

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2018.05.07

大尺寸测量系统运动目标测量能力校准现状

甘晓川, 赵子越, 马骊群

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 分析包括全站仪、激光跟踪仪、动态工业摄影测量系统、iGPS/wMPS、激光跟踪干涉仪在内的, 目前工业测量中使用较多且具有运动目标测量能力的大尺寸测量系统的基本原理, 总结国内外主要相关标准和规范对这些系统动态性能的校准和评定方法, 给出部分系统的校准试验结果。展望了动态测量系统校准方法的发展方向, 为大尺寸测量系统的使用和校准提供参考。

关键词: 大尺寸; 动态检测; 动态校准; 运动目标测量; 测量系统

中图分类号: TB9; TP336

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2018)05-0033-06

Calibration Status Analysis of Large Scale Measurement System Measurement Capability for Moving Target

GAN Xiaochuan, ZHAO Ziyue, MA Liqun

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: The basic measurement principle of large scale measurement system with capability of moving target measurement in industrial measurement is summarized. The calibration and evaluation methods of dynamic performance of these measurement systems in relevant standards and specifications at home and abroad are analyzed. The similarities and differences of these methods are compared and analyzed. The calibration test results of specialized systems are given. The development direction of the dynamic measuring system is prospected, which provides a reference for the use and calibration of the large scale measuring system.

Key words: large scale; dynamic test; dynamic calibration; moving target measurement; measurement system

0 引言

常见的大尺寸测量系统中, 全站仪、激光跟踪仪、动态工业摄影测量系统、iGPS/wMPS、激光跟踪干涉仪等具有一定的运动目标跟踪测量能力, 能够使用连续扫描测量的方式获取空间坐标, 记录运动轨迹等。在航空航天、汽车制造、船舶风电和重型工业等工业现场较多。

由于这些测量系统的测量原理、结构形式各不相同, 它们的校准方法有很大差异。对同一种测量系统来说, 测量静止目标和测量运动目标的准确度是不同的, 通常测量运动目标的准确度要低于测量静态目标。一些测量系统面世时间不长或数量不多, 造成对它们校准方法(特别是测量运动目标能力的校准方法)研究不多。随着几何量测量更多地参与到动态目标测量中(如利用激光干涉仪对 6D 精密摇摆台进行动态参数校准^[1]), 对于测量运动目标能力的校准显得愈发重要。本文将目前的各主要动态测量系统的校准现状加以汇总, 帮助有关人员了解现状。

1 动态测量系统

1.1 全站仪

全站仪是全站型电子速测仪的简称, 是一种在电子经纬仪基础上增加了电子测距功能的大地测量仪器。高精度的全站仪测距部分一般采用相位法。其静态测角重复性为 0.5", 测距误差在 $\pm(1\text{ mm} + 10^{-6}L)$ 级别, 测距范围可达千米级。某些全站仪具有马达驱动、自动目标识别(Automatic Target Recognition, ATR)和锁定跟踪等功能, 可以对运动目标进行跟踪测量(Leica MS60 在 100 m 处切向速度为 45 m/s^[2]), 可以跟踪特定的目标, 甚至可以实现扫描测量的功能。在某些测距精度要求不高的应用中, 为动态目标测量和跟踪提供了一种可行的技术方案。

1.2 激光跟踪仪

激光跟踪仪是自 1987 年^[3]开始发展起来的一种激光测量系统, 集激光干涉测距技术、绝对测距技术、光电检测技术、精密机械技术、计算机控制技术、现

代数值计算技术、坐标测量技术、不确定度分析技术于一体，具有安装快捷、操作简便、实时扫描、测量精度高、效率高等优点，被誉为“便携式三坐标测量机”^[4]。工作时，配合反射镜、接触式测头或非接触测头等进行目标测量，先利用激光干涉测距或绝对测距技术测量到目标的距离，并利用高速光栅测角测量到目标的两个角度，再根据球坐标测量原理给出点的空间三维直角坐标，如图 1 所示。

