

高速公路交通的神经网络自适应控制

李宝家¹, 黄小原²

(1. 哈尔滨工业大学(威海) 数学系, 山东 威海 264209; 2. 东北大学 工商管理学院, 辽宁 沈阳 110006)

摘要: 建立宏观的高速公路交通流动态模型并设计理想的控制方案具有重要的理论意义和实际应用价值. 在高速公路交通流宏观模型中含有复杂的非线性关系, 一般的最优控制方案在计算上存在维数灾难问题, 而且控制目标函数的设计往往有失偏颇. 为此, 本文建立了一个包括神经网络结构在内的宏观高速公路交通流动态模型, 从高速公路管理者和使用者两方面的需求出发, 设计了能够反映高速公路总体运营水平的目标函数, 并提出相应的自适应控制方案. 该方案结构简单、计算方便. 数值仿真实验的结果表明控制效果良好, 与不施加控制的运营方式相比较能够提高高速公路交通的总体运营水平.

关键词: 高速公路; 模型; 神经网络; 自适应控制

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Neural network adaptive control for highway traffic

LI Bao-jia¹, HUANG Xiao-yuan²

(1. Department of Mathematics, Harbin Institute of Technology at Weihai, Shandong Weihai 264209, China;

2. College of Business Administration, Northeastern University, Liaoning Shenyang 110006, China)

Abstract: To establish a macroscopical highway traffic flow dynamic model and to design a perfect control scheme it is of great importance for both theory and practice. In the highway traffic flow macroscopical dynamic model there are complicated nonlinear relations, and hence in the general optimization control scheme there may exist the dimension disaster in computing and the design of the control objective function may not be considerate as well. A highway traffic flow macroscopical dynamic model including a neural network structure is established; the objective function that can reflect the total operation level of the highway is then designed according to the demands from both managers and users; and the adaptive control scheme is also given such that it is simple in structure and easy for computation. The numerical simulation shows that the adaptive control scheme given in the paper is favorable; it improves the total operation level of the highway in comparison with that without control.

Key words: highway; model; neural networks; adaptive control

1 引言 (Introduction)

到目前为止, 以“保障安全、提高效率、改善环境、节约能源”为目标的智能运输系统 (ITS) 的概念正逐步在全球范围内形成^[1]. 高速公路交通的建模与控制已经逐步进入智能阶段. 先进国家提出的目标是加强公路安全性、提高交通流量、增加经济效益并改善环境质量, 提高高速公路的经济效益和社会效益. 近年来, 我国高速公路建设取得巨大进步, 已经初步形成覆盖全国的高速公路网络, 随着汽车制造业的迅速发展, 各种车辆数目急剧增加. 从 ITS 角度来说, 对高速公路交通问题的研究更加重要, 高速公路交通模型、控制和实时监测等问题都是极其重要的研究内容, 已经取得了非常丰富的研究成

果^[2~14]. 本文通过对基本的高速公路交通模型的分析, 建立了一个包含神经网络结构在内的交通模型, 结合反映高速公路交通总体运营水平的目标函数, 设计了具有重要意义的自适应控制方案. 该方案结构简单计算方便, 仿真实验结果表明控制效果比较好.

2 基本的高速公路交通动态模型 (Basic highway traffic dynamic model)

假设研究的问题为单向道路, 共有 N 个路段, 每个路段只有一个入口和一个出口, 那么离散型动态交通模型可以描述如下^[2,7,12]:

$$\rho_i(k+1) =$$

$$\rho_i(k) + \frac{1}{\Delta_i} [q_{i-1}(k) - q_i(k) + r_i(k) - s_i(k)], \quad (1)$$

$$v_i(k+1) =$$

$$v_i(k) + \frac{1}{\tau} [v(\rho_i(k)) - v_i(k)] + \frac{\xi}{\Delta_i} v_i(k) [v_{i-1}(k) - v_i(k)] - \frac{v(\rho_{i+1}(k) - \rho_i(k))}{\tau \Delta_i (\rho_i(k) + \lambda)}, \quad (2)$$

