

文章编号: 1001- 2486(2010) 06- 0015- 06

泛探雷达长时间相参积累目标检测方法研究*

张 月, 邹江威, 陈曾平

(国防科技大学 ATR 重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要: 泛探雷达利用同时多个接收波束覆盖整个观测空域, 可利用长时间相参积累提高动目标检测性能, 然而必须解决目标在长积累时间之内出现跨波束、跨距离单元和跨多普勒单元现象带来的积累增益下降问题。在跨波束影响可忽略前提下, 研究了基于 Keystone 变换与 Dechirping 变换相结合的运动补偿方法, 并在此基础上提出了基于 Clean 思想的多目标检测流程。通过对仿真数据与外场实测数据的处理与分析, 验证了本文方法的有效性, 可以用于泛探雷达的目标检测。

关键词: 泛探雷达; 目标检测; 运动补偿; 相参积累; Keystone 变换; Dechirping 变换; Clean 思想

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A

Long-time Coherent Integration Targets Detection Method for Ubiquitous Radar

ZHANG Yue, ZOU Jiang-wei, CHEN Zeng-ping

(ATR Key Laboratory, Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Ubiquitous radar receiver generates multi-beam at the same time to monitor the area designated. It can use long-time coherent integration method to improve target detection performance. However, the crossing-beam, crossing range-cell and crossing Doppler cell problem in long time must be solved to avoid the integration loss. A moving compensation method based on Keystone transform and Dechirping was researched in the case the crossing-beam impact can be neglected. A detecting flow for multiple targets using the Clean method was proposed. The method proposed in this paper was verified by the simulating data and the outfield experimental data processing. Results show that it can be used for target detection of ubiquitous radar.

Key words: ubiquitous radar; targets detection; moving compensation; coherent integration; Keystone transform; Dechirping transform; Clean method

泛探雷达的基本思想是^[1-3]采用全向发射和同时固定多波束接收来实现时时、处处不间断的观测, 可充分利用时域、空域和谱域信息并结合数字波束形成(Digital Beamforming, DBF)和数字信号处理技术在不损失信噪比的情况下实现不同数据率的同时多功能, 并具有良好的低截获(Low Probability of Intercept, LPI)特性, 是数字阵列雷达(Digital Array Radar, DAR)的重要应用方向之一。

对于常规波束扫描体制雷达, 波束在每个指向的驻留时间有限, 因此可供相参积累的回波数目有限, 为了进一步提高检测概率, 只能利用多个扫描周期的航迹信息进行非相参积累。相参积累通常通过MTD来完成, 利用航迹信息进行非相参积累的典型方法有Hough变换类方法和检测前跟踪(TBD)类方法等, 这些方法有效的前提是非相参积累之前目标的信噪比不能过低。而对于泛探雷达, 相参积累时间主要取决于系统相关性和目标运动特性, 而不是由波束扫过目标的时间决定, 因此可大大增长相参积累时间, 提高雷达在强杂波背景下的弱小目标检测能力。然而积累时间的增长也会带来新的问题, 主要是在积累的时间之内很有可能出现目标跨越距离单元、多普勒单元和波束的“三跨”问题。

本文结合某数字阵列雷达样机的观测情况, 研究有效的长时间积累检测算法。由于样机接收波束较宽, 暂不考虑积累时间内跨波束的影响。所观测目标为民航客机, 因此在积累时间之内目标近似匀加

* 收稿日期: 2010- 09- 10

基金项目: 国家部委基金资助项目(51307060401)

作者简介: 张月(1980-), 男, 博士生。

速运动。对于这类目标,同时存在越距离、多普勒单元走动,回波相位为二阶多项式。对于二次相位的参数估计问题,主要的方法有 Dechirping 方法、Wigner-Hough 变换法^[4]、离散调频-傅立叶变换(DCFT)法^[5-6]、分数阶傅立叶变换法^[7]和时频分析法^[8-9]等,这些方法的讨论都是以目标不出现越距离单元走动为前提的,对于越距离、多普勒单元走动同时存在的情况,需要对两种走动同时进行补偿,才能达到较好的积累效果。

