

双相机工业摄影测量系统校准规程

Calibration Procedures for Dual Camera Industrial Photogrammetry System

(征求意见稿)

(本稿完成时间：2024年2月1日)

202X - XX - XX 发布

202X - XX - XX 实施

中国测绘学会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 系统构成	2
4.1 系统组成	2
4.2 作业流程	2
5 计量特性	2
5.1 坐标测量误差	2
5.2 坐标测量重复性	3
5.3 测长误差	3
6 校准条件	3
6.1 环境条件	3
6.2 场地及标准器条件	3
7 校准方法	4
7.1 坐标测量误差校准	4
7.2 坐标测量重复性校准	6
7.3 测长误差校准	7
8 校准结果	9
9 复校时间间隔	9
附录 A（规范性） 系统坐标测量误差计算	10
附录 B（规范性） 系统坐标测量重复性计算	11
附录 C（资料性） 测长误差不确定度评定示例	12
附录 D （资料性） 校准证书样例	16
参考文献	19

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。

本文件由中国测绘学会提出并归口。

本文件起草单位：XXXXX、XXXXX。

本文件主要起草人：XXX、XXX。

双相机工业摄影测量系统校准规程

1 范围

本文件规定了双相机工业摄影测量系统的计量特性、校准条件、校准方法、校准结果等要求。本文件适用于双相机工业摄影测量系统和原理相同的其它测量仪器的校准。

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 34890 《数字摄影三坐标测量系统的验收检测和复检检测》

JJF1001 《通用计量术语及定义》

JJF1059.1 《测量不确定度评定与表示》

JJF1071 《国家计量校准规范编写规则》

JJF1094 《测量仪器特性评定》

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

双相机工业摄影测量系统 dual camera industrial photogrammetry system

由2台工业测量相机、定向尺、摄影测量标尺、测量笔、靶标、解算软件和控制器等单元组成的基于实时交会测量技术的三维坐标测量系统。

3.2

摄影测量标尺 scale-bar

为工业摄影测量系统提供长度量值的一种标尺。

3.3

标尺长度 scale-bar 's length

标尺上指定的两个靶标中心之间的距离。

3.4

坐标测量重复性 coordinate measurement repeatability

在相同测量方法、相同观测者、相同场所和短时期内，采用同一双相机工业摄影测量系统对摄影测量检测场内的靶标进行多组测量，相同靶标在不同组测量中坐标间的一致性。

3.5

摄影测量检测场 calibration field

为测定工业摄影测量系统坐标测量误差和坐标测量重复性而建立的具有三维结构的检测场，一般依托实验室稳定的承重墙面搭设稳定的三维框架建造。

3.6

测长误差 length measurement error

双相机工业摄影测量系统对参考长度进行测量时，系统测得的长度值与参考长度之间的差值。

3.7

扩展测量范围测长误差检测场 length measurement error calibration field for extended measurement range

为测定双相机工业摄影测量系统在扩展测量范围长度测量能力而建立的具有三维结构的检测场，一般依托实验室测长机搭设稳定的三维框架建造。

3.8

靶标 target

由回光反射材料制作的能够被双相机工业摄影测量系统识别的圆形合作目标。

3.9

测量场 measuring field

双相机工业摄影测量系统定向完成后能够测量覆盖的空间范围。

4 系统构成

4.1 系统组成

双相机工业摄影测量系统由 2 台工业测量相机、定向尺、摄影测量标尺、测量笔、靶标、解算软件和控制器等单元组成。工业测量相机是系统的核心传感器，相机结构应稳定，且畸变已知。

4.2 作业流程

作业流程应符合下列要求：

- a) 测量开始前，应采用定向尺、摄影测量标尺或控制场对测量场内架设的 2 台工业测量相机定向，系统软件解算出 2 台相机之间相对的空间位置和姿态；
- b) 测量过程中，系统应对粘贴在被测物体上的靶标进行同步摄影，系统软件经图像处理、同名像点匹配、空间前方交会等操作后，实时解算出靶标的空间三维坐标，从而实现动/静态物体相关几何信息的实时测量。

5 计量特性

5.1 坐标测量误差

5.1.1 应分别采用高精度单相机工业摄影测量系统与双相机工业摄影测量系统对摄影测量检测场内靶标的空间三维坐标进行测量。

5.1.2 应以高精度单相机工业摄影测量系统测得的靶标坐标作为参考值。

5.1.3 应通过坐标转换计算双相机工业摄影测量系统测得的靶标坐标与单相机工业摄影测量系统测得的靶标坐标间的偏差，用所有靶标坐标在 X、Y、Z 各方向坐标分量和整体点位的均方根误差（RMSE）表示双相机工业摄影测量系统的坐标测量误差，具体计算方法参见附录 A。

5.1.4 对摄影测量检测场内靶标的空间三维坐标进行测量时应在相同条件下进行，包括：相同的地点、方法、观测者，并要求在短时间内完成测量。需要进行复核时，应由生产商或用户根据标称指标提供最

大允许误差。

5.1.5 单相机工业摄影测量系统的测量不确定度不应大于双相机工业摄影测量系统测量不确定度的三分之一。

5.2 坐标测量重复性

5.2.1 双相机工业摄影测量系统应在短时间内对同一摄影测量检测场中的靶标进行多组重复测量。

5.2.2 同名靶标在不同组间空间三维坐标的一致程度，应用所有靶标的测量坐标相对于其参考坐标在 X、Y、Z 各方向坐标分量和整体点位的均方根误差（RMSE）表示，具体计算方法参见附录 B。

5.2.3 对摄影测量检测场内靶标的空间三维坐标进行测量时应在相同条件下进行，包括：相同的地点、方法、观测者，并要求在短时间内完成测量。需要进行复核时，应由生产商或用户根据标称指标提供最大允许误差。

5.3 测长误差

5.3.1 双相机工业摄影测量系统的测长误差应包括典型测量范围测长误差，可包括扩展测量范围测长误差。

5.3.2 典型测量范围测长误差应符合下列要求：

- a) 典型测量范围指绝大多数作业条件下双相机工业摄影测量系统的测量范围；
- b) 典型测量范围根据大量实际应用及双相机工业摄影测量系统的测量特性确定；
- c) 典型测量范围测长误差应采用双相机工业摄影测量系统对摄影测量标尺进行测量，通过比较摄影测量标尺长度测量值与标称值之间的差异计算系统的测长误差。

