

基于高阶累积量的点燃式发动机 爆震检测及爆震强度判定

杨文宏¹, 王珂^{1,2}, 刘成材^{2,3}, 高青^{2,3}

(1. 吉林大学通信工程学院, 长春 130022; 2. 吉林大学汽车动态模拟国家重点实验室, 长春 130022; 3. 吉林大学汽车工程学院, 长春 130022)

摘要:研究了利用高阶累积量提取汽油机爆震特征的方法。利用加速度传感器采集振动信号, 传感器安装在四缸汽油机的缸盖上。通过分析信号的高阶统计特性, 定义了一个基于高阶累积量的公式来计算爆震强度。与基于傅立叶变换和小波变换的方法相比, 该方法使用相对较少的数据点, 并且可以检测到较弱程度爆震的发生。通过分析不同工况下振动信号的高阶统计特性, 并结合爆震声音强度, 提出了一种对爆震强度分级的方法。实际信号分析结果表明了本文方法的实用性。

关键词:动力机械工程; 仪器仪表技术; 点燃式发动机; 爆震检测; 高阶累积量; 爆震强度

中图分类号:TK402 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2010)02-0376-06

Spark ignition engine knock detection and intensity determination based on higher-order statistics

YANG Wen-hong¹, WANG Ke^{1,2}, LIU Cheng-cai^{2,3}, GAO Qing^{2,3}

(1. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. State Key Laboratory of Automobile Dynamic Simulation, Jilin University, Changchun 130022, China; 3. College of Automobile Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: A method to extract the knock characteristic of the spark ignition engine was proposed based on the higher-order cumulants. The vibration signals were collected by an accelerometer mounted on the cylinder head of a 4-cylinder spark ignition engine. A formula based on the higher-order cumulants was defined to calculate the knock intensity by analysis of the higher-order statistics characteristic of the signal. The proposed method was compared with the methods based on the Fourier transform and the wavelet transform, and it was found that the former needs less data points, and is capable of detecting the occurrence of weaker knock. Combining with the sound intensity when the knock occurs, a knock intensity classification method was proposed after analyzing the higher-order statistics characteristic of the vibration signal under different engine operating conditions. Processing of the real vibration signals show the practicality of the proposed method.

Key words: power machinery and engineering; technology of instrument and meter; spark ignition engine; knock detection; higher-order statistics; knock intensity

收稿日期:2009-06-14.

基金项目:国家自然科学基金项目(50676039).

作者简介:杨文宏(1982-),女,博士研究生.研究方向:信号及信息处理. E-mail:wenhongyang@yahoo.com.cn

通信作者:高青(1961-),男,教授,博士生导师.研究方向:清洁燃烧技术. E-mail:gqing@jlu.edu.cn

发动机正常燃烧时,离火花塞近的可燃混合气体首先被点燃,之后火焰以此为核心向四周传播,燃烧室内的混合气循序燃烧。若有爆震现象发生,说明末端未燃混合气在正常火焰到达之前发生强烈自燃并快速传播,化学能量的快速释放导致缸内压力和温度急速上升,并产生强烈的冲击波。严重的爆震导致发动机功率下降,油耗上升,气缸过热甚至损坏发动机。但是轻微爆震反而能改善发动机的动力性和效率,因此研究如何检测爆震及判定爆震程度具有重要的意义^[1-4]。

目前检测爆震的方法有滤波方法和时频分析方法两类^[5-9]。滤波方法以带通滤波后的某些信号特征(如谱峰值)来判别爆震。它以傅立叶变换为基础,虽然滤掉了部分噪声分量,但是噪声也存在于带通频带内,当爆震程度较弱时,信噪比较低,用该方法难以判别爆震是否发生。时频分析方法对信号进行时频变换,对比不同时频窗中的信号特征来判别爆震。由于时频变换经常涉及到卷积运算,此类方法计算量较大。高阶累积量是描述随机变量高阶统计特性的数学工具,提供了比二阶统计量更丰富的信息,可自动抑制高斯噪声,本文将高阶累积量应用于爆震信号分析,通过一系列的实际信号分析证明了方法的可行性及有效性。

