

多学科流程集成及实验设计系统研究与实现

蒋兴沛 吴义忠

(华中科技大学国家 CAD 支撑软件工程技术研究中心 武汉 430074)

摘 要 复杂工程系统的设计是多学科交叉综合设计优化决策过程,针对这个过程,设计并开发了基于组件的多学科流程集成与实验设计系统,为复杂工程系统方案设计和仿真试验提供了支撑。与现有多学科系统相比,本系统具有的特点或优势有:1)摒弃项目管理的方式,采用流程与实验设计混合模型存储,方便模型的管理;2)采用多线程技术,实现了流程的组件并行调度和实验设计各实例的并行调度;3)采用动态任务调度技术,实现了实验设计调度过程的自动调度与交互控制相融合的灵活控制方式。

关键词 多学科流程集成,实验设计,并行调度

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

Research and Implementation of the System of Multi-disciplinary Flow Integration and Design of Experiment

JIANG Xing-pei WU Yi-zhong

(National Engineering Research Center of CAD Information Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract As the design of complex engineering system is a decision-making process of multi-disciplinary synthesis design optimization, a System of Multi-disciplinary Flow Integration and Design of Experiment based on component is designed and implemented. The system supports the conceptual design and simulation experiment of complex engineering system. Compared to current multi-disciplinary design optimization systems, the system has the following characteristics and advantages: 1) Design of experiment (DOE) and flow's hybrid model other than project management style is proposed to easily manage the model; 2) Multi-threading technology is adopted to seek the parallel scheduling execution for flow's components and DOE's instances; 3) Dynamic task scheduling technology is proposed to realize the flexible control mode of the combination of DOE's automatic scheduling and interactive control.

Keywords Multi-disciplinary flow integration, Design of experiment, Parallel scheduling

1 引言

随着工程技术应用复杂度及深度的拓展以及交叉性学科的发展,迫切需要应用多学科^[1,2]来解决日益复杂的工程问题,而在解决问题的过程中往往需要多种仿真计算工具联合起来进行仿真。鉴于学科间的耦合度高、分析模型建立的复杂性、系统设计变量的增加、计算量大^[3],需要多学科流程集成环境来集成和运行各个学科,实现各学科之间的通讯,并通过实验设计^[4]来确定设计变量中对设计目标和设计约束影响最大的关键因素,缩减设计变量,提高优化计算的速度。具有代表性的多学科流程集成环境有国外 Phoenix Integration 公司开发的 ModelCenter^[5]及 Engineous 公司开发的 iSIGHT^[6],这两款软件都支持基于多学科的流程建模、仿真和优化分析;国内的北京航空航天大学开发的“系统设计集成优化环境——SDOF^[7]”和国防科技大学开发的“月球探测卫星总体设计系统^[8]”则是在 iSIGHT 的基础上进行的二次开发,依赖于国外软件,而且建立的多学科设计集成平台仅面向自身行业。应用国外成套集成平台系统存在以下缺陷:软件

许多地方不符合我国国家标准、价格昂贵、维护困难、存在技术封锁、不利于技术创新及新技术应用,尤其给对重点行业的安全保密工作带来不利影响。鉴于此,应开发具有自主知识产权的基于多种商品化分析软件封装的多学科流程和实验设计建模与分析系统。

2 系统体系结构

本文系统通过常用商品化分析软件的集成、学科模型的封装、学科间的数据传递来实现多学科流程集成,在流程集成基础上通过实验设计的定义、运行调度与监控来实现实验设计系统。根据流程与实验设计的混合模型管理方式,多学科流程集成及实验设计系统体系结构如图 1 所示,主要包括多学科流程集成模块及实验设计模块。多学科流程集成模块主要用于构建基于组件封装和变量映射的流程模型并实现对流程的运行与监控,包括组件封装、控制组件的定义、变量定义、变量映射、流程运行调度与监控等子模块;实验设计模块主要用于根据实验设计算法及流程模型来定义实验设计,并实现对实验设计的运行调度、监控及结果的分析,包括实验设计算

