

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2017.08.001

航空发动机安全保护控制研究综述

齐义文*, 曹峥, 崔建国

沈阳航空航天大学 自动化学院, 辽宁 沈阳 110136

摘要: 随着航空发动机技术的不断发展, 对其性能要求不断提高, 发动机既要发挥极限性能又不能超过限制边界, 这使得发动机安全性变得愈发重要, 相应的控制设计、状态监测和安全保护问题受到研究人员的关注。本文通过对现有文献资料的整理分析, 概述了涉及航空发动机安全保护控制的研究现状。首先, 从发动机可靠性角度, 对航空发动机的健康管理和容错控制研究现状进行了综述分析。然后, 进一步从发动机安全性角度, 对航空发动机的防喘保护、限制保护和切换保护等安全保护控制研究方法进行了文献评述。最后, 对航空发动机安全保护控制的研究前景进行了展望。

关键词: 航空发动机; 安全保护; 控制方法

中图分类号: V233.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-5453 (2017) 08-0001-06

近年来, 由于国防和民用需求的提升, 航空技术领域得到了快速发展, 而航空动力技术是最为核心和重要的研究内容之一。目前, 世界上战斗机的发展已从主流的三代战斗机逐渐向第五代战斗机过渡, 而作为第五代战斗机重要指标的超声速巡航、超机动能力及短距起降等无一不对航空发动机提出了更高的要求, 如果发动机性能跟不上, 飞行器的性能也将受到限制。然而, 追求高性能技术指标已经使航空发动机的运行状态处于其性能极限。实际上, 发动机性能的提升往往是其对原安全限制边界的不断突破。但性能和安全两者相互制约, 追求高极限性能容易导致发动机产生安全问题, 这使得发动机安全保护显得十分关键。

除了采取必要可靠的结构设计、材料和热防护等措施外, 航空发动机的安全保护还需要综合稳态和过渡态控制设计与健康管理、容错以及针对安全保护的特定控制方法等手段来保障。本文通过对现有国内外主要文献资料进行梳理和分析, 概述了航空发动机控制系统设计中与健康管理和安全保护相关的控制研究现状, 为航空发动机的安全保护控制

提供一些方向建议和研究参考。

1 航空发动机健康管理及容错控制

由于航空发动机的高复杂性和工作环境的特殊性, 发动机部件出现故障或状态恶化不可避免, 因此, 针对其安全可靠性的健康管理与容错控制是发动机技术研究的重点内容之一。

1.1 发动机健康管理

飞机推进系统的预测及健康管理 (Prognostics and Health Management, PHM) 主要包括诊断和预测两大方面。对于诊断, 即寻找当前和过去不正常工作状态/事件的过程。对于预测, 是指根据当前检测到的故障信息, 对发动机未来功能、性能变化趋势和剩余使用寿命等进行估算的过程。当前, 发动机 PHM 除上述两项功能外, 还纳入了维修和后勤等综合功能。因此, 有效地监视发动机的健康状态, 评定发动机的工作状态, 并采取必要的措施进行科学预测和及时决策, 对解决故障、缓解发动机性能衰退、保证飞行安全

投稿日期: 2017-04-24; 退修日期: 2017-06-12; 录用日期: 2017-07-12

基金项目: 国家自然科学基金 (61403261); 航空科学基金 (2014ZC54014, 2016ZC54008); 辽宁省科技计划博士启动基金 (20141077); 沈阳航空航天大学中青年拔尖人才支持计划 (04160105)

* 通讯作者. Tel.: 024-89723961 E-mail: qiyiwen@sau.edu.cn

引用格式: Qi Yiwen, Cao Zheng, Cui Jianguo. Survey of aeroengine safety protection control study[J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28 (08): 01-06. 齐义文, 曹峥, 崔建国. 航空发动机安全保护控制研究综述 [J]. 航空科学技术, 2017, 28 (08): 01-06.