1 高阶累积量

对于随机变量 x , 如果其概率密度函数为 $p(x)$, 随机变量 x 的第一特征函数定义为

$$\varphi(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} p(x) e^{j\omega x} dx = E[e^{j\omega x}] \quad (1)$$

显然,特征函数实际上就是概率密度函数 $p(x)$ 的傅立叶反变换。对 $\varphi(\omega)$ 取自然对数,得到第二特征函数

$$\psi(\omega) = \ln [\varphi(\omega)] \quad (2)$$

则随机变量 x 的 k 阶累积量 c_k 为

$$c_k = (-j)^k \frac{d^k \psi(\omega)}{d\omega^k} \Big|_{\omega=0} \quad (3)$$

当 k 取值为 1 和 2 时,分别称为一阶和二阶统计量,均值和方差是常用的一阶和二阶统计量。二阶以上的统计量称为高阶累积量。若用 τ 表示信号延时量,则随机信号 $x(t)$ 的 k 阶累积量也可表示为

$$c_{kx}(\tau_1, \dots, \tau_{k-1}) = \text{cum}[x(t), x(t + \tau_1), \dots, x(t + \tau_{k-1})]$$

对于高斯分布的随机变量,当 $k \geq 3$ 时,其高阶累积量 c_k 恒为零,这正是高阶累积量可以抑制高斯噪声的理论基础。任意随机变量如果与某一高斯随机变量具有相同的二阶矩,则其高阶累积量是衡量该随机变量偏离高斯分布的度量^[10]。

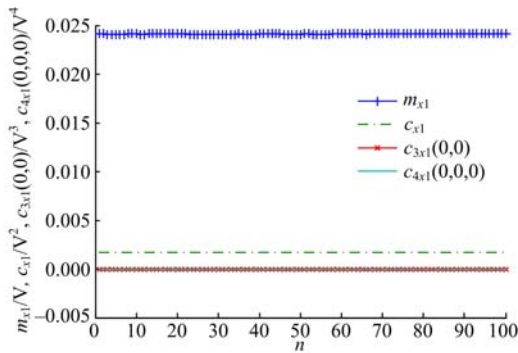
2 爆震检测方法及其强度分级

对振动信号进行预处理,使其均值为零并且具有单位方差,那么处理后信号的高阶累积量值可以衡量该段信号偏离高斯分布的程度。虽然爆震信号是非平稳信号,但是在发动机完成一个工作循环内的爆震信号,其高阶统计特性却是规律可循的。在信号分析中,选取发动机完成一个工作循环内的数据。当发动机转速低于 1500 r/min 时,由于数据长度的增加,计算效率将降低,但是发动机低速运转时,一般不易发生爆震。而对于高于 3200 r/min 的情况,则可选取多个工作循环的数据进行分析。本文实验分析中选取了发动机中速运转下的爆震振动信号。

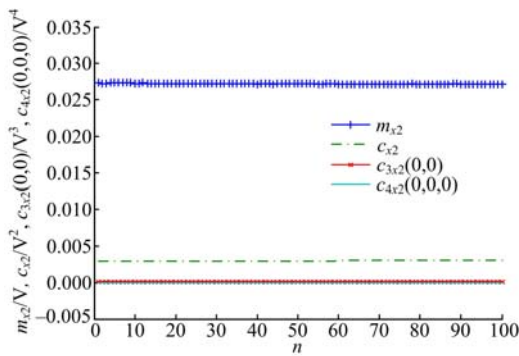
分析两组信号的各阶统计量的特点,这两组信号是四冲程汽油发动机运转中无爆震发生时采集的,采样速率为 100 kHz,发动机所处的转速分别为 2600、3000 r/min,点火提前角分别为 24.75、28.875 °CA。图 1 描绘了这两组振动信号在不同时间段时的均值 m_{xi} ($i = 1, 2$)、方差 c_{xi} 、三阶累积量 $c_{3,xi}(0, 0)$ 和四阶累积量 $c_{4,xi}(0, 0, 0)$ 的值。

