

必选

# 塑造智慧变革



HEXAGON  
海克斯康



北京  
国家会议中心

2018年  
9月10-12日

[2018.hexagonchina.com.cn](http://2018.hexagonchina.com.cn)

# Leica 地面式三维扫描仪、激光跟踪仪校准方法研究

---

孔令辉 中国测试技术研究院

日期 2018.09.10

# 目录

必选

- a) 地面式三维激光扫描仪、激光跟踪仪校准的意义
- b) 地面式三维激光扫描仪、激光跟踪仪校准国内外现状
- c) 中国测试技术研究院60m室内大长度标准基线场介绍
- d) 本单位对扫描仪、跟踪仪校准方法的研究
- e) 在对地面式三维扫描仪、激光跟踪仪校准时应注意的问题
- f) 目前地面式三维扫描仪、激光跟踪仪计量校准的局限以及技术发展的趋势

# Leica 地面式三维扫描仪、激光跟踪仪校准方法研究

必选

## 一、地面式三维激光扫描仪、激光跟踪仪校准的意义

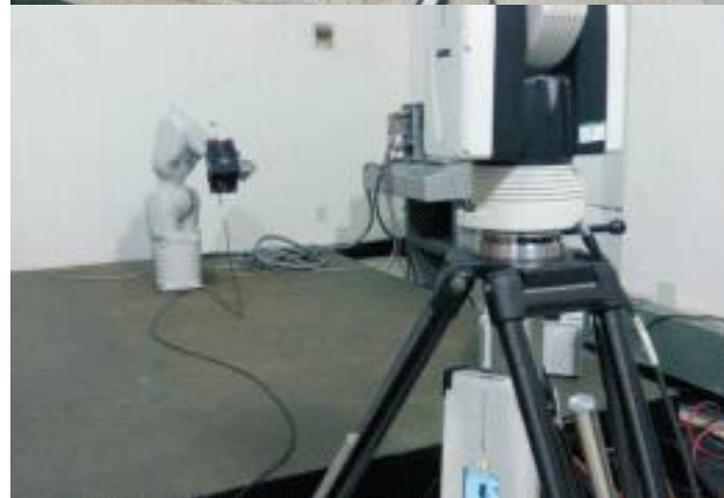
- 地面式三维激光扫描仪主要用于大场景三维扫描项目，在数字化工厂、文物古建重建、变形监测等诸多方面已经得到了极为广泛的应用。但其作为测量、测绘仪器在使用过程中存在精度下降、丢失等问题，对于变形监测等一些精密测量方面会造成较大影响，因此需要对该类设备做一个定期的检测校准，以保证仪器设备精度在合格范围之内。此外从计量体系上要求，测量设备在使用过程中应对具有有效的溯源证书来确保仪器设备满足测量规范要求。（目前越来越多的客户已经注意到这一点，并对测量服务第三方提出了设备溯源要求）。



- 中国测试技术研究院精密工程测量（储罐变形监测）

## Leica 地面式三维扫描仪、激光跟踪仪校准方法研究

- 激光跟踪仪是高精度的空间坐标测量仪器，对于该类设备主要用于测量精度非常高的领域，如飞机制造装配、风机装配等。此类设备也面临着和地面式三维激光扫描仪同样的溯源校准问题。该类设备的主要客户集中在国防军工、大型国企等企事业单位，因此对激光跟踪仪设备的第三方计量校准需求很多。
- 质量管理体系的愈发完善，也要求更多的客户需要测量服务提供商能够提供激光跟踪仪设备的溯源校准证书以证明设备使用的有效性



- 中国测试技术研究院工业机器人性能检测 (CNAS检测资质)

