



陈宗海 主编

**System
Simulation
Technology & Application**
(Vol. 10)

**系统仿真技术
及其应用**

· 第 10 卷 ·

中国科学技术大学出版社

系统仿真技术及其应用

· 第 10 卷 ·

System Simulation Technology & Application

(Vol.10)

陈宗海 主编

中国科学技术大学出版社

2008 · 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技术应用专业委员会于2008年7月联合组织展开的'2008系统仿真技术及其应用学术会议(CCSSTA'2008)'的论文选编。

书中收录了会议论文208篇,是近年来系统仿真科学与技术 in 自然科学和社会科学各领域,航空、航天、石油、化工、能源、国防、轻工等行业中应用的最新成果,以及建模与仿真方法、复杂系统新领域等的最新进展。

本书可供科研、设计部门和厂矿企业中系统仿真科学和技术的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10卷/陈宗海主编.—合肥:中国科学技术大学出版社,2008.7
ISBN 978-7-312-02379-8

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(2008)第093673号

出版发行 中国科学技术大学出版社

安徽省合肥市金寨路96号 邮编:230026

网址: <http://www.press.ustc.edu.cn>

编辑部:0551-3602900 发行科:0551-3602905

印 刷 合肥现代印务有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 880×1230 1/16

印 张 55.5

字 数 1920千

册 数 1~1000

版 次 2008年7月第1版

印 次 2008年7月第1次印刷

定 价 360.00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 丛 爽 刘兴堂

肖田元 张启信 陈宗海

陈建华 孟祥萍 贾连兴

曾建潮 蔡远利 范文慧

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，第三种认识和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，以及信息产业革命的全面展开，“仿真”这个古老而又年轻的学科更加朝气蓬勃地播洒着无限青春的活力。

信息社会化的进程，使得仿真科学与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，信息时代的到来正在孕育着系统仿真科学和技术某些新的突破。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科技工作者付出艰辛的劳动，使仿真这门迄今为止最有效、最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技术应用专业委员会主办的‘2008系统仿真技术及其应用学术会议，共收到论文300篇，录用208篇。其中，大会特邀报告5篇；建模与仿真技术54篇；系统仿真45篇；航天与装备仿真48篇；控制决策及其他47篇。另有两个专题：量子系统控制2篇；灰色定性仿真7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科学与技术的发展起到积极的推进作用。

编委会

2008年5月于中国科学技术大学

目 录

第一部分 大会报告

1. 基于 HLA/RTI 的摆式列车多学科协同仿真技术.....范文慧 肖田元 (001)
2. 群机器人系统的建模与仿真.....曾建潮 薛颂东 (012)
3. 基于复杂系统理论的信息化战争体系对抗建模与仿真.....金伟新 肖田元 (019)
4. 分层式强化学习研究进展.....陈春林 (032)
5. 分布式仿真平台及其在武器攻防对抗中的应用...陈海东 赵 雯 费智婷 张灏龙 鄢 宁 (038)

第二部分 建模与仿真方法

6. 情报通信对抗效能评估行为仿真框架和模型设计.....徐 广 杨 正 (044)
7. 基于生命轮回神经网络的径流量预测模型.....张建兴 马孝义 赵文举 屈金娜 (048)
8. 采煤机滚筒螺旋叶片仿真算法与建模.....张俊文 (053)
9. 基于 UKF 的飞机飞行状态估计.....耿建中 姚海林 (056)
10. 基于框架的 CGF 实体行为建模研究.....刘 奇 唐金国 李荣新 黄传毅 (060)
11. 声呐浮标对潜拦截搜索效能的研究.....战 凯 王 净 吴朝晖 单广超 (063)
12. 一种扩展随机有色 Petri 网及在防空作战建模中的应用.....唐立军 王小艺 王建中 (066)
13. HLA 联邦成员的移植.....刘 帅 朱英浩 李 军 (070)
14. 作战仿真模型开发中面向 Agent 的建模方法应用.....李 瑛 毕义明 (074)
15. 仿真系统模型验证方法对比研究.....董家瑞 刘 朔 王琴琴 (078)
16. 基于 WEB 架构的 GPSS/JAVA 的研究与开发.....任 毅 孙 健 (082)
17. 基于 Cr ator 的三维建模关键技术与实践.....陈国华 钱红林 杨雨迎 (088)
18. 多次级高压变压器的简化等效模型.....冉汉政 钱祖东 (092)
19. 面向任务的装备维修保障能力评估建模.....朱 波 龚时雨 谭 林 (095)
20. 基于遗传算法的最大类间方差图像分割及实现.....徐海卫 牛 朝 周 倩 (099)
21. Vega Prime 中 DOF 技术的研究和应用.....周剑勇 王跃峰 (103)
22. 标志牌文本提取的优化算法及计算机仿真.....冯 雷 孟祥萍 (106)
23. 多个移动常量力作用下简支梁的动力仿真技术.....张 军 刘 俊 李 伟 (110)
24. 船舶火灾蔓延模型的研究.....王科伦 朱全英 (113)
25. 作战系统仿真中的数据建模方法研究.....董晓明 贾连兴 (116)
26. 概率路标算法在动作规划仿真中的应用.....赵志峰 周前祥 (122)

