

文章编号: 1000-8055(2007)07-1184-06

基于 RBF 网络的质量矩导弹姿态控制

秦 莉, 杨 明, 郭 庆

(哈尔滨工业大学 控制与仿真中心, 黑龙江 150001)

摘 要: 研究了三轴稳定质量矩导弹姿态控制问题. 建立了内部带有 3 个可移动滑块的数学模型. 利用 RBF(radial basis function) 网络的快速自学习、自适应特性, 作为被控对象的模型, 不断调整 PID 控制器的参数, 协调控制滑块位置, 从而改变导弹的飞行姿态. 最后讨论了滑块运动特性对系统性能的影响并对系统稳定性进行了分析. 仿真结果表明该控制律在保证系统稳定的情况下有效地实现导弹的姿态调整, 并且提高了系统的动态响应品质.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 质量矩; 滑块位置; 姿态控制; RBF

中图分类号: V448. 23

文献标识码: A

Moving-mass attitude control system based on RBF networks

QIN Li, YANG Ming, GUO Qing

(Control and Simulation Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The ability of moving-mass attitude control system to control a vehicle with three axial stabilization in intra-atmospheric space is investigated. And general nonlinear motion equations with three internal moving masses are provided. Utilizing on the fast self-learning and adaptive capacities of RBF (radial basis function) networks, use them as the identification of the object under control to tune the PID (proportional integral differential) controller's parameters. The masses are positioned independently to generate modest attitude corrections for the vehicle. Finally, the influence of moving masses' motion on the system performance is discussed and the system stability is analyzed. Simulation results show that the system stabilization can be ensured while effective attitude adjustment for the vehicle is effected and at the same time the system's dynamic performances are improved.

Key words: aerospace propulsion system; moving mass; moving mass position; attitude control; RBF (radial basis function)

随着人们对导弹运动机动能力要求的不断提高, 以及针对传统控制方式的固有不足, 变质心控制系统正受到越来越多的关注^[1-3], 其不仅应用于旋转导弹和飞弹布撒器, 以及潜艇和水下运载器的控制, 另外在中低速飞行器、高超声速飞行器等诸多领域都有广阔的应用前景.

与传统的导弹控制机理不同, 质量矩控制的基本原理是通过调整内部滑块的位置来改变系统

质心与气动压心的相对位移, 利用产生的附加气动配平力矩或弹体惯量主轴的偏移来改变导弹的飞行姿态, 从而达到导弹的机动控制. 设计上的优点^[4-5]主要有: 执行机构在弹头内部, 可以使弹头设计具备良好的气动外形; 无需解决控制机构的高温烧灼问题; 利用弹头所受的空气动力及其力矩对姿态和轨迹进行实时修正, 只需微调质心位置, 就可以获得较大的控制力和控制力矩, 节约了

收稿日期: 2006-06-16; 修订日期: 2007-03-10

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60434010); 黑龙江省杰出青年基金(JC200606)

作者简介: 秦莉(1981-), 女, 河南焦作人, 博士研究生, 研究方向为飞行器制导与控制.

燃料消耗.

本文采用三轴稳定质量矩导弹, 三个轴上的滑块相互配合进行姿态控制. 但是由于系统是一个具有非线性和模型不确定性的多变量时变系统, 各通道间存在强烈的动力学耦合. 该系统要解决的问题就是如何协调控制三个滑块相对于弹壳质心的位置来满足需用控制力矩的不断变化. 为此, 本文在考虑滑块运动速度和加速度限制的基础上, 采用了基于 RBF^[6] 网络整定的 PID 控制方式. 仿真结果表明该方法能使弹体姿态快速跟踪期望姿态, 并满足一定的动态和稳态性能要求.

1 姿态控制问题的数学描述

为实现姿态的快速机动控制, 最大限度的减少控制耦合, 设计一个滑块安装在弹壳体坐标系的纵轴上, 其余两个安装在弹尾的径向平面内的法线和侧向方向, 并通过弹壳的轴线, 如图 1 所示.