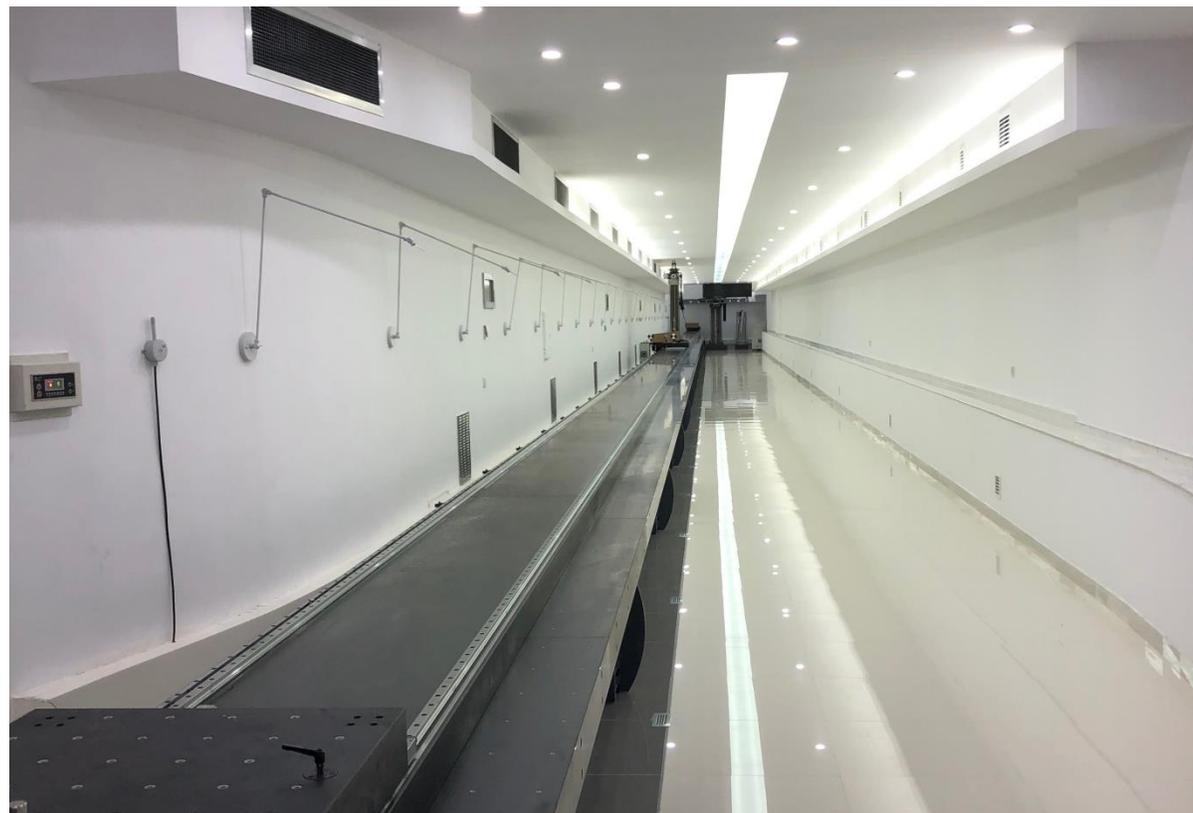
- 中国测试技术研究院精密设备形位公差尺寸检测

# Leica 地面式三维扫描仪、激光跟踪仪校准方法研究

## 二、地面式三维激光扫描仪、激光跟踪仪校准国内外现状

- 目前针对地面三维扫描仪、激光跟踪仪这类高技术含量的测量设备国外各生产商都有自己的检测校准实验室。设备在出厂前均会做厂商自己的检测校准。
- 国内现阶段可以对上述设备进行第三方计量校准的单位主要有：中国计量科学研究院（NIM）、中国测试技术研究院（NT）、中航工业北京长城计量测试研究所（304所）、上海市计量院（SIMT）等数家单位，其均采用室内大长度标准基线场作为标准装置来对设备进行溯源校准。
- 国内各主要计量机构大长度标准基线场装置主要参数

单位	NIM	NT	304 所	SIMT
量程	75m	56m	30m	50m
方法	气浮导轨	直线导轨	气浮导轨	气浮导轨



• 中国测试技术研究院60m室内大长度标准基线场近照

# Leica 地面式三维扫描仪、激光跟踪仪校准方法研究

## 三、中国测试技术研究院60m室内大长度标准基线场介绍

- 中国测试技术研究院机械研究所从建所伊始一直致力于本院基准、标准装置的研究和搭建、从事高精度测量仪器的研发和制造。对于本院室内大长度标准基线场，攻克技术难关采用了与其他兄弟院所不同的导轨运行方式——直线导轨方式。避免了气浮导轨在稳定性和形变方面不利影响。
- 标准基线场总长60m，有效测量距离57m，建于本院实验基地的山洞实验室中，基础地基与岩石层接触，并有防震隔层处理，平台基座采用14块花岗岩拼接，稳定性优良。
- 直线导轨安装直线度：0.15mm/全长
- 直线导轨双轨平行度：0.08mm/全长
- 光路设计采用：三光束激光干涉仪（标准器选用惠普5519B高精度激光干涉仪）减小阿贝误差



### 主要参数

- 直线导轨全长57m;
- 电动平台移动速度：0~200mm/s，连续可调;
- 电动平台净运载能力：100kg
- 电动平台加速度 200mm/s<sup>2</sup>
- 电动平台定位精度 (0.03+0.03L) mm;
- 电动平台重复定位精度：0.03mm;
- 电动平台运动分辨力：0.05mm

# Leica 地面式三维扫描仪、激光跟踪仪校准方法研究

## 三、中国测试技术研究院60m室内大长度标准基线场介绍



直线导轨及电动滑动平台



短标尺及标准圆轨迹发生器



激光干涉仪三光路系统

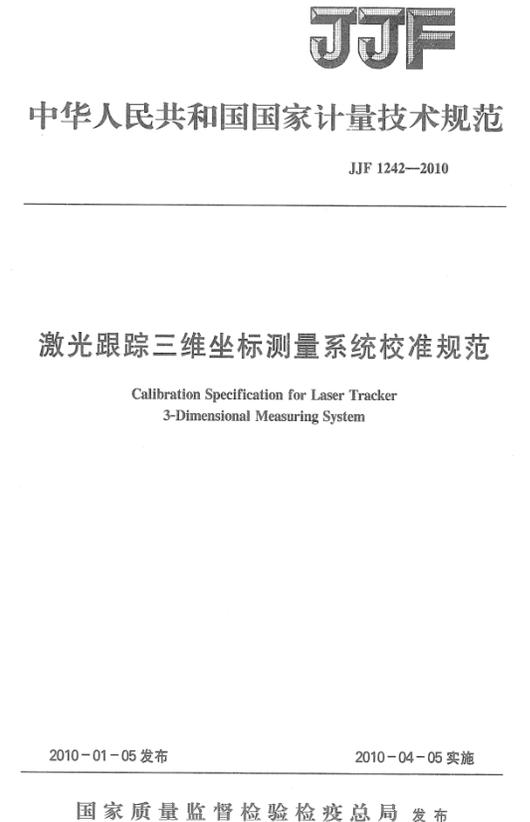
# Leica 地面式三维扫描仪、激光跟踪仪校准方法研究

## 四、中国测试技术研究院对扫描仪、跟踪仪校准方法的研究

- 依据技术规范：
  - 1、JJF 1406-2013 《地面激光扫描仪校准规范》
  - 2、JJF 1242-2010 《激光跟踪三维坐标测量系统校准规范》

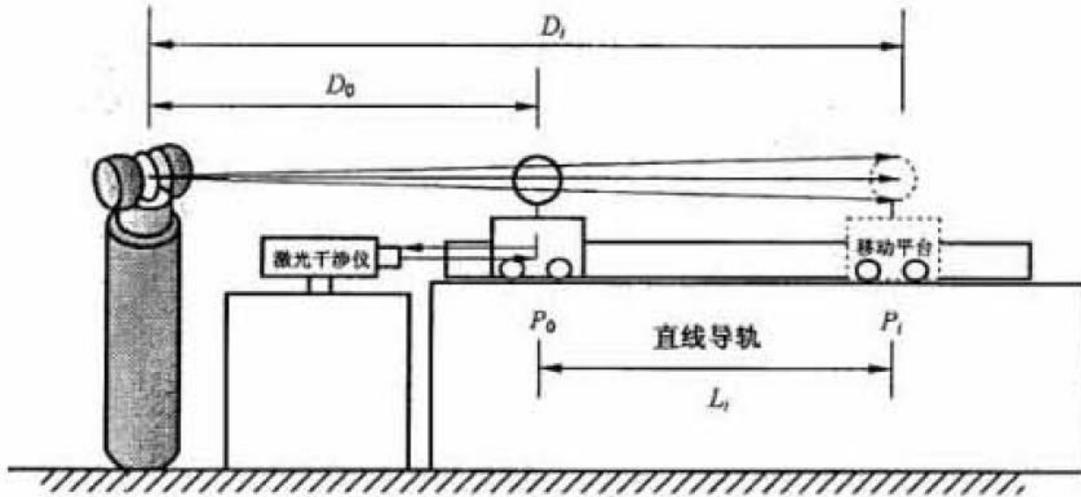
本院对上述两项仪器第三方计量检测内容

地面式三维激光扫描仪	激光跟踪仪
径向长度示值误差	点对点长度示值误差
径向重复性	距离示值误差
标靶重复性	动态速度误差
/	动态示值误差



# Leica 地面式三维扫描仪、激光跟踪仪校准方法研究

## • 径向距离校准示意图



- 将标靶安置在移动平台上面，在直线导轨的一端安置扫描仪，调节扫描仪的位置和高度，使其中心大致处于标靶中心运动轨迹的延长线上。
- 扫描仪至标靶的初始位置应大于最小测量距离，标靶沿导轨移动到不同测量位置，测量位置数不应小于5个，并在测量范围内大致均匀分布
- 对应各校准位置重复扫描测量三次，分别计算径向距离示值误差 ( $\Delta L_1$ 、 $\Delta L_2$ 、 $\Delta L_3$ )，取最大值  $\Delta L_{\max} = \max(\Delta L_1, \Delta L_2, \Delta L_3)$  作为该位置的校准结果。