本文提出一种 Keystone 变换与 Dechirping 方法相结合进行相参积累的多目标检测方法,能够同时实现对跨距离单元和跨多普勒单元的补偿,并能克服强目标对弱小目标检测的影响。通过对仿真数据和外场实测雷达目标回波数据的处理,验证了本文方法的有效性。

1 基于长时间积累的匀加速目标检测

1.1 基于 Keystone 变换的越距离单元走动校正

Keystone 变换首先被用于 SAR/ISAR 成像中的越距离单元走动校正^[10],随后又被用于匀速目标长时间积累检测中的越距离单元走动校正^[11-14],该方法的主要特点是可以在目标运动速度信息未知的情况下校正距离单元走动,且适用于低信噪比的情况。本节分析将该方法用于匀加速目标距离单元走动校正的适用性以及校正之后的相位特性。

雷达发射信号可表示为:

$$f(t) = s_i(t - mT_1) \exp[j2\pi f_c(t - mT_1)] \quad (1)$$

其中, t 表示时间, T_1 为脉冲重复周期, f_c 为载频, $s_i(t)$ 为发射信号波形。

根据“停一跳”模型^[15],运动目标基带回波可表示为:

$$s_r(t', t_m) = A s_i[t' - 2r(t_m)/c] \exp[-j4\pi f_c r(t_m)/c] \quad (2)$$

其中 $t_m = mT_1$ 为慢时间, $t' = t - t_m$ 为快时间, $r(t_m)$ 表示目标在 t_m 时刻与雷达的距离。

假设目标在积累起始时刻的速度为 v_0 ,加速度恒定为 a ,目标在 $t_m = 0$ 时刻的距离为 r_0 ,则:

$$r(t_m) = r_0 + v_0 t_m + \left(1/2\right) a t_m^2 \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)并在快时间进行 Fourier 变换,得到:

$$S_r(f, t_m) = A S_i(f) \exp[-j4\pi(f + f_c) \left(r_0 + v_0 t_m + \left(1/2\right) a t_m^2 \right) / c] \quad (4)$$

令 $\tau_m = (f + f_c) t_m / f_c$,进行慢时间尺度变换(即 Keystone 变换)后得:

$$S_r(f, \tau_m) = A S_i(f) \exp\left[-j2\pi(f + f_c) \frac{2r_0}{c}\right] \exp\left[-j2\pi f_c \frac{2v_0 \tau_m}{c}\right] \exp\left[-j \frac{2\pi a}{\lambda} \left(\frac{1}{1 + f/f_c}\right) \tau_m^2\right] \quad (5)$$

根据系统参数, $f_c = 1.33\text{GHz}$,窄带带宽 $B = 2\text{MHz}$,在整个带宽内, f/f_c 可近似为常数 0,此时式(5)可近似为:

$$S_r(f, \tau_m) = S_i(f) \exp[-j4\pi(f + f_c) r_0 / c] \exp\left[-j4\pi v_0 \tau_m / \lambda\right] \exp\left[-j2\pi a \tau_m^2 / \lambda\right] \quad (6)$$

对式(6)在快时间维进行 Fourier 反变换,得:

$$s_r(t', \tau_m) = A s_i\left[t' - 2r_0/c\right] \exp\left[-j4\pi f_c r_0/c\right] \exp\left[-j4\pi v_0 \tau_m / \lambda\right] \exp\left[-j2\pi a \tau_m^2 / \lambda\right] \quad (7)$$

其中 $\lambda = c/f_c$ 为载频对应波长。

从式(7)可以看出对匀加速直线运动目标 Keystone 变换同样能近似实现 f 与 τ_m 的解耦,在积累时间之内不会出现距离单元走动,但此时多普勒频率近似线性变化,多普勒走动依然存在,必须进行相应的补偿。

1.2 基于多通道 Dechirping 的加速度补偿

如果已知目标加速度 a ,则可将式(7)与 $\exp\left[j2\pi a \tau_m^2 / \lambda\right]$ 相乘实现二次相位项的有效补偿,该过程即为 Dechirping 处理,补偿后可利用常规的 MTD 处理实现相参积累。由于目标加速度未知,对于感兴趣目标的加速度范围,可以采用多通道搜索的方式。设最大加速度为 a_{\max} ,则加速度搜索范围为 $[-a_{\max}, a_{\max}]$,可按照一定的搜索精度量化为 L 个离散的加速度值: $a_1, a_2, \dots, a_l, \dots, a_L$; 设每次回波

