

采用 LS-SVM 计算时间序列的 Lyapunov 指数谱

张勇, 关伟

ZHANG Yong, GUAN Wei

北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044

School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

E-mail: zy_tju@126.com

ZHANG Yong, GUAN Wei. Calculation Lyapunov exponent spectrum of time series based on least-squared support vector machine. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(31): 196-199.

Abstract: In order to calculation Lyapunov exponent spectrum of unknown system, firstly, reconstruct phase space of observed one-dimensional time series, secondly, use Least-Squared Support Vector Machine (LS-SVM) approximate dynamical equation of reconstruction system and calculation Lyapunov exponent spectrum by Jacobian matrix. Lyapunov exponent spectrum of Henon system has been calculated by proposed method, result is precise even length of time series is shorter than 1000. Lyapunov exponent spectrum of real traffic flow time series of different condition has been calculated, the result shows that: in crowded condition, system is hyper chaotic because there are two or more positive Lyapunov exponents; in synchronized condition, system is chaotic or hyper chaotic there are one or more positive Lyapunov exponents; in jammed condition, system is not chaotic because all Lyapunov exponents are smaller than zero.

Key words: chaotic time series; Lyapunov exponent spectrum; Least-Squared Support Vector Machine (LS-SVM); traffic flow; hyper chaotic

摘要: 为了计算未知系统的 Lyapunov 指数谱, 首先, 对一维观测数据序列进行相空间重构, 然后, 利用最小二乘支持向量机 (LS-SVM) 逼近重构系统的动力学方程, 再通过雅可比矩阵计算 Lyapunov 指数谱。采用提出的方法计算 Henon 映射的 Lyapunov 指数谱, 可以得到精确的计算结果且需要的序列步长小于 1000。计算了实测不同状态的交通流时间序列的 Lyapunov 指数谱。结果表明: 在拥挤状态下, 有多个 Lyapunov 指数大于零, 说明系统是超混沌的; 在同步状态下, 有一个或多个 Lyapunov 指数大于零, 说明系统是混沌的或超混沌的; 在堵塞状态下, Lyapunov 指数全小于零, 说明系统不是混沌的。

关键词: 混沌时间序列; Lyapunov 指数谱; 最小二乘支持向量机; 交通流; 超混沌

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2009.31.059 **文章编号:** 1002-8331(2009)31-0196-04 **文献标识码:** A **中图分类号:** O545; U491

1 引言

Lyapunov 指数描述的是动力系统在空间演化过程中相邻轨道的指数发散或收缩速率, 系统的全部 Lyapunov 指数即为 Lyapunov 指数谱。如果系统的最大 Lyapunov 指数大于零, 则为混沌系统, 计算时间序列的最大 Lyapunov 指数方法有 Wolf 法、小数据量方法及其改进方法, 如果有多个 Lyapunov 指数大于零, 则为超混沌系统^[1], 判断是否为超混沌系统需要计算 Lyapunov 指数谱。计算时间序列的 Lyapunov 指数谱一般要通过相空间重构, 然后辨识未知系统方程, 如文献[2]和[3]的基于神经网络的计算方法; 文献[4]的基于组合策略的计算方法。这

些方法都用到了神经网络辨识未知系统方程, 但是神经网络往往存在过拟合, 网络结构事先不好确定、训练过程受局部极小点的困扰等固有的缺陷, 且需要较长的学习时间^[5]。最小二乘支持向量机^[5-6] (Least Squares Support Vector Machine, LS-SVM) 训练过程遵循结构风险最小化原则, 不易发生过拟合现象, 且在有限计算内可以得到训练结果, 该文提出采用 LS-SVM 辨识未知系统方程的方法计算时间序列的 Lyapunov 指数谱, 并通过数值实验证明了提出方法的有效性。

交通系统是复杂的、非线性的、开放式的巨系统, 研究交通中的混沌现象对交通分析^[6-12]、交通预测^[13]、交通控制^[14]具有重

基金项目: 国家自然科学基金 (the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60874078, No.60834001); 国家高技术研究发展计划 (863) (the National High Technology Research and Development 863 Program of China under Grant No.2006AA11Z212); 国家重点基础研究发展规划 (973) (the National Grand Fundamental Research 973 Program of China under Grant No.2006CB705507); 高等学校博士学科点专项科研基金项目 (the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China under Grant No.20070004020)。

