

# 灭火剂浓度机载测试系统时间同步性试验研究



侯亚东,李丽,李牛栋

中国飞行试验研究院,陕西 西安 710089

**摘要:**实时准确的灭火剂浓度测试数据直接影响到飞机防火系统的评估。针对灭火剂浓度机载测试系统测试过程中各采样管通道测试数据之间存在时间延迟的问题,本文从测试原理出发,识别影响各采样管通道时间延迟的关键因素,开展各影响因素的时间同步性试验;得到了采样管长度、采样管材质、采样管弯曲度等因素对各采样管通道测试数据时间同步性的影响规律。试验结果表明,采样管长度、采样管材质、采样管弯曲度等因素均会对测试系统的时间同步性产生较大影响,飞行试验数据处理过程中不能忽略。在此基础上开展了互换性试验和模拟装机条件下的时间同步性试验,并提出了飞行试验数据处理方法,为后续灭火剂浓度测试试验和机载灭火剂浓度测试设备小型化研发提供技术支撑。

**关键词:**时间同步性试验;采样管长度;采样管材质;采样管弯曲度;飞行试验数据处理方法

中图分类号:V244.1

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.07.006

在飞机设计中首要考虑的是飞行安全性,其中火灾是威胁飞行安全的重要因素<sup>[1-2]</sup>。美国联邦航空局(FAA)根据研究结果在咨询通告AC 120-80A<sup>[3]</sup>中做出说明:不受控制的火灾可以在20min内摧毁一架飞机,充满烟雾的机舱会在6~10min内被大火吞噬。性能可靠的发动机舱灭火系统对于飞机安全至关重要。目前,我国军用和民用飞机的动力舱(包括发动机舱和辅助动力装置(APU)舱)使用的都是Halon 1301灭火系统,其灭火剂的填充量、喷嘴配置、保护区内的障碍物等因素都会影响到灭火剂喷射后在舱内的空间分布,只有当灭火剂浓度达到一定值后才能保证及时扑灭火灾<sup>[4-9]</sup>。因此,灭火剂在舱内空间的浓度分布成为评估灭火有效性及灭火系统设计合理性的重要指标。根据FAA发布的咨询通告AC 20-100<sup>[10]</sup>以及美国军方规范MIL-E-22285<sup>[11]</sup>,飞机发动机舱Halon 1301灭火系统在灭火剂喷射后,保护区域内Halon 1301的体积浓度应达到6%并至少维持500ms。

由于舱内灭火剂浓度分布合格判据为“12个测点同时到达6%的时间不低于500ms”,时间精度要求较高,但12个采样管测点分布在舱内的不同位置,再经约30m长采样

管引入灭火剂浓度测试设备,同时测试设备本身12路通道内部结构并非完全相同,导致灭火剂浓度测试设备测得的12个通道浓度数据之间存在时间延迟,会严重影响后续时间数据的判读,无法给出真实可信的舱内灭火剂浓度时间历程数据,无法准确评估舱内灭火剂浓度是否满足设计要求。

目前,国内外已经对灭火剂浓度测试技术开展了大量研究,美国KAD公司生产的Halonyer-II型和GA型气体分析仪早已研发成功并被FAA认可,法国Lhotellie公司研发的灭火剂浓度测试设备已被欧洲航空安全局(EASA)认可。由于国外供应商的技术封锁,从公开的文献资料中无法找到国外灭火剂浓度测试设备的时间同步性能。国内诸如试飞院、中科大、602研究所等单位也根据不同测试原理研发出灭火剂浓度测试设备,但均由于测试精度、时间同步性能、机载测试环境等尚未获得局方认可,无法直接在民用飞机上应用。

本文针对灭火剂浓度测试试验过程中各通道浓度数据存在时间延迟的问题,利用试飞院自主研制的国产灭火剂浓度测试设备,开展时间同步性试验,探索灭火剂浓度数据

收稿日期:2023-04-19; 退修日期:2023-05-16; 录用日期:2023-06-15

引用格式: Hou Yadong, Li Li, Li Niudong. Experimental study on time synchronization of airborne test system for extinguishing agent concentration[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(07):43-50. 侯亚东,李丽,李牛栋. 灭火剂浓度机载测试系统时间同步性试验研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34(07):43-50.

