

某涡扇发动机低压压气机叶片角度控制通道性能研究

赵东运,王文栋,张生良,谢寿生
(西安空军工程大学 工程学院,西安 710038)

摘要:针对某型涡扇发动机低压压气机导流叶片角度控制工作原理中的一些误区、盲点以及实际应用中经常出现的故障现象,对发动机综合调节器进行了模拟仿真试验,得到了原理研究参考中至今未涉及到的特性曲线 S8 曲线与 $\alpha 1$ 角度曲线。这对该型发动机的理论研究与实际维护都有重要的参考价值。

关键词:S8 曲线; $\alpha 1$ 调节规律; $\alpha 1$ 通道故障;占空比

中图分类号:V233.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2620(2004)01-0020-04

An Investigation on Performance of Variable Vane Control Channel for a Turbofan Engine LPC

ZHAO Dong-yun, WANG Wen-dong, ZHANG Sheng-liang, XIE Shou-sheng
(Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: An emulate system is established to look at the conceptual misunderstanding, unknowns and faults frequently happened in practice of a turbofan engine LPC vane control. Characteristic curves S8 and $\alpha 1$, which haven't been referred to so far, have been obtained. Results show that the investigation is important to theoretical study and maintenance practice.

Key words: S8 curve; regulation rule of $\alpha 1$; $\alpha 1$ channel fault; coefficient of possessive space

1 引言

为获得发动机的最大推力,某型涡扇发动机在保证低压压气机稳定工作的基础上采用了电子-机械控制系统对低压压气机进口导流叶片角度 $\alpha 1$ 进行控制。该控制系统是由电子与机械两部分共同完成的,并存在不同类信号之间的转换,如:位移-电、转速-电、温度-电、电-油压、油压-位移等,同时还联系到各系统之间的匹配问题,涉及面广且内容复杂。

在实际应用过程中经常会出现 $\alpha 1$ 通道故障的情况,该故障是该型发动机使用过程中出现最频繁且最影响飞行的故障。由于工程研究的局限性,对该通道的工作机理不能进行定量的分析与判断,因而对此类故障的形成机理不是很明确,所以处理时一般是进行换件。这样做既费时费力,又达不到彻底排

除故障的目的。现在对电子控制器部分即综合调节器进行了深入的理论与试验研究,对机械部分进行了相应的理论分析,得到了一些比较满意的曲线与规律。这将有助于从原理上对系统进行分析,对故障原因进行诊断,无论对理论研究还是实际指导都具有重要的意义。

2 低压压气机导流叶片调节通道控制计划及控制系统工作原理

低压压气机导流叶片控制系统的功用是:根据低压压气机转子的换算转速 $n1_{cor}$ 调节低压压气机进口导流叶片角度 $\alpha 1$,保证低压压气机的喘振裕度和效率。其电路与油路详见文献[1,2]。 $\alpha 1$ 调节通道结构图如图 1 所示。

收稿日期:2003-04-03;修回日期:2003-11-17

作者简介:赵东运(1963-),男,河南人,工程师,西安空军工程大学工程学院研究生,专业方向为航空宇航推进理论与工程。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

