

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2013.01.012

# 改进电压模型的异步电机矢量控制系统仿真

黄 钦, 李祥飞, 李文锋, 马 箭

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘 要:** 针对电压模型在低速区存在的缺陷, 采用一种改进型电压模型, 该模型由电压模型和电流模型有机地组合而成, 扩展了电压模型的调速范围。设计了基于改进电压模型的矢量控制系统动态仿真模型, 在低速区和高速区改变定子电阻进行动态仿真, 并对仿真结果进行分析, 仿真结果验证了该方法的正确性、合理性。

**关键词:** 异步电机; 电压模型; 磁链观测器; 矢量控制

中图分类号: TM343

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2013)01-0053-05

## Simulation of Asynchronous Motor Vector Control System Based on Improved Voltage Model

Huang Qin, Li Xiangfei, Li Wenfeng, Ma Jian

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** In response to the disadvantage of voltage model in the low speed region, an improved voltage model is proposed. The model is composed of voltage model and current model and extends the speed regulating range. The vector control system dynamic simulation model is designed based on the improved voltage model system, and a dynamic simulation is performed in the low-speed area and high-speed area by changing the stator resistance. The simulation results verify the correctness and rationality of the method.

**Keywords:** asynchronous motor; voltage model; flux observer; vector control

## 0 引言

在磁场定向控制或者直接转矩控制的异步电机驱动系统中, 准确的磁链观测是提高系统性能的关键<sup>[1]</sup>, 然而, 目前使用广泛的电流模型、电压模型和基于两者在调速范围内互相切换的混合模型都存在着不同程度的缺陷, 为了减小估计误差, 必须消除

缺陷对估计值的影响。

由于电流模型对电机转子参数的敏感性, 将会增加磁链观测的不准确性程度, 故一般只应用于低速场合, 实际中, 电压模型比电流模型应用广泛, 但存在着 2 个缺点<sup>[2]</sup>: 一是低速场合对定子电阻变化较敏感。在低速区时, 由于定子电阻压降的存在, 使得定子磁链的观测精度下降, 系统不能有效运行;

收稿日期: 2012-11-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61273157), 湖南省教育厅青年科研基金资助项目(09B25), 国家能源局基金资助项目(国能科技[2011]276号)

作者简介: 黄 钦(1988-), 女, 湖南常德人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电力电子自动控制系统,

E-mail: hxb5419@163.com

二是模型中对反电动势的纯积分环节易引起观测误差。由于纯积分环节的存在，会带来直流漂移误差和积分初值误差，这些误差将影响定子磁链的幅值，导致定子磁链产生畸变且加剧转矩脉动<sup>[3]</sup>。因此电流和电压模型的调速范围都比较窄。

为了消除估计误差并扩展磁链观测器的调速区，本文采用一种改进电压模型的磁链观测器，它是由开环的电流模型和自适应电压模型组成的，在低速区时，使用电流模型对电压模型进行修正，引入经PI作用得到的补偿电压来消除纯积分环节和定子电阻参数误差带来的影响<sup>[4]</sup>，取代传统矢量控制系统中的电流模型或电压模型，能够实现两种模型的平滑切换，因此在较宽的速度范围内具有很好的磁链估计效果。在Matlab实验平台上对此系统进行了仿真验证，仿真结果表明，改进电压模型的磁链观测器在整个调速范围内都能获得理想的效果，因而具有广泛的工程应用价值。

### 1 转子磁链定向异步电机模型

按转子磁链定向时其约束条件是 $\psi_{rT}=0, \psi_{rM}=\psi_r$ 。

$$\begin{cases} \psi_{rM}=\psi_r=L_m i_{sM}+L_r i_{rM}, \\ \psi_{rT}=0=L_m i_{sT}+L_r i_{rT}, \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\psi_{rM}$ 和 $\psi_{rT}$ 为转子磁链在M-T轴上的分量；

