

重复使用液体火箭发动机涡轮泵安全寿命预估方法

刘士杰^{1,2}, 刘登丰¹, 马晓秋^{1,2}, 梁国柱³

(1. 中国航天科技集团有限公司 北京航天动力研究所, 北京 100076;

2. 中国航天科技集团有限公司 北京航天动力研究所

低温液体推进技术实验室, 北京 100076;

3. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 102206)

摘 要: 利用复杂系统寿命分布模型和故障树分析(FTA)理论建立了涡轮泵的安全寿命预估方法,并以航天飞机主发动机(SSME)高压液氢涡轮泵(HPFTP)的安全寿命预估为例,对该方法进行了说明。研究结果表明:①当待考核的 HPFTP 关键部件数大于 10 时,其寿命模型可以用指数分布近似表示,数目越多近似结果越可靠;②HPFTP 的平均无故障工作时间(MTBF)为 76 917 h,平均维修时间(MTTR)为 8 879 h,0.998 8 可靠度对应的安全寿命为 25 575 s,可安全使用 49 次;0.999 6 可靠度对应的安全寿命为 8 521 s,可安全使用 16 次;安全使用 11 次对应的可靠度为 0.999 7;③HPFTP 涡轮叶片和喷嘴对应的关键重要度分别是 0.217 5 和 0.216 6,集液器和叶轮对应的关键重要度都是 0.174 2。该研究方法可为液体火箭发动机涡轮泵等复杂组件可重复使用性研究提供一定的参考。

关 键 词: 液体火箭发动机; 涡轮泵; 故障树分析; 寿命分布; 可靠性

中图分类号: V434⁺.21

文献标志码: A

Predicting method of safety life of reusable liquid rocket engine turbopump

LIU Shijie^{1,2}, LIU Dengfeng¹, MA Xiaoqiu^{1,2}, LIANG Guozhu³

(1. Beijing Aerospace Propulsion Institute,

China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100076, China;

2. Laboratory of Science and Technology on Cryogenic Liquid Propulsion,

Beijing Aerospace Propulsion Institute,

China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100076, China;

3. School of Astronautics, Beihang University, Beijing 102206, China)

Abstract: Based on the life distribution model of complex system and fault tree analysis (FTA) theory, a safety life prediction method of turbopump was established. As an example, the safety life of the high pressure liquid hydrogen turbopump (HPFTP) of the space shuttle main engine (SSME) was verified to demonstrate this method. The results showed that: (1) The life

收稿日期: 2021-08-08

作者简介: 刘士杰(1985—),男,工程师,博士,主要研究方向为液体火箭发动机可重复使用性、疲劳与断裂、材料力学本构建模。

通信作者: 梁国柱(1966—),男,教授,博士,主要从事火箭发动机设计、仿真与优化集成研究,火箭发动机点火与燃烧动态过程实验研究,运载器增压输送系统动力学、航天飞行器姿轨控发动机系统总体设计与实验研究。E-mail:lgz@buaa.edu.cn

引用格式: 刘士杰,刘登丰,马晓秋,等. 重复使用液体火箭发动机涡轮泵安全寿命预估方法[J]. 航空动力学报,2022,37(5): 1079-1089. LIU Shijie, LIU Dengfeng, MA Xiaoqiu, et al. Predicting method of safety life of reusable liquid rocket engine turbopump[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(5): 1079-1089.

of complex system roughly followed the exponential distribution when the number of HPFTP critical components was more than 10, and a more reliable result accompanied a larger number. (2) The mean time between failure (MTBF) and mean time to repairment (MTTR) of HPFTP was 76 917 h and 8 879 h, respectively, and the safety life of 0.998 8 reliability was 25 575 s, which can be used 49 times safely; the safety life of 0.999 6 reliability was 8 521 s, which can be used for 16 times; the reliability was 0.999 7 for 11 times safety use. (3) The key components of HPFTP safety life were turbine blade and nozzle, and their corresponding critical importance was 0.217 5 and 0.216 6, respectively, and the critical importance of both liquid collector and the impeller was 0.174 2. This work can provide a reference for the reusability research of complex components such as liquid rocket engine turbopump.

Key words: liquid rocket engine; turbopump; fault tree analysis; life distribution; reliability

随着社会的发展,商业卫星的发射需求不断增加,因此如何在提高航天发射频次、降低发射成本的同时,保证航天发射的安全性成为了越来越重要的一个难题。涡轮泵作为液体火箭发动机的关键组件,其安全寿命的研究具有重要的应用价值。

液体火箭发动机的可重复使用次数直接受其子系统寿命、安全性和维修性的限制。1987年,Cikanek^[1]对航天飞机飞行和试验中出现的故障进行了总结,从1978年航天飞机主发动机(SSME)调试试验至1987年这一段时间,高压液氢涡轮泵(HPFTP)共发生6次故障,其中3次是涡轮叶片破坏,2次是由金属排气总管破裂引起,1次是由热燃气渗入涡轮转子冷却管道引起的。为提高HPFTP多次使用能力,对其涡轮叶片作了大量分析研究,如1988年Abdul-Aziz等^[2]对第1级涡轮叶片进行了三维非线性热结构分析,分析了定向凝固合金MAR-M246和单晶高温合金PWA-1480两种叶片材料。利用Gauglar的STAN5代码产生叶片附面层传热分析用的膜系数(film coefficients),并使用MARC软件对叶片做了弹塑性分析,分析结果表明两种不同材料的叶片热响应存在很大的不同,这可能是由于流场附面层的不一致引起的。尽管文中没有对抗疲劳特性进行定义,但是结果显示两种材料均能抵抗几百次的低周热疲劳。1989年,Paster等^[3]对SSME HPFTP的工作寿命进行了研究,结果表明HPFTP仅可重复使用11次,这与航天飞机可重复使用55次的要求不一致。1993年,Williams^[4]在对SSME进行安全性评估的同时,指出影响HPFTP寿命的主要因素是涡轮叶片(1、2级)和热防护装置,其中

