

控制与决策

Control and Decision

改进型灰狼算法在热电偶动态补偿中的应用

韩太林, 张延雪, 王啸, 张恩奎

引用本文:

韩太林, 张延雪, 王啸, 等. 改进型灰狼算法在热电偶动态补偿中的应用[J]. *控制与决策*, 2021, 36(1): 61–67.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0688>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于强化学习的倒立摆分数阶梯度下降RBF控制](#)

Reinforcement learning based fractional gradient descent RBF neural network control of inverted pendulum
控制与决策. 2021, 36(1): 125–134 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0816>

[基于超级节点的分布式传感器节点定位算法](#)

A distributed sensor nodes localization algorithm based on super nodes
控制与决策. 2020, 35(12): 2898–2906 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0219>

[基于操作风险的双模式传感器管理方法](#)

A dual-mode sensor management method based on operational risk
控制与决策. 2020, 35(12): 2993–2998 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1541>

[参数未知的离散系统Q-学习优化状态估计与控制](#)

Q-learning optimal state estimation and control for discrete systems with unknown parameters
控制与决策. 2020, 35(12): 2889–2897 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0180>

[异构网络中基于鸽群优化算法的D2D资源分配机制](#)

Resource allocation for D2D based on pigeon-inspired optimization algorithm in heterogeneous networks
控制与决策. 2020, 35(12): 2959–2967 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0526>

改进型灰狼算法在热电偶动态补偿中的应用

韩太林, 张延雪, 王 啸[†], 张恩奎

(长春理工大学 电子信息工程学院, 长春 130022)

摘要: 为解决热电偶传感器在瞬态温度测试过程中因传感器动态性能不足引入动态误差影响测试精度的问题, 提出基于改进型灰狼优化算法的热电偶传感器动态补偿方法. 通过改变候选解产生策略和引入动态权重因子, 对灰狼优化算法(GWO)进行改进, 从而进一步提高了热电偶传感器的时间常数. 根据热电偶传感器水浴法校准数据寻优获得补偿系统传递函数, 并对实测火焰数据进行实验. 实验结果表明, 水浴法校准数据经补偿后时间常数由 0.068 5 s 提升为 0.014 7 s, 动态误差减小了近 75%. 经 IGWO 寻优获得的动态补偿系统, 可有效地改善热电偶传感器的动态特性, 减小热电偶传感器的动态误差.

关键词: 灰狼优化算法; 热电偶; 动态补偿; 动态权重; 数据处理

中图分类号: TP212

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0688

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 韩太林, 张延雪, 王啸, 等. 改进型灰狼算法在热电偶动态补偿中的应用 [J]. 控制与决策, 2021, 36(1): 61-67.

Application of improved grey wolf algorithm in dynamic compensation of thermocouple

HAN Tai-lin, ZHANG Yan-xue, WANG Xiao[†], ZHANG En-kui

(College of Electronic and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to solve the problem of the dynamic error affecting the test accuracy of the thermocouple sensor during the transient temperature test, the dynamic compensation method of the thermocouple sensor based on the improved gray wolf optimization (IGWO) algorithm is proposed. The gray wolf optimization (GWO) algorithm is improved by changing the candidate solution generation strategy and introducing the dynamic weighting factor, thereby further improving the time constant of the thermocouple sensor. According to the thermocouple sensor water bath method calibration data to obtain the compensation system transfer function, and experiments on the actual measured flame data is performed. The experimental results show that the time constant of the water bath calibration data is increased from 0.068 5 s to 0.014 7 s, and the dynamic error is reduced by nearly 75%. The dynamic compensation system obtained by IGWO optimization effectively improves the dynamic characteristics of the thermocouple sensor and reduces the dynamic error of the thermocouple sensor.

Keywords: grey wolf optimization algorithm; thermocouple sensor; dynamic compensation; dynamic weight; data processing

0 引言

火炮、火箭炮等武器在发射过程中产生的高温高压的火药燃气高速冲刷武器身管的内膛, 使得身管内膛壁的温度变化剧烈, 其温度的变化与武器身管的烧蚀程度有密切关系, 所以测量武器内膛壁的温度对装药射击的热安全性和延长武器的使用寿命具有一定意义^[1-2].

膛内温度由于火药燃气具有高温高压的特点难以直接测量, 可采用热电偶传感器测量武器外壳的多点表面温度, 通过武器身管热传动模型反演膛内温度. 热电偶传感器的偶结情况反映了热电偶测温时的响应速度^[3], 偶结裸露的热电偶测温时的响应速度较快, 即时间常数小, 但在恶劣的测试环境中易造成热电偶的损坏, 不适用于火炮等武器温度的测试; 偶

收稿日期: 2019-05-18; 修回日期: 2019-07-31.