27. 水电站继电保护整定计算一体化建模方法研究.....施 念 李咸善 (127)
28. 基于 Creator 的 3D 建模适时性优化方法.....林秋杰 段 红 (131)
29. 目标与场景的红外特性建模与仿真软件的发展.....范晋祥 岳艳军 (136)
30. 基于复杂电磁环境的情报探测模型研究.....戚学文 孙永侃 熊正祥 李雪飞 (142)
31. 基于 Creator 的四种地形转换算法研究.....陈 琼 (147)
32. 基于辅助骨骼的 2D 变形算法.....曹 玮 费广正 石民勇 龚 健 王 阳 (151)
33. 现代海战仿真模型体系研究.....李雪飞 孙永侃 戚学文 (155)
34. 动态系统建模与仿真软件柔性构建研究.....陈 波 李咸善 凡 华 (159)
35. 一种新的 CSM 过程噪声方差自适应算法.....赵波浪 蔡远利 (164)
36. 一种基于 SOA 的动态数据集成模型的研究.....王 俊 于爱荣 瞿 雷 (168)
37. 海军战术仿真中的事件关联算法研究.....贾 全 李 群 吴扬波 宋莉莉 (171)
38. 综合自然环境中的多分辨率模型.....王江云 林 琚 (176)
39. 基于 MAS 的编队协同作战决策过程形式化描述.....缪旭东 王义涛 王永春 (181)
40. 直觉模糊条件下舰艇编队防空威胁估计决策模型.....王永春 缪旭东 王义涛 (186)
41. 应力波在木材中的三维传播模型.....冯海林 李光辉 (190)
42. 正序故障分量的提取方法与仿真分析.....韩晓光 王天施 吴 云 (195)
43. 电视系统编/解码器的建模与仿真.....王亚丽 毛 征 魏 玮 王昱镔 刘园园 (199)
44. 空间目标的红外成像仿真研究.....刘海洋 陈 勇 章兰英 (203)
45. 六自由度关节式机械臂路径规划.....柴 莹 申晓留 王秀全 (207)
46. Colpitts 混沌振荡器的分岔现象仿真分析.....李春彪 蒙树森 (210)
47. 基于混沌映射的数字图像加密及仿真研究.....王 正 朱兴动 黄 葵 (214)
48. 聚丙烯腈脱单生产过程混合建模.....贾淑矿 杨慧中 张素贞 吴金生 (217)
49. 行星状星云的三维重建.....宋宇莹 (221)
50. 基于 Repast 的发电侧电力市场多智能体仿真模型.....刘西陲 沈 炯 李益国 (226)
51. 基于 GL Studio 的通信装备建模与仿真研究.....吕慧芳 陈 刚 黄文华 沈 彬 (231)
52. 听觉系统内毛细胞 Meddis 模型的分析与仿真.....成彬彬 张 海 (234)
53. 复杂地形山谷气流的动态仿真.....许丽人 张美根 李 鲲 张 吉 (240)
54. 基于连续时间系统仿真的神经网络学习算法.....蔡远利 林志民 (244)
55. 基于 UML 的面向设计概念模型研究.....刘俊邦 蔺健宁 陈 伟 (248)
56. 针对机器人觅食任务的强化学习算法及其仿真研究
.....陈宗海 段家庆 任 焱 罗杨宇 李成荣 (252)
57. 工业测控网络通信性能参数仿真研究.....杨清宇 马训鸣 葛思擘 蔡远利 (257)
58. 一种基于平方根 Unscented 卡尔曼滤波的 GPS/DR 组合定位算法.....杨 静 郑南宁 (261)
59. 基于全局光流的多目标检测与跟踪.....王智灵 路婷婷 张硕奇 陈宗海 罗杨宇 李成荣 (265)

第三部分 系统仿真

60. 虚拟校园漫游设计与实现.....谢建华 马 剑 张建茂 (269)
61. 舰船电力系统保护研究及仿真.....王 琦 付立军 纪 锋 (272)
62. 移相电抗器在舰船综合电力推进系统中的仿真研究
.....张志强 冀路明 庄亚平 吴正国 马守军 (276)
63. 基于虚拟现实技术的变电站继电保护仿真系统.....龚庆武 张茂林 李 晔 (280)
64. 非确定性环境下 HPP-DSS 系统构架与 CMAPP 模型的整数仿真.....冯德鸿 黄悦华 朱建军 (284)
65. 一种面向虚拟制造的虚拟手设计与应用.....徐 菁 刘 春 (288)
66. 基于 Web 服务的分布式仿真动态组合框架研究.....宋莉莉 张 灿 王 超 李 群 (293)
67. 基于 Matlab 的智能机器人路径规划仿真.....王菁华 崔世钢 罗云林 (298)
68. 基于 XML 的电子对抗军事想定数据交换格式设计.....李 俊 方胜良 刘湘伟 周 明 (302)
69. 虚拟训练仿真系统中虚拟人的运动控制研究.....赵 娅 杨友红 刘贤梅 解红涛 (308)
70. 虚拟变电系统中实时渲染算法的研究与应用.....赵 娅 刘贤梅 解红涛 梁金铃 (314)
71. 城市人民防空计算机仿真系统设计与实现.....李 勇 贾连兴 (318)
72. 视景仿真系统中 IRIX 与 WINDOWS 操作系统通信接口研究.....马寒菲 陈 华 (321)
73. 一种网络仿真系统的设计与实现.....陈 涛 李陶深 蓝照华 (325)
74. 螺杆钻具下三牙轮钻头的计算机仿真.....吴泽兵 杨闻达 (330)
75. 视频网格模拟器的构建与实现.....赵 宏 吾守尔·斯拉木 侯 勇 刘欣文 姚正亮 (333)
76. 基于 XML 的作战想定文件研究.....王 浩 李小将 侍 蕾 (337)
77. 太阳能光伏电池输出特性分析与仿真研究.....杜 慧 林永君 张少伟 (341)
78. 海军作战模拟系统建设标准体系研究.....陈 勇 陆勤夫 侯 雯 (345)
79. 一个基于脉冲的超宽带通信系统的计算机仿真.....杨文川 程 杰 董 超 (349)
80. 基于小波包的牵引网暂态信号分析研究.....王晶晶 徐国卿 (353)
81. 基于多样本的仿真系统的想定开发研究.....谈 斌 张己化 曲庆军 (357)
82. 基于 SIP 协议的大话务量仿真测试系统的设计与实现.....刘小锐 杨龙麟 (361)
83. 电力系统中的仿真技术与应用.....王京新 (365)
84. 板球系统的经典控制仿真研究.....吕 芳 胡林静 (368)
85. 航空搜潜若干影响因素仿真研究.....印明明 董阳泽 (370)
86. 城市交通中观仿真系统软件设计.....袁 芳 关雪梅 宋 星 (374)
87. 面向图元对象的电网仿真拓扑分析.....凡 华 李咸善 陈 波 (377)
88. 他励直流电动机电枢串电阻启动过程的分析和 MATLAB 仿真.....吴 云 康晓军 杜明娟 (382)
89. MSDVE: 一个支持动态区域调整的分布式虚拟现实系统.....许 林 谢 可 梁晓辉 (386)
90. 基于自定义建模的水电站继电保护系统仿真方法.....倪 琼 李咸善 胡翔勇 袁 喆 (392)
91. 基于轨迹灵敏度方法的水电系统动态仿真.....袁 喆 李咸善 胡翔勇 倪 琼 (396)
92. 复杂系统仿真研究与人体仿真研究内容的探讨.....董淑英 周玉生 (401)
93. 面向服务架构下的仿真运行支撑框架研究.....王 超 宋莉莉 李 群 王维平 (406)
94. 基于 Java3D 的三维实体驱动仿真.....徐 晶 刘 丽 (411)

