虚拟维修技术研究与应用

周 栋 霍 琳 王美慧 毛德耀

(北京航空航天大学 虚拟现实技术与系统国家重点实验室,北京 100191)

摘 要: 针对虚拟维修在建模与仿真等核心环节的研究中存有很大局限的问题,提出了虚拟维修方法体系,探讨虚拟维修理论与方法,在此基础上开展虚拟维修模型与仿真控制方法的深入研究. 提出虚拟维修模型即维修任务网(MTN, Maintenance Task Net), MTN 基于 Petri 网可描述维修过程,可表达维修过程中资源、活动和约束. 提出 MTN 驱动虚拟仿真的触发规则及建立控制虚拟维修仿真机制. 通过飞机典型设备维修案例对提出的虚拟维修模型和控制机制进行了实例验证,应用结果验证了建模与仿真方法的有效性,为支持维修性工程应用提供了可行的技术途径.

关 键 词: 维修性; 虚拟维修; 模型; 仿真; 控制

中图分类号: TB 114.3

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2011)02-0231-06

Research and application of virtual maintenance technology

Zhou Dong Huo Lin Wang Meihui Mao Deyao

(State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and Systems, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The theory of virtual maintenance is not fully studied and researches are deficiency in the field of virtual maintenance modeling and simulation. The methodology architecture of virtual maintenance were discussed and built, and virtual maintenance model and simulation control method were studied. The model of virtual maintenance called maintenance task net (MTN) was presented, and MTN based on Petri net can describe maintenance process and the factors including state, action and condition. In addition, the fire rules and the control mechanism of virtual maintenance simulation which is driven by MTN were presented. A case study of the line replaceable unit(LRU) repair of an aircraft was conducted, and the result confirms the validation and feasibility of all the studies, which can become a new technique means for maintainability engineering.

Key words: maintainability; virtual maintenance; model; simulation; control

传统的维修性设计与分析工作中存在着一些问题,许多工作项目需要通过设计人员在实物样机或原型机上模拟真实产品的维修过程来进行. 由于这种对实物样机的需求,导致了工作开展时间一般比较滞后. 同理,维修规程制订、维修训练等工作内容的开展时间会更晚一些,可能要等到产品定型之后或使用阶段初期. 因此,这种传统的"串行"设计方式不能尽早地发现产品设计中存在的问题. 有些维修相关的问题甚至要等到产品投入使用之后才暴露出来. 这样,由于此时设计工作已接近尾声,很难再对产品进行改进.

虚拟维修技术改变传统维修性设计依赖实物样机造成周期长、费用高、更改困难的缺陷与不足,也满足产品研制时间性和经济性需求. 将虚拟现实技术引入维修性工程领域突破了传统维修性设计在时空上的局限. 虚拟维修技术可在产品设计早期,具有数字样机的研制阶段就可以将维修性设计同产品性能设计并行开展,显著地提高了产品设计"一次成功率";借助虚拟环境可开展维修任务的仿真,维修过程规划、维修训练等工作,则将传统的"设计空间"提升到了"试验空间",丰富了设计手段. 虚拟维修仿真的这些特点以及技

收稿日期: 2009-12-24

作者简介: 周 栋(1977 -),男,陕西咸阳人,讲师,zhoudong@buaa.edu.cn.

术上日渐可行,使得其愈来愈成为维修性工程设计中的先进技术手段.

1 虚拟维修概念与内涵

1.1 相关概念分析

对于虚拟维修目前没有统一和标准的定义,只是不同学者从不同角度对虚拟维修内涵进行探讨,给出定义[1-3]. 相关文献分析可以看出,Kimura 给出虚拟维修的定义强调虚拟维修作为一种计算机辅助工具的应用方向;军械工程学院则着眼于虚拟维修的本质内容;Lockheed Martin 公司对虚拟维修的定义着重强调环境.