5.3.3 扩展测量范围测长误差应符合下列要求：

- a) 扩展测量范围指被校准设备在保证测量精度的前提下能够覆盖的最大测量范围，该范围一般由生产厂家给出。
- b) 扩展测量范围测长误差的校准宜采用激光干涉仪提供参考长度。需要进行复核时，应由生产厂家或用户规定最大允许误差。
- c) 激光干涉仪测长误差的不确定度（测长误差不确定度评定示例参见附录 C）与最大允许误差的比值应不大于三分之一。

6 校准条件

6.1 环境条件

影响双相机工业摄影测量系统的环境条件，如温度条件、空气湿度、预热时间和振动等的极限值应符合生产厂家的相关要求。

6.2 场地及标准器条件

6.2.1 摄影测量检测场

摄影测量检测场应符合下列要求，其示意图见图 1：

- a) 摄影测量检测场应有足够的景深，宜在一面钢筋混凝土墙前搭设稳定的结构框架建造摄影测量检测场；
- b) 摄影测量检测场范围不宜小于 3.0m（宽）×2.0m（高）×0.5m（深）；
- c) 摄影测量检测场的混凝土墙和框架上应均匀布设靶标；
- d) 摄影测量检测场布设的靶标数量宜介于 1200 个--2000 个，靶标直径宜为 6mm；
- e) 双相机工业摄影系统的坐标测量误差和坐标测量重复性应在摄影测量检测场进行校准。

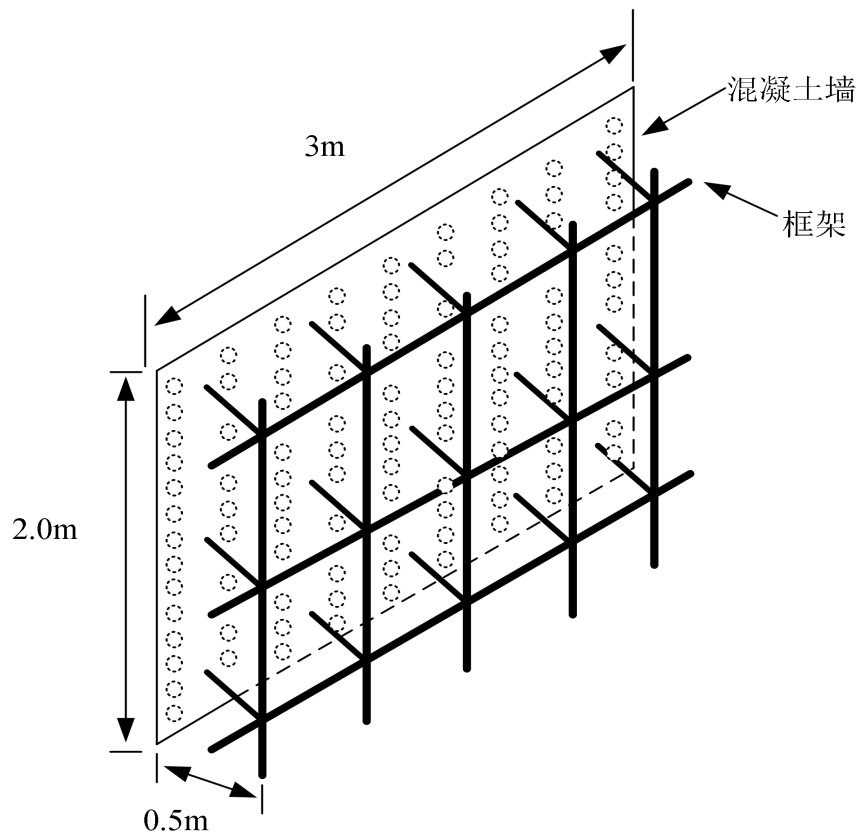


图 1 摄影测量检测场示意图

注 1: \odot 表示靶标

注 2: 图 1 框架上布设的靶标未标出

6.2.2 标尺

标尺应符合下列要求，其示意图见图 2：

- 标尺应以膨胀系数低的碳纤维材料或钢钢作为基体；
- 每根标尺上宜均匀粘贴 8 个靶标，靶标与基体应牢固连接；
- 每根标尺应提供不少于 4 个参考长度，其中最小长度不宜小于最大长度的三分之一；
- 标尺标称值的测量不确定度不应大于被校准系统长度测量不确定度的三分之一。

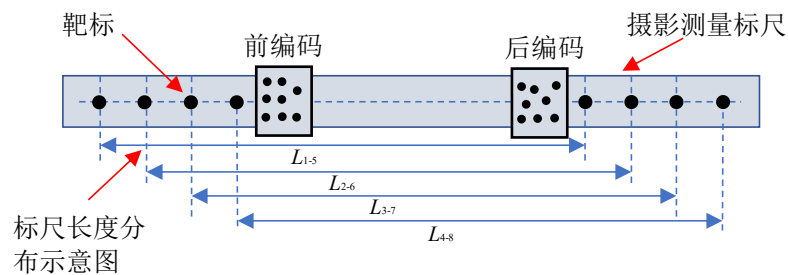


图 2 一种摄影测量标尺示意图

7 校准方法

7.1 坐标测量误差校准

7.1.1 单相机工业摄影测量系统坐标测量要求如下：

- 宜采用高精度单相机工业摄影测量系统在距离摄影测量检测场 3—4m 的位置对检测场内的靶标进行测量，计算出检测场内所有靶标的空间三维坐标，拍摄示意图见图 3；
- 单相机工业摄影测量系统的测量不确定度不应大于待校准双相机工业摄影测量系统测量不确定度的三分之一；
- 单相机工业摄影测量系统对检测场内靶标坐标进行测量时，相机摄站应分布在检测场的左上、左中、左下、中上、正中、中下、右上、右中、右下 9 个位置，相机摄站分布示意图见图 4a；
- 单相机工业摄影测量系统每次拍摄时宜使所有靶标在相片上成像，每个摄站拍摄 4 张照片，每拍摄一张照片相机原位绕相机光轴旋转 90° ，即相机分别在 0° 、 90° 、 180° 和 270° 姿态下对检测场进行拍照，相机旋转示意图见图 4b。

