

# 编制说明

随着我国航空航天发动机朝着高增压比、高推重比和高可靠性的趋势快速发展,动态压力参数测试已经成为发动机自主研制和改进的重要手段,越来越受到重视。事实上,世界航空发达和发动机领先的国家,始终都非常重视先进航空动力高新技术和核心技术领域的压力试验测试技术研究以及相关标准规范的制定和贯彻,以提高发动机测试性设计水平和保障能力。美国在航空发动机领域建立的标准体系包括美军标、协会标准和企业标准的三级标准体系,覆盖了设计、试验、制造、使用及维护的全寿命周期,为航空航天发动机提供了有利支撑和保证。美国国防部早在 2000 年就颁布了美军最顶层计量标准 MIL — STD — 1839B 《国防部校准与测量要求标准实践》,以及该标准的解释性手册 MIL — HDBK — 1839A 《校准与计量要求手册》。同样,俄罗斯门捷列夫国家计量院建有高频高压的正弦压力标准装置,主要解决大推力发动机高频高压的测试需求。实际上,航空航天领域的动态压力测试需求主要为航空航天领域所用的压力传感器的动态测试。近年来,由于国内发动机技术的发展和要求的提高,发动机前端压气机叶片旋转、后端加力燃烧室的振荡燃烧、发动机风洞实验以及发动机进气道流畅畸变等工况,其使用的压力传感器在高频高压环境中的动态性能尤其关键。然而,国内还没有针对航空航天用压力传感器动态测试的相关标准。在国内航空航天领域重要性日益提高的大环境下,国内航空航天领域所用压力传感器存在“使用广、重要性大却无测试标准,甚至使用者不了解所用压力传感器所需的测试内容”等现状,因此有必要研究和建立航空航天领域所用压力传感器的动态测试技术标准,规范和明确航空航天用压力传感器的动态性能测试内容,以保障航空航天领域所用压力传感器在工况下的动态性能。

国内计量领域由北京长城计量测试技术研究所于 2005 年制定了现行有效的 JJG 624《动态压力传感器检定规程》,但其侧重于针对计量部门如何去检定压力传感器的动态指标,罗列了全部的性能指标和几种数据处理方法,较为笼统,且其频率响应的测试点一般低于 1kHz,总体上是针对工业领域使用的常规要求。然而,航空航天领域用压力传感器由于其使用领域的特殊性,仍需要在压力传感器的测试内容、测试原则、测试频率、最适宜的数据处理方法等方面,进一步探讨与明确。

上海作为我国航空航天产业的重要承载基地,目前已初步建立了以大型客机和民用航空发动机研制、新支线飞机量产为代表的民用航空产业体系,而目前恰恰缺乏航空航天领域相关的标准。作为张江国家科学中心,从上海航空航天产业的未来发展与定位出发,上海急需建立和制定航空航天领域动态测试的相关标准,为上海的航空航天技术做技术支撑与保障。且《上海市十三五规划》指出,要聚焦“大飞机”重大工程,推动建立和完善商用飞机产业计量标准,提高商用飞机产业专业设备的计量校准能力,研究商用飞机型号研制校准测试方法、测量测试系统和行业标准规范,为商用飞机产品研发提供支撑。同时,《上海市工业强基工程实施方案》中明确要开展航空航天领域补短板行动,加强商用飞机专用测试设备的研制。而本次航空航天用压力传感器的动态测试标准研究和制定,正是对商用飞机、民用飞机等航空航天领域做强有力的技术支撑。因此,研究制定航空航天用压力传感器动态测试的上海市地方标准,满足航空航天用压力传感器的动态测试需求,规范和促进航空航天领域的产业发展,具有重要意义。

## 一、任务来源

本地方标准由原上海市质量技术监督局提出,于 2018 年 11 月通过审定并批准立项,以“沪质技监标(2018)503 号”文正式下达制定任务,项目名称为《航空航天用压力传感器动

态测试方法》，项目编号为 18DZ2203800，合同编号为 STCSM2018-04-18，技术归口单位为上海市计量测试技术研究院。以上海市计量测试技术研究院为主要起草单位，上海飞机制造有限公司、中国航发上海商用航空发动机制造有限公司、昆山双桥传感器测控技术有限公司、上海精密计量测试研究所为参与起草单位，成立地方标准编制组，共同起草本标准，并同时有序组织实施标准制定过程中的前期研究工作与技术确认工作，起止时间为 2018 年 11 月至 2020 年 12 月。

