

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.09.045

弧面凸轮廓面非等径加工的刀位控制方法*

葛荣雨¹ 冯显英² 王庆松³

(1. 济南大学机械工程学院, 济南 250022; 2. 山东大学机械工程学院, 济南 250061;

3. 山东大学能源与动力工程学院, 济南 250061)

【摘要】 刀位补偿法是非等径加工弧面凸轮廓面最常用的方法,提出了刀位补偿法法向误差计算的方法和一种刀位自适应补偿优化算法,即对于任意凸轮转角,以最大法向误差最小为目标函数,进行刀位优化,寻求对应的最佳补偿点和补偿量,使刀位根据加工误差自适应地柔性补偿。通过实例验证了法向误差计算式的有效性,并得出了滚子和刀具的半径差是最佳补偿量,而最佳补偿点位置并不固定的结论,结果表明所提出的刀位优化算法正确有效,可显著减小加工误差。

关键词: 弧面凸轮 非等径加工 法向误差 刀位优化

中图分类号: TH132.47 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)09-0223-04

Cutter Location Control Method for Unequal Diameter Machining of Globoidal Cam Surface

Ge Rongyu¹ Feng Xianying² Wang Qingsong³

(1. School of Mechanical Engineering, University of Jinan, Ji'nan 250022, China

2. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China

3. School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract

The cutter location compensation method is often used for unequal diameter machining of globoidal cam surface. A new calculation method for the normal error is developed, and a self-adaptive cutter location compensation optimization algorithm is proposed, whose objective is to minimize the maximal normal error. This algorithm can find out the best compensation direction and value by the cutter location optimization for any cam rotation angle and make the cutter location self-adaptive and flexible compensation according to the machining error. The normal error calculation formula has been proved to be valid by an example. A conclusion has been drawn that the radius difference between the cutter and the roller is the best compensation value and the best compensation direction is not fixed. The results show that the correctness and effectiveness of the improved self-adaptive compensation method have been proved and machining errors can be evidently reduced.

Key words Globoidal cam, Unequal diameter machining, Normal error, Cutter location optimization

引言

弧面分度凸轮机构是目前最理想的分度机构,

在动态性能、分度精度、啮合刚度与结构等方面均有很好的性能^[1-2]。但弧面凸轮的廓面是不可展的空间异型曲面,廓面的准确与否直接影响到机构的传

收稿日期: 2009-08-10 修回日期: 2010-01-25

* 国家自然科学基金资助项目(50875153)和济南大学科研基金资助项目(XKY0907)

作者简介: 葛荣雨,讲师,主要从事空间凸轮廓面的优化设计与数控加工研究, E-mail: log325@yahoo.com.cn

通讯作者: 冯显英,教授,博士生导师,主要从事数控加工与智能检测技术研究, E-mail: fxying@sdu.edu.cn

动质量和分度精度。其加工通常在数控机床或专用机床上采用共轭刨成法进行,刀具和工件的共轭刨成复现滚子和凸轮的共轭运动,且精加工时的刀具与滚子的特征几何参数一致,这样理论上就可以无误差地加工出空间凸轮的廓面^[3-4],这种加工方式称为等径加工。这种铣削方法的缺陷是在精铣时刀具的半径必须和滚子半径严格一致。但从实际出发,这是不现实的。因此非等径铣削,即加工所用刀具几何参数和滚子几何参数不一致,是实际生产中加工弧面凸轮廓面经常用到的加工方式,引起了国内外研究学者的广泛兴趣。

如果用小直径刀具非等径加工弧面凸轮廓面,则无论如何控制刀轴轨迹和姿态,非等径加工后的凸轮廓面都将存在加工误差,但是可以寻求一定的刀位控制方法,尽量减少加工误差。因此非等径加工弧面凸轮的焦点在于刀具位姿的确定和加工误差的控制,其中刀具位姿指刀轴矢量和刀心位置。目前相关文献讨论最多的非等径加工方式是刀位补偿加工,其思想可归结为让小直径刀具的轴线从滚子轴线的初始位置沿廓面接触线上某一点处的廓面法线方向补偿,补偿方向一般取理论廓面上滚子轴线中点处^[5]或平均接触角处^[6]的法矢方向,补偿量一般为滚子半径和刀具半径的差值,即在刀位规划前就限定了补偿量和补偿方向两个关键因素,这样难以得到加工误差最小的刀位路径,从而限制了刀位补偿法的应用。为此,本文提出一种自适应的柔性刀位补偿方法,以补偿量和体现补偿方向的补偿点位置为优化变量,使优化后刀位路径的加工误差趋于最小。

