

热轧带钢卷取温度联合控制算法设计与仿真

彭力, 李彦荣

PENG Li, LI Yan-rong

江南大学 通信与控制学院 控制研究中心, 江苏 无锡 214122

Control Science and Engineering Research Center, Southern Yangtze University, Wuxi, Jiangsu 214122, China

PENG Li, LI Yan-rong. Hot steel strip coiling temperature combining control and simulation system. *Computer Engineering and Applications*, 2007, 43(27): 222-225.

Abstract: In a hot steel strip production line, the coiling temperature control is critical for strip quality. In this paper, the coiling temperature control of a typical steel strip mill is investigated. A simplified dynamic model is introduced, based on which a cooling control scheme with combined feedforward, feedback and adaptive algorithms is developed. Simulations with a model validated using actual plant data are conducted, and the results have confirmed the effectiveness of the proposed control method.

Key words: hot steel strip coiling temperature; combining control algorithms; simulation system

摘要: 在热轧带钢生产线上, 卷取温度的精确控制对带钢质量是至关重要的。详细研究了一个实际的热轧带钢卷取温度控制系统。建立了一种简化的动态控制模型, 并用一个改进的遗传算法在线调整模型的参数。基于该模型提出了一个包括冷却反馈控制、前馈及自适应联合控制算法的控制器。通过建立一个更精确的仿真系统, 达到指导现场生产的目的。实践结果证明提出的控制方法是有效的, 仿真系统也具有较大的实际意义。

关键词: 热轧带钢卷取温度; 联合控制算法; 系统仿真

文章编号: 1002-8331(2007)27-0222-04 文献标识码: A 中图分类号: TP391

在热轧带钢生产过程当中, 热轧带钢卷取温度是影响成品带钢性能的重要工艺参数之一, 卷取温度的精确控制对带钢质量是至关重要的。在热轧生产中, 为保证产品具有良好的性能, 采用层流冷却装置对热轧后的板带进行冷却控制。由于在冷却过程中带钢的温度不能在线连续检测, 为保证热轧板带具有良好的性能, 热轧生产利用喷水系统对板带进行轧后层流冷却处理, 喷水系统的设定是层流冷却过程控制的关键。层流冷却过程具有强非线性、分布参数和时变特性, 难以建立精确的数学模型。建立一套层流冷却过程仿真系统为新产品的开发提供必要的方法, 通过建立一个更精确的仿真系统, 达到指导现场生产的目的, 因此具有很大的现实意义。

1 层流冷却工艺背景

在一个热轧钢厂(图1), 钢水从炼钢炉出来经过连铸、粗轧、精轧, 然后变成大约一千公尺带钢进入层流冷却区(Cooling Section, CS), 最后由卷取机卷取。

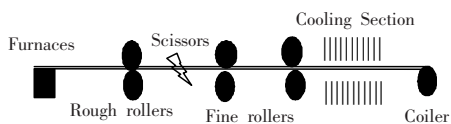


图1 热轧钢厂里CS的位置

带钢卷取温度(Coiling Temperature, CT)是热轧带钢质量的重要因素。因此CT的控制是热轧带钢制造一个主要的部分。CS包括冷床、带喷水口的冷却管。冷却轨道放置于终轧口

与卷取机之间。通过控制喷水口的打开与关闭控制带钢的温度。CS的结构如图2所示。

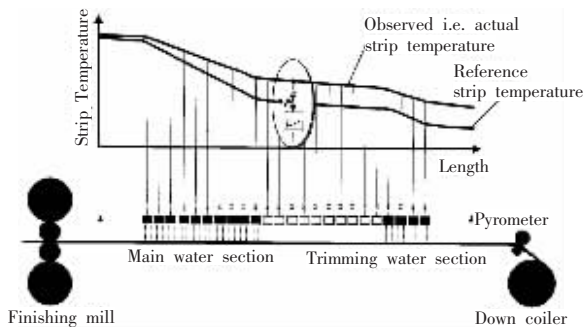


图2 CS的结构与带钢温度控制

了解上述的控制工作, 决定一个适当的冷却模型和合理的算法是关键。在最近几年, 一些模型和运算法则已经提出。G. Van Ditzhuijzen^[1]推导了一个组合的线性模型以适应不同的现象。Henrich^[2]给出了一个可调整冷却模型符合温度和柔性参数的要求。Guo^[3]介绍了一个用前馈-反馈并可追踪系统位置的控制算法。一个用来模拟在传送轨道上带钢的冷却过程的数学模型被提出。但是两个重要的因素: 冷却水和环境温度, 在他的参考系统的反馈变量中未考虑。

