

網路控制系統仿真平臺的研究

Research on Simulation Platform of Networked Control System

尹遜和 Xun-He Yin, 崔慶權 Qing-Quan Cui

北京交通大學電子信息工程學院

xhyin@bjtu.edu.cn, modic@163.com

摘要

隨著網路控制系統(NCS)研究的深入,對於NCS的仿真平臺的研究也引起了廣泛的關注。NCS是同時具有時間特性和事件特性的一個混雜系統,在仿真的研究上存在一定的難度。本文利用現有的Matlab中Simulink和Stateflow兩個視覺化仿真工具,提出了一個MS2仿真方法的設計思想,並從混雜系統的角度論證了MS2仿真方法的可行性。本文所提出的網路控制系統的MS2仿真方法是一個開放式NCS仿真平臺,突破了現有的黑箱仿真環境的限制,為網路控制系統的仿真研究提供了一個新的研究思路。

關鍵字: 網路控制系統、混雜系統、Simulink、Stateflow、MS2。

Abstract

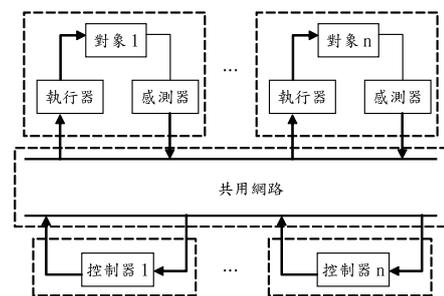
With the further research of Networked Control System (NCS), research on simulation platform of NCS has been attracting significant attention. NCS is a hybrid system aggregating time and event, which brings some difficulties in the research of NCS simulation. In this paper, a novel NCS simulation called MS2 with Simulink and Stateflow tools is proposed. MS2 simulation method is designed, and its validity is also analyzed which proves that MS2 method is effective from the perspective of hybrid system. The proposed NCS simulation method is an open simulation platform, which breaks the restriction of simulation environment based on "Black box", and provides a novel idea for simulation research of NCS.

Keywords: Networked Control System, Hybrid system, Simulink, Stateflow, MS2.

1 緒論

網路控制系統是一個融合了電腦技術、控制技術和通信技術的分散式系統,如圖一所示。NCS通過即時共用網路形成閉環的回饋控制系統,將不同地域的感測器、控制器、執行器等分佈節點通過網路連接起來,從而形成了結構更加靈活,功能更為強大的控制體系。這種基於網路的控制方式通信速率高、佈線方便、系統組建和組態靈活、網路資源分散且共用,尤

其適於複雜物件的控制。此外,這種控制方式可以大大節省相關的安裝、調試、組態和維護的時間及費用。因此網路控制系統在移動感測器網路,遠端手術,通過網路的觸感協作,自動公路系統和無人飛行器[1]等領域都有著廣泛的應用。



圖一 網路控制系統的一般結構

控制系統引入網路帶來很多優點的同時,由於網路的存在,也引入了一些之前沒有出現過的問題,這些問題主要包括[1]:網路時延、資料包丟失、資料的單包和多包傳輸、資料包的時序錯亂、帶寬約束、網路調度、時變的傳輸週期、節點的驅動方式等。此外,NCS還是既具有時間特性又具有事件特性的混雜系統,因此,在仿真的研究上存在一定的難度。如何有效逼真地對複雜的通信系統進行建模仿真是一個富有挑戰性的課題,網路仿真的種種困難隨著OPNET、NS2 (Network Simulator, Version 2)等網路仿真工具的誕生而解決了許多問題。但仍然有很多問題需要研究和解決,如何搭建一個好的NCS的仿真平臺,具有重大的研究意義。本文題提出了一個MS2的仿真平臺思想,來加強和完善NCS的仿真平臺的研究。

2 NCS的仿真平臺

目前,NCS現有的仿真平臺主要有:NS2、Truetime工具箱、NCS-simu、OPNET[6]等。由於網路控制系統需要結合網路控制和資訊調度進行研究和仿真,下面主要對一些常用的NCS的仿真平臺進行介紹。

2.1 NS2

NS2 (Network Simulator, Version 2)是由美國加州大學的LNBL (Lawrence Berkeley National Laboratory)網路研究組於1989年開發的一個網路仿真軟體,具有良好的開放性和擴展性。利用它可以構造各種網路的拓撲結構、實現網路協定、測試網路性能,可以實現

