



$$M=T_{\text{macro}}/T_{\text{bp}}.$$

一个基本周期包括周期相、监视相、事件相和保护相,后三相合称为偶发相<sup>[1]</sup>.主设备在周期相中遵照所设计的轮询表对周期数据轮询,监视相中主设备进行设备扫描和主权传递,事件相处理突发报文.不同的基本周期可以有不同的偶发时间,其缺省值为 350 μs.

MVB 采用主-从工作方式,主帧长度固定为 33 bit,从帧  $F$  码对应 5 种长度:33,49,81,153,297 bit,考虑到时间延迟  $t_{\text{ms}}$  和  $t_{\text{sm}}$ ,MVB 完成一次报文传输需要的时间为

$$t_{\text{mm}}=\frac{\text{len}(\text{Master\_frame})}{v}+\frac{\text{len}(\text{Slave\_frame})}{v}+t_{\text{ms}}+t_{\text{sm}} \tag{2}$$

MVB 通信速率  $v$  为 1.5 Mbit/s,由式(2)可以计算每次通信的时长.

## 2 周期轮询表问题描述与模型建立

### 2.1 任务描述

考虑对  $N$  个周期变量编排,每个周期变量可以表示为

$$C_i=\{T_{ip},F_i,L_i\};i\in\{1,2,\cdots,N\} \tag{3}$$

式中: $T_{ip}$  是第  $i$  个变量的特征周期; $F_i$  是功能码,取值为 0,1,2,3,4,依次对应 5 个从帧长度,通过从帧长度求出完成一次报文传输时间  $t_{\text{mmi}}$ ;  $L_i$  为周期变量首次在轮询表中出现的基本周期编号,本文的目的就是确定每个设备的  $L_i$ .

### 2.2 约束条件

(1)最大周期约束.每个基本周期中,周期相所占时间有一定限制,需要留出一定时间完成监视任务和处理突发消息.用  $k$  表示周期相在一个基本周期所占比例:

$$\sum_{j=1}^M t_{\text{mmj}}<kT_{\text{bp}}=T_{\text{max}} \tag{4}$$

(2)可调度性条件.周期信息的截止期等于其特征周期,可调度性要求响应时间不大于截止期<sup>[6]</sup>,所以端口首次在轮询表中出现的时间不大于其特征周期,即

$$L_i\leqslant T_{ip} \tag{5}$$

### 2.3 优化目标

IEC 61375-1 标准要求周期信息均匀分布,

一个重要指标是基本周期周期相的标准差

$$Var=\sqrt{\frac{1}{M}\sum_{m=1}^M\left(\sum_{g=1}^{G(m)}t_{\text{mmg}}-t_{\text{ave}}\right)^2} \tag{6}$$

式中: $G(m)$  是第  $m$  个基本周期的端口数; $\sum_{g=1}^{G(m)}t_{\text{mmg}}$  表示第  $g$  个基本周期中周期相实际时间; $t_{\text{ave}}$  表示周期相的平均值,如果用  $\lambda$  表示端口的特征周期级别,用  $N_\lambda$  表示级别为  $\lambda$  的端口数目,则

$$t_{\text{ave}}=\sum_{\lambda=0}^{\log_2 M}\left(\frac{1}{2^\lambda}\sum_{j=1}^{N_\lambda}t_{\text{mmj}}\right) \tag{7}$$

定义时间梯度为轮询表最长周期相和最短周期相之差,用  $T_{\text{grad}}$  表示,用  $t_{\text{total}(i)}$  表示第  $i$  个基本周期内周期相长度,则有

$$T_{\text{grad}}=\max\{t_{\text{total}(i)}\}-\min\{t_{\text{total}(i)}\} \tag{8}$$

$Var$ 、 $T_{\text{grad}}$  越小效果越好,利用它们加权作为第一个优化目标以更全面地表达均匀度要求,用  $Fit_1$  表示为

$$Fit_1=Var+xT_{\text{grad}} \tag{9}$$

为提高网络对偶发相处理能力,在保证均匀度的基础上,扩大相邻基本周期的平均时间差<sup>[3]</sup>,此度量用  $T_{\text{diff}}$  表示为

$$T_{\text{diff}}=\frac{1}{M}\sum_{i=2}^M|t_{\text{total}(i)}-t_{\text{total}(i+1)}| \tag{10}$$

