航空航天嵌入式计算机体系架构评估模型

韩 伟[1,2] 白晓颖[1] 谢建春[2]
(清华大学计算机科学与技术系 北京 100084)[1] (中航工业西安航空计算技术研究所 西安 710065)[2]

摘 要 典型的航空航天嵌入式计算机具有很多共同的特点,在体系架构的设计方面表现尤为突出。从飞机飞行控制计算机、导弹制导控制计算机和星载计算机3种典型嵌入式计算机入手,分析了航空航天行业嵌入式计算机的体系架构特点和共性技术,从模块化、网络、综合化、集约化、长寿命、COTS和开放性7个体系架构特征开展研究,归纳出通用架构、成本控制和适应发展3个评价维度,从而构建了针对这类嵌入式计算机的体系架构评估模型。对每个体系架构特征提出了基本的评判原则和具有可操作性的参考项,并给出了整机、评价维度和体系架构特征三者的分级之间的关系,以此便可对嵌入式计算机进行分级,以满足不同的评估需求。以两种先进的航空嵌入式计算机的评估为例,说明了评估的过程和方法。评估实例表明,该评估模型清晰、有效、实用。

关键词 评估模型,航空电子体系结构,航空航天,嵌入式计算机,模块化
中图法分类号 TP33 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.5.002

Aerospace Embedded Computer Architecture Evaluation Model

HAN Wei[1,2] BAI Xiao-ying[1] XIE Jian-chun[2]
(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)[1]
(Aeronautics Computing Technique Research Institute, Xi'an 710065, China)[2]

Abstract Typical aerospace embedded computers have many characters in common, especially in the aspect of the design of computer architecture. Three typical aerospace embedded computers were sampled and their characters of architecture and common technology were analyzed. These samples are flight control computer, guidance control computer and satellite borne computer. Seven characters of architecture were concluded. They are modular, network centric, integration, intensivism, longevity, application of commercial off the shelf(COTS) and system openness. As a result, 3 evaluation dimensions were proposed: common architecture, cost control and development oriented, which contribute to the final score of the system under test directly. All the architecture characters and evaluation dimensionalities mentioned above form the evaluation model for aerospace embedded computers. Each architecture character has a basic guideline and a practical reference value or design. Based on the relationship of the classification of the final evaluation result, the evaluation dimensions and the architecture characters, any aerospace embedded computer can be scored according to the evaluation model for various estimate requirements. The evaluating method and progress were illustrated through two kinds of advanced aerospace embedded computers' evaluation case. The cases indicate that the evaluation model is clear, effective and practical.

Keywords Evaluation model, Avionic architecture, Aerospace, Embedded computer, Modularization

1 引言

近年来,航空电子系统正从联合式航电系统向综合模块化航电(IMA)系统发展。其主要思想是充分利用微电子技术的快速发展,让大型航空电子系统的多个子系统通过统一的网络连接,共享由若干种标准模块构成的资源。这能够形成信息处理和消息交换的统一支撑平台,支持航电功能的高度综合,在功能性能、运行性能和可承受成本这3方面取得成效[1,2]。航天电子系统有着类似的发展趋势,通过信息共享、高速可靠网络、功能整合和模块分割等方式来适应未来探测器的发展方向,即向着高性能、高可靠、智能化、小型化的方向发展。同时,卫星、飞船这样的航天器,在轨运行时间长,受到宇宙空间的高温和高辐射等影响,尤其需要考虑搭载嵌入式计算机的可靠性问题[3]。

计算机体系架构的评估方法主要有模块化开放系统评估(模块化开放式系统过程 MOSA[4])、计算机系统参考架构

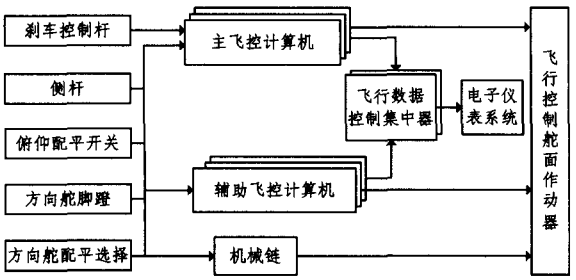
到稿日期:2014-06-22 返修日期:2014-10-02
韩 伟(1988—),硕士,助理工程师,主要研究方向为嵌入式计算机应用与测评;**白晓颖**(1973—),博士,副教授,主要研究方向为软件工程、软件测试;**谢建春**(1978—),博士,工程师,主要研究方向为计算机视觉等。

