

# 温室无线传感器网络监控系统的事件驱动调度器\*

韩安太<sup>1</sup> 郭小华<sup>2</sup> 孙延伟<sup>1</sup>

(1. 中国计量学院电工与电子技术研究所, 杭州 310018; 2. 杭州职业技术学院友嘉机电学院, 杭州 310018)

**【摘要】** 针对基于无线传感器网络构建的温室环境监控系统的整体性能受时变传输延时、丢包、网络拥塞、延时抖动等不利网络属性的影响,提出一种采用事件驱动机制的反馈调度策略。该反馈调度策略以截止期错失率作为网络服务质量性能评价指标,针对传感器节点和汇聚节点间的数据传输,利用反馈控制技术在线调整各个传感器节点的采样周期,使传感器节点的带宽要求适应网络负载的动态变化,从而保证网络服务质量维持在一定水平;在此基础上,引入新型的事件驱动机制来降低反馈调度策略设计难度和资源消耗。实验表明,该事件驱动反馈调度策略合理、有效并实用。

**关键词:** 温室 无线传感器网络 事件驱动调度器 反馈控制

**中图分类号:** S625.5; TN919.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)07-0186-05

## Event-driven Scheduler in Monitoring and Controlling System for Greenhouse Based on Wireless Sensor Networks

Han Antai<sup>1</sup> Guo Xiaohua<sup>2</sup> Sun Yanwei<sup>1</sup>

(1. Institute of Electrical Engineering and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China

2. Fair Friend Institute of Electromechanics, Hangzhou Vocational and Technical College, Hangzhou 310018, China)

### Abstract

In order to reduce the adverse impact of network time-varying delay, packet loss, network congestion, jitter and other properties on performance of the monitoring and controlling system for greenhouse environment based on wireless sensor networks, the event-driven feedback scheduling strategy was proposed. The basic idea of the proposed event-driven feedback scheduling strategy was to use deadline miss ratio as the indicator for the network quality of service, adjust the sampling period of each sensor nodes by means of feedback control technology at run time such that the bandwidth requirement of each sensor nodes could adapt the change of the network workload, and the quality of network service could be maintained at a certain level. The novel event-driven invocation mechanism for the feedback scheduler was adopted to reduce the design difficulty and overhead of the feedback scheduler. Experiments indicated the proposed event-driven feedback scheduling strategy was with rationality, effectiveness and practicability.

**Key words** Greenhouse, Wireless sensor networks, Event-driven scheduler, Feedback control

### 引言

随着无线传感器网络技术<sup>[1]</sup>日益成熟,研究人员将其应用于温室环境监控系统构建,并取得一些研究成果<sup>[2-4]</sup>。

在无线传感器网络为温室环境监控系统构建带来便利的同时,系统整体性能也受到时变传输延时、丢包、网络拥塞、延时抖动等不利网络属性的严重影响<sup>[5-6]</sup>。为此,研究人员从修改网络协议、设计系统控制器等角度提出解决方法<sup>[7-9]</sup>;但是,由于难以建

立描述无线传感器网络应用系统的精确数学模型、网络协议栈修改困难、使用过多假设条件等原因,这些方法的验证大多使用了软件仿真,其实用性仍需进一步探索。

从通讯角度来看,上述不利网络属性与可用网络带宽(或网络负载)密切相关<sup>[10]</sup>。只要网络带宽足够充分或网络负载足够小,这些网络属性对系统性能的影响微乎其微,即网络可为应用提供满意的服务质量;然而,实际无线传感器网络带宽十分有限,需要对其进行合理调度才可满足各个节点的带宽要求<sup>[11]</sup>。

基于上述分析,本文将网络调度与反馈控制技术相结合<sup>[12-14]</sup>,提出一种以提高网络服务质量为目标的事件驱动反馈调度策略。该策略从管理可用网络带宽的角度出发,在网络负载变动的情况下,通过在线调整各个传感器节点的采样周期,使传感器节点的带宽要求适应网络服务质量的动态变化,从而减小时变传输延时、丢包、网络拥塞、延时抖动等网络属性对系统性能的不利影响。

