

基于 DBN-PID 的木材干燥窑参数检测系统

夏春江¹, 王培良^{1,2}

(1. 杭州电子科技大学 新型电子器件研究所, 杭州 310018;

2. 湖州师范学院 信息与控制技术研究所, 浙江 湖州 313000)

摘要: 针对目前在木材干燥过程中检测参数精度低的问题, 设计了一种木材干燥窑参数检测系统; 该系统对干燥窑有关参数进行实时采集、调理, 经 ARM 处理器进行数据处理后, 将采集的数据通过 WiFi 无线网络上传至 PC 机; 为改进系统的控制算法, 引入深度学习的方法, 提出了一种基于 DBN-PID 的控制算法, 并与 BP-PID 算法进行了实验比较; 实验结果表明, DBN-PID 控制算法应用在木材干燥窑参数检测系统中具有更高的检测精度; 为进一步说明 DBN-PID 算法的性能, 还与 BP-PID 算法进行了仿真比较; 仿真表明, DBN-PID 算法能够很好的近似非线性对象, 具有较强的自适应能力。

关键词: 深度学习; 深度信念网络; 木材干燥窑参数; 嵌入式系统

Detecting System of Wood Dry Kilns' Parameters Based on DBN-PID

Xia Chunjiang¹, Wang Peiliang^{1,2}

(1. Institute of New Electronic Devices, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. Institute of Information and Control Technology, Huzhou Teachers College, Huzhou 313000, China)

Abstract: For the problem of the low measured precision of the parameters in the process of the wood drying, this paper design a detecting system of wood dry kilns' parameters. The system will capture the parameters of wood dry kilns real time, regulate and process the data with ARM microprocessor, and then send the data to the PC with the WiFi. To improve the control algorithm of system, this paper introduces the deep learning method, and put forward a control algorithm of DBN-PID. In the same hardware platform, compared with the algorithm of BP-PID. The experimental results show that the detecting system of wood dry kilns with DBN-PID has the more higher precision. For further clarification about the performance of DBN-PID, compared with the algorithm of BP-PID in the simulation. The results of simulation show that DBN-PID can approach the nonlinear object more better, and has the more stronger adaptive ability.

Keywords: deep learning; deep belief network; wood dry kilns' parameters; embeded system

0 引言

木材干燥作为木材加工的基础环节, 同时也是木材加工的关键步骤, 其能耗约占木制品生产总能耗的 40%~70%。因此, 对木材进行正确合理的干燥处理, 既是保证木制品质量的关键, 又是节约能源、降低成本的重要手段^[1]。在一般情况下, 干燥窑内的温湿度、木材的实时含水率、木材的树种、树型等诸多因素对木材干燥的质量有着较大的影响, 尤其对于木材含水率的精确测量, 会直接影响到木材干燥质量的好坏和干燥成本的高低^[2]。

PID 控制器以其结构简单、鲁棒性强、易于操作等特点, 被广泛应用在电力、冶金和机械等工业控制领域中^[3], 而在工业木材干燥窑智能检测系统中, 也普遍采用传统的单片机和 PID 算法来实现。但对于像木材干燥窑控制系统这类非线性的复杂系统, 建立精确的数学模型较为困难, 使用常规的 PID 控制器的效果不够理想^[4]。为了解决木材干燥窑参数检测精度低的问题, 构建了基于 ARM 嵌入式平台的木材干燥窑参数检

测系统。为改进系统的控制算法, 引入了机器学习中的深度信念网络 (deep belief network, DBN) 模型^[5], 结合传统的 PID 控制算法, 提出了一种 DBN-PID 控制算法。为检验 DBN-PID 算法的有效性, 在相同硬件平台下, 与 BP 神经网络 PID^[6] 控制算法采集的数据进行了比较分析。为进一步表明 DBN-PID 控制算法的性能, 在 MATLAB 环境下进行了算法仿真比较。通过仿真实验表明, 该算法具有较强的自适应控制能力, 能够保证被控系统在最佳状态下运行。