(通用开放式结构 GOA 模型[5]、ASAAC 结构模型等)、健康状态与可靠性评估等。但是这些方法要么缺乏对航空航天嵌入式计算机的针对性,要么过于强调计算机系统的某一方面(软件层次与接口、可靠性等),未能很好地整体把握这类计算机体系结构的特点。

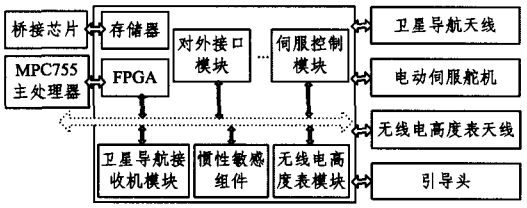
针对上述问题,设计一种航空航天嵌入式计算机体系架构评估模型。该评估模型通过分析航空航天典型嵌入式计算机的特点来建立评估指标,制定各架构指标评估方法,从而给出直观的评估结果。

2 典型航空航天嵌入式计算机体系架构及其共性技术

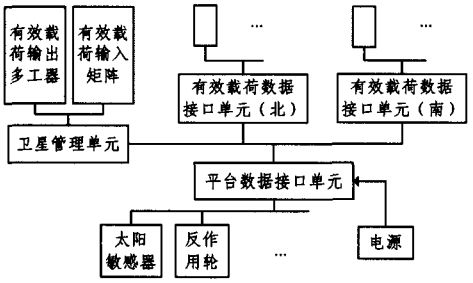
对于飞机飞行控制计算机、导弹制导控制计算机和星载计算机这 3 种典型的航空航天嵌入式计算机,首先对它们的体系架构进行分析,找出它们的共性技术。这些计算机的架构示意图如图 1 所示,主要架构特征如表 1 所列。



(a)A380 飞行控制计算机



(b)导弹制导控制系统



(c)SpaceBus4000 星载电子系统

图 1 典型航空航天嵌入式计算机体系架构

航空航天领域的嵌入式计算机因其承载平台特性、可靠性要求、功能复杂性等的不同而表现出多种多样的体系架构。尽管如此,它们之间仍然存在相通的技术特点。首先是模块化,或者说,以外场可更换模块(LRM)作为基本的硬件构件。这些模块往往不是完整的计算机,包括处理模块、I/O 模块和网络交换模块等形式。LRM 可以参加系统运行,也可以在其他 LRM 工作的同时脱离系统进行诊断,甚至可以下电更换 LRM 再恢复参与系统工作。通过诊断问题模块和替换模块的方法使计算机系统的可维护性得到提高。其次是以数据网络为中心。网络历来是计算机系统的基础设施,目前发展成高速确定的网络有 AFDX、光纤通道(FC)、Space Wire 总线和 TTE 总线等。再次是综合化,加强信息共享程度,系统(模块)实现了原来多个系统(模块)的功能。

表 1 架构特征

典型行业嵌入式计算机	架构特征	说明
空客 A380 飞控计算机[6]	模块化	主副飞控计算机都分成命令通道、监控通道、分配器和比较器等模块。
	功能综合	除了完成飞控任务以外,综合了自动飞行和飞行导引功能。
	开放接口	飞控计算机具有 AFDX 接口,实现软件下载、告警数据通信和部分系统之间的通信等功能。
	非相似余度设计	主飞控系统包含 3 台主飞控计算机和 3 台辅助飞控计算机。每台计算机由两个通道组成,采用不同的生产厂商、处理器和编程语言。
某导弹制导控制系统[7]	模块化	按电源模块、处理器模块、总线通讯模块、A/D 模块、伺服控制模块等进行分解,形成集成式模块化功能插件板。
	集成设计	采取硬件资源统筹规划,将各弹载子系统中的电子设备进行集成设计。
	小型化	合并功能模块,模块化功能插件板和惯性敏感组件集成到一个机箱内,系统结构紧凑,体积小。
SpaceBus4000 星载电子系统[8]	模块化	卫星管理单元(SMU)和 3 个数据接口单元都采用了模块化的设计思想。
	以网络为中心	数据总线网络(DBN)连接了 SMU、平台设备和有效载荷设备。
	余度设计	SMU 的各个模块采取热备份或冷备份。DBN 可以管理 6 条冗余 RS485 总线。

