

气动阀门结构煤油/空气脉冲爆震发动机试验

何小明 王家骅 张靖周

(南京航空航天大学能源与动力学院, 南京, 210016)

摘要:以煤油为燃料、空气为氧化剂,采用气动阀门结构进气,组合结构障碍物强化燃烧和双半V型障碍物加强激波反射,在内径100 mm,长为1 340 mm的爆震管内进行大量的爆震试验,实现工作频率58.8 Hz协调工作。研究爆震室内主要部件在不同工作阶段的功能,并分析主要部件的工作机理,分析了煤油/空气两相可燃混气形成过程,研究煤油/空气脉冲爆震发动机爆震波特性,获得煤油/空气脉冲爆震发动机协调工作关键技术。研究结果为煤油/空气脉冲爆震发动机原理样机设计提供了理论基础。

关键词:脉冲爆震发动机;爆震燃烧;气动阀;强化燃烧

中图分类号:V235.22 文献标识码:A 文章编号:1005-2615(2011)06-0713-05

Experiment of Kerosene/Air Pulse Detonation Engine with Aero-valve Structure

He Xiaoming, Wang Jiahua, Zhang Jingzhou

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Multi-cycle pulse detonation experiments with heated air filled and liquid kerosene fuel injected by aero-valve and accelerating combustion by combined intensifying combustion assembly are carried out in a detonation tube with 100 mm in inner diameter and 1 340 mm in length, and the pulse detonation engine can operate at a frequency up to 58.8 Hz. The function and principle of main parts in the detonation chamber are analyzed with different operation process of pulse detonation engine. The formation mechanism of two-phase combustible mixture and the detonation wave properties are investigated. The key technologies of harmony operation of kerosene/air pulse detonation engine are obtained.

Key words: pulse detonation engine; detonative combustion; aero-valve; intensifying combustion

脉冲爆震发动机(Pulse detonation engine, PDE)是基于爆震燃烧的新概念发动机,是当前倍受关注的新型非稳态动力装置。不仅可以作为独立的推进装置,还可以作为涡喷或涡扇发动机的加力装置,为亚声速和超声速飞行状态的飞行器提供动力^[1-3]。

Achasov^[4]等人进行了钝体气动阀的PDE试验研究,研究了强化紊流作用,通过凹槽面激波汇聚作用,超声速喷射作用等提高爆震的成功起爆,采用氮气稀释的 H_2/O_2 和 C_2H_2/O_2 混合物,研究了

不同氮气稀释率的可燃混气的爆震性能。文献^[5]采用螺旋安置在爆震管中加速DDT实现,Kasahara^[6]在爆震管第一部分安装Shchelkin螺旋加速火焰传播,实现 H_2/O_2 混合物的DDT过程。Lee^[7]进行了许多DDT过程的相关参数研究,如障碍物的堵塞比,间距等。在长1 650 mm,宽45 mm的方管中安装圆形平板障碍物实现乙烯/空气混合物的DDT过程。根据PLIF和纹影图像显示,平板障碍物提高了爆震室内的紊流强度,促进火焰加速,未燃混气中局部热爆炸更进一步加速火焰传播,试验

中发现火焰传播速度必须增加到CJ速度的一半左右才可以实现DDT过程,平板障碍物堵塞比在0.3~0.6之间能够有效增加火焰传播速度,流动阻力损失可以接受。Cooper^[8]研究结果表明,使用堵塞比为43%的扰流装置能够使氮气稀释的丙烷、乙烯和氧气混合物的DDT时间平均降低65%,但是,扰流装置的使用可能使推力降低25%。

本文在进气加温的条件下,以煤油为燃料,空气为氧化剂,在内径100 mm,长1 340 mm的爆震管内进行大量爆震试验。研究爆震室内各种部件的

工作机理,研究煤油/空气脉冲爆震发动机两相可燃混气形成机理,研究煤油/空气脉冲爆震发动机爆震波特性。

1 试验装置与测量方法

煤油/空气脉冲爆震发动机的整体试验装置如图1所示,主要部件包括试车台,空气加热器,爆震管,供油、供气系统,点火系统,测试系统包括开环控制系统,PCB压力传感器,A/D转换器,数据采集系统。

