

文章编号: 1001-3806(2014)04-0484-04

多种群遗传算法在湿蒸气参量测量中的应用

杨 颖¹, 黄竹青^{1,2*}, 刘芳艳¹, 蔡 成¹, 许春山¹

(1. 长沙理工大学 能源与动力工程学院, 长沙 410114; 2. 湖南有色金属职业技术学院, 株洲 412006)

摘要: 为了利用激光散射法快速准确地测量出汽轮机中湿蒸气的参量值, 实时监测汽轮机末级蒸汽湿度, 指导汽轮机安全运行, 采用多种群遗传算法, 用三次样条插值的方法代替散射理论公式, 以理论值与测量值的最小二乘值为目标函数, 设置合适的控制参量, 对加入高斯白噪声的仿真数据和模拟汽缸的实验数据进行搜索寻优。结果表明, 多种群遗传算法能够克制过早收敛, 准确地搜索到全局最优解, 在遗传代数内反演出湿蒸气的各个参量。该研究对激光散射法测量湿蒸气参量或其它微粒粒度分布的反演是有帮助的。

关键词: 散射; 湿蒸气参量; 多种群遗传算法; 散射比; 反演

中图分类号: O436.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.04.011

Application of multi-population genetic algorithm in wet steam parameter measurement

YANG Ying¹, HUANG Zhuqing^{1,2}, LIU Fangyan¹, CAI Cheng¹, XU Chunshan¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Hunan Nonferrous Metals Vocational and Technical College, Zhuzhou 412006, China)

Abstract: In order to measure the wet steam parameters with laser scattering method, monitor the steam humidity at the final stage and guide the safe operation of turbine, the multi-population genetic algorithm was adopted, cubic spline interpolation was used in stead of scattering theory, the least squares of theoretical value and measured value were adopted as the objective functions and the appropriate control parameters were set up for searching the optimization among the simulation data added Gaussian white noise and the experimental data of analog cylinder. The experimental results show that multi-population genetic algorithm can effectively restraint premature convergence, locate the global optimal solution accurately and inverse every parameter of wet steam prominently among some hereditary algebras. The study is helpful for the measurement of wet steam parameters with laser scattering method and the inversion of particle size distribution.

Key words: scattering; wet steam parameter; multi-population genetic algorithm; scattering ratio; inversion

引 言

湿蒸气中水滴粒径、浓度和尺度分布参量是汽轮机末级蒸汽湿度监测中的主要参量, 对汽轮机的安全经济运行有着非常重要的影响。实时监测湿蒸气中水滴粒径的变化和分布情况, 给锅炉的给水提供参考依据, 对提高汽轮机效率、降低高速水滴对叶

片产生的冲蚀有着重要的意义^[1-3]。激光散射法测量湿蒸气参量是通过接收水滴群散射空间在某一立体角内的散射光强来实现的。以往多个湿蒸气参量的搜索是对各个参量设置步长进行单点搜索, 需要设置多重循环, 进行大量的计算才能得所需参量值, 且搜索精度受步长的限制。因此, 寻求一种合适的方法提高搜索速度和精度非常必要。

遗传算法 (genetic algorithm, GA) 是一种以达尔文的进化论和孟德尔的遗传学说为基础的全局优化算法, 具有很强的鲁棒性和全局搜索能力。标准遗传算法 (simple genetic algorithm, SGA) 初始产生单个种群进行搜索^[4-6], 易过早收敛, 当求解到一定范围时会做大量无效的冗余计算, 搜索效率低, 容易陷入局部最优解, 对系统的反馈信息利用较少。多种群遗传算

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51376025); 湖南省自然科学基金重点资助项目 (12JJ2031); 湖南省科技厅重点资助项目 (2011GK4005)