## 二、工作简况

### (1) 成立编制组

自 2018 年 11 月立项后，上海市计量测试技术研究院、上海飞机制造有限公司、中国航发上海商用航空发动机制造有限公司、昆山双桥传感器测控技术有限公司和上海精密计量测试研究所，共 5 家单位共同成立了编制组。编制组成员包括了人员组成和分工见表 1：

**表 1 编制组人员组成分工表**

序号	姓名	单位	职务/职称	任务分工	备注
1	张忠立	上海市计量测试技术研究院	高级工程师	项目总体策划，开展调研分析，进行实验验证，编写标准文件及编制说明。	
2	王灿	上海市计量测试技术研究院	高级工程师	项目总体策划，开展调研分析，试验设备采购，进行实验验证。	
3	徐子翼	上海计量测试技术研究院	/	前期仿真验证，搭建试验平台，进行试验验证。	
4	林正皓	上海市计量测试技术研究院	/	编写标准文件及编制说明。	
5	王冰	昆山双桥传感器测控技术有限公司	高级工程师	开展调研分析，激波管调研及试验。	
6	孙波	上海飞机制造有限公司	高级工程师	开展航空领域需求及特点调研分析，技术研讨，标准文件编写。	
7	翁俊	上海精密计量测试研究所	高级工程师	开展航天领域需求及特点调研分析，技术研讨，标准文件编写。	
8	徐苒	中国航发上海商用航空发动机制造有限公司	工程师	开展航空领域需求及特点调研分析，技术研讨，标准文件编写。	

9	刘春光	上海市计量测试技术研究院	/	模拟仿真分析，数据分析整理。	
10	张进明	上海市计量测试技术研究院	教授级高级工程师	项目总体策划，技术指导，方案设计。	
11	任学弟	上海市计量测试技术研究院	教授级高级工程师	项目总体策划，技术指导。	

## (2) 确立编制原则

本标准的主要以适应上海市航空航天动态测试的发展和应用为目标，对航空航天用压力传感器的动态性能进行要求，制定相应可执行的测试方法，填补本市的航空航天领域用压力传感器相关标准的空白，完善和规范本市航空航天领域用压力传感器的动态测试内容、测试原则、测试方法等，规范和引导上海市航空航天压力传感器的应用，促进经济效益和社会效益相统一。

本标准的编制主要遵循以下原则：

- a) 统一性原则。在动态压力计量领域及航空航天领域内尽量保证术语和定义的一致性。
- b) 可操作性原则。增强动态测试方法中各步骤的可操作性，使其易于应用和推行。

本标准的制定，标准限值的确定与经济、技术发展水平和相关承受能力相适应，具有先进性和指导性，促进科学技术进步。

## (3) 开展调研分析

目前，国内暂无针对航空航天用压力传感器动态测试的相关标准。国内计量领域已经针对工业使用，起草了 JJG 624-2005《动态压力传感器国家检定规程》，以及 JJG 1142-2017《动态压力标准器国家检定规程》。除此以外，针对国内常规动态压力传感器的生产制造，现仅有一个推荐性国标可以参考：GB/T 26807-2011《硅压阻式动态压力传感器》，其规定了硅压阻式动态压力传感器的分类与命名、基本参数、要求、检验方法、检验规则及标志、包装、运输和贮存，同时适用于硅压阻式动态压力传感器的生产、使用、验收等。具体内容见表 2：

**表 2 相关标准规程调研表**

序号	标准号（规程号）	名称	分析
1	JJG 624-2005	动态压力传感器国家检定规程	列出了一系列动态压力检定的方法和要求，但较为宽泛， <b>可操作性较差</b> ，难以直接应用。
2	JJG 1142-2017	动态压力标准器国家检定规程	给出了动态压力标准器的检定方法和要求，但对于动态压力传感器如何检定 <b>未提及</b> 。
3	GB/T 26807-2011	硅压阻式动态压力传感器	规定了硅压阻式动态压力传感器的分类与命名、基本参数、要求、检验方法、检验规则及标志、包装、运输和贮存，同时适用于硅压阻式动态压力传感器的生产、使用、验