## 1 事件驱动反馈调度器设计

### 1.1 系统体系结构

图 1 为基于星形拓扑结构无线传感器网络构建的温室环境监控系统<sup>[13]</sup>。在该系统中,分布在温室环境内的大量传感器节点通过无线通讯网络与汇聚节点进行信息交换。

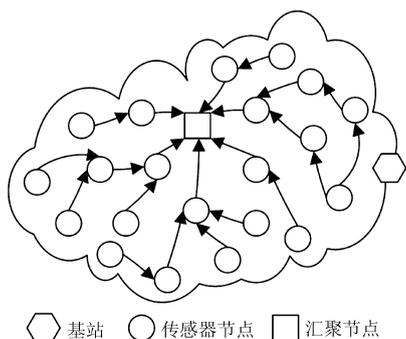


图 1 系统体系结构

Fig. 1 Architecture of the whole system

系统运行时,传感器节点通过各类传感器从温室环境获得采样数据,并无线发送给汇聚节点;汇聚节点根据系统设计目标对收到的数据进行处理;基站可作为高层控制器和外部接口,通过与汇聚节点通讯,对系统进行协调、优化、管理。

### 1.2 基本设计思路

网络服务质量可通过截止期错失率、网络利用率等指标进行度量<sup>[10]</sup>。对于实际无线传感器网络来说,节点带宽要求主要由数据包大小和采样频率

决定;数据包大小、数据传输速率等参数取决于网络协议栈,一般难以进行修改,因此,节点带宽要求主要受采样频率影响<sup>[15]</sup>。

当采样频率较高时,节点发送的数据包数量增加,带宽要求增加,网络负载增加,节点间发生冲突的概率增大,数据包可能经历更长传输延时,甚至损失,而网络也可能发生拥塞,此时,网络利用率较高,截止期错失率较大,网络服务质量下降。为此,需要减少节点对网络的带宽要求,这可通过降低采样频率来实现。然而,由香农采样定理可知,采样频率应根据监控对象特点确定,采样频率越高,系统性能越好;低采样频率虽可提高网络服务质量,但也造成网络利用率不足,网络带宽浪费。

一般情况下,应保持较高网络利用率,但网络利用率并不是越高越好,当网络利用率高于安全界限时,会出现截止期错失<sup>[1,10]</sup>,造成截止期错失率增大,网络服务质量下降。在动态变化的无线传感器网络中,确定具体的网络利用率安全界限非常困难;然而,如果能够使截止期错失率维持在一定水平,则无论网络负载是否变化,网络利用率都可达到最大值,同时保证一定的网络服务质量<sup>[16]</sup>。

根据以上分析,针对图 1 所示系统,为提高网络服务质量,本文从管理可用网络带宽的角度,设计了图 2 所示的事件驱动反馈调度策略。

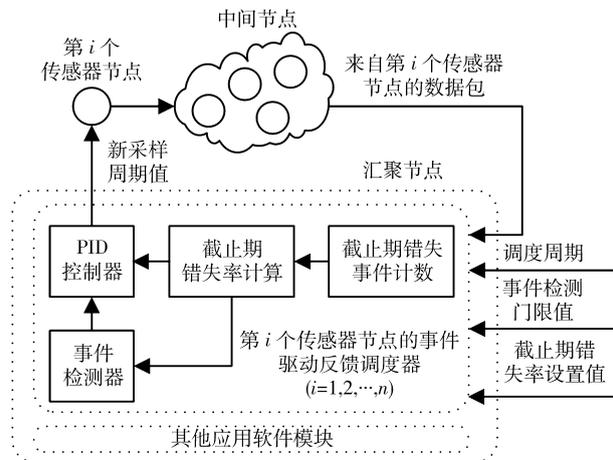


图 2 事件驱动反馈调度策略

Fig. 2 Event-driven feedback scheduling strategy

事件驱动反馈调度策略的核心是为各个传感器节点分别设计的事件驱动反馈调度器,它是在原系统上增加的一个反馈控制闭环,以函数形式保存、运行在汇聚节点上。

针对各个传感器节点与汇聚节点间的通讯,当系统运行时,根据以截止期错失率表示的网络服务质量变化情况,事件驱动反馈调度器在线调整各个传感器节点的采样周期,使节点带宽要求适应网络

