

杂交粒子群算法在列车运行调整中的应用研究

王瑞峰¹, 孔维珍¹, 詹生正²

(1. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 兰州 730070; 2. 镇江华东电力设备制造厂, 江苏 镇江 212000)

摘要: 针对列车运行调整存在约束条件多、求解难度大等问题,结合城市轨道交通列车运行特点,建立了优化的列车运行调整模型。在此基础上,引入遗传算法中的杂交思想,采用改进后的粒子群算法对此模型进行求解,给出了求解算法的具体步骤,并采用西安地铁2号线数据进行仿真验证。结果表明,采用杂交粒子群算法解决列车运行调整问题是一种有效的方法,并且其优化能力优于标准粒子群算法。

关键词: 列车运行调整;城市轨道交通;杂交粒子群算法;仿真

中图分类号: TP301.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)06-1721-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.06.031

Application of crossbreeding particle swarm optimization algorithm in train operation adjustment

WANG Rui-feng¹, KONG Wei-zhen¹, ZHAN Sheng-zheng²

(1. School of Automation & Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Zhenjiang East China Electric Power Equipment Factory, Zhenjiang Jiangsu 212000, China)

Abstract: Aiming at the problem of numerous constraints and huge search space on train operation adjustment, concerning the characteristic of urban rail transit, this paper established optimizing mathematical model. For this reason, it gave the introduction of the idea of crossbreeding, using the improved algorithm to solve the model, and specific methods and steps of solving. Basing on the data of Xi'an metro line 2, the preparation of program simulation results show that the crossbreeding particle swarm algorithm is an effective way, and optimization capabilities is better than particle swarm optimization.

Key words: train operation adjustment; urban rail transit; crossbreeding particle swarm optimization algorithm; simulation

城市轨道交通列车运行调整作为行车调度指挥工作的核心,决定着列车运行秩序的优劣^[1]。随着城市轨道交通列车运行速度的提高、行车密度的增大,使得列车运行调整也更为复杂。因此,研究适合城市轨道交通特点的列车运行调整方法对实现最优运行以提高列车运营质量有着非常重要的意义。

列车运行调整问题属于非线性多目标的组合优化问题,一直被称为 NP(nondeterministic polynomial) 难题^[2]。国内外相关方面的专家学者对列车运行调整问题进行了大量的研究,仿真模拟、运筹学、模糊决策、专家系统等方法已在求解过程中得到应用^[3],并取得了一定的成果。近年来,许多学者提出了一些用优化算法来求解列车运行调整问题的方法。这些优化算法主要采用遗传算法和粒子群(PSO)算法。遗传算法虽然适用性强,但是在求解最优解时存在编码复杂、寻优过程耗时多、收敛速度慢、局部搜索能力差等缺点。由于列车运行问题约束因素多、搜索空间大,标准粒子群算法求解时容易早熟收敛,难以得到最优解^[4]。杂交粒子群算法是 Angeline 在 PSO 算法基础上提出的一种改进算法,将遗传算法中的杂交思想引入到 PSO 算法中,使得算法搜索能力增强,不容易陷入局部最优。因此,本文提出了一种基于杂交粒子群算法的快速寻优方法来解决城市轨道交通列车运行调整问题。

1 列车运行调整模型

列车运行调整是指列车运行受到干扰时,列车实际运行偏离了计划运行图,通过对列车运行计划进行调整,使得列车运行尽可能逼近计划运行图^[5]。列车运行调整问题是一个多约束组合优化问题,这类问题通常采用如下的抽象形式表示^[6]:

状态方程: $G(j+1) = G(j) + T \cdot G(j)$

优化目标集: Object(1) and Object(2) ... and Object(n) (1)

约束条件集: Restraint(1) and Restraint(2) ... and Restraint(n)

其中: $G(j)$ 为 j 时刻列车运行状态; T 为由列车运行调整的决策所决定的状态转移算子。

对于城市轨道交通系统,列车在运行过程中不存在越行和会让,列车停站时间相对固定。这一特点为求解列车运行调整模型提供了一种可行的简单方法。同时,本文研究的对象是城市轨道交通列车运行调整,因此对列车等级不予考虑。在建立列车运行调整模型前,给出如下定义:

设双线区段共有 m 个车站,调整区段所涉及的列车共 n 列(其中上行列车 n_1 列,下行列车 n_2 列), $D_{i,j}$ 、 $F_{i,j}$ 分别为第 i ($i \in \{1, 2, \dots, n\}$) 列车在第 j ($j \in \{1, 2, \dots, m\}$) 个车站的实际到、发时刻,则 $D_{i,j}^0$ 、 $F_{i,j}^0$ 分别为第 i 列车在第 j 个车站的计划到、发时刻, k_i^l 为列车晚点标志函数,是或运算函数,其定义如下:

收稿日期: 2012-09-29; 修回日期: 2012-11-16

作者简介: 王瑞峰(1966-),女,内蒙古呼和浩特人,教授,主要研究方向为计算机测控技术及仪器仪表技术等(wzkong225@163.com);孔维珍(1987-),女,甘肃临夏人,硕士研究生,主要研究方向为智能算法、交通信息工程及控制;詹生正(1982-),男,甘肃武威人,助理工程师,本科,主要研究方向为机械工程及其自动化。

$$k_i^j = (D_{i,j} - D_{i,j}^0) \parallel (F_{i,j} - F_{i,j}^0) = \begin{cases} 0 & D_{i,j} - D_{i,j}^0 \leq 0, F_{i,j} - F_{i,j}^0 \leq 0 \\ 1 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

列车运行调整问题模型复杂,涉及的因素很多,在实际中很难建立最优化模型^[7]。列车运行调整优化最重要的是降低列车晚点时间,减少晚点列车的数量,以提高列车运行的正点率。因此,可以得到列车运行调整模型的两个优化目标:

目标1 列车总晚点时间 F_1 最小:

$$F_1 = \min \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (|D_{i,j} - D_{i,j}^0| + |F_{i,j} - F_{i,j}^0|) \quad (3)$$

目标2 总晚点列车数目 F_2 最小:

$$F_2 = \min \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (D_{i,j} - D_{i,j}^0) \parallel (F_{i,j} - F_{i,j}^0) \quad (4)$$

本文以列车总晚点时间最小和晚点列车总数最少共同作为优化目标,建立列车运行调整数学模型,其目标函数如下:

$$F = \min [q_1 \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (|D_{i,j} - D_{i,j}^0| + |F_{i,j} - F_{i,j}^0|) + q_2 \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (D_{i,j} - D_{i,j}^0) \parallel (F_{i,j} - F_{i,j}^0)] \quad (5)$$

其中: q_1 、 q_2 分别为晚点时间和晚点列车数的加权因子。

式(5)表明, F 属于非线性、多目标组合优化问题,因此可以用杂交 PSO 算法来求解。列车运行调整的目的是使晚点的列车在运行中尽量恢复计划运行时刻,即适应度函数应使列车晚点的时间和晚点列车数的加权和最小,适应值越小表明列车晚点时间和晚点列车数目越小,列车运行越逼近计划运行方案^[8],因此本文将 F 作为适应度函数 $\text{fitness}(f)$,即

$$\text{fitness}(f) = \min [q_1 \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (|D_{i,j} - D_{i,j}^0| + |F_{i,j} - F_{i,j}^0|) + q_2 \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (D_{i,j} - D_{i,j}^0) \parallel (F_{i,j} - F_{i,j}^0)] \quad (6)$$

根据城市轨道交通列车运行实际情况,对于当前区段内的列车有如下的约束条件:

约束1 发车时间约束:

$$F_{i,j} \geq F_{i,j}^0 \quad (7)$$

约束2 最小停站时间约束:

$$F_{i,j} - D_{i,j} \geq ST_{i,j} \quad (8)$$

其中: $ST_{i,j}$ 为列车 i 在 j 站的最小停站时间。

约束3 区间运行时间约束:

$$D_{i,j+1} - F_{i,j} \geq T_{\min} + Q_{i,j} + T_{i,j+1} \quad (9)$$

其中: $T_{\min}$ 为区间最小运行时分; $Q_{i,j}$ 为列车 i 在 j 站的启动附加时分; $T_{i,j+1}$ 为列车 i 在 $j+1$ 站的停站附加时分。

