

分布式系统 TTCAN 调度优化算法研究

叶彦斐, 刘之境, 刘 帅, 赵金玉

(淮海大学 能源与电气学院, 南京 211100)

摘要: 总线技术的发展给线缆测试仪带来了分布式、信息化、网络化的新需求, 且在分布式线缆测试仪工作过程中, 测试线路的数目增加也对总线数据通讯的稳定性和通讯效率提出了更高的要求; 针对分布式系统在线缆测试中的应用需要, 设计并优化了分布式线缆测试仪工作的 TTCAN 应用层协议和其系统矩阵; 对于分布式系统通信中的周期性消息形成的系统矩阵先后采用遗传算法、改进型差分进化算法进行优化, 对于其中的非周期性消息采用基于松弛度的动态优先级算法; 在 MATLAB 仿真环境中进行实验, 实验结果表明, 改进型差分算法比遗传算法能够更快、更稳定地计算出优化矩阵, 经调度优化后的 TTCAN 总线工作时数据传输效率有显著提高; 文章通过智能优化算法, 有效提高了系统总线的通讯效率和稳定性。

关键词: 时间触发的控制器局域网; 总线调度; 优化算法; 分布式系统

Research on TTCAN Scheduling Optimization Algorithm for Distributed Systems

YE Yanfei, LIU Zhijing, LIU Shuai, ZHAO Jinyu

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Development of bus technology brings new requirements of distribution, information and network to the cable tester, in the working process of the distributed cable tester, the increase of the test cable number also puts forward higher requirements on the stability and efficiency for the bus data communication. According to the application requirements of distributed system in cable testing, the TTCAN application layer protocol and its system matrix of distributed cable testing instrument are designed and optimized. The system matrix formed by periodic messages in distributed system communication is optimized by the genetic algorithm and improved differential evolution algorithm successively, and the dynamic priority algorithm based on relaxation degree is adopted for the non-periodic messages. Experiments in MATLAB simulation environment show that the improved difference algorithm can calculate the optimization matrix more quickly and stably than the genetic algorithm, and the data transmission efficiency of the TTCAN bus after scheduling optimization is significantly improved. The communication efficiency and stability of the system bus are improved effectively by the intelligent optimization algorithm.

Keywords: TTCAN; the bus schedule; optimization algorithm; distributed system

0 引言

CAN (controller area network) 总线作为应用最广泛的现场总线之一, 为分布式控制系统实现各节点之间实时、可靠的数据通讯提供了强有力的支持^[1]。随着总线技术的发展, 线缆测试仪也逐渐产生了分布式、信息化及网络化发展的新需求。在分布式线缆测试仪实际工作中, 数千条测试线路数据需要同时传输、通信, 其中不仅包括诸如通断检测状态、绝缘检测状态等需要优先处理的消息, 也包括主机设置、信息查询、节点自检等非周期性消息, 从而对总线的稳定性及通讯效率提出了更高的要求。因此, 需要设计或改进优化一种更高效、更可靠的基于 CAN 总线的系统层通讯协议, 来更好地满足分布式线缆测试仪的需求。

TTCAN (Time-Triggered CAN) 是一种以系统矩阵为核心, 基于时间触发的总线协议。论文采用 TTCAN 作为

分布式线缆测试仪中数据传输的应用层协议, 针对 TTCAN 的系统矩阵进行优化设计, 采用遗传算法、差分进化算法和动态优先级算法分别为线缆测试仪的周期性和非周期性消息调度策略进行设计及优化, 以实现提高系统稳定性及总线传输效率的目标。

1 TTCAN 的系统分析

TTCAN 协议的核心是其独有的系统矩阵, 其完整的传输周期被称为系统矩阵周期 MP (Matrix Period)^[2], 一个 MP 具有多个基本周期 BP (Basic Period)。单个基本周期 BP 由一个参考消息开始, 对应系统矩阵中的一行。分布式线缆测试仪的系统矩阵中会存在若干周期性或非周期性消息, 如图 1 所示。

若总线通信系统中存在 N 个周期性消息, 消息集表示为 $M \in \{M_1, M_2, \dots, M_{N-1}, M_N\}$, 则第 m 个消息 M_m 的传输时

收稿日期: 2021-09-14; 修回日期: 2021-10-19。

基金项目: 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(2021B76137); 南京市工业和信息化发展专项资金(人工智能产业地标)项目(20200578)。

作者简介: 叶彦斐(1973-), 男, 河南新乡人, 博士, 硕士生导师, 副教授, 主要从事信息融合、多传感器网络方向的研究。

引用格式: 叶彦斐, 刘之境, 刘 帅, 等. 分布式系统 TTCAN 调度优化算法研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(3): 173-178.