作者简介: 杨 颖 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要从事动力设备故障诊断的研究。

* 通讯联系人。E-mail: huangzhuqing@aliyun.com

收稿日期: 2013-07-29; 收到修改稿日期: 2013-08-15

法(multi-population genetic algorithm, MPGA)是一些改进遗传算法性能的方法中较好的一种^[7-9],其基本思路是随机产生多个不同控制参量的种群并行搜索,各个种群之间通过移民算子进行联系,协同进化,加快了进化速度,有效地克制了未成熟收敛。因此,本文中提出以 MPGA 反演湿蒸气参量,通过对仿真数据和实验数据的搜索寻优,验证了该算法用在激光散射法测量湿蒸气参量中的有效性、可行性。

1 湿蒸气参量测量理论及模型

激光散射法测量湿蒸气参量以适合描述球形粒子散射特性的 Mie 散射理论为基础,根据异轴角散射法设计实验模型,如图 1 所示,CCD 和长焦距镜头作为探测器接收散射立体角内的散射光强,每个像元对应一定长度的散射区域,每个散射区域对应的散射立体角与镜头的接收截面大小有关。

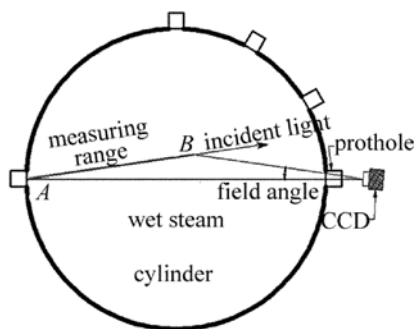


Fig. 1 Model of wet steam parameters measurement

根据 CCD 工作原理可知^[10-11],在像元灰度值达到饱和之前,光强与灰度值呈线性关系,即灰度值越高,像元上接收到的散射光越强;本文中以 Rosin-Rammler 分布函数表示水滴群的尺寸分布。当湿蒸气中水滴之间的距离远大于水滴直径时,可近似认为只发生单次散射,所以湿蒸气的散射特性可以看成是各个水滴散射特性的叠加;水和蒸汽对于可见光的吸收可以忽略,为了简化计算,假设湿蒸气中水滴的大小、浓度分布均匀,测量区域 A 和 B 之间水滴粒径分布和浓度处处相等。

当入射光为非偏振光时,湿蒸气中水滴群在散射立体角内的散射光强 I_s 与入射光强 I_0 之比,记为 T ,表达式如下:

$$T = \frac{I_s}{I_0} = \frac{\lambda^2 NLS}{8\pi^2} \times \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} [i_1(\theta) + i_2(\theta)] f(r_{0.5}) \varphi \sin\theta dr d\theta \quad (1)$$

式中, $f(r)$ 是 Rosin-Rammler 尺寸分布概率密度函

数^[12]:

$$f(r) = 0.693 \frac{K-1}{\bar{r}_{0.5}} \left(\frac{r}{\bar{r}_{0.5}} \right)^{K-1} \times \exp \left[-0.693 \left(\frac{r}{\bar{r}_{0.5}} \right)^K \right] \quad (2)$$

式中, $i_1(\theta)$ 和 $i_2(\theta)$ 是散射强度函数,由 Mie 系数 a_n, b_n 和角度分布函数 π_n, τ_n 求得^[13-15]; L 是像元对应的散射区长度, S 是散射区横截面积(和激光器参量有关), λ 是波长, N 是单位体积内的水滴数; θ 是散射立体角中心线和入射光 I_0 之间的夹角, θ_1 和 θ_2 是散射立体角的起始角度; r 是水滴半径, r_{\min} 和 r_{\max} 分别是水滴尺寸分布的最小半径和最大半径; $\bar{r}_{0.5}$ 和 K 分别是质量中间半径和尺度分布参量,质量中间半径 $\bar{r}_{0.5}$ 表示质量中间半径以上或以下的粒子占总粒子数的 50%; φ 是散射立体角在散射半球底面的投影角度, φ 与散射角 θ 的关系如下^[16]:

$$\varphi = 2 \arccos \left[\frac{\cos \left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{2} \right) - \cos \theta \cos \left(\frac{\theta_2 + \theta_1}{2} \right)}{\sin \left(\frac{\theta_2 + \theta_1}{2} \right) \sin \theta} \right] \quad (3)$$

