

某型发动机低压压气机导叶角度偏关故障分析与排除

李小彪,张秀云,邱续茂,马 征
(中国航发沈阳发动机研究所,沈阳 110015)

摘要:针对某型发动机低压压气机导流叶片角度低于标准值即偏关的故障,详细分析了故障现象,阐述了低压压气机导流叶片调节通道工作原理及控制计划,剖析故障机理。根据所制定的排故流程,提出并分析了可能引发该故障的综合电子调节器、电路、传感器故障模式,最终确定综合电子调节器故障导致低压压气机导流叶片角度低于标准值。更换综合电子调节器,进行外场试车验证。结果表明:发动机工作参数正常,推力稳定,低压压气机导流叶片角度符合要求。

关键词: 低压压气机导叶角度;控制计划;综合电子调节器;航空发动机

中图分类号: V232.4

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2018.04.018

Analysis and Solution on Fault of Guide Vane Angle Relatively Small for an Aeroengine Low Pressure Compressor

LI Xiao-biao, ZHANG Xiu-yun, QIU Xu-mao, Ma Zheng

(AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: For the fault on an aeroengine guide vane angle of the low pressure compressor lower than the standard values, phenomenon was analyzed in detail, the channel control schedule and working principle were expounded, and the fault mechanism was analyzed. The possible causes of electronic controller failure, the circuit failure and the sensor failure were listed and analysed. The analysis shows that the angle of the guide blade of the low pressure compressor was lower than the standard value due to the failure of the electronic controller failure. The field test verification is conducted by replacing the engine controller, the test results show that the engine work parameters are normal and the thrust is stabilize, the angle of the guide vane of the low pressure compressor is congruent.

Key words: guide vane angle of the low pressure compressor; control plan; engine electronic controller; aeroenging

0 引言

为保证航空发动机工作稳定,获得良好的性能,通常会对低压压气机进口导叶角度进行控制^[1-2]。通过采用合适的控制系统调节导叶角度,可改变压气机工作状态、增大发动机喘振裕度、提高发动机推力。导叶角度控制系统存在不同类型信号之间的转换,同时还涉及到子系统之间的匹配问题,涉及面广且内容复杂^[3-5]。在实际应用过程中经常出现导叶角度低于标准值即偏关的情况,对于发动机性能和飞行安全产生不利影响。目前针对该故障的公开文献相对较少^[6-8]。

本文针对某型发动机低压压气机导叶角度偏关

故障,基于低压压气机导叶调节通道控制原理,列举导致导叶角度偏关的因素,分析定位原因,最后经过排故和外场试车验证,排除了故障。

1 低压压气机导叶角度偏关故障现象

在某次飞行过程中,在相同油门杆状态下,飞行员感到发动机推力突然不足,观察座舱高压转子转速表,转速有所降低。飞行结束后,判读飞参发现,前半程发动机参数正常,后半程在相同油门杆状态下高低压转子物理转速、高低压转子换算转速、低压压气机导叶角度偏小,见表1。表中: n_1 、 n_2 分别为低、高压转子物理转速; n_{1r} 、 n_{2r} 分别为低、高压转子换算转速;

收稿日期:2017-12-10 基金项目:航空动力基础科研项目资助

作者简介:李小彪(1987),男,硕士,工程师,从事航空发动机技术支持工作;E-mail: xiaobiaoli1987@163.com。

引用格式: 李小彪,张秀云,邱续茂,等.某型发动机低压压气机导叶角度偏关故障分析与排除[J].航空发动机,2018,44(4):99-102. LI Xiaobiao, ZHANG Xiuyun, QIU Xumao, et al. Analysis and solution on fault of guide vane angle relatively small for an aeroengine low pressure compressor[J]. Aeroengine, 2018, 44(4): 99-102.

α_1 为低压压气机导叶角度。

表 1 故障数据

	n_1	n_{1r}	n_2	n_{2r}	α_1
前半程	95.9	96.7	98.5	97.8	106.0
后半程	92.8	93.0	96.4	97.2	61.6

从表中数据可见,除低压压气机导叶角度偏关以外, n_1 、 n_2 等发动机转速也有所降低,这是由于当低压压气机导叶角度控制系统发生故障时,发动机控制系统会由电子系统控制转为液压机械备份调节,导致发动机工作状态下降,发动机转速随之降低。

