

文章编号:1001-5078(2024)02-0228-07

· 激光应用技术 ·

三维激光投影技术在核电厂施工放样中的应用

王开诚^{1,2}, 许志强^{1,2}, 赫海涛^{1,2}, 王宝迪¹, 廖静瑜¹, 路宏杰^{1,2}, 张亚军¹

(1. 中国核工业二三建设有限公司, 北京 100000, 2. 深圳普达核工业数字测控有限公司, 广东 深圳 518120)

摘要: 施工放样作为核电厂建造的关键基础工作, 是其他施工活动的依据, 其对工程质量及进度有着直接影响。目前核电建安领域主要采用全站仪进行逐点式放样的施工放样方法, 该方法具有放样精度差、施工效率低和人工成本投入大等弊端。本文主要提出了应用三维激光投影技术实现核电厂快速施工放样, 该方法具有批量放样和投影精度高的特点, 通过核电厂施工放样可行性分析和某核电项目现场应用, 并使用全站仪进行对比分析, 验证了三维激光投影技术在核电厂施工放样中具有一定的应用前景。

关键词: 三维激光投影技术; 施工放样; 核电厂; 全站仪; 对比分析

中图分类号: TN249; TN247 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.02.010

Application of 3D laser projection technology in construction layout of nuclear power plants

WANG Kai-cheng^{1,2}, XU Zhi-qiang^{1,2}, HE Hai-tao^{1,2}, WANG Bao-di¹,

LIAO Jing-yu¹, LU Hong-jie^{1,2}, ZHANG Ya-jun¹

(1. China Nuclear Industry 23 Construction Co., Ltd., Beijing 100000, China;

2. Shenzhen Puda Nuclear Industry Digital Measurement and Control Co., Ltd., Shenzhen 518120, China)

Abstract: As a key foundation work for nuclear power plant construction, construction setting out is the basis for other construction activities, which has a direct impact on the quality and progress of the project. At present, the construction setting-out method of point-by-point setting-out with total station is mainly used in the field of nuclear power construction and installation, which has the disadvantages of poor setting-out accuracy, low construction efficiency and large investment in labor costs. In this paper, the application of 3D laser projection technology is put forward to realize the rapid construction lofting of nuclear power plants, which has the characteristics of batch lofting and high projection accuracy. Through the feasibility analysis of construction lofting of nuclear power plants and the on-site application of a nuclear power project, as well as the use of total station for comparative analysis, it is verified that 3D laser projection technology has a certain application prospect in the construction lofting of nuclear power plants.

Keywords: 3D laser projection technology; construction lofting; nuclear power plant; total station; comparative analysis

1 引言

施工放样是工程施工的关键基础作业, 是将设计图纸上建筑物的平面及高程坐标采用一定的测量技术在实地标定出来, 并作为其他施工活动的依据, 其对工

程施工质量及进度有着直接影响。准确、周密的定位放线工作不但关系到一个工程是否能顺利按图施工, 还为工程质量提供重要的技术保证, 为工程质量检查等工作提供方法和手段^[1]。

作者简介: 王开诚(1984-), 男, 大专, 工程师, 主要从事工程测量技术的研究工作。

通讯作者: 许志强(1995-), 男, 本科, 助理工程师, 主要从事精密三维测量技术研究与应用工作。E-mail: 1284593808@qq.com

收稿日期: 2023-04-18

当前核电厂建安领域主要通过全站仪实现各设备设施安装的定位点放样,该方法主要通过架设全站仪测量反射棱镜获取当前坐标值,并与理论放样值进行偏差计算,再反复移动反射棱镜直至在理论放样位置时进行划线,该方法施工效率较低,需要测量人员多次调整直至找到理论放样位置;对人员技能水平依赖性较高,单点放样时间往往取决于测量人员持反射棱镜找点时间,现场放样时间占据了设备安装工期的大量时间,严重影响项目工程进度和施工质量。