$$l_i(k+1) = l_i(k) + d_i(k) - r_i(k), \quad (3)$$

$$i = 1, 2, \dots, N, k = 0, 1, 2, \dots, K.$$

其中: $\rho_i(k)$ 为第 i 个路段 k 时刻的车辆密度, 即第 i 个路段单位长度内拥有的车辆数; $q_i(k)$ 为第 i 个路段从 $k-1$ 时刻到 k 时刻的车流量, 而且

$$q_i(k) = \alpha_i \rho_i(k) v_i(k) + (1 - \alpha_i) [\rho_{i+1}(k) v_{i+1}(k) - r_{i+1}(k)] - \gamma_i q_{i-1}(k), \quad (4)$$

$$\alpha_i = \begin{cases} 0, & \rho_{i+1}(k) \geq \rho_c, \\ 1, & \rho_{i+1}(k) < \rho_c. \end{cases} \quad (5)$$

Δ_i 为第 i 个路段的长度; $\alpha_i = 1/\Delta_i$; γ_i 为第 i 个路段的分流系数; ρ_c (拥挤密度) 为已知常数; $v_i(k)$ 为第 i 个路段 k 时刻的车辆行驶的平均速度; r_i 为第 i 个路段从 $k-1$ 时刻到 k 时刻通过入口匝道进入主线的车辆数 (称为入口调节率); $s_i(k)$ 为第 i 个路段从 $k-1$ 时刻到 k 时刻通过出口匝道驶出主线的车辆数; $l_i(k)$ 为第 i 个路段 $k-1$ 时刻在入口匝道处排队的车辆数; $d_i(k)$ 为第 i 个路段从 $k-1$ 时刻到 k 时刻到达入口匝道处车辆数; ξ, v, λ, τ 是根据不同的高速公路而相应选定的适当参数, 这是基本的高速公路交通动态模型的不方便之处之一。

车速与密度之间的关系表达式有许多种, 其中格林希尔茨速度-密度模型为

$$v = v_f [1 - (\frac{\rho}{\rho_i})]. \quad (6)$$

其中: v_f 是自由行驶速度, ρ_i 是阻塞密度. 在实际应用中常取

$$s_i(k) = \gamma_i q_{i-1}(k). \quad (7)$$

入口调节率 $r_i(k)$ 应该满足不低于最低调节率 $r_{i\min}$, 以免引起排队等待着抱怨或误以为信号失灵而贸然闯入, 又不超过最大调节率 $r_{i\max}$, 至多把原有排队车辆和新到达的车辆全部放行即可, 记车辆排队容量为 $l_{i\max}$, 则 $r_i(k)$ 满足

$$\max \{r_{i\min}, d_i(k) - l_{i\max} + l_i(k)\} \leq r_i(k) \leq \min \{r_{i\max}, d_i(k) + l_i(k)\}. \quad (8)$$

上述模型表明, 具有控制作用的变量是入口匝道的调节率 $r_i(k)$, 而 $\rho_i(k)$ 和 $v_i(k), l_i(k)$ 均为模

型的状态变量.

3 高速公路交通新模型与自适应控制 (New highway traffic model and its adaptive control)

3.1 高速公路交通新模型 (New highway traffic model)

基本的高速公路交通模型里含有复杂的非线性函数关系, 同时, 如果采用一般的最优控制方法对其进行控制, 那么在计算上存在着潜在的维数灾难问题^[2]. 为此, 建立一个包含神经网络结构的高速公路交通模型. 根据基本的高速公路交通模型, 构造如下的交通状态方程:

$$\rho_i(k+1) =$$

$$\rho_i(k) + \alpha_i [(1 - \gamma_i) q_{i-1} - q_i(k)] + \alpha_i r_i(k), \quad (9)$$

$$l_i(k+1) = l_i(k) + d_i(k) - r_i(k), \quad (10)$$

$$v_i(k+1) = f(h_i(k)), \quad (11)$$

$$i = 1, 2, \dots, N, k = 0, 1, 2, \dots, K.$$

其中 $f(\cdot)$ 为未知的非线性函数.

$$h_i(k) =$$

$$(\rho_i(k), v_i(k), l_i(k), \rho_{i-1}(k), v_{i-1}(k), l_{i-1}(k), \rho_{i+1}(k), v_{i+1}(k), l_{i+1}(k), r_i(k))^T,$$

简记成

$$h_i(k) = ((h_i(k))_1, \dots, (h_i(k))_{10})^T.$$

不失一般性, 取 $q_i(k) = \rho_i(k) v_i(k)$, 并假设 $d_i(k)$ 为可观测量. 因此在上面的状态方程中 $\rho_i(k), l_i(k), v_i(k)$ 均为状态变量, $r_i(k)$ 为控制变量, 并假设状态变量均可观测.

