

doi:10.3969/j.issn.1007-7162.2013.03.010

单车场关联物流运输调度问题的混沌遗传算法

汤雅连,蔡延光,郭 帅,乐 峰
(广东工业大学 自动化学院,广东 广州 510006)

摘要: 提出了关联物流运输调度问题(Incident Vehicle Routing Problem,IVRP)概念,建立了单车场单车型的IVRP模型,并用混沌遗传算法求解关联物流运输调度问题.混沌遗传算法的基本思想是把混沌变量加载于遗传算法的变量群体中,利用混沌变量对子代群体进行微小扰动并随着搜索过程的进行逐渐调整扰动幅度.研究表明,该方法能有效地解决关联物流运输调度问题.

关键词: 单车场单车型;关联物流运输调度问题;混沌变量;混沌遗传算法

中图分类号: TP319 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-7162(2013)03-0053-06

Single-Depot Incident Vehicle Routing Problem Based on Chaos Genetic Algorithm

Tang Ya-lian, Cai Yan-guang, Guo Shuai, Le Feng
(School of Automation,Guangdong University of Technology,Guangzhou 510006,China)

Abstract: The concept of Incident Vehicle Routing Problem (IVRP) was proposed, the single-depot and single-type-vehicle model was established, and chaos genetic algorithm was applied in the solution to IVRP. The basic thought of chaos genetic algorithm is that chaos variables were brought into the genetic algorithm, adjusting gradually the scope of disturbance in offspring population. The experimental results show that the algorithm can solve IVRP effectively.

Key words: Single-depot and single-type-vehicle; Incident Vehicle Routing Problem(IVRP); chaos variable; chaos genetic algorithm

车辆路径问题(Vehicle Routing Problem,VRP)^[1-2]自1959年Dantzig和Ramser首先提出以来就引起了人们的高度重视.VRP的实用性强,应用广泛.车辆路径问题一般定义为:对一系列送货点和收货点,组织适当的行车路线,使车辆有序地通过它们,在满足一定的约束条件(如货物需求量、发送量、送发货时间、车辆容量限制、行驶里程限制、时间限制等)下,达到一定的目标(如路程最短、费用极小、时间尽量少、使用车辆数尽量少等)^[3].

混沌是连续或离散动力系统产生的无固定周期的循环行为,广泛存在于工程、物理、数学及生物学等领域^[4].本文根据混沌优化的遍历性^[5-6]和遗传

算法^[7-9]优化的反演性,提出了一种混沌遗传算法(Chaos Genetic Algorithm,CGA)^[10-13],其基本思想是将混沌状态引入到优化变量中,并把混沌运动的变量范围“放大”到优化变量的取值范围,然后把得到的混沌变量进行编码,表示成“染色体”,对其进行选择、复制、交叉、变异,然后对各个混沌变量附加混沌小扰动,通过不断进化,求得问题的最优解.

1 问题的描述

在实际中常有这样的情况,客户需要多种零件商品,这些零件商品是成品的组成部分,而零件商品由于性质、特征和用途的差异,彼此之间具有货物性

质关联性;客户常常为了保证其需求不受影响而将所有的零件商品供货交付给一个物流运输公司来为其配货. 客户的这种需求本文称之为关联需求;零件商品在被客户使用,即在加工组成成品的过程中,零件的使用有先后顺序,本文称零件商品具有时间关联性. 这时,物流公司应该考虑怎样进行车辆分配和寻求最优配送路线以达到最低的物流成本来为多种这种性质的客户配送货物,这样的问题这里称之为关联物流运输调度问题(Incident Vehicle Routing Problem, IVRP).

(1) 物流配送渠道由 1 个车场, l 个客户(1, 2, 3, $\dots$, l), 1 个配送中心构成.

(2) 车辆从车场出发,完成配送后返回原车场.

(3) 配送车辆有最大配送距离约束.

(4) 无时间窗^[14]要求.

(5) 非满载.

(6) 考虑货物性质关联、需求关联及时间序列关联.