作者简介: 张勇 (1980-), 男, 博士生, 主要研究领域为混沌时间序列的建模和预测, 交通系统工程; 关伟 (1968-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为智能交通系统, 交通系统工程。

收稿日期: 2009-05-11 **修回日期:** 2009-06-20

要的实际意义。已有的对交通流混沌的分析集中在对交通流的混沌识别^[6-10], 但是交通流中是否具有超混沌现象还有待于研究, 文章通过计算实测交通流时间序列的 Lyapunov 指数谱, 分析了交通流在不同状态^[15-16]下的混沌和超混沌现象。

2 基于 LS-SVM 的 Lyapunov 指数谱计算

2.1 时间序列的相空间重构

设一个未知动力系统的观测函数 $x(t)$, 经过采样后, 得到一个单变量的时间序列 $x(j), j=1, 2, \dots, N$, 其中 $x(j)$ 表示 $t_0 + j\Delta t$ 时刻的观测值, Δt 为采样时间间隔, t_0 为采样起始时间, 重构该时间序列在 m 维欧氏空间中的一条轨道 $X(j)$:

$$X(j)=[x(j), x(j+\tau), \dots, x(j+(m-1)\tau)]^T \quad (1)$$

$j=1, 2, \dots, N-(m-1)\tau$

其中 m 称为嵌入维数, 可以采用虚假邻近点法和最小预测误差法确定^[17], τ 为延迟时间可以采用自相关法和平均互信息量最小法确定^[17], 根据 Takens 相空间重构定理, $X(j)$ 可以恢复原系统的动力学特征, 设 $X(j)$ 到 $X(j+\tau)$ 的映射关系^[2-4] G :

$$G: \begin{bmatrix} x(j) \\ x(j+\tau) \\ \vdots \\ x(j+(m-1)\tau) \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} x(j+\tau) \\ x(j+2\tau) \\ \vdots \\ x(j+m\tau) \end{bmatrix} \quad (2)$$

显然 $X(j+\tau)$ 的前 $m-1$ 个元素即为 $X(j)$ 的后 $m-1$ 个元素, 只需确定 $X(j) \rightarrow x(j+m\tau)$ 的映射^[2-4] F 即可确定 G :

$$x(j+m\tau)=F(X(j)) \quad (3)$$

该文采用 LS-SVM 辨识 F 。

2.2 LS-SVM 辨识未知系统

由原始序列 $x(j), j=1, 2, \dots, N$, 构造训练数据集 $(X(j), x(j+m\tau)), j=1, 2, \dots, N-m\tau$, 利用高维特征空间的线性函数来拟合样本集^[5-6]:

$$x(j+m\tau)=\omega^T \Phi(X(j))+b \quad (4)$$

其中非线性变换 $\Phi(X)$ 将输入数据映射到高维特征空间, ω 维数不需预先知道。在 LS-SVM 中, 原始空间中的优化问题及其约束条件为:

$$\begin{cases} \min_{\omega, b, e} J(\omega, e) = \frac{1}{2} \omega^T \omega + \frac{1}{2} C \sum_{j=1}^{N-m\tau} e_j^2 \\ \text{s.t. } x(j+m\tau) = \omega^T \Phi(X(j)) + b + e_j, j=1, 2, \dots, N-m\tau \end{cases} \quad (5)$$

其中 e_j 表示误差; e 为 e_j 组成的误差向量; C 为权重; b 为偏差, 引入 Lagrange 乘子 $\alpha_j (j=1, 2, \dots, N-m\tau)$ 得:

$$L(\omega, b, e, \alpha) = J(\omega, e) - \sum_{j=1}^{N-m\tau} \alpha_j \{\omega^T \Phi(X(j)) + b + e_j - x(j+m\tau)\} \quad (6)$$

