

基于有限零和灰色博弈的车道变换决策分析

彭金栓,付锐,郭应时,袁伟,王畅

长安大学汽车学院,西安 710064

摘要 车道变换决策阶段,由于驾驶人对距离和速度判断失误,极易造成擦挂和追尾事故。为了明确车道变换决策形成机制以及此过程中交通冲突的诱发机制,基于决策阶段车辆间的运动关系及驾驶期望等,限定边界条件,提出车道变换博弈的概念。引入具有混合策略的二人有限零和灰色博弈模型,推导模型算法。结合实际道路试验前提下车道变换博弈样本的筛选和数据处理分析,研究博弈双方驾驶人的策略选择和收益特性。结果表明,当车道变换对象车与目标车道后随车的交通冲突不可避免时,对象车的理想最优策略是减速等待,而目标车道后随车的理想最优策略是加速通过临界冲突点,可以有效地兼顾博弈双方安全性与行车时间的收益需求,达到整体最优。研究结果可为车道变换过程中交通冲突的形成机制和路权分配提供相应的理论支持。

关键词 车道变换;决策;有限零和;灰色博弈;混合策略

中图分类号 U491.3

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.03.08

Analysis of Lane Change Decision Making Based on the Finite and Zero-sum Grey Game Theory

PENG Jinshuan, FU Rui, GUO Yingshi, YUAN Wei, WANG Chang

School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China

Abstract In the lane change decision-making stage, scratch and rear-end accidents may occur owing to drivers' miss judgments on the relative distances and velocities. In order to clarify the formation mechanism of drivers' decision making and traffic conflict in the lane change process, based on the motion relationship of related vehicles and driving expectation, the boundary conditions are limited, and a lane change game concept is put forward. The finite and zero-sum grey game model with mixed strategies is introduced, and the model algorithm is subsequently derived. Strategy selection and income characteristics of the drivers in the game are researched by sample selection and data processing analysis under the condition of real-world experiments. Analysis shows that when the traffic conflict between lane change object vehicle and following vehicle in the target lane is inevitably, the ideal and optimal strategy for the object vehicle is slowing down and waiting, while corresponding strategy for the game opponent is passing by the critical conflict point with an acceleration, so as to give the consideration to driving safety and traveling time, then achieve the goal of global optimality. The results may give corresponding theoretical support to the formation mechanism of the traffic conflicts and allocation of right-of-way in a lane change process.

Keywords lane change; decision-making; finite and zero-sum; grey game; mixed strategy

0 引言

车道变换过程经常伴随交通冲突的发生,如果驾驶人的操控技术不熟练、判断决策水平及事件处置能力较低,极易

诱发交通事故。据相关统计显示,直接的车道变换事故约占事故总量的6%,由此造成的交通延误超过交通事故所致总延误时间的10%,给人们的生命及财产安全带来巨大的威

收稿日期:2010-11-16;修回日期:2011-01-04

基金项目:国家道路交通安全科技行动计划项目(2009BAG13A05)

作者简介:彭金栓,博士研究生,研究方向为驾驶人行为特性及事故机制等,电子信箱:pengjinshuan@163.com;付锐(通信作者),教授,研究方向为道路交通安全,电子信箱:furui@chd.edu.cn

胁。在所有的车道变换事故中,由于驾驶人判断决策失误而诱发的事故约占事故总量的 75%,由此可见决策阶段对整个车道变换过程的安全性具有决定性影响^[1]。

国内外众多学者对驾驶人车道变换行为进行了深入研究。Salvucci 等^[2]基于仿真实验认为驾驶人变道前会轻微减速,变道过程中再加速,直至车道变换结束,首次对车道变换过程中速度变化趋势进行了深度剖析,不足之处是与真实交通环境下的实路试验相比,仿真实验结果的准确性受到限制。Chung 等^[3]构建了驾驶人车道变换辅助系统,基于视频设备动态采集目标车道相关车辆信息,对车道变换驾驶人进行预警,且预警成功率保持在较高水平,但该系统光适应性尚需改进。Henning 等^[4]提出转向信号灯与后视镜的注视扫描是预测驾驶人即将车道变换的两项重要指标,而且后视镜的注视扫描比转向灯信号在时序上更为领先,且预测精度更高,该结论对于判定驾驶人的车道变换意图有重要意义。

