

引用格式:高杨,李浩若,王彤,等.时间触发网络的重构策略研究与实现[J].电光与控制,2020,27(4):44-48,72. GAO Y, LI H R, WANG T, et al. Research and implementation of reconfiguration strategies in time-triggered network[J]. Electronics Optics & Control, 2020, 27(4):44-48, 72.

## 时间触发网络的重构策略研究与实现

高杨, 李浩若, 王彤, 何锋  
(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 航空电子系统规模和复杂度的迅速增长,对时间触发网络的容错能力和可靠性提出了更高的要求。重构作为故障处理的一项重要技术,可以提高系统的容错能力和可靠性,延长系统的生命周期。在基于应用迁移的重构策略研究基础上,根据航空电子时间触发网络中不同资源约束条件,针对端系统模块级故障导致其上驻留应用失效的问题,提出了迁移、抢占、降级3种重构方式;针对时间触发网络,建立应用和消息的关联,基于可满足性模理论提出了一种支持端系统模块重构的消息调度算法;最后,通过仿真实验,从实时性角度验证了重构算法的合理性。

**关键词:** 时间触发通信; 重构策略; 资源约束; 消息调度

中图分类号: V243 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2020.04.009

## Research and Implementation of Reconfiguration Strategies in Time-Triggered Network

GAO Yang, LI Haoruo, WANG Tong, HE Feng

(School of Electrical and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** In recent years, rapid expansion of scale and increase of complexity of the avionics system bring higher demands on fault tolerance and reliability of Time-Triggered (TT) network. As an important technology of fault management, reconfiguration can improve fault tolerance and reliability of a specific system, and prolong its lifespan as well. In this paper, based on the reconfiguration strategy of application migration and according to different resource constraints in the avionics time-triggered network, three kinds of reconfiguration methods are proposed, namely, migration, preemption and degradation, so as to tackle the problem of application failure of the end system due to modular failure. What's more, the relation between applications and messages in TT network is established, and a message scheduling algorithm based on Satisfiability Modulo Theories (SMT) is proposed, which can support fault recovery of the end system. The case study based on the real-time test shows that the proposed reconfiguration strategies are reasonable.

**Key words:** time-triggered communication; reconfiguration strategy; resource constraint; message scheduling

### 0 引言

高度综合的分布式综合模块化航空电子(Distributed Integrated Modular Avionics, DIMA)体系结构已成为航空电子系统的发展方向。其特征在于利用分布式架构将所有综合化模块分布在飞行器中<sup>[1]</sup>,并通过时间触发网络实现安全关键性消息的严格周期确定性传输。时间触发(Time-Triggered, TT)网络是一种具有严格时间确定性的实时网络,其中,时间触发消息的

发送、转发和接收时刻由静态调度表决定<sup>[2]</sup>。时间触发消息多用于对实时性要求较高的应用,完成关键的任务,执行重要的功能。因此,在系统发生故障时,时间触发消息的实时性与确定性能否得到保障,势必会影响到系统对故障的抵抗能力。

重构技术是系统在某种条件或状态发生时,适时调整控制参数或构型,利用系统现有资源重建系统中的局部功能甚至全部功能的一种容错控制方法<sup>[3]</sup>。为了确保系统可靠性,航空电子系统需要具备在运行时重构的能力,以在减少资源利用的基础上对故障做出及时的反应。因此研究重构在航空电子时间触发网络中的应用显得尤为重要。

作为混合安全关键系统,航空电子系统需要预先

收稿日期:2019-04-03 修回日期:2019-06-08

基金项目:装备预研领域基金(61403120404)