采样点数为 N , 积累脉冲数为 M , 则加速度补偿和相参积累的过程如图 1 所示。

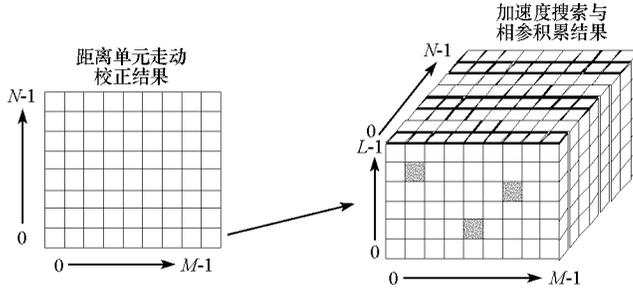


图 1 加速度补偿和相参积累示意图

Fig. 1 Acceleration compensation and coherent Integration

该过程的输入是经过 Keystone 变换得到的距离单元走动校正之后的 $N \times M$ 二维矩阵, 对该矩阵的每一行(对应一个距离单元)进行 L 通道加速度搜索补偿, 并对每通道补偿结果进行 FFT 变换实现相参积累。经过以上处理每个距离单元得到一个 $L \times M$ 二维矩阵, 矩阵中的每个元素对应一个速度、加速度单元, N 个距离单元得到 $N \times L \times M$ 的三维矩阵。该处理流程比常规 MTD 处理增加了一维信息, 因此更有利于多目标的分辨。

在实际应用中, 速度、加速度量化的间隔决定了矩阵的维数, 理论上间隔越小, 越能减少目标真实运动参数与量化值偏差所导致的增益损失(跨越损失), 然而量化精度的增高也意味着数据量的增加, 必须在量化精度和增益损失之间作一个折中。

2 实测数据处理与分析

本节利用外场实测数据对所提出长时间相参积累检测方法的有效性进行验证。如图 2 所示, 发射采用宽波束覆盖较宽的方位角, 接收采用同时固定多波束。所观测目标主要为民航客机, 其飞行线路主要两种, 一种是距离较近且近似切向飞行, 一种是近似径向飞行, 经分析这两种目标在 10s 左右的积累时间之内可近似为匀加速直线运动。假设目标的最大可能加速度为 5m/s^2 , 综合考虑计算量和跨越损失, 选取加速度补偿通道 200 个, 选择切向飞行的目标 2 进行检测试验, 采用常规 MTD 处理得到的 R-D 平面如图 3 所示, 其中目标 2 同时发生了越距离单元和越多普勒单元走动。首先经过 Keystone 变换对越距离单元走动进行校正, 正确多普勒补偿通道的处理结果如图 4 所示, 距离单元走动得到了很好的校正。然后进行加速度搜索和相参积累, 包含目标的距离单元得到的加速度-速度平面如图 5 所示, 目标能量得到了有效积累。