1 弧面凸轮数学模型

弧面凸轮机构的数学模型如图 1 所示^[7],在与滚子固联的从动坐标系 $O_f x_f y_f z_f$ 中,滚子圆柱面的矢量函数及其单位法矢函数为

$$\mathbf{R}_f = [l \quad R \cos \phi \quad R \sin \phi \quad 1]^T \quad (1)$$

$$\mathbf{n}_f = [0 \quad \cos \phi \quad \sin \phi \quad 1]^T \quad (2)$$

又因为从动件坐标系 $O_f x_f y_f z_f$ 到凸轮坐标系 $O_c x_c y_c z_c$ 的齐次坐标变换矩阵为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \tau & -\sin \tau \cos \theta & -\sin \theta & -c \cos \theta \\ \sin \tau & \cos \tau & 0 & 0 \\ \sin \theta \cos \tau & -\sin \tau \sin \theta & \cos \theta & -c \sin \theta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

根据微分几何知识,在与凸轮固联的动坐标系 $O_c x_c y_c z_c$ 中,可以推导出弧面凸轮理论廓面的参数方程和接触方程

$$\mathbf{R}_c(l, \theta) = \mathbf{M} \mathbf{R}_f \quad (3)$$

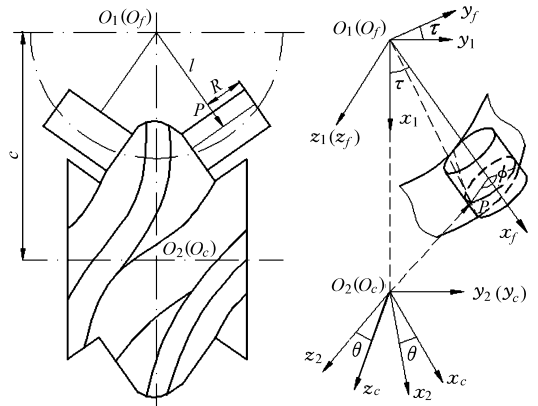


图 1 弧面凸轮机构数学模型

Fig. 1 Mathematical model of globoidal cam

$$\phi = \phi(l, \theta) = \arctan \frac{l d\tau / d\theta}{l \cos \tau - c} \quad (4)$$

- 式中 c ——中心距 R ——滚子半径
- l ——任意接触点 P 所在滚子截面到从动盘旋转轴的距离
- ϕ ——凸轮与滚子的接触角
- θ, τ ——凸轮和从动盘瞬时转角,且满足由运动规律所决定关系 $\tau = \tau(\theta)$

2 非等径加工刀位的建立

2.1 刀位的确定

对于非等径加工空间凸轮廓面的刀位补偿法,无论补偿量和补偿方向如何选取,补偿后刀具轴线都和滚子轴线平行,即刀具仅仅从滚子轴线初始位置进行了一个简单平动,故刀位补偿法的刀位计算只需计算刀心坐标,刀轴矢量仍然和等径加工方式下的刀轴矢量相同,都等于滚子轴线矢量。

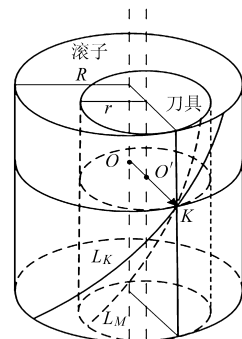


图 2 刀位补偿加工示意图

Fig. 2 Cutter location compensation machining method

由弧面凸轮廓面方程知,对任意一个凸轮转角 θ ,廓面方程表示的是沿滚子轴线轴向分布的一条空间曲线,即为滚子与凸轮廓面的理论接触线 L_K ,如图 2 所示,设小直径刀具沿理论接触线上某点 K 的法线方向进行半径补偿,即刀具截圆圆心 O' 在线段 OK 上, OO' 为补偿方向,该方向对应接触角为 $\bar{\phi}(l,$