基金项目: 国家重点科技攻关计划项目(20170204053GX).

责任编辑: 柴利.

[†]通讯作者. E-mail: wangx_work@126.com.

结带有保护套的热电偶其测温时的响应速度较慢,即时间常数大,在恶劣的测试环境中不易造成热电偶的损坏,所以更适用于测量火炮身管的温度. 偶结带有保护套的热电偶在测量快速变化温度的过程中,由于本身的热惯性和有限热传导的因素^[4],使得传感器响应速度无法跟上温度变化速度,导致测量结果存在动态误差;因此,需对热电偶传感器的动态性能进行改善. 目前,常用的改善措施有两种:一种是改进热电偶结构从而减小偶结热容量^[5-6];另一种是构建动态补偿滤波器用来拓宽传感器工作频带^[7-9]. 减小偶结热容量会减小偶结体积和机械强度,而在火炮身管温度测试过程中,温度变化要伴随炸药爆炸,极易对传感器造成损伤. 而构建动态补偿滤波器只需要辨识出滤波器的阶次和参数,并未改进传感器的偶结,其方法易于实现且补偿效果好^[10]. 在设计动态补偿滤波器时,需采用各种优化算法来建立补偿滤波器的模型. 粒子群优化算法(PSO)作为传统经典算法具有算法简单易于实现的优点,但同时也存在收敛速度慢、寻优精度低的问题^[11-12]. 灰狼优化算法(GWO)根据其等级制度和狩猎机制,使得算法具有寻优精度高、收敛速度快的特点. 但是,灰狼优化算法在解决复杂优化问题时仍然存在易陷入局部极值(即早熟收敛)的现象^[13-15]. 所以,本文引入灰狼优化算法并对算法进行改进从而建立较好的动态补偿滤波器模型,改善热电偶的动态性能,提高热电偶的补偿精度.

1 灰狼优化算法(GWO)

1.1 GWO算法原理

灰狼优化算法(grey wolf optimizer, GWO)是一种新颖的群体智能优化算法^[16],它通过模拟灰狼群体的狩猎行为最终实现优化的目的. 灰狼群体根据其严格的等级制度将灰狼个体从高到低进行排序,分为头狼、下属狼、普通狼和其余灰狼个体. 灰狼群体搜索猎物主要依靠头狼、下属狼和普通狼的位置进行搜索来估计猎物所在的位置,它们彼此分道扬镳,寻找猎物,种群内其余灰狼个体以其估计猎物的位置为标准,计算自己与猎物的距离,从而实现灰狼群体对猎物的包围和各个方向的攻击,最终定位猎物准确位置,成功捕获猎物. 灰狼捕获猎物的过程如图1所示.

下面给出灰狼算法中的3个定义.

1) 灰狼个体与猎物之间的距离^[16]. 当灰狼群体搜索到猎物时,首先需对猎物进行包围,对应应在GWO算法中,需要确定灰狼个体与猎物之间的距离,即

$$D = |CX_p(t) - X(t)|, \quad (1)$$

$$C = 2r_2. \quad (2)$$

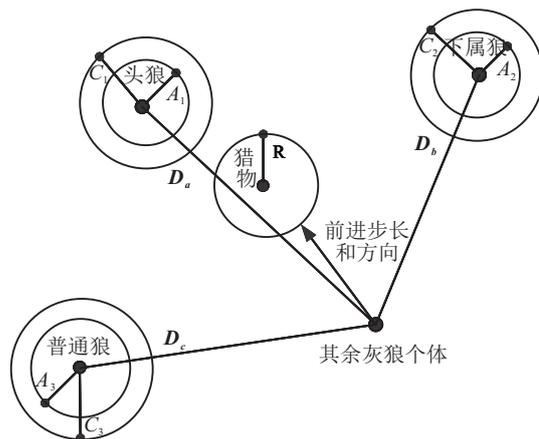


图1 灰狼捕获猎物的过程

其中: t 为当前迭代次数, C 为系数向量, r_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机数, X_p 为猎物的位置向量, X 为灰狼个体位置向量.

2) 灰狼个体位置更新为^[16]

$$X(t+1) = X_p(t) - AD, \quad (3)$$

$$A = 2a(t)r_1 - a(t). \quad (4)$$

其中: A 为系数向量, r_1 为 $[0, 1]$ 之间的随机数, $a(t)$ 为随着迭代次数的增多由2线性下降到0.

3) 猎物位置定位. 当灰狼判断出猎物所在位置时,将由头狼带领下属狼和普通狼发动追捕行为. 在灰狼群体中,头狼、下属狼和普通狼这三者距离猎物最近,可以根据这三者位置判断出当前猎物位置.