**径向距离示值误差公式：**  $\Delta L = L_i - L_{si}$

式中： $\Delta L$ ——径向距离示值误差，mm；

$L_i$ ——径向距离测得值，mm；

$L_{si}$ ——径向距离参考值，mm；

$X_i, Y_i, Z_i$ ——各位置  $P_i$  处标靶中心坐标值，mm；

$X_0, Y_0, Z_0$ ——初始位置  $P_0$  处标靶中心坐标值，mm；

## 径向重复性

在径向距离示值误差校准过程中，在最远测量位置处对标靶进行了多次重复扫描，按下式计算径向重复性。

其中：

式中：

$$s(D) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}{n-1}}$$

$s(D)$ ——径向重复性，mm；

$D_i$ ——绝对距离测得值，mm；

$\bar{D}$ ——绝对距离平均值，mm；

$N$ ——测量次数，一般不少于10次。

# Leica 地面式三维扫描仪、激光跟踪仪校准方法研究

## • 标靶重复性

- 利用下式计算标靶重复性:

$$s(\delta) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}}$$

其中:  $\delta_i = \sqrt{(X_i - \bar{X})^2 + (Y_i - \bar{Y})^2 + (Z_i - \bar{Z})^2}$

式中:  $s(\delta)$ ——标靶重复性, mm;

$\delta_i$  ——标靶中心点偏差, mm;

$\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$ 、 $\bar{Z}$  ——各轴系坐标分量平均值, mm;

$n$ ——测量次数, 一般不少于10次。

表 1 标准不确定度一览表

标准不确定度分量 $u_i (\Delta L_i)$	不确定度来源	标准不确定度值 $u (X)$	$K$ 值
$u_1 (L_{si})$	距离参考值	0.01 $\mu$ m	1
$u_2 (L_i)$	距离测量值	0.292mm	1
$u_{21} (L_i)$	球型标靶温度变化测量误差	0.002mm	$\sqrt{3}$
$u_{22} (L_i)$	球型标靶形状误差	0.057mm	$\sqrt{3}$
$u_{23} (L_i)$	测量重复性引入的标准不确定度分量	0.286mm	1

4.4 合成不确定度为:

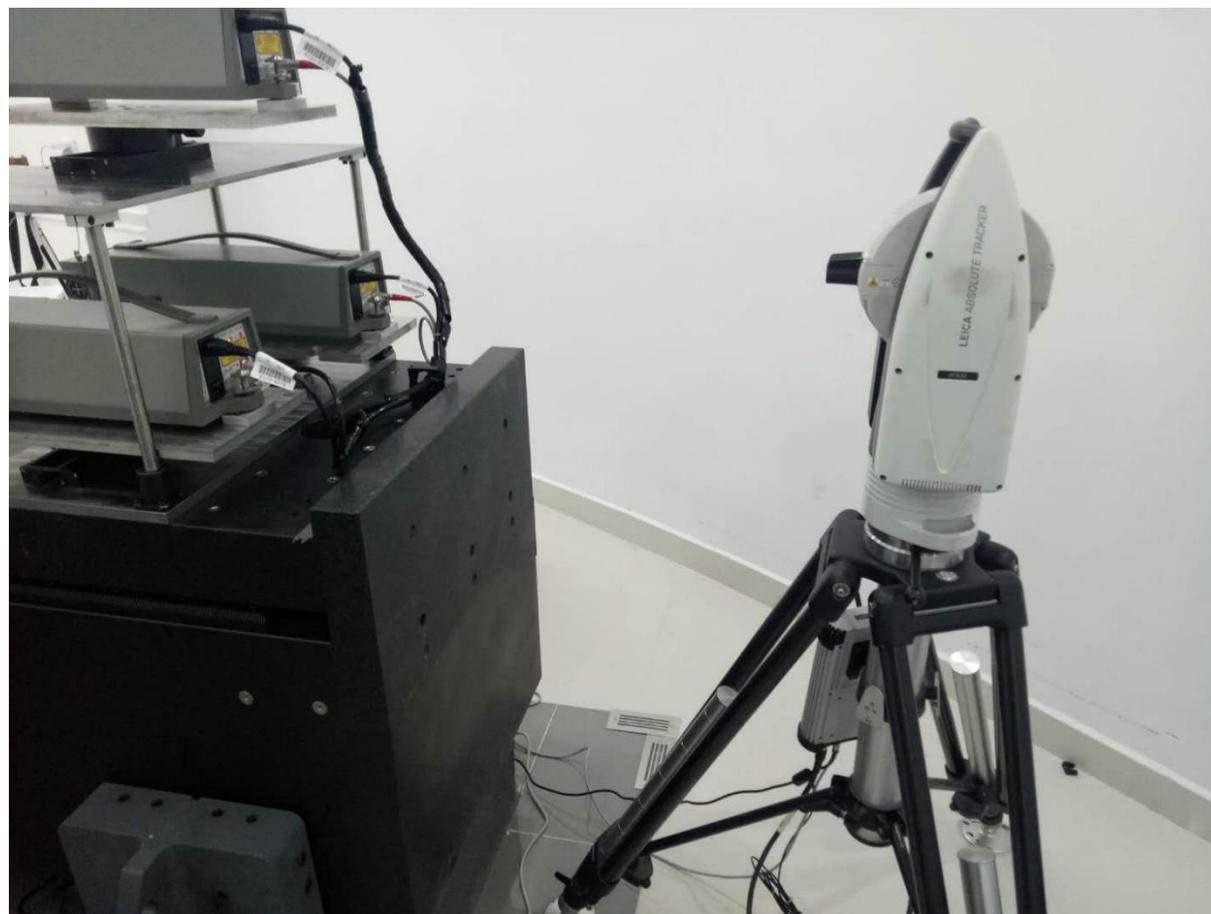
$$u^2 (\Delta L_i) = u_1^2 (L_{si}) + u_2^2 (L_i)$$