处理方法,为获得真实可信的灭火剂浓度测试数据提供支撑。

## 1 灭火剂浓度机载测试系统

### 1.1 基本原理

灭火剂浓度测试设备是基于FAA发布的咨询通告《测量动力装置舱内灭火剂浓度通用指南》推荐的测量原理,采用测量微压差方法,间接测量气体的体积浓度。

由低速流体的泊肃叶定律(Poiseuille's law)可知,当流体流经层流节流装置时,由于流体具有黏性,黏性阻力导致流体出现压力损失,即节流装置两端产生的压降,该压降与流体流量及动力黏度成函数关系,如式(1)所示

$$Q_v = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8L\mu_{\text{mix}}} \quad (1)$$

式中, $Q_v$ 为流体的体积流量; $R$ 为被测管道半径; $\Delta p$ 为流过节流装置产生的压降; $L$ 为节流装置之间的距离; $\mu_{\text{mix}}$ 为流体的动力黏度。

由式(1)可以得出,在气体流量和层流节流装置结构参数一定的条件下,气体流经节流装置产生的压降只与流体的动力黏度成比例,如式(2)所示

$$\mu_{\text{mix}} = k\Delta p \quad (2)$$

式中, $k = \frac{\pi R^4}{8L \cdot Q_v}$ 为仪器系数,与测量装置本身有关,可采用标准气体对测试设备进行标定得到。

再根据式(3)建立混合气体黏度与混合气体中 Halon 1301 气体体积浓度的对应关系,求得混合气体中 Halon 1301 气体体积浓度

$$\mu_{\text{mix}} = \frac{\sum x_i \mu_i M_i^{1/2}}{\sum x_i M_i^{1/2}} \quad (3)$$

式中, $M_i$ 为混合气体中*i*组分的分子量; $x_i$ 为混合气体中*i*组分的体积浓度。

灭火剂浓度测试过程为:气体取样真空泵通过采样管将动力装置舱内被测 Halon 1301 气体抽出来,通过温度控制器使流过节流装置的气流温度稳定在设定温度;通过限流装置实现气体恒流流动,将气体流经层流装置产生的压降以电压信号输出,经过数据处理得到灭火剂浓度值。

### 1.2 测试系统组成

灭火剂浓度测试系统由气体处理测量单元、温度控制器、电源转换器、数据处理计算机、气体取样真空泵 5 部分组成,各系统交联如图 1 所示。测试过程中,被测气体从气体处理测量单元的 1~12 号通道进入其内部,经气体处理

测量单元测量后从其内部汇合点处流出,再经气体取样真空泵排出至外界;灭火剂浓度测试结果由气体处理测量单元传输至数据处理计算机。

灭火剂浓度测试系统各组成部分功能如下:

#### (1) 气体处理测量单元

通过对被测气体加温、流量控制等,测量层流装置的压差,转化成电压信号输出。

#### (2) 真空泵

给被测气体提供动力,使被测气体从浓度检测点快速到达、流过气体处理测量单元。

#### (3) 温度控制器

控制被测量气体的温度在恒定的设计值。

#### (4) 数据处理计算机

对气体处理测量单元各测量通道传输来的电压信号进行处理,并转化成与之对应的气体浓度信号,同时完成气体浓度信号显示、存储、回放等。

#### (5) 电源转换器

将三相 115V/400Hz 交流电源转换成灭火剂浓度测试系统各组件所需的电源。

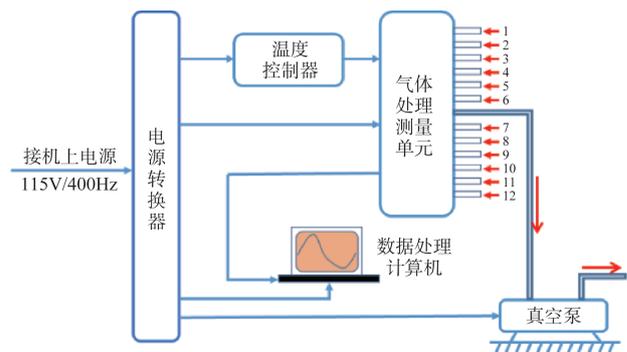


图1 测试系统基本组成

Fig.1 Basic composition of airborne test system

## 2 时间同步性试验

### 2.1 试验方法

图2所示为时间同步性试验过程示意图。时间同步性试验的试验方法如下:试验前,将经中国计量院标定过的哈龙 1301 气体、氧气、氮气的混合标气瓶通过减压阀、一根长度约为 1m 的软管连接至分流器的进口;分流器 12 路出口通过外径为 6mm、内径为 4mm 的铜采样管连接至气体处理测量单元的 12 路通道接口;试验时,首先打开标气瓶阀门,迅速调节减压阀,使得分流器处压力略高于外界大气压,标气瓶中的气体经过减压阀流入分流器(见图3)中,分流器将

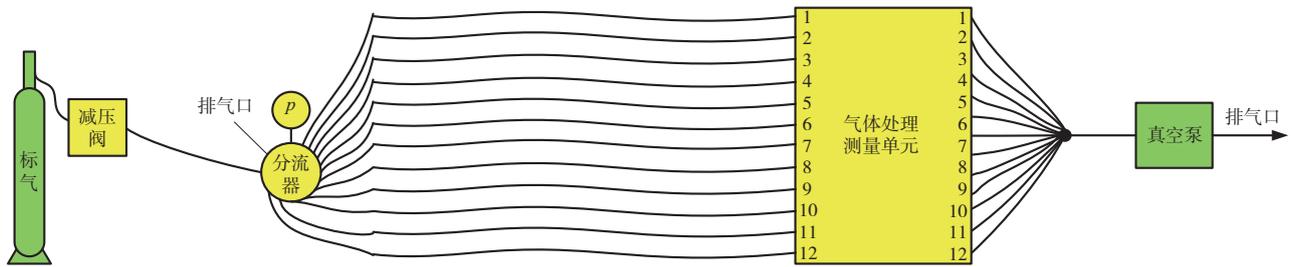


图2 时间同步性试验过程示意图

Fig.2 Schematic diagram of time synchronization test

标气均分为12路气体分别进入气体处理测量单元对应的12路通道,每个通道气流在气体处理测量单元内部均进过压力传感器、温度传感器、气流温度控制器、温度传感器、层流节流装置、恒流控制器、压力传感器等部件,后汇聚于一处,经真空泵排出。

需要注意的是,分流器上设置有压力传感器和排气孔,压力传感器通过数字电表将压力值转化为更为精确的电压值,以此来精准控制分流器处压力,而排气孔则是为了在实际操作气瓶阀门时保持分流器处的压力与外界大气压有一个恒定的正值。

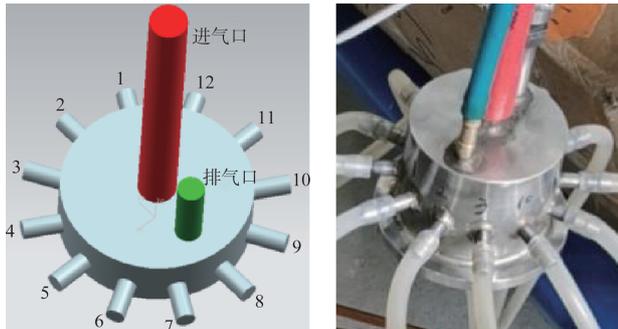


图3 分流器

Fig.3 Schematic diagram of diverter

## 2.2 关键影响因素分析

灭火剂浓度测试设备是利用气体流经层流装置产生的压降转化为电压信号的形式,进而经数据处理得到真实的灭火剂浓度值。因此,每路测得的压降直接影响该路测得的灭火剂浓度值。

根据流体力学原理,管路沿程压降是沿程阻力损失与局部阻力损失之和。沿程阻力损失与管路长度、定性管径、沿程摩擦阻力系数、定性流速和介质密度有关,由式(4)计算所得,其与沿程摩擦阻力系数、流动速度平方成正比;每个通道的管路长度、直径、沿程摩擦流阻系数均会影响沿程阻力损失。局部阻力损失与局部阻力系数、定性管径、定性

