

$$\frac{dN_{AB}^{Lead}(b)}{dy} = \frac{N_{AB}^{Lead}(b)}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left[-\frac{(\eta - y_0)^2}{2\sigma_1^2}\right] \quad (12)$$

$$\frac{dN_{AB}^{Specp}(b)}{dy} = \frac{N_{AB}^{Specp}(b)}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \exp\left[-\frac{(\eta - y_{s0})^2}{2\sigma_2^2}\right] \quad (13)$$

式中 $N_{AB}^{Specp}(b)$ 指的是碰撞区域内旁观者中的质子数, y_{s0} 指旁观者快度分布峰的位置. $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV 金-金碰撞, 对不同对心度 c , σ_1 、 σ_2 、 y_0 和 y_{s0} 的取值分别为 0.65、0.8、3.65 和 4.62.

3.3 核-核碰撞的末态带电粒子的赝快度分布

由式(3)可知, 核-核碰撞的末态带电粒子的赝快度分布为

$$\frac{dN_{AB}(b)}{d\eta} = \sqrt{1 - \frac{m^2}{m_T^2(b) \cosh^2 y}} \cdot \left(\frac{dN_{AB}^{Bina}}{dy} + \frac{dN_{Lead}}{dy} + \frac{dN_{Specp}}{dy} \right) \quad (14)$$

图2为 $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV 金-金碰撞末态带电粒子的赝快度分布. 其中圆圈、正方形、三角形、菱形、加号和星号是 PHOBOS 合作组的实验结果^[2], 虚线、点线和点划线分别是旁观者、带头粒子和二元核子-核子碰撞的结果, 实线是以上三线的叠加(式(14)). 由图2可知, 式(14)的计算结果与 PHOBOS 合作组的实验数据符合得很好, 由最小对心度(0~6%)碰撞得到的常数 σ_1 、 σ_2 、 y_0 和 y_{s0} , 应用到其它对心度碰撞, 结果也吻合, 还可看出二元核子-核子碰撞主要贡献在中心快度区, 旁观者和带头粒子主要作用于大快度区.

数值计算中, 横向动量 $p_T(b)$ 的取值是依据不同质心能量实验中各对心度下核-核碰撞后产生的不同带电粒子(主要为 π 介子、 K 介子和质子 p) 的

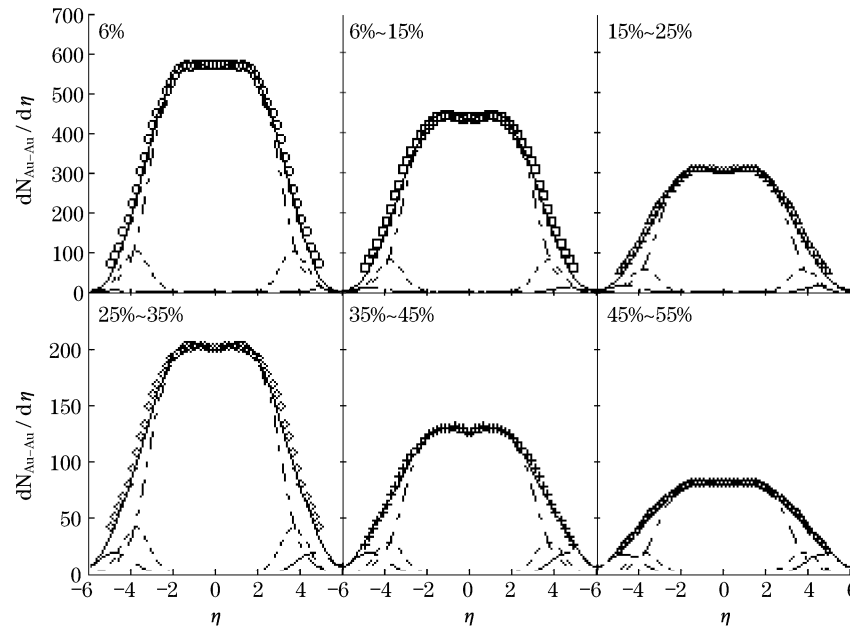


图2 $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV 金-金碰撞的末态带电粒子的赝快度分布.

Fig.2 Pseudorapidity distributions of charged particles in Au - Au collisions at $s_{NN} = 130$ GeV

比例^[13],取横向动量的平均值.对心度从小到大对应的 $\alpha(b)$ 值为 0.003 05、0.003 75、0.005 2、0.007 7、0.012 和 0.017 5, $p_T(b)$ 的值分别为 0.438、0.438、0.425、0.41、0.40 和 0.40 GeV/c.随着对心度 c 的增加, $p_T(b)$ 的值减小, $\alpha(b)$ 的值增加,这与实验结论一致.