$$u^2 (\Delta L_i) = 0.292\text{mm}^2$$

4.4 扩展不确定度:

$$U=0.6\text{mm}, (k=2)$$

#### 四、中国测试技术研究院对扫描仪、跟踪仪校准方法的研究



# Leica 地面式三维扫描仪、激光跟踪仪校准方法研究

## • 径向长度示值误差第一组数据

X0	Y0	Z0	距离mm	Xi	Yi	Zi	标准值	mm	
-1525.173	2070.866	-273.975	5000	-4582.197	6027.212	-273.645	4999.806948	4999.851	-0.0440520
			10000	-7639.202	9983.586	-273.748	9999.624416	9999.748	-0.1235839
			15000	-10695.708	13940.24	-273.611	14999.35599	14999.631	-0.2750053
			20000	-13752.648	17896.69	-273.487	19999.19624	19999.539	-0.3427563
			25000	-16809.858	21852.86	-273.073	24998.97843	24999.449	-0.4705700
			30000	-19866.211	25809.59	-274.202	29998.68055	29999.371	-0.6904532
			35000	-22923.237	29766.45	-273.651	34998.88911	34999.289	-0.3998862
			40000	-25980.56	33722.23	-272.681	39998.43732	39999.187	-0.7496810
			45000	-29036.045	37680.2	-274.353	44998.58526	44999.07	-0.4847439
			50000	-32093.971	41636.17	-273.49	49998.64928	49998.875	-0.2257242

## • 径向长度示值误差第三组数据

X0	Y0	Z0	距离mm	Xi	Yi	Zi	标准值	mm	
-1525.173	2070.866	-273.975	5000	-4582.275	6027.328	-273.561	4999.946436	4999.851	0.0954364
			10000	-7639.184	9983.706	-273.728	9999.708367	9999.748	-0.0396325
			15000	-10695.805	13940.39	-273.659	14999.53558	14999.631	-0.0954196
			20000	-13752.767	17896.67	-273.506	19999.2508	19999.539	-0.2882005
			25000	-16810.001	21852.71	-273.182	24998.94241	24999.449	-0.5065856
			30000	-19866.266	25809.45	-274.309	29998.6026	29999.371	-0.7684021
			35000	-22923.239	29766.35	-273.585	34998.81516	34999.289	-0.4738388
			40000	-25980.533	33722.36	-272.781	39998.52368	39999.187	-0.6633210
			45000	-29036.104	37680.16	-274.412	44998.59126	44999.07	-0.4787434
			50000	-32093.769	41636.17	-273.44	49998.52578	49998.875	-0.3492247

## • 径向长度示值误差第二组数据

X0	Y0	Z0	距离mm	Xi	Yi	Zi	标准值	mm	
-1525.173	2070.866	-273.975	5000	-4582.231	6027.323	-273.564	4999.915577	4999.851	0.0645770
			10000	-7639.219	9983.632	-273.724	9999.671211	9999.748	-0.0767892
			15000	-10695.809	13940.32	-273.635	14999.48184	14999.631	-0.1491576
			20000	-13752.717	17896.68	-273.514	19999.23131	19999.539	-0.3076923
			25000	-16809.86	21852.74	-273.139	24998.88074	24999.449	-0.5682634
			30000	-19866.383	25809.32	-274.204	29998.56889	29999.371	-0.8021150
			35000	-22923.035	29766.29	-273.626	34998.64533	34999.289	-0.6436690
			40000	-25980.604	33722.36	-272.731	39998.56709	39999.187	-0.6199096
			45000	-29035.849	37680.11	-274.462	44998.39579	44999.07	-0.6742099
			50000	-32093.899	41636.22	-273.362	49998.64482	49998.875	-0.2301766

第一组	第二组	第三组	径向长度示值误差mm
-0.0440520	0.0645770	0.0954364	0.0954364
-0.1235839	-0.0767892	-0.0396325	-0.0396325
-0.2750053	-0.1491576	-0.0954196	-0.0954196
-0.3427563	-0.3076923	-0.2882005	-0.2882005
-0.4705700	-0.5682634	-0.5065856	-0.4705700
-0.6904532	-0.8021150	-0.7684021	-0.6904532
-0.3998862	-0.6436690	-0.4738388	-0.3998862
-0.7496810	-0.6199096	-0.6633210	-0.6199096
-0.4847439	-0.6742099	-0.4787434	-0.4787434
-0.2257242	-0.2301766	-0.3492247	-0.2257242

## Leica 地面式三维扫描仪、激光跟踪仪校准方法研究

	径向长度示值误差:			
	0628-3	0628-4	0629-1	0629-2
5m	0.09	-0.09	0.10	0.22
10m	-0.30	-0.44	-0.04	0.17
15m	-0.55	-0.70	-0.10	-0.02
20m	-0.73	-0.85	-0.29	-0.25
25m	-0.92	-1.09	-0.47	-0.44
30m	-1.06	-1.05	-0.69	-0.74
35m	-0.83	-0.92	-0.40	-0.62
40m	-0.87	-0.99	-0.62	-0.68
45m	-0.85	-0.98	-0.48	-0.72
50m	-0.46	-0.63	-0.23	-0.59

# Leica 地面式三维扫描仪、激光跟踪仪校准方法研究

地面式三维激光扫描仪校准原始记录 受控编号: JL/12/JX5103  
 送检单位 中国测试技术研究院 校准员 孔金辉  
 核验员 胡常安 记录编号  
 样品名称 地面式三维激光扫描仪 型号 P40  
 编号 1850814 生产厂家 Leica  
 标准器名称 激光干涉仪 型号 5519B 编号 US52145376  
 最大允许误差/不确定度/等级 标准器证书号  
 标准器有效期至 2020 年 04 月 26 日 温度 20.5 °C 湿度  
 60 %RH 依据的技术文件 JJF1406-2013 地面激光扫描仪校准规范  
 证书编号 校准字第 号 校准日期 年  
 月 日 测量结果的不确定度  $U=0.3\text{mm}$ ,  $k=2$

