

某发动机电子控制器密封性研究

吴兴浪, 颜鹏程, 曾夏青, 黄欢, 徐滔

中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002

摘 要 : 本文分析了某发动机数字电子控制器结构, 对影响数字电子控制器密封性的因素进行分析, 控制器结合面密封性、航插面板密封性及导流排水设计等均会影响数字电子控制器的密封性, 通过控制其可以提高数字电子控制器的密封性, 并通过某发动机整机腐蚀试验电子控制器密封性问题进一步进行分析。

关 键 词 : 发动机; 电子控制器; 密封性

Study On Sealing Property Of An Engine Electronic Controller

Wu Xinglang, Yan Pengcheng, Zeng Xiaqing, Huang Huan, Xu Tao

Avic Hunan Power Machinery Research Institute, Zhuzhou, Hunan 412002

Abstract : In this paper, the structure of an engine digital electronic controller is analyzed, and the factors affecting the sealing performance of the digital electronic controller are analyzed. The sealing performance of the controller joint surface, the sealing performance of the navigation panel, and the design of diversion and drainage will all affect the sealing performance of the digital electronic controller, which can be improved by controlling it. The sealing problem of the electronic controller of an engine corrosion test is further analyzed.

Keywords : engine; electronic controller; leakproofness

引言

航空发动机数字电子控制系统是发动机可靠稳定工作的重要保障^{[1][2]}, 数字电子控制器是数字电子控制系统的核心, 其正常工作与否是发动机可靠工作的关键因素^[3]。当发动机工作在海洋环境中时, 电子控制器的密封性优劣是其能否可靠长期工作的重要因素。

一、数字电子控制器结构简介

某发动机采用全权限数字电子控制系统, 数字电子控制系统采用双控制通道的数字电子控制器^[4]。数字电子控制器主要由机箱、功能电路模块、P0大气压力传感器及其他零部件组成, 包括开入模块、开出模块、连接板模块、电源模块、减振器等^[5]。数字电子控制器中除外部机箱外, 内部包含较多电子元器件、印制板、导线等材料, 为保证内部电路可靠安全的工作, 对数字电子控制器进行了封闭式结构设计, 一定程度上隔离外界恶劣的自然条件^{[6][7]}。

二、数字电子控制器密封性改进分析

当发动机工作在海洋环境中, 数字电子控制器的工作环境包括了高湿、盐雾及淋雨等条件, 密封性优劣是其是否能长期工作的重要因素。

根据控制器密封结构及参考其他发动机控制器密封性改进措施, 数字电子控制器密封性改进分析具体如下。

(一) 提高控制器结构密封性影响分析

1. 控制器结合面密封性影响

数字电子控制器机箱的结合面一般采用橡胶屏蔽条进行封闭, 如果螺钉安装孔与螺钉之间存在间隙, 且两个箱体之间不能保证完全贴合, 螺钉孔位置存在间隙会使的控制器内腔与外部环境不完全气密。当控制器在海洋环境长时间工作时, 外部的高湿盐雾空气进入控制器内部, 在控制器工作过程中, 内外之间存在气压差, 则会存在内外气体交换现象, 当工作一段时间后, 存在凝结积液的可能^[8]。通过调整屏蔽条选型, 增加屏蔽条紧度从而提升结构密封性; 另外可以通过设计将上下箱体的紧固螺钉的装配间隙与控制器内腔隔离, 保证内腔气密性, 提高机箱结合面的密封性。

2. 航插面板密封性影响分析

一般数字电子控制器的航插面板采用的是普通航插固定方式, 没有针对气密性进行设计。当控制器在海洋环境长时间工作时, 外部的高湿盐雾空气进入控制器内部, 存在凝结积液的可能^[9]。由于航插及航插装配螺钉处不能保证气密性, 可以采用外部密封胶灌封方式进行密闭, 从而提高其密封性。

