

DOI: 10.7672/sgjs2025240092

三维激光扫描技术在双曲铝板设计、加工 及施工中的应用*

宋江¹, 段先军¹, 柴婷婷¹, 陈李华¹, 刘铸玮¹, 王刚²

(1. 北京城建集团有限责任公司, 北京 100084; 2. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100037)

[摘要] 随着智能建造技术的进步、对绿色环保和以人为本理念的重视及经济快速发展,未来的建筑设计将更加多元化,符合建筑美学的异形建筑将会成为一种趋势。主要研究了复杂曲面构造跨专业3D扫描技术应用,针对点云数据分析及有效选取,确定点云数据拟合模型技术在流程中的应用步骤及如何根据拟合模型指导跨专业构建实体模型。首先分析异形构件复杂曲面特性,并初步判断不同构件位置轮廓线形类别。其次根据轮廓线形类别拆分数据并分类处理,即针对常规线形范围数据,选取有效特征点并集合交点,输出构件轮廓,指导放样设计;针对复杂曲线范围,采用Geomagic Design X处理对应位置复杂曲面点云数据;综合提高点云数据处理精度及效率,实景化拟合出准确无误的主体结构的完整曲面造型。最后基于主体结构的完整曲面造型模型(前序专业模型),并根据建筑设计意图,指导完成异形建筑铝板装饰模型(后序界面专业模型),并完成样板加工及拓展施工。其研究结果对优化三维扫描技术、数据处理及高效点云数据拟合在异形构件复杂曲面跨专业设计、加工及施工案例中的应用具有重要的理论和实际意义。

[关键词] 三维扫描;实景化拟合;双曲铝板;点云数据;施工技术

[中图分类号] TU758.11

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)24-0092-06

Application of 3D Laser Scanning Technology in Design, Fabrication and Construction of Hyperbolic Aluminum Plate

SONG Jiang¹, DUAN Xianjun¹, CHAI Tingting¹, CHEN Lihua¹, LIU Zhuwei¹, WANG Gang²

(1. Beijing Urban Construction Group Co., Ltd., Beijing 100084, China;

2. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., Beijing 100037, China)

Abstract: With the advancement of intelligent construction technology, the emphasis on green and environmentally friendly practices, the prioritization of people-oriented concept, and the rapid economic development, future architectural designs will become increasingly diversified. Buildings with unconventional forms that align with architectural aesthetics are expected to emerge as a prevailing trend. This paper primarily focuses on the application of cross-disciplinary 3D scanning technology for complex curved surface construction, specifically addressing the analysis and effective selection of point cloud data. It establishes the procedural steps for applying point cloud data fitting model technology within the workflow and explores how to guide the creation of cross-disciplinary component solid models based on the fitting model. The research begins by analyzing the characteristics of complex curved surfaces in unconventional components and preliminarily categorizing the contour line types at different component positions. Subsequently, the data is segmented and processed according to the contour line types. For data within conventional linear ranges, effective feature points are selected, intersection points are aggregated, and component contours are output to guide lofting design. For complex curve ranges, Geomagic Design X is employed to process the corresponding complex surface point cloud data. This

* 2023北京市国资委国有资本经营预算支持市属国企(创新团队)项目;大跨度钢屋盖综合模块拼装、运输及安装

[作者简介] 宋江,深化设计师,E-mail: songjiang@ bucg. cc

[通信作者] 柴婷婷,科研主任,E-mail: chaitingting@ bucg. cc

[收稿日期] 2025-11-11

approach enhances both the precision and efficiency of point cloud data processing, enabling the realistic fitting of accurate and complete surface models of the main structure. Finally, based on the complete surface model of the main structure (the preceding professional model) and in accordance with the architectural design intent, the study guides the completion of the aluminum panel decorative model for unconventional buildings (the subsequent interface professional model), followed by formwork processing and extended construction. The findings of this research hold significant theoretical and practical implications for optimizing 3D scanning technology, data processing, and efficient point cloud data fitting in cross-disciplinary design, fabrication, and construction cases involving complex curved surfaces of unconventional components.