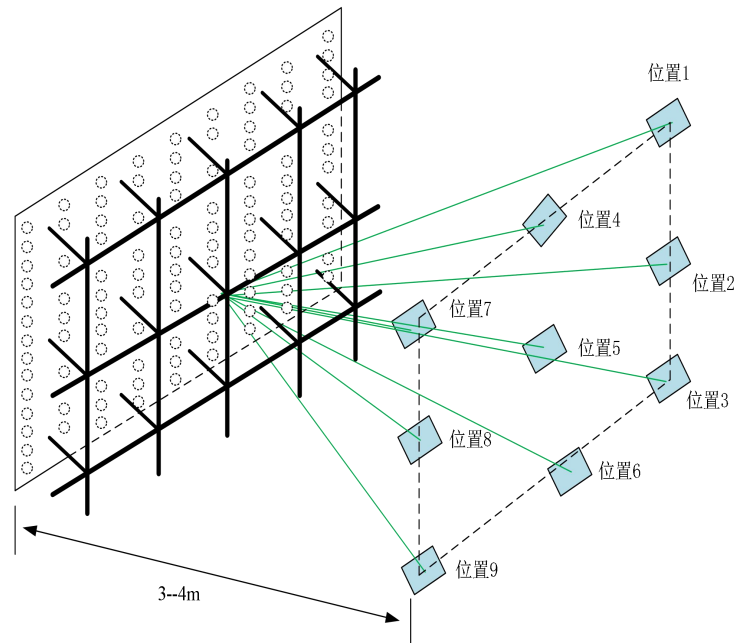


图 3 单相机工业摄影测量系统相机在摄影测量检测场前位置分布立体图

注：图中“”表示相机

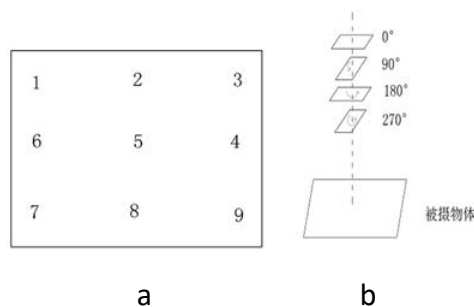


图 4 单相机工业摄影测量系统测量时相机拍摄位置和旋转位置示意图

7.1.2 双相机工业摄影测量系统坐标测量要求如下，见图 5：

- 应在摄影测量检测场前架设双相机工业摄影测量系统，系统距离检测场宜 3m—4m；
- 双相机工业摄影测量系统应采用厂家规定的方式完成系统定向，并连续对检测场内靶标的坐标测量 3 组；
- 将 2 台相机位置互换，重新对系统进行定向。定向完成后，采用待校准双相机工业摄影测量系统再次对检测场内的靶标坐标测量 3 组。

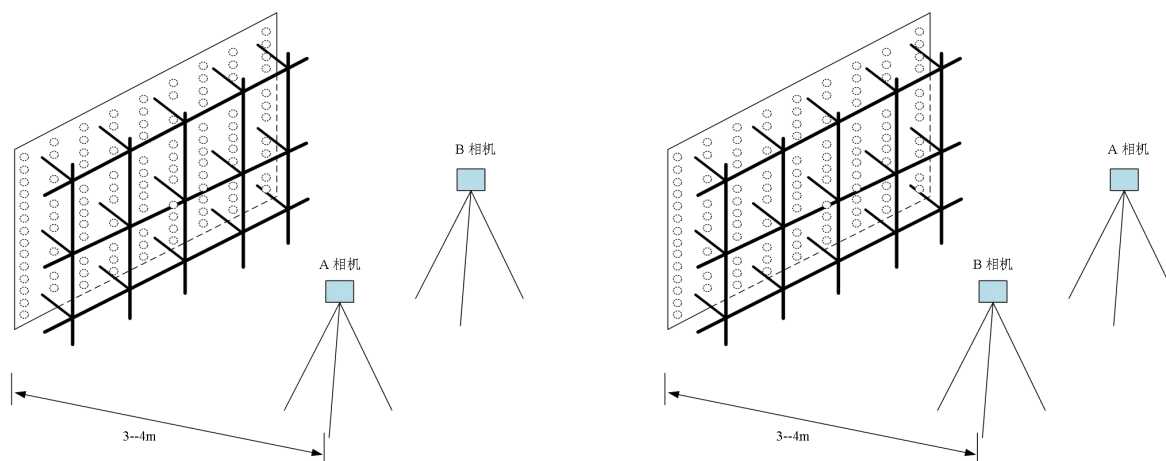


图5 双相机工业摄影测量系统架设示意图

7.1.3 坐标测量误差计算要求如下：

- 应以单相机工业摄影测量系统测得的检测场内所有靶标的空间三维坐标为参考值，采用校准实验室自编软件或第三方具有认证的软件进行坐标转换；
- 应分别计算双相机工业摄影测量系统测量得到的每组靶标坐标相对于基准坐标在 X、Y、Z 及点位方向的均方根误差；
- 应取 6 组靶标在 X、Y、Z 和点位方向均方根误差的平均值作为坐标测量误差的表征指标；
- 同名靶标坐标转换应遵循最小二乘原则，坐标转换过程中宜剔除超过 3 倍中误差的粗大误差。

7.2 坐标测量重复性校准

7.2.1 双相机工业摄影测量系统坐标测量要求如下，见图 6：

- 应在摄影测量检测场前架设双相机工业摄影测量系统，系统距离检测场宜 3--4m；
- 双相机工业摄影测量系统应采用厂家规定的方式完成系统定向；
- 双相机工业摄影测量系统应连续对检测场内的靶标坐标测量 10 组。

