

# 商用飞机复合超级壁板数字化测量技术研究

王宏博, 马煜亮, 唐珊珊

(中航西安飞机工业集团股份有限公司, 陕西 西安 710000)

**摘要:**为提高飞机装配质量,便于装配过程的反馈调整,提出商用飞机复合超级壁板数字化测量技术研究。分析壁板的组成结构与结构特征,减少测量过程中对壁板造成损害,利用红光光束、分束镜等装置建立激光雷达扫描系统,通过点云数据配准,提高测量数据精度;构建Metra SCAN扫描仪的不确定度模型,确保测量数据更加真实;分析激光雷达的可达性,计算两种设备的重复测量区间,利用权重分配法获得最终测量数据,完成壁板数字化测量。实验结果表明,所提方法获取的点云数据较为完整,没有出现数据失真现象,测量误差小,促进了数字化测量技术的研究。

**关键词:**商用飞机;复合超级壁板;数字化测量;激光雷达;权重分配

中图分类号:TN391 文献标识码:A 文章编号:1003-7241(2025)02-0110-05

## Research on Digital Measurement Technology of Commercial Aircraft Composite Super Wall Panel

WANG Hong-bo, MA Yu-liang, TANG Shan-shan

(Avic Xi'an Aircraft Industry Group Company Ltd., Xi'an 710000 China)

**Abstract:** In order to improve the assembly quality of aircraft and facilitate the feedback adjustment of the assembly process, the research on the digital measurement technology of commercial aircraft composite super wall panel is proposed. It analyzes the composition structure and structural characteristics of the wall panel to reduce damage to the wall panel during the measurement process, establishes a laser radar scanning system using red light beams, beams splitters and other devices to improve the accuracy of measurement data through point cloud data registration. It builds the uncertainty model of Metra SCAN scanner to ensure more real measurement data, analyzes the accessibility of the lidar, calculates the repeated measurement interval of the two devices, obtains the final measurement data using the weight distribution method, and completes the digital measurement of the wall panel. The experimental results show that the point cloud data obtained by the proposed method is relatively complete, there is no data distortion, and the measurement error is small, which promotes the research of digital measurement technology.

**Keywords:** commercial aircraft; composite super wall panel; digital measurement; Lidar; weight allocation

### 0 引言

飞机制造属于一项复杂的系统工程,在装配过程中存在很多尺寸大小不一的飞机复合壁板<sup>[1]</sup>。这些壁板主要由隔框、蒙皮等工件构成,具有结构一体化的特征,无需为子结构配备专门的模具,节省制造时间。此外,复合材料的刚度较大,不需要太多用量,其能够减轻飞机结构重量。复合壁板是构成机身的关键部件,可承担飞行时受到的各类负载,其表层有耳片孔分布,利用该孔与定位孔相连,实现壁板定位。因此,复合壁板的测量精度直接影响飞机整体的装配质量,决定了飞行过程是否安全。

在制造业快速发展的同时,对飞机制造质量的要求也随之提高。复合壁板经过高温处理后,容易产生机体

固化变形,导致实际尺寸和理想尺寸之间存在一定差别。为满足机身设计要求,必须通过数字化测量来判断是否可以安装,不能强迫装配<sup>[2]</sup>。现阶段,国外一些学者通常使用激光雷达来测量复合超级壁板,利用这些设备代替传统测量工具,通过对关键点的测量,判断壁板是否存在误差<sup>[3]</sup>。该方法测量精度较高,且能够与可视化等技术相结合,将测量结果更加直观地体现出来。而国内研究人员提出一种柔性测量技术,构建复合壁板测量场模型,规划扫描仪的扫描路径,分析该技术在扫描飞机不同位置时的测量结果<sup>[4]</sup>。

虽然国内对数字测量技术已经展开了一些研究,但是对于飞机复合壁板的测量而言,整体水平还较为落后。为此,吸取国内外相关经验,提出基于激光扫描和Metra SCAN空间扫描系统相结合的商用飞机复合超级壁板数字化测量技术。其中,激光扫描的范围大,且不会