从图中可知,在确定的转速和点火提前角下,信号的均值和方差与时间起点无关。另外,在实验中计算了信号在不同时间起点的部分自相关函数值,发现这些自相关函数值与时延值相关,但与时间起点无关,说明该随机过程是宽平稳过程。同时信号的 3 阶和 4 阶累积量几乎重合,随时间变化的幅度也很微小。但是,在不同的转速和点火提前角下,信号各阶统计量稍有差异。为了比较在不同转速和点火提前角时信号的性质变化,首先对信号进行预处理,使信号均值为零,方差单位化,并计算了转速在 2400~3200 r/min 以及点火提前角在 24.75~37.875 °CA 的无爆震发生时振动信号的四阶累积量 $c_{4,xi}(0, 0, 0)$ 的值,如图 2 所示。

不同工况下的振动信号的四阶累积量值落在区间^[3 5]。该值之所以在某个区间内波动,与无法准确把握爆震临界值有关。在采集数据时,为



(a) 第一组数据



(b) 第二组数据

图 1 两组数据的各阶统计量随时间的变化

Fig. 1 Statistics characteristics of two data groups

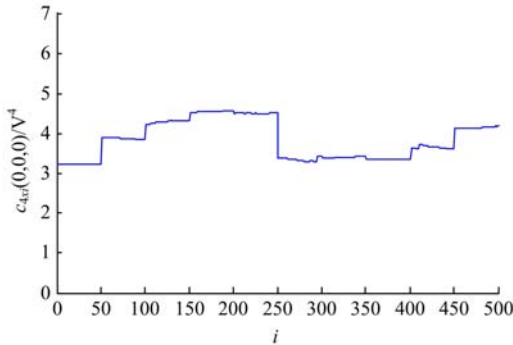


图 2 不同工况下信号的四阶累积量值

Fig. 2 Forth-order cumulants of signals measured in different situations

了确保无爆震发生,有时将点火提前角调得比较小。在实验中发现,当无爆震发生时,信号的四阶累积量的值较小,当逐渐增大点火提前角使爆震发生时,信号的四阶累积量的值有所增大,并且随着爆震程度的加剧,四阶累积量的值越来越大。这是因为无爆震发生时,信号近似于平稳分布,其四阶累积量的值在某个小范围内波动。当爆震发生时,信号出现了明显的冲击分量,而具有脉冲特性的信号一般是超高斯信号,其峰度值大于零,并且冲击程度越强,越偏离高斯分布,其四阶累积量

的值越大,因此利用信号的四阶累积量的值可以检测爆震的发生,并判断出爆震程度。

将振动信号 x 分为两部分:爆震引发的信号分量 s 和非爆震引发的信号分量 n 。从激励源来看,二者是独立的。根据累积量的性质,独立变量和的累积量等于各自累积量的和,因此 $c_{4x}(0,0,0)$ 理论上等于 $c_{4s}(0,0,0)$ 与 $c_{4n}(0,0,0)$ 之和。根据多次实验分析,本文定义了爆震强度 KI 的计算式,即

$$KI = G \left(\frac{c_{4x}(0,0,0)}{c_{4n}(0,0,0)} - 1 \right) = G \frac{c_{4s}(0,0,0)}{c_{4n}(0,0,0)} \quad (4)$$

式中: G 为幅度修正因子。 $\frac{c_{4x}(0,0,0)}{c_{4n}(0,0,0)} - 1$ 表征了爆震分量与非爆震分量的概率分布差异,若无爆震现象发生,其值为零。在实际的信号处理中,无法得知 $c_{4n}(0,0,0)$ 的值,但是由前面的分析可知,该值在某个区间内波动,所以可以取对应区间的均值,因此 $c_{4n}(0,0,0)$ 取图 2 所示数据的均值,即 3.8357。

对于实的时间序列 $x(n)$, 其四阶累积量估计式为

$$c_{4x}(l_1, l_2, l_3) =$$

$$\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x(k) x(k+l_1) x(k+l_2) x(k+l_3) \quad (5)$$

式中: N 为数据长度。

不同转速下,在一个工作循环中采集的数据长度是不相同的。若爆震区间内的爆震分量相同,但是包含在不同长度的振动信号中,则式(5)的求平均运算会使 KI 值发生变化,所以设置修正系数 $G = N/N_0$, 分子消除不同数据长度的影响,而分母是一个常数,将计算结果控制在合理的范围,不至于扩大或缩小很多倍。 N_0 适宜选为中速运转时一个工作循环对应的数据长度。在本文实验分析中, N_0 取为 3200 r/min 时,一个工作循环所对应的数据长度为 3750。