流速和介质密度有关,由式(5)计算所得,其与局部阻力系数、流动速度平方成正比;每个通道局部管路的弯度、形状等均会影响该通道各个位置处的局部阻力损失。从整个管路通道来看,每个通道流阻系数越大,流动速度越小,从采样点至受感部位置处时间滞后性越大;12个通道的流阻系数差异性越小,则流动速度差异性越小,流量差异性越小,12个通道时间延迟越小

$$\Delta p_f = \lambda \frac{l}{d_0} \cdot \frac{V_0^2}{2} \rho \quad (4)$$

式中, $\Delta p_f$ 为管路沿程摩擦阻力; $\lambda$ 为沿程摩擦阻力系数; $d_0$ 为计算沿程摩擦阻力的定性管径; $V_0$ 为计算管路沿程摩擦阻力的定性流速; $\rho$ 为介质密度。

$$\Delta p = \zeta \frac{V_0^2}{2} \rho \quad (5)$$

式中, $\Delta p$ 为局部阻力; $\zeta$ 为局部阻力系数; $V_0$ 为计算局部阻力的定性流速; $\rho$ 为介质密度。

在时间同步性试验中,12个通道从分流器到汇合点的压降是相同的,因此,从影响沿程阻力损失和局部阻力损失的因素入手,认为分流器接口位置、采样管长度、采样管材质、采样管弯曲度以及测试设备内部管路等因素是影响测试设备各通道时间同步性的关键因素。

## 2.3 数据处理

机载灭火剂浓度测试设备时间同步性概念为首次提出,国内尚无明确统一的标准和评价指标,由于咨询通告AC 20-100中,舱内灭火剂浓度合格指标是6%及以上浓度的Halon 1301气体,因此时间同步性试验关注的重点就是12个通道到达6%浓度的最长时间与最短时间之差,记为6%- $\Delta T$ ,即瞬态特性。以某次时间同步性试验举例说明:图4是某次时间同步性试验过程中各通道的灭火剂浓度时间历程曲线数据,横坐标代表绝对时刻,纵坐标代表各通道的灭火剂浓度。试验前12路通道灭火剂浓度为0,试验开始后,12路通道灭火剂浓度数值迅速上升,最终达到标气瓶灭火剂浓度数值10%,本次试验的时间同步性延

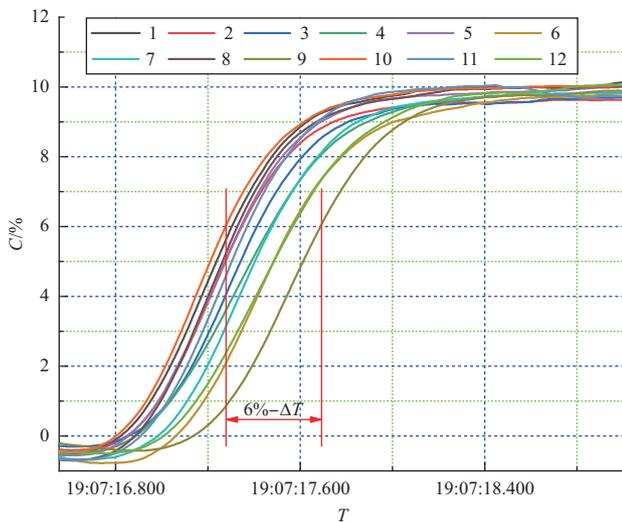


图4 某次时间同步性试验数据

Fig.4 Data of a time synchronization test

迟记为  $6\%-\Delta T=0.395s$ 。

### 3 时间同步性影响因素

根据2.2节关键影响因素分析,从采样管长度、采样管材质、采样管弯曲度等因素进行实验室试验,研究其对时间同步性的影响。

#### 3.1 采样管长度

针对采样管长度,分别选取了长度为2m和10m的两种采样管进行时间同步性试验,具体试验结果见表1。分别选取下面两组试验结果进行对比,第一组是10%标气条件下2m和10m平直塑料采样管(序号1~6);第二组是10%标气条件下2m和10m平直紫铜采样管(序号7~14)。