对非线性的速度状态方程, 这里采用神经网络 N_f 逼近高速公路交通车辆行驶速度的实际的非线性过程, 则交通系统模型为

$$\rho_i(k+1) =$$

$$\rho_i(k) + \alpha_i [(1 - \gamma_i) q_{i-1}(k) - q_i(k)] + \alpha_i r_i(k), \quad (12)$$

$$l_i(k+1) = l_i(k) + d_i(k) - r_i(k), \quad (13)$$

$$\hat{v}_i(k+1) = N_f(h_i(k)), \quad (14)$$

$$i = 1, 2, \dots, N, k = 0, 1, 2, \dots, K.$$

其中: N_f 是 BP 反向传播神经网络, $\hat{v}_i(k+1)$ 是输入为 $h_i(k)$ 的神经网络 N_f 的输出. 模型的约束条件式(8)表明对入口匝道调节率具有有限幅作用.

3.2 高速公路交通的自适应控制 (Adaptive control for highway traffic)

高速公路交通控制系统的设计与评价可以采用

不同的性能指标.从使用高速公路的驾驶员角度来讲,总希望以较快的速度到达目的地,这就要求主线行驶时间和入口匝道排队时间总合为最小,这时可以采用总行程时间最小指标,这种指标意味着交通延误最小、服务水平较高,按此指标设计的交通控制系统可以有效地预防和限制常发性拥挤及偶发性拥挤.从高速公路管理部门的角度,即尽量发挥道路通行能力的角度来考虑,总希望道路容量得到最大限度的利用,以缓解周围路网的交通紧张状况,这就要求服务流量最大,适用于交通高峰期的设计优化.以上两类指标分别侧重于追求速度较高和流量较大,单独采用哪一种性能指标都不免有失偏颇.为此考虑下面的动态性能指标:

$$\min J = J_1 + J_2 + J_3 + J_4. \quad (15)$$

其中

$$J_1 = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^K [(\rho(k+1) - \rho^0)^T A (\rho(k+1) - \rho^0)], \quad (16)$$

$$J_2 = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^K [(v(k+1) - v^0)^T B (v(k+1) - v^0)], \quad (17)$$

$$J_3 = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^K [(l(k+1) - l^0)^T C (l(k+1) - l^0)], \quad (18)$$

$$J_4 = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^K [(r(k) - r^0)^T D (r(k) - r^0)]. \quad (19)$$

A, B, C, D 为对称正定矩阵; $\rho(k) = (\rho_1(k), \dots, \rho_N(k))^T$, $v(k) = (v_1(k), \dots, v_N(k))^T$, $l(k) = (l_1(k), \dots, l_N(k))^T$, $r(k) = (r_1(k), \dots, r_N(k))^T$; $\rho^0 = (\rho_1^0, \dots, \rho_N^0)^T$ 为标称密度, $v^0 = (v_1^0, \dots, v_N^0)^T$ 为标称平均速度, $l^0 = (l_1^0, \dots, l_N^0)^T$ 为标称匝道排队量, $r^0 = (r_1^0, \dots, r_N^0)^T$ 为标称入口调节率.

目标函数反映的不是简单的速度跟踪和入口匝道放行跟踪.由于交通模型的复杂性和变量的耦合关系,该目标函数反映的是道路使用者和交通管理部门两方面意愿,综合考虑多方面因素,从总体角度发挥高速公路的最大效用.另外,在高速公路实际运行过程中,只要有排队现象存在,那么简单的速度跟踪和入口匝道放行跟踪可能造成道路拥挤和交通事故发生,尤其是在交通需求量非常大的时候,因此,入口匝道放行控制的作用就极其重要,它直接影响到交通流量、交通密度、交通速度等重要的交通管理指标,这正是新交通模型和控制目标函数所表明的意义.