最近, 一些改良的控制模型和算法已经被提出。S. Latzel^[4]用稳定的理论提出了一个先进的控制方法。Hsu和Wu^[5]建立尤其以超窄带钢为基础的一个热力学模型。S. Saini^[6]调查冷却的速率、材料的性能而提供了一些控制策略。Jeong^[7]提供了一种

在线可训练的 RBF 网络来修正卷取温度。RBF 网络被设计代替传统的以规则为基础的查询, 输出是热传输系数控制系统的结果。

然而, 大部分的研究为了要简化控制算法, 并且推导是在假定系统稳定状态下提出的。因为带钢以各种不同的速度移动且冷却口间隔着开与关, 忽略或错误对待带钢参数将引起温度控制的错误。此外, 因为实际中的复杂情况使得建立非常准确的模型非常困难。本文将建立一个简单的一阶控制模型, 一些因子由遗传算法(GAs)确定, 并且提出了以该模型为基础的实际控制算法。他们有更灵活的表现, 如自适应。对于各种不同工艺要求, 在此模型基础上建立一个模型仿真系统和仿真控制系统很有必要。

2 冷却模型及算法

2.1 数学模型

带钢从终轧机出来经过冷却辊道到 CS 的出口卷取机的这段时间, 称为冷却区。带钢在冷却区通过水和环境进行热交换。

在 CS 内, 带钢的入口和出口位置视为模型的几何边界。终轧温度计放在入口位置, 卷取温度计放在出口位置。带钢在运行过程中被采样时间分成若干段, 冷却辊道分成若干物理区。

一维热交换模型假设对于同种的 CS 是有效的, 带钢与环境的热量交换应该在各处是相同的。CS 中带钢在采样 T 时刻的表面温度描述如下:

$$T = U_w + (T_c - U_w) \cdot e^{-Z} \quad (1)$$

其中 U_w 和 T_c 分别代表环境温度 and 终轧的温度。Z 是带钢进入冷却区的时间。P 是时间常数的倒数(模型因子), 与带钢的厚度、移动速度、热交换和传导有关, 它表示成:

$$P = \frac{TLF}{\left(\frac{1}{(\alpha_1 + \alpha_2)F} + \frac{h}{K_1 \cdot WLF}\right) WLF \times h \times k_2}$$

在这里 TLF 是带钢的导温系数, 而 WLF 是带钢的导热系数, 它们由经验给出。K₁ 和 k₂ 是常数, h 是带钢厚度。α₁、α₂ 分别是带钢的上喷水下喷水与带钢表面的热交换系数。这两个因素能经过基因算法(GAs)获得。测量的卷取温度和根据模型计算的温度之间的不同之处在算法中也被研究。F 是水温、水压和带钢速度综合修正系数, 它由实验获得。

为了要实现数字的计算机控制, 对控制阀进行编号且阀门位置由系统顺序分配, 冷却区也分段进行编码。借助控制模型(1), 冷却时间 Z, 从而计算出 CS 中的冷却长度。

2.2 前馈算法(FFA)

如带钢进入 CS, 前馈控制策略(算法)被激活。带钢依采样点分段, 然后每段卷取温度由下列的公式计算:

$$T_h(ny, n) = U_w + (T_c(ny, n) - U_w) \cdot \exp\left[-\sum_{n=1}^x P(ny, n) Z(ny, n)\right] \quad (2)$$

公式(2)起源于模型(1)。x 是冷却水段数。当 ny 个带钢段进入 CS 的区域 n 之后, 片段确认程序提供一组标准平均数据给段 ny: 带钢速度、终轧温度、厚度等。