试验结果如下:第一组,2m和10m条件下  $6\%-\Delta T$  时间分别为0.285s、0.710s;第二组,2m和10m条件下,  $6\%-\Delta T$  时间分别为0.180s、0.409s。

由试验结果可以看到,采样管长度显著影响各通道测试数据时间同步性;相同材质采样管和弯曲度,采样管长度越长,时间同步性越差,时间延迟越大。这是由于采样管长度越长,管路沿程阻力损失越大,进而导致各个采样管管路之间流动差异性越大,时间延迟也就越大,即采样管的长度放大了各个采样管之间的时间延迟。

#### 3.2 采样管材质

选取了塑料管和紫铜管两种采样管材质进行时间同步性试验,具体试验结果见表1。分别选取表1中两组试验结果进行对比,第一组:10%标气条件下2m长的平直塑料采样管和紫铜采样管(序号1~3和序号7~10);第二组:10%

表1 不同采样管材质与长度影响下时间同步性试验结果

Table 1 Test results of time synchronization for different sampling tube lengths

序号	采样管材质	采样管长度/m	标气浓度/%	弯曲度	$6\%-\Delta T/s$	平均值/s
1	塑料管	2	10	平直态	0.282	0.285
2	塑料管	2	10	平直态	0.285	
3	塑料管	2	10	平直态	0.288	
4	塑料管	10	10	平直态	0.708	0.710
5	塑料管	10	10	平直态	0.710	
6	塑料管	10	10	平直态	0.712	
7	紫铜管	2	10	平直态	0.177	0.180
8	紫铜管	2	10	平直态	0.178	
9	紫铜管	2	10	平直态	0.180	
10	紫铜管	2	10	平直态	0.185	0.180
11	紫铜管	10	10	平直态	0.395	
12	紫铜管	10	10	平直态	0.410	
13	紫铜管	10	10	平直态	0.420	0.409
14	紫铜管	10	10	平直态	0.410	

标气条件下10m长的平直塑料采样管和紫铜采样管(序号4~6和序号11~14)。

试验结果如下:第一组,塑料采样管和紫铜采样管对应的  $6\%-\Delta T$  分别为0.285s、0.180s;第二组,塑料采样管和紫铜采样管对应的  $6\%-\Delta T$  分别为0.710s、0.409s。

由试验结果可以看到,采样管材质显著影响各通道测试数据时间同步性;相同采样管长度、相同弯曲度下,紫铜管的时间同步性较塑料管短。这主要是由采样管内混合气体与采样管内壁面之间黏性不同导致的。

#### 3.3 采样管弯曲度

选取了4种弯曲度的采样管进行时间同步性试验,其弯曲程度见表2。均采用10%标气10m长紫铜采样管进行试验,每种弯曲程序均进行了多次试验,对  $6\%-\Delta T$  取平均值,具体试验结果见表3,具体如下:A形紫铜管的  $6\%-\Delta T$  平均值为0.409s;B形紫铜管的  $6\%-\Delta T$  为0.465s;C形紫铜管的  $6\%-\Delta T$  平均值为0.471s;D形紫铜管的  $6\%-\Delta T$  平均值为0.475s。

试验结果表明,采样管弯曲度显著影响各通道测试数

表2 采样管不同弯曲程度示意

Table 2 Different bending degrees of sample tubes

弯曲类型	A	B	C	D
弯曲示意				

据时间同步性;平直态紫铜管的时间同步性较弯曲状紫铜管短;弯曲度越复杂,得到的时间同步性越差,时间延迟越大。这是由于采样管弯曲度越复杂,局部阻力损失越大,进而导致各个采样管管路之间流动差异性越大,时间延迟也就越大,即采样管的弯曲度放大了各个采样管之间的时间延迟。

表3 不同采样管弯曲度时间同步性试验结果

Table 3 Test results of time synchronization for different sampling tube curvature

