

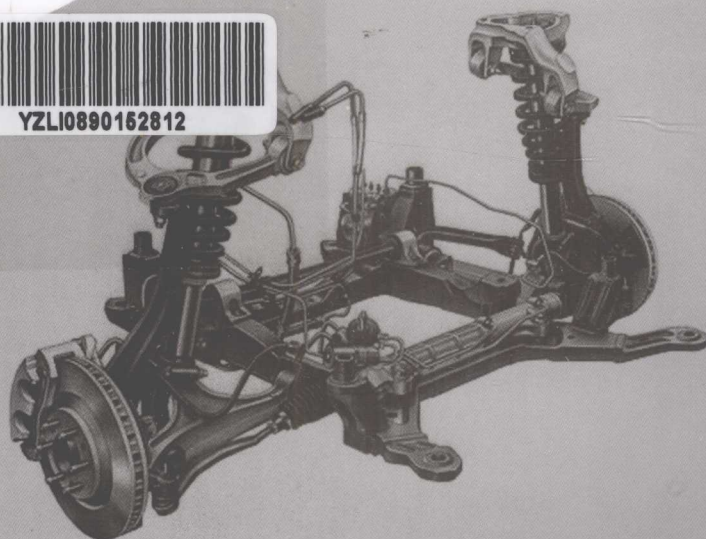
基于符号和混沌的 汽车悬架隔振性能检测与评价

张雨 任成龙 王玉国 文少波◎著

**Detection and Evaluation
for Anti-vibration Performance**
of Vehicle Suspension Based
on Symbols and Chaos



YZLI0890162812



东南大学出版社

基于符号和混沌的汽车悬架 隔振性能检测与评价

Detection and Evaluation for Anti-vibration Performance of Vehicle
Suspension Based on Symbols and Chaos

张 雨 任成龙 著
王玉国 文少波



YZLI0890162812

东南大学出版社
• 南京 •

内 容 简 介

探讨了时间序列符号化、符号序列编码及其直方图、符号特征参数 Shannon 熵的理论和算法,以及系统混沌特征参数如最小嵌入相空间维数 $m_{\min}$ 、准相图、Poincare 截面图、奇异吸引子的关联维 D_2 、Kolmogorov 熵和最大 Lyapunov 指数 $\lambda_{\max}$ 的理论和算法。将符号理论和混沌理论相结合,对时间序列符号化后得到对应着符号序列的概率序列——符号概率序列,计算其符号特征参数和混沌特征参数,构成了符号混沌特征。

采用上述理论和方法,研究了检测、分析汽车悬架隔振性能的新手段。讨论了汽车悬架的类型、隔振原理及其参数;分析考察了用于汽车悬架激振和参数检测的 3 类实验设备——单轮平板式汽车悬架隔振参数检测台、扫频式汽车悬架参数振动实验台、多连杆汽车悬架激振实验台的特性;对汽车悬架振动的混沌特性进行了仿真,得到了汽车悬架出现混沌振动的临界条件;对汽车悬架隔振性能采用符号特征和混沌参数进行了表征与评价。

本书可作为车辆工程等相关专业教师、研究生和技术人员的科研与技术参考书。

图书在版编目(CIP)数据

基于符号和混沌的汽车悬架隔振性能检测与评价/张雨等著. —南京:东南大学出版社,2012.2
ISBN 978-7-5641-2892-0

I. ①基… II. ①张… III. ①汽车—车悬架—隔振—减振性能—研究 IV. ①U463.33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 128090 号

基于符号和混沌的汽车悬架隔振性能检测与评价

出版发行 东南大学出版社
出 版 人 江建中
社 址 南京市四牌楼 2 号
邮 编 210096

经 销 江苏省新华书店
印 刷 南京新洲印刷有限公司
开 本 700 mm×1000 mm 1/16
印 张 8
字 数 198 千字
书 号 ISBN 978-7-5641-2892-0
印 次 2012 年 2 月第 1 次印刷
版 次 2012 年 2 月第 1 版
印 数 1—1200 册
定 价 22.00 元

(凡有印装质量问题,请与我社读者服务部联系。电话:025-83792328)