飞行器载体很大程度上决定了嵌入式计算机的架构设计,上述 3 种嵌入式计算机都涉及飞行控制,但是它们之间的差异显著。对于使用时间和频度有限的载体(如导弹),嵌入式计算机需要着重控制生产成本,表现为集约化设计,尽量合并相同的功能,使机体紧凑。对于使用时间长或者使用次数多的载体(如飞机),嵌入式计算机更强调可靠性和可维护性,往往用到余度设计的方法来保证系统有很长的使用寿命。而这两种努力方向都可以看作是对嵌入式计算机全寿命周期内的成本控制。

除了上述的模块化等技术特点外,典型航空航天嵌入式计算机在架构方面的共性技术还有:

- 采用商用货架产品(COTS)。元器件、处理器、存储器等采用 COTS,有效地降低生产成本。应用 COTS 技术和组件有着诸多优势,如减少专用器件、组件或模块、软件数量,兼容性好,技术先进,技术支持良好等[9]。
- 遵循开放性标准。遵循开放的接口规范、总线协议等,便于系统的扩展、升级或者功能重构。借助开放性的标准,系统设计者能够方便地在多个厂商、多种产品渠道中选择产品进行系统集成。

3 评估建模

根据航空航天嵌入式计算机架构方面的共同特点,从总体架构、成本控制和适应发展 3 个方面建立评估模型,如图 2 所示。模块化、以网络为中心和综合化是一般性的架构设计概念,并不仅限于嵌入式计算机,因此将它们归于"通用架构"

一类。集约化设计、依赖可靠性和可维护性的长寿命设计反映了成本控制的两种思路。航空航天嵌入式计算机的其他特征归入“适应发展”类，使用 COTS 既降低成本又保证持续的货源供应，遵循开放性标准有利于系统的扩展。

嵌入式计算体系架构评估模型(求和)	通用架构(取最小值)	模块化	0～3 级
		以网络为中心	0～3 级
		综合化	0～3 级
	成本控制(取最大值)	集约化	0～3 级
		长寿命	0～3 级
	适应发展(取平均值)	COTS 应用	0～2 级
		开放性	0～2 级

图 2　架构评估模型

3.1　通用架构

通用架构主要表现为模块化和以网络为中心这两方面，两方面中任何一个做得不足都有悖于通用架构。模块化关注于是否将复杂系统划分为可管理的模块，以及模块的安全机制和可维修性。以网络为中心表现为多个计算机(模块)构成互联、互通和共享的信息系统，将物理上分布的差异的计算资源连为一体，降低维护成本，便于系统扩展。这里要求网络有良好的连通性、确定性、延展性和统一性。新一代航空航天总线技术有光纤通道、AFDX、Space Wire、TTP 和 TTE 等。综合化主要表现为资源共享和功能综合，达到控制复杂系统的规模的目的。对于通用体系架构，要支持综合化的技术特征，就需要在网络层和中间件层提供有效的支持。嵌入式系统的综合化是指在系统设计方面，采用标准化的方法通过总线互联将各模块的信息进行综合，实现信息共享，并在此基础上结合其他扩展功能，以达到数据统一、减少数据冗余度、降低数据间的不一致性的目的。该评价维度的分级原则和参考如表 2 所列。