根据 KKT 条件并消除 e_j 和 ω , 得到线性方程组:

$$\begin{bmatrix} 0 & I^T \\ I & K+C^{-1}E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ Y \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中: $Y=[x(1+m\tau), x(2+m\tau), \dots, x(N)]^T$; $\alpha=[\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{N-m\tau}]^T$; $I=[1, 1, \dots, 1]^T$; E 为 $N-m\tau$ 阶单位阵; $K=(k_{i,j})_{(N-m\tau) \times (N-m\tau)}$, 该文采用径向基函数得到 K 的每个元素:

$$k_{i,j}=k(X(i), X(j))=\exp(-\|X(i)-X(j)\|_2^2/\sigma^2) \quad (8)$$

解方程(7)得到 α 和 b , 则 LS-SVM 回归函数逼近式(3)中的 F 为:

$$x(j+m\tau)=F(X(j))=\sum_{i=1}^{N-m\tau} \alpha_i K(X(i), X(j))+b \quad (9)$$

2.3 Lyapunov 指数谱的计算

由式(2)可以得到:

$$\Delta X(j+\tau)=DG(X(j)) \cdot \Delta X(j) \quad (10)$$

其中 $DG(X(j))$ 为映射 G 的雅可比矩阵, 其形式为:

$$DG(X(j)) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ \frac{\partial F}{\partial x(j)} & \frac{\partial F}{\partial x(j+\tau)} & \dots & \frac{\partial F}{\partial x(j+(m-1)\tau)} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式(10)表明, 对于重构向量 $X(j)$, 它在 j 时刻的微小变化 $\Delta X(j)$, 在雅可比矩阵 $DG(X(j))$ 的作用下, 将反映到 $j+\tau$ 时刻重构的相空间向量 $X(j+\tau)$ 取值的微小变化。依次下去, 这种作用将累加到 $j+l\tau (l \in N)$ 时刻相空间向量 $X(j+l\tau)$ 取值的变化, 其关系如下式表示:

$$\Delta X(j+l\tau)=DG(X(j+(l-1)\tau)) \cdots DG(X(j)) \cdot \Delta X(j) \quad (12)$$

式(12)可改写为:

$$\Delta X(j+l\tau)=D^l G(X(j)) \cdot \Delta X(j) \quad (13)$$

根据 Oseledec 乘积遍历性定理, 系统的 Lyapunov 指数谱为如下矩阵的特征值的对数^[2-4]:

$$\lim_{l \rightarrow \infty} [(D^l G(X(j)))^T D^l G(X(j))]^{1/2l} \quad (14)$$

按大小排列为 $\lambda_i, i=1, 2, \dots, m$ 。由于式(14)中定义的矩阵存在指数和分数幂, 难以直接精确的计算它的全部特征值, 可以采用长乘积矩阵的分解技术对式(14)进行求解, 具体过程参见文献[2]。

3 数值实验

3.1 算法验证

以 Henon 映射产生混沌时间序列:

$$\begin{cases} x(n+1)=1-1.4x(n)^2+y(n) \\ y(n+1)=0.3x(n) \end{cases} \quad (15)$$

取初值(0,0)迭代产生时间序列, 去掉前面 4 000 个数据点以消除初始值到吸引子过渡的影响, 按照该文的方法计算时间序列 $x(j)$ 的 Lyapunov 指数谱, 嵌入维和延迟时间取: $m=2, \tau=1$, 支持向量回归参数取: $C=10\ 000, \sigma=0.4$, 取不同序列步长 N 的计算结果如表 1 所示 (Henon 映射 Lyapunov 指数谱为: $\lambda_1=0.408, \lambda_2=-1.60$)。

由表 1 可见, 仅需要几百个步长的时间序列就能精确的计算出时间序列 Lyapunov 指数谱, 最大 Lyapunov 指数 λ_1 随 N 的增大而趋向于真实值, 负的 Lyapunov 指数 λ_2 也非常接近真实值, 说明 LS-SVM 能够准确的辨识未知系统, 重构系统具有和原系统一样的混沌特性。

表 1 计算 Henon 时间序列的 Lyapunov 指数谱

N	λ_1	λ_2
400	0.390 8	-1.663 1
600	0.402 3	-1.654 1
800	0.412 1	-1.658 6
1 000	0.410 5	-1.650 9

取 $m=2; 3; 4; 5, \tau=1, N=1\ 000$ 时 Lyapunov 指数谱计算结果见表 2, 当增大嵌入维数时, 计算所得的最大 Lyapunov 指数 λ_1 基本保持不变, 其他 Lyapunov 指数均小于零, 说明增大嵌入维的情况下, 重构系统保持了原系统的混沌特性。

表2 取不同嵌入维, 计算 Henon 时间序列的 Lyapunov 指数谱

m	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5
2	0.410 5	-1.650 9			
3	0.409 2	-0.939 2	-1.708 6		
4	0.405 6	-0.619 9	-0.896 1	-1.484 6	
5	0.407 0	-0.511 1	-0.634 9	-0.862 9	-1.407 4