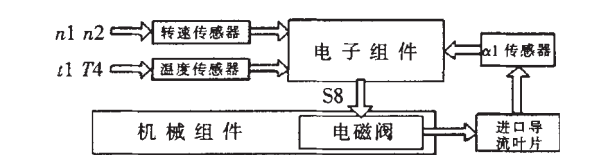


图 1 $\alpha 1$ 调节通道结构图
Fig.1 The outline regulation of $\alpha 1$

电子控制部分原理如图 1 中所示： $\alpha 1$ 通道电子部分将来自 $n 1$ 传感器和 $t 1$ 传感器的信号转换为正比于 $n 1$ 和 $\sqrt{t 1}$ 的电压信号，并把生成的正比于 $n 1_{cor}$ 的电压信号送到程序生成器。 $\alpha 1$ 信号生成器将来自位移传感器的信号转换成正比于 $\alpha 1$ 的电压信号并送到程序生成器。 $n 1_{cor}$ 的值经由程序生成器形成所需要的 $\alpha 1$ 调节程序值信号，即压机机叶片角度的控制指令 $\alpha 1^{\circ}$ 信号。 $\alpha 1^{\circ}$ 信号与 $\alpha 1$ 信号生成器的 $\alpha 1$ 信号值进行比较，形成失调信号 $\Delta \alpha 1$ ， $\Delta \alpha 1$ 经过校正电路输入宽脉冲调制器。宽脉冲调制器将失调信号 $\Delta \alpha 1$ 按一定的函数关系调制成平衡占空比信号 $S 8$ ，再经功率放大器后，输给执行机构电磁活门 IM8，实施对 $\alpha 1$ 的调节。将 $\alpha 1$ 调到与 $n 1_{cor}$ 相符的角度上，这时失调信号消失，占空系数恢复到 $S 8=50\%$ 。

理论上出现 $\alpha 1$ 故障的原因有以下两个：当有 $n 2>57\%$ 的信号输入时， $n 1_{cor}$ 的输出电压超过允许值； $S 8=0$ 时，宽脉冲调制器测量装置的输出值与检查装置生成值不符，功率放大器输出功率不够。

机械控制系统的基本工作原理^[1]是：电子控制部分形成控制 IM8 电磁活门运动的占空比信号 $S 8=f(\Delta \alpha 1)$ ($\alpha 1=\alpha 1^{\circ}$ 时， $S=50\%$ ； $\alpha 1<\alpha 1^{\circ}$ 时， $S<50\%$)，IM8 电磁活门根据占空比信号 $S 8$ 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 ($S 8$ 增大，放油多，衬筒右移)；在液压-机械控制部分把测得的数据换算到发动机进口截面的高压转子换算转速 $n 2_{cor}$ ，并通过杠杆机构转换为分油活门的位置 ($n 2_{cor}$ 增大，分油活门向左移动；导流叶片角度增大，通过反馈装置使分油活门右移)。分油活门与衬筒的相对位置控制了作动筒活塞左右腔的油压，从而改变了进口导流叶片的角度。当电子-机械控制系统正常工作时，按图 2 所示的 $\alpha 1=f(n 1_{cor})$ 进行控制；当控制系统的电子部分发生故障时 (又称 $\alpha 1$ 通道故障)， $\alpha 1$ 角度由机械控制部分按 $\alpha 1=f(n 2_{cor})$ 进行控制^[2]。

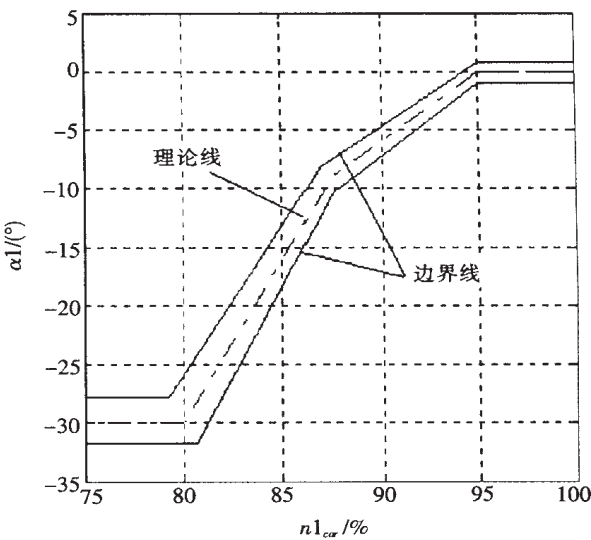


图 2 $\alpha 1$ 调节规律曲线
Fig.2 Curve of regulation rule

3 测试条件

对综合调节器 $\alpha 1$ 通道进行分析和模拟试验，让其复现正常与故障时的各类情况。

具体的测试系统参考文献[5]，在此不进行详细介绍，只对该通道的测试条件进行说明。综合调节器能进行正常工作的必要条件是要有以下的输入： $T 4$ 、 $n 1$ 、 $n 2$ 、 $t 1$ 、 $P m$ 、 $T t$ 、 $T m$ 。因为 $T m$ 与 $T t$ 没有参与控制，所以只接固定的正常值如 100Ω 。 $n 1$ 与 $n 2$ 是 0~3 200Hz 的正弦波信号，幅值取为 4V。 $P m$ 压力信号是 400Hz 的方波信号，不同的幅值代表不同的压力值。 $T 4$ 是 0~40mV 的电压信号。 $t 1$ 是 250~600mV 的电压信号。这些信号都是由计算机发出的且连续可调。

