

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.03.003

基于 Matlab/Simulink 的随机路面建模与不平度仿真*

陈杰平^{1,2} 陈无畏¹ 祝辉¹ 朱茂飞¹

(1. 合肥工业大学机械与汽车工程学院, 合肥 230009; 2. 安徽科技学院工学院, 凤阳 233100)

【摘要】 在分析路面空间频率功率谱密度、时间频率功率谱密度与方差之间关系的基础上,建立了路面随机信号生成模型,在不同车速情况下进行了仿真,生成了 B 和 C 级随机路面时间激励信号。利用功率谱密度和方差分析,对所建模型的仿真结果与路面分级标准进行比较,证明所建模型产生的随机信号功率谱和方差值与国家规定的路面等级标准一致,结果准确,可以为车辆控制研究提供可靠的激励信号。

关键词: 路面不平度 随机激励 功率谱密度 时域模型 仿真

中图分类号: U461.4; U467.1⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)03-0011-05

Modeling and Simulation on Stochastic Road Surface Irregularity Based on Matlab/Simulink

Chen Jieping^{1,2} Chen Wuwei¹ Zhu Hui¹ Zhu Maofei¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

2. College of Engineering, Anhui Science and Technology University, Fengyang 233100, China)

Abstract

In the time domain analysis of vehicle ride comfort, the veracity of the input excitation signals is directly related to the simulation result. The random road model was constructed by Matlab/Simulink based on the study of the relation of stochastic road space and time frequency power spectral density (PSD) and PSD and root-mean-square (RMS). The stochastic excitation signals were produced, and the vertical displacement of the B and C level uneven road was built by simulation with different vehicle velocities. By PSD and RMS analysis of vertical displacement of simulation result and national standards, the correctness of model was confirmed. That can offer reliable excitation signals for control research of vehicle. It proves that the idea and methods of modeling is unique and practical.

Key words Roughness of road surface, Random excitation, Power spectral density, Time domain model, Simulation

引言

以往对汽车平顺性的研究较多的是基于线性系统的假设^[1],采用路面谱输入可直观而方便地建立系统响应的频域模型以获得平顺性分析计算结果,用频域研究路面谱的方法在车辆平顺性研究中发挥了很大作用^[2-5]。

而在研究汽车主动、半主动悬架设计及其系统控制等非线性问题时,用时域分析方法有利于导出良好的控制律^[6]。借助路面输入(激励)的时域模型,可方便地在时域和频域内进行汽车平顺性动力学分析与研究,因而对路面时域不平度建模研究成为一项重要基础工作,国内外许多学者进行了大量研究^[7-9]。

收稿日期: 2009-03-03 修回日期: 2009-04-08

* 国家自然科学基金资助项目(50575064)、安徽省“十一五”科技攻关项目(07010202055)、安徽省教育厅自然科学科研项目(KJ2007B127)和安徽科技学院自然科学科研项目(ZRC2007125)

作者简介: 陈杰平, 博士生, 安徽科技学院副教授, 主要从事车辆 CAD 和控制研究, E-mail: chen369100@163.com

通讯作者: 陈无畏, 教授, 博士生导师, 主要从事车辆底盘与集成控制研究, E-mail: cww@mail.hf.ah.cn

在仿真研究中,如果使用的激励信号不合适,则会导致系统响应与实际偏差过大。在现有的关于平顺性仿真研究和时域序列生成的文献资料中,除了生成方法困难外,几乎没有涉及到重构时域路面的正确性验证问题,致使构建的路面时域激励信号相差很大,形成的路面随机高程激励信号差异非常显著^[10-12],该现象在理论和工程上都难以进行合理解决。显然,时域模型在相同等级路面上产生的随机高程激励信号应该一致。所以,在利用路面随机高程作为激励信号对车辆的振动进行仿真研究时,为保证仿真结果的可信,对于生成的路面随机高程需要进行验证。

本文根据随机路面的标准化功率谱,分析研究时域与频域描述的关系,借助 Matlab 软件,寻求一种合理正确和简单的路面时域激励信号生成方法,为车辆平顺性及其控制研究提供可靠的激励信号。