第 i 个客户的货运量为 g_i ($i = 1, 2, \dots, l$), 需要从车场将货物运到客户手中, 有车场派出载重量为 q 的货车, 已知 $g_i < q$, 求满足货运需求成本最小的配送路线.

预先对需要车辆数进行估计. 可以按照式(1)确定车辆数:

$$m = [\sum g_i / \alpha q] + 1, \quad (1)$$

式中, $[\]$ 表示不大于括号内数字的最大整数; $0 < \alpha < 1$, 是对装车(或卸车)的复杂程度及约束多少的估计.

以 c_{ij} 表示为从点 i 到点 j 的运输成本(距离、费用、时间等), $c_{ij} = c_{ji}$, 不考虑车辆空载时产生的费用. 假设客户 i, j 之间的距离为 d_{ij} , 目标为使车辆的总运输距离最短. 车场编号为 0, 客户为 i ($i = 1, 2, \dots, l$). 设 t_{ij} 为车辆从客户 i 行驶到客户 j 的时间, e_i 表示该任务的终止时间, T_i 为完成该任务所需时间(装货或卸货).

定义变量如下:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{车辆 } k \text{ 由点 } i \text{ 到点 } j, \\ 0, & \text{否则,} \end{cases}$$

$$y_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{点 } i \text{ 的货运任务由车辆 } k \text{ 完成,} \\ 0, & \text{否则.} \end{cases}$$

建立数学模型

$$\min z = \sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^l \sum_{k=1}^m c_{ij} x_{ijk} Q x_i g_i, \quad (2)$$

$$\sum_{n=1}^N d_{ijk} \leq D_{\max}, \quad i, j = 1, 2, \dots, l, \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^l x_{ijk} = y_{jk}, \quad i, j = 1, 2, \dots, l, k = 1, 2, \dots, m, \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^l x_{ijk} = y_{ik}, \quad i, j = 1, 2, \dots, l, k = 1, 2, \dots, m, \quad (5)$$

$$x_{ijk} = 1, \quad i, j = 1, 2, \dots, l, k = 1, 2, \dots, m, \quad (6)$$

$$y_{ik} = 1, \quad i, j = 1, 2, \dots, l, k = 1, 2, \dots, m, \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^l g_i \sum_{j=0}^l x_{jik} \leq q, \quad k = 1, 2, \dots, m, \quad (8)$$

$$\sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^l x_{ijk} \leq l, \quad i, j = 1, 2, \dots, l, k = 1, 2, \dots, m, \quad (9)$$

$$\begin{cases} r_{ij} \geq 0.5, & \text{可用同辆车运载,} \\ r_{ij} < 0.5, & \text{不可同辆车运载.} \end{cases} \quad (10)$$

目标函数式(2)表示总运输成本最低, 以 c_{ij} 表示从点 i 到点 j 的单位运输成本并用客户 i 与 j 之间的距离 d_{ij} 作为取值. Q 为预计制造成品数量, x_i 为货物需求关联系数. g_i 为原材料单位重量. 式(3)为车辆行驶距离约束, 其中 d_{ijk} 表示车辆 k 行驶了客户 i 到 j 的路程, n 是车辆 k 服务的客户数目, 最大为 N . 式(4)和(5)表示两个变量之间的关系. 式(6)表示车辆服务客户 i 后直接行驶到顾客 j 为其服务. 式(7)表示每个客户只能由 1 辆车来服务且每个客户都能得到服务. 式(8)表示每辆车所运送的货物重量不能超过车辆载重量的限制. 式(9)表示保证每辆车的客户总数小于等于总客户数目. 式(10) r_{ij} 表示点 i 处的货物与点 j 处货物的性质关联系数, 判断不同性质货物是否可以同载.

2 算法设计

2.1 混沌遗传算法

1) 遗传算法

Step1: 编码. 编码是运用遗传算法要解决的首要问题. 由于遗传算法计算过程的鲁棒性, 大多数问题都可以采用基于 $\{0, 1\}$ 符号集的二进制形式, 而二进制编码的缺点是在某些相邻整数的二进制代码之间有很大的汉明距离, 所以本章采用自然数编码, 即序数编码. 对算例中的所有客户和车辆进行排序, 行驶路径即为染色体. 如染色体(0-2-4-3-0-1-6-5-0)表示两条配送路径: 车场-2-4-3-车场; 车场-1-6-5-车场.