Keywords: 3D scanning; realistic fitting; hyperbolic aluminum plate; point cloud data; construction

0 引言

相较于传统的二维设计,三维设计(3D设计)有诸多显著优势,如直观性、准确性、可视化、创意表达及修改调整效率提升。但在实际工程中常面临如下问题:对于一些设计、加工及施工精度高达毫米级的工程,涉及多个专业间设计协调。前序专业生产、施工和未来的加载变形,是后序界面专业设计、加工及安装的依据,尤其对于异形结构更是如此。

为此可通过对前序已生产加工或施工的结构进行高精度三维扫描,基于前序专业最终状态的三维扫描点云数据,并通过点云拟合方式创建前序专业实体模型。结合设计意图,构建后序界面专业的设计-加工模型,并生成二维施工图纸,指导后序界面专业构件的加工和安装。

因此,该方法可最大限度确保高精度、超复杂的多专业建筑体顺利施工及安装,并达到满意的设计效果和精度要求。

1 工程概况

香港机场三跑道项目航站楼内树杈柱结构共有14组,每组2种造型,共计28种不同类型;可见面积总计300m²,如图1所示;最宽2.6m,最窄只有1.9m;相对标高最高14.000m,最低7.700m。由于每种类型的大小和角度各不相同,为验证永久工程的设计效果,确保施工可达到设计要求的毫米级精度,选择其中一种类型开展样板施工。



图1 钢屋盖-树杈柱体系

Fig.1 Steel roof-tree branch column system

2 异形构件复杂曲面特性分析

2.1 树杈柱结构特点及扫描方法确定

主体钢结构树杈柱由圆弧段圆管+牛腿+连接

夹板组成,如图2所示。项目团队先采用FARO S350落地支架式扫描仪扫描,生成三维立体模型,不仅能提高工程测量效率,还能解决传统工程测量中产生的大量数据难以处理问题。但实际扫描后,节点板位置点云噪点较多,达不到后序界面专业设计的质量要求(图3中收口胶条≤5mm;当点云拼接完成后噪点分层>5mm时,影响后序铝板模型与拟合后结构模型间匹配精度)。经过对比研究分析,夹板螺栓节点是扫描的难点,间距小、数量多。传统固定式扫描仪即使增加扫描站点数量,也很难覆盖螺栓间空隙,且极易形成噪点,点云质量低,处理难度大,仅适合大空间的单体建筑扫描。

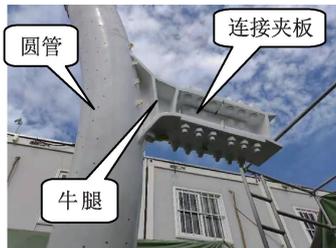


图2 树杈柱结构(局部)

Fig.2 Tree branch column structure(part)

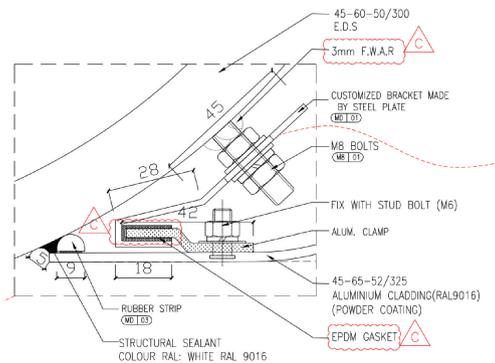


图3 双曲铝板收口节点

Fig.3 Necking node of hyperbolic aluminum plate

针对树杈柱样板扫描,对比之后选用了手持式扫描仪,相对于立式扫描仪更便携,对于隐蔽部位

可做到无死角覆盖,更适合树杈柱结构类型。

实际永久工程中所有 14 组树杈柱将用于承受整个屋盖自重。屋盖钢结构采用了整体模块滑移安装方式,如图 4 所示。8 个模块在内地组装完成发运到香港安装。除模块间的嵌补段需在香港安装外,其他专业如金属屋面、机电桥架、挡烟隔墙及部分室内大吊顶均已安装完毕。单个模块最重达 1 035t。最后这些模块会与树杈柱结构精准无误对接,如图 5 所示,精度要求 10mm 以内。在施工过程中易产生结构变形、位移等问题,因此,相关施工单位应加强对钢结构施工技术管理的监督。同时,对于后序界面专业设计和施工,通过扫描技术监测卸载后的树杈柱结构具有重要参考意义。