1 路面激励及其频域描述

1.1 路面激励和空间频率功率谱

系统激励源于道路高程的不平度,是汽车行驶时最主要的激励。在进行车辆平顺性仿真研究和性能评价时,需要获得准确的路面信息,对路面激励有足够的了解^[13]。车辆振动的路面不平度输入主要采用路面功率谱密度的形式,获得路面谱最直接的方法就是测量,但费力费时、不经济,在工程应用上受到了限制。

国内外许多单位对路面不平度测量数据的研究表明,当车速恒定时,路面不平度服从高斯概率分布,具有零均值的平稳各态历经特性,是以时间为参数的随机过程,不能用明确的数学关系表示。而且,由于速度功率谱为常数,符合白噪声的定义和统计特征,经适当变换后可拟合出路路面随机不平度的时域模型。因而,通常用路面的功率谱密度(PSD)函数和方差来描述其统计特性。PSD 表示路面平度能量在空间频域的分布,方差反映路面平度大小的总体情况,描述了路面不平度的基本形式和总体特征。

国外从 20 世纪中叶开始对路面功率谱进行研究,通过路面功率谱来评价路面质量和汽车振动响应。迄今已提出了多种不同的路面谱密度表示方法^[14],1984 年国际标准化组织在文件 ISO/TC108/SC2N67 中提出了“描述不平度表示方法草案”,中国也参照制定了相应的国家标准,由长春汽车研究所起草制订了 GB/T7031—1986《车辆振动输入—路面平度表示方法标准》。在这两份文件中,均建议路面功率谱密度 $G_q(n)$ 的拟合表达式为

$$G_q(n) = G_q(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-w} \quad (1)$$

式中 n ——空间频率, m^{-1} , 是波长 λ 的倒数

n_0 ——参考空间频率, $n_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$

$G_q(n_0)$ ——参考空间频率 n_0 下路面功率谱密度,称为路面不平度系数, m^3

w ——频率指数,是双对数坐标上斜线斜率,它决定路面功率谱密度频率结构

同时,定义了每种响应路面的均方根值来描述路面随机激励信号的强度或平均功率

$$\sigma_q = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (2)$$

上述两个文件按照路面功率谱密度把路面分为 8 个等级,规定了各级路面的 $G_q(n_0)$ 的几何平均值,分级路面谱的频率指数 $w = 2$;同时,还给出了 $0.011 \text{ m}^{-1} < n < 2.83 \text{ m}^{-1}$ 范围内的路面不平度相应的均方根值 $q_{\text{rms}}(\sigma_q)$ 的几何平均值,如表 1 所示。

表 1 路面不平度 8 级分类标准

Tab. 1 Roughness of road surface of 8 ranks standard

路面等级	$G_q(n_0)/\text{m}^3$	σ_q/m
	$(n_0 = 0.1 \text{ m}^{-1})$	$(0.011 \text{ m}^{-1} < n < 2.83 \text{ m}^{-1})$
	几何平均值	几何平均值
A	16×10^{-6}	3.81×10^{-3}
B	64×10^{-6}	7.61×10^{-3}
C	256×10^{-6}	15.23×10^{-3}
D	1024×10^{-6}	30.45×10^{-3}
E	4096×10^{-6}	60.90×10^{-3}
F	16384×10^{-6}	121.80×10^{-3}
G	65536×10^{-6}	243.61×10^{-3}
H	262144×10^{-6}	487.22×10^{-3}

同理,速度功率谱密度 $G_{\dot{q}}(n)$ 和加速度功率谱密度 $G_{\ddot{q}}(n)$ 常用来补充描述路面不平度的统计特性。三者关系为

$$G_{\dot{q}}(n) = (2\pi n)^2 G_q(n) \quad (3)$$

$$G_{\ddot{q}}(n) = (2\pi n)^4 G_q(n) \quad (4)$$

1.2 时间频率功率谱描述

在空间频率功率谱描述中,没有速度影响因素出现。但对于汽车振动系统而言,车速是必须要考虑的一个因素。当汽车以车速 u 驶过空间频率为 n 的路面时,等效的时间频率(Hz)为

$$f = un \quad (5)$$

且时间频率功率谱密度和空间频率功率谱密度关系为

$$G_q(f) = \frac{1}{u} G_q(n) \quad (6)$$

式中 $G_q(f)$ ——时间频率功率谱密度
 $G_q(n)$ ——空间频率功率谱密度

所以,时间频率功率谱密度

$$G_q(f) = \frac{1}{u} G_q(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-2} = G_q(n_0) n_0^2 \frac{u}{f^2} \quad (7)$$