Step2:初始化种群. 本文根据配送点及车场,随机产生初始种群,从车场0出发,随机地选取某客户点作为下一路径点,多次反复,并判断是否满足模型中所约定的约束,若不满足,则返回车场0,这样就可以形成一个染色体. 若有 l 个客户,1个车场,每条路径所经过的客户数之和最大为 l ,如 $p_1 = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_w\}$, x_i 为客户编号($i = 1, 2, \dots, l$)或车场编号0,则IVRP的初始路径集为 $P(0) = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$. 即每代中种群中有 N 个个体,每个个体有 w 个基因. 然后确定交叉概率、变异概率、进化代数等参数.

Step3:适应度函数. 适应度函数也称之为评价函数,是根据目标函数来区分群体中个体好坏的标准,是进行自然选择的唯一准则. 适应度函数总是非负的. 计算相应的目标函数值以及适应度函数值 f_j , $j = 1, 2, \dots, m$. 对于极大值问题,适应度函数值就等于目标函数值. 根据 $F = \sum_{j=1}^m f_j$ 计算群体的适应度函数值总和,并根据 $P_j = f_j/F$ 来计算每个染色体对应的选择概率 P_j ,然后采用轮盘赌来选择算子.

Step4:对选择后的种群以一定的概率进行交叉和变异操作,生成新种群.

Step5:若该新个体的适应度值大于原个体,则替换原个体,否则不变.

Step6:满足条件,产生了最优解,算法终止;否则,转步骤Step2.

2) 约束的处理

Step1:载重约束和里程约束处理. 本文采用载重约束和里程约束来控制车场的插入,同时满足载重约束和里程约束则把车场加入路径中. 若 $g_i + g_j \geq q$ 或车辆超过了最大里程约束,则车辆从 i 处返回;若 $g_i + g_j < q$,且没有超过最大里程约束,则车辆可以继续配送. 每经过一次搜索,需判断一次载重约束和里程约束,经过这样的约束处理后,使解空间呈现多样性.

Step2:货物性质关联约束处理. 若 $r_{ij} \geq 0.5$,则此两种货物可以同车运载,否则不能同载.

Step3:时间窗约束处理. 本文采用增加惩罚函数的形式,若在规定时间内完成任务,则不加惩罚;若早到或者晚到,则会相应地增加惩罚值,使之具有较小适应值.

3) 混沌遗传算法

Step1:设定混沌遗传算法参数,变量的取值范

围 $[d_i, e_i]$ 、种群规模 N 、混沌吸引子 μ_i 、交叉概率 p_c 和变异概率 p_m .

Step2:选用Logistic映射^[7],如式(11)所示.

$$\beta_i^{(u+1)} = \mu_i \beta_i^{(u)} (1 - \beta_i^{(u)}). \quad (11)$$

式中, i 表示混沌变量的序号, $i = 1, 2, \dots, r$; u 表示种群序号, $u = 0, 1, \dots, n = 0$; β_i 表示混沌变量, $0 \leq \beta_i \leq 1$; μ_i 表示吸引子. 当 $\mu_i = 4$ 时,Logistic映射完全处于混沌的状态,此时产生的混沌变量 β_i 具有很好的遍历性. 假设迭代次数为300,初值为0.6,得到Logistic映射的概率分布图,如图1所示.