表 2　通用架构评价维度

架构特征	等级	评判原则	参考项
模块化[10]	0	没有划分模块或者仅有少数几个模块	模块数目不超过 2
	1	适当的模块划分	有电源管理模块、数据处理模块和接口模块
	2	适当的模块划分和良好的模块独立性	数据处理功能进一步划分模块，模块可以独立开发、测试、验证和维护
	3	便于维修和排除故障	模块具有故障检测和隔离机制
以网络为中心	0	网络连通性差，共享信息少	
	1	基本的网络互连，共享信息较多，低速的数据交换，良好的确定性	数据交换速率在 10Mb/s 以下[11]
	2	高度的网络互连，共享信息丰富，高速的数据交换，良好的确定性和延展性	数据交换速率在 10Mb/s 以上
	3	统一的高速的网络互连，具有系统级互联的统一高速网络，遵循开放的网络标准	某种高速网络将系统 80%以上的数据采集、处理、显示部件相连
综合化	0	资源共享性差，功能单一	
	1	设计公用模块，资源共享性好，综合多种功能	将通用数据处理和网络交换作为公用模块
	2	可靠的功能综合，保证功能综合的同时通过隔离机制等方法避免功能之间的相互影响	以分区操作系统实现隔离机制
	3	可靠灵活的功能综合，在可靠的功能综合基础上，实现统一的实时中间件层屏蔽计算机硬件、操作系统和网络等的差异，支持系统升级	主要功能模块具有统一的实时中间件

3.2　成本控制

成本控制评价维度包括集约化和长寿命两种互相矛盾的思路，应用场合决定具体采取哪一种成本控制方式。集约化强调较少的代价实现计算机系统，缩短生产周期，减小体积、重量和功耗。长寿命主张提高可靠性和可维护性两个方面。相关评价原则和参考如表 3 所列。

表 3　成本控制评价维度

架构特征	等级	评判原则	参考项
集约化	0	系统未做或仅做了少量的精简设计	
	1	减少冗余器件，保证基本可靠性的前提下缩减性能余度	冗余器件不超过 8%
	2	小型化，对相近的系统在功能和结构上进行一体化设计，机体采取紧凑型布局	子系统之间功能和结构差异明显
	3	在小型化基础上，采用其他手段进一步控制成本	采用了 COTS、软件重用等手段进一步控制成本
长寿命[12]	0	系统的可靠性和可维护性差	
	1	系统具有很高的可靠性，优选的元器件(良好的系统软件安全机制)	采用高质量的元器件，采用降额设计技术
	2	系统具有很高的可靠性和可维护性，余度容错，(良好的系统软件安全机制)易于维修	维修时易于检测故障和替换故障模块
	3	系统具有很高的可靠性、可维护性和后续开发保障，余度容错，(良好的系统软件安全机制)易于维修，开发有保障	成熟的开发方法与支持开发的工具链

3.3　适应发展

适应发展评价维度由 COTS 应用和开放性两方面组成。这些架构特征是可选的，依赖于通用架构，为适应新的需求、升级换代而准备。使用 COTS 研制和开发的设备具有如下特点：符合技术发展潮流；减少专用硬件、软件的研制开发，降低科研成本；采用通用的、开放的技术标准，兼容性好；技术支持良好，产品升级与更新换代方便；可以直接商业采购，供货渠道有保障等。开放性在硬件上表现为互连、互通和互操作，在软件上表现为系统采用分层设计。相关评价原则及参考如表 4 所列。

表 4　适应发展评价维度

架构特征	等级	评判原则	参考项
COTS 应用[13,14]	0	COTS 应用比例很低	COTS 应用比例不足 20%
	1	COTS 应用比例中等	COTS 应用比例在 20%～60%
	2	COTS 应用比例很高	COTS 应用比例在 60%以上
开放性	0	遵循少量的开放标准	
	1	良好的硬件开放性	遵循开放的数据总线标准和封装与接口标准
	2	良好的软硬件开放性	遵循开放的数据总线标准、封装与接口标准和应用软件接口标准

4　体系架构评估实例

在美国的“宝石柱”和“宝石台”计划的推动下，以综合化航空电子系统(IMA)为代表的航空电子技术取得了长足的发展。这里以 F-22 战斗机的共用综合处理机(CIP)和 F-35 战斗机的核心综合处理机(ICP)为评估对象，来说明本文的体系架构评估方法。

