

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 2059—2023

膜盒式高度表、空速表、 马赫数表校准规范

Calibration Specification for Capsule Altitude Gauges,
Airspeed Gauges and Mach Gauges

2023-06-30 发布

2023-12-30 实施

国家市场监督管理总局 发布

膜盒式高度表、空速表、

马赫数表校准规范

Calibration Specification

for Capsule Altitude Gauges,

Airspeed Gauges and Mach Gauges

JJF 2059—2023

归口单位：全国压力计量技术委员会

主要起草单位：北京长城计量测试技术研究所

参加起草单位：中航工业太原航空仪表有限公司

中航贵州飞机有限责任公司

92493 部队计量测试中心

本规范委托全国压力计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

李鑫武（北京长城计量测试技术研究所）

盛晓岩（北京长城计量测试技术研究所）

李 群（北京长城计量测试技术研究所）

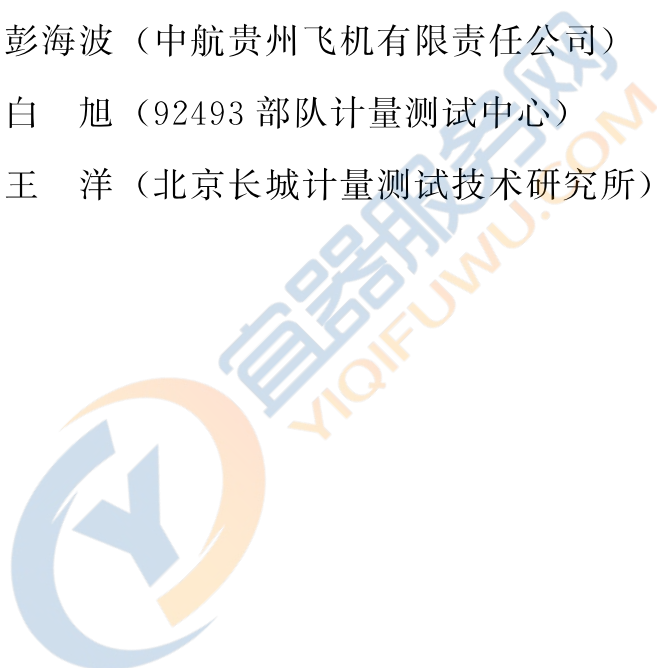
参加起草人：

张卫红（中航工业太原航空仪表有限公司）

彭海波（中航贵州飞机有限责任公司）

白 旭（92493 部队计量测试中心）

王 洋（北京长城计量测试技术研究所）



目 录

引言	(II)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语和计量单位	(1)
3.1 术语	(1)
3.2 计量单位	(1)
4 概述	(2)
5 计量特性	(2)
5.1 零位	(2)
5.2 气密性	(2)
5.3 示值误差	(3)
5.4 回程误差	(4)
5.5 轻敲位移	(4)
5.6 位置误差	(4)
6 校准条件	(5)
6.1 环境条件	(5)
6.2 校准用标准装置	(5)
7 校准项目与校准方法	(5)
7.1 校准前准备	(5)
7.2 零位检查	(5)
7.3 气密性检查	(5)
7.4 示值误差校准	(6)
7.5 回程误差校准	(7)
7.6 轻敲位移校准	(7)
7.7 位置误差校准	(7)
8 校准结果	(8)
9 复校时间间隔	(8)
附录 A 膜盒式高度表、空速表、马赫数表校准记录格式	(9)
附录 B 膜盒式高度表、空速表、马赫数表校准证书内页格式	(10)
附录 C 膜盒式高度表校准不确定度评定	(11)
附录 D 膜盒式空速表校准不确定度评定	(14)
附录 E 膜盒式马赫数表校准不确定度评定	(16)

引 言

JJF 1071《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001《通用计量术语及定义》、JJF 1008《压力计量名词术语及定义》、JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本规范制定工作的基础性系列规范。