国内对车道变换行为的研究始于 21 世纪初,魏丽英等^[5]运用线性跟驰理论对相邻车辆之间的距离、速度和加速度进行分析,判定路段上的车道变换行为,得到驾驶人车道变换路径选择的基本规律,开启了国内对车道变换行为的研究进程,但考虑因素过于单一,且忽视了驾驶人自身特性对车道变换行为的影响。近几年来,开始注重对驾驶人车道变换安全性的量化评价,王荣本等^[6]结合相对速度、距临界碰撞点时间等参数得出了最小安全车道变换距离的计算方法,为量化研究驾驶人车道变换安全性提供了重要依据;Pei 等^[7-8]研究了驾驶人车道变换行为对原始车道和目标车道车头时距的影响,提出了道路通行能力修正系数计算公式,并提出了车道变换行为安全性评价函数,与文献[6]相比,其考虑因素更为全面,评价可靠性更高。

基于以上文献回顾可以看出,国外对车道变换的研究比较领先,但研究多集中于车道变换的实施阶段,而缺少对决策阶段进行深入探讨的研究。国内主要是建立车道变换的相关数学模型,并进行微观交通流仿真,取得了一些研究成果,但往往忽略了驾驶人在车道变换行为中的决定性作用,具有一定的局限性。

为了从驾驶人的主体角度研究车道变换行为,本文引入二人有限零和灰色博弈模型,较深入地分析了车道变换决策阶段相关车辆的相互竞争关系,从而明确了车道变换决策以及交通冲突的形成机制,并且为相关交通规则的制定提供理论支持。

1 车道变换博弈的引入

如图 1 所示, V_1 为当前车道研究对象车, V_2 为当前车道前导车, V_3 及 V_4 分别为目标车道跟随车及前导车; L'_1 、 L'_2 、 L'_3 分别为对象车 V_1 分别与 V_2 、 V_3 和 V_4 的临界安全距离(不发生碰撞的最小安全距离,由车辆性能、驾驶人行为特性、车辆瞬时速度等确定); L_1 、 L_2 、 L_3 分别为对象车与其他车辆的实际距离; C 为 V_1 与 V_3 按照彼此当前运动趋势发生交通冲突的

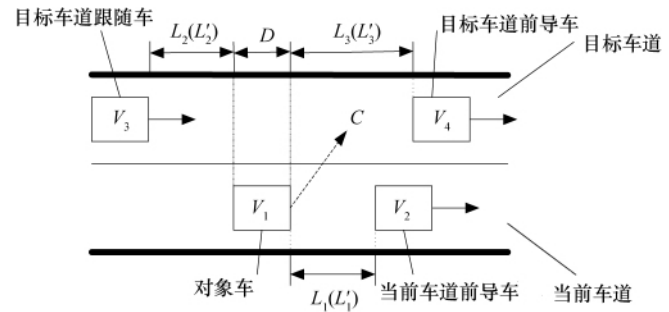


图 1 车道变换示意

Fig. 1 Schematic diagram of lane-change

临界点(假定 L_2 足够小)。本文涉及对象车欲行至左侧快车道的典型车道变换场景。

行车过程中,当对象车的驾驶人感知所处驾驶环境无法满足自身的驾驶期望时,为获取更高的速度及空间满意度,产生车道变换意图。从目标车道跟随车的角度分析,对象车变道成功后, V_3 的前导车由 V_4 变成了 V_1 ,从而导致 V_3 驾驶人的速度及空间满意度降低。驾驶人本能上都有使自身利益最大化的心理趋势,因而 V_3 可能会选择加速率先通过冲突临界点,阻止 V_1 变换车道,二者从而形成竞争关系。假定对象车 V_1 与目标车道前导车 V_4 的实际距离 L_3 充分大,可以忽略 V_4 对 V_1 车道变换行为的影响,此时车道变换决策可以简化为 V_1 与 V_3 驾驶人为了争夺冲突临界点,追求各自速度及空间满意度而进行的策略选择和博弈过程。