当均匀度相同时, $T_{\text{diff}}$  越大表明该编排越能将长周期和短周期更好地错开.长周期剩余时间少,短周期剩余时间多,若突发消息在长周期剩余时间无法处理完,在短周期里有足够剩余时间处理,这提高了对偶发相的处理能力,所以  $T_{\text{diff}}$  越大效果越好.构造第二个优化目标  $Fit_2$  为

$$Fit_2=y(T_{\text{max}}-T_{\text{diff}}) \tag{11}$$

其中  $y$  表征两个优化目标的相对重要性,一般  $y<0.1$ .

综上所述,优化目标为
$$\begin{cases} \min(Fit_1) \\ \min(Fit_2) \end{cases}$$
,任务是生

成向量  $L=(L_1\ L_2\ \cdots\ L_N)$ ,记录每个端口在轮询表中首次出现的特征周期编号.

因为比较  $T_{\text{diff}}$  指标的前提是均匀度相同,当均匀度不同时不能通过简单比较  $T_{\text{diff}}$  来判断某个解的性能.由此引入相对指标用于评价解的性能表现,表达式为

$$Relative\_diff = \frac{T_{diff}}{Var} \quad (12)$$

$Relative\_diff$  越大,认为均匀度相同时相邻周期的时间差异越大,说明网络处理偶发消息的能力越强,性能也就越好.

### 3 基于 Pareto 蚁群算法建立周期轮询表

#### 3.1 Pareto 蚁群算法

蚁群算法利用群体合作和正反馈机制搜索解空间,不易陷入局部最优,在离散的优化调度问题上寻优效果好.蚁群系统(ant colony system, ACS)算法<sup>[7-8]</sup>相比基本蚁群算法和其他改进算法,其全局搜索能力更强.本文的 Pareto 蚁群算法是在蚁群系统算法的基础上添加规则提出的,能用于多目标优化问题<sup>[9]</sup>.

蚁群系统算法先利用最近邻思想<sup>[2]</sup>构造初始游历,其适应值为  $f_0$ ,则信息素增强系数

$$Q = \frac{1}{Nf_0} \quad (13)$$

信息素矩阵各元素初始化为  $Q$ .蚂蚁从第  $i$  个节点选择第  $k$  条路径走到第  $i+1$  个节点的概率为

$$P_{i,i+1}^k = \frac{\tau_{i,i+1}^\alpha \eta_{i,i+1}^\beta}{\sum_{s \in allowed_k(i)} \tau_{is}^\alpha \eta_{is}^\beta} \quad (14)$$

式中: $\tau_{i,i+1}$  为信息素强度, $\eta_{i,i+1}$  为启发函数, $\alpha$  为信息启发因子, $\beta$  为期望启发因子.由式(5)得第  $i$  个节点可选择路径有  $T_{ip}$  条,则启发函数表示为

$$\eta_{i,i+1} = 1/T_{ip} \quad (15)$$

求得每条备选路径概率后,利用轮盘赌方式选择下一条路径.

蚁群系统算法的信息素更新规则包括局部更新和全局更新,如

$$\tau_{i,i+1}^{local}(t+1) = (1-\rho_1)\tau_{i,i+1}(t) + \rho_1 Q \quad (16)$$

$$\tau_{i,i+1}^{global}(t+1) = (1-\rho_2)\tau_{i,i+1}(t) + \rho_2/f_b \quad (17)$$

式中: $\rho_1$ 、 $\rho_2$  为信息素挥发系数,  $f_b$  表示最优路径的适应值.蚂蚁每走一步,都利用局部更新规则更新信息素;当所有蚂蚁遍历结束,对全局最优的路径利用全局更新规则更新信息素.

