

船用制淡制冷一体机真空泵 PSO-PID 的智能调控

孙洲阳

(集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 船用制淡制冷一体机系统性能优化的关键在于真空泵的3个比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)调控参数 K_p 、 K_i 和 K_d ,它们直接影响制冷温度和蒸发速率(制冷量和淡水产率)。针对真空泵PID参数难整定的问题,应用MATLAB Simulink,并结合船用制淡制冷一体机真空泵控制系统传递函数,将粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)运用到PID算法模型优化中进行PID参数优化。结果表明:与基于临界比例度法的PID控制器参数整定相比,PSO-PID优化算法的调节时间缩短2.8%,超调量降低4.5%,说明PSO算法优化后的船用制淡制冷一体机PID控制具有更快的响应速度和更好的鲁棒性,有效提高了控制质量,实现船用制淡制冷一体机真空泵PSO-PID的智能调控。

[关键词] 船用制淡制冷一体机;真空泵;PSO-PID算法;智能调控

[中图分类号] U 664.121

Research on PSO-PID Intelligent Regulation of Vacuum Pump for Marine Refrigeration and Desalination Integrated Machine

SUN Zhouyang

(School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The three PID control parameters K_p , K_i and K_d of the vacuum pump had become the key to optimize the system performance of the marine refrigeration and desalination integrated machine (MRDIM), which affect the refrigeration temperature and evaporation rate (refrigeration capacity and fresh water yield) directly. In response to solve the problem of difficult tuning of PID parameters for vacuum pumps, this paper combines the transfer function of the vacuum pump control system for MRDIM, and applied MATLAB Simulink and PSO algorithm to PID model, to optimize PID parameters. The results showed that compared with the PID controller parameter tuning based on the critical proportionality method, the PSO-PID optimization algorithm shortened the adjustment time by 2.8% and reduced the overshoot by 4.5%. This indicates that the PID control of the MRDIM optimized by the PSO algorithm has faster response speed and better robustness, and improves the control quality effectively, that is, realizing the PSO-PID intelligent regulation of the MRDIM vacuum pump.

Keywords: marine refrigeration and desalination integrated machine; vacuum pump; PSO-PID algorithm; intelligent regulation

0 引言

在船用制淡制冷一体机的研制过程中,真空泵的控制对象——真空罐除了具有容积延迟外,压力

[收稿日期] 2024-06-30

[基金项目] 福建省自然科学基金项目“船用真空制淡/制冷一体机优化匹配及智能调控研究”(2020J01689);国家自然科学基金项目“船用废热真空制淡/制冷/制冰系统机理及热动力学研究”(51279066)

[作者简介] 孙洲阳(1967—),副教授,博士,从事制冷制淡技术研究, E-mail: sunzhouyang@126.com。

http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb

还有很大的迟滞性，被测量的是真空罐的汽压，而控制量是真空泵的转速。所以，当改变真空泵的转速后，载热介质——水蒸汽流量对物料的出口温度和压力必然有一个迟滞的时间，即介质经过管道的时间。如何通过真空泵的智能调控解决系统迟滞问题，以及如何实现船用制淡制冷一体机性能最优控制成为当前重要的研究课题。

由于受季节和航行区域等室外环境的影响，船舶需冷冷负荷的需冷量具有非线性、大时滞和强耦合等特点，采用传统的比例-积分-微分（proportional-integral-derivative, PID）调控方式难以达到所要求的设定值^[1]。针对这种情况，采用新的智能调控方法替代传统控制方法是大势所趋。因此，探索船用制淡制冷一体机智能调控很有必要。在船用制淡制冷一体机控制过程中，由于控制对象是强耦合、大时滞、非线性的，所以对 PID 控制器的参数整定是较为困难的^[2]。PID 控制器由于结构简单、鲁棒性好、可靠性高等优点，因此在现代控制领域得到了广泛应用，而 PID 的控制性能与控制器参数 K_p 、 K_i 和 K_d 的优化整定直接相关^[3]。因此本文应用 PSO-PID 算法对船用制淡制冷一体机真空泵 PID 控制器的参数进行优化，利用智能控制理论和方法调控真空泵，使船用制淡制冷一体机的冷量输出与冷用户的需求尽可能一致，同时提高冷用户的舒适度，降低船用制淡制冷一体机的能耗。