在通用架构方面，CIP 稍逊于 ICP。CIP 由 12 种模块 8 种网络组成，机箱内采用 PI 总线实现模块间的通讯，采用大容量存储器(GBM)作为模块的程序和数据存取的载体，采用专门的接口模块对外实现点到点光纤链路、1553B 总线及视频交连，集成了雷达、电子战和 CNI(通信、导航和识别)处理等大量功能[15]；ICP 由 7 种模块 4 种网络组成，采用光纤总线(FC)实现模块间通讯，通过 Switch 模块进行数据的交换，功能上与 CIP 大体相当[16]。相比之下，ICP 系统结构的复杂性低，网络交换性能更好。

成本控制方面，CIP 和 ICP 都采用长寿命的设计方式。一个 CIP/ICP 机箱用于备份，采用现场可更换模块(LRM)技术，计算信道冗余，可靠的容错和故障恢复；不同安全/密级的应用软件区别对待，软件的开发难度较低。

适应发展方面，CIP 和 ICP 都很优秀。二者结构都是开放的、可扩展的，支持雷达、电子战、CNI、任务软件和控制以及显示器处理需求。CIP 的系统软件包括航空电子操作系统(AOS)和航空电子系统管理器(ASM)，前者提供操作系统服务，支持多级保密执行环境，后者负责系统控制、模块管理和文件服务，应用程序用 Ada 编写；ICP 的系统软件包括 Integrity 操作系统和实时中间件，支持多安全级别和系统升级，应用程序采用 C＋＋语言编写。CIP 和 ICP 大量采用商用技术，处理器和存储器等一般都是 COTS 产品。

对 CIP 和 ICP 的评估结果和分级理由如表 5 所列。

表 5　评估结果和分级理由

	CIP	ICP
模块化	3 级。模块划分合理，具有良好的模块独立性和容错重构能力，易于诊断和维修。	3 级。模块划分合理，具有良好的模块独立性和容错重构能力，易于诊断和维修。
以网络为中心	2 级。PI、高速数据总线和光纤发射-接收总线等实现系统内外通讯，速度 50Mb/s～400Mb/s。	3 级。通过统一网络 FC 和网络开关模块，ICP 内资源高度共享；速度 2GB/s，确定延迟。
综合化	2 级。综合雷达、电子战和 CNI 处理等功能。双数据处理单元、大容量存储器等作为共享模块；AOS 和 ASM 支持上述功能综合。	3 级。综合处理任务雷达、电子战等多种任务；通用处理模块和网络开关模块作为共享模块；Integrity 操作系统和 CORBA 中间件对上述功能综合提供了很好的支持
长寿命	3 级。3 个机箱一个备份，LRM，冗余计算管道；测试与维护(TM)总线；多级保密执行环境，软件的开发难度较低。	3 级。双 ICP 设计，LRM，FC 和 1394B 冗余信道；不同安全级别的应用在不同的分区，软件的开发难度较低
COTS 应用	2 级。大量采用商用技术，处理器(Intel)和存储器等一般 COTS 产品。	2 级。大量采用商用技术，处理器(PowerPC)和存储器等一般 COTS 产品。
开放性	2 级。模块主要接口为光纤接口和 PI 总线接口，接口标准公开；AOS 在软件分层和 API 开发度方面表现良好；COTS 广泛被采用。	2 级。模块主要接口为光纤接口和 1394 总线接口，接口标准公开；Integrity 操作系统在软件分层设计和 API 开放度方面表现良好；COTS 广泛被采用。
评价维度及最终分级	通用架构为 2 级。成本控制为 3 级。适应发展为 2 级。总体为 7 级。	通用架构为 3 级。成本控制为 2 级。适应发展为 2 级。总体为 8 级。