服务质量的动态变化,从而保证网络利用率最大化且网络服务质量维持在一定水平。

### 1.3 反馈调度器设计

在第  $k$  个调度周期  $T(k)$  中,传感器节点  $i$  向汇聚节点发送数据过程中发生的截止期错失事件个数为

$$n_i(k) = \begin{cases} n_i(k) & (\text{汇聚节点在 } h_i(x-1) \sim h_i(x) \\ & \text{内收到数据包}) \\ n_i(k) + 1 & (\text{汇聚节点在 } h_i(x-1) \sim h_i(x) \\ & \text{内未收到数据包}) \\ 0 & (h_i(0)) \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $h_i(x)$  为传感器节点  $i$  的采样周期,  $h_i(x) \leq T(k)$ ,  $x=0, \dots, \lfloor \frac{T(k)}{h_i(x)} \rfloor$ ,  $\lfloor \cdot \rfloor$  为下取整运算符。

在  $T(k+1)$  开始之前,传感器节点  $i$  对应的截止期错失率为

$$d_i(k) = \frac{n_i(k)}{\lfloor T(k)/h_i(x) \rfloor} \quad (2)$$

由于无线通讯内在的不确定性,即使在相同网络条件下,相邻两个调度周期内的  $d_i(k)$  也可能随机变化,为了消除这种不确定性和测量噪声对计算精度的影响,传感器节点  $i$  对应的截止期错失率误差计为

$$e_i(k) = d_{ir} - [\lambda d_i(k) + (1-\lambda)d_i(k-1)] \quad (3)$$

式中  $d_{ir}$ ——传感器节点  $i$  对应的截止期错失率设定值

$\lambda$ ——遗忘因子,  $0 \leq \lambda \leq 1$

需要注意的是,式(3)包含一个数字低通滤波器,  $\lambda$  决定了滤波性能;当  $\lambda=1$  时,式(3)可转换为

$$e_i(k) = d_{ir} - d_i(k) \quad (4)$$

将  $e_i(k)$  代入 PID 控制器,得到在  $T(k+1)$  内传感器节点  $i$  的采样周期值为

$$h_i(k+1) = h_i(k) + K_p(e_i(k) - e_i(k-1)) + K_I e_i(k) + K_D(e_i(k) - 2e_i(k-1) + e_i(k-2)) \quad (5)$$

式中  $K_p, K_I, K_D$ ——PID 控制器参数

根据传感器节点  $i$  与被监控对象的特点,对  $h_i(k+1)$  进行双向限幅,即

$$h_i(k+1) = \begin{cases} h_{imin} & (h_i(k+1) \leq h_{imin}) \\ h_i(k+1) & (h_{imin} < h_i(k+1) < h_{imax}) \\ h_{imax} & (h_i(k+1) \geq h_{imax}) \end{cases} \quad (6)$$

式中  $h_{imin}, h_{imax}$ ——被监控对象容许的采样周期最小值、最大值

最后,汇聚节点将限幅后的  $h_i(k+1)$  发送给传感器节点  $i$ ,在  $T(k+1)$  内,节点  $i$  按照  $h_i(k+1)$  进行采样。

### 1.4 事件驱动机制

在系统运行过程中,上述反馈调度器以  $T(k)$  为周期重复执行,即采用时间触发机制。 $T(k)$  取值对系统性能具有重要影响。例如:较小的  $T(k)$  可提高反馈调度器对网络动态的响应速度,但导致  $d_i(k)$  计算误差增大,调节精度下降;较大的  $T(k)$  虽可减小  $d_i(k)$  计算误差,但降低了反馈调度器响应速度,易造成较大超调量、较长调节时间和振荡。事实上,由于无线传感器网络应用系统的动态变化相对复杂且具有随机性、非线性,确定合适的  $T(k)$  非常困难<sup>[17]</sup>。

另外,反馈调度器的周期执行也会增加系统存储、运算、通讯等资源消耗,特别是系统长时间处于稳态时,周期性调用反馈调度器将造成资源浪费,缩短无线传感器网络应用系统寿命。

