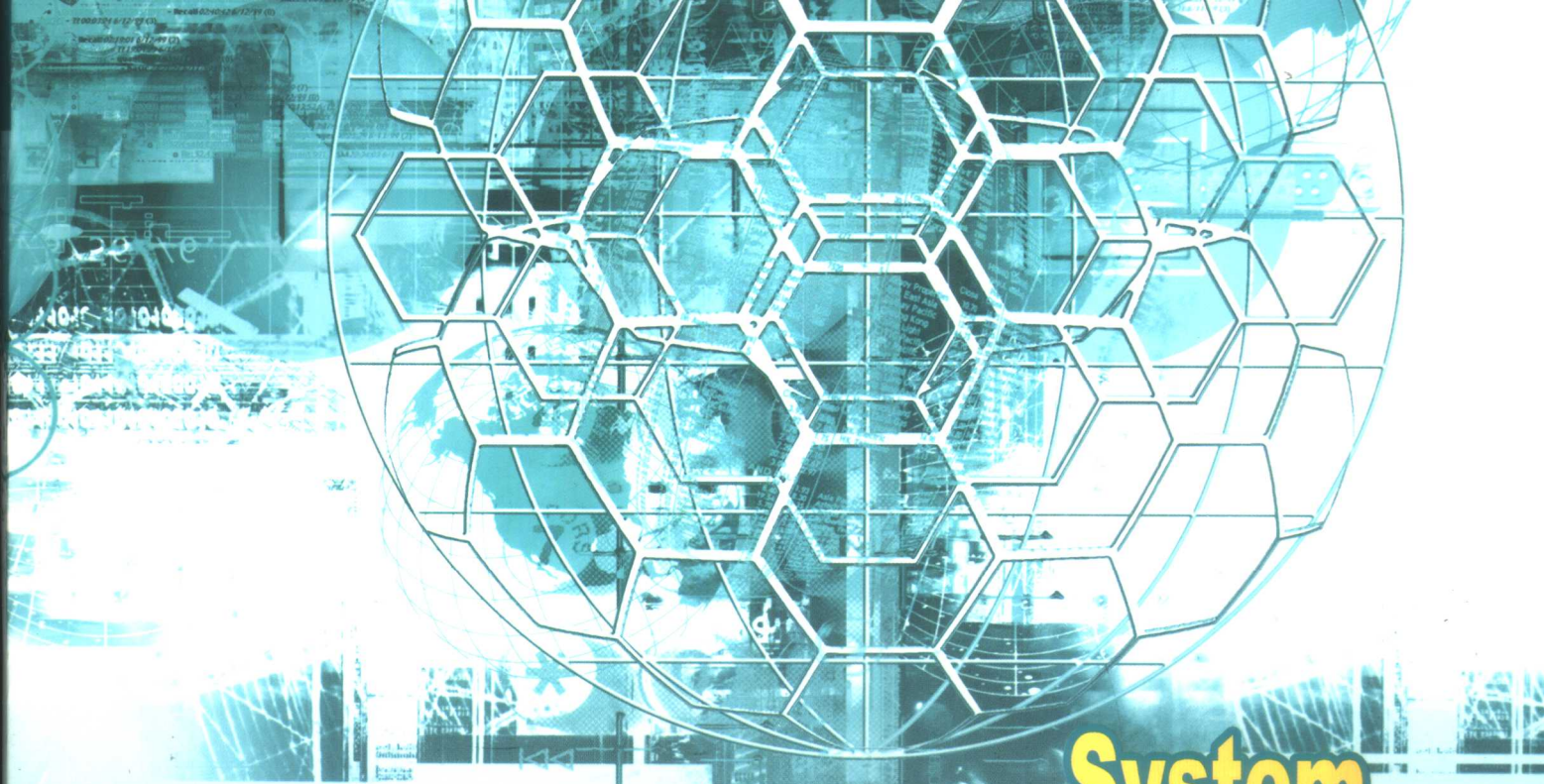




陈宗海 主编

**System
Simulation**

Technology & Application

(Vol. 8)

**系统仿真技术
及其应用**

· 第 8 卷 ·

中国科学技术大学出版社

系统仿真技术及其应用

• 第 8 卷 •

System Simulation Technology & Application

(Vol.8)

陈宗海 主编

中国科学技术大学出版社

2006 · 合肥

内 容 简 介

本书为中国自动化学会系统仿真专业委员会和中国系统仿真学会仿真计算机与软件专业委员会于 2006 年 8 月联合组织的'2006 系统仿真技术及其应用学术交流会的论文选编。

书中收录了会议论文 212 篇,是近年来系统仿真技术在航空、航天、石油、化工、能源、国防、轻工等领域中应用的最新成果,建模与仿真方法以及复杂系统新领域量子系统建模、仿真与调控等的最新进展。

本书可供科研、设计部门和厂矿企业中系统仿真技术研究和应用人员以及高等学校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

系统仿真技术及其应用. 第 8 卷/陈宗海主编.—合肥:中国科学技术大学出版社,2006.8
ISBN 7-312-01995-1

I. 系… II. 陈… III. 系统仿真—学术会议—文集 IV. TP391.9-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 087131 号

出 版 者:中国科学技术大学出版社

社 址:安徽省合肥市金寨路 96 号

网 址:<http://press.ustc.edu.cn>

发 行 部:0551-3602905 邮 购 部:0551-3602906

印 刷:合肥学苑印务有限公司

开 本:880×1230 1/16

印 张:53.5

字 数:1541 千

册 数:1—1000

版 次:2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

定 价:280.00 元

《系统仿真技术及其应用》编委会

顾 问：李伯虎

主 编：陈宗海

副主编：王正中 肖田元

编 委：王正中 肖田元

贾连兴 陈宗海

陈建华 曾建潮

丛 爽 蔡运利

写在卷首

“建模与仿真技术同高性能计算一起，正成为继理论研究和实验研究之后，第三种认识、改造客观世界的重要手段”（李伯虎院士）。随着计算机技术、通信技术等高科技的发展，伴随着信息产业革命的到来，使得“仿真”这个古老而又年轻的学科更加朝气蓬勃地播散着无限青春的活力。

信息社会化的进程，迫使系统仿真技术面对丰富多彩的客观世界。信息化和信息社会化，使人类处理的系统规模与复杂性日益增长，人类对系统的认识和研究逐步深化，可利用的信息资源的影响已具有全球的性质。这个信息社会化和高科技迅猛发展的背景，推动了系统仿真方法学的革新、发展与进步。