总结上述虚拟维修相关概念研究,对虚拟维修与虚拟样机、虚拟制造及虚拟装配相比较,可以看出,虚拟样机是虚拟维修、虚拟制造和虚拟装配开展虚拟仿真的数字化模型基础,没有了虚拟样机就无从开展这三项工作. 虚拟维修与虚拟装配、虚拟制造相比较,在涉及分析内容上有差别. 虚拟装配解决的是进行或者辅助进行产品装配相关的工程决策,解决的是装配过程尺寸、公差等问题;虚拟维修过程包含产品装配过程,但侧重点在产品维修性设计及维修过程规划,虚拟维修解决的是加入维修人员后涉及的可达、可视、操作空间、人素等维修性定性问题和维修时间等维修性定量问题以及维修过程规划等分析;虚拟制造面向的是产品设计和制造阶段的制造领域问题,其内涵很丰富,包含虚拟装配的研究内容;虚拟维修面向的是产品维修性设计分析和使用维修问题,维修过程中的主体是人,所以与虚拟制造相比,虚拟维修更加强调人机工效学,维修人素要求也是维修性设计的一个准则,这一点上虚拟维修更多的是从人机功效学领域去考虑.

1.2 定义及内涵

目前,国内外学者们对虚拟维修的研究和应用多集中于针对具体维修操作仿真,如对拆卸、装配、维修动作库、人员行为等方面进行虚拟仿真研究,取得了很多成果. 但是缺乏从宏观层次对产品的维修性设计进行全过程、全系统的研究,缺乏从微观层次对产品虚拟维修过程的仿真调度与控制研究. 如果在这些分散研究成果基础上,将宏观研究与微观研究很好结合起来,将使虚拟维修在产品设计和维修性设计中发挥积极作用,并促进其理论的进一步发展和应用. 因此,本文提出的虚拟维修定义如下:

虚拟维修是利用虚拟现实技术对物理世界形象、直观的表达能力,在计算机生成的虚拟环境中,进行维修工程和维修性工程活动. 通过对产品寿命周期中的维修性设计活动和维修过程进行统一建模,实时、并行地模拟出产品未来维修的全过程,突出对维修仿真过程的调度、控制、决策能力及其对产品设计的影响,预测产品维修性设计特性并优化产品维修方案,支持全过程、全系统的维修性设计评价、资源规划和维修规划决策.

从提出的虚拟维修定义可以看出,该定义着重于在产品设计阶段或使用阶段如何通过虚拟化方式来促进产品维修性设计和分析工作. 它是以“虚拟仿真”为手段,以预测产品维修性设计特性,进而获得产品“最优”维修性特性为设计目标的一种方法. 虚拟维修其内涵具有并行化、虚拟化、预测化和优化等特点.

1) 并行化. 并行化是指虚拟维修解决了两个方面的并行. 一是产品寿命周期中维修性工程活动的并行,在早期设计阶段采用虚拟维修方式就能考虑后续使用维护阶段的需求;二是维修性设计与产品性能设计及其它质量特性的并行设计.

2) 虚拟化. 虚拟化是指虚拟维修设计过程是三维的[4]、交互的,甚至是沉浸的[5].

3) 预测化. 预测化也称可检验化,是指基于虚拟维修,在产品被制造出之前,可以对产品的可达性、可视性、可装配性、故障检测[6]和维修过程进行预测和检验,及早发现设计中的缺陷和错误.

4) 优化. 优化是指采用虚拟维修方式,基于虚拟维修建模、仿真调度策略和综合分析并通过虚拟仿真对多种维修性设计方案、多种设计参数进行分析比较,从中选出最优方案或参数.

1.3 方法体系

在以上探讨虚拟维修定义与内涵的基础上,结合目前出现的虚拟维修新概念、新模式和新思想,提出了虚拟维修方法体系,如图 1 所示.