表 1 径向距离示值误差 单位: mm

序号	参考值	第一次		第二次		第三次	
		测得值	示值误差	测得值	示值误差	测得值	示值误差
1	4999.851	4999.807	-0.044	4999.916	0.065	4999.946	0.095
2	9999.748	9999.624	-0.124	9999.671	-0.077	9999.708	-0.040
3	14999.631	14999.356	-0.275	14999.482	-0.149	14999.536	-0.095
4	19999.539	19999.196	-0.343	19999.231	-0.308	19999.251	-0.288
5	24999.449	24998.978	-0.471	24998.881	-0.568	24998.942	-0.507
6	29999.371	29998.681	-0.690	29998.569	-0.802	29998.603	-0.768
7	34999.289	34998.889	-0.400	34998.645	-0.644	34998.815	-0.474
8	39999.187	39998.437	-0.750	39998.567	-0.620	39998.524	-0.663
9	44999.07	44998.585	-0.485	44998.396	-0.674	44998.591	-0.479
10	49998.875	49998.649	-0.226	49998.645	-0.230	49998.526	-0.349

表 2 径向重复性及标靶重复性

序号	空间坐标			绝对距离	点位偏差 $\delta$
	X	Y	Z		
1	-32093.971	41636.173	-273.49	49998.649	-0.226
2	-32093.899	41636.223	-273.362	49998.645	-0.230
3	-32093.769	41636.173	-273.44	49998.526	-0.349
4	-32093.929	41636.429	-273.357	49998.826	-0.049
5	-32093.88	41636.276	-273.244	49998.675	-0.200
6	-32093.708	41636.372	-273.323	49998.646	-0.229
7	-32093.59	41636.539	-273.347	49998.706	-0.169
8	-32093.384	41636.436	-273.405	49998.499	-0.376
9	-32093.693	41636.478	-273.416	49998.721	-0.154
10	-32093.525	41636.383	-273.426	49998.543	-0.332
平均值	-32093.7348	41636.3482	-273.381	49998.649	-0.226
径向重复性	$s(D) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}{n-1}}$			0.100	
标靶重复性	$s(\delta) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n}}$			0.230	

校准结果:

序号	主要校准项目	校准结果
1	径向距离示值误差	见表 1
2	径向重复性	0.100mm
3	标靶重复性	0.230mm

# Leica 地面式三维扫描仪、激光跟踪仪校准方法研究

中国测试技术研究院校准证书  
Calibration Certificate-NIMTT

证书编号:  
Certificate No.

## 校准数据/结果

Data / Results of Calibration

1、径向距离示值误差 单位 (mm)

序号	参考值	第一次		第二次		第三次	
		测得值	示值误差	测得值	示值误差	测得值	示值误差
1	4999.851	4999.807	-0.044	4999.916	0.065	4999.946	0.095
2	9999.748	9999.624	-0.124	9999.671	-0.077	9999.708	-0.040
3	14999.631	14999.356	-0.275	14999.482	-0.149	14999.536	-0.095
4	19999.539	19999.196	-0.343	19999.231	-0.308	19999.251	-0.288
5	24999.449	24998.978	-0.471	24998.881	-0.568	24998.942	-0.507
6	29999.371	29998.681	-0.690	29998.569	-0.802	29998.603	-0.768
7	34999.289	34998.889	-0.400	34998.645	-0.644	34998.815	-0.474
8	39999.187	39998.437	-0.750	39998.567	-0.620	39998.524	-0.663
9	44999.070	44998.585	-0.485	44998.396	-0.674	44998.591	-0.479
10	49998.875	49998.649	-0.226	49998.645	-0.230	49998.526	-0.349

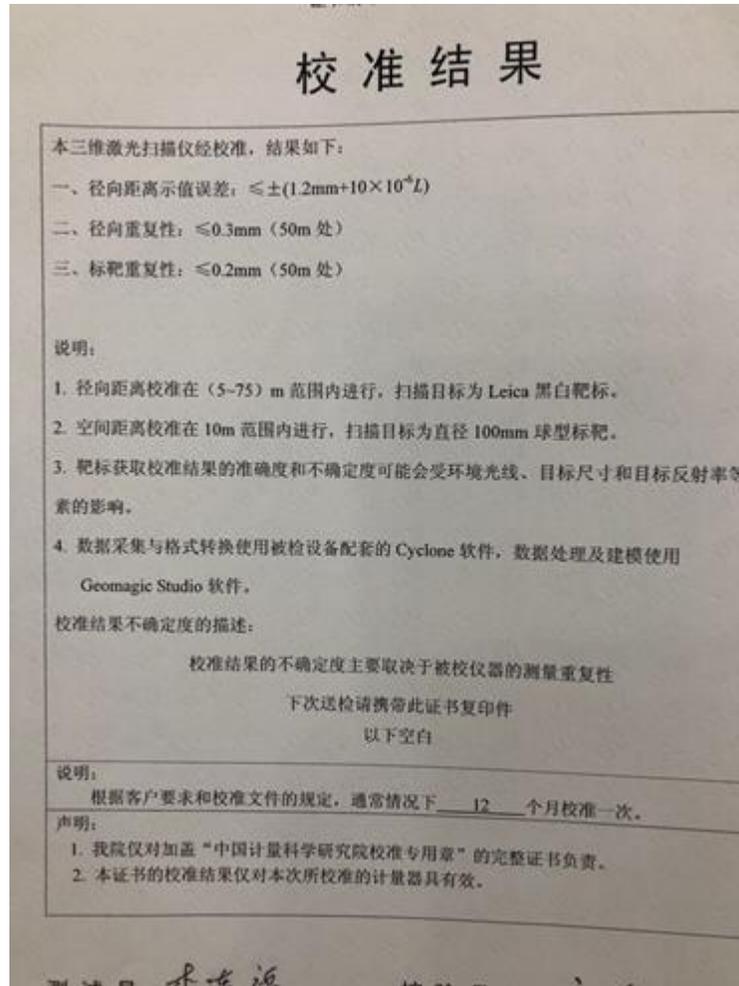
2、径向距离测量重复性 (50m处) 单位 (mm)

序号	绝对距离	点位偏差
1	49998.649	-0.226
2	49998.645	-0.230
3	49998.526	-0.349
4	49998.826	-0.049
5	49998.675	-0.200
6	49998.646	-0.229
7	49998.706	-0.169
8	49998.499	-0.376
9	49998.721	-0.154
10	49998.543	-0.332
平均值	49998.644	-0.226
径向重复性		0.10

3、标靶重复性 (50m处): 0.23mm

测量结果的不确定度:  
The Uncertainty Of the Measurement:

本次径向误差测量不确定度为:  $U=0.3\text{mm}, (k=2)$



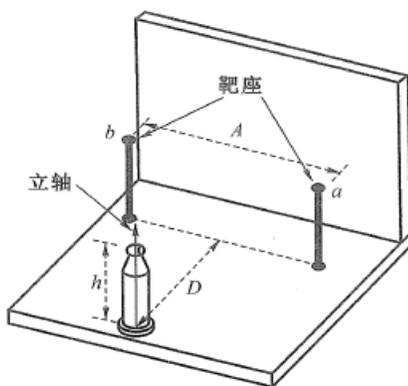
# Leica 地面式三维扫描仪、激光跟踪仪校准方法研究

- 激光跟踪仪计量特性：
- 1、点对点长度示值误差

测量标准器：短标尺（导轨测量系统或刚性结构的经校准的标准器），本单位采用激光干涉仪导轨测量系统，在红圈内安装API激光干涉仪、导轨、反射镜组及反射标靶。

表 1 水平长度测量

位置序号	距离 $D$ (近似值)	相对靶座 $a$ 的测量水平角 ( $^{\circ}$ )
1	0.1A	任意
2	1.2A	0
3	1.2A	90
4	1.2A	180
5	1.2A	270
6	2.7A	0
7	2.7A	90
8	2.7A	180
9	2.7A	270



7.1.1 水平长度测量。短标尺按照表 1 所示水平方向设置。距离  $A$  应当不小于 2.3 m。激光跟踪仪的高度  $h$ ，应当大约与靶座  $a$  和  $b$  的高度一样。 $D$  表示参考长度与激光跟踪仪之间的距离。此外，激光跟踪仪的安装应当使其与靶座  $a$  和  $b$  的距离近似相等。

激光跟踪仪测量短标尺在水平、垂直、对角线（左对角、右对角）方位的示值与参考值之差

# Leica 地面式三维扫描仪、激光跟踪仪校准方法研究

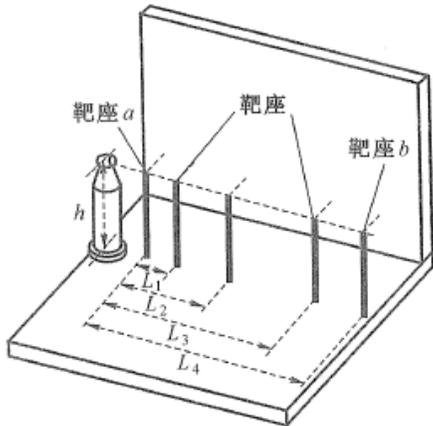
- 2、距离示值误差

测量标准器：长标尺（60m长度基线场）

- 对应各校准位置重复扫描测量三次，分别计算径向距离示值误差（ $\Delta L_1$ 、 $\Delta L_2$ 、 $\Delta L_3$ ），取最大值  $\Delta L_{max} = \max(\Delta L_1, \Delta L_2, \Delta L_3)$  作为该位置的校准结果。

表 6 距离测量

位置 序号	参考长度 [注释 (1)]	靶座 a 和 b 连线的 天顶角 (°)
1	$L_1 = 18\%R$	90
2	$L_2 = 36\%R$	90
3	$L_3 = 54\%R$	90
4	$L_4 = 72\%R$	90
5	用户选择	90
6	用户选择	90



