

研究论文

热定型过程能耗建模及 PSO 参数优化

任 佳, 张益波, 高金凤, 潘海鹏, 戴文战
(浙江理工大学机控学院自动化研究所, 浙江 杭州 310018)

摘要: 热定型过程是印染工业中的主要耗能单元之一。首先, 基于定型机的物理结构及工艺原理, 依据换热平衡和牛顿热交换公式, 推导出能耗与定型过程关键因素间的相互关联模型, 即能耗模型。其次, 在 Matlab/Simulink 软件中, 对上述模型进行构建。最后, 将能耗模型转化为能耗最小的优化问题, 运用粒子群优化算法对其进行求解。现场工业数据的仿真研究表明: 能耗模型符合现场工艺, 粒子群优化结果已得到现场工程师的初步认可。

关键词: 热定型过程; 能耗模型; 粒子群优化; 参数优化

DOI: 10.3969/j.issn.0438-1157.2011.08.020

中图分类号: TP 13

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2011) 08-2206-06

Modeling and PSO based parameter optimization of heat-setting process

REN Jia, ZHANG Yibo, GAO Jinfeng, PAN Haipeng, DAI Wenzhan

(Institute of Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China)

Abstract: Heat-setting process is one of the major energy-consuming unit in dyeing industry. Firstly, based on stereotypes of the physical structure and process principles, model of energy consumption and the key factors of the process is derived using Newton's heat balance and heat exchange formula. Then, in the Matlab/Simulink software, the following model is constructed. Finally, after the conversion of the energy model into the optimization problem of minimum energy consumption, particle swarm optimization algorithm is introduced to solve them. Simulation of industrial data shows that the proposed energy consumption model is consistent with on-site process and particle swarm optimization results can provide a reference and guidance for the operation.

Key words: heat-setting process; energy consumption model; PSO algorithm; parameter optimization

引 言

印染行业是我国的重要产业之一, 被称为“新朝阳产业”。随着经济的发展, 我国印染行业在生产过程中带来的能源消耗大、污染物排放量多的矛盾日益显现。

印染是一个复杂的生产过程, 其主要生产工序包括坯布、烧毛、预缩、染色、脱水、定型、压光、检验等。定型过程是印染生产中最大的耗能单元: 以拥有 10 台定型机、每年生产 180 天的中等规模印染企业的定型工段为例, 整个定型工段年耗电 900 万度, 耗煤 2 万吨, 约占整个印染生产过程

2011-05-03 收到初稿, 2011-05-13 收到修改稿。

联系人及第一作者: 任佳 (1977—), 女, 博士, 讲师。

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目 (2009AA04Z139); 国家自然科学基金项目 (61004034); 浙江省自然科学基金项目 (Y1110686)。

Received date: 2011-05-03.

Corresponding author: REN Jia, jren@zstu.edu.cn

Foundation item: supported by the High-tech Research and Development Program of China (2009AA04Z139), the National Natural Science Foundation of China (61004034) and Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (Y1110686).

总能耗的 1/2。定型过程通常由若干级烘房串接而成。每级烘房中有热空气风速与温度、导热油流量与温度、布匹运动速度、温度、湿度等几十个测控变量; 烘房的体积近 40 m^3 , 布匹依次通过各级烘房时的物理通道长度约为 $40 \sim 50 \text{ m}$, 变量滞后相对较大; 同时各级烘房及烘房内的变量间相互耦合严重, 因此现场工作人员很难从众多的相关变量中准确判断出影响过程能耗和定型质量的关键变量, 更无法准确把握这些变量的最佳工作点, 而更多地依靠经验对导热油温度、鼓风机和抽气机功率等众多相关参数进行设置, 因此导致整个系统运行不够平稳, 定型质量波动较大, 控制效果欠佳; 同时由于过程变量被设置在较高水平而造成系统能耗的增加。

目前针对定型机节能降耗的研究主要集中在两个方面, 其一是对其现有设施进行硬件升级和改造^[1-2]。其二是使用先进的控制算法对定型过程中的关键参数进行重点控制^[3-5]。随着硬件设备的不断升级换代, 目前多数大中型印染企业的硬件改造空间已经越来越小; 同时随着计算机控制技术在定型过程的应用, 对定型过程总体能耗进行建模, 并基于能耗模型进行参数优化, 逐渐成为当前工作的一个重要研究方向。