2 参量反演

光散射理论计算比较复杂,特别是 Mie 系数的计算,直接根据理论公式进行搜索将非常耗时。本文中根据上述公式,设置合适的参量范围和步长,编程计算出每个像元对应的散射区在参量范围内所有的散射比,以三次样条插值的方法代替光散射理论公式,提高 MPGA 的搜索速度,MPGA 搜索结构见图 2。

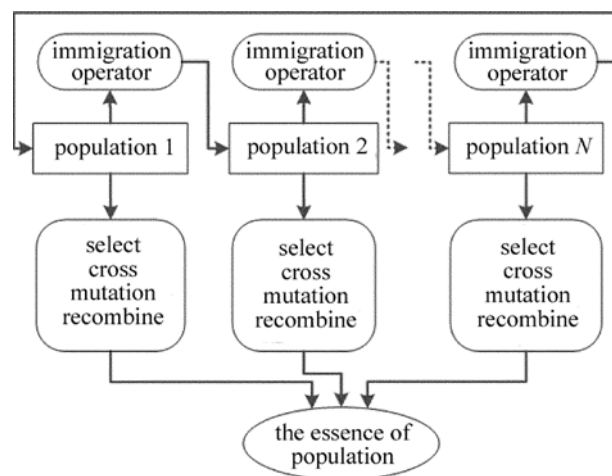


Fig. 2 MPGA schematics

2.1 仿真数据反演

为验证 MPGA 能否准确地反演出水滴群的粒度分布,按上述实验模型设定多组参量进行反演,根据理论公式分别计算出各个像元对应的散射比,并加入高斯白噪声;本文中取其中 2 组仿真数据,如图 3a 与图 4a 中细实线所示,尺度分布如图 3b 与图 4b 中实线所示。

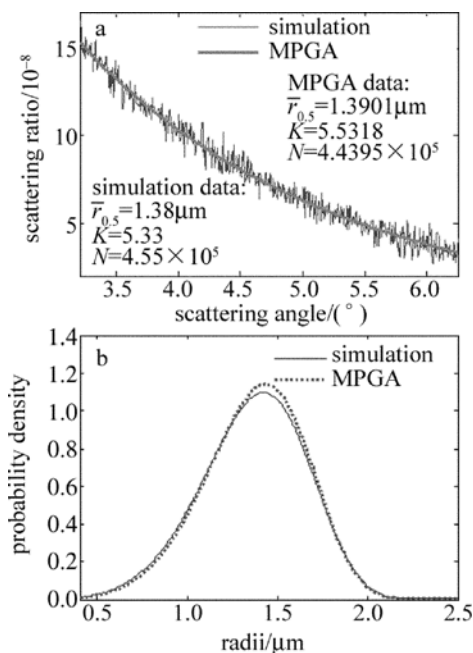


Fig. 3 The inversion results of the first groups of simulation data
a—scattering ratio curve b—droplet size distribution curve

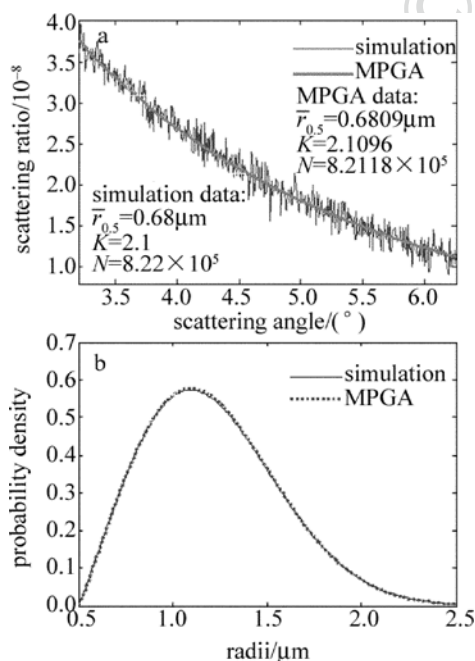


Fig. 4 The inversion results of the second group of simulation data
a—scattering ratio curve b—droplet size distribution curve