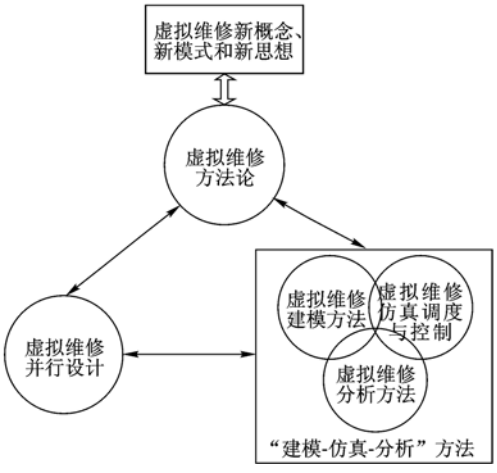


图 1 虚拟维修方法体系

这是一个开放式架构体系. 装备研制系统的维修过程是个复杂的问题,解决这类问题,基于系统工程方法、开展综合集成是一种有效和可行的解决方案. 各方法将在后续章节论述.

2　虚拟维修并行设计过程

如何在设计阶段使产品维修性和产品性能设计并行开展,进行一体化设计一直是维修性工程领域研究热点之一,虚拟维修因其可在设计阶段基于产品数字样机、通过形象直观的维修过程演示进行维修性设计分析,因此为解决上述问题提供了一个有效的方式和手段,本文结合产品设计一般过程建立虚拟维修综合设计过程,并与维修性设计过程进行关联.

如图 2 所示,在产品概念设计阶段,进行产品功能、结构及零部件优化设计[7],建立产品 CAD (Computer Aided Design)数据的同时就可并行开展虚拟维修方案设计,将上述相关 CAD 数据及信息导入到虚拟环境中可进行虚拟维修总体布局、空间设计、LRU(Line Replaceable Unit)规划和初步建立虚拟维修模型进行维修规划.

随着产品设计的深入,产品功能、结构和零部件、产品 CAD 以及产品工艺和工装设计信息的丰富,依据产品 CAD 数据转换来的虚拟样机和 CAPP(Computer-Aided Process Planning)数据可进行虚拟维修过程建模,基于虚拟维修模型进行仿真调度和控制,优化维修规划方案和维修保障资源. 同时在虚拟环境中可进行产品可达性、可视性及可操作性等维修性设计因素检验,进行产品维修性核查,基于虚拟仿真过程进行维修时间预计. 虚拟维修的优势还在于当发现维修性设计问题后可迅速反馈给产品设计部门,对修改后的数据和信息重新建立虚拟维修模型,通过虚拟维修仿真调度与控制进行维修性分配、预计、维修性核查和维修保障资源分析. 此过程往往不是一次可以完成的,要进行多次迭代、逐次逼近最优的设计方案. 而当产品进入生产使用阶段,随着生产制造信息和用户反馈信息的加入,可快速依赖虚拟维修模型和仿真过程的调度与控制进行维修性设计验证,优化维修性设计方案. 因此,虚拟维修综合设计过程可有效使产品维修性设计与性能设计并行展开,互相反馈,相互作用.