本文首先依据换热平衡和牛顿热交换公式, 推导出热定型过程的能耗模型; 之后基于 Matlab/Simulink 软件对该模型进行构建和仿真; 最后将该能耗模型转化为最优化问题, 应用 PSO (particle swarm optimization, 粒子群优化) 算法对其进行了优化求解。

1 热定型过程能耗模型建立

图 1 为定型机单级烘房示意图。图中, T 为温度; t 为时间; v 为速率; 下角标 f 代表布匹, s 代表环境或空气; p 为布匹厚度; l 为单级烘房的长度; x 为某一小段布匹距离烘房起始位置的距离; Δx 为该小段布匹的长度, 一般是个微量值。

根据牛顿换热公式, 可知一定幅宽、长度为 Δx 的布匹在 dt 时间内通过对流方式吸收的热量为

$$\begin{aligned} q &= 2h_c(T_f(t), T_s, v_s)S[T_s - T_f(t)]dt \\ &= 2h_c(T_f(t), T_s, v_s)n\Delta x[T_s - T_f(t)]dt \end{aligned} \quad (1)$$

式中 S 为热交换面积, $h_c(T_f(t), T_s, v_s)$ 为热交换系数

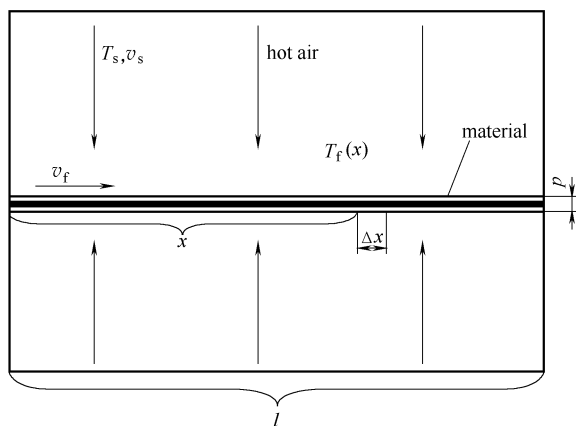


图 1 单级烘房示意图

Fig. 1 Single heating oven's schematic diagram

$$h_c(T_f(t), T_s, v_s) = A(T_s) \frac{v_s^{0.8}}{l^{0.2}} c_l c_r \quad (2)$$

其中

$$A(T_s) = 3.49 \times (1 - 8.26 \times 10^{-4} T_s),$$

$$c_l = \left(\frac{T_s}{T_f(t)} \right)^{0.5}, c_l = c_r = 1$$

对式(1) 两端从 $0 \sim t$ 进行积分, 得

$$Q = \int_0^t q dt \quad (3)$$

通常, 热定型机由 9~10 级烘房组成, 根据各级烘房所在位置及待定型布匹的温度, 布匹在定型机中消耗热量分别计算如下。

(1) 当布匹温度 $\leq 100^\circ\text{C}$ 时, 可建立如下的热平衡方程

$$Q = Q_l + Q_w + Q_{\text{loss}} \quad (4)$$

式中 下角标 w 代表水, loss 代表能量损耗。布匹升温所吸收的热量 Q_l 计算如下

$$Q_l = c_l \rho_l \Delta x n p [T_f(t) - T_0] \quad (5)$$

式中 n 为布匹宽度。当布匹温度 $\leq 100^\circ\text{C}$ 时, 布匹中所含水量吸收的热量 Q_w 可根据式(6) 求得

$$Q_w = c_w m_w [T_w(t) - T_0] \quad (6)$$

式中 c_w 为水的比热容, 这里取 $4.2 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$; m_w 代表长度 Δx 、一定幅宽的布匹中的携带的水的质量。

根据散热损失计算公式, 可求得此过程中散失的热量 Q_{loss}

$$Q_{\text{loss}} = [(T_s - T_0) / (\delta / \lambda + 1 / \alpha)] \times 1.3 \times \beta \quad (7)$$