4 数据测量和分析

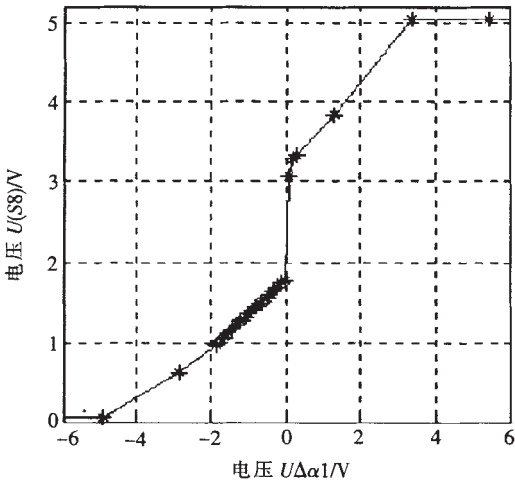
4.1 S8 曲线的测量

在有关的文献与资料中都没有 $S 8$ 信号的详细介绍与说明，因而对其进行测量与分析具有重要的理论与实践意义。

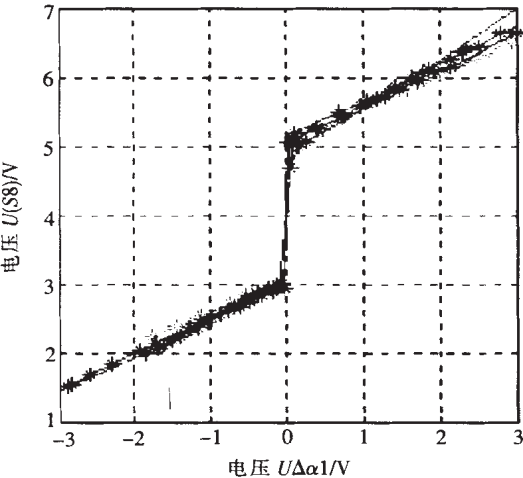
$S 8$ 曲线的测量方法是：在没有故障情况下，给定适当的 $n 1_{cor}$ ，给定 $\alpha 1$ 某个角度，对应的稳定的 $S 8$ 值就是此时的角度引起的偏差量对应的正比于占空比的值。该值是在接 IM8 电磁活门时测得的。否则， $S 8$ 信号将为 0。

图 3a 的数据是在使用单位通过地面检测设备测得的。图 3b 的数据是在实验室条件下测得的。横坐标是 $\alpha 1$ 角度与给定的标准值的差值，纵坐标是相应 $S 8$ 的输出值。因为两图中纵坐标的定义不同，所以从表面上看是不同的。将图 3a 作坐标平移至图

3b 中(图 3b 中有一条线是图 3a 中的线),可以看出二者所测的 S8 的输出特性是一致的。图 3a 中上下两端的平行线,在实验室测量中同样可以测出,分别表征 S8=0 与 100%时的特性。



(a) 地面检测设备测量结果



(b) 实验室测量结果

图 3 S8 特性曲线

Fig.3 Characteristic curves of S8

图 3b 的数据线中除图 3a 中的数据线外都是在实验室的条件下测得的。在多条数据线接近重合的情况下,同样与某研究所提供的 S8 曲线过四个点的结论相一致。从以上分析可以得出这样的结论:S8 曲线形状如图 3b 所示,与 S1 曲线有很大的差别,最明显的差别在于 S8 很难在占空比为 50%时稳定下来。经计算,只有与给定值的差值小于 1.19'时才有可能稳定下来。这与实际应用中所能达到的精度差别很大。精度大于 1'说明 S8=50%的点是个瞬时点,也就是说发动机在稳态工作时,其低压压气机导流叶片在不停地调节。这将与理论产生很大差别。由图 3 可看出 S8 信号几乎是随偏差量在零点附近大梯