图 1 TTCAN 的系统矩阵周期

间为 t_m , 传输周期 T_m 。取所有消息传输时间的最大公约数为基本周期时间 T_{BP} , 所有消息传输周期的最小公倍数为系统周期时间 T_{MP} , 则系统矩阵的行数可表示为 $L = \frac{T_{MP}}{T_{BP}}$ 。

2 TTCAN 调度计划分析

2.1 TTCAN 消息分析

一般来说, 通讯系统中的消息被分为两种: 时间触发消息和事件触发消息, 这种分类隐藏了一个很重要的特征: 消息的真实时间需求。

在通信系统中, 按照任务的时延需求可以将消息分为 3 个种类^[3]: 硬实时消息、普通实时消息以及软实时消息, 而在分布式线缆测试仪中, 不同的消息种类对于时间延迟的要求也不同, 诸如线缆通断、绝缘以及振动测试结果, 必须及时从从站传输到主站, 属于优先级最高的硬实时消息, 必须安排在独占窗口中进行即时通讯。而诸如线缆测试启动、测试结束等按键指令, 为了保证操作的流畅度, 也应有较高的优先级。诸如各种设置、查询类消息属于普通实时消息, 虽然也需要及时处理, 但在测试过程中并不是特别重要, 所以可以安排至仲裁窗口或自由窗口中。主机自检、LED 自检等功能则划归为软实时消息, 仅需在机器空闲时进行即可, 不需要严格的响应时间要求。

对线缆测试仪的消息分析表明, 一些比较重要的消息也可能被分配到仲裁窗口中, 那么这类消息的通讯效率就会受到仲裁机制的影响, 仲裁窗口中的其它普通消息也需要减少传输延迟。综上, 扩大仲裁窗口的传输时间有利于整个系统性能的提高。论文的主要工作是保证硬实时消息及时传输的同时, 最大限度地提高仲裁窗口传输时间。

2.2 构建初始矩阵

PSA (标致雪铁龙集团) 消息集常用于基于现场总线的分布式系统的基准测试^[4], 论文选择 PSA 消息集模拟线缆测试中可能出现的消息通信情况, 以验证通信优化方法的可行性, 并增加了一些延时约束使其更符合实际情况。

如表 1 中所示的修改的 PSA 消息集可以模拟线缆测试过程中可能出现的周期性消息通讯情况, 共有 12 个硬实时消息需要进行处理, 每个消息所需要的传输时间各不相同, 并且由于同一条线缆的多项测试结果应在较短时间内完成传输, 所以一些消息之间会构成控制环路。为了保证线缆测试系统的时效性, 需要使所有消息的传输时间以及消息

间形成的控制环路都得到满足。

根据表 1 中的消息集, 可以得到矩阵的系统周期 T_{MP} 为 80 000 μs , 基本周期 T_{BP} 为 10 000 μs , 共存在 8 个基本周期^[5], 那么初始矩阵为 8 行; 按各消息周期时间计算得到在一个系统周期内总共需传输的消息数为 52, 至少需要 7 列进行消息集传递, 加上每行第一列参考消息和最后一列仲裁窗口, 初始矩阵选 9 列。用相对简单的装箱算法可以得到初始矩阵, 如图 2 所示。

表 1 PSA 消息集

序号	周期 / μs	传输时间 / μs	延时约束
1	10 000	1 040	无
2	10 000	656	与消息 7 组控制环路 1, 延迟 1 800
3	20 000	656	与消息 9 组成控制环路 2, 延迟 2 800
4	10 000	584	无
5	20 000	808	无
6	40 000	808	与消息 11 构成控制环路 3, 延迟 4 000
7	10 000	736	与消息 2 组成控制环路 1, 延迟 1 800
8	40 000	808	无
9	20 000	736	与消息 3 组成控制环路 2, 延迟 2 800
10	80 000	968	无
11	40 000	808	与消息 6 构成控制环路 3, 延迟 4 000
12	80 000	504	无