θ); OO' 为补偿量,且为了后面建立统一的刀位优化模型,令 $OO' = \Delta$, O 为滚子对应截圆的圆心,刀位补偿以后,得到实际接触线 L_M 。

刀位补偿以后,对于刀心位置的变化,可以先在滚子坐标系中计算,然后通过坐标变换得到在凸轮坐标系中的刀心坐标。如图3所示, C 为滚子轴线上一点,也就是刀位补偿前刀心点, C' 为刀位补偿后刀心点,对加工过程中的每次走刀 l 是个定值,记为 \bar{l} ,并记 $\bar{\phi}$ 为补偿点 K 对应的接触角。在从动件坐标系中,补偿前刀心 C 的位置矢量为 r_f ,它是沿轴线的参数 \bar{l} 的函数,则补偿后刀心 C' 的位置矢量 r'_f 可表示为

$$r'_f(\theta) |_{\bar{l}} = r_f(\bar{l}) + \Delta \cdot n_f = [\bar{l} \quad \Delta \cos \bar{\phi} \quad \Delta \sin \bar{\phi} \quad 1]^T \quad (5)$$

则加工过程中刀心位置矢量为

$$r_c(\theta) |_{\bar{l}} = M r'_f(\theta) |_{\bar{l}} \quad (6)$$

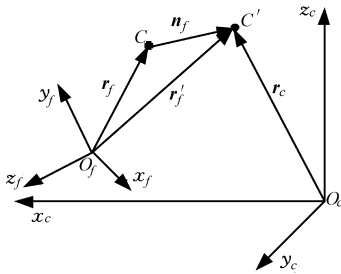


图3 刀位补偿加工法刀位计算

Fig. 3 Confirmation of compensating vector

2.2 法向误差计算式推导

计算法向误差,需要先推导刀位补偿后的实际廓面方程,再比较实际廓面和理论廓面的法向误差,计算过程比较复杂。为了简化法向误差的计算,使刀位优化易于实现,本文研究法向误差近似计算的新方法,并对计算式进行推导。

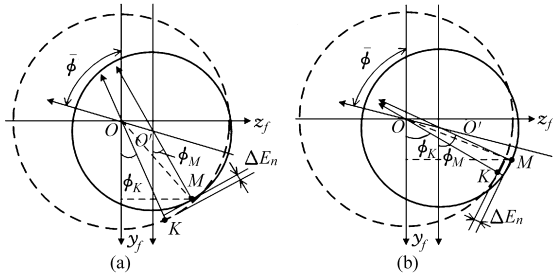


图4 刀位补偿法法向误差计算

Fig. 4 Normal error calculation after compensated

(a) 欠切状态 (b) 过切状态

根据刀位补偿法的思想,刀具中心 O' 沿某补偿方向偏移一个补偿量。图4所示为滚子和刀具的某轴截面图,虚线圆为滚子,实线圆为刀具, M 为补偿后实际接触线上一点,对应接触角为 ϕ_M , K 为补偿前的理论接触点,对应接触角为 ϕ_K 。

由于法向误差大小和坐标系无关,这里在滚子坐标系 $O_f x_f y_f z_f$ 中推导误差计算式。在刀具任意截面 l 内,刀具与凸轮啮合点 M 的矢径为

$$r_M = [l \quad \Delta \cos \bar{\phi} + r \cos \phi_M \quad \Delta \sin \bar{\phi} + r \sin \phi_M \quad 1]^T \quad (7)$$

其中,根据共轭啮合方程可以求得^[8]

$$\phi_M = \arctan \frac{l d\tau/d\theta - \Delta \sin \tau \sin \bar{\phi}}{c - l \cos \tau - \Delta \sin \tau \cos \bar{\phi}} \quad (8)$$