可靠性及降低运营成本等都具有重要意义。自 20 世纪 90 年代以来,发动机健康管理已逐渐成为发动机设计的重点内容之一^[1]。由于涉及发动机健康管理的研究文献众多,限于篇幅,不予赘述。在此,引用一些国内外相关重要的综述和总结性资料,如国内部分见文献 [2]~ 文献 [5],国外部分见文献 [6]~ 文献 [8]。

1.2 发动机容错控制

容错控制是在航空发动机控制与故障诊断的基础上发展而来的,具体指当某些部件发生故障时,系统仍能按照原先设定的性能指标或在性能指标可接受的下降范围内完成控制任务。由于航空发动机结构越来越复杂,加之其恶劣的运行环境,使得部件性能会发生不同程度退化,进而影响发动机的安全飞行。

因此,希望提高发动机的容错能力,在发生故障时,发动机仍能有一定的安全性与生存能力。目前,容错控制主要分为被动容错与主动容错两种。被动容错是指系统有一个固定控制器,既能满足无故障时的控制要求,也能在发生某些故障时,仍使系统满足一定的控制性能。主动容错则是根据发动机运行状态自动选择(调整)相应的控制器,以实现故障的容错。

文献 [9] 针对航空发动机燃油计量阀进行了被动容错控制设计,利用 T-S 模糊规则设计了基于线性变参系统的虚拟传感器,保证了在计量阀传感器发生故障时,对计量阀位置的检测依然保持稳定。文献 [10] 针对航空发动机气路性能恶化问题,提出一种具有自我修复能力的主动容错控制设计,并特别针对不可预测和未知恶化给出了一种基于模糊与全局优化的混合故障诊断方法。文献 [11] 提出用模型预测控制器替代 Min/Max 构架中的 PID 基础控制器。该方法是一种基于模型的控制技术,可处理复杂的受限动力学特性,并允许在控制设计中考虑发动机部件故障影响。

此外,文献 [12] 设计了基于模态切换的任务级和发动机级模式的容错控制系统,任务级模式的容错控制系统在发动机部件故障时,通过切换达到恢复或降低性能的要求;而发动机级模式的容错控制系统在控制回路失效时,可根据故障情况切换到容错控制回路,保证发动机能继续正常工作。为减小不确定性对航空发动机分布式控制系统性能的影响,文献 [13] 分别针对参数摄动、不确定时延、外部噪声和执行器故障,提出了基于鲁棒 H_{∞} 理论的容错控制方法,使控制系统对这 4 种因素均具有鲁棒性。

2 航空发动机安全保护控制

航空发动机是十分复杂的气动热力学系统,具有工作状态恶劣、运行范围广和非线性强等特征。作为被控对象,存在外部干扰强、参数变化快和不确定性大等问题,同时发动机性能退化等因素也对发动机控制系统设计提出很高要求。通过控制设计,有效地保证发动机在不同工作环境下都能稳定地运行,使发动机性能接近其期望工作状态的并不超过给定的安全边界范围(区域),这是航空发动机控制设计的基本功能要求。

为保护发动机避免进入不安全或不期望的工作区域,需要进行保护控制设计。本节通过梳理和分析相关文献资料,对航空发动机安全保护问题进行了综述,主要包括防喘保护、限制保护和切换保护等控制手段。

2.1 发动机防喘保护

喘振现象是一种航空发动机工作于深度亚临界状态或发动机本身的工作点越过其喘振限制工作边界时而产生的进气道气流不稳定现象,是发动机运行中常见的故障。由于航空发动机经常工作在恶劣的外部环境下,使得喘振的发生具有突发性,若处理不当,可能导致发动机的强烈机械振动和热端超温,引起进气道结构的破坏,造成燃烧室熄火或发动机停车,可在很短的时间内造成发动机部件的严重损坏,甚至引发飞行事故。喘振的产生将极大限制发动机的性能、工作范围及可靠性。因此,航空发动机的防喘保护十分重要。