\*基金项目:工信部民用飞机重大专项科研项目(MJZ-2018-J-107);中航西安飞机工业集团项目(KY2020003)

收稿日期:2023-08-03

对壁板造成损伤,是一种高效测量工具;Metra SCAN 扫描系统结构简单,操作方便,对复杂材料的数据采集能力较强。此种组合测量方式能够获取更多的测量数据,通过数据融合进一步减少测量误差,提高测量效率。

## 1 商用飞机复合超级壁板组成与结构特征

### 1.1 结构组成

复合壁板是机身结构中最关键的组件,能够承担各类荷载作用,构成壁板的主要结构有如下几种:

(1) 蒙皮:厚度较小,大约在2 mm,属于壳类结构,通常由合金构成,是壁板中最基础的部件。蒙皮能够承载拉伸、剪裁等负载作用,其周围有大量耳片孔分布,可以通过这些孔实现定位。

(2) 长珩:增强壁板强度,一般可以承受蒙皮拉伸负载,其他负载较小,可忽略。制作材料和蒙皮相同,由合金制成。

(3) 钣金隔框<sup>[5]</sup>:由铝合金制作而成,对蒙皮与长珩起到支撑作用,维持机体形状。还能分担机体飞行时产生的荷载,提高整体刚度。

(4) 剪切角片:可传递蒙皮与隔框间的荷载,并确保隔框的安全。

### 1.2 结构特征分析

复合材料在加工过程中会出现各种物理与化学效应,因此材料的结构特征就取决于这些效应能否满足要求,这与加工工艺有关。尤其对于复合超级壁板这类结构复杂的构件来说,结合结构特征选取合适的工艺,即可得到高质量的壁板。

现阶段,复合壁板加工常使用液压成型技术,将液体加入到模具中,通过调整温度、压力等参数<sup>[6]</sup>,最终达到固化目的。复合壁板整体工艺流程如图1所示。

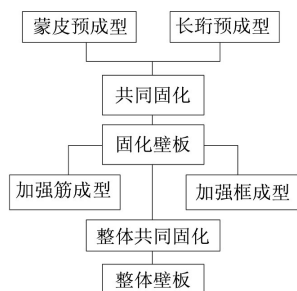


图1 复合壁板工艺流程示意图

在加工成型后,壁板的力学特征必须满足设计要求,但是复合材料一般存在外形误差,因此需要分析其结构特征,为实现准确测量奠定基础。基本结构特征如下:

(1) 壁板结构通常对称,且从动力学角度分析,左右对称要求更为严格。

(2) 壁板在加工时受液体流动和模具约束的影响,导

致成品具有误差,误差主要存在于蒙皮外表、加强框等位置。

(3) 壁板的耐冲击性较差,加工时通过应力装配,可以减少对壁板造成损伤。

## 2 基于数据融合的飞机复合壁板数字化测量

### 2.1 激光雷达测量技术

#### (1) 测量过程

激光扫描仪的测量范围较大,大量应用于精密工件和飞机制造行业。激光雷达扫描过程如图2所示。

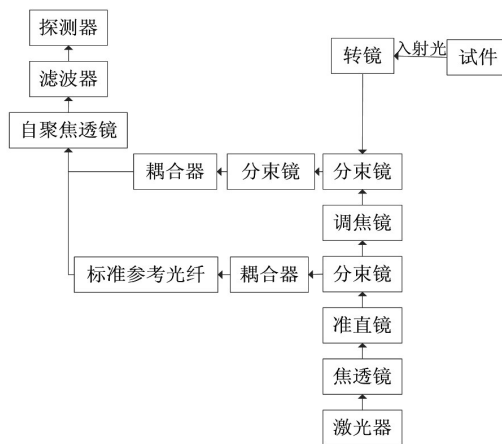


图2 激光雷达扫描系统示意图

该系统使用的光束是半导体红光光束,两束光经过透镜与准直镜后,变为相互平行的光束。通过分束镜后,其中一束光会照射到耦合器上,另一束光则由其他分束镜照射到转镜上,映射在测量目标表面并原路反射。从测量目标上返回的光束通过分束镜后,到达混频装置,信号在该装置内混频,并发送到处理电路。因光束为红外光,肉眼不可见,因此需设计指示光束来协助完成测量工作。