度过渡,但在实际测量过程中其跳变时间是很长的,一般是 30~50s,从原理上分析这样不至于出现调节突跳的情况。

IM8 电磁活门参与工作的条件是换算转速大于 90%,但在实际的测量中换算转速达到 70%时 IM8 电磁活门都可以工作,这与理论不一致。但对于理论学习与指导实践有很大意义,同时也对国产 FADEC 的研制提供一定的参考。

4.2 α1 调节规律及故障边界的测量

某型发动机在使用单位经常出现 α1 通道故障,绝大多数的使用者认为是调节器出现故障。经调查发现,因为出现 α1 故障而送去修理的调节器中有大多数都没有检测到此类故障,于是又原样返回再装到飞机上,所以还会出现 α1 故障。这说明多数的此类故障与调节器没有太大的关系,只是表征为此类故障。

故障边界的测量方法是:在一次测量中,先固定某个换算转速,再调整 α1 角度,看 S8 电压与接在示波器上的 IM8 电磁活门两端的电压波形;分别采集下限故障、上限故障、占空比为 0、占空比为 100%、占空比 S8 突变时对应的 α1 角度。经过多次测量,得到图 4 的数据线(图 4 纵坐标是 α1 传感器转角

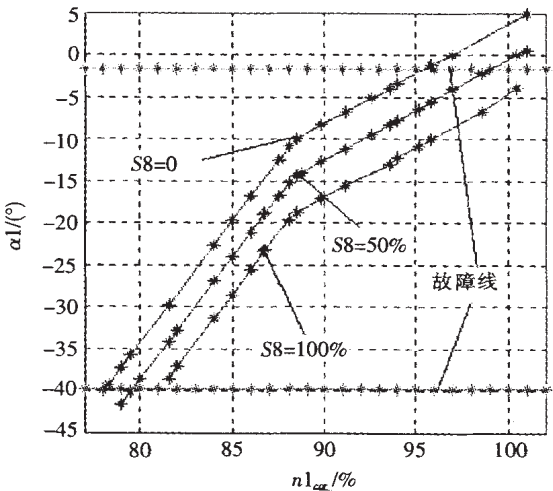


图 4 α1 通道工作区域

Fig.4 Work area of α1 passage

由图 4 可知:中间的线是不同换算转速所对应的过渡点的 α1 角度值。它不是稳态值,而是过渡值,是对应 S8 曲线中两条直线的交界点。这条曲线与理论线是一致的,但是在两个极限状态时不一样,如图 2 所示。在调节器中不会出现现象理论曲线中那样当换算转速小于 80%或大于 95%时 α1 给定值不

变的情况,但在实际的调节试验中是可以实现的。故可以得出,该控制规律线是电子与机械综合作用的结果,边界的两直线是通过机械部分实现的。

由图 4 还可看出,在故障情况下 S8 还是可以变化的,故障信号对 S8 信号的变化没有任何影响。

占空比为 0 与 100%的曲线如图 4 所示。从图中可以看出,两侧曲线与过渡工作线几乎是等距的,这是正常工作时的可变范围。图中的上下两条平行线是故障线。上面一条是当 S8 占空比信号为 0 以后测得的,即输出电压一直为 0,不断减小 $\alpha 1$ 角度直到故障信号出现后测得的;下面一条故障线是在 S8 占空比信号为 100%以后测得的,即输出电压一直为 27V,不断手动调大 $\alpha 1$ 角度直到出现故障后测得的。测量结果发现传感器都是在同样的调整角度才出现 $\alpha 1$ 故障报警信号。这种情况在文献资料中没有提到过,与实际的使用情况也不太一样。即使是在不接 IM8 电磁活门时(即执行机构在断电时)的故障范围也相当宽,如图 5 中所示。这样就引出一个问题:既然有这么宽的裕度,那为何在实际应用中会频繁出现 $\alpha 1$ 通道故障呢?