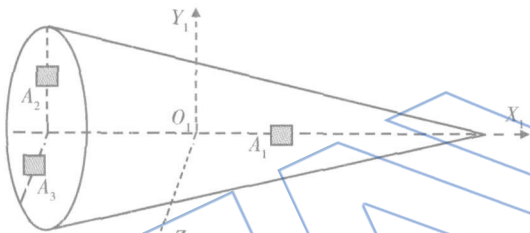


图 1 滑块布局示意图

Fig. 1 Three axial stabilization vehicle with three moving masses

滑块质量: 轴向滑块 m_1 、径向(Y 向) 滑块 m_2 、径向(Z 向) 滑块 m_3 ; 弹壳体质量: m ; 全弹质量: $m_T = m + m_1 + m_2 + m_3$, $\mu_i = m_i / (1 - m_i / m_T)$, $\mu_{ij} = m_i m_j / m_T$ ($i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3$); 滑块各自导轨中心在弹壳体系中的水平偏移量为: a, b, c ; 系统相对于质心系的瞬时转动惯性张量阵为 I_c .

当把弹体视为刚体时, 其绕质心转动的动力学方程为

$$\frac{dH}{dt} = \sum M \tag{1}$$

其中 $\sum M$ 是作用在弹体上的外力对质量矩导弹质心的力矩总矢量. 由于质量矩导弹在大气层内飞行, 只受到重力和空气动力作用, 且重力作用在弹体系统质心处, 重力产生的力矩为零. 故 $\sum M$ 即为空气动力矩. H 是弹体对质心的绝对动量矩.

根据多刚体动力学知识分析可知, 对于由滑

块和弹壳组成的多刚体系统来说, 关于系统质心的绝对动量矩可以表示为

$$H = I_c \cdot \omega + \sum_{i=1}^3 \mu_i r_{A_i/O_1}^c \times \dot{r}_{A_i/O_1}^c - \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i+1}^3 \mu_{ij} (r_{A_i/O_1}^c \times \dot{r}_{A_j/O_1}^c + r_{A_j/O_1}^c \times \dot{r}_{A_i/O_1}^c) \tag{2}$$

式中 $r_{A_i/O_1}^c, \dot{r}_{A_i/O_1}^c$ 分别为第 A_i 滑块相对于弹壳质心的相对位移和相对速度在质心系中分量.

弹体质心坐标系是动坐标系, 根据动量矩定理可得绕质心系统动力学方程为

$$\begin{cases} M_x = I_{11} \dot{\omega}_x + I_{12} \dot{\omega}_y + I_{13} \dot{\omega}_z + M_1 \\ M_y = I_{12} \dot{\omega}_x + I_{22} \dot{\omega}_y + I_{23} \dot{\omega}_z + M_2 \\ M_z = I_{13} \dot{\omega}_x + I_{23} \dot{\omega}_y + I_{33} \dot{\omega}_z + M_3 \end{cases} \tag{3}$$

其中 M_x, M_y 和 M_z 为作用在系统质心上的外力矩在三个坐标轴上的分量, 对系统的作用和气动

力矩对系统的作用等效. M_1, M_2 和 M_3 是由系统耦合产生的附加力矩, 分别称为滚转附加力矩、偏航附加力矩和俯仰附加力矩.

2 姿态控制规律设计

2.1 姿态控制规律

针对质量矩导弹的数学模型, 姿态控制规律设计的难点在于如何规划滑块的运动. 此问题可以从两个角度进行分析, 一是控制优先级问题, 另外是滑块之间相互匹配问题. 由于滚转角和滚转角速度对整个系统的影响较大, 因此一般对滚转通道的优先级最高; 对俯仰通道和偏航通道两者优先级相同. 后一个问题主要涉及到如何考虑各个姿态控制通道对滑块位置的影响. 由于每个滑块的位置都对两个姿态控制通道产生影响, 本文把两个姿态控制通道对滑块位置的影响放在一起进行设计, 设计思路如下, 判断是否需要滚转控制:

(1) 如果需要, 则建立初始攻角或侧滑角, 使升力、侧向力不为零; 并且使弹尾径向滑块 A_2 和 A_3 相互配合, 实现对滚转姿态的控制; 最后轴向滑块要位于导轨的前端.