95. 基于虚拟现实技术的无人机地面控制站系统设计·····乔志华 李一波 康绍鹏 朱 琼 (415)
96. 复杂航天器多学科建模与仿真·····朱雨童 王江云 董得志 杨延德 (419)
97. 虚拟座舱显示系统的设计与仿真·····刘 磊 王江云 (424)
98. 数字人体建模仿真方法及在三维服装 CAD 的应用·····刘载文 连晓峰 王小艺 (429)
99. 基于仿真的网络存储系统性能研究方法探索·····曹建明 贾连兴 杨 兰 曾 东 (434)
100. 基于 DirectPlay 的 RTI 设计与实现·····侯学隆 唐金国 王文恂 (438)
101. 炮兵作战训练仿真系统的设计与实现·····谢 文 (443)
102. 基于 HLA/RTI 的步兵作战仿真成员设计与实现·····饶永红 (446)
103. 结合数学形态学的 LOG 算法在嵌入式射击模拟训练中应用研究
·····杨雨迎 王 玲 陈国华 张新喜 (450)
104. 基于单片机直流调速系统的 MATLAB 仿真设计·····张 军 罗维平 (453)

第四部分 航天与装备仿真

105. 某型导弹模拟训练仓整体设计·····谢建华 马 剑 张建茂 (456)
106. 海军训练仿真中的因果追溯分析·····石 峰 杨 峰 高兴华 方志刚 (459)
107. 舰空导弹反导效能影响因素评估·····周 园 曹之新 (463)
108. 多星测控调度问题的建模与仿真·····辛维政 董光亮 李济生 黄永宣 (468)
109. 装备指挥训练模拟数据工程研究·····龚 瀛 刘 兵 赵永朋 (472)
110. 装甲装备仿真探要法·····王世学 花传杰 (477)
111. 基于自适应观测器的导弹电动机故障诊断方法研究·····吴 彬 廖 瑛 曹登刚 卢晓慧 (481)
112. 基于 UML 导弹任务规划系统建模与实现研究·····刘 良 毕义明 杨 萍 (486)
113. AMESim 与 Simulink 联合仿真在舵机可靠性研究中的应用··李霏霞 曾声奎 马纪明 田华东 (490)
114. 地基雷达对低轨卫星截获效能仿真·····张俊华 杨 根 徐 青 赵拥军 (494)
115. 基于 HLA 的导弹攻防系统建模与仿真·····谢道成 张为华 (498)
116. 基于期望值建模的卫星信息支援作战仿真·····王卫杰 张占月 (502)
117. 基于 HLA 和 Vega/Creator 的某型反坦克导弹营分布式虚拟仿真训练系统研究
·····钱红林 钱红军 赵永朋 陈国华 (506)
118. 地空导弹抗饱和攻击能力 SIMAN 仿真·····沈继承 刘付显 高 乾 邓铁柱 (510)
119. 某型导弹对面目标攻击火力分配研究·····周广正 李志镜 许慧敏 (514)
120. 基于二级模糊综合评判的某型导弹系统效能分析·····王育民 周广正 许慧敏 (518)
121. 基于形式化行为描述的航天资源规划建模技术研究·····王 励 陈克伟 王炎娟 张 辉 (521)
122. 舵系统展开过程虚拟试验仿真·····刘 广 (525)
123. 基于超实时仿真的航天飞控辅助决策·····崔凯云 (529)
124. 航迹数据库及其在航迹规划中的应用研究·····吴 昊 任 敏 薛宏涛 沈林成 (534)
125. 电传动履带车辆驱动系统建模与联合仿真·····王双双 张豫南 张 朋 赵玉慧 (538)
126. 电视制导导引头仿真实现·····陈 伟 张志虎 潜继成 贾红光 (542)

127. 舰载直升机 CGF 行为建模研究·····	阚荣才 姜 伟 孙 航 (545)
128. 某导弹自动切线研究·····	张志虎 贾红光 张少贤 吴晓中 朱守深 (549)
129. 基于 Matlab 的制导炮弹三点法导弹弹道仿真·····	孙东彦 汪德虎 潘红华 马乐梅 (553)
130. 鱼雷运动模型的建立与制导率的仿真·····	田长铮 韩 亮 (556)
131. 巡航导弹作战效能建模与评估·····	续 堃 韩 亮 龚光红 (560)
132. 机载相控阵雷达杂波抑制仿真研究·····	娄 军 陆必应 周智敏 (564)
133. CCD 成像跟踪仿真研究·····	贺 玉 谭碧涛 马军雁 景春元 (569)
134. 侦察/攻击无人机系统仿真研究·····	李 艳 黄柯棣 (572)
135. 动能拦截弹红外成像导引头仿真系统技术的发展·····	范晋祥 岳艳军 (576)
136. 用于火炮随动系统定型试验的火控仿真器设计·····	赫 赤 董光玲 解文凯 韩东霏 (581)
137. 导航雷达虚拟实现的一种新方法·····	易成涛 徐晓刚 王孝通 (585)
138. 低轨卫星空间地磁场的计算与仿真·····	蔡俊武 王卫国 董绪荣 (589)
139. 探索视景仿真技术在海军标图中的应用·····	周 峰 梁义芝 (592)
140. 基于 STK 的大椭圆轨道卫星与地球圆轨道卫星的接近过程研究与仿真·····	符 俊 (595)
141. 战场复杂电磁环境的可视化研究·····	刘向刚 赵希国 李贺佳 (599)
142. 基于 Vega Prime 的反潜战术可视化仿真系统研究·····	李耀宇 王文广 侯洪涛 王维平 (603)
143. 受大气影响的巡航导弹建模与仿真研究·····	杨晓阳 王江云 罗红磊 (607)
144. 升力式再入航天器数学建模及地球自转对再入轨迹的影响·····	周文雅 杨 涤 薛东彬 (612)
145. 基于 HLA 与 STK 的载人航天任务视景仿真研究·····	刁华飞 李 智 (617)
146. 自行高炮模块化自构建仿真系统的研究·····	刘园园 毛 征 吴 良 何宝林 尹丽萍 (621)
147. 空间飞行器最优姿态控制器设计与仿真·····	陈晓波 (625)
148. “人在回路”式导弹远程操控仿真研究·····	唐 江 谢晓方 刘纪文 黄权欣 (629)
149. 潜艇作战系统可靠性建模与仿真·····	战 凯 吴朝晖 王 净 单广超 (633)
150. 鱼雷作战效能研究平台的 HLA 设计·····	李文哲 张宇文 李 铁 范 辉 (636)
151. 信息化作战条件下抗无人机检测新技术研究·····	杜廷岳 (640)
152. 粘性阻尼器对减小展开式太阳翼锁定冲击力矩的研究·····	肖应廷 廖 瑛 (644)