本文受国家自然科学基金项目(51175198)资助。

蒋兴沛(1989—),男,硕士生,主要研究方向为多领域建模与仿真技术,E-mail:jxp6008@gmail.com;吴义忠(1970—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为多领域建模、协同设计等,E-mail:cad.wyz@hust.edu.cn(通信作者)。

法、实验设计定义、实验设计运行调度与监控、实验设计的结果分析等子模块。

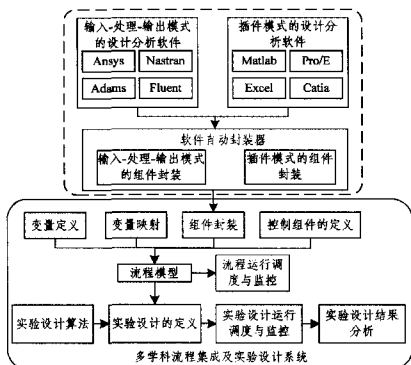


图1 多学科流程集成及实验设计系统体系结构图

3 多学科流程集成

3.1 组件

多学科集成流程模型是由组件构成的，组件是具有输入变量、输出变量的“黑盒”。组件分为两类：计算组件和控制组件。计算组件是通过组件封装对某个商用分析软件的输入、输出数据封装后，产生的具有输入、输出、启动及附加文件的流程节点。组件封装是通过调用软件自动封装器对专业模型生成工具和专业模型数据基于统一工具平台进行管理，并将各种工程分析、设计优化软件的输入、输出数据转化为统一的与用户可直接交互的数据格式。计算组件包括 Ansys 计算组件、Adams 计算组件、Nastran 计算组件、Fluent 计算组件、Excel 计算组件、Matlab 计算组件、用户自定义组件等。系统通过组件的拖放式建模、组件封装、基于批处理方式调用商品化分析软件进行仿真计算的组件运行来支持计算组件。控制组件是定义流程调度控制逻辑的流程节点，由一个或多个计算组件、控制组件及自定义的变量构成。控制组件包括条件控制 If/Else 组件、并行控制 Parallel 组件、循环控制 Loop 组件及子流程 SubFlow 组件。

3.2 变量映射

为了实现各学科商用仿真软件开发的仿真模型的动态信息交换，即将一个仿真模型（起始组件）的输出或输入变量值赋给另一个仿真模型（终止组件）的输入变量，可采用变量映射机制。变量映射机制通过建立变量之间的映射关系来创建组件之间的约束关系，当组件运行结束后读文件并更新变量值，通过组件间的变量约束关系将其赋给另一个组件的变量，另一组件根据新的输入变量值进行仿真计算后，将新的变量值再赋给其他组件的变量，这样继续直至完成所有的仿真，实现各仿真模型的动态信息交换。

3.3 流程建模

流程建模主要是通过组件封装、控制组件的定义、变量映射等方式创建流程模型，并通过撤销、恢复、拷贝、粘贴、删除等编辑手段编辑流程模型。系统支持在流程视图区中接受由组件列表区中的组件拖放，经过组件封装后根据组件类型以自增的方式给组件命名，由拖放点位置以缺省的区域范围和角度创建组件块（MBlock）实体，将其加入到用于图形显示的实体链表中，并向模型树中添加相应类型的组件节点，模型树

采用树形控件显示模型中各组件间、组件与变量间的层次结构关系。

3.4 流程运行调度与监控

对于建立的多学科集成流程模型，可通过流程运行调度与监控模块进行计算分析。流程运行调度与监控包括对流程的启动运行、暂停与继续、终止等进行控制，以及监视流程的状态与流程中各个组件的状态，并将组件中的变量值用曲线显示。流程运行之前先执行流程检查，包括组件封装性检查、组件依赖性检查等，如果有错误则给予提示，并不再启动运行流程。