3.2 交通流的混沌特性分析

3.2.1 实测交通流时间序列

由于道路交通系统受各种因素的影响,因此很难建立确定的数学模型,进而进行解析的方法来研究,所以一般研究交通系统的混沌特性采用的是时间序列分析方法。该文计算实测的交通流序列的 Lyapunov 指数谱,分析不同状态下交通系统的混沌和超混沌现象。交通状态可以分为行驶和堵塞两种状态,而一般将行驶时状态划分为三种,即三相交通流^[15-16]:自由流、同步流、拥挤流。自由流是指车辆密度非常低时,各车间距很大,车间没有相互作用;同步流是密度适中时,车辆处于跟车行驶的畅行状态;拥挤流是指密度很大时,车在行驶过程中频繁的加减速的状态。

数据实测的地点为北京西直门外大街,德胜门桥以西某断面,采集时间为 2007-5-14,6:00~23:00 共 17 个小时,数据序列为单车道的车头间距序列,即在单车道断面的固定位置统计每辆车车头到达时间和上一辆车车尾离去时间的时间差(单位:s),一共包括 19 683 个点,数据序列如图 1 所示。

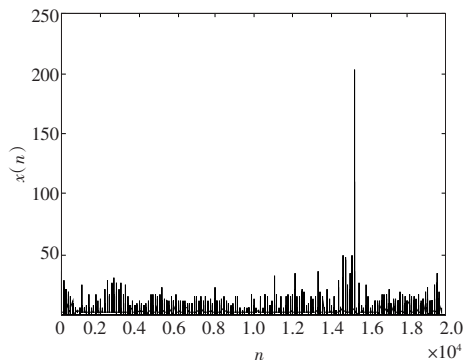


图1 交通流时间序列

表3 不同时间段交通流时间序列的 Lyapunov 指数谱

时段	时间段	N	(τ, m)	Lyapunov 指数					
				λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6
1	6:00~7:00	921	(2, 5)	0.053 2	-0.171 0	-0.352 5	-0.478 4	-0.783 8	
	7:00~8:00	1 385	(3, 5)	0.306 4	0.111 8	0.014 5	-0.075 8	-0.210 7	
2	8:00~9:00	1 080	(3, 6)	0.496 2	0.084 5	-0.025 2	-0.089 1	-0.162 4	-0.277 9
	9:00~10:00	1 210	(2, 5)	0.415 1	0.148 8	0.013 0	-0.142 1	-0.352 3	
3	10:00~11:00	1 233	(3, 6)	0.179 7	0.057 1	-0.025 0	-0.067 5	-0.128 6	-0.246 1
	11:00~12:00	1 284	(3, 6)	0.116 6	0.039 2	-0.014 6	-0.063 8	-0.123 0	-0.275 9
	12:00~13:00	1 184	(4, 6)	0.065 8	-0.020 0	-0.071 6	-0.095 3	-0.149 3	-0.260 2
	13:00~14:00	1 410	(4, 5)	0.231 7	0.069 5	0.016 9	-0.056 4	-0.194 1	
4	14:00~15:00	1 413	(2, 5)	0.460 7	0.099 4	-0.059 0	-0.182 7	-0.379 1	
	15:00~16:00	1 276	(4, 5)	0.591 8	0.128 5	-0.015 8	-0.204 1	-0.422 0	
	16:00~17:00	1 232	(4, 5)	0.385 5	0.102 7	0.031 6	-0.040 9	-0.168 5	
	17:00~18:00	1 126	(3, 5)	0.470 9	0.041 5	-0.094 1	-0.178 9	-0.364 8	
5	18:00~19:00	457	(3, 6)	-2.022 3	-2.403 7	-2.417 9	-2.447 2	-2.563 4	-2.850 2
6	19:00~20:00	1 201	(3, 5)	0.440 8	0.133 1	0.009 3	-0.088 3	-0.289 2	
7	20:00~21:00	1 134	(3, 6)	0.090 8	0.016 1	-0.031 3	-0.089 9	-0.131 7	-0.266 0
	21:00~22:00	1 174	(3, 6)	0.130 4	0.025 5	-0.061 6	-0.114 5	-0.195 0	-0.312 8
8	22:00~23:00	946	(3, 5)	0.132 9	-0.030 0	-0.132 1	-0.217 1	-0.432 0	

