

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.04.014

改进粒子群算法在空压机联动控制中的应用

季 力

(浙江机电职业技术学院 电气电子工程学院, 浙江 杭州 310053)

摘 要:针对空压机控制系统中的节能减排、均衡调度和管网压力波动等问题,提出了空压机联动控制的多目标优化调度模型,并以改进惯性权重的粒子群算法进行求解。以灰色系统理论中的灰色关联度作为改进粒子群算法的适应度函数,对影响空压机联动系统的机组功耗、生产均衡调度和管网压力波动等多目标进行了优化求解。引入的非线性动态调整惯性权重策略改进了算法的全局收敛能力,有效地提高了粒子搜索过程中的智能性。通过某饮料罐装车间的技术改造,证明了本算法的有效性。

关 键 词:多目标优化;改进粒子群算法;灰色理论;空压机组功耗;均衡调度;管网波动

中图分类号:TH45;TP18

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2014)04-0057-05

Application of Improved Particle Swarm Optimization Algorithm in Air Compressor Associated Controlling System

Ji Li

(Department of electrical and Electronic Engineering, Zhejiang Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Hangzhou 310053, China)

Abstract: In order to solve the energy-saving and emission-reduction, balanced dispatching and pressure variance in pipe network, a multi-objective optimization scheduling model of air compressor associated controlling system was presented, which used the particle swarm optimization based on the improved inertia weight. Using the grey relation in grey theory as the fitness function of the improved algorithm, it optimized the air compressor's power, the balance scheduling and the pressure variance reduce in pipe network. The nonlinear dynamic inertia weight strategy improved the algorithm's global convergence ability, and increased the intelligence in the search process of the particle. The algorithm was proved effectively by the technical transformation in a canning workshop.

Key words: multi-objective optimization; improved particle swarm optimization (PSO) algorithm; Grey Theory; air compressor's power; balance scheduling; pressure variance

空压机是工业生产中普遍应用的设备,一般占据工厂总耗电量10%~20%,纺织行业部分工厂甚至高达35%。我国工业空压机电力消耗大,节能水平低,运行粗放,加快工业空压机节能改造已经成为继电机节能改造后的重大节能工程。在实际运行系统中,空压机联动控制系统的总体节能、个别空压机运行时间平衡和负载压力均衡等多项指标存在着矛盾。粒子群算法具有结构简单、参数少、易于编程实现等特点,经过改进后具有寻找全局最优解的良好特性,能有效地避免陷入局部最优解。本文在综合考虑空压机联动控制系统实际运营的各项技术指标后,提出基于系统均

衡的多目标节能调度模型,改进了多目标粒子群算法,并对该模型进行了求解。通过MATLAB进行仿真验证,获得了分布良好的最优解,有效地降低了能耗,均衡了系统运行的各项指标。

1 空压机联动控制系统多目标优化模型

空压机联动控制系统多目标优化调度的目的是在满足企业正常生产用气压力的基础上,通过设定多个运行目标使整个空压机系统运行在一个比较理想的状态。在空压机联动控制中,多目标优化调度算法的结果使得空压机组的功耗较低,同时兼顾个别空压机运行时间均衡,使得管网负载压力均衡以及企业运营成

收稿日期:2014-02-17;修回日期:2014-05-30

作者简介:季力(1972),男,四川夹江人,硕士,副教授,主要研究方向为智能控制、智能仪表。E-mail:jilizime@sohu.com

本最低。在工程实践中,这几个子目标之间是相互矛盾的,多个子目标同时达到最优值是不可能的,必须通过多目标优化调度算法在各个子目标中进行协调和折中处理,使各个子目标尽可能地达到最优化。

1.1 空压机联动控制系统优化调度的目标函数

1) 空压机组最低功耗

$$\text{Min}f_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{n}{n-1} \frac{P_{si}(t)Q_{vi}(t)}{0.06} \right.$$

$$\left. \left[\left(\frac{P_{di}(t)}{P_{si}(t)} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] + P_{mi}(t) \right\} / \eta_{mi}$$

式中, T 为调度周期; N 为联动控制系统中空压机台数; $P_{si}(t)$ 为第 i 台空压机吸气绝对压力; $P_{di}(t)$ 为第 i 台空压机排气绝对压力; $Q_{vi}(t)$ 为第 i 台空压机实际容积流量; $P_{mi}(t)$ 为第 i 台空压机轴承摩擦及气流蜗旋损失的功率; η_{mi} 为第 i 台空压机驱动电机的效率, 通常在 $0.18 \sim 0.21$; n 为被压缩气体的等熵指数^[1], 取 1.35 。