图2为流程运行调度与监控的逻辑流程图，下面分别阐述其中的关键过程。

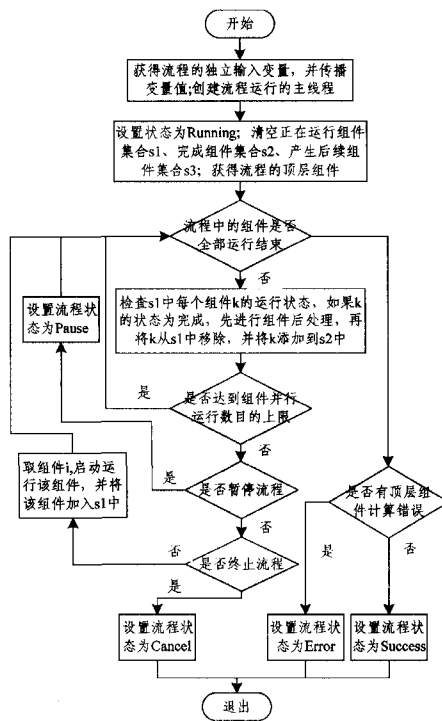


图2 流程运行调度与监控逻辑流程图

1) 流程的初始化

获取流程的独立输入变量，并传播变量值；创建流程运行的主线程；清空运行组件集合 s1、完成组件集合 s2 与后续组件集合 s3，并获得流程的顶层组件列表。

2) 流程的推进与组件调用

流程根据变量映射以及控制组件定义的控制逻辑，顺次启动运行顶层组件并创建组件运行的线程，如果顶层组件为控制组件，则按照控制组件的调度方式启动运行控制组件中的各组件。但最终归结到计算组件的运行，而运行计算组件则是通过创建线程来调用计算组件的启动文件，用批处理的方式调用商品化分析软件进行仿真计算。

3) 取组件 i 运行的前提条件

取组件 i 运行的前提条件是组件没有未执行完的依赖组件、组件状态不是 Success 且组件的输入未被修改、组件在后续组件集合 s3 中或不在完成组件集合 s2 中、组件不在运行组件集合 s1 中。对于计算组件而言，组件的输入指计算组件的输入变量，对于控制组件 If/Else 和 Loop 而言，组件的输入包括输入变量和逻辑控制条件。

4)并行化调度

与常见多学科系统的不同之处在于,本文系统中组件的运行是通过多线程调用的,当有多个组件均无依赖组件或依赖组件运行结束时,这几个组件可以并行运行,以提高计算效率。但受计算机性能的影响,可限定组件并发计算数目,当运行组件集合 s_1 中的元素个数达到并行运行数目上限时,则等待有组件运行结束再启动下一个组件。

5)组件状态监视与组件计算后处理

流程监控主界面通过定时器来检查各组件的状态,并刷新显示组件状态,如果组件运行结束(即组件状态为 Success、Error 或 Cancel),则将其添加到集合 s_2 中,当其状态为 Success 时,则进行组件计算后处理:读组件的输出文件并更新组件的变量值,再根据变量映射关系,将该组件的变量值赋给其它组件的输入变量,并将因此而导致的输入修改的组件添加到后续组件集合 s_3 ,同时刷新界面显示该组件的变量值。

6)流程的暂停、继续与终止

由于流程的运行调度是通过组件的运行调度来实现的,因此流程的暂停、继续与终止功能也可通过组件的调度来实现。暂停流程的实现方法是尚未启动的组件暂不启动运行,正在运行的组件等待其运行结束;继续运行流程的实现方法是运行完成的组件则不再启动运行,尚未启动的组件开始启动运行;终止流程的实现方法是尚未启动的组件则不再启动运行,正在运行的组件让其自动运行完成。