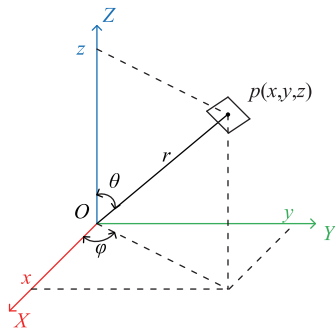


图 1 球坐标的原理图

跟踪仪的 2 个角度的测量均使用高精度角度传感器，测角重复性在 1"左右。距离的测量一般使用激光干涉测距 (IFM) 或绝对测距 (ADM)。目前的技术水平下，测距激光干涉仪的 $MPE = \pm 0.5 \times 10^{-6} L$ ；ADM 在全部测量范围内的 $MPE = \pm 10 \mu\text{m}$ 。二者跟踪能力的不同，主要体现在横向跟踪速度和加速度的不同，如表 1 所示。

表 1 常见激光跟踪仪动态性能参数

激光跟踪仪名称	最大径向速度 $/(m \cdot s^{-1})$	最大横向跟踪速度 $/(m \cdot s^{-1})$	最大角速度 $/((^{\circ}) \cdot s^{-1})$	最大角加速度 $/((^{\circ}) \cdot s^{-2})$	测量频率 $/\text{Hz}$
API Radian	> 6	— — —	180	180	1000
Faro VantageS	> 25	— — —	180	860	350
Leica AT930 /960	> 6	> 4	360	1350	1000

1.3 动态摄影测量系统

国外在视觉测量方面的研究起步较早，无论是单相机系统还是双/多相机系统，都推出了多个种类。在双相机系统方面，美国 GIS 公司的 V - Stars DynaMo 系统比较著名，其采用 500 万像素相机时，测量的 $MPE =$

$\pm (14 \mu\text{m} + 14 \times 10^{-6} L)$ ，最高工作频率为 10 Hz。最新的 INCA4 专业相机具有 4096×3072 像素，提供了更高性能。由两台 INCA4 组成的实时动态测量系统，测长误差的 $MPE = \pm (9 \mu\text{m} + 9 \times 10^{-6} L)$ ，具有更快的电子快门和高速闪光灯，最高的工作频率约为 3 Hz。

德国 GOM 公司的 Aramis SRX，是一种基于双目立体视觉结合数字图像相关法的三维应变测量系统，采用两台像素为 4096×3068 的相机，全分辨率时最高工作频率为 335 Hz，在 4096×480 分辨率时最高可达 2000 Hz。主要用于变形、应变、材料性能的测量，如测量氧化锆陶瓷的弹性模量^[5]。

加拿大 NDI 公司的 PRO CMM 系统使用 3 个线阵 CCD 实现高速测量，可应用于汽车、机器人、工程、风洞试验等领域的静态和动态测量。在 35 m^3 的测量范围内最大允许误差 $MPE = \pm (110 + L/40) \mu\text{m}$ ，单点的重复性最高为 $20 \mu\text{m}$ ^[6]，采样速率最高可达 4500 Hz。配合使用动态组件 (DPR) 还可以监测被测对象的意外移动和震动，且能够提高测量精度。

国内某厂商定制的双目立体视觉系统中，使用 2336×1728 像素的两台 CMOS 相机组成可动基线的三维动态测量系统，最高帧率可达 500 Hz，在 9 m 范围内其静态测量误差不超过 0.4 mm。

1.4 iGPS/wMPS

上世纪 90 年代，美国 Arcsecond 公司(后被 Nikon 公司收购)在 GPS 原理的启发下开发了 Indoor GPS(也称为 iGPS 或室内 GPS)系统^[4]。iGPS 测量技术具有精度较好、可靠性较好、效率较高的优点，主要用于解决大尺寸空间的测量与定位问题^[7]。iGPS 角度测量原理如图 2 所示。

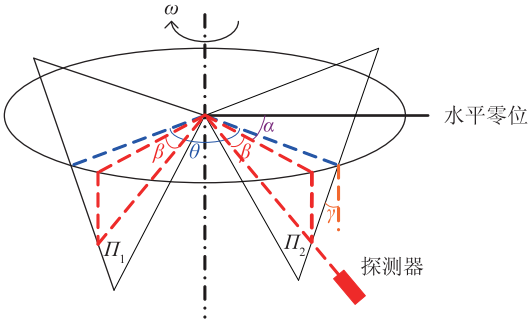


图 2 iGPS 角度测量原理图

iGPS 每个发射器的旋转频率都是唯一确定的(大约为 50 Hz)，这使得接收器能够跟踪特定的发射器并与其它发射器信号区分。发射器在旋转过程中，发出选通脉冲，作为每一圈旋转的起始标志。