涡轮叶片断裂失效是影响HPFTP安全性最为关键的因素之一。1996年,Abdul-Aziz^[5]又研究了HPFTP第1级涡轮叶片瞬态(启动和关机)、稳态工作阶段非弹性应变以及疲劳裂纹扩展问题,指出大约20%的应力是由热载荷引起的,涡轮叶片高应力区发生在第4榫齿处。工作循环必然会引起这些薄弱部位的疲劳损伤。2011年,Blair等^[6]在总结航天工程中的经验教训的过程中,研究了影响涡轮泵可重复使用的因素,通过对SSME故障历史数据进行总结发现,HPFTP故障次数占到SSME发生故障总次数的26%。在大量研究资料的基础上,2015年,刘士杰等^[7]研究了SSME HPFTP的故障类型,对涡轮叶片故障、叶轮故障、密封故障等模式进行了综述分析,列出了HPFTP在1980~1983年间48个项目相关的457种故障模式、故障原因与故障发生的重要度因子。其中,HPFTP共发生3次1级失效(严重故障),11次2级失效(次严重),429次3级失效和14次3级以上的失效。以上研究为本文工作的开展奠定了数据基础。

对于复杂系统寿命分布,1960年,Drenick等^[8]首先对复杂系统寿命概率分布问题进行了研究,给出了著名的Drenick定理:复杂系统寿命分布服从指数分布。2005年,Tang等^[9]对失效率时间相关的可维修并联系统的可靠性进行了研究,通过求解微分方程得到了系统的可靠度与可用度的计算公式。2018年,Collins等^[10]对复杂系统寿命模型进行了研究,分析发现当系统部件数达到10以上时,随着系统中部件数目的增多,系统寿命概率模型与指数分布的一致性越来越好。故障树分析(fault tree analysis, FTA)方法是获得复杂

系统可靠性指标的重要工具,2011年,刘士杰和梁国柱^[11]利用FTA方法对SSME高压氢泵的可靠性进行了计算分析,理论得到了高压氢泵平均无故障工作时间(MTBF)和平均停机时间(MDT)。2021年,刘士杰等^[12]对液体火箭发动机可重复使用性指标分配方法进行了研究,提出了一种考虑维修性和经济性的可重复使用性指标分配方法,并以涡轮盘和推力室为例对该方法进行演示说明。涡轮泵是复杂的机电系统,它的寿命分布模型研究较少,这是由航天产品量少、工作的特殊性决定的,但确定涡轮泵寿命模型对其可靠寿命评估具有重要应用价值。

综上可知,HPFTP、SSME,以及整架航天飞机的服役寿命不一样便带来如下问题:①维修周期的安排很难统一协调,维修方案的制定会比较繁琐;②考虑到子系统之间,以及子系统与总系统之间的相互影响,各系统之间,甚至部件之间的寿命确定要考虑的因素就变得比较复杂。由于这一复杂性,有关涡轮泵安全寿命的确定方法并未深入开展,基于此,本文以HPFTP安全寿命的研究为契机,提出了一种基于FTA的安全寿命确定方法,给出了HPFTP安全寿命计算流程,在Visual C++6.0开发环境下编程计算了HPFTP的MTBF及其部件的关键重要度,预估了HPFTP的安全寿命,提出了涡轮泵寿命保障的可靠性设计策略。该方法可为其他复杂系统的可靠性分析及安全寿命预估提供一定的参考。

1 HPFTP安全寿命分析理论

1.1 FTA理论简介

FTA方法,是利用逻辑“与门”和“或门”等符号将系统故障的各种原因由总体至部分,按照树状结构,自上而下逐层细化展开的分析方法。目前FTA方法已广泛应用于宇航、核能、电子、机械、化工和采矿等各个领域。

在SSME HPFTP的故障分析中,FTA是故障模式影响与危害度分析的继续,它是一种在详细掌握HPFTP部件失效模式基础上开展的确定HPFTP可靠性参数指标的技术。

首先,根据HPFTP各部件的功能特点、部件之间的功能与故障联系特点、故障的危害程度,以及部件在HPFTP寿命分析中的地位等不同因素,确定系统-部件的功能/故障-危害关系图。然后,在此基础上建立HPFTP的故障树。最后,理

论计算HPFTP的可靠性指标数据,并分析结果。因此,本文按照如下步骤对HPFTP的可靠性参数进行基于FTA的研究。

1) HPFTP故障树的建造

HPFTP故障树建造的主要内容有:了解HPFTP的基本故障模式,导致故障模式的故障因素,故障模式对系统危害程度的分析。相关内容还可参见文献[13]。

2) 建立故障树的数学模型

故障树数学建模的主要内容有:研究HPFTP故障树基本事件的概率数学模型,在此基础上分析系统概率模型的特点,然后为每个事件选定先验的概率分布模型。这为后续的故障树计算提供了数据输入与分析支撑。

3) 定性分析

定性分析的主要内容是利用FTA理论求解HPFTP的割集与路集,其中,割集表示系统在 t 时刻不能正常工作状态,路集表示系统 t 时刻正常工作状态。以此找出导致HPFTP无法正常工作的故障模式与故障组合形式。

4) 定量计算分析

在故障模式研究的基础上,结合给定的寿命概率分布模型,利用HPFTP的故障树,计算其可靠度指标与部件关键重要度。

通过对HPFTP开展以上的FTA,可以计算得到HPFTP的可靠度 P_r 、MTBF、平均维修时间(MTTR),以及部件关键重要度,这为HPFTP安全寿命的预估提供了数据支撑。

1.2 HPFTP可靠寿命模型

HPFTP是由轴承、叶轮、叶片等机械类零部件组成,不同于电子类元器件的寿命分布(电子类元器件的寿命分布多为指数分布),其中,由文献[14]可知HPFTP的机械类元器件的寿命分布多为威布尔分布或对数正态分布。HPFTP单一部件的寿命概率模型比较容易确定,但更为关心的是由这些种类繁多的元器件组成的系统的寿命分布规律,因为这对确定HPFTP的安全寿命是极其关键的。其实,组成HPFTP的零部件个数并未达到成千上万的级别,在几十个数量级范围内的系统寿命概率模型完全可以由各部件的寿命概率分布来确定,此处为了理论研究的完备性,仍以复杂系统(即元器件数目足够多)的理论方法来对HPFTP的寿命概率分布进行研究分析,并与理论模型计算结果进行比较分析。

在本节的理论分析中,首先默认 HPFTP 达到了足够复杂的程度,即部件寿命足以保证建模工作的顺利进行。同时,为了确定 HPFTP 的寿命分布,认为 HPFTP 在服役期内满足如下假定:

1) 所研究的 HPFTP 部件都为关键部件,即从功能失效的角度来看 HPFTP 可以表示成串联系统。

2) 所研究的 HPFTP 部件寿命为任意分布。尽管由文献[14]知,HPFTP 部件的概率寿命模型为威布尔分布或对数正态分布,但为了理论的普适性,此处并不对 HPFTP 部件寿命分布模型作任何假定,理论上讲,这并不影响 HPFTP 的最终分析结果。

3) HPFTP 服役阶段失效的部件不断地由新部件替代,且该类维修属于完全维修,即维修后部件好如当初。

在上述 3 条假设的基础上,参考文献[15]便可推导 HPFTP 的寿命概率分布模型。

HPFTP 在服役过程中由 n 个部件组成,失效的元器件不断的由新元器件所更换,因而在某 t_0 时刻系统中许多元器件的使用时间不相同。如果从 t_0 时刻起计算可靠度,那么系统可靠度就是 1 个条件概率,该过程如图 1 所示,图中 $\#i (i=1, 2, \dots, n)$ 表示第 i 个涡轮泵的工作历程。

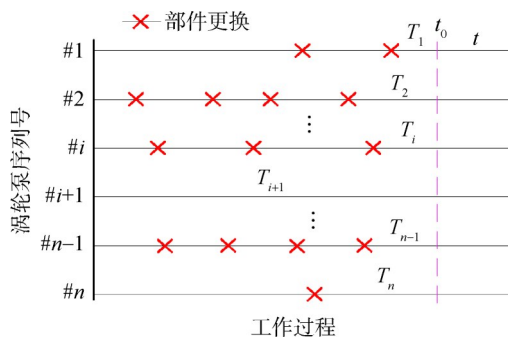


图 1 重复使用涡轮泵工作过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of working process of reusable turbopump

由图 1 可知可靠度函数

$$R(t, t_0 | T_1, T_2, \dots, T_n) = \prod_{i=1}^n \frac{1 - F(t + T_i)}{1 - F(T_i)} \quad (1)$$

式中 T_i 表示第 i 个元器件的使用期,它是与起始时刻 t_0 和元器件寿命分布有关的随机变量; $F(*)$ 表示失效概率分布函数。

设 $q(T_i, t_0)$ 表示 T_i 的密度函数,并以 t_0 时刻作为起点,可得到

$$\lim_{t_0 \rightarrow \infty} q(T_i, t_0) = \lim_{t_0 \rightarrow \infty} R(T_i, t_0) \lambda(T_i) = [1 - F(T_i)] / \xi \quad (2)$$

式中 $\lambda(*)$ 表示失效率函数; $R(*)$ 表示可靠度函数。

于是,HPFTP 的可靠度计算公式可表示为

$$R(t, t_0) = \int_0^\infty \dots \int_0^\infty R(t, t_0 | T_1, T_2, \dots, T_n) \cdot \prod_{i=1}^n q(T_i, t_0) dT_1, \dots, dT_n \quad (3)$$

把式(1)、式(2)代入式(3),则 HPFTP 的可靠度为

$$\lim_{t_0 \rightarrow \infty} R(t, t_0) = \left[\int_0^\infty \frac{1 - F(T + t)}{1 - f(T)} q(T, t_0) dT \right]^n = \left[\int_0^\infty \frac{1 - F(T + t)}{\xi} dT \right]^n \quad (4)$$

式中 $f(*)$ 表示寿命概率密度函数; ξ 表示平均无故障时间(MTBF)。令 $T + t = y$ 代入式(4),得

$$\lim_{t_0 \rightarrow \infty} R(t, t_0) = \left[\int_t^\infty \frac{1 - F(y)}{\xi} dy \right]^n = \left[\int_0^\infty \frac{1 - F(y)}{\xi} dy - \int_0^t \frac{1 - F(y)}{\xi} dy \right]^n = \left[1 - \frac{t}{\xi} + \int_0^t \frac{F(y)}{\xi} dy \right]^n \quad (5)$$

为了对式(5)作进一步化简,需要了解概率分布的一些基本特性。图 2 是形状参数等于 2.2,尺寸参数等于 250 的威布尔累计失效概率分布图。

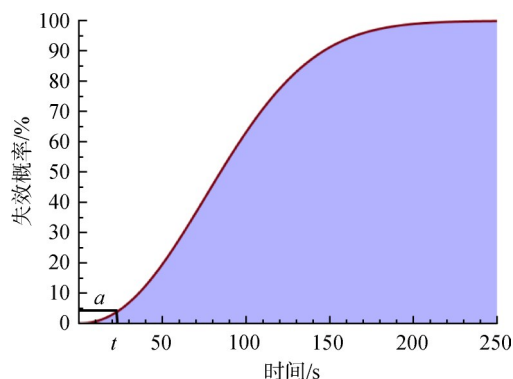


图 2 威布尔分布的失效概率函数

Fig.2 Failure probability function of Weibull distribution

从图 2 可以看出,部件寿命两个典型的失效概率值为 $F(0)=0, F(+\infty)=1$ 。这表示开始工作前部件功能完好,随着工作时间的持续,部件必定发生故障。

如果令 t 时刻的失效概率为 a , 则由图 2 可知

$$\int_0^t F(y) dy < at \quad (6)$$

把式(6)代入式(5)得

$$\lim_{t_0 \rightarrow \infty} R(t, t_0) = \left[1 - \frac{t}{\xi} (1 - a) \right]^n \quad (7)$$

定性地来看, 由大量元器件组成的复杂系统的寿命应远低于元器件的寿命, 即复杂系统寿命 t 相对于元器件寿命分布函数图上离原点更近, 所以 $a \ll 1$, 而当 $n \rightarrow \infty$ 时, $a \rightarrow 0$, 所以可把式(7)展开成泰勒级数:

$$\lim_{t_0 \rightarrow \infty} R(t, t_0) = 1 - \frac{nt}{\xi} + \frac{n(n-1)}{2!} \left(\frac{t}{\xi} \right)^2 + \dots + \frac{n(n-1) \dots 1}{n!} \left(\frac{t}{\xi} \right)^n + \dots \quad (8)$$

同时, 可以把指数函数 $\exp\left(-\frac{nt}{\xi}\right)$ 展开成泰勒级数:

$$\exp\left(-\frac{nt}{\xi}\right) = 1 - \frac{nt}{\xi} + \dots + \frac{n^2}{2!} \left(\frac{t}{\xi} \right)^2 + \dots + \frac{1}{n!} \left(\frac{nt}{\xi} \right)^n + \dots \quad (9)$$