在实际的发动机爆震控制中,强烈的爆震是不允许出现的,但是若完全没有爆震发生,则发动机的效率下降,因此需要调整点火提前角使发动机工作在弱爆震情形下。鉴于目前缺乏对爆震强度细致划分的方法,本文根据实测信号的 KI 值的范围,结合信号采集过程中相关领域的专业人员对爆震声音强度的判断,针对本文实验所用发动机,将爆震强度划分为 4 个等级, KI 值及对应

的爆震状态如表 1 所示。

表 1 爆震强度分类

Table 1 Knock intensity classify

Knock level	Value of KI	Knock state
0	$KI \leq 0$	Non-knocking
1	$0 < KI \leq 2$	Light knocking
2	$2 < KI \leq 4$	Moderate knocking
3	$KI > 4$	Heavy knocking

在发动机运行过程中,应调整点火提前角使其工作在轻微爆震情形下。若爆震等级为 0,则应增大点火提前角;若爆震等级为 2,则应减小点火角;因为爆震等级为 3 是需要尽量避免的情况,所以若爆震等级为 3,应以较大的步长降低点火提前角。

3 实际振动信号分析

试验台采用的是一台四缸四冲程汽油发动机,爆震传感器是西门子加速度传感器,安装在 2 缸和 3 缸之间,采集振动信号,并转化为电压(V)幅值。传感器的输出经过 100 kHz 的信号采样和数据分析软件的处理,成为计算机可识别的数据。在信号采集过程中,通过调整点火提前角来控制爆震的发生。选取 3 组信号进行实验分析,数据长度均为发动机完成一个工作循环的时间。所有数据由专业人员采集,并根据当时的爆震声音信号将数据分为强烈爆震、一般爆震和微弱爆震 3 种程度。3 组振动信号所处的工况分别为:信号 1,转速为 3000 r/min,点火提前角为 37.875°CA ;信号 2,转速为 3200 r/min,点火提前角为 34.125°CA ;信号 3,转速为 2600 r/min,点火提前角为 33.75°CA 。

为了比较不同爆震检测方法的效果,本文分别给出了振动信号的时域图、傅立叶变换后的频域幅值图,以及信号经小波变换后特征频率为 6.25~12.5 kHz 的子带的近似分量与细节分量图。选择这个子带是因为爆震特征频率位于 5~15 kHz 频带内,从目前的研究来看,这个子带能很好地提取爆震特征。

从图 3 可知,当发生强烈爆震时,爆震分量的能量明显高于噪声的能量,目前普遍认为振动信号中的爆震特征频率位于 5~15 kHz,在图中也有体现,在该频带内可看到一明显的峰值。振动信号 1 经小波变换后的子带图如图 4 所示,图 4(a)为信号的近似分量图,图 4(b)为信号的细节

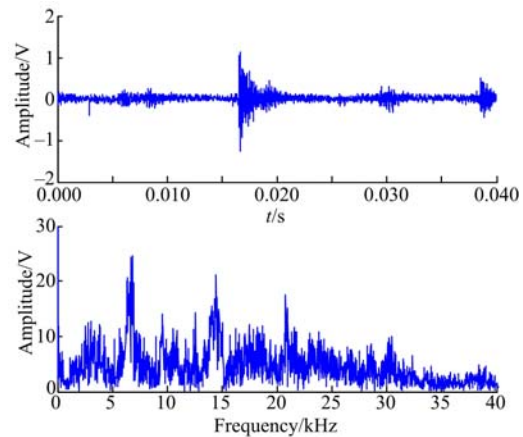


图 3 实测振动信号 1 的时域和频域幅值图

Fig. 3 Real vibration signal 1 and its spectrum

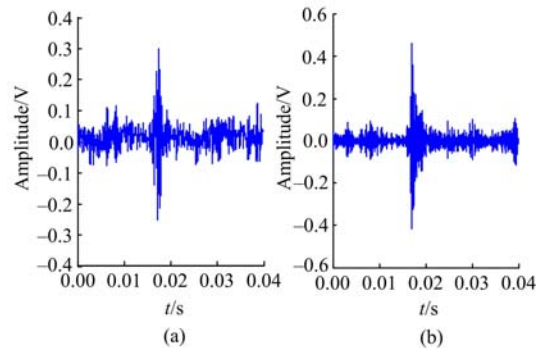


图 4 实测振动信号 1 经小波变换后的分量图

Fig. 4 Wavelet transform of vibration signal 1

分量图。在爆震发生区间,细节分量的幅值明显大于近似分量的值,爆震特征比较明显。利用本文方法计算的爆震强度值为 $KI=7.1270$,从爆震强度分类表中可知,爆震等级为 3,此振动信号属于强烈爆震。