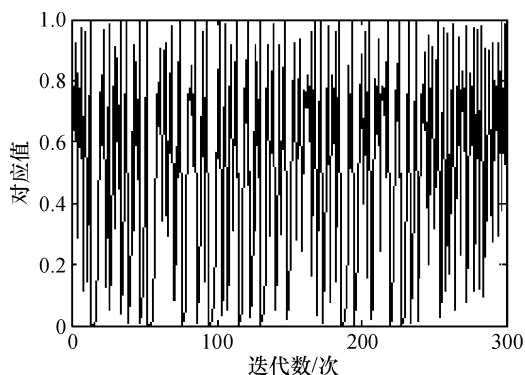


图1 Logistic映射的概率分布图

Fig. 1 The LogisticMap probability distribution map

Step3:令 $X = (x_1, x_2, \dots, x_r)$, $X' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_r)$,按式(12)将 $\beta_i^{(u+1)}$ 代入目标函数中,使其变换为混沌变量 x'_i ,将混沌变量的变化区间“放大”到相应优化变量的取值范围. 其中 a_i, b_i 为变换常数.

$$x'_i = a_i + b_i \beta_i^{(u+1)}. \quad (12)$$

Step4:以目标函数的倒数作为适应度函数,计算式(12)产生的适应度值并按降序排列.

Step5:编码设计. 采用自然数编码,对上一代群体中适应度最大的10%采取保留机制,另外90%由复制、交叉和变异3种操作产生. 对染色体进行解码.

Step6:计算新的适应度值,并降序排列. 若平均适应度值与最大适应度值满足式(13),输出最优值.

$$\left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f'_i(X') - f'(X')_{\max} \right| < \varepsilon. \quad (13)$$

Step7:对适应度较小的90%对应的优化变量按式(14)加一混沌扰动,按式(12)映射为优化变量,进行迭代计算. 式(15)中的 θ 随迭代次数增加为不断变化,迭代向较优解逼近,直到满足式(16). k 为迭代次数.

参考文献[15], φ^* 为当前最优解 $(x_1^*, \cdots, x_n^*)$ 映射到 $[0,1]$ 的向量^[6], φ_k 为迭代 k 次后的混沌向量, φ'_k 为随机扰动后的混沌向量, θ 取值在 $(0,1)$ 之间,可由下式来计算, m 依目标函数而定,本文取 $m=5$. k 为迭代次数.

$$\varphi'_k = (1 - \theta)\varphi^* + \theta\varphi_k,$$

(14)

$$\theta = 1 - \left| \frac{k-1}{k} \right|^m,$$

(15)

$$\left| \overline{f'_k(X')} - \overline{f'_{k+1}(X')} \right| < \varepsilon'.$$

(16)

Step8:对新产生的种群进行适应度值计算,若满足式(16),输出最优值;否则,返回 Step2. 算法流程图如图 2 所示.

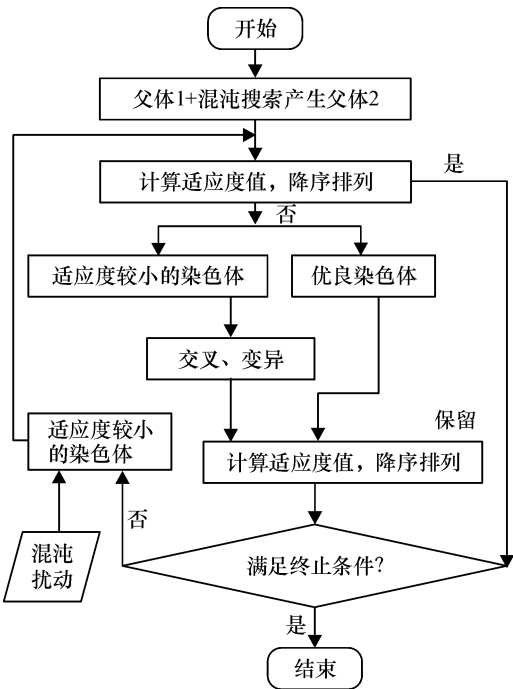


图 2 混沌遗传算法流程图

Fig. 2 Operation flow diagram of chaos genetic algorithm

2.2 算例仿真及分析

根据市场需求,某公司需要制造某种产品,数量为 50 件,该产品由 6 种原材料分别加工成配件,最后组装而成. 该公司将配送原材料的业务指派给 1 个物流公司. 需将 6 种原材料配送给相应的配件加工中心,原材料信息一览表如表 1 所示,每个配件中心所需的原材料,本文统称为货物,具有需求关联性 及时间关联性,如表 2 所示, x_i 为需求关联系数,配件编号与原材料编号一一对应, $x_i=2$ 时表明生产一件配件所需要的货物数量为 2. 时间关联序列按字母顺序进行排序,为了区分,不同时间序列的货物加工时间不存在交叉重叠. 时间关联序列表示在货物