本规范给出了膜盒式高度表、空速表、马赫数表计量特性的具体校准条件、校准项目和校准方法。

本规范主要参考 JJG 52—2013《弹性元件式一般压力表、压力真空表和真空表检定规程》、HB 6127—1986《飞行大气参数》、HB 6552—1991《民用航空器气压式高度表最低性能要求》、HB 6551—1991《民用航空器空速表最低性能要求》、HB 7826—2008《空速表通用规范》、HB 7828—2008《马赫数表通用规范》、BS 2G 115—1956《飞行器用灵敏高度表规范》(Specification for sensitive altimeters for aircraft)、BS G 190—1964《航空用座舱高度表规范》(Specification for cabin altimeters for aircraft) 等文件相关内容进行制定。

本规范为首次发布。

膜盒式高度表、空速表、 马赫数表校准规范

1 范围

本校准规范适用于航空用膜盒式高度表、空速表、马赫数表的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJG 52—2013 弹性元件式一般压力表、压力真空表和真空表检定规程

JJF 1008—2008 压力计量名词术语及定义

HB 6127—1986 飞行大气参数

HB 6551—1991 民用航空器空速表最低性能要求

HB 6552—1991 民用航空器气压式高度表最低性能要求

HB 7826—2008 空速表通用规范

HB 7828—2008 马赫数表通用规范

BS 2G 115—1956 飞行器用灵敏高度表规范 (Specification for sensitive altimeters for aircraft)

BS G 190—1964 航空用座舱高度表规范 (Specification for cabin altimeters for aircraft)

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 术语和计量单位

3.1 术语

3.1.1 膜盒式高度表 capsule altitude gauges

以膜盒为敏感元件测量大气静压，并利用高度与大气静压之间的变化规律将所测静压转换为高度的仪表。

3.1.2 膜盒式空速表 capsule airspeed gauges

以膜盒为敏感元件测量大气静压和全压，并利用空速与大气静压和全压之间的变化规律将所测静压和全压转换为空速的仪表。

3.1.3 膜盒式马赫数表 capsule Mach gauges

以膜盒为敏感元件测量大气静压和全压，并利用马赫数与大气静压和全压之间的变化规律将所测静压和全压转换为马赫数的仪表。

3.2 计量单位

高度表采用的计量单位为米 (m) 或千米 (km)。

空速表采用的计量单位为千米每小时 (km/h)。

马赫数为一个比值，是无量纲的数。

4 概述

高度表适用于测量飞机飞行的高度，空速表用于测量和指示飞机飞行的指示空速，马赫数表用于测量和指示飞机飞行的马赫数，上述 3 种仪表主要用于飞机的飞行参数测量。

膜盒式高度表的工作原理是利用真空膜盒随静压变化产生变形，膜盒中心位移经传动机构放大，带动指针沿刻度面移动，指示出与气压相应的高度值。

膜盒式空速表的工作原理是利用压差膜盒随动压变化产生变形，膜盒中心位移经传动机构放大，带动指针沿刻度面移动，指示出当前指示空速值。

膜盒式马赫数表的工作原理是利用真空膜盒随静压变化、压差膜盒随全压变化产生变形，膜盒中心位移经传动机构放大，带动指针沿刻度面移动，指示出当前马赫数值。

5 计量特性

5.1 零位

5.1.1 高度表零位

当表壳内绝对压力为 101.325 kPa 时，把高度指针调整到“0”，此时气压刻度盘的示数与“101.325”之差一般在 ± 0.2 kPa 范围内。当气压刻度盘调到“101.325”标记处时，高度指针与高度刻度盘“0”之差一般在 ± 10 m 范围内。