2 博弈特征分析

2.1 特性递推

在对象车与目标车道后随车进行的车道变换博弈过程中,双方驾驶人基于各自对外界环境信息的感知结果,结合自身对车速和相对距离等参数的判断,充分考虑对手可能的策略选择和对应收益,最终制定自身对应的行为决策。博弈双方驾驶人的选择策略有限,且博弈一方驾驶人所得收益值等于其博弈对手所失收益值,即为二人零和博弈;驾驶人在行车过程中,会受到心理状态、技术水平等内在因素和所处环境不确定性的影响,进行策略选择时受到不确定性的约束,只能以某种不确定的灰数选择自己的策略,进而满足二人有限零和灰色博弈模型的条件。当博弈双方驾驶人进行策略选择时,无法选定某个纯策略,只能给出选取每个纯策略的概率,因而最终可以把车道变换博弈看作是混合策略的二人有限零和灰色博弈。车道变换博弈特性的递推过程如图 2 所示。

2.2 策略组合与收益

车道变换对象车与目标车道后随车围绕临界交通冲突点进行车道变换博弈时,对于对象车驾驶人而言,有强制车道变换与减速等待(让 V_3 通过后,对象车再执行车道变换操作)两种纯策略,而目标车道后随车驾驶人相应则有减速让行、匀速通过、加速通过 3 种纯策略。车道变换时,驾驶人收

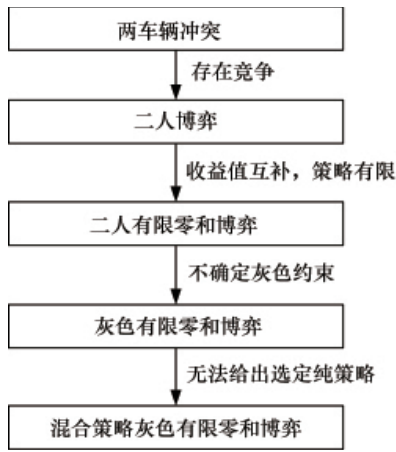


图2 车道变换博弈特征的递推过程

Fig. 2 Recurrence process of lane change game characteristics

益涉及行车时间 T 与行车安全性 S , 为方便比较, 统一换算为综合效益 E , 具体算法为

$$E=0.6S+0.4T$$

其中, 行车安全性 S 按车道变换博弈过程中交通冲突的剧烈程度分为低危险、危险、非常危险 3 个等级, 各等级对应得分为 5、3、1; T 为博弈过程中车道变换对象车的行车时间收益值(单位: s), 时间节省量取为正值, 损益值取负值。叠加后的无量纲收益值 E 可能为正, 也可能为负。

3 二人有限零和灰色博弈模型

3.1 模型描述

具有混合策略的二人有限零和灰色博弈为 $G^*=\{P_1^*, P_2^*, A(\otimes), E\}$, 其中局中人甲、乙的策略集合分别为 $P_1=(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m), P_2=(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$, 局中人甲的收益矩阵 $A(\otimes)=[a_{ij}(\otimes)]_{m \times n}, a_{ij}(\otimes) \in [\underline{a}_{ij}, \overline{a}_{ij}] (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n), P_1^*, P_2^*$ 分别为局中人甲和乙对应策略集的混合策略分布, 即

$$P_1^*=\left\{x=(x_1, x_2, \dots, x_m) \mid x_i \geq 0, i=1, 2, \dots, m, \sum_{i=1}^m x_i=1\right\}$$

$$P_2^*=\left\{y=(y_1, y_2, \dots, y_n) \mid y_j \geq 0, j=1, 2, \dots, n, \sum_{j=1}^n y_j=1\right\}$$

其中, x, y 分别为甲和乙的混合策略, 即博弈双方取各自纯策略的概率值大小, 且 (x, y) 为一个混合局势, 局中人甲的收益函数为

$$E(x, y)=x^T A(\otimes) y=\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij}(\otimes) x_i y_j$$