序号	采样管 材质	采样管 长度/m	标气 浓度/%	弯曲度	6%~ $\Delta T/s$	平均值/s
1	紫铜管	10	10	A	0.395	0.409
2	紫铜管	10	10	A	0.410	
3	紫铜管	10	10	A	0.420	
4	紫铜管	10	10	A	0.410	
5	紫铜管	10	10	B	0.464	0.465
6	紫铜管	10	10	B	0.463	
7	紫铜管	10	10	B	0.465	
8	紫铜管	10	10	B	0.467	
9	紫铜管	10	10	C	0.440	0.471
10	紫铜管	10	10	C	0.420	
11	紫铜管	10	10	C	0.545	
12	紫铜管	10	10	C	0.460	
13	紫铜管	10	10	C	0.490	0.475
14	紫铜管	10	10	D	0.465	
15	紫铜管	10	10	D	0.495	
16	紫铜管	10	10	D	0.465	

### 3.4 测试设备内部管路和分流器接口位置

从上述时间同步性试验中可以看到,即使采样管长度为2m情况下仍然存在时间同步性延迟;这主要由气体处理测量单位内部12路通道管路不完全一致导致,属于测试设备自身固有属性,无法消除且不可忽略。

同时,时间同步性试验中需要使用分流器装置,该装置主要作用是将1路标准气体均匀分流成12路连接采样管,进而进入测试设备。基于分流器设计、制造等原因,分流器内部气流分布不均匀,无法保证分流器12路出口处压力完全一致,且分流盘设计有排气管路,上述原因均导致下游各采样管测得的试验数据有明显延迟,无法消除且不可忽略。

上述对关键影响因素进行了大量时间同步性试验,得出以下结论:

(1)采样管长度、材质、弯曲度均会对时间同步性产生较大影响,无法消除且不可忽略,进行飞行试验数据处理时

必须考虑其影响。

(2)测试设备内部管路不一致导致的时间同步性延迟属于设备自身固有属性,无法消除且不可忽略,进行飞行试验数据处理时必须考虑其影响。

(3)由于飞行试验过程中不使用分流器装置,因此,针对分流器接口位置不同导致的时间延迟在后续进行飞行试验数据处理时必须消除其影响。

### 3.5 解决措施

针对上述时间同步性得到的结论,提出以下方法予以解决:(1)针对采样管长度、采样管材质、采样管弯曲度以及测试设备内部管路不同导致的时间同步性,采用模拟装机条件下的时间同步性试验解决,即在地面实验室中按照实际装机条件,采用相同的采样管长度、采样管材质、采样管弯曲形式以及测试设备进行时间同步试验,得到每个通道的时间同步性延迟数据库;(2)针对分流器接口位置导致的时间同步性延迟,采用互换性试验的方法予以消除。

## 4 试验数据处理方法

### 4.1 互换性试验

采用长0.2m(尽可能短)的平直紫铜管进行时间同步性试验,得到最快的分流器接口,然后分别将其余接口与最快的分流器接口进行互换,共开展12次互换性试验。

针对某一分流器接口位置(以分流器接口位置1为例),互换前后时间延迟差值计算过程如下:互换前(初始状态),采样管1的时间同步性延迟为0.085s;互换后编号为1的采样管对应的分流器接口位置为1的时间同步性延迟为1.195s。差值即为由分流器接口位置1引起的时间同步性延迟,即1.11s。试验后,得到的分流器接口位置时间同步性数据见表4。

### 4.2 模拟装机条件下的时间同步性试验

模拟装机条件下的时间同步性试验,即按照真实飞行试验时所采用的采样管材质、采样管长度、采样管弯曲走向在地面实验室进行时间同步性试验。这里以发动机舱采样管灭火剂浓度测试设备时间同步性试验为例进行说明。

试验用采样管与机上试验采样管材质、长度和内外径均相同,均为外径6.35mm、壁厚0.762mm的英制紫铜管,弯曲度与飞行试验中等效。发动机舱采样管包括舱内部分和舱外部分,舱外部分指的是从吊挂经机翼至灭火剂浓度测试设备接口部分,舱内部分指的是12个测点至吊舱/发动机分离面部分;对于12根采样管,舱外部分采样管走

表4 分流器接口位置时间同步性数据

Table 4 Test results of time synchronization for different diverter interface locations

分流器接口位置	6%— $\Delta T/s$
1	1.11
2	0
3	0.18
4	0.055
5	0.03
6	0.02
7	0.01
8	0.22
9	0.01
10	0.02
11	0.245
12	0.255