前 言

我们这个研究小组对基于符号和混沌检测评价汽车悬架隔振性能的研究,自 2004 年至 2010 年,历经 7 年。

研究始于 2004 年,考虑到汽车悬架工作时属于非线性非稳态动力学系统,而隔振性能是系统性能的外在表现,应该可以采用混沌特征对其进行描述。所开展的研究分别获得了湖南省自然科学基金项目“车辆悬架混沌特征与隔振性能的关联研究(03JJY3006)”和江苏省高校自然科学基金研究计划项目“汽车悬架隔振性能及其混沌表征的关联研究(04KJB580037)”的资助。通过研究发现,某些混沌特征参数(关联维 D_2 、Kolmogorov 熵、最小嵌入相空间维数 $m_{\min}$)可用于描述钢板弹簧式非独立悬架的隔振性能,关联维 D_2 可用于区分钢板弹簧式非独立悬架或麦弗逊式独立悬架。

研究于 2007 年继续进行,试图基于符号特征和混沌参数对汽车悬架隔振性能进行综合评价,并基于符号特征或混沌参数对用于汽车悬架激振和参数检测的 3 类实验设备——平板式汽车悬架隔振参数检测台、扫频式汽车悬架参数振动实验台、多连杆汽车悬架激振试验台的特性有详细的了解。所开展的研究分别获得了江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目“基于新技术集成的汽车悬架激振台”(07-D-014)、江苏省高校自然科学基金基础研究计划项目“汽车悬架隔振性能混沌评价的方法与实现”(07KJD580084)的资助。通过研究,掌握了用于汽车悬架激振和参数检测的 3 类设备的运动特性和动力学性能,采用混沌参数关联维 D_2 表征与评价了汽车悬架隔振性能,采用符号特征“1-Shannon 熵”和 D_2 建立复合参量 F 综合评价汽车悬架隔振性能。

本书内容是上述 4 项政府资助项目主要研究结果的汇总。

本书的第 9 章由任成龙撰写,第 6 章由王玉国撰写,第 8 章由文少波撰写,其余各章由张雨撰写,全书由张雨统稿。书后所附“发表的相关研究论文”的部分合作者参与了本书涉及的研究工作,谨向他们致谢。

著 者

2010 年 12 月于南京方山

目 录

上篇 理论	(1)
1 时间序列符号分析方法	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 时间序列的符号化	(2)
1.2.1 二进制符号化规则	(2)
1.2.2 角区间符号化规则	(3)
1.3 符号序列编码及其直方图	(3)
1.4 符号树图解及其 Shannon 熵	(4)
1.5 改进的 Shannon 熵	(5)
1.6 符号化参数的选择	(6)
1.6.1 符号序列长度 L 的选择	(6)
1.6.2 时延 τ 的选择	(7)
1.7 计算改进 Shannon 熵的流程	(8)
2 时间序列混沌分析方法	(9)
2.1 混沌系统	(9)
2.1.1 混沌的理念和特征	(9)
2.1.2 混沌的类似随机性	(9)
2.1.3 奇异吸引子	(12)
2.2 混沌理论的发展过程及其国内外应用现状	(13)
2.3 混沌的表征参数和方法	(15)
2.3.1 相空间重构	(15)
2.3.2 最小嵌入相空间维数的确定	(16)
2.3.3 混沌特征参数的计算	(18)
2.3.4 计算混沌特征参数的流程	(22)
3 时间序列的符号混沌特征	(24)
3.1 系统含噪和动力学系统状态辨识	(24)
3.1.1 系统含噪的熵表征	(24)