被加工成配件时的工序时间关联,时间序列相同时,如货物 2 和 3 的时间序列都为 A,则说明这两种货物可被同时加工;时间序列有先后顺序的货物,如原材料 4 和 5,对应的序列是 A 和 B,因为 A 先于 B,所以 4 应早于 5 到达配件加工中心,或者 5 提前到达配件加工中心. 货物与货物之间的性质关联系数如表 3 所示, r_{ij} 为原材料性质关联系数. 本试验由 1 个车场的车辆进行配送,车的最大里程限制为 60 个单位长度,车场坐标为 $(0,0)$,每辆车的载重为 120 t,配送费用为 1 元/(单位长度 $\times$ 单位重量).

表 1 原材料信息一览表

Tab. 1 The clients' information sheet

原材料	坐标	重量/t
1	(15,3)	0.57
2	(20,0)	0.16
3	(17,-2)	0.56
4	(7,-4)	0.30
5	(1,-6)	0.47
6	(15,-6)	0.47

表 2 货物需求关联系数 x_i 和时间关联序列

Tab. 2 Goods demanded coefficient x_i & Time related sequence

配件编号	货物编号	时间序列	x_i
1	1	B	2
2	2	A	3
3	3	A	2
4	4	A	3
5	5	B	2
6	6	C	2

表 3 货物性质关联系数 r_{ij}

Tab. 3 Feature related coefficient among goods

货物编号	1	2	3	4	5	6
1	1.00	0.80	0.90	0.83	0.45	0.22
2	0.80	1.00	0.85	0.70	0.88	0.76
3	0.90	0.85	1.00	0.94	0.78	0.48
4	0.83	0.70	0.94	1.00	0.35	0.86
5	0.45	0.88	0.78	0.35	1.00	0.84
6	0.22	0.76	0.48	0.86	0.84	1.00

本文中的实验是在 Intel (R) Core™ i3 CPU2. 53GHz、内存 2.0G 的 PC 机上采用 Microsoft Visual C++ 6.0 编程实现.

该算法中参数设计为:初始化种群 $N=20$,最大迭代次数(gen) = 50,交叉概率 $p_c=0.9$,变异概率 $p_m=0.04$. 为简化问题,交叉算子指单点杂交,变异

算子特指单点变异。

运行算法 20 次,得到最终运行结果如图 3 所示,具体配送路径如表 4 所示。

表 4 最优配送路径
Tab. 4 The best distribution diagram

路径	最优路径	(实载/容量)/t	相对里程
1	0-2-6-4-0	116/120	44.1
2	0-3-1-0	113/120	37.8
3	0-5-0	117.5/120	12.2
合计		364.5/360	94.1

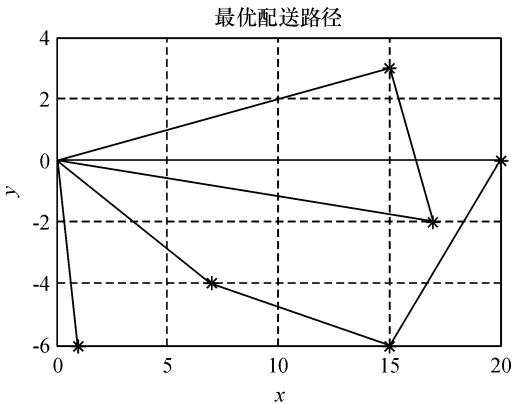


图 3 运行结果
Fig. 3 Operating result

3 结束语

本文用混沌遗传算法对具有性质关联、需求关联及时间关联特征的关联运输调度问题求解,由于传统 GA 已经产生了部分适应度高的基因,只对适应度较差的基因加混沌扰动,缩小混沌遗传算法的搜索空间,加快了寻优速度. 证明此算法能有效解决单车场单车型无时间窗约束的 IVRP.