			收等，但对于其他类型的压力传感器并未提及。
--	--	--	-----------------------

(4) 征求意见稿阶段

2018 年 11 月至 2020 年 3 月，编制组在对国内外现有相关标准和规程调研的基础上，结合上海市航空航天产业的需求和特点，搭建实验设备进行验证，组织起草单位专家进行内部技术讨论，开始撰写标准征求意见稿及其编制说明。

(5) 送审稿阶段

2020 年 3 月至 2021 年 1 月，编制组将经过完善的标准征求意见稿发往航空航天领域和动态压力领域相关单位征求意见，征求意见单位包括上海飞机制造有限公司、中国航发上海商用航空发动机制造有限公司、昆山双桥传感器测控技术有限公司、上海精密计量测试研究所和北京长城计量测试技术研究所，5 家单位，共收到反馈意见 10 条，采纳 8 条，部分采纳 2 条，并对标准征求意见稿进行修改完善，形成了标准送审稿及器编制说明、意见汇总处理表。

(6) 报批稿阶段

2021 年 3 月 30 日，上海市市场监督管理局组织召开地方标准评审会议，参加会议的有国家标准技术审评中心、上海机电工程研究所、上海精密计量测试研究所、上海工程技术大学、上海交通大学、复旦大学、前石科技有限公司等单位的代表和专家，形成审定意见，一致同意通过审定。

会后，编制组分析研究了专家意见，共计 12 条，采纳 12 条，并对标准及编制说明进行了修改和完善，形成了标准报批稿及其编制说明、意见汇总处理表。

三、采用国际标准和国外先进标准的情况

国外航空航天以军工领域为主，暂未检索到航空航天用压力传感器的相关标准。

四、确定标准主要内容的依据

(1) 标准化对象

本标准是方法标准，主要内容为动态压力测试的方法及相关要求、设备，针对的对象是航空航天用压力传感器。

(2) 标准化内容

本标准规定了航天航空用压力传感器动态测试的内容、测试原则、测试设备以及测试方法等。本标准适用于航空航天领域压力传感器及压力测量系统的基于正弦压力标准装置的频率响应测试以及基于激波管标准装置的阶跃响应测试。

本标准的术语和定义的依据主要来自于 JJF 1008-2008 和 JJG 1142-2017 中已有术语和定义，再根据本标准的需要进行了一些解释性的修改，并新增了一部分航空航天用动态压力传感器相关的定义，包括航空航天用压力传感器、动态测试、正弦压力标准装置等。

本标准的测试内容和要求的依据来源于 JJG 624-2005 中的动态压力传感器测试内容和要求，并在一般动态压力传感器的基础上，充分调研了压力传感器使用单位的需要，提出了航空航天领域独有的要求：明确了航空航天用压力传感器的测试内容及要求，包括静态准确度、幅值灵敏度、相移、上升时间、谐振频率、过冲量、建立时间等，并对首次测试和使用中测试进行区别；明确了航空航天用压力传感器测试原则，包括“压力传感器固有频率应不小于实际或设计使用工况环境的压力变化频率的 10 倍，若为压阻式压力传感器，则其固有频率应不小于实际或设计使用工况环境的压力变化频率的 5 倍。（注：实际或设计使用工况

环境的压力变化频率是指根据实际或设计工况得到的预估频率。)；压力传感器的正常工作压力量程应至少覆盖其实际使用工况环境的压力变化范围,其最大耐压值应至少为量程上限的 2 倍”等。

本标准的测试设备和方法的依据来源于 JJG 624-2005 和 JJG 1142-2017 中的相关要求,并根据研究过程中实验验证的结果,对用于测试的标准装置提出了包括不确定度、失真度、上升时间、持续时间,波形不平度等在内的技术要求。

本标准的测试步骤的依据来源于 JJG 624-2005 中的动态压力传感器测试步骤,并根据实际试验时的步骤,明确了其中有歧义的表述,增强了其可操作性,包括增设了低通滤波环节等。

本标准的计算方法和参数的依据来源于 JJG 624-2005 中所提及的参数,并针对整个计算流程,增加或修改了一部分计算参数和方法,包括幅值灵敏度相对误差、相移、阶跃响应幅度、上升时间、谐振频率、过冲量、建立时间、灵敏度等。