当 $A(\eta)=\eta a_{ij}+(1-\eta) \overline{a}_{ij} (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n), 0 \leq \eta \leq 1$, 称 $A(\eta)$ 为 $A(\otimes)$ 的 η 定位白化矩阵, $G^*(\eta)$ 称为 G^* 的 η 定位问题。当 $\eta=0$ 时, 对应下临界定位博弈问题 $G^*(0)$; 当 $\eta=1$ 时, 对应上临界定位博弈问题 $G^*(1)$; $\eta=1/2$ 时, 对应均值

定位博弈问题 $G^*(1/2)$ 。一般取均值博弈的最优解与最优值近似作为 G^* 的最优解与最优值, 特殊地, 当灰色博弈问题 G^* 上下临界定位博弈的最优值相等时, 则该最优值与对应最优解为 G^* 的理想最优值与理想最优解^[9]。

3.2 模型求解

给定混合策略下的有限零和灰色博弈为

$$G^*=\{P_1^*, P_2^*, A(\otimes), E\}$$

假设当局中人甲选择策略 α_i , 乙选择策略 β_j 时, 甲的收益增加值 $\sum_{i=1}^m x_i a_{ij}(\otimes) (j=1, 2, \dots, n)$, 设其最小值为 $K_1(\otimes)$, 且满足 $K_1(\otimes) \in [\underline{K}_1, \overline{K}_1]$ 为一区间灰数。甲通过调整 $x_i (i=1, 2, \dots, m)$ 使 $K_1(\otimes)$ 尽可能大; 局中人乙的收益损失值为 $\sum_{j=1}^n a_{ij}(\otimes) y_j (i=1, 2, \dots, m)$, 设其最大值为 $K_2(\otimes) \in [\underline{K}_2, \overline{K}_2]$ 为区间灰数, 乙也会调整 $y_j (j=1, 2, \dots, n)$, 使 $K_2(\otimes)$ 尽可能小, 则上述问题转化成求解以下两个线性规划:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{求} \quad \max K_1(\otimes) \\ \text{st} \quad \sum_{i=1}^m x_i a_{ij}(\otimes) \geq K_1(\otimes) (j=1, 2, \dots, n) \\ \sum_{i=1}^m x_i=1, x_i \geq 0 (i=1, 2, \dots, m) \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{求} \quad \min K_2(\otimes) \\ \text{st} \quad \sum_{j=1}^n y_j a_{ij}(\otimes) \leq K_2(\otimes) (i=1, 2, \dots, m) \\ \sum_{j=1}^n y_j=1, y_j \geq 0 (j=1, 2, \dots, n) \end{array} \right. \quad (2)$$

设 $h=\min\{a_{ij}\} (0 \leq i \leq m, 0 \leq j \leq n), q=|h|+1, q_{ij}=a_{ij}+h$, 则式

(1) 等价于

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{求} \quad \max [K_1(\otimes)+q] \\ \text{st} \quad \sum_{i=1}^m x_i q_{ij}(\otimes) \geq K_1(\otimes)+q (j=1, 2, \dots, n) \\ \sum_{i=1}^m x_i=1, x_i \geq 0 (i=1, 2, \dots, m) \end{array} \right. \quad (3)$$

令 $\frac{x_i}{K_1+q}=f_i (i=1, 2, \dots, m)$, 则式(3)等价于

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{求} \quad \min \sum_{i=1}^m f_i=Z \\ \text{st} \quad \sum_{i=1}^m f_i q_{ij}(\otimes) \geq 1 (j=1, 2, \dots, n) \\ f_i \geq 0 (i=1, 2, \dots, m) \end{array} \right. \quad (4)$$

同理, 式(2)等价于

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{求} \quad \min [K_2(\otimes)+q] \\ \text{st} \quad \sum_{j=1}^n y_j q_{ij}(\otimes) \leq K_2(\otimes)+q (i=1, 2, \dots, m) \\ \sum_{j=1}^n y_j=1, y_j \geq 0 (j=1, 2, \dots, n) \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\begin{cases} \text{令 } \frac{y_j}{K_2+q} = g_j (j=1, 2, \dots, n), \text{ 则式(5)等价于} \\ \text{求 } \max \sum_{i=1}^m g_j = W \\ \text{st } \sum_{j=1}^n g_j q_j (\otimes) \leq 1 (i=1, 2, \dots, m) \\ g_j \geq 0 (j=1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (6)$$