文献 [14] 研究了基于最小二乘支持向量机的发动机防喘诊断方法,利用最小二乘支持向量机模型建立了发动机喘振故障模型,通过监测低压压气机转速、燃油流量和压比的预测值与真实值间的相对误差率进行喘振监测。针对压气机旋转失速与喘振问题,文献 [15] 提出了一种动态面控制方法,该方法保留了系统中有用的非线性部分,控制器结构不会因为是否发生喘振而改变,并且不需要测量旋转失速的振幅。文献 [16] 对面向主动防喘的航空发动机加速控制进行了研究,共设计了 4 个发动机加速控制方案,通过仿真分析评估了发动机在不同加速控制方案下喘振裕度和加速性能的关系。此外,文献 [17] 建立了航空发动机整机过失速与退喘的动态仿真模型,该模型可对发动机的两种动态过程进行模拟,包括从发动机稳定状态到喘振及从旋转失速到退喘两个过程。

2.2 发动机限制保护控制

发动机控制主要包括稳态控制(也称设定点控制)和过渡态控制。相比稳定的巡航控制,过渡态控制会在一个较

短的周期内反映出发动机很大而又明显的性能变化。有资料表明,过渡态控制设计占用了发动机控制设计总开发周期的 3/4。过渡态控制设计主要是实现发动机工作状态在不同的稳态工作点间变换,同时,保证在过渡态运行期间保护发动机不超过其工作极限范围,如转速物理极限、涡轮叶片最大工作温度和压缩系统的喘振极限等。在某些情况下,若这些限制量超出最大限定值,可能导致发动机出现喘振、超转、超温超压等情况。由此,限制保护控制(Limit Protection Control, LPC)应运而生,它是一种通过强制性的附加限制来保证航空发动机在获得期望性能的同时而不使发动机工作超过安全范围的重要手段^[1]。

在文献[18]中,将自抗扰技术用于限制保护控制器的设计,通过自抗扰控制器的扩张观测器对限制量进行反馈补偿,实现超限后的快速保护,提高了发动机的安全性,起到限制保护的作用。文献[19]针对不确定性可能引起的进气道畸变,提出了基于 H_∞ 鲁棒控制与鲁棒参考调节器的限制保护方法。文献[20]针对涡扇发动机的限制保护问题,改进了传统线性调节器的缺点,在Min/Max选择控制框架中用滑模控制器替换线性调节器,以实现在设定点间被调输出信号的转换,并保证一组受限输出信号不超出限制范围。文献[21]研究了基于降阶和优先指令管理器的限制保护控制,若某一安全变量发生超限危险,便调整相应控制器的设定点,并通过划分硬性约束和软性约束给出了限制保护的优先级。另外,文献[22]将限制保护应用于发动机的起动控制,提出一种以涡轮前总温 T_{4a} 设计涡扇发动机起动控制的策略,并在所设计的 T_{4a} 闭环回路前加入喘振裕度限制保护,保证了发动机不发生超温和喘振,还可实现最大剩余功率和起动时间最短。

2.3 发动机切换保护控制

先进高性能航空发动机具有宽广的飞行包线,但在大飞行包线内,由于工作环境和工作状态急剧变化,航空发动机的气动热力过程也会发生很大变化,发动机特性在不同工况下差异性巨大,易出现安全限制问题。为确保安全,传统的航空发动机控制系统设计时往往会留有较大的安全裕度,以保证发动机在所考虑的全飞行包线范围内都能可靠稳定地运行,但这种控制设计的安全边界较为保守,牺牲了宝贵的发动机性能。为了充分、最大地利用发动机潜能,要求发动机能以更低的保守性在临界状态下工作,但当出现外部干扰时,却易出现越过安全边界的危险情况。对此,一种解决思路,即航空发动机调节/保护切换控制策略被提出,采用切换控制可实现当出现超限时,使发动机控制系统迅速切换