约束4 列车追踪间隔约束:

$$D_{i+1,j} - D_{i,j} \geq \Delta T, F_{i+1,j} - F_{i,j} \geq \Delta T \quad (10)$$

其中: ΔT 为列车追踪间隔。

2 模型求解过程

2.1 PSO 算法

PSO 算法是由 Kennedy 和 Eberhart 两人共同提出的^[9],属于一种随机寻优算法。该算法的基本思想为:将每个优化问题的解设想成存在于 D 维空间中的粒子中,每个粒子都对应一个由目标函数所决定的适应值。粒子以一定的速度在搜索空间中飞行,通过个体和群体的飞行经验来动态调整其速度,并不断更新位置,直到达到最优为止^[10]。用 pbest_i 表示粒子个体历史最优位置, gbest 表示种群历史最优位置。在每一次迭代中,粒子通过跟踪这两个极值来更新自己。

假设在 D 维搜索域中存在 N 个粒子,则每一个粒子的位置可以表示成一个 D 维向量,其中 $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}]$;同样

该微粒的速度也是一个 D 维向量 $V_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}]$ 。PSO 算法的位置和速度更新方程为

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 r_1 (\text{pbest}_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (\text{gbest}_d^k - x_{id}^k) \quad (11)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (12)$$

其中: $1 \leq i \leq N, 1 \leq d \leq D, k$ 为迭代次数; c_1 和 c_2 为加速常数(通常为非负数); r_1, r_2 为 $[0, 1]$ 间取值的随机数; ω 称为惯性权重因子,此参数设置对算法结果有较大影响。文献^[11]中通过大量实验证明,采用线性权重递减法设置该参数能够显著提高算法的性能,具体公式如下:

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\text{iter}_{\max}} \times \text{iter} \quad (13)$$

其中: iter 为当前迭代次数; $\text{iter}_{\max}$ 为最大迭代次数; $\omega_{\max}$ 为惯性权重因子的初值; $\omega_{\min}$ 为惯性权重因子的终值。通常 $\omega_{\max}$ 取 0.9, $\omega_{\min}$ 取 0.4。

2.2 杂交 PSO 算法求解列车运行调整问题

PSO 算法在进化过程中会出现早熟收敛现象,而早熟收敛现象的出现会使种群丧失活性,导致收敛精度的降低。为了避免此现象的发生,近年来提出了一种新方法,将遗传算法中的杂交思想引入到 PSO 算法中,并对种群中的粒子赋予一个杂交概率 P_c ,粒子两两杂交产生子代粒子,新的粒子不断地替代原来的粒子,从而使得陷入局部最优的粒子跳出来,使其可能找到最优解^[12]。子代粒子位置可由式(14)得出。

$$\text{child}(x) = p \times \text{parent}_1(x) + (1-p) \times \text{parent}_2(x) \quad (14)$$

其中: p 服从均匀分布且在 $[0, 1]$ 上取值; $\text{parent}_1(x)$ 和 $\text{parent}_2(x)$ 为亲代粒子位置。子代粒子速度 $\text{child}(v)$ 的计算式如下:

$$\text{child}(v) = \frac{\text{parent}_1(v) + \text{parent}_2(v)}{|\text{parent}_1(v) + \text{parent}_2(v)|} |\text{parent}_1(v)| \quad (15)$$

其中: $\text{parent}_1(v)$ 和 $\text{parent}_2(v)$ 为亲代粒子速度。

种群中的粒子通过杂交操作不断产生新的粒子。当处于局部最优的两个粒子进行杂交时,产生的粒子往往能够跳出局部最优,从而大大提高算法的收敛精度。本文采用杂交 PSO 算法对上述模型进行求解,具体步骤如下:

a) 初始化种群规模,包括种群数目、所有粒子的位置和速度、评价每个粒子的适应度,设定粒子的个体最优值 pbest_i 和种群最优值 gbest 。

b) 设定参数值,包括系数 c_1 、 c_2 ,杂交池的大小比例 S_p ,杂交概率 P_c ,最大迭代次数 M , ω 的设置参考式(13)。

c) 对每一个粒子按照式(11)(12)更新速度和位置,迭代生成新的微粒群体。

d) 依据式(6)评价每个粒子的适应值,将每个粒子的适应值与原设定的 pbest_i 进行比较,如果较好,则用此适应值替换当前的 pbest_i 。

e) 比较当前所有 pbest_i 和 gbest 的值,更新 gbest 。

f) 根据杂交概率 P_c 选取指定数量的粒子放入杂交池内,池中的粒子两两随机杂交产生同样数目的子代粒子,依据式(14)(15)计算子代粒子的位置和速度,同时保持 pbest_i 和 gbest 不变。