4 结 论

根据核子-核子碰撞与核-核碰撞的关系,首先讨论核子-核子碰撞,得到赝快度分布和能量的关系式.利用 Glauber 模型计算平均二元核子-核子碰撞数、参与者数、碰撞区域内的旁观者数和带头粒子数.最后分析核-核碰撞的末态带电粒子的赝快度分布(式(14)),主要有三部分组成:二元核子-核子碰撞、碰撞区域内的旁观者和带头粒子,讨论了 $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV 金-金碰撞,计算结果与实验结果吻合.

参考文献:

- [1] BACK B B, BAKER M D, BARTON D S, et al. Significance of the fragmentation region in ultrarelativistic heavy-ion collisions [J]. Phys Rev Lett, 2003, 91:052303.
- [2] BACK B B, BAKER M D, BALLINTIJIN M, et al. The PHOBOS perspective on discoveries at RHIC[J]. Nucl Phys A, 2005, 757:28-101.
- [3] 刘福虎. AGS 和 RHIC 能区核-核碰撞中的领头粒子效应与双柱模型[J]. HEP & NP, 2006, 30(7):638-

641.

- [4] XIONG Wei, FENG Sheng-Qin. Analysis of charged hadron multiplicity distributions at RHIC[J]. Chinese Physics C, 2008, 32(4):639-644.
- [5] 孟彩荣. 高能核-核碰撞中产生质子的快度分布[J]. 2006, 30(4):322-326.
- [6] DONG Y F, JIANG Z J, WANG Z W. Pseudorapidity distributions of multiplicity in Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV[J]. Chinese Physics C, 2008, 32(4):259-263.
- [7] WANG Z W, JIANG Z J. Charged-particle pseudorapidity distributions in Au + Au collisions at RHIC[J]. Chinese Physics C, 2009, 33(4):274-280.
- [8] 王增伟,姜志进,张裕仕. 高能 Au + Au 碰撞末态多重数赝快度分布研究[J]. 上海理工大学学报, 2009, 31(4):322-326.
- [9] 黄卓然. 高能重离子碰撞导论[M]. 黑龙江:哈尔滨工业大学出版社, 2002:24-230.
- [10] WONG C Y. Initial energy density of quark-gluon plasma in relativistic heavy-ion collisions[J]. Phys Rev D, 1984, 30:961-971.
- [11] BUSZA W. Structure and fine structure in multiparticle production data at high energies[J]. Acta Phys Pol B, 2004, 35(12):2 873-2 894.
- [12] 姜志进. 高能重离子碰撞中的参与者数和核子-核子碰撞数[J]. 物理学报, 2007, 56(9):5 191-5 195.
- [13] ADLER S S, AFANASIEV S, AIDALA C, et al. Identified charged particle spectra and yields in Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV [J]. Phys Rev C, 2004, 69:034909.

(责任编辑:巩红晓)

(上接第 74 页)

化,以使得计算结果更加精确.另外,在算法所分析的 3 种优化目标中,只选定货品的质量和出库频率为模糊量,而对于其他货品属性量的模糊化还有待于进一步研究.

参考文献:

- [1] 王雯,傅卫平,马明云. 自动化立体仓库出入库调度优化[J]. 工业工程与管理, 2008, (5):15-20.
- [2] 柳赛男,柯映林,李江雄,等. 基于调度策略的自动化仓库系统优化问题研究[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(9):1438-1443.
- [3] 徐香玲,傅卫平,李德信,等. 基于专家系统的自动化立体仓库出入库调度研究[J]. 物流技术, 2005, (2):38-51.
- [4] 刘普寅,吴孟达. 模糊理论及其应用[M]. 湖南:国防

科技大学出版社, 1998.

- [5] 孟广武,张兴芳. 模糊数的运算法则[J]. 模糊系统与数学, 2001, 13(3):25-29.
- [6] 李郝林. 遗传算法中的逐级进化策略研究[J]. 上海理工大学学报, 2004, 26(2):138-140.
- [7] 何洋林,叶春明. 模糊交货期 Flow Shop 调度文化进化算法研究[J]. 上海理工大学学报, 2009, 31(1):99-102.
- [8] 秦红,杜红,毛鹏. 一种基于神经网络模型的反模糊化的新方法[J]. 山东省农业管理干部学院学报, 2000, (01):57-59.
- [9] 王小平,曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现[M]. 陕西:西安交通大学出版社, 2002.
- [10] 王沫然. MATLAB 与科学计算[M]. 第 2 版. 北京:电子工业出版社, 2008.

(责任编辑:巩红晓)