针对上述问题,本文在文献[3, 18]基础上,将时间触发和事件触发机制相结合,引入事件检测条件

$$|e_i(k)| \geq \delta_i \quad (7)$$

式中  $\delta_i$ ——用于传感器节点  $i$  的事件检测门限值

从而得到按以下步骤执行的事件驱动反馈调度器:① 在  $T(k)$  中,反馈调度器使用式(1)~(3)计算  $n_i(k)$ 、 $d_i(k)$  和  $e_i(k)$ 。② 判断式(7)是否成立。③ 如果式(7)成立,使用式(5)、(6)计算  $h_i(k+1)$  并发送给传感器节点  $i$ ;否则,在  $T(k+1)$  中继续重复步骤①~③。

采用事件驱动机制后,反馈调度器不需要每次执行步骤③,因此,可有效减少系统资源消耗;同时,从平均意义上减少了汇聚节点的运算、通讯时间,可在保证  $d_i(k)$  计算精度的前提下为  $T(k)$  选取较小的值,从而降低  $T(k)$  选择难度。另外,测量噪声对  $e_i(k)$  的影响也可通过合理选择  $\delta_i$  来避免,可直接使用式(4)计算  $e_i(k)$ 。

## 2 实验验证与分析

### 2.1 实验方案

为了验证本文提出的事件驱动反馈调度策略的有效性,在杭州市某农场的盆栽番茄培养温室中进行模拟实验。该普通日光温室长 70 m、宽 8.2 m、檐高 4.9 m、脊高 6.2 m。温室内布置 14 个网络节点,构成图 3 所示的实验系统。该实验系统是温室环境监控系统的自动灌溉子系统。所有网络节点为自制,设计细节及参数设置方法见文献[19],无线通

讯使用 Zigbee 协议,工作频率为 2.4 GHz,最大数据传输速率为 250 kb/s,最大传输距离为 30 m,数据包大小为 64 字节。

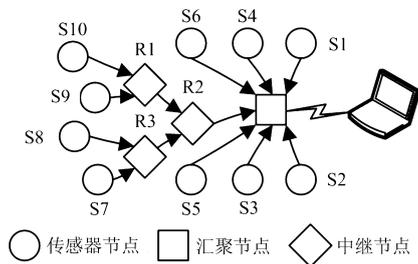


图 3 模拟实验系统

Fig. 3 Simulated experimental system

为了简化实验过程,此处仅使用配置电容式湿度传感器的 S1 来检测土壤湿度,测量值直接发送给汇聚节点;汇聚节点收到测量数据后,根据预先设定的门限值,通过直流电磁阀控制喷水系统通断,实现自动灌溉。S2 ~ S10 为干扰节点,随机发送任意内容数据包给汇聚节点,模拟无线传感器网络;R1 ~ R3 为中继节点,实现数据包转发;汇聚节点通过串行口与计算机进行信息交换,在计算机上使用 Matlab 进行数据记录和图形绘制;所有数据采用单数据包传递,S2 ~ S10 采用时间触发方式工作,R1 ~ R3 和汇聚节点采用事件触发方式工作。

S1 ~ S10 的实验参数设置为  $h_i(0) = 20 \text{ ms}$ ,  $h_{i\min} = 10 \text{ ms}$ ,  $h_{i\max} = 50 \text{ ms}$ ,  $i = 1 \sim 10$ ;用于 S1 的事件驱动反馈调度器参数分别为  $T(k) = 1 \text{ s}$ ,  $d_{1r} = 10\%$ 、 $\lambda = 1$ ,  $\delta_1 = 0.05$ 。  $K_p = 0.008$ ,  $K_I = 0.006$ ,  $K_D = 0.003$  是通过 TrueTime 软件仿真得到的 PID 控制器参数;除了 S1 外,S2 ~ S10 的采样周期不进行反馈调节。

实验时间为 360 s。实验初始,打开汇聚节点,S1 ~ S3;120 s 时,打开 S4 ~ S6、R1 ~ R3;240 s 时,打开 S7 ~ S10;360 s 时,停止实验,计算机从汇聚节点读取数据并进行曲线绘制。