g) 判断是否满足算法终止条件(通常为预设的最大迭代次数),若满足则停止搜索,输出运算结果;否则返回步骤 c),继续搜索。

h) 输出最优个体对应的列车到、发时刻及列车运行图,形成列车运行调整方案。

3 实例分析

为了检验上述算法的效果,采用 Visual C++ 6.0 作为编程

工具,编制了列车运行图调整仿真界面如图1所示。实验数据取自西安地铁2号线北客站至会展中心这一区段,共设17个站,拟开行列车24列,上、下行分别为12列。相关参数设置为:粒子数目 $N=30$,最大迭代次数 $M=300$,杂交概率 $P_c=0.9$,杂交池大小比例 $S_p=0.2$, $q_1=0.8$, $q_2=0.2$ 。

该仿真系统对列车晚点调整进行仿真,调整的结果可以用不同的方式来显示。现考虑上行方向,在该区段内列车运行时间为6:00~10:00,108次列车到达运动公园站时出现晚点,初始晚点时间为120 s,分别采用PSO和杂交PSO算法进行调整,得到调整后的列车运行图分别如图2和3所示。

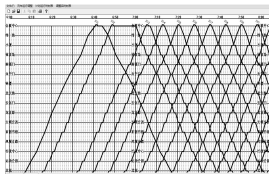


图1 计划运行图

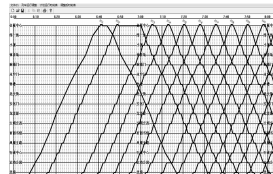


图2 调整后运行图(PSO)

以上述列车的晚点情况为例,调整前后的时刻表显示界面分别如图4和5所示。

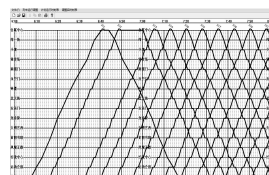


图3 调整后运行图(CPSO)

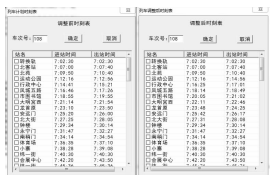


图4 调整前后时刻表(PSO)

从图4可以明显地看出,108次列车在运动公园站发车时间由计划运行图的7:12:56晚点120 s至7:14:56发车,采用PSO算法进行调整,随着站序的不断推移,晚点时间不断减少,到钟楼站出发时晚点时间降为0 s。由图5可见,108次列车在运动公园站晚点120 s,采用杂交PSO算法进行调整,到安远门站晚点消失,在安远门站恢复到计划运行图正常运行。按照调整的目标要求,所得到的调整方案最终较好地解决了列车晚点问题,且在求解列车运行调整问题时,杂交PSO算法的优化能力优于标准PSO算法。对所开行的车辆应用杂交PSO算法进行计算,记录每一代的全局最优值,并将其与标准PSO算法求解值进行比较,得到群体适应度的变化趋势情况如图6所示。

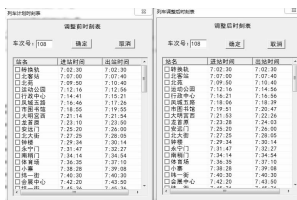


图5 调整前后时刻表(CPSO)

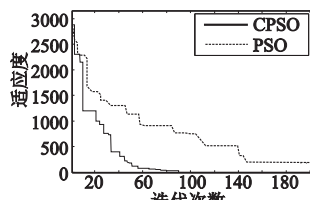


图6 群体优化适应度变化值

从图6可以看出,杂交PSO算法的收敛速度比标准PSO算法更快,具有更强的收敛能力和跳出局部最优的能力。用改进算法得到的解是全局最优解,而标准PSO算法搜索速度较慢,得到的最优解较差。另外,改进算法收敛到最优解所需的迭代次数比标准PSO算法明显降低。因此,杂交PSO算法在求解列车运行调整问题时更具优越性。