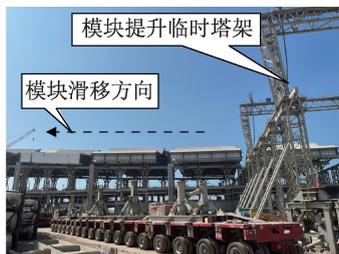


图 4 钢屋盖模块提升滑移

Fig. 4 Module lifting and slip for steel roof



图 5 树杈柱与屋盖对接

Fig. 5 Connection between tree branch column and steel roof

注意,此样板仅被用于验证三维扫描技术在钢结构树杈柱双曲铝板造型设计、加工及施工中应用的可行性(屋盖卸载前)。

2.2 手持式三维扫描仪特点

1) 主动扫描光源,无须人工干预,自动发射的激光即可测得目标物表面点的三维坐标信息,无须复杂操作,实现一键自动扫描。

2) 三维激光扫描以水平和垂直方向同时全方位快速获取高精度、高分辨率的海量点云数据。现场所有肉眼可见的物体都可扫描得到,如案例中树杈柱结构角落的细节、夹板间空隙等。

3) 数字化采集、兼容性好。中间没有模拟信号转换的步骤,直接获取数字信号采集的数据(PTS, E57 等格式)。其具有全数字特征,方便进行后期处理和输出,与 Revit, AutoCAD, SketchUp, ArchiCad, Bentley, Tekla, Rhino 等软件有很好的兼容性。

4) 便携性。手持式三维扫描仪可装入手提箱,携带到作业现场或工厂,使用便捷。

5) 高精度。在手持模式下,其扫描精度最高可达 0.045mm,体积精度可达 0.3mm/m³。

3 实景化拟合前序结构专业主体模型

3.1 圆弧柱曲面造型拟合

高精度的点云模型是实景化拟合曲面效果的基础。Geomagic Design X 这款拟合软件可自动识别并生成圆弧段结构模型,如图 6 所示。整个过程主要分为自动识别和精确拟合两大步。第 1 阶段,自动识别-创建“构件”。确保点云数据已经过必要的预处理,如去除噪声、填充小孔、简化等;进入功能组中的自动曲面命令;设置识别参数,如拟合精度、离群点剔除(自动放弃拟合偏差较大的点云)、拟合对象的外观类型。最后运行并检查结果是否被正确识别为“圆柱构件”,如没有,需返回上一步调整识别参数,或使用手动领域工具进行修补。第 2 阶段,选择拟合的“圆柱构件”设置拟合参数,如曲面类型、修剪边界、自然边界、径向厚度和精度,完成拟合。此流程是逆向工程中的核心环节,能高效将物理样件的扫描数据转化为高质量、可用于加工和再设计(后序 Rhino 设计)的模型。

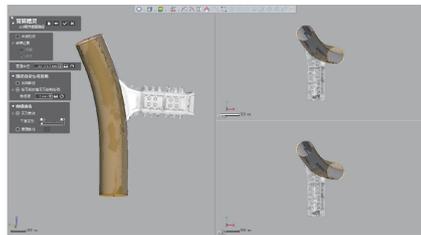


图 6 Geomagic Design X 自动生成圆管模型

Fig. 6 Geomagic Design X automatically generating circular tube models

经测量检查,拟合圆管的直径与理论模型(考虑油漆厚度)仅有 0.5mm 偏差。在此环节充分验证了实景化拟合的质量和效果。

3.2 牛腿、节点板拟合

连接板和牛腿的拟合充分结合了业主的设计意图,在点云模型中选取集合交点,经过延伸曲线、倒圆角、修剪、重建曲面等步骤完善细节,输出构件轮廓,如图 7 所示。通过分析模型中构件尺寸,拟合