作者简介:高杨(1995—),女,辽宁沈阳人,硕士生,研究方向为航空电子综合。

考虑故障的类型,并进行离线冗余设计。现有关于重构实施的研究多基于应用级别。文献[4]提出可重构的综合模块化航空电子系统平台,可以通过将故障模块上驻留的应用迁移至空闲模块的方式来改变网络配置;文献[5-7]均采用模块级冗余和应用迁移的方式来实现IMA平台的重构,并采用结构分析和设计语言(Architecture Analysis and Design Language, AADL)建模的方式对重构后的系统进行可靠性评估;文献[8]对故障发生后的网络状态进行离线分析,寻找延迟最低的任务迁移路由,同时最小化故障导致的网络配置切换时间开销,然而,大量的备份势必会造成成本的提升;文献[9]认为安全关键性嵌入式系统难以承受过度备份带来的高成本,因此可以考虑通过切换现有资源配置来利用空闲资源,以抵抗故障对系统的影响;针对时间触发网络,文献[10]着重讨论在加入新设备并引起网络改变后,系统将新的调度表装载到各个设备的总用时;文献[11]以减少帧丢失数目和配置切换时间为目标,将时间触发网络的重构转化为依赖图问题。总的来看,现有关于重构方式的研究没有直接与具体的时间触发消息调度建立联系,未具体考虑故障发生后航空电子系统中时间触发消息的再次配置。

本文针对航空电子系统时间触发网络中的端系统模块故障导致其上驻留应用失效的问题,基于不同的资源约束条件提出了迁移、抢占、降级3种重构方式。在应用迁移的基础上,建立应用到消息的关联,基于可满足性模理论(Satisfiability Modulo Theories, SMT)提出了一种可以支持模块级故障恢复的消息调度算法,并从实时性角度对算法进行了验证。

## 1 重构策略设计

### 1.1 航空电子系统的重构策略

当一个部件不按照它的规范工作,就可称之为故障。故障处理是指在一个系统中,为了防止整个系统失效,对故障进行处理的办法<sup>[12]</sup>,一般分为故障检测、策略选择、系统恢复3个阶段。航空电子系统中的故障检测模块负责实时监控故障,并针对不同的故障类型通知系统采取重启、重构、忽略等不同的故障处理方式。

以图1中航空电子时间触发网络的简单拓扑为例,说明基于应用迁移的重构方式。图1(a)为正常情况下的初始配置,包括5个端系统模块 $M_1 \sim M_5$ 和2个交换机模块 $S_1, S_2$ 。其中, $M_5$ 作为冗余模块,正常工作情况下没有应用驻留。图1(b)和图1(c)分别为 $M_1$ 和 $M_3$ 发生故障后,将其上全部应用迁移至 $M_5$ 的配置。可以看出,冗余模块的设置将直接关系到网络中虚拟链路

( $V_1 \sim V_4$ )改变的程度,进而影响重构的复杂性。

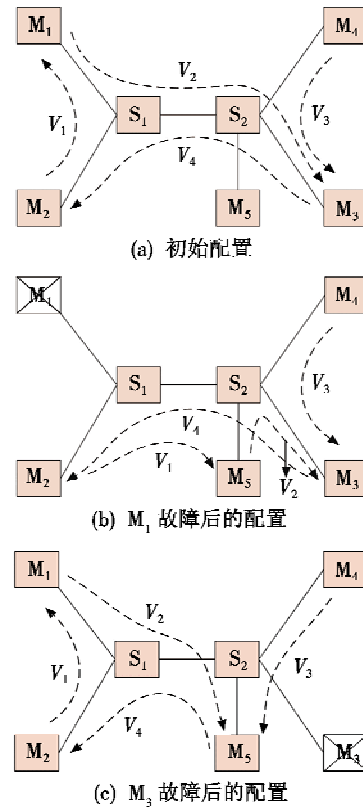


图1 应用迁移示例

Fig. 1 Example of application migration

分别给出上述两种重构情景的描述性定义。

定义1 (本地重构 Local Reconfiguration): 模块级故障产生后,同一交换机上模块间应用的迁移。

定义2 (远程重构 Distant Reconfiguration): 模块级故障产生后,不同交换机上模块间应用的迁移。

重构冗余模块数量设置方面可以参考实际需求,以及各飞行器标准。STANAG 4626 第6部分安全性相关章节<sup>[13]</sup>建议,关键等级相同的应用封装于同一个模块中。因此,在冗余模块的设置过程中仍需要考虑初始配置时各模块上驻留的具体应用,尽量为关键应用配置本地重构。

### 1.2 基于资源约束的重构策略设计

考虑到成本、冗余复杂度等问题,飞行器工作时不宜携带过多的冗余模块;另外,在恶劣的外界环境或作战等特殊条件下,故障可能多次出现,有限的冗余资源难以保证应用的及时迁移,此时应允许其他有余量的端系统模块接收迁移的应用。端系统模块的资源承载能力可由消息条数衡量。