对于任意二人有限零和灰色博弈问题 $G^* = \{P_1^*, P_2^*, A(\otimes), E\}$, 当已知满足条件的收益矩阵时, 反求式(6)~式(1), 可求得 G^* 的对应最优解和最优值。

4 实例分析与讨论

研究小组前期进行了真实城市道路环境下的自动驾驶试验, 以研究驾驶人各种驾驶行为模式 (如跟车、车道变换及超车等) 下的行为特性。17 名被试者 (其中 8 名非熟练驾驶人, 9 名熟练驾驶人) 共执行了 152 次车道变换, 结合试验场景录像对车道变换时窗内交通冲突状况进行分析, 最终提取 19 次车道变换博弈样本 (向左侧变道)。参照第 2.2 节所述车道变换博弈局中人综合收益的计算方法, 结合实验工作人员的数据分析处理及主观判断, 得到叠加后各种策略组合下车道变换对象车 (局中人甲) 收益值的均值, 并最终确定其收益矩阵如表 1 所示。即

$$A(\otimes) = \begin{bmatrix} [1, 3] & 2 & 1 \\ [2, 4] & -1 & -3 \end{bmatrix}$$

表 1 对象车收益矩阵

Table 1 Income matrix of object vehicle

V_1	V_3		
	减速让行	匀速通过	加速通过
减速等待	[1, 3]	2	1
强制变道	[2, 4]	-1	-3

首先考虑 G^* 的下临界定位博弈问题 $G^*(0) = \{P_1^*, P_2^*, A(0), E\}$, 其中 $A(0) = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & -1 & -3 \end{bmatrix}$, 可知 $h = -3, q = 4$, 故 $q(0) =$

$$\begin{bmatrix} 5 & 6 & 5 \\ 6 & 3 & 1 \end{bmatrix}。$$

按照第 3.2 节介绍方法求得式(6)最优值 $W = 1$, 混合最优解 $g^0 = (g_1^0, g_2^0, g_3^0) = (0, 0, 0.2)$; 式(4)最优值 $Z = 1$, 最优解 $f^0 = (f_1^0, f_2^0) = (0.2, 0)$ 。进而求得灰色下临界定位线性规划最优值 $G^*(0) = 1$, 混合最优解 $x^0 = (x_1^0, x_2^0) = (1, 0), y^0 = (y_1^0, y_2^0, y_3^0) = (0, 0, 1)$ 。

再考虑 G^* 的上临界定位博弈问题 $G^*(1) = \{P_1^*, P_2^*, A(1), E\}$, 其中,

$$A(1) = \begin{bmatrix} 3 & 2 & 1 \\ 4 & -1 & -3 \end{bmatrix} \quad h = -3 \quad q = 4$$

$$q(1) = \begin{bmatrix} 7 & 6 & 5 \\ 8 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

按照同样方法求得 G^* 的上临界定位线性规划的最优值 $G^*(1) = 1$, 混合最优解 $x^1 = (x_1^1, x_2^1) = (1, 0), y^1 = (y_1^1, y_2^1, y_3^1) = (0, 0, 1)$ 。

由于 G^* 的上下临界最优值相等, 混合最优解相同, 所以该最优值及混合最优解即为 G^* 的理想最优值与理想最优解。

也就是说, 当对象车收益满足表 1 所示的区间灰数矩阵时, 其收益可以达到理想最优值, 且对象车的理想最优混合策略是执行减速让行的纯策略, 而目标车道后随车的理想最优混合策略是执行加速通过临界交通冲突点的纯策略。此时理想混合策略过渡到理想纯策略, 博弈双方都可以给定自己的选择策略, 从而有效兼顾双方驾驶人行车安全性与行车时间收益需求。通过对表 1 中各策略组合下的收益值进行小范围内波动调整发现, 理想最优解及最优值并未受到影响。车道变换博弈样本选取时, 较好地兼顾了熟练驾驶人与非熟练驾驶人的行为特性差异, 从而使最优解和最优值的结果更具说服力。因此可以认定, 相关车辆进行车道变换博弈时, 当对象车与目标车道后随车的交通冲突不可避免时, 对象车的理想最优策略是减速让行, 而目标车道后随车的理想最优策略则是加速通过冲突点, 如此才能保证博弈双方驾驶人收益值最大, 从而达到系统整体最优。值得注意的是, 在博弈双方驾驶人的实际策略选择过程中, 在必须保障安全及顺畅的前提下, 双方最终同时选择减速让行或者强制通过临界冲突点的策略组合并不存在, 从而保证了有限零和灰色博弈模型的适用性。