（二）增加导流排水设计影响分析

数字电子控制器散热性和密封性在设计时均需考虑，电子控制器机箱开孔过多，可以提高散热性，但存在积液腐蚀的可能。在设计时可以在控制器下箱体角落进行开孔，且数字电子控制器在飞机上实际安装时倾斜一定的角度，如有积液可及时排出^[10]。

控制器如需长期放置在海洋环境中，机箱开孔后，控制器内部电路、结构与外部环境的接触面增大，海洋环境中的高浓度酸性盐雾会大量进入控制器内部，对内部电路、结构等产生腐蚀，可能导致产品的可靠性降低，长期在海洋环境使用的风险较大，适用于周期相对较短的腐蚀防护环境。

三、某发动机整机腐蚀试验电子控制器密封性问题分析

某发动机在进行整机抗腐蚀性试验时，数字电子控制器 B 通道主控在起动过程时，未采集到起动电磁阀回采信息，报起动电磁阀未响应故障，发动机起动不成功。随后数字电子控制器切换到 A 通道主控后起动成功。

起动电磁阀的功能是控制发动机起动油路的通断，起动过程其不响应则发动机不能起动成功。起动电磁阀为单余度，控制器双通道共用外部起动电磁阀负载及电缆，因此初步判断控制器内部 B 通道起动电磁阀输出电路存在故障，定位到控制器本体故障。

（一）问题分析

将试验时数字电子控制器进行分解检查，检查对象为机箱内部、金属结构件、内部功能模块、相关接线和传感器等，控制器打开后发现内部存在少量积水，积水处为箱体底面，电路模块表面有水渍，金属结构件未出现腐蚀。控制器在试验时处于平放状态，电源、频率量及开出模块 B 在下箱体的最底部，内部积液浸泡，电路板腐蚀较严重，主要涉及起动电磁阀驱动电路。其中 B 通道起动电磁阀驱动电路腐蚀，导致数字电子控制器 B 通道起动电磁阀控制信号不能输出，与台架试验过程时故障相吻合。

对某发动机机腐蚀防护试验中数字电子控制器电路腐蚀进行问题分析，具体如下。

a) 使用环境苛刻

控制器在性能验证阶段按照 GJB150A 要求通过了酸性大气、湿热、酸性盐雾等试验。对本次发动机机腐蚀试验和控制器腐蚀试验条件进行对比，相比控制器单项进行的腐蚀试验条件，发动机器腐蚀试验条件复杂，试验时间远多于控制器试验时间。

经试验现场观察，发动机腐蚀试验时由压缩机提供含湿气、温度、盐雾的压缩空气，吹风口对着控制器，有应力时流量约为 4.9kg/s，无应力时为 1.7kg/s，风速较大。而控制器放置的机载设备舱为封闭环境，没有如此强度的气流应力，且控制器盐雾、湿热试验时只施加微量的风。

综上可得，发动机腐蚀试验条件比控制器腐蚀试验条件严酷，因此不能排除使用环境苛刻引发控制器积液，从而导致电路腐蚀的可能性。

b) 机箱结构不合理

控制器中除外部机箱外，内部包含较多电子元器件、印制

板、导线等材料，为保证内部电路可靠安全的工作，对控制器进行了封闭式结构设计。机箱主体的上下箱体之间采用阶梯配合的安装方式，并设计了密封条。航插安装处均设计有导电密封垫，导电密封垫的有效压缩使得航插安装处密封处理较好一定程度上隔离外界恶劣的自然条件。

根据现场试验情况，控制器放置于发动机前侧，直接面对试验的强风。该情况下，控制器表面不会产生积水，主要原因为：1) 风速过快，凝水速度低于蒸发速度，湿空气无法凝结；2) 即使产生凝水，在强风直接吹拂下，凝水直接被吹走，无法保留在控制器表面。因此，可以排除外部凝水或其他水进入控制器的情况。