通过光束测量参数时,测量区间较广,但因光速较快,所以测量的间隔很短。为解决此问题,雷达系统利用相对测量技术,在不断切换光纤方向的过程中,完成测量工作。此种切换方式是自动的,只需使用不同的接收电路即可实现切换。

利用激光扫描系统测量复合壁板时,主要通过测量距离和角度参数来实现数字化测量。在测距过程中,两束光的传输时间分别表示为 $T_m$ 和 $T_g$ ,当两束光结合后,可获得时间差 $\Delta T = T_m - T_g$ 。

通过测频的方式得到 $\Delta T$ ,接收与发射信号会存在频率差 $\Delta F$ ,而 $\Delta T$ 和 $\Delta F$ 之间存在下述关系:

$$\Delta T = \frac{\Delta F}{100} \quad (1)$$

因此,可获取被测距离计算公式:

$$L = \frac{1}{2} \left( \Delta L \times \frac{n_0}{\Delta T} \right) \quad (2)$$

式中,  $\Delta L$  为补偿距离,  $n_0$  为光纤与目标之间的距离。

在测量水平角度时, 确定空间内相交的两条直线, 在交点处绘制铅垂线, 则两个铅垂面夹角即为水平角<sup>[7]</sup>。由此可知测量过程中, 必须符合如下要求: 确保任意中心在铅垂线上; 找出可以瞄准目标的点, 该点能够在水平面上自由移动。

## (2) 点云数据配准

经过上述扫描获取的壁板点云信息和其 CAD 理论数据间存在一定误差, 为提高测量精度必须进行配准处理。选择较为简单的三点法完成点云配准。将壁板点云与理论数据引入到相同坐标系下, 分别在测量点与数模中选择三个点  $\{P_1, P_2, P_3\}$  和  $\{Q_1, Q_2, Q_3\}$ , 建立下述单位向量:

$$\begin{cases} u_1 = \overline{P_2 - P_1} / |P_2 - P_1| \\ v_1 = \overline{Q_2 - Q_1} / |Q_2 - Q_1| \end{cases} = \begin{cases} u_1 \times \frac{P_3 - P_1}{|P_3 - P_1|} \\ v_1 \times \frac{P_3 - P_1}{|P_3 - P_1|} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} u_2 = u_3 \times u_1 \\ v_2 = v_3 \times v_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $u_1, u_2, u_3$  和  $v_1, v_2, v_3$  为两个不同局部坐标系。根据以上分析获取坐标系之间的旋转与平移向量  $R$  和  $T$ , 公式如下:

$$R = [v_1 \ v_2 \ v_3][u_1 \ u_2 \ u_3]^T \quad (5)$$

$$T = Q_1 - RP_1 \quad (6)$$

经过配准处理, 确保壁板点云数据与理论数据吻合, 为后续测量提供精确的初始值。

## 2.2 Metra SCAN 扫描不确定度模型

Metra SCAN 扫描仪是一种手持激光扫描设备, 操作简单, 体积较小。但是其测量精度与激光雷达相比稍差, 为此必须构建 Metra SCAN 扫描设备的不确定度模型。

假设被测目标点的距离表示为  $r$ , 方位角  $\theta_A$  与俯仰角  $\theta_E$  的误差满足正态分布要求, 则  $r$  的概率密度函数可通过下述公式得出:

$$F(r) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(r-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (7)$$

式中,  $\mu$  和  $\sigma$  分别为  $r$  的期望值与标准差。

将  $\mu$  作为中心, 以  $\sigma$  为标准差, 构建置信区间  $[\mu-k\sigma, \mu+k\sigma]$ , 则  $r$  在该区间的概率为:

$$p[|r-\mu| \leq k_r\sigma] = \int_{\mu-k_r\sigma}^{\mu+k_r\sigma} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(r-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (8)$$