$i_{sM}, i_{sT}, i_{rM}, i_{rT}$ 分别为定子电流、转子电流在同步旋转坐标系M-T轴上的分量；

$L_r, L_m$ 为转子电感和定转子之间的互感。

三相异步电机在两相同步旋转坐标系上的电磁转矩方程为

$$T_e=n_p L_m (i_{sT} i_{rM} - i_{sM} i_{rT}) \quad (2)$$

式中 $n_p$ 为极对数。

将式(1)代入式(2)得：

$$T_e=n_p \frac{L_m}{L_r} \psi_r i_{sT}, \quad (3)$$

$$\psi_r = \frac{L_m}{T_r p + 1} i_{sM}, \quad (4)$$

式中： $T_r$ 为转子电路的时间常数， $T_r=L_r/R_r$ ；

$p$ 为微分符号， $p=d/dt$ 。

$$i_{sM} = -\frac{L_r}{L_m} i_{rT} = \frac{\Delta\omega T_r}{L_m} \psi_r = \frac{T_r \psi_r}{L_m} \Delta\omega, \quad (5)$$

式中 $\Delta\omega$ 为转差转速。

由式(5)可以得到转差角速度

$$\Delta\omega = \frac{i_{sT} L_m}{T_r \psi_r}, \quad (6)$$

$$\theta = \int \omega_s dt = \int (\Delta\omega + \omega_r) dt, \quad (7)$$

式中： $\omega_s$ 和 $\omega_r$ 分别为同步转速和转子实际转速；

$\theta$ 为M轴与固定坐标系 $\alpha$ 轴的夹角。

### 2 磁链观测器

图1为改进电压模型的磁链观测器，电流模型作为隐含的给定，在低速区时可以提供比较准确的值，电压模型则有比较宽的调速范围，通过合理的选择闭环特征值就能实现两模型的平滑切换，此观测器有效地结合了两者在不同速度段的优势，适用于较宽速度范围内的转子磁链观测<sup>[5]</sup>。

#### 2.1 改进电压模型磁链观测器原理框图

根据以上分析，控制思路如图1所示。

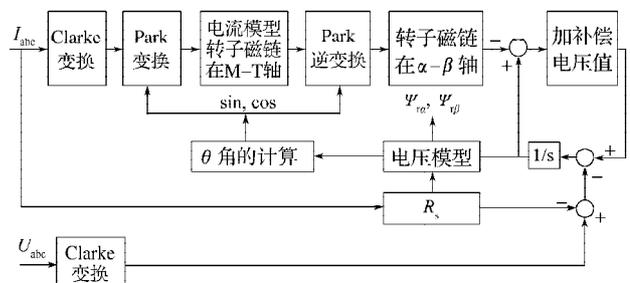


图1 改进模型框图

Fig. 1 The block diagram of improved model

#### 2.2 电压模型

电压模型法<sup>[6-7]</sup>是在 $\alpha-\beta$ 坐标系下根据定子电压、电流信号观测转子磁链。

电压补偿公式

$$\begin{cases} \psi_{s\alpha}^u = \int (u_{s\alpha} - i_{s\alpha} R_s - \Delta u_{s\alpha}) dt, \\ \psi_{s\beta}^u = \int (u_{s\beta} - i_{s\beta} R_s - \Delta u_{s\beta}) dt, \end{cases} \quad (8)$$

式中： $\psi_{s\alpha}^u, \psi_{s\beta}^u$ 为电压模型里定子磁链在坐标系 $\alpha-\beta$ 轴上的分量；

$u_{s\alpha}, u_{s\beta}$ 为定子电压在静止坐标系 $\alpha-\beta$ 轴上的分量；

$\Delta u_{s\alpha}, \Delta u_{s\beta}$ 为定子电压在 $\alpha-\beta$ 轴上的经过PI环节计算出的电压补偿值；

$i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ 分别为定子电流在静止坐标系 $\alpha-\beta$ 轴上的分量；