5.1.2 空速表零位

在未施加任何压力的状态下，没有零位标记的，指针一般位于刻度盘最小空速值和最大空速值之间空白区域内；有零位标记的，指针一般指在零位标记处。

5.1.3 马赫数表零位

在未施加任何压力的状态下，没有零位标记的，指针一般位于刻度盘最小马赫数值和最大马赫数值之间空白区域内；有零位标记的，指针一般指在零位标记处。

5.2 气密性

5.2.1 高度表气密性

高度表指示 5 km 的高度时，指针在 1 min 内下降值一般不超过 50 m。

5.2.2 空速表气密性

a) 静压气密性

当静压口的压力相当于满量程空速时，指针在 1 min 内下降值一般不超过 40 km/h。

b) 动压气密性

在零高度上，当动压口的压力相当于满量程空速时，指针在 1 min 内一般不应有变化。

5.2.3 马赫数表气密性

a) 静压气密性

当静压口的压力相当于 1 马赫数时，指针在 1 min 内下降值一般不超过 0.01 马

赫数。

b) 动压气密性

在零高度上，当动压口的压力相当于满量程马赫数时，指针在 1 min 内一般不应有变化。

5.3 示值误差

5.3.1 高度表示值误差

高度表的示值误差一般不超过表 1 所规定的最大允许误差。

表 1 高度表最大允许误差

高度/km	最大允许误差/m		
	测量上限 11 km	测量上限 15 km	测量上限 28 km
—0.3	±15	±20	±20
0	±15	±20	±20
0.5	±20	±30	±30
1	±25	±40	±40
1.5	±30	±45	——
2	±35	±50	±50
3	±40	±60	——
4	±45	±70	±70
5	±60	±80	——
6	±65	±90	±90
7	±70	——	——
8	±90	±110	±130
9	±100	——	——
10	±110	±130	±150
11	±130	——	——
12	——	±150	±180
14	——	±180	±200
15	——	±200	——
16	——	——	±250
18	——	——	±300
20	——	——	±350
24	——	——	±400
28	——	——	±600

5.3.2 空速表示值误差

空速表的示值误差一般不超过表 2 所规定的最大允许误差。

表 2 空速表最大允许误差

空速/(km/h)	最大允许误差/(km/h)	
	测量上限 1 200 km/h	测量上限 1 600 km/h
150	±10	——
200	±10	±15
300	±10	±15
400	±10	±20
600	±15	±20
800	±15	±20
1 000	±15	±25
1 200	±20	±25
1 400	——	±25
1 600	——	±30

5.3.3 马赫数表示值误差

马赫数表的示值误差一般不超过表 3 所规定的最大允许误差。

表 3 马赫数表最大允许误差

高度/km	马赫数范围	最大允许误差
0	0.5~1.1	±0.05
4	0.6~1.6	±0.08
8	0.6~2.0	±0.08
12	0.6~2.4	±0.08
16	0.8~2.4	±0.10
20	1.1~2.4	±0.10
25	1.5~2.5	±0.17

5.4 回程误差

高度表、空速表、马赫数表的回程误差一般不大于各点最大允许误差的绝对值。

5.5 轻敲位移

轻敲表壳前与轻敲表壳后，高度表的示值变动量一般不大于各点最大允许误差绝对值的 1/2。空速表、马赫数表的示值变动量用力测一般不超过刻度盘弧长 2 mm。

5.6 位置误差

高度表、空速表、马赫数表由正常位置向指定方向转动，示值与正常位置示值之差

一般不大于各自最大允许误差的绝对值。

注：以上指标不用于合格性判别，仅供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

- a) 环境温度： $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ ；
- b) 相对湿度：不大于 85%；
- c) 环境压力：大气压力；
- d) 其他：周围无明显的机械振动和外磁场（地磁场除外）。

6.2 校准用标准装置

6.2.1 可供选用的标准装置

- a) 大气数据测试系统；
- b) 自动标准压力发生器（带有大气数据换算功能，0.05 级及以上，年稳定性合格的）。

标准器最大允许误差绝对值一般不大于被校准仪表最大允许误差绝对值的 1/3。

6.2.2 辅助设备

- a) 压力源及真空源；
- b) 三通管及医用胶管；
- c) 秒表。

7 校准项目与校准方法

7.1 校准前准备

a) 用目力观察被校表外观，一般有以下要求：被校准仪表装配牢固、无松动现象，可见部分无明显的瑕疵、划伤，连接件无明显的毛刺和损伤，表面玻璃无色透明，无妨碍读数的缺陷，分度盘平整光洁，数字及各标志清晰可辨。一般有如下标志：产品名称、计量单位和数字、出厂编号等。被校准空速表、马赫数表表壳背面靠近接管嘴的地方有“静压”和“动压”标记。