## 2.2 实验结果

图 4、5 分别给出了  $h_1(k)$ 、 $d_1(k)$  随时间的变化曲线;图中一般方法指使用标准 Zigbee 协议进行通讯;本文方法指除了使用标准 Zigbee 协议进行通讯外,在应用层上调用并执行了本文提出的事件驱动反馈调度策略。

从图 4、5 可以看到,在不进行反馈调度的情况下,由于  $h_1(k)$  固定为 20 ms,在网络负载很轻的 0 ~ 120 s 内, $d_1(k)$  小于 10%;随着网络负载逐步增加, $d_1(k)$  迅速增加,在 120 ~ 240 s 内, $d_1(k)$  约 58% ~ 78%;在 240 ~ 360 s 内, $d_1(k)$  约 88% ~ 100%。这就意味着来自 S1 的绝大多数数据包不能在规定时间内到达汇聚节点,网络不能提供满意的服务质量。

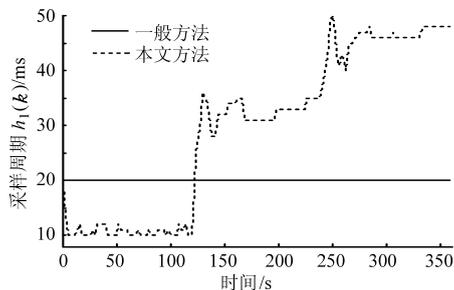


图 4 采样周期  $h_1(k)$  变化曲线

Fig. 4 Curves of sampling periods  $h_1(k)$

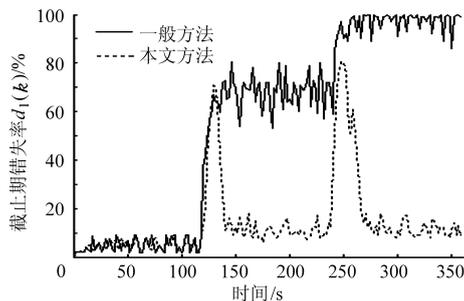


图 5 截止期错失率  $d_1(k)$  变化曲线

Fig. 5 Curves of deadline miss ratios  $d_1(k)$

在进行反馈调度的情况下, $h_1(k)$  可根据  $d_1(k)$  的变化进行动态调整,虽然网络负载逐步增加,但  $d_1(k)$  仍可维持在设定值附近(除了在 0、120、240 s 处的暂态过程),网络可提供满意的服务质量。

由于反馈调度器使用了事件驱动机制,当不满足式(7)时,反馈调度器并不进行新采样周期计算和数据发送。因此,当  $d_1(k)$  围绕  $d_{1r}$  波动且满足  $|e_1(k)| < 5\%$  时,图 4 的  $h_1(k)$  曲线保持平直。

## 2.3 讨论

实验结果证明,本文提出的事件驱动反馈调度策略在网络负载动态变化的情况下,能有效保证网络服务质量维持在设定水平,减小小时变传输延时、丢包、网络拥塞、延时抖动等不利网络属性对系统性能的影响。在具体使用该事件驱动反馈调度策略时,应注意以下几点:

(1) 在实际温室环境监控系统中,传感器节点故障、监控区域扩大、监控点增加、监控点位置改变、随机性射频干扰、环境噪声等原因都可导致网络服务质量变化。因此,“通过人为改变网络节点数量来实现网络服务质量变化,从而验证事件驱动反馈调度策略的有效性”的实验方案是对实际情况的模拟,实验结果具有一般性。

(2) 在使用本文提出的事件驱动反馈调度策略时,应在满足香农采样定理前提下,根据被监控对象特点、应用系统要求、传感器节点硬件和网络条件等因素来合理确定各个传感器节点的采样周期变化范围。一般来说,在不影响系统整体性能指标的前提

下,数字控制器容许采样周期在一定范围内变动<sup>[17]</sup>。但是,当采样周期变动范围较大时,需要考虑控制器参数的在线调整。

(3) 事件驱动反馈调度器保存、运行在资源相对丰富的汇聚节点上,很少消耗传感器节点资源。由于使用了兼顾时间触发和事件触发特点的事件驱动机制,在保持调度策略运行高效率的同时,也减少了调度开销。