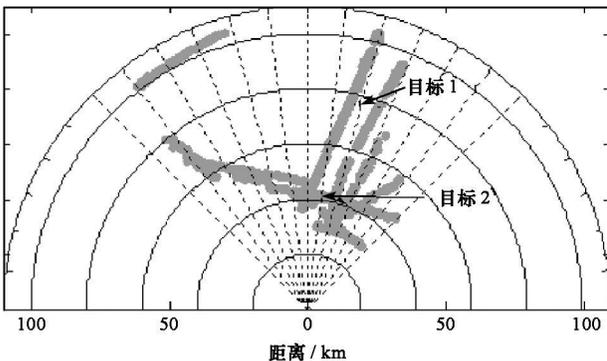


图 2 目标运动轨迹

Fig. 2 Target moving track

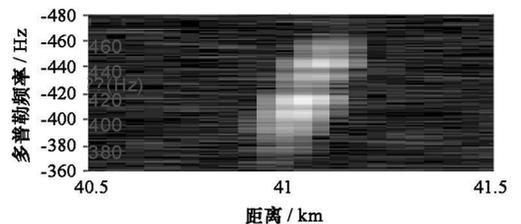


图 3 未补偿 MTD 处理结果

Fig. 3 MTD result before compensation

3 基于 Clean 思想的多目标检测

前文讨论了匀加速直线运动目标回波的相参积累方法, 该方法也同样适用于匀速直线运动目标回

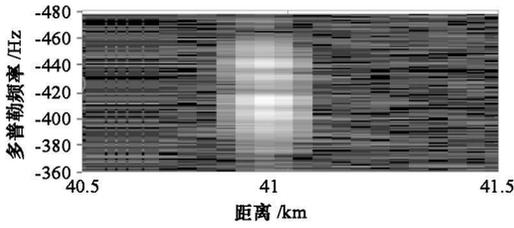


图4 Keystone 变换后 MTD 处理结果

Fig. 4 MTD result after Keystone transform

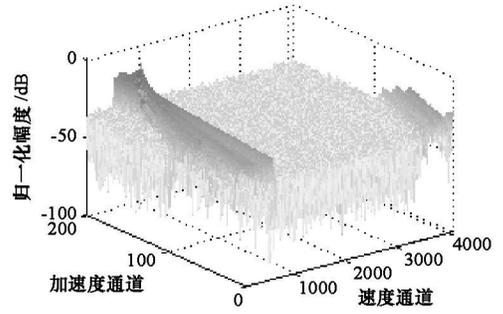


图5 加速度-速度平面

Fig. 5 Acceleration-velocity plane

波的相参积累。这两种运动形式目标的回波经过 Keystone 变换之后都可实现距离单元走动校正,对于匀速目标经过 MTD 处理就可实现有效的相参积累,完成目标的检测和参数提取,而匀加速目标则需要进一步的进行加速度搜索补偿,以实现最佳积累性能,完成目标的检测和参数提取。

由于多普勒模糊的存在,需要对 Keystone 变换结果进行多个多普勒通道补偿。对于信噪比较高的目标,其在正确多普勒通道有较强且集中的峰值,但在其他模糊通道同样存在较强且较为分散的峰值,这些“伪峰”对检测是不利的:一方面容易被检测成目标,造成虚警;另一方面会淹没弱小目标的真实峰值,造成漏检。

为了观察复杂多目标回波的情况,本文仿真了具有表 1 所示的不同参数的 5 个目标的回波和噪声信号。该仿真数据对应的距离-时间图像如图 6(a) 所示,从中可以看出目标 2、4 的信噪比较高,1、3 的信噪比较低,目标 5 由于信噪比过低在距离-时间图像里不可见。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameter

目标编号	速度/(m/s)	加速度/(m/s ²)	脉压后信噪比/dB	起始距离/km
1	-150	0	3	51.5
2	100	0	6	51.2
3	150	2	3	51.8
4	200	1	8	52.1
5	211.67	0	-3	51.2

图 6(b) 给出了经 Keystone 变换后多个多普勒补偿通道的 MTD 目标检测结果。从中可以看出,信噪比较低的匀加速直线运动目标 3 没有被检测出来,而信噪比低的匀速直线运动目标 5 的回波相参积累结果被强目标的“伪峰”所淹没,也不能被正确检测。可见为了正确检测弱目标,必须减弱或消除强目标的影响。从图 6(b) 中可以看出一些可用于强目标提取的显著特征,即无论是匀速还是匀加速直线运动目标回波,其在正确多普勒通道中的积累结果都集中在几个距离单元之内,而在其他通道中的“伪峰”则占据多个距离单元;对于匀速直线运动目标的回波,在各通道中都无多普勒走动,而对于匀加速直线运动目标的回波同时存在距离和多普勒走动。根据以上特点,可利用图像处理的方法,利用目标幅度、距离走动和多普勒走动三个特征,区分正确的目标积累结果和“伪峰”,从而检测出回波中的高信噪比目标。在强目标检测的基础上,可以利用 Clean 思想,把强目标从回波信号中消除,再进一步完成弱小目标的检测。

综合以上分析,本文提出一种多目标检测流程,主要分为以下几个步骤。

步骤 1: 对距离-时间数据进行 Keystone 变换,并补偿多个多普勒模糊通道;

步骤 2: 利用慢时间维 FFT 对 Keystone 变换结果实现 MTD 处理,得到多通道 R-D 结果;

步骤 3: 在 R-D 结果中利用幅度和形状信息,提取强度超过一定门限的高信噪比目标,并计算目标的参数;