参考文献:

[1] 任中明,蔡延光. 智能运输调度系统求解机制研究与实现[J]. 自动化与信息工程,2011,32(1):14-18.
Ren Zhong-ming,Cai Yan-guang. The research and implementation fort the solving mechanism of intelligent vehicle dispatch system[J]. Automation & Information Engineering,2011,32(1):14-18.

[2] 尹朋珍,郭海湘,杨娟,等. 单车场车辆路径问题的蚁群算法求解及程序设计[J]. 计算机应用与软件,2010,27(8):49-54.
Yin Peng-zhen,Guo Hai-xiang,Yang Juan,et al. Resolving single depot vehicle routing problem with ant colony algorithm and the program designing[J]. Computer Applications and Software,2010,28(7):49-54.

[3] 屈援,汪波,钟石泉. 单车场多送货点车辆路径问题的改进遗传算法[J]. 计算机工程与应用,2007,43(25):237-239.
Qu Yuan,Wang Bo,Zhong Shi-quan. Improved genetic algorithm for vehicle routing problem with single depot and weight limit [J]. Computer Engineering and Applications, 2007,43(25):237-239.

[4] 张楠,李志蜀,张建华,等. 基于混沌理论的免疫遗传算 [J]. 计算机应用,2006,26(5):1111-1113.
Zhang Nan,Li Zhi-shu,Zhang Jian-hua,et al. Immune ge- netic algorithm based on chaos theory[J]. Computer Appli- cation,2006,26(5):1111-1113

[5] 武妍,冯钊. 一种基于混沌搜索的自适应入侵遗传算法 [J]. 计算机应用,2008,28(1):101-103.
Wu Yan,Feng Zhao. Adaptive invading genetic algorithm based on chaos search [J]. Computer Applications,2008, 28(1):101-103.

[6] 姚俊峰,梅炽,彭小奇,等. 混沌优化算法及其应用[J]. 系统工程,2001,19(1):70-74.
Yao Jun-feng,Mei Chi,Peng Xiao-qi,et al. A new optimi- zation approach-chaos genetic algorithm [J]. Systems En- gineering, 2001,19(1):70-74.

[7] Chen Zi-xia,Xuan You-shi. VRP based on improved niche isolation genetic algorithm [C] // The Proceedings of the Fourth International Conference on Fuzzy Syatens and Knowledge Discovery (FSKD 2007). [S. l.]: IEEE Com- puter Society,2007:724-729.

[8] Moin N H, Salhi, Aziz N A B. An efficient hybrid genetic algorithm for the multi-product multi-period inventory rou- ting problem[J]. Int J Production Economics,2011(133): 334-343.

[9] 徐雁飞,幸海琼. 遗传算法的应用及研究分析[J]. 电脑 学习,2010(3):113-115.
Xu Yan-fei, Xing Hai-qiong. The application and research analysis of genetic algorithm [J]. Computer Study, 2010 (3):113-115.

[10] 姚俊峰,梅炽,彭小奇. 混沌遗传算法 (CGA) 的应用研 究及其优化效率评价[J]. 自动化学报,2002,28(6): 936-943.
Yao Jun-feng, Mei Chi, Peng Xiao-qi. The application re- search of tne chaos genetic algorithm (CGA) and its evalu- ation of optimization efficiency[J]. Acta Automatica Sini- ca,2008,28(6):936-943.

[11] 章敬东,刘小辉,邓飞其,等. 混沌优化与遗传算法的智 能集成[J]. 计算机工程与应用,2003,39(16):17-22.
Zhang Jing-dong,Liu Xiao-hui,Deng Fei-qi, et al. Intelli- gent integrate of genetic algorithm and chaotic optimization [J]. Computer Engineering and Application, 2003, 39 (16):17-22.

Conference, Proceedings/TENCON, 2011:312-315.