施工放样作为工程建设的基础,一直备受国内外相关学者的关注,在施工放样方法改进方面近些年也有一定的研究。其中国内学者李昂、熊文豪、彭辉等人于2022年提出基于BIM放样机器人的快速施工放样技术研究,他认为基于BIM的放样机器人能够实现对BIM技术图纸的三维化应用,在施工现场根据BIM技术平台构建的三维虚拟模型进行放线作业^[2],相较于传统的全站仪放样方式智能化程度更高,其现场放样形式与全站仪类似,均为单点测量;另外国内学者钱跃磊、关小果、李阳等人提出了GNSS技术在工程放样中的应用研究,他们认为在施工放样中GNSS技术相较于全站仪虽然放样精度不高,但该方法无需架站定向,操作方便、劳动强度小,能全天24 h作业,在施工效率方面有很大的提升^[3]。

综上所述,上述研究成果虽然对提高施工放样效率方面有一定成效,但在提高效率同时保障测量精度的前提下,尚无法满足核电厂快速施工放样的需求。为了解决这一难题,本文主要提出了应用三维激光扫描技术实现核电厂快速施工放样的方法,近些年三维激光投影技术得到飞速发展,其能够以激光线条的方式将三维模型聚焦投影至工作面上,具有精度高、柔性化、易控制等特点,在大型工件制造及装配数字化定位中得到广泛应用^[4]。本文通过分析三维激光投影技术特点和工作方法,以及在某核电项目现场进行应用和对比分析,验证了其在核电厂施工快速放样中的可行性,解决传统放样方法施工效率低、人力投入成本高等问题,对提高施工效率、保障核电建造质量、推动我国核电施工技术向智能化、数字化发展具有重要意义。

2 三维激光投影技术介绍

2.1 三维激光投影技术原理

三维激光投影系统采用机械扫描的设计思路,

利用电流大小控制振镜电机的转动,实现振镜的高速扫描。利用两套独立振镜系统组合成二维扫描,具有较大的转角范围和大视场扫描^[5]。

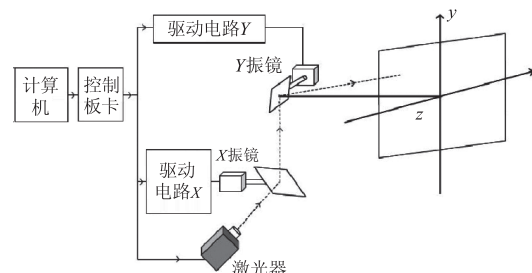


图1 三维激光投影技术原理

Fig. 1 Principle of 3D laser projection technology

如图1所示,在计算机通过数字板卡发出指令后驱动电路将驱动激光器发出准直激光束,入射到X轴反射镜上,经过X轴振镜的偏转扫描实现水平方向反射,激光束再入射至Y轴反射镜上,经过Y轴振镜的偏转实现俯仰方向反射,即可将激光束投影到工作面上,通过变换两轴振镜的夹角,系统可实现待投影工作面的往复扫描,形成完整连续的三维激光束轮廓^[6],从而完成投影工作面上的激光三维投影。

2.2 三维激光投影设备

本次选用因凯自动化技术有限公司提供的RayTracer高精度激光投影仪,该仪器主要由主机(激光器、准直扩束装置、聚焦装置、高速二维振镜及控制板卡等)、支撑三脚架、计算机及相应操控软件等组成。能够实现精确可靠的远距离投影和高级轨迹控制,其主要技术参数如表1所示。

表1 RayTracer高精度激光投影仪技术参数

Tab. 1 Technical parameters of RayTracer high-precision laser projector

1. 性能	
定位精度	0.25 mm/5 m
投影距离/m	1.5 ~ 15
视角范围/(°)	60
聚焦线宽度/mm	0.5 ~ 2
2. 硬件规格与环境要求	
功率输入	120/240 VAC 50/60 HZ
工作环境温度/(°C)	5 ~ 40
激光等级/nm	532(绿色)