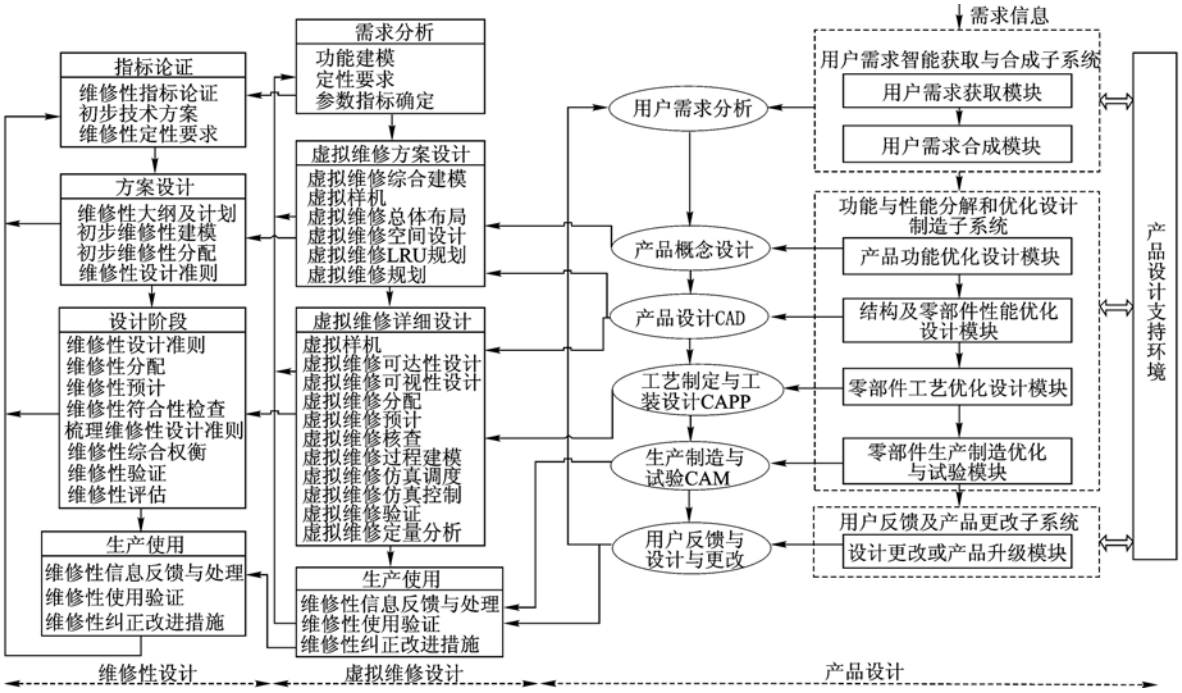


图 2　虚拟维修并行设计过程

3　虚拟维修模型与控制机制

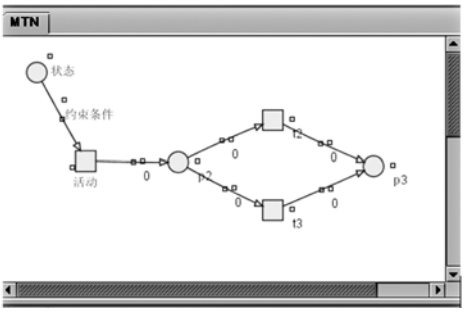
维修任务的执行需要多个工序,包括检测、装配与拆卸等. 整个的维修任务,是由这些工序所组成的一个“过程”,每个工序可视为过程中的“组成活动”. 另一方面,考虑到每个工序的具体实现,也同样是由一步步的组成动作连贯执行的. 所以,无论从相对抽象的维修任务描述来看,还是考虑底层的维修动作仿真,都具有“过程性”这一特征[1].

当前比较广泛应用的过程建模方法包括 IDEF3、UML、PERT 图以及 Petri 网等[3-6]. 这些技

术相对于场景仿真的具体实现而言,比较适用于描述高层的、相对抽象的过程信息. 但是,目前还缺乏将抽象的维修任务描述与底层维修活动仿真相结合的研究. 基于上述的问题,本文研究开发了维修任务(MTN, Maintenance Task Net),MTN 基于 Petri 网,采用图形化建模,能够描述高层的抽象维修任务,同时也能驱动控制虚拟场景进行仿真.

3.1 MTN 建模设计

状态、维修活动以及约束条件(弧)是维修仿真模型中的核心内容,本节将分别从这三个方面讨论 MTN 的具体表达. MTN 基于图形化的网络模型进行构建,如图 3 所示.



注:○—状态;□—活动;直线—约束条件.

图 3 MTN 图形化建模

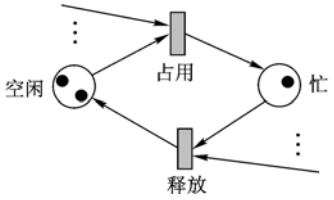
1) 状态. 对维修任务中涉及的资源、对象进行了描述;采用一些运行标识(如是否资源可以利用、开始、正常结束、异常结束等状态). 目前考虑的属性有名称、人员、工具、设备和运行标志. 可根据需要不断扩充.

从作为资源的角度来看,状态具有两种基本态:"空闲"态与"忙"态. 因此,可以通过判断在状态中有无对应的"空闲"或"忙"标志(token)来判断资源的可用或不可用,如图 4a 所示.