到保护控制回路确保安全性^[23]。

对于航空涡轮发动机的快速性及安全性问题,文献[24]提出了具有状态约束、输出量约束或状态与输出之间的组合函数约束的多种航空发动机调节/保护的多变量控制方法。文献[25]研究了火箭冲压发动机的多目标切换控制问题,使发动机在获得最优推力控制目标时,可避免进气道不起动问题。文献[26]提出了一种基于进化算法优化的航空发动机Min/Max燃油流量控制方法。基于航空发动机控制性能要求和安全边界限制,先给出了航空发动机的传统Min/Max控制设计。同时,还采用遗传算法来优化调整Min/Max控制器的控制增益。针对高超声速吸气式推进系统在运行中存在的安全边界问题,文献[27]提出一种输出调节/安全保护的切换控制策略,设计了PI控制器和切换律,将调节/保护切换的控制目标抽象为切换系统模型和切换输出渐近跟踪问题予以解决。文献[28]利用Min切换规则尝试解决超燃冲压发动机在加速过程中的安全限制保护问题,通过该规则和控制设计,协调了调节和保护之间的矛盾,保证了发动机的加速性,并避免了进气道不起动现象。文献[29]研究了航空发动机推力调节/安全保护的平滑切换控制问题,给出了一种结合基于发动机工作状态的切换规则和无扰平滑切换机制的切换控制设计策略。另外,文献[30]提出了一种基于多变量滑模控制和新型切换逻辑的航空发动机受限控制策略,该策略将已有单输入滑模控制器的Min/Max航空发动机切换控制推广到多输入情形,以充分利用执行机构来增强系统性能。

此外,针对航空发动机推力调节与安全保护,文献[31]提出了一种基于遗传算法参数整定技术的航空发动机模糊燃油流量控制设计方法。首先为发动机设计模糊燃油控制器;然后,采用多目标遗传算法来优化模糊控制器参数,而优化的目标函数考虑了发动机动态性能、推力需求和安全边界约束等综合因素。在考虑多输出限制情况下,文献[32]提出了一种新型的 L_1 自适应控制,相比传统发动机控制手段,该方法可使发动机在获得快速响应与强鲁棒性的同时,还能满足安全限制约束要求。

3 结论

航空发动机技术的快速发展使得发动机在追求高性能和确保安全性与可靠性之间的矛盾更加突出。本文通过对现有主要资料的总结和分析,综述了航空发动机安全保护控

制研究的相关问题及解决方案。从研究现状来看,航空发动机安全保护控制问题主要有限制保护控制、受限控制以及基于多模式切换(包括 Min/Max 切换)控制的几种解决途径。这些研究中,有将传统方法的单变量控制向多变量控制推广,也有在传统框架下通过引入智能算法进一步优化调节控制参数,还有将故障容错等任务与安全保护控制协同考虑。本文经过总结发现,将多种方法的各自优点相结合,可以规避单一控制方法的局限性,或者将发动机健康管理与控制相结合进行综合设计,都是有待进一步探索研究的重要方向。