注释 (1):  $R =$  最大测程。



# Leica 地面式三维扫描仪、激光跟踪仪校准方法研究

## • 3、动态速度极限、动态示值误差、动态示值误差变动量

### 测量标准器：标准圆发生器

#### 7.5 动态速度极限

将球面反射靶标安置在标准圆轨迹发生器的靶座上，激光跟踪仪安装在与球面反射靶标运动平面垂直的方向，距离 3 m。

激光跟踪仪照准球面反射靶标。逐步增加旋转速度，至激光跟踪仪脱离跟踪状态。此时标准圆轨迹发生器显示的转速  $R_m$ ，则该激光跟踪仪的动态速度极限：

$$R_L = 0.9R_m \quad (3)$$

式中： $R_m$ ——激光跟踪仪无法保持跟踪状态时的标准器转速，r/min。

当规定了动态速度极限，可以逐步增加旋转速度到动态速度极限，当激光跟踪仪可以稳定跟踪靶标的运动，可以判断激光跟踪仪满足指标要求。

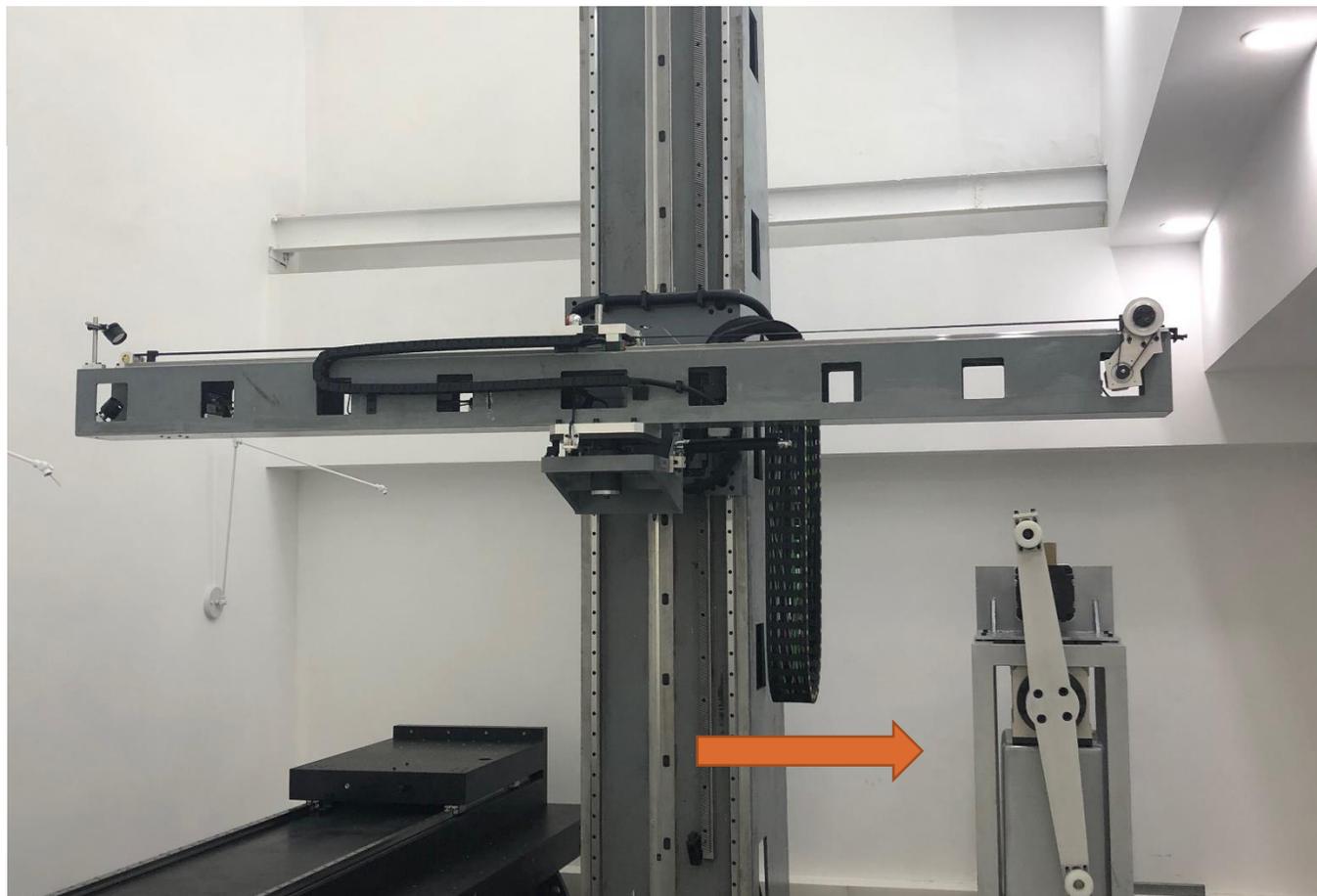
#### 7.6 动态示值误差

将球面反射靶标安置在标准圆轨迹发生器的靶座上，激光跟踪仪安装在与球面反射靶标运动平面垂直的方向，距离 3 m。

激光跟踪仪照准球面反射靶标。逐步增加旋转速度至  $0.7R_L$ ，利用激光跟踪仪定距采样功能间隔 5 mm 采样，取一周的测量点集，利用激光跟踪仪软件计算圆周直径。直径示值与参考值之差，为激光跟踪仪的动态示值误差  $\Delta$ 。与对应的最大允许误差比较，应满足  $|\Delta| \leq |MPE|$ 。

#### 7.7 动态示值变动量

利用 7.6 的测量点集，拟合圆心，计算所有点到圆心之间的距离，计算距离的标准差，作为动态示值变动量。



## Leica AT960 激光跟踪仪距离示值误差测量数据

干涉仪	跟踪仪1	跟踪仪2	跟踪仪3	示值误差绝对值的最大值
0	0	0	0	0
999.99	999.989	999.989	999.989	0.001
1999.984	1999.983	1999.983	1999.983	0.001
2999.98	2999.98	2999.98	2999.981	0.001
3999.983	3999.984	3999.984	3999.983	0.001
4999.971	4999.973	4999.972	4999.972	0.002
5999.972	5999.974	5999.974	5999.974	0.002
6999.984	6999.986	6999.986	6999.987	0.003
7999.979	7999.981	7999.981	7999.981	0.002
8999.987	8999.99	8999.99	8999.99	0.003
9999.988	9999.991	9999.991	9999.991	0.003
10999.995	10999.997	10999.997	10999.997	0.002
11999.987	11999.99	11999.99	11999.99	0.003
12999.981	12999.986	12999.986	12999.986	0.005
13999.981	13999.985	13999.986	13999.986	0.005
14999.984	14999.989	14999.989	14999.989	0.005
15999.992	15999.996	15999.996	15999.996	0.004
16999.992	16999.995	16999.995	16999.995	0.003
18000.006	18000.011	18000.012	18000.011	0.006
18999.996	19000.002	19000.002	19000.002	0.006
20000.004	20000.01	20000.011	20000.011	0.007
21000.014	21000.019	21000.019	21000.019	0.005
22000.018	22000.024	22000.024	22000.024	0.006
23000.029	23000.034	23000.034	23000.034	0.005
24000.025	24000.033	24000.032	24000.033	0.008
25000.029	25000.037	25000.037	25000.037	0.008

干涉仪	跟踪仪1	跟踪仪2	跟踪仪3	示值误差绝对值的最大值
27000.053	27000.062	27000.063	27000.063	0.01
28000.057	28000.067	28000.067	28000.067	0.01
29000.08	29000.09	29000.09	29000.09	0.01
30000.068	30000.077	30000.077	30000.076	0.009
31000.088	31000.099	31000.099	31000.099	0.011
32000.088	32000.1	32000.1	32000.1	0.012
33000.094	33000.105	33000.105	33000.105	0.011
34000.094	34000.106	34000.105	34000.105	0.012
35000.102	35000.113	35000.113	35000.113	0.011
36000.109	36000.12	36000.119	36000.12	0.011
37000.105	37000.116	37000.116	37000.116	0.011
38000.102	38000.114	38000.113	38000.114	0.012
39000.109	39000.12	39000.12	39000.121	0.012
40000.125	40000.136	40000.135	40000.135	0.011
41000.113	41000.127	41000.127	41000.128	0.015
42000.133	42000.146	42000.147	42000.147	0.014
43000.137	43000.153	43000.153	43000.154	0.017
44000.129	44000.145	44000.145	44000.144	0.016
45000.129	45000.145	45000.145	45000.146	0.017
46000.125	46000.141	46000.142	46000.142	0.017
47000.105	47000.122	47000.122	47000.122	0.017
48000.105	48000.115	48000.116	48000.116	0.011
49000.082	49000.101	49000.102	49000.102	0.02
50000.074	50000.092	50000.091	50000.092	0.018
51000.062	51000.084	51000.084	51000.084	<b>0.022</b>
52000.031	52000.051	52000.051	52000.051	

## Leica 地面式三维扫描仪、激光跟踪仪校准方法研究

标准不确定度一览表

标准不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	标准不确定度值 $u(X)$	$K$ 值
$u_1$	干涉仪波长测量不确定度	$1 \times 10^{-9} \text{L}$	2
$u_2$	温度变化测量误差	$11.8 \times 10^{-9} \text{L}$	$\sqrt{3}$
$u_3$	气压测量误差 1	$1.7 \times 10^{-9} \text{L}$	$\sqrt{3}$
$u_4$	气压测量误差 2	$0.9 \times 10^{-9} \text{L}$	$\sqrt{3}$
$u_{332}$	读数漂移引起的测量误差	$0.12 \mu \text{m}$	$\sqrt{3}$
$u_{331}$	分辨力引入的标准不确定度分量	$0.29 \mu \text{m}$	$\sqrt{3}$

$$\begin{aligned}
 u_c^2(L) &= u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_{332}^2 + u_{331}^2 \\
 &= 0.12^2 + 0.29^2 + (12.4 \times 10^{-9} \text{L})^2
 \end{aligned}$$