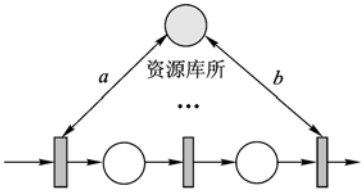
也可以采用建立全局的"资源"库的方法来描述资源问题如图 4b 所示,若此状态中存在所需要的标志,则表示相应的资源可用;若此状态中没有该标志,则表明没有所需的资源,相应的维修工作无法开展. 一般来说,图 4b 方法的模型简单一些,但在刻画行为的细节程度上不如图 4a 方法. 因此,可以根据具体的研究问题需要进行方法选择.

2) 活动. 表示维修任务中要进行的操作行为. 具体说,活动所需要的工具、人员均能够从状态中获得,则活动处于可触发状态. 活动所需资源的具体信息,一般通过指向活动的约束条件标明.

在研究维修过程内容时,时间是必须要考虑的参数,许多维修性、保障性分析设计的定量指标都是用时间值来描述的,如平均修复时间(MTTR, Mean Time To Repair)、后勤延误时间等. 在研究维修问题时,MTN 的活动表示一项维修操作,此时要求活动具有表达持续时间的能力. 而状态在有些情况下会"消耗"时间,例如"等待"状态. 这种情况既可认为是活动触发条件不满足而产生的维持等待时间,也可以看作是维修中某种状态的明确要求持续时间.



a 资源描述 *A*



b 资源描述 *B*

图 4 资源描述

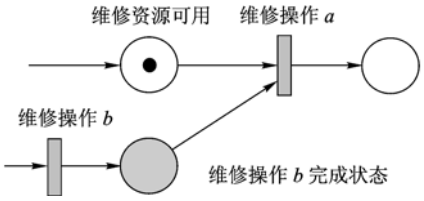
因此,为了便于建模与分析,本文对 MTN 引入时钟与时间属性的概念. 对于时钟,作如下约定:①网络模型的整个过程执行有一个全局时钟监控. ②全局时钟的起始时刻对应着第一个活动可触发的时刻. ③全局时钟的结束时刻对应着最后一个活动的结束时刻.

同时,在维修工作描述中,活动与状态都可能与时间相关,因此本文采用"混合"方式,即同时对状态与活动关联时间属性.

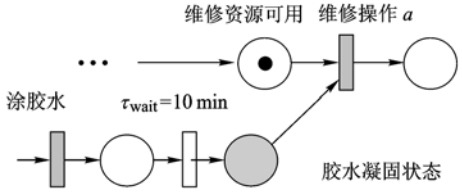
3) 约束条件. 表示维修活动与资源间的约束关系. 某项维修操作是否可以执行,不但受维修保障资源制约,而且还与维修工作自身的特点密切相关. 例如,拆卸某 LRU 时,必须要等到所有与该 LRU 相连接的电缆被断开后才能执行. 这种关系可表示如图 5a 所示.

图 5a 中说明,即使维修保障资源满足要求,维修操作 *a* 也必须要等待维修操作 *b* 完成之后方可执行. 这种约束,可以看作是一种维修操作之间的时序约束. 此外,还存在另一种时间约束,例如,在涂完胶水后,必须等待胶水凝固后方可进行下一步操作,如图 5b 所示的情况.

总之,对于这些约束,均可以通过建立状态与活动的指入弧与指出弧以及配置相应的标识来进行描述.



a　约束条件建模 *A*



b　约束条件建模 *B*

图 5　约束条件建模

3.2　MTN 控制机制

MTN 驱动虚拟场景显示系统进行维修任务过程仿真中核心的部分是 MTN 的触发规则,规则概述如下:仿真的开始总是由状态指向活动. 对活动来说,只要满足其所有指入弧的条件,则活动激活,调用其行为函数,观测行为函数的返回值,决定是否活动结束. 如果条件判定活动结束,则活动运行状态改变,完成一次活动触发,同时状态属性值从一个状态转移到另一个状态,开始新的活动触发判断. 当循环中再无活动可触发,仿真结束! 其触发流程如图 6 所示.