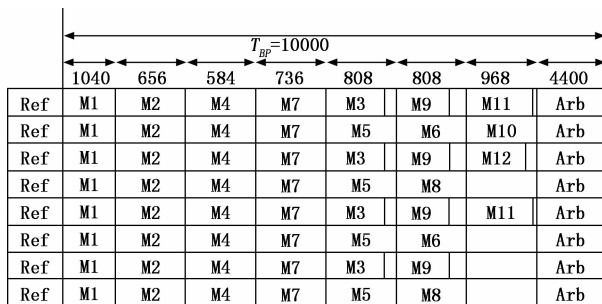


图 2 初始系统矩阵

矩阵单列须满足该列中所有消息的传输时间需求, 则单列列宽须大于或等于该列所有消息传输时间的最大值, 这导致矩阵的独占窗口中存在很多空白区域, 这些空白显然会造成总线传输效率的下降^[6]。论文通过设计、优化消息调度策略, 对系统矩阵中各个消息的合理安排, 尽量缩短整个独占窗口的通讯时间, 以扩大仲裁窗口、提高总线通讯效率。

3 消息调度优化算法

3.1 周期性消息优化

3.1.1 编码

首先对矩阵进行编码:

如图 3 (a) 所示, 将 M_1 至 M_7 所处的列数作为消息编码, 如 M_1 处在矩阵第 1 列, 那么 M_1 的编码就是 1, 可得到

图3(b)中 M_1 至 M_7 在矩阵中的编码为 [1, 1, 2, 3, 2, 3, 3]。

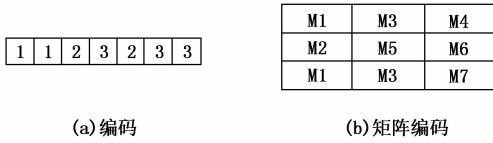


图3 矩阵编码

同理可得到图2初始系统矩阵中 M_1 至 M_{12} 编码为: [1, 2, 5, 3, 5, 6, 4, 6, 6, 7, 7, 7]。

3.1.2 优化目标

设 j 表示表1中各消息的序号, i 表示图2初始系统矩阵的列数。 x_{ij} 根据对应序号为 j 的消息在某列是否存在取值1或0, 若第 k 列存在, 则 x_{kj} 的取值1, 否则取0。

例如, $j=3$ 时, 消息3存在于第5列, 则 x_{53} 为1, x_{13} 、 x_{23} ... 为0。

由于同一个消息只会出现在矩阵的同一列出现, 且每行最多出现一次, 可得:

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1 \quad (1)$$

优化目标可分为两部分, 一部分表示独占窗口所占用时间的最小化, 另一部分表示总线的利用率。 C_j 表示消息 j 所需的传输时间, 通过 $C_j x_{ij}$ 表示消息 j 在某一列中所占用的传输时间因为必须保证任意一列的所有消息都可以正常传输, 所以矩阵列宽取该列所有消息的最大值。则最小化独占窗口时间可表示为:

$$F_0 = \min \sum_{i=1}^m \{ \max(C_j x_{ij}) \mid j=1,2,\dots,n \} \quad (2)$$

同时将总线的利用率表示为:

$$F_1 = \frac{\sum_{j=1}^n (C_j \times \frac{T_{MC}}{T_j})}{\sum_{i=1}^m \{ \max(C_j x_{ij}) \mid j=1,2,\dots,n \} \times \frac{T_{MC}}{T_{BC}}} \quad (3)$$

T_j 为消息 j 的传输周期, 将式(2)和式(3)叠加可得到目标函数, 以达到减小独占窗口传输时间的同时总线利用率最大化的效果。

3.1.3 条件约束

初始矩阵生成后, 矩阵的总行数是固定的, 必须对矩阵进行适当的约束, 确保整个矩阵每一列消息的数量不能超过该列的初始行数, 即单个消息 j 在矩阵中出现的次数必须小于等于矩阵的行数^[7], 可得如下的表达式:

$$\sum_{j=1}^n \frac{T_{MC}}{T_j} \times x_{ij} \leq \frac{T_{MC}}{T_{BC}} \quad (4)$$

设:

$$f_0 = \sum_{j=1}^n \frac{T_{MC}}{T_j} \times x_{ij} - \frac{T_{MC}}{T_{BC}} \quad (5)$$

同时总线须满足延时约束, 需要保证控制环路的延时在设定的范围内, 根据实际线缆测试情况, 若控制环路对应的两个消息的序号分别为 j_1, j_2 , 其周期都为 BC_T , 对应的列为 i_1, i_2 , 最大网络延迟可表示为:

$$\begin{cases} (i_2 - i_1) \times C_{\max} + C_{j_2} \leq T_d, i_2 > i_1 \\ (i_1 - i_2) \times C_{\max} + C_{j_1} \leq T_d, i_1 > i_2 \end{cases} \quad (6)$$