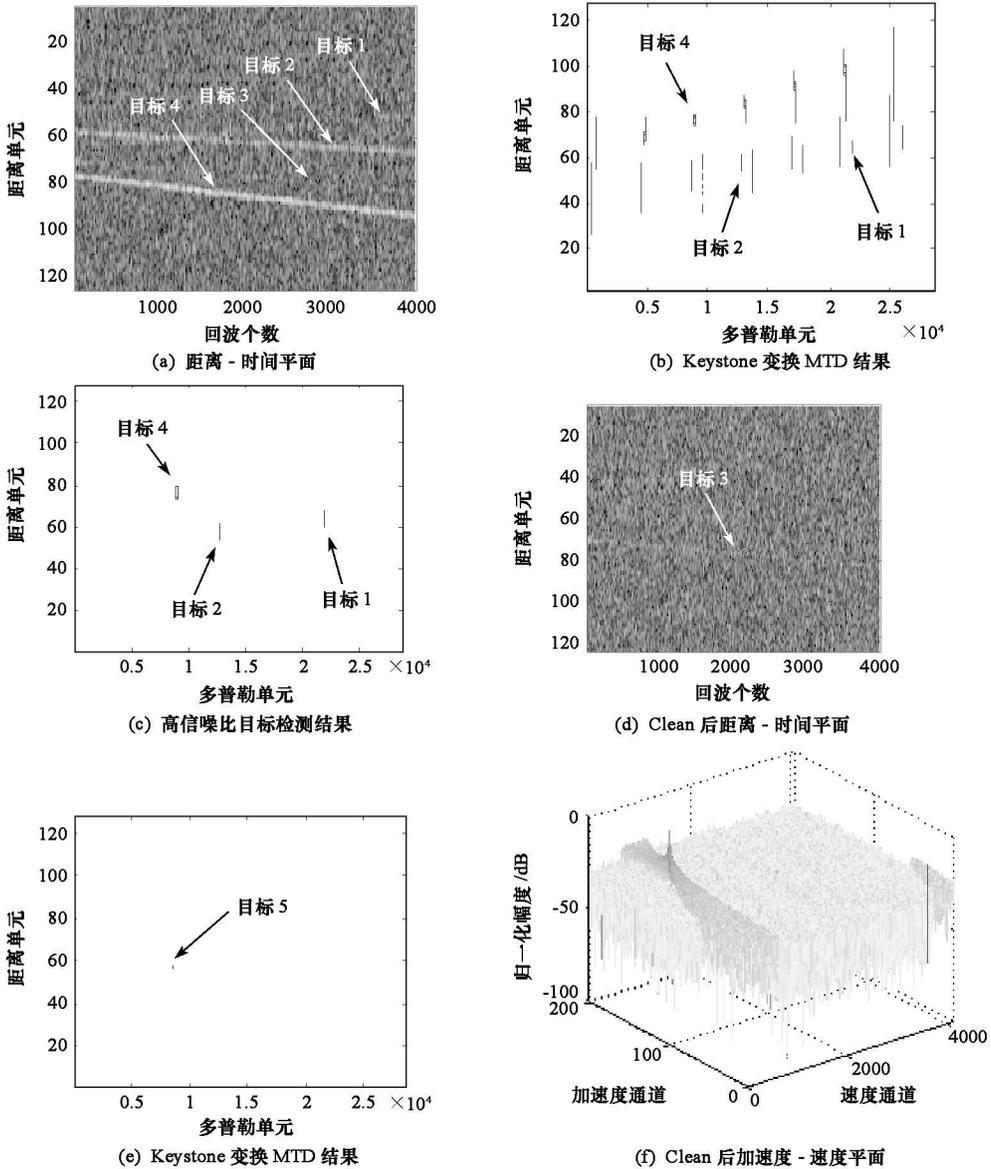


图 6 多目标检测结果

Fig. 6 Multiple targets detecting result

步骤 4: 根据所检测强目标的参数, 在 R-D 结果的正确补偿通道中进行距离多普勒滤波, 再通过 MTD 和 Keystone 的反变换, 得到 Clean 之后的距离-时间图像;

步骤 5: 重复步骤 1、2;