故障触发重构后,系统需要首先为故障模块申请备份资源,若备份资源充足,则直接将故障模块上的应用迁移至冗余模块,此为迁移式重构。若备份资源不足,则分析其他端系统模块的承载能力,在余量足够的

情况下将应用迁移至其他模块,此为抢占式重构。若可占用的资源不足,则只能考虑放弃部分应用的执行,此为降级式重构,具体的执行流程如图2所示。

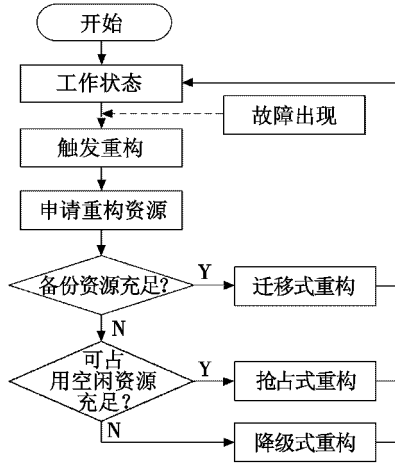


图2 正常工作状态下重构执行流程图

Fig.2 Flow chart of reconfiguration under normal operation conditions

## 2 调度算法设计

航空电子时间触发网络在进行通信时,各模块之间通过消息的交互进行通信,完成任务,执行功能。本文建立从应用到消息的对应关系,通过设计消息调度算法来实现模块级的故障恢复。

### 2.1 应用、任务、消息之间的关系

通常情况下,应用由一组具有依赖关系的任务构成,每个任务完成应用中的一部分功能,组合后为用户提供特定的服务。以航空电子系统中的飞行控制应用为例,它由数据采集任务、控制任务、自动导航任务等组成。不同的任务之间需要通过协调动作、互相配合以执行相应的功能,这涉及到任务间的通信。消息反映了任务之间的通信需求。任务产生消息,任务间的交互需要通过消息的收发完成。简言之,应用由一组特定任务构成,任务的完成要依靠相应消息的收发。

为了研究重构执行时的具体消息动作,需要根据上文中的对应关系建立应用和消息的联系。高安全关键级别应用包含的任务具有更高的优先级。相应地,高优先级任务产生高优先级的消息。时间触发网络一般兼容时间触发与事件触发消息,时间触发消息更适用于高确定性的场合。因此,在对高优先级任务进行消息设计时,通常考虑为其匹配更多的时间触发消息。本文中假设高优先级的任务对应的消息具有更高的优先级,其重要性更高。

### 2.2 基本消息调度算法

时间触发网络的物理拓扑可表示为一个无向图  $G = (V, E)$ ,其中,节点集  $V$  代表端系统或交换机,边集  $E$  代

表连接节点的物理链路。通信链路仅存在于交换机节点间或交换机与端系统节点之间,且每条通信链路都以全双工形式通信。假定  $v_1$  和  $v_2$  是相邻的两个节点,且  $v_1, v_2 \in V$ ,则用  $[v_1, v_2]$  与  $[v_2, v_1]$  来表示双向数据流链路。设  $DL$  为数据流链路的集合,则  $\forall (v_1, v_2) \in E$ ,有  $[v_1, v_2] \in DL$ ,且  $[v_2, v_1] \in DL$ 。  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$  为包含  $n$  条时间触发消息的集合,每条时间触发消息对应的虚拟链路中所有的数据流链路集合表示为  $P_i$ ,现使用一个五元组来表示时间触发消息的各项属性

$$t_i = \{t_{i, \text{length}}, t_{i, \text{period}}, P_i, t_{i, \text{offset}}, t_{i, \text{pri}}\} \quad (1)$$

式中:  $i$  为消息标号;  $t_{i, \text{length}}$  表示消息帧长;  $t_{i, \text{period}}$  表示消息周期;  $P_i$  为每条消息对应的虚拟链路中所有的数据流链路的集合;  $t_{i, \text{offset}}$  为每条数据流链路的消息发送时间偏移集合;  $t_{i, \text{pri}}$  为消息的优先级。

针对时间触发消息调度的特点,可以采用 SMT 来对消息发送时间进行计算。SMT 求解器通过对输入的包含一系列运算的逻辑命题进行真假判断,最终求解出一个满足所有约束条件的充分解,或者得出无解的结论。SMT 求解约束条件<sup>[14-15]</sup>的数学表示形式如下所述。