C_{\min} 和 C_{\max} 指的是表1消息集中最小和最大传输时间, C_{j_2} 为消息 j_2 的传输时间, T_d 为两消息之间的最大网络延迟, 设:

$$\begin{cases} f_1 = (i_2 - i_1) \times C_{\max} + C_{j_2} - T_d, i_2 > i_1 \\ f_2 = (i_1 - i_2) \times C_{\max} + C_{j_1} - T_d, i_1 < i_2 \end{cases} \quad (7)$$

3.1.4 目标函数

经过总线通讯调度优化, 将独占窗口占用时间最小化, 总线利用率最大化, 同时还需要满足矩阵行数约束和控制环路延迟约束。引入罚函数法对约束条件进行处理, 将不等式以罚函数的形式融入目标函数, 可以降低优化难度, 提高优化效率^[8]。将总线利用率取倒数并调整数量级以匹配独占窗口占用时间的数量级, 可得到目标函数表达式:

$$F = F_0 + \frac{10^4}{F_1} + p_0 + p_1 \quad (8)$$

其中:

$$p_0 = \begin{cases} a_0 \times f_0, & f_0 > 0 \\ 0, & f_0 \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

p_1 在 $i_2 > i_1$ 时为:

$$p_1 = \begin{cases} a_1 \times f_1, & f_1 > 0 \\ 0, & f_1 \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

在 $i_2 < i_1$ 时:

$$p_1 = \begin{cases} a_1 \times f_2, & f_2 > 0 \\ 0, & f_2 \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

a_0 和 a_1 为惩罚因子, 一般取较大的常数值。论文中 a_0 取值400, a_1 取值5000, 不符合约束条件的 F 值会因此数值过大而被算法淘汰。

3.2 差分进化优化算法改进

差分进化算法可以有效规避算法陷入局部循环的问题, 其主要用于求解连续域上的优化问题, 论文主要是整数优化, 属于离散优化, 所以可以借鉴0~1规划中对于差分进化算法的改进^[9]。

佳点集法是一种用更少的试验次数产生更加均匀的点序列、更逼近被积函数曲线^[10]的初始种群生成方法。该方法有效避免了随机生成初始种群的弊端, 且通过佳点集生成的种群精度与维数无关, 有效提高了函数的运算效率。因此论文采用佳点集法生成初始种群, 其定义为: 设 G_s 为 S 维欧氏空间中的单位立方体^[11], 如果 $r \in G_s$, 形为:

$$p_\theta(k) = \{r_1^{(\theta)} * k\}, \dots, \{r_i^{(\theta)} * k\}, \dots, \{r_s^{(\theta)} * k\}, \quad 1 \leq k \leq \theta \quad (12)$$

若偏差 $\varphi(\theta)$ 满足:

$$\varphi(\theta) = C(r, \epsilon) \theta^{-1+\epsilon} \quad (13)$$

其中: $C(r, \epsilon)$ 是只与 $r, \epsilon (\epsilon > 0)$ 有关的常数, 则称 $p_\theta(k)$ 为佳点集^[12], r 称为佳点。取:

$$r = \{2\cos(2\pi k/p)\}, 1 \leq k \leq s \quad (14)$$

p 为满足 $(p-s)/2 \geq s$ 的最小素数, 或:

$$r_k = \{\exp(k)\}, 1 \leq k \leq s \quad (15)$$

$\{a\}$ 表示 a 的小数部分。用任意给定的 θ 个点的函数值构成的任何加权和来近似计算函数在 S 维欧氏空间单位立方体 G_s 上的积分时, 取 θ 个佳点所得的误差是最小的^[13], 此时最小误差为:

$$\left| \int_{x \in G_s} f(x) dx - [\sum f(p_\theta(k))]/\theta \right| \quad (16)$$

其中: $p_\theta(k)$ 是一个包含有 θ 个点的佳点集。

其次, 为提高算法的局部搜索能力和全局搜索能力, 加快收敛速度, 采用自适应的变异因子及交叉因子。

变异是差分进化算法的重要步骤, 常用变异操作有随机变异法和最优变异法。

随机变异法如式 (17) 所示选取随机个体变异:

$$v_{\alpha, \beta}(t+1) = x_{\alpha, \beta}(t) + F(x_{p1, \beta}(t) - x_{p2, \beta}(t)) \quad (17)$$