接收器接收到发射器发出的选通脉冲后开始计时, 作为计时零位; 当扇面 Π_1 扫过接收器时, 接收器发出一束选通脉冲, 并将第一束扇形光束传输到接收器的时刻记为 t_1 ; 同理, 当扇面 Π_2 扫过接收器时, 接收器发出一束选通脉冲, 将第二束扇形光束传输到接收器的时刻记为 t_2 ; 已知发射器的旋转角速度为 ω , 接收器与发射器之间的方位角 Az 和俯仰角 El 分别为^[8]

$$Az = \frac{(t_1 + t_2)\omega - \theta}{2} \quad (1)$$

$$El = \arctan \left[\frac{2 \sin \frac{(t_1 + t_2)\omega - \theta}{4}}{\tan \Phi} \right] \quad (2)$$

天津大学也开发了类似原理的 wMPS 系统。wMPS (workspace Measuring Position System) 系统是一种组合分布式的坐标测量系统, 它基于前方角度交汇原理, 采用光电扫描的角度测量方式, 提高了自动化测量能力和测量效率^[9]。

1.5 激光跟踪干涉仪

激光跟踪干涉仪 (LaserTRACER) 是德国 Etalon 公司 2006 年发布的产品, 2015 年发布了最新一代的 LaserTRACER-NG。最初开发的目的主要是为解决 CMM 和机床的定位精度校准的问题。本质上可以认为激光跟踪干涉仪是具有目标跟踪功能的干涉仪, 虽然其内部也具有两个角度反馈, 但只用于本身的运动控制, 进行空间坐标解算时只使用长度测量信息。可采用多台同时测量或者单台分时测量组成多边解算系统, 进行空间坐标测量。相较由角度和长度组成的球坐标测量系统, 使用多边解算的方式能达到较高的坐标测量精度^[10]。其测量范围为 0.2 ~ 20 m, 长度测量的不确定度 $U = (0.2 + 0.3L) \mu\text{m} (k=2)$ ^[11]。

2 动态测量系统校准方法

2.1 全站仪

虽然全站仪是球坐标测量系统, 但对其校准时, 采用的是角度和测距两部分分别校准的方式。其中角度部分依据 JJG 100 - 2003《全站型电子速测仪检定规程》进行检定或校准, 测距部分依据 JJG 703 - 2003《光电测距仪检定规程》进行检定或校准。但对全站仪的运动目标测量能力和目标跟踪能力无相应的检测规范。

2.2 激光跟踪仪

2.2.1 静态参数的校准

最早的跟踪仪校准方法是 2006 年 ASME 发布的 B89.4.19, 主要在跟踪仪不同距离处, 相对于跟踪仪

摆放为水平、竖直、左右对角等不同姿态, 结合跟踪仪处于不同的水平角共 105 个状态, 使用定长标尺对测长误差进行校准。双面示值误差的校准是用正反面测量功能在跟踪仪 4 个水平角度, 分别测量上中下 3 个目标点, 即共进行 12 个点的测量, 每个点测量 3 次, 进而得到双面误差。使用直线标准器 (固定目标或者移动目标) 测量跟踪仪的测距性能, 其测点包括跟踪仪测量范围内 4 个几乎均布的点和用户任意选定的 2 点。但是该标准中没有对跟踪仪的运动特性的校准给出规定^[12]。

GJB 6201 - 2008 中规定, 校准的主要参数有: 内置激光干涉仪测量示值误差、长度测量示值误差、绝对距离测量仪 ADM 的测量示值误差、基点位置误差、温度气压传感器的示值误差和内置激光干涉仪的真空波长不确定度等 7 个项目^[13]。