7)流程运行结束的条件

如果终止流程或所有组件全部运行结束,则流程运行结束。

图 3 为流程运行调度的例子,该流程实例中含有 5 个组件(组件间的箭头表示有变量映射关系),组件 3 的输入变量 BE_{in} 、 DE_{in} 分别与组件 1 的输出变量 B_{out} 、组件 2 的输出变量 D_{out} 建立变量映射关系,组件 4 的输入变量 DG_{in} 、 MG_{in} 分别与组件 2 的输出变量 D_{out} 、全局变量 $Model_{in}$ 建立变量映射关系,组件 5 的输入变量 I_{in} 与组件 4 的输出变量 H_{out} 建立变量映射关系,因此组件 3 依赖于组件 1、2,组件 4 依赖于组件 2,组件 5 依赖于组件 4,组件 1、2 运行结束后,组件 3、4 可以并行调度,但组件 4、5 必须顺序执行,运行该流程时组件调用顺序为(1,2)→(3,4)→(5)。

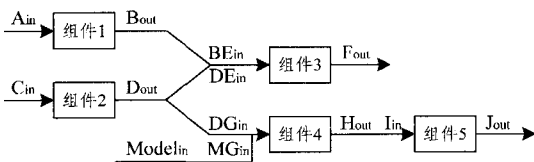


图 3 流程示例调度图

为了提高运行效率,在重复运行流程时,若流程中的输入参数(包括组件的输入参数)未被修改,则再次运行流程将不起作用。但如果有些组件的输入被修改,或者组件的运行状态为非 Success,则再次运行流程时,将按照组件间的变量约束关系运行相关组件,从而避免不必要的组件重复运行。如图 3 所示,若变量 $Model_{in}$ 的值被修改,组件 3 的运行状态为 Error,其余组件的状态为 Success。则运行该流程时组件调用顺序为(3,4)→(5)。

4 基于流程的实验设计

4.1 实验设计

实验设计的建立是基于多学科流程模型,通过指定变量集合(包括设计变量和响应变量)、变量取值范围及实验设计算法(包括全因子设计、中心复合设计、拉丁超立方设计、正交设计及均匀设计等)产生设计矩阵(设计变量的取值链表)。

4.2 实验设计运行调度与监控

实验设计运行调度与监控包括利用可视化界面操作对实验设计的启动运行、暂停与继续、终止进行控制,以及监视实验设计的状态及实验设计中各流程实例(对一组参数设置不同的固定值所构成的流程模型)的状态。本文系统支持多个实验设计的建立,并用链表保存所有的实验设计,在用户选定一个实验设计后,首先执行合法性检查(包括流程合法性检查、设计变量和响应变量的合法性检查等),如果合法,则可获得实验设计的设计变量名链表和响应变量名链表,动态创建列表控件的列,并将流程实例的状态及各流程实例的全部设计变量与响应变量值填入列表控件对应列的位置,完成列表控件的初始化。

实验设计运行调度与监控的逻辑流程如图 4 所示,下面分别阐述其中的关键过程。

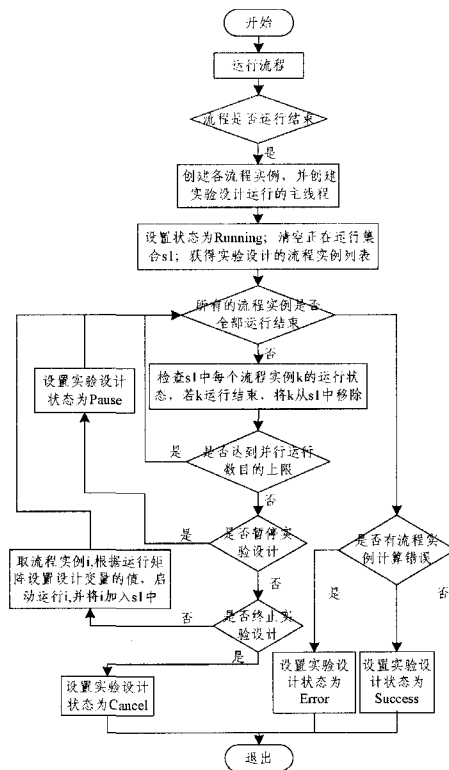


图 4 实验设计运行调度与监控逻辑流程

1)实验设计的初始化

启动运行实验设计,首先按照缺省参数值运行流程一次,其次根据流程实例的数目,拷贝流程和全部组件状态,并创建实验设计的目录和文件,最后创建实验设计运行的主线程、清空运行集合 s_1 并获得流程实例列表。