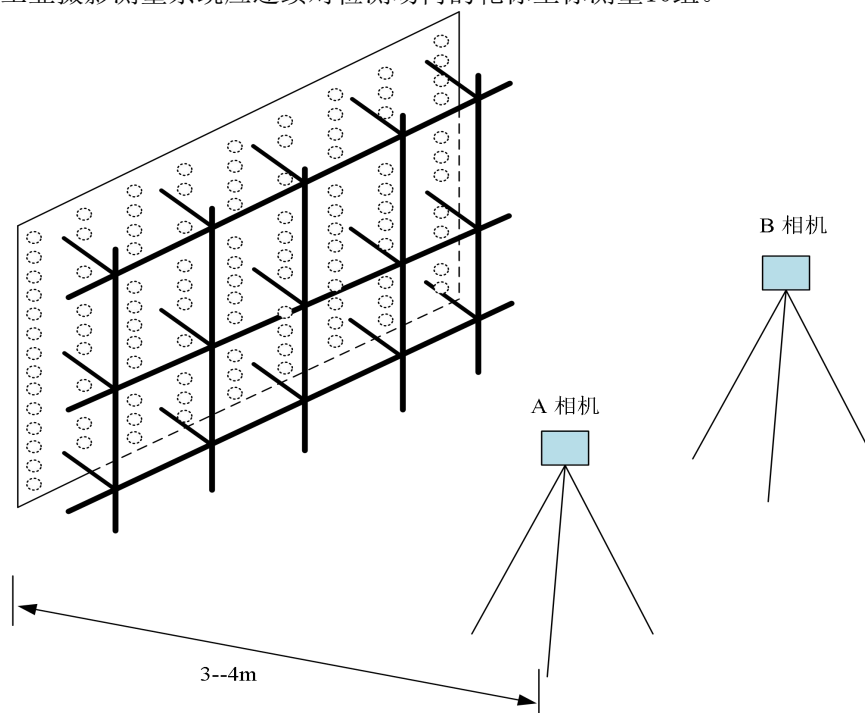


图6 双相机工业摄影测量系统重复测量精度示意图

7.2.2 坐标测量重复性计算要求如下：

- 应取10组靶标坐标的平均值作为各靶标坐标的参考值；
- 宜采用校准实验室自编软件或第三方具有认证的软件分别计算各组靶标的坐标测量值与其参考值在X、Y、Z和点位方向的均方根误差；
- 应统计10组对比结果，取其平均值作为被校准系统的坐标测量重复性指标。

7.3 测长误差校准

7.3.1 典型测量范围测长误差校准要求如下：

- 应以摄影测量标尺为标准器对双相机工业摄影测量系统在典型测量范围的测长误差进行校准，校准时双相机工业摄影测量系统应在两种基线距离条件下对标尺长度进行测量，基线距离应由生产厂家或用户给出，两种基线长度之间的差值不宜小于1m；
- 每种基线条件下，双相机工业摄影测量系统定向完成后应对测量场内19个位置的摄影测量标尺进行测量，示意图见图7；
- 标尺位置应分布在测量场的两个测量平面，第一测量平面应位于双相机测量场纵深方向距双相机基线0.4B~0.6B位置处，该平面内应竖向放置标尺，从左至右共3列，每列分别在上、中、下三个位置进行测量，共摆放9个位置，示意图见图8；
- 第二测量平面应与第一测量平面平行，距基线1.1B~1.2B，该平面内标尺至少横向放置6个位置，斜向45°放置4个位置，共放置10个位置，也可根据视场大小增加横向标尺摆放的位置，示意图见图8；
- 测量过程中标尺放置的位置宜覆盖整个测量场边界，标尺靶标与双相机交会角不应小于45°，竖视角不应超过23°，相机光轴与基线的夹角不应超出28°~68°的范围；
- 测量完成后，比较标尺长度实测值与标称值之间的差异。其数学模型为：

