ICS 点击此处添加 ICS 号
CCS 点击此处添加 CCS 号

T/CSOE

中 国 光 学 工 程 学 会 团 体 标 准

T/CSOE 0022—2026

核级 MEMS 光纤压力传感器

Nuclear-grade MEMS fiber optic pressure sensors

（报批稿）

XXXX－XX－XX 发布　　XXXX－XX－XX 实施

发 布

目　　次

前言 III
1　范围 1
2　规范性引用文件 1
3　术语和定义 1
4　缩略语 1
5　结构与分级 2
5.1　传感器结构 2
5.2　系统结构 2
5.3　分级 3
6　技术要求 3
6.1　抗电磁干扰能力 3
6.2　耐辐射干扰能力 3
6.3　工作温度 3
6.4　满量程输出 3
6.5　误差 3
6.6　分辨率 4
6.7　重复性 4
7　试验方法 4
7.1　抗电磁干扰试验 4
7.2　耐辐射干扰试验 5
7.3　工作温度试验 5
7.4　满量程输出试验 6
7.5　误差试验 6
7.6　分辨率检查 7
7.7　重复性试验 7
8　检验规则 8
8.1　检验分类 8
8.2　出厂检验 8
8.3　型式检验 8
8.4　判定规则 8
9　标志、包装、运输和贮存 8
9.1　标志 8
9.2　包装 9
9.3　运输 9
9.4　贮存 9
附录 A（资料性）　性能指标的计算方法 10
A.1　满量程误差计算 10

A.2　重复性计算 10
附录 B（资料性）　传感器性能试验设备 12

前　言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则　第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国光学工程学会提出。

本文件由中国光学工程学会归口。

本文件起草单位：深圳大学、天津大学、上海大学、大连理工大学、深圳市特发信息股份有限公司。

本文件主要起草人：王义平、王双、刘申、江俊峰、庞拂飞、彭伟、杨彬、包维佳、代小爽、魏鹤鸣、荆振国、邓伟锋、王英、刘铁根。

核级 MEMS 光纤压力传感器

1 范围

本文件规定了核级MEMS光纤压力传感器的结构与分级、技术要求、试验方法、检验规则以及标志、包装、运输和贮存。

本文件适用于宽温区测量环境的核级MEMS光纤压力传感器。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 191 包装储运图形符号标志

GB/T 2829 周期检验计数抽样程序及表（适用于对过程稳定性的检验）

GB/T 8170 数值修约规则与极限数值的表示和判定

GB/T 12727 核电厂安全重要电气设备鉴定

GB/T 13283 工业过程测量和控制用检测仪表和显示仪表精确度等级

GB/T 15478 压力传感器性能试验方法

GB/T 15972.54 光纤试验方法规范 第54部分：环境性能的测量方法和试验程序 伽玛辐照

GB/T 17626.2 电磁兼容 试验和测量技术 静电放电抗绕度试验

GB/T 17626.4 电磁兼容 试验和测量技术 电快速瞬变脉冲抗群扰度试验

GB/T 18901.1 光纤传感器 第1部分：总规范

GB/T 26111 微机电系统（MEMS）技术 术语

GB/T 41143 核电厂仪表和控制术语

GB/T 43347 核电厂安全重要电气、仪表与控制设备环境参数的监测

3 术语和定义

GB/T 18901.1、GB/T 26111和GB/T 41143界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

MEMS光纤压力传感器 MEMS fiber optic pressure sensor

利用MEMS工艺制备压力敏感芯片，将被测压力转换为光的波长、相位或强度信号，并通过光纤传输的传感器。

注1：该类传感器通常由利用MEMS工艺制备的压力敏感芯片、光纤插芯及光纤等部件组成。

注2：传感器基于法布里-珀罗（FP）干涉效应。外部压力使敏感芯片产生微米级挠曲位移，改变FP干涉腔长度，从而对入射光进行调制；传感器通过光纤与监测主机连接，实现干涉信号的实时采集与转换。干涉信号经光纤传输至监测主机解调后，输出可读测量数据。