Pareto 蚁群算法包含  $Fit_1$  和  $Fit_2$  两个目标,

两个目标对应信息素  $\tau^1$  和  $\tau^2$ ,根据上述规则独立维护各自的信息素,路径上总的信息素由  $\tau^1$  和  $\tau^2$  加权得到:

$$\tau = p\tau^1 + (1-p)\tau^2 \quad (18)$$

其中  $p$  体现两个目标的重要程度,考虑到  $Fit_1$  为主要目标,取  $p > 0.7$ .

蚁群算法与研究问题建立如图 1 所示的对应关系<sup>[4]</sup>,图中每个端口对应一个节点,蚂蚁只准从起点依次经过各个节点最后到达端口  $N$ .由式(5)得从第  $i-1$  个节点走到第  $i$  个节点可选择路径有  $T_{ip}$  条,如果选择第  $k$  条路径则表示第  $i$  个端口在轮询表中首次出现的特征周期编号为  $k$ .每只蚂蚁走完一遍就会生成一个解向量,每个解向量对应一个轮询表.利用 Pareto 蚁群算法搜索解空间,就可以得到性能优越的非劣解.

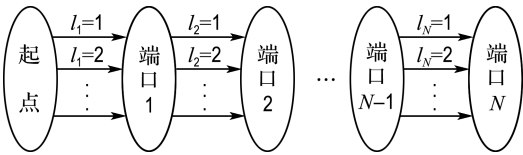


图 1 周期轮询表的蚁群算法

Fig. 1 The ant colony algorithm of period polling table

#### 3.2 非劣解维护

假设解  $A$  的两个适应值都小于解  $B$  的适应值,称  $A$  支配  $B$ ,否则  $B$  不受  $A$  支配.不受任何解支配的解,称之为非劣解.

多目标优化问题一般没有绝对的最优解,本文的目标是找出非劣解的集合形成 Pareto 沿.假设解集的容纳量为  $Num\_nd$ ,当得到的非劣解数目过多,需要根据规则剔除一部分.非劣解集基于拥挤距离<sup>[10]</sup>来维护,拥挤距离表征该解周围其他解分布的密集程度,点的拥挤距离越小,说明该点周围的解分布越密集,该解被剔除的概率越大.拥挤距离的计算如下:

针对每一个优化目标  $m$

根据适应值升序排序,  $S = sort(S, m)$

for  $i = 2$  to  $(Num\_nd - 1)$

$$S[i].distance = S[i].distance + (S[i + 1].m - S[i - 1].m)$$

对于边界点,  $S[1].distance = S[Num\_nd].$

$distance = maximumdistance$

获得 Pareto 沿后,根据下列式子计算沿上每一个点的评价指数  $\psi$ :