2.3 三维激光投影技术在核电厂施工放样中应用的可行性分析

为了分析三维激光扫描技术在核电厂施工放样中应用的可行性,对现场主要施工专业的放样精度和施工场景进行了现场调研和和数据收集,并汇总如表 2 所示。

表 2 核电厂主要专业施工放样需求调研数据

Tab.2 Survey data of construction lofting demand of major disciplines in nuclear power plant

专业	放样精度	放样场景	放样范围	放样形式
主系统	1	房间内	2~8	点
机械	2	房间内	2~6	点
管道	2	房间内	4~10	直线
电气	2~4	房间内	4~8	直线
通风	5~10	房间内	4~8	直线
预制加工	1~2	房间内	2~6	直线、圆等

从表 2 中可以看出,目前核电厂主要施工专业的放样环境位于房间内,测量范围最大为 10 m,放样精度最高为 1 mm,而在放样形式方面各个专业根据具体施工活动有着各自的需求,其中管道、电气、通风方面需要设备就位的中心轴线,在预制加工方面需要先将加工尺寸形状放样出来才能进行加工。但受制于全站仪的单点放样方式,目前主要是通过全站仪放出关键点位,如直线两端点,再由施工人员进行连线,形成设备中心轴线进行安装就位。

而从表 1 中可以看出三维激光投影系统测量精度为 0.25 mm/5 m,投影距离最大为 15 m,考虑到现场主要放样场景和范围,其放样在 10 m 位置的精度则为 0.5 mm,满足其最大 1 mm 的精度要求。其次该系统支持 CAD 三维模型导入功能,可实现直线、圆周、三维线框等多种投影方式,相较于全站仪的放样方式,三维激光投影技术能够较好的满足现场放样需求。

3 三维激光投影技术在核电厂快速施工放样中的应用

3.1 总体实施思路

三维激光投影技术在核电厂快速施工放样中的总体实施思路主要分为技术准备阶段、现场准备阶段、投影放样阶段和质量检查阶段这 4 个主要方面。

每个阶段均有具体的工作内容和详细的实施思路^[7],如图 2 所示。

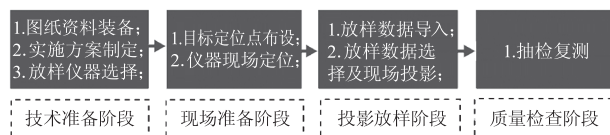


图 2 总体实施思路

Fig.2 Overall implementation idea

3.2 技术准备

在前往现场进行放样前,需要进行技术准备工作。首先进行图纸资料的了解,进行现场探勘,根据现场实际情况和放样需求确定放样仪器、施工人员和主要施工方法,编制实施方案并进行技术交底,确保施工人员在现场能够安全、有效的完成放样工作。

3.3 仪器现场定位

3.3.1 目标定位点介绍

目标定位点主要作用是用于三维激光投影系统现场定位,由具有回光反射材料的反射膜制作而成,这种回光反射膜一面,由直径大约 50 μm 的玻璃微珠或微晶立方角体组成。如图 3 所示,每个微珠具有猫眼或反射棱镜功能,将反射光由入射光的方向反射回去^[8],通过低强度曝光就可以产生高对比度标志图像,从而实现快速、准确而可靠的定位。而定位点的布设需要覆盖整个投影范围,在不同高度上呈空间立体式进行布设。

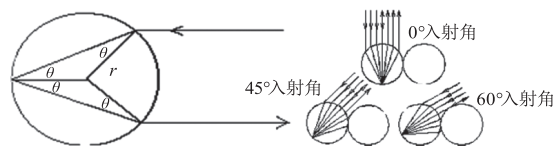


图 3 目标定位点反射示意图

Fig.3 Sketch map of target positioning point reflection

3.3.2 仪器现场定位

在使用三维激光投影系统进行放样前,该系统与投影工作面相对位置关系的确定是能否实现精确放样的前提,即系统在进行定位放样之前应先完成投影坐标系与现场坐标系之间的相互转换工作,将投影坐标系转化至现场坐标系之内^[9]。