同样可以得到时间频率的不平度垂直速度 $\dot{q}(t)$ 和加速度 $\ddot{q}(t)$ 的功率谱密度关系为

$$G_{\dot{q}}(f) = 4\pi^2 G_q(n_0) n_0^2 u \quad (8)$$

$$G_{\ddot{q}}(f) = 16\pi^4 G_q(n_0) n_0^2 u f^2 \quad (9)$$

2 路面随机不平度时域模型的建立

2.1 时域模型的描述方法

路面功率谱密度 PSD 是对应于某一种确定的路面不平度的统计量。但对于给定的路面功率谱密度 PSD, 重构的路面高程并不是唯一的, 所得到的道路函数, 只是相应于某一速度时给定路面谱的当量路面高程中的一个样本函数。

从已知的路面谱, 重构满足既定 PSD 的道路时域模型, 必须有 2 个前提条件: ① 道路过程是平稳的 Gaussian 随机过程。② 道路过程具有遍历性。重构的基本思想是: 将路面高程的随机波动抽象为满足一定条件的白噪声, 然后进行变换而拟合出路路面随机不平度的时域模型。

对于平稳 Gaussian 随机过程, 生成路面高程时域模型的方法有很多^[15]。主要的方法有滤波白噪声生成法、随机序列生成法、谐波叠加法、AR (ARMA) 法以及快速 Fourier 逆变换生成法等。其中滤波白噪声法物理意义清楚、计算方便, 并可直接根据路面功率谱数值和行驶车速确定路面模型参数, 所以使用较多。功率谱密度的有理函数拟合形式为^[16]

$$G_q(n) = \frac{2\alpha\beta^2}{\pi(\alpha^2 + n^2)} \quad (10)$$

式中 α, β ——与路面等级有关的常数

2.2 随机路面的滤波白噪声生成

根据前述可知, 当车辆以速度 u 匀速行驶, 由于 $\omega = 2\pi f$, 时域路面不平度功率谱密度表示为

$$G_q(\omega) = (2\pi)^2 G_q(n_0) n_0^2 \frac{u}{\omega^2} \quad (11)$$

当 $\omega \rightarrow 0$ 时, $G(\omega) \rightarrow \infty$ 。因此, 考虑下截止角频率后, 实用功率谱密度可以表示为

$$G_q(\omega) = (2\pi)^2 G_q(n_0) n_0^2 \frac{u}{\omega^2 + \omega_0^2} \quad (12)$$

式中 ω_0 ——下截止角频率

式(12)可视作为白噪声激励的一阶线性系统的响应。根据随机振动理论, 可知

$$G_q(\omega) = |H(\omega)|^2 S_w \quad (13)$$

式中 $H(\omega)$ ——频响函数

S_w ——白噪声 $W(t)$ 功率谱密度, 取 $S_w = 1$

所以有

$$H(\omega) = \frac{2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0) u}}{\omega_0 + j\omega} \quad (14)$$

即 $\dot{q}(t) = -2\pi n_0 u q(t) + 2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0) u} W(t)$

$$(15)$$

式中 n_{00} ——下截止空间频率, $n_{00} = 0.011 \text{ m}^{-1}$

G_0 ——路面不平度系数; m^3

$W(t)$ ——均值为零的 Gauss 白噪声

$q(t)$ ——路面随机高程位移, m

3 随机路面位移的生成与验证分析

3.1 基于 Matlab/Simulink 的随机路面生成

根据式(15), 在 Matlab/Simulink 中搭建仿真模型如图 1 所示, 其中 $f_0 = un_{00}$ 。

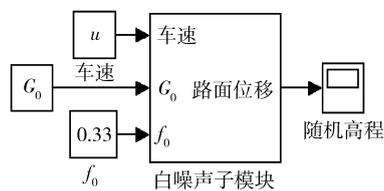


图 1 随机路面生成模型

Fig. 1 Model of stochastic road surface generating

在进行仿真时, 只要按照路面等级和车速对 f_0 、 G_0 和 u 进行设置, 即可得到不同车速驶过不同等级路面情况下的时域响应输出, 作为悬架控制的输入激励。