近年来，建模与仿真方法学致力于更自然地抽取事物的特征、属性和实现其更直观的映射描述，寻求使模型研究者更自然地参与仿真活动的方法。现阶段依托包括网络、多媒体等在内的计算机技术、通信技术等科技手段，通过友好的人机界面构造完整的计算机仿真系统，提供强有力的、具有丰富功能的软硬件营造的仿真环境，使开放复杂巨系统的模型研究，从单纯处理数学符号映射的计算机辅助仿真（CAS），强化包括研究主体（人）在内的具有多维信息空间的映射与处理能力，逐步创建人、信息、计算机融合的智能化、集成化、协调化高度一体的仿真环境。可见，信息时代的来临正在孕育着系统仿真方法学某些新的突破。正待开发的系统仿真方法和仿真技术广阔无垠，需要我们从事系统仿真的技术工作者付出艰辛的劳动，使仿真这门迄今为止最有效的经济的综合方法和推动技术进步的战略技术在现代化进程中发挥更大的促进作用。

由中国自动化学会系统仿真专业委员会、中国系统仿真学会仿真计算机与软件专业委员会主办的‘2006 系统仿真技术及其应用学术会议，共收到论文 290 篇，录用 212 篇。其中，大会报告 8 篇；建模与仿真技术 51 篇；系统仿真 45 篇；航天与装备仿真 39 篇；控制决策及其它 53 篇。另有两个专题：定性仿真 7 篇；量子系统建模、仿真与调控 9 篇。收录的论文涉及广泛的领域，内容丰富多彩，反映了当前学科发展的方向和技术应用的水平。这次学术交流，无疑将对我国系统仿真学科和仿真技术的发展起到积极的促进作用。

编委会

2006 年 7 月于中国科学技术大学

目 录

第一部分 大会报告

1. 基于 HLA 的协同仿真技术研究与实现.....肖田元 林 宇 (001)
2. 群体行为仿真与群体智能算法.....曾建潮 崔志华 (010)
3. 海军兵种战术训练模拟系统建设研究.....陈建华 李刚强 (018)
4. 多 Agent 系统形式化建模方法学.....蔡远利 于振华 王瑞峰 (027)
5. 作战仿真及其发展.....贾连兴 单维峰 鲁云军 翟成功 刘 华(036)
6. 基于李雅普诺夫稳定性理论的量子反馈控制.....匡 森 丛 爽 (041)
7. 铁水运输仿真系统研究.....崔建江 徐心和 (048)
8. 仿真技术在高等教育中的应用.....黄元亮 (055)

第二部分 建模与仿真技术

9. Ad Hoc 网络路由协议的仿真与分析.....袁培燕 李腊元 (059)
10. 基于 Y 形阵的高分辨空时二维 DOA 估计.....谢维华 左继章 (064)
11. 基于多智能体的海战仿真模型研究.....张 伟 赵晓哲 姜 伟 徐建志 (069)
12. 基于 OpenGL 的三维地质模型的设计和实现.....杨 芳 原 松 (073)
13. 虚拟制造技术及其在制造业中的应用研究.....唐 克 孙来彬 (077)
14. 批均值法对稳态仿真的结果分析.....唐 克 孙来彬 (080)
15. 溢流阀——管道系统的仿真研究.....成兆义 (082)
16. 虚拟现实复杂建筑型体的建模方法的研究.....林国伟 孙劲光 (086)
17. 基于 Agent 的建模与仿真模型校核与验证探讨.....廖守亿 戴金海 (089)
18. AeroSim 在飞行控制系统设计中的应用.....李怡勇 沈怀荣 (093)
19. 基于 BP 神经网络的飞机目标识别方法研究.....陶志国 姜一晖 柳 鹏 (097)
20. 基于小波变换的图像去噪.....侯培国 赵 静 刘 明 (101)
21. 基于拓扑优化的筏形基础传力途径仿真.....兰 倩 杜永峰 李 慧 (104)
22. 矿山三维地形生成技术的研究.....张永库 孙 宁 (107)
23. 基于多智能体的通信作战指挥系统仿真模型研究.....王晓薇 谈 园 杨 莉 (110)
24. 对复杂系统建模与仿真的几点重要思考.....刘兴堂 刘 力 (114)
25. 电站最小费用 MATLAB 优化仿真.....冯 雷 孟祥萍 (118)
26. 基于层次包围盒的碰撞检测算法研究.....董向阳 张佐刚 (122)
27. 3dsmax 和 Multigen Creator 结合建模探讨.....肖 琼 (125)
28. 基于 MAS 仿真的蜈蚣博弈分析.....徐春林 王 愚 陶 钰 姜 颖 张秋月 (129)
29. 800MW 火电机组超临界直流锅炉的数学模型与仿真研究.....余圣方 (133)

30. 一种基于现代 GPU 的大地形可视化算法·····潘宏伟 李 辉 廖吕闻 曾安祥 (137)
31. 汽车 ABS 控制系统的建模与控制算法仿真·····李艳彩 杜太行 刘春怡 韩冬冬 陈 杨 (143)
32. 基于功率倒置阵的 LCMV 算法·····王 磊 胡永辉 华 宇 (148)
33. 一种自适应的联合树算法·····刘俊娜 张佑生 (152)
34. 联合战役通信模拟多分辨率建模研究·····鲁云军 黄建华 (156)
35. 联合作战模拟系统通信行动评估模型的建立·····王梦麟 周 明 靳 焰 (160)
36. 战术无线 AdHoc 网络的区域 QoS 管理及 OPNET 仿真·····靳 焰 单维峰 周 明 (163)
37. 路面激励下车内噪声仿真测试与评价·····方 园 吴光强 (168)
38. GL Studio 在 Vega 场景中的应用研究·····唐金国 李治庆 黎漫斯 (172)
39. 基于军用业务特点的 IP QoS 机制研究与仿真·····顾晓丹 张 帆 (175)
40. 可用于 QoS 组播路由算法仿真的分层网络拓扑生成模型·····陈晓卉 郝应光 (179)
41. 捷联惯性导航频域算法的仿真研究·····朱 威 张 明 吴文启 (183)
42. 一种通用的面向对象战术计算模型设计·····孙 军 王梦麟 (187)
43. 基于决策树的数据挖掘模型研究·····孙向军 刘凯龙 王世鑫 庞海洋 (190)
44. 基于 GA 算法的装备保障任务区分模型·····刘 兵 朱晓博 乔 欣 (193)
45. 侦察飞行中的三维地形仿真实现·····张 波 张国锋 (197)
46. 水声对抗视景仿真中的关键建模技术研究·····胡海燕 殷勇勤 罗修波 (201)
47. 复杂社会系统的研究方法——系统模型方法·····董淑英 (204)
48. 战场环境仿真技术比较研究·····王海永 张继军 (209)
49. FDTD 建模中介质共形研究·····蓝朝晖 江中和 胡希伟 (211)
50. 基于多级 LWM 算子多属性决策方法的军事友好国家分析模型研究
·····李玉俭 司保华 傅 凝 (215)
51. 宽带噪声干扰器建模与仿真实现·····刘 淼 罗修波 (220)
52. 被动式声诱饵声学模型仿真研究·····罗修波 董晓恒 (223)
53. 货台空投系统气囊缓冲过程仿真·····王亚伟 杨春信 柯 鹏 (226)
54. 基于控制论的牛鞭效应建模与仿真研究·····王旭坪 郭瑞东 胡祥培 (231)
55. 基于 DEVS 和 HLA 的多范型模型驱动体系机构·····韩守鹏 刘 焱 黄柯棣 (235)
56. 关于个性化三维人台模型的建立·····侯莉莉 杨子田 张文斌 (240)
57. 基于.NET 反射和 XML 的数学仿真模块库重用技术·····李 玮 裴 彬 (243)
58. 一种新的修正常模盲均衡算法·····韩迎鹤 郭业才 (246)
59. 基于 DEVS 的智能体建模方法·····闵飞炎 杨 明 (250)