比较式(8)和式(9)可见, 当 $n \rightarrow \infty$ 时,

$$\lim_{t_0 \rightarrow \infty} R(t, t_0) = \lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ \Delta t \rightarrow 0}} \left(1 - \frac{t}{\xi} \right)^n = \exp\left(-\frac{nt}{\xi}\right) \quad (10)$$

因此, 当 t_0 和 n 为大数时, 系统的寿命概率模型趋近于指数分布:

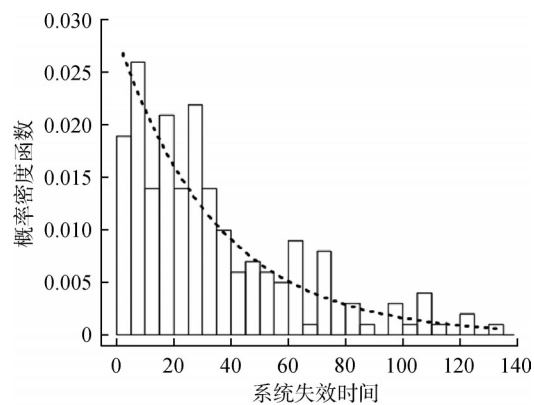
$$R_0(t) \approx \exp\left(-\frac{nt}{\xi}\right) \quad (11)$$

如果 HPFTP 的寿命服从指数分布, 那么它的可靠寿命(即某一可靠度下的寿命)可以表示为

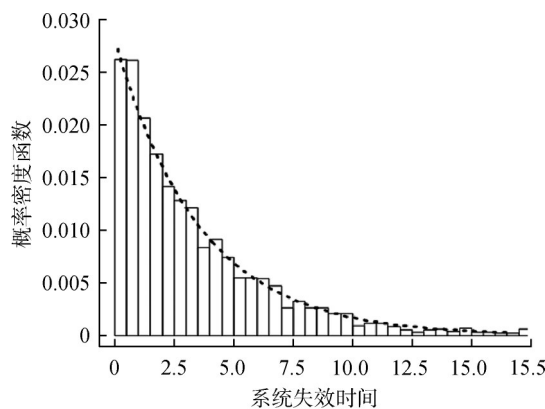
$$t_{\text{safe}} = \ln\left(\frac{1}{R^{\frac{1}{n}}}\right) \quad (12)$$

由式(12)可知, 在知道系统 MTBF 的情况下, 可以求 HPFTP 对应任意可靠度下的可靠寿命。然而, 组成系统的部件个数究竟达到多少才能使得该模型可以合理描述系统的寿命状态是问题分析的关键, 文献[10]给出了如图 3 所示的研究结果。

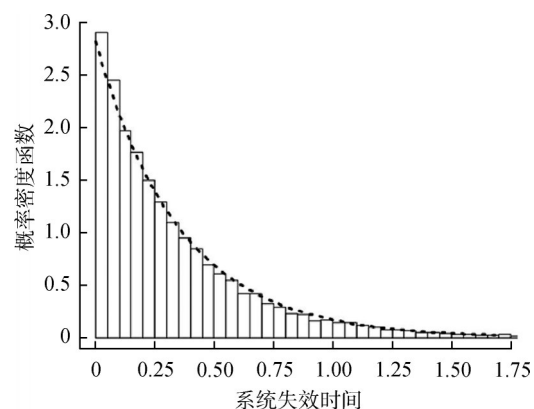
由图 3 可知, 当部件数目(或待考察的寿命影响因素)大于 10 时, 系统的寿命可以近似利用指数分布来描述, 这需要研究者特别注意。



(a) 部件数为10



(b) 部件数为100



(c) 部件数为1000

图3 部件数与系统寿命概率分布模型关系^[10]

Fig.3 Relationship between component number and system life probability distribution model^[10]

1.3 HPFTP可靠性参数计算理论

方便起见, 可以假设 HPFTP 各部件的寿命概率模型为指数分布, 这样假设的合理性主要由如下3点保证:

1) 由文中第 1.2 节的推导可知, 复杂系统的概率寿命模型为指数分布, 部件的分布类型对系统分布类型无影响。

2) MTBF 与平均故障维修时间的推导与事件

的发生频率有关,所有概率分布模型都对应着一定的失效率函数,应用指数分布会使分析更加方便。

3) 对于寿命不服从指数分布的模型可以通过引入等效指数概率分布模型来在指数分布下对该部件的寿命可靠性进行分析。

HPFTP 是由众多机械部件构成的复杂系统,随着部件的使用,其失效率 λ 不可能保持为常数,它应当是时间的函数 $\lambda(t)$ 。同时,各部件还要进行一定的维修翻新,这对应着一定的修复率 $\mu(t)$ (它类似失效率函数,表示单位时间内瞬态修复的概率)。为此,研究 HPFTP 可重复使用性的最合乎逻辑的方法应该是 Markov 更新过程理论^[7],但本文的目的是给出 HPFTP 安全寿命预估理论,部件失效率 $\lambda(t)$ 的取值应当对安全寿命预估框架不构成影响。为了方便计算 HPFTP 的 MTBF 与 MTTR,HPFTP 除满足文中第 1.2 节的假设外,还引入如下假设:

1) HPFTP 各部件的失效率 $\lambda(t)$ 为常数。

2) HPFTP 部件的失效率与它的修复率之比小于 0.1,这主要是保证不管修理人员多还是少,也不管系统失效时是否停止工作,都可以把系统内各部件的工作与修复近似看作彼此独立^[15]。

3) MTTR 仅考虑维修时间,不考虑故障后的准备、等待维修的时间。

在利用 FTA 理论计算 HPFTP 系统的可靠性指标时,借助于系统的割集、路集来求系统的失效率频率和修复频率^[16],主要公式如下:

$$f_s(t) = P_i \left\{ \bigcup_{z=1}^m \left[\bar{K}_z \cap \left(\bigcup_{j=1}^{n_i} g_{t_{zj}} \right) \right] \right\} \quad (13)$$

$$f_i(t) = P_i \left\{ \bigcup_{z=1}^l \left[L_z \cap \left(\bigcup_{j=1}^{k_i} q_{t_{zj}} \right) \right] \right\} \quad (14)$$