1) 无冲突约束。

消息在传输时必须独占收发端口和链路,不同消息的发送时间区间相互不可重叠,即

$$\forall [v_k, v_l] \in L, \forall t_i \in T_i:$$

$$(t_{i, \text{offset}} \geq T_{i, \text{offset}} + T_{i, \text{length}}) \vee (T_{i, \text{offset}} \geq t_{i, \text{offset}} + t_{i, \text{length}}) \quad (2)$$

2) 路径依赖约束。

消息的发送是逐级的,两端口之间预留给消息的发送窗口应该大于消息的传输时间。最小单跳延迟由物理链路固定传输延迟决定,设  $H_{\text{hopdelay}}$  为最小单跳延迟,即

$$\forall [v_k, v_r], [v_r, v_l] \in L, \forall t_i \in T_i:$$

$$H_{\text{hopdelay}} \leq t_{i, \text{offset}}^{[v_r, v_l]} - t_{i, \text{offset}}^{[v_k, v_r]} \quad (3)$$

3) 交换机网络存储约束。

交换机存储空间有限。当消息在交换机上的存储超过一定时间时,将被视为无效消息并丢弃,设  $M_{\text{membound}}$  为交换机的最大内存,即

$$\forall [v_k, v_r], [v_r, v_l] \in L, \forall t_i \in T_i:$$

$$M_{\text{membound}} \geq t_{i, \text{offset}}^{[v_r, v_l]} - t_{i, \text{offset}}^{[v_k, v_r]} \quad (4)$$

4) 端到端延时约束。

消息普遍具有实时性约束。消息需要在一定时间内得到接收。设  $L_{\text{latency}}$  为消息端到端延时的阈值,本文将将其设为消息的周期,即

$$\forall [v_k, v_l] \in L, \forall t_i \in T_i:$$

$$L_{\text{latency}} \geq t_{i, \text{arrival}}^{[v_k, v_l]} - t_{i, \text{offset}}^{\text{first}} \quad (5)$$

具体计算时,首先按照规范化调度约束格式,生成

时间触发消息在网络中传输应满足的调度约束条件,然后将上述约束条件输入到 SMT 求解器的逻辑上下文 context 中,寻找满足约束的可行解。

### 2.3 支持端系统模块重构的调度算法

在航空电子时间触发网络,各端系统之间通过时间触发消息的收发来进行通信。端系统模块发生故障后,网络中的初始消息调度方案将不再适应消息的传输。本文中的 3 种重构方式均基于应用的迁移,在故障发生后对消息进行二次调度,以满足故障发生后网络中的消息传输需求。

系统在初始情况下,按照基本的 SMT 算法进行消息的调度设计,生成初始的消息调度表  $SMT\_result$ 。端系统出现故障后,根据故障时间在  $SMT\_result$  中确定需要重构的  $N$  条消息,并按照截止期限将其排序,得到二次调度需要的重发消息列表  $re\_frame\_list$ 。

若故障模块连接的交换机上有冗余模块,则直接改变消息路径属性,执行本地重构,无需执行二次调度。对于远程重构的情况,则需要判断故障发生时系统的资源约束情况,端系统模块的余量用消息条数来衡量。根据图 2 来选择重构方式,具体消息的分配需要满足

$$\begin{cases} N = \sum_{j=0}^k m_j \\ m_j \leq \max_j \end{cases} \quad (6)$$

式中: $k$ 为可接受迁移的模块数量; $j$ 为有余量的模块标号,在 $[0, k]$ 之间取值; $m_j$ 为模块 $j$ 实际接纳的消息条数; $\max_j$ 为模块 $j$ 的最大消息承载数目。

选取满足要求的消息分配方案后即可得到新的消息传输需求,包括  $re\_frame\_list$ 、消息的路径和约束等。将以上消息属性再次输入 SMT 求解器,即可得到消息的二次调度结果。消息调度算法流程如图 3 所示。