如果计算卷取温度 T_h 脱离目标卷取温度 T_s, 运行一个对应的控制, 也就是改变冷却时间。最佳的功能:

$$\min |T_h - T_s| \quad (3)$$

该变化可由下列公式获得:

$$T_h(ny, n) = U_w + (T_c(ny, n) - U_w) \cdot \exp\left[-\sum_{n=1}^x P(ny, n) Z(ny, n)\right] \quad (4)$$

$$T_s(ny, n) = U_w + (T_c(ny, n) - U_w) \cdot \exp\left[-\sum_{n=1}^x P(ny, n) Z_s(ny, n)\right] \quad (5)$$

$$\frac{T_h - U_w}{T_c - U_w} = \exp\left[-\sum_{n=1}^x P(ny, n) Z(ny, n)\right] \quad (6)$$

$$\frac{T_s - U_w}{T_c - U_w} = \exp\left[-\sum_{n=1}^x P(ny, n) Z_s(ny, n)\right] \quad (7)$$

$$\ln \frac{T_h - U_w}{T_s - U_w} = -P(ny, 1) Z(ny, 1) + P(ny, 1) Z_s(ny, 1) \cdots \\ - P(ny, w) Z(ny, w) + P(ny, w) Z_s(ny, w) - \\ P(ny, i) Z(ny, i) + P(ny, i) Z_s(ny, i) + \cdots \\ - P(ny, x) Z(ny, x) + P(ny, x) Z_s(ny, x) \quad (8)$$

$$\ln \frac{T_h - U_w}{T_s - U_w} = P(ny, i) \Delta Z(ny, i) - P(ny, w) \Delta Z(ny, w) \quad (9)$$

假设当它通过一个冷却区的时候, 带钢速度 $V(ny, x)$ 是不变的。通过变换, 得到以下结果:

$$\ln \frac{T_h - U_w}{T_s - U_w} = P(ny, i) \frac{L_h(ny, i)}{V(ny, i)} - P(ny, w) \frac{L_h(ny, w)}{V(ny, w)} \quad (10)$$

从中得到冷却长度的变化:

$$L_h(ny, w) = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{T_h - U_w}{T_s - U_w} \right)$$

$$\text{where } k = \frac{P(ny, i)}{v(ny, i)} - \frac{P(ny, w)}{v(ny, w)} \quad (11)$$

冷却时间变化也得到了。然后促使阀门对应实际的编码。上述的计算是一个反复进行的程序。

2.3 反馈算法(FBA)

一旦带钢头部进入卷取机, 实测卷取温度可以获得, 反馈控制就开始。这些实测值代替前馈控制中的预测值, 进行反馈控制。实测卷取温度和目标的卷取温度比较, 得到冷却长度的改变量:

$$L_f(ny, m) = \frac{G}{MB} \ln \left(\frac{T_s(ny, m) - T_u}{T_s - T_u} \right)$$

$$MB = \frac{K(ny, m) P(ny, m)}{v(ny, m)} - \frac{K(ny, m-1) P(ny, m-1)}{v(ny, m-1)} \quad (12)$$

G 比 1 少了修正因子。

2.4 自适应控制算法(ACA)

和每一个其他理论模型一样, 方程(1)是好的, 但不是对实际的完美近似。因而为了与实际更接近, 在这些模型中引入修正因子是很正常的。

修正因子 K_s 用来在模型方程(1)中修正时间常数的倒数 P。时间常数的倒数 P(ny, n) 被 K(ny, n) * p(ny, n) 代替。如此方程(2)将会改变成下式:

$$T_h(ny, n) = U_w + (T_c(ny, n) - U_w) \exp\left[-\sum_{n=1}^x K(ny, n) p(ny, n) Z(ny, n)\right] \quad (13)$$

K(ny, n) 能由测量值计算出来。修正因子算法则根据下列规则在线运行:

$$K(ny, n) = K(ny-1, n) + F * (KUG - K(ny-1, n)) \quad (14)$$

其中, KUG 是特别的平衡修正因子, 它能从式(6)和(7)之比获得, 它反映测量的和计算的温度之间的关系。F 是一个从 0 到 1 的分数, 通常是 0.6。KUGs 使在方程(2)中修改修正因子成为可能, 而且因此模型能适应各种情况。总之, 上述的控制算法能与图 3 的结构一起应用。