$x_{\alpha, \beta}$ 表示第 α 个个体的第 β 个分量, $\alpha = 1, 2, \dots, M, \beta = 1, 2, \dots, n$ 。其中 $p1, p2$ 为 $[1, M]$ 中任意选取的互相不等的随机整数, M 为父代个体总数, F 为变异因子, t 为当前进化代数, $v_{\alpha, \beta}(t+1)$ 为暂量, 参与差分进化算法接下来的交叉、选择操作。

最优变异法如式 (18) 所示选取最优个体变异:

$$v_{\alpha, \beta}(t+1) = x_{best, \beta}(t) + F(x_{p1, \beta}(t) - x_{p2, \beta}(t)) \quad (18)$$

随机变异法全局搜索能力较强, 但收敛速度较慢; 最优变异法一定程度上提高了局部搜索能力, 但会使算法更容易陷入局部循环。

根据这两种变异的特点, 论文提出了渐进的变异策略, 如式 (19):

$$v_{\alpha, \beta}(t+1) = \lambda x_{\alpha, \beta}(t) + (1 - \lambda)x_{best, \beta}(t) + F(x_{p1, \beta}(t) - x_{p2, \beta}(t)) \quad (19)$$

其中: $\lambda \in [0, 1], \lambda = \frac{T-t}{T}$, 变异因子 $F = 1 - \frac{t}{t+T}$,

T 为最大进化代数, 随着算法代数的增长, λ 由 1 逐渐减小为 0, 实验表明, 算法在迭代中由随机变异逐渐转变为最优值变异, 保持了种群多样性的同时提高了算法的收敛速度和收敛精度。

交叉因子在基本差分进化算法中, 基本都设置为常数^[14], 进化初期, 种群多样性较强, 收敛速度较慢, 后期时种群多样性减少, 算法收敛速度快, 但容易陷入局部最优^[15]。所以论文用自适应的变化指数形式 $P_c = e^{-\frac{t}{T}}$ 来表示, 交叉因子随进化代数在 0.3 和 1 之间逐渐增大, 这样既可以保持良好的局部搜索能力, 又能提高算法的收敛速度和精度。

最后针对整数优化, 对变异和交叉后的个体取整并求绝对值, 以保证算法的解为整数。

3.3 非周期性消息优化

3.3.1 松弛度

LLF (Least Laxity First) 算法根据消息的松弛度 (紧急程度) 评估优先级, 松弛度越低的消息优先级越高。设 Δt_p 为有效生存期, 即消息从生成到截止的时间, 设消息从抢占总线到发送成功所需的时间为 t_i , 则消息的松弛度 $\Delta t_i = \Delta t_p - t_i$ 。总线内的各通讯消息因松弛度不同, 优先级会

被动态调整。

3.3.2 动态标识符

总线通过对标识符进行仲裁实现消息调度功能, 动态调度非周期性消息需要动态调整其标识符。对消息标识符 ID 的更改会影响其标记消息种类和功能以及作为各节点消息滤波凭据的作用。STM32 芯片内部自带 bxCAN 收发控制器。bxCAN 内置的消息过滤器组可屏蔽、位宽可变, 可以实现总线消息传输的硬件过滤功能, 节约了 CPU 开销的同时, 过滤器组可以选择性过滤标识符 ID 的部分位^[16]。LLF 算法对总线非周期性消息的调度通过该功能实现。

3.3.3 实际应用

由于独占窗口中存在一些空闲时间, 可将部分非周期性消息通过该窗口进行通讯。将周期性消息标识符最高位设置为 1, 非周期性消息最高位标识符设置为 0, 使其优先级低于周期性消息, 避免出现堵塞现象。将剩余标识符位中后 Y 位设定为固定部分用于消息过滤及功能识别, 其余位中可变部分设为动态部分, 可得系统中可调度的消息数量为 2^Y 。

设总线所有消息的最大有效生存期为 Δt_{pmax} , 动态部分数值大小为 $ID_{dynamic}$, 则由总线各节点完成计算:

$$ID_{dynamic} = \frac{2^Y}{\Delta t_{pmax}} \Delta t_L \quad (20)$$

为确保有效生存期最小的消息也能够实时发送, 应保持调整周期应小于所有消息传输时间的最小值对动态 ID 进行调节。该功能通过 STM32 芯片的定时器实现。

4 仿真结果分析

针对周期性消息, 在 MATLAB 中先使用遗传算法进行程序设计, 以便与改进型差分进化算法进行对比。

首先随机生成初始种群, 种群大小选择 2 000 并用式 (8) 所示目标函数计算个体适应度。接着采用轮盘赌选择法进行个体选择并进行交叉步骤, 交叉后代比例选择 0.8^[17]。然后进行复制、变异, 选择精英数目为 50, 并将适应度函数值偏差设为 e^{-100} ^[18], 迭代结果如图 4 所示。