1 木材干燥原理

木材中含有一定量的水分, 为了保证木材与木制品的质量及延长木制品的使用寿命, 必须采取适当措施使木材中的水分降低到一定程度。木材干燥的基本原理: 利用沿木材厚度上的含水率梯度以及在加热后形成的内外的水蒸汽分压力差, 促使水分以液态和气态两种形式连续地由内部向外部移动, 并通过木材表面向外界蒸发, 为使木材由表及里均衡地变干, 内部的水分移动强度应与表面的水分蒸发强度协调一致。木材加工企业通过提高木材温度的方法来降低木材中的水分, 同时控制空气的流动速度, 使水分迅速地离开木材, 最终达到干燥的目的^[7]。

在进行木材干燥时, 窑内空气的温度、湿度 (木材的平衡含水率)、空气的循环流动速度是影响木材干燥质量优劣的 3 个主要工艺参数, 确定这 3 个工艺参数的依据是木材含水率的变动状况, 因此, 实时掌握干燥过程中木材含水率的变化是保证窑内被干木材按照设定的干燥基准进行干燥的一个重要前提

收稿日期: 2014-06-05; 修回日期: 2014-07-14。

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目 (LY12F03008)。

作者简介: 夏春江 (1990-), 男, 在读硕士研究生, 主要从事智能检测与控制方向的研究。

王培良 (1963-), 男, 教授、硕士生导师, 主要从事智能检测与控制、系统建模与故障诊断、工业自动化等方向的研究。

条件。多年来，对于木材干燥窑内参数的实时在线检测一直是各国学者研究的热点^[8]。

2 系统硬件平台设计

系统以型号为 S3C2440A 的 ARM 处理器作为数据采集的核心控制器，芯片上自带了 SDRAM 控制器、NandFlash 控制器及串口等系统所要使用到的基本硬件配置。经过 ARM 嵌入式控制平台将采集到的干燥窑内的数据通过 WiFi 网络与 PC 机进行实时数据通信，采集的参数主要有木材干燥窑内的温湿度、木材的含水率等。在 PC 机中，将传送来的信号值和预设值对比，如果测量值超出或者低于预设值，则通过反馈控制电路来控制外部设备来实现自动调理。系统原理框架如图 1 所示。

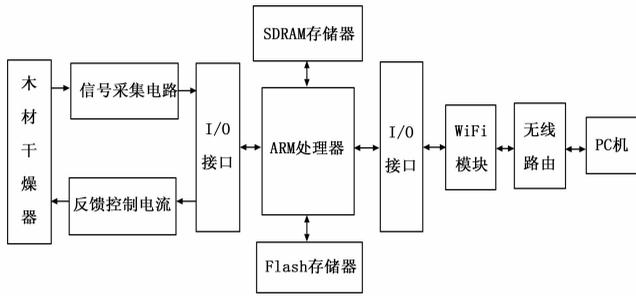


图 1 系统原理框图

本文中的信号采集电路通过安装在干燥窑内的干湿球传感器来获得窑内的空气的温湿度值，干湿球的测量由一个继电器来切换，通过欧姆定律将测量得到的干球和湿球电阻值转换成电压信号，电压信号经过仪表放大器 AD620 放大后输入到主控制器处理。而测量木材含水率的传感器采用钢钉，利用电阻法（木材含水率变化时，其直流等效电阻值会随之变化）实现木材含水率的检测。当温度一定时，木材含水率和电阻率的关系可以分两段：含水率从 8% 至纤维饱和点（约为 30%），电阻率的对数 $\lg \rho$ 与含水率的对数 $\lg W$ 成线性关系；而在纤维饱和点以上时，含水率与电阻率的对数呈一定的线性关系，电阻率随含水率的变化不明显^[9]。木材含水率为 5%~95% 范围内，对应木材等效电阻的变化范围为几 kΩ 到几百 GΩ，一般检测中都采取分量程测量^[10]。

3 DBN-PID 控制器设计

3.1 深度信念网络 (DBN) 训练

深度信念网络由若干层受限玻尔兹曼机 (restricted boltzmann machine, RBM) 和一层 BP 神经网络组成，它是目前研究和应用都比较广泛的深度学习结构，DBN 的相邻两层可分解为一个单独的 RBM，利用 RBM 抽取源数据的特征，每个低层的 RBM 作为输入数据用于训练下一个 RBM，如此循环尽可能多的层数，最后通过微调参数来增强网络的抽取能力，以达到自动提取特征的目的^[11]。