以理论值与测量值的最小二乘值为 MPGA 的目标函数,控制参量设置:种群数量为 10,种群大小 500,个体长度 50;各种群的交叉、变异概率由计算机在一定范围内随机生成;截止条件:最优值最少保持 10 代,另设置当目标函数到达所需精度时终止搜索。

经过多次搜索,运行代数都未超过 100,搜索结果计算成散射比如图 3a 与图 4a 中粗实线所示,粒径分布如图 3b 与图 4b 中虚线所示。仿真数据反演得到的结果表明,对不同的仿真参量,MPGA 都能够有效地搜索到比较精确的参量值。

2.2 实验数据反演

为了检验 MPGA 对真实测量数据的有效性,对上述测量模型设计实验得到的实验数据进行反演;图 5 是散射角 θ 在 $2.6^\circ \sim 6.6^\circ$ 范围内,由 CCD 接收散射光强得到的灰度图。CCD 灰度值与光强的关系计算公式如下^[17-18]:

$$k = \frac{(P_1 - P_2) \Delta t}{\sum (G_1 - G_2)} \quad (4)$$

式中, k 是光强-灰度比例因子; P_1, P_2 分别是激光入射时的光功率和没有激光入射时测得的环境光功率; G_1, G_2 是与 P_1, P_2 相对应的灰度图总灰度值; Δt 是 CCD 曝光时间。

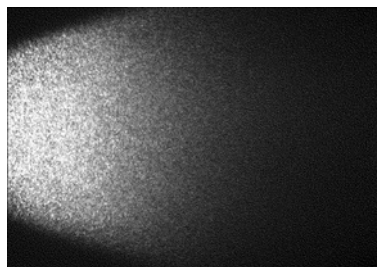


Fig. 5 Experimental gray

提取灰度图(见图 5)中线的灰度值,经过高斯滤波后,根据灰度值与光强的关系转换成散射光强

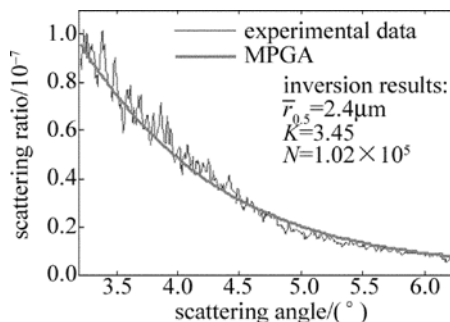


Fig. 6 Comparison between experimental scattering ratio and inversion scattering ratio

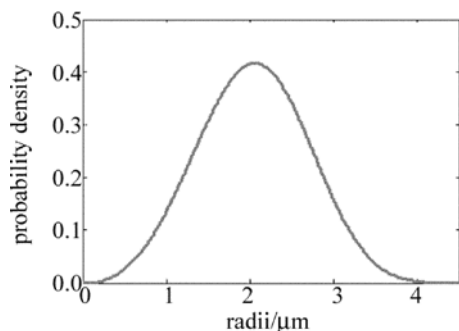


Fig. 7 Droplet size distribution

I_s , 散射比 I_s/I_0 如图 6 中细实线所示。按第 2.1 节中的方法对实验数据进行搜索寻优, 粒径分布如图 7 所示, 按(1)式计算得到对应的散射比如图 6 中的粗实线所示。

表 1 中记录了 MPGA 对实验数据反演寻优的 5 次结果, 从表中可以看出, 5 次搜索都能够较快地找到最优值, 表明它可以较好地克制过早收敛现象, 准确地找到全局最优解。综上所述, MPGA 对真实测量数据的搜索寻优也是有效可行的。

Table 1 MPGA optimization results

genetic algebra	$\bar{r}_{0.5}/\mu\text{m}$	K	N/m^{-3}	optimum value
39	2.0601	3.4607	101554	2.4957×10^{-16}
48	2.0440	3.4838	102016	2.4968×10^{-16}
52	2.0724	3.4989	100143	2.4854×10^{-16}
35	2.0404	3.4991	102155	2.4998×10^{-16}
41	2.0500	3.5268	100868	2.4898×10^{-16}