本标准的动态压力测试辅助设备技术要求的依据来源于压力传感器使用单位所提供的设备信息以及调研过程中得到的市场信息,包括了电荷放大器、电压及应变放大器、数据采集卡和其他附加设备。

本标准的附录的依据来源于 JJG 624-2005 中所给出的附录资料,并经过研究,在《正弦压力信号数据处理方法研究》论文中进行比较分析,最终给出了基频的确定方法,激波管阶跃压力数据处理方法,确定了使用三参数 DFT 法作为本标准计算幅值和相位的方法,最后根据本标准的动态测试流程给出了航空航天用压力传感器动态测试报告的格式样例。

本标准的附录 A 正弦压力信号的基频确定,其依据来源于正弦压力信号测试中实际数据处理时的试验步骤,明确了基于比较法的频率响应测试中的基频确认方法,确保动态测试结果数据处理的一致性。

本标准的附录 B 正弦信号三参数 DFT 法计算正弦波幅值和相位,其依据来源于 JJG 624-2005 中所给出的附录资料和《正弦压力信号数据处理方法研究》论文中的比较分析,明确了采用正弦信号三参数 DFT 法计算正弦波幅值和相位的数据处理方式,确保动态测试结果数据处理的一致性。

本标准的附录 C 激波管阶跃压力信号数据处理方法,其依据来源于 JJG 624-2005 中所给出的附录资料,明确了激波管阶跃压力信号数据处理方法,确保动态测试结果数据处理的一致性。

本标准的附录 D 航空航天用压力传感器动态测试报告(格式样例),其依据来源于标准正文中所提及的各个所需计算参数和需要列于报告中的测试环境、传感器信息等,确保最终测试报告的可读性和有效性。

## 五、主要试验或验证的分析报告

本标准中进行了正弦压力信号测试和阶跃压力信号测试来验证测试方法、步骤、参数和可操作性等。

### (1) 正弦压力信号测试

#### 试验设备:

本装置为径向活塞式正弦压力发生器,如图 1 所示:

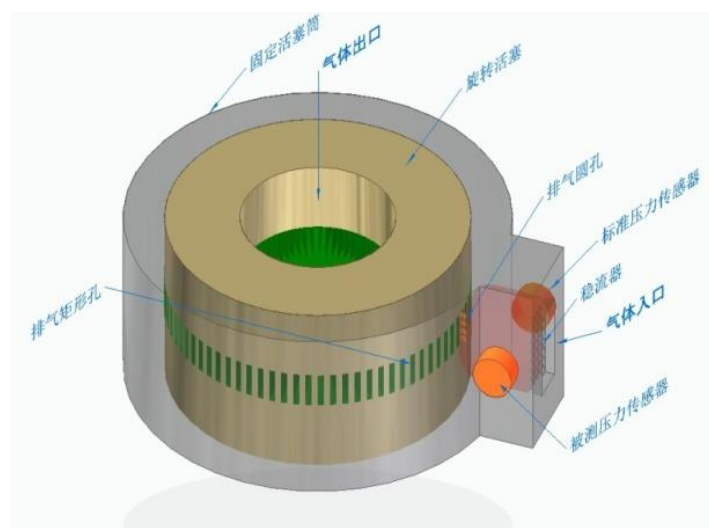


图 1 径向活塞式正弦压力发生器示意图

其工作原理为：将标准压力传感器和被测压力传感器分别安装在正弦压力腔的两侧（如图 1-1 右边橙色部分所示），正弦压力腔连同外部活塞筒属于固定不动的部件；电机控制旋转活塞的转动，并能调节不同的转速；从高压源流出的气体经过减压稳压后，通过图 1-1 中右侧的气体入口，并经过稳流滤波器后进入正弦压力腔内部，稳流滤波器的结构是密排的小通孔，作用是稳定气流，减少高次振荡谐波的产生；正弦压力腔的底部设有数个排气孔，且旋转活塞的径向曲面设有数个矩形的排气孔，这些孔在旋转活塞的中间融会贯通，气体最终由旋转活塞上方的出口流出；旋转活塞采用矩形孔，在正弦压力腔底部同时设置数个竖直排布的圆孔，随着活塞转动，正弦压力腔底部的孔与旋转活塞排气孔之间的排气面积按照正弦规律变化，这样就在右侧固定的正弦压力腔内产生一个正弦压力波。设计多个圆孔同时与矩形孔相切变化，是为了增加同一时间的排气量，增加正弦压力峰峰值的变化幅度，提高动静幅值比，是径向活塞式正弦压力发生器设计的关键。通过压力控制系统可以改变压力幅值，而压力的变化频率则由旋转活塞的半径、开孔数目和转速确定。