在训练深度信念网络模型的过程中主要分为两步：第一步，分别单独无监督地训练每一层 RBM 网络，确保特征向量映射到不同特征空间时，尽可能多地保留特征信息。第二步，在深度信念网络的最后一层设置 BP 网络，接收来自 RBM 的输出特征向量，并将这些特征向量作为 BP 网络的输入特征向量，有监督地对实体关系分类器进行训练^[12]。

本文采用文献 [13] 提出的对比散度 (Contrastive Divergence, CD) 算法来训练 RBM，实现步骤如下：

设 x 为训练样本集的所有样本； ω 为梯度下降法中的学习速率； h 为隐层单元向量； W 为 RBM 的权值矩阵； b 为输入偏置向量； c 为输出偏置向量。

1) 根据 $P(h_j = 1 | v; \theta) = \lambda(\sum_{i=1}^I \omega_{ij} v_i + c_j)$ 来计算 $Q(h_{1i} = 1 | x_1)$ ，并对 $Q(h_{1i} = 1 | x_1)$ 采样 h_{1i} ，其中 $h_{1i} \in \{0, 1\}$ 。

2) 根据 $P(v_i = 1 | h; \theta) = \lambda(\sum_{j=1}^I \omega_{ij} h_j + b_i)$ 来计算 $P(x_{2j} | h_1)$ ，并对 $P(x_{2j} | h_1)$ 采样 x_{2j} ，其中 $x_{2j} \in \{0, 1\}$ 。

3) 计算 $Q(h_{2i} = 1 | x_2)$ 并按照以下式子来更新权值：

$$W \leftarrow W + \omega(h_1 x_1 - Q(h_2 = 1 | x_2) x_2) \quad (1)$$

$$b \leftarrow b + \omega(x_1 - x_2) \quad (2)$$

$$c \leftarrow c + \omega(h_1 - Q(h_2 = 1 | x_2)) \quad (3)$$

对于 BP 网络的训练，本文使用文献 [14] 提出的一种训练方法，算法步骤如下所示：

1) 随机初始化顶层的 BP 网络的参数，设训练步长为 N 。

2) 进行前向计算，对于第 l 层的 j 单元节点，其值为 $y_j^l(n) = \sum \omega_{ji}(n) y_i^{l-1}(n)$ ，若神经元 j 属于输出层 ($l = L$)，则令 $y_j^l(n) = O_j(n)$ ，误差 $e_j(n) = d_j(n) - O_j(n)$ ，而 d_j 为正确信息。

3) 计算 δ 用以自顶向下修正网络的权值参数，对于输出单元：

$$\delta_j^l(n) = e_j(n) O_j(n) [1 - O_j(n)] \quad (4)$$

隐层单元：

$$\delta_j^l(n) = y_j^l(n) [1 - y_j^l(n)] \sum \delta_k^{l+1}(n) \omega_{kj}^{l+1}(n) \quad (5)$$

4) 修改权值：

$$\omega_{ji}^l(n+1) = \omega_{ji}^l(n) + \eta \delta_j^l y_i^{l-1}(n) \quad (6)$$

其中： η 为学习速率。

5) 如果 $n = N$ ，表示训练结束；否则， $n = n + 1$ ，并跳转到步骤 2)。

3.2 DBN-PID 控制算法

结合多种算法来设计一种混合控制器是设计控制器的一种传统方法。传统 PID 控制系统主要是由控制器及被控对象组成。它想要取得理想的控制效果，需要调整好比例、积分和微分这 3 种参数相互制约的关系，而这种关系在复杂控制系统中已不是简单的线性组合关系^[15]。而神经网络可以表示任意复杂的非线性函数模型，可以通过网络学习来实现具有最佳组合的 PID 控制。本文采用深度信念网络，结合传统的 PID 控制系统，构建了能够对比例、积分和微分这 3 个参数自学习的 PID 控制器。如图 2 所示，该控制器由深度信念网络和常规 PID 控制器组成，PID 控制器直接作用于对被控对象，而深度信念网络的作用是根据系统的运行状态，调整 PID 控制器的参数，使得控制系统到达最佳性能。