3.2

光纤插芯 fiber ferrule

中心具有微孔、用于固定和精密定位光纤的部件。

注：在MEMS光纤压力传感器中，插芯通常用于将光纤固定并保持其端面与压力敏感芯片的相对位置，以形成光学FP腔。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

FP：法布里-珀罗（Fabry-Perot）

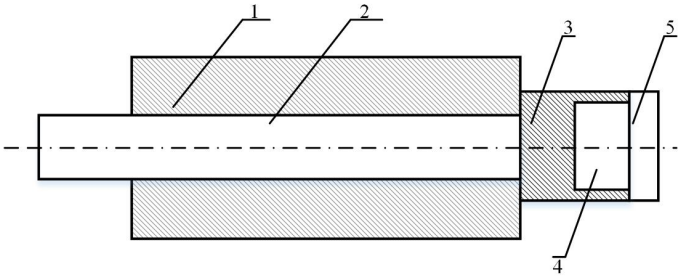
MEMS：微机电系统（Micro-Electromechanical Systems）

OA级：常规环境级（Ordinary Ambient Grade）
OB级：高温级（Operational Beyond-temperature Grade）
OC级：超高温级（Over-limit Critical-temperature Grade）
RIA：辐射致衰减（Radiation-Induced Attenuation）
TID：累积吸收剂量（Total Ionizing Dose）

5 结构与分级

5.1 传感器结构

传感器应由压力敏感芯片、光纤插芯及光纤等部件组成。压力敏感芯片采用MEMS工艺制备，包含敏感膜片、真空腔与基片。传感器结构示意如图1所示。

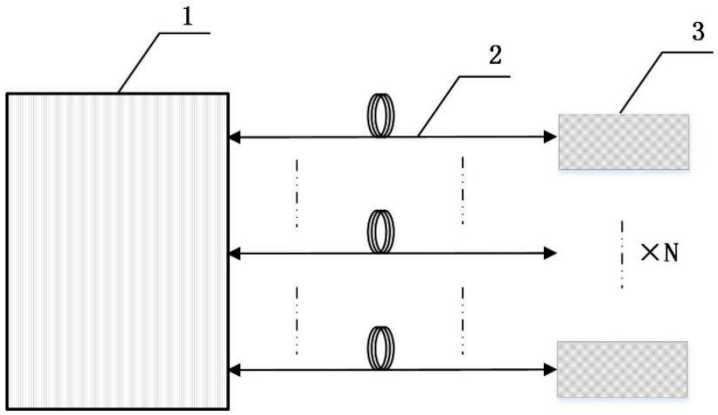


标引序号说明：
1——光纤插芯；
2——光纤；
3——基片；
4——真空腔；
5——敏感膜片。
传感器结构应保证：安装时，光纤端面对准压力敏感芯片底面。

图 1 核级 MEMS 光纤压力传感器

5.2 系统结构

压力监测系统包括多个传感器和一个监测主机，传感器通过光纤与监测主机连接，将采集的传感器信号实时转换为可读的测量压力数据进行输出。其结构示意图如图2所示。



标引序号说明：
1——监测主机；
2——光纤；
3——传感器；

图 2 压力监测系统

监测主机提供传感器所需的光能，并接收受被测压力影响的传感器光信号，将其转换为电信号并实现压力测量。包含光源、耦合器、光电信号处理单元、通信接口、数据显示等光机器件。

5.3 分级

传感器可根据使用区域和测量用途，按表1确定。

表 1 分级

使用区域	测量用途	技术等级	温度（℃）
其他辅助设施	安全壳微正压控制、微差压力变送器通风系统、过滤器工作环境压力监测	OA级	-25～100
辅助支持设施	凝结水泵、化学除盐水泵等设备工作环境压力监测	OA级	100～300
反应堆停堆系统和专设安全设施	应急堆芯冷却系统、高压安注系统压力监测与安全限值控制	OB级	100～300
反应堆停堆系统和专设安全设施	反应堆冷却剂一回路主冷却系统、稳压器控制系统压力监测与预警	OC级	300～1200