式中 δ 为保温层厚度, 这里取 0.02 mm ; λ 为保温材料的热导率, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, 本文取 0.093 ; β 为修正系数; α 表示保温层外表面向大气的散热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, 其计算公式为

$$\alpha = 1.163(6 + v_{\text{air}}/2) \quad (8)$$

式中 v_{air} 代表风速, 本文中取为 0。

(2) 当烘房中的布匹温度 $> 100^\circ\text{C}$ 时, 总能耗计算为

$$Q = Q_f + Q_v + Q_{\text{loss}} \quad (9)$$

式中 布匹吸收热量 Q_f 和热损失 Q_{loss} 的计算分别同式 (5) 和式 (7)。汽化热 Q_v 可由 (10) 式求得

$$Q_v = c_v m_v = c_v (0.02e^{10^{-3}T_f(i)}) \quad (10)$$

式中 c_v 代表水的汽化热, 其值为 $2260 \text{ kJ} \cdot \text{mg}^{-1}$, m_v 为水蒸气的质量。

综上, 长度 Δx 的布匹经过定型机 10 级烘房所消耗的总热量为

$$Q_{\text{all}} = \sum_{i=1}^{10} Q^{(i)} \quad (11)$$

根据布匹温度的范围, $Q^{(i)}$ 可分别由式 (4) 或式 (9) 计算求得。

2 能耗模型在 Matlab/Simulink 环境中的实现

将所建立的定型机 10 级烘房能耗模型在 Matlab/Simulink 环境中进行实现。实现过程如下。

2.1 基于 Simulink 的单级烘房模型构建

基于 Simulink 构建单级烘房能耗模型, 其 Simulink 框图如图 2~图 6 所示。

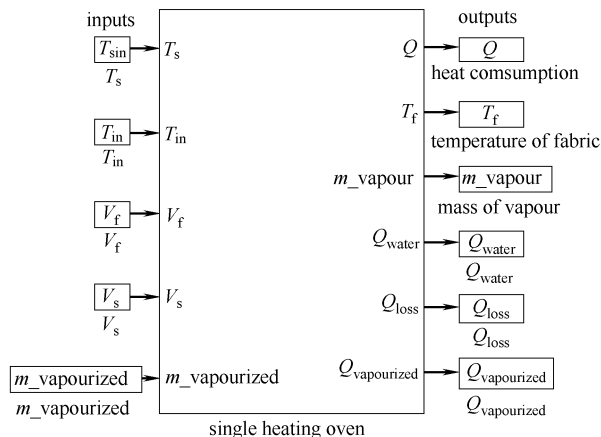


图 2 单级烘房能耗模型界面

Fig. 2 Single heating oven's energy consumption model interface

2.2 十级烘房串联运行仿真

编写 m 文件 (sim_heating_oven.m) 来模拟 10 级烘房的串联运行。其伪代码如下所示。

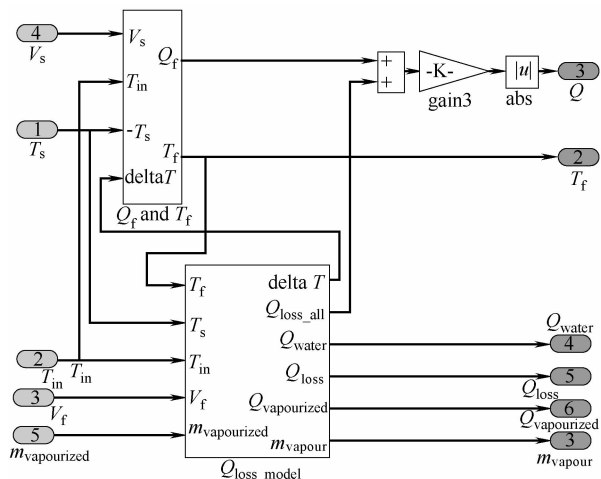


图 3 Q_f 和 Q_{loss} 子系统框图

Fig. 3 Subsystem of Q_f and Q_{loss}

```

Parameter initialization //参数初始化
For index=1:10 //10 级烘房串联调用
sim('each_oven',[0,Timespan]);
save Qall(i), Tf(i) //保存当前烘房运行后的
                        总能耗, 和布匹温度值
end
    
```