对速度状态方程的逼近采用 BP 神经网络,结合其他交通状态方程和目标函数,下面设计自适应控制方案^[15,16].控制器由两部分组成,一部分是包含 BP 神经网络在内的系统模型,神经网络的权值由实际系统输出与模型输出的误差经反向传播来修正.在神经网络训练完成之后,将 k 时刻的输入变量代入神经网络,计算出神经网络的输出,作为 $k+1$ 时刻实际速度的预测值,其他变量 $k+1$ 时刻的计算则由模型中相应的确定性方程来实现,在此基础上,按照目标函数的要求计算相应的控制变量.控制器的另一部分是梯度优化器,其修正项由状态输出和控制输入设定误差经梯度算法来处理(参见图 1).

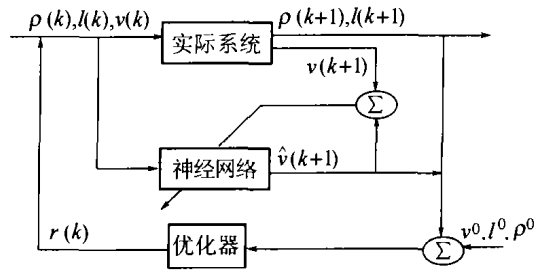


图 1 控制结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of control frame

本文中 BP 神经网络采用 3 层结构,隐层节点作用函数取为 $S(x) = 1/(1 + e^{-x})$, 并有 $S'(x) = S(x)[1 - S(x)]$, 输出层节点作用函数取为线性函数,即

$$\hat{v}(k+1) = W_2 [S(W_1(h_i(k)))^T + b_1] + b_2. \quad (20)$$

其中: W_1, W_2, b_1 和 b_2 是权值和阈值的矩阵、向量, 分别记为

$$\begin{cases} W_1 = (w_{p,q}^1)_{j \times 10N}, & b_1 = (b_n^1)_{j \times 1}, \\ W_2 = (w_{u,v}^2)_{N \times j}, & b_2 = (b_m^2)_{N \times 1}. \end{cases} \quad (21)$$

这里 j 为神经网络隐层节点的个数.

梯度优化器结构为

$$r^{z+1}(k) = r^z(k) - \eta \frac{\partial J}{\partial r(k)}. \quad (22)$$

上角标 z 是梯度算法的迭代次数, $\eta > 0$ 是步长因子.

梯度优化器中的梯度是(略写上角标 z)

$$\frac{\partial J}{\partial r(k)} = \frac{\partial J_1}{\partial r(k)} + \frac{\partial J_2}{\partial r(k)} + \frac{\partial J_3}{\partial r(k)} + \frac{\partial J_4}{\partial r(k)}. \quad (23)$$

其中

$$\frac{\partial J_1}{\partial r(k)} = \text{diag}(a_1, \dots, a_N) A(\rho(k+1) - \rho^0), \quad (24)$$

$$\frac{\partial J_2}{\partial r(k)} = EB(v(k+1) - v^0), \quad (25)$$

$$\frac{\partial J_3}{\partial r(k)} = -C(l(k+1) - l^0), \quad (26)$$

$$\frac{\partial J_4}{\partial r(k)} = D(r(k) - r^0), \quad (27)$$

$$E = \text{diag}(e_1, \dots, e_N), \quad (28)$$

$$e_i = W_2^i \cdot \beta^i, \quad (29)$$

$$\beta^i = (\beta_1^i, \dots, \beta_j^i), \quad (30)$$

$$\beta_s^i = w_{s,10N}^1 \cdot S'(\sum_{t=1}^{10N} w_{s,t}^1(h_i(k))_t), \quad (31)$$

$$s = 1, 2, \dots, j.$$

W_2^i 为 W_2 的第 i 行, $i = 1, 2, \dots, N$.