$R_s$ 为定子电阻。

PI调节公式如式(9)所示：

$$\begin{cases} \Delta u_{s\alpha} = k_p (\psi_{s\alpha}^u - \psi_{s\alpha}^i) + k_i \int (\psi_{s\alpha}^u - \psi_{s\alpha}^i) dt, \\ \Delta u_{s\beta} = k_p (\psi_{s\beta}^u - \psi_{s\beta}^i) + k_i \int (\psi_{s\beta}^u - \psi_{s\beta}^i) dt, \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $\psi_{s\alpha}^i, \psi_{s\beta}^i$  为电流模型里定子磁链在  $\alpha$ - $\beta$  轴上的分量;  $k_p, k_i$  为 PI 里的比例系数和积分系数。

由定子磁链  $\psi_{s\alpha}^u, \psi_{s\beta}^u$  计算的  $\alpha$ - $\beta$  坐标系下的转子磁链为

$$\begin{cases} \psi_{r\alpha}^u = -\frac{L_s L_r}{L_m} \sigma i_{s\alpha}^u + \frac{L_r}{L_m} \psi_{s\alpha}^u, \\ \psi_{r\beta}^u = -\frac{L_s L_r}{L_m} \sigma i_{s\beta}^u + \frac{L_r}{L_m} \psi_{s\beta}^u, \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\psi_{r\alpha}^u, \psi_{r\beta}^u$  为电压模型里转子磁链在坐标系  $\alpha$ - $\beta$  轴上的分量;

$L_s$  为定子电感;

$\sigma$  为漏感系数,  $\sigma = 1 - L_m^2 / L_s L_r$ 。

由式 (8)~(10) 可以看出, 改进的电压模型里增加了一个 PI 环节, 使偏离实际值的电压得到补偿, 并快速的跟上实际电压值。

### 2.3 电流模型

同步旋转坐标系下转子磁链:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{rM}^i}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{sM}^i - \frac{1}{T_r} \psi_{rM}^i + (\omega_s - \omega_r) \psi_{rT}^i, \\ \frac{d\psi_{rT}^i}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{sT}^i - \frac{1}{T_r} \psi_{rT}^i + (\omega_s - \omega_r) \psi_{rM}^i, \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\psi_{rM}^i, \psi_{rT}^i$  为电流模型里转子磁链在  $M$ - $T$  轴上的分量。

由于其约束条件  $\psi_{rT} = 0, \psi_{rM} = \psi_r$ , 所以式 (11) 可以化为:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{rM}^i}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{sM}^i - \frac{1}{T_r} \psi_{rM}^i, \\ \psi_{rT}^i = 0; \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \psi_{s\alpha}^i = L_s i_{s\alpha}^i + L_m i_{r\alpha}^i = L_s \sigma i_{s\alpha}^i + \frac{L_m}{L_r} \psi_{r\alpha}^i, \\ \psi_{s\beta}^i = L_s i_{s\beta}^i + L_m i_{r\beta}^i = L_s \sigma i_{s\beta}^i + \frac{L_m}{L_r} \psi_{r\beta}^i \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$  分别为转子电流在静止坐标系  $\alpha$ - $\beta$  两个轴上的分量;

$\psi_{s\alpha}^i, \psi_{s\beta}^i$  分别为电流模型里转子磁链在静止坐标系  $\alpha$ - $\beta$  两个轴上的分量。

## 3 仿真模型搭建

### 3.1 转子磁场定向模型

在矢量控制中, 最重要的就是坐标变换, 然而由静止坐标到旋转坐标的变换需要用到转子的旋转角

度, 所以在此就要求能计算出转子的旋转角度, 根据给出的式 (6)~(8) 就能得出角度, 在 simulink 中搭建如图 2 所示的模型。

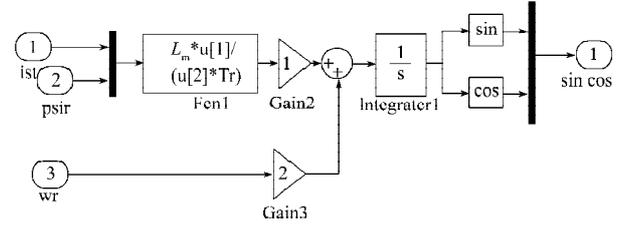


图2 计算转子角度模型

Fig. 2 The model for rotor angle calculation

### 3.2 系统控制框图

系统控制框图是由很多子系统构建的 (如图 3 所示), 有按照图 1 的原理框图搭建的改进电压模型磁链观测器、有如图 2 转子角度计算的子系统、SVPWM 模块, 还有一些坐标变换子模块等。