在数学上模拟灰狼群体的狩猎行为如下:首先,假设头狼(最优解)、下属狼和普通狼对猎物可能存在的位置有更好的了解,因此保留前3个解. 图1中, D_a 、 D_b 、 D_c 表示其余灰狼个体分别与头狼、下属狼和普通狼之间的距离,有

$$D_a = |C_1X_a(t) - X(t)|, \quad (5)$$

$$D_b = |C_2X_b(t) - X(t)|, \quad (6)$$

$$D_c = |C_3X_c(t) - X(t)|; \quad (7)$$

其余灰狼个体向头狼、下属狼和普通狼的位置前进的步长和方向为

$$X_1 = X_a - A_1D_a, \quad (8)$$

$$X_2 = X_b - A_2D_b, \quad (9)$$

$$X_3 = X_c - A_3D_c. \quad (10)$$

灰狼个体的位置更新为

$$X(t+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3}, \quad (11)$$

其灰狼算法的流程如图2所示.

实际上,灰狼优化算法是将求解优化问题的解空间对应为灰狼捕食猎物的空间,在每一次的迭代过程

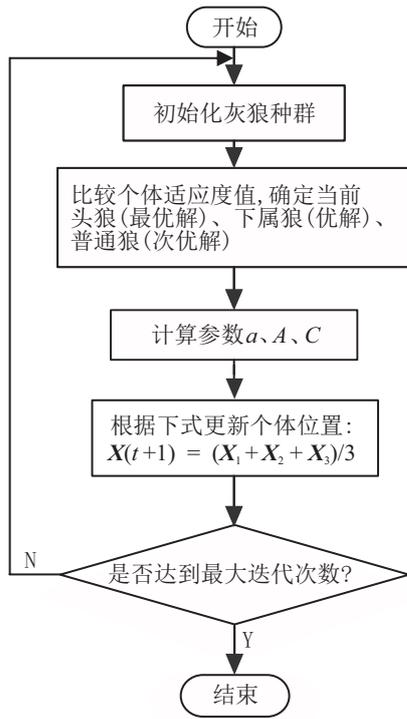


图2 灰狼算法流程

中,每个灰狼个体所在的位置信息都是求解优化问题的一个可行解,可通过多次迭代并计算适应度函数来获取最优解对应的位置信息。

1.2 GWO与标准PSO算法对比

GWO算法和PSO算法的本质都是对动物觅食行为的模拟,但是两者搜索机理并不相同。PSO算法是将种群个体看成无质量无体积的粒子,每个粒子根据个体极值和全局极值来更新自己的速度和位置,通过粒子个体间的协作与竞争,最终实现最优解的搜索。GWO算法则是将种群中每个个体看成灰狼,根据其严格的等级制度选出头狼、下属狼和普通狼,其中下属狼、普通狼和其他灰狼个体都受到头狼的支配,每个灰狼个体根据其头狼、下属狼及普通狼的方向和距离的平均值来更新个体前进的方向和距离,从而实现最优解的搜索。GWO算法与PSO算法相比,其调制参数少,编程难度小,并且GWO算法本身并不依赖于参数的设置,而PSO算法在搜索性能方面过分依赖于调制参数^[17],因此GWO算法的全局搜索能力和搜索速度要比PSO算法更强、更快。

由于GWO算法本身的特性,在相同的迭代次数下求解相同的寻优问题上,GWO算法能比PSO算法更快速地搜索到更好的结果,寻优精度高。但是,GWO算法也存在一些不足之处,如在解决复杂优化问题时,随着迭代次数的增加,算法后期种群的多样性逐渐减小,易使算法陷入局部最优,从而影响算法在热电偶动态补偿中的应用。通过上述算法的比

较与分析,本文选用GWO算法,并对算法的不足之处加以改进,从而使其能够更好地应用于热电偶的动态补偿中。

2 改进灰狼优化算法(IGWO)

针对灰狼优化算法存在的不足,本文从算法产生的搜索空间和个体位置更新这两方面对灰狼算法进行改进,即改变候选解产生策略和引入动态权重因子,使算法在热电偶传感器的动态补偿上得到较好的应用。

2.1 候选解产生策略

在灰狼算法的寻优过程中,提高候选解质量有助于提高灰狼个体的多样性,避免早熟现象。因此,本文改进算法的候选解,即在候选解中加入变异算子,通过变异算子将种群中具有良好信息的两个灰狼个体之间的加权差向量加到第3个灰狼个体上,从而产生新的灰狼个体,实现候选解质量的提高。