協定和演算法的擴充及驗證[5]。該仿真軟體由於是一種對網路技術的源代碼公開的、免費的軟體模擬平臺，主要是在Linux系統下運行，也有Windows系統下運行的版本，但是安裝比較繁瑣，而且運行效率低。

2.2 Truetime 工具箱

Truetime 工具箱是由瑞典Lund工學院研究出的網路控制系統仿真工具，它為NCS的理論的仿真研究提供了簡易可行、功能齊全的研究手段，它作為Matlab中的一個工具箱能和Matlab套裝軟體中的其他控制模組相結合，簡便而又快速的搭建即時網路控制系統的仿真模型，目前Truetime工具箱的最新版本是1.5。

2.3 NCS_simu

英國Sussex大學工程與設計系Dr. T. C. Yang開發了網路控制系統軟體仿真包NCS_simu，該軟體主要適合用於在網路統計特性已知的情況下，網路控制系統的分析仿真研究[5]。

如上所描述的幾種NCS仿真平臺中，NS2是源代碼公開的、免費的軟體模擬平臺，對網路的仿真效果好，但在控制演算法的仿真上比較薄弱；Truetime工具箱對網路控制系統的調度和控制的聯合設計具有較好的仿真效果，但是在網路模組的仿真中，是一個黑箱仿真，無法得到網路的具體運行狀況；NCS_simu適合用於在網路統計特性已知的情況下NCS的分析仿真研究，但對實際網路的時變特性的仿真效果較差。隨著網路技術和控制技術的不斷發展，對NCS的仿真要求越來越高，對於網路和控制的仿真不能局限於現有的仿真方法，需要創新和完善NCS的仿真方法。下面將分3節分別介紹本文所提出的MS2仿真方法的現有基礎、可行性以及設計思想。

3 Stateflow和Simulink關係

本文提出的MS2仿真方法的基礎就是Matlab中的Simulink和Stateflow工具箱，兩者都是視覺化圖形模組。Matlab是一個高度集成的軟體系統，集科學計算、圖像處理、聲音處理於一體，具有極高的編程效率。

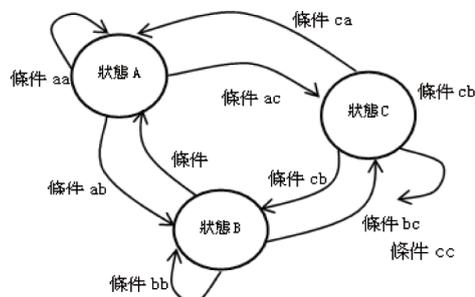
3.1 Simulink

Matlab提供的Simulink是一個進行動態系統建模、仿真和分析的套裝軟體，它具有模組化、可重載、可封裝、面向結構圖編程及視覺化等特點，用戶可以方便定制和創建自己的模型、模組，這樣可大大提高系統仿真的效率和可靠性。它的出現可以使仿真工作以結構圖的形式加以進行，且採用分層結構。從仿真角度講，Simulink模型不僅能讓用戶知道具體環節的動態細節，而且能夠讓用戶清晰地瞭解各種器件、各子系統、各系統間的資訊交換，掌握各部分之間的交互影響，同時可以借助類比示波器將仿真動態結果加以顯示，因而仿真結果過程十分直觀。

3.2 Stateflow

Stateflow是一個為建模和仿真事件驅動系統集成的設計工具。它採用面向物件的編程思想：即屬性、事件和方法，用圖形方式描述物理模型。它以獨特的方式將有限狀態機理論、流程圖和狀態轉移概念等結合起來，能夠建模和仿真離散事件系統。Stateflow的仿真原理是有限狀態機理論FSM (Finite State Machine)。所謂有限狀態機是指系統中存在的可數的狀態，在某些事件發生時，系統從一個狀態轉換成另一個狀態，故有限狀態機又稱事件驅動的系統。

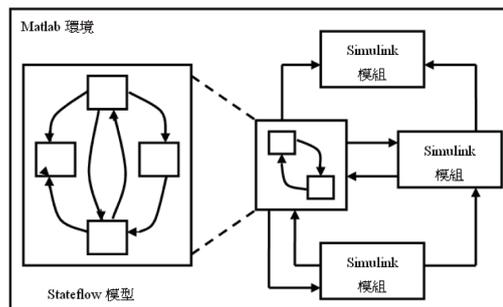
在Stateflow中，狀態和狀態轉換是最基本的元素，有限狀態機的示意圖如圖二所示。圖二中所所有3個(有限)狀態，這三個狀態間的轉換是有條件的，其中有些狀態間是相互轉換的，A狀態是自行轉換的。在有限狀態機還表示了狀態遷移的條件和事件[2]。