从图 5 可知,当一般程度的爆震发生时,爆震信号的能量较低,对应频带 5~15 kHz 内的幅值没有明显大于其他频带幅值的特征,说明此时的傅立叶变换不足以识别爆震。振动信号 2 经小波变换后,其近似分量及细节分量如图 6 所示,在爆震对应区间内的细节分量值大于近似分量幅值,小波变换还能提取出爆震特征,但与图 4 相比,爆震特征有所减弱。由本文方法计算的爆震强度值为 $KI=2.9978$,爆震等级为 2,此振动信号属于一般爆震。

图 7 所示的振动信号,从时域来看,爆震程度较弱,从频域来看,5~15 kHz 内的频域幅值较低,爆震分量淹没于噪声中,同样说明此时傅立叶变换不足以识别爆震。图 8 所示的小波变换子带

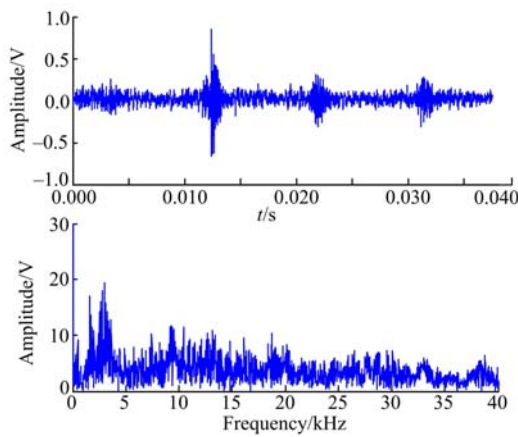


图 5 实测振动信号 2 的时域和频域幅值图

Fig. 5 Real vibration signal 2 and its spectrum

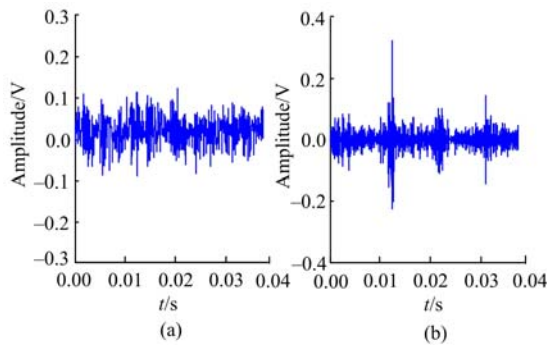


图 6 实测振动信号 2 经小波变换后分量图

Fig. 6 Wavelet transform of vibration signal 2

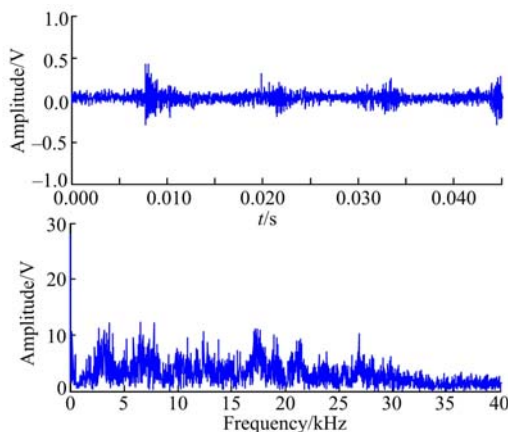


图 7 实测振动信号 3 的时域和频域幅值图

Fig. 7 Real vibration signal 3 and its spectrum

图中,爆震对应区间的细节分量的幅值与近似分量的幅值差异很小,也很难由此辨别爆震特征。利用本文方法计算的爆震强度为 $KI=0.7427$,从爆震强度分类表中可知,爆震等级为 1,此振动信号属于轻微爆震。