AST

参考文献

- [1] Jaw L, Mattingly J D. Aircraft engine controls: design, system analysis, and health monitoring [M]. Reston; American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [2] 王施, 王荣桥, 陈志英等. 航空发动机健康管理综述 [J]. 燃气涡轮试验与研究, 2009, 22 (1): 51-58.
WANG Shi, WANG Rongqiao, CHEN Zhiying, et al. Survey on aircraft engine health management [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2009, 22 (1): 51-58. (in Chinese)
- [3] 宋辉, 李晓明, 宋文波. 航空发动机健康评估技术综述 [J]. 航空发动机, 2011, 37 (2): 58-62.
SONG Hui, LI Xiaoming, SONG Wenbo. Review on aeroengine health assessment technology [J]. Aeroengine, 2011, 37 (2): 58-62. (in Chinese)
- [4] 洪兴焱, 庄锡明, 冯彩霞. 航空发动机健康管理技术研究 [C] // 2015 航空试验测试技术学术交流会, 2015: 391-393.
HONG Xingyan, ZHUANG Ximing, FENG Caixia. A survey on aeroengine health management technology [C] // Aeronautical Testing and Testing Technology Conference, 2015: 391-393. (in Chinese)
- [5] 蔡光耀, 高晶, 苗学问. 航空发动机健康管理系统发展现状及指标体系研究 [J]. 测控技术, 2016, 35 (4): 1-5.
CAI Guangyao, GAO Jing, MIAO Xuewen. Current situation and indexes of prognostics and health management system for aero-engines [J]. Measurement & Control Technology, 2016, 35 (4): 1-5. (in Chinese)
- [6] Hunter G W, Lekki J D, Simon D L. Development and testing of propulsion health management [C] // Workshop on Integrated Vehicle Health Management and Aviation Safety, 2012: 1-6.
- [7] Garg S. Overview of propulsion controls and diagnostics research at NASA Glenn [C] // 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2012.
- [8] Garg S. Air breathing propulsion controls and diagnostics research at NASA Glenn under NASA aeronautics research mission programs [C] // 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2014.
- [9] Souami Y, Mechbal N, Ecoutin S. Robust passive fault tolerant control applied to a fuel metering valve of a jet engine [C] // IEEE Aerospace Conference, 2015: 1-12.
- [10] Mohammadi E, Montazeri-Gh M. Active fault tolerant control with self-enrichment capability for gas turbine engines [J]. Aerospace Science and Technology, 2016, 56 (1): 70-89.
- [11] Saluru D C, Yedavalli R K, Belapurkar R K. Active fault tolerant model predictive control of a turbofan engine using C-MAPSS40k [C] // ASME 5th Annual Dynamic Systems and Control Conference, 2012: 349-358.
- [12] 杨征山, 仇小杰, 庄锡明, 等. 基于模态切换的航空发动机容错控制 [J]. 航空动力学报, 2014, 29 (4): 953-964.
YANG Zhengshan, QIU Xiaojie, ZHUANG Ximing, et al. Aeroengine fault-tolerant control based on mode switch [J]. Journal of Aeroengine Power, 2014, 29 (4): 953-964. (in Chinese)
- [13] 王磊, 谢寿生, 彭靖波, 等. 航空发动机分布式控制系统不确定性鲁棒 H_∞ 容错控制 [J]. 航空动力学报, 2013, 34 (6): 836-842.
WANG Lei, XIE Shousheng, PENG Jingbo, et al. Uncertain robust H_∞ fault-tolerant control for aero-engine distributed control system [J]. Journal of Aeroengine Power, 2013, 34 (6): 836-842. (in Chinese)
- [14] 曹惠玲, 罗立箫, 曲春刚, 等. 基于 LS-SVM 的航空发动机喘振故障诊断研究 [J]. 热能动力工程, 2013, 28 (1): 23-27.
CAO Huiling, LUO Lixiao, QU Chungang, et al. Study of the surge fault diagnosis of an aeroengine based on the LS-SVM [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2013, 28 (1): 23-27. (in Chinese)
- [15] Dong W, Shao P, Xie W, et al. Dynamic surface control design for the rotating stall and surge in an aeroengine compressor [J]. Asian Journal of Control, 2015, 17 (5): 2025-2032.
- [16] 黄伟, 黄向华. 基于主动防喘的航空发动机加速控制仿真 [J].