第五部分 控制、决策及其他

153. 发电机的鲁棒逆优化自适应控制方法研究·····	王远景 (648)
154. 一种基于 GIS 的复杂地形通视性算法研究·····	李文伟 李广运 (652)
155. 美军作战实验室及其带来的启示·····	李文伟 任海龙 (655)
156. 无线传感网在智能楼宇系统中的应用·····	沈佳栋 唐明浩 章 力 (658)
157. 变速恒频风力发电系统的有功无功控制分析·····	张照彦 李长青 王兴武 邓冠宇 董 青 (662)
158. Research of Multiple Models Predictive Control Arithmetic of Nonlinear System ·····	Zhang Jing-nan Sun Wei-meng Zheng Zhi-qiang (667)

159. Research of the Models Aggregation Acquisition of Multiple Models Control
.....Zhang Jing-nan Sun Wei-meng Zheng Zhi-qiang (670)
160. 一种针对 AVS 实时编码的 VBR 码率控制方法.....郑从卓 李均利 陈刚 孙尧丰 满家巨 (673)
161. 群体决策理论在异步指挥控制中的应用研究.....鲍广宇 付丰科 张炜钟 张谦益 (678)
162. 智能客服系统中调度器的设计与实现.....李辉 严隽薇 刘敏 李继骏 (682)
163. CTDB 地形数据库的多维信息可视化.....杨新颖 龚光红 王行仁 (686)
164. PSpice 性能分析中特征值函数编制及应用.....肖永军 卢金军 曾庆栋 (690)
165. 一种基于运动信息和结构信息的视频质量评价方法
.....卢国庆 李均利 陈刚 章颖 满家巨 (693)
166. 基于 RTX 扩展的 Windows 2000/XP 系统实时性分析.....徐林 姚益平 蒋志文 (698)
167. Robust Tracking Control of Inverted Pendulum Using Backstepping...Wang Hong-bin Yao Hong-lei (702)
168. 焦炉智能控制系统.....赵国新 (706)
169. 导弹驾驶仪滑模观测器研究.....朱敬举 夏群力 (709)
170. 一种改进贝叶斯网络不确定性的方法.....周海刚 沈怀荣 (713)
171. 视频叠加图形的设计与实现.....潜继成 张志虎 贾红光 陈伟 (718)
172. 基于 AJAX 的 RPC 远程电源管理系统设计与研究.....于爱荣 王俊 曹雷 (722)
173. 基于分段线性化 H_2/H_∞ 控制对弹道优化研究.....苏浩秦 段娅 郝治国 李洪波 李平坤 (726)
174. Linux 下 RTI 网络功能实现.....洪继钦 韩亮 龚光红 (729)
175. GL Studio 在 Vega Prime 场景中的应用研究.....朱锐 谢晓方 袁胜智 韦俞锋 (733)
176. 基于免疫遗传算法的电力系统无功优化.....杨素英 赵一橙 王金城 (736)
177. 城市单交叉口两级加权神经网络控制系统设计与应用.....徐欣 徐立鸿 (740)
178. 工程装备论证知识管理系统技术分析.....孙向军 刘凯龙 (744)
179. 基于面向对象的变电站拓扑表示与动态修正研究.....钟炜 黄元亮 刘志刚 姚锋 (748)
180. 基于蚁群算法的电子战干扰资源分配方法研究.....谷学强 陈璟 王克波 (752)
181. 一种改进的多飞行器协调航迹规划算法.....冯倚银 李景荣 施晓红 华祖耀 (756)
182. 基于手绘草图轮廓检索的简笔绘图系统.....龚健 费广正 石民勇 曹玮 (761)
183. 程序变异在软件可靠性评估中的应用.....王珏 韦群 孟祥航 (765)
184. 用例驱动的需求分析.....刘剑 匡友华 (767)
185. 一种基于辅助工具的电网谐波检测新方法.....王松 李德和 (771)
186. 粒子群算法的自适应改进.....余祖强 董晨 王高峰 陈震亦 (774)
187. 基于改进 PSO 算法的支持向量机参数选择.....郭景华 杨慧中 (778)
188. 基于 Creator/Vega 的柴油机可视化实现与特技效果设计.....刘春江 陈辉 商蕾 (781)
189. 基于模块设计的蚁群算法研究综述.....刘心报 叶强 (785)
190. 增强现实研究现状及其在遥操作中的应用.....李一波 康绍鹏 乔志华 朱琼 (790)
191. 3D 游戏的镜头艺术与实时影片技术探索.....宋亚军 扈文峰 (794)
192. 装备保障力量部署方案评估系统设计.....李晰 肖东昀 (798)
193. 基于 SBA 的工作流管理系统开发研究.....马舒扬 刘丽 (802)

194. MSF 在军用软件开发中的应用.....史正祥 汪 霖 贾连兴 (806)
195. 用 EWB 设计单道绝对式码盘的 M 序列编码.....李正生 马文彦 (809)
196. 基于视觉的远程机械臂闭环控制系统.....王军南 丛 爽 (813)
197. 三维激光扫描技术在西藏壁画信息留取与病害调查中的应用
.....蔡广杰 张爱武 高 峰 段文国 武继广 觉 丹 刘晓萌 周 霄 巴 珠 (818)
198. 具有 PID 特性的神经网络非线性自适应控制.....梁艳阳 丛 爽 尚伟伟 (822)
199. 基于多信息的人目标的精细轮廓跟踪.....王智灵 张硕奇 路婷婷 陈宗海 罗杨宇 李成荣 (829)

第六部分 量子系统控制

200. 基于量子遗传算法的 PID 参数优化研究.....曾 成 赵锡均 (834)
201. 基于 Liouville 超算符变换的开放量子系统最优控制.....杨 洁 丛 爽 (837)