3.1.2	动力学系统状态辨识方法的不足	(25)
3.2	利用系统噪声差异辨识系统状态——构筑符号混沌特征的思路 ...	(27)
3.2.1	符号特征和混沌参数与系统含噪状态的关系	(27)
3.2.2	信息流模型——基于系统噪声的熵值分类	(28)
3.2.3	构筑符号混沌特征的思路	(29)
3.3	符号混沌特征的计算	(30)
3.3.1	由时间序列到符号概率序列	(30)
3.3.2	符号概率序列的符号混沌特征	(31)
3.3.3	计算符号混沌特征参数的流程	(33)
下篇	应用	(35)
4	汽车悬架及其隔振性能	(35)
4.1	汽车悬架类型和工作原理	(35)
4.1.1	汽车悬架结构形式	(35)
4.1.2	汽车悬架振动控制方法	(40)
4.2	汽车悬架隔振原理和参数	(42)
4.2.1	汽车隔振系统基本原理	(42)
4.2.2	汽车悬架隔振参数	(43)
4.3	汽车悬架隔振性能评价方法	(46)
4.3.1	汽车悬架隔振性能评价方法的发展	(46)
4.3.2	现有汽车悬架隔振性能评价方法的不足	(47)
5	平板式汽车悬架隔振参数检测台的一般规律	(49)
5.1	拟脉冲激励及其共振响应技术	(49)
5.2	对汽车悬架施行拟脉冲激励的方式	(51)
5.3	单轮平板式汽车悬架隔振参数检测方式	(51)
5.4	甄别悬架-车轮系统振动响应信号周期性的原理	(52)
5.5	单轮平板式汽车悬架隔振参数检测台使用效果	(53)
5.5.1	悬架-车轮系统振动响应信号的周期性	(53)
5.5.2	车轮激励与车体振动的相关性	(54)
5.5.3	试验车悬架隔振效果分析示例	(55)
5.5.4	试验车的悬架参数	(56)
6	单轮平板式汽车悬架隔振参数检测仪	(57)
6.1	单轮平板式汽车悬架隔振参数检测仪构成和原理	(57)

6.2	单轮平板式汽车悬架隔振参数检测仪控制软件设计和开发	(58)
6.2.1	控制软件总体设计	(58)
6.2.2	控制软件面板子系统设计	(59)
6.2.3	控制软件数据采集子系统设计	(67)
6.2.4	控制软件检测结果处理和输出子系统设计	(71)
6.3	单轮平板式汽车悬架隔振参数检测仪应用实例	(76)
6.3.1	检测仪器和设备	(76)
6.3.2	采样参数的确定	(76)
6.3.3	具体操作步骤	(77)
6.3.4	检测注意事项	(77)
6.3.5	检测结果	(78)
7	扫频式汽车悬架参数振动实验台	(79)
7.1	扫频激励及其共振响应技术	(79)
7.2	平台三向振动信号的获得	(80)
7.3	基于符号混沌特征辨识实验台的单频性	(80)
7.4	基于功率谱密度特征谱值辨识实验台垂向主振动的有效性	(82)
8	多连杆汽车悬架激振实验台虚拟设计和实验	(85)
8.1	多连杆汽车悬架激振实验台的机构模型	(85)
8.2	多连杆汽车悬架激振实验台虚拟样机的设计	(86)
8.2.1	多连杆汽车悬架激振实验台的三维实体建模	(86)
8.2.2	多连杆汽车悬架激振实验台的运动仿真分析	(87)
8.3	多连杆汽车悬架激振实验台运动特性的分析	(90)
8.3.1	基于自功率谱密度的分析	(90)
8.3.2	基于符号时间序列直方图和 Shannon 熵的分析	(91)
8.4	多连杆汽车悬架激振实验台的方案比较	(93)
8.5	多连杆汽车悬架激振实验台的虚拟正交实验	(94)
8.5.1	工作台性能评价指标	(94)
8.5.2	正交实验设计	(94)
8.5.3	正交实验结果分析	(95)
9	汽车悬架混沌振动	(97)
9.1	Melnikov 理论	(97)
9.2	双频拟周期激励下汽车悬架振动的混沌特性	(97)
9.2.1	汽车悬架模型的运动微分方程	(97)

9.2.2	汽车悬架发生混沌的临界条件	(98)
9.2.3	数值仿真及其结果分析	(99)
9.3	随机激励下汽车悬架振动的混沌特性	(102)
9.3.1	汽车悬架模型的运动微分方程	(102)
9.3.2	汽车悬架发生混沌的临界条件	(103)
9.3.3	数值仿真及其结果分析	(105)
10	汽车悬架隔振性能表征和评价	(107)
10.1	汽车前后悬架振动信号的检测	(107)
10.2	汽车悬架隔振性能的混沌表征和评价	(108)
10.2.1	不同类型汽车悬架的关联维 D_2 表征	(108)
10.2.2	不同状况下钢板弹簧式非独立前悬架隔振性能的混沌评价	(109)
10.3	汽车悬架隔振性能基于符号特征和混沌参数的综合评价	(111)
	附录 发表的相关研究论文	(113)
	参考文献	(115)