国际标准化组织 ISO 2016 年发布了 ISO 10360 - 10: 2016, 采用了 B89.4.19 的基本方法, 对某些项目的测量点数量有新的规定, 还增加了探测误差的校准, 包括球反射镜 (Spherically Mounted Retroreflector, SMR)、接触测头 (Stylus and Retroreflector Combination, SRC)、非接触测头 (Optical Distance sensor and retroreflector Combination, ODC)。通过探测直径大于 10 mm 且小于 51 mm 的已校准过形状和尺寸的标准球, 确定形状探测误差和尺寸探测误差^[14]。25 个点位如图 3 所示。

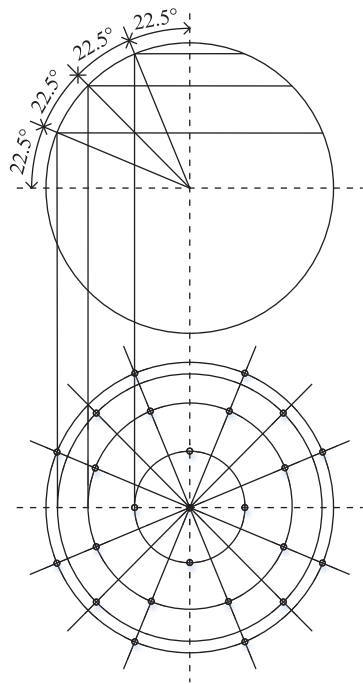


图 3 25 点点位分布

2.2.2 动态参数的校准

相对于跟踪仪测量静止目标能力的校准方法,对于它们测量运动目标能力的校准的研究显得不多,发布的校准规范就更少。文献[15]提出采用圆轨迹的方式对跟踪仪的运动目标测量能力进行校准,文献[16]利用电机实现了上述方法。在发布的校准规范中,国家计量技术规范 JJF 1242 给出了以标准圆轨迹的方式对跟踪仪的动态速度极限、动态示值误差、动态示值变动量进行校准的方法^[17]。

文献[18]在该方法基础上,总结跟踪仪动态性能校准中的特点,对改进动态特性的校准方法有一定的借鉴作用。其中,考虑增加 RMS 表示动态示值变动量,该参数在 Spatial Analyzer (SA) 的拟合计算中直接给出,校准中使用方便;改进测量条件,在某些跟踪仪的校准中发现,在转速设置为 $0.7 R_L$ 时,跟踪仪虽能连续稳定地跟踪,但是不能进行测量,只有稍降低转速后才能进行测量。

文献[19]通过对激光跟踪仪动态测量精度的理论分析和实验,得出如下结论:①以基准尺为参考进行的大量重复动态测量,可以现场快速标示激光跟踪仪动态测量精度及稳定性;②双频干涉仪可以在室内精确检定激光跟踪仪的动态测量精度;③角度误差是造成动态测量误差的重要因素;④双频干涉仪检定结果表明,不同频率对动态测量结果没有显著影响。

激光跟踪仪是精度较高的移动式坐标测量系统,其动态性能在装配、制造等领域有较大的应用空间。但缺乏针对其动态性能的稳定性、动态测量精度和范围等指标的现场快速标定方法和室内高精度校准方法的相关研究,以目前的静态指标标识其动态测量精度是不够的^[19]。

2.3 动态摄影测量系统

2.3.1 静态参数的校准

目前国内没有统一的计量技术规范用于校准工业摄影测量系统,实际中通常参考 VDI/VDE 2634 系列标准中 part 1 关于单相机点对点的探测系统的校准方法,在相机测量范围内使用具有多目标点的定长标尺以多个空间位置的长度测量误差表征工业摄影测量系统的测量能力,但没有涉及双/多相机系统和动态性能的校准方法^[20]。

GB/T 34890-2017 中规范了数字摄影三坐标测量系统的验收检测和复检检测,并分别给出了坐标测量重复性、测长误差、标尺长度的测量方法和计算方法^[21]。