后的实景化模型与点云匹配度极高(±1.5mm 偏差),完全符合作为建筑造型设计的结构基准模型要求。

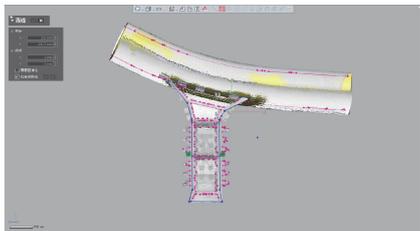


图7 Geomagic Design X 半自动生成节点板和牛腿模型

Fig. 7 Semi-automatic generation of node board and bracket models by Geomagic Design X

3.3 点云拟合技术创新

3.3.1 去噪算法改进

本研究提出了一种改进的点云去噪算法,该算法融合了半径滤波和局部平面拟合技术,旨在提升目标点云的识别精度。在点云处理阶段,该算法特别适用于螺栓节点的处理,能有效去除噪声点,从而提高点云数据质量。通过优化去噪过程,本研究为后续的点云拟合和建模提供了更准确的数据基础。

3.3.2 局部表面拟合

在点云拟合阶段,本研究采用了局部表面拟合技术,通过在点云的局部区域内拟合小片段的曲面,然后将这些片段拼接在一起,形成整体的拟合

结果。这种方法特别适用于复杂和不规则的表面拟合,如牛腿节点的拟合。局部表面拟合技术能精确捕捉到局部细节,为复杂结构的建模提供了一种有效的解决方案。

3.3.3 B样条曲线和NURBS曲线的应用

本研究进一步探讨了B样条曲线和非均匀有理B样条(NURBS)曲线在点云拟合中的应用。这些数学工具能精确表示自由形状的曲线和曲面,广泛应用于3D建模领域。特别是在建筑造型设计阶段,NURBS曲线的应用创新使得复杂结构构件的扫描数据能高效转化为可用于建筑造型设计的参考基准(3D模型)。这一创新极大地方便了后续界面专业进行更深入的二次应用和创新设计,提高了设计流程的效率和质量。

综上所述,本研究在点云拟合技术方面的创新不仅提高了数据处理效率和准确性,还为建筑行业的数字化转型提供了强有力的技术支持。

4 构建后序界面专业设计模型

在具备实景化拟合前序结构专业主体模型条件下,结合建筑设计大样图(见图8),Rhino软件可轻松实现复杂曲面造型设计。首先需找出结构的基准面、轮廓线,并考虑施工安装空间。通过NURBS曲线放样建立装饰造型。其中,基准面的确定参考了拟合后的圆弧柱体,以竖向轴心为z轴;以轴心上的法线方向确定x轴,确定出立面基准;y轴方向参考拟合后的牛腿部位结构中心线(见图9)。