其中,投影坐标系是依托于现场坐标系而建立的,在投影工作面上布置若干个目标定位点(通常为 6 个),这些目标定位点通过其他测量系统(如全站仪、激光跟踪仪、摄影测量系统等)测量出它们现场实际坐标信息。

在布设定位点并获取其现场坐标信息后,三维激光投影系统通过控制二维振镜使激光束准确扫描到这些目标定位点,控制器分别记录激光束扫描到各目标定位点时 X 轴检流计和 Y 轴检流计的偏转角度值水平角 H 、俯仰角 V ,利用坐标系的平移矩阵和旋转矩阵完成投影坐标系和现场坐标系的变换,再通过计算得到二维振镜偏转角度值与现场坐标系下的坐标关系,最终确定投影系统与被投影工作面之间的精确位置关系,完成系统的现场定位工作^[10]。图4为仪器现场定位示意图。

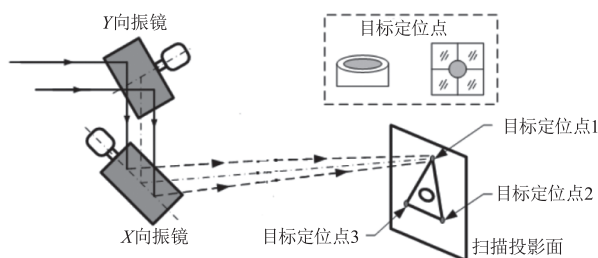


图4 仪器现场定位示意图

Fig. 4 Schematic diagram of instrument site positioning

3.4 投影放样阶段

投影放样阶段主要包括放样数据的导入、放样数据的选择及现场投影这两个步骤。

3.4.1 放样数据的导入

三维激光投影系统放样根据现场需求有两种不同的数据导入方式,其中放样定位点、直线可进行放样程序编辑,导入放样点坐标信息进行放样;如需要放样三维模型可直接将三维模型文件导入至软件中,选取所需要放样的图形进行投影即可。

(1) 放样程序编辑

在进行定位点放样时,通常需要在TXT格式文本中进行放样程序编辑,输入目标定位点坐标信息和放样点信息,将该文件导入至软件中即可进行投影。

如图5所示,目标定位点“\$ * TARGET 1 436.036290 0.555807 184.700351 TGT_1”则为定位点1的坐标信息,以点位编号 X 值坐标、 Y 值坐标、 Z 值坐标 TGT_1 格式依次编写,中间用空间进行间隔标识。

放样点的编写与目标定位点基本一致,都是 X 、 Y 、 Z 坐标的顺序,放样点是以线的方式进行编辑。首先输入首个点,然后根据图形顺序进行依次输入。

```
$* PARTNO M7
$* PRONAME AGS
$* TARGET 1 436.036290 0.555807 184.700351 TGT_1
$* TARGET 2 187.009993 0.000000 154.654596 TGT_2
$* TARGET 3 217.622904 -0.898676 24.774947 TGT_3
$* TARGET 4 0.000000 0.000000 0.000000 TGT_4
$* TARGET 5 451.466838 0.000000 0.000000 TGT_5
$* TARGET 6 221.786845 -1.086779 -197.346848 TGT_6
UNITS MM
$* PLY Default
PENUP
GOTO 0.0000 0.0000 0.0000
PENDWN
GOTO 0.0000 0.0000 98.5000
GOTO 0.0000 0.0000 98.5000
GOTO 0.0000 240.8000 98.5000
GOTO 0.0000 240.8000 98.5000
GOTO 0.0000 240.8000 0.0000
GOTO 0.0000 240.8000 0.0000
```