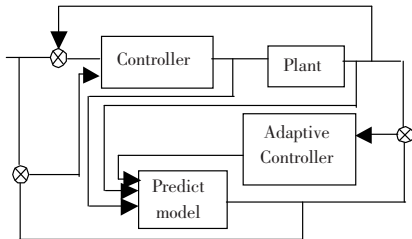


图3 控制系统方框图

3 仿真结果分析

根据上述的描述,开发了一个仿真系统。该系统包括两个部分:一是模型的仿真(MS),另一个是系统仿真(SS)。方案如图4描述。图4上面一半是真正的现场(RP)。BAC是基础自动化,将会直接地用来自PCC(程序冷却控制器)的冷却文件控制冷却的阀门。另一半是仿真系统(SS),包括冷却控制器(SGCC)和冷却模型(SM)。

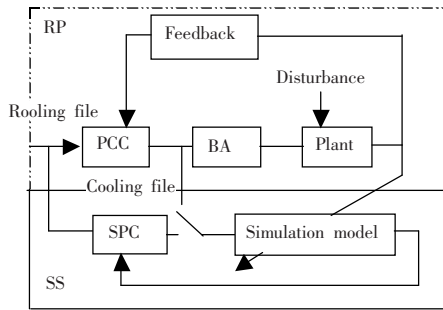


图4 仿真系统方案

3.1 模型仿真

在模型的模拟方面,如下列方程(15)所显示的二维高精度模型被用来计算冷却卷取温度。

$$\frac{\partial u(x, y, t)}{\partial t} + v(t) \frac{\partial u(x, y, t)}{\partial x} = \alpha \frac{\partial^2 u(x, y, t)}{\partial y^2}$$

$$\lambda \frac{\partial u(x, y, t)}{\partial y} \Big|_{y=0} = \alpha_2 (\omega_2(x, t) - u(x, 0, t))$$

$$\lambda \frac{\partial u(x, y, t)}{\partial y} \Big|_{y=h} = \alpha_1 (\omega_1(x, t) - u(x, h, t))$$
(15)

这里 $u(x, y, t)$ 是点 (x, y) 在 t 时刻的温度, x 是冷却长度的方向, y 是带钢厚度的方向, $v(t)$ 是带钢速度, λ 是热传导因素, α 是热交换因素, α_1, α_2 是带钢上、下部的热交换系数, ω_1, ω_2 是带钢上、下的介质温度, 而 h 是带钢厚度。

根据模型模拟,模型能在工程满意的范围内接近对象。这里以带钢 #1758050 为例,长度 153.4 m,厚度 16.32 mm,终轧温度 855.8℃,目标温度 650℃。模型的仿真结果如图5显示,标