注：按传感器耐温性能，分为常规环境级传感器（OA级）、高温级传感器（OB级）和超高温级传感器（OC级）。

6 技术要求

6.1 抗电磁干扰能力

抗电磁干扰能力应符合下列规定：

a) 传感器应通过 GB/T 17626.2 规定的严酷等级为 3 级的静电放电抗扰度试验；
b) 传感器应通过 GB/T 17626.4 规定的严酷等级为 2 级的电快速瞬变脉冲群抗扰度试验；
c) 试验后，传感器测量误差应符合 6.5 的规定。

6.2 耐辐射干扰能力

传感器及传输光纤在核级场景特定区域完成规定的累积吸收剂量照射后，耐辐射干扰能力应符合表2的规定。试验程序应符合GB/T 15972.54的规定，辐射源使用Co-60伽马源。

表 2 耐辐射干扰能力

使用区域	累积吸收剂量（TID）	辐射致衰减（RIA）要求	压力测量误差
红区	≥250kGy	工作波长下≤1.0dB/km	满足6.5规定
黄区	≥0.35kGy	工作波长下≤0.05dB/km	满足6.5规定
蓝区	≥3.5kGy	工作波长下≤0.1dB/km	满足6.5规定

注1：剂量率选取应模拟实际工况，布置在红区的设备老化计量应根据模型计算的剂量率和设备寿命单独进行评估，难以开展详细剂量计算的应按红区250kGy/10年，黄区0.35kGy/10年、蓝区3.5kGy/10年。

注2：工作波长通常为850nm、1300nm、1550nm。

6.3 工作温度

工作温度应符合表1的规定。

6.4 满量程输出

满量程输出值P_{max}宜按核能环境用途，分为下列等级：

a) 低量程：P_{max}≤100 kPa；
b) 中量程：100 kPa＜P_{max}≤10 MPa；
c) 高量程：P_{max}＞10 MPa；

注：满量程输出值P_{max}应根据核安全等级，设定为额定工作压力的1.2倍至1.5倍。

6.5 误差

误差应符合表3的规定。

表 3　误差

技术等级	误差（F.S.）
0A级	0.2%
0B级	0.5%
0C级	2%

注1：传感器的误差以满量程输出的百分比（%F.S.）表示，该误差为综合误差，包含非线性、迟滞、重复性，附录A给出了满量程误差计算公式。

注2：环境温度变化产生的温度漂移应计入对应工作温度点下的综合误差中，且在工作温度范围内应不超过本表中规定值。

6.6　分辨率

传感器分辨率应符合下列规定：

a)　0A 级压力传感器的分辨率应优于 0.04%F.S.。
b)　0B 级压力传感器的分辨率应优于 0.1%F.S.。
c)　0C 级压力传感器的分辨率应优于 0.4%F.S.。

6.7　重复性

传感器重复性应符合下列规定：

a)　0A 级压力传感器的重复性不应超过 0.1%F.S.。
b)　0B 级压力传感器的重复性不应超过 0.25%F.S.。
c)　0C 级压力传感器的重复性不应超过 1%F.S.。

7　试验方法

7.1　抗电磁干扰试验

7.1.1　静电放电抗扰度试验

静电放电抗扰度试验应符合GB/T 17626.2的规定，并应按下列步骤执行：

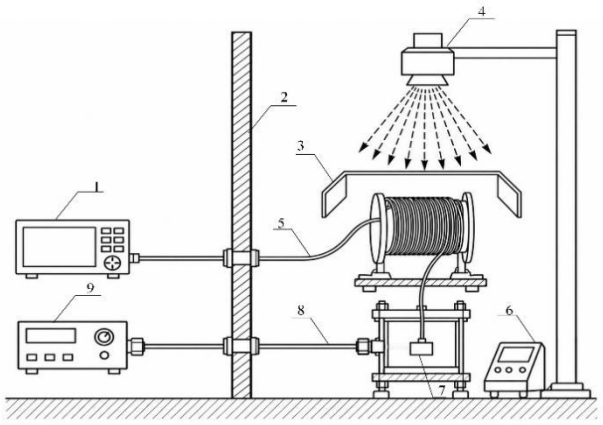
a)　将传感器置于接地参考平面上方的绝缘支架上；传感器通过光纤连接至试验区域外的检测主机，使测量系统处于正常工作状态；若传感器设有金属接地端或铠装接地线，应可靠接至参考地。
b)　按严酷等级 3 级设定试验电压：接触放电为±6 kV，空气放电为±8 kV。
c)　放电施加：
　1)　接触放电：在传感器可触及的金属外壳、金属接头等部位，放电电极紧贴表面触发放电，正、负极性各至少放电 10 次，单次间隔不少于 1s；
　2)　空气放电：在传感器的绝缘外壳、光纤引出密封处等非导电部位，采用空气放电头快速接近放电，正、负极性各至少放电 10 次，单次间隔不少于 1s；
　3)　间接放电：在水平耦合板及垂直耦合板边缘对传感器实施正、负极各 10 次接触放电，单次间隔不少于 1s。
d)　试验后，传感器的压力测量误差应符合 6.5 的规定.