图 2 为车辆在 B 级路面上以 10、20 和 30 m/s 车速下分别驶过 1 000 m 时的路面随机高程仿真结果。可以看出, 三者的随机路面高程激励信号基本一样。

另外需要注意两点: ① Simulink 中的有限带宽白噪声模块输出的并非按照所设置的噪声强度输出, 其采样时间参数对输出强度有很大影响。② 仿真时间需要根据车速进行调整, 保证在各车速下仿真车辆驶过的路面长度基本一致。

3.2 谱密度与均方根值的关系

已知在空间频率 $n_1 < n < n_2$ 内的路面位移谱密度为 $G_q(n)$, 根据式(1)利用平稳随机过程的平均功率的频谱展开性质, 路面不平度分别为

$$\frac{d\sigma_q^2}{dn} = G_q(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-2} \quad (16)$$

$$\frac{d\sigma_q^2}{dn} = (2\pi n)^2 G_q(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-2} \quad (17)$$

可得, 在空间频率内

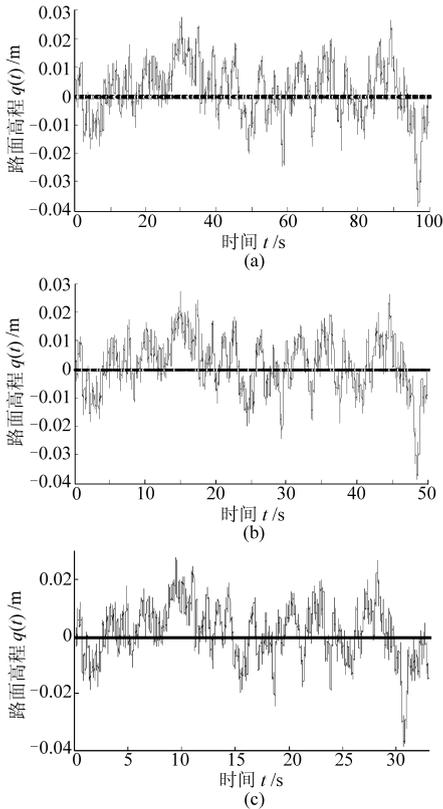


图2 不同车速下生成的路面激励

Fig. 2 Road excitation in different car speed

(a) $u = 10 \text{ m/s}$ (b) $u = 20 \text{ m/s}$ (c) $u = 30 \text{ m/s}$

$$\sigma_{q_{\text{rms}}} = \sqrt{\int G_q(n_0) \left(\frac{n_0}{n}\right)^2 dn} \quad (18)$$

$$\sigma_{\dot{q}_{\text{rms}}} = 2\pi n_0 \sqrt{\int G_q(n_0) dn} \quad (19)$$

但是,在进行车辆平顺性研究时,对于路面不平度还必须考虑到车速这一重要因素所带来的影响。在建立时域模型时,必须首先将空间功率谱密度换算成时间功率谱密度。当汽车以一定车速驶过空间频率为 n 的路面时,可以得到

$$G_q(f) = \frac{1}{u} G_q(n) = G_q(n_0) n_0^2 \frac{u}{f^2} \quad (20)$$

$$G_{\dot{q}}(f) = 4\pi^2 G_q(n_0) n_0^2 u \quad (21)$$

同理可以得到

$$\sigma_{q_{\text{rms}}} = \sqrt{\int G_q(n_0) n_0^2 \frac{u}{f^2} df} \quad (22)$$