上篇 理论

1

时间序列符号分析方法

1.1 引言

对时间序列施行符号化而得到“符号序列”,原来数值无穷变化的时间序列就成为仅有几个数值(或符号)的符号序列。在这个“粗粒化”的过程中,大尺度特征得以留存,微弱的非重要信息被去除。由符号时间序列方法得到的符号熵,其描述的是符号序列的含噪状态,比之由时间序列直接得到的熵值,因为符号序列中仅留存着大尺度特征,故更能清晰表达系统信息状态,进而可基于含噪程度差异对系统状态进行辨识。近些年来,国内外越来越多的学者采用符号熵辨识隐藏在很强的观测噪声和动力学噪声中的确定性状态模式。美国 Oak Ridge 国家实验室和 Tennessee 大学的学者将符号熵用于研究火花点燃式发动机的循环可变性(cycle variability)^[1], Indiana 技术学院的 Lin F 将符号熵用于检测和判断发动机失速的早期行为^[2], Finney C E A 等人将符号熵用于发动机燃烧状态的测量与评估^[3]。文献[4]给出了由协方差矩阵最大特征值法或最小符号熵法确定符号序列长度 L 的方法,并采用符号熵辨识不同瞬态工况的汽油汽车尾气碳氢化合物排放、不同活塞环状态的柴油机机身振动、不同转子-定子碰摩状态的转子振动、不同前悬架状态时的汽车振动。文献[5]针对模型选择的要求,提出了源于符号分析的分类方法,当在两个一般模型之间进行选择时,与其他算法比较,符号分类的误差最低。文献[6]检测因轴不对中而产生的轴承振动加速度,并采用符号时间序列分析方法辨识损伤模式。文献[7-9]将符号时间序列分析方法用于对复杂系统的性能监控和决策,具体的应用案例是通过超声波探伤仪和便携式光学显微镜在线监测多合金构件,采用符号时间序列分析方法分析监测信号,辨识 7075-T6 铝合金构件的早期疲劳损伤。相比于神经网络和成分分析理论,符号时间序列分析方法能够辨识细小的由小疲劳裂纹成长累积形成的早期疲劳损伤。对于小异常现象的早期检测问题,文献[10]将符号时间序列分析方法与其他现有的模式识别方法相比较,表明由于符号时间序列分析方法是在符号序列的快速时间尺度上分析变化缓慢的早

期小异常现象,因而有其优越性。

采用时间序列符号分析方法处理瞬态含噪信号的最大优越性在于符号化方法对于噪声相当稳健。

1.2 时间序列的符号化

对时间序列进行符号统计量方法分析时,通过引入相空间离散划分并分配符号给每个划分单元,将时间序列转换为符号序列。一旦建立了符号序列,就可以对表示不同符号序列出现概率的符号统计量进行计算。通过阈值函数,将时间序列 $\{x_n\}$ 的元素 $x_n \equiv x(n)$ 转换为符号序列 $\{s_n\}$ 的元素 $s_n \equiv s(n)$,即

$$\{x_n\} = (x_1, x_2, \dots, x_N) \rightarrow \{s_n\} = (s_1, s_2, \dots, s_N) \quad (1.1)$$

本节介绍 2 种对时间序列进行符号化、由时间序列 $\{x_n\}$ 获得符号序列 $\{s_n\}$ 的规则。

1.2.1 二进制符号化规则

引入划分 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_q\}$, 并把系统的状态空间划分为 $m = (q+1)^d$ 个单元,其中 d 为状态空间的维数, q 为划分个数, $q=1$ 为最简单的二进制划分。每个单元用一个符号 $s_r \in \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ 进行标记,从而在相空间内为连续曲线的轨迹被转换为符号序列,这些符号标记了被轨迹所访问的单元,描述了系统的动力学特征。

给出划分线 P_0 而设定 2 种元模式,使得符号序列 s_n 中每一个符号在 2 种元模式中出现的概率相等,则可设计二进制符号化规则:

$$s_n = \begin{cases} 1 & x_n > P_0 \\ 0 & x_n \leq P_0 \end{cases} \quad (1.2)$$