第七部分 灰色定性仿真

202. 基于改进灰色模型的 TBM 弹道预测.....董 捷 董云峰 (844)
203. 基于模糊积分的视频质量评价方法.....章 颖 李均利 陈 刚 卢国庆 满家巨 (848)
204. 离散事件仿真和定性仿真的集成及其人-物互动仿真应用.....胡 斌 牛 飞 (852)
205. 灰色决策法在某导弹作战决策优化中的应用.....李志镜 王护利 周广正 (856)
206. A Recognition-Primed Decision Model Used in Combat Simulation
.....Meng Qing-cao Zhao Xiao-zhe Jiang Wei (859)
207. 稳健快速的匹配算法研究.....李晓雷 黄新生 王亦平 徐婉莹 (864)
208. 双枝模糊评判在舰艇作战效能评估中的应用.....解维河 李选海 马乐梅 (868)

基于 HLA/RTI 的摆式列车多学科协同仿真技术

范文慧 肖田元

(清华大学自动化系, 北京, 100084)

摘要: 介绍了摆式列车为了解的基本原理, 分析了摆式列车仿真技术现状和难点, 提出了基于 HLA/RTI 摆式列车多学科协同仿真环境体系结构。建立了基于 HLA/RTI 摆式列车多学科协同仿真的团队、任务分解和 workflows, 通过对摆式列车多学科系统分析, 在 Matlab 中建立了摆式列车控制模型, 在 Hopsan 软件中建立了液压模型, 在 Adams 软件中建立了动力学模型。基于适配器构成了基于 HLA/RTI 摆式列车多学科协同仿真环境, 仿真运行结果可以看出倾摆装置在进入弯道后较短的时间内进入了稳定状态。

关键词: 摆式列车; HLA/RTI; 协同仿真

中图分类号: TP14

HLA/RTI based Multidisciplinary Collaborative Simulation for Tilting Train

Fan Wen-hui Xiao Tan-yuan

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing, 100084)

Abstracts: The Principle of tilting train is introduced, the technology of tilting train simulation is analyzed, and architecture of HLA/RTI based Multidisciplinary Collaborative Simulation Environment for Tilting Train is proposed. Team, task and workflow of Multidisciplinary Collaborative Simulation are built. By decoupling Multidisciplinary system of Tilting Train, control model, hydraulic model and dynamic model in Matlab, Hopsan and Adams are created. Three adaptors based HLA/RTI based Multidisciplinary Collaborative Simulation Environment are established. From the simulation calculate result, as the collaborative simulation system, it is very useful for Tilting Train design.

Keywords: Tilting Train; HLA/RTI; 协同仿真

1 引言

经过多年的发展与完善, 目前已经出现了大量成熟的商用仿真软件, 典型的如 Adams、Nastran、Matlab、QUEST 等等, 可以分别对动力学、热力学、控制系统、生产线等各个过程进行仿真分析。这些仿真软件广泛应用到产品开发过程中, 极大地提高了企业的产品设计开发能力。但随着需求的进一步发展, 传统的单学科仿真技术的不足也组件显露出来。一般来说, 现实世界中的复杂产品通常都是多学科的, 由多种工具设计出来的属

于不同领域的多个分系统组成^[1], 如图1所示。随着产品规模和复杂程度的不断增长, 产品设计过程中涉及到的学科领域越来越多, 分系统间的关系也越来越复杂。虽然现有的仿真工具可以有效辅助产品某个功能单元的设计开发, 能够很好地解决大部分单领域的分析评估问题, 但对于涉及到多学科知识的复杂系统(整个产品或其某个复杂子系统)仿真支持不够。仅靠传统的单领域仿真已经很难满足对整个产品或其某个复杂子系统的功能/行为分析, 仿真工具之间相互协同的需求开始逐渐变得强烈。

为了解决传统的单领域仿真模式在复杂产品设计过程中遇到的困难, 人们开始将协同仿真的思想引入产品设计领域, 多学科协同仿真技术开始受到重视并成为研

基金项目: 国家 863/cims 项目资助 (NO. 2006AA04Z160)

作者简介: 范文慧 (1966-), 男, 副教授, 从事复杂产品协同仿真与协同优化的研究、开发与应用工作。

究的热点。

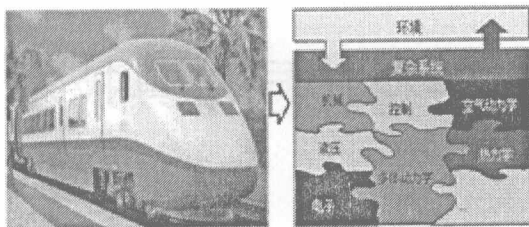


图1 复杂产品通常涉及多学科知识

协同仿真随着计算机环境协作能力的提高和仿真方法论的进步发展起来的一种先进的系统仿真方法,主要面向复杂系统的分析和设计。协同仿真可以将位于不同地点、基于不同计算机平台、采用不同建模方法建立的混合异构层次化仿真模型,在分布式环境中进行仿真运行。

协同仿真是一个处于发展中的概念,目前尚未形成统一的观点。Victor和Paul认为,协同仿真是一种复杂系统仿真方法,它支持处于不同地点、基于不同计算机平台的仿真人员,采用不同建模方法建立混合异构层次化的仿真模型^[2],并在分布环境上进行仿真运行。

在产品设计领域,协同仿真主要出现在不同学科领域之间,即表现为多学科协同仿真的形式。我们认为多学科协同仿真是指在复杂产品设计过程中,通过多个分布在不同地点的、属于不同学科的仿真模型之间的并行运行、实时交互,共同实现对整个产品或其某个复杂子系统的仿真分析。

多学科协同仿真技术将面向不同学科领域的仿真工具结合起来共同构成一个统一的仿真系统,进行针对整个系统的仿真,可以充分发挥仿真工具各自的优势,同时还可以加强不同领域开发人员之间的协调与合作。协同仿真技术充分发挥了多学科仿真工具的优势,体现了不同分系统间的联系,相对于单领域仿真方式更具有系统性和合理性,仿真结果的置信度也更高。协同仿真不需要拆散一个系统,使其全貌得以保持;使得对系统的分析、设计和评价过程尽可能地接近人们认识系统的方法和习惯;使得分析、设计、实现系统地方法学原理与人们认识客观世界的过程尽可能一致。协同仿真技术的出现和发展,将会对复杂产品的设计过程提供更加强大的支持,从而促进产品设计能力的提高。