$$\psi = 0.75Fit_1 + 0.25Fit_2 \tag{19}$$

其中  $\psi$  包含了各个指标的信息,将其升序排列,从前 3 个点中随机选择一个,该点对应的向量  $L$  即为最终解,最后以此为依据建立周期轮询表。

综上所述,利用 Pareto 蚁群算法优化 MVB 周期轮询表的流程如图 2 所示。

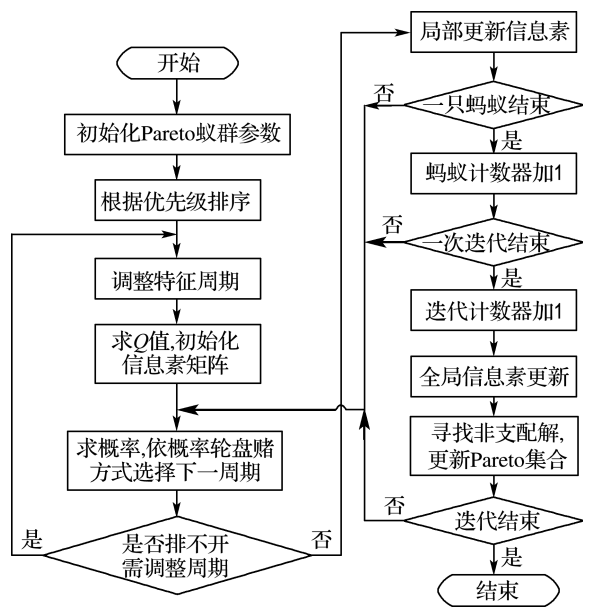


图 2 Pareto 蚁群算法流程图

Fig. 2 Flow chart of the P-AC algorithm

4 方法比较与结果分析

基于文献[3]和[4]的实验数据,将本文算法与已经提出的蚁群算法和多目标粒子群优化算法进行比较。Pareto 蚁群算法的参数设定:  $\alpha = 1, \beta = 2, \rho_1 = 0.05, \rho_2 = 0.10$ , 蚂蚁数目为 10, 信息素增强系数由式(13)求得,非劣解集容纳量为 24,程序迭代 200 次。

文献[3]的设备信息数据如表 1 所示,式(4)中  $k=75\%$ ,利用文献[3]的多目标粒子群优化算法得到的解向量为(2 2 1 2 2 4 3 1 6 3 6 1 5 16 3 3 4 16 13 1 9 11 7 23)。利用本文的 Pareto 蚁群算法仿真生成的非劣解如图 3 所示。根据式(19)计算排序,最终选取的解向量为(2 1 2 2 4 4 3 1 7 7 6 2 1 7

14 11 2 10 11 3 13 5 1 15)。两种算法的评价参数见表 2。

表 1 文献[3]的设备信息表

Tab. 1 Device information list of Lit. [3]

| <i>i</i> | <i>i<sub>mm</sub></i> | <i>T<sub>ip</sub></i> | <i>i</i> | <i>i<sub>mm</sub></i> | <i>T<sub>ip</sub></i> | <i>i</i> | <i>i<sub>mm</sub></i> | <i>T<sub>ip</sub></i> |
|----------|-----------------------|-----------------------|----------|-----------------------|-----------------------|----------|-----------------------|-----------------------|
| 1        | 71                    | 2                     | 9        | 71                    | 8                     | 17       | 140                   | 16                    |
| 2        | 92                    | 2                     | 10       | 92                    | 8                     | 18       | 140                   | 16                    |
| 3        | 140                   | 2                     | 11       | 140                   | 8                     | 19       | 140                   | 16                    |
| 4        | 236                   | 2                     | 12       | 140                   | 8                     | 20       | 236                   | 16                    |
| 5        | 71                    | 4                     | 13       | 236                   | 8                     | 21       | 236                   | 16                    |
| 6        | 140                   | 4                     | 14       | 60                    | 16                    | 22       | 236                   | 16                    |
| 7        | 236                   | 4                     | 15       | 71                    | 16                    | 23       | 140                   | 32                    |
| 8        | 236                   | 4                     | 16       | 92                    | 16                    | 24       | 236                   | 32                    |

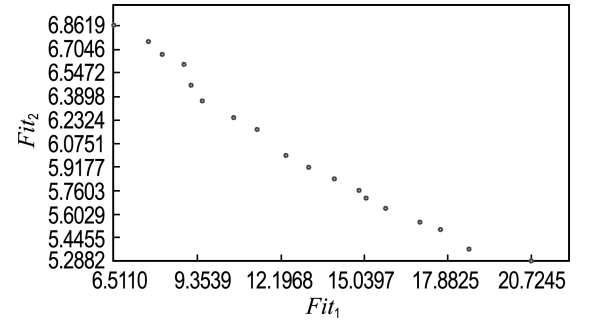


图 3 Pareto 蚁群算法基于表 1 产生的非劣解

Fig. 3 Non-dominated solutions created by P-AC algorithm based on Tab. 1

表 2 标准解性能指标

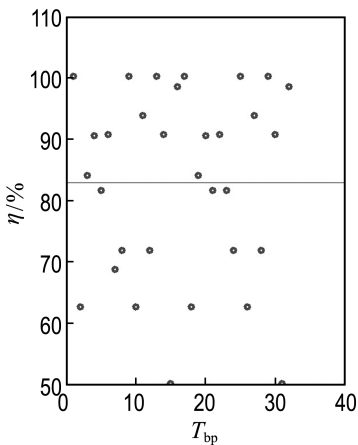
Tab. 2 Performance indicators of the standard solutions

| 算法          | <i>Var</i> | <i>T<sub>grad</sub></i> | <i>T<sub>diff</sub></i> | <i>Relative_diff</i> |
|-------------|------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|
| 多目标粒子群优化算法  | 115.75     | 376.00                  | 165.28                  | 1.42                 |
| Pareto 蚁群算法 | 67.79      | 236.00                  | 100.18                  | 1.48                 |