控制器结构达不到气密性设计要求，外部水汽可通过呼吸作用进入内部凝结产生积液，从而产生腐蚀，因此机箱结构密封性设计欠缺可导致电路腐蚀。

c) 机箱加工制造缺陷

机箱加工缺陷或使用过程中磕碰会破坏机箱的封闭结构，而导致水或湿气进入控制器内部，产生积液。经开箱检查，控制器机箱等结构件无磕碰情况，装配结合处光滑、平整，未见结构明显缺陷，可排除机箱加工制造缺陷致进水腐蚀的可能。

d) 电路防护不当

电路模块防护不当可导致电路接触高湿、盐雾气体时产生腐蚀。控制器中所有电路模块均采用专用三防漆涂覆处理，使用的三防漆均采购自同一生产厂家以保证三防漆成分的一致性。数字电子控制器选用的涂覆方式为设备涂覆，使用的涂覆设备为喷涂式。对于设备涂覆工艺，在涂覆工艺规范中详细规定了材料配比、配置方法、涂覆、固化以及检测要求等，从而保证涂覆工艺的一致性。

三防漆按照 GJB150A 要求通过了湿热、盐雾和霉菌试验验证。经分解检查确认，未被积液浸泡区域的电路模块三防涂层完好，因此可基本排除电路防护不当引起电路腐蚀的可能。

通过上文分析可知，数字电子控制器虽然是封闭式结构，但缺乏有效的密封性设计，在发动机腐蚀防护试验的严酷条件下长时间使用，非气密的控制器在试验过程中的温度条件变化下，产生呼吸作用，使得试验中的高湿度盐雾气体进入控制器内部，在降温过程中产生凝水，并吸收盐雾形成 NaCl 溶液，浸润到电路板的器件，使得器件被腐蚀而损坏，最终导致控制器出现 B 通道起动电磁阀未响应异常现象。

（二）纠正措施

控制器腐蚀故障的主要原因是外部高湿盐雾空气进入控制器内部凝结积液所致。针对该问题从结构、工艺两方面进行改进设计，通过提升机箱密封性来减少高湿盐雾空气进入控制器内部，避免冷凝积液。

对控制器结构上非密封部位进行了全面梳理，发现机箱上下箱体结合处、机箱顶部螺钉和航插面板与航插法兰盘的结合处等位置存在非密封，通过屏蔽条选型改进、屏蔽条安装槽改进、屏蔽条与机箱紧固螺钉孔的相对位置更改和航插面板涂胶密封等措施进行优化。

（三）验证情况

1. 屏蔽条形位参数加工工艺试验

为了保证屏蔽条密封效果，机箱上安装屏蔽条的槽和结合面

的形位尺寸精度要求较高,因此需要对机箱加工的工艺参数进行预先确认。预先选取平板工艺样件,确定铣削工艺参数,使用该工艺参数加工平板工艺样件,对样件平整度和粗糙度进行了测量。结果表明样件的平整度和粗糙度满足设计图纸要求,通过工艺过程保证的方法,可以确保产品的加工精度满足设计要求。

2. 密封性提升措施有效性验证

机箱泄露通道可分为两大类:一、上下箱体间隙;二、航插面板间隙。针对两类泄露通道进行了专项验证,分别对改进后的上下箱体间隙和航插面板间隙进行密封性测试。

控制器工作高度最大为6000m,此时外部大气压力为47.2KPa,假设控制器内部气压为101KPa,则控制器内外压差最大约为54KPa。本次打压试验设定控制器机箱内外压差为101KPa,覆盖了真实工况的最大压差。

为确认上下箱体间隙密封性改进措施的有效性,采用改进前的控制器和密封槽改进后的工艺机箱做试验件,按照整机施加温度-湿度-高度试验的环境应力,试验结束后开箱对比进水情况。

试验条件如图1所示,温度-20℃、25℃;湿度95%;高度6000m;

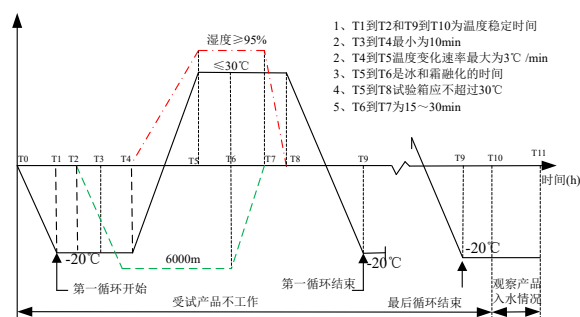


图1故障重现法试验应力谱

试验步骤如下:

- 准备两个试验件:一个改进前控制器,用堵盖及密封胶堵住航插口;一个密封槽改进后的工艺机箱;
- 将两个控制器安装在试验箱的中央;
- 控制器不工作,以不大于3℃/min 的温度变化速率将温度箱调整到-20℃,并保持2h;
- 保持-20℃,将试验箱压力调整到6000m(472mba),保持此温度和压力10min;

参考文献:

- 樊思齐,李华聪,樊丁等. 航空发动机控制(上册、下册)[M]. 西安:西北工业大学出版社,2008.
- 孙健国. 现代航空动力装置控制[M]. 北京:航空工业出版社,2009.
- 曾英俊. 航空动力装置控制[M]. 北京:航空工业出版社,1995.
- 王晓燕,刘振侠;力宁;胡廷勋;周坤;潘君. 刷式篦齿组合密封性能试验研究[J]. 推进技术,2022(07):353-359.
- 杨瑞峰;马铁华. 声发射技术研究及应用进展[J]. 中北大学学报(自然科学版),2006(05).
- 乔坤,刘冬,高天阳. 航空发动机数字电子控制器通道恢复技术研究[J]. 机械管理开发,2023,38(11).
- 李轶,郑国栋,陈志翔. 混动专用发动机密封系统设计[J]. 中国机械,2023,(20).
- 孔祥明,邵志江,顾颖慧. 全权限数字电子控制器雷电试验方法研究[J]. 航空发动机,2016,42(05).
- 张天宏. 航空发动机数字电子控制器的BIT技术[J]. 航空制造技术,2009,(18):42-45.
- 韩小宝. 嵌入式航空发动机数字电子控制器设计研究[D]. 西北工业大学,2005.

e)以不大于3℃/min 的温度变化速率将温度箱调整到25℃,同时调整试验箱湿度达到95%,保持该状态使所有的霜和冰融化;

f)以不小于30mbar/min 的升压速率,将试验箱压力升高到室内环境压力,再调整试验箱的相对湿度到正常环境时的相对湿度;

g)图1中为一个循环,重复c)~f),共完成25个循环;

h)在最后一个试验循环结束时,将试验箱温度稳定在-20℃;

i)试验结束后,打开控制器,观察控制器内积水量。

试验结果:经开箱检查,改进前控制器电路模块上有大量水珠,改进后工艺机箱内部无水珠,初步表明上下箱体间隙密封改进措施有效。

3. 控制器腐蚀验证试验

为了验证改进后的控制器在发动机抗腐蚀性试验中的温度、湿度和盐雾等综合条件下的持续工作能力、材料耐腐蚀能力,参照发动机抗腐蚀性试验条件开展控制器验证试验。

试验结束后对控制器进行了外观检查、功能性能检查及分解检查,具体如下:

- 控制器插座、电缆插头内部无积水、腐蚀;控制器上下箱体未变形;上下箱体的结合缝隙正常;航插面板上密封胶无脱落和起泡;
- 按电子控制器检验规程对控制器进行了功能性能检测,检测合格;
- 对控制器进行了解体检查:上下箱体结合面的密封措施无失效迹象,机箱内部及模块上干燥无积液,电子元器件、焊点及内部结构件无腐蚀迹象。

腐蚀验证试验后控制器功能性能正常,机箱内部及电路模块上干燥无积液,电子元器件、焊点及结构件未见明显腐蚀,改进部位的密封性能未见明显衰减,证明了改进措施有效。

总结

通过对某发动机数字电子控制器密封性改进分析及发动机整机腐蚀试验电子控制器密封性问题分析,通过控制数字电子控制器结合面密封性、航插面板密封性及导流排水设计等措施可以提高数字电子控制器的密封性。