第三部分 系统仿真

60. 邯钢 CSP 仿真系统介绍·····柳保生 张 琳 张 强 赵艳良 (254)
61. 炮兵分队射击模拟训练系统视景仿真·····张永亮 潘金堂 谢 文 李江河 (257)

62. 并行离散事件仿真系统内核及其回退框架.....乔海泉 鞠儒生 张 锰 李 革 黄柯棣 (261)
63. 扩频系统的 Simulink 仿真.....张颖花 薛彩姣 (265)
64. 基于 Vega 的视景仿真系统中自由视点的开发.....薛军涛 贺怀清 (269)
65. 船舶操纵模拟器控制台通讯的软硬件设计.....余 枫 刘秀文 李志华 (273)
66. 基于 HLA 的防空作战视景仿真系统开发研究.....马海军 李 革 (277)
67. HLA 及其在研究传统工具协同仿真中的应用.....战玉芝 刘怀勋 李 佳 (281)
68. 基于 DCOSE 的电厂热力过程仿真模块设计.....刘树清 王 颖 张瑞鹏 (286)
69. 三牙轮钻头三维啮合计算与运动仿真.....吴泽兵 (290)
70. 基于数据的信息网络系统建模与运用设计.....刘德祥 宋 懿 刘安宇 (293)
71. 基于 DIS 的分布式作战模拟系统.....杨俊强 (297)
72. 基于 HLA/RTI 的防空 C³I 系统的设计与实现.....张亚崇 (300)
73. 防空作战训练仿真系统的设计与实现.....王新辉 郭 立 (303)
74. 离散系统仿真语言 GPSS/JAVA 的研究与开发
.....孙 健 薛 磊 吕潇婷 谷满娜 任 毅 (306)
75. 基于 DCOSE 的大型 CFB 机组仿真机设计方案.....刘建民 刘树清 (310)
76. 2D 刚体碰撞的实时模拟.....杨先卫 张甫宽 (313)
77. SIMULINK 下液压系统仿真模型库的建立.....高钦和 王孙安 黄先祥 (317)
78. 基于 VRML/X3D 的战场环境仿真研究.....王 斌 朱英浩 (321)
79. 小规模分布仿真系统网络通讯模型.....曹 力 刘晓平 (324)
80. 面向建筑智能控制的虚拟现实系统研究.....李 蔚 (328)
81. 从摄像带构建网上交互三维场景.....朱英浩 王 斌 (331)
82. 人工生命、人工社会、人工涌现的和谐仿真.....顾 佳 贺仲雄 (335)
83. 无线 Mesh 网络中路由协议的性能比较.....向 征 方旭明 (339)
84. 系统仿真技术在通信系统中的应用.....张 珏 张 玥 (343)
85. 基于 LabVIEW 的并励直流电动机起动过程仿真.....邓双城 蒋力培 焦向东 薛 龙 (346)
86. 基于多 Agent 的联合战斗仿真系统研究.....杨建池 韩守鹏 黄柯棣 (351)
87. 基于分布式交互仿真系统的控制面板评价方法研究.....张烨烨 王延斌 廖可兵 张 伟 (354)
88. .NET Web Services 的 DataSet 数据类型在 Delphi 中的处理与研究
.....王 俊 于爱荣 曹 雷 (358)
89. 标准仿真体系结构下的建模框架研究.....黄 燕 姚益平 (361)
90. 基于 HLA 的战术互联网网络管理模拟训练系统的研究吕慧芳 黄文华 刘长珍 李 建 (365)
91. 实用多通道投影自动拼接技术.....陈 桓 彭俊毅 戴树岭 (368)
92. 基于 HLA 的铁路列车运行仿真系统研究.....韩 弢 杨肇夏 刘 军 (373)
93. 基于仿真优化的集装箱堆场大门系统规划.....于 越 金 淳 霍 琳 (378)
94. 基于数据库的仿真信息管理系统的研究.....于建文 任 章 李 皓 (382)
95. 并行离散事件仿真软件 KD-PADSE 的框架设计与性能评估

-张耀程 乔海泉 李 革 黄柯棣 (386)
96. 军事通信网管理三维可视化研究.....裴 波 贾连兴 韩世刚 汪 霖 (391)
97. 基于 CTS 构建三维地形数据库研究.....贾连兴 韩世刚 裴 波 汪 霖 邢小平 (394)
98. 电压波动同步检测法的仿真.....向学军 杨 盛 刘 平 (398)
99. 人工战争: 战争仿真的新趋向.....金伟新 肖田元 胡晓峰 马亚平 (401)
100. 雪崩光电二极管应用特性的仿真研究.....席 兵 胡章芳 (406)
101. 基于离散事件仿真的信息系统性能测试方法.....沈剑峰 金 淳 霍 琳 (409)
102. 基于 NS2 网络仿真器的网络仿真研究及应用.....杨 璐 全 伟 (413)
103. 光电跟踪半实物仿真平台的研究与实现.....丁 一 毛 征 王 欢 尹丽萍 尹志新 (418)
104. 基于复杂性思维的分布式制造系统仿真方法.....陈 玮 张小花 李继耀 (422)