通道故障现象有两种:一种是 α 角度不能调节, $n2$ 转速上升到 91.5%后不再上升;还有一种是 α 角度只能调节到极限值 -20° , 转速上升时 $n1$ 上升很快, $n2$ 上升到大约 91.5%时, $n1$ 上升到 104%的极限状态,这时报警系统发出“超过极限状态”信号。

经过反复认真的研究和试验,结果表明这两种现象与电子控制部分没有太大的联系,主要是由机械部分造成的。同时在分析了大修资料提供的数据后发现,当出现故障、转为机械调节时的规律如下:

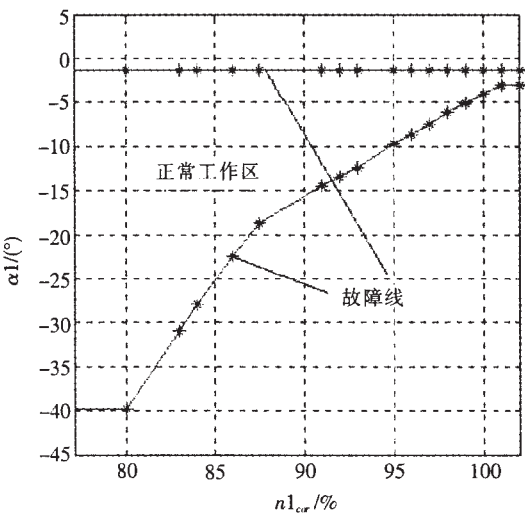


图 5 不接电磁阀时 $\alpha 1$ 通道工作区域

Fig.5 Work area of $\alpha 1$ passage with solenoid off

电子控制部分发生故障时,改由机械调节器按 $\alpha 1=f(n2_{cor})$ 进行控制。S8=0 时按图 6 中右侧线进行调节,其左右边界是液压机械控制器带衬筒活塞左极限位置限动螺钉的允许调整范围,使用中通道故障的两种现象正是该螺钉调整位置不同所引起的;当 S8=100%时,按图 6 中左侧线进行调节。电子控制器其它部分正常而通道发生故障时,均使 IM8 电磁活门断电,只有开关电路在打开时就发生故障,才可能使高速电磁阀一直通电,因此 S8=100%故障的可能性极小。故障时 S8=0 和 S8=100%的控制线必在正常工作线的两侧,这个观点在文献[3]与文献[4]中均有论述。如果把文献[2]中 $\alpha 1=f(n2_{cor})$ 时 S8=0 和 S8=100%的控制线与正常工作控制规律线(见图 6)画在一起,这两条线均在正常工作线的右侧,这与实际情况不同。

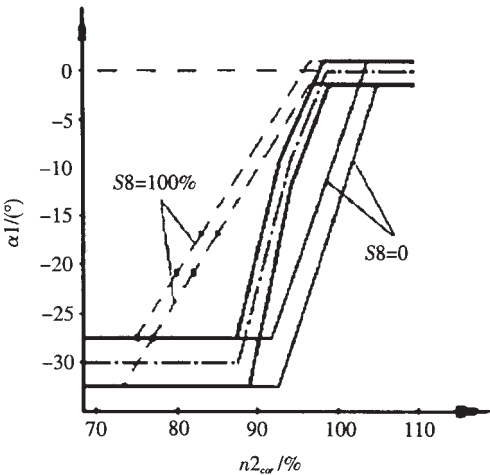


图 6 补充完整的导流叶片角度控制规律线

Fig.6 Compensatory curve of regulation rule

5 结论

(1) 从多方面明确了 S8 调节曲线,得到了 $\alpha 1$ 通道的工作曲线与故障曲线,这些是原理中没有涉及到的特性曲线,弥补了理论上的不足,对理论与实践都有指导意义。

(2) 结合 $\alpha 1$ 故障进行了分析与讨论,使其工作与故障机理更加清晰。

(3) 在发动机控制系统中,机械、液压、电子之间的结合越来越紧密,分析与解决问题时应从总体的角度去考虑。

参考文献:

[1] 谢寿生.某型加力涡扇发动机[M].西安:西安空军工程学院,1998. 下转第(36)页

所得的天平工作公式计算测量推力；第二是安装上钢丝胶管进行动校试验，按照气动矢量喷管模型天平工作公式计算测量推力。理论上讲，同一喷管在同样状态下产生的推力应该是相同的。由图 6 可以看出，两种方法所得结果非常接近，动校重复性误差 $\leq 0.5\%$ ，天平有良好的动态特性。由此即可证明，钢丝胶管对天平的测力影响很小，气动矢量喷管模型校准所得的天平工作公式是可用的。