(2) 如果不需要, 则判断俯仰和偏航的优先级

a) 若俯仰优先级大于偏航优先级, 则滑块 A_3 (控制 z) 的位置不变; 轴向滑块 A_1 和径向滑块 A_2 相互配合, 实现对俯仰姿态的控制; 且轴向滑块 A_1 位于压心的前端, 系统处于静稳定状态;

b) 若偏航优先级大于俯仰优先级, 则滑块 A_2 (控制 y) 的位置不变; 轴向滑块 A_1 和径向滑块 A_3 相互配合, 实现对偏航姿态的控制; 轴向滑块 A_1 位于压心的前端, 系统处于静稳定状态.

由于只能利用 3 个通道的姿态角和角速度,采用 PID 控制器形式确定控制优先级函数,三个方向上的等效力矩可以表示为

$$\begin{cases} M_r = k_1 \Delta \gamma + k_2 \Delta \omega_k \\ M_\phi = k_3 \Delta \Psi + k_4 \Delta \omega_\gamma \\ M_\delta = k_5 \Delta \delta + k_6 \Delta \omega_\delta \end{cases} \quad (4)$$

其中等效力矩 M_g , M_ϕ , 和 M_δ 分别为滚转、偏航和俯仰通道对当前姿态角与期望姿态角的偏差和偏差变化率的加权函数,主要用来表征控制优先级.对滑块位置的控制律设计如下

$$x_{A1} = (k_7 \Delta \Psi + k_8 \Delta \omega_\gamma) + (k_0 \Delta \delta + k_{10} \Delta \omega_\delta) + X \quad (5)$$

$$y_{A2} = (k_{11} \Delta \gamma + k_{12} \Delta \omega_k) + (k_{13} \Delta \delta + k_{14} \Delta \omega_\delta) \quad (6)$$

$$z_{A3} = (k_{15} \Delta \gamma + k_{16} \Delta \omega_k) + (k_{17} \Delta \Psi + k_{18} \Delta \omega_\gamma) \quad (7)$$

其中, X 为一固定偏移量; $k_1 \sim k_{18}$ 为控制器加权控制系数.

2.2 RBFNN+ PID 控制器设计

PID 控制器简单易实现,在工业过程中得到了广泛应用,利用 RBF(radial basis function)网络的快速自学习及自适应能力,本文设计了一种基于 RBF 网络整定的 PID 控制律来对姿态进行任意调整,同时提高了系统的动态响应品质.

质量矩导弹姿态控制系统的原理框图如图 2 所示.将系统的期望姿态角与实际姿态角的差值以及差值的变化率送入 PID 控制器,用神经网络作为被控对象的模型来在线调整 PID 控制器的参数,由 PID 控制器计算控制输出,再由执行机构予以执行,得到各滑块的实际移动位置.系统模型根据滑块的实际位置计算出新的系统姿态角,从而构成姿态控制回路.

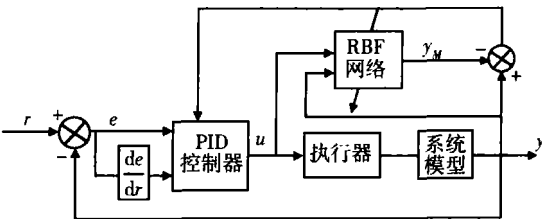


图 2 姿态控制系统原理框图

Fig.2 Diagram of attitude control system

基于 RBF 网络整定的 PID 控制系统结构如图 2 所示,由两部分构成:

(1) 经典的 PID 控制器,直接对被控对象进行闭环控制.

(2) RBF 辨识器(NNI),根据系统的运行状态,作为被控对象的模型在线调整 PID 控制器的参数,可获得较好的控制效果.

采用单隐层的 RBF 网络.网络结构如图 3 所示.

