

导弹并行测试系统设计与任务调度仿真

谢化勇, 肖明清, 陈伟明, 王琳
(空军工程大学工程学院, 710038, 西安)

摘要: 针对传统串行测试时间长、效率低、成本高等问题, 利用并行性程序设计、仿真了导弹测试系统, 同时基于蚁群算法提出了并行测试系统任务调度算法. 并行测试系统的硬、软件包括可重构测试接口适配器、同步类以及仪器类组合方法等. 算法中设计了局部搜索函数、状态转移概率、基于 Tchebycheff 不等式的信息素更新和测试禁忌计算式, 配置了测试任务优先级, 从而获得了测试任务最优调度方案. 仿真结果表明, 所提算法的测试时间是串行测试的 30%~75%, 平均搜索时间和找到最优解的概率等较之 TaskScheduler-T 调度和遗传退火算法优越性更加显著.

关键词: 并行测试; 可重构测试接口适配器; 任务优先级; 最优调度; 蚁群算法

中图分类号: TP202 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)10-0022-05

Design and Task-Scheduling Emulation of Parallel Test System for Missiles

XIE Huayong, XIAO Mingqing, CHEN Weiming, WANG Lin
(The Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Because of long test time, low efficiency and high cost of serial test, a parallel automatic test system (PATS) for missiles is designed and emulated based on parallel program. A task scheduling algorithm for PATS is brought forward based on the ant colony algorithm. Reconfigurable test unit adapters (TUA) and the combination of synchronization classes and instrument classes are designed in the hardware and software architecture of the PATS. A local search function, the probability of state transfer, the pheromone updating based on Tchebycheff inequality and the taboo formula are designed in the scheduling algorithm. Test task priorities are configured so that the optimized task scheduling is achieved. Emulation results show that the parallel test time is reduced to 30%-75% of the serial test time. Moreover, the scheduling algorithm gains an advantage over the TaskScheduler-T and the genetic annealing algorithm on aspects of average search time, probability of finding the optimal solution and so on.

Keywords: parallel test; reconfigurable test unit adapter; task priority; scheduling optimization; ant colony algorithm

传统武器装备的串行测试时间长、效率低、成本高. 据统计, 在传统的串行测试系统中, 昂贵仪器资源的平均闲置时间占整个测试时间的 50% 以上^[1-3], 因而提高资源利用率和测试效率已经成为测试系统亟待解决的问题, 并行测试技术^[4-5]便应运而生.

并行测试技术对于提高武器装备战时的快速维

护和保障具有重要意义, 尤其是针对导弹的大型复杂测试系统, 其测试信号复杂多样, 测试项目繁多, 测试功能之间具有严格的时序性^[6], 因此显得尤为重要. 如何将先进的并行测试技术应用于导弹测试之中并解决相关的软、硬件设计难题, 正是本文研究的出发点.

1 导弹测试系统的硬、软件体系结构

并行测试系统(PATS)如图 1 所示,其中主要包括多核 CPU、并行测试适配器、 N 枚导弹、 M 项测试任务以及并行测试程序等。某型导弹的并行测试平台结构如图 2 所示,其中:VXI 仪器资源包括测量、开关、激励、数字、射频等子系统,可根据实际需要进行更换、增加或减少;可重构测试接口适配器(RTUA)可根据某型导弹的并行测试需要来设计(见图 3)。