- 测控技术, 2013, 32 (4): 61-65.
- HUANG Wei, HUANG Xianghua. Adaptive acceleration control for aero-engine based on active anti-surge control [J]. Measurement & Control Technology, 2013, 32 (4): 61-65. (in Chinese)
- [17] 杨帆, 胡骏, 严伟. 航空发动机过失速及喘振模型研究 [J]. 航空发动机, 2017, 43 (1): 41-47.
- YANG Fan, HU Jun, YAN Wei. Model research on post stall and recovering from stall for aeroengine [J]. Aeroengine, 2017, 43 (1): 41-47. (in Chinese)
- [18] 王元, 李秋红, 黄向华, 等. 基于 ADRC 的航空发动机限制保护器设计 [J]. 航空动力学报, 2012, 38 (9): 1154-1157.
- WANG Yuan, LI QiuHong, HUANG Xianghua, et al. Controller design for limit protection of aero-engine based on ADRC [J]. Journal of Aeroengine Power, 2012, 38 (9): 1154-1157. (in Chinese)
- [19] Kolmanovsky I V, Jaw L C, Merrill W, et al. Robust control and limit protection in aircraft gas turbine engines [C]// IEEE International Conference on Control Applications. Dubrovnik, 2012: 812-819.
- [20] Richter H, Litt J S. A novel controller for gas turbine engines with aggressive limit management [C]//47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2011.
- [21] Tian Y, Kolmanovsky I. Reduced order and prioritized reference governors for limit protection in aircraft gas turbine engines [C]// AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2014.
- [22] 殷锴, 魏芳, 张荣等. 考虑限制保护的航空发动机起动控制技术 [J]. 航空发动机, 2016, 42 (2): 34-37.
- YIN Kai, WEI Fang, ZHANG Rong, et al. Starting control strategy considering limit protection for turbofan engine [J]. Aeroengine, 2016, 42 (2): 34-37. (in Chinese)
- [23] Yu D R, Liu X F, Bao W, et al. Multi-objective robust regulating and protecting control for aeroengines [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2009, 131 (6): 61601-61610.
- [24] 刘晓锋. 航空发动机调节 / 保护系统多目标控制问题研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- LIU Xiaofeng. Multi-objective regulating and protection control for aeroengines [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)
- [25] Bao W, Li B, Chang J T, et al. Switching control of thrust regulation and inlet buzz protection for ducted rocket [J]. Acta Astronautica, 2010, 67 (7): 764-773.
- [26] Montazeri-Gh M, Jafari S. Evolutionary optimization for gain tuning of jet engine Min-Max fuel controller [J]. AIAA Journal of Propulsion and Power, 2011, 27 (5): 1015-1023.
- [27] Chen C, Dimirovski G M, Zhao J. Safety protection control for the aeroengines via switching strategy [C]// ASME 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis. Nantes, 2012: 741-747.
- [28] Cao R F, Chang J T, Tang J F. Switching control of thrust regulation and inlet unstart protection for scramjet engine based on min strategy [J]. Aerospace Science and Technology, 2015, 40 (1): 96-103.
- [29] Qi Y W, Bao W, Chang J T. State-based switching control strategy with application to aero-engines safety protection [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2015, 28 (3): 1-11.
- [30] Du X, Richter H, Guo Y Q. Multivariable sliding-modes strategy with output constraints for aeroengine propulsion control [J]. AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2016, 39 (7): 1631-1642.
- [31] Montazeri-Gh M, Safari A. Tuning of fuzzy fuel controller for aero-engine thrust regulation and safety considerations using genetic algorithm [J]. Aerospace Science and Technology, 2011, 15 (3): 183-192.
- [32] Sharifi R, Hacker J, Cao C. Adaptive engine control with multiple constraints [C]// AIAA. Infotech@Aerospace Conference, 2011. (责任编辑 刘玲蕊)

作者简介

齐义文 (1983—) 男, 博士 / 博士后, 副教授。主要研究方向: 先进控制理论及在飞行器 / 发动机中的应用。

Tel: 024-89723961

E-mail: qiyiwen@sau.edu.cn

曹峥 (1992—) 男, 硕士研究生。主要研究方向: 先进控制技术及应用。

Tel: 024-89723961

E-mail: caozheng100@outlook.com

崔建国 (1963—) 男, 博士, 教授。主要研究方向: 航空发动机健康管理。

Tel: 024-89724448

E-mail: gordon-cjg@163.com

Survey of Aeroengine Safety Protection Control Study

QI Yiwen*, CAO Zheng, CUI Jianguo

School of Automation, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China

Abstract: With the continuous development of aeroengine technology, its performance requirements continue to increase, and the engine should not only play the best performance and can not exceed the limits. This makes the engine safety increasingly important, and the corresponding control design, condition monitoring and safety protection issues are of concern to researchers. Based on the analysis of the existing literatures, the paper summarized the research status of the aeroengine safety protection control. First of all, from the perspective of engine reliability, the studies on the health management and fault-tolerant control of aeroengine were reviewed. Furthermore, from the perspective of engine safety, the studies on the surge prevention, limit protection and switching protection of aeroengine were summarized. Finally, the paper gave the research prospects of the safety control of aeroengine.

Key Words: aeroengine; safety protection; control methods

Received: 2017-04-24; **Revised:** 2017-06-12; **Accepted:** 2017-07-12

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61403261) ; Aeronautical Science Foundation of China (2014ZC54014, 2016ZC54008) ; Doctoral Scientific Research Foundation of Liaoning Province (20141077) ; SAU Young and Middle-aged Top-notch Talent Support Program (04160105)

*Corresponding author. Tel. :024-89723961 E-mail: qiyiwen@sau.edu.cn