根据协同仿真指导思想的不同,协同仿真方法可以分为基于统一语言(Unified Language)和基于接口两大类。

基于统一建模语言的方法希望通过提供一种统一的语言,实现多学科协同建模与仿真^[3-7]。其中有代表性的是Modelica语言的相关研究。Modelica是瑞典Linköping大学Modelica协会开发的一种免费的、面向对象的建模语

言,其设计目标是用来处理大型的、复杂的、混合的物理系统问题。Modelica的两个重要特点是面向对象和非因果关系。Modelica既是一种建模语言,也是一种模型交换规则。基于统一语言的协同仿真方法具有一定的理论研究价值。

基于接口的多学科协同仿真模式通过提供统一的接口标准来实现不同仿真应用之间的信息交互,现有的仿真软件只需要对自身的信息交互接口进行改造和封装,无需对内部具体的算法和实现机制进行改动。这种模式以协同仿真的关键问题,即仿真运行过程中实时的信息交互为出发点,突出了对现有仿真资源的继承和重用,支持对未来新技术的充分兼容,相对基于统一语言的方法具有更好的适用性和可行性,是目前产品制造领域协同仿真的主要研究方向。软总线接口方式是比较典型的,类似于计算机总线机制,各个仿真应用遵循统一的接口规范插入到仿真总线上,通过仿真总线实现实时分布交互,如图2所示。软总线式结构具有许多明显的优点,如支持即插即用、易扩展、易维护等等。

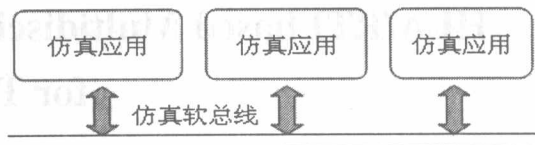


图2 软总线式协同仿真结构

HLA规范(IEEE 1516)的提出为基于软总线的协同仿真提供了可以遵循的国际标准。目前市场上出现了RTI支撑环境,也为其应用提供了方便,这种协同仿真方式在军事领域已经有了许多成功的应用案例,在产品设计领域的应用研究也已经全面展开。本文采用基于HLA/RTI的多学科协同仿真技术来实现摆式列车的协同仿真。

2 摆式列车的基本原理

铁路交通是我国主要的运输方式,如何提高列车运行速度是目前铁路领域关注的重要问题。由于我国的大部分既有线路修建时间较早,对曲线问题考虑得不是很多,导致在这些线路上实现高速化有一定的困难。提速最彻底的办法是修建和改造高速铁路,但这种方案投资大,所费的人力物力多,修建时间长,只有那些有很大的客流量,确有经济效益的地方才有可能和有必要修建高速铁路。相对来说,采用改进机车车辆性能办法来提高列车原有速度具有更好的可行性,摆式列车技术是其中代表性技术之一。^[8-11]

摆式列车技术主要解决列车通过曲线时因离心加速度过大造成的限速问题。在线路实际设定超高一定的条

件下,提速车辆进入曲线时,让车体向轨道内侧再倾摆一个角度,相当于再增加一份超高,于是车上的重力加速度横向分量可以平衡更大的离心加速度,从而提高通过曲线的速度。在主动倾摆式车体的开发过程中,涉及到多体动力学、控制系统、液压系统等分属多个领域的分系统,而且各个分系统之间关系紧密。在传统的单领域仿真模式下,如果要对这种机、电、液一体化的复杂系统仿真进行仿真分析,只能每个领域分别进行,而且必须对其他领域的分系统进行简化处理。这种对系统人为的割裂和简化必然导致仿真置信度的降低,严重影响了仿真的效果。

列车在曲线段运行时的允许最高速度与曲线半径、最小外轨超高、允许欠超高、允许过超高等参数有关。当列车以高速通过曲线区间时,产生的离心加速度会导致以下问题:(1)乘坐舒适性恶化;(2)线路外车受到偏向力的作用,容易导致线路位置失常;(3)列车容易在曲线外侧脱轨;(4)列车有在曲线内侧翻车的危险。我国铁路设计标准规定:通过曲线时未平衡的离心加速度最大不能超过 $0.77g$ 。在常规线路的曲线部分通常采用加高外轨的方法,使列车产生一个向心力,用以平衡列车在曲线段运行时产生的离心力。在有超高的曲线上,车辆向曲线内侧倾斜,使重力加速度的横向分量与离心加速度相互抵消一部分,从而使得离心加速度保持在一定范围之内。如图3所示。超高的大小是根据曲线半径和列车速度来确定的,为了兼顾货车和客车的不同需求,保证列车运行安全性,外轨超高应该受到限制。我国规定最大超高为150mm。

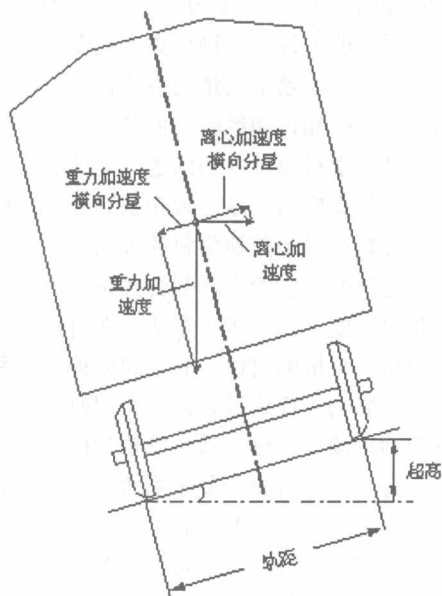


图3 外轨超高

由于列车速度的不断提高,既有线路上的曲线外轨

超高已经不能满足平衡离心力的要求。在这种情况下,如能使车体向曲线内侧倾斜,也可以弥补外轨超高的不足,这也就是摆式列车技术得以发展的原因。

根据倾摆方式的不同,摆式车体可以分为两种:

(1)被动倾摆式,又称为自然倾摆式。利用通过曲线时的离心力作用,使车体自然地曲线内侧倾摆,没有外加的动力。例如西班牙的Talga列车和日本的381电动车组。

(2)主动倾摆式,又称为强制倾摆式。通过外加的动力强制车体向曲线内侧倾摆,例如意大利的ETR450电动车组、瑞典的X2000型列车和德国的VT611内燃动车组。

一般而言,被动摆比较简单,不需要作动器、能源、控制和信号采集系统,但由于摆动中心较高,车体重心横移比较大,摆动角度小,加上摆动滞后等原因,对乘坐舒适度的改善比较有限。主动摆的摆角大,但需要有外加能源以及相应的信号采集、控制和执行机构。目前主动倾摆已经称为技术发展的主流,目前主动摆的倾角可达 8° ,可以补偿大约65%的离心加速度。