3 结 论

根据异轴角散射法设计实验模型测量湿蒸气参量, 以三次样条插值的方法代替复杂的光散射公式, 提高了反演寻优的速度; 利用多种群遗传算法全局寻优的特点, 对仿真数据和实验数据进行反演, 搜索湿蒸气参量。结果表明, 对于光散射法测量微粒粒度分布, 多种群遗传算法能够有效地搜索到比较准确的参量值, 且速度比传统的寻优方法快得多, 所以利用多种群遗传算法反演湿蒸气参量是可行的。该方法还可以应用于其它基于光散射法测量微粒粒度的反演。

参 考 文 献

[1] LIU J C, LIN Z H, WEN X Y, *et al.* Recent advances in the technology of moisture removal in steam turbines[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2005, 20(1): 1-5 (in Chinese).

nese).

[2] REN H R, SHENG D R, LU X F, *et al.* Calculation of turbine exhaust enthalpy in online system[J]. Power Engineering, 1998, 18(6): 1-4 (in Chinese).

[3] HAN Z H, YANG K. Reviews on wetness measurement methods of wet steam in turbine[J]. Journal of North China Electric Power University, 2001, 29(4): 44-47 (in Chinese).

[4] MA Y J, YUN W X. Research progress of genetic algorithm[J]. Application Research of Computers, 2012, 29(4): 1201-1206 (in Chinese).

[5] LI J J. Research of genetic algorithms and application[J]. Computer and Information Technology, 2013, 21(2): 5-12 (in Chinese).

[6] LI S Q, SUN X, SUN D H, *et al.* Summary of crossover operator of genetic algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(1): 36-39 (in Chinese).

[7] LÜ H, ZHOU C, ZOU J, *et al.* Genetic algorithm based on multi-population evolution[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(8): 57-60 (in Chinese).

[8] ZHANG Y, ZHANG Y Y, WANG F. Facial feature location based on multipopulation genetic algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(6): 167-169 (in Chinese).

[9] YE Y F, DU Y Q, XING X S. An improved genetic algorithm of suppressing premature convergence[J]. Journal of Shanxi Normal University (Natural Science Edition), 2010, 24(2): 25-28 (in Chinese).

[10] WANG Q Y. Application technology of CCD[M]. Tianjing: Tianjing University Press, 2000: 32-39 (in Chinese).

[11] SU P, NIU Y X, LI D Q, *et al.* Image acquisition and processing of a laser warning system based on planar array CCD[J]. Laser Technology, 2013, 37(3): 394-399 (in Chinese).

[12] ITO S. Optical wave propagation in discrete random media with large particles a treatment of the phase function[J]. Applied Optics, 1993, 32(9): 1652-1656.

[13] DAVE J V. Scattering of visible light by large water sphere[J]. Applied Optics, 1969, 8(2): 155-161.

[14] WANG L F, LIU G B, ZHENG Z, *et al.* Onwards continued fraction algorithm for Mie scattering and numerical simulation[J]. Optical Technique, 2009, 35(4): 541-543 (in Chinese).

[15] LENTZ W J. Generating Bessel functions in Mie scattering calculations using continued fractions[J]. Applied Optics, 1976, 15(3): 668-671.

[16] HUANG T L, ZHENG G, WANG N N. Theory study of light scattering measurement technology on particulate contamination under ultraclean environment[J]. Journal of Guilin Institute of Electronic Technology, 2000, 20(1): 6-12 (in Chinese).

[17] HUANG Zh Q. Investigation of exhaust wetness measurement method in steam turbine based on mie scattering of laser[D]. Changsha: National University of Defence Technology, 2010: 54-57 (in Chinese).

[18] JIAO Y, HUANG Zh Q, CAO X L, *et al.* Simulation study on steam moisture measurement based on the method of optical back-scattering[J]. Laser Technology, 2013, 37(3): 310-313 (in Chinese).