变异算子的具体实现方法:首先,对每个候选解计算其适应度函数值,并按计算值的大小从大到小的顺序进行排序;然后,计算每个候选解的排名所占全部候选解排名中的比例,比例越小的候选解被选中为变异算子的几率越大,从而使种群中良好信息传递给后代。

$$fit(i) = fit(Pos(i)), \tag{12}$$

$$[fit(i), Index(i)] = sort(fit(i)), \tag{13}$$

$$P = \frac{Index(i)}{N}, \tag{14}$$

$$Pos(t + 1) = Pos_{P_1}(t) + 0.5(Pos_{P_2}(t) - Pos_{P_3}(t)). \tag{15}$$

其中:Pos(i)为每个灰狼个体的位置信息,fit(i)为适应度函数,Index(i)为适应度值从大到小的排序,P为每个候选解的排名所占全部候选解排名中的比例,N为种群大小,Pos_P(t)为第t代种群中比例P较小的第i个个体。

2.2 动态权重因子

在灰狼算法中,头狼(最优解)可能接近的不是全局最优解,而是局部最优解,这将使整个种群向着局部最优解收敛,使迭代结果陷入局部最优。为了提高局部搜索的能力,引入线性递减的动态权重因子。通过动态权重因子的调节,可以使算法在迭代初期位置更新的步长较大,在迭代后期位置更新的步长较小,然后通过每次迭代计算适应度值来动态改变一次位置更新的步长,从而提高局部搜索的能力,使算法避免陷入局部最优,提高算法收敛速度。动态权重因子

$$w = w_{\text{end}} + \frac{(w_{\text{start}} - w_{\text{end}})(M - t)}{M}. \quad (16)$$

其中: $w_{\text{start}} = 0.9, w_{\text{end}} = 0.4, M$ 为最大迭代次数, t 为当前迭代次数.

2.3 IGWO算法步骤描述

IGWO算法求解步骤如下:

step 1: 首先初始化灰狼种群个体位置信息、种群大小和迭代次数, 并随机生成 a, A, C 等参数.

step 2: 计算每个候选解的适应度值, 保留适应度值较好的前3个灰狼个体位置, 分别记为 Alpha_pos、Beta_pos 和 Delta_pos. 根据式 (5) 和 (10) 进行计算, 得出其余灰狼个体分别与头狼、下属狼和普通狼之间的距离以及前进的步长和方向.

step 3: 将动态权重因子 w , 即式 (16) 代入式 (11), 从而更新灰狼个体位置, 即

$$\text{Pos}(i, j) = \frac{w(X_1 + X_2 + X_3)}{3}. \quad (17)$$

step 4: 根据式 (12) 和 (15) 进行变异操作, 产生新的子代灰狼个体.

step 5: 更新 a, A, C 等参数值.

step 6: 判断算法是否满足终止条件, 若满足结束条件, 则输出 Alpha_pos, 否则重复执行 step 2 ~ step 6.

2.4 测试寻优函数

采用 IGWO 算法对如下 4 个维数均为 30 的基准测试函数进行最小值寻优测试, 并且与 GWO 算法以及 PSO 算法进行实验对比, 其中基准测试函数的理论最优适应度值都为 0.

1) Ackley 函数 ($-32 < x_i < 32, i = 1, 2, \dots, n$) 如下:

$$f_1(x) =$$

$$-20 \exp\left(-0.2\sqrt{\frac{1}{D} \sum_{i=1}^D x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{D} \sum_{i=1}^D \cos(2\pi x_i)\right) + 20 + e. \quad (18)$$

2) Griewank 函数 ($-600 < x_i < 600, i = 1, 2, \dots, n$) 如下:

$$f_2(x) = 1 + \sum_{i=1}^D \frac{x_i^2}{4000} - \prod_{i=1}^D \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right). \quad (19)$$

3) Rastrigrin 函数 ($-5.12 < x_i < 5.12, i = 1, 2, \dots, n$) 如下:

$$f_3(x) = \sum_{i=1}^D (x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10). \quad (20)$$

4) Sphere 函数 ($-100 < x_i < 100, i = 1, 2, \dots, n$) 如下:

$$f_4(x) = \sum_{i=1}^D x_i^2. \quad (21)$$

在仿真实验中, 设置种群大小均为 100, 维数均为 30, 最大迭代次数为 200. 表 1 给出了对于 4 个测试函数分别采用 3 种算法独立进行 20 次重复测试的实验结果对比.

表 1 中的 4 个基准函数常被用于测试算法的函数性能. 其中前 3 个函数为多峰基准函数, 后 1 个函数为单峰基准函数. 由表 1 的对比结果可看出, IGWO 算法对多峰函数和单峰函数的寻优结果明显比 GWO 算法和 PSO 算法结果更接近理论最优值, 其标准差甚至为零, 这表明了 IGWO 算法有较强的鲁棒性和寻优能力. 并且, IGWO 算法在最优值和平均值方面的结果也明显优于 GWO 和 PSO, 表明 IGWO 算法在寻优问题中有更高的搜索效率, 并且能避免早熟.