其中 $f_s(t)$ 为 HPFTP 正常工作频率; $f_i(t)$ 为 HPFTP 失效频率; K_z 为 HPFTP 内第 z 个割集, $\bar{K}_z$ 是 K_z 的补集; L_z 为 HPFTP 内第 z 条路集; $g_{t_{zj}}$ 为 HPFTP 内第 z 个割集中的第 j 个失效部件在 t 时刻单位时间内被修复; $q_{t_{zj}}$ 为 HPFTP 内第 z 条路集中的第 j 个部件在 t 时刻单位时间内发生失效。

当求得 HPFTP 的修复频率与失效率后,便可利用式(15)求得系统循环工作周期和平均停机时间^[17]:

$$C = 1/f_i, \quad t_{md} = P_i/f_i \quad (15)$$

式中 C 为循环工作周期; t_{md} 为平均停机时间(MDT); P_i 为无效度,即 HPFTP 处于不能工作

状态的概率。通过前面的假设可以知道,本文 MTBF 就是平均可用时间,MTTR 就是平均停机时间,两者之和就是 C 。

HPFTP 部件关键重要度的定义:HPFTP 部件 i 的关键重要度是指该部件故障概率的变化与由它引起 HPFTP 故障发生概率的变化率之比,其定义用式(16)表示:

$$I_i^{cr}(t) = \lim_{\Delta Q_i(t) \rightarrow 0} \frac{\frac{\Delta g[Q(t)]}{g[Q(t)]}}{\frac{\Delta Q_i(t)}{Q_i(t)}} = \frac{Q_i(t)}{g(t)} \cdot \frac{\partial g[Q(t)]}{\partial Q_i(t)} \quad (16)$$

式中 g 表示故障事件发生的概率密度函数; Q 表示 HPFTP 的不可靠度; Q_i 表示第 i 个部件的不可靠度。

因为部件故障概率 $I_i^{pr}(t) = \frac{\partial g[Q(t)]}{\partial Q_i(t)}$, 所以

关键重要度 $I_i^{cr}(t) = \frac{Q_i(t)}{g(t)} I_i^{pr}(t)$, 可见用概率结

构重要度乘上 $\frac{Q_i(t)}{g(t)}$ 就可求出关键重要度。

2 HPFTP 安全寿命程序流程图

基于 FTA 理论的 HPFTP 安全寿命计算程序主要分为两大模块:① HPFTP 割集/路集计算;② HPFTP 可靠性参数计算、关键重要度计算,以及安全寿命分析。

模块 1 是利用 FTA 理论程序计算引起 HPFTP 失效的割集与使得 HPFTP 正常工作的路集,其计算流程图,见图 4。

图 4 中割集的求解采用的是 Fussell-Vesely 算法中的下行法,该方法的要点是利用“与门”直接增加割集的容量,“或门”增加割集数目这一性质。简单地来说,“与门”代表所有的下级事件都发生时上级事件才发生,而“或门”表示只要下级事件有一个发生,则上级事件便发生。这从逻辑上表示了故障发生的一种从属关系。需要注意的是,为了便于计算机进行程序计算,故障树中所有的事件需要先进行数字化编码处理,详细过程见文中第 3 节的实例或文献[13,17]。

模块 2 是利用 FTA 理论,程序计算 HPFTP 平均故障间隔时间和 MTTR,以及各部件关键重要度,并在此基础上分析 HPFTP 的安全寿命。程序计算流程图,见图 5。