b) 被校准仪表一般要在校准条件下放置 2 h 后进行校准。

7.2 零位检查

将被校仪表内腔与大气相通，并按正常工作位置放置，用目力观察，零位要求符合 5.1 的要求。

7.3 气密性检查

7.3.1 高度表气密性检查

将标准压力设置为 5 km 高度对应的压力值，待高度表指示至 5 km 刻度上时，切断压力源，稳定 5 min 后，观察 1 min 内高度表示值的变化。

7.3.2 空速表气密性检查

- a) 静压气密性检查

动压口通大气，静压口连接标准器，将标准压力设置为满量程空速值对应的压力

值，待空速表指示至满量程时，切断压力源，稳定 5 min 后，观察 1 min 内空速表示值的变化。

b) 动压气密性检查

静压口通大气，动压口连接标准器，向空速表动压口施加相当于满量程空速的压力值，待空速表指示至满量程时，切断压力源，稳定 5 min 后，观察 1 min 内空速表示值的变化。

7.3.3 马赫数表气密性检查

a) 静压气密性检查

动压口通大气，静压口连接标准器，将标准压力设置为 1 马赫数对应的压力值，待马赫数表指示至 1 马赫数刻度上时，切断压力源，稳定 5 min 后，观察 1 min 内马赫数表示值的变化。

b) 动压气密性检查

静压口通大气，动压口连接标准器，向马赫数表动压口施加相当于满量程马赫数的压力值，待马赫数表指示至满量程时，切断压力源，稳定 5 min 后，观察 1 min 内马赫数表示值的变化。

7.4 示值误差校准

示值误差校准点尽量按标有数字的刻度线选取，并尽可能在测量范围内均匀分布。校准过程中，标准器应缓慢平稳地升压或降压至目标校准点，避免出现超调或回调现象。读取被校表示值时，一般按照最小分度值的 $1/2$ 估读。

7.4.1 高度表示值误差校准

高度表示值误差校准点一般不少于 8 个点（包括测量范围上、下限点），可参考表 1 所列的校准点对高度表进行校准，进行 1 个校准循环。

高度表示值误差校准时，从第一个高度值开始均匀缓慢控压至该高度值对应的压力（即标准高度值），然后读取被校高度表示值，接着用手指轻敲一下高度表外壳，再读取被校高度表的示值并进行记录，轻敲后被校高度表示值与标准高度值之差即为该校准点的示值误差；如此依次在所选取的校准点进行校准直至测量上限为正行程校准，再依次逐点进行反行程校准，直至测量范围下限。

7.4.2 空速表示值误差校准

空速示值误差校准点一般不少于 6 个点（包括测量范围上、下限点），可参考表 2 所列的校准点进行，进行 1 个校准循环。

空速表示值误差校准时，静压口通大气，向动压口控压至第一个空速值对应的压力（即标准空速值），然后读取被校空速表示值，接着用手指轻敲一下空速表外壳，再读取被校空速表的示值并进行记录，轻敲后被校空速表示值与标准空速值之差即为该校准点的示值误差；如此依次在所选取的校准点进行校准，直至测量上限为正行程校准，再依次逐点进行反行程校准。

7.4.3 马赫数表示值误差校准

马赫数表示值误差校准点在零高度时一般不少于 6 个点（包括测量范围上、下限点），其他高度一般不少于 3 个点，可参考表 4 所列的校准点对马赫数表进行校准，每

个高度进行 1 个校准循环。

马赫数表示值误差校准时，将被校马赫表静压口与真空源连接，动压口与标准器连接，向静压口施加第一个校准高度值对应的压力，待压力稳定后，向动压口控压至第一个马赫数对应的压力，然后读取被校马赫数表示值，接着用手指轻敲一下马赫数表外壳，再读取被校马赫数表的示值并进行记录，轻敲后被校表示值与标准马赫数之差即为该校准点的示值误差；如此依次在所选取的校准点进行校准，直至测量上限为正行程校准，再依次逐点进行反行程校准。之后再进行下一个高度值的校准，直到所有高度校准完毕。