表 1 基准测试函数结果对比

函数名	算法	最优值	平均值	标准差	理论最优值
Ackley	IGWO	8.881 8e-16	8.881 8e-16	0	0
	GWO	2.215 1e-08	4.882 2e-08	1.475 4e-08	0
	PSO	5.175 0	7.431 5	1.400 0	0
Griewank	IGWO	0	0	0	0
	GWO	2.919 0e-14	0.011 8	0.017 3	0
	PSO	1.985 4e+02	4.372 1e+03	1.234 9e+04	0
Rastrigrin	IGWO	0	0	0	0
	GWO	1.881 5e-11	6.740 5	3.914 3	0
	PSO	34.201 5	54.830 9	17.413 7	0
Sphere	IGWO	0	0	0	0
	GWO	3.744 4e-15	1.927 9e-14	1.399 4e-14	0
	PSO	1.566 8e+04	2.162 3e+04	30.435 1	0

3 基于IGWO的热电偶动态补偿

3.1 热电偶动态补偿原理

在温度测试过程中,由于热电偶传感器动态性能不足,使得传感器响应速度跟不上温度变化速度,测量结果存在动态误差,从而影响测试精度,因此需要对热电偶实测数据进行动态补偿,使其补偿后的信号尽可能地接近原始信号,减小动态误差^[18]。图3为热电偶动态补偿原理图。

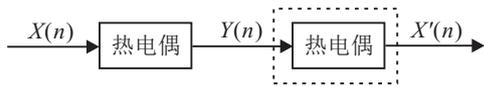


图3 热电偶动态补偿原理

图3中: $X(n)$ 为被测的温度信号, $Y(n)$ 为经过热电偶传感器后带有动态误差的信号, $X'(n)$ 为经过动态补偿滤波器补偿后得到的信号。在传感器后面接入补偿器可以拓宽传感器系统的工作频带,提高响应速度,使得实测信号经过补偿系统后动态误差可以减小^[19]。求解最优补偿器的本质就是求取最优补偿器的传递函数 $H(z)$ 。因此,本文将原始温度信号 $X(n)$ 作为补偿器的输出,经过热电偶测得的信号 $Y(n)$ 作为补偿器的输入,从而建立差分方程

$$A(z)X(n) = B(z)Y(n), \quad (22)$$

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_nz^{-n}}{1 + a_1z^{-1} + \dots + a_nz^{-n}}. \quad (23)$$

其中: $b_0, b_1, \dots, b_n, a_1, \dots, a_n$ 分别为分子和分母系数, n 为系统阶数。由式(23)可见,求取最优 $H(z)$ 的问题可转化为求取 $H(z)$ 中最优参数的问题,针对这一问题将采用IGWO算法进行求解。

在动态补偿方法中,常采用最小均方误差作为优化算法的适应度函数,其公式如下:

$$f = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (x'(n) - x(n))^2}. \quad (24)$$

最小均方误差越小表示寻优个体的适应度值越好,因此会获得 $H(z)$ 的最优参数,从而构建最优补偿器实现对原始输入数据的补偿。基于改进型灰狼算法的热电偶动态补偿原理如图4所示。

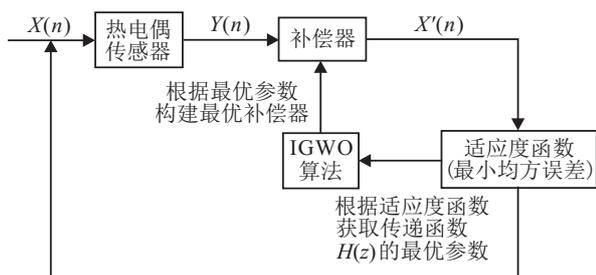


图4 基于改进型灰狼算法的热电偶动态补偿原理

3.2 IGWO对水浴法得到的数据进行补偿

水浴法能产生恒定的温度值,因此常被用来动态校准热电偶,将热电偶快速插入热水浴中,热电偶因受到一个阶跃温度激励而产生阶跃响应,此时会得到被校热电偶的时间常数^[20]。给热电偶传感器加温度阶跃信号时,产生温度阶跃信号的时间常数小于被校传感器时间常数的10%时,校准结果才有效^[21]。本实验采用两种型号的热电偶同时进行水浴法实验,经实验可得,慢响应速度热电偶(图5中蓝色曲线)的时间常数为0.0685s,快响应速度热电偶(图5中绿色曲线)的时间常数为0.00513s,其快响应速度热电偶的时间常数小于慢响应速度热电偶的时间常数的10%,所以将响应速度较快的热电偶代替温度阶跃信号,从而用来校准响应速度较慢的热电偶。图6为两种型号的热电偶,图7为水浴法实验装置图。