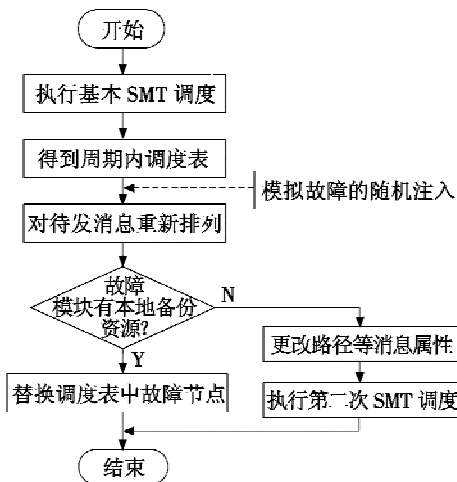


图 3 可重构的消息调度算法流程图

Fig. 3 Flow chart of reconfigurable message scheduling algorithm

### 3 实验结果及分析

本文使用 Yices 求解器进行消息的调度设计。为了简化具体实现过程中的参数设置,对系统进行如下假设:1)非冗余模块有工作和失效两种模式;2)仅模块级端系统故障可以触发重构,且故障可以被检测;3)备用冗余模块可以随时切换至工作状态;4)各模块的失效互不影响;5)不考虑模块的启动、切换、消息调度表的装载等硬件时间开销。

现对图 4 中的拓扑进行建模,网络包括 5 个端系统模块  $M_1 \sim M_5$  和 2 个交换机模块  $S_1, S_2$ ,其中,  $M_5$  为冗余模块,物理链路带宽为 100 Mibit/s。共设置 300 条时间触发消息,周期在  $[1000 \mu s, 16\ 000 \mu s]$  中取值,且为  $1000 \mu s$  的整数倍;消息长度在  $[64\ B, 1518\ B]$  中取值。

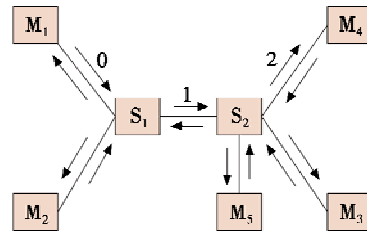


图 4 案例拓扑

Fig. 4 Case topology

首先考虑迁移式重构的情况。 $M_1$  发生故障,且  $M_5$  余量充足时,  $M_1$  上驻留的消息全部迁移至  $M_5$ 。经过对初始 SMT 调度的统计,在  $16\ 000 \mu s$  内,所有消息得到完整发送的用时为  $15\ 080 \mu s$ 。“正常用时”即为  $15\ 080 \mu s$ 。“故障时间”在  $[0 \mu s, 16\ 000 \mu s]$  中随机取值。“重构后总用时”由两部分组成:故障发生前的消息发送用时,以及故障发生后剩余消息经二次调度得到的消息调度表时间长度。“平均端到端延时”指各消息端到端延时的平均值。迁移式重构结果见表 1。

表 1 迁移式重构结果

Table 1 Result of migration reconfiguration  $\mu s$

故障时间	正常用时	重构后总用时	端到端延时	重构后端到端延时
6	15486	15498	109	108
363	15486	15422	109	107
2062	15486	15503	109	110
4280	15486	15466	109	107
7790	15486	15432	109	106
8000	15486	15330	109	109
10022	15486	15231	109	108
11862	15486	15412	109	110
12009	15486	15508	109	108
14224	15486	15330	109	108

结果显示:迁移式重构可以得到执行,且总用时在正常用时范围内上下浮动。相较于初始消息调度的总

用时,启用二次调度后消息调度表的总时间长度会发生小范围改变。具体的改变取决于故障时间与原始消息发送窗口的相对位置:如果故障在某些消息发送过程中出现,即破坏了消息传输的完整性,则会导致部分消息的重新发送,势必会增大时间消耗;如果故障的出现不切割消息发送的时间窗口,则相当于强制将其后的时间窗口前移,会相应减少时间消耗。因此,迁移式重构可以在不对原始消息调度表长度产生大幅影响的前提下得到有效执行。

下面对资源受限条件下的抢占式重构和降级式重构进行分析。 $M_1$  在 10 022  $\mu\text{s}$  发生故障,冗余模块  $M_2$  余量不足,但其他模块余量充足,执行抢占式重构, $M_1$  上驻留的消息将迁移至  $M_3, M_4, M_5$  3 个模块。每个模块接纳的迁移消息条数相同。若冗余模块  $M_3$  和其他模块余量均不足,则执行降级式重构,将低重要性消息(占比约为 40%)丢弃。选用 10 组消息进行验证,重构执行结果如表 2 所示,其中,“高重要性消息完成时间”是系统执行远程重构后所有高重要性消息在首个周期内的发送完成时间之和。