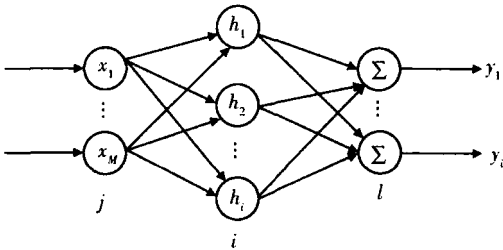


图 3 RBF 网络结构

Fig.3 Structure of RBF NN

网络的输入向量为 $\mathbf{x} = [x_1, x_2 \dots, x_n]^T$.网络输入层的输入为

$$O_j = x_j \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

输入层节点直接传递信号到隐含层,采用高斯激活函数,则隐含层第 i 个节点的输出为

$$h_i(x) = \exp(-\|x - \mathbf{m}_i\|^2 / \sigma^2) \quad (9)$$

其中, $\mathbf{m}_i$ 是第 i 个神经元的中心位置, $\mathbf{m}_i = [m_i^1, m_i^2, \dots, m_i^n]^T, i = 1, 2, \dots, q, q$ 为隐含层个数. σ 为节点 i 的基宽度.

隐含层到输出层实现线性映射,即

$$y_m(k) = \sum_{i=1}^q \omega_{li} h_i \quad (10)$$

其中 w_{li} 为隐层第 i 个节点至输出层第 l 个节点的权值.

将 PID 神经网络控制器与被控对象一起作为广义网络,训练的的目的是使性能指标函数在要求的限度内.性能指标函数为

$$J = \frac{1}{2} (y(k) - y_m(k))^2 \leq \varepsilon \quad (11)$$

将 RBF 网络的学习过程分为两个阶段.第一阶段采用经典的 k -均值聚类算法调整中心向量并确定基宽度.第二阶段采用有教师学习方式修正权值

$$\omega_{li}(k+1) = \omega_{li}(k) + \eta (y(k) - y_m(k)) h_i(x) / h^T \mathbf{h} \quad (12)$$

η 为学习率,取 $0 < \eta < 1. \mathbf{h} = [h_1(x) h_2(x) \dots h_q(x)]^T$.采用增量式 PID 控制器,控制误差为

$$e(k) = r(k) - y(k) \quad (13)$$

PID 控制器的三项输入为

$$c(1) = e(k) - e(k-1) \quad (14)$$

$$c(2) = e(k) \quad (15)$$

$$c(3) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \quad (16)$$

控制算法为

$$u(k) = u(k - 1) + \Delta u(k) \tag{17}$$

$$\Delta u(k) = k_p(e(k) - e(k - 1)) + k_i e(k) + k_d(e(k) - 2e(k - 1) + e(k - 2)) \tag{18}$$

神经网络整定指标为

$$E(k) = \frac{1}{2}e^2(k) \tag{19}$$

k_p, k_i, k_d 的调整采用梯度下降法

$$\Delta k_p = -\xi \frac{\partial E}{\partial k_p} = -\xi \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \Delta u} \frac{\partial \Delta u}{\partial k_p} = \xi_{\mathcal{E}}(k) \frac{\partial y}{\partial \Delta u} c(1) \tag{20}$$

$$\Delta k_i = -\xi \frac{\partial E}{\partial k_i} = -\xi \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \Delta u} \frac{\partial \Delta u}{\partial k_i} = \xi_{\mathcal{E}}(k) \frac{\partial y}{\partial \Delta u} c(2) \tag{21}$$

$$\Delta k_d = -\xi \frac{\partial E}{\partial k_d} = -\xi \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \Delta u} \frac{\partial \Delta u}{\partial k_d} = \xi_{\mathcal{E}}(k) \frac{\partial y}{\partial \Delta u} c(3) \tag{22}$$

式中, ξ 为学习率, $0 < \xi < 1$. $\frac{\partial y}{\partial \Delta u}$ 为被控对象的 Jacobian 信息(对象的输出对控制输入变化的灵敏度信息), 可通过神经网络的辨识得到. 具体形式为

$$\frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} \approx \frac{\partial y_m(k)}{\partial \Delta u(k)} \tag{23}$$

经过上述运算, 便可得到 PID 控制器的参数, 从而控制滑块的位置, 通过改变系统的质心位置, 使系统的姿态得到有效调整.

2.3 滑块运动特性对系统性能的影响

本文考虑了滑块的速度和加速度限制, 也就是说滑块需要一定的过渡时间才能到达期望位置, 这样就不能快速跟踪期望姿态和姿态角变化率, 可能造成较大的脱靶量. 因此滑块运动的快速性会对系统性能有很大的影响. 为了达到更加精确控制系统的目的, 期望滑块能够迅速到达指令位置, 中间过渡过程越短越好.