3 基于 PSO 算法的能耗模型求解

粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法是 Kennedy 等^[6]于 1995 年开发的一种演化计算方法, 它是通过模拟鸟群觅食过程中的迁徙和群聚行为而提出的一种基于群体智能的全局随机搜索算法^[7]。目前, PSO 算法已被广泛应用于诸多实际问题的求解中, 取得了不少成果^[8-9]。本文应用 PSO 算法对前面建立的热定型机能耗模型进行分析、求解, 以期得到影响能耗的关键因素的优化值。

3.1 目标函数

本能耗模型的目标函数描述如下

$$\min(Q_{\text{all}}) \quad (12)$$

$$Q_{\text{all}} = \sum_{i=1}^{10} Q^{(i)} = f(T_s(i), v_f) \quad (13)$$

3.2 约束条件

根据热定型过程中不同织物的定型要求, 给出如下的约束描述。

$$(1) T_{\text{low}} \leq T_s(i) \leq T_{\text{high}}, (i=1, 2, \dots, 10)$$

$$(2) v_{\text{low}} \leq v_f \leq v_{\text{high}}$$

(3) 织物在定型机中达到定型温度 T_{setting} 的时间需大于规定的定型时间 time_setting 。

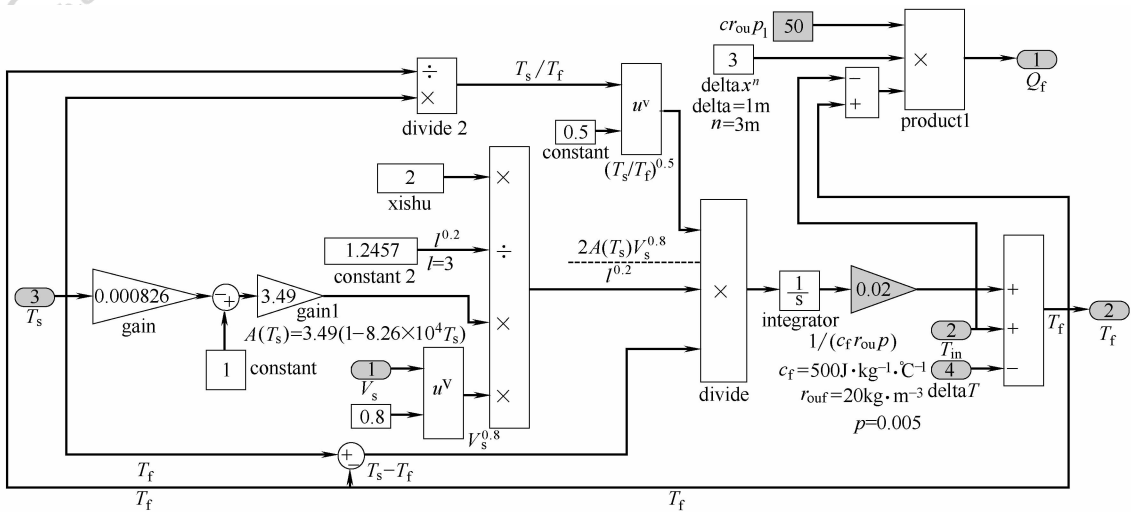


图 4 Q_f 和 T_f 模块组成
Fig. 4 Subsystem of Q_f and T_f

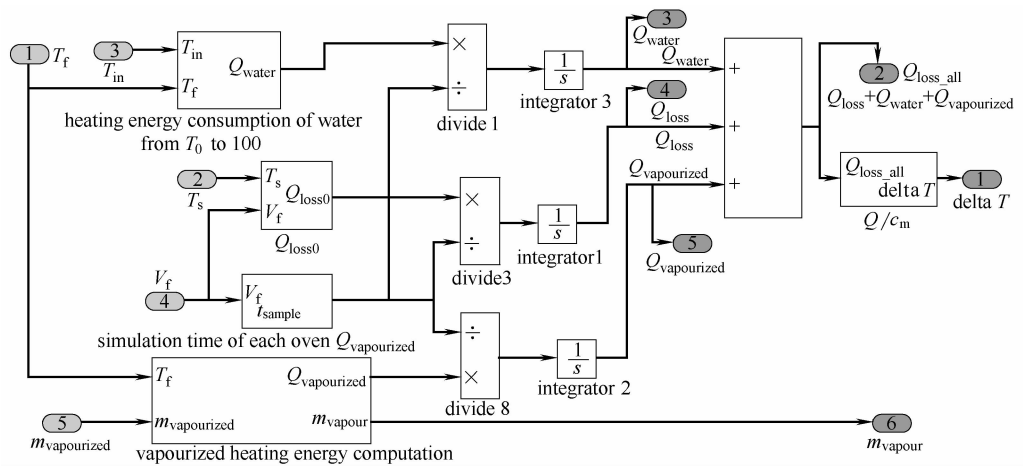


图 5 热损失模块 $Q_{\text{loss_all}}$
Fig. 5 Subsystem of $Q_{\text{loss_all}}$

表 1 不同织物对应的约束条件值