在实际车道变换过程中, 直行车辆与变道车辆相比具有更高的路权, 交通冲突发生时, 从整体理智的角度而言, 让目标车道后随车率先加速通过, 对象车再执行车道变换操作, 既兼顾了规则要求, 又维持了交通流的动态稳定性, 同时也验证了有关车道变换博弈概念与结论的合理性, 以及模型求解方法的有效性。

5 结论

(1) 当满足一定的外界条件时, 车道变换决策过程可以看作是对象车驾驶人与目标车道后随车驾驶人为追求各自的驾驶期望而进行的车道变换博弈行为。

(2) 当对象车与目标车道后随车的交通冲突不可避免时, 对象车驾驶人的理想最优策略是减速让行, 而目标车道后随车驾驶人的理想最优策略是加速通过临界交通冲突点, 此时可以有效保障车道变换时博弈双方驾驶人安全性与顺畅目标的实现。

(3) 将有限零和灰色博弈模型引入驾驶人车道变换行为研究, 深化了车道变换时交通冲突的形成机制, 并为此状况下的路权分配提供了理论依据。

参考文献 (References)

[1] 中华人民共和国公安部交通管理局. 中华人民共和国道路交通事故

- 统计年报 (2008 年度)[R]. 北京: 中华人民共和国公安部交通管理局, 2009.
- Transportation Administrative Bureau Ministry of Public Security, People's Republic of China. Statistical yearbook of road traffic accidents of the people's republic of China (2008) [R]. Beijing: Transportation Administrative Bureau, Ministry of Public Security, 2009.
- [2] Salvucci D D, Liu A. The time course of a lane change: Driver control and eye-movement behavior [J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2002, 5(2): 123-132.
- [3] Chung E Y, Jung H C, Chang E, et al. Vision based for lane change decision aid system [C]. The 1st International Forum on Strategic Technology, Ulsan, 2006: 10-13.
- [4] Henning M J, Georgeon O, Krems J F. The quality of behavioral and environmental indicators used to infer the intention to change lanes[C]. 4th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Stevenson, Washington, 2007.
- [5] 魏丽英, 隗志才, 田春林. 驾驶员车道变换行为模拟分析[J]. 中国公路学报, 2001, 14(1): 78-80.
- Wei Liying, Juan Zhicai, Tian Chunlin. *China Journal of Highway and Transport*, 2001, 14(1): 78-80.
- [6] 王荣本, 游峰, 崔高健, 等. 车辆安全换道分析[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2005, 33(2): 179-182.
- Wang Rongben, You Feng, Cui Gaojian, et al. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2005, 33(2): 179-182.
- [7] Pei Y L, Xu H Z. The control mechanism of lane-changing in jam condition [C]. The Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation, Dalian, 2006: 8650-8654.
- [8] Pei Y L, Xu H Z. Study on the virtual desire trajectory of lane-changing [C]//Proceedings of the 4th Meeting of the Sino-Japanese Academic Exchanges: City & Intelligent Transportation System. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 19-27.
- [9] 罗党. 灰色决策问题的分析方法研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.
- Luo Dang. Study on the analytic methods for grey decision-making[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004.
- (责任编辑 刘志远)

第十一届全国渗流力学学术会议暨 国际渗流力学研讨会

时间: 2011年4月
地点: 重庆

主办: 中国力学学会
中国石油学会
中国煤炭学会
中国岩石力学与工程学会

通信地址: 重庆市沙坪坝区沙坪坝正街174号
重庆大学资源及环境科学学院渗流力学会务组 (400044)
电 话: 023-65106873
电子信箱: shenliu11@163.com