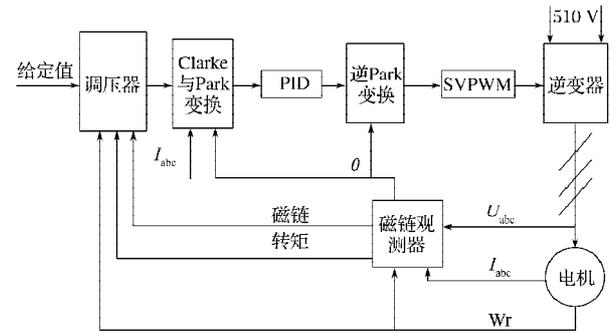


图3 仿真系统图

Fig. 3 The diagram of simulation system

## 4 仿真结果及分析

根据建立的异步电机双闭环矢量控制模型做仿真测试, 实验异步电机参数为<sup>[8]</sup>: 电动机额定电压为 380 V, 额定功率为 50 Hz; 极对数  $n_p=2$ ;  $R_r=0.816 \Omega$ ;  $R_s=0.435 \Omega$ ;  $L_{1s}=0.002 \text{ mH}$ ;  $L_{1r}=0.002 \text{ mH}$ ;  $L_m=0.069 \text{ mH}$ ;  $J=0.065 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ; 逆变器直流电源为 510V。

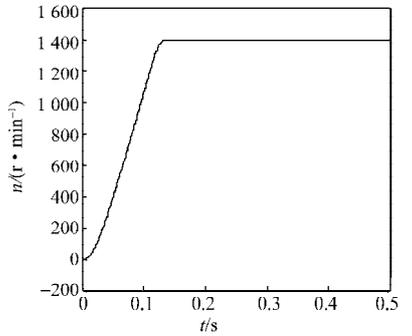
为了验证所设计的改进电压模型磁链观测器双闭环异步电机矢量控制系统仿真模型的静、动态性能, 系统空载起动, 待进入稳态后, 在  $t=0.4 \text{ s}$  时突加负载转矩  $T_e=30 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 给定磁链 0.9, 通过 PI 调节来获得给定转矩, 可以得到系统转速、转矩和磁链观测器输出磁链等波形。

### 4.1 高速区仿真结果

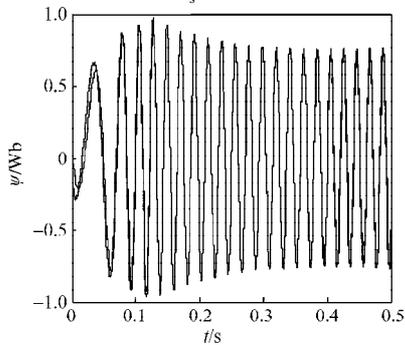
当给定转速为 1 400 rad/min 时, 改变定子电阻值所得到的波形如图 4 所示。

由于仿真中直接给出定子磁链的幅值, 所以图

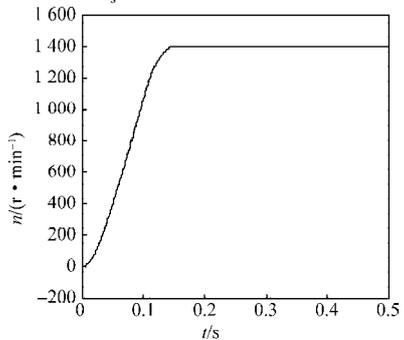
4b 和图 4d 的波形从大变小有一个弱磁过程。由图 4 可看出, 转速上升较前者缓慢, 在 0.4 s 突加负载时, 转速有微小的变化, 由此表明改进后的磁链观测器所得的观测值对电机参数的依赖程度非常小, 在精度要求不高的场合, 可以忽略。