圖二 有限狀態機示意圖

3.3 Stateflow與Simulink仿真關係

Stateflow內嵌於Simulink，與Simulink環境的集成、交互也極其方便。每一個Stateflow圖在Simulink模型中都被看作一個獨立的模組，這個模組可以同其他的模組交換資料、信號和事件，Stateflow通過函數調用來觸發Simulink模組的執行。Simulink是仿真連續模型的強大工具，Stateflow是仿真離散模型的有力手段，具體關係如圖三所示[3]。



圖三 Stateflow/Simulink/Matlab關係

4 MS2仿真方法的可行性

針對目前網路控制系統的現有的仿真平臺的研究情況，並基於以上有關Simulink和Stateflow關係的介紹和分析，本文應用了這兩個視覺化環境設計的網路控

制系統的仿真平臺，故命名本文所設計的仿真環境為Matlab-Simulink-Stateflow，簡稱為MS2。針對MS2仿真方法，下面將對這個方法進行可行性分析。

4.1 混雜系統的基本概念

混雜系統是一種包含時間和事件的混合系統，在自然界中，「混雜系統 (Hybrid System, HS)」指的是一類其行為由不同特性的進程或實體來定義的系統 [4]。在本文中，混雜系統則可以理解為由連續和離散特性交互混雜而形成的系統，而混雜動態系統 (Hybrid Dynamical System, HDS) 的提出則具有很強的工程背景，本質上是現代電腦等數位控制技術滲透到連續製造和連續處理系統的產物。

過去研究混雜系統時，離散事件動態部分是從時間動態部分中分離出來並且進行單獨研究，前者通過自動機或Petri網模型（還有PLC邏輯描述等）來研究，而後者通過微分或差分方程來研究。由於混雜系統既包含連續變量過程又包含離散事件過程，並且他們又交互作用，所以建立一種模型來精確的描述這樣的混雜系統的動態行為是重要，而且是必需的。

4.2 可行性分析

首先由於物理被控物件與電腦之間的相互作用，而且網路本身混合了事件驅動和時間驅動的通信協議；網路控制系統中又存在時鐘不同步的網路節點，量化的感測器資料約束了網路的通信量，同時符號控制指令可以簡化設計和操作，因此網路控制系統實質上是一個混雜系統 [8]。

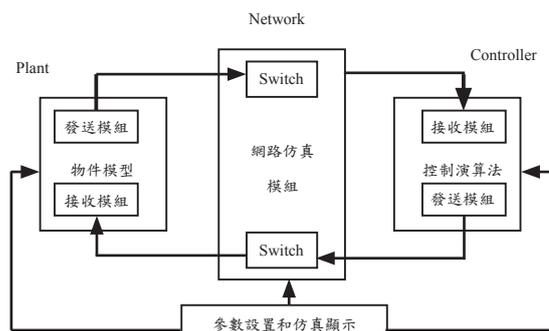
時間尺度分離 (Time-scale separation)、大型系統以及遞階控制的抽象設計要涉及到混雜動力學的問題，電腦的即時軟體與外部環境的相互作用使得電腦系統具有混雜的特性；另外，開關控制、最優控制、批量控制、監督控制等很多控制策略本身也是混雜的。因此採用混雜控制理論對網路控制系統進行建模和控制能夠比較準確的反映網路控制系統的動態特徵，有利於網路控制系統的控制器的設計。

由於Simulink對於連續和離散時間系統能夠進行較好的模型的建立和仿真，Stateflow是一個為建模和仿真事件驅動系統集成的設計工具，特別適合於對離散事件系統的建模和仿真。因此把兩者結合起來，就能夠較好的對混雜系統進行較好的建模和仿真，由於網路控制系統本身就是一個混雜系統，因此本文所設計的基於Matlab、Simulink和Stateflow的MS2的仿真方法是可行的。