向均一致,舱内部分由于测点位置不同均不相同,舱外舱内采样管弯曲走向等效方案示例见表5、表6,为保证等效结果的可信度,将等效时的管路弯折方式与实际飞行试验装机数模保持一致,表中直管段只填写长度项,弯管段只填写弯曲半径和弯曲角度项。表5为飞行试验与实验室试验用发动机舱外采样管等效方案,12根采样管走向均一致,故只需保持统一即可,其中管路共分为45段,两者等效弯折方式基本保持一致,表5所示只给出部分分段数据,其余分段同理;表6为飞行试验与实验室试验用发动机舱内部分采样管等效方案(以11号采样管为例,管路共分为11段,同理此表也只给出部分分段数据)。

按照事先设计的等效方案,将等长的采样管按照表5、表6的要求进行弯曲,采样管一端接分流器,另一端接灭火剂浓度测试设备12个通道接口,采用10%标准气体进行时间同步性试验,得到了模拟装机条件下的时间同步性延迟。该时间同步性延迟数据包括了由分流器接口位置不同、采样管弯曲差异不同、测试设备内部管路不同导致的延迟总和,因此,为了使得到的各通道采样管时间延迟数据能够修正飞行试验数据,需将由分流器接口位置不同导致的时间延迟去除,得到发动机舱采样管时间同步性试验数据库。详细试验结果和修正后的试验数据见表7。

#### 4.3 飞行试验数据处理

将灭火剂浓度机载测试系统安装至飞机客舱中,按照设计好的发动机舱内测点及采样管长度、走向进行机上改装,开展飞行试验,得到发动机舱灭火剂浓度测试原始试验

表5 飞行试验与实验室试验用发动机舱外采样管等效方案

Table 5 Equivalent scheme of engine cabin extravehicular sampling tube for flight test and laboratory test

管段序号	飞行试验(装机数模)			实验室试验		
	长度/mm	弯曲半径/mm	弯曲角度/(°)	长度/mm	弯曲半径/mm	弯曲角度/(°)
1	149.20			150		
2		50.80	90		50	90
3	80.3			80		
4		41.2	60.3		41	60
5	46.8			47		
6		35.1	48		35	48
7	23.3			23		
8		86	52		86	52
9	86.2			86		
10		51.5	60		52	60

表6 飞行试验与实验室试验用发动机舱内采样管等效方案

Table 6 Equivalent scheme for sampling tube in engine cabin for flight test and laboratory test

管段序号	飞行试验(装机数模)			实验室试验		
	长度/mm	弯曲半径/mm	弯曲角度/(°)	长度/mm	弯曲半径/mm	弯曲角度/(°)
1		50.80	90		50	90
2	554.99			555		
3		61.2	70		61	70
4	123.6			124		
5		52.7	60.5		53	61
6	87.5			88		
7		23.5	74		24	74
8	93.4			93		
9		68.5	83.2		69	83
10	60.2			60		
11		50.80	90		50	90

数据。利用表7中的各采样管通道时间同步性延迟数据对各通道数据进行修正,即各通道试验数据按照修正后发动机舱采样管时间同步性试验数据库,进行时间轴修正,得到真实的灭火剂浓度时间历程曲线。

## 5 结论

本文从影响灭火剂浓度测试结果时间同步性的原理出发,识别其关键影响因素,并对每个关键影响因素进行时间同步性试验;得到了各因素影响规律,提出了一套解决措施;针对飞行试验数据,提出一套切实可行的数据处理方

表7 发动机舱采样管时间同步性试验数据  
Table 7 Time synchronization test results of engine compartment sampling tube

采样管编号	原始6% $-\Delta T/s$	修正后6% $-\Delta T/s$
10	0	-0.020
5	0.323	0.293
1	0.347	-0.763
11	0.365	0.120
2	0.422	0.422
4	0.528	0.473
8	0.587	0.367
7	0.612	0.602
6	0.872	0.852
12	1.210	0.955
9	1.343	1.333
3	1.517	1.337