步骤 6: 基于加速度多通道搜索的匀速、匀加速弱小目标检测。

图 6(c) 给出了强目标的检测结果, 此时检测到了两个匀速目标和一个匀加速目标; 图 6(d) 给出了对检测出的三个强目标进行 Clean 处理之后得到的新的距离-时间图像, 从中可以看出三个强目标已经被成功 Clean; 图 6(e) 给出了对 Clean 之后的数据进行 Keystone 变换和 MTD 处理得到的 R-D 结果, 此时之前被淹没的目标 5 被成功的检测出来; 图 6(f) 给出了对目标 3 所在距离单元进行加速度搜索的输出结果, 可以看到在速度-加速度平面内, 目标 3 得到的有效的积累, 可以成功地被检测出来。以上仿真处理结果证明了本文方法的有效性。

4 结束语

泛探雷达具有多种传统雷达所不具备的特点, 其中一个突出特点就是可以用不同的数据率实现对

不同距离段目标的检测。对于近距离目标的探测只需要较短的积累时间,可以有较高的数据率,而随着探测距离的增加,可通过不断增加积累时间来获得更好的远距离探测性能,数据率也不断降低,与实际的应用情况是相符的,对于需要高数据率的应用通常针对的是近距离目标,而对于需要低数据率的应用通常针对的是远距离目标。本文重点研究距离较远情况下长时间积累检测的方法,由于目标距离较远,平稳飞行目标在积累时间之内都可近似为匀加速直线运动,针对这一运动模型,本文提出了一种利用 Keystone 变换校正距离单元走动和利用 Dechirping 处理校正多普勒单元走动的多目标检测方法。外场实测数据的处理结果表明,本文方法能够有效实现长时间相参积累,为泛探雷达的目标检测提出了一种可行的思路。

参考文献:

- [1] Skolnik M. Improvements to Air-Surveillance Radar[C]//Proceedings of IEEE Radar Conference, Waltham, 1999: 18- 21.
- [2] Skolnik M. Systems Aspects of Digital Beam Forming Ubiquitous Radar[R]. NRL Report: NRL/MR/5007- 02- 8625, 2002.
- [3] Skolnik M. Opportunities in Radar- 2002[J]. Electronics and Communications Engineering Journal, 14(6), 2002: 263- 272.
- [4] Liu F, Sun D P, Tao R, et al. Multi-component LFM Signal Feature Extraction Based on Improved Wigner-Hough Transform [C]//4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2008, 1- 4.
- [5] Xia X G. Discrete Chirp-Fourier Transform and its Application to Chirp Rate Estimation[J]. IEEE Trans. On Signal Processing, 2000, 48(11): 3122- 3133.
- [6] 邓兵,陶然,平殿发,等.基于分数阶傅立叶变换补偿多普勒徙动的动目标检测算法[J].兵工学报,2009,20(10):1303- 1309.
- [7] 武其松,邢孟道,保铮.双通道 MIMO-SAR 运动目标成像[J].系统工程与电子技术,2010,32(5):921- 926.
- [8] 保铮.雷达信号的长时间积累[R].第七届中国雷达学术年会特邀报告,1999,11.
- [9] Ren S J, Su X, Wang W J, et al. Application of Time-Frequency Analysis to Doppler Signal[C]//International Forum on Computer Science Technology and Applications, 2009:155- 158.
- [10] Perry R P, Dipietro R C, Fante R L. SAR Imaging of Moving Targets[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic System, 1999, 35(1): 188- 200.
- [11] 张顺生,曾涛.基于 keystone 变换的微弱目标检测[J].电子学报,2005,33(9):1675- 1678.
- [12] Perry R P, Dipietro R C, Fante R L. Coherent Integration With Range Migration Using Keystone Formatting[C]//Proceedings of IEEE Radar Conference, 2007.
- [13] Lv J, Gu H, Su W M, et al. A Fast Range Migration Compensation Method[C]//2nd International Conference Signal Processing Systems, 2010.
- [14] Su J, Xing M, Wang G, et al. High-speed Multi-target Detection with Narrowband Radar[J]. IET Radar Sonar and Navigation, 2010, 4(4): 595- 603.
- [15] Richards M A. 雷达信号处理基础[M].北京:电子工业出版社,2003.