當然這只是對NCS的仿真的一個新的想法和設想，在網路環境的模擬上存在很多問題需要進一步的研究和細化。

5 MS2仿真平臺設計思想及分析

由以上分析證明瞭MS2方法仿真是可行的，下面將介紹這個MS2仿真方法的設計思想。MS2的網路控制系統的仿真原理如圖四所示。通過對圖中對網路控制系統的3個主要構成部分的設計，每一部分都可以看成一個子系統，把所有的子系統組合起來，就可以實現對NCS的仿真研究。整個NCS由網路模組、控制器模組和物件模組構成，其中這裏的物件模組包括被控物件模型、執行器和感測器。下面將分別介紹每個模組仿真的具體設計原理。



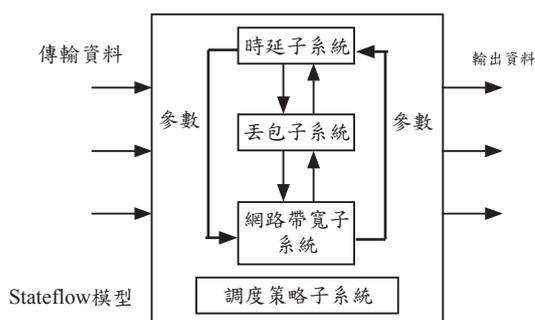
圖四 MS2仿真平臺原理

5.1 網路仿真模組的設計

由於Stateflow是一個仿真離散事件模型的有力手段，Simulink是連續或離散時間系統模型的有力工具，結合嵌入Stateflow的Simulink的模組，可以類比網路中存在的大多數情況，如網路誘導時延，丟包等多種情況，並可以結合Matlab中的M函數的編程，以及外部介面對接的C、C++等工具，實現更為全面的仿真環境。

在NCS中的網路模組的資料傳輸部分，可用如下網路模組結構原理圖五進行設計，由於網路的引入，將會引起網路誘導時延，資料包的丟失，以及網路帶寬有限等問題，這是網路控制系統需要解決的一大問題之一。

下面我們主要考慮只存在時延，資料包丟失和網路帶寬的簡單網路進行設計。所設計的網路部分的原理如下：

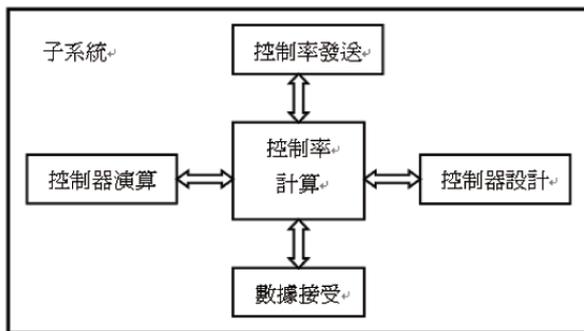


圖五 網路仿真模組設計的原理

- (1)應用Stateflow建立一個多輸入多數出系統，需要通過網路傳輸的資料從輸入端輸入，經過網路傳輸後對應的資料從輸出端輸出，並結合不同的情況和網路種類採取的調度策略，以及存在的時延大小的情況進行網路參數的設計和選擇；
- (2)分別利用Simulink建立圖五中的四個子系統，每個子系統中充分結合Stateflow和Simulink模組中現有的控制項，進行每個部分的模擬；
- (3)根據不同的網路環境，選擇不同的網路參數，以及四個子系統間的轉換關係，並通過調度子系統，實現即時的網路調度。

5.2 控制器的仿真

控制器的仿真設計相對簡單，跟一般的Matlab對一般控制系統的仿真相似。在這可以根據不同的控制演算法的要求，選擇Simulink視覺化模組建模，或是通過編寫Matlab的m函數進行控制演算法的實現。



圖六 控制模組設計的原理圖

控制模組設計的原理如圖六所示，通過設計不同的控制演算法，實現不同情況控制要求。網路控制系統常用的控制演算法有，PID (Proportion- Integration-Derivate) 控制，智慧控制，自適應控制，滑模變結構控制，最優控制等等。由於網路控制系統加入了網路，單純的從控制的角度來分析很難滿足系統的性能，目前通常考慮的方法是，控制與調度的聯合設計方法。

此外，執行器一般採用時間驅動，用Simulink模組即可實現對執行器的仿真，包括對數A/D，D/A轉換等。感測器一般採用的是事件驅動，因此利用Stateflow在離散事件的仿真的優勢，既可以實現對資料的採集，同樣也可以實現對資料的週期採樣，非週期採樣等。