式中: $x_n \in \{x_n\}$; $s_n \in \{s_n\}$ 。

因此,原先的时间序列 $\{x_n\}$ 被转换为由 0 和 1 代表的符号序列 $\{s_n\}$, 表征了原时间序列中数据 $x_n > P_0$ 和 $x_n \leq P_0$ 这 2 种元模式,这样就符号化地表征了原时间序列的变化规律。图 1.1 表示对于平稳随机各态历经的数据,给出划分线 $P_0 = 0$ 后在二进制符号化规则下时间序列转换为符号序列的过程,所得符号序列表示了

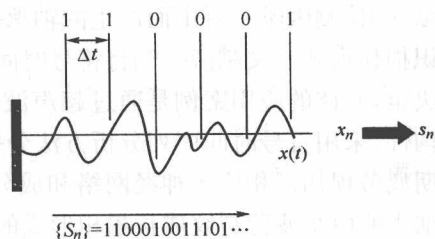


图 1.1 时间序列 $\{x_n\}$ 与符号序列 $\{s_n\}$

正、负数据 2 种元模式,即

$$s_n = \begin{cases} 1 & x_n > 0 \\ 0 & x_n \leq 0 \end{cases}$$

1.2.2 角区间符号化规则

若在原时间序列 $\{x_n\}$ 中某时间增量 Δt_n 内的时间序列元素 x_n 的变化为 Δx_n , 则定义角区间 $\theta = \arctan \frac{\Delta x_n}{\Delta t_n}$, 考虑到反正切函数在 $[45^\circ, 90^\circ)$ 、 $[0^\circ, 45^\circ)$ 、 $[-45^\circ, 0^\circ)$ 、 $(-45^\circ, -90^\circ)$ 这 4 个角区间内的不同变化规律, 则可设计角区间符号化规则:

$$s_n = \begin{cases} R & 45^\circ \leq \theta < 90^\circ \\ r & 0^\circ \leq \theta < 45^\circ \\ d & -45^\circ \leq \theta < 0^\circ \\ D & -90^\circ < \theta \leq -45^\circ \end{cases} \quad (1.3)$$

式中: R, r, d, D 分别表示 $\{x_n\}$ 在 4 个角区间出现的位置。

这样原先的时间序列 $\{x_n\}$ 被转换为由字符 R, r, d, D 代表的符号序列 $\{s_n\}$ 。因此, $\{x_n\}$ 就可被转换为如“ $RrrdDDDDrRRRR\cdots$ ”的形式, 可表征原时间序列中数据变化的 4 种元模式。有文献采用角区间符号化规则描述了恒生指数时间序列的数据快升、一般升、一般降、快降 4 种元模式。

1.3 符号序列编码及其直方图

对于每个符号序列, 更为方便的数值表达是把基 n 的序列转换为基 10 的十进制数序列, 这一过程称为序列编码(sequence code)过程。例如, 对于基 2 的序列 000 其编码为 0, 001 为 1, 010 为 2, 011 为 3, 等等。在确定了符号序列长度(树层数) L 和时延 τ 后, 可把符号序列 $\{s_n\}$ 分组为短序列:

$$\bar{s}(k) = [s(k), s(k+\tau), \cdots, s(k+(d-1)\tau)] \quad (1.4)$$

式中: $k=1, 2, \cdots, N-(d-1)\tau$ 。

为方便起见, 符号序列 $\bar{s}(k)$ 可以转换为十进制数序列:

$$s(k) = \sum_{i=1}^d (q+1)^{d-i} \bar{s}_i(k) \quad (1.5)$$

式中: $\bar{s}_i(k) = s(k+(i-1)\tau)$ 。

因此, 符号模式和相应的 Shannon 熵可以从符号序列 $s(k)$ 中获得。

符号序列经编码后, 可以把它们的统计量表示为直方图, 称为符号序列直方图

(SSH——symbol sequence histograms)。根据等概率划分的原则,对于真正随机的数据序列,其相对概率是相等的,任何显著偏离等概率的情况将显示数据中的时间相关特性和确定性结构。