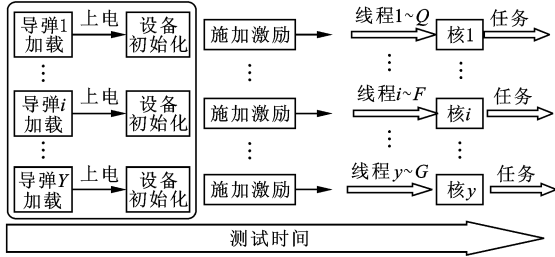


图 1 并行测试系统

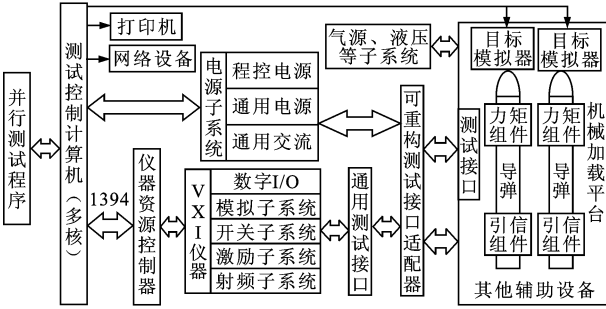


图 2 某型导弹的并行测试平台

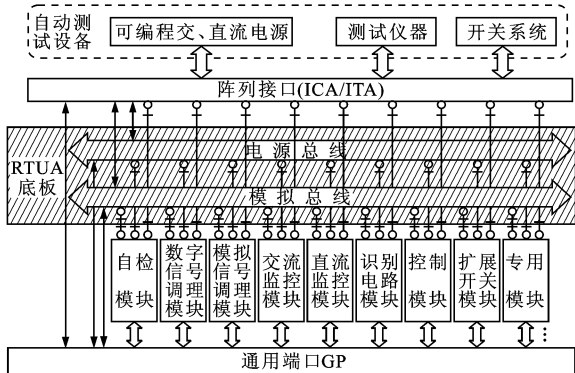


图 3 RTUA 硬件架构

RTUA 的控制模块采用了可编程片上系统(SOPC)技术,测控计算机使用 COM 组件对 RTUA 进行配置管理,通过调用不同的配置文件以实现重构^[7]。实际应用表明,采用 RTUA,测试适配器的成

本可降低 40% 左右,测试效率可提高 30% 以上,自动测试系统(ATS)的扩展性、灵活性大大提高。

PATS 软件的概念模型^[8]如图 4 所示,该模型刻画了用户登陆界面、软件执行命令的全过程。

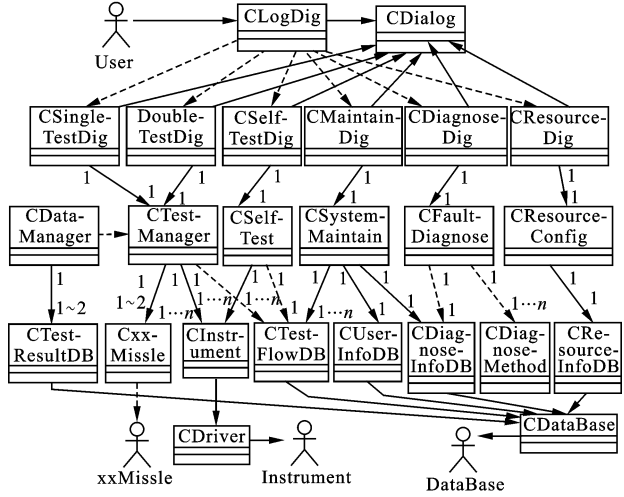


图 4 并行测试系统软件的概念模型

本文利用 VC++ 的 MFC 封装机制提供了 4 种用于线程之间同步的对象类,即临界区 CCritical-Section、互斥量 CMutex、信号量 CSemaphore、事件 CEvent,此外还包括对同步变量进行锁定和释放的控制类 CSingleLock 和 CMultilock^[9]。

2 任务调度算法

蚁群算法是一种随机型的优化方法,在解决离散组合优化问题方面性能良好^[10]。PATS 任务调度采用了改进的蚁群动态算法(AACA)。

2.1 局部搜索值 $\lambda_{ij}(i)$

局部搜索值(启发函数) $\lambda_{ij}(i)$ 表示测试任务 t_j 在第 r 步选择仪器资源 w_i 的期望程度^[11],即

$$\lambda_{ij}(i) = \begin{cases} \frac{\lambda_E}{\min(u(M'_i))} & t_j \in T_{w_i} \\ \left\{ \sum_{t_a \in T'_{w_i}} \left[\sum_{w_k^a \in M_{w_i}^a} \frac{\lambda_E}{u(M_k^a)} (|M_{w_i}^a| - 1)^{-1} \right] \right\} / |T'_{w_i}| & t_a = t_0 \end{cases}$$