(4) 由于所有事件驱动反馈调度器都保存、运行在汇聚节点上,当网络规模较大时,汇聚节点的资源负担将急剧增加。为了减少汇聚节点负担,可根据需要,仅为部分传感器节点设计反馈调度器。

(5) 可根据各个传感器节点对网络服务质量的不同要求,分别设计具有不同参数的事件驱动反馈调度器,实现灵活的分布式反馈调度。

(6) 反馈调度器的设计和使用是在网络协议栈

的应用层上进行的,不涉及对底层协议的修改和调用。因此,可实现为不依赖具体硬件平台和网络协议栈的通用支持软件。

### 3 结束语

本文提出一种基于事件驱动机制的反馈调度策略。在网络负载动态变化的情况下,针对每个传感器节点与汇聚节点之间的无线通讯,所提出的反馈调度策略通过在线测量网络截止期错失率和PID控制器动态调整各个传感器节点的采样周期,使节点带宽要求适应截止期错失率的动态变化,保证以截止期错失率表示的网络服务质量维持在设定水平。通过引入事件驱动机制,降低了反馈调度器的设计难度和资源消耗,提高了运行效率和系统整体性能。实验结果表明,所提出的事件驱动反馈调度策略可有效降低网络截止期错失率,提高网络服务质量。

### 参 考 文 献

- Cullar D, Estrin D, Srivastava M. Overview of sensor networks [J]. *Computer*, 2004, 37(8): 41~49.
- 冯友兵, 张荣标, 沈敏. 面向精确灌溉的无线传感器网络构建[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(1): 56~59.  
Feng Youbing, Zhang Rongbiao, Shen Min. Construction of wireless sensor networks for precision irrigation [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(1): 56~59. (in Chinese)
- Pawlowski A, Guzman J L, Rodriguez F, et al. Simulation of greenhouse climate monitoring and control with wireless sensor network and event-based control [J]. *Sensors*, 2009, 9(1): 232~252.
- 张荣标, 冯友兵, 沈卓, 等. 温室动态星型无线传感器网络通信方法研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(12): 107~110.  
Zhang Rongbiao, Feng Youbing, Shen Zhuo, et al. Communication method of star wireless sensor network for greenhouse dynamic measurement [J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(12): 107~110. (in Chinese)
- Rezgui A, Eltoweissy M. Service-oriented sensor-actuator networks: promises, challenges, and the road ahead [J]. *Computer Communications*, 2007, 30(13): 2627~2648.
- Ploplys N, Kawka P, Alleyne A. A closed-loop control over wireless networks [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2004, 24(3): 58~71.
- Felemban E, Lee C, Ekici E. MMSPEED: multipath multi-SPEED protocol for QoS guarantee of reliability and timeliness in wireless sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2007, 5(6): 738~754.
- 韩安太, 郭小华. 基于无线传感器网络的LQR输出反馈控制器设计[J]. *计算机测量与控制*, 2009, 17(1): 53~56.  
Han Antai, Guo Xiaohua. Design of the LQR output feedback controller based on the wireless sensor networks [J]. *Computer Measurement and Control*, 2009, 17(1): 53~56. (in Chinese)
- 王毅, 张德运, 张栋. 无线传感器网络满足QoS带宽需求的能量最优路由方案[J]. *传感技术学报*, 2006, 19(6): 2754~2759.  
Wang Yi, Zhang Deyun, Zhang Dong. Best energy route discovery method with the requirement of QoS bandwidth satisfied for wireless sensor networks [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, 19(6): 2754~2759. (in Chinese)
- 孙利民, 李建中, 陈渝, 等. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- Feng X. QoS challenges and opportunities in wireless sensor/actuator networks [J]. *Sensors*, 2008, 8(2): 1099~1110.
- Walsh G C, Hong Ye. Scheduling of networked control system [J]. *IEEE Control System Magazine*, 2001, 21(1): 57~65.
- 韩安太, 郭小华, 吴秀山. 温室环境控制无线传感器网络的服务质量管理[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 216~220.  
Han Antai, Guo Xiaohua, Wu Xiushan. Quality of service management in wireless sensor networks for greenhouse environmental control [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(1): 216~220. (in Chinese)
- He T, Stankovic J A, Marley M, et al. Feedback control-based dynamic resource management in distributed real-time systems [J]. *Journal of Systems and Software*, 2007, 80(7): 997~1004.