第四部分 航天与装备仿真

105. 基于伪卫星的提高北斗定位精度的研究.....谢维华 左继章 (426)
106. 虚拟现实在坦克机动性虚拟试验中的应用技术研究.....周云波 李宏才 闫清东 (429)
107. 对潜应召搜索战法仿真试验平台的设计与实现.....徐圣良 曹之新 陈建华 (433)
108. 对模拟化训练的几点思考.....丁 文 曹之新 陈建华 (437)
109. 某反坦克导弹模拟训练器制导系统控制信号采集研究.....陈国华 陈 伟 尚建昆 (440)
110. 航天外测数事后处理系统的设计与仿真评估.....胡绍林 许爱华 安振军 黄刘生 (443)
111. 基于 HLA 的 TUAV 侦察运用仿真研究.....罗 军 都基焱 (447)
112. 无人战斗机武器系统作战效能分析.....罗 军 都基焱 李伟芬 (452)
113. 某新型防空导弹单发杀伤概率仿真.....李建坤 张五洲 朱俊峰 杨 争 (455)
114. 仿真技术在防空导弹武器中的应用与发展前景.....陆胜勇 (459)
115. 光电对抗系统仿真研究.....闵 君 邓 晓 (462)
116. 一种基于仿真的武器装备体系结构优化新思路
.....蒯美青 温志诚 黄 诚 李 群 杨 峰 (465)
117. 反坦克导弹作战环境可视化的实现.....章卫忠 陶照耀 (469)
118. 卡尔曼滤波在分布式航天器相对状态确定中的应用.....王淑云 王元钦 陈谷仓 王天祥 (472)
119. 气浮台在卫星控制系统仿真中的应用.....李季苏 牟小刚 张锦江 (476)
120. 无人机通信信道的建模与仿真.....胡文静 (480)
121. 巡航导弹中制导律设计与仿真.....张靖男 赵兴锋 郑志强 黄柯棣 (483)
122. 基于计算机视觉的航天器图像序列仿真.....于俊伟 薛文芳 常红星 (486)
123. 火箭炮发射训练视景仿真系统的设计与实现.....杨 光 杨清文 房施东 (490)
124. 基于 OpenGL 的可视化仿真系统开发技术研究.....周伟静 沈怀荣 (493)
125. 基于 Vega 的常规导弹三维可视化仿真系统研究.....王 晔 孙 红 周晓华 王 燕 (496)
126. 深空探测器姿态大角度机动与稳定控制半物理仿真研究.....程少华 崔祜涛 崔平远 (500)

127. 装备指挥想定生成方案规范化描述·····	赵明星 黄镇圣 (504)
128. 装备指挥训练模拟系统分析与设计·····	朱晓博 蒋 南 (508)
129. 基于 HLA 的激光反无人机仿真概念设计·····	刘长海 华卫红 (512)
130. 基于 MultiGen Creator / Vega 飞艇飞行控制系统仿真技术研究·····	任 鹏 王大华 余 刃 (515)
131. 基于模型的遥操作预测算法研究·····	陈 娜 戴树岭 (518)
132. 采用 Visual C++ 开发的 GPS 信号模拟器·····	胡金辉 袁少强 (522)
133. 装备保障仿真实验室体系结构研究·····	郭兵兵 吴 莹 (525)
134. 高动态飞行器姿态解算及三维视景仿真技术研究·····	孙 逊 杜小菁 马春艳 成保栋 (529)
135. 分布式卫星编队构形连续保持控制仿真·····	郝继刚 张育林 (533)
136. 基于置信度的卫星多分辨率建模与仿真·····	郭佳子 张占月 (537)
137. 卫星性能分析与仿真技术研究·····	徐艳丽 沈怀荣 (541)
138. 航天装备体系建模与仿真技术研究·····	徐艳丽 沈怀荣 张占月 (544)
139. 航天器编队空间目标定轨半实物仿真系统·····	李新洪 张育林 曾国强 (548)
140. 军事通信网络仿真平台的设计与实现·····	段联国 程安潮 周学全 叶酉荪 (552)
141. 基于 HLA 的潜艇分布式作战仿真系统改造研究·····	陈晓波 倪 政 (556)
142. 基于 Creator 和 Vega 的航海模拟器三维视景系统开发·····	关克平 陈锦标 施朝健 (559)
143. 低频主动声纳最优探测频率仿真研究·····	战 凯 陈建华 (564)

第五部分 控制决策及其他

144. 基于磁轴承的固体火箭发动机测控系统的研究·····	魏 彰 翟江源 (567)
145. 基于 USB 总线的任意波形发生器研究·····	刘志明 李哲英 (571)
146. 某型直升机导弹制导电子箱陀螺脉冲和指令输出电路设计 ·····	张志虎 贾红光 李明哲 汪东林 (574)
147. 小分队城市作战想定编辑系统设计研究·····	张海兵 徐 诚 陈振华 马荣华 (577)
148. Improving Online Adaptation of Game AI with Imitation Learning ·····	Guohong Ji Shouhai Fang Ruiying Cai (581)
149. 状态反馈解耦控制算法研究·····	李康伟 王宏力 (584)
150. 基于相对坐标系下的舰艇避碰算法仿真研究·····	程茂泰 曹之新 郑环宇 (588)
151. 编队协同对地攻防对抗多级动态决策方法研究·····	张 莉 张 安 张永芳 史志富 (592)
152. 利用 ADAMS 仿真技术处理俯仰机构欠载问题·····	宋志安 王文馨 (596)
153. 混合遗传算法在物流配送路径优化问题中的应用·····	吴海兵 刘 萍 (599)
154. 基于遗传算法的非线性系统建模与控制·····	刘 莉 安 树 (603)
155. 基于混沌加密的 DCT 域公开水印技术·····	刘大利 刘世金 任小洪 张敬泉 (606)
156. 铁路 FSK 信号静态分析系统研究·····	苏 娟 杜普选 崔 欣 姜道勇 (610)
157. 飞机防滑刹车系统模糊 PID 控制器的设计·····	余 驰 贾玉红 (614)