图5 放样程序编辑及放样点、直线导入

Fig. 5 Lofting program editing and lofting point and line import

(2) 三维模型文件导入

三维激光投影系统支持STEP、IGES、SAT等三维格式文件导入,只需通过导入功能选择对应的格式即可完成三维模型导入工作,如图6所示。

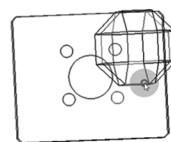


图6 三维模型导入

Fig. 6 3D model import

3.4.2 放样数据的选择及投影

在完成放样数据导入后,通过选择投影数据(点、直线、三维模型等)即可完成投影操作,系统根据指令在投影工作面上投影出相应的图形。

其操作方法较为简便,通过操控软件中的仪器-激光发射器-投影对象功能,选择相应的投影对象后即可实现现场快速批量化放样。如图7所示,以本次投影为例,可一次性放样4个支架的定位点,且以直线方式进行投影,施工工人可直接进行划线,大幅提升现场施工效率。表3为放样数据。



图7 现场支架定位点批量化放样

Fig. 7 Batch setting out of site support positioning points

3.5 质量检查

在工程施工中为了保障放样质量,通常会使用其他测量手段进行复核,如图8所示,如通过卷尺拉

表 3 支架定位点三维激光投影系统放样数据
Tab.3 Setting-out data of 3D laser projection system
for support positioning point

点号	放样点坐标/mm		
	X	Y	Z
1-1	-149.16	-232.00	-513.84
1-2	-149.16	-232.00	51.84
1-3	-714.84	-232.00	51.84
1-4	-714.84	-232.00	-513.84
2-1	1750.84	-232.00	1386.16
2-2	1750.84	-232.00	1951.84
2-3	1185.16	-232.00	1951.84
2-4	1185.16	-232.00	1386.16
3-1	3650.84	-232.00	-513.84
3-2	3650.84	-232.00	51.84
3-3	3085.16	-232.00	51.84
3-4	3085.16	-232.00	-513.84

表 4 支架定位点全站仪复查数据
Tab.4 Recheck data of total station of support
positioning point

点号	放样点坐标/mm		
	X	Y	Z
1-1	-149.35	-231.85	-513.69
1-2	-149.43	-232.12	51.99
1-3	-714.66	-232.25	52.02
1-4	-714.57	-232.10	-513.69
2-1	1750.99	-231.74	1386.02
2-2	1750.91	-231.87	1952.07
2-3	1184.89	-232.21	1951.79
2-4	1185.02	-232.09	1386.31
3-1	3651.01	-231.85	-514.11
3-2	3650.96	-232.12	51.91
3-3	3085.00	-231.83	51.77
3-4	3085.05	-232.09	-513.67

距墙尺寸反算、第三方点位检查等,如要条件可以使用其他测量仪器对放样点进行抽检。为了验证三维激光放样系统在实际放样过程中可行性,本次采用目前工程主要测量仪器全站仪对放样点进行复测,表 4 为检测数据。

3.6 数据对比分析

将三维激光投影系统放样数据与全站仪复测数据进行对比分析,如表 5 所示,两次数据最大偏差 RMS(均方根)为 0.36 mm,能够满足现场施工放样 1 mm 的精度要求。