1 船用制淡制冷一体机真空泵 PSO-PID 智能调控的设计

在船用制淡制冷一体机研制中，真空泵调控成为系统性能优劣的关键所在。图 1 是船用制淡制冷一体机自动控制系统框图，被控对象真空泵的主要作用是稳定真空罐的负压，即稳定液面的蒸发速率，从而稳定系统的制冷输出和淡水生产率。因而在选择真空泵系统的大小时，需要根据冷用户的需冷量（冷负荷）和产水率来设计。由此可见，真空泵是船用制淡制冷一体机的核心部件，承担着调控船用制淡制冷一体机制冷量和淡水生产率的重要功能，对整个船用制淡制冷一体机的高性能及其稳定可靠运行起着至关重要的作用。

船用制淡制冷一体机真空罐的真空度主要靠冷凝器的压力和真空泵的转速来及时调整，以实现动态平衡。船用制淡制冷一体机真空泵转速控制回路的主要功能是通过调节船用制淡制冷一体机真空泵转速的调节，使真空罐的真空度为定值，从而实现输出的冷冻水温度、制冷量和淡水生产率稳定。真空度整定值则根据船用制淡制冷一体机供给侧的需要及时进行调整，即真空罐的蒸汽输出流量经函数发生器转换，产生信号送给 PID 调节器，调节器产生 4 ~ 20 mA 的电流信号作为真空泵转速整定值送给船用制淡制冷一体机真空泵转速控制器。要实现 PID 参数的自整定，首先要了解被控制的对象，然后选择相应的参数计算方法来完成控制器参数的设计^[4]。

传递函数的输入为真空泵转速，输出为真空罐真空度，通过改变真空泵转速来控制真空罐真空度。根据船用制淡制冷一体机真空泵调速系统的动态特性，在满足精确度的要求下，选用二阶模型建模，并进行 PID 控制及参数优化。具体方法采用“两点法”与“曲线拟合法”相结合。由于船用制淡制冷一体机真空泵调速系统具有迟延的特性，其二阶的传递函数形式^[5]可表示为 $W(s) = 1/(s^2 + 2s + 1)$ 。其中： $W(s)$ 为传递函数； s 为拉氏算子。

2 船用制淡制冷一体机真空泵 PSO-PID 智能调控流程

在船用制淡制冷一体机实际控制过程中，控制对象是高阶、时滞、非线性的，所以对 PID 控制器的参数整定是较为困难的。PSO 由于具有简单、易于实现、设置参数少、无需梯度信息等特点，在连续非线性优化问题和组合优化问题中都表现出良好的效果。此外，PSO 算法很容易实现，计算代价

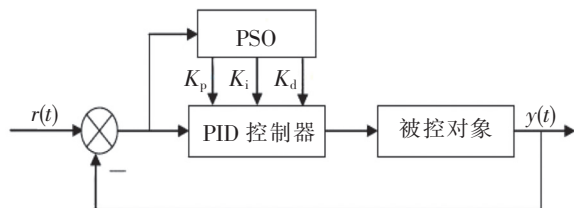


图 1 船用制淡制冷一体机自动控制系统框图
Fig.1 Block diagram of an automatic control system for marine desalination refrigeration integrated machine

低，且占用计算机硬件资源少，已被证明能很好地解决许多全局优化问题^[6]。

2.1 PSO 算法

PSO 算法的基本原理^[7]为：把鸟群中的每只鸟看作一个粒子，鸟群在寻找食物的过程中无法确定食物的具体位置，也没有具体的飞行目标，只知道自身和食物的位置关系，为了尽快找到食物，它们只能通过对距食物最近的鸟的附近空间进行不断搜索来找到食物。