表 4 马赫数表校准点

高度/km						
0	4	8	12	16	20	25
马赫数校准点						
0.3	——	——	0.659	0.869	1.123	1.556
0.4	——	0.653	0.855	1.106	1.430	2.022
0.5	0.630	0.804	1.037	1.338	1.751	2.511
0.6	0.750	0.948	1.212	1.580	2.088	
0.7	0.869	1.085	1.395	1.832	2.444	
0.9	1.100	1.378	1.790	2.385		
1.1	1.346	1.694	2.236			
1.2	1.474	1.869	2.477			
1.3	1.603	2.044				

7.5 回程误差校准

回程误差的校准是在示值误差校准时进行，同一校准点正行程、反行程轻敲表壳后被校仪表示值之差的绝对值即为回程误差。

7.6 轻敲位移校准

轻敲位移校准是在示值误差校准时进行，同一校准点轻敲仪表外壳前与轻敲仪表外壳后指针位移变化所引起的示值变动量即为轻敲位移。

7.7 位置误差校准

被校表由正常工作位置绕纵轴线转动 90° 、 180° 、 270° 及刻度面向上 4 种位置的示值与正常位置的示值之差为位置误差。

高度表以当前大气压作为试验点。

空速表在当前大气压条件下，以相当于空速表满量程 $1/2$ 的压力值作为试验点。

马赫数表在当前大气压条件下，以相当于马赫数表满量程 $1/2$ 的压力值作为试验点。

8 校准结果

校准结果应在校准证书或校准报告上反映。校准证书或报告应至少包括如下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- d) 证书或报告的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 送校单位的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期，若与校准结果的有效性及应用有关时，应说明被校对象的接收日期；
- h) 如果与校准结果的有效性及应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
- i) 对校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- k) 校准环境的描述；
- l) 校准结果及其不确定度的说明；
- m) 对校准规范的偏离的说明；
- n) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识，以及签发日期；
- o) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书或报告的声明。

经校准的膜盒式高度表、空速表、马赫数表，发给校准证书或校准报告，加盖校准印章。

9 复校时间间隔

由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸因素所决定的，因此送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔，一般建议为1年。

附录 A

膜盒式高度表、空速表、马赫数表校准记录格式

证书编号：

校准日期： 年 月 日

送校单位										
仪器信息	被校表				标准器					
仪表名称										
制造厂家										
仪器编号										
测量范围										
依据文件					准确度等级					
					有效期					
零位检查					环境温度		℃	相对湿度		%
气密性检查					校准人		复核人			
位置误差	正常	90°		180°		270°		向上		
标准器示值 *	被校表轻敲后 的示值 ()		轻敲位移 ()		示值误差 ()	回程误差 ()	扩展不确定度 ($k=2$)			
	正行程	反行程	正行程	反行程						
校准结果										

注：被校表为高度表时，“*”位置填写“高度值（）”；被校表为空速表时，“*”位置填写“空速值（）”；被校表为马赫数表时，“*”位置填写“马赫数值”，并注明校准高度。

附录 B

膜盒式高度表、空速表、马赫数表校准证书内页格式

环境温度：℃

相对湿度：%

证书编号 ××××××—××××

校准结果

一、零位：

二、气密性：

三、回程误差：

四、轻敲位移：

五、位置误差：

六、示值误差及扩展不确定度：

标准器示值 ()	被校表示值 ()		扩展不确定度 ($k = 2$)
	正行程	反行程	

附录 C

膜盒式高度表校准不确定度评定

C.1 评定依据

JJF 1059.1—2012 测量不确定度评定与表示。

C.2 测量方法

由上一级大气数据测试仪通过直接比较法对下一级膜盒式高度表进行检定。通过对膜盒式高度表的满量程范围内高度点进行 6 次测量，得出结果，进行各不确定度分量的计算，并得出最终的不确定度。