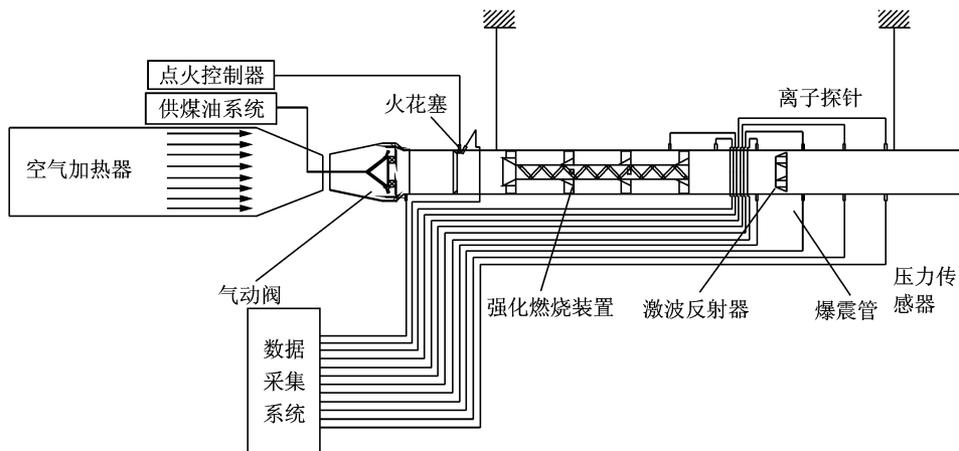


图1 煤油/空气脉冲爆震发动机试验装置

1.1 气动阀

进气装置是脉冲爆震发动机重要部件之一,是形成可燃混气的关键,是实现煤油/空气脉冲爆震发动机高频工作的有效途径之一。本次试验选用直流圆锥体加径向旋流气动阀作为进气装置,如图2所示,主要包括圆锥体、径向旋流器、导流环、溅油环、喷嘴座和进气道等,它具有单向阀、燃油雾化、掺混和扩焰等功能,实现了阀门、混气形成一体化设计。

在混气充填阶段,气动阀起到燃油雾化功能和

掺混功能,同时促使爆震室内气流旋转,使得爆震室内产生火焰后,达到扩焰功能。当爆震室内产生火焰,爆震燃烧阶段,气动阀起到单向阀功能和推力壁功能。膨胀排气阶段,气动阀充当推力壁作用。直流圆锥体加径向旋流气动采用喷油环均布小孔喷注,从小孔喷出的大量油雾飞溅在溅油环上,形成油膜,溅油环两侧是气动阀的喉道,雾化,大油珠变成小油珠然后和来流空气在气动阀出口附近剧烈掺混。小油珠跟随气流进入爆震室,在气动阀的锥体上安装径向旋流器,部分来流空气通过径向旋流器进入爆震室,提高爆震室头部紊流强度,促使来流空气和煤油掺混形成可燃混气。没有完全气化的两相混气在向爆震室下游运动的过程中,进一步雾化、蒸发形成接近恰当比的可燃混气。

1.2 强化燃烧装置

脉冲爆震发动机DDT过程实现需要经过火焰加速、皱褶变形,在火焰前锋产生一系列压缩波,压缩波叠加形成激波,在前导激波形成之前,强化燃烧,促使火焰加速、皱褶变形是非常关键的,能够有效缩短DDT距离(时间)。强化燃烧过程的实现主

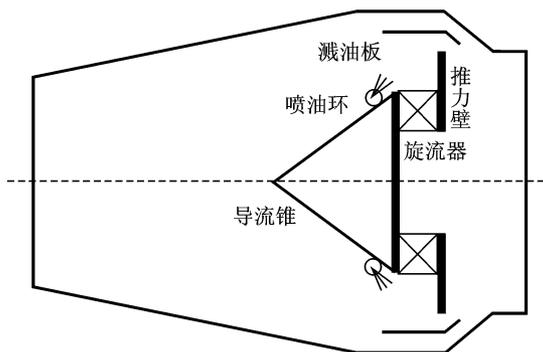


图2 直流圆锥体加径向旋流气动阀

要包括以下途径:(1)提高燃油蒸发率;(2)提高燃油和空气掺混形成接近恰当比的可燃混气;(3)提高燃烧室内紊流强度,提高混气燃烧放热率;(4)利用火焰和障碍物作用,促使火焰皱褶变形。根据强化燃烧的原则,本次试验选用一种组合型障碍物构成的强化燃烧装置,如图3所示。