7.1.2　电快速瞬变脉冲群抗扰度试验

电快速瞬变脉冲群抗扰度试验应符合GB/T 17626.4的规定，并应按下列步骤执行：

a)　将传感器置于接地参考平面上方的绝缘支架上；传感器通过光纤连接至试验区域外的监测主机，使测量系统处于正常工作状态；若传感器设有金属接地端或铠装接地线，应可靠接至参考地。脉冲发生器与接地参考平面实现低阻抗搭接。
b)　按严酷等级 2 级设定试验条件：试验电压峰值为±1 kV，脉冲重复频率为 5 kHz 或 100 kHz。
c)　脉冲发生器通过耦合网络或耦合夹将脉冲群施加于外壳接地端或金属护层，正、负极性各施加不少于 1 min。
d)　试验后，传感器的压力测量误差应符合 6.5 的规定。

7.2 耐辐射干扰试验



标引序号说明：
1—光功率计；
2—防护屏蔽墙；
3—遮光罩；
4—Co-60辐照装置；
5—传输光缆；
6—辐射剂量率仪；
7—传感器；
8—气路；
9—压力控制器；

图 3 耐辐射干扰试验装置示意图

耐辐射干扰试验应按GB/T 15972.54的规定执行，如图3所示，宜采用Co-60辐照装置、辐射剂量率仪及光功率计等装置，并按下列步骤进行：

a) 试样应包含 MEMS 光纤压力传感器及其传输光纤。传输光纤宜松绕于直径不小于 10cm 的非金属耐辐照线轴上，并采取避光措施。传感器通过光纤与辐照区域外的监测主机连接，使其处于正常工作状态。

b) 辐照前应记录试样的初始光功率和压力测量值，并按 7.5 测量传感器压力测量误差。试验工作波长应与传感器实际工作波长一致，输入光功率应按正常工作条件设置，并在试验过程中保持稳定。

c) 应按表 2 规定的累积吸收剂量进行辐照。辐射源采用 Co-60 伽马射线源，试验环境温度按工作区域基准温度保持恒定，辐照过程中应监测试样所在位置的剂量率和累积吸收剂量，并连续或定期记录传输光纤输出功率和传感器压力测量值。

d) 达到规定的累积吸收剂量后停止辐照，并连续监测输出光功率不少于 15min。辐照结束后应按式（1）计算传输光纤辐射致衰减，并按 7.5 重新测量传感器压力测量误差。

$$\alpha_{RIA} = \frac{\Delta A_t}{L} \times 1000 \tag{1}$$

式中：

α_{RIA}—辐射致衰减，单位 dB/km;

L—辐射致衰减，单位 m。

e) 试验后辐射致衰减应符合 6.2 的规定；压力测量误差应符合 6.5 的规定。

7.3 工作温度试验

7.3.1 常规温度 T1 工作试验

试验过程中，0A级传感器应置于高低温试验箱内，宜采用标准铂电阻温度计测量工作温度，应在-25℃＜T1＜100℃时，待传感器在工作温度稳定0.5h后，测定1次测量误差。以后每0.5h测定1次测量误差，共3次，试验结果应符合6.5的规定。