C.3 已知条件

C.3.1 被校膜盒式高度表

测量范围：(0~15 000) m。

C.3.2 标准器

标准名称：大气数据测试仪；

高度测量范围：(-914~24 384) m；

准确度等级：0.01 级。

C.3.3 测量的环境

环境温度：19.8 ℃；

环境湿度：51%RH。

C.4 测量模型

膜盒式高度表示值误差的测量模型为：

$$\Delta h = h - h_0$$

式中：

Δh ——膜盒式高度表的示值误差，m；

h ——高度表的示值，m；

h_0 ——标准高度值，m。

不确定度来源如下：

- 1) 测量重复性引入的不确定度分量；
- 2) 被校高度表估读引入的不确定度分量；
- 3) 上级标准引入的不确定度分量。

C.5 不确定度分量的评定

C.5.1 测量重复性引入的不确定度分量 u_1

对膜盒式高度表进行 6 次测量，对不同点均有 6 个读数，取平均值作为测量结果，则标准不确定度用实验标准偏差来评估，以 1 000 m、5 000 m 及 15 000 m 高度点为例，校准数据见表 C.1。

表 C.1 高度表示值测量

标准高度值 m	高度表示值/m					
	第一次校准	第二次校准	第三次校准	第四次校准	第五次校准	第六次校准
1 000	995	995	995	990	995	990
5 000	4 985	4 990	4 985	4 985	4 985	4 990
15 000	14 980	14 985	14 985	14 980	14 980	14 980

由贝塞尔公式计算出单个测量值的实验标准偏差 $s(h)$ ，即测量重复性，则重复性导致的不确定度分量 u_1 为：

$$u_1 = s(h) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2}{n-1}}$$

各测量点的 u_1 见表 C.2。

表 C.2 测量重复性引入的标准不确定度分量 u_1

m

测量点	各测量值的算术平均值 $\bar{h}$	u_1
1 000	993.3	2.6
5 000	4 986.7	2.6
15 000	14 981.7	2.6

C.5.2 被校高度表估读引入的不确定度分量 u_2

被校高度表的分度值 R 为 10 m，估读误差为分度值的 1/2，属于均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，则高度表示值估读误差所引入的标准不确定度 u_2 为：

$$u_2 = \frac{R}{2\sqrt{3}} = \frac{10 \text{ m}}{2\sqrt{3}} = 2.9 \text{ m}$$

C.5.3 上级标准引入的不确定度分量 u_3

本次校准使用的大气数据测试仪型号为 ADTS405，其准确度等级为 0.01 级，参照大气数据测试仪校准规范，可得不同高度点标准器最大允许误差如表 C.3 所示，按均匀分布，取 $k=\sqrt{3}$ ，因此，大气数据测试仪引入的不确定度 u_3 如表 C.3。

表 C.3 上级标准引入的标准不确定度分量 u_3

测量点/m	上级标准最大允许误差/m	上级标准引起的标准不确定度分量 u_3 /m
1 000	± 1.1	0.6
5 000	± 1.7	1.0
15 000	± 7.3	4.2

C.6 合成标准不确定度

由于各不确定度分量互不相关，合成标准不确定度 u_c 为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}$$

各测量点的 u_c 见表 C.4。

表 C.4 合成标准不确定度汇总

m

测量点	u_1	u_2	u_3	u_c
1 000	2.6	2.9	0.6	4.0
5 000	2.6	2.9	1.0	4.0
15 000	2.6	2.9	4.2	5.7

C.7 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度 U 为：

$$1\ 000\ \text{m 点：} U=k \times u_c=8\ \text{m}$$

$$5\ 000\ \text{m 点：} U=k \times u_c=8\ \text{m}$$

$$15\ 000\ \text{m 点：} U=k \times u_c=12\ \text{m}$$



附录 D

膜盒式空速表校准不确定度评定

D.1 评定依据

JJF 1059.1—2012 测量不确定度评定与表示。

D.2 测量方法

由上一级大气数据测试仪通过直接比较法对下一级膜盒式空速表进行检定。通过对膜盒式空速表的满量程范围内各校准点进行 6 次测量，得出结果，进行各不确定度分量的计算，并得出最终的不确定度。