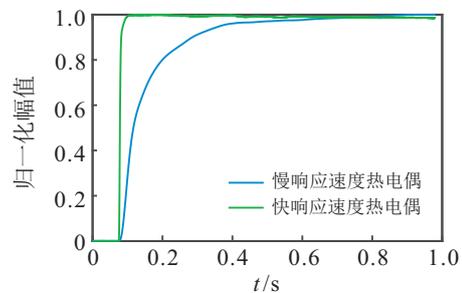


图5 两种热电偶水浴实验数据



(a) 快速响应热电偶TT-K-30-SLE-2M+SMPW (b) 慢速响应热电偶WRNK-191(铠装热电偶)

图6 热电偶的型号

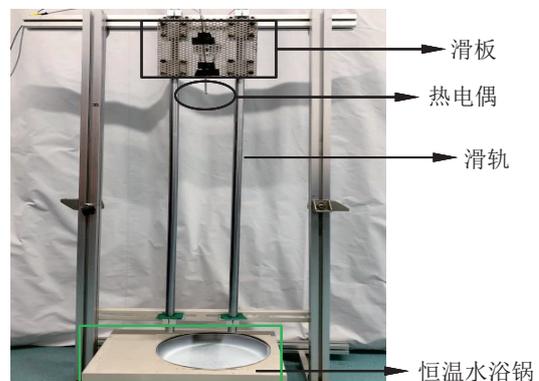


图7 水浴法实验装置

图5为两种热电偶的水浴实验数据,该数据经截止频率为64Hz的低通滤波器去除了噪声干扰(截止

频率 $f = 0.35/0.00551\text{ s}$, 0.00551 s 为热电偶的上升时间, 即响应从稳态值的 10% 上升到 90% 所需要的时间^[22], 可见响应速度慢的热电偶其测量的动态误差较大。

本文采用 5 阶线性系统作为动态补偿系统, 并以响应速度较慢的热电偶实测数据作为输入, 以响应速度较快的热电偶实测数据作为输出, 通过 IGWO 确定传递函数的参数, 从而构建补偿系统的传递函数为

$$H(z) = \frac{(-2.727 - 3.615e^{-4}z^{-1} + 4.003e^{-2}z^{-2} + 1.759e^{-1}z^{-3} + 7.029e^{-5}z^{-4} + 2.511z^{-5})}{(1 - 1.940e^{-4}z^{-1} + 3.251e^{-6}z^{-2} - 1.043e^{-4}z^{-3} + 8.055e^{-5}z^{-4} - 1.178e^{-5}z^{-5})}. \quad (25)$$

设置种群大小为 100, 最大迭代次数为 20000, 其补偿系统对热电偶实测数据的补偿效果如图 8 所示. 为了更好地说明 IGWO 动态补偿的有效性, 图 8 给出了经 PSO 动态补偿后的曲线. 经 IGWO 动态补偿后, 其时间常数由 0.0685 s 提升为 0.0147 s , 经 PSO 动态补偿后, 其时间常数由 0.0685 s 提升为 0.0229 s (起始时间为 0.07177 s), 从数据中可以明显看出基于 IGWO 的动态补偿效果优于 PSO 的动态补偿效果, 并且基于 IGWO 动态补偿后, 其动态误差减小近 75% (在 0.1038 s 处, 快响应速度热电偶测得的幅值为 1, 慢响应热电偶测得的幅值为 0.3393 , 经 IGWO 测得的幅值为 1.161), 有效提升了慢速响应热电偶的响应速度。

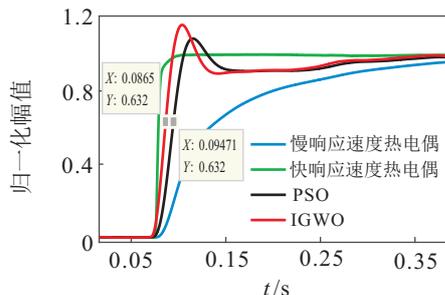


图 8 热电偶实测信号的动态补偿

3.3 IGWO 对实测火焰温度数据补偿结果

在实际应用中, 首先会根据实验室水浴法所得实测数据构建补偿系统的传递函数 (具体传递函数如式 (25) 所示), 之后将热电偶所测得实际温度信号经过热电偶的补偿系统, 获得补偿后的数据。

某次火焰温度测试中, 采用上述所说的两种热电偶同时进行温度测量, 其所测得的实际温度信号与补偿后的温度数据如图 9 所示. 当温度突然升高时, 慢速响应的热电偶由于响应速度较低, 无法跟上温度的快速变化, 从而使得测试结果不准确. 通过 IGWO