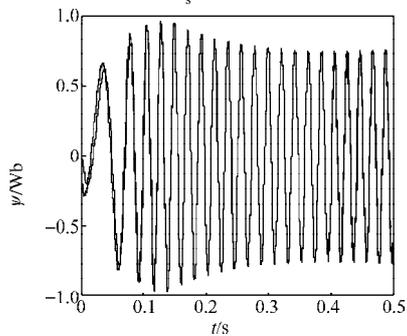
a)  $R_s$  时的转速



b)  $R_s$  时的观测与实际磁链



c)  $3R_s$  时的转速

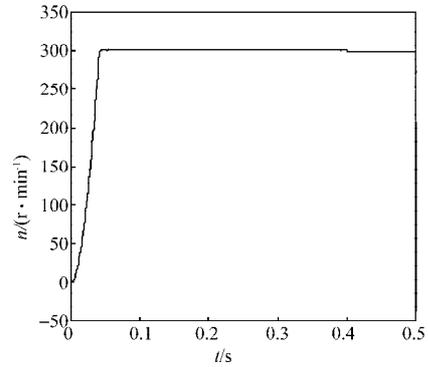


d)  $3R_s$  时的观测与实际磁链

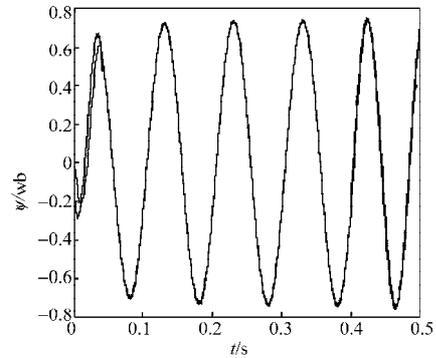
图 4 给定转速 1 400 rad/min 的仿真结果  
Fig. 4 The simulation results of the given speed 1 400 rad/min

#### 4.2 低速区仿真结果

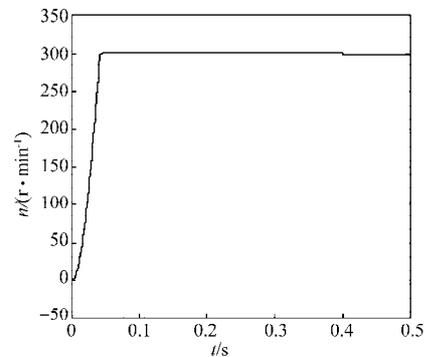
当给定转速为 300 rad/min 时, 改变定子电阻值所得到的波形如图 5 所示。



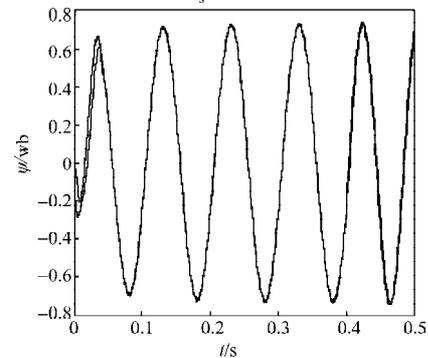
a)  $R_s$  时的转速



b)  $R_s$  时的观测与实际磁链



c)  $3R_s$  时的转速



d)  $3R_s$  时的观测与实际磁链

图 5 给定转速 300 rad/min 的仿真结果  
Fig. 5 The simulation results of the given speed 300 rad/min

从图5得到:在低速运行时,增大定子电阻对观测值以及系统都没有影响。

从图4a、图5a中,可以看出无论是低速区还是高速区转速上升的速度都比较快,证明响应快,且超调量也很小,输出转速与转速给定指令基本相同,电机的跟随性好。

从图4b和图5b的比较可以看出,改进电压模型磁链观测器获得的转子磁链能够很好地逼近真实磁链,对电机参数发生变化时,取得的鲁棒性较好,减少了传统电压模型中存在的问题,说明了模型建立的正确性。

由在低速和高速区仿真结果可以判断改进后的磁链观测器对电机参数敏感性不高。克服了电流模型和电压模型的缺点,比电流模型和电压模型有了更广的调速范围,因此应用领域也更加广泛。