DBN-PID 控制器的控制算法如下：

1) 确定 DBN 的网络结构，即输入层节点及数目 n ，确定隐含层层数 m 。

2) 采样得到 $R_in(k)$ 、 $Y_out(k)$ ，计算该时刻误差 $e = R_in(k) - Y_out(k)$ 。

3) 将误差的微分 $\frac{de}{dt}$ 作为深度信念网络的输入数据，PID

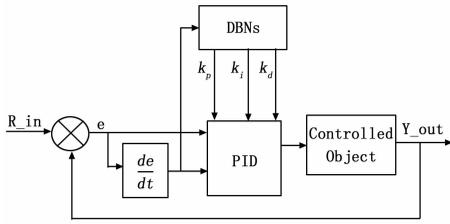


图 2 DBN-PID 控制结构图

控制器的 3 个可调参数 k_p 、 k_i 、 k_d 通过深度信念网络的输出层的输出进行调节。

4) 计算输出 $u(k)$, $u(k)$ 为 PID 控制器的输出。

5) 对深度信念网络进行训练, 在线调整权值系数; 实现 PID 控制参数的自适应调整。

6) 使得整型变量 $k = k + 1$, 返回到第一步循环执行, 直到网络学习完成, 即系统控制精度到达预设要求, 则算法执行完毕。

4 实验结果及分析

实验中选用的木材树种是较为常见的柞木, 所有实验数据采集自浙江湖州某木材加工企业。为了反映提出的 DBN-PID 控制算法的有效性, 引入 BP-PID 算法进行了对比实验, 主要比较分析了两种算法测得数据的精确度。表 1 与表 2 分别给出了在木材干燥过程中这两种算法的部分采集数据与工业标准数据的对比, 括号中的数据为干燥过程中工业参数标准值。

表 1 使用 BDN-PID 方法采集的部分数据与工业标准值的对比

温度/°C	相对湿度/(%)	木材电阻率/(%)	含水率/(%)
76.5(76.0)	95.2(95.0)	8.10(8.10)	20.2(20.0)
76.5(76.0)	98.6(98.0)	7.11(7.10)	26.3(26.0)
69.3(69.0)	44.3(44.0)	9.80(9.90)	6.6(6.0)
64.7(64.0)	87.7(87.0)	9.20(8.90)	16.5(16.0)
69.3(69.0)	53.7(53.0)	9.71(9.80)	7.3(7.0)
69.3(69.0)	60.2(60.0)	9.48(9.50)	8.1(8.0)
76.6(76.0)	74.6(74.0)	8.78(8.80)	10.0(10.0)
64.7(64.0)	51.6(51.0)	9.98(10.00)	7.3(7.0)
69.3(69.0)	98.4(98.0)	7.43(7.50)	26.6(26.0)
76.5(76.0)	93.5(93.0)	8.37(8.50)	18.9(18.0)

表 2 使用 BP-PID 方法采集的部分数据与工业标准值对比

温度/°C	相对湿度/(%)	木材电阻率/(%)	含水率/(%)
76.8(76.0)	95.5(95.0)	8.16(8.10)	21.1(20.0)
76.9(76.0)	97.3(98.0)	7.31(7.10)	26.9(26.0)
69.6(69.0)	44.6(44.0)	9.81(9.90)	6.9(6.0)
64.9(64.0)	87.9(87.0)	8.60(8.90)	18.5(16.0)
68.3(69.0)	52.1(53.0)	9.61(9.80)	7.6(7.0)
70.3(69.0)	60.8(60.0)	9.41(9.50)	9.1(8.0)
76.6(76.0)	73.6(74.0)	8.62(8.80)	11.1(10.0)
65.1(64.0)	50.1(51.0)	9.68(10.00)	7.6(7.0)
69.8(69.0)	98.1(98.0)	7.13(7.50)	26.5(26.0)
76.8(76.0)	92.3(93.0)	8.15(8.50)	18.9(18.0)

通过均方根误差 (RMSE) 来对测量值精度进行评估,

计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{s} \sum_{i=1}^s (x_i - \bar{x}_i)^2} \quad (7)$$

其中: s 为数据长度, x_i 为实际测量值, \bar{x}_i 为标准值。表 3 为 DBN-PID 和 BP-PID 算法测量到的数据的 RMSE 对比。通过对数据的分析可得, 在同样的硬件平台下, 使用 DBN-PID 算法对木材干燥窑内的各个参数的检测值的 RMSE 更小, 说明应用 DBN-PID 控制算法使得检测系统具有更高的检测精度。

表 3 两种算法测量得到数据的 RMSE 比较算法

算法	温度	相对湿度	木材电阻率	含水率
BP-PID	0.875	0.723	0.241	0.853
DBN-PID	0.495	0.513	0.118	0.451

