

航空发动机反推作动器卡滞故障分析



杨向群¹, 田杨涛², 王胜², 袁杰²

1. 空军装备部驻西安地区军事代表局驻西安地区第五军事代表室, 陕西 西安 710077

2. 航空工业庆安集团有限公司, 陕西 西安 710077

摘 要:反推作动器用于同步驱动反推力装置移动外罩展开, 实现大型飞机在着陆后或中断起飞(RTO)过程中减小飞机速度、缩短滑跑距离, 尤其是在雨雪天气下, 保证飞机安全降落。针对某发动机反推作动器外场卡滞无法收起的故障问题, 通过反推作动系统工作原理分析, 开展了卡滞故障原因分析, 建立了作动器卡滞故障树。然后对底事件逐一排查, 对产品分解检查以及试验验证, 最终确定该卡滞故障是由于反推作动器在侧向载荷作用下丝杠螺母传动副卡滞, 进而导致反推力装置无法收回。最后, 通过对丝母内螺纹牙尖增加倒角, 并在模拟反推力装置侧向载荷的试验条件下开展改进产品试验验证。结果表明, 丝母的内螺纹牙尖增加倒角后, 减小了丝杠螺母传动副在侧向载荷下的摩擦力, 减轻了磨损, 提高了反推作动器在工作中承受侧向载荷的能力, 防止作动器卡滞。本文故障分析方法与结果对外场同类故障排除具有积极的指导意义, 也为后续同类产品改进设计和新研产品开发奠定了坚实的基础。

关键词:航空发动机; 反推力装置; 液压; 作动器; 卡滞

中图分类号: V211

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2021.08.007

反推力装置是大型飞机重要的减速装置, 安装于发动机的排气尾管处, 通过改变发动机排气方向, 在着陆后或在中断起飞(rejected take off, RTO)过程中帮助减小飞机的速度。与制动、扰流板等其他几种减速方式相比, 反推力装置能够有效缩短飞机着陆滑跑距离, 减少制动片的磨损, 应急效果好, 且减速效果不受湿滑或结冰跑道影响, 保证飞机安全, 在大型飞机上得到广泛应用^[1-4]。反推力装置的结构类型主要有抓斗式、瓣式和叶栅式, 现在以大涵道比涡扇发动机为动力的大型飞机主要采用结构灵巧紧凑、反推力比较平稳的叶栅式反推力装置。叶栅式反推力装置的每个半部一般有两个或三个反推作动器, 同步软轴使各个反推作动器以相同的速度下伸出和收进实现反推力装置展开与收起。在反推力装置展开操作过程中, 反推作动器驱动每个移动外罩向后移动使折流门旋转进入发动机风扇涵道, 风扇空气排气改变方向并通过叶栅流出, 从而产生反推力^[5-10], 叶栅式反推力装置原理如图1所示。

某发动机的叶栅式反推力装置采用液压反推作动系统, 在外场使用过程中, 飞机顺航向右侧的发动机反推力装置完全展开后, 当压下反推杆回到收起位置时, 反推力装置无法收回。检查系统的液压与电气均正常, 通过人工方式手动驱动反推作动器收起, 反推作动器卡滞在故障位置无法运动。该问题造成飞机无法再次起飞, 严重影响了飞行任务。

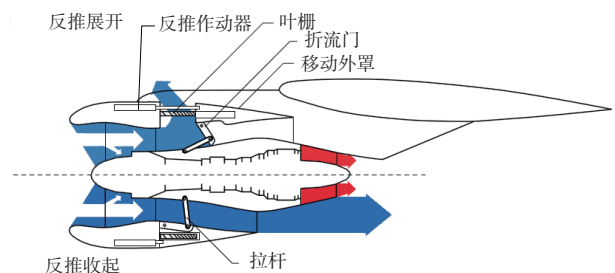


图1 叶栅式反推力装置原理图

Fig.1 Schematic diagram of cascade reverse thrust device

收稿日期: 2021-05-19; 退修日期: 2021-06-15; 录用日期: 2021-07-07

引用格式: Yang Xiangqun, Tian Yangtao, Wang Sheng, et al. Analysis of jammed failure of aero-engine reverse actuator[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(08): 43-48. 杨向群, 田杨涛, 王胜, 等. 航空发动机反推作动器卡滞故障分析[J]. 航空科学技术, 2021, 32(08): 43-48.