4 结束语

列车运行调整问题是一个非线性、多目标组合优化问题,约束条件众多,搜索空间庞大,实际中很难获得最优解。本文结合城市轨道交通列车运行调整的特点建立了相应的列车运行调整优化模型,以列车晚点时间和晚点列车数量的加权和最小作为运行调整的目标,采用杂交PSO算法对其进行求解,最终产生新的调整计划。实例表明,杂交PSO算法在解决列车运行调整问题时具有良好的实时性和有效性,同时也验证了该模型的可行性。

参考文献:

- [1] 贾传俊,胡思继,杨宇栋. 列车运行调整微粒群算法研究[J]. 铁道学报,2006,28(3):6-11.
- [2] 陈雍君,周磊山. 基于序优化方法的列车运行调整算法研究[J]. 铁道学报,2010,32(3):1-8.
- [3] HELLSTOM P, SANDBLAD B, FREJ I, *et al.* An evaluation of algorithms and system for computer aided train dispatching[M]//Computer in Railway VI. [S. l.]: WIT Press,1998:585-595.
- [4] 黄宇,韩璞,刘长良,等. 改进量子粒子群算法及其在系统辨识中的应用[J]. 中国电机工程学报,2011,31(20):114-120.
- [5] 贺振欢,李海鹰,苗建瑞,等. 铁路客运专线列车运行调整策略仿真分析[J]. 系统仿真学报,2010,22(1):262-265.
- [6] 张莉艳,李平,贾利民. 在移动闭塞条件下列车运行调整的仿真研究[J]. 系统仿真学报,2004,16(10):2257-2260.
- [7] 章优仕,金炜东. 单线列车运行调整的梯度搜索算法仿真与研究[J]. 系统仿真学报,2010,22(11):2496-2501.
- [8] 陈世明,赖毅平,江冀海. 面向列车运行调整问题的粒子群算法研究[J]. 计算机应用研究,2010,27(12):4460-4463.
- [9] 罗辞勇,陈民铀. 适应性粒子群寻优算法[J]. 控制与决策,2008,23(10):1135-1138.
- [10] 朱丽莉,杨志鹏,袁华. 粒子群优化算法分析及研究进展[J]. 计算机工程与应用,2007,43(5):24-27.
- [11] SHI Y, EBERHART R C. A modified swarm optimizer[C]//Proc of IEEE International Conference on Evolutionary Computation. [S. l.]: IEEE Press,1998:69-73.
- [12] 谭乐祖,任东彦,温巧林. 基于杂交粒子群算法的弹炮混编防空群火力优化模型[J]. 兵工自动化,2010,29(2):16-19.

(上接第1687页)

- [4] HE Jun, YAO Xin. A study of drift analysis for estimating computation time of evolutionary algorithms[J]. *Natural Computing*,2004,3(1):21-35.
- [5] 覃俊,康立山. 一个多目标优化演化算法的收敛性分析框架[J]. 计算机应用研究,2005,22(2):68-70.
- [6] OLIVETO P S, HE Jun, YAO Xin. Time complexity of evolutionary algorithms for combinatorial optimization: a decade of results[J]. *International Journal of Automation and Computing*,2007,4(3):281-293.
- [7] OLIVETO P S, WITT G. Simplified drift analysis for proving lower bounds in evolutionary computation[J]. *Algorithmica*,2011,59(3):369-386.

- [8] JAGERSKUPPER J. Combining markov-chain analysis and drift analysis: the (1+1) evolutionary algorithm on linear functions reloaded[J]. *Algorithmica*,2011,59(3):409-424.
- [9] LEHRE P K, YAO Xin. Runtime analysis of the (1+1) EA on computing unique input output sequences[C]//Proc of IEEE Congress on Evolutionary Computation. 2007:1882-1889.
- [10] CHEN Tian-shi, HE Jun, SUN Guang-zhong, *et al.* A new approach for analyzing average time complexity of population-based evolutionary algorithms on unimodal problems[J]. *IEEE Trans on System, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*,2009,39(5):1092-1106.
- [11] 缪柏其. 概率论教程[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1998.