### 3.4 扩展不确定度

$$U \approx 11 \mu \text{m} (k=2)$$

# Leica 地面式三维扫描仪、激光跟踪仪校准方法研究

五、在对地面式三维扫描仪、激光跟踪仪校准时应注意的问题

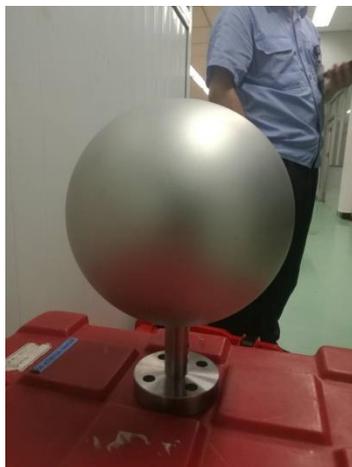
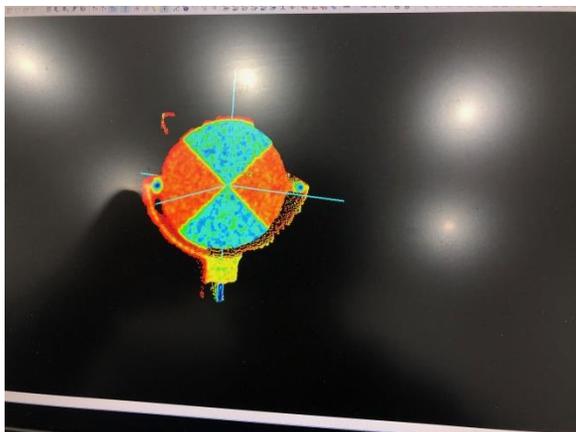
## 1、标靶的选取

分别采用leica 4.5英寸黑白标靶和200mm铝合金标准球作为标靶进行扫描；

铝合金标准球亚光、漫反射

## 2、背景影响

基线场平台采用花岗岩组建，颜色呈黑色，扫描若不对其进行适当遮挡会影响检测精度



Leica原装 4.5英寸黑白标靶

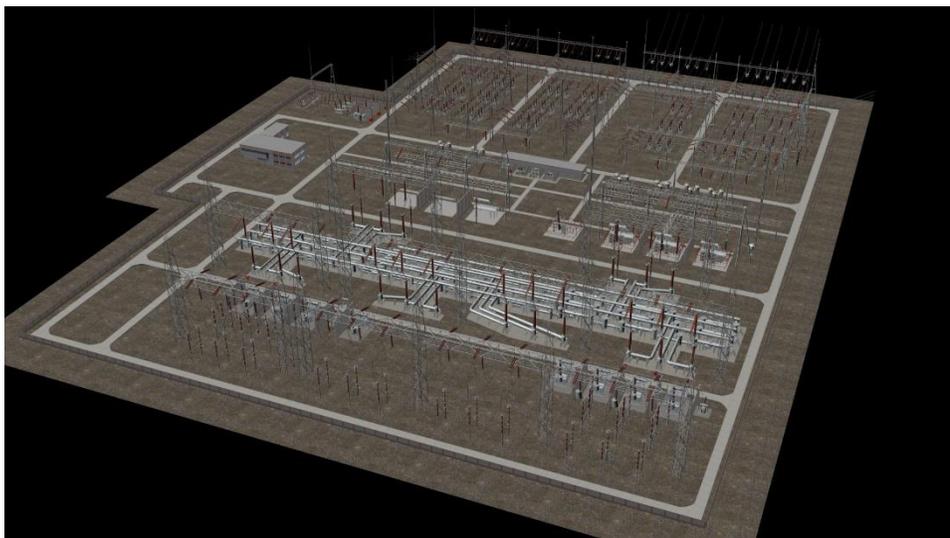
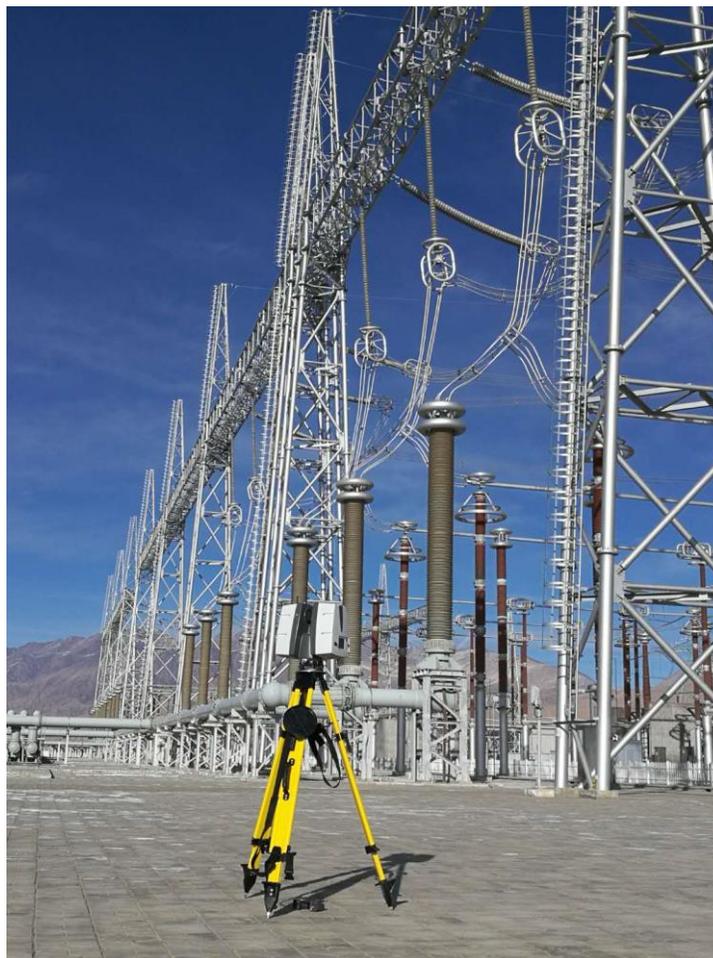


自制200mm铝合金标准球

## Leica 地面式三维扫描仪、激光跟踪仪校准方法研究

六、目前地面式三维扫描仪、激光跟踪仪计量校准的局限及技术发展的趋势

室内大长度标准基线场长度仍然有限，在面对短距离、高精度三维扫描仪检测时尚能满足，但对于测绘类超远距离三维扫描仪计量检测时不能很好的覆盖其量程；因此对于此类超大长度三维扫描仪（500m量程以上）则需要室外标准基线场来进行校准标定，而这也需要新的标准规范出台。



必选

—— 谢 谢 ——