## 5 结语

本文主要采用一种新的电压模型磁链观测方法,把电流模型和电压模型相结合,利用电压补偿、PI调节推导出磁链观测器的数学公式,通过转矩内环、转速和磁链外环的矢量控制技术的应用,搭建出了控制系统的仿真模型。仿真结果表明:该方法在整个调速范围内都有较好的稳定性,具有很好的辨识效果。对电机动态性能要求不太高时,该方法具有很好的现实意义和工程实践应用价值。

### 参考文献:

[1] 张春朋,林 飞,陈寿孙.改进U-I法异步电机转子磁链估计器[J].中国电机工程学报,2004,24(5):126-129.  
Zhang Chunpeng, Lin Fei, Chen Shousun. Improved U-I Model Rotor Flux Estimator For Induction Motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 126-129.

[2] 孙大南,林文立,刁利军,等.改进型感应电机电压模型磁链观测器设计[J].北京交通大学学报,2011,35(2):94-99.  
Sun Da'nan, Lin Wenli, Diao Lijun, et al. Improved Voltage Model Flux Observer Design of Induction Machine [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2011, 35(2): 94-99.

[3] 李 浩,谭国俊,方静欢,等.基于全阶闭环转子磁链观测器矢量控制系统[J].电力电子技术,2008,42(11):30-31.  
Li Hao, Tan Guojun, Fang Jinghuan, et al. Vector Control System Based on a Full-Order Closed-Loop Rotor Flux Estimator[J]. Power Electronics, 2008, 42(11): 30-31.

[4] 李 涛.感应电机无速度传感器矢量控制系统研究[D].武汉:华中科技大学,2007.  
Li Tao. The Research on Speed Sensorless Vector Controlled Induction Motor Drives[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.

[5] 罗金盛,谭国俊.一种全阶转子磁链观测器的仿真模型的建立[J].华侨大学学报:自然科学版,2011,32(1):30-34.  
Luo Jinsheng, Tan Guojun. Establishment of a Simulation Model for a Full-Order Rotor Flux Observer[J]. Journal of Huaqiao University: Natural Science, 2011, 32(1): 30-34.

[6] 林贞发,游林儒,庄桂玉,等.异步电机矢量控制系统仿真与应用[J].微电机,2010,43(4):30-33.  
Lin Zhenfa, You Linru, Zhuang Guiyu, et al. Simulation and Application on Vector Control System of Induction Motors[J]. Micro motor, 2010, 43(4): 30-33.

[7] 宋文祥,尹 赟.基于改进电压模型的感应电机低速发电运行稳定性研究[J].中国电机工程学报,2012,32(12):79-82.  
Song Wenxiang, Yin Yun. Studies on Regenerating-Mode Stabilization of Induction Motors Based on Improved Voltage Model[J]. Proceeding of the CSEE, 2012, 32(12): 79-82.

[8] 洪乃刚.电力电子和电力拖动系统的MATLAB仿真[M].北京:机械工业出版社,2006:18042-18050.  
Hong Naigang. Power Electronics and Electric Drive System in MATLAB Simulation[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2006: 18042-18050.

[9] 纪志成,薛 花,沈艳霞.基于Matlab交流异步电机矢量控制系统的仿真建模[J].系统仿真学报,2004,16(3):384-389.  
Ji Zhicheng, Xue Hua, Shen Yanxia. Modeling and Simulation of AC Asynchronism Motor Vector Control System Based on Matlab[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(3): 384-389.

[10] 韩会山,陈 龙,程德芳.异步电机矢量控制系统的设计及仿真研究[J].计算机仿真,2012,29(2):400-403.  
Han Huishan, Chen Long, Chen Defang. Design and Simulation for Vector Control System of AC Motor Based on IMC[J]. Computer Simulation, 2012, 29(2): 400-403.

[11] 杨文强,贾正春.异步电机转子磁链观测器的准确度分析与设计[J].华中科技大学学报,2001,29(2):11-13.  
Yang Wenqiang, Jia Zhengchun. The Accuracy Evaluation and Design for Rotor Flux Observers of Induction Motor [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2001, 29(2): 11-13.

(责任编辑:申 剑)