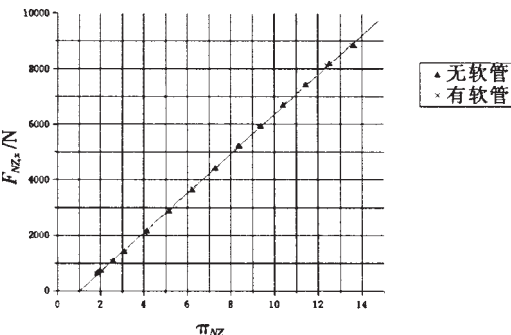


图 6 气动矢量喷管模型的验证试验

Fig.6 The verification test of the pneumatic vectoring exhaust nozzle model

4 试验结果

采用钢丝胶管作为次流连接装置后对某型气动矢量喷管进行了试验。图 7 是在不同喷管膨胀比下

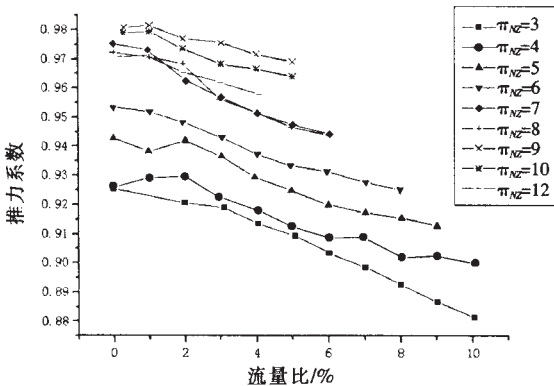


图 7 推力系数特性曲线

Fig.7 Characteristic curves of the thrust force coefficient

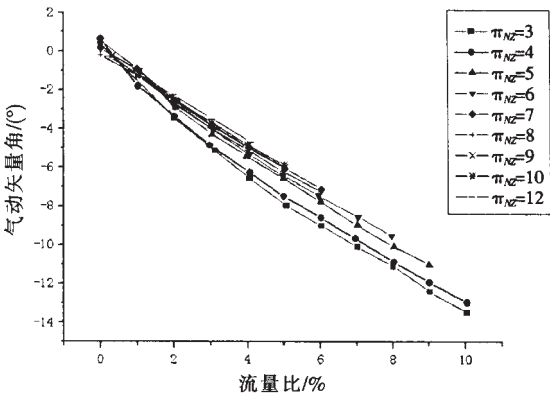


图 8 气动矢量角特性曲线

Fig.8 Characteristic curves of the pneumatic vectoring angle
喷管推力系数随次、主流流量比的变化曲线；图 8 是在不同喷管膨胀比下喷管气动矢量角随次、主流流量比的变化曲线。试验得到的气动矢量喷管数据和设计值相吻合。

5 结论

对气动矢量喷管进行的试验表明，采用钢丝胶管作为次流连接装置满足试验要求，并可得到如下结论：

- (1) 用钢丝胶管作为次流连接装置后对天平进行的校准试验表明，钢丝胶管内压力的高低对天平的测力几乎没有影响。
- (2) 用钢丝胶管作为次流连接装置后，天平静态性能良好，动态测量稳定可靠，动校重复性误差 $\leq 0.5\%$ ，校准所得气动矢量喷管模型天平工作公式正确，总体性能满足试验要求。
- (3) 用钢丝胶管作为次流连接装置后，可在较大的次、主流流量比范围内进行气动矢量喷管模型试验，试验结果可靠。

参考文献:(略)

上接第(23)页

[2] 周宗才.某型飞机推进系统控制[M].西安:西安空军工程学院,1997.
[3] 郑铁军.某型航空发动机低压压气机叶片角度控制规律研究[A].中国航空学会第六届发动机试验与测试技术学术讨论会论文集[C].沈阳:中国航空学会,2001.

[4] 欧阳军.某发动机叶片角度动态超边界故障分析及改进措施[A].中国航空学会第六届发动机试验与测试技术学术讨论会论文集[C].沈阳:中国航空学会,2001.
[5] 张生良,谢寿生.某涡扇发动机电子综合调节器综合测试系统[J].推进技术,2003,24(2):190-192.