因此,本文针对反推作动器卡滞故障问题,通过反推作动器的工作机理分析,建立故障树,分析可能引发该卡滞故障的故障模式,定位故障原因,提出改进措施并进行验证,为反推作动器同类故障排除提供参考。

1 反推作动器工作原理

在反推力装置展开和收起操作过程中,反推作动器驱动移动外罩,反推力装置的左、右部分分别有三个反推作动器,反推作动系统原理如图2所示。反推作动器是一个线位移液压作动器,通过活塞末端的球轴承与移动外罩连接,其主要组成有筒体、活塞、丝杠、蜗轮和蜗杆,丝杠采用梯形丝杠。当需要打开反推时,液压控制装置控制高压油同时进入液压作动器的展开腔与收进腔,活塞在两腔面积差产生的力作用下伸出,移动外罩展开;收起反推时,液压控制装置控制低压油进入液压作动器的展开腔,收进腔保持高压油,活塞在高压油的作用下收进,移动外罩收起。

每个移动外罩的三个液压作动器是沿发动机周向布置的,为了保证各个作动器能够同步运动,在每个液压作动器之间连接有同步软轴,同步软轴与蜗杆连接,蜗杆通过蜗轮与丝杠连接,与丝杠配合的丝母固定于活塞上,反推作动器原理如图3所示。在反推作动系统展开或收起过程中,当相邻两个液压作动器由于气动载荷不一致等造成位移差时,在同步软轴上就会形成扭转角,从而使同步软轴上产生同步扭矩。此时,对于运动较快的作动器,同步扭矩成为负载力;而对于运动较慢的作动器,同步扭矩成为驱动力,最终在由丝杠、丝母、蜗轮、蜗杆、同步软轴组成的同步机构的作用下,实现反推作动器的同步运动。

2 卡滞故障原因分析

根据反推作动器的工作原理,结合本次故障现象开展相关的影响因素及其失效状态分析,梳理出可能导致作动器卡滞的故障原因^[1]。

2.1 影响因素分析

反推作动器工作时,作动器两腔通液压油,液压驱动活塞直线运动,同时活塞驱动丝杠旋转运动,与丝杠同步运动的蜗轮驱动蜗杆输出旋转运动,其运动原理如图4所示。经分析,作动器中机械运动部件的卡滞是导致作动器卡滞的直接原因,作动器的运动部件主要有筒体活塞运动副、丝杠丝母传动副、蜗轮蜗杆传动副,其中丝杠丝母传动副中包含角接触轴承,蜗轮蜗杆传动副中包含深沟球轴承。