2)运行流程实例

依次取流程实例哈希表中状态为 Ready 的流程实例,先根据设计矩阵设置流程实例的设计变量值,再创建流程运行

的线程来启动运行流程实例,并将该流程实例加入正在运行的集合 $s1$,此时相当于重复运行流程,流程按照组件间的变量约束关系运行相关组件,避免了不必要的组件重复运行。

3)并行化调度

由于各流程实例是完全独立的,可采用多线程技术进行并行化调度,但受计算机性能的影响,可限定流程实例并发运行数目,当集合 $s1$ 中元素个数达到流程实例并发运行数目上限时,则等待有流程实例运行结束再启动下一个流程实例。

4)各流程实例的监视

实验设计监控主界面通过定时器来检查各流程实例的状态,并刷新显示流程实例状态,当其状态为 Success 时,系统获得该流程实例中对应的各个响应变量值,并将这些值刷新显示到界面上。

5)实验设计的暂停、继续与终止

由于实验设计的运行调度是通过流程实例的运行调度来实现的,因此实验设计的终止、暂停、继续运行功能也可通过对流程实例的调度来实现。对于正在运行的实验设计,可暂停或终止运行,终止运行实验设计的实现方法是对于尚未启动的流程实例,则不再启动,对于正在运行的流程实例,则终止运行;而暂停运行实验设计的实现方法是对于尚未启动的流程实例,则暂不启动,对于正在运行的流程实例,则暂停运行。对于暂停的实验设计,可继续运行,其实现方法是对于运行完成的流程实例,则不再启动运行,对于尚未启动的流程实例,则启动运行,对于暂停的流程实例,则继续运行。

6)实验设计运行结束的条件

如果终止实验设计或所有流程实例全部运行结束(即流程实例状态为 Success、Error 或 Cancel),则实验设计运行结束。

本文系统的特色之一在于采用动态任务调度技术,实现了实验设计调度过程的自动调度与交互控制相融合的灵活控制方式。通过可视化界面选中某个流程实例,单独对该流程实例的启动运行、暂停与继续、终止进行控制。为了便于管理单独控制的流程实例,系统使用单独控制运行集合 $setInstance$ 。启动运行该流程实例时,根据设计矩阵设置流程实例的设计变量值,并将运行序号添加到集合 $setInstance$ 。终止运行时从集合 $setInstance$ 移除该流程实例的运行序号。单独控制的流程实例的监视通过集合 $setInstance$ 纳入实验设计监控主界面的监控范围。

为了提高运行效率,避免不必要的重复运行,对于已经运行结束的实验设计,再次启动运行时,应检查当前的流程及实验设计是否更改,如果没有改变则不再运行实验设计,如果改变则提示是否保持原来的实验数据,如果是则界面不改变;否则先删除全部流程实例,再运行流程,拷贝创建各流程实例,最后调度执行各流程实例。

4.3 实验设计结果分析

对于运行完成的实验设计可获得响应变量值的集合,并通过各种实验结果分析方法将数据输出用于绘制曲线或曲面,通过分析可研究多个设计变量对系统响应变量的影响;在实验次数可以接受的情况下,确定系统的所有关键因素。本文系统提供的实验结果分析方法包括单因素分析、双因素分析及主因素分析。单因素分析用于显示一个设计变量与一个

