

上海大学出版社

2006年上海大学博士学位论文 61



# 基于多重组合 Petri 网的 现场总线间多协议转换 系统机理研究

- 作者：陈维刚
- 专业：控制理论与控制工程
- 导师：费敏锐



上海大学出版社  
2006年上海大学博士学



# 基于多重组合 Petri 网的 现场总线间多协议转换 系统机理研究

- 作者：陈维刚
- 专业：控制理论与控制工程
- 导师：费敏锐



## 图书在版编目(CIP)数据

2006 年上海大学博士学位论文. 第 2 辑/博士学位论文编辑部编. —上海:上海大学出版社,2010.6

ISBN 978-7-81118-513-3

I. 2... II. 博... III. 博士—学位论文—汇编—上海市—2006 IV. G643.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 162510 号

## 2006 年上海大学博士学位论文

——第 2 辑

上海大学出版社出版发行

(上海市上大路 99 号 邮政编码 200444)

(<http://www.shangdapress.com> 发行热线 66135110)

出版人:姚铁军

\*

南京展望文化发展有限公司排版

上海华业装潢印刷厂印刷 各地新华书店经销

开本 890×1240 1/32 印张 278 字数 7 760 千

2010 年 6 月第 1 版 2010 年 6 月第 1 次印刷

印数:1—400

ISBN 978-7-81118-513-3/G·514 定价:880.00 元(44 册)

Shanghai University Doctoral Dissertation (2006)

# **Multiple Composition Petri Net Based Mechanism Research of Multi-Fieldbus Protocol Conversion System**

**Candidate:** Chen Weigang

**Major:** Control Theory & Control Engineering

**Supervisor:** Fei Minrui

**Shanghai University Press**

• Shanghai •

# 上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查,确认符合上海大学博士学位论文质量要求。

答辩委员会名单:

主任:	席裕庚	教授,上海交通大学	200030
委员:	顾幸生	教授,华东理工大学	200237
	范 锐	教授,上海自动化仪表研究所	200233
	董德存	教授,同济大学	200092
	应启夏	研究员,上海理工大学	200093
导师:	费敏锐	教授,上海大学	200072

评阅人名单:

<b>席裕庚</b>	教授, 上海交通大学	200030
<b>应启夏</b>	教授, 上海理工大学	200093
<b>陈启军</b>	教授, 同济大学	200092

评议人名单:

<b>何国森</b>	教授, 上海大学	200072
<b>付敬奇</b>	教授, 上海大学	200072

## 答辩委员会对论文的评语

陈维刚同学的博士学位论文《基于多重组合 Petri 网的现场总线间多协议转换系统机理研究》，针对工业控制网络中多种协议难以兼容的问题，以三种典型的现场总线为对象，研究了多协议转换系统的模型建立和性能分析问题。论文选题具有重要的理论意义和实际应用价值。

论文取得了下列创新性研究成果：

(1) 提出了多重组合 Petri 网的概念，定义了其状态不变性和行为不变性，分析了不同组合情况下多重组合 Petri 网的有界性、活性、状态不变性和行为不变性。

(2) 针对 MODBUS/TCP、DeviceNet、Profibus-DP 现场总线协议的通信过程，通过对其状态机的统一描述，建立了各总线结构相似的通信模型，并基于 S-多重组合 Petri 网，得到并验证了多协议转换系统的原理模型。

(3) 将随机时间因素引入变迁，得到了多协议转换系统的性能模型，分析了多协议转换器的利用率和吞吐率，与实际测试得到的结果相比较，得到了系统性能随负载变化的规律，并提出了能够优化系统性能的负载配置方案。

(4) 提出了多协议转换器的设计方案，并构建了能够同时兼容工业以太网和多种现场总线的小型过程控制系统，取得了良好的社会经济效益。

论文表述清晰流畅、写作规范，表明作者具有坚实宽广的理论基础和系统深入的专业知识，有很强的独立科研能力。答辩过程中回答问题正确。

## 答辩委员会表决结果

经答辩委员会无记名投票,一致同意通过陈维刚同学的博士学位论文答辩,并建议授予工学博士学位。

答辩委员会主席:**席裕庚**

2006 年 2 月 22 日



## 摘 要

现场总线和工业以太网技术的发展给工业控制网络的发展带来了新的机遇,但是也带来新的问题和挑战。工业通信网络协议的多样性给生成厂商和用户提供了广阔的生存空间和应用空间,但同时也造成了多标准共存的混乱局面。为了解决上述问题,既要顾及多方的商业、技术利益,又要推动这一领域快速、有序地发展。能够实现多个工业通信网络兼容的多协议转换技术是一个有效、实用的解决方案。

鉴于现场总线协议的多样性,本文选择已获得广泛应用的 MODBUS/TCP 工业以太网协议和在设备层具有代表性的 DeviceNet 现场总线、Profibus-DP 现场总线作为研究对象,深入剖析了各个协议的报文通信过程,基于多重组合 Petri 网理论和随机高级 Petri 网理论,建立了多协议转换系统原理模型和性能模型,并从理论和实验两个方面对多协议转换系统的性能进行了分析。然后以一小型锅炉为对象,以多协议转换器为核心设备,构建了能够兼容多种工业通信网络的小型过程控制系统。主要取得以下研究成果:

(1) 提出了多重组合 Petri 网的概念,指出了结构相似的多个 Petri 网模型可以基于具有相同作用的公共库所或公共变迁实现组合,为多协议转换系统原理模型的建立奠定了理论基础。

(2) 给出了多重组合 Petri 网的两个特有性质——状态不变性和行为不变性的定义,并分析了在不同组合情况下多重组合 Petri 网的有界性、活性、状态不变性和行为不变性。提出了

在不同组合情况下,多重组 Petri 网满足以上性质的充要条件,为多协议转换系统原理模型的验证提供了依据。

(3) 以 MODBUS/TCP 工业以太网协议、DeviceNet 现场总线协议和 Profibus 现场总线协议的通信过程为切入点,将各个通信状态机统一成通信准备、报文通信和通信断开三个阶段,建立了各个总线的通信模型。基于结构相似的各个总线通信模型,以公共报文缓冲区为公共库所,建立了 S-多重组 Petri 网模型,从而得到了多协议转换系统原理模型,并验证了原理模型的正确性。

(4) 基于多协议转换系统原理模型和具有标识变量随机高级 Petri 网理论,将随机时间因素引入原理模型的各个变迁,得到了多协议转换系统性能模型,并基于性能模型,定性地分析了多协议转换器的利用率和吞吐率。基于对实际系统的测试数据,定量地分析了系统在不同情况下的吞吐率、丢包率,并对分别采用这两种方法得到的分析结果进行了比较。结合基于性能模型的分析结果和基于系统测试的分析结果,得到了随负载变化多协议转换系统的性能变化规律。

(5) 提出了多协议转换器的设计方案,详细说明了多协议转换器的软、硬件构成,构建了能够同时实现 MODBUS/TCP 工业以太网与 DeviceNet 现场总线间以及与 Profibus 现场总线间协议转换的多协议转换器。

(6) 以多协议转换器为关键设备,以自主研发的带有工业以太网接口、DeviceNet 和 Profibus 现场总线接口的智能单元作为现场设备,以实现工业以太网客户机节点功能的上位机作为监控设备,以一小型锅炉为对象,构建了能够同时兼容 MODBUS/TCP 工业以太网、DeviceNet 现场总线和 Profibus

现场总线的小型过程控制系统。上述成果在冶金及低压电器行业得到实际验证,能满足用户的实际需求,提升了用户产品的技术构成,促进了现场总线技术的推广和应用。多协议转换系统荣获了 2005 年上海市科技进步二等奖,并且在 2004 年第六届上海国际工业博览会上荣获了创新奖,创造了广泛的社会经济效益。

**关键词** 多重组合 Petri 网,现场总线,工业以太网,多协议转换,性能分析

## Abstract

The development of fieldbus and industrial Ethernet is very advantageous for industrial control networks, nevertheless it results in some new problems and challenges. The diversity of industrial communication networks provides broad living and applied space, but at the same time it leads to a mess of multiple standards. The above problems are waiting to be solved, moreover, the extensive interests of commerce and technology have to be considered and the development of this technology field should be promoted rapidly. According to these factors the technology of multi-protocol conversion is effective and practical.

In this paper, the MODBUS/TCP industrial Ethernet, which is applied widely, and DeviceNet and Profibus-DP fieldbuses, which are representative device layer fieldbuses among multiple fieldbus standards, were researched objects. The message communication processes of these protocols were analyzed deeply and the principle and performance model of multi-protocol conversion system were made. Further the performance of multi-protocol conversion system was analyzed as to theory and experiment. Finally a small process control system, in which the core device was multi protocol converter and the controlled object was a small boiler, was

constructed. The main contributions are as follows:

1. The conception of multiple composition Petri net was presented and it was supposed that multiple similar Petri net models could be composed based on public places or public transitions, which behaved similarly. The above conception laid theoretical foundation for principle model of multi-protocol conversion system.

2. Two specialized conceptions, namely, state constancy and behavior constancy were presented. Under different composition situations, the boundness property, liveness property, state constancy and behavior constancy were all analyzed and the necessary and sufficient conditions for above properties were proposed. These conclusions guaranteed the correctness of principle model of multi-protocol conversion system.

3. According to the communication processes of MODBUS/TCP industrial Ethernet, DeviceNet, and Profibus fieldbuses, all communication state machines were uniformed into three stages, namely communication preparation, message communication and communication abort, and communication models of every protocol were made. Based on these communication models, the S-multi conversion Petri net model, in which the public message buffer is public place, was made, furthermore, the principle model of multi-protocol conversion system was proposed and the correctness was proved.

4. Based on principle model of multi protocol conversion

system and theory of stochastic high level Petri net with marking variables, by integrating stochastic time factors into transitions, the performance model of multi protocol conversion system was presented. By applying this performance model, the qualitative analysis of utilization ratio and throughput ratio were performed. Furthermore, the quantificational analysis of throughput and package loss ratio was performed based on practical test data. According to above analytical and comparative conclusions, the relationship of system performance vs. loads was proposed.