图 1.2 给出了二进制符号化规则下符号统计量的图解,分别是划分、基于划分的符号化、生成序列码、由序列码的概率形成的符号序列直方图。

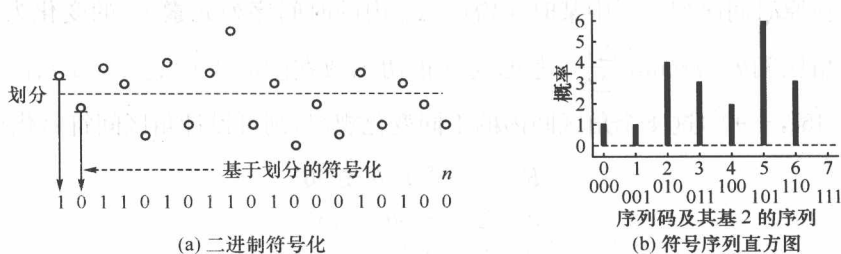


图 1.2 符号统计量图解

1.4 符号树图解及其 Shannon 熵

符号树是符号统计量的图形表示,符号统计量是符号序列长度 L 的函数。在获得符号树后可以方便地提取符号序列统计量。图 1.3 是一棵 3 层符号树,其中 p_{001} 为观测符号序列 001 的概率。显然,树中每一层对应着符号序列的特定长度,符号序列长度 $L=3$,表示 3 个连续符号出现的情况。 L 同时等于符号树的层数,因为它表达了用以评估符号统计量的符号树的深度。在树的第 L 层有 $(q+1)^L$ 种不同的符号序列。 L 也等于状态空间的维数 d 。

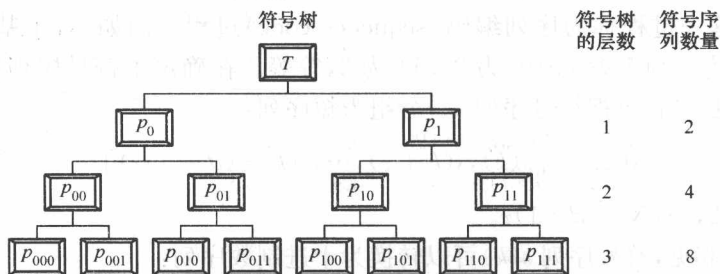


图 1.3 一棵 3 层符号树的符号序列长度、符号序列概率

有多种方法可用来描述符号统计量。可以把符号统计量看做树矢量空间中的高维矢量,从而引入多层熵来描述符号统计量,其中最常用的是 Shannon 熵。对于二进制划分,在树的第 L 层可定义 Shannon 熵为:

$$H(p(\tau, L)) = -\frac{1}{L \ln(q+1)} \sum p_{s_1 s_2 \dots s_L} \ln p_{s_1 s_2 \dots s_L} \quad (1.6)$$

变元 p 表示树的个数, 是时延 τ 和树层数 L 的函数(求和是在树的 L 层上对所有树的个数进行), 所有的熵都隐式地依赖于划分 q 的选择。

对于混沌数据和紊流数据, 相关性随着时延 τ 的增加而衰减, 且其 Shannon 熵渐近地达到上限 $H^\infty(p(L))$, 即

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} H(p(\tau, L)) = H^\infty(p(L)) \quad (1.7)$$

在有限时延 τ 的情况下, 数据中残余相关性表述为:

$$I(\tau) \equiv H^\infty(p(L)) - H(p(\tau, L)) \quad (1.8)$$

$I(\tau)$ 也称为残余熵。

对于固定的时延 τ , 树的个数严格满足分支法则。将 s_{L+1} 对所有符号在 $(0, 1)$ 情况下求和, 得到通常的条件:

$$p_{s_1 s_2 \dots s_L}(\tau) = \sum_{s_{L+1}} p_{s_1 s_2 \dots s_L s_{L+1}}(\tau) \quad (1.9)$$

类似地, L 层树与任意 $(L+N)$ 层树的关系为:

$$p_{s_1 s_2 \dots s_L}(\tau) = \sum_{s_{L+1}, s_{L+2}, \dots, s_{L+N}} p_{s_1 s_2 \dots s_L s_{L+1} s_{L+2} \dots s_{L+N}}(\tau) \quad (1.10)$$