3.2.2 交通流的混沌特性分析

分别计算每一小时交通流序列的 Lyapunov 指数谱,计算采用互信息法^[17]确定延迟时间 τ , 虚假邻近点法^[17]确定嵌入维 m , 选择 LS-SVM 的计算参数: $C=10\ 000, \sigma=1$ 。根据计算结果和实际的交通状态将一天划分成不同时段,见表 3,可以做如下的解释:

(1)时段 1:6:00~7:00,此时通过的车辆数适中,说明车辆间隔均匀,处于同步流状态,由于交通流的波动特性,序列的周期性成分较多^[16],随机成分较少,所以最大 Lyapunov 指数 λ_1 大于零且较小,其余 Lyapunov 指数均小于零,系统有较弱混沌特征,不是超混沌的。

(2)时段 2:7:00~10:00,进入早高峰期,车辆较快的增多,处于拥挤流状态,此时交通接近于堵塞,间隔缩小,相互作用很强,交通流受局部条件影响很大,混乱程度增加^[16],此时序列有 2 个或 3 个 Lyapunov 指数大于零, λ_1 较大,系统的混沌特性增加,且为超混沌系统,此时的交通预测和控制较为困难。

(3)时段 3:10:00~14:00,车辆减少,交通流恢复到较为畅通的同步跟驰状态,此时 λ_1 大于零,但 λ_2 较上一时段小,且接近于零甚至小于零,因此系统是混沌的,超混沌特性不明显。

(4)时段 4:14:00~18:00,车辆数又开始增多,再次进入高峰期,与时段 2 类似出现多个 Lyapunov 指数大于零,表现为超混沌现象。

(5)时段 5:18:00~19:00,此时通过车辆数仅为 457,即每隔 8 s 左右通过一辆车,几乎停止行驶,此时系统处于堵塞状态,交通流在宏观上没有规律性可言,序列的全部 Lyapunov 指数均小于零,序列没有混沌特性。

(6)时段 6:19:00~20:00,随着拥堵的消失,车辆开始有序行驶,但密度仍然较大,与时段 2、4 类似,混沌特性较强,且为超混沌状态。

(7)时段 7:20:00~22:00,夜间行驶车辆开始减少,与时段 3 处于相同的状态,交通流处于混沌状态,超混沌特性较弱。

(8)时段 8:22:00~23:00,与时段 1 类似,只有 λ_1 大于零,系统有较弱混沌特征,但不是超混沌的。

基于以上分析, 当交通系统处于同步流状态时候, 系统是混沌或者超混沌的, 但混沌特征不是很强, 且超混沌特征不明显; 当处于拥挤流状态, 系统具有较强的混沌特征, 且是超混沌的。这里没有分析自由流状态下是否具有混沌特性, 一般认为此时车辆行驶时按各自的意愿行驶, 系统是随机的^[16], 因此可以认为不是混沌的。从该文计算来看处在完全堵塞时, 也是随机的。

4 结语

文章提出基于 LS-SVM 计算离散时间序列的 Lyapunov 指数谱, 并给出了计算过程, 相比神经网络采用 LS-SVM 辨识未知系统不用事先确定网络结构, 且算法快速、简单、准确性高。对 Henon 混沌序列的计算表明了算法的有效性和优越性: 在序列长度为几百时仍然可以较为准确地计算出 Lyapunov 指数谱, 且反映系统的混沌特性最为重要的最大 Lyapunov 指数随嵌入维的增大保持不变。

计算了实测交通流车头间距时间序列的 Lyapunov 指数谱, 对实测数据序列的计算表明: 在行驶时交通流的混沌特性与车流密度有关, 不同状态交通流具有不同的混沌特征, 交通系统在拥挤状态下是超混沌的, 在同步状态下混沌特征较弱, 在堵塞时不是混沌的。

参考文献:

- [1] Liu C X. A new hyperchaotic dynamical system[J]. Chinese Physics, 2007, 16(1): 3279-3284.
- [2] 田宝国, 姜璐, 谷可. 基于神经网络的 Lyapunov 指数谱的计算[J]. 系统工程理论与实践, 2001, 21(8): 9-13.
- [3] 李冬梅, 王正欧. 基于 RBF 网络的动力系统 Lyapunov 指数的计算方法[J]. 信息与控制, 2004, 33(5): 523-526.
- [4] 宫立新, 程国平, 岳毅宏. 基于组合策略的 Lyapunov 指数谱的计

算[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(7): 93-97.