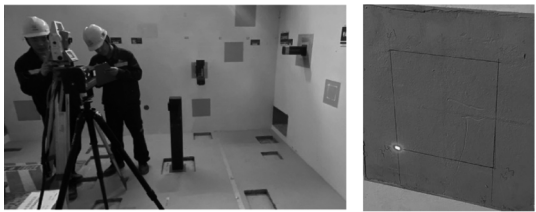


图 8 支架定位点现场复查
Fig.8 On-site review of support positioning point

表 5 两次数据对比分析
Tab.5 Comparative analysis of the two data

点号	投影系统放样数据/mm			全站仪复测数据/mm			偏差/mm			
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	RMS
1-1	-149.16	-232	-513.84	-149.35	-231.85	-513.69	-0.19	0.15	0.15	0.28
1-2	-149.16	-232	51.84	-149.43	-232.12	51.99	-0.27	-0.12	0.15	0.33
1-3	-714.84	-232	51.84	-714.66	-232.25	52.02	0.18	-0.25	0.18	0.36
1-4	-714.84	-232	-513.84	-714.57	-232.10	-513.69	0.27	-0.10	0.15	0.32
2-1	1750.84	-232	1386.16	1750.99	-231.74	1386.02	0.15	0.26	-0.14	0.33
2-2	1750.84	-232	1951.84	1750.91	-231.87	1952.07	0.07	0.13	0.23	0.27
2-3	1185.16	-232	1951.84	1184.89	-232.21	1951.79	-0.27	-0.21	-0.05	0.35
2-4	1185.16	-232	1386.16	1185.02	-232.09	1386.31	-0.14	-0.09	0.15	0.22
3-1	3650.84	-232	-513.84	3651.01	-231.85	-514.11	0.17	0.15	-0.27	0.35
3-2	3650.84	-232	51.84	3650.96	-232.12	51.91	0.12	-0.12	0.07	0.18
3-3	3085.16	-232	51.84	3085.00	-231.83	51.77	-0.16	0.17	-0.07	0.24
3-4	3085.16	-232	-513.84	3085.05	-232.09	-513.67	-0.11	-0.09	0.17	0.22

4 影响放样精度的误差分析

测量误差是普遍存在的,且是可以积累的,这是受设备人员环境等因素影响的必然结果。在三维激光投影放样过程中,若忽视微小偏差带来的影响,则会导致系统性的误差累积,必然影响整体测量精度。因此,需要采取各种方法手段来削弱误差对系统性测量带来的影响。

4.1 仪器误差分析

仪器方面影响放样精度的因素主要包括系统定位误差和机械磨损误差。其中系统定位误差是施工放样的主要误差来源。三维激光投影系统在进行定位时需要测量目标定位点,而其定位坐标的准确性取决于反射膜的好坏和定位反射膜安装位置的好坏^[11],以及两次测量之间的仪器系统误差也将造成系统定位误差的产生,该误差主要通过重复测量和目标定位点的维护来进行减弱。

而机械磨损老化误差主要是由于激光器长时间、高速旋转会对系统主轴带来损伤,而主轴的机械磨损将导致激光器不能保持恒定的速度进行运转^[11],从而对系统定位和投影放样精度造成影响,该误差是日积月累形成的,在使用过程中注意仪器保养可以延长使用寿命。

4.2 环境影响分析

在放样过程中所处环境的温度、湿度、风力、大气折射、能见度等因素属于不可控的因素,这些因素变化对测量结果都会产生一定的影响。在本应用场景范围下分析,其主要在室内进行投影放样,主要环境误差来源是架设基础的稳定性。即架设的基础面发生震动、沉降都将导致投影系统发生位移,从而导致投影放样数据发生偏差。该误差主要通过拉取警戒带、禁止放样区域较大的吊装、切割作业等措施进行规避。

4.3 人为因素影响分析

三维激光投影工作的开展主要依靠人员的操作进行,人员的专业能力水平是存在差异性的,不同人员的测量操作方法会有一定的区别,不同的操作人员进行操作也会造成误差,可以通过加强操作人员的技能培训,提高技术操作人员的熟练程度来降低人员操作的误差^[11]。

5 结论

文中主要提出了应用三维激光投影技术实现核

电厂快速施工放样的方法,通过可行性分析和在某核电项目现场应用。以及与目前主要放样仪器全站仪进行数据对比分析,可以得出相较于传统放样方法,三维激光投影技术可以一次投射出视场范围内的所有定位点和图形,实现快速、批量化放样,通过与全站仪的复测数据对比分析来看,其最大偏差为 0.36 mm,能够较好的满足现场施工放样 1 mm 的精度要求。