式中: λ_E 表示期望程度的强度; T_{w_i} 为仪器资源 w_i 的可测任务集; $M_{w_i}^a$ 为需要占用资源 w_i 才可完成任务 t_a 测试的测试方案集; $M_{w_i}^a$ 为不需要资源 w_i 也可完成任务 t_a 测试的测试方案集; $u(M_k^a)$ 表示任务 t_a 采用测试方案 M_k^a 时的测试用时; $\min(u(M'_i))$ 为仪器资源 w_i 的测试任务 t_j 的最小测试用时; $|T'_{w_i}|$ 为

T'_{w_i} 的元素个数; t_0 为空任务。

2.2 状态转移概率 $\phi_{rj}^k(i, l)$

状态转移概率 $\phi_{rj}^k(i, l)$ 表示 l 时刻蚂蚁 k 在第 r 步执行任务 t_j 时选择仪器 w_i 的概率, 即

$$\phi_{rj}^k(i, l) = \begin{cases} \frac{[\tau_{rs}^n(i, l)]^\alpha [\lambda_{rj}(i, l)]^\beta}{\sum_{(t_s \in T_{w_i}) \cap (t_s \notin \Gamma_j)} [\tau_{rs}^n(i, l)]^\alpha [\lambda_{rs}(i, l)]^\beta} & (t_j \in T_{w_i}) \cap (t_j \notin \Gamma_j) \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

式中: Γ_j 为仪器禁忌表, 表示禁用了仪器 w_j ; $\tau_{rs}^n(i, l)$ 为第 r 步 l 时刻选择 w_i 执行任务 t_s 时, 路径 n 上的信息素量; α 为信息启发式因子; β 为期望的启发式因子。

2.3 信息素的定义与更新

当所有蚂蚁完成一次旅行后, 设置信息素全局更新规则, 即

$$\Delta\tau_{rj}(i) = \begin{cases} 0 & U = I_{\sup} = I_{\inf} \\ c_{r1} \frac{U_{\text{best}}}{U} + c_{r2} \frac{I_{\sup} - I_{\inf}}{(I_{\sup} - I_{\inf}) + (U - I_{\inf})} & \text{其他} \end{cases}$$

式中: $I_{\sup}$ 和 $I_{\inf}$ 是对 μ 近似置信区间边界的估计; c_{r1} 和 c_{r2} 是表示两项权重的参数^[12]. $I_{\sup}$ 设置为 U_{best} (U_{best} 为当前最好遍历时间), 且 $I_{\sup} = \mu + z(\nu/\omega^{1/2})$, $z = 1/(1-\nu)^{1/2}$, 而 ν 给出了被选择的置信水平. 该更新规则是利用 Tchebycheff 不等式得到的, Tchebycheff 不等式允许为服从任意分布的随机变量定义一个置信区间^[13].

U_{best}/U 表示当前最好遍历时间和本次遍历时间的比值, $(I_{\sup} - I_{\inf})/[(I_{\sup} - I_{\inf}) + (U - I_{\inf})]$ 可评估 U 与 $I_{\inf}$ 的差值与置信区间外延之间的关系, 后者考虑了最近一次遍历时间的稳定性. 需注意, 当 $U = I_{\sup} = I_{\inf}$ 时, $\Delta\tau_{rj}(i) = 0$. 系数信息素更新(一次循环中路径 (i, j) 上的信息素增量)策略为

$$\tau_{ij}(i, l + \Delta l) = (1 - \rho)\tau_{ij}(i, l) + \Delta\tau_{ij}(i)$$

式中: ρ 表示信息素挥发系数, $\rho \in [0, 1)$.

2.4 禁忌表与目标函数

仪器禁忌表为

$$\Gamma(\pi) = \begin{cases} 1 & \sum_{i=1}^n x_i = 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

其使得一次循环中蚂蚁的路径不会重复, 并保证各仪器在某一时刻只能作用于一个任务。

任务分配矩阵为 $\mathbf{X}$, 其元素 $X_{ij} = l$ 表示将任务

t_j 分配给仪器 w_i , $X_{ij} = 0$ 表示不将任务 t_j 分配给仪器 w_i .