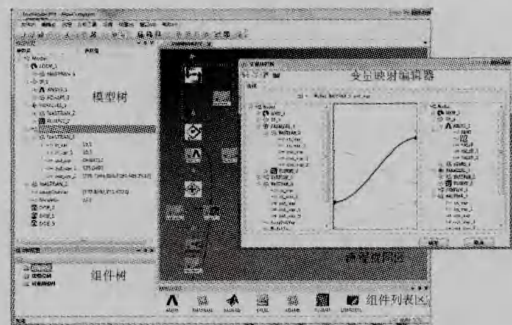
响应变量之间的关系曲线。双因素分析用于显示两个设计变量与一个响应变量之间的关系曲面。主因素分析用于显示所有的设计变量对某个响应变量的影响率。当响应变量为矢量时,还可对响应变量进行取值类型的选择,包括全部值、最大值、最小值、积分值、最终值、平均值等。

5 模型管理

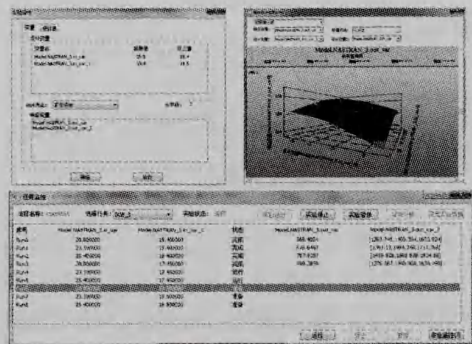
实验设计与多学科集成流程的混合模型是本文系统的主要特色之一,采用混合模型有以下优点:1)对于含有实验设计的混合模型,在下次执行实验设计时可以直接从模型中读取实验设计信息,提高了建模的效率;2)将实验设计信息保存于模型数据中,实现了实验设计信息的可继承性,提高了实验设计模型的可重用性。模型的存储首先执行流程的序列化操作(包括流程变量、组件、变量映射关系等关键信息的序列化),再遍历实验设计链表执行实验设计的序列化操作(包括实验设计名称、实验方法、设计变量信息列表、设计矩阵、响应变量值的哈希表的序列化操作),这样流程与实验设计的数据结构中的关键信息以文件形式保存。读取模型文件时,按照各对象的保存顺序进行提取,从而构造流程对象及实验设计对象,并在图形界面上进行显示。

6 系统运行实例

图 5 所示是利用该系统建立的运行实例,图 5(a)为利用该系统建立的模型及用于显示模型中变量关系的变量映射编辑器,图 5(b)为在该模型的基础上进行的实验设计定义、运行调度与监控界面及实验结果分析界面。



(a) 系统主界面与变量映射编辑器



(b) 实验设计定义、监控与结果分析界面

图 5 系统运行实例

结束语 目前该系统操作方便、运行稳定,但现有研究成果仍有缺陷与不足,将来主要在以下几个方面进行进一步的

研究和实现:1)集成通用 CAD 软件的模型用于分析仿真,并实现 CAD 几何模型可视化显示或隐藏;2)支持基于多项式回归模型、Kriging 模型、径向基函数模型、基于支持向量回归模型、样条响应面模型的响应面分析;3)支持基于经典算法、启发式算法、响应面算法、全局优化算法的优化设计;4)丰富数据可视化工具,提供交互可视化处理权衡研究数据结果工具集,为设计人员分析数据提供辅助。

参考文献

[1] Chen Z, Siddique Z. A cooperative-collaborative design system for concurrent multi-disciplinary mechanical design[C]// Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. California; DIPTeM University of Genoa, 2005: 779-787

[2] Weatherill N P, Turner-Smith E A, John j, et al. An integrated software environment for multi-disciplinary computational engi-

neering[J]. *Engineering Computations*, 1996, 16(8)

[3] 赵顺华, 吴义忠, 沈博. 基于 Web 的多领域可视化建模系统设计与实现 [J]. *计算机科学*, 2013, 40(6): 138-141

[4] Vittorio C, Bruna D S, Vito I, et al. Evaluation and optimization of manufacturing system using simulation modeling and design of experiment[C]// Proceedings of the 20th European Modeling and Simulation Symposium (EMSS 2008). Italy; DIPTeM University of Genoa, 2008: 224-230