3 摆式列车仿真技术现状及难点

对摆式车而言,进入弯道时合理的控制特别重要。要实现车体倾摆执行机构的控制,需要对取自传感器的信号适时进行综合处理,以达到弯道过渡段所希望的动态响应。在曲线上,车体倾斜的大小和速率应该与转弯产生的向心加速度的增长速度相符。如果倾摆系统的响应速度过快,会产生很大的倾摆速度和振动,影响乘坐舒适度。相反,如果倾摆系统的响应速度太慢,会使车辆通过曲线时来不及倾斜足够的角度,不能完全抵消向心加速度的作用^[10]。理想情况下,车体倾摆角应逐渐增大,使之与正出现的弯道加速和增大的超高角完美地协调。原则上讲,倾摆作用必须是迅速的。但是,因为轨道不平整、不规则会引发随机的、对被测曲线加速度有附加影响的噪声信号。大多数倾摆控制机构以横向加速度计为基础。加速度计或者固定在车体上,或者固定在转向架上。它不仅测出弯道加速度,同时也测出轨道不规则而出现的噪声。为了不影响列车的直线运行品质,倾摆系统必须能够滤除这些噪声信号。

早期的摆式列车控制系统采用所谓的“零控制”方式。这种控制方式使用来自安装于车体的加速度计信号控制驱动器,使得列车通过曲线时倾摆角度逐步增加直到车体横向加速度为零。但实际上,完全补偿横向加速度并不能得到最好的乘坐舒适性,而且在设计上也存在难以克服的矛盾,无法保证倾摆机构的反应速度和车辆直线运行品质。鉴于零控制方式的不足,人们又提出了命令驱动方式,用安装在转向架轴箱或轮对上的横向加

速度计测量超高,发出命令信号,并将车体的实际倾摆角度反馈回控制器,实现闭环反馈控制。由于反馈因子 K 小于1,从而部分地补偿了车体横向加速度。保证了车体的曲线运行品质。但由于横向加速度计不仅可以测量到曲线运行时的离心加速度,也能够测量到由于轨道不平顺引起的横向加速度,从而产生不期望的倾摆动作,如果采用滤波的方法又必然导致系统响应滞后。目前大多数现代的倾摆控制系统采用一种所谓“超前倾摆”控制方式,这种控制方式的命令信号来自前一节车辆,倾摆角指令取自固定在车辆最前面的转向架上的加速度传感器,并根据列车速度、车厢长度等信息通过适当的延时逐级向后传送。通过适当的设计滤波器,使得滞后时间正好与前一节车的超前作用相抵消,从而保证了良好的控制品质。超前倾摆控制系统的原理图如图4所示:

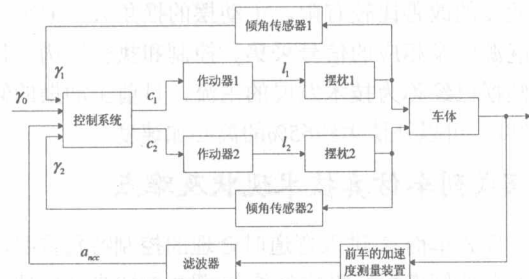


图4 超前倾摆控制原理

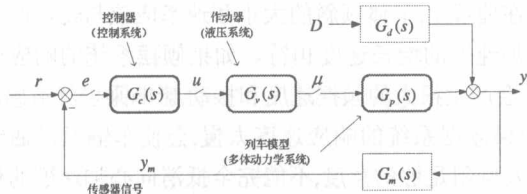


图5 主动式倾摆系统结构图

由以上的分析可见,摆式列车可以看作由多体动力学系统、控制系统、液压传动系统等三个彼此独立且相互作用的子系统组成的复杂系统。在运行过程中,多体动力学系统实时的向控制系统传递传感器信号 y_m ,如列车速度、横向加速度等等;控制系统根据输入的信号,在相应控制算法的支持下产生控制信号 u 并传递给液压执行机构;液压系统根据得到的控制信号产生对应的行程 μ 再传递给多体动力学系统,驱动转向架上的四连杆机构,从而使列车产生倾摆,完成整个控制过程。整个倾摆系统的基本结构如图5所示,其中 G_c 为控制器传递函数, G_v 为作动器传递函数, G_p 为多体动力学系统传递函数, G_d 为对象干扰通道传递函数, G_m 为传感器传递函数, r 为设定值, y 为被调量,包括列车的各种运行参数, y_m 为被调量的测量信号; u 为控制器输出; μ 为作动器输出; D 为系统收到的干扰信号; e 为偏差信号。

摆式列车的仿真难点主要体现在以下几个方面:

◇ 产品功能结构更加复杂

相对传统的列车,摆式列车增加了检测装置、控制系统、液压系统、倾摆机构等元件,通过检测机构获取列车当前的运行状态,在一定控制算法的支持下产生倾摆控制信号,并经由液压系统作用到倾摆机构上,实现弯道过渡段所希望的动态响应,以达到更好的乘坐舒适性指标。这种工作原理上的突破大大改善了列车的运行性能,但同时也增加了系统的复杂性,使得整个系统设计开发的难度也随之提高。

◇ 学科间存在着紧密的耦合与交互关系

摆式列车的倾摆装置由控制系统、执行机构、受控系统几个主要的分系统组成,分别对应控制、液压以及多体动力学等学科的知识。各个分系统通过彼此作用,构成了一个完整的多学科复杂系统,共同实现列车通过曲线时的动态响应。与此相对应,各个学科之间存在着紧密的耦合与交互关系,在设计过程中相互制约。例如,有时候多体动力学系统的设计方案可能在本学科范围内是可行的,但从控制学科的角度来看,在这个设计方案下可能的控制系统的设计将会非常困难甚至无法实现,从而导致整个系统的设计失败。从系统论的角度来说,即使所有分系统都实现了局部最优也不能保证整个系统的全局最优。因此,提高整个系统的性能必须要综合考虑所有学科的知识以及学科间的耦合与交互关系,不能只在某个学科范围内孤立地进行设计。