作动器的筒体用于固定安装,活塞相对筒体输出直线

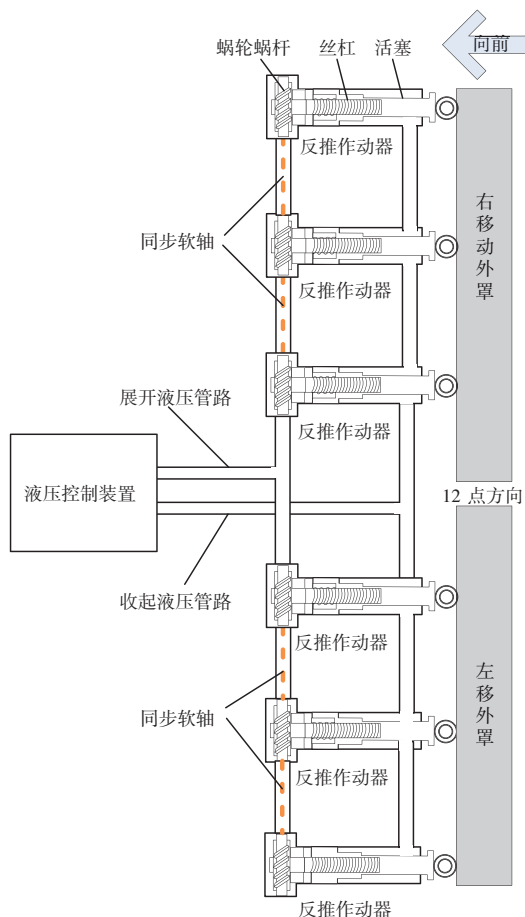


图2 液压反推作动系统原理图

Fig.2 Schematic diagram of hydraulic reverse thrust actuation system

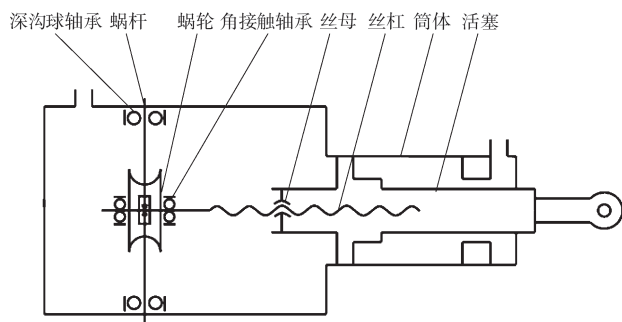


图3 反推作动器原理图

Fig.3 Schematic diagram of reverse thrust actuator

运动,活塞的直线运动通过丝杠输出同步旋转运动,丝杠的同步旋转运动通过蜗轮实现蜗杆的同步旋转输出,蜗杆的旋转输出用于通过同步软轴实现沿周向布置的相邻作动器之间的同步直线运动。因此,筒体活塞运动副卡滞、丝杠丝母传动副卡滞和蜗轮蜗杆传动副卡滞为可能导致反推作动器卡滞的三个因素。



图4 反推作动器机械运动原理图

Fig.4 Schematic diagram of mechanical movement of reverse thrust actuator

2.2 失效状态分析

筒体活塞运动副卡滞、丝杠丝母传动副卡滞和蜗轮蜗杆传动副卡滞均为机械运动卡滞，一般造成机械运动卡滞的原因主要有两方面：一是机械运动机构失效造成卡滞无法运动，二是外来异物卡在运动配合部位导致无法运动。

除外来异物造成运动卡滞外，活塞与筒体的变形、丝杠与丝母配合间隙减小、丝杠与丝母配合面损伤、蜗轮蜗杆配合减小、蜗轮蜗杆配合面损伤、角接触轴承卡滞、深沟球轴承卡滞等机械运动机构失效模式也可能导致作动器发生卡滞故障。

2.3 故障树分析

故障树分析(fault tree analysis, FTA)是对引起系统故障的各种原因进行分析和确定导致故障发生的各种可能原因,包括硬件、软件以及人为环境等进行逻辑因果分析。将

系统故障与组成系统各零部件的故障有机联系在一起,可以找出系统的全部可能失效状态。

基于上述卡滞故障的影响因素与失效状态分析,建立反推作动器卡滞的故障树(见图5),以反推作动器卡滞的顶事件为出发点,向下逐级分解出导致顶事件发生的三个故障原因:M1筒体活塞运动副卡滞、M2丝杠丝母传动副卡滞和M3蜗轮蜗杆传动副卡滞,采用逻辑门符号和事件符号表示事件之间的逻辑关系,构成因果关系图,共分析出X1活塞变形、X2筒体变形、X3筒体活塞运动副异物卡阻、X4丝杠丝母配合间隙减小、X5丝杠丝母配合面损伤、X6角接触轴承卡滞、X7丝杠丝母传动副异物卡阻、X8蜗轮蜗杆配合间隙减小、X9蜗轮蜗杆配合面损伤、X10深沟球轴承卡滞、X11蜗轮蜗杆传动副异物卡阻共11个底事件。

3 故障定位及解决措施

3.1 故障定位及确认

通过对可能导致卡滞故障的11个故障原因进行初步分析,首先对反推作动器进行了分解检查,然后分别对活塞、筒体、丝杠、丝母、蜗轮、蜗杆等零件进行尺寸计量、零件表面质量检查以及角接触轴承和深沟球轴承灵活性检查,依次对故障原因进行排查分析,最终确认底事件X5丝杠丝母配合面损伤为可能故障原因,具体排查方案与排查结果见表1。