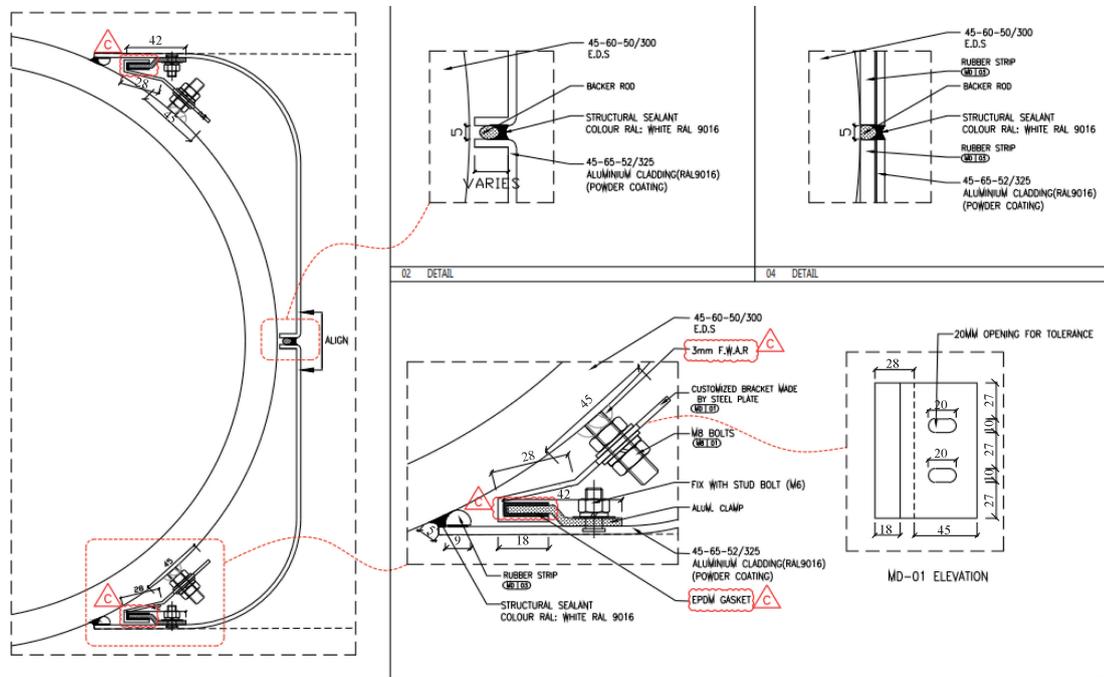


图8 设计节点大样

Fig. 8 Design node sample

到此步骤基准面和矢量方向均已确立。然后利用 NURBS 曲线强大的可编辑性、高度直观性和可预测性,可实现任何想要的曲面效果。它不仅可创建复杂的几何形状和曲线,还可优化调整曲率,让曲面更顺滑、美观。控制点可直接连接到曲线上,或通过类似橡皮筋的方式连接。将顺滑的曲线两两间通过放样功能形成曲面,沿曲率方向延伸靠圆柱一侧的曲面,保证整体效果顺滑和衔接,然后将顶部、底部曲面与侧面分别倒圆弧角。最后将延伸后的曲面用圆柱管修剪掉多余部分,得到最终的双曲铝板造型(见图 10)。

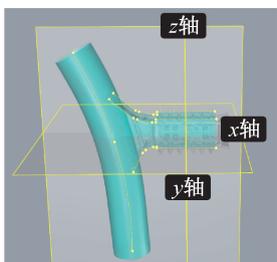


图 9 提取结构基准面和轮廓线

Fig. 9 Extracting the structure datum and outline



图 10 NURBS 曲线放样、曲率优化后的效果

Fig. 10 Effect after NURBS curve lofting and curvature optimization

5 装饰双曲铝板下单、加工、检测及安装

5.1 双曲铝板下单

复杂双曲铝板下单和加工是整个流程中需严格把控的环节。下单精度和加工质量将直接影响最终完成效果。利用 Rhino 中强大的 GH 参数化功能,将双曲铝板面导入 Grasshopper、划分曲面,并导出开料和加工图纸(见图 11)。程序自动生成的加工尺寸快速且准确,可消除人为因素影响,大大提高建筑设计和生产的精度及效率,并减少错误。

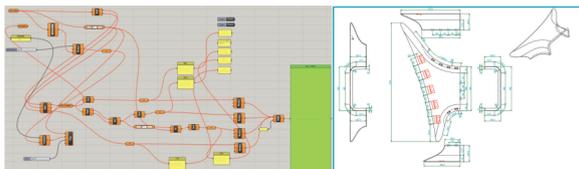


图 11 GH 参数化导出加工数据和加工

Fig. 11 GH parameterization exporting processing data and processing

5.2 双曲铝板加工与检测

双曲铝板的加工技术自 2010 年以来便已实现技术普及、产业链完整、BIM 深度集成、标准化和可批量化。案例中铝板厂家根据设计要求专门制作了适应双曲面形状的成型木模。模具制作需考虑双曲铝板的曲率和弯折角度,以确保成型准确性和稳定性。将铝板放于成型模具中,通过加热和压力作用使其成型为所需的双曲面形状。成型过程中需控制加热温度、压力和成型时间,以确保成型质量和精度。成型完成后采用靠模方法检查铝板加工精度,合格后再次将不同位置的铝板在一起试拼装,依据加工图检查整体尺寸(四边和空间对角线)及外观效果是否平整、顺滑(见图 12)。检测精度符合要求后,接下来对铝板进行表面处理,以增加其耐腐蚀性和美观度。常用的表面处理方法包括阳极氧化、喷涂涂层、粉末涂层等。本案例采用 RAL9016 粉末喷涂工艺,与结构柱体一致,使整体效果更加贴合。