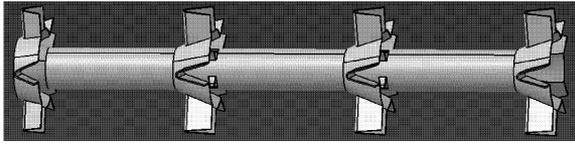


图3 组合型强化燃烧装置

组合型强化燃烧装置是由4个V型掺混器(堵塞比27%)和1个空心管组成,空心管内装有螺旋型障碍物(堵塞比43%),在空心管中部两个环V型槽位置开对称小孔,如图3所示,整体结构堵塞比为35.2%。在爆震管充填过程中,当新鲜混气经过气动阀以后,分为两股,一股气流经过空心管外侧和爆震管组成的通道,在这个区域内,V型掺混器提高了紊流强度并促使可燃混气形成。另外一股气流经过空心管,由于空心管吸收了上个循环的热量,进入管中的混气被加热,提高了煤油的蒸发性能和气流的速度,两股气流在空心管出口处汇合,由于存在速度差,提高了爆震室内的紊流强度。当爆震室内产生火焰以后,空心管外侧和爆震管组成的通道内,火焰和V型掺混器表面作用,促使火焰皱褶变形,增加火焰放热面积,提高火焰放热速率,加速火焰传播。空心管中安装螺旋型障碍物,气流经过障碍物后形成旋转气流,旋转气流具有较高的紊流强度和剪切应力,使得火焰加速。火焰加速反过来又增强紊流强度,这种正反馈作用使火焰不断加速。提高紊流火焰喷射速度,在空心管出口截面附近的适当位置安装激波反射器,能够在其出口附近产生强度较大的激波。激波和紊流火焰相互作用,促使火焰变形,增加火焰放热面积,提高了火焰传播速度。另外,空心管内火焰速度相对其外侧区域火焰速度较快,火焰可以通过小孔点燃外侧区域可燃混气,相当于在爆震室内增加多处点火源,提高爆震室内火焰放热速率,加速火焰传播。组合型强化燃烧装置综合了V型、螺旋型障碍物强化燃烧以及小孔射流点火等快速扩展火焰的优点,同时通过匹配不同堵塞比的强化燃烧结构,满足脉冲爆震发动机强化燃烧装置低阻力损失要求。

1.3 激波反射装置

本文试验选用双半V型激波反射装置,是由两个半V型环楔面体组成,如图4所示,两个楔面体的斜面角均为 22.5° ,高度为24 mm,堵塞比43%。在爆震室充填新鲜混气阶段,双半V型激波反射装置起到掺混、提高爆震室内紊流强度的功能。当爆震室内产生火焰,火焰产生压缩波叠加产生激波以后,激波遇到双半V型激波反射装置发生反射,增强激波强度,并促使火焰和激波发生正反馈机制,有利于缩短爆燃向爆震转变距离(时间)。

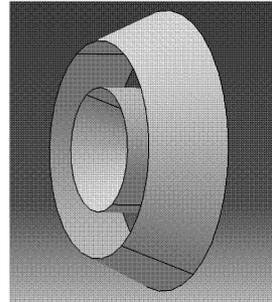


图4 双半V型激波反射装置

1.4 试验方法

本文采用罗茨风机模拟飞行进气,气流经过空气加热器预热,出口温度为 $50\sim 300^\circ\text{C}$ 可调,模拟飞行速度在 $30\sim 140\text{ m/s}$ 之间可调,充填爆震室速度为 $60\sim 90\text{ m/s}$,工作频率为 $20\sim 60\text{ Hz}$,燃料为煤油,供油压力为 $0\sim 4\text{ MPa}$ 。脉冲爆震发动机的工作频率是通过点火频率控制的,利用开环控制系统控制周期保证PDE协调工作。