在一个 D 维的搜索目标空间中，假设有 n 个微粒组成一个粒子群，其中每个微粒就是一个 D 维的，即它的空间位置可表示为向量 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{iD})$, $i = 1, 2, \cdots, n$ 。微粒的空间位置是目标优化问题中的一个解，将它代入适应度函数公式可以计算出适应度值，再根据适应度值的大小衡量微粒的优劣。第 i 个微粒的飞行速度 $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \cdots, v_{iD})$ ，它是一个 D 维的向量；第 i 个微粒所经历过的具有最好适应值的位置称为个体历史最好位置，记为 $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \cdots, p_{iD})$ ；整个微粒群所经历过的最好位置称为全局历史最好位置，记为 $p_g = (p_{g1}, p_{g2}, \cdots, p_{gD})$ 。则粒子群的进化方程可描述为

$$v_{ij}(t+1) = v_{ij}(t) + c_1 r_1(t)(p_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + c_2 r_2(t)(p_{gj}(t) - x_{ij}(t)), \tag{1}$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1). \tag{2}$$

其中： i 为微粒数； j 为微粒的维度； t 为代数； c_1 、 c_2 为加速常量，通常在 $(0, 2)$ 间取值； $r_1 \sim U(0, 1)$ 、 $r_2 \sim U(0, 1)$ 为 2 个相互独立的随机函数。从式 (1) 和式 (2) 中可以看出， c_1 调节微粒飞向自身最好位置方向的步长， c_2 调节微粒向全局最好位置飞行的步长。

通过分析基本粒子群的特点可知，式 (1) 中：第一部分 $v_{ij}(t)$ 为微粒先前的速度；第二部分 $c_1 r_1(t)(p_{ij}(t) - x_{ij}(t))$ 为“认知”部分，表示微粒本身的思考；第三部分 $c_2 r_2(t)(p_{gj}(t) - x_{ij}(t))$ 为“社会”部分，表示微粒间的社会信息共享。目前，虽然模型的社会部分和认知部分的相对重要性还没有从理论上给出，但有一些研究已经表明，对一些问题，模型的社会部分显得比认知部分更重要。

2.2 PSO-PID 算法

近 10 a 来，PSO 优化算法作为群体智能算法的一个重要分支得到了广泛深入的研究，并在最近几年里获得了快速的发展。PSO 优化算法属于种群搜索的自适应优化算法，它能自主地在约束条件的限制下寻找最优的控制参数。PID 控制器原理简单、鲁棒性好、可靠性高，因此一直是控制领域中应用最广泛的方法，尤其适用于可建立精确数理模型的确定性系统。PSO-PID 优化算法的发展为 PID 的参数整定提供了新的方法，因其结构简单、寻优效率高、精度高的特性，已被广泛应用于 PID 控制器的参数整定中^[8]。

船用制淡制冷一体机真空泵调控具有非线性、时变不确定性等问题，难以建立精确的数理模型，因而应用常规 PID 控制器不能达到理想的控制效果。此外，在实际应用的现场中，常规 PID 控制器往往会受到参数整定过程繁杂的困扰，出现整定不良、性能欠佳的情况，对船用制淡制冷一体机运行工况的适应性也较差。

为解决 PID 参数整定最优化问题，人们提出许多理论和方法，如智能优化算法等，这类待优化问题大多数具有非线性、动态、时滞和无法建立准确数理模型等特点。如今，尽管出现了许多高级控制方法如智能控制等，但是实际控制案例仍然以 PID 控制为主^[9]。在船用制淡制冷一体机中，为了提高传统 PID 整定的适应能力，本文采用 PSO-PID 算法，以期能实现船用制淡制冷一体机真空泵 PSO-PID 的智能调控。