$$\Delta_1 = L' - L \dots\dots\dots (1)$$

其中， L' 为双相机工业摄影测量系统测得的标尺长度， L 为标尺的标称长度， Δ_1 为系统在典型测量范围的测长误差。

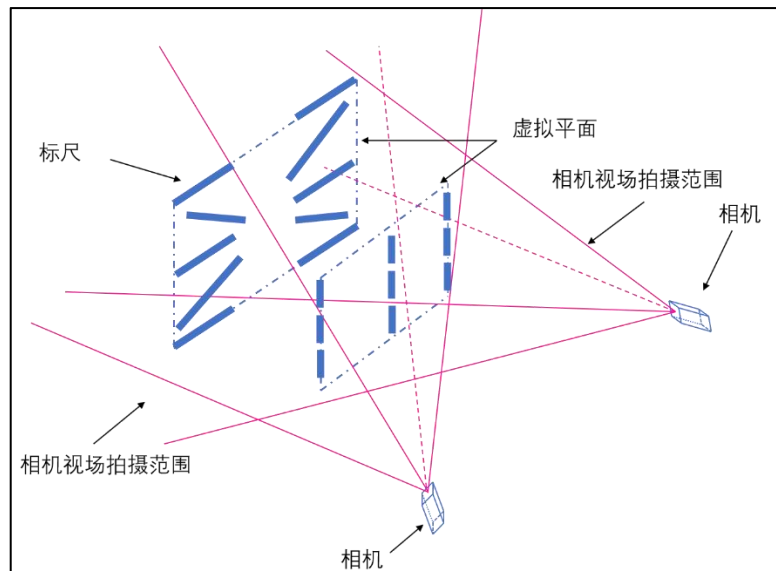


图7 标尺放置位置示意图

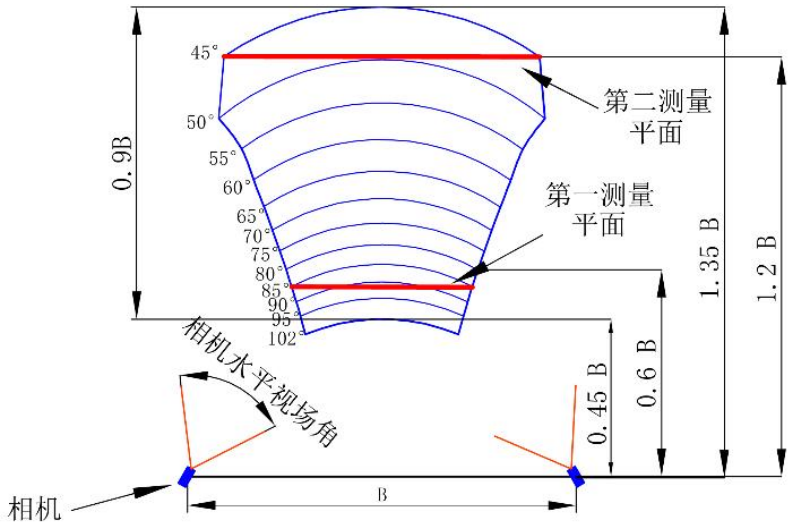


图 8 双相机工业摄影测量系统测量场俯视图
注：B 代表双相机工业摄影测量系统的基线长度

7.3.2 扩展测量范围测长误差校准要求如下：

- a) 检测场应在生产商规定的最大测量范围内布设，且检测场内应具有测长机；
- b) 测长机上应具有可平滑移动的运动装置，运动装置的运动距离应能够通过测长机测得，且运动装置上应布设摄影测量靶标，装置图见图9；
- c) 运动装置在位置一时应采用双相机工业摄影测量系统对运动装置上靶标的坐标进行测量，运动装置运动到位置二、三、四、五时应依次进行测量，并记录位置一到位置二、三、四、五的距离 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 ；
- d) 运动装置移动位置数和每两个位置间的距离应根据用户和厂家的实际需要确定；
- e) 运动装置移动的位置数不宜少于4个，每两个位置间的距离不应小于0.5m；
- f) 应以测长机测得的运动距离作为参考长度。双相机工业摄影测量系统根据测得的靶标坐标计算得到的运动装置移动长度作为测量长度。根据测量长度与参考长度之间的差异，计算双相机工业摄影测量系统的测长误差 δ ，计算公式为：

$$\delta_i = |L_{mi} - L_{refi}| \dots \dots \dots (2)$$

式中： L_{mi} ----双相机工业摄影测量系统测量出来的第 i 个长度；
 $L_{refi, j}$ ----测长设备测得的第 i 个长度的参考值。

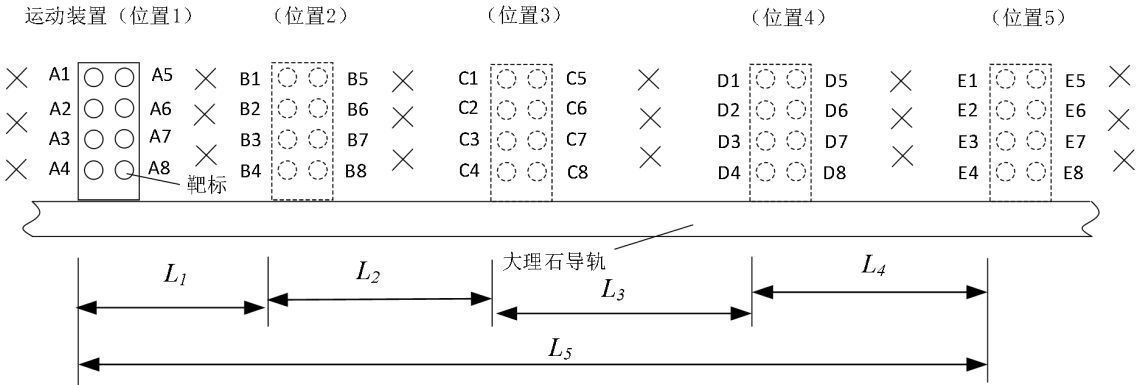


图 9 扩展测量范围长度测量误差校准装置示意图

注 1： B_n 、 C_n 、 D_n 、 E_n 是对 A_n 的重命名， $n=1,2,3,4,5,6,7,8$ ；

注 2：“○”表示运动装置上布设的靶标，“×”表示检测场上布设的靶标。

8 校准结果

经校准的双相机工业摄影测量系统应出具校准报告或校准证书。

9 复校时间间隔

送校单位使用者应根据实际使用情况决定复校时间间隔，复校时间间隔不宜超过1年。

附录 A
(规范性)
系统坐标测量误差计算

系统坐标测量误差计算方法如下：

A.1 采用高精度单相机工业摄影测量系统对摄影测量检测场内的靶标坐标进行测量，由于所选用的单相机工业摄影测量系统的坐标测量不确定度不大于被校准系统坐标测量不确定度的三分之一，因此，可以将单相机工业摄影测量系统测得的靶标坐标作为参考值。

A.2 将双相机工业摄影测量系统在两种测量状态下测得的六组靶标坐标分别与单相机工业摄影测量系统测得的靶标坐标进行公共点转换。计算各靶标在 X 、 Y 、 Z 及点位方向上的转换偏差 δ_X 、 δ_Y 、 δ_Z 和 δ_T ，以及所有靶标在 X 、 Y 、 Z 和点位方向的均方根误差 RMS_X 、 RMS_Y 、 RMS_Z 和 RMS_T 。

A.3 设摄影测量检测场上有 m 个测量靶标，以双相机工业摄影测量系统测得的第 i 组靶标坐标与高精度单相机工业摄影测量系统测得的靶标坐标进行对比为例，其评定原理为：

$$\begin{aligned} RMS_{Xi} &= \sqrt{\frac{(\delta_{X1})^2 + (\delta_{X2})^2 + \dots + (\delta_{Xm})^2}{m-1}} \\ RMS_{Yi} &= \sqrt{\frac{(\delta_{Y1})^2 + (\delta_{Y2})^2 + \dots + (\delta_{Ym})^2}{m-1}} \dots\dots\dots (A.1) \\ RMS_{Zi} &= \sqrt{\frac{(\delta_{Z1})^2 + (\delta_{Z2})^2 + \dots + (\delta_{Zm})^2}{m-1}} \end{aligned}$$

$$RMS_{Ti} = \sqrt{RMS_{Xi}^2 + RMS_{Yi}^2 + RMS_{Zi}^2} \quad i=1,2,3,4,5,6. \dots\dots\dots (A.2)$$

$$\delta_{Xj} = X_{ij} - X_{Gj}; \delta_{Yj} = Y_{ij} - Y_{Gj}; \delta_{Zj} = Z_{ij} - Z_{Gj}; i = 2, 3, 4, 5, 6; j = 1, 2 \dots \dots m。$$