自行研制离子探针系统^[9],离子探针系统的工作机理是根据燃烧火焰面内存在大量带电离子,形成电流导通区(相当于导线),根据采集到电压信号判断火焰面到达测量点的时间。离子探针1安装在火花塞附近(距离火花塞顶端 $6\sim 10\text{ mm}$)测量点火延迟时间,离子探针2,3,4和5分别安装在距离气动阀出口738,986,1 086和1 186 mm,根据离子探针系统测量结果计算本次试验条件下的煤油/空气混合物的点火延迟和火焰传播速度,PCB压力传感器1安装在气动阀推力壁上,PCB压力传感器2,3,4和5分别安装在距离气动阀出口738,986,1 086和1 186 mm,记录爆震室内压力历程。

2 试验结果与讨论

本次试验条件下,爆震室充填速度为 84.3 m/s ,空气加热器出口温度为 373 K ,煤油为常温,采用自适应控制向爆震室内间歇供油^[10-11],采用开环控

制系统调节PDE的工作周期。

图5给出了工作频率20, 25, 33.3, 40, 50和58.8 Hz 6种不同工作频率情况下爆震室内测量获得的PDE 推力壁和爆震室内压力变化历程,从图上可以看到,工作频率40 Hz时,平均压力峰值最大,工作循环相对最稳定(协调工作)。根据推力壁压力变化历程估算不同工作频率条件下气动阀关闭时间,从而估算出各工作频率条件下爆震室可燃混气充填时间,进而可以计算获得爆震室可燃混气充填距离。随着工作频率的增加,爆震室可燃混气充填距离显著缩短,当工作频率为50, 58.8 Hz时,煤油/空气脉冲爆震发动机的工作模式属于部分充填状态^[12],分别为843和716.5 mm。相对于工作频率为40 Hz的时候,推力壁和爆震室内压力均有降低,尤其爆震室内的压力变化较为明显,这主要因为随着工作频率的增加,充填比例显著降低,导致工作频率在50和58.8 Hz的情况下爆震波没有充分发展,爆

震管后端的压力传感器测量的是衰减的激波压力。因此,在爆震室结构和可燃混气充填速度一定情况下,煤油/空气脉冲爆震发动机存在最佳工作频率。试验结果表明,本次试验条件下,采用气动阀门结构进气,安装组合结构障碍物强化燃烧和双半V型激波反射装置的内径为100 mm,长为1 340 mm的PDE最佳工作频率为40 Hz。

图6给出了煤油/空气脉冲爆震发动机工作频率40 Hz稳定工作时的试验结果,利用5个离子探针和5个PCB压力传感器记录爆震室内火焰传播和压力变化历程,其中离子探针1安装在火花塞附近,压力传感器1安装在推力壁上,离子探针2,3,4,5和PCB压力传感器2,3,4,5在爆震管相同截面上,相位差 90° 。

经过大量试验,根据图6中离子探针1获得信号取多组循环算术平均,获得此条件下煤油/空气混合物的点火延迟时间为2.23 ms。爆燃向爆震转变(DDT)过程指的是从点火时刻到产生稳定传播的爆震波的历程。根据PCB压力传感器记录的曲线,从图上可以看到,PCB压力传感器2位置获得压力峰值平均为3.5 MPa左右,表明在此位置产生了过驱动爆震波,PCB压力传感器4和5位置获得压力峰值均为1.72 MPa左右,表明过驱动爆震波已经衰减为稳定传播的爆震波。因此,获得了此条件下煤油/空气混合物爆燃向爆震转变的位置在压力传感器2和3之间某位置,即爆燃向爆震转变的距离为738~986 mm。因为爆震波的传播速度非常快,爆震波从DDT完成处到PCB压力传感器3传播需要的时间相对于DDT时间可以忽略不计。因此,DDT时间可以根据离子探针1,2记录的火焰传播历程来计算,煤油/空气混合物的DDT时间为2.35 ms左右。通过离子探针信号和压力传感器获得压力历程判断激波和火焰(反应区)是否耦合,以此来确定在某位置产生稳定传播的爆震波,所以爆震波的速度就是火焰传播速度,本次试验通过火焰传播速度计量爆震波传播速度。经过大量试验取多组循环算术平均,本次试验条件下测量到的爆震波传播速度为1 245.6 m/s,相对于气相燃料理论CJ爆震波传播速度偏低,主要因为液态煤油挥发性能较差。两相混气中,液相比例较大,爆震室中存在大量离散液滴,液滴群在激波作用下破碎形成云雾,扩散机制控制燃烧,导致前导激波后反应区放热损失较大,存在非完全燃烧现象,并且可能产生回传激波,化学反应释放能量没有完全提供加速前导激波,使得前导激波以较低的速度传播并与反应区耦合。