2.3 真空泵 PSO-PID 智能调控算法流程

PSO-PID 智能调控的最终目的就是通过对 PSO 优化算法来确定 PID 最优的控制参数 K_p 、 K_i 和 K_d ，使得控制器性能最优。图 2 是船用制淡制冷一体机真空泵 PSO-PID 智能调控算法流程。PSO 算法与 Simulink 模型之间连接的是粒子（即 PID 控制器参数 K_p 、 K_i 和 K_d ）和该粒子对应的适应值（即控制系统的性能指标）。PSO 算法优化 K_p 、 K_i 和 K_d 的过程为：PSO 算法产生的粒子群先依次赋值给 K_p 、

K_i 和 K_d ，然后再运行控制系统的 Simulink 模型，获得该数组参数对应的性能指标，再传递给 PSO 算法中作为该粒子的适应值，直到满足终止条件才退出算法^[10]。

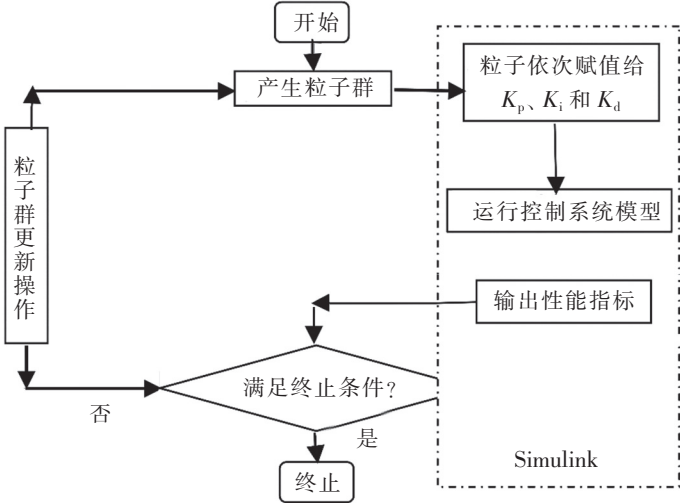


图 2 真空泵 PSO-PID 智能调控算法流程
Fig.2 Process of PSO-PID intelligent control algorithm for vacuum pump

在船用制淡制冷一体机中，真空泵控制过程都会遇到纯滞后调节控制问题，因为在船用制淡制冷一体机中，真空罐的真空度控制是一个典型的纯滞后工艺对象。在过程控制系统中，真空罐真空度控制是一种常见的控制形式，本文主要通过船用制淡制冷一体机中真空度控制的模型结构来阐述最优控制，即用 PSO 算法的思想来对 PID 参数进行自整定。

3 结果与分析

为了提高船用制淡制冷一体机系统的调控性能和稳定性，以实现更优的控制性能，采用 PSO-PID 智能调控方法是一种有效的优化调控策略。其核心技术在于利用 PSO 优化算法来调整 PID 控制器的控制参数，它结合了 PSO 优化算法和 PID 控制器的优势，能够自适应地调整 PID 控制器的控制参数 K_p 、 K_i 和 K_d ，以适应不同的控制对象和工作环境。

图 3 是 PSO 优化算法对真空泵 PID 控制参数 K_p 、 K_i 和 K_d 的优化过程。由图 3 可见，从上到下的 3 条曲线分别是 K_p 、 K_i 和 K_d ，得到最优的 PID 控制参数 K_p 、 K_i 和 K_d 分别为： $K_p = 168.73$ ， $K_i = 1.045$ ， $K_d = 24.87$ 。

图 4 是 PSO 优化 PID 所得性能指标的 ITEA 变化曲线。由图 4 可见，随着迭代次数的增加，性能指标 ITEA 值逐渐减少，迭代 12 次后的 ITEA 值稳定在 0.215，说明调控快速性和稳定性良好。