显然, 对于有限层树结构, 树是由最低层树的个数完全确定的, 即测量的最大 L 值。对于最低层为 L 的符号树, 在更高层 L' ($L' < L$) 树的个数可以理解为符号序列长度为 L 的邻近轨迹的概率之和。

噪声的存在使得符号动力学与连续动力学之间呈现相同拓扑性是不可能的, 因此, 应当宽容地理解诸如“邻近轨迹”的条件: 对适度低噪声的系统, 即使在符号序列与相空间区域之间没有一一对应的关系, 邻近的符号序列仍然趋向于连续相空间中类似的轨迹; 但是对于高噪声的系统, 不存在这种对应关系; 当时延变化时, 仍然可以通过符号化方法获得连续动力学的大致行为。

1.5 改进的 Shannon 熵

符号序列的概率分布在任一符号树层中平均有组织的程度隐含于 Shannon 熵中, 可以定义改进 Shannon 熵为:

$$H_S(L) \equiv -\frac{1}{\log N_{\text{seq}}} \sum_i p_{i,L} \log p_{i,L} \quad (1.11)$$

式中: N_{seq} 为符号序列中具有非零概率符号的总个数; i 为符号序列的序数; $p_{i,L}$ 是长度为 L 的第 i 个符号序列的概率。

对于随机数据, $H_s(L)$ 将趋近于 1; 对于非随机数据, 其值介于 0 与 1 之间。 $H_s(L)$ 越低, 意味着原始时间序列数据中包含着更加确定性的结构。由此可见, 符号时间序列分析方法把信号处理方法与信息论有机地结合起来。

改进 Shannon 熵 $H_s(L)$ 可以用于对复杂系统的状态进行评估。因为从几何观点来看, 感兴趣的信号实质上是动力学系统相空间中的轨迹, 不论它是混沌的还是非混沌的, 它必是确定性的。如果使用生成划分把相空间符号化并将轨迹转换为符号序列, 那么特定符号串将更为频繁地出现。另一方面, 对于纯粹的随机噪声, 各种符号出现的可能性在统计意义上是相等的。因此, 这一特性可以用来检测时间序列是否包含了确定性的结构, 或者在总体上是否是随机的。

更进一步, 从前面的讨论可见, 对于纯随机噪声, $H_s(L)$ 接近于 1, 即 $H_s(L)$ 值较大; 对于纯周期信号, $H_s(L)$ 接近于 0, 即 $H_s(L)$ 值较小; 当 $H_s(L)$ 值处于中间状态时, 则存在更为复杂但确定的数据结构。 $H_s(L)$ 往 0 方向移动表示数据中确定性特别是周期性加强; 反之, $H_s(L)$ 往 1 方向移动则表示数据中随机性加强。

在以后的内容中, 出于表达简洁的意图, 所有出现的“Shannon 熵”都是指“改进 Shannon 熵 $H_s(L)$ ”。

1.6 符号化参数的选择

1.6.1 符号序列长度 L 的选择

符号序列长度 L 等于重构相空间的维数 m 。因此, 可以采用 2.3.2 节中的“最大特征值不变法”或本节的“最小 Shannon 熵法”获得最佳的符号序列长度 L 。对于前者, 得到了重构相空间的维数 m 也就获得了符号序列长度 L , 容后详述。对于后者, “最小 Shannon 熵法”是这样考虑的: Shannon 熵 $H_s(L)$ 将随符号序列长度 L 的变化而变化。给定符号集大小 N_s , 令 L 从 1 开始增加, 当 $H_s(L)$ 有最小值时, 进行符号化变换可以较好地地区分动力学数据与随机噪声, 此即为最佳的符号序列长度 L 。

下面是一个案例。搭载电子燃油喷射汽油机的某型号汽车在加速-滑行过程中测试获得的 CO 成分瞬态排放信号如图 1.4 所示, 采用二进制符号化规则, 可得到符号序列 $\{s_n\}$ 。分别采用最大特征值不变法和最小 Shannon 熵法确定其符号序列长度 L , 图 1.5 同时给出了最小 Shannon 熵值-符号序列长度 L 曲线、协方差矩阵最大特征值之差-符号序列长度 L 曲线。由图 1.5 可见:

(1) 随着符号序列长度 L 增大, 对应的 Shannon 熵值有最小值; 由最小 Shannon 熵法确定的符号序列长度 $L=9\sim 10$ 。

(2) 随着符号序列长度 L 增大, 对应的协方差矩阵最大特征值之差也在减少, 表明最大特征值趋于定数, 但是趋向缓慢; 由最大特征值不变法确定的符号序列长度 $L=10$ 。

(3) 比较由最大特征值不变法与最小 Shannon 熵法分别得到的符号序列长度 L , 可以确定 $L=10$ 。

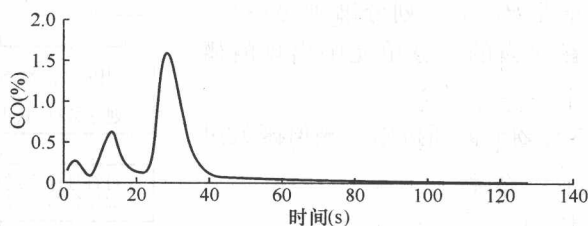


图 1.4 某车型加速-滑行的 CO 瞬态排放信号

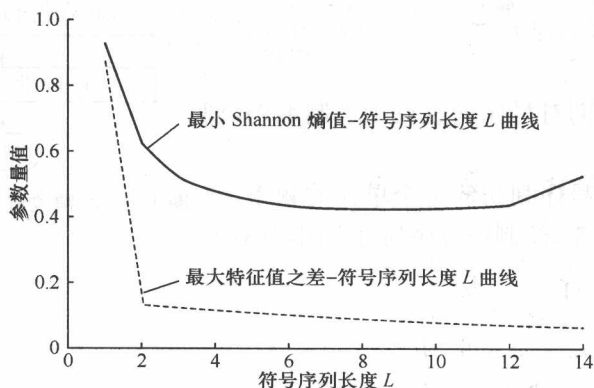


图 1.5 用 2 种方法得到的符号序列长度 L

1.6.2 时延 τ 的选择

一般情况下, 对采样频率的选择是事先确定的, 为了对时间序列合理地符号化, 还需要选择时间序列数据间的时延 τ 。选择时延 τ 的途径有: 重构相空间参数法、平均互信息法、位移法、效果比较法。

如果动力学系统是由非周期轨道支配, 选择较长时延 τ 意味着哪怕在好的标度中也混进了远距离轨迹, 因而符号统计量趋向于更高的熵值。随着时延 τ 增加, 符号统计量的熵值将最终渐近于上限 $H^\infty(p(L))$ 。

1.7 计算改进 Shannon 熵的流程

二进制划分下计算改进 Shannon 熵的流程如图 1.6 所示。主要步骤有:

(1) 确定相关参数如符号序列长度(树层数) L 、时延 τ 等。

(2) 确定划分线 $P_0=0$ 。划分准则是:符号集中每一个符号在对应的划分单元中出现的概率相等。

(3) 对数据进行划分。通过以下阈值函数过滤时间序列:

$$s_n = \begin{cases} 1 & x_n > 0 \\ 0 & x_n \leq 0 \end{cases} \quad (1.12)$$

从而将模拟信号的时间序列 $\{x_n\}$ 转换为符号序列 $\{s_n\}$ 。

(4) 对获得的符号序列进行十进制编码,创建符号模式。

(5) 计算符号序列访问每个单元的频率,获得符号序列的概率,绘制符号序列直方图,计算改进 Shannon 熵。

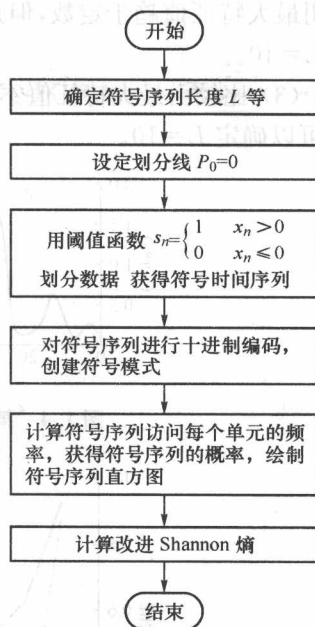


图 1.6 获得改进 Shannon 熵的流程