### 试验内容：

考察正弦压力发生器在不同频率点上的压力波形变化和失真度变化。

### 试验过程：

- 1、令试验装置分别在 200Hz、3000Hz、20000Hz 频率下运转。
- 2、采集获得压力传感器的信号波形图。
- 3、对时域信号做傅里叶变化，得到其频谱图。
- 4、计算时域信号的基频
- 5、计算压力信号的谐波失真度。

### 试验结果：

在正弦频率为 200Hz、3000Hz、20000Hz 时，其谐波失真度分别为 4.6%、7.8%、14.1%。

## (2) 阶跃压力信号测试

试验设备：

本试验装置为激波管式阶跃压力发生器，激波管拥有结构简单，使用方便可靠，压力幅值范围宽，频率范围宽和易于分析研究与数据处理等优点激波管装置实图如下图 2、3 所示：



图 2 激波管装置实图（正面）



图 3 激波管装置实图（侧面）

该装置通过安装不同厚度的膜片隔离高压室和低压室，高压室连通气源，不断缓慢增大压力，使得膜片自然破裂，即从膜片处向低压室发射出激波，激波在传播至激波管端面处反射，使得安装于激波管壁面上的压力传感器感受到阶跃

压力激励信号，产生阶跃响应，从而考察压力传感器的动态性能。

### 试验内容：

计算阶跃压力信号的上升时间和谐振频率。

### 试验过程：

- 1、安装激波管膜片，装置通电预热。
- 2、增大高压室压力，使得膜片自然破开。
- 3、记录压力传感器在阶跃压力下的时域响应波形。
- 4、根据二阶系统特点，计算上升时间。
- 5、对时域波形做傅里叶变换，得到频谱图。
- 6、找到频谱图峰值，即对应压力传感器谐振频率。
- 7、更换不同厚度膜片，再次试验。

### 试验结果：

以 0.2mm 膜片为例，其阶跃响应如下图 4 所示：

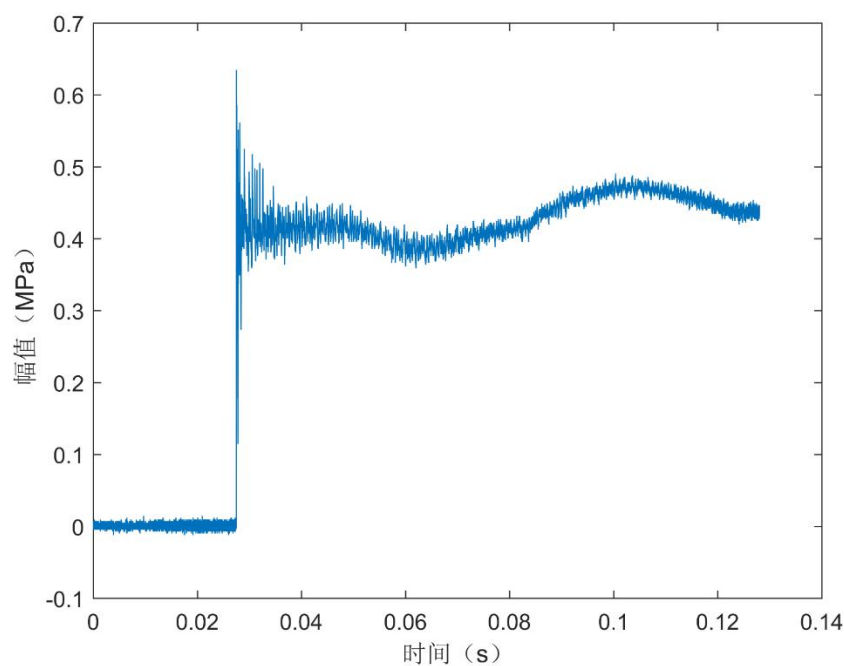


图 4 压力传感器阶跃响应（0.2mm 膜片）

其稳态值为 0.4273MPa，稳态值的 10%为 0.0427 MPa，稳态值的 90%为 0.3846 MPa，根据时域压力数据，得到上升时间为  $5 \times 10^{-6}$  秒。其频谱图如下图 5 所示：