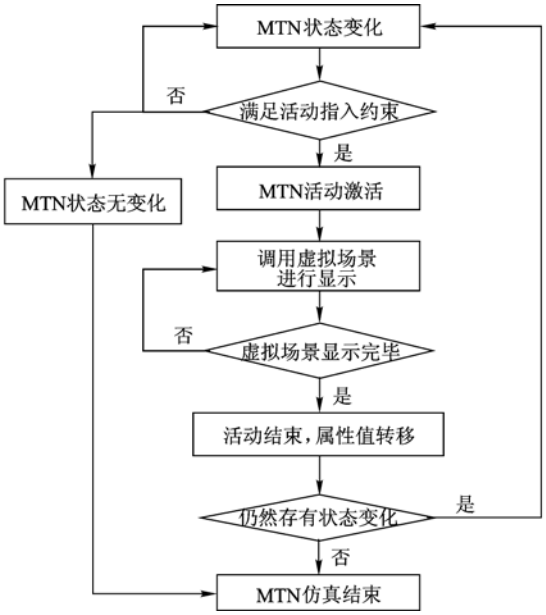


图 6　MTN 触发流程

4　虚拟维修技术应用

应用实例为某型号飞机飞参记录仪拆卸任务作为维修任务仿真过程. 根据维修资源、维修工具、维修人员和维修工序利用 MTN 描述上述维修任务. MTN 建模如图 7 所示.

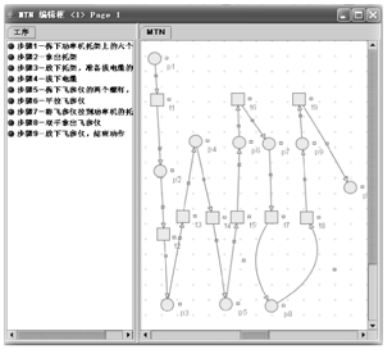
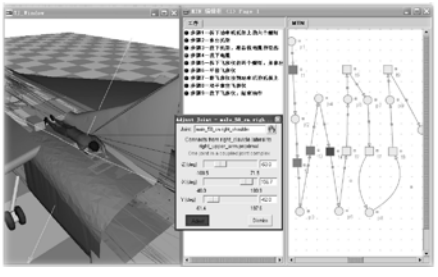


图 7　利用 MTN 建立的维修任务网络图

在使用 MTN 驱动虚拟环境 Jack 开始进行虚拟仿真前,首先要导入虚拟场景包括虚拟人、虚拟样机和各种设备等. 同时启动 Jack 端的底层监听服务,等待 MTN 发出的连接信号,当 MTN 与 Jack 建立了通讯连接关系后,Jack 端收到仿真指令就开始进行虚拟仿真. 如图 8a 所示,当活动颜色为绿色时,表示活动处于运行态. 在虚拟仿真过程中要进行分析评价时,就需要对仿真过程进行控制管理,例如通过 MTN 暂停当前仿真场景,回到虚拟场景中仔细观察,同时可以借助一些分析处理工具做准确的测量或计算,最后评价人员给出合理的评价,如图 8b 所示,当活动颜色为深色时,表示活动处于暂停态.



a　仿真过程



b　分析过程

图 8　MTN 驱动控制 Jack 虚拟环境进行维修过程仿真

本实例通过对某型号飞机飞参记录仪拆卸过程进行虚拟仿真,很好地验证 MTN 的设计,包括:MTN 建模,MTN 驱动虚拟仿真以及 MTN 控制仿真过程. 该实例证实了 MTN 良好的应用效果.

5 结束语

虚拟维修产生自虚拟现实技术与维修性工程专业领域的紧密结合,目前已成为一种先进的维修性设计与分析技术. 虚拟维修着重于在产品设计阶段或使用阶段如何通过虚拟化方式来促进产品维修性设计和分析工作. 它是以“虚拟仿真”为手段,以预测产品维修性设计特性,进而获得产品“最优”维修性特性为设计目标的一种方法. 虚拟维修具有并行化、虚拟化、预测化和优化等特点,作为一种可操作的并行工程技术,虚拟维修综合设计过程可有效使产品维修性设计与性能设计并行展开,互相反馈,相互作用. 结合维修性工程应用实际,基于过程模型的建模方法,建立了维修任务仿真管理模型 MTN. MTN 一方面可以描述表达上层的维修任务方案,另一方面可以驱动虚拟场景进行维修仿真和控制. 论文也从实际运行角度出发,采用网络传输方式建立 MTN、虚拟场景显示系统和数据库之间连接方式,形成一个完整的系统,并通过案例应用有效验证了虚拟维修技术方法的可行性和有效性.