$$\sigma_{\dot{q}_{\text{rms}}} = \sqrt{4\pi^2 G_q(n_0) n_0^2 u df} \quad (23)$$

当考虑有效的空间频率 $0.011u < f < 2.83u$, 对于 B 级路面, 即有

$$\sigma_{q_{\text{rms}}} = \sqrt{\int G_q(n_0) n_0^2 \frac{u}{f^2} df} =$$

$$\sqrt{64 \times 10^{-6} \times 0.1^2 u \left(\frac{1}{0.011u} - \frac{1}{2.83u} \right)} =$$

$$7.61 \text{ mm}$$

$$\sigma_{\dot{q}_{\text{rms}}} = \sqrt{4\pi^2 G_q(n_0) n_0^2 u df} = 2\pi n_0 u \sqrt{G_q(n_0) |n_2 - n_1|} \quad (24)$$

利用式(24)可以求出车辆以不同车速驶过 B 级路面时,路面激励的速度均方根值,有

$$\sigma_{\dot{q}_{\text{rms}}} = \begin{cases} 84.4 & (u = 10 \text{ m/s}) \\ 168.7 & (u = 20 \text{ m/s}) \\ 253.1 & (u = 30 \text{ m/s}) \end{cases}$$

将生成的路面信号进行处理后与计算结果进行比较,可以判定所生成的信号是否符合预期的要求。所以,根据式(22)、(23)可求出 B 级和 C 级路面的位移和速度标准均方根值,与仿真结果比较结果如表 2 所示。

表 2 各种工况下均方根值与标准值对比

Tab. 2 Contrast of RMS of standard and every work condition

车速 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	路面 等级	随机高程方差/mm		随机速度方差/ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	
		标准	$\sigma_{q_{\text{rms}}}$	标准	$\sigma_{\dot{q}_{\text{rms}}}$
10	B	7.61	7.63	84.4	82.8
	C	15.23	14.86	168.7	161.6
20	B	7.61	7.64	168.7	165.5
	C	15.23	15.29	337.4	354.4
30	B	7.61	7.64	253.1	254.1
	C	15.23	15.88	506.1	560.1

3.3 路面随机谱密度正确性验证

根据 B 和 C 级标准路面的时域仿真结果,可求得随机路面高程与标准等级路面的谱密度对比曲线,如图 3 所示。图示说明,在任何车速下路面位移输入是一致的。

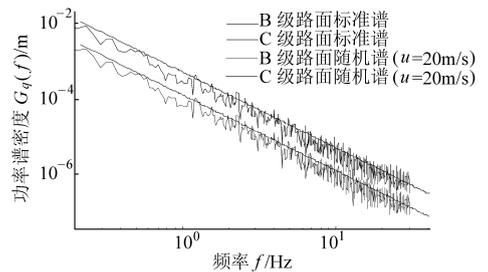


图3 生成随机路面谱密度与标准等级路面谱密度对比曲线

Fig. 3 PSD curve compare of generated stochastic road surface and standard rank road surface

经过以上两个方面的检验,可以看出生成路面与标准规定一致,证明所采用的方法正确,生成的信号合理,可以作为平顺性振动分析的输入激励。

4 结束语

通过分析研究路面的空间频率和时间频率功率

谱密度的关系,借助于滤波白噪声生成的方法,结合 Matlab 软件,建立了实用的路面生成仿真模型。

通过对仿真结果的方差和功率谱分析,可知路面谱与标准路面谱吻合得很好。模型物理意义清楚,可直接根据标准路面空间频率功率谱密度、路面

空间截止频率、行驶车速等生成符合等级路面规定的随机高程,作为车辆平顺性分析研究的输入激励信号,应用方便可靠。可以证明,本文的方法具有通用性,可以适用于各等级路面激励信号的生成,为车辆的控制研究提供可靠的激励信号。