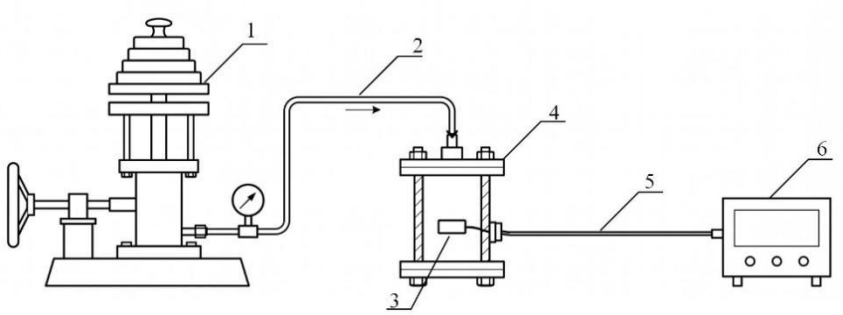
7.3.2 高温 T2 工作试验

试验过程中，0B级传感器应置于高温箱式炉内，宜采用标准铂电阻温度计测量工作温度，应在100℃≤T2＜300℃时，待传感器在工作温度稳定0.5h后，测定1次测量误差。以后每0.5h测定1次测量误差，共3次，试验结果应符合6.5的规定。

7.3.3 超高温 T3 工作试验

试验过程中，0C级传感器应置于高温箱式炉内，宜采用铠装热电偶测量工作温度，应在300℃≤T3＜1200℃时，待传感器在工作温度稳定0.5h后，测定1次测量误差。以后每0.5h测定1次测量误差，共3次，试验结果应符合6.5的规定。

7.4 满量程输出试验



标引序号说明：

1— 活塞式压力计；

2— 气路；

3— 传感器；

4— 密封气室；

5— 传输光纤；

6— 监测主机；

图 4 满量程输出试验装置结构示意图

满量程输出试验应符合GB/T 15478的规定。如图4所示，应采用密封气室和监测主机进行，压力源宜采用活塞式压力计。按下列步骤进行：

a) 将传感器置于密封气室内，通过密封引出结构将传输光纤连接至监测主机；活塞式压力计与密封气室连通，检查气路及接口的密封性；

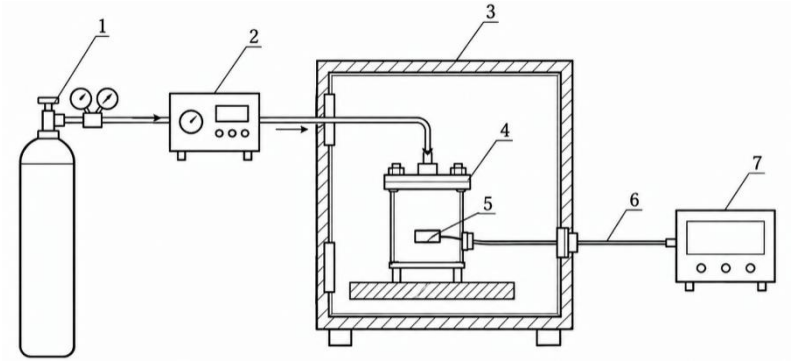
b) 操作活塞式压力计造压机构平稳升压至传感器量程上限后泄压至测量下限，重复不少于 3 次进行预压；

c) 预压结束后，在活塞承重盘上加载对应满量程的标准砝码，操作造压机构使活塞升起处于工作行程内并旋转活塞，待活塞浮起平稳且压力稳定后，记录活塞压力计标称压力值和传感器测量值；

d) 逐级卸除砝码并操作造压机构将压力恢复至测量下限，检查传感器输出是否恢复正常；

e) 传感器正常测量的量程上限应符合 6.4 规定，且量程上限处的压力测量误差应符合 6.5 的规定。

7.5 误差试验



标引序号说明：

1— 氮气瓶；

2— 压力控制器；

3— 高低温试验箱、高温箱式炉；

4— 密封气室；

5— 传感器；

6— 传输光纤；

7— 监测主机；

图 5　压力测量误差试验装置结构示意图

压力测量误差试验装置结构示意图如图5所示，误差试验应符合GB/T 15478的规定。应采用压力控制器、密封气室、高低温试验箱、高温箱式炉和监测主机进行，压力源宜采用氮气。并应按下列步骤执行：