- [5] 陈爱军. 最小二乘支持向量机及其在工业过程建模中的应用[D]. 浙江: 浙江大学, 2007: 39-43.
- [6] 张勇, 贺国光. 一种在线快速地判定交通流混沌的方法[J]. 长沙交通学院学报, 2007, 23(2): 36-40.
- [7] 李松, 刘力军, 贺国光. 仿真交通流混沌转化过程研究[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(5): 232-235.
- [8] 李松, 张杰, 贺国光. 基于元胞自动机模型的交通流混沌仿真研究[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(32): 20-23.
- [9] Lan L W, Sheu J B, Huang Y S. Investigation of temporal freeway traffic patterns in reconstructed state spaces[J]. Transportation Research Part C, 2008, 16(1): 116-136.
- [10] Shang P J, Li X H, Santi K. Nonlinear analysis of traffic time series at different temporal scales[J]. Physics Letters A, 2006, 357(4/5): 314-348.
- [11] Shang P J, Li X H, Santi K. Chaotic analysis of traffic time series[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2005, 25(1): 121-128.
- [12] Wastavino L A, Toledo B A, Rogan J, et al. Modeling traffic on crossroads[J]. Physica A, 2007, 381(15): 414-419.
- [13] 董超俊, 刘智勇, 邱祖廉. 基于混沌理论的交通量实时预测[J]. 信息与控制, 2004, 33(5): 518-522.
- [14] Lo S C, Cho H J. Chaos and control of discrete dynamic traffic model[J]. Journal of the Franklin Institute, 2005, 342(7): 839-851.
- [15] Kerner B S, Klenov S L. Probabilistic breakdown phenomenon at on-ramp bottlenecks in three-phase traffic theory: Congestion nucleation in spatially non-homogeneous traffic[J]. Physica A, 2006, 364(15): 473-492.
- [16] Kerner B S. Three-phase traffic theory and highway capacity[J]. Physica A, 2004, 333(15): 379-440.
- [17] 王海燕, 卢山. 非线性时间序列分析及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

(上接 192 页)

表 1 两种方式调整梁截面的结果对比

	详细模型	方法一	方法二
弯曲刚度/(N·mm ⁻¹)	26 417	31 366	30 216
扭转刚度/(Nm·deg ⁻¹)	7 806	10 098	9 521
弯曲刚度误差/(%)	--	18.7	14.3
扭转刚度误差/(%)	--	29.4	22.0
调整截面所用时间	--	7 h	43 min

采用方向方法二时, 弯曲刚度和扭转刚度的精度分别提高了 4.4%、7.4%, 而调整截面所有时间缩短了近 6 个小时, 所以采用此方法不仅提高了设计的精度, 而且提高了设计的效率。

6 结论

文章通过对 UG NASTRAN 中调整梁截面方向的研究, 在 UG 中建立了一种智能化的调整梁截面方向的工具, 并利用此工具对某款车进行了具体的分析, 通过对比可知, 此方法使概念设计阶段的弯曲刚度和扭转刚度的计算精度分别提高了 4.4%、7.4%。而调整截面方向的时间缩短了近 6 个小时。这种

工具的开发, 使调整梁的截面方向的操作更加简单、直观, 同时也提高了车身结构概念设计阶段的效率, 并为以后的车身设计积累了经验。

参考文献:

- [1] 兰凤崇, 陈吉清, 林建国. 轿车参数化分析模型的构造及应用[J]. 计算机集成制造技术, 2005, 11(2): 183-188.
- [2] 黄金陵, 娄永强, 龚礼洲. 轿车车身结构概念模型中接头的模拟[J]. 机械工程学报, 2000, 36(3): 78-81.
- [3] 张峰. NX Nastran 基础分析指南[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [4] 洪如瑾. UG NX4 高级仿真培训教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 2-3.
- [5] 严正锡, 南正奎. Unigraphics NX 专业特别教程[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2002.
- [6] 陈塑寰, 聂毓琴, 孟广伟. 材料力学[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 2000.
- [7] 侯文彬, 胡平, 刘大有, 等. 基于知识的车身结构概念设计工具—IVCD[J]. 吉林大学学报工学版, 2006, 11(5): 814-81.