2 低压压气机导叶调节通道控制原理

低压压气机导叶控制系统的功用^[9-11]是:根据低压压气机转子的换算转速 n_{1r} 调节低压压气机进口导叶角度 α_1 ,保证低压压气机的喘振裕度和效率。 α_1 调节通道结构如图 1 所示。图中转速包括 n_1 和 n_2 ,温度包括发动机进气温度 T_1 和排气温度 T_6 ; S 为平衡占空比信号; α_{1c} 、 α_{1g} 分别低压压气机导叶角度的测定值和给定值。

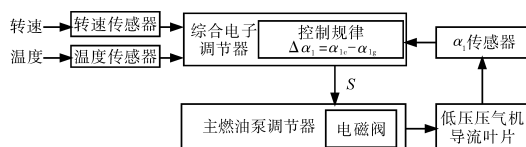


图 1 α_1 调节通道结构

电子控制部分原理^[12-13]如图 1 所示。 α_1 通道电子部分将低压转子转速传感器和发动机进气温度传感器的信号转换为 n_{1r} 电压信号,并送到程序生成器。 α_1 信号生成器将来自位移传感器的信号换成电压信号并送到程序生成器。低压转子换算转速 n_{1r} 的值经由程序生成器形成所需要的 α_1 调节值信号。 α_1 给定信号与 α_1 信号生成器的 α_1 测定信号值进行比较,形成失调信号 $\Delta\alpha_1 = \alpha_{1c} - \alpha_{1g}$, $\Delta\alpha_1$ 经过校正电路输入宽脉冲调制器。宽脉冲调制器将 $\Delta\alpha_1$ 按给定的函数关系调制成 S ,再经功率放大器后,输给执行机构电磁活门,实现对 α_1 的调节。最终将 α_1 调到与 n_{1r} 相符的角度上,这时 $\Delta\alpha_1 = 0$, $S = 50\%$ 。

机械控制系统的基本工作原理如图 2 所示^[14]。电子控制部分形成控制电磁活门运动的 S ,机械系统的电磁活门根据 $S = f(\Delta\alpha_1)$ 控制油路的放油量,控制衬筒活塞右腔的油压,进而控制衬筒的位置(S 减小,放

油少,衬筒左移);在液压机械控制部分把测得的数据换算为发动机高压转子换算转速 n_{2r} ,并按给定的函数关系 $\alpha_1 = f(n_{2r})$,通过杠杆机构转换为分油活门的位置(n_{2r} 减小,分油活门向右移动;导叶角度减小,通过反馈装置使分油活门左移)。分油活门与衬筒的相对位置改变了作动筒活塞左、右腔的油压,从而控制进口导叶的角度^[15-16]。

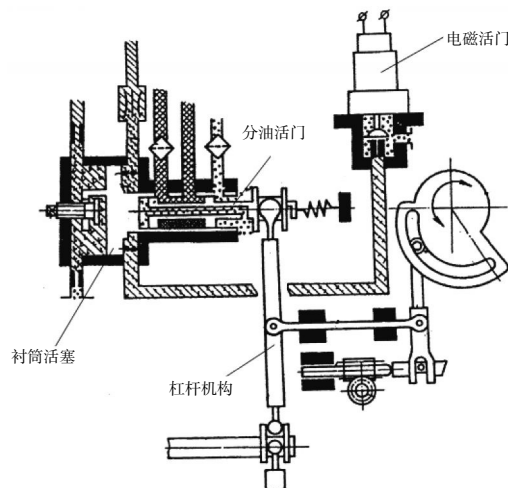


图 2 α_1 机械控制系统工作原理

低压压气机进口导叶角度由电子系统控制,当电子系统发生故障时,转为液压机械备份调节。

3 低压压气机导叶角度偏关故障原因分析

航空发动机推力是因外界气流对发动机部件表面上的作用力而产生的。根据动量定理,通过计算发动机进口和出口气流流动量的变化来确定发动机推力^[16]

$$F = W_1 c_1 - W_0 c_0 + p_1 A_1 - p_0 A_1 \quad (1)$$

式中: $W_1 c_1$ 为发动机控制体出口截面上气流的动量; $W_0 c_0$ 为发动机远前方未收扰动截面气流的动量; p_1 为控制体出口截面上的气流压力; p_0 为发动机远前方未收扰动截面上的气流压力; A_1 发动机控制体出口截面面积。

低压压气机导叶角度控制规律为

$$\alpha_1 = f(n_{1r}) \quad (2)$$

在发动机不同工作状态下, α_1 与 n_{1r} 相对应。当低压压气机导叶角度发生偏关故障时, α_1 不按照式(2)的规律控制,转为液压机械备份调节,发动机转速随之降低。 α_1 、 n_1 、 n_2 值降低,导致发动机进气流量偏小,式(1)中 $W_1 c_1$ 、 $p_1 A_1$ 减小,最终导致发动机推力减小。