实际接触点 M 处的法向误差精确值应为该点到理论工作廓面的法向距离,但由于补偿量很小,点 M 与对应理论接触点 K 比较近,这样点 M 处的法向误差可近似表示为 M 和 K 两点的法向距离。令

$$\Psi = \left| \phi_K - \arctan \frac{\Delta \sin \bar{\phi} + r \sin \phi_M}{\Delta \cos \bar{\phi} + r \cos \phi_M} \right|$$

则对于图4a所示的欠切状态,欠切法向误差 E_n 可以近似表示为

$$E_n^q = E(l, \theta) =$$

$$R - \sqrt{\Delta^2 + r^2 + 2\Delta r \cos(\bar{\phi} - \phi_M) \cos \Psi} \quad (9)$$

对于图4b所示的过切状态,过切法向误差 E_n 可以近似表示为

$$E_n^g = -E(l, \theta) =$$

$$\sqrt{\Delta^2 + r^2 + 2\Delta r \cos(\bar{\phi} - \phi_M) \cos \Psi} - R \quad (10)$$

由于法向误差等于欠切量与过切量之和,结合上述两种状态,最大法向误差可以表示为

$$E_{n\max} = E_{\max}(l, \theta) - E_{\min}(l, \theta) \quad (11)$$

3 刀位自适应补偿优化算法

弧面凸轮廓面的非等径刀具加工,关键是刀具补偿量和补偿方向的确定。对于任意凸轮转角 θ ,最大法向误差 $E_{n\max}$ 是一个关于补偿量参数 Δ 和体现补偿方向的参数 l 的二元函数,则可以 $E_{n\max}$ 最小为目标函数,进行刀位优化,得到 l 和 Δ 两个最优化参数值,使刀位点根据加工误差自适应地柔性补偿。取接触线上哪一点处的法向和取多大的补偿量都由优化算法来决定,刀位可以延接触线的法矢方向任意柔性补偿。为了缩短优化时间,对于补偿方向,选取滚子有效长度 H 中间位置邻域的一小段区间作为补偿参数的定义域,即 $l \in U(H/2, \varepsilon)$; 对于补偿量,选取刀具和滚子半径差 Δ_R 领域的一小段区间作为定义域,即 $\Delta \in U(\Delta_R, \varepsilon)$ 。因此,刀位自适应补偿优化算法是一个二维的区间约束非线性优化问题,可以选用 Matlab 优化工具箱中的 fmincon 函数^[9]求解。

4 弧面凸轮加工实例计算分析

为验证提出的法向误差计算公式和自适应刀补

优化算法,对一左旋弧面凸轮进行刀位规划,设计参数:从动件滚子半径 $R = 22 \text{ mm}$,中心距 $c = 180 \text{ mm}$,转盘分度期的运动规律为修正正弦,弧面凸轮分度期转角为 120° , $77 \text{ mm} \leq l \leq 97 \text{ mm}$ 。若用 $r = 20 \text{ mm}$ 的小直径刀具进行刀位补偿加工,并采用刀位自适应补偿算法确定刀具位姿,刀位优化算法的部分结果如表 1 所示。由表 1 可知,法向误差的近似计算结果与精确计算结果相差很小,相对误差均不超过 3%,因此完全可以利用文中推导的法向误差计算公式进行误差评定;同时可以看出,对于任意凸轮转角,最佳的补偿量均为滚子与刀具的半径差 $\Delta = \Delta_R = 2 \text{ mm}$,而随着凸轮转角的改变,使最大法向误差最小的最佳补偿点并不是固定不变的,最佳补偿点与凸轮转角的关系曲线如图 5 所示。对于任意凸轮转角,必须寻求对应的最佳补偿点,这也充分说明刀位自适应补偿的必要性。

表 1 自适应刀补优化结果

Tab. 1 Optimized results of self-adaptive cutter location compensation

凸轮转角 $\theta / (^\circ)$	补偿量 Δ / mm	补偿点 l / mm	法向误差	
			近似值/mm	确值/mm
20	2	87.838	1.804 4	1.750 7
40	2	87.581	6.877 3	6.784 2
60	2	87.450	9.018 7	8.911 4
80	2	87.587	6.958 6	6.824 5
100	2	87.850	1.841 7	1.800 2