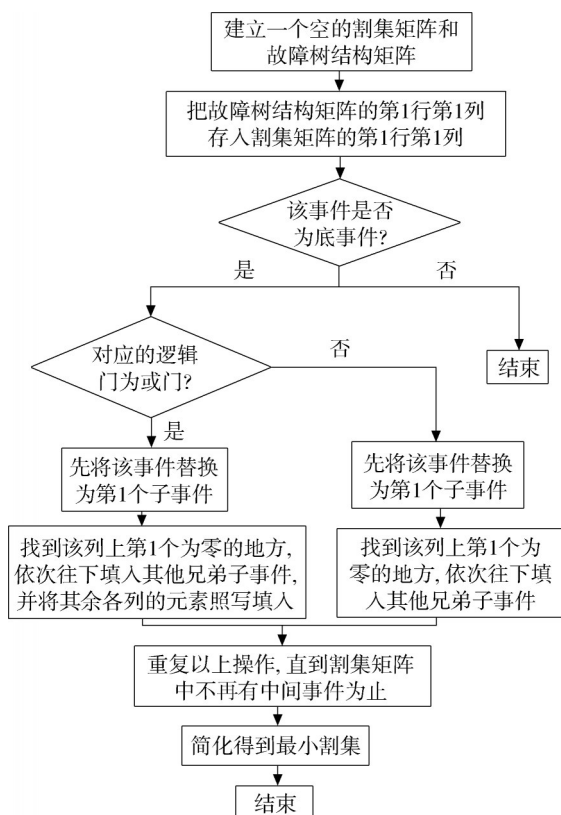


图4 HPFTP割集/路集计算流程图

Fig.4 HPFTP cut set/path set calculation flow chart

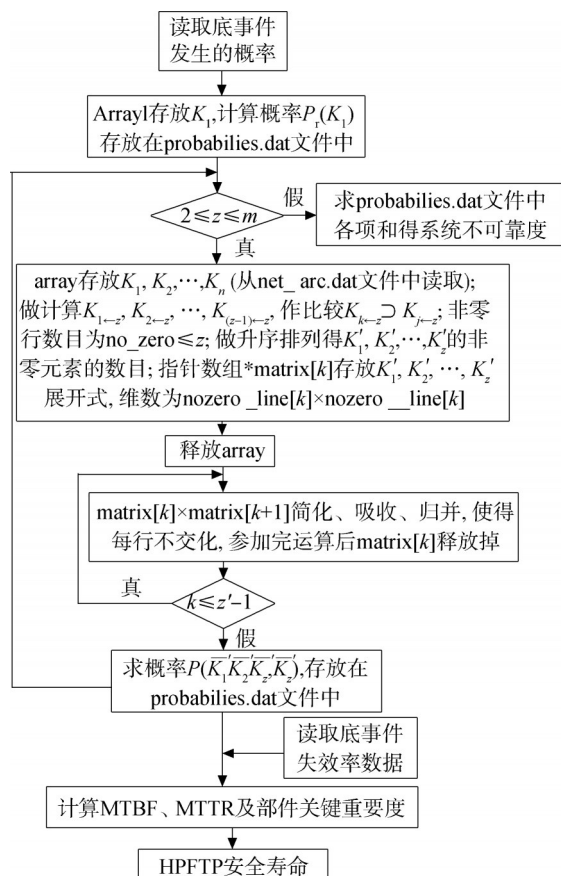


图5 HPFTP安全寿命计算流程图

Fig.5 HPFTP safety life calculation flow chart

图5中可靠性参数的计算是采用直接不交化算法,算法详细介绍见文献[13],其他细节参见文中第1.2节和第1.3节的理论。

3 SSME HPFTP安全寿命分析

故障模式影响与危害度分析是开展FTA、安全寿命评估的基础。2015年,刘士杰等^[7]对SSME HPFTP的主要故障模式进行了综述研究,结果表明HPFTP主要有涡轮叶片断裂、轴承故障、密封件失效、涡轮进气回转导管扭曲、叶轮故障等失效模式。结合文献[14]的故障模式总结分析报告,本文给出了HPFTP结构失效故障树,如图6所示。

由图6可以看出,HPFTP的故障树层次性地给出了导致HPFTP结构失效的原因。注意由于图5可以直接看出故障树的割集情况,故本文不再讨论该项研究内容。为了便于计算机处理,表1采用文献[18]的方法将图6中的各个事件进行数字化编号。

结合文献[7, 14]给出了各个部件故障发生(底事件)的不可靠度,如表2所示。表2中的代码与表1的底事件名称相同。

在表2的基础上,HPFTP的可靠度 R 可以直接由FTA程序计算得到,本文以该计算值作为HPFTP的可靠度 R 。同时,参考文献[3],将“工作11次(即 $1.65\text{ h}=5\,940\text{ s}$)后可靠度不低于 R ”作为本文SSME HPFTP的安全寿命指标。于是在文中第1.3节假设2)的基础上,采取如下方法研究HPFTP的安全寿命指标:

1) 令HPFTP所有部件的失效率 $\lambda=1.00\times 10^{-4}\text{ h}^{-1}$,修复率 $\mu=1.00\times 10^{-6}\text{ h}^{-1}$,计算得到HPFTP的 $R=0.998\,8$,MTBF为454.5 h,MTTR为89 h,对应的可靠寿命为50 s,此时涡轮泵连单次使用要求也达不到,和实际情况不符。

2) 令HPFTP所有部件的失效率 $\lambda=1.00\times 10^{-5}\text{ h}^{-1}$,修复率 $\mu=1.00\times 10^{-7}\text{ h}^{-1}$,计算得到HPFTP的 $R=0.998\,8$,MTBF为7 692 h,MTTR为888 h,可靠寿命为852 s,即涡轮泵可安全使用1次。

3) 令HPFTP所有部件的失效率 $\lambda=1.00\times 10^{-6}\text{ h}^{-1}$,修复率 $\mu=1.00\times 10^{-8}\text{ h}^{-1}$,计算得到HPFTP的 $R=0.998\,8$,MTBF为76 917 h,MTTR为8 879 h,可靠寿命为25 575 s,即涡轮泵可安全使用49次; $R=0.999\,6$ 对应的寿命为8 521 s,

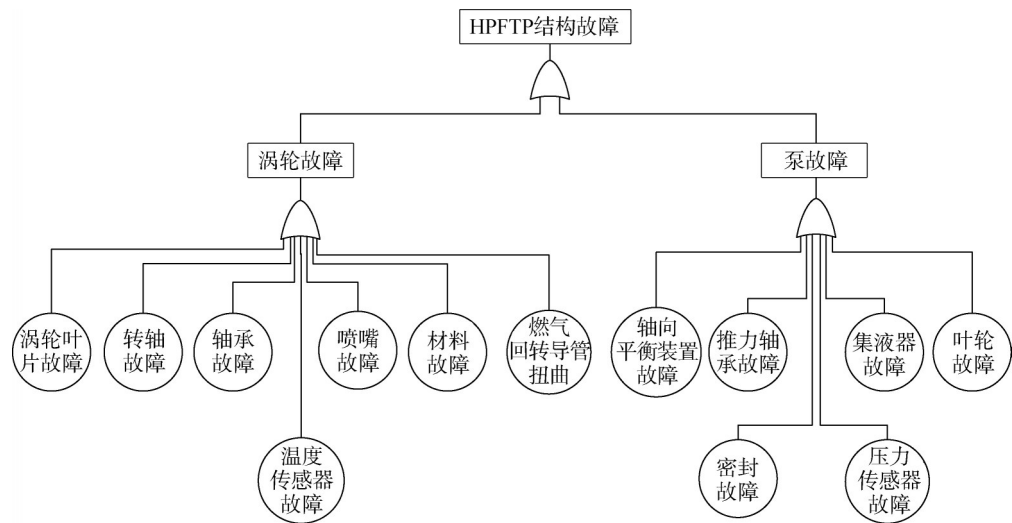


图6 HPFTP结构失效故障树
Fig.6 HPFTP structure failure tree

表 1 HPFTP FTA 事件数字化
Table 1 HPFTP FTA event digitization

事件名称	HPFTP结构失效	HPFTP涡轮故障	HPFTP泵故障	涡轮叶片故障	转轴故障	轴承故障	温度传感器故障	喷嘴故障
代码	401	402	403	1	2	3	4	5
事件名称	材料故障	燃气回转导管扭曲	轴向平衡装置故障	推力轴承故障	密封故障	压力传感器故障	集液器故障	叶轮故障
代码	6	7	8	9	10	11	12	13

表 2 HPFTP FTA 底事件(部件)不可靠度
Table 2 HPFTP FTA bottom event (component) unreliability

代码	1	2	3	4	5	6	7
不可靠度	2.51×10^{-4}	4.20×10^{-8}	4.20×10^{-8}	1.43×10^{-7}	2.50×10^{-4}	4.20×10^{-8}	4.20×10^{-8}
代码	8	9	10	11	12	13	
不可靠度	4.20×10^{-8}	5.02×10^{-5}	1.50×10^{-4}	5.00×10^{-5}	2.01×10^{-4}	2.01×10^{-4}	