[5] PHX ModelCenter-Phoenix Integration [EB/OL]. <http://www.phoenix-int.com/software/phx-modelcenter.php>, 2013-06-24

[6] Dassault Enginuous Software [EB/OL]. <http://www.3ds.com/products/simulia/portfolio/isight-simulia-execution-engine/isight-see-portfolio/>, 2013-07-19

[7] 赵勇, 颜力, 陈小前, 等. 基于 MDO 方法的月球探测卫星总体设计[J]. *上海航天*, 2006(2): 37-41

[8] 韩明红, 邓家祺. 复杂工程系统多学科设计优化集成环境研究[J]. *机械工程学报*, 2004, 40(9): 100-105

(上接第 336 页)

其中本文算法是采用欧氏距离来判定近邻域的,但是欧氏距离不能很好地反映非线性数据间的分布情况,影响近邻域的确定及后续的降维工作。对于如何解决这个问题,需要进一步的研究。

参考文献

[1] 王立志, 黄鸿, 冯海亮. 基于 MFA 与 kNNS 算法的高光谱遥感影像分类[J]. *计算机科学*, 2012, 39(6): 261-265

[2] Yang Guo-peng, Zhou xin, Yu Xu-chu, et al. Relevance vector machine for hyperspectral imagery unmixing [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(12): 2751-2756

[3] Yin Ji-hao, Wang Yan, Wang Yi-song. A revised multi-target detection approach in hyperspectral image [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(9): 1975-1978

[4] Luo Si-wei, Zhao Lian-wei. Manifold learning algorithms based on spectral graph theory [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2006, 43(7): 1173-1179

[5] He Lin, Pan Quan, et al. Research Advance on Target Detection for Hyperspectral Imagery [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(9): 2016-2024

[6] Wang Li-zhi, Huang Hong, Feng Hai-liang. Hyperspectral Remote Sensing Image Classification Based on SSMFA and kNNS [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(4): 780-787

[7] Ma Li, Crawford M M, Tian Jin-wen. Local manifold learning-based k-nearest-neighbor for hyperspectral image classification [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(11): 4099-4109

[8] Huang H, Li J W, Feng H L. Subspaces versus Submanifolds: A comparative study in small sample size problem [J]. *International Journal of Pattern Recognition And Artificial Intelligence*, 2009, 23(3): 463-490

[9] Turk M, Pentland A. Eigenfaces for recognition [J]. *Journal of*

Cognitive Neuroscience, 1991, 3(1): 71-86

[10] Belhumeur P, Hespanha J, Kriegman D. Eigenfaces vs. Fisherfaces: Recognition using class specific linear projection [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1997, 20(7): 711-720

[11] He Xiao-fei, Cai Deng, Yan Shui-cheng, et al. Neighborhood preserving embedding [A]// Proceedings of the 10th IEEE International Conference Computer Vision (ICCV' 05) [C]. Beijing, 2005: 1208-1213

[12] He Xiao-fei, Yan Shui-cheng, Hu Yu-xiao, et al. Face recognition using Laplacianfaces [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(3): 328-340

[13] Yan Shui-cheng, Xu Dong, Zhang Ben-yu, et al. Graph embedding and extensions: A general framework for dimensionality reduction [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007, 29(1): 40-51

[14] Fu Yun, Yan Shui-cheng, Huang T S. Classification and feature extraction by simplexization [J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2008, 3(1): 91-100

[15] Fu Yun, Yan Shui-cheng, Huang T S. Discriminant simplex analysis [A]// Proceedings of the IEEE Conference ICASSP[C]. Las Vegas, NV, 2008: 3333-3336

[16] Bau T C, Sarkar S, Healey G. Hyperspectral region classification using a three-dimensional gabor filterbank [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(9): 3457-3464

[17] Acito N, Diani M, Corsini G. Hyperspectral signal subspace identification in the presence of rare signal components [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(4): 1940-1954

[18] Yang J M, Kuo B C, Yu P T, et al. Adynamic sbuspace method for hyperspectral image classification [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(7): 2840-2853