任务和仪器分配的目标函数是使得分配后所用的测试时间最短, 即

$$U_{ij} = \min \sum_{k,a} u(M_k^a)$$

2.5 测试任务优先级

在导弹测试中, 某些信号严格遵循一定的时序关系, 所以在测试中必须考虑测试任务的优先级问题. 本文用 $(t_i, t_j) > (t_m, t_n)$ 表示任务 t_i, t_j 的优先级高于任务 t_m, t_n . 在算法运行过程中, 若任务已经执行, 则其标识位为 1, 否则为 0. 只有 t_i, t_j 的标识位均为 1 时, 才能执行 t_m, t_n .

AACA 流程^[11]如图 5 所示.

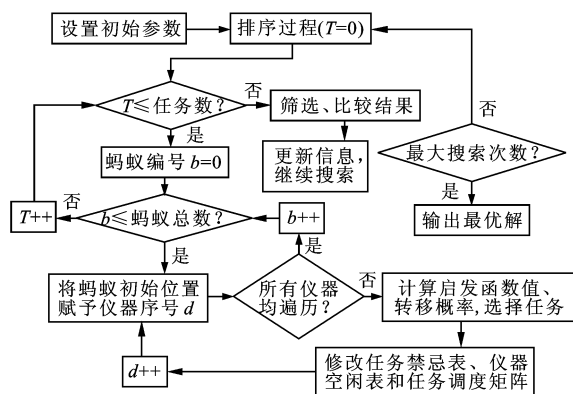


图5 AACA 流程

3 仿真实验

为了证明算法的实用性, 将 ACCA 与 Task-Scheduler-T 算法^[14]、遗传退火算法^[15] (GASA) 进行了性能比较。

3.1 并行测试任务需求描述

某型导弹并行测试系统的测试任务集 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_{22}\}$, 仪器资源集 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_8\}$. 各任务测试方案、资源占用情况以及单独测试用时如表 1 所示. 测试任务之间的时序约束关系为: $(t_1, t_2) > (t_4, t_9)$; $t_3 > t_9$; $t_5 > t_{11}$; $t_6 > (t_7, t_{10}, t_{11})$; $t_7 > (t_{13}, t_{20})$; $t_8 > (t_9, t_{10}, t_{15})$; $t_9 > t_{19}$; $t_{12} > t_{14}$; $t_{15} > t_{22}$.

测试方案 1, 是对 t_1 进行测试时需利用仪器资源 w_3, w_5 , 测试用时为 7 s; 测试方案 2, 需利用仪器资源 w_6 , 测试用时为 5 s; 测试方案 3, 需利用仪器资源 w_6, w_8 , 测试用时为 8 s. 其他测试情况类推。

3.2 实验设置

实验 1 对前 11 个任务 ($t_1 \sim t_{11}$) 进行测试; 实验

度,然后穷举得到最优解^[14].它每次都能找到最优解,但显然是相当费时的.当 PATS 的规模扩大到原来的 n 倍时,该算法随机生成量要扩大到原来的 $n!$ 倍,耗时急剧增加(实验 2 用时是实验 1 用时的 2.15 倍),这在一些并行测试过程中是不可接受的,并且 TaskScheduler-T 的平均搜索时间标准差也比较大.若减小随机穷举次数,时间开销会随之减小,但搜索准确性也随之降低.

两次试验中,AACA 与 GASA 在最优解概率上基本相当,但 AACA 的平均搜索时间只有 GASA 的 $2/3$ 左右,这对测试时间间隔有着严格要求的场合是非常关键的.可以看出,随着 ATS 规模的扩大,AACA 与 GASA 的最优解概率均有所降低,但 GASA 下降得比较明显,同时可见 AACA 的平均搜索时间标准差比 GASA 小得多.总之,AACA 在性能上全面超越了 TaskScheduler-T 和 GASA.