表 2 抢占式重构和降级式重构结果

Table 2 Result of preemption and degradation reconfiguration  $\mu\text{s}$

抢占式重构		降级式重构	
消息总用时	高重要性消息完成时间	消息总用时	高重要性消息完成时间
15 145	2810	15 161	2086
15 249	3020	15 366	2296
15 332	2990	15 422	2130
15 442	2883	15 322	2001
15 320	2769	15 463	2033
15 348	2843	15 233	2344
15 243	2974	15 122	2435
15 220	2500	15 376	1998
15 410	2800	15 400	2136
15 410	2733	15 329	2043

结果显示:各端系统模块抢占式重构和降级式重构可以得到执行。抢占式重构与迁移式重构的区别仅在于消息迁移的目的模块不同。而降级式重构丢弃了部分的消息,会对网络造成一定影响。

时间触发消息有各自的周期,其时间窗口在规定的整体时间周期(16 000  $\mu\text{s}$ )内分布,因此,丢弃部分消息不会明显减少消息发送的总用时。然而在丢弃约 40% 的低重要性消息后,高重要性消息的发送完成时间在总体上有约 15%~40% 的下降。因此,在采取对低重要性消息的丢弃操作后,高重要性消息可以得到更快发送,系统对其保障能力更强。同时以丢弃低重要性消息为代价,必然会换来网络带宽的提高,这也使得系统更容易适应因故障带来的网络性能下降的情况。除此之

外,在故障状态下,可能产生一些重要且紧急的事件触发消息,留有更多的带宽余量更容易满足此类消息的执行。因此抢占式重构和降级式重构可以在充分利用端系统冗余资源的前提下得到有效执行,其中降级式重构还可以为高重要性消息提供更强的保障能力。

## 4 结论

本文首先针对航空电子系统时间触发网络中的端系统模块故障导致其上驻留应用失效的问题,基于不同的资源约束条件提出了迁移、抢占、降级 3 种重构方式;其次,在应用迁移基础之上,建立应用到消息的关联,提出了一种基于 SMT 的支持模块级故障恢复的消息调度算法;最后从实时性角度对算法进行验证。仿真实验结果表明,在不考虑系统配置表切换时间以及冗余模块启动等相关硬件时间开销的前提下,本文提出的重构方式合理,消息调度算法也能得到有效执行。

## 参考文献

- [1] WOLFIG R, JAKOVLJEVIC M. Distributed IMA and DO-297: architectural, communication and certification attributes [C]//IEEE/AIAA 27th Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2008. doi:10.1109/DASC.2008.4702769.
- [2] KOPETZ H, BRAUN M, EBNER C, et al. The design of large real-time systems: the time-triggered approach [C]//Proceedings of the 16th IEEE Real-Time Systems Symposium, 1995. doi:10.1109/REAL.1995.495208.
- [3] 杨斌. 模块化综合系统的重构设计[J]. 电讯技术, 2009, 49(6):45-48.
- [4] BIEBER P, NOULARD E, PAGETTI C, et al. Preliminary design of future reconfigurable IMA platforms [J]. ACM SIGBED Review, 2009. doi:10.1145/1851340.1851349.
- [5] ZHOU Q, GU T, HONG R, et al. An AADL-based design for dynamic reconfiguration of DIMA [C]//IEEE/AIAA 32nd Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2013. doi:10.1109/DASC.2013.6712585.
- [6] ZHANG Q, WANG S H, LIU B. Approach for integrated modular avionics reconfiguration modelling and reliability analysis based on AADL [J]. IET Software, 2016, 10(1):18-25.
- [7] 陈龙, 王立松. IMA 重构的功能危害分析方法研究 [J]. 计算机工程, 2016, 42(6):151-155.
- [8] POURMOHSENI B, WILDERMANN S, GLAB M, et al. Hard real-time application mapping reconfiguration for NoC-based many-core systems [J]. Real-Time Systems, 2019, 55(2):433-469.