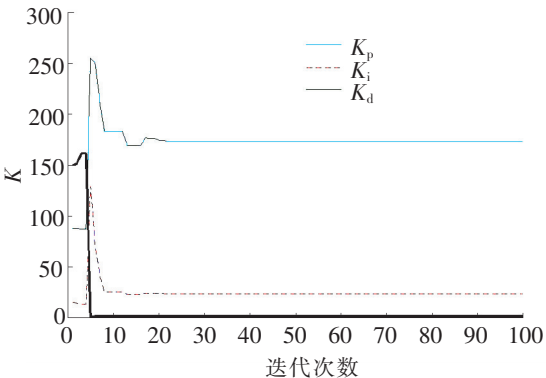


图 3 PSO 算法优化 PID 参数 K_p 、 K_i 和 K_d 的过程
Fig.3 Process of PSO algorithm for optimizing PID parameters

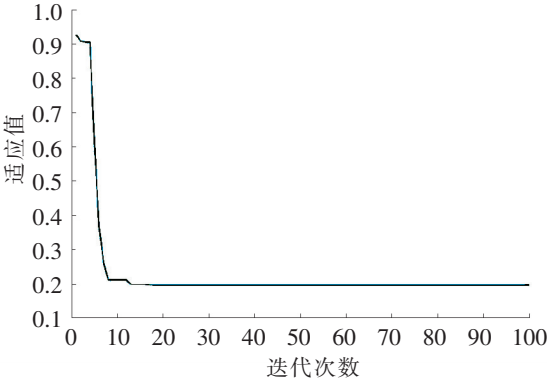


图 4 PSO 优化 PID 所得性能指标 ITEA 变化曲线
Fig.4 Performance indicator ITEA variation curve obtained by PSO optimized PID

4 结论

本文应用 PSO-PID 算法对船用制淡制冷一体机真空泵 PID 控制器的参数进行优化,结果表明,该方法是一种有效的智能优化方法,它结合了 PID 控制器的稳定性和 PSO 优化算法的高效性,能够较快找到 PID 控制器的最优参数 K_p 、 K_i 和 K_d 的组合,实现更好的系统控制性能。PSO-PID 智能调控方法结合粒子群优化算法和 PID 控制器的优势,自适应性强,优化调控效果好,应用广泛,为船用制淡制冷一体机真空泵 PSO-PID 智能调控提供了有效的解决方案。由于课题研究时间和条件的限制,将来仍有一些问题需要进一步研究,如:1) 将该 PSO 算法与其他算法有机融合,将有助于进一步提高算法的收敛速度和精度;2) 深入分析控制系统的动态性能,改进 PSO 优化算法整定 PID 参数的适应度函数,将有助于优化调控系统的动态性能;3) 可以将改进的 PSO 优化算法应用到船用制淡制冷一体机整机控制,解决整机优化调控问题。

[参考文献]

- [1] 王长涛,郭高超,赵剑明,等. 粒子群优化 PID 在变风量空调系统中的应用[J]. 自动化仪表,2018,39(2):7-16.
- [2] 张德丰. MATLAB R2020a 智能算法及实例分析[M]. 北京:电子工业出版社,2021.
- [3] 莫卫林,杨浩,熊智新,等. 基于改进 PSO 算法的 PID 优化用于黑液液位控制[J]. 纸和造纸,2018,37(2):5-9.
- [4] 冯少辉. PID 参数整定与复杂控制[M]. 北京:化学工业出版社,2023.
- [5] 李方园. 行业专用变频器的智能控制策略研究[M]. 北京:科学出版社,2018.
- [6] 文孟超,吴杰长,常广晖,等. 基于改进 PSO 算法的柴油机 PID 控制器参数优化[J]. 武汉理工大学学报,2013,35(6):81-85.
- [7] 郁磊. MATLAB 智能算法 30 个案例分析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2015.
- [8] 于明星,杨丽,舒丹丹,等. PSO 在 PID 参数整定控制系统中的影响因素分析[J]. 沈阳理工大学学报,2020,39(2):18-23.
- [9] 周鑫浩,张海军. 一种基于 PSO-PID 算法的燃气自动控制阀门智能调控方法:201611192138.1[P]. 2017-05-31.
- [10] 陈铭. 自动控制系统模型设计及仿真技巧研究分析[M]. 哈尔滨:东北林业大学出版社,2020.

(责任编辑 马建华 英文审校 郑青榕)