## 参 考 文 献

- 1 高飞,肖刚,潘双夏. 产品功能模块划分方法[J]. 机械工程学报,2007,43(5):29~35.  
Gao Fei, Xiao Gang, Pan Shuangxia. Method of product function module partition[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(5):29~35. (in Chinese)
- 2 Ulrich K, Tung K. A heuristic method for identifying modules for product architectures[J]. Design Studies, 2000, 21(1): 5~31.
- 3 王海军,孙宝元,魏小鹏. 基于模糊聚类的产品模块化形成过程分析[J]. 计算机集成制造系统,2003,12(9):123~126.  
Wang Haijun, Sun Baoyuan, Wei Xiaopeng. Process analysis of product modularization's generation based on fuzzy cluster [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2003, 12(9):123~126. (in Chinese)
- 4 Gu P, Hashemian M, Sosal E S. An integrated design methodology for life engineering[J]. Ann. CIRP, 1997, 46(1):71~74.
- 5 Victor B Kreng, Tseng-Pin Lee. Modular product design with grouping genetic algorithm—a case study[J]. Computers & Industrial Engineering, 2004,46(3):443~460.
- 6 游有鹏,张晓峰,王珉. 可重构机床的模块化设计[J]. 机械科学与技术,2001,20(6):815~818.  
You Youpeng, Zhang Xiaofeng, Wang Min. Modularity design for reconfigurable machines[J]. Mechanical Science and Technology, 2001, 20(6): 815~818. (in Chinese)
- 7 赵庆志,刘正坝,谷安. 电火花线切割机床可重构模块划分的理论和应用研究[J]. 机械工程学报,2005,41(9):175~179.  
Zhao Qingzhi, Liu Zhengxun, Gu An. Theoretical and applicable research of modulus division for reconfigurable wire electrical discharge machine tools[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005,41(9):175~179. (in Chinese)
- 8 祁卓娅,王建正,韩新民. 模块柔性划分方法[J]. 机械工程学报,2007, 43(1):87~94.  
Qi Zhuoya, Wang Jianzheng, Han Xinmin. Flexible module division method[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(1):87~94. (in Chinese)
- 9 Gu P, Sosal E S. Product modularization for life engineering[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 1999, 15(5): 387~401.
- 10 黄海鸿,刘志峰,王淑旺. 面向回收的产品模块化设计方法[J]. 农业机械学报,2006,37(2):144~149.  
Huang Haihong, Liu Zhifeng, Wang Shuwang. Research on methodology of modular design for recycling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(2):144~149. (in Chinese)
- 11 贡智兵,李东波,史翔. 面向产品配置的模块形成及划分方法[J]. 机械工程学报,2007,43(11):160~167.  
Gong Zhibing, Li Dongbo, Shi Xiang. Module generation and module partition method for product configuration[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(11):160~167. (in Chinese)
- 12 明加,朱才朝,冉险生. 基于特征线的复杂曲面重构技术[J]. 农业机械学报,2008,39(6):179~183.  
Ming Jia, Zhu Caichao, Ran Xiansheng. Complex surface reconstruction based on feature line [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(6):179~183. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 190 页)

- 15 Colandairaj J, Irwin G W, Scanlon W G. Wireless networked control systems with QoS-based sampling [J]. IET Control Theory and Applications, 2007, 1(1):430~438.
- 16 Feng X, Zhao W H, Sun Y X, et al. Fuzzy logic control based QoS management in wireless sensor/actuator networks [J]. Sensors, 2007, 7(12):3 179~3 191.
- 17 蒋静坪. 计算机实时控制系统[M]. 杭州:浙江大学出版社,1992.
- 18 Feng X, Longhua M, Chen P, et al. Cross-layer adaptive feedback scheduling of wireless control systems [J]. Sensors, 2008, 8(12):4 265~4 281.
- 19 郭小华. 基于无线传感器网络的无线网络控制系统研究[D]. 杭州:浙江大学,2007.  
Guo Xiaohua. Study on wireless networked control system based on wireless sensor networks [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.