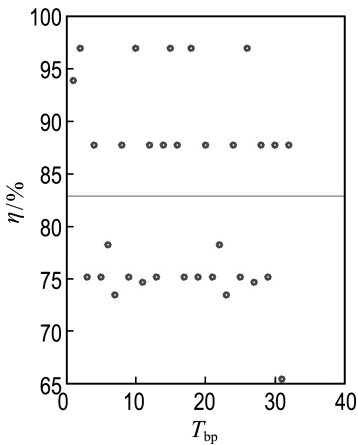
由表 2 可得,Pareto 蚁群算法得到解的标准差是 67.79,远小于多目标粒子群优化算法的 115.75;其  $T_{grad}$  指标是 236.00,同样远小于多目标粒子群优化算法的 376.00,说明本文算法能保证各基本周期波动小,在均匀度上的表现更好。Pareto 蚁群算法的 *Relative\_diff* 为 1.48,而多目标粒子群优化算法的仅为 1.42,说明 Pareto 蚁群算法得到的解能更好地将长短周期错开,提高网络处理偶发消息的能力。因为 Pareto 蚁群算法较多目标粒子群优化算法更适合处理离散优化问

题,所以它的结果表现更优秀.

图 4 是两种算法解的周期相利用率分布. Pareto 蚁群轮询表最大利用率为 97%,较小的也在 70%以上,分布集中;而多目标粒子群优化算法对应表最大利用率为 100%,还有多个周期低于 65%,分布零散.对比发现,Pareto 蚁群算法构建的周期轮询表中各周期相波动较小,均匀度更好,利用率更接近平均值,这样的周期轮询表能够更好地均衡网络负荷,预防局部通信压力过大.



(a) 多目标粒子群优化算法周期相时间散点图



(b) Pareto 蚁群算法周期相时间散点图

图 4 Pareto 蚁群算法与多目标粒子群优化算法的周期相利用率比较

Fig. 4 Comparison of cycle phase utilization between P-AC and MPSO algorithms

文献[4]的设备信息数据如表 3 所示,式(4)中  $k=65\%$ ,利用文献[4]的蚁群算法得到的向量为(1 1 1 3 3 2 4 4 3 6 7 5 5 4 6 1 8 10 2 10).利用 Pareto 蚁群算法仿真生成

的 Pareto 沿如图 5 所示.根据式(19)计算排序,最终选取的解向量为(1 1 2 1 4 2 3 4 2 4 7 1 7 5 3 6 4 8 5 18).表 4 列出对应参数指标.

表 3 文献[4]的设备信息表  
Tab. 3 Device information list of Lit. [4]

| $i$ | $i_{mm}$ | $T_{ip}$ | $i$ | $i_{mm}$ | $T_{ip}$ | $i$ | $i_{mm}$ | $T_{ip}$ |
|-----|----------|----------|-----|----------|----------|-----|----------|----------|
| 1   | 89       | 1        | 8   | 89       | 4        | 15  | 89       | 8        |
| 2   | 121      | 2        | 9   | 265      | 8        | 16  | 89       | 8        |
| 3   | 89       | 2        | 10  | 265      | 8        | 17  | 265      | 16       |
| 4   | 169      | 4        | 11  | 169      | 8        | 18  | 169      | 16       |
| 5   | 169      | 4        | 12  | 121      | 8        | 19  | 89       | 16       |
| 6   | 121      | 4        | 13  | 100      | 8        | 20  | 265      | 32       |
| 7   | 100      | 4        | 14  | 100      | 8        |     |          |          |