a) 将传感器感压端置于密封气室内，连接压力控制器和监测主机，并检查气路及接口密封性；

b) 至少选取工作温度下限、典型工作温度和工作温度上限 3 个温度点，工作温度上限<125℃宜采用高低温试验箱，工作温度上限>125℃应采用高温箱式炉，待温度稳定后进行试验；

c) 在测量范围内均匀选取不少于 6 个压力压力测试点，包括测量上限和测量下限；

d) 按规定压力点依次进行升压和降压试验，待压力稳定后记录标准压力值和传感器测量值，完成不少于 3 次升降压、降压循环；

e) 按附录 A.1 计算压力测量误差，各温度点的测量误差应符合 6.5 的规定。

7.6　分辨率检查

分辨率检查应采用压力控制器、密封气室和监测主机进行，压力源宜采用氮气。压力控制器的最小可控压力变化量应小于被试传感器规定的分辨率，并按下列步骤进行：

a) 将传感器感压端置于密封气室内，连接压力控制器和监测主机；

b) 调节密封气室压力至传感器量程内规定压力点，待压力及传感器输出稳定后记录初始值；

c) 通过压力控制器向传感器平稳施加规定分辨率的微小压力变化量。OA 级传感器规定分辨率应为 0.04%F.S.；OB 级应为 0.1%F.S.；OC 级应为 0.4%F.S.；

d) 监测主机显示数据清晰、稳定产生相应单向变化，且变化量大于监测主机本底噪声波动，分辨率检查合格。

e) 重复检查不少于 3 次，均能正确辨识规定的最小压力变化量。

7.7　重复性试验

重复性试验应按下列步骤执行：

a) 在规定试验温度下，待传感器恢复至常规大气压后，在传感器压力量程内，按照规定压力变化率控制压力至规定压力点；

b) 从规定压力点恢复至常规大气压，连续进行 n 次测试，记录每次在规定压力点下的传感器压力测量值；

c) 根据测量次数 n 的不同，按附录 A.2 规定的公式计算测量重复性ξ_R：

- 当测量次数n≥6时，采用贝塞尔公式计算；

- 当测量次数n＜6时，采用极差法计算。

注：测量次数n的取值宜为5次、7次。

8 检验规则

8.1 检验分类

传感器的检验项目应分为出厂检验和型式检验，检验项目应符合表4规定。

表 4 检验项目表

序号	检验项目	技术要求	试验方法	出厂检验	型式检验
1	抗电磁干扰能力	6.1	7.1	×	√
2	耐辐射干扰能力	6.2	7.2	×	√
3	工作温度	6.3	7.3	×	√
4	满量程输出	6.4	7.4	√	√
5	误差	6.5	7.5	√	√
6	分辨率	6.6	7.6	×	√
7	重复性	6.7	7.7	√	√
注：表中“√”为检验项目，“×”为不检验项目。					

8.2 出厂检验

出厂前应由制造厂质量检验部门逐台进行检验，检验合格并发给合格证后方可出厂。

8.3 型式检验

8.3.1 检验条件

有下列情况之一时，应进行型式检验：

a) 新产品试验鉴定或老产品转厂生产时。
b) 正常生产的传感器每年一次。
c) 正式生产后，结构、材料、工艺有较大改变，可能影响产品性能时。
d) 停产一年以上恢复生产时。
e) 出厂检验结果与上次型式检验有较大差异时。

8.3.2 抽样

试样应从经出厂检验合格的同一批次产品中，按照GB/T 2829规定的随机抽样方法抽取。抽样基数不应少于10只，抽样数量不少于3只。

8.4 判定规则

8.4.1 出厂检验规则

逐台检验项目全部合格，判定该台合格；任一项不合格即为不合格品。抽检出现1台不合格时，允许从同批产品中加倍抽样复检该项目。复检全部合格判定该批次合格；若仍有1台不合格，判定该批次出厂检验不合格，不予交付。

8.4.2 型式检验规则

所有试验组别的全部受试样品均满足技术要求，判定为型式检验合格；出现任一项不合格即判定初检不合格。允许加倍抽样复验不合格项及关联项目。复验全部合格则判定合格；若仍有1台不合格，判定型式检验不合格。