实验 1 的测试效率提升比

$$\hat{\lambda}_1 = \frac{u_{s1} - u_{p1}}{u_{s1}} = \left(\sum_{i=1}^{11} u_{i(\min)} - u_{p1} \right) / \sum_{i=1}^{11} u_{i(\min)} =$$

$$\left(\sum_{i=1}^{11} u_{i(\min)} - 35 \right) / (5 + 7 + 6 + 9 + 6 + 6 + 19 +$$

$$22 + 5 + 12 + 6) = 0.66$$

实验 2 的测试效率提升比

$$\hat{\lambda}_2 = \frac{u_{s2} - u_{p2}}{u_{s2}} = \left(\sum_{i=1}^{22} u_{i(\min)} - u_{p2} \right) /$$

$$\sum_{i=1}^{22} u_{i(\min)} = 0.743$$

其中 u_s 为传统串行测试最短时间, u_p 为采用 AACA 的并行测试最短时间.可见,采用并行测试能大大提高测试吞吐量,节省测试时间.

4 结 论

本文构建了某型导弹并行测试系统的软、硬件体系结构,设计了并行测试任务调度算法,并进行了仿真实验.结果显示,所构建的 ATS 切实可行,采用的任务调度算法性能优越,对于测试任务的分配效果较好,且测试时间较传统的大为减少,应用前景广阔.由于蚁群算法本身的局限性,任务分配有陷入局部最优解的可能,因而还需进一步增强 AACA 的全局搜索能力.

参考文献:

- [1] 程进军. 武器装备并行测试系统研究[D]. 西安: 空军工程大学工程学院, 2007.
- [2] 朱小平. 并行测试技术及其应用研究[D]. 西安: 空军工程大学工程学院, 2005.
- [3] 陈长龄, 田书林. 自动测试及接口技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [4] 肖明清, 朱小平, 夏锐. 并行测试技术综述 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2005, 6(3): 22-25.
XIAO Mingqing, ZHU Xiaoping, XIA Rui. Summary of parallel test technology [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2005, 6(3): 22-25.
- [5] TOAL R, HAYES R. Distributed and concurrent test environments on popular COTS platforms [C]// AU-TOTESTCON Proceedings. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000: 2031-2038.
- [6] 夏锐. 并行测试系统开发方法研究[D]. 西安: 空军工程大学工程学院, 2008.
- [7] 谢化勇. 某型导发架内外场通用测试系统研究[D]. 西安: 空军工程大学工程学院, 2008.
- [8] 陈伟明. 某型导弹并行测试系统研究与实现[D]. 西安: 空军工程大学工程学院, 2008.
- [9] 郝文化. Windows 多线程编程技术与实例 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [10] 寇英信, 王琳, 周中良. 多目标攻击条件下的作战任务分配模型研究 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(16): 4408-4411.
KOU Yingxin, WANG Lin, ZHOU Zhongliang. Study of combat task allocation model in multi-target attack condition [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(16): 4408-4411.
- [11] 付新华, 肖明清, 夏锐. 基于蚁群算法的并行测试任务调度 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(16): 4352-4356.
FU Xinhua, XIAO Mingqing, XIA Rui. Novel ant colony algorithm for parallel test task scheduling [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(16): 4352-4356.
- [12] DORIGO M, CARO G D, GAMBARDELLA L M. Ant algorithms for discrete optimization [J]. Artificial Life, 1999, 5(2): 137-172.
- [13] 张军, 胡晓敏, 罗旭耀. 蚁群优化 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [14] 胡瑜. 基于有色 Petri 网理论的并行自动测试系统建模研究 [D]. 西安: 电子科技大学测试计量技术及仪器系, 2003.
- [15] 夏锐, 肖明清, 程进军. 基于混合遗传退火算法的并行测试任务调度优化 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(15): 3564-3567.
XIA Rui, XIAO Mingqing, CHENG Jinjun. Optimization for the parallel test task scheduling based on hybrid GASA [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(15): 3564-3567.

(编辑 苗凌)