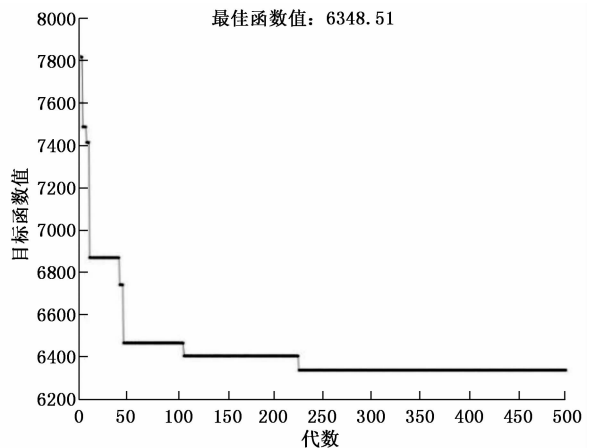


图 4 遗传算法优化结果图

得到的结果通过矩阵排列如图 5 所示。

	1040	656	584	736	656	808	968	4552
Ref	M1	M2	M4	M7	M3	M5	M6	Arb
Ref	M1	M2	M4	M7	M3	M9	M6	Arb
Ref	M1	M2	M4	M7	M3	M5	M8	Arb
Ref	M1	M2	M4	M7	M3	M9	M8	Arb
Ref	M1	M2	M4	M7	M12	M5	M10	Arb
Ref	M1	M2	M4	M7		M9	M11	Arb
Ref	M1	M2	M4	M7		M5	M11	Arb
Ref	M1	M2	M4	M7		M9		Arb

图 5 优化的系统矩阵

可以看到独占窗口的通讯时间由图 2 中的初始化矩阵中所示的 5 600 ms 降低到了 5 448 ms, 传输同样的消息量所需时间缩短了 2.7%, 起到了良好的优化效果。

接着使用上文所述的改进型差分算法对矩阵进行优化, 首先通过佳点集法生成初始种群, 接着采用式 (19) 所示渐变变异法对初始种群进行变异, 然后引入自适应的交叉指数 $p_c = e^{-T/T}$ 进行交叉操作, 最后通过式 (9) 计算适应度后进行选择操作, 通过迭代可以得到结果如图 6 所示。

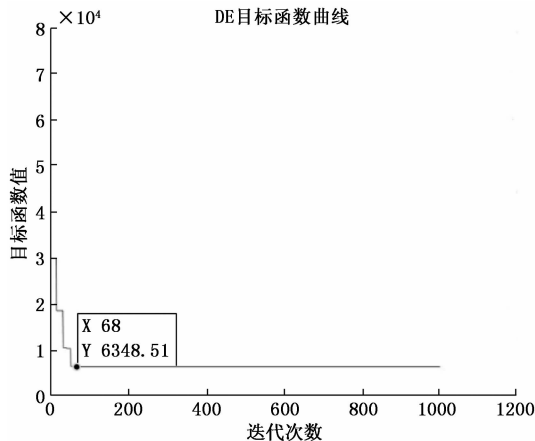


图 6 差分进化算法优化结果图

可以看到函数在迭代至 68 代时就已经收敛到了遗传算法计算出的最优值, 得到了相同的优化效果。通过比较遗传算法和差分进化算法的进化曲线, 发现改进型差分算法收敛速度较快。且在实际的多次实验中发现差分进化算法收敛稳定性高, 不容易陷入局部循环。遗传算法已经可以达到对周期消息矩阵进行优化的效果, 但是优化速度仍然不够理想, 且经常会出现陷入局部循环的现象, 而差分进化算法可以有效地规避这样的问题。

非周期消息通讯采用了抢占多任务的结构, 在满足任务实时调度的同时, 抢占多任务会带来 CPU 资源的浪费和内存总开销的增加^[19]。因此在保证调度质量的前提下, 任务切换的频繁程度可以用来评估系统的通信效率, 切换越频繁, 通信效率越低^[20]。通过 MATLAB 程序仿真比较相同时间内应用算法前后整个总线系统切换次数如图 7 所示。