但是滑块的加速度越大, 速度变化也就越快, 转动惯量的变化率将变化明显. 同时加速度和速度还直接影响空气动力产生的附加力矩. 若附加力矩大于空气动力矩, 在公式(3)中占主要因素, 则可能影响系统的稳定性, 所以滑块的加速度不能太大, 过渡时间也不能太短.

综合考虑, 本文中三个滑块的加速度采用开关变化, 也是 Bang-Bang 控制曲线, 如图 4 所示.

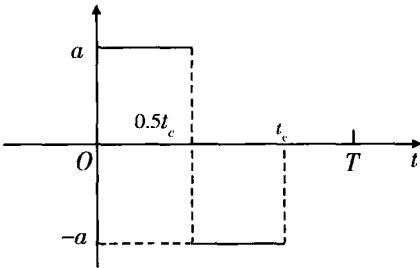


图 4 一个控制周期内加速度变化曲线

Fig. 4 Change of acceleration in a period

3 系统稳定性分析

对于质量矩导弹姿态控制系统, 由于各通道间存在强烈的耦合, 3 个滑块的运动位置、速度和加速度对姿态角、姿态角速度相互影响很大, 系统能控与否直接与滑块运动产生的空气动力矩及附加力矩的相对大小有关. 当气动力矩远大于附加力矩时, 可以很容易通过滑块的运动来实现对姿态的控制; 反之, 要设计出有效的滑块控制规律来实现姿态的控制就比较困难.

通过分析, 系统能控与否与导弹马赫数大小、压心位置的变化范围有很大的关系. 当导弹的速度衰减较快时, 系统的压心与弹体理论尖点的距离减小也较快, 而轴向滑块的运动使系统质心轴向的位置变化范围有限. 如果当系统在控制结束时, 滑块位于导轨的前端但压心与系统质心的相对位移大于零, 则系统就处于静不稳定状态, 即系统不可控.

压心与系统质心的相对位置可以分为三个区域:

- 1) 绝对稳定区域: 无论轴向滑块如何变化, 系统的质心一直位于压心的前端, 整个系统处于绝对静稳定状态;
- 2) 切换区域: 通过轴向滑块的变化, 能使系统在静稳定和静不稳定区域之间来回切换, 系统在此区间建立攻角和侧滑角;
- 3) 绝对不稳定区域: 无论轴向滑块怎样变化, 压心总是位于系统质心的前方, 系统总是处于静不稳定状态.

系统初始满足一定的马赫数, 处于静稳定状态, 纵向滑块位于导轨的前端, 径向滑块位于导轨的中心, 初始的攻角和侧滑角为 0, 通过滑块向后移动, 使系统切换到静不稳定状态, 通过改变径向滑块 A_2, A_3 的位置来获得较大的攻角、侧滑角; 进而通过调整滑块位置来实现对姿态的控制, 同时系统的攻角和侧滑角逐渐减少; 最后当控制结束时纵

向滑块移至导轨前端,系统处于静稳定状态.

4 仿真实验

假设质量矩拦截器初始姿态角 $\Psi = -10^\circ$, $\vartheta = 8^\circ$, $\gamma = 5^\circ$, 初始角速度 $\omega_x = \omega_y = \omega_z = 0^\circ/s$, 期望姿态角 $\Psi_d = 0^\circ$, $\vartheta_d = 0^\circ$, $\gamma_d = 0^\circ$, 期望角速度均为零. 控制步长取 10 ms, 仿真步长取 1 ms.

表 1 轴向与径向滑块不同响应时间运动参数表

Table 1 Simulation result based on response time of radial masses unchanged

T_{A1}/ms	T_{A2}/ms	T_{A3}/ms	$\Delta x/\text{m}$	$\Delta y/\text{m}$	$\Delta z/\text{m}$	$\Delta R/\text{m}$
5	9	9	-0.513	0.669	1.225	1.487
	8	8	-0.324	0.338	0.668	0.816
	6	6	0.568	-0.638	0.325	0.914
	3	3	-0.299	-0.479	0.485	0.744

下面以轴向滑块响应时间为 5 ms, 径向滑块响应时间均为 3 ms 进行仿真.