2.3.2 动态参数的校准

航空工业计量所采用圆轨迹发生器作为标准器,测量给定转速条件下回转臂上距离已知的目标点间的距离,用长度测量误差来评定系统特定转速条件下的性能。动态摄影测量系统两相机相距约 2 m,相对圆轨迹发生器距离约 2 m。圆轨迹发生器的回转臂两端固定有反光标记点。标记点的线速度根据 $v = \omega r$ 计算。其中, v 表示该点线速度, ω 表示旋转的角速度, r 表示该点对应的回转半径。设置圆轨迹发生器以不同速度匀速转动,比较动态摄影测量系统测得的速度与设定速度之差,同时比较不同速度下两反光标记点间距离与参考值之差。被测系统的主要参数设置为:采样频率 500 Hz、快门时间 100 μ s、相机增益 50 dB。

图 4 和图 5 分别为线速度 6.74 m/s 时的速度曲线和该速度条件下的两点间距离曲线。

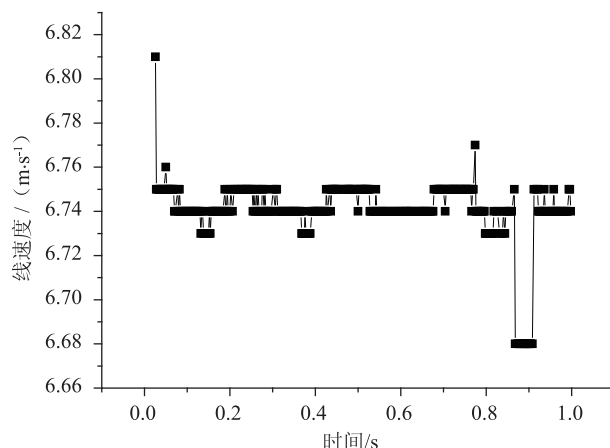


图 4 线速度曲线

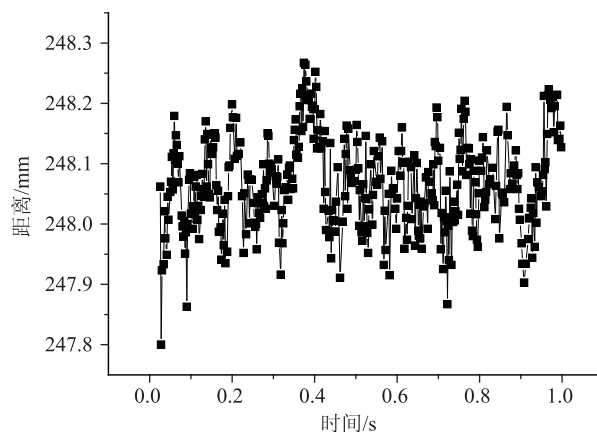


图 5 距离误差

2.4 iGPS/wMPS

2.4.1 静态参数的校准

静态测量准确性的评价主要有两种方式,单点比

较法和参考长度比较法^[22]。单点比较法使用 iGPS/wMPS 和另外一种坐标测量系统,对大量点坐标分别进行测量,坐标系统一之后,比较同一点两系统坐标测量之差。参考长度比较法使用定长标尺在测量范围内进行测量,用 GPS/wMPS 系统测量结果与标尺参考长度之差表征系统的测量能力。

静态测量的单点重复性使用 $\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}$ 对每个测量点的重复性标准差进行统计计算^[23]。

2.4.2 动态参数的校准

对 iGPS/wMPS 的精度分析、使用方法、校准方法的研究均较少。在文献[23]中,对 wMPS 的动态测量重复性、动态测量精度的校准方式进行了探索。动态重复性通过多次测量轨迹的重复性来评价。动态测量精度采用平面和直线两种方式进行评定,比较不同目标运动速度下的位置偏差,实验数据表明运动速度越快,动态测量误差越大。

2.5 激光跟踪干涉仪

目前没有激光跟踪干涉仪专用的计量技术规范,主要参照 JJG 739-2005《激光干涉仪检定规程》对干涉仪进行部分校准。设置跟踪部分保持不动,将测量激光与标准装置的干涉仪光路准直。图 6 为某激光跟踪干涉仪测量得到的误差曲线。