158. Eclipse 插件架构分析及其对 ICA-Embedded 的支持.....李志民 (618)
159. 混合动力汽车新型智能能量管理系统开发与前景.....李启迪 周雅夫 (623)
160. 紫外荧光测二氧化硫浓度系统研究与设计.....郑德忠 刘 明 赵 静 (626)
161. 基于人工神经网络的建筑节能体系综合评价.....杨 丽 卢德华 (630)
162. 基于最优控制的汽车操纵逆动力学的仿真研究.....张丽霞 赵又群 吴 杰 (634)
163. Analysis of a New Piecewise-linear Chaotic System
.....Rui Wang Guoyuan Qi Hui Sun Xiangping Chen Fang Wen (638)
164. 一种均衡的应用层组播协议.....肖 钢 陈 越 黄平川 (643)
165. 基于 ARM 的无线传感器网络节点的设计.....仲 峰 刘从新 何 科 朱荣臻 (647)
166. 一类最小相位非线性系统的镇定.....王彦刚 董亚丽 (650)
167. 基于 CORBA 实时传输的分层网络结构的设计.....陈 筱 戴树岭 (653)
168. 轿车信息集中控制系统的可靠性研究.....李 响 李刚炎 田启华 (658)
169. 非线性规划在建筑管理中的应用.....曲晓丽 李树荣 (662)
170. 实数编码免疫算法在溶剂脱水塔软测量中的应用.....孟 科 李绍军 钱 锋 (666)
171. 基于 Struts 框架技术的缺陷跟踪管理系统的设计与实现.....王芳潇 王 俊 刁兴春 (670)
172. 基于 MTM 的个体服装纸样生成规则.....许 练 杨子田 张文斌 (674)
173. DNA 遗传算法在 M-TSP 问题中的应用.....张 雷 杨大地 刘冬兵 刘凌晨 (677)
174. 合肥电信宽带接入网规划.....胡云堂 胡社教 (681)
175. 浅析 GPRS 技术的应用.....郭晓艳 胡社教 (685)
176. 基于 ATmega128 单片机的无人机飞控系统设计与半实物仿真.....胡金辉 袁少强 (690)
177. 一种改进的 BP 神经网络学习算法及其应用.....彭斯俊 杜伟伟 (693)
178. 基于 Delphi 的 State 设计模式的实现与研究.....王 俊 刁兴春 于爱荣 敖 雪 (697)
179. 基于伴随方法的化学风险评价模式系统.....刘 峰 宋 黎 (700)
180. NGN 固网智能化在宣城电信的实现.....魏 斌 胡社教 (704)
181. 基于表决融合的高速公路事件检测算法融合.....覃频频 许登元 姚起宏 黄大明 (707)
182. 多通道显示系统的实时同步技术研究.....乔彩丽 戴树岭 (712)
183. 基于多尺度形态学滤波的 CT 图像肺结节检测算法.....魏 颖 徐心和 贾 同 赵大哲 (717)
184. 基于 PSpice 的热斑现象解决方案.....崔 岩 刘素梅 (720)
185. 基于小波特征提取的车牌定位方法.....李艳洪 邹俊忠 张 见 雷江震 (725)
186. 基于层次化双共轭梯度算法的静态 P/G 网的分析
.....苏浩航 张义门 张玉明 解 敏 满进财 (728)
187. 逆奈奎斯特阵列法在单元机组负荷控制系统中的应用研究.....于希宁 管志敏 魏文超 (732)
188. 基于 Vague 控制的安全防范大系统.....张 洋 贺仲雄 (736)
189. 系统建模分析在 LonWorks 现场总线系统优化中的应用.....张 魁 黄天成 (739)
190. 小波技术与神经网络在齿轮诊断中的应用.....田延安 王建文 杨 莉 (744)
191. 控制工程中几种自校正控制的应用及其性能对比研究.....邓 娟 丛 爽 (747)

192. 递归神经网络逼近性能的研究.....丛 爽 戴 谊 (751)
193. 基于小波分析的卡尔曼滤波校正方法.....姜 斐 熊岳山 谭 珂 郭光友 (755)
194. 基于最小二乘法的动态系统时域拟配.....耿少锋 (760)
195. 基于 PLC 的智能变频恒压供水系统.....朱 敏 (763)
196. 一种 Gray 区域表征的关键条件属性集逆向求解.....程玉胜 张佑生 胡学钢 (766)

第六部分 定性、灰色、模糊仿真专题

197. 不确定性推理中确定性的传播.....黄元亮 (770)
198. 模糊定性仿真与灰色定性仿真.....段家庆 陈宗海 (775)
199. 基于模糊综合评判的一体化联合作战能力评估模型研究.....陈芳莉 张明智 邵 勇 (780)
200. 一种基于模糊函数分析的 LFM 信号的改进方法.....向 闻 贾 鑫 秦文兵 (784)
201. 未知环境移动机器人探测中不确定性分析.....王海波 陈宗海 周露平 (788)
202. 定性仿真中关键问题分析.....李 龙 李欣欣 谢红卫 张 明 (793)
203. 视觉图像理解中的定性方法研究.....王智灵 陈宗海 周露萍 (797)

第七部分 量子系统建模、仿真与调控专题

204. “Disturbance Decoupling” Problem for Open Quantum Dynamical Systems
.....Ming Zhang Mingshan Li Weiwei Zhou Xingwei Li (801)
205. 量子系统的多时间点测量.....周薇薇 张 明 谢红卫 (806)
206. 量子神经网络在电机转子故障辨识中的应用研究.....易健雄 朱大奇 陈昕静 (810)
207. 基于量子理论的多 Agent 系统强化学习研究.....孟祥萍 苑全德 皮玉珍 (814)
208. 两能级量子系统控制场的设计与操纵.....丛 爽 郑 捷 (817)
209. 量子系统状态与 Bloch 球的几何关系.....丛 爽 冯先勇 (822)
210. 李群的一般分解及其在量子系统中的应用.....东 宁 丛 爽 (826)
211. 量子计算机——未来二十年的挑战.....李 明 陈宗海 (833)
212. 基于量子过程层析的量子系统参数测定.....吴庆林 陈宗海 (840)

基于 HLA 的协同仿真技术研究 with 实现

肖田元 林 宇

(清华大学自动化系, 北京, 100084)

摘 要: 针对 HLA 不支持在运行期修改 HLA 联邦模板, 本文提出了基于“资源管理联邦”的多联邦平台结构, 从而使仿真平台在结构标准上与 HLA 保持高度一致。本文设计实现了与 RMF 相配合的用户自定义模型 DiyModel。DiyModel 支持连续和离散事件系统的仿真。它通过封装虚拟变量和事件对象的机制, 使用户模型能够透明地与其他仿真模型进行交互。最后, 本文在 C 型臂造影系统动态特性分析的工程实例中, 综合应用了以上技术。验证了本文研究与软件实现的研究意义和实用价值。

关键词: 协同仿真; 资源管理联邦; 多联邦; 用户自定义模型

Research and Implementation on Collaborative Simulation Technology Based on HLA

Tianyuan Xiao Yu Lin

(Automation Department, Tsinghua University, Beijing, 100084)

Abstract: Because the Object Model Template of HLA federation is not able to be updated during the running period, a multi-federation system structure is constructed with Resource Management Federation (RMF), which changes the flat structure in existing simulation federation system. In order to define the interface between RMF and model adapters, the DiyModel is designed and implemented. DiyModel encapsulates the virtual variable and event objects so that user model can exchange data with other distributed models without concerning about the data mapping process. Finally, all these technology are applied to the simulation task of a C-arm angiographic system as an industry case, which proves that these research works about collaborative simulation based on RMF are useful and valuable.