综上所述,将控制算法归纳如下:

i) 给各状态变量赋予初值;

ii) 状态方程(12)、(13)为确定性方程,可以直接作为输出,将 $h_i(k)$ 代入式(14)计算 $k+1$ 时刻的速度预测值;

iii) 应用神经网络反向传播算法,更新网络权值和阈值;

iv) 应用式(22)~(31)计算新的控制变量;

v) 将新的变量馈入实际系统(12)~(14);

vi) 判断是否达到终端时刻,若是,则停止,否则返回 ii)。

4 仿真实验(Simulation experiment)

在建立高速公路交通的新模型和设计控制方案之后,笔者对单向道路两个路段的情况进行了几组数据的数值仿真实验,与不加控制的情况相比,控制效果都比较令人满意,下面给出一个实验结果以说明。

假设单向高速公路的2个路段长度均为10 km,第1个路段的分流系数 $\gamma_1 = 0.5$,时间点取20个,时间间隔15 min,行驶速度为25 km/15 min. 设定密度 $\rho^0 = (5, 5)^T$,设定排队量 $l^0 = (0, 0)^T$,设定调节率 $r^0 = (120, 120)^T$,设定速度 $v^0 = (30, 30)^T$,最大、最小调节率分别为60, 180, 最大排队量60. 神经网络采用3层BP网,输入层节点10个,中间层节点20个,作用函数为 $S(x) = 1/(1 + e^{-x})$,输出层节点2个,作用函数取为线性函数. 另外,对行驶速度实行限幅控制,设定最大、最小行驶速度分别为40、10 km/15 min. 目标函数中的 A, B, C, D 取为单

位矩阵. 假设两个路段每一时刻的密度分别为4、5,速度都为25,放行车辆数分别为100、75,排队数分别为40、20,到达车辆数分别为100、75,流量分别为100、125. 那么在不加以控制的情况下,计算得到相应的目标函数值为 $J = 28510$,按照本文给出的控制方法得到的目标函数值为 $J = 17351$. 两个路段的入口匝道放行和密度数据图示如下。

图2显示的是各路段入口在各控制时间点车辆放行的数量,纵坐标1、2分别对应路段1、2,横坐标1~20对应控制时间点,交点所对应的竖坐标的值就是在该路段入口该时刻放行的车辆数. 从仿真结果来看,车辆放行还是比较稳定的,而且对设定放行的跟踪也比较理想。

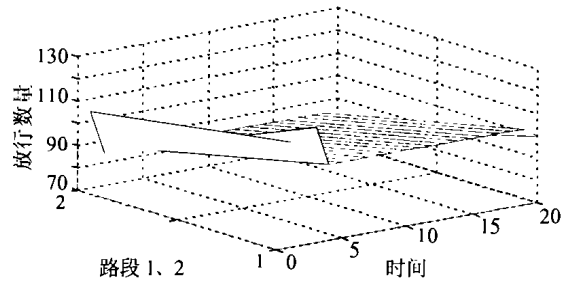


图2 路段1、2入口放行数量

Fig. 2 Discharged vehicles on section 1, 2 of highway

图3显示的是各路段在各控制时间点路段上车辆的密度,纵坐标1、2分别对应路段1、2,横坐标1~20对应控制时间点,交点所对应的竖坐标的值就是在该路段该时刻路段上车辆的密度. 从仿真结果来看,经过控制,各路段上车辆的密度还是比较均匀的,而且对设定密度的跟踪也比较好。

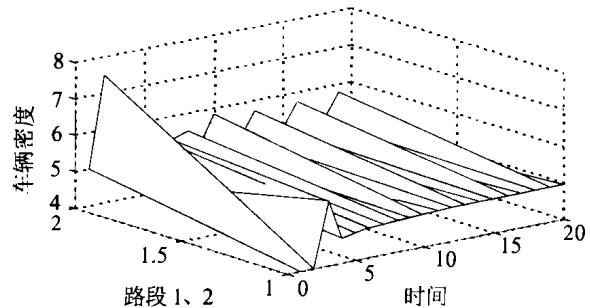


图3 路段1、2车辆密度

Fig. 3 Density of vehicles on section 1, 2 of highway

建立高速公路交通模型和设计相应的控制方案有各种各样的方法,对各种模型和控制方法进行比较、分析和评价需要进一步研究。

5 结论(Conclusion)

本文通过对基本高速公路交通模型的分析,建立了一个包含神经网络结构的高速公路交通模型,

根据反映高速公路交通总体运营水平的目标函数,设计了相应的自适应控制方案.仿真实验结果表明,各路段的车辆放行和密度都比较稳定,控制的效果比较好.