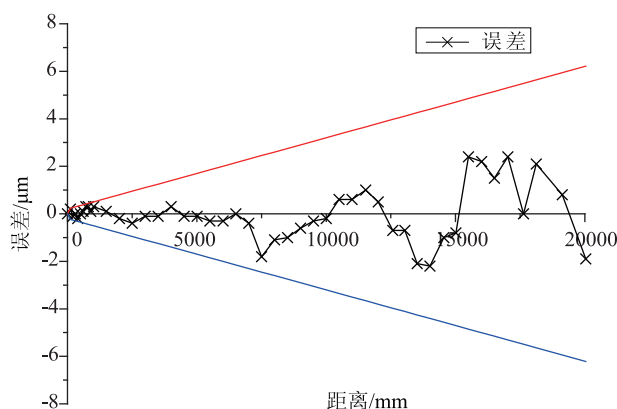


图 6 激光跟踪干涉仪误差曲线

目前,尚未见有激光跟踪干涉仪测量运动目标性能的校准工作。

3 结束语

综合文献和实际工作情况,相对于静态性能的校准,运动目标测量能力的校准在理论、实践、规范等

方面的研究工作开展均不充分。甚至还存在以静态精度替代动态精度进行测量结果分析和不确定度评定的状况,这可能会造成测量结果的误用。因此提出以下建议:①相关测量人员应加强对测量系统原理的了解,充分掌握静态性能和动态性能的区别和联系;②未来应深入开展几何量动态测量理论的研究,为动态参数校准奠定基础;③补充并丰富动态测量系统的校准手段,使用圆轨迹或直线轨迹开展动态试验;④进一步开展测量方法研究,不但应考虑运动目标速度对测量的影响,还应考虑运动目标加速度对测量结果的影响。

参考文献

- [1] 马骊群,王继虎,曹铁泽,等.6D 精密摇摆台的动态参数校准[J]. 计量学报,2008,29(4A): 65-68.
- [2] Leica Geosystems. Leica MS60/TS60 hand book[Z]. 2015.
- [3] Wikipedia. Laser tracker[EB/OL]. [2018-07-31]. https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_tracker.
- [4] 李广云,李宗春.工业测量系统原理与应用[M]. 北京:测绘出版社,2011.
- [5] 耿红霞,付朝华,蒋小林,等.三维数字图像相关法测量氧化锆陶瓷的弹性模量[J]. 实验技术与管理,2015,32(12): 60-62.
- [6] NDI. PROCMM[EB/OL]. <https://www.ndigital.com/msci/products/procmm/>.
- [7] 潘廷耀,范百兴,易旺民,等.大尺寸动态测量技术综述[J]. 测绘与空间地理信息,2015,38(8): 70-72.
- [8] 李倩,马骊群,孙安斌.IGPS 发射器角度校准中同轴调整方法研究[J]. 中北大学学报(自然科学版),2012(5): 112-116.
- [9] 端木琼.wMPS 三维精密测量系统硬件分析与设计[D]. 天津:天津大学,2008.
- [10] 甘晓川.数字近景摄影测量系统中相机校准和长度测量误差校准[D]. 北京:中国计量科学研究院,2012.
- [11] Etalon. LaserTRACER - NG[EB/OL]. [2018-07-31]. <https://www.etalon-ag.com/en/products/lasertracer/>.
- [12] ASME B89.4.19 Performance Evaluation of Laser - Based Spherical Coordinate Measurement Systems[S].
- [13] GJB/J 6201-2008 大尺寸测量系统-激光跟踪仪校准规范[S]. 2008.
- [14] ISO 10360-10: 2006 Geometrical product specifications(GPS)-Acceptance and reverification tests for coordinate measuring system(CMS) Part 10: Laser trackers for measuring point-to-point distances[S]. 2006.
- [15] 王为农,苏永昌,任国营.激光跟踪仪的动态特性研

- 究[J]. 计量学报, 2007, 28(1): 34-36.
- [16] 任国营, 王为农, 苏永昌, 等. 激光跟踪仪动态参数自动测试系统设计[J]. 计量学报, 2008, 29(2): 114-116.
- [17] JJF 1242 - 2010 激光跟踪三维坐标测量系统校准规范[S]. 2010.
- [18] 甘晓川, 孙安斌, 王继虎, 等. 激光跟踪仪横向跟踪速度校准方法[J]. 计量学报, 2014, 35(6A): 39-44.
- [19] 杨凡, 范百兴, 李广云, 等. 激光跟踪仪动态测量精度测试[J]. 计量学报, 2014, 35(6A): 119-122.
- [20] VDI/VDE 2634 part1: 2002, Optical 3D measuring systems Imaging systems with point-by-point probing[S]. 2002.
- [21] GB/T 34890 - 2017 产品几何技术规范(GPS)数字摄影三维坐标测量系统的验收检测和复检检测[S]. 2017.
- [22] 李洋. 室内 GPS 空间坐标测量网的优化与校准[D]. 北京:

中国航空研究院, 2012.