三维激光投影技术作为一种新兴的数字化定位技术,能够以数字激光线条形式一次投影成型的方式进行智能放样,相较于传统施工放样方式,大幅提高施工效率,保障施工质量,在核电厂快速施工放样中具有一定的应用前景,在提高我国核电领域基础施工智能技术装备水平,推动施工技术装备向数字化、智能化、自动化与现场施工相融合方向发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] Ni Qingmin. Talking about the quality control of project engineering process[J]. Urban Architecture, 2013, (4): 137. (in Chinese)
倪卿民. 浅谈项目工程工序质量控制[J]. 城市建筑, 2013, (4): 137.
- [2] Li Ang, Xiong Wenhao, Peng Hui, et al. Research on rapid construction lofting technology based on BIM lofting robot [J]. Urban Building Space, 2022, 29 (S1): 161 - 162. (in Chinese)
李昂, 熊文豪, 彭辉, 等. 基于 BIM 放样机器人的快速施工放样技术研究[J]. 城市建筑空间, 2022, 29 (S1): 161 - 162.
- [3] Qian Yuelei, Guan Xiaoguo, Li Yang, Application of GNSS technology in engineering lofting[J]. Journal of Xuchang University, 2022, 41 (2): 37 - 40. (in Chinese)
钱跃磊, 关小果, 李阳, GNSS 技术在工程放样中的应用研究[J]. 许昌学院学报, 2022, 41 (2): 37 - 40.
- [4] Dong Lingjie, Dai Guanghong, Ji Song. 3D reconstruction model of indoor scene based on 3D laser projection[J]. Applied Laser, 2022, 42 (7): 125 - 132. (in Chinese)
董玲洁, 代广红, 冀松. 基于 3D 激光投影的室内场景三维重建模型[J]. 应用激光, 2022, 42 (7): 125 - 132.
- [5] Sun Jiahui. Research on digital positioning laser 3D projection technology[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2014. (in Chinese)
孙佳慧. 数字定位激光 3D 投影技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014.

- [6] Li Yunpeng, Hou Maosheng. Laser scanning projection technology applied to the positioning of rail car parts[J]. China Standardization, 2019, (S2): 291 - 296. (in Chinese)
李云鹏, 侯茂盛. 应用于轨道客车零件定位的激光扫描投影技术[J]. 中国标准化, 2019, (S2): 291 - 296.
- [7] Wang Sheng, Wu Junhao, Niu Runjun, et al. Research and application of laser projection technology in aircraft conduit support installation [J]. Navigation and Control, 2018, 17(3): 48 - 54. (in Chinese)
王声, 吴军豪, 牛润军, 等. 激光投影技术在飞机导管支架安装中的研究与应用[J]. 导航与控制, 2018, 17(3): 48 - 54.
- [8] He Haitao, Cao Jun, Xu Gang, et al. Application of close-range photogrammetry in three-dimensional measurement of nuclear power pressure vessels[J]. Mapping and Spatial Geographic Information, 2021, 44(5): 191 - 195. (in Chinese)
赫海涛, 曹君, 徐刚, 等. 近景摄影测量技术在核电压力容器三维测量中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44(5): 191 - 195.
- [9] Huang Jing, Liu Ben, Wang Kai, et al. Positioning method of heavy work pieces based on spatial positioning system[J]. New Technology and New Process, 2019, (2): 24 - 27. (in Chinese)
黄静, 刘奔, 王凯, 等. 基于空间定位系统的重工工件定位方法[J]. 新技术新工艺, 2019, (2): 24 - 27.
- [10] Guo Lili. Research on intelligent laser 3D projection system and spatial positioning accuracy calibration technology [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2019. (in Chinese)
郭丽丽. 智能激光 3D 投影系统及空间定位精度标定技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2019.
- [11] Qiu Jun, Zhang Yajun, Xu Lei, et al. System error analysis of digital positioning laser projection 3D projection technology[J]. Science and Technology and Innovation, 2022, (7): 105 - 107. (in Chinese)
邱均, 张亚军, 许磊, 等. 数字化定位激光投影 3D 投影技术系统误差分析[J]. 科技与创新, 2022, (7): 105 - 107.