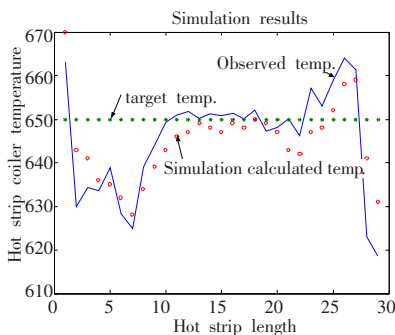


图5 带钢卷取温度仿真、目标、实测值

准的错误是 6.64。图6显示了模型计算的温度和实际测量的温度之间的差别。

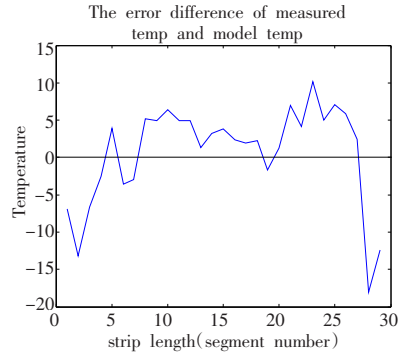


图6 卷取温度带钢模型误差曲线

一段的温度下降曲线在图7显示,而后温度的分布在图8中显示。

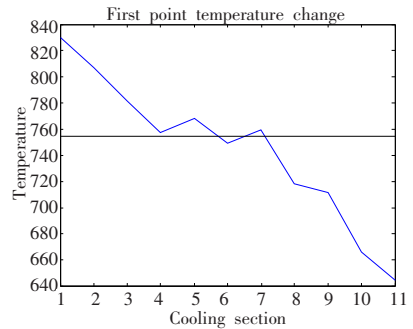


图7 第一段点的温度下降曲线

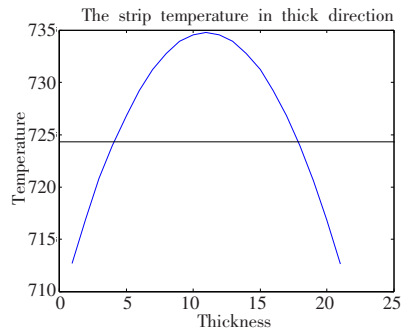


图8 带钢温度与厚度变化曲线

3.2 系统仿真

在这一个区段中,采来自模拟过后的正确的模型,能够对被观察的温度控制算法(PCC)进行修正。SGCC在系统仿真之后获得。SGCC能用于真正的生产中,修正因子 K 和时间常数的倒数 P ,以带钢 #1758050 为例,目标温度是在 550° 的 $\pm 10^\circ$ 范围内。模拟系统的命中率(带钢在允许范围内)是 96.3%。仿真的结果说明了算法效果。仿真系统主画面见图9。

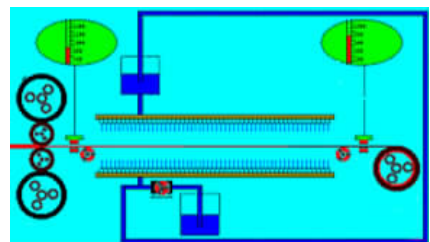


图9 卷取温度仿真控制系统

将在仿真中实验的控制结果应用在实际的现场,结果对薄带钢精确度超过 95%(厚度少于 12 mm),对于厚带钢也能达到 85%(厚度超过 12 mm),控制精度平均增加 8%,经济价值显著。

藉着对象模型和控制算法精度的不断改进,目前已达到一个较好的控制效果。虽然控制模型过于简单,仍然有许多问题,但通过修正和控制算法的改进,还是能够补偿的。仿真计算的数据有待进一步优化。采用固定带钢长度的控制策略比较合理,应该下一步采用。(收稿日期:2007年1月)

参考文献:

- [1] van Ditzhuijzen G.The controlled cooling of hot rolled strip:a combination of physical modeling,control problems and practical adaptation[J].IEEE Transactions on Automatic Control,1993,8(7):1060-1065.
- [2] Henrich L,Holz L,Knepp G.Physically based cooling line model to meet growing demands in temperature and flexibility [J].Iron Making and Steel Making,1996,23(1):97-81.
- [3] Guo R.Modeling and simulation of run-out table cooling control using feedforward-feedback and element tracking system[J].IEEE Transactions on Industry Applications,1997,33(2):304-311.

- [4] Latzel S.Advanced automation concept of runout table strip cooling for hot strip and plate mills[J].IEEE Transactions on Industry Applications,2001,37(4):1088-1097.
- [5] Hsu Y,Wu C.An improvement of the thermal model for producing the ultra-thin strips in a conventional hot strip mill[C]//39th IEEE Conference on Industry Applications,IAS Annual Meeting,2004,2(3/7):891-896.
- [6] Saini S,Shaw D A,Ramon H P,et al.Coiling temperature control and performance at AHMSA hot strip mill Mexico[C]//33th IEEE Conference on Industry Applications,IAS Annual Meeting,Oct 12-15,1998,3:2244-2251.
- [7] Jeong S,Lee M,Lee S,et al.Improving lookup table control of a hot coil strip process with online retrainable RBF network[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics,2000,47(3).
- [8] 王笑波,任德祥,邵惠鹤.板带层流冷却仿真系统的研究[J].系统仿真学报,2002,14(5):620-622.
- [9] 陈小燕,柴天佑,王笑波,等.板带层流冷却系统仿真软件包的研究与开发[J].系统仿真学报,2002,14(6):785-788.
- [10] 谭明皓,片锦香,柴天佑.热轧层流冷却过程的智能建模仿真软件包[J].系统仿真学报,2005,17(2):332-336.