所求得的传递函数提高了慢速响应热电偶的响应速度. 由于两种热电偶本身型号的不同, 导致两种热电偶在温度冷却时的下降速度不一样, 经 IGWO 补偿后曲线下降速度快于快速响应热电偶曲线的下降速度. 但是, 针对测量温度信号的准确度是有所提高的, 由图 9 可见, 补偿后信号的温度值更加接近真实火焰信号的温度值. 快响应速度热电偶测得的归一化温度值为 1, 峰值时间为 0.0485 s (起始时间为 0.0671 s), 慢响应速度热电偶测得的归一化温度值为 0.3107 , 峰值时间为 0.087 s , 慢响应速度热电偶经 IGWO 补偿后其归一化温度值上升为 0.8717 , 其峰值时间降低为 0.0487 s , 使动态误差有效减小近 80%。

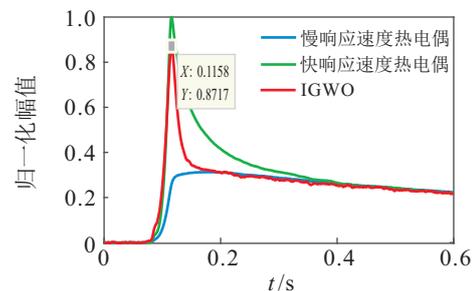


图 9 火焰实测信号补偿前后对比

4 结论

本文提出了一种改进型的灰狼优化算法, 分别从狼群的产生机制和狼群的搜索方面进行改进, 提高了算法的收敛速度和求解精度. 将改进的 IGWO 算法应用于热电偶的动态补偿, 通过实验室的水浴法和火焰的实测数据, 验证了 IGWO 算法应用于热电偶动态补偿上的可行性, 其补偿后的时间常数优于文献 [20] (时间常数为 0.0941 s), 有效改善了热电偶的动态性能, 提高补偿精度, 减小了热电偶传感器的动态误差。

参考文献 (References)

- [1] 朱文芳, 王育维, 郭映华, 等. 某火炮身管温度仿真计算及其影响因素分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2016, 37(4): 58-62.
(Zhu W F, Wang Y W, Guo Y H, et al. Temperature simulation calculation and analysis of influential factors of a certain gun barrel[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2016, 37(4): 58-62.)
- [2] 陈桂东, 周彦煌. 身管受热及其对弹丸腔内滞留的影响[J]. 火炮发射与控制学报, 2010, 31(1): 8-12.
(Chen G D, Zhou Y H. Heat in the body tube and its influence on the retention of the projectile[J]. Journal of Gun Launch and Control, 2010, 31(1): 8-12.)
- [3] 杨宇, 郝晓剑, 周汉昌. 热电偶动态校准及动态补偿技术研究[J]. 光电技术应用, 2013, 28(6): 77-80.
(Yang Y, Hao X J, Zhou H C. Research on thermocouple dynamic calibration and dynamic compensation technology[J]. Journal of Optoelectronic Technology,