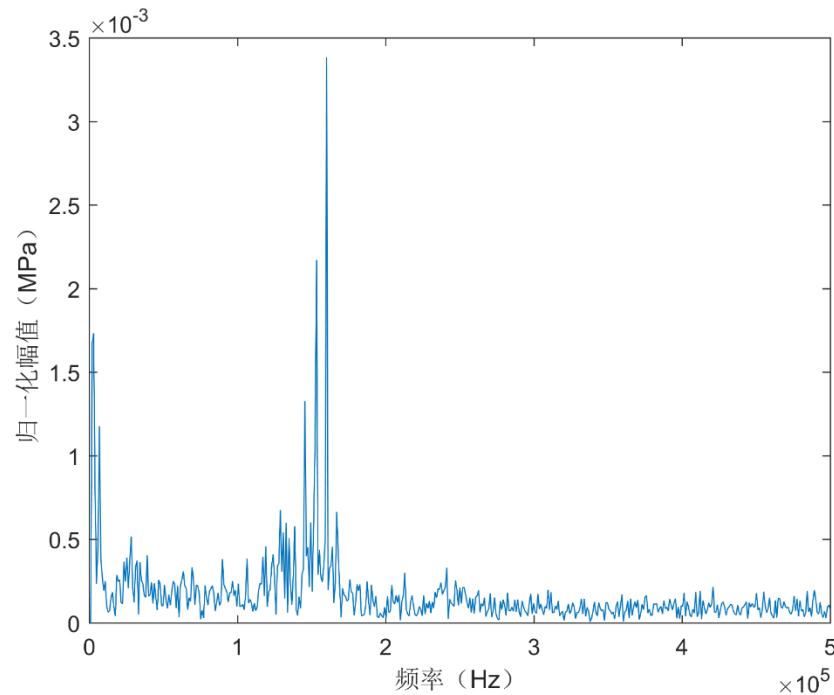


图 5 压力传感器阶跃响应频谱图（0.2mm 膜片）

可以看到，二阶传感器在受到阶跃响应的频谱图中的最高峰值即为压力传感器的固有频率，由图中峰值数据可得，该传感器的谐振频率  $f$  为 160.2kHz。

## 六、重大分歧意见的解决过程和结果

本地方标准无重大分歧意见。

## 七、与现行法律、法规、标准的关系

目前，国内暂无针对航空航天用压力传感器动态测试的相关标准。在调研阶段，已经在表 2 中列出了包括 JJG 624-2005《动态压力传感器国家检定规程》，JJG 1142-2017《动态压力标准器国家检定规程》和 GB/T 26807-2011《硅压阻式动态压力传感器》在内的不足之处。

《JJG 624-2005》以及《JJG 1142-2017》的第一起草单位“北京长城计量测试技术研究所”，作为国内动态压力标准的权威机构，已在本标准的征求意见稿公示期间，对本标准提出部分建议和修改意见，且已妥善处理。除此以外，针对国内常规动态压力传感器的生产制造，现仅有一个推荐性国标可以参考：GB/T 26807-2011 硅压阻式动态压力传感器，其规定了硅压阻式动态压力传感器的分类与命名、基本参数、要求、检验方法、检验规则及标志、包装、运输和贮存，同时适用于硅压阻式动态压力传感器的生产、使用、验收等。其第一起草单位“昆山双桥传感器测控技术有限公司”同时是本地方标准的参与起草单位，涉及的部分相关内容并无冲突。因此，本标准针对航空航天用压力传感器的特殊性，对其动态测试内容、测试原则、测试设备以及测试方法明确了进一步的要求，能够和现有标准、规程相协调。

本标准在制定过程中参考了许多相关领域内的文件，其中最重要的就是 JJG 624-2005《动态压力传感器》，现将 JJG 624-2005《动态压力传感器》和本标准在各个项目进行对比，以展示本标准对其的继承和改进。如下表 3 所示：