综合模块化设计的计算机系统有效地解决了系统综合问题，减小了系统的体积并提高了可维修性，因而是航空航天嵌入式计算机体系架构发展的一个重要趋势。CIP 和 ICP 是四代机航空电子系统发展史上具有里程碑意义的优秀产品，它们相差约 20 年，而其综合模块化、开放式和长寿命等设计特点都十分显著。通过对二者的体系架构进行评估，可以更好地理解和把握这些架构特点，还能从中看出航空电子的发展脉络。

结束语　对于航空航天嵌入式计算机，设计和生产的标准化程度逐渐提高，体系架构方面表现出越来越多的共同点。本文总结了先进的航空航天内嵌入式计算机的特征，建立体系架构评估模型，对 ICP 架构进行评估。评估过程和结果表明，该体系架构评估模型是有效而实用的。期望本文的评估模型能为嵌入式计算机的设计者和采购者提供一定的参考。下一步将考虑嵌入式计算机的差异性需求，提炼出平衡性设计等方面的评价指标和评价方法。

参 考 文 献

[1]　张凤鸣，褚文奎，樊晓光，等. 综合模块化航空电子体系结构研究[J]. 电光与控制，2009，16(9)：47-51

[2]　崔西宁，胡林平，叶宏，等. 综合化航空电子系统软件接口研究[J]. 计算机科学，2011，38(2)：122-126

[3]　蒋彭龙. 片上系统技术在航天领域的发展和应用[J]. 导弹与航天运载技术，2010，5：17-19

[4]　Jakovijevic M. Modular Open System Approach(Mosa) and Ttp-Based Platforms for Aerospace Control Systems[C]// Proceeding of 25th Digital Avionics Systems Conference. 2006：1-6

[5]　黄永葵，吴建民，谷涛，等. SAE AS4893《通用开放式结构(GOA)框架》评析[J]. 航空计算技术，2007，38(1)：40-46

[6]　牛文生. 机载计算机技术[M]. 西安：航空工业出版社，2013

[7]　谢燕武. 飞航导弹一体化制导控制系统[J]. 兵工自动化，2012，31(11)：38-40

(下转第 18 页)

了，IICA 找到了问题的最优值，免疫算法没有找到，但是均值的差别并不是特别的大。当原子数目增加到 38 时，IICA 找到的最优值已经非常明显地优于 ICA 和其他两种免疫算法 PM-IA、LM-IA，所以 IICA 适合解决高维多峰优化问题，在一定程度上能避免算法陷入局部最优。

图 10 为原子数目为 2 个、3 个、10 个、38 个时兰纳-琼斯势能平均收敛图和解的质量图。从该图可以发现，对于低维和高维的实际优化问题，无论是算法的收敛速度还是解的质量，IICA 都明显优于 ICA，从而得出，基本贸易的帝国竞争算法对解决高维的实际问题是非常有效的。