注 1: X_{ij} 、 Y_{ij} 、 Z_{ij} 表示采用双相机工业摄影测量系统在第 i 次测量中测得的第 j 个靶标的空间三维坐标；

注 2: X_{Gj} 、 Y_{Gj} 、 Z_{Gj} 表示采用单相机工业摄影测量系统测得的第 j 个靶标的空间三维坐标；

注 3: δ_X 、 δ_Y 、 δ_Z 表示双相机工业摄影测量系统测得的各靶标三维坐标与高精度单相机工业摄影测量系统坐标转换后在 X 、 Y 、 Z 方向上的偏差量， RMS_{Xi} 、 RMS_{Yi} 、 RMS_{Zi} 和 RMS_{Ti} 表示第 i 组所有靶标在 X 、 Y 、 Z 和点位方向的均方根误差。

$$\begin{aligned} RMS_X &= \frac{RMS_{X1} + RMS_{X2} + RMS_{X3} + RMS_{X4} + RMS_{X5} + RMS_{X6}}{6} \\ RMS_Y &= \frac{RMS_{Y1} + RMS_{Y2} + RMS_{Y3} + RMS_{Y4} + RMS_{Y5} + RMS_{Y6}}{6} \dots\dots\dots (A.3) \\ RMS_Z &= \frac{RMS_{Z1} + RMS_{Z2} + RMS_{Z3} + RMS_{Z4} + RMS_{Z5} + RMS_{Z6}}{6} \\ RMS_T &= \frac{RMS_{T1} + RMS_{T2} + RMS_{T3} + RMS_{T4} + RMS_{T5} + RMS_{T6}}{6} \end{aligned}$$

注 4: RMS_X 、 RMS_Y 、 RMS_Z 和 RMS_T 表示所有靶标在 X 、 Y 、 Z 和点位方向的均方根误差。

附 录 B
(规范性)
系统坐标测量重复性计算

系统坐标测量重复性计算方法如下：

B.1 被校准系统对摄影测量检测场进行 10 次测量，解算出每个靶标的坐标，取每个靶标 10 次坐标值的平均值为其参考值。

B.2 设摄影测量检测场上有 m 个靶标，第 j 个靶标 10 次测量得到的坐标参考值为：

$$\begin{aligned} X_j &= \frac{X_{1,j} + X_{2,j} + \cdots + X_{10,j}}{10} \\ Y_j &= \frac{Y_{1,j} + Y_{2,j} + \cdots + Y_{10,j}}{10} \quad \dots\dots\dots (B.1) \\ Z_j &= \frac{Z_{1,j} + Z_{2,j} + \cdots + Z_{10,j}}{10} \end{aligned}$$

B.3 以第 i 次测量重复性的计算原理为例：

$$\begin{aligned} RMS_{X_i} &= \sqrt{\frac{(\delta_{X_{i1}})^2 + (\delta_{X_{i2}})^2 + \cdots + (\delta_{X_{im}})^2}{m}} \\ RMS_{Y_i} &= \sqrt{\frac{(\delta_{Y_{i1}})^2 + (\delta_{Y_{i2}})^2 + \cdots + (\delta_{Y_{im}})^2}{m}} \quad i=1,2,3,4,5,6,7,8,9,10. \quad \dots\dots (B.2) \\ RMS_{Z_i} &= \sqrt{\frac{(\delta_{Z_{i1}})^2 + (\delta_{Z_{i2}})^2 + \cdots + (\delta_{Z_{im}})^2}{m}} \end{aligned}$$

$$\delta_{X_{ij}} = X_{i,j} - X_j; \delta_{Y_{ij}} = Y_{i,j} - Y_j; \delta_{Z_{ij}} = Z_{i,j} - Z_j; i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10; j = 1, 2, \dots, m.$$

注 1: X_{ij} 、 Y_{ij} 、 Z_{ij} 表示采用双相机工业摄影测量系统在第 i 次测量中测得的第 j 个靶标的空间三维坐标；

注 2: $\delta_{X_{ij}}$ 、 $\delta_{Y_{ij}}$ 、 $\delta_{Z_{ij}}$ 表示第 i 次测量时第 j 个靶标坐标相对于其参考值在 X 、 Y 、 Z 方向上的偏差量， RMS_{X_i} 、 RMS_{Y_i} 、 RMS_{Z_i} 表示第 i 次测量中所有靶标在 X 、 Y 、 Z 和点位方向的均方根误差。

B.4 10 组测量所有靶标在 X 、 Y 、 Z 和点位方向的均方根误差 RMS_X 、 RMS_Y 、 RMS_Z 和 RMS_T 为：

$$\begin{aligned} RMS_X &= \frac{RMS_{X_1} + RMS_{X_2} + \cdots + RMS_{X_{10}}}{10} \\ RMS_Y &= \frac{RMS_{Y_1} + RMS_{Y_2} + \cdots + RMS_{Y_{10}}}{10} \quad \dots\dots\dots (B.3) \\ RMS_Z &= \frac{RMS_{Z_1} + RMS_{Z_2} + \cdots + RMS_{Z_{10}}}{10} \\ RMS_T &= \sqrt{RMS_X^2 + RMS_Y^2 + RMS_Z^2} \end{aligned}$$

附 录 C
(资料性)
测长误差不确定度评定示例

测长误差不确定度评定示例如下：

C.1 测量方法

对双相机工业摄影测量系统的长度测量误差进行评定，测长误差为测量长度与参考长度（标准值）之差，即

$$\delta = L - L_S \dots\dots\dots (C.1)$$

式中：

δ --测长误差；

L --测量长度；

L_S --参考长度。

C.2 测量模型

由测量原理和测量方法，得到长度误差测量模型：

$$\delta = L - L_S + L_S(\delta_\alpha \theta + \alpha_S \delta_\theta) \dots\dots\dots (C.2)$$

式中：

δ_α --测量系统与标准器膨胀系数差；

α_S --标准器的膨胀系数；

θ --系统的温度与 20°C 参考温度的差值；

δ_θ --测量系统与标准器温度的差。

由于各输入量间不相关，所以合成标准不确定度的计算公式为：

$$u_c(L) = \sqrt{c_1^2 u^2(L_1) + c_2^2 u^2(\delta) + c_3^2 u^2(\alpha_S) + c_4^2 u^2(\theta) + c_5^2 u^2(\delta_\alpha) + c_6^2 u^2(\delta_\theta)} \dots\dots (C.3)$$