参考文献(References):

- [1] 黄卫,陈里得.智能运输系统(ITS)概论[M].北京:人民交通出版社,1999:1-19.
(HUANG Wei, CHEN Lide. *Introduction of Intellective Transport System* [M]. Beijing: People Transport Press, 1999:1-19.)
- [2] 刘伟铭.高速公路系统控制方法[M].北京:人民交通出版社,1998:31-59.
(LIU Weiming. *Highway System Control Method* [M]. Beijing: People Transport Press, 1998:31-59.)
- [3] TANAKA K, SHIFUGA Y. The universal traffic management [J]. *System, Control and Information*, 1996, 40(6):228-237.
- [4] TAKABA S. Automobiles road traffic in 21st ceature [J]. *System, Control and Information*, 1996, 40(6):223-229.
- [5] 王亦兵,韩曾晋,贺国光.城市高速公路交通控制综述[J].自动化学报,1998,24(4):484-496.
(WANG Yibing, HAN Zengjin, HE Guoguang. A survey on urban freeway traffic control [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1998, 24(4):484-496.)
- [6] PAPAGEOGIOU M. Multilayer control system design applied to freeway traffic [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1984, 29(6):482-490.
- [7] OU Haitao, XU Xiaoming, ZHANG Weidong, et al. Internal model control with novel RBF neural network of highway [C]// *Proc of the 3rd Asian Control Conference*, July, 2000. [s. l.]: [s. n.], 2000: 2218-2223.
- [8] 黄小原,樊治平,张文江.高速公路车辆群模型与控制[J].东北工学院学报,1990,11(4):337-382.
(HUANG Xiaoyuan, FAN Zhiping, ZHANG Wenjiang. Highway vehicles model and control [J]. *J of Northeastern University*, 1990, 11(4):337-382.)
- [9] 黄小原,樊治平,张文江.高速公路入口匝道与限速标志的交通控制[J].中国公路学报,1990,11(4):59-64.
(HUANG Xiaoyuan, FAN Zhiping, ZHANG Wenjiang. Traffic control at a freeway entrance ramp and by speed-limit sign [J]. *China J of Highway and Transport*, 1990, 11(4):59-64.)
- [10] 黄小原,樊治平,张文江.高速公路入口匝道的分散控制[J].信息与控制,1991,20(2):1-6.
(HUANG Xiaoyuan, FAN Zhiping, ZHANG Wenjiang. Decentralized control at a freeway entrance ramp [J]. *Information and Control*, 1991, 20(2):1-6.)
- [11] 黄小原,吕振辽.环城高速公路自校正控制[J].自动化学报,1995,21(5):609-612.
(HUANG Xiaoyuan, LU Zhenliao. Self tuning controller for freeway traffic around city [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1995, 21(5):609-612.)
- [12] HO Fu-sheng, IOANNOU P. Traffic flow modeling and control using artificial neural network [J]. *IEEE Control System*, 1996, 32(10):16-26.
- [13] 黄小原,李宝家.高速公路交通的神经网络控制[J].信息与控制,2000,29(3):280-284.
(HUANG Xiaoyuan, LI Baojia. Neural network controller of highway traffic [J]. *Information and Control*, 2000, 29(3):280-284.)
- [14] 魏武,张起森.基于计算机视觉和图象处理的交通参数检测[J].信息与控制,2001,30(3):257-261.
(WEI Wu, ZHANG Qishen. Traffic parameters checking based on computer vision and image dealing [J]. *Information and Control*, 2001, 30(3):257-261.)
- [15] 孙增圻,张再兴,邓志东.智能控制理论与技术[M].北京:清华大学出版社,1997:150-196.
(SUN Zengqi, ZHANG Zaixing, DENG Zhidong. *Intelligent Control Theory and Technology* [M]. Beijing: Tshinghua University Press, 1997:150-196.)
- [16] NORIEGA J R, WANG H. A direct adaptive neural network control for unknown nonlinear systems and its application [J]. *IEEE Neural Networks*, 1998, 9(1):27-34.

作者简介:

李宝家 (1965—),男,哈尔滨工业大学(威海)数学系副教授,博士.主要研究方向为神经网络控制和模糊控制及其在经济管理问题中的应用. E-mail: libaojia2000@yahoo.com.cn;

黄小原 (1947—),男,东北大学工商管理学院教授,博士生导师.主要研究方向为供应链管理和电子商务.