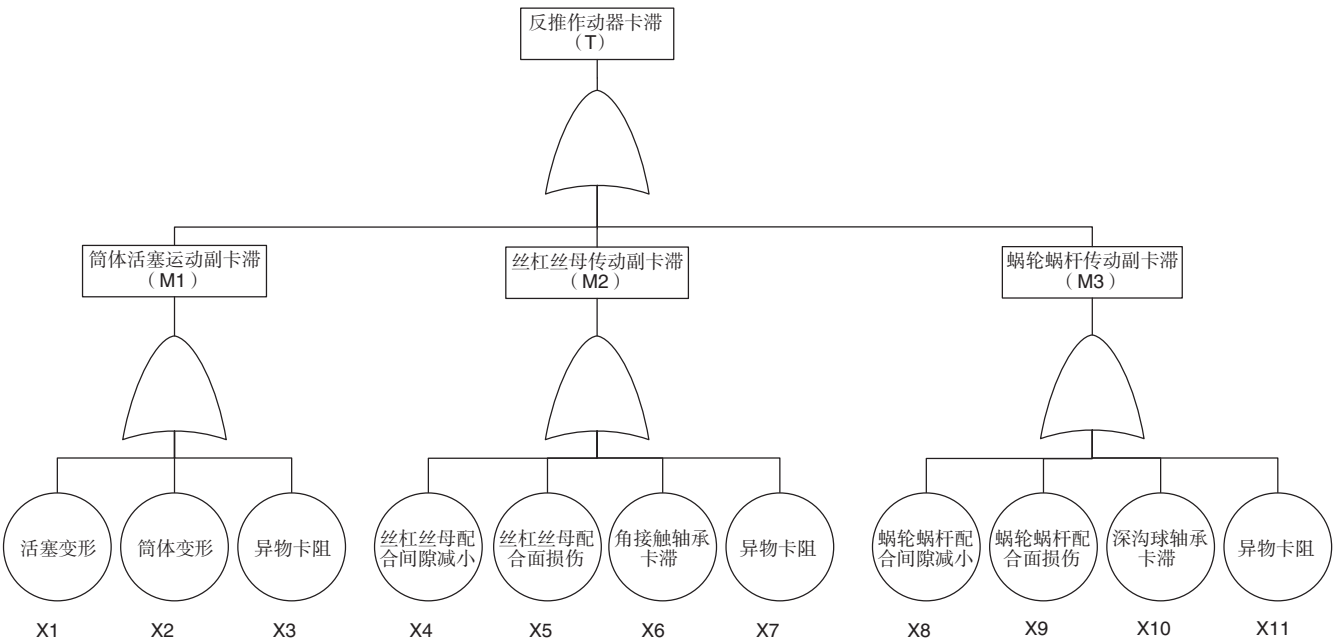


图5 反推作动器卡滞故障树

Fig.5 Jammed fault tree of reverse actuator

表1 卡滞故障原因排查方案与结果

Table 1 Troubleshoot scheme and the result of jammed fault

底事件	排查方案	排查结果
X1 活塞变形	分解产品, 计量活塞尺寸	活塞尺寸合格
X2 筒体变形	分解产品, 计量筒体尺寸	筒体尺寸合格
X3 筒体活塞运动副异物卡阻	分解产品, 检查产品内部异物情况	产品内部无异物
X4 丝杠丝母配合间隙减小	分解产品, 计量丝杠丝母配合间隙尺寸	丝杠丝母配合间隙尺寸合格
X5 丝杠丝母配合面损伤	分解产品, 检查丝杠丝母配合面表面质量	丝杠丝母配合面表面存在损伤见(见图6)
X6 角接触轴承卡滞	分解产品, 检查角接触轴承运动灵活性	角接触轴承运动灵活
X7 丝杠丝母传动副异物卡阻	分解产品, 检查产品内部异物情况	产品内部无异物
X8 蜗轮蜗杆配合间隙减小	分解产品, 计量蜗轮蜗杆配合间隙尺寸	蜗轮蜗杆配合间隙尺寸合格
X9 蜗轮蜗杆配合面损伤	分解产品, 检查零件表面质量	表面正常
X10 深沟球轴承卡滞	分解产品, 检查深沟球轴承运动灵活性	深沟球轴承运动灵活
X11 蜗轮蜗杆传动副异物卡阻	分解产品, 检查产品内部异物情况	产品内部无异物