图 7 显示, 在使用优化算法后系统的切换次数较使用优化算法前有明显降低, 证明了优化算法可以有效地减少

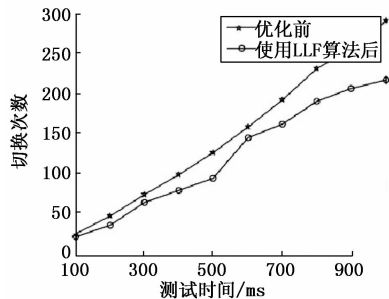


图 7 系统切换次数仿真图

系统抢占现象, 可以显著提高总线传输效率。

5 结束语

论文针对分布式线缆测试仪这一分布式系统的实际应用中可能出现的时滞问题, 分别对周期性消息和非周期性消息提出了不同的优化方案, 将周期性消息的调度问题转化为整数优化问题, 并通过改进型的差分进化算法进行了有效的优化, 得到了优化的系统矩阵, 提高了总线利用率; 对于非周期性偶发消息, 通过基于松弛度的动态优先级调度方案, 保证了偶发性消息的可靠传输。

参考文献:

- [1] 姚英, 田心宇. 基于小型无人飞行器的 CAN 总线冗余技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (6): 159-163.
- [2] QIAO X, WANG K F, SUN Y, et al. A genetic algorithms based optimization for TTCAN [C] //2007 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety. IEEE, 2007: 1-7.
- [3] JOHANSSON R. Time and event triggered communication scheduling for automotive applications [M]. Chalmers Lindholmen högsk., 2004.
- [4] 夏鹏, 朱琳, 叶杰, 等. 变频器监控系统 TTCAN 调度优化算法研究 [J]. 电气传动, 2015, 45 (3): 72-76.
- [5] 王欢. 电动汽车 TTCAN 总线技术研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院 (电工研究所), 2006.
- [6] 俞植馨, 李苏. 基于冗余 TTCAN 的核电站报警窗改进设计 [J]. 自动化仪表, 2020, 41 (3): 102-106.
- [7] SCHMIDT K, SCHMIDT E G. Systematic message schedule construction for time-triggered CAN [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56 (6): 3431-3441.
- [8] 俞俊霞, 赵波. 基于改进粒子群优化算法的最优潮流计算 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2005 (4): 83-88.
- [9] 宁桂英, 曹敦度, 周永权. 求解 0-1 规划问题的改进差分进化算法 [J]. 系统科学与数学, 2019, 39 (1): 120-132.
- [10] 张铃, 张钺. 佳点集遗传算法 [J]. 计算机学报, 2001 (9): 917-922.
- [11] 张强, 李盼池, 王梅. 自适应混合文化蜂群算法求解连续空间优化问题 [J]. 电子科技大学学报, 2017, 46 (2): 419-425.
- [12] 饶玉佳, 程家兴, 夏军, 等. 基于佳点集的多目标遗传算法 [J]. 计算机技术与发展, 2008, 18 (12): 67-69.

[13] 肖赤心. 高维优化进化算法及其应用研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2009.

[14] 宁桂英, 曹敦度, 周永权. 一种融合 Powell 搜索法的差分进化算法 [J]. 高等学校计算数学学报, 2017, 39 (3): 267 - 280.

[15] 蒋佳颖, 王万良, 徐新黎, 等. 基于量子遗传算法的染缸排产问题研究 [J]. 计算机工程, 2011, 37 (21): 159 - 161, 164.

[16] 魏磊, 戴宗贤. 一种新型时间触发 CAN 消息动态调度算法的设计及实现 [J]. 机电工程技术, 2020, 49 (4): 131 - 133.

[17] 郭建华, 刘初群, 刘翠. 基于遗传算法优化的城市标准循环工况构建 [J]. 科学技术与工程, 2017, 17 (15): 327 - 333.

[18] 赵丽娟, 范佳艺. 基于遗传算法的采煤机螺旋滚筒多目标优化设计 [J]. 中国机械工程, 2018, 29 (5): 591 - 596.

[19] SAKSENA M, WANG Y. Scalable real-time system design using preemption thresholds [C] //Proceedings 21st IEEE real-time systems symposium. IEEE, 2000: 25 - 34.

[20] 范凯胤, 王学奇, 谭小虎, 等. 基于累计价值的最小松弛度优先算法 [J]. 火力与指挥控制, 2017, 42 (12): 175 - 178.