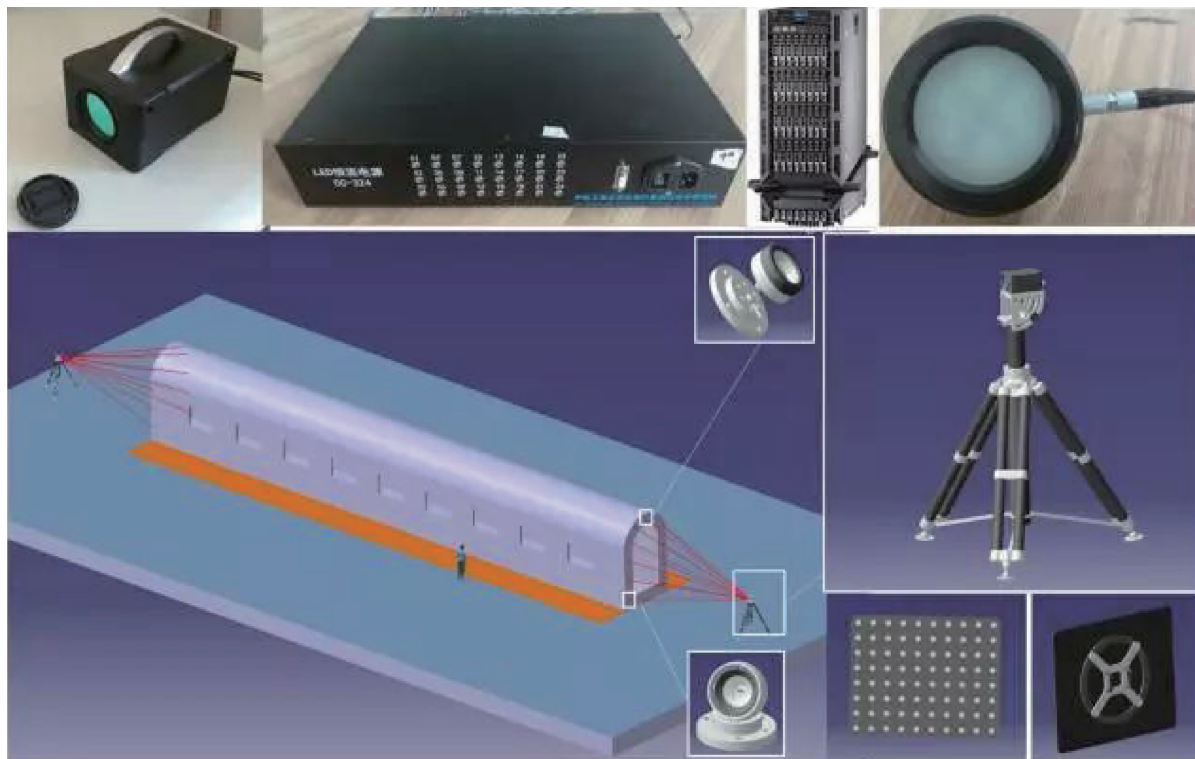
- [23] 赵子越. 基于 wMPS 空间测量场的动态测量定位方法与技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.

收稿日期: 2018-07-31

作者简介



甘晓川(1979-), 男, 高级工程师, 一级注册计量师, 硕士, 主要研究领域包括大尺寸测量、大尺寸测量系统校准、相关的测量结果和不确定度评价等。曾主持承担国家重大科学仪器设备开发项目、科工局技术基础项目、航空基金等多个科研课题, 获得省部级科技奖 1 项, 发表学术论文 20 余篇, 参与编制国家计量技术规范 1 项。



航空工业计量所长度大尺寸实验室动态摄影测量系统