从分析结果可知,基于高阶累积量方法计算的

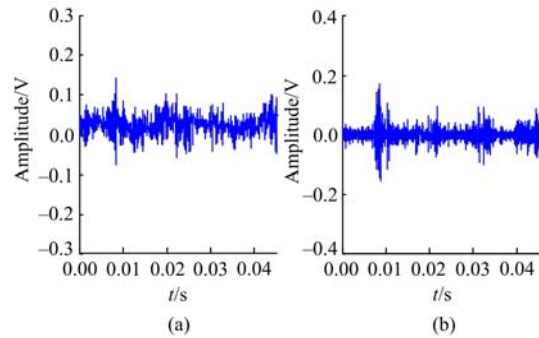


图 8 实测振动信号 3 经小波变换后分量图

Fig. 8 Wavelet transform of vibration signal 3

爆震强度 KI 分别是 7.1270、2.9778 和 0.7427,爆震等级分别为 3、2 和 1,对应的爆震状态分别是强烈爆震、一般爆震和轻微爆震。与传统方法相比,本文方法的优点为:

(1)傅立叶变换能检测到较强的爆震现象,不能分辨出程度较轻的爆震现象。小波变换方法与傅立叶变换相比,能更好地提取爆震特征,但是在发生轻微爆震的情形下,性能下降。与傅立叶变换和小波变换方法相比,基于高阶累积量的方法能检测到轻微爆震的发生,并定量地计算出爆震强度。

(2)将爆震强度值的范围划分为 4 个爆震等级,可方便快捷地判断出爆震状态,从而提高爆震控制效率。

(3)傅立叶变换及小波变换一般需要数据长度为 2 的幂次方,一般取 8192 点或更长,相比之下,本文所用的方法使用数据点较少,长度为 4000 点左右。而且由于选取的是高阶累积量的对角切片,由第 2 节给出的计算公式可知,算法简便、不含有卷积运算、计算效率高。

4 结束语

加速度传感器是常用的爆震传感器,但是由加速度传感器测量的振动信号较复杂,很难从中准确地判断爆震。本文分析了发动机在不同运转工况下的爆震振动信号,定义了基于高阶累积量计算爆震强度的公式,可以从缸盖振动信号中检测到不同程度的爆震现象,而且能很好地检测到轻微爆震的发生。同时,以多次实验分析中得到的实际信号的爆震强度值为依据,提出了一种划分爆震强度等级的方法,从而能快速地从缸盖振动信号中判断出爆震状态,提高爆震控制效率,是一种可以应用于实时爆震控制的方法。

参考文献:

- [1] Ker S, Bonnardot F, Duval L. Algorithm comparison for real time knock detection[C]// IEEE, ICASSP Hawaii, USA, 2007.
- [2] Lezius U, Schultalbers M, Drewelow W, et al. Improvements in knock control[C]// Mediterranean Conference on Control and Automation, Athens, Greece, 2007.
- [3] Hudson C, Gao X, Stone R. Knock measurement for fuel evaluation in spark ignition engines[J]. Fuel, 2001, 80: 395-407.
- [4] Yue S, Li P. Automatic knock control system[C]// Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation, Hangzhou, China, 2004.
- [5] Thomas J H, Dubuisson B, Dillies-Peltier M A. Engine knock detection from vibration signals using pattern recognition[J]. Kluwer Academic Publisher, Meccanica, 1997, 32: 431-439.
- [6] Park S T, Yang J G. Engine knock detection based on wavelet transform[J]. IEEE Mechanics, 2004, 3: 80-83.
- [7] Chang J, Kim M, Min K. Detection of misfire and knock in spark ignition engines by wavelet transform of engine block vibration signals[J]. Measurement Science and Technology, 2002, 13: 1108-1114.
- [8] Matz G, Hlawatsch F. Time-frequency methods for signal detection with application to the detection of knock in car engines[C]// Proceedings of IEEE on Statistical Signal and Array Processing, Portland, USA, 1998.
- [9] Behrens S C, Bohme J F. Fast knock detection using pattern signals[C]// 2001 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Salt Lake City, USA, 2001.
- [10] 邱天爽, 张旭秀, 李小兵, 等. 统计信号处理——非高斯信号处理及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.