为进一步验证本文提出的 DBN-PID 控制算法的性能, 在 MATLAB 开发环境下进行了算法仿真, 并与 BP-PID 控制算法进行比较分析。在网络的自适应学习中, 分别对比例、积分和微分采用不同的学习速率, 根据各自的权系数对参数值进行调整。因为初始权值并不影响整个学习规则的改变, 所以在一定范围内可以随意取值, 设被控对象的近似数学模型为:

$$Y(k) = \frac{3.661}{(1 + 25k)^2} \quad (8)$$

仿真结果如图 3 和图 4 所示, 分析图 3 可知, DBN-PID 控制器与 BP-PID 控制器相比, 在超调量相同的情况下, 上升速度更快, 调节时间更短。这反映了 DBN-PID 控制器具有更好的自整定控制参数能力, 使得系统的超调量更为容易达到理想状态, 并且收敛性能更强。图 4 为 DBN-PID 与 BP-PID 算法的控制参数自适应整定图。从仿真结果分析, DBN-PID 控制算法能更好得依据被控对象的变化, 自适应地调整 PID 的 3 个参数。

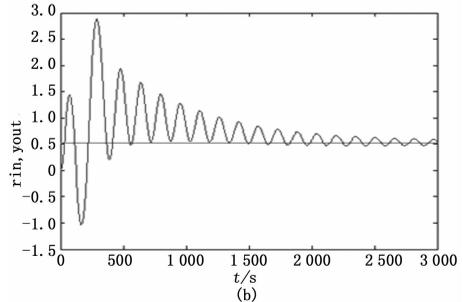
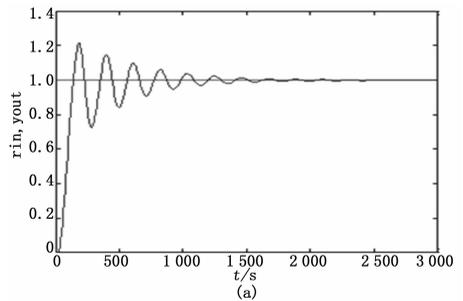


图 3 DBN-PID (a) 与 BP-PID (b) 控制下的阶跃响应曲线对比

5 结论

本文设计了一种木材干燥窑参数检测系统, 为改进系统的 (下转第 105 页)

5 结束语

本文通过 FPGA 控制智能变送前端设备和网络适配器, 完成远程遥测姿态控制系统的设计, 为飞行器姿态倾角的测量、控制提供了全新的技术手段。经过对测试结果分析, 该遥测系统工作稳定, 测量精度高, 抗干扰性强, 可广泛应用于飞行器测试。

参考文献:

[1] 陈 靖. 系统自动控制与信号处理技术 [D]. 西安: 西安电子科

技大学, 2006.

[2] 王帅夫, 刘景林, 杨士河, 等. 基于 DSP 的步进电机多轴控制系统研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (1): 95-97.
 [3] 吴晓鹏, 赵祥喜, 胡 炼, 等. ADIS16209 IMU 在倾角测量中的应用 [J]. 现代电子技术, 2010 (13): 110-114.
 [4] 吴 云, 陆 镔, 赵海洋, 等. 基于 FPGA 的步进电机细分驱动器设计 [J]. 自动化仪表, 2009, 30 (10): 61-63.
 [5] 戴习兵. 基于 FPGA 的卫星天线机载“动中通”倾角测量的分析与设计 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2013.

(上接第 101 页)