- 2013, 28(6): 77-80.)
- [4] 张根甫, 郝晓剑, 桑涛, 等. 热电偶温度传感器动态响应特性研究[J]. 中国测试, 2015, 41(10): 68-72.
(Zhang G B, Hao X J, Sang T, et al. Dynamic response characteristics of thermocouple temperature sensor[J]. China Testing, 2015, 41(10): 68-72.)
- [5] 潘保青, 李岩峰, 张志杰. 基于量子粒子群算法的热电偶动态校准及动态补偿技术研究[J]. 传感技术学报, 2015, 28(7): 992-996.
(Pan B Q, Li Y F, Zhang Z J. Research on dynamic calibration and dynamic compensation technology of thermocouple based on quantum particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Transduction Technology, 2015, 28(7): 992-996.)
- [6] 王祖光, 由臣, 秦世麒, 等. D型(钨铼)热电偶用补偿导线合金丝的研究[J]. 工业计量, 2012, 22(S2): 9-11.
(Wang Z G, Yu C, Qin S Q, et al. Study on the compensation wire alloy wire for D-type (tungsten-rhenium) thermocouples[J]. Industrial Measurements, 2012, 22(S2): 9-11.)
- [7] 陈保立. 动态测试信号降噪及系统动态补偿方法研究[D]. 太原: 中北大学仪器与电子学院, 2013.
(Chen B L. Research on dynamic test signal denoising and system dynamic compensation method[D]. Taiyuan: School of Instrumentation and Electronics, North University of China, 2013.)
- [8] 郝晓剑, 李科杰, 周汉昌, 等. 热电偶动态测量误差补偿技术研究[J]. 中北大学学报: 自然科学版, 2008, 29(4): 370-375.
(Hao X J, Li K J, Zhou H C, et al. Research on error compensation technology for thermocouple dynamic measurement[J]. Journal of North University of China: Natural Science Edition, 2008, 29(4): 370-375.)
- [9] 赵学敏, 王文廉, 李岩峰, 等. 火焰温度场测试中的传感器动态响应研究[J]. 传感技术学报, 2016, 29(3): 368-372.
(Zhao X M, Wang W L, Li Y F, et al. Research on dynamic response of sensor in flame temperature field test[J]. Journal of Transduction Technology, 2016, 29(3): 368-372.)
- [10] 轩春青, 轩志伟, 陈保立. 基于最小二乘与粒子群算法的压力传感器动态补偿方法[J]. 传感技术学报, 2014, 27(10): 1363-1367.
(Xuan C Q, Xuan Z W, Chen B L. Dynamic compensation method of pressure sensor based on least squares and particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Transduction Technology, 2014, 27(10): 1363-1367.)
- [11] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]. IEEE International Conference on Neural Networks, Perth: IEEE, 1995: 1942-1948.
- [12] 滕志军, 吕金玲, 郭力文, 等. 基于动态加速因子的粒子群优化算法研究[J]. 微电子学与计算机, 2017, 34(12): 125-129.
(Teng Z J, Lu J L, Guo L W, et al. Research on particle swarm optimization algorithm based on dynamic acceleration factor[J]. Microelectronics & Computer, 2017, 34(12): 125-129.)
- [13] Zhu A J, Xu C P, Li Z. Hybridizing grey wolf optimization with differential evolution for global optimization and test scheduling for 3D stacked SoC[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2015, 26(2): 317-328.
- [14] 徐松金, 龙文. 嵌入遗传算子的改进灰狼优化算法[J]. 兰州理工大学学报, 2016, 42(4): 102-108.
(Xu S J, Long W. Improved grey wolf optimization algorithm embedded in genetic operator[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2016, 42(4): 102-108.)
- [15] 魏政磊, 赵辉, 韩邦杰, 等. 具有自适应搜索策略的灰狼优化算法[J]. 计算机科学, 2017, 44(3): 259-263.
(Wei Z L, Zhao H, Han B J, et al. Grey wolf optimization algorithm with adaptive search strategy[J]. Computer Science, 2017, 44(3): 259-263.)
- [16] Mirjalili S, Mirjalili S M, Lewis A. Grey wolf optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69(3): 46-61.
- [17] 王养廷, 闫文忠. 分组信息共享的量子粒子群优化算法的改进[J]. 数据采集与处理, 2013, 28(3): 363-370.
(Wang Y T, Yan W Z. Improvement of quantum particle swarm optimization algorithm for group information sharing[J]. Data Acquisition and Processing, 2013, 28(3): 363-370.)
- [18] Xia Y L, Zhai Y. Dynamic compensation and its application of shock wave pressure sensor[J]. Test Science and Instruments, 2016, 7(1): 48-53.
- [19] Gong C, Li Y. Transducer modeling and compensation in high-pressure dynamic calibration[C]. ICMIT: Information Systems and Signal Processing, 2005: 6041-6046.
- [20] 赵学敏. 瞬态高温传感器动态特性分析及爆温测试应用[D]. 太原: 中北大学仪器与电子学院, 2017.
(Zhao X M. Dynamic characteristics analysis and explosion temperature test application of transient high temperature sensor[D]. Taiyuan: School of Instrumentation and Electronics, North University of China, 2017.)
- [21] 廖理. 温度传感器动态响应校准误差及影响因素分析[J]. 计测技术, 1998, 18(1): 20-21.
(Liao L. Analysis of dynamic response calibration error and influencing factors of temperature sensors[J]. Journal of Measurement Technology, 1998, 18(1): 20-21.)
- [22] Bob Alverson. Book review: High-speed digital design: A handbook of mlack magic by Howard W. Johnson and Martin Graham[J]. Acm Sigarch Computer Architecture News, 1993, 21(5): 85-86.

作者简介

韩太林(1969—), 男, 教授、博士生导师, 从事通信信号处理、盲信号处理等研究, E-mail: hantl@cust.edu.cn;

张延雪(1993—), 女, 硕士生, 从事智能信息处理的研究, E-mail: 2253242157@qq.com;

王啸(1990—), 男, 讲师, 博士, 从事信号处理、传感器补偿等研究, E-mail: wangx_work@126.com;

张恩奎(1986—), 男, 博士生, 从事现代信息处理的研究, E-mail: ekuizhang@163.com.

(责任编辑: 孙艺红)