2) 优先权控制

用户根据企业的运营需求, 可以人为地设置空压机运行的优先级, 实现最优控制。具体为: ① 老旧的空压机需要尽快淘汰, 应将其运行优先级设置最高, 使之开机后处于加载状态的几率较大, 加速老化的过程; ② 根据空压机的功率设置优先权系数, 使大功率的空压机较长时间运行于加载状态, 充分利用其产气效率; ③ 为实现最大经济效益, 正常加卸载的空压机设置为次高的优先级, 备用空压机加载优先级最低。其值为无量纲系数。

$$\text{Max}f_2 = \sum_{i=1}^N \left(e^{\frac{t_i}{T_{mi}}} \cdot \frac{b_i P_{di}}{P_{k\alpha}} + C_i \right)$$

式中, t_i 为第 i 台空压机运行时间; α_i 为第 i 台空压机老化系数; T_{mi} 为第 i 台空压机寿命时间; P_{di} 为第 i 台空压机排气绝对压力; $P_{k\alpha}$ 为空压机组平均功率; b_i 为空压机功率转换系数; c_i 为正常加载设备权重系数。

3) 负载压力均衡, 管网压力波动小

空压机运行过程中, 为方便理论计算, 通常将整个供气管网等效为一有效体积为 V 的密闭容器。空压机加载运行可理想化为等温向这一密闭容器内充气, 生产现场用气可理想化为等温从这一密闭容器内放气。对容腔内空气的状态方程式 $pV = mRT$ 进行时间微分, 可得: $\Delta P = \frac{\Delta V \rho RT}{V}$, 空压机联动控制的目标是为了维持整个管网负载压力均衡, 管网压力波动最小^[2]。

$$\text{Min}f_3 = \sum_{i=1}^N \frac{\Delta V(i) \rho RT}{V(i)}$$

式中, $\Delta V(i)$ 为第 i 台空压机产气量的变化; $V(i)$ 为第 i 台空压机的产气量; ρ 为气体密度; R 为气体常数; T 为气体温度。

1.2 约束条件

1) 空压机组排气压力上下限

$$P_{dimin} \leq P_{di} \leq P_{dimax}$$

式中, P_{dimin} 、 P_{dimax} 分别为空压机组排气绝对压力上下限约束值。

2) 空压机容积流量上下限

$$Q_{vimin} \leq Q_{vi} \leq Q_{vimax}$$

式中, Q_{vimin} 、 Q_{vimax} 分别为空压机容积流量上下限约束值。

3) 空压机运行时功率的上下限

$$P_{kmin} \leq P_k \leq P_{kmax}$$

式中, P_{kmin} 、 P_{kmax} 分别为空压机运行时功率的上下限约束值。

4) 空压机组爬坡约束

$$R_{imin} \leq P_{di}(t+1) - P_{di}(t) \leq R_{imax}$$

式中, R_{imin} 、 R_{imax} 分别为空压机组压力输出所允许的最大变化率和最小变化率。

5) 空压机组特性约束条件

$$P_{di}^2 = aP_{si}^2 - bQ_{vi}^2$$

式中, a 、 b 为空压机组特性参数, 它们与空压机的组合情况有关^[3]。

2 改进粒子群算法

2.1 基本粒子群算法

粒子群优化算法(PSO)是 Kennedy 和 Eberhart 受人工生命研究结果的启发, 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^[4]。PSO 中, 所谓粒子就是搜索空间中每个优化问题的潜在解。一个被优化的函数决定所有粒子的适应值, 一个速度值决定每个粒子飞翔的方向和距离。

假设, 由 n 个粒子组成的群体对 Q 维空间进行搜索。每个粒子的空间位置表示为 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{iQ})$, 每个粒子对应的速度可以表示为 $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}, \dots, v_{iQ})$, 每个粒子在搜索时要考虑 2 个因素:

1) 单个粒子搜索到的历史最优值 p_i , $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iQ})$, $i = 1, 2, 3, \dots, n$;

2) 全部粒子搜索到的最优值 p_g , $p_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gQ})$, 注意这里的 p_g 只有 1 个。

以下是粒子群算法的位置速度更新公式^[5]

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (p_{gd}^k - x_{id}^k) \quad (1)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + r v_{id}^{k+1} \quad (2)$$

式中, ω 是保持原来速度的系数, 称之为惯性权重; 粒子对自身的认识用 c_1 表示, 它是粒子跟踪自己历史最优值的权重系数; 粒子对整个群体知识的认识用 c_2 表示, 它是粒子跟踪群体最优值的权重系数; r_1, r_2 是 $[0, 1]$ 区间内均匀分布的随机数; r 为约束因子, 是对位置更新的时候, 在速度前面加的一个约束系数。