发动机低压转子换算转速与物理转速间的关系为

$$n_{lr}=n_1\sqrt{\frac{288}{t_1+273.15}}$$

(3)

式中: t_1 为发动机进口温度。

结合式(2)、(3)可知,如果发动机进口温度传感器或 α_1 角位移传感器发生故障均会导致低压压气机导叶角度偏差。

基于低压压气机导叶调节通道控制原理及图 1 可知,传输电路或综合电子调节器发生故障会影响 $\Delta\alpha_1=\alpha_{1c}-\alpha_{1g}$ 失调信号的形成,从而导致低压压气机导叶角度异常。

综上所述,发动机进口温度传感器、 α_1 角位移传感器、传输电路、综合电子调节器发生故障是导致低压压气机导叶偏差的原因,制定排故程序如图 3 所示。

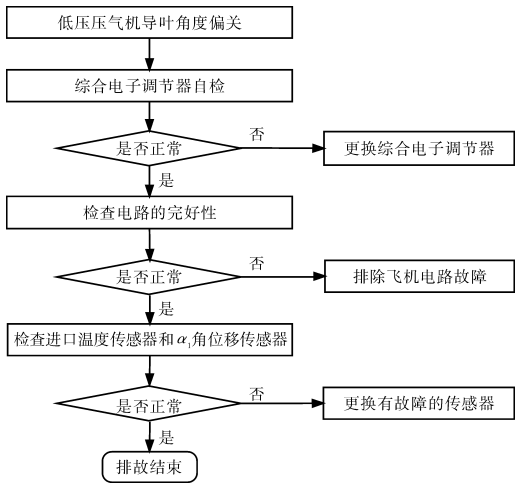


图 3 低压压气机导叶角度偏差故障排故流程

接地面检查仪对综合电子调节器自检,综合电子调节器报故,报指定故障代码,指示 α_1 通道故障。经对综合电子调节器进一步分解测试,发现 α_1 通道电路板的达林顿管开路,导致电磁阀无法正常工作,发出 α_1 通道故障信号。

检测主燃油泵调节器电磁阀电阻为 $17.3\ \Omega$,符合标准($10\sim 20\ \Omega$)。检查与综合电子调节器相连的进口总温传感器和 α_1 角位移传感器电路,电路完好、无短路现象。

检查发动机进口温度传感器信号,插座的第 1、2 针的电阻为 $45\ \Omega$,符合标准;插座的第 3、7 针的电阻为 $50\ \Omega$,符合标准。证明发动机进口温度传感器没有故障。

检测 α_1 传感器组件,各检验点的电阻符合要求。

检查风扇可调叶片角度传感器信号,插座的第 44、46 针的电阻为 $188.9\ \Omega$,符合标准($100\sim 210\ \Omega$);第 45、46 针的电阻为 $5.6\ \Omega$,符合标准($3\sim 7\ \Omega$);第 49、50 针的电阻为 $125.5\ \Omega$,符合标准($80\sim 150\ \Omega$)。证明 α_1 角位移传感器没有故障。

综上所述,分析原因为 α_1 通道故障并自锁,发出 α_1 通道故障信号,综合电子调节器退出对 α_1 的控制,转由机械液压调节,导致低压压气机导叶角度偏差。

4 试车验证

基于以上分析,更换发生故障的综合电子调节器,地面开车验证。开车结束后,判读飞参,在相同油门杆状态下选取有代表性的数据,结果见表 2。试验数据表明,在整个试车过程中高低压转子物理转速、高低压转子换算转速、低压压气机导叶角度等发动机参数与表 1 相比均有提升,推力正常,满足发动机使用要求。

表 2 验证试验数据

	n_1	n_{lr}	n_2	n_{2r}	α_1
数值	95.1	96.2	98.0	97.1	107.0

5 结束语

低压压气机进口导叶角度 α_1 对于保证压气机工作稳定性,并获得发动机的最优性能具有重要作用。为避免 α_1 低于标准值即偏差、对发动机性能和飞行安全产生不利影响,本文基于剖析低压压气机导叶调节通道控制计划及工作原理,分析故障原因,确定综合电子调节器故障导致 α_1 低于标准值。更换综合电子调节器后经外场试车验证,发动机工作参数正常, α_1 符合要求,发动机推力稳定。

参考文献:

[1] 曹志鹏,刘波,丁伟. 静叶角度调节对组合压气机性能优化机理[J]. 北京航空航天大学学报,2007,33(8): 878-881.
CAO Zhipeng,LIU Bo,DING Wei. Stator setting angles adjustment on performance improvement of axial-centrifugal compressor[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2007,33 (8): 878-881. (in Chinese)
[2] 张健,任铭林. 静叶角度调节对压气机性能影响的试验研究[J]. 航空动力学报,2000,15 (1):27-30.
ZHANG Jian,REN Minglin. Experimental investigation on effect of stator vane angle adjustment on compressor performance [J].Journal of

- Aerospace Power, 2000, 15(1): 27–30. (in Chinese)
- [3] 李志刚, 陶增元, 李剑. 变几何部件对发动机性能的影响分析[J]. 航空发动机, 2005, 31(2): 6–7.
- LI Zhigang, TAO Zengyuan, LI Jian. Effects of variable geometry components on engine performance[J]. Aeroengine, 2005, 31(2): 6–7. (in Chinese)
- [4] Witezak M, Obuehowicz A, Korbicz J. Genetic programming based approaches to identification and fault diagnosis of nonlinear dynamic systems[J]. Control, 2002, 75(13): 1012–1031.
- [5] Reed J A, Afje A A. Interactive, secure webenabled aircraft engine simulation using XML data blinding integration [R]. AIAA-2002-1894.
- [6] 张绍基. 航空发动机控制系统的研究与展望[J]. 航空动力学报, 2004, 19(3): 375–382.
- ZHANG Shaoji. A review of aeroengine control system [J]. Journal of aerospace power, 2004, 19(3): 375–382. (in Chinese)
- [7] 夏存江. CFM56-3 发动机可变几何控制系统对发动机性能的影响[J]. 航空发动机, 2008, 34(3): 42–45.
- XIA Cunjiang. Effect of CFM56-3 engine variable geometry control system on aerongine performance [J]. Aeroengine, 2008, 34(3): 42–45. (in Chinese)
- [8] 黄爱华. 涡扇发动机可调静子叶片控制规律研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2017, 30(1): 48–51.
- HUANG Aihua. Control law of variable stator vane for turbofan engine [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2017, 30(1): 48–51. (in Chinese)
- [9] 李杰, 樊丁, 彭凯, 等. 压气机静子叶片转角主备控制器转换装置改进[J]. 航空动力学报, 2011, 26(4): 935–941.
- LI Jie, FAN Ding, PENG Kai, et al. Improvement of switch devices of compressor stator blade angle mainbackup controller [J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(4): 935–941. (in Chinese)
- [10] 沈光辉. 某型发动机压气机进口可调导叶角度不归位的故障分析[J]. 现代工业经济和信息化, 2016, 22(6): 58–60.
- SHEN Guanghui. Fault analysis of an aeroengine compressor inlet guide vane angle nonhoming [J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2016, 22(6): 58–60. (in Chinese)
- [11] 潘璿, 杨纪明, 周章文. 基于 FPGA 的导流叶片角度数字化测量系统[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(10): 118–120.
- PAN Jin, YANG Jiming, ZHOU Zhangwen. Digitization measurement system of guide vane angle based on FPGA [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2015, 34(10): 118–120. (in Chinese)
- [12] 赵东运, 王文栋, 张生良, 等. 某涡扇发动机低压压气机叶片角度控制通道性能研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2004, 17(1): 20–23.
- ZHAO Dongyun, WANG Wendong, ZHANG Shengliang, et al. An investigation on performance of variable vane control channel for a turbofan engine LPC[J]. Gas Turbine and Research, 2004, 17(1): 20–23. (in Chinese)
- [13] Svakın A V, Matveev A S. Cyclic linear differential automatic: a simple class of hybrid dynamical systems [J]. Automata, 2000, 36(5): 727–734.
- [14] 范世新, 黄猛, 郑明. 航空发动机导流叶片角度调节参数变化故障分析[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2013, 4(4): 48–50.
- FAN Shixin, HUANG Meng, ZHENG Ming. Failure analysis on adjustable parameter deviation of aeroengine's compressor inlet guide vane angle [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2013, 4(4): 48–50. (in Chinese)
- [15] Libeozrn D, Morse A S. Basic problems in stability and design of switched systems [J]. IEEE Control System Magazine, 1999, 19(5): 59–70.
- [16] 廉筱纯, 吴虎. 航空发动机原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2013: 63–68.
- LIAN Xiaochun, WU Hu. Aviation engine principle[M]. Xi'an: north-west university of technology press, 2013: 63–68. (in Chinese)

(编辑: 李华文)