灵敏度系数

$$C_1 = \frac{\partial \delta}{\partial L} = 1 \qquad C_2 = \frac{\partial \delta}{\partial L_S} = -1 + (\delta_\alpha \theta + \alpha_S \delta_\theta) \approx -1$$

$$C_3 = \frac{\partial \delta}{\partial \delta_\alpha} = -L_S \cdot \theta \qquad C_4 = \frac{\partial \delta}{\partial \theta} = -L_S \cdot \delta_\alpha = 0$$

$$C_5 = \frac{\partial \delta}{\partial \alpha_S} = -L_S \cdot \delta_\theta = 0 \qquad C_6 = \frac{\partial \delta}{\partial \delta_\theta} = -L_S \cdot \alpha_S$$

$$u_c(\delta) = \sqrt{c_1^2 u^2(L_S) + c_2^2 u^2(\delta) + c_5^2 u^2(\delta_\alpha) + c_6^2 u^2(\delta_\theta)} \dots\dots\dots (C.4)$$

因 δ_α 、 δ_θ 很小， C_4 、 C_5 约为零。

C.3 标准不确定度分量分析

由测量原理可分析得到测量不确定度来源于表 C.1 所示几个方面。

表 C.1 测量不确定度来源

输入标准不确定度 $u(x_i)$	不确定度来源	不确定度分类
u_l	测量重复性引入的标准不确定度 u_l	
$u_{(refi)}$	参考值引入的标准测量不确定度分量 $u_{(refi)}$	
$u(\alpha)$	标尺膨胀系数差引入的标准不确定度 $u(\alpha)$	
$u(t)$	标尺温度差引入的标准不确定度 $u(t)$	

C.4 典型测量范围测长误差校准的不确定度评定

双相机工业摄影测量系统进行测长误差的不确定度评定示例如下：

a) 长度测量重复性引起的标准不确定分量 u_l 的评定。

测量重复性引起的标准不确定度 u_l ，可以通过连续测量得到，采用 A 类方法进行评定。对长度为 800mm 的标尺重复测量 10 次，得到测量列：

表 C.2 典型测量范围测量列示例

单位：mm

序号	1	2	3	4	5
测量值	800.002	800.008	799.998	799.997	800.005
序号	6	7	8	9	10
测量值	800.004	800.007	799.997	799.996	800.006

测得值的平均值为 $L = \frac{1}{N} \sum_{N=1}^N L_i = 800.002 \text{mm}$

实验标准差为 $s = \sqrt{\frac{\sum (L_i - \bar{L})^2}{N-1}} = 5 \mu\text{m}$

标准不确定度 $u_l = s = 5 \mu\text{m}$

b) 由标尺引入的标准测量不确定度分量 $u_{(refi)}$

由标尺引入的标准测量不确定度分量 $u_{(refi)}$ 可由校准证书获得扩展不确定度为 $U=4.4 \mu\text{m}$ ，灵敏度系数为 1，则

$$u_{(refi)} = c \times \frac{U}{k} = 1 \times 2.2 \mu\text{m} \quad (\text{C.5})$$

c) 标尺膨胀系数差引入的标准不确定度 $u(\alpha)$

校准环境中温度要求为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，取其半宽则 $\Delta t = 2^\circ\text{C}$ ，服从均匀分布， k 取 $\sqrt{3}$ ，实验中标尺是由膨胀系数为 $0.5 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 的碳纤维材料制成，灵敏度系数为 $C_3 = \frac{\partial \delta}{\partial \delta_\alpha} = -L_s \cdot \theta$ 。

所以

$$u(\alpha) = c \times \frac{\Delta t}{L} = \frac{(-L \cdot \alpha \cdot \Delta t)}{L} = \frac{-1.3 \times 2 \times 0.5}{\sqrt{3}} = -0.75 \mu\text{m} \quad (\text{C.6})$$

d) 标尺温度差引入的标准不确定度 $u(t)$

校准环境中的温度要求为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，试验中的标尺是由膨胀系数为 $0.5\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ 的碳纤维材料制成，充分等温后，温度差为 $\Delta t = 0.05^\circ\text{C}$ ，服从均匀分布， k 取 $\sqrt{3}$ ，灵敏系数为 $C_6 = \frac{\partial \delta}{\partial \delta_\theta} = -L_S \cdot \alpha_S$

所以

$$u(t) = c \times \frac{\Delta t}{k} = \frac{-L \cdot \alpha \cdot \Delta t}{k} = \frac{-1.3 \times 0.5 \times 0.05}{\sqrt{3}} = -0.019\mu\text{m} \quad (\text{C.7})$$

e) 合成标准不确定度 u_c

经分析，以上各不确定度分量不相关

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_{\text{refi}}^2 + u_\alpha^2 + u_t^2} = 5.5\mu\text{m} \quad (\text{C.8})$$

f) 扩展标准不确定度 u_c

$$\text{取 } k=2, U = k \times u_c = 11.0\mu\text{m} \quad (\text{C.9})$$

C.5 扩展测量范围测长误差校准的不确定度评定

双相机工业摄影测量系统进行扩展测量范围（实验中实际取值为 7145.027mm ）测长误差的不确定度评定示例如下：

a) 测量重复性引起的标准不确定 u_1 的评定

测量重复性引起的标准不确定度 u_1 ，可以通过连续测量得到，采用 A 类方法进行评定。采用 7.3.2 的方法重复测量 10 次，得到测量列：

表 C.3 扩展测量范围测量列示例

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值	7145.034	7145.033	7145.034	7145.036	7145.030	7145.024	7145.025	7145.026	7145.024	7145.018

计算实验标准差

$$s = \sqrt{\frac{\sum (L_i - \bar{L})^2}{N-1}} = 6\mu\text{m}$$

标准不确定度 $u_1 = s = 6\mu\text{m}$

b) 由测长机测长（以激光干涉仪测长为例）所引入的不确定度 $u_{(\text{refi})}$

由激光干涉仪所引入的不确定度可由证书查询获得，激光干涉仪校准结果示值误差小于 $\pm(0.03 + 1.5L)\mu\text{m}$ ， L 为测量长度，单位为 m ，服从均匀分布，取 $k = \sqrt{3}$ 。灵敏系数为 $c=1$ 。

$$u_{(\text{refi})} = \frac{0.03 + 1.5 \times 7.15}{\sqrt{3}} = 6.21\mu\text{m}$$

c) 由标尺热膨胀系数所引入的不确定度 $u_{(\alpha)}$

校准环境中温度要求为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，取其半宽则 $\Delta t = 2^\circ\text{C}$ ，实验中标尺是由碳纤维材料制成（膨胀系数为 $\Delta\alpha = 0.5\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ），服从均匀分布，取 $k = \sqrt{3}$ ，灵敏度系数为 $C_3 = -L_S \cdot \theta$ 。