(上接第 150 页)



图 13 目标识别显示

畅, 实时视频的延时在允许范围内, 无明显掉帧卡顿现象, 软件达到了各项设计要求。

4 结束语

本文设计了一种基于 Qt 框架的微型无人机载光电吊舱显控软件, 可通过串口实现光电传感器状态信息和控制指令的收发, 通过网口通信实现视频流的接收和解码, 通过 YOLOv3 算法模型实现对解码后图像中目标的实时检测和识别。该显控软件基于 Qt 和 C/C++ 语言, 具有良好的跨平台性, 分模块和多线程的架构设计, 使程序模块划分清晰, 易读性强。但是, 视频解码后, 在地面进行目标检测、识别, 进一步提高了实时视频的延时时间, 在之后的工作中需继续研究, 从而兼顾地面设备的高性能优势和实时视频的低延时需要。

参考文献:

[1] 吉书鹏. 机载光电载荷装备发展与关键技术 [J]. 航空兵器, 2017 (6): 3 - 12.

[2] 曹尹琦, 齐媛, 程刚, 等. 军用无人机小型光电吊舱的发展和关键技术 [J]. 飞航导弹, 2019 (3): 54 - 59.

[3] 梁海军, 崔挺, 马家军. 典型无人空袭兵器发展现状与趋势研究 [J]. 舰船电子工程, 2021, 41 (8): 9 - 13.

[4] 王晨宇, 王春阳. 光电吊舱的分数阶鲁棒控制器设计与仿真 [J]. 国外电子测量技术, 2021, 40 (4): 1015.

[5] 王鹏鹏. 光电吊舱隔振系统设计与试验研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016.

[6] 魏志强, 葛珊. 无人机载光电吊舱双路视频压缩存储系统设计与实现 [J]. 机械与电子, 2019, 37 (6): 32 - 34.

[7] 张孟陶. 直升机机载光电吊舱的发展现状及对策 [J]. 中国新通信, 2020, 22 (13): 234.

[8] SHEN C, CHEN N, TAN R, et al. Modeling and Stability Analysis of Coarse-Fine Composite Mechatronic System in UAV Multi-Gimbal Electro-Optical Pod [J]. Electronics, 2020, 9 (5): 769.

[9] LIU X, AI Y, TIAN B, et al. Robust and Fast Registration of Infrared and Visible Images for Electro-Optical Pod [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018: 1.

[10] 贾世海, 李沛玉, 胡守扬, 等. 基于 Qt 框架的 APV25 数据采集系统研究 [J]. 原子能科学技术, 2020, 54 (6): 1041 - 1046.

[11] 杜召辉, 刘安东. 基于 Qt 的移动机器人上位机软件设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (5): 107 - 111.

[12] 徐建明, 甘万正, 张文安, 等. 基于 QT 的工业机器人人机交互系统的设计 [J]. 高技术通讯, 2019, 29 (6): 576 - 584.

[13] 孙好婕, 赵利强, 郑惠泽, 等. 基于 Qt 的集成电路测试软件设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (5): 150 - 153.

[14] 马希超, 魏志强, 葛珊. 无人机载光电吊舱显控软件的设计与实现 [J]. 电视技术, 2021, 45 (1): 25 - 27, 33.

[15] 张科鑫, 是建荣, 高建平. 基于 Qt 的公安交通管理业务专用设备管理系统设计与实现 [J]. 道路与交通科学技术, 2021 (1): 35 - 38.

[16] 肖翔. 微喷射粘结快速成形系统控制软件的研究与实现 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.

[17] 贾杰, 刘智腾. 基于 Qt 的小型无人机地面站软件设计与实现 [J]. 计算机与现代化, 2015 (7): 94 - 97.

[18] 李杉格, 林静, 李杰. 一种机载光电吊舱显控软件设计与实现 [J]. 软件导刊, 2018, 17 (8): 153 - 156.

[19] 迟圣威, 纪明, 朱镭, 杨少康, 余黎明. 机载光电吊舱轻量化设计与评估方法研究 [C] //2017 年 (第三届) 中国航空科学技术大会论文集 (上册), 2017: 346 - 351.

[20] KIM J H, LEE D W, Cho K R, et al. Development of an electro-optical system for small UAV [J]. Aerospace Science & Technology, 2010, 14 (7): 505 - 511.

[21] 梁秦嘉, 刘怀, 陆飞. 基于改进 YOLOv3 模型的交通视频目标检测算法研究 [J]. 南京师范大学学报 (工程技术版), 2021, 21 (2): 47 - 53.