参 考 文 献

- 魏朗,陈荫三,龚国庆. 公路卧铺客车的车铺人系统平顺性模拟计算[J]. 中国公路学报,1999,12(1):101~104.
Wei Lang, Chen Yinsan, Gong Guoqing. Ride performance simulative calculation of vehicle-berth-human subsystem of road sleeper berth bus [J]. China Journal of Highway and Transport, 1999,12(1):101~104. (in Chinese)
- 陶向华,黄晓明. 车辆动载荷的频域模拟计算与分析[J]. 华中科技大学学报:城市科学版,2003,20(4):47~50.
Tao Xianghua, Huang Xiaoming. Analysis and calculation of frequency domain simulations of dynamic load[J]. J. of HUST: Urban Science Edition, 2003,20(4):47~50. (in Chinese)
- Schiehlen W, Hu B. Spectral simulation and shock absorber identification [J]. International Journal of Nonlinear Mechanics, 2003, 38(2):161~171.
- 胡亮,李黎,樊剑. 使用特征正交分解型谱表示法的汽车受路面激励随机模拟[J]. 振动与冲击,2007,26(1):136~138.
Hu Liang, Li Li, Fan Jian. Stochastic simulating for multi-variation road roughness with spectral representation method based on proper orthogonal decomposition (POD)[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(1):136~138. (in Chinese)
- Feng Jinzhi, Zheng Songlin, Yu Fan. Bandwidth-limited active suspension controller for an off-road vehicle based on co-simulation technology [J]. Frontiers of Mechanical Engineering in China, 2008, 3(1):111~117.
- 张永林,钟毅芳. 车辆路面不平度输入的随机激励时域模型[J]. 农业机械学报, 2004,35(2):9~12.
Zhang Yonglin, Zhong Yifang. Time domain model of road undulation excitation to vehicles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(2):9~12. (in Chinese)
- [英]Dave Crolla,喻凡. 车辆动力学及其控制[M]. 北京:人民交通出版社,2004.
- 唐光武,贺学锋,颜永福. 路面不平度的数学模型及计算机模拟研究[J]. 中国公路学报,2000,13(1):114~117.
Tang Guangwu, He Xuefeng, Yan Yongfu. Mathematical model of road roughness in time domain and its simulation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(1):114~117. (in Chinese)
- 赵珩,卢世富. 路面对四轮汽车输入的时域模型[J]. 汽车工程,1999,21(2):112~117.
Zhao Heng, Lu Shifu. A vehicle time domain model with road input on four wheels [J]. Automotive Engineering, 1999, 21(2):112~117. (in Chinese)
- 檀润华,陈鹰,路甬祥. 路面对汽车激励的时域模型建立及计算机仿真[J]. 中国公路学报,1998,11(3):96~102.
Tan Runhua, Chen Ying, Lu Yongxiang. The mathematical models in time domain for the road disturbances and the simulation[J]. China Journal of Highway and Transport, 1998, 11(3):96~102. (in Chinese)
- 张立军,张天侠. 车辆四轮相关时域随机输入通用模型的研究[J]. 农业机械学报, 2005,36(12):29~31,12.
Zhang Lijun, Zhang Tianxia. Study on general model of random inputs of the vehicle with four wheels correlated in time domain[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005,36(12):29~31,12. (in Chinese)
- 方浩,李晓宾,王璐,等. 基于路面随机激励的8自由度整车动力学仿真[J]. 中国工程机械学报, 2007,5(2):167~173.
Fang Hao, Li Xiaobin, Wang Lu, et al. Dynamical simulation of 8-DOF vehicle suspension based on stochastic road surface excitation[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2007,5(2):167~173. (in Chinese)
- 徐延海. 考虑路面不平度的汽车稳定性控制的研究[J]. 汽车工程, 2005,27(3):330~333.
Xu Yanhai. An investigation into vehicle stability control with the consideration of road surface roughness[J]. Automotive Engineering, 2005, 27(3):330~333. (in Chinese)
- Sayers M W. Dynamic terrain inputs to predict structural integrity of ground vehicles[R]. Michigan: University of Michigan Transportation Research Institute Report UM TR I-88-16, 1988.
- 张永林. 用谐波叠加法重构随机道路不平度高程的时域模型[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6):32~35.
Zhang Yonglin. Time domain model of road irregularities simulated using the harmony superposition method[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(6):32~35. (in Chinese)
- Michelberger P, Palkovic L, Bokor J. Robust design of active suspension system[J]. Int. J. of Vehicle Design, 1993, 14(2/3):145~165.