将经过神经网络调整过参数的 PID 控制器的控制效果同未经参数调整的姿态控制偏差进行比较, 如图 5 所示, 其中的实线表示经过参数调整, 虚线表示未经参数调整, 从图可以明显看出, 经过参数调整过的控制器可以快速而平稳的将姿态到期望值.

图 6 表明在初始阶段, 由于弹体处于静不稳定状态, 需要迅速建立攻角和侧滑角, 之后经过三个滑块的协调控制, 弹体变为静稳定, 攻角和侧滑角的逐渐减小.

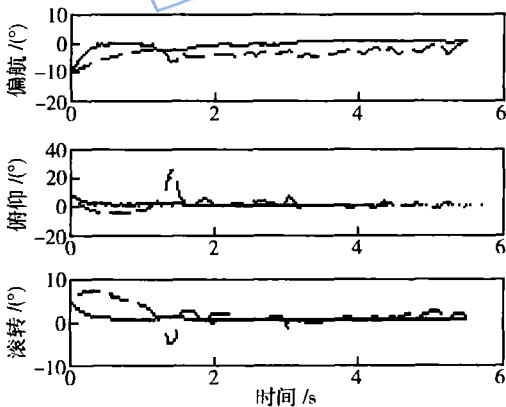


图 5 姿态角偏差变化曲线

Fig. 5 Attitude error curves

5 结 论

本文在建立三轴稳定质量矩导弹姿态运动模

轴向滑块最大偏移量取 0.1 m, 按照图 4 所示曲线改变轴向滑块的加速度, 固定轴向滑块的响应时长, 从表 1 中可以看出系统最终所能达到的脱靶量, 只要选择合适的滑块响应时间参数, 当滑块运动存在一定位置延时, 通过相互配合也能达到脱靶量的精度范围以内. 所以合理选择滑块的运动参数对系统精确制导具有重要意义.

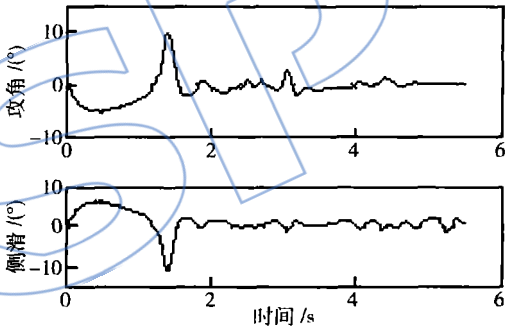


图 6 攻角、侧滑角曲线

Fig. 6 Angle of attack and sideslip angle curves

型的基础上, 提出了一种基于 RBF 网络整定的姿态控制规律. 以期望姿态角与实际姿态角的误差及误差变化率作为 PID 控制器的输入, 以神经网络作为被控对象的模型, 对 PID 控制器的参数进行自适应调整, 从而对三个滑块的位置进行协调控制. 并讨论了滑块运动特性对系统性能的影响. 实验结果表明, 采用这种控制律可以对弹体姿态进行任意调整, 提高了系统的动态响应品质并能保证系统的静稳定性.

参考文献:

[1] Menon P K, Sweriduk G D, Ohlmeyer E J. Integrated guidance and control of moving mass actuated kinetic warheads [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2004, 27(1): 118 126.

[2] Robinet C R D, Rainwater B. Moving mass trim control for aerospace vehicles [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1996, 19(5): 1064 1079.

[3] Ly shevski S E. Space transformation method in control of

agile Interceptors and missile with advanced microelectro-
mechanical actuators[C] // Proceeding of the 42nd IEEE
Conference on Decision and Control. Maui, Hawaii: USA.
2003: 543-547.

[4] Woolsey C A, Leonard N E. Moving mass control for un-
derwater vehicles[C] // Proceedings of the American Con-
trol Conference. Anchorage: AK May 8-10, 2002: 2824-
2829.

[5] Petsopoulos T, Regan F J, Barlow J. Moving-mass roll con-
trol system for fixed-trim re-entry vehicle[J]. Journal of
Spacecraft and Rockets, 1996, 33(1) : 54-60.

[6] 徐丽娜. 神经网络控制[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003:
203-212.