法;解决了灭火剂浓度测试试验过程中各通道浓度数据存在时间延迟的问题,为后续灭火剂浓度测试设备能够在民用飞机上应用提供技术支撑。

AST

### 参考文献

- [1] 李淑艳,王新月,卿雄杰. 飞机/发动机灭火系统的设计与计算[J]. 西北工业大学学报, 2006, 24(1):124-127.  
Li Shuyan, Wang Xinyue, Qing Xiongjie. An engineering method for extinguishing incipient aircraft/engine fire[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2006, 24(1): 124-127.(in Chinese)
- [2] 冯力群. 飞机的火灾扑救及抢险救援[J]. 安全, 2007, 28(10): 26-28.  
Feng Liqun. Aircraft fire fighting and rescue[J]. Safety & Security, 2007, 28(10): 26-28. (in Chinese)
- [3] Federal Aviation Administration. AC 120-80A: Advisory circular 120-80A in-flight fires[S]. FAA,2014.
- [4] 陈晓林. 飞机火灾事故原因分析与预防(上)[J]. 劳动保护, 2011(4):96-98.  
Chen Xiaolin. Cause analysis and prevention of aircraft fire accidents(Part 1)[J]. Journal of Labor Protection, 2011(4):96-98. (in Chinese)
- [5] 李丽. 民机货舱防火系统验证试飞方法研究[J]. 航空科学技术, 2011(4):24-26.  
Li Li. Research on demonstration method of commercial airplane cargo compartment fire protection system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2011(4): 24-26. (in Chinese)
- [6] 李丽. 民用飞机防火系统适航试验研究[J]. 航空科学技术, 2013(4):55-57.  
Li Li. Research on airworthiness test about civil airplane fire protection[J]. Aeronautical Science & Technology, 2013(4):55-57.(in Chinese)
- [7] 张沛,钟剑龙,汪箭. 飞机发动机舱失火仿真研究[J]. 航空科学技术, 2017, 28(8):21-27.  
Zhang Pei, Zhong Jianlong, Wang Jian. Study on misfire simulation in aircraft nacelle[J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28(8): 21-27. (in Chinese)
- [8] 王诗婷. 基于数据驱动的国产运输类飞机持续适航实践研究[J]. 航空科学技术, 2021, 32(11):39-44.  
Wang Shiting. Data-driven study on the continuous airworthiness practices of domestic transport category aircraft [J]. Aeronautical Science & Technology, 2021,32(11):39-44.(in Chinese)
- [9] 朱日兴,朱兆优. 民用飞机防火系统适航审定技术分析与研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2021(1): 123-127.  
Zhu Rixin, Zhu Zhaoyou. Analysis and study of airworthiness certification technology for civil aircraft fire protection systems [J] Civil Aircraft Design and Research, 2021(1): 123-127. (in Chinese)
- [10] Federal Aviation Administration. AC 20-100: Advisory circular 20-100 general guidelines for measuring fire-extinguishing agent concentration in powerplant compartments[S].FAA,1977.
- [11] United States Navy. MIL-E-22285: Extinguishing system, fire, aircraft, high-rate-discharge type, installation and test[S]. U.S. Navy, 1959.

## Experimental Study on Time Synchronization of Airborne Test System for Extinguishing Agent Concentration

Hou Yadong, Li Li, Li Niudong

*Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China*

**Abstract:** Real time and accurate testing data of fire extinguishing agent concentration directly affects the evaluation of aircraft fire protection systems. In view of the problem of time delay between the test data of each sample tube channel in the testing process of the current domestic testing system, the key factors affecting the time delay of each sample tube channel were identified from the testing principle, and the time synchronization test of each influencing factor was carried out. The influence on the length of sampling tube, the material of sampling tube, the bending degree of sampling tube and other factors on the time synchronization of each sampling tube channel test data were obtained. The experimental results show that factors such as the length, material, and bending degree of the sampling tube all have a significant impact on the time synchronization of the testing system, and cannot be ignored in the process of flight test data processing. On this basis, the interchangeability test and time synchronization test under simulated installation conditions were carried out, and the processing method of flight test data was proposed, which provided technical support for subsequent fire extinguishing agent concentration test and miniaturization research and development of airborne fire extinguishing agent concentration test equipment.

**Key Words:** time synchronization test; sampling tube length; sampling tube material; sampling tube curvature; flight test data processing methods