注:表中上标带*为估计数据,其他数据来自文献[14]。

安全使用16次;安全使用11次对应的 $R=0.999\ 7$ 。

通过以上研究发现,当HPFTP各部件失效率 $\lambda=1.00\times10^{-6}\ \text{h}^{-1}$,修复率 $\mu=1.00\times10^{-8}\ \text{h}^{-1}$ 时比较接近真实使用状况。其实,HPFTP统计可靠度为0.999 6,显然这更加表明此处给出的 λ 和 μ 具有一定的参考价值(数值可能与本文有差别,但量级上是比较合理的),这些数据可以为可重复使用涡轮泵的研究提供一定的数据参考。

需要说明的是,本文用同一个MTBF去评价不同可靠度下的涡轮泵寿命是基于这样的事实:①利用FTA涡轮泵的可靠性参数时,涡轮泵可靠度的计算不影响涡轮泵MTBF的计算,这是因为

MTBF是由涡轮泵底事件的路集或割集、失效率和修复率决定的。尽管失效率和修复率在某种程度上反映了部件可靠度的大小(即对部件可靠度有影响),但这可以通过调整涡轮泵部件的工作时间来抵消这一影响;②通过前文的理论分析可知,假如涡轮泵的寿命服从指数分布,则涡轮泵的可靠度与工作时间的关系可由MTBF唯一确定。基于以上分析,本文关于涡轮泵可靠寿命的分析计算方法理论可行。通过以上分析可知,安全寿命是对系统可靠度和工作时间的综合评价,工作时间越短,则它发生故障的机会越小,就越安全可靠,反之亦然。在实际的应用中,不能一味地为了

追求高可靠性而降低工作时间(寿命)限制 HPFTP 应有的工作能力,也不能冒着发生故障的风险去延长它的工作时间,良好的指标需要通过多学科的优化协调制定。

本节计算的 MTTR 仅有 8 879 h,如果假设维修时间也服从指数分布,且具有式(11)的形式,则 6.8 h 修好的概率为 0.99;24 h 不间断修好的概率为 0.965。这可能与实际涡轮泵使用情况有差异,原因可能是由于失效率、修复率数据给的不合理造成的,也可能是由于未考虑资源调配等因素引起的,但因为涡轮泵部件维修信息比较少,它的失效率、修复率相关的资料更加稀少,而且本节的目的是验证利用 MTBF 评估涡轮泵可靠寿命的可行性,所以不对 MTTR 作过多分析。实际上,对于研究情况 3),根据 MTTR 与 MTBF 计算得到的 HPFTP 的可用度为 0.897,这与实际情况也是不符的(涡轮泵的停机维修时间远高于它的工

作时间,它的可用度较低),由前文可知,修复率参考资料少,MTTR 的计算存在偏差,故可用度与实际情况不符,但安全寿命的确定仅直接与 MTBF 相关,故此处可用度的不符并不影响安全寿命的分析。2015 年,刘士杰和梁国柱^[19]对 SSME HPFTP 可用度的数字仿真方法进行了研究,此处不再赘述。注意,前文给出的涡轮泵故障树其实是串联模式,即各个底事件的发生均可导致涡轮泵失效。这样,它的可靠度比较容易求得,但如果系统中存在并联和/或旁路设计,那么利用 FTA 可靠性参数指标(尤其是重要度分析)的优越性就会变得很明显。

利用式(16)得到 HPFTP 各部件的关键重要度,如表 3 所示。

为了直观分析各部件对 HPFTP 安全寿命的影响程度,本文给出了各部件关键重要度直方图,如图 7 所示。

表 3 HPFTP 部件关键重要度
Table 3 Critical importance of HPFTP components

代码	1	2	3	4	5	6	7
关键重要度	0.217 5	3.638×10^{-5}	3.638×10^{-5}	1.239×10^{-4}	0.216 6	3.638×10^{-5}	3.638×10^{-5}
代码	8	9	10	11	12	13	
关键重要度	3.638×10^{-5}	4.349×10^{-2}	0.130 0	4.332×10^{-2}	0.174 2	0.174 2	

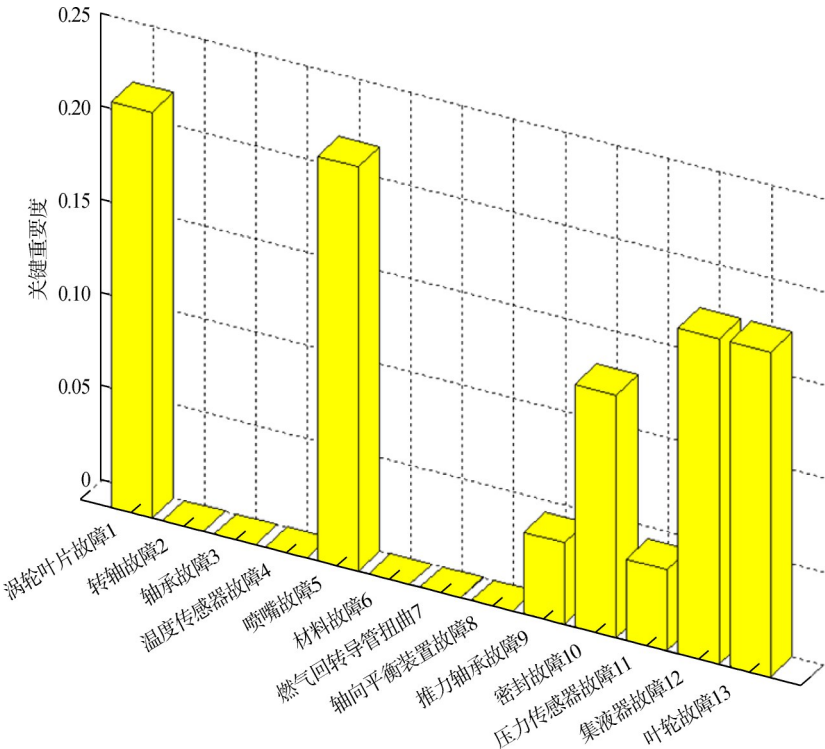


图 7 HPFTP 部件关键重要度柱状图
Fig.7 Component criticality histogram of HPFTP components

由图7可知,涡轮叶片和喷嘴的故障对HPFTP安全性的影响最大。在HPFTP设计阶段需要着重分析涡轮叶片失效模式和失效机理,有针对性地解决诸如叶片的热机械疲劳、腐蚀(大气接触时的氧化、富氢状态的氢脆)、蠕变(高温、长时间服役的重复使用涡轮泵)、微动磨损(带榫齿叶片),以及喷嘴的热烧蚀问题。集液器故障和叶轮故障的影响次之,要注意这些部件的焊接疲劳、汽蚀冲击等故障模式。其次,密封件故障、推力轴承故障,以及压力传感器故障也需要引起重视。