Keywords: Collaborative Simulation; System Architecture; Multi-federation; Model adapter; User defined model

1 引言

高层体系结构(High Level Architecture, HLA)是新一代协同仿真体系, 以提供一种普遍适用于各类应用的标准仿真框架。由于 HLA 的军用背景, 各领域的仿真应用都需要研究如何在 HLA 的架构之内进行修改和补充, 来建立为某种典型的应用量身定做的仿真框架。90 年代以后, 对于 HLA 的研究呈现出多层次、多角度的趋势。HLA 协同仿真面临以下两个方面的问题:

(1) 单联邦体系

HLA 的联邦概念是与一次具体的仿真相对应的, HLA 体系内一个联邦执行的生灭过程就是一次具体仿真任务的运行过程。这意味着仿真任务未建立前, 仿真平台也不存在, 在这种单联邦体系下, 虽然平台以 HLA 的 RTI 作为底层通信基础, 但参与仿真的模型却无法通过 RTI 互相连通从而开始仿真运行。目前所采用的弥补方式是通过非 RTI 的方式(如 CORBA)触发仿真模型加入联邦。

(2) 不支持在运行期修改 HLA 联邦模板

HLA 标准自身不支持在运行期确定仿真联邦的组成结构。HLA 标准要求一个仿真联邦通过以联邦执行描述文件 FED 为核心的对象模型模板(OMT)来定义参与仿真的联邦成员可能创建的所有的对象及其类结构。每运行一个新的仿真任务, 需要手工修改 OMT。

本文提出了基于“资源管理联邦”的多联邦平台结构, 从而使仿真平台在结构标准上与 HLA 保持高度一致。本文设计实现了与 RMF 相配合的用户自定义模型 DiyModel。DiyModel 支持连续和离散事件系统的仿真。它通过封装虚拟变量和事件对象的机制, 使用户模型能够透明地与其他仿真模型进行交互。最后, 本文在 C 型臂造影系统动态特性分析的工程实例中, 综合应用了以上技术。

2 协同仿真平台结构

目前基于 HLA 的协同仿真平台, 一般采用单联邦结构: 平台的运行期间, 只有一个仿真任务在运行, 仿真任务所对应的 HLA 联邦使用固定不变的联邦对象模型 FOM 和成员对象模型 SOM。例如, 2002 年, 日本 Hibino

等人开发的 HLA 分布仿真环境下的制造适配器,用于连接 HLA/RTI 和其他商业化的制造系统仿真软件,参见图1。

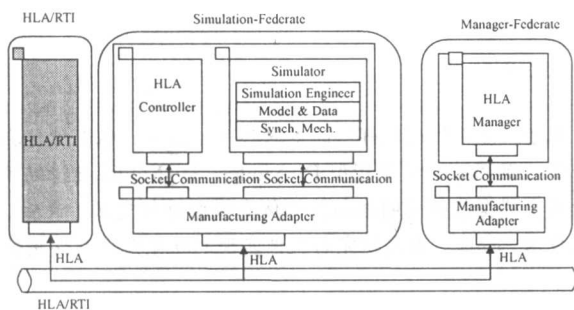


图1 Manufacturing Adapter 系统结构图

为弥补 HLA 不能动态改变联邦结构的不足,清华大学陈晓波博士等人对仿真联邦中的控制器成员进行扩展,使控制器具有双重的角色:在仿真联邦启动之前,控制器负责配置仿真联邦的联邦对象模型 FOM 和各仿真模型的成员对象模型 SOM,然后由控制器操纵各模型启动 HLA 联邦;在仿真联邦运行期,控制器依然作为仿真运行的控制核心,负责模型之间数据收发动作的同步。他们研究开发的 HLA/RTI 模型适配器实现了上述的思想,参见图2。

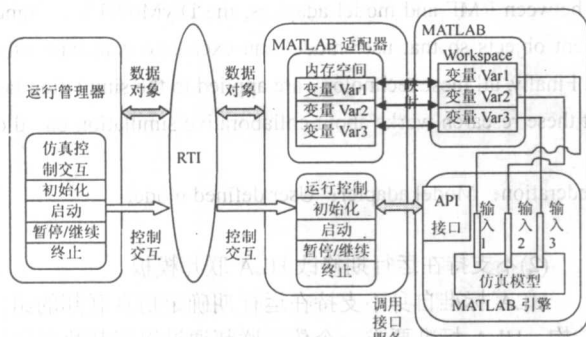


图2 可配置的仿真模型适配器

仅靠对管理器成员的扩展,还不能够使平台具备同时支持多个仿真任务的能力,这是单联邦结构的平台所不能满足的。

HLA 本身支持多个联邦的同时运行,但并不提供联邦之间的交互手段,多联邦平台要解决的主要问题有两个,一个是如何管理与维护用户所共享的模型资源,另一个是如何实现 HLA 仿真联邦 OMT 的动态配置。

为此,本文提出“资源管理联邦”的概念,其基本思想是:平台内的各节点是“资源管理联邦”的成员,每个节点,HLA 的对象模型模板 OMT 具有描述各种虚拟世界的能力,并由该成员程序负责管理本地的模型等仿真资源。在平台的运行期,资源管理联邦始终存在,各节点间则通过 HLA 联邦提供的交互机制实现模型的共享和资源的维护,所有的仿真联邦都在它的控制下生成,改变原来 HLA 联邦之间的平面关系,通过“资源管理联邦”在 HLA 的内部动态配置仿真联邦的 OMT。

平台的逻辑结构分为三层。如图3所示,自下而上,平台的最底层是 HLA 的运行支撑环境(Run-Time Infrastructure, RTI),RTI 负责平台的底层网络通信,提供与“联邦”相关的一系列服务,包括联邦的建立(Create)、加入(Join)、退出(Resign)和销毁(Destroy)。在联邦的基础上,RTI 作为一条分布式的仿真总线,采用“消息系统”范型,通过对象类属性(Object Class)和交互事件(Interaction)的发布、订购操作,使联邦内的成员发生交互,协同工作。

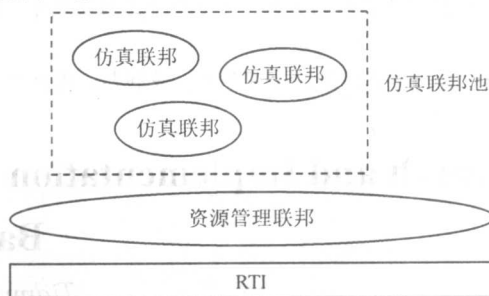


图3 协同仿真平台的基本框架

RTI 之上是资源管理联邦 RMF。每一个加入到协同仿真平台中的计算机(下文称为节点)上都运行着一个代表该节点的资源管理联邦 RMF 程序,对应于资源管理联邦的一个联邦成员。RTI 中的资源管理联邦就是由这些成员所组成。每一个 RMF 成员负责管理自身节点上的仿真资源,并与其他 RMF 成员的交互,完成以下功能:

- 平台范围内有效资源的感知与更新。
- 基于用户兴趣,寻找仿真资源。
- 向拥有相关资源的节点租用用户需要的仿真资源,以及将本地的资源租用给其他节点的用户。
- 根据用户要求,构造仿真任务对应的 OMT(主要包括联邦对象模型 FOM 和成员对象模型 SOM),生成仿真联邦。
- 监控仿真联邦的运行,负责仿真任务完成后的善后工作。

平台的第三层称为“仿真联邦池”。仿真联邦池是由那些处于活动状态的仿真联邦所组成的。每个仿真联邦对应一个仿真任务,仿真联邦的联邦成员就是参与该仿真任务的各个协同仿真模型,这些仿真模型一般是分布在平台的不同节点上。仿真联邦是在资源管理联邦的控制下创建并运行的,但仿真联邦和资源管理联邦都是普通的 HLA 联邦,对 RTI 而言,它们没有本质的区别。