从丝杠丝母配合面表面损伤部位初步分析,同时结合反推系统工作原理,初步确认为反推作动器安装在反推力装置上时活塞接头端存在侧向载荷,在侧向载荷作用下丝杠与丝母配合面摩擦力增大,活塞在液压驱动力的作用下使丝杠与丝母卡死。为了确认故障机理,通过测量得到反推作动器在反推力装置上的侧向载荷约150N,然后另选取一台验收合格的反推作动器,在作动器的输出端施加150N的侧向载荷后通压工作,产品卡滞无运动输出,与外场使用故障现象一致。因此,确认在侧向力作用下导致反推作动器丝杠与丝母卡死是本次卡滞故障的根本原因。图6为表面存在损伤的丝母实物图。

3.2 改进措施

针对反推作动器在侧向载荷作用下丝杠与丝母摩擦力

增大导致卡滞这一故障原因,将丝母的内螺纹牙尖增加倒角,如图7所示,减小丝杠丝母传动副在侧向载荷下的摩擦力,减轻磨损,从而提高反推作动器在工作中承受侧向载荷能力。

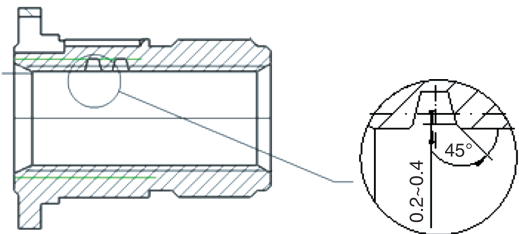


图7 丝母内螺纹牙尖增加倒角示意图

Fig.7 Schematic diagram of internal thread of the nut



图6 表面存在损伤的丝母实物图

Fig.6 Physical picture of the nut with damage on the surface

4 试验验证

为验证故障定位的准确性与改进措施的有效性,制定了如下试验验证方案:

(1)选取两个试验件:一个是为将故障产品的丝杠丝母传动副更换为已落实改进措施的丝杠丝母传动副;另一个是已实施改进措施的新产品。

(2)分别将两个试验件水平安装于试验台(见图8),通过在产品输出端吊挂砝码产生150N的侧向载荷,通压使产品以(20±5)mm/s的速度,往复运动25次,观察产品运动情况。

在试验过程中,两个试验件均能正常平稳往复运行且无卡滞或突跳现象,确定本次故障原因判断准确、机理分析正确,改进措施有效。



图8 反推作动器侧向载荷试验

Fig.8 Side load test of reverse thrust actuator

5 结束语

本文对某型发动机反推作动器的外场卡滞故障进行分析与试验验证,结合反推作动系统工作原理分析,开展了作动器卡滞故障影响因素研究,将系统故障与组成系统各零部件的故障有机联系在一起,找出了系统的全部可能失效状态,建立了反推作动器卡滞故障树。根据故障树梳理出的底事件,通过分解检查、尺寸计量、零件表面质量检查、轴承运动灵活性检查,逐一排查 11 个底事件后定位了卡滞故障原因。由于反推作动器在侧向载荷作用下丝杠与丝母配合面摩擦力增大,活塞在液压驱动力的作用下使丝杠与丝母卡死,导致反推作动器卡滞,进而导致反推力装置无法收回。

通过增加丝母的内螺纹牙尖倒角,减小丝杠丝母传动副在侧向载荷下的摩擦力,减轻磨损,提高了反推作动器在工作中承受侧向载荷能力。并在模拟反推力装置侧向载荷的试验条件下,对落实改进措施的产品进行充分试验验证,验证了反推作动器卡滞故障原因定位准确,结构改进措施有效。本文故障研究所采用的方法与改进措施,对外场同类故障排除具有积极的指导意义,也为后续同类产品改进设计和新研产品开发奠定坚实基础。