5.3 仿真性能比較

通過本文所提出的MS2的設計思路和可行性分析研究，並與目前現有的NCS的仿真平臺的綜合對比，從網路、調度，控制以及聯合設計的四個仿真方面，來進行綜合對比，具體比較結果如表1所示。

表1 仿真性能比較

仿真比較	網路	調度	控制	聯合設計
MS2	白箱網路仿真	自行設計各種調度演算法	能添加各種控制演算法	較好，克服了以下三個軟體的各自弱點
Truetime	黑箱網路仿真	固定形式的調度策略	能添加各種控制演算法	可以，但網路部分稍顯薄弱
NCS_simu	網路特性已知的網路	簡單的調度策略	能添加各種控制演算法	可以，但要求網路特性已知
NS2	較好的仿真網路	自行設計各種調度演算法	能添加各種控制演算法	可以，但控制部分薄弱

由表1中對比，可以得出本文所設計的網路控制系統MS2的仿真方法，無論在網路、調度和控制上，還是在控制與調度聯合設計的仿真上，都能較好的實現仿真。

6 結論

由於網路控制系統本身就是一個混雜系統，加之Stateflow和Simulink相結合的方法對於混雜系統的仿真具有較好的效果，而且方便易懂，避免了很多NCS的仿真環境的黑箱限制。本文所設計的MS2仿真方法，是一個白箱形式的仿真環境，對於NCS的研究更為有利，特別是在NCS的理論研究遠遠落後於其應用進程的條件下，能夠極快的加速NCS理論的研究，MS2很有研究價值和實際意義。

NCS是網路技術、控制技術和電腦技術的交叉，所涉及的內容非常廣泛。由於本項目的研究正在進行中，MS2具體的仿真模擬、實作測試的量化數據作為比較討論之佐證、平臺的建設和細化研究將在後續的論文中進一步描述和研究。希望本文能為NCS研究提出一個新的研究思路，同時也提出了新的NCS的仿真平臺的設計思路。

基金項目

國家自然科學基金資助項目 (60872012)；北京交通大學基金資助項目 (2007XM002)。

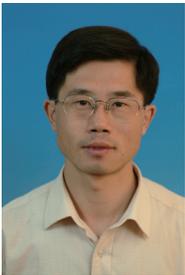
參考文獻

- [1] Hespanha, Naghshtabrizi, and Yonggang Xu., "A Survey of Recent Results in Networked Control Systems[J]," Proceedings of the IEEE, Vol. 95, No.1, January 2007, pp.138-162.
- [2] 賈秋玲、袁冬莉、樂雲鳳，基於MATLAB 7.x/Simulink/Stateflow系統仿真、分析及設計[M]，西安：西北工業大學出版社，2006。
- [3] N. Papandeu, M. Varsamou, "Transmission Systems Prototyping based on Stateflow/Simulink Models [J]," Proceedings of the 15th International Workshop on Rapid System Prototyping, IEEE, 2004.
- [4] Panos J. Antsaklis, Xenofon D. Koutsoukos, "Hybrid

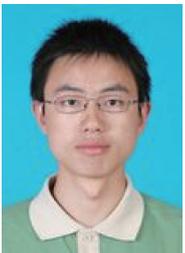
System Control[J],” ISIS Technical Report ISIS-2001-003, February, 2001, pp.10-14.

- [5] 岳東、彭晨，*Qinglong Han 網路控制系統的分析與綜合[M]*，北京：科學出版社，2007。
- [6] 王文博、張金文，*OPNET Modeler與仿真建模[M]*，北京：人民郵電出版社，2005。
- [7] M. S. Branicky, S. M. Phillips, and W. Zhang, “*Stability of Networked Control Systems[J]*,” IEEE Control Systems Magazine, 2001, pp.84-99.
- [8] D. Hristu-Varsakelis, W. S. Levine, “*Handbook of Networked and Embedded Control Systems[J]*,” Birkhäuser, 2005, pp.45-116.

作者簡介



尹遜和 (Xun-He Yin)，副教授。目前是北京交通大學電子信工程學院副教授。研究領域主要為網路控制系統及應用、感測器網路、混沌控制、混雜控制等。



崔慶權 (Qing-Quan Cui)，碩士研究生。現就讀於北京交通大學控制理與控制工程專業，主要研究領域為網路控制系統及應用、混雜控制等。