图 12 木模和铝板加工工艺

Fig. 12 Processing technology of wood formwork and aluminum plate

5.3 预留码件与定位检测

为方便铝板安装,在设计阶段便需考虑码件预留。相对于在现场测量放线、定位烧焊码件的传统方式,该项目充分运用了 BIM 技术,在主体钢结构加工前将码件的三维信息与主体钢结构相结合,通过 Tekla 软件建模,提供给加工厂模型(见图 13)。工厂在主体结构出图时将已协调确认后的码件与主体结构一并加工。对比现场烧焊,其加快了生产效率,提高了加工精度(见图 14)。

码件的定位偏差同样也会影响安装质量,偏差

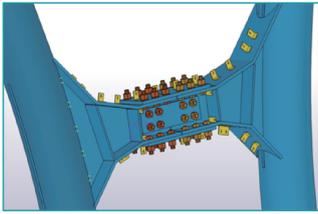


图 13 结构预留码件(最终确认模型)

Fig. 13 Structure reserved code (final confirmation model)



图 14 预留码件实体

Fig. 14 Reserved code

较大的情况下铝板配件可能无法适配。为提前了解码件偏差情况,采取相对应的整改措施。这就需在主体结构卸载后、结构趋于稳定的情况下(见图5)对树杈柱进行三维扫描,结合 BIM 理论模型对比偏差数值。结合节点图, $\Delta \leq 10\text{mm}$,节点设计可消化这部分偏差; $10\text{mm} < \Delta \leq 30\text{mm}$,可定制铝板专用配件消化误差; $30\text{mm} < \Delta$,则需采用补焊或切割打磨重新焊接等方式整改码件。

5.4 安装节点创新优化

建筑设计方案要求双曲铝板与圆弧结构柱间保留 5mm 缝隙,缝隙要求宽度一致,通缝设置,对结构、装饰铝板的加工和安装质量要求极为苛刻。为达到设计要求,采用在结构上焊接螺栓码件的方式(见图 3)。其中,铝板定制配件开长圆孔,一端与螺栓码件固定,另一端与铝板预埋铆钉固定;并在内部设置胶条。该细部节点充分考虑了误差的可调节性。螺栓码件可调节进出方向的误差,铝板配件可调节左右方向误差,胶条的设置将 2 种材料隔绝开,避免安装造成表面涂层破坏,导致后期发生电化学反应。样板通过安装节点的设计提高了因前序结构专业加工误差而造成后序界面专业现场无法安装或安装效果差的容错率,进而提高一次安装成品合格率。

6 结语

本文通过实体样板工程充分开展在实体前序专业已施工条件下利用三维扫描技术的优化应用,提高后序界面专业设计、加工及施工各环节的精度,并论证了三维扫描技术在复杂铝板包柱曲面设计、加工及施工阶段应用的可行性。

先对 A 实体(树杈柱)进行逆向建模获得 A 实体的拟合模型,然后在 A 实体的拟合模型中获得特征点,由特征点获得 B 设计模型(双曲铝板),最终根据 B 设计模型生成 B 实体,实现永久工程设计效果,并在其他类似项目中进行推广应用。

此外,BIM 技术的应用和创新不仅降低成本、减少人力和缩短时间,而且工厂先进的加工设备和加工环境也大大提高了加工质量和精度。

参考文献:

- [1] 张涵.工程测量中地面三维激光扫描技术的应用分析[J].技术与市场,2021,28(4):103-104.
ZHANG H. Application analysis of ground three-dimensional laser scanning technology in engineering survey [J]. Technology and market, 2021, 28(4): 103-104.
- [2] 菅芳.现代土木工程中钢结构技术的施工技术探析[J].工程建设,2023,6(9):165.
JIAN F. Analysis of construction technology of steel structure technology in modern civil engineering [J]. Engineering construction, 2023, 6(9): 165.
- [3] 张慎,尹鹏飞.基于 Rhino+Grasshopper 的异形曲面结构参数化建模研究[J].土木建筑工程信息技术,2015,7(5):102-106.
ZHANG S, YIN P F. Research on parametric modeling technique for special-shaped surface based on Rhino and Grasshopper [J]. Journal of information technology in civil engineering and architecture, 2015, 7(5): 102-106.
- [4] 于鹏远,罗维成. BIM+三维扫描技术在弧形构筑物施工中的应用[J].施工技术(中英文),2024,53(16):110-113.
YU P Y, LUO W C. Application of BIM+3D scanning technology in construction of arc structure [J]. Construction technology, 2024, 53(16): 110-113.
- [5] 韩学敏.激光扫描技术在大型波浪形屋盖钢结构变形分析中的应用[J].施工技术(中英文),2024,53(8):39-43.
HAN X M. Application of laser scanning technology in deformation analysis for large wavy roof steel structures [J]. Construction technology, 2024, 53(8): 39-43.
- [6] 包胜,方玄略,卜航栋.三维激光扫描技术在工程建设中的应用研究[J].施工技术(中英文),2024,53(5):1-10.
BAO S, FANG X L, BU H D. Application research of 3D laser scanning technology in engineering construction [J]. Construction technology, 2024, 53(5): 1-10.
- [7] 张理想,刘俊杰,崔天义,等. BIM+三维扫描技术在施工质量控制中的应用[J].施工技术(中英文),2023,52(5):49-52.
ZHANG L X, LIU J J, CUI T Y, et al. Application of BIM+3D scanning technology in construction quality control [J]. Construction technology, 2023, 52(5): 49-52.
- [8] 戴路,段超龙,李波,等.三维激光扫描技术在武汉天河机场幕墙改造中的应用研究[J].施工技术(中英文),2023,52(3):39-43.
DAI L, DUAN C L, LI B, et al. Application of 3D laser scanning technology in curtain wall reconstruction of Wuhan Tianhe Airport [J]. Construction technology, 2023, 52(3): 39-43.

表 5 沥青用量 (P_{ai}) 与体积参数回归方程和相关系数 R^2 Table 5 Regression equations and correlation coefficient R^2 for asphalt dosage (P_{ai}) and volume parameters

类别	P_{ai} 和 ρ_f	P_{ai} 和 VV	P_{ai} 和 VMA	P_{ai} 和 VFA
AC-13	$y = -0.012 9x^2 + 0.152 4x + 2.064 4$ $R^2 = 0.997 9$	$y = 0.308x^2 - 5.862 5x + 27.545$ $R^2 = 0.999 9$	$y = 0.5x^2 - 6.175x + 35.777$ $R^2 = 0.978 6$	$y = -1.919 6x^2 + 36.786x - 63.16$ $R^2 = 0.999 3$
ARHM-13	$y = -0.008x^2 + 0.117 5x + 2.079 2$ $R^2 = 1$	$y = 0.549 1x^2 - 9.047 1x + 37.864$ $R^2 = 0.998 9$	$y = 0.272 3x^2 - 3.187 5x + 24.385$ $R^2 = 0.999 1$	$y = -1.383 9x^2 + 31.125x - 59.957$ $R^2 = 0.999 9$
SMA-13	$y = -0.014 7x^2 + 0.205 6x + 1.795 4$ $R^2 = 0.996 6$	$y = 0.473 2x^2 - 7.023 6x + 26.812$ $R^2 = 0.999 4$	$y = 0.450 9x^2 - 4.480 7x + 24.144$ $R^2 = 0.980 7$	$y = -2.187 5x^2 + 40.55x - 84.622$ $R^2 = 0.998 9$

[4] 张方方,张捷,韩光,等. Superpave 与马歇尔两种沥青混合料设计方法探讨[J]. 中外公路,2008,28(6):236-239.
ZHANG F F, ZHANG J, HAN G, et al. Discussion on design methods of Superpave and Marshall asphalt mixtures[J]. Journal of China & foreign highway, 2008, 28(6): 236-239.

[5] 王旭东. 一种新型沥青混合料体积设计方法的探讨[J]. 上海公路,2011(2):1-3,8,12.
WANG X D. Discussion on a new volume design method for asphalt mixture[J]. Shanghai highways, 2011(2): 1-3, 8, 12.

[6] 陈泽宏. 沥青混合料不同配合比设计方法对比研究[D]. 长沙:湖南大学,2013.
CHEN Z H. Comparative study on different mix design methods for asphalt mixes[D]. Changsha: Hunan University, 2013.