分别以滚子有效长度中点处补偿法、平均接触角处补偿法和自适应柔性补偿法加工前述弧面凸轮模型,计算最大法向误差,绘制最大法向误差随凸轮转角值的变化曲线,如图 6 所示。从图中可以看出,以平均接触角处为补偿点要优于滚子有效长度中点处作为补偿点,前者比后者的加工误差减小 8.8% 左右,而刀位的自适应柔性补偿法的加工误差与平

均接触角处为补偿点法相比,能进一步减小 9% 左右。这说明,自适应柔性刀位补偿法能有效减小加工误差。

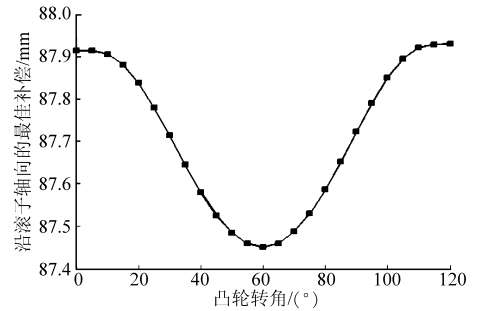


图 5 最佳补偿点位置与凸轮转角关系

Fig. 5 Relations between best compensation point and cam rotation angle

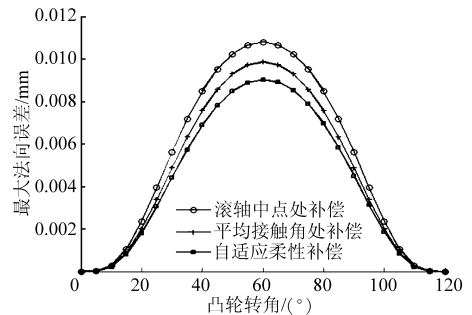


图 6 最大法向误差比较

Fig. 6 Comparison of maximum normal errors

5 结论

(1) 基于弧面凸轮廓面的数学模型,确立了采用刀位补偿法非等径加工弧面凸轮时的刀位位姿,并推导了法向误差计算式,该式能简化误差评定过程。

(2) 采用刀位补偿法加工弧面凸轮廓面,关键是补偿矢量的确定。以最大法向误差最小为目标函数,以代表补偿矢量的两参数为优化变量,提出了自适应刀补优化算法。实例计算表明,所建立的优化算法能切实减小加工误差。

参 考 文 献

- 王其超,肖正杨,马丽敏,等. 弧面分度凸轮机构啮合特性的研究[J]. 农业机械学报,1994,25(增刊):1~7.
Wang Qichao, Xiao Zhengyang, Ma Limin, et al. Study on the meshing characteristic of globoidal indexing cam mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1994, 25(Supp.):1~7. (in Chinese)
- Lee R S, She C H. Tool path generation and error control method for multi-axis NC machining of spatial cam [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1998, 38(4):277~290.
- 陈俊华,辛勇. 圆锥滚子摆动从动件圆锥凸轮的非等径加工[J]. 农业机械学报,2009,40(3):222~226.
Chen Junhua, Xin Yong. Non-equalization machining method for conical cam with oscillating tapered roller follower [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3):222~226. (in Chinese)
- 牛兴华,迟荣兰. 摆动从动件槽形圆柱凸轮的刀具轨迹及生成方法[J]. 农业机械学报,2007,38(1):203~205.