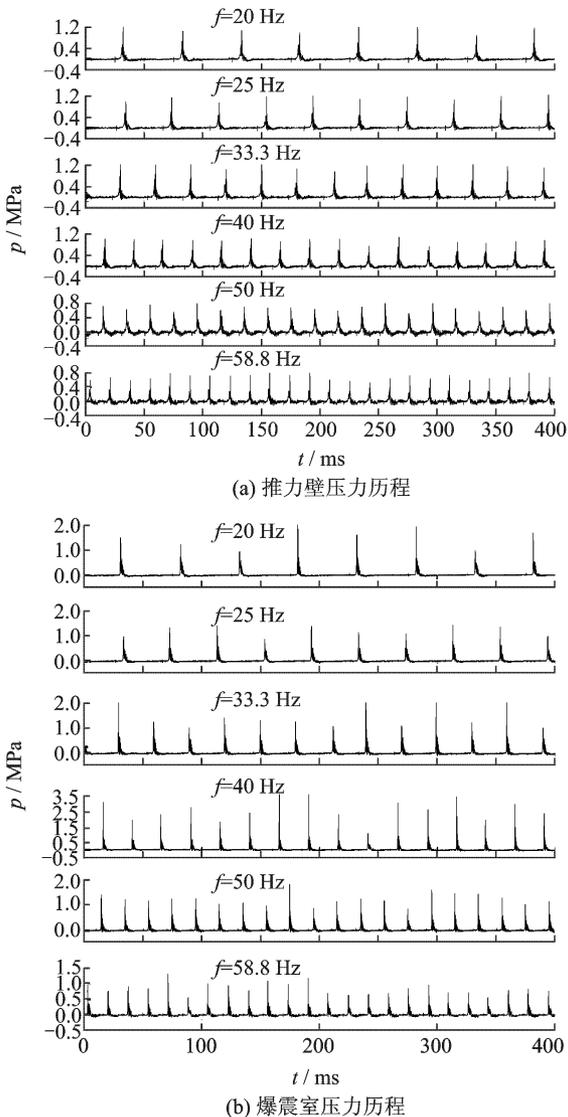


图5 不同工作频率试验结果

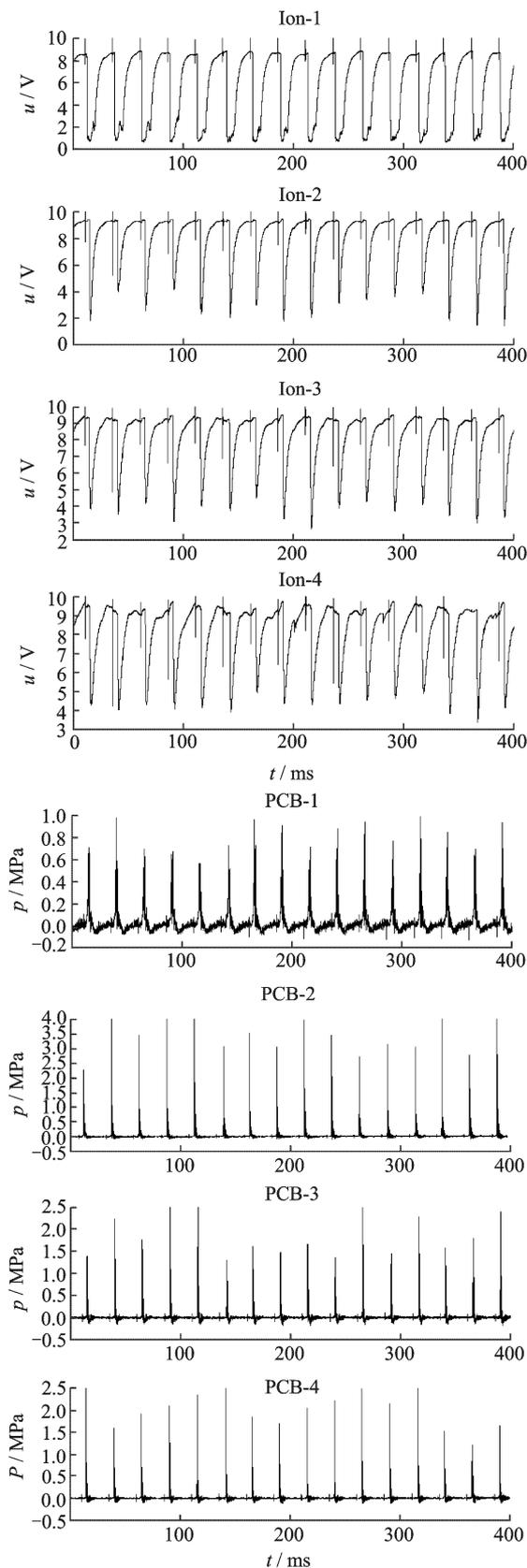


图6 PDE试验结果(40 Hz)

3 结 论

(1)以空气为氧化剂,煤油为燃料,在内径100 mm,长1 340 mm的爆震管内,成功实现了煤

油/空气脉冲爆震发动机以工作频率58.8 Hz稳定工作,研究表明:气动阀、强化燃烧装置和强化激波反射装置的匹配是保证脉冲爆震发动机协调工作的关键技术。

(2)研究了煤油/空气脉冲爆震发动机在工作频率40 Hz时爆震波特性,主要包括点火延迟(2.23 ms),DDT时间(2.35 ms),火焰传播速度(1 245.6 m/s)和爆震波CJ压力(1.72 MPa)等。

(3)煤油/空气脉冲爆震发动机结构和可燃混气充填速度一定情况下,存在最佳工作频率,本次试验条件下,采用气动阀门结构进气,组合结构障碍物强化燃烧和双半V型障碍物加强激波反射的脉冲爆震发动机最佳工作频率为40 Hz。

参考文献:

- [1] Brent T Channell. Evaluation and selection of an efficient fuel/air initiation strategy for pulse detonation engines [D]. Naval Postgraduate School; Office of Naval Research(ONR), 2005.
- [2] Roy G D, Frolov S M, Borisov A A, et al. Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective[C]//Progress in Energy and Combustion Science. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2004: 546-672.
- [3] Fontfreyde T, Levy F, Dupays J, et al. Numerical studies of pulse detonation rocket engines [R]. AIAA 2004-3873, 2004.