所以

$$u_{(\alpha)} = c \times \frac{\Delta\alpha}{k} = \frac{-L \cdot \theta \cdot \Delta\alpha}{k} = \frac{7.15 \times 2 \times 0.5}{\sqrt{3}} = -4.1 \mu\text{m}$$

d) 由标尺温度差所引入的不确定度分量 $u_{(t)}$

校准环境中温度要求为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，实验中标尺是由膨胀系数为 $0.5 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 的碳纤维材料制成，充分等温后，两者的温度差为 $\Delta t = 0.05^\circ\text{C}$ ，服从均匀分布，取 $k = \sqrt{3}$ 。

灵敏系数为 $c=1$ 。

$$C_6 = -Ls \cdot \alpha s$$

所以

$$u_{(t)} = \frac{c \times \Delta t}{k} = \frac{-L \cdot \alpha \cdot \Delta t}{k} = \frac{-7.15 \times 0.5 \times 0.05}{\sqrt{3}} = -0.18 \mu\text{m}$$

e) 合成标准不确定度 u_c

经分析，以上各不确定度分量不相关。

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_{refi}^2 + u_\alpha^2 + u_t^2} = 9.6 \mu\text{m}$$

f) 扩展不确定度

取 $k=2$ ，

$$U = k \times u_c = 19.2 \mu\text{m}$$

双相机工业摄影测量系统的长度测量误差：

评定的测量长度 800mm ：假定允许长度差为 $34.5 \mu\text{m}$ ，测量不定度为 $U=11.0 \mu\text{m}$ ， $k=2$ 。测量不定度为 U 与长度允许误差之比小于 $1/3$ 。

评定的测量长度 7145.027mm ：假定允许长度差为 $122.2 \mu\text{m}$ ，测量不定度为 $U=19.2 \mu\text{m}$ ， $k=2$ 。测量不定度为 U 与长度允许误差之比小于 $1/6$ 。

满足校准要求。

附录 D
(资料性)
校准证书样例

校准证书样例如下：

<h1>校准单位名称</h1>			
校准单位英文名称			
<h2>校准证书</h2>			
Calibration Certificate			
证书编号	_____号		
Certificate No.			
委托单位	_____		
Client			
样品名称	_____		
Name Of Sample			
型号/规格	_____		
Type/Specification			
出厂编号	_____		
Serial No.			
制造单位	_____		
Manufacturer			
校准依据	_____		
Calibration Regulation			
(校准专用章) (Stamp)	批准人	_____	
	Approved By		
	核验员	_____	
	Checked By		
	校准员	_____	
	Calibration By		
校准日期	年	月	日
Date Of Calibration	Year	Month	Day
接样日期	年	月	日
Rcvd Date	Year	Month	Day
计量检定机构授权证书号:	电话号码:		
Authorized Certificate No.	Office:		
地址:	电子邮件:		
Address:	E-mail		
邮编:			
Post Code.			

校准单位名称
Name

证书编号：_____号
Certificate No.

校准单位名称

Name

授权单位：
Authorized
Unit:

授权证书号： (2015) 13701号
Authorized Certificate No.

本次校准的技术依据（代号、名称）：

Reference Documents For The Verification (Code, Name)

本次校准所使用的主要计量标准器具：

Main Measurement Standard Used in The Verification

名称 Name	编号 No.	测量范围 Measuring range	不确定度或准确度等级或最大允许误差 Uncertainty/accuracy/maximum permissible error	证书号 Certificate No.	有效期至 Valid Date To

溯源性（发证机构）：本次校准使用的计量标准均可溯源至国家计量基准或社会公用计量标准。

Traceability

Standards of Measurement Used in The Verification Can Be Traceable to China National Standards of Measurement or Public Standards of Measurement.

校准环境条件：

Environmental Conditions of Verification

校准地点 Verification Place	温度(℃) Temperature	湿度(%RH) Humidity	其它 Others

校准数据 / 结果

Data / Results of Verification

数据结果请见下页

备注：1、本证书未加盖检定单位的检校专用章无效。

It's Invalid That The Certificate Cannot Be Stamped By The Calibration Units.

2、本证书无批准人、核验员、检定员签名无效。

Without The Signature of Approver, Verifier and Checker on The Certificate Is Invalid.

3、本证书涂改无效。

It's Invalid That The Certificate Is Altered.

4、复制本证书未重新加盖检定单位的校准专用章无效。

It's Invalid That The Certificate Is Copied If Not Be Stamped By The Calibration Units.

5、本校准结论，仅对受校样品的本次受检有效。

It's Effect That The Results of This Report Relate Only to The Sample(s) Tested.

证书续页

Continue Page of Certificate

校准单位名称
Name

证书编号: _____ 号
Certificate No.

校准数据 / 结果

Data / Results of Calibration

1、坐标测量精度

$RMS_T =$ _____ mm

2、坐标测量重复精度 单位: mm

RMS_X	RMS_Y	RMS_Z	RMS_T

3、典型测量范围内测量误差 单位: mm

序号	标尺长度	测量长度	偏差值
位置1			
位置2			
位置3			
位置4			
位置5			
位置6			
位置7			
位置8			
位置9			
位置10			

序号	标尺长度	测量长度	偏差值
位置11			
位置12			
位置13			
位置14			
位置15			
位置16			
位置17			
位置18			
位置19			

4、扩展测量范围内测量误差 单位: mm

标称值	实测值	偏差	标准偏差

标称值	实测值	偏差	标准偏差

以下空白

Blank below

参 考 文 献

- [1] 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》
 - [2] GB/T 2001.5—2017 《标准编写规则 第5部分：规范标准》
 - [3] GB/T 2004.1—2016 《团体标准化 第1部分 良好行为指南》
 - [4] GB/T 2004.2—2018 《团体标准化 第2部分 良好行为指南》
 - [5] GB/T 15624—2011 《服务标准化工作指南》
 - [6] GB/T 24421.1—2009 《服务业组织标准化工作指南 第1部分：基本要求》
 - [7] GB/T 24421.3—2009 《服务业组织标准化工作指南 第3部分：标准编写》
 - [8] GB/T 24421.4—2009 《服务业组织标准化工作指南 第4部分：标准实施及评价》
 - [9] GB/T 28222—2011 《服务标准编写通则》
-