2.2 粒子群算法的改进

在粒子群算法中, 惯性权重值 ω 是最重要的参数。基本 PSO 算法早期搜索速度很快, 但同时也暴露了局部搜索能力差的弱点, 这使得算法后期的收敛速度变慢, 精度降低。为了平衡算法的全局和局部的搜索能力, Shi Y^[6] 进一步提出了 LDIW 策略, 在迭代过程中线性地减少 ω , 在一定程度上解决了基本粒子群算法局部搜索能力弱的问题。但是, 线性递减惯性权重的粒子群算法也有不足: ① 算法的收敛速度低, 这是因为它的惯性权重值与粒子无关, 从而导致粒子搜索过程的智能性降低; ② 需要预测最大迭代次数, 但在实际求解一个问题时, 最大迭代次数往往是难以预测的, 因而它将影响算法的惯性权重值^[7]。

本文提出一种非线性动态调整惯性权重策略, 取

$$\omega = \frac{1}{1 + f(p_{gd}^k)/f(x_{id}^k)} - 0.3 \quad (3)$$

式中 i 表示第 i 个粒子, k 表示迭代次数, $f(p_{gd}^k)$ 表示到第 k 次迭代为止, 全局最优位置的适应值, $f(x_{id}^k)$ 表示在第 k 次迭代中, 第 i 个粒子的适应值。该惯性权重与粒子有关, 依粒子适应值的变化自动调整大小, 从而使得粒子搜索过程的智能性增加。

2.3 利用灰色系统理论求解空压机联动控制多目标模型

对空压机联动系统而言, 其内部变量多、变量之间关联多, 因此需要选择反映系统重要特性的参数组成一定的序列来表征系统的状态。灰色关联度分析方法是根据系统参数之间发展趋势的相似或者相异程度来作为衡量系统参数之间关联程度的一种方法^[8]。对一个系统的发展变化态势分析需要量化的度量, 灰色关联度分析非常适用于这种动态历程。

灰色综合评价主要是依据以下模型: $R = Y \times W$ 。式中, R 为 M 个被评价对象的综合评价结果向量; W 为 N 个评价指标的权重向量; Y 为各指标的评判矩阵。 $\xi_i(k)$ 为第 i 个被评价对象的第 K 个指标与第 K 个最优

指标的关联系数。

1) 确定最优指标集

设 $F = [J_1^*, J_2^*, \dots, J_n^*]$, 式中 J_k^* 为第 k 个指标的最优值。

2) 指标的规范化处理

不同量纲和数量级的评判指标间通常是不能直接进行比较的, 为确保结果的可靠性, 需要对原始指标进行规范处理。假设第 k 个指标的变化区间为 $[j_{k1}, j_{k2}]$, j_{k1} 为第 k 个指标在所有被评价对象中的最小值, j_{k2} 为第 k 个指标在所有被评价对象中的最大值, 则可以用下式将上式中的原始数值变成无量纲值 $C_k^i \in (0, 1)$ 。

$$C_k^i = \frac{j_k^i - j_{k1}}{j_{k2} - j_{k1}}, \quad i = 1, 2, \dots, m, k = 1, 2, \dots, n$$

3) 计算综合评判结果

根据灰色系统理论, 将 $\{C^*\} = [C_1^*, C_2^*, \dots, C_n^*]$ 视为参考数列, 将 $\{C\} = [C_1^i, C_2^i, \dots, C_n^i]$ 视为被比较数列, 则通过关联分析法分别求得第 i 个被评价对象的第 k 个指标与第 k 个指标最优指标的关联系数, 即

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |C_k^* - C_k^i| + \rho \max_i \max_k |C_k^* - C_k^i|}{|C_k^* - C_k^i| + \rho \max_i \max_k |C_k^* - C_k^i|}$$

式中 $\rho \in (0, 1)$, 一般 $\rho = 0.5$ 。

系统各个参数的关联度定义为 n 个关联系数的平均值

$$r = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k)$$

系统参数求解的目标是获得这个平均参数的最小值, 引入灰色系统理论求解空压机联动控制系统多目标优化模型的计算步骤如下^[9]:

1) 在空压机联动控制系统的参数空间随机生成一组粒子, 在满足各参数约束条件的情况下随机生成粒子的初始位置和速度。

2) 设定各个参数的最优指标集, 构成参考数列。

3) 以种群中的各个粒子为基础, 使用改进的粒子群算法进行计算, 各个目标函数的计算结果组成比较数列。

4) 计算各个粒子对应的参考数列和比较数列的关联度, 并以此关联度作为粒子群优化算法的适应函数。

5) 利用式(1)、(2)、(3)对粒子的位置和速度进行更新。

6) 不断重复上述步骤, 直到求解出满足适应函数所需要的条件。

3 系统参数计算和分析

为验证本文所提出的粒子群算法对空压机联动控制系统的多目标优化调度模型的有效性,以对某饮料企业罐装车间的5台空压机联动控制改造为例,在约束条件下求解各目标函数。现场5台空压机均为阿特拉斯的螺杆空压机,其空压机组参数如表1、表2所示。