5. The design theme and software and hardware structure of multi protocol converter, which can perform protocol coversion function among MODBUS/TCP industrial Ethernet, DeviceNet and Profibus fieldbuses, was presented.

6. A small process control system, in which MODBUS/TCP industrial Ethernet, DeviceNet and Profibus fieldbuses are compatible, was constructed. In this system the core device is multi protocol converter and the controlled object is a small boiler, moreover, the field devices are intelligent unit with MODBUS/TCP industrial Ethernet, DeviceNet and Profibus interfaces and the monitor is a computer functions as industrial Ethernet client.

The multi-protocol conversion technologies had been validated in metallurgy and low voltage electrical apparatus fields and the successful run shwed that these technologies could meet users' practical requirements. Furthermore, the users' products had been upgraded and the promotion and

application of fieldbus technology had been improved. In the sixth Shanghai International Industry Fair of 2004, the multi protocol conversion system was awarded creation prize, besides the system was awarded 2nd class Shanghai Science & Technology Advance Prize of 2005, undoubtedly multi protocol conversion system creates extensive social and economic benefits.

**Key words** multiple composition Petri net, fieldbus, industrial Ethernet, multi-protocol conversion, performance analysis

## 主要符号说明

$\lambda$ : SPN 模型中变迁实施速率

$L$ : 多协议转换器报文转换周期

$\eta$ : 多协议转换器利用率

$\rho_1$ : 多协议转换器对 DeviceNet 总线报文吞吐率

$\rho_2$ : 多协议转换器对 Profibus 总线报文吞吐率

$\rho_3$ : 多协议转换器对工业以太网报文吞吐率

$T_d$ : DeviceNet 总线从节点向多协议转换器发送数据的周期

$T_p$ : Profibus 总线从节点向多协议转换器发送数据周期

$T_e$ : 上位机接收数据时的查询周期

$T'_e$ : 在某一 DeviceNet 总线负载下, 为了不产生丢包现象, 上位机查询周期  $T_e$  的上限值

$T''_e$ : 在某一 Profibus 总线负载下, 为了不产生丢包现象, 上位机查询周期  $T_e$  的上限值

$T'_d$ : 在某一上位机查询周期下, DeviceNet 总线发送数据周期的下限阈值

$T'_p$ : 在某一上位机查询周期下, Profibus 总线发送数据周期的下限阈值

$T_{d1}$ : DeviceNet 总线从多协议转换器接收数据的周期

$T_{p1}$ : Profibus 总线从多协议转换器接收数据的周期

$T_{e1}$ : 上位机向 DeviceNet 总线或 Profibus 总线发送数据的周期

$T'_{e1}$ : 在某一 DeviceNet 总线数据接收周期下, 上位机向 DeviceNet 总线周期性发送数据的下限阈值

$T'_{e1}$ : 在某一 Profibus 总线数据接收周期下, 上位机向 Profibus 总线周期性发送数据的下限阈值



$T_1$ : DeviceNet 总线向上位机发送 100 次数据所需的时间

$n_1$ : DeviceNet 总线开辟的数据缓冲区

$Data1$ :  $T_1$  时间内上位机收到的 DeviceNet 总线发送的数据量

$\omega_1$ : 多协议转换系统对 DeviceNet 总线报文吞吐率

$k_1$ : DeviceNet 总线报文丢包次数

$\delta_1$ : DeviceNet 总线报文丢包率

$T_2$ : Profibus 总线向上位机发送 100 次数据所需的时间

$n_2$ : Profibus 总线开辟的数据缓冲区

$Data2$ :  $T_2$  时间内上位机收到的 Profibus 总线发送的数据量

$\omega_2$ : 多协议转换系统对 Profibus 总线报文吞吐率

$k_2$ : Profibus 总线报文丢包次数

$\delta_2$ : Profibus 总线报文丢包率

$T_3$ : 上位机向 DeviceNet 总线发送 100 次数据所需的时间

$T_4$ : 上位机向 Profibus 总线发送 100 次数据所需的时间

$n_3$ : 工业以太网开辟的数据缓冲区

$Data3$ : 在  $T_3$  时间内 DeviceNet 总线收到的上位机发送的数据量

$\omega_3$ : 上位机向 DeviceNet 总线发送数据时多协议转换系统对工业以太网报文吞吐率

$Data4$ : 在  $T_4$  时间内 Profibus 总线收到的上位机发送的数据量

$\omega_4$ : 上位机向 Profibus 总线发送数据时多协议转换系统对工业以太网报文吞吐率

$k_3$ : 上位机向 DeviceNet 总线发送数据时工业以太网报文丢包次数

$\delta_3$ : 上位机向 DeviceNet 总线发送数据时工业以太网报文丢包率

$k_4$ : 上位机向 Profibus 总线发送数据时工业以太网报文丢包次数

$\delta_4$ : 上位机向 Profibus 总线发送数据时工业以太网报文丢包率