参考文献(References)

[1] 郝建平. 虚拟维修仿真理论与技术[M]. 北京:国防工业出版社,2008
Hao Jianping. Virtual maintenance simulation theory and technique[M]. Beijing: National Defence Industry Press,2008(in Chinese)

[2] 何剑彬,苏群星,刘鹏远. 基于过程建模的复杂装备虚拟维修训练仿真[J]. 军械工程学院学报, 2009,21(4):6-14
He Jianbin, Su Qunxing, Liu Pengyuan. Complex equipment virtual maintenance training simulation based on process modeling [J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2009, 21(4):6-14(in Chinese)

[3] 刘佳,刘毅. 虚拟维修技术发展综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2009,21(11):1520-1534
Liu Jia, Liu Yi. A survey of virtual maintenance technology[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2009, 21(11):1520-1534(in Chinese)

[4] Marcos Paulo Alves de Sousa, Manoel Ribeiro Filho. Maintenance and operation of a hydroelectric unit of energy in a power system using virtual reality[J]. Electrical Power and Energy Systems,2009,11:1-8

[5] Abate A F,Guida M,Leoncini P. A haptic-based approach to virtual training for aerospace industry[J]. Journal of Visual Languages and Computing,2009,20:318-325

[6] Ben Elzendoorna,Marco de Baara,Rene Chavanb. Analysis of the ITER ECH upper port launcher remote maintenance using virtual reality[J]. Fusion Engineering and Design,2009,84:733-735

[7] 闻邦椿. 产品全功能与全性能的综合设计[M]. 北京:机械工业出版社,2008
Wen Bangchun. Integrating design of product full function and full performance[M]. Beijing: Mechanical Industry Press,2008(in Chinese)

(编 辑:娄 嘉)

(上接第 230 页)

2) 当 $Ma=0.6$ 时,$G=5.94$ mm 时,各种工况下均发生了较静止条件下更为严重的主流附着现象,这样都无法产生反向二次流. $G=11.9$ mm 时,40 530 Pa≤二次抽吸压强 <87 139.5 Pa,可以产生反流. 当 $Ma=1.2$ 时,这两种喷管模型均不能产生反向二次流. $G=11.9$ mm 时,未发生主流附体的情况下,有同向二次流产生,但产生的推力矢量角相对较小.

3) 综合几种飞行条件下的工况,所研究的反流控制矢量喷管在静止条件下可以达到较为理想的推力矢量效果. 在亚音速飞行条件下,增加缝宽可以产生较为理想的反向二次流. 在超音速飞行条件下,无法产生反向二次流. 说明了这种推力矢量喷管对工作条件和几何参数非常敏感,并且较难控制,从而对于飞机上的应用带来了困难.

参考文献(References)

[1] Strykowski P J, Krothapalli A, Forliti D J. Counterflow thrust vectoring of supersonic jets[R]. AIAA96-0115,1996

[2] Vanderveer M R,Strykowski P J. Counterflow thrust vector control of subsonic jets:continuous and bistable regimes [J]. Journal of Propulsion and Power,1997,13(3):412-413

[3] Hunter C A , Deere K A. Computational investigation of fluidic counterflow thrust vectoring [R]. AIAA99-2669,1999

[4] Barth T J, Jespersen D. The design and application of upwind schemes on unstructured meshes[R]. AIAA89-0366,1989

[5] Choudhury D. Introduction to the renormalization group method and turbulence modeling[R]. Fluent Inc Technical Memorandum TM-107,1993

[6] Flamm J D. Experimental study of a nozzle using fluidic counterflow for thrust vectoring [R] . AIAA98-3255,1998

(编 辑:张 嵘)