9 标志、包装、运输和贮存

9.1 标志

9.1.1 产品标志

传感器应有下列标志：

a) 产品型号和名称；
b) 主要技术参数；
c) 防护等级；
d) 出厂编号和日期；
e) 检验单位标志；
f) 制造商名称。

9.1.2 包装标志

包装标志应符合 GB/T 191 的规定。

9.2 包装

包装应采用复合防护包装类型，具有防雨、防潮、防尘、减振能力。包装箱内应有下列文件：

a) 产品合格证。
b) 产品使用说明书。
c) 装箱单。

9.3 运输

包装好的产品在避免雨雪直接淋袭的条件下应适用于公路、铁路、水路、航空运输。

9.4 贮存

包装后的传感器应贮存在温度为-10℃～60℃、相对湿度不超过85%、无凝露、无腐蚀性气体和腐蚀性化学药品、通风良好的库房内。

附 录 A
（资料性）
性能指标的计算方法

A.1 满量程误差计算

满量程误差应按公式（A.1）计算：

$$E_{fs}=\frac{|P_r-P_m|_{max}}{P_{fs}}\times 100\% \quad \cdots\cdots (A.1)$$

式中：

E_{fs}——满量程误差；

P_r ——压力控制器实际压力值；

P_m——传感器压力测量值；

P_{fs}——满量程输出。

A.2 重复性计算

A.2.1 测量次数n≥6

采用贝塞尔公式分别计算每个效验点上正、反行程的子样标准偏差：

正行程子样标准偏差S_{U_i}按式（A.2）计算：

$$S_{U_i}=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}\left(Y_{U_{ij}}-\overline{Y}_{U_i}\right)^2} \quad \cdots\cdots (A.2)$$

反行程子样标准偏差S_{D_i}按式（A.3）计算：

$$S_{D_i}=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}\left(Y_{D_{ij}}-\overline{Y}_{D_i}\right)^2} \quad \cdots\cdots (A.3)$$

传感器在整个测量范围内的子样标准偏差 S 按式（A.4）计算：

$$S=\sqrt{\frac{1}{2m}\left(\sum_{i=1}^{m}S_{U_i}^2+\sum_{i=1}^{m}S_{D_i}^2\right)} \quad \cdots\cdots (A.4)$$

则，重复性ξ_R按式（A.5）计算：

$$\xi_R=\frac{\lambda S}{P_{fs}}\times 100\% \quad \cdots\cdots (A.5)$$

式中：

$Y_{U_{ij}}$——正行程第i点第j次的示值；

$Y_{D_{ij}}$——反行程第i点第j次的示值；

$\overline{Y}_{U_i}$ ——正行程平均值；

$\overline{Y}_{D_i}$ ——反行程平均值；

n ——重复试验次数；

m ——校准点个数；

λ ——包含因子。

注：包含因子λ可按下列原则之一选取：1）按t分布，取置信概率等于95%；2）按极差法取2～3。

A.2.2 测量次数n＜6

采用极差法公式（A.6）计算单次测量的试验标准偏差估计值s_R：

$$s_R=\frac{Y_{max}-Y_{min}}{C_n} \quad \cdots\cdots (A.6)$$

则，重复性ξ_R按式（A.7）计算：

$$\xi_R=\frac{s_R}{P_{fs}}\times 100\% \quad \cdots\cdots (A.7)$$

式中：

Y_{max}——n次测量中的最大值

Y_{min}——n次测量中的最小值

C_n——极差系数

注：测量次数n为2、3、4、5时，极差系数C_n应为1.13、1.69、2.06、2.33。

附 录 B
（资料性）
传感器性能试验设备

表 B.1 传感器性能试验设备

设备名称	性能要求
压力控制器	测量范围覆盖传感器满量程输出，准确度不小于0.1级
活塞式压力计	测量范围覆盖传感器满量程输出，准确度不低于0.01级
高低温试验箱	温度范围-55℃～125℃
高温箱式炉	温度范围25℃～1300℃
标准铂电阻温度计	测量范围覆盖-55℃～400℃，准确度应不小于2级
铠装热电偶	测量范围覆盖300℃～1300℃，准确度应不小于2级