AST

参考文献

- [1] 隋杰飞, 朱岩. 液压作动反推力装置安全性设计与研究[J]. 液压与气动, 2016(1): 104-107.
Sui Jiefei, Zhu Yan. The safety design and research of hydraulic action thrust reverser[J]. Chinese Hydraulic & Pneumatics, 2016(1): 104-107. (in Chinese)
- [2] 袁杰, 王文山, 郑艳锋. 商用飞机反推控制系统发展趋势分析[C]//飞机机电系统理论与实践第二届民用飞机机电系统国际论坛, 2016.
Yuan Jie, Wang Wenshan, Zheng Yanfeng. Analysis on the development trend of commercial aircraft reverse control system[C]//Proceedings of the Second International Forum on Civil Aircraft Electromechanical Systems, 2016. (in Chinese)
- [3] 陈永琴, 汪天兴, 苏三买, 等. 反推力装置液压作动系统 AMESim 建模与仿真[J]. 航空动力学报, 2017, 32(11): 2791-2799.
Chen Yongqin, Wang Tianxing, Su Sanmai, et al. Modeling and simulation of thrust reverser hydraulic actuation system based on AMESim[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(11): 2791-2799. (in Chinese)
- [4] 雷伟. 波音 737NG 飞机反推排故与维护[J]. 民用飞机设计与研究, 2018, 131(4): 85-90.
Lei Wei. Troubleshooting and maintenance of thrust reverser for 737NG aircraft[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2018, 131(4): 85-90. (in Chinese)
- [5] 杜刚, 金捷. 大型运输机反推力装置[C]//大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会年学术年会, 2007.
Du Gang, Jin Jie. Reverse thrust device for large transport aircraft[C]// High-level Forum on Key Technologies of Large Aircraft and Annual Academic Conference of Chinese Aeronautical Society, 2007. (in Chinese)
- [6] 靳宝林, 邢伟红, 刘殿春. 飞机/发动机推进系统反推力装置[J]. 航空发动机, 2004, 30(4): 48-52.
Jin Baolin, Xing Weihong, Liu Dianchun. Aircraft/Engine propulsion system of thrust reverser[J]. Aircraft Engine, 2004, 30(4): 48-52. (in Chinese)
- [7] Asbury S C, Yetter J A. Static performance of six innovative thrust reverser concepts for subsonic transport applications[R]. Summary of the NASA Langley Innovative Thrust Reverser Test Program, 2000.
- [8] Santin, Barbosa M A, Bontempo J R, et al. Overview on thrust reverser design[C]//18th International Congress of Mechanical Engineering, 2005.
- [9] 张国栋, 王强. 主要几何参数对叶栅式反推力装置性能的影响[J]. 航空动力学报, 2014, 27(1): 145-151.
Zhang Guodong, Wang Qiang. The influence of main geometric parameters on the performance of cascade reverse thrust device[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 27(1): 145-151. (in Chinese)
- [10] 谢叶平, 王强, 邵万仁, 等. 叶栅式反推装置阻流门运动规律对气动性能的影响[J]. 航空动力学报, 2010(6): 1297-1302.

Xie Yeping, Wang Qiang, Shao Wanren, et al. Effect of kinetic mechanism of blocker doors on aerodynamic performance for a cascade thrust reverser[J]. Journal of Aerospace Power, 2010 (6): 1297-1302. (in Chinese)

[11] 石鹏飞, 张航, 陈洁. 先进民机飞控系统安全性设计考虑[J].

航空科学技术, 2019, 30(12): 52-58.

Shi Pengfei, Zhang Hang, Chen Jie. Safety design considerations for advanced civil aircraft flight control system [J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(12): 52-58. (in Chinese)

Analysis of Jammed Failure of Aero-engine Reverse Actuator

Yang Xiangqun¹, Tian Yangtao², Wang Sheng², Yuan Jie²

1. The Fifth Military Representative Office of the Military Representative Bureau of the Air Force Equipment Department in Xi'an, Xi'an 710077, China

2. AVIC Qingan Group Co., Ltd., Xi'an 710077, China

Abstract: The reverse thrust actuator is used to synchronously drive the reverse thrust device to move the sleeve to deploy, which can reduce the aircraft speed and shorten the taxi distance after landing or RTO. Especially in rain and snow weather, it makes sure the safe landing. Aiming at the problem that the reverse thrust actuator could not stow, through the analysis of the working principle of the reverse thrust actuation system, the jammed failure reason analysis was carried out, and the jammed fault tree of actuator was established. Then, the bottom events were investigated one by one, and the product decomposition and test verification were conducted. Finally, it determines that the jam failure is due to the jam between screw and nut under the side load, which causes the thrust reverse device to fail to be retracted. At last, the side load test was conducted. The results show that increasing in the chamfer of the internal thread tip of the nut can reduce the friction and wear, and improve the thrust reverse actuator to withstand the lateral direction force during work, which prevents the actuator from jamming. The failure analysis and the results have profound meaning for troubleshooting, and also play a role in the following improvement of similar products design and the development of new research products.

Key Words: aircraft engine; thrust reverse device; hydraulic; actuator; jam