D.3 已知条件

D.3.1 被校膜盒式空速表

测量范围：(0~1 600) km/h。

D.3.2 标准器

标准名称：大气数据测试仪；

空速测量范围：(18~1 852) km/h；

准确度等级：0.01 级。

D.3.3 测量的环境

环境温度：19.8 ℃；

环境湿度：51%RH。

D.4 测量模型

膜盒式空速表示值误差的测量模型为：

$$\Delta v = v - v_0$$

式中：

Δv ——膜盒式空速表的示值误差，km/h；

v ——空速表的示值，km/h；

v_0 ——标准空速值，km/h。

不确定度来源如下：

- 1) 测量重复性引入的不确定度分量；
- 2) 被校空速表估读引入的不确定度分量；
- 3) 上级标准引入的不确定度分量。

D.5 不确定度分量的评定

D.5.1 测量重复性引入的不确定度分量 u_1

对膜盒式空速表进行 6 次测量，对不同点均有 6 个读数，取平均值作为测量结果，则标准不确定度用实验标准偏差来评估，以 800 km/h 和 1 600 km/h 空速点为例，校准数据见表 D.1。

表 D.1 空速表示值测量

标准空速值 km/h	空速表示值/(km/h)					
	第一次校准	第二次校准	第三次校准	第四次校准	第五次校准	第六次校准
800	800	800	800	800	800	800
1 600	1 595	1 595	1 595	1 600	1 595	1 595

由贝塞尔公式计算出单个测量值的实验标准偏差 $s(v)$ ，即测量重复性，则重复性引入的不确定度分量 u_1 为：

$$u_1 = s(v) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}{(n-1)}}$$

$$800 \text{ km/h 点: } u_1 = 0 \text{ km/h}$$

$$1\,600 \text{ km/h 点: } u_1 = 2.0 \text{ km/h}$$

D.5.2 被校空速表估读引入的不确定度分量 u_2

被校空速表的分度值 R 为 10 km/h，估读误差为分度值的 1/2，属于均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则空速表示值估读误差所引入的标准不确定度 u_2 为：

$$u_2 = \frac{R}{2\sqrt{3}} = \frac{10 \text{ km/h}}{2\sqrt{3}} = 2.9 \text{ km/h}$$

D.5.3 上级标准引入的不确定度分量 u_3

本次校准使用的大气数据测试系统型号为 ADTS405，在 800 km/h 空速时的误差为： $\pm 0.3 \text{ km/h}$ ；在 1 600 km/h 空速时的误差为： $\pm 0.2 \text{ km/h}$ 。按均匀分布，取 $k = \sqrt{3}$ ，因此大气数据测试系统引入的不确定度 u_3 为：

$$800 \text{ km/h 点: } u_3 = \frac{0.3 \text{ km/h}}{\sqrt{3}} = 0.2 \text{ km/h}$$

$$1\,600 \text{ km/h 点: } u_3 = \frac{0.2 \text{ km/h}}{\sqrt{3}} = 0.1 \text{ km/h}$$

D.6 合成标准不确定度

由于各不确定度分量互不相关，合成标准不确定度 u_c 为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}$$

$$800 \text{ km/h 点: } u_c = 2.9 \text{ km/h}$$

$$1\,600 \text{ km/h 点: } u_c = 3.5 \text{ km/h}$$

D.7 扩展不确定度

取包含因子 $k = 2$ ，则扩展不确定度 U 为：

$$800 \text{ km/h 点: } U = k \times u_c = 6 \text{ km/h}$$

$$1\,600 \text{ km/h 点: } U = k \times u_c = 7 \text{ km/h}$$

附录 E

膜盒式马赫数表校准不确定度评定

E.1 评定依据

JJF 1059.1—2012 测量不确定度评定与表示。

E.2 测量方法

由上一级大气数据测试仪通过直接比较法对下一级膜盒式马赫数表进行检定。通过对膜盒式马赫数表的满量程范围内各校准点进行 6 次测量，得出结果，进行各不确定度分量的计算，并得出最终的不确定度。