Table 1 Range of Constraints for different kinds of fabric

Fabric	$T_{\text{low}}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{high}}/^{\circ}\text{C}$	$v_{\text{low}}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$v_{\text{high}}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$T_{\text{setting}}/^{\circ}\text{C}$	Time_setting/s
stretch fabric	170	200	0.6	1.2	150	20
polyester fabric	170	210	0.5	1.2	155	20
linen fabric	150	170	0.8	1.5	125	15
cotton fabric	140	165	1	1.8	110	12

表 1 给出了常见织物的约束条件值。

3.3 PSO 优化算法求解过程

本文采用基于 Matlab 环境的 PSO 工具箱，该工具箱的具体算法实现见文献 [10]。

针对热定型机能耗模型及多个约束条件，对 PSO 函数进行如下定义。

pso (fitnessfcn, nvars, Aineq, bineq, Aeq, beq, LB, UB, nonlcon, options) //求解优化问

题的主函数。

fitnessfcn 为目标函数的句柄。本问题中，通过调用 @sim_heating_oven 函数来实现。@sim_heating_oven 是作者编写的子函数文件，函数内容见第 2 节。

nvars 为待求解的优化问题的维度，这里取值为 11。11 个优化变量分别为十级烘房的温度 $T_s(1), T_s(2), \dots, T_s(10)$ ，以及织物在烘房中