3 资源管理联邦

资源管理联邦作为一个普通的 HLA 联邦,具有自身的 OMT,既联邦对象模型 FOM 和成员对象模型 SOM。不同于仿真联邦的地方在于,资源管理联邦的 FOM 中描述的是平台内存在的模型、软件等仿真资源的类别,资源管理联邦的 SOM 中描述的是该 RMF 联邦成员所感兴趣的仿真资源类别(对应于订购操作)和该联邦成员所拥

有的本地仿真资源的类别(对应于 Publish 操作)。可以看到,在描述仿真资源的基础上,由 RMF 来解决在仿真任务频繁变化时,动态完成仿真联邦集成。因此,仿真资源的描述和管理,对基于 RMF 的协同仿真平台非常重要。

3.1 RMF 的 FOM 结构与管理

资源管理联邦的 FOM 是以联邦执行描述文件 FED 的形式最终体现的。图 4 所示是一个典型 RMF 的 FED 文件的核心部分。

```
(class Resource
  (attribute Name reliable timestamp)
  (attribute Status reliable timestamp)
  (attribute Identifier reliable timestamp)
(class Model
  (attribute InVariableList reliable timestamp)
  (attribute OutVariableList reliable timestamp)
  (attribute InEventList reliable timestamp)
  (attribute OutEventList reliable timestamp)
)
(class Software
  (attribute AppName best_effort receive)
  (attribute Description best_effort receive)
  (attribute AppVersion best_effort receive)
  (attribute DistinguishedName best_effort receive)
  (attribute UserInfo best_effort receive)
)
)
```

图 4 典型的联邦 FED 文件的核心部分

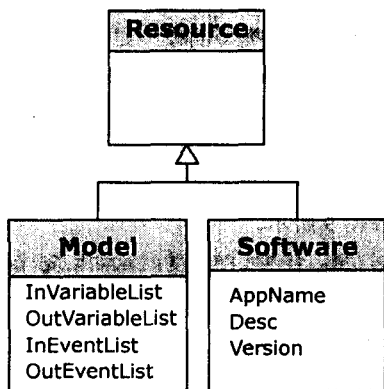


图 5 类继承关系图

上述文本所表达的意义等价于下图 5 所示的类继承关系图。可以看到,RTI 的 FED 文件对资源的描述比较简单,不包含类的数据结构信息,也不涉及对象实例的保存,因此 RMF 主要通过内部实现的一族 Resource 类继承结构来对平台内的仿真资源进行详细的描述。

3.2 成员对象模型 SOM 的生成

在仿真联邦池中,每一个仿真联邦对应于一个协同仿真任务,因此仿真任务的生成可以归结为仿真联邦的联邦对象模型 FOM 和成员对象模型 SOM 的自动构造过

程。发起仿真任务的节点称为“发起节点”,与该仿真任务有关的其他平台节点称为“参与节点”。

仿真联邦的成员对象模型 SOM 描述其中 Federation Name 是仿真联邦的名称,由“发起节点”的用户手动指定。FEDfilePath 由“参与节点”的 RMFederate 参考模型所在路径填写。模型的 PublishVariableList 等价于模型记录中的 OutVariableList, PublishEventList 则等价于模型记录中的 OutEventList。因此,生成 SOM 的主要任务是构造各参与仿真任务的模型的 SubscribeVariableList 和 SubscribeEventList。

各模型发布订购模型属性和交互事件的信息,最终体现为模型的 ModelCfg 对象。该对象的数据结构如图 6 所示。

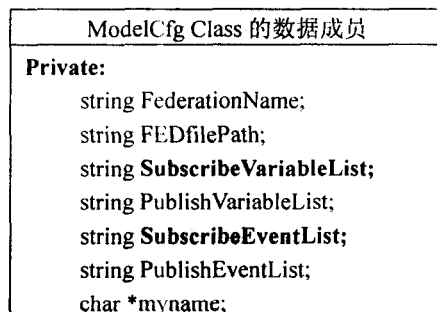


图 6 ModelCfg 的类结构

3.3 联邦对象模型 FOM 的生成

仿真联邦 FOM 的生成则相对简单,仿真任务的发起节点将这 FED 文件的核心片段通过 RTI 的交互服务发送到各参与节点,各参与节点将片段填入标准 FED 文件模板,即生成仿真任务所需的最终 FED 文件。仿真联邦 OMT 的配置过程可参见图 7。

3.4 仿真任务的运行与监控

由于仿真任务的 OMT 已经顺利生成并配置到了各个参与仿真的模型节点上,仿真任务的启动本身是比较简单的:发起节点通过 RTI 的交互服务向各参与节点发送“启动仿真任务”的消息,各参与节点启动相应模型既可。这里的问题在于多数仿真模型在运行期需要大量的计算,如果由资源管理联邦来负载这些模型的运行,将大大影响本地用户与 RMF 的交互效率。在本平台中,采用了“守护线程”的机制,使仿真模型独立于资源管理联邦运行,而同时受资源管理联邦的监控。

当本地节点需要运行一个仿真模型时,节点的 RMFederate 对象将创建一个“守护线程”,并将模型文件的路径传递给该线程。该线程被激活后首先创建一个内核事件对象 EventObject,然后线程开启一个子进程,运行仿真模型文件,并传递 EventObject 的句柄给模型进程,守护线程则通过 Wait()元操作进入休眠状态。因此,模型的运行和 RMF 的运行被分割在两个进程中,在分时间片的操作系统下,用户会感觉到两个进程在同时运行一样。

当模型仿真结束后,模型进程通过 Set() 元操作唤醒守护线程,守护线程返回后资源管理联邦便知道仿真模型已经运行完毕。

仿真运行的另一个重要问题是多个仿真任务用到同

一模型时的死锁规避。本平台采用的策略是在模型参与仿真运行时,在本地建立模型文件的镜像副本,从而使死锁产生的必要条件之一“资源的独占性”不再满足,从而回避了协同仿真中的死锁问题。