(下转第 72 页)

目标指令, PMAC 卡运算后通过串口输出  $\pm 10\text{ V}$  电压给驱动器, 驱动器接收信号之后通过滑环对电机进行控制和保护。试验结果如图 6(b) 所示, 矢量转盘输出跟踪误差在 3% 以内, 配合离心机为试件提供二维加速度过载模拟环境。

## 5 结论

本文为得到准确、稳定的二维加速度过载环境, 提高矢量转盘的位置跟踪精度, 采用自适应混沌蚁群优化的 RBF 神经网络 PID 控制器, 通过自适应混沌蚁群优化算法解决 RBF 神经网络权值优化较慢的问题, 有效缩短神经网络学习时间, 提高 PID 控制器的在线自适应能力, 使转盘跟踪试验系统精准地跟踪目标轨迹。仿真结果表明, 自适应混沌蚁群优化 RBF 神经网络的误差明显小于传统算法, 跟踪误差小、精确度高。将此控制策略应用于飞行器二维加速度过载模拟的矢量转盘跟踪试验系统, 结果表明: 系统具有良好的准确性和快速性, 跟踪误差控制在 3% 以内, 能精确提供所需的二维加速度过载环境, 满足模拟试验要求, 在工程实践中有广泛的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] 王士超. 离心旋转试验台控制策略研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.
- [2] 张艳兵, 马铁华, 孙江涛. 导弹二维加速度过载环境的离心转盘模拟方法[J]. 弹箭与制导学报, 2016, 36(4): 109-112.
- [3] 窦晓之. 复合台精密离心机控制方法研究与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [4] 李阳阳. 基于 IRMC171 的医用离心机优化控制系统的研究与设计[D]. 天津: 天津理工大学, 2017.
- [5] 叶德住. 基于 BP 神经网络的永磁同步电机控制[J]. 微电机, 2016, 49(11): 57-61.
- [6] 邵文强, 康尔良. 基于 RBF 神经网络的永磁同步电动机 PID 控制[J]. 微特电机, 2018, 46(11): 75-78.
- [7] TATAR A, BARATI A, NAJAFI A, et al. Radial basis function (RBF) network for modeling gasoline properties [J]. *Petroleum Science and Technology*, 2019, 37(11): 1306-1313.
- [8] 孙启豪, 蔡爱华. 航空搜潜布阵航路优化研究[J]. 电光与控制, 2017, 24(4): 39-42.
- [9] 谢颖, 李吉兴, 杨忠学, 等. 改进遗传蚁群算法及其在电机结构优化中的研究[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(10): 64-70.
- [10] 李亚女, 潘广贞. 蚁群算法中挥发系数与迭代次数和最优路径长度关系研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(23): 79-83.
- [11] 毛亮亮, 王旭东. 蚁群算法在永磁同步电机起动过程中的应用[J]. 电力电子技术, 2015, 49(11): 74-76, 80.
- [12] 王跃钢, 文超斌, 左朝阳, 等. 自适应混沌蚁群径向分析算法求解重力辅助导航匹配问题[J]. 物理学报, 2014, 63(8): 089101-1-089101-8.
- [9] OBERMAISSER R, AHMADIAN H, MALEKI A, et al. Adaptive time-triggered multi-core architecture [J]. *Designs*, 2019, 3(1): 1-23.
- [10] WISNIEWSKI L, CHAHAR S, JASPERNEITE J. Seamless reconfiguration of time triggered Ethernet based protocols [C]//IEEE World Conference on Factory Communication Systems (WFCS), 2015. doi: 10.1109/WFCS.2015.7160581.
- [11] LI Z H, WAN H, PANG Z Y, et al. An enhanced reconfiguration for deterministic transmission in time-triggered networks [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2019, 27(3): 1124-1137.
- [12] 熊华钢, 王中华. 先进航空电子综合技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [13] Military Agency for Standardization. STANAG 4626 (Part VI: Guidelines for system issues) (Vol. 7: Safety) [S]. Brussels: North Atlantic Treaty Organization, 2014.
- [14] STEINER W. An evaluation of SMT-based schedule synthesis for time-triggered multi-hop networks [C]//The 31st IEEE Real-Time Systems Symposium, 2010. doi: 10.1109/RTSS.2010.25.
- [15] STEINER W. Synthesis of static communication schedules for mixed-criticality systems [C]//The 14th IEEE International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing Workshops, 2011. doi: 10.1109/ISORCW.2011.12.

(上接第 48 页)