E.3 已知条件

E.3.1 被校膜盒式马赫数表

测量范围：0.3 马赫数～2.5 马赫数。

E.3.2 标准器

标准名称：大气数据测试仪；

马赫数测量范围：0 马赫数～10 马赫数；

准确度等级：0.01 级。

E.3.3 测量的环境

环境温度：19.8 ℃；

环境湿度：51%RH。

E.4 测量模型

膜盒式马赫数表示值误差的测量模型为：

$$\Delta M = M - M_0$$

式中：

ΔM ——膜盒式马赫数表的示值误差；

M ——马赫数表的示值；

M_0 ——标准马赫数值。

不确定度来源如下：

- 1) 测量重复性引入的不确定度分量；
- 2) 被校马赫数表估读引入的不确定度分量；
- 3) 上级标准引入的不确定度分量。

E.5 不确定度分量的评定

E.5.1 测量重复性引入的不确定度分量 u_1

以 4 km 高度为例，对膜盒式马赫数表进行 6 次测量，对不同点均有 6 个读数，取平均值作为测量结果，则标准不确定度用实验标准偏差来评估，校准数据见表 E.1。

表 E.1 马赫数表示值测量

标准马赫数值	马赫数表示值					
	第一次校准	第二次校准	第三次校准	第四次校准	第五次校准	第六次校准
0.630	0.610	0.620	0.610	0.620	0.620	0.610
1.100	1.100	1.090	1.100	1.100	1.090	1.100
1.603	1.580	1.590	1.580	1.580	1.580	1.580

由贝塞尔公式计算出单个测量值的实验标准偏差 $s(M)$ ，即测量重复性，则重复性引入的不确定度分量 u_1 为：

$$u_1 = s(M) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}{n-1}}$$

各测量点的 u_1 见表 E.2。

表 E.2 测量重复性引起的标准不确定度分量 u_1

马赫数测量点	各测量值的算术平均值 $\bar{M}$	u_1
0.630	0.615 0	0.005 5
1.100	1.096 7	0.005 2
1.603	1.581 7	0.004 1

E.5.2 被校马赫数表估读引入的不确定度分量 u_2

被校马赫数表的分度值 R 为 0.02，估读误差为分度值的 1/2，属于均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，则马赫数表示值估读误差所引入的标准不确定度 u_2 为：

$$u_2 = \frac{R}{2\sqrt{3}} = \frac{0.02}{2\sqrt{3}} = 0.005 8$$

E.5.3 上级标准引入的不确定度分量 u_3

本次校准使用的大气数据测试仪型号为 ADTS405，其准确度等级为 0.01 级，参照大气数据测试仪校准规范，可得在 4 km 高度不同马赫数点标准器最大允许误差如表 E.3 所示，按均匀分布，取 $k=\sqrt{3}$ ，因此大气数据测试仪引入的不确定度 u_3 如表 E.3。

表 E.3 4 km 高度上级标准引起的标准不确定度分量 u_3

马赫数测量点	上级标准最大允许误差	上级标准引起的标准不确定度分量 u_3
0.630	± 0.002	0.001 2
1.100	± 0.001	0.000 6
1.603	± 0.001	0.000 6

E.6 合成标准不确定度

由于各不确定度分量互不相关，合成标准不确定度 u_c 为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}$$

各测量点的 u_c 见表 E. 4。

表 E. 4 合成标准不确定度汇总

马赫数测量点	u_1	u_2	u_3	u_c
0. 630	0. 005 5	0. 005 8	0. 001 2	0. 008 1
1. 100	0. 005 2	0. 005 8	0. 000 6	0. 007 8
1. 603	0. 004 1	0. 005 8	0. 000 6	0. 007 1

E. 7 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度 U 为：

0. 630 马赫数点： $U=k \times u_c=0. 016$ 马赫数

1. 100 马赫数点： $U=k \times u_c=0. 016$ 马赫数

1. 603 马赫数点： $U=k \times u_c=0. 014$ 马赫数