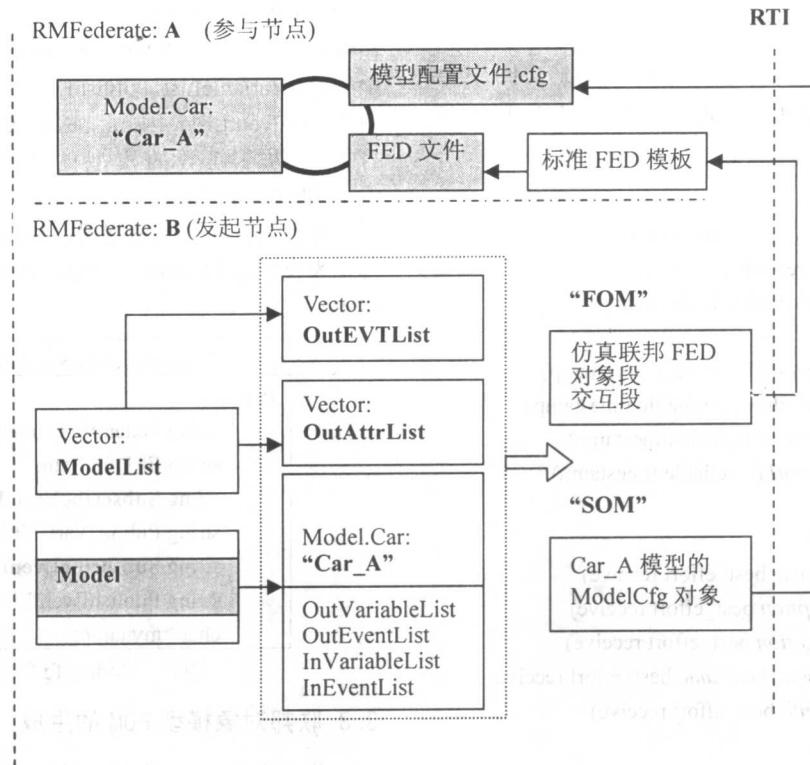


图7 仿真联邦 OMT 的配置过程

4 用户模型模板

用户模型模板用于封装各类资源,以支持 RMF。因此,在设计和软件实现上要满足以下要求:

- 接受协同仿真平台 RMF 的统一管理,不需要修改程序或重新编译,通过资源管理联邦的运行期配置,能够参与到不同的仿真任务中。
- 设计和实现统一的外部数据结构,使模型正确地完成数据交互。
- 设计和实现完善的内部数据结构,既可以用于连续系统的仿真问题,也能够用于仿真离散事件系统。

协同仿真模型彼此交互的数据对象可以分成两类:第一类是模型的属性(Attribute),另一类是模型在交互过程中触发的事件(Event)。

4.1 属性处理

用户模型属性通过一个“虚拟变量”类(Variable Class)来描述:对于模型的每一个属性,用户创建一个虚拟变量类的对象实例,这个虚拟变量记录了所对应属性的名称、类型、RTI 句柄等相关信息,并自行维护变量的取值。通过定义于虚拟变量类上的两个元操作 Put 和 Get 实现对变量值的存取,基本数据结构如图 8 所示。

在用户模型模板中,通过虚拟变量类 Variable 的一族派生类来对不同数据类型的模型属性进行描述,但用户并不直接使用这些 Variable Class 的子类,用户模型模板的核心类是 DiyModel Class,通过由 DiyModel 来控制不同数据类型的模型属性变量值的存取,使用户可以专心于实现仿真模型内部的仿真运行过程。DiyModel Class 的类结构如图 9 所示。

Variable Class

```
public:
string RTIclassid;
string RTIattr;
string localname;
ObjectClassHandle classh;
AttributeHandle attrih;
int isA();
virtual int Put(double t, char* beg)=0;
virtual ~variable() {};
protected:
int queuelen;
vtype typ;
variable(vtype tp,string name,int queuen){};
```

图8 Variable Class 的类结构

DiyModel Class 数据成员:
公有继承自 FederateAmbassador

```
private:
    const char *myname;
    string RTIclass;
    string inputstr;
    string outputstr;
    RTI::FederateHandle fedid;
    RTI::RTIambassador rtiAmb;
    RTI::ObjectClassHandle classhandle;
    RTI::ObjectHandle objecthandle;
    map<string,variable*> input;
    vector<variable*> output;
    map<unsigned int,variable*>
inputidx;
    ModelCfg cmd;
    std::ofstream errfile;
    RTIfedTime currenttime;
    RTIfedTime lookahead;
```

图 9 核心类 DiyModel 的类结构

用户自定义模型在构造完成后,将以 DiyModel 对象实例的形式参与协同仿真,因此可以看到 DiyModel 类继承了 RTI 的联邦大使类 FederateAmbassador,这使 DiyModel 的实例能够通过 RTI 与联邦内的其他模型进行数据交互。

4.2 事件处理

ModelCfg Class

```
Private:
    string FederationName;
    string FEDfilePath;
    string SubscribeVariableList;
    string PublishVariableList;
    string SubscribeEventList;
    string PublishEventList;
    char *myname;
public:
    ModelCfg(char name[]): {}
    void diskin() {}
    void diskout(char path[]) {}
```

图 10 ModelCfg 类的成员

事件对象表示参与仿真的模型之间相互传递的即时信息。从事件触发一方创建事件对象开始,一旦事件接收方完成对事件的响应操作后,事件对象既被销毁。因此,事件对象的存在时间相对短暂,在用户模型模板中对事件对象的设计和实现也与属性对象不尽相同。

本文讨论的用户模型模板把与本模型有关的事件分成两类:“输入”事件和“输出”事件。对“输入”事件,本模型是这个事件的感知者或者响应者,“输入”事件集合表示本模型能够对哪些事件做出反应。对“输出”事

件,本模型是这个事件的触发者,“输出”事件集合表示本模型能够产生哪些事件。

用户模型模板将一个事件的产生和感知、处理分开,成为两个事件对象,使它们分别隶属于触发事件的模型和处理事件的模型。具体来说,这些相关的信息是在模型配置文件 ModelCfg 对象中进行描述的,如图 10 所示。

在用户模型模板的核心类 DiyModel 中,不论“输入”或是“输出”事件,都由事件对象类 Event Class 描述,其类结构如图 11 所示。

Event Class

```
private:
    struct parameter {
        RTI::ParameterHandle RTIparamh;
        string paramname;
        vector<char> paramdata;
        vtype typ; };
    vector<parameter> paramlist;
    RTI::InteractionClassHandle RTIeventh;
    Event(string name, vector<string>
paramlist);
public:
    string localname;
    int raise();
    int (* replyevent)(const event &EVT, int
paramNum);
    int Getparam(string paramname, char
*des)
    int Putparam(string paramname, char
*src, int size)
```

图 11 Event Class 的类结构图

4.3 与 RTI 事件对象的映射

在仿真运行前,用户模型模板将由模型的核心对象 DiyModel 完成模型“输入”事件、“输出”事件与模型外部的 RTI 事件之间的映射。首先,由 DiyModel 的构造函数读入 ModelCfg 对象, DiyModel 的 run() 方法将对 ModelCfg 对象中的 SubscribeEventList 进行解析,最后,用户程序根据自身的情况调用 SetEventReply() 方法,将用户程序提供的回调函数指针填入 Event 对象的 replyevent 成员中。

用户模型模板在资源管理联邦的统一配置下实现仿真模型互联、互操作,具有可灵活定制的优势。

5 工程应用

5.1 问题描述

仿真对象是一台大型心血管造影系统,如图 12 所示。系统的核心运动部件是一个由电机驱动的多自由度 C 型机械臂,其中旋转造影动作的动态特性对系统最终的血管成像质量等综合性能指标有非常重要的影响。