- [10] Yoshikawa F, Kobayashi T, Watanabe K, et al. Automated service scene detection for badminton game analysis using CHLAC and MRA[J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2010, 62: 942-945.
- [11] Nakagawa K, Hasegawa H, Murakami M, et al. Aerodynamic properties and flow behavior for a badminton shuttlecock with spin at high reynolds numbers[J]. Procedia Engineering, 2012,34:104-109.
- [12] 王永超. 刚体转动惯量的质量投影法[J]. 大学物理,

2010, 9(29): 16-18.

Wang Yong-chao. The mass projection method of rigid body rotational inertia[J]. College Physics, 2010, 9(29): 16-18.

- [13] 王永超,朱力. 均质椭圆柱面刚体转动惯量的计算[J]. 大学物理,2011,6(30): 9-11.
- Wang Yong-chao, Zhu Li. Calculation of rotational inertia of an elliptic cylinder uniform rigid body[J]. College Physics, 2011, 6(30): 9-11.

(上接第48页)

- [9] 刘成颖,王昊,张之敬,等. 面向动态性能的永磁直线同步电机设计[J]. 中国电机工程学报,2011,31(33): 138-143.
- Liu Cheng-ying, Wang Hao, Zhang Zhi-jing, et al. Design of permanent magnet linear synchronous motor for dynamic performance[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(33): 138-143.
- [10] 刘金琨. 先进PID控制及其MATLAB仿真[M]. 北京, 电子工业出版社,2003.
- [11] 姜飞荣,章玮. 基于MC56F8357的永磁同步电机伺服控制系统[J]. 电气自动化,2007,29(2):3-5,31.
- Jiang Fei-rong, Zhang Wei. A MC56F8357-based permanent magnet synchronous motor (PMSM) servo system [J]. Electrical Automation,2007,29(2):3-5,31.
- [12] Shen Yan-Xia, Chen Zhong-Wei. Induction motor vector control system based on anti-windup controller[C]//Proceedings of the 2011 6th IEEE Conference on Industrial E-

lectronics and Applications(ICIEA),2011:2729-2732.

- [13] Zhang Da, Li Hui, Collins Emmanuel G. Digital anti-windup PI controllers for variable-speed motor drives using FPGA and stochastic theory[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006,21(5):1496-1501.
- [14] Shin Hwi-beom, Park Jong-gyu. Anti-windup PID controller with integral state predictor for variable-speed motor drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012,59(3):1509-1516.
- [15] 李腾,刘延杰,孙立宁,等. 考虑端部效应的永磁直线同步电机键合图建模[J]. 电机与控制学报,2011,15(2):71-75.
- Li Teng, Liu Yan-jie, Sun Li-ning, et al. Bond graph approach to the modeling of permanent magnet linear synchronous motor with consideration of end-effect[J]. Electric Machines and Control,2011,15(2):71-75.

(上接第57页)

- [12] 匡胤,刘益和,黄迪明. 混沌理论在遗传算法中的应用[J]. 四川理工学院学报,2007,20(4):1-3.
- Kuang Yin, Liu Yi-he, Huang Di-ming. Research on genetic algorithm based on chaos theory[J]. Journal of Sichuan University of Science&Engineering:Natural Science Edition,2007,20(4):1-3.
- [13] 姚俊峰,梅炽,彭小奇,等. 混沌遗传算法及其应用[J]. 系统工程,2001,19(1):70-75.
- Yao Jun-feng, Mei Chi, Peng Xiao-qi, et al. A new optimization approach-chaos genetic algorithm[J]. Systems Engineering, 2001,19(1):70-75.
- [14] 李大卫,王莉,王梦光. 一个求解带有时间窗口约束的

车辆路径问题的启发式算法[J]. 系统工程,1998,16(4):20-24.

Li Da-wei, Wang Li, Wang Meng-guang. A heuristic for the vehicle routing problem with time windows constraints [J]. Systems Engineering,1998,16(4):20-24.

- [15] 谷晓琳,黄明,梁旭. 混沌变异算子的改进遗传算法及其应用[J]. 计算机应用,2007,27(10):2490-2492.
- Gu Xiao-lin, Huang Ming, Liang Xu. Improved genetic algorithms based on chaotic mutation operation and its application[J]. Computer Applications, 2007, 27(10): 2490-2492.