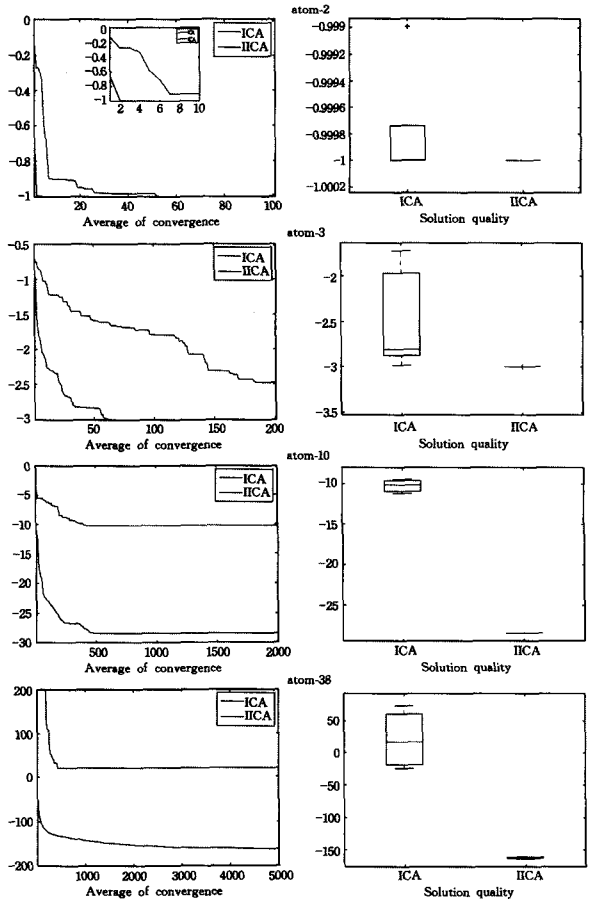


图 10　兰纳-琼斯势能平均收敛图和解的质量

结束语　本文提出了一种基于贸易的帝国竞争算法。基于贸易顺逆差的进出口机制的引入，促进了各国之间有效信息的交互，同时打破了原有 ICA 算法中帝国主义的进化仅靠殖民地与帝国主义位置互换的规则，加快了算法的收敛速度，同时对于多峰函数来说，该机制更有效地避免了算法陷入局部最优。将其分别应用在低维和高维的兰纳-琼斯势实际问题上，其收敛速度和解的质量都有了明显的改善，从而验证了新提出的算法解决高维实际问题的有效性。对于更高维的实际优化问题，其优化问题的时间也是一个考虑的因素。下一步将致力于提高算法的时间利用率，并将改进的算法应用在其他的实际优化问题、旅行商问题和调度问题等一些离散问题的研究上。

参 考 文 献

[1] Behnamian J, Zandieh M. A discrete colonial competitive algorithm for hybrid flowshop scheduling to minimize earliness and quadratic tardiness penalties[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(12): 14490-14498

[2] Coelho L D S, Afonso L D, Alotto P. A modified imperialist competitive algorithm for optimization in electromagnetics[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(2): 579-582

[3] Mousavi Rad S J, Akhlaghian Tab F, Mollazade K. Application of Imperialist Competitive Algorithm for Feature Selection: A Case Study on Bulk Rice Classification[J]. International Journal of Computer Applications, 2012, 40: 41-48

[4] Bahrami H, Faez K, Abdechiri M. Imperialist competitive algorithm using chaos theory for optimization (CICA)[C]// Proceeding of the 2010 12th International Conference on Computer Modelling and Simulation (UKSim). Cambridge, 2010, 5: 98-103

[5] Lin, J L, Cho C W, Chuan H C. Imperialist competitive algorithms with perturbed moves for global optimization[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 284: 3135-3139

[6] Lin J L, Tsai Y H, Yu C Y, et al. Interaction Enhanced Imperialist Competitive Algorithms[J]. Algorithms, 2012, 5(4): 433-448

[7] Atashpaz-Gargari E, Lucas C. Imperialist competitive algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition[C]// 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation. 2007, 7: 4661-4667

（上接第 13 页）

[8] 冶元菲，吕楠，黄献龙，等. 先进电子信息系统在通信卫星平台中的应用[J]. 空间控制技术与应用，2011，37(1)：45-49

[9] 林长苓，周军连，聂国健. COTS 元器件在舰载装备中的可靠性风险分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验，2006，24(6)：37-41

[10] 崔昆涛，孙文力，孙文强. 模块化开放式系统架构设计、原理研究[J]. 信息系统工程，2013(5)：35-37

[11] 刘士全，隽扬，蔡洁明，等. 1553B 总线应用发展研究[J]. 电子与封装，2013，13(12)：11-15

[12] 孔德岐，李亚辉，郭鹏. 高可靠嵌入式计算机系统的发展[J]. 通信学报，2013，34(Z1)：170-175

[13] 邢克飞，何伟，杨俊. COTS 器件的空间应用技术研究[J]. 计算机测量与控制，2011，19(7)：1741-1745

[14] 王猛，宁滨，马连川. 基于 COTS 的安全计算机系统[J]. 铁道通信信号，2007，43(3)：56-58

[15] 罗巧云. 美军 F-22 的先进航空电子系统[J]. 电讯技术，2006，46(6)：7-12

[16] Luo Rui, LI Guo-zhu. Development of the F-35 Avionics System [J]. Ship Electronic Engineering, 2012, 32(8): 21-23