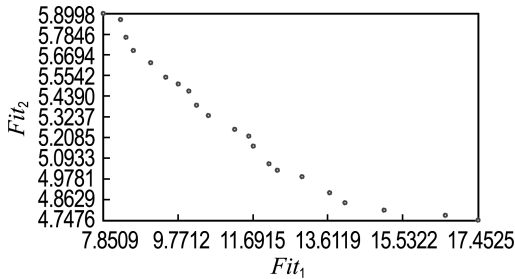


图 5 Pareto 蚁群算法基于表 3 产生的非劣解  
Fig. 5 Non-dominated solutions created by P-AC algorithm based on Tab. 3

表 4 两个解的性能指标  
Tab. 4 Performance indicators of the two solutions

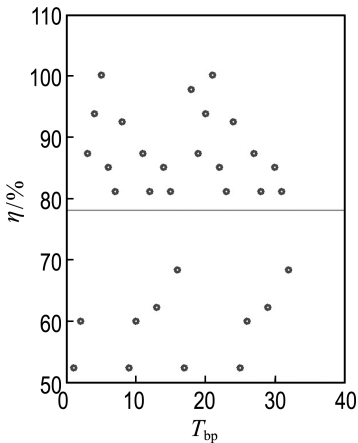
| 算法          | $Var$  | $T_{grad}$ | $T_{diff}$ | $Relative\_diff$ |
|-------------|--------|------------|------------|------------------|
| 基本蚁群算法      | 106.58 | 334.00     | 103.48     | 0.97             |
| Pareto 蚁群算法 | 57.89  | 265.00     | 70.72      | 1.22             |

由表 4 可得,Pareto 蚁群算法对应的标准差和  $T_{grad}$  分别为 57.89 和 265.00,明显小于基本蚁群算法的,充分证明 Pareto 蚁群算法能更好地保证轮询表的均匀度;Pareto 蚁群算法的  $Relative\_diff$  为 1.22,大于基本蚁群算法的 0.97,证明其能够更有效地错开长短周期,均衡网络负荷.

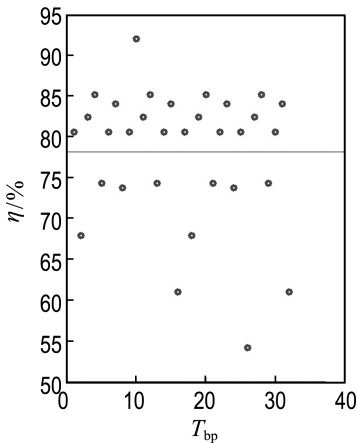
图 6 是两种算法解的周期相利用率分布. Pareto 蚁群算法对应轮询表的利用率只有一个超过 85%,利用率在 70%以下的仅有 5 个周期;基本蚁群算法轮询表的利用率跨度很大,最大已经达到 100%,利用率在 70%以下的很多,对比可知



Pareto 蚁群算法均衡网络负荷能力更强.



(a) 基本蚁群算法周期相时间散点图



(b) Pareto 蚁群算法周期相时间散点图

图 6 Pareto 蚁群算法与基本蚁群算法的周期相利用率比较

Fig. 6 Comparison of cycle phase utilization between P-AC and AC algorithms

5 结 语

在 IEC 61375-1 标准的基础上,构造出两个优化目标,这样既能优化均匀度,又能够保证将长短周期错开,全面提高轮询表质量.在此基础上建立模型并利用 Pareto 蚁群算法求解.比较证明,本文算法得到的解的性能比基本蚁群算法和多目标粒子群优化算法得到的解的性能更好,证明了利用本文算法构建 MVB 周期轮询表,更有助于 MVB 均衡网络负荷,提高网络处理偶发信息的能力,保证实时通信.

参考文献:

[1] 李 锐,李永宗,费巧玲,等. 一种多功能车辆总线周期扫描表优化设计方案[J]. 机车电传动, 2013(4):92-94.

LI Rui, LI Yong-zong, FEI Qiao-ling, *et al.* An optimization solution of the MVB periodic polling table [J]. **Electric Drive for Locomotives**, 2013(4): 92-94. (in Chinese)

[2] 蒋 瑾,王长林. 多功能车辆总线 MVB 周期扫描表配置分析[J]. 铁道机车车辆, 2011, **31**(3):34-36.