[7] 陈华鑫,江星. 沥青混合料马歇尔设计异常现象分析[J]. 中外公路,2006,26(4):195-197.
CHEN H X, JIANG X. Analysis of abnormal phenomenon in Marshall design of asphalt mixture[J]. Journal of China & foreign highway, 2006, 26(4): 195-197.

[8] 陈骁,朱春阳. 不同沥青混合料设计方法对比评价分析[J]. 中外公路,2007,27(4):267-271.
CHEN X, ZHU C Y. Comparative evaluation and analysis of different asphalt mixture design methods[J]. Journal of China & foreign highway, 2007, 27(4): 267-271.

[9] 黄优,刘朝晖,王旭东,等. 基于骨架最紧密状态的沥青混合料配合比设计方法[J]. 中外公路,2016,36(5):216-221.
HUANG Y, LIU Z H, WANG X D, et al. Mix proportion design method of asphalt mixture based on the tightest skeleton state[J]. Journal of China & foreign highway, 2016, 36(5): 216-221.

[10] 冯新军,康起. 试验室压实方法对热拌沥青混合料空隙率及力学性能的影响[J]. 中外公路,2020,40(3):291-297.
FENG X J, KANG Q. Evaluation of the laboratory compaction method on the air voids and the mechanical behavior of hot mix asphalt[J]. Journal of China & foreign highway, 2020, 40(3): 291-297.

[11] MASAD E, JANDHYALA V K, DASGUPTA N, et al. Characterization of air void distribution in asphalt mixes using X-ray computed tomography[J]. Journal of materials in civil engineering, 2002, 14(2): 122-129.

[12] 王聪,郭乃胜,赵颖华,等. 不同成型方法和级配的沥青混合料内部空隙特征[J]. 吉林大学学报(工学版),2014,44(1):74-80.
WANG C, GUO N S, ZHAO Y H, et al. Air voids distribution of asphalt mixtures in different compaction methods and aggregate gradations[J]. Journal of Jilin University (engineering and technology edition), 2014, 44(1): 74-80.

(上接第 97 页)

[9] 孙楠,李枫,沃布帆. 以高品质为产品导向的改造技术研究[J]. 城市建筑空间,2023,30(9):5-7.
SUN N, LI F, WO B F. High-quality product-oriented transformation technology[J]. Urban architecture space, 2023, 30(9): 5-7.

[10] 刘欢佳,袁俭,钟易达. 三维激光扫描曲面结构点云安装复核技术在异形混凝土结构施工中的应用[J]. 城市建筑空间, 2022, 29(10): 242-243.
LIU H J, YUAN J, ZHONG Y D. Application of three-dimensional laser scanning surface structure point cloud installation review technology in special-shaped concrete structure construction[J]. Urban architecture space, 2022, 29(10): 242-243.

[11] 于安澜,郭讯. 地域性现代建筑设计探索——以西安热雪奇迹室内冰雪乐园为例[J]. 城市建筑空间, 2024, 31(4): 21-27.
YU A L, GUO X. Regional modern architectural design: taking

Indoor Ice and Snow Park of Bonski Snow Park in Xi'an as an example[J]. Urban architecture space, 2024, 31(4): 21-27.

[12] 杨敏,方林,张俊. 三维激光扫描在既有建筑检测中的应用[J]. 城市建筑空间,2022,29(11):247-248,251.
YANG M, FANG L, ZHANG J. Application of three-dimensional laser scanning in the detection of existing buildings[J]. Urban architecture space, 2022, 29(11): 247-248, 251.

[13] 李德胜. 高铁站房室内设计探析[J]. 城市建筑空间, 2025, 32(4): 99-103.
LI D S. Interior design of high speed railway station building[J]. Urban architecture space, 2025, 32(4): 99-103.

[14] 吴哲昊,王超益,张群力,等. 杭州运河亚运公园体育馆绿色建筑实践[J]. 建筑技艺,2023,29(5):106-109.
WU Z H, WANG C Y, ZHANG Q L, et al. Green building design of Hangzhou canal Asian games park gymnasium[J]. Architecture technique, 2023, 29(5): 106-109.