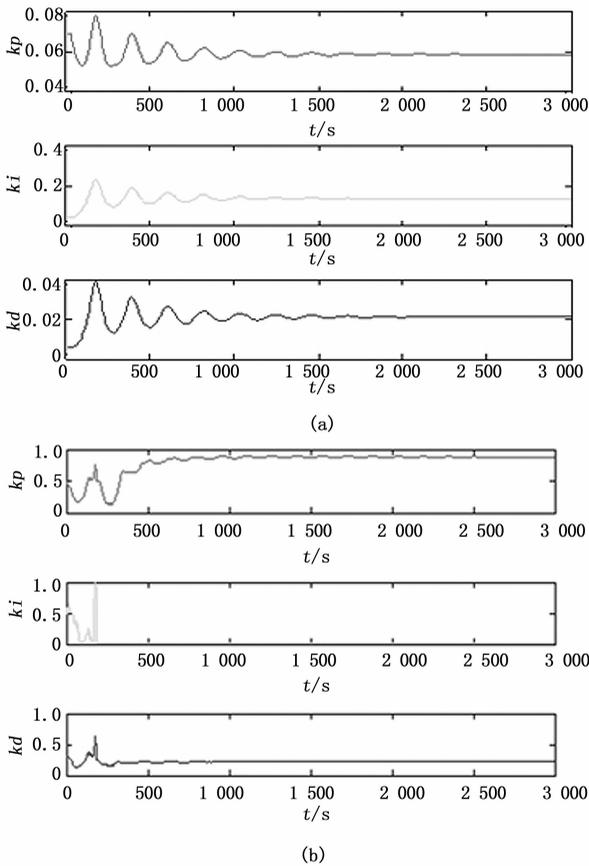


图 4 DBN-PID (a) 与 BP-PID (b) 控制下的各个参数变化曲线对比

控制算法, 引入深度学习方法, 提出了一种 DBN-PID 控制算法, 它将 DBN 和 PID 结合, 实现了对 PID 参数的自动整定, 且能够很好的近似非线性对象, 具有较强的自适应能力。实验以柞木为研究对象, 将 DBN-PID 控制算法和 BP-PID 算法分别应用在该检测系统中, 检测得到了干燥窑内空气的温度、湿度以及木材的含水率等影响干燥质量的重要参数, 并将两种算法检测到的数据进行比较分析。通过对实验数据的分析可得, 在具有相同硬件设施的条件下, 使用 DBN-PID 算法对木材干

燥窑内的各个参数进行检测的精度更高。

参考文献:

[1] 张璧光, 伊松林, 周永东. 我国木材干燥设备制造业概况与存在的问题 [J]. 干燥技术与设备, 2011, 9 (4): 176-179.
 [2] Wang X C G, Liu W, Gu L Z, et al. Development of an intelligent control system for wood drying processes [A]. 2001 IEEE/ASME International Conference on Advance Intelligent Mechatronics Proceedings [C]. 2001: 371-376.
 [3] 王 伟, 张晶涛, 柴天佑. PID 参数先进整定方法综述 [J]. 自动化学报, 2000, 26 (3): 347-355.
 [4] 胡力刚, 许伟明. 嵌入式神经网络 PID 控制器的研究与设计 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 23 (11): 2066-2069.
 [5] Mostafa A Salama, Aboul Ella Hassanien, Aly A Fahmy. Deep belief network for clustering and classification of a continuous data [A]. IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology [C]. 2010: 473-477.
 [6] 陈书谦, 张丽虹. BP 神经网络在 PID 控制器参数整定中的应用 [J]. 计算机仿真, 2010, 27 (10): 171-174.
 [7] 胡昆仑. 基于神经网络的木材干燥模型辨识研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2004.
 [8] 成发勇, 刘佩英, 姜志宏, 等. 木材窑干过程含水率实时在线检测技术述评 [J]. 林业科技开发, 2013, 27 (4): 7-11.
 [9] 常建民, 王东林, 高建民. 木材干燥全自动控制系统的研制 [J]. 北京林业大学学报, 2003, 25 (2): 72-74.
 [10] 薛巨峰, 张佳薇, 刘德胜. 双 CPU 在木材干燥窑智能化测试系统中的应用 [J]. 林业机械与木工设备, 2006, 34 (6): 40-41.
 [11] 周长建, 司震宇, 邢金阁, 等. 基于 Deep Learning 网络态势感知建模方法研究 [J]. 东北农业大学学报, 2013, 44 (5): 144-149.
 [12] Hinton G, Osindero S, Teh YW. A fast learning algorithm for deep belief nets [J]. Neural Computation, 2006, 18 (7): 1528-1554.
 [13] Hinton G. A practical guide to training restricted Boltzmann machines [R]. Report of Momentum, 2010, 9 (1): 1-20.
 [14] 陈 宇, 郑德权, 赵铁军. 基于 Deep Belief Nets 的中文名实体关系抽取 [J]. 软件学报, 2012, 23 (10): 2572-2585.
 [15] 刘 岩. 增强学习的 PID 控制参数优化快速整定算法 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (2): 467-470.