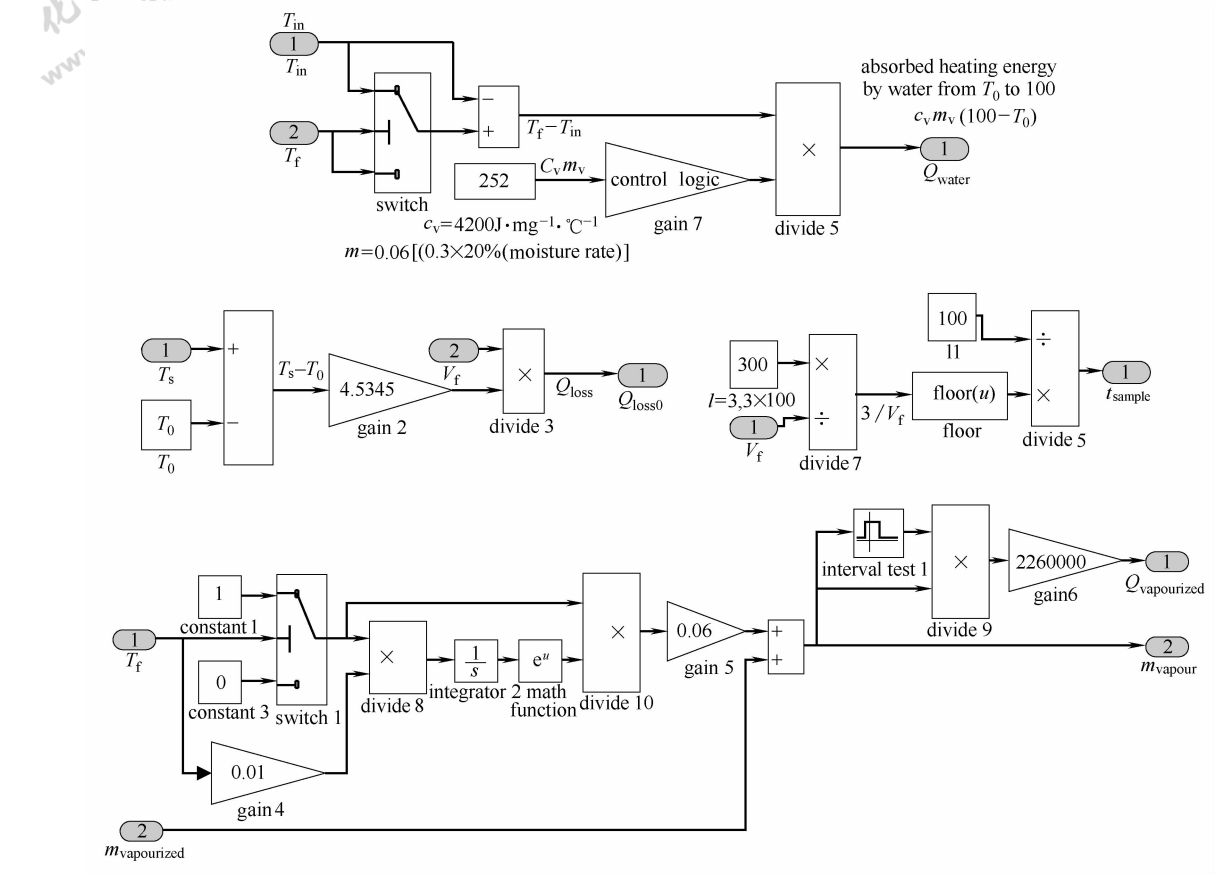


图 6 Q_{loss} 、 Q_v 、 Q_w 子模块

Fig. 6 Subsystem of Q_{loss} , Q_v , Q_w

表 2 基于 PSO 的能耗模型优化结果

Fabric type	The best result of 10 running			Average result
	$Q_{\text{all}}/\text{kJ} \cdot \text{mg}^{-1}$	v_f	$T_s(1), T_s(2), \cdots, T_s(10)$	
stretch fabric	36. 61	0. 61	160,190,162,166,163,164,160,160,160,160	36. 85
polyester fabric	38. 80	0. 69	170,209,172,190,180,173,171,174,170,170	38. 99
linen fabric	33. 68	0. 51	145,169,147,152,146,146,146,146,145,145	33. 92
cotton fabric	33. 06	0. 50	141,160,141,148,145,144,141,142,140,140	33. 98

的行进速率 v_f 。

Aineq= [], bineq= [], 线性不等式约束，文中无此项约束，因此这里为空值。

Aeq= [], beq= [], 线性等式约束，文中亦无此项约束，置空值。

LB, UB 为 11 个优化变量 $T_s(1)$, $T_s(2)$, $\cdots$, $T_s(10)$, v_f 的下限、上限值。各变量的上下限值设定详见表 2。

nonlcon 为非线性约束，文中通过调用自编写子函数 @nonlinear_constraints 来实现。

options 为其他附加参数设定，设定值如下。

加速常数： $c_1 = 1.25$, $c_2 = 0.5$ ；惯性权重采

用如下函数形式： $w(k+1) = k_w w(k)$ ，其中 $w(0) = 0.9$, $k_w = 0.85$ ；种群代数：Generations = 50；种群数：PopulationSize = 40。

3.4 优化结果及讨论

运用上述 PSO 函数，对实际工业生产中的 4 种常见的定型织物（弹力布，涤纶，麻布，棉布）分别进行了优化求解，其结果如表 2 所示。表 2 给出了 PSO 算法在 4 种织物中的 10 次运行结果最优值和平均值。同时，为了清楚地观察 PSO 算法的优化过程和效果，图 7 为其中一次 PSO 算法求解过程中最优目标值以及平均目标值随迭代代数变化的趋势。