表 3 项目对比表

对比项目	JJG 624-2005《动态压力传感器》	本地方标准
术语和定义	仅列出了对于一般压力传感器动态检定	综合了 JJF 1008-2008、JJG 624-2005、

	所需的术语和定义。	JJG 860、JJG 1142-2017多项规程的说法，并针对航空航天背景和实际操作流程进行了修改和明确。
测试要求	仅要求压力传感器结构坚固外表面完好，铭牌等信息清晰可见，有高低压标志。	针对航空航天实际使用环境，提出了固有频率和压力量程范围等进一步要求。
正弦压力标准装置技术要求	在 200Hz 以下、200Hz 到 1000Hz、1000Hz 以上 3 个频率段上，提出了幅值灵敏度测量不确定度和相移测量不确定度要求。	进一步增设了 1000 到 5000 和 5000 到 20000 的频率段，并额外提出了正弦波失真度要求
正弦压力测试频率点的选取	仅对每个频率点的测量次数做出要求。	对不同频率范围内的测试点和总测试点数分别提出了要求。
正弦压力采样频率的选取	未提出相关要求。	根据正弦压力的特点和实验所得数据的规律，提出了采样频率的要求。
正弦压力测试步骤	给出了一套流程，但需要使用附录处未明确输入输出量，可操作性较差。	在需要利用附录处增加了明确先后顺序的表述，并根据实际实验中的情况，优化了测试步骤，提出了低通滤波的要求。
幅值灵敏度相对误差	给出了一套计算方法，但是有未明确的地方，缺乏可操作性。	在 JJG 624-2005 所提出的方法基础上，进一步细化中间过程，明确并修改了原来有歧义的表述和公式，增强了可操作性。
阶跃压力采样频率的选取	未提出相关要求。	根据阶跃压力的特点和实验所得数据的规律，提出了采样频率的要求。
阶跃压力测试结果的计算方法	给出了一套计算方法，但是有许多未提及、未明确或有歧义的地方，难以直接应用。	在 JJG 624-2005 所提出的方法基础上，增加了进一步细化中间过程，新增了一套计算阶跃响应幅值的方法，为后续计算奠定了基础，增强了可操作性。
动态压力测试的辅助设备	给出了确定的最低标准，但由于制定时间较久，已不符合现有辅助设备的水平。	调研了现在航空航天及相关产业中所用的压力传感器和相应辅助设备，提出了符合现有使用环境的相应参数。
附录 A 正弦压力信号的基频确定	未提出相关要求。	根据实际实验中出现的基频偏移情况，并考虑整体流程，利用 DFT 法确定基频，帮助后续正弦信号处理。
附录 B 正弦信号三参数 DFT 法计算正弦波幅值和相位	仅笼统地提出了四种方法，未提及具体的性能优劣和适用情况。	根据模拟实验的结果，总结出了各种方法的适用条件，并最终决定以 DFT 法作为本标准的计算方法。
附录 C 激波管阶跃压力信号数据处理方法	缺少直观的激波管压力波形的直观图像，仅列出公式供测试人员使用。	添加了激波管内部各阶段的压力和温度变化情况，可直观理解激波管的运作过程，增强了可读性。
附录 D 航空航天用压力传感器动态测试报告（格式样例）	给出了正弦压力和阶跃压力的检定记录样张，仅记录数据。	根据正文中动态测试的流程，给出了测试报告的格式样例，并新增了时域图和频域图位置于报告中，增强了动态测试报告的可读性。

## 八、实施标准的要求和措施建议

本标准适用于上海地区的航空航天用压力传感器；

本标准的全部技术条款在其正式颁布实施后，推荐过渡期一年后执行，以预留时间给现

用航空航天用压力传感器，按照本标准完成测试；

建议定期跟踪本市航空航天领域的技术发展与测试需求，及时修订本标准，以适应产业发展。

#### 九、修改或废止现行专项标准的建议

无。

#### 十、标准发行范围和数量的建议

建议本标准向上海飞机制造有限公司、中国航发上海商用航空发动机制造有限公司、昆山双桥传感器测控技术有限公司、上海精密计量测试研究所等航空航天领域内动态压力传感器的使用单位和检测单位发行。

#### 十一、其他应予说明的事项

无。