◇ 传统的单学科仿真方式无法满足设计需求

传统的仿真分析通常是借助单学科仿真工具来实现的,例如用Adams进行多体动力学仿真,用Matlab进行控制系统仿真。一般来说,这种仿真方式在企业中已经应用了很长时间,并积累了大量的专业仿真工程师、仿真工具、以及相关的知识和经验。但是,目前的仿真工具都只能解决某个学科范围内的问题,无法实现涉及学科间交互的复杂仿真应用。这导致在仿真分析过程中不得不简化甚至忽略掉属于其他学科的分系统,很难体现出各个分系统之间的动态约束和耦合关系,严重影响了仿真的精度和可信度。如某机车车辆厂在对摆式列车进行多体动力学仿真分析的时候,完全忽略掉控制系统和液压传动系统的影响,仅通过设定一个同时间相关的简单函数来驱动列车倾摆,这导致系统模型的行为同系统的行为不符。为了实现对整个复杂系统进行精确的分析与评估,必须通过某种机制实现不同学科间的协同仿真。

◇ 需要有效的多学科协同机制作为保障

摆式列车协同开发过程中涉及多个开发小组和多种开发工具,这些开发小组可能分布在企业中的不同地点,甚至分布在不同的企业,分别负责某个分系统的设计开

发工作。如果各个开发小组在设计阶段只关注自身分系统的设计与仿真,彼此之间缺乏及时的协调与合作,将很可能产生设计冲突现象,从而导致大规模的返工。因此,为了提高开发效率,需要提供一种有效的多学科协同机制,支持在设计阶段进行面向整个系统的多学科协同仿真,使得各个学科的开发小组可以及时了解其他部分的设计现状,及时发现设计中的冲突并加以解决。

摆式列车属于典型的涉及多学科知识的复杂系统,功能结构复杂,技术含量高,学科间存在着大量的耦合与交互关系,其中一些涉及学科间交互的复杂仿真问题很难通过当前的单学科仿真技术解决。在这种情况下,采用多学科协同仿真技术可以将各个学科的仿真模型联合起来进行面向整个产品的协同仿真,体现了复杂系统的整体性,而且有效的重用了现有的信息资源,充分发挥了仿真工具各自的优势,同时还可以加强不同学科开发人员之间的协调与合作,为摆式列车的设计过程提供了有力的支持。

4 多学科协同仿真支撑环境

多学科协同仿真技术的实施是一个复杂的系统工程,

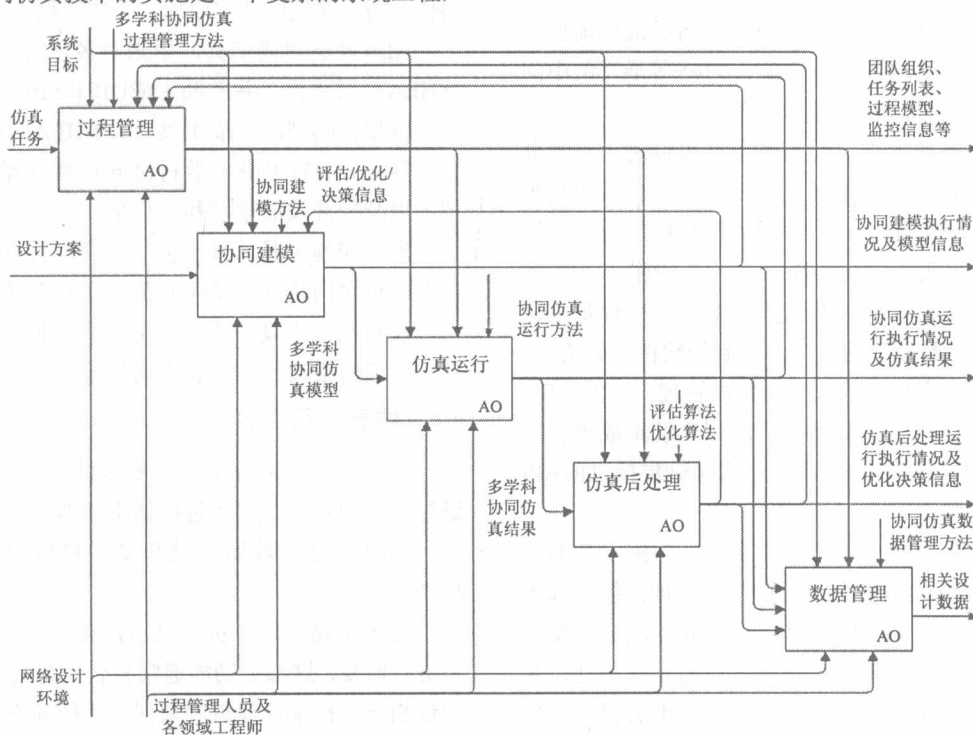


图6 协同仿真平台功能视图

由图6可以看出协同仿真平台的主要功能组成:协同仿真过程管理、协同建模、协同仿真运行、仿真后处理、以及协同仿真数据管理。

协同仿真平台同时对协同仿真过程中各种涉及整体的问题进行统一规定,如采用的标准/规范/协议、网络与

涉及到大量的人员/工具/信息/过程的组织和协调。为了在具有分布特性的、复杂的产品开发过程中成功的实施多学科协同仿真技术,需要提供一个底层的支持软件环境,以支持整个开发过程中的信息集成和过程集成^[12-16]。

4.1 功能组成

多学科协同仿真技术的实施是一个复杂的系统工程,除了前面各章所研究的协同仿真建模、协同仿真运行、模型库管理等核心技术之外,还涉及到诸如人员、过程、工具等诸多问题。为了保证整个过程能够完整有序的进行,需要为其提供一个底层支撑环境作为实施的基础。

协同仿真环境以并行工程思想为指导,以协同仿真过程管理为核心,为面向复杂产品设计的多学科协同仿真技术的实施提供一个完整的支撑环境解决方案。协同仿真环境从全局的角度规划和协调协同仿真过程中各部分之间的关系,使其构成一个有机的整体,实现整个多学科协同仿真过程的信息集成和资源共享。协同仿真平台的主要功能视图以及各分系统之间的集成关系如图6所示。

数据库结构、系统集成技术和集成方法、系统运行模式等等。

4.2 系统结构

为了提高系统的柔性和可靠性,充分利用先进的网络通信技术,协同仿真环境采用如图7所示的C/A/S三层