包括应力、应变和运动规律在内的大量动态结果,对曲轴系统设计的力学考察更全面。

劳分析,雨流计数法和累积损伤理论将对曲轴的应力-时间历程进行变幅载荷谱处理和寿命分析,得到的结果比传统准静态分析方法更贴近实际。

(2) 曲轴系统的动力学计算结果可直接转入疲

参 考 文 献

- 何兵, 郑长江, 艾钢. 曲轴疲劳寿命三维有限元分析[J]. 计算机辅助工程, 2007, 16(1): 5~9.
He Bing, Zheng Changjiang, Ai Gang. 3D finite element analysis on crankshaft fatigue life-span [J]. Computer Aided Engineering, 2007, 16(1): 5~9. (in Chinese)
- 张国庆, 黄伯超, 浦耿强, 等. 基于动力学仿真和有限元分析的曲轴疲劳寿命计算[J]. 内燃机工程, 2006, 27(1): 41~44.
Zhang Guoqing, Huang Bochao, Pu Gengqiang, et al. Crankshaft fatigue life calculation based on dynamic simulation and FEA [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2006, 27(1): 41~44. (in Chinese)
- 张林波, 柳杨, 黄鹏程, 等. 有限元疲劳分析法在汽车工程中的应用[J]. 计算机辅助工程, 2006, 15(增刊1): 195~198.
Zhang Linbo, Liu Yang, Huang Pengcheng, et al. FEM-based fatigue analysis method and application in automobile industry [J]. Computer Aided Engineering, 2006, 15(Supp.1): 195~198. (in Chinese)
- 张旭, 张家泰, 胡胜海. 一种敏捷曲柄连杆机构的动力学模拟[J]. 哈尔滨商业大学学报: 自然科学版, 2002, 18(3): 278~281.
Zhang Xu, Zhang Jiatai, Hu Shenghai. Dynamic simulation of smart crank and connecting rod mechanism [J]. Journal of Harbin University of Commerce: Natural Sciences Edition, 2002, 18(3): 278~281. (in Chinese)
- 李潜, 施卫东, 郭仁惠. 基于有限元的污水泵轴疲劳可靠性分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(12): 208~211.
- Perillo M, Primavera V, Bonello G, et al. Structural dynamic response of a track chain complete undercarriage system using virtual proving ground approach [C] // 10th International LS-DYNA User's Conference, Dearborn, USA, 2008.
- Yoo W S, Kim K N, Kim H W. Developments of multibody system dynamics: computer simulation and experiments [J]. Multibody System Dynamics, 2007, 18: 35~58.
- Hallquist J O. LS-DYNA theory manual [M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2006.
- 郭毅之, 金先龙, 丁峻宏, 等. 并行数值仿真技术在盾构隧道地震响应分析中的应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2005, 13(1): 43~50.
Guo Yizhi, Jin Xianlong, Ding Junhong, et al. Parallel numerical simulation techniques in seismic response analysis of shield tunnel [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2005, 13(1): 43~50. (in Chinese)
- 周传月, 郑红霞, 罗慧强, 等. MSC. Fatigue 疲劳分析应用与实例 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- 刘献栋, 曾小芳, 单颖春. 基于试验场实测应变的车辆下摆臂疲劳寿命分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5): 34~38.
Liu Xiandong, Zeng Xiaofang, Shan Yingchun. Fatigue life analysis of vehicles lower suspension arm based on strain signal measured in proving ground [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 34~38. (in Chinese)

(上接第 226 页)

- 西岡雅夫. 円筒カムの工具径補正と補正誤差[J]. 日本機械学会論文集: C編, 2003, 562(12): 3403~3409.
Nishioka M. Tool diameter offset and the offset error of cylindrical cam [J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers 69-C, 2003, 562(12): 3403~3409. (in Japanese)
- Zhang Yitong, Lu Ling, Yin Mingfu. Optimal control principle of profile errors for machining of cylinder CAM [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1997, 10(3): 176~194.
- 葛荣雨, 冯显英. 弧面凸轮非等径侧铣刀位计算与 GA 优化[J]. 农业机械学报, 2007, 38(10): 132~135.
Ge Rongyu, Feng Xianying. Calculation of cutter position for unequal diameter milling of globoidal cam [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(10): 132~135. (in Chinese)
- 尹明富, 赵镇宏. 弧面分度凸轮单侧面加工原理及刀位控制方法研究[J]. 中国机械工程, 2005, 16(2): 127~130.
Yin Mingfu, Zhao Zhenhong. Study on one-side machining principle and tool path control method of the globoidal cam [J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(2): 127~130. (in Chinese)
- 苏金明, 阮沈勇. MATLAB 工程数学 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.