(上接 46 页)

表 2 常见攻击后提取的水印效果(lena 图)

经	好	好	好	好	好	好	好	好
平滑滤波	高斯模糊	椒盐噪声	高斯噪声	几何剪切	几何旋转	JPEG 压缩	USM 锐化	边缘锐化

表 1 数字水印对常见攻击抵抗能力量化表

攻击类型	攻击参数	图像	本文方案		文献方案	
			PSNR	NC	PSNR	NC
无攻击	无	lena	39.676 0	1.0000	32.887 9	1.0000
		couple	40.707 1	1.0000	30.976 8	1.0000
平滑滤波	5×5	lena	24.831 0	0.812 5	26.331 8	0.562 8
		couple	25.748 3	0.786 9	27.685 1	0.608 0
高斯模糊	半径 2.0 像素	lena	25.500 4	0.975 6	25.228 9	0.952 1
		couple	26.183 1	0.896 9	21.617 5	0.910 4
叠加噪声	椒盐噪声(10%)	lena	15.232 0	0.979 3	15.062 8	0.922 5
		couple	13.945 0	0.991 7	13.864 4	0.827 8
		lena	14.371 3	0.991 9	15.368 0	0.910 6
	高斯噪声(20.37%)	couple	22.312 3	0.896 0	21.850 1	0.850 1
		lena	14.851 3	0.980 9	20.143 2	0.907 9
几何剪切	随机剪切	couple	15.407 7	1.0000	15.221 7	0.895 1
		lena	15.331 3	0.868 1	19.266 9	0.826 5
几何旋转	旋转 75°	couple	9.927 8	0.874 1	10.237 6	0.810 2
		lena	36.374 1	0.959 3	30.639 3	0.786 0
JPEG 压缩	压缩品质为 8	couple	35.347 7	0.864 5	28.270 6	0.702 7
		lena	25.953 3	1.0000	29.478 1	0.950 2
图像增强	USM 锐化 (量 60%,半径 5)	couple	28.586 5	1.0000	26.594 2	0.935 3
		lena	21.507 5	1.0000	23.256 7	0.942 4
		couple	21.798 2	1.0000	20.104 9	0.928 8

降低嵌入水印对图像可见性的影响。(5)在提取过程中通过优化预测均值的线性组合,避免额外嵌入的水印位对提取效果的影响。实验证明,本文算法对各类攻击均具有较好的鲁棒性,并具有计算简单容易实现等功能,大大扩展了其应用范围。

(收稿日期:2007年1月)

参考文献:

- [1] Cox I J,Miller I.The first 50 years of electronic watermarking[J].Journal of Applied Signal Processing,2002,56(2):126-132.
- [2] Hartung F,Girod B.Watermarking of MPEG-2 encoded video with-

out decoding and re-encoding[C]//Proceeding of the SPIE Conference on Multimedia Computing and Networking 1997.Bellingham:SPIE Press,1997,3020:264-273.

- [3] Yen Hui-cheng.Watermark embedded in permuted domain[J].Electronics Letter,2001,37(2):80-81.
- [4] Kankanhallims,Raimohan,Ramakrishnan K R.Content based watermarking of image [C]//Effelsberg W.ACM Multimedia Electronic Proceeding,the 6th ACM International Multimedia Conference.New York:ACM Press,1998:61-70.
- [5] 孙锐,孙洪,姚天任.一种空域的数字图像盲水印方案[J].华中科技大学学报:自然科学版,2002,30(2):81-84.
- [6] Kutter M,Jordan F,Bossen F.Digital signature of color images using amplitude modulation[J].Journal of Electronic Imaging,1998(7):326-332.
- [7] Netravalian,Haskell B G.Digital picture representation and compression[M].New York:Plenum Press,1998:245-299.
- [8] Kuoch,Chen C F.A prequantizer with the human visual effects for the DPCM[J].Signal Processing:Image Communication,1996(8):433-442.
- [9] Puertpan R,Amornraksa T.Gaussian pixel weighting marks in amplitude modulation of color image watermarking[C]//Proceedings of the IEEE ISSPA,Kuala-Lampur,Malaysia,2001.
- [10] Amornaraksa T,Janthawongwilai K.Enhanced images watermarking based on amplitude modulation[J].Image and Vision Computing,2006(24):111-119.
- [11] Ahmidi N,Safabakhsh R.A novel DCT-based approach for secure color image watermarking[C]//Proceedings of the International Conference on Information Technology:Coding and Computing(ITCC'04),2004,2:709-713.
- [12] 黄继武,Yun Q Shi,姚若河.基于块分类的自适应图像水印算法[J].中国图象图形学报,1999,4(A):640-643.
- [13] 陆哲明,吴昊天,刘忠仁,等.一种用于版权通知和保护的多功能彩色图像水印算法[J].电子学报,2004,32(5):778-781.