注意,本文研究的各部件对HPFTP的安全性影响都较大,由故障树结构可知各部件故障属于串联关系,可以不用计算关键重要度,通过可靠度就知道哪个部件对HPFTP更为重要,但是对于HPFTP中并联部分的部件(比如故障诊断系统中备份涡轮温度检测设备),其可靠度的大小不能直接反映它对系统可靠度的影响程度,此时进行关键重要度计算是很有必要的。本文正是基于此才开展了部件关键重要度的研究。

4 结 论

本文旨在建立可重复使用液体火箭发动机涡轮泵安全寿命指标的评价方法。基于复杂系统寿命概率分布模型和FTA理论,以SSME HPFTP为对象,开展了涡轮泵安全寿命的研究。首先,对复杂系统寿命服从指数分布这一理论进行了公式推导验证;然后,给出了基于故障树的系统可靠性参数计算流程,建立了SSME HPFTP的故障树,并数值求解了HPFTP的可靠性参数,在此基础上对HPFTP的安全寿命进行了理论分析。最后,对HPFTP的安全寿命和部件关键重要度进行了分析说明。通过本文的研究,得到如下结论:

1) 复杂系统寿命服从指数分布,这一关系与部件数目 n 有关, n 越大这一关系的符合性越好,HPFTP关键部件数为13,其寿命模型可以用指数分布表示。

2) 根据HPFTP所有部件的失效率 $\lambda=1.00\times 10^{-6}\text{ h}^{-1}$,修复率 $\mu=1.00\times 10^{-8}\text{ h}^{-1}$,计算得到HPFTP的MTBF为76 917 h,MTTR为8 879 h,0.998 8可靠度对应的安全寿命为25 575 s,即涡轮泵可安全使用49次;0.999 6可靠度对应的安全寿命为8 521 s,安全使用16次;安全使用11次对应的可靠度为0.999 7,这些研究结果可为相似型

号的研制提供数据参考。

3) HPFTP安全寿命影响关键件是涡轮叶片和喷嘴,它们对应的关键重要度分别是0.217 5和0.216 6,其次是集液器故障和叶轮故障,它们对应的关键重要度都是0.174 2,在现有型号研制中这几类部件依旧是故障频发件,而且故障发生的相对频次和重要程度与本文研究基本吻合,因此,需要着重对这些部件开展故障模式与故障机理的研究。

本文可为液体火箭发动机涡轮泵可重复使用性研究提供参考。

参考文献:

- [1] CIKANEK H A.Characteristics of space shuttle main engine failures[R].AIAA-87-1939,1987.
- [2] ABDUL-AZIZ A, THOMPSON R L.Thermal-structural analysis of space shuttle main engine (SSME) hot section components[R].NASA-22404,1988.
- [3] PASTER R D,STOHLER S L.SSME evolution[R].AIAA-1989-2618,1989.
- [4] WILLIAMS W C.Report of the SSME assessment team[R].Washington DC:National Aeronautics and Space Administration,N93-21645,1993.
- [5] ABDUL-AZIZ A.Structural evaluation of a space shuttle main engine (SSME) high pressure fuel turbopump turbine blade[R].NASA-CR-198428,1996.
- [6] BLAIR J C,RYAN R S.Lessons learned in engineering[R].NASA/CR-216468,2011.
- [7] 刘士杰,梁国柱.航天飞机主发动机高压燃料涡轮泵的故障模式[J].航空动力学报,2015,30(3):611-626.
LIU Shijie,LIANG Guozhu.Failure modes of space shuttle main engine high-pressure fuel turbopump[J].Journal of Aerospace Power,2015,30(3):611-626.(in Chinese)
- [8] DRENICK R F.The failure law of complex equipment[J].Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics,1960,8(4):680-690.
- [9] TANG S D,WANG F Q.Reliability analysis for a repairable parallel system with time-varying failure rates[J].Applied Mathematics:A Journal of Chinese Universities,2005,20(1):85-90.
- [10] COLLINS D H,WARR R L.Failure time distributions for complex equipment[J].Quality and Reliability Engineering International,2018,35(1):1-9.
- [11] 刘士杰,梁国柱.FTA方法在SSME高压氢泵可靠性分析中的应用[C]//2011年中国航天第三专业信息网学术交流会论文集.甘肃 敦煌:中国航天第三专业信息网,2011:790-797.
- [12] 刘士杰,康红雷,梁国柱.液体火箭发动机重复使用性指标分配方法的初探[C]//第三届空天推进技术会议论文集.福建 厦门:中国航天科技集团第六研究院有限公司,2021:

- 82-91.
- [13] 金星,洪延姬,沈怀荣,等.工程系统可靠性数值分析方法[M].北京:国防工业出版社,2002.
- [14] FRAGOLA J R, MAGGIO G. Probabilistic risk assessment of the space shuttle. phase 3: a study of the potential of losing the vehicle during nominal operation[R]. NASA-CR-197810, 1995.
- [15] 丁定浩,可靠性与维修性工程:系统与电路结构的分析和设计[M].北京:电子工业出版社,1986.
- [16] SINGH C. Calculating the time-specific frequency of system failure[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1979, R-28(2): 124-126.
- [17] SINGH C, BILINTON R. A new method to determine the failure frequency of a complex system[J]. Microelectronics Reliability, 1973, 12(5):459-465.
- [18] 石彬,基于故障树的EPS系统可靠性及失效模式仿真研究[D].杭州:浙江大学,2007.
- SHI Bin. Study on the reliability and failure modes simulation of EPS system based on FTA[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese)
- [19] 刘士杰,梁国柱,重复使用液体火箭发动机可用度的数字仿真[J].北京航空航天大学学报,2015,41(12):132-140.
- LIU Shijie, LIANG Guozhu. Digital simulation on reusable liquid rocket engine availability[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(12):132-140. (in Chinese)

(编辑:陈越)