- [4] Achasov O V, Penyazkov O G. Some gasdynamic methods for control of detonation initiation and propagation[R]. AIAA 2001-3614, 2001.
- [5] New T H, Panicker P K, Lu F K, et al. Experimental investigations on DDT enhancements by shchelkin spirals in a PDE[R]. AIAA 2006-552, 2006.
- [6] Kasahara J, Takazawa K, Arai T. Experimental study of impulse and heat transfer on pulse detonation engines[R]. AIAA 2002-4071, 2002.
- [7] Lee S Y, Conrad C, Watts J, et al. Deflagration to detonation transition study using simultaneous schlieren and oh PLIF images[R]. AIAA 2000-3217, 2000.
- [8] Cooper M, Jackson S, Austin J, et al. Direct experimental impulse measurements for detonations and deflagrations[R]. AIAA 2001-3812, 2001.
- [9] 张义宁,王家骅,张靖周.两相多循环爆震波特性研究[J].航空动力学报,2006,21(5):699-794.
- [10] 李建中,王家骅,范育新,等.煤油/空气气动阀式脉冲爆震发动机爆震波压力特性试验[J].推进技术,2005,26(5):443-447.
- [11] 范育新,王家骅,李建中,等.脉冲爆震发动机供油自适应控制优化设计研究[J].推进技术,2005,26(1):62-67.
- [12] 李建中,王家骅.煤油/空气脉冲爆震发动机气动阀研究[J].南京航空航天大学学报,2008,40(3):279-283.