表1 空压机组相关参数

Table 1 Parameters of air compressor

罐装车间	额定流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	排气压力/MPa	空压机效率
空压机1	9.8	0.89	0.18
空压机2	8.7	0.87	0.20
空压机3	12.2	0.69	0.19
空压机4	18.8	0.65	0.19
空压机5	12.2	0.69	0.20

表2 空压机组均衡调度相关参数

Table 2 Parameters of air compressor dispatch

罐装车间	空压机 老化系数	功率转换系数/ ($\text{kW} \cdot \text{MPa}^{-1}$)	加载权重 系数	空压机 寿命/h
空压机1	2.0	84.2	0.3	43 000
空压机2	1.5	63.2	0.3	45 000
空压机3	2.0	108.7	0.1	35 000
空压机4	2.5	169.2	0.2	43 000
空压机5	2.0	108.7	0.3	52 000

采用改进粒子群算法对空压机联动控制系统的各个目标函数进行计算,结果如表3所示。

表3 目标函数求解结果

Table 3 Results of object function

算 法	$\text{Min}f_1/\text{kW}$	$\text{Max}f_2$	$\text{Min}f_3/\text{MPa}$
改进算法	381.2	9.68	0.038
未改进算法	412.8	7.86	0.065

在进行系统改造之前,我们对现场2台空压机进行了检测。空压机2现场电流(单相)测得如下:高压螺杆机电流在150~390 A之间波动,且基本1.5 min波动1次,波动频繁,如图1所示。

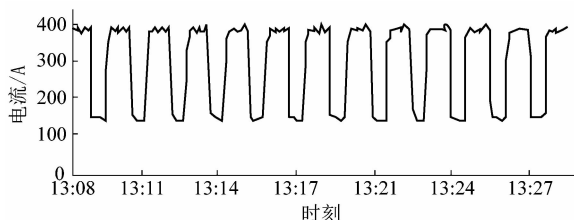


图1 螺杆空压机2 活塞电流

Figure 1 Piston electric current of 2# compressor

检测0.7 MPa空压机3,现场压力数据测得如图2所示。总体上,空压机3压力从0.64~0.70 MPa波

动,波动范围达到了0.06 MPa。且基本1 min波动1次,波动很频繁。说明空压机3对应末端间歇性用气。而空压机又没有调配手段,故存在不合理及能源浪费现象。

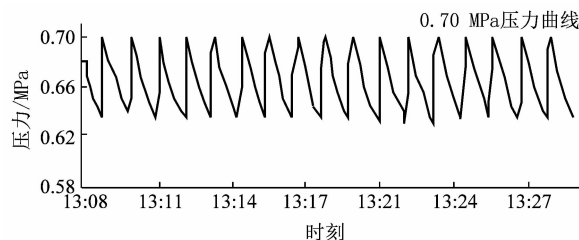


图2 空压机3 压力曲线

Figure 2 Pressure curve of 3# compressor

对此罐装车间的5台空压机进行技术改造,采用改进的粒子群算法对联动控制系统的参数进行了重新计算。使得空压机的平均功耗从83 kW降低到76 kW,节能效率提高了8%。空压机的满载运行时间减少了,管网压力的波动得到明显改善。

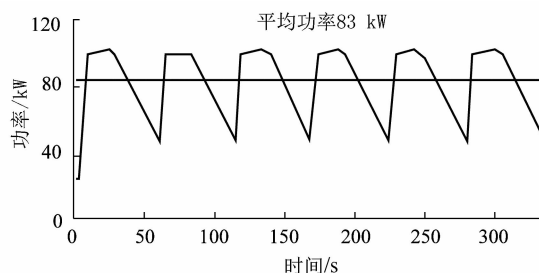


图3 传统联机控制系统平均功耗

Figure 3 Average power of traditional control system

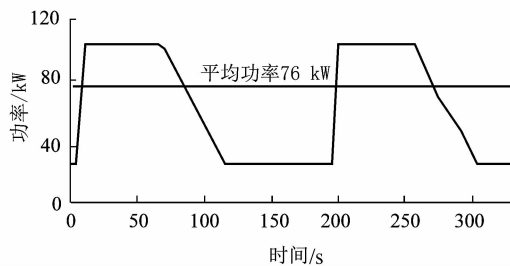


图4 基于粒子群改进算法的空压机
联动控制系统平均功耗

Figure 4 Average power of syetem based on
improved particle swarm optimization algorithm

4 结 语

本文针对空压机联动控制系统中所涉及的机组功耗最低、均衡调度问题、管网波动最小等目标函数,利

(下转第64页)