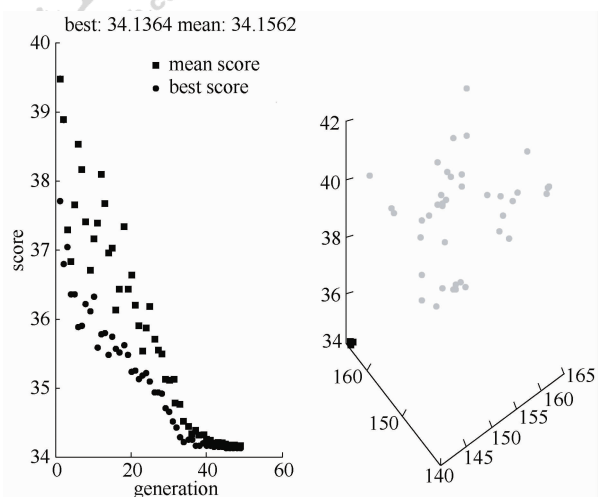


图 7 单次 PSO 算法优化过程

Fig. 7 Optimization process of PSO algorithm

由表 2 和图 7 可以得出：

(1) 针对不同织物的不同定型条件和要求，应用 PSO 算法可得到对应能耗最小时的优化参数值。根据实际要求，输入待定型织物的定型条件，通过求解即可得出该织物在最优能耗下的关键参数优化值；

(2) 十次运行的最优值与平均值差异不太，表明文中应用的 PSO 算法的参数设置合理，可以有效地解决文中提出的能耗模型优化；

(3) 从图 7 可以看出，PSO 算法在运行 40 次以后基本找到了最“优”值，算法的收敛速度较快，算法应用的有效性较高。

4 结 论

本文首先介绍了热定型机能耗模型的推导、建立以及基于 Matlab 的模型构建；在此基础上通过合理设定约束条件和参数设定，应用 PSO 算法对

构建的能耗模型进行求解。求解结果表明，本文构建的热定型机能耗模型符合实际定型机的特点，优化结果符合生产要求，得到了现场工程师的初步认可。下一步的任务是进一步结合定型机实际生产的特点，与现场工程师合作将能耗模型优化结果应用到实际生产，为操作员工提供操作建议和指导。

References

- [1] Wu Zhoulin (吴周林), Jin Jizhong (金继忠). Transformation of heat setting machine drying [J]. *Wool Textile Journal* (毛纺科技), 1997, **32** (6): 191-196
- [2] Luo Shengwen (罗胜文). Improvement of K-10 type stenter machine [J]. *Advanced Textile Technology* (现代纺织技术), 2003, **2** (11): 51-53
- [3] Mori S, Kondo S, Kinose R. Roll shaping machine realizing high efficiency and stable grinding [J]. *Hitachi Review*, 1996, **45** (6): 289-292
- [4] Kinose R, Kondoh S, Mori S. Development and application of built-in roll shaping machine for hot strip mill work rolls [J]. *Iron and Steel Engineer*, 1997, **74** (1): 32-36
- [5] Zhou Daqing (周大庆). Application of industrial control computer in heat setting machine of textile industry [J]. *Textile Machinery* (纺织机械), 2000, **14**: 25-29
- [6] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization// *Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Neural Networks* [C]. Piscataway: IEEE Service Center, 1995: 1942-1948
- [7] Poli R. Analysis of the publications on the applications of particle swarm optimization [J]. *Journal of Artificial Evolution and Applications*, 2008: 1-10
- [8] Gao Shang, Zhang Zaiyue, Cao Cungen. Multiply particle swarm optimization algorithm [J]. *Journal of Computers*, 2010, **5** (1): 150-157
- [9] Yang Tianqi. A multi-objective PSO algorithm for energy-efficient scheduling [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, **143/144**: 663-667
- [10] Perez R E, Behdinan K. Particle swarm approach for structural design optimization [J]. *Computers and Structures*, 2007, **85**: 1579-1588