JIANG Jin, WANG Chang-lin. Analysis on periodic polling table configuration of multifunction vehicle bus MVB [J]. **Railway Locomotive & Car**, 2011, **31**(3):34-36. (in Chinese)

[3] 陈佳凯,韦 巍. 基于多目标粒子群优化的多功能车辆总线周期性扫描表的优化[J]. 铁道学报, 2012, **34**(11):60-66.

CHEN Jia-kai, WEI Wei. Optimization of the MVB period polling table based on multi-objective particle swarm optimization [J]. **Journal of the China Railway Society**, 2012, **34**(11):60-66. (in Chinese)

[4] 朱 俊,李 芳,王丽芳. 基于蚁群算法的多功能车辆周期扫描表的优化设计[J]. 铁道学报, 2013, **35**(7):57-62.

ZHU Jun, LI Fang, WANG Li-fang. Optimized design method of periodic list in multifunction vehicle bus based on the ant colony algorithm [J]. **Journal of the China Railway Society**, 2013, **35**(7): 57-62. (in Chinese)

[5] 王永翔,王立德. 多功能车辆总线周期扫描表的最优化设计[J]. 铁道学报, 2009, **31**(6):46-52.

WANG Yong-xiang, WANG Li-de. The optimization method of the MVB period polling table [J]. **Journal of the China Railway Society**, 2009, **31**(6):46-52. (in Chinese)

[6] 朱琴跃,谢维达,谭喜堂,等. MVB 周期信息的实时调度[J]. 计算机应用, 2007, **27**(12):3108-3111.

ZHU Qin-yue, XIE Wei-da, TAN Xi-tang, *et al.* Real-time scheduling of periodic messages for MVB [J]. **Computer Applications**, 2007, **27**(12):3108-3111. (in Chinese)

[7] Dorigo M, Gambardella L M. Ant colony system;a

cooperative learning approach to the traveling salesman problem [J]. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, 1997, 1(1):53-66.

[8] 李士勇,陈永强,李研. 蚁群算法及其应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2004:29-40.

LI Shi-yong, CHEN Yong-qiang, LI Yan. **Ant Colony Algorithms with Applications** [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004:29-40. (in Chinese)

[9] Doerner K F, Gutjahr W J, Hartl R F, *et al.* Pareto ant colony optimization with ILP preprocessing in multiobjective project portfolio selection [J]. **European Journal of Operational Research**, 2006, 171(3):830-841.

[10] Raquel C R, Naval P C Jr. An effective use of crowding distance in multiobjective particle swarm optimization [C] // **GECCO 2005 - Genetic and Evolutionary Computation Conference**. New York: Association for Computing Machinery, 2005:257-264.

## Optimization design of MVB period polling table based on Pareto ant colony algorithm

FAN Chao<sup>1</sup>, YU Yue<sup>1,2</sup>, GU Hong<sup>\*1</sup>

( 1. School of Control Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;  
2. CNR Dalian Electric Traction R&D Center Co. ,Ltd. , Dalian 116045, China )

**Abstract:** Good multifunction vehicle bus (MVB) period polling table contributes to balancing the network load and improving the ability of network processing sporadic messages, which can ensure the reliability of the real time communication. An effective polling table design method is proposed. The design of the MVB period polling table is abstracted into a discrete optimization problem. Constraints are obtained according to the IEC 61375-1 international standard and request of schedulability. The optimal objective consists of uniformity and adjacent basic period time interval. The solution is achieved by Pareto ant colony algorithm. In this algorithm, every objective has updated its own pheromone independently by rule of the ant colony system algorithm and the total pheromone is calculated by weighted summation of the two pheromones. The non-dominated solutions sets are maintained by the crowding distance method in this multi-objective problem. The experimental results show that the Pareto ant colony algorithm can perform better than the existing algorithms in uniformity and balancing the network load.

**Key words:** Pareto ant colony algorithm; multifunction vehicle bus (MVB); period polling table