则该区间中半宽度计算公式如下:

$$a_r = k_r \frac{\sigma}{\mu} \quad (9)$$

式中,  $k_r$  属于置信度因子。

由此能够获得  $r$  的不确定度:

$$u(r) = \frac{a_r}{k_r} \quad (10)$$

相同道理, 能够计算出方位角  $\theta_A$  和俯仰角  $\theta_E$  的不确定度:

$$u(\theta_A) = \frac{a_r}{\sigma} \quad (11)$$

$$u(\theta_E) = \frac{a_r}{\mu} \quad (12)$$

## 2.3 不同测量设备数据融合

所提方法使用了两种不同的激光设备分别对壁板进行扫描, 当扫描结束后, 需要通过数据融合得到精准的测量信息。融合测量过程如下。

### (1) 可达性分析

由于激光雷达设备的扫描精度高于 Metra SCAN 扫描仪, 因此当激光雷达遇到难以到达的测量区域时, 需要完全使用 Metra SCAN 完成测量, 所以有必要分析激光雷达的可达性<sup>[8]</sup>。

雷达扫描范围通常在  $-\frac{\pi}{4} \sim \frac{\pi}{4}$  区间内, 当测量极限角时, 其测量精度较差。当测量曲面时, 选择高精度区间, 并在  $\left(-\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{12}\right) \sim \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{12}\right)$  区间内完成探究可达性。

假设被测壁板的坐标表示为  $[X, Y, Z, I, J, K]$ , 雷达坐标标记作  $[x_0, y_0, z_0]$ , 若符合如下公式要求, 则说明激光可达:

$$\arccos\left([I, J, K], [X-x_0, Y-y_0, Z-z_0]\right) \in \left[-\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{12}, \frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{12}\right] \quad (13)$$

式中,  $[X, Y, Z]$  为壁板上任意一点三维坐标,  $[I, J, K]$  则是与该点相对的矢量。

### (2) 重复区域融合

为解决两种扫描系统存在测量差异的问题, 利用权重分配的方式实现数据融合, 进而完成测量, 提高测量精度。当二者扫描的区域重合时, 利用下述公式分配不同测量权重:

$$[X, Y, Z] = \frac{k_L [X_L, Y_L, Z_L]}{k_m [X_m, Y_m, Z_m]} \quad (14)$$

$$k_L = \frac{u_L}{u_m + u_L} \quad (15)$$

$$k_m = \frac{u_m}{u_m + u_L} \quad (16)$$

式中,  $X_L, Y_L$  和  $Z_L$  是通过激光雷达扫描获取的坐标,  $X_m, Y_m$  和  $Z_m$  则是 Metra SCAN 扫描仪得到的坐标,  $u_L$  与  $u_m$  分别为两种设备的不确定度,  $k_L$  和  $k_m$  为两种设备的测量权重。

在实际测量中, 当入射角度太小时, 激光雷达的测量精度较低, 容易出现失真点, 这时 Metra SCAN 扫描仪获取的数据测量权重为 1。根据权重计算结果, 利用权重分配来确定最终的测量结果<sup>[9]</sup>。

### 3 实验过程与结果分析

此次实验目标为商用飞机复合超级壁板中的左侧壁板,如图3所示,包括蒙皮、登机门和货舱门框等组件。

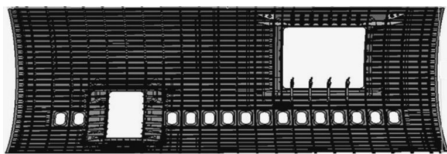


图3 测量目标示意图

#### (1) 实验设备

根据复合壁板的材料特性,选择激光跟踪仪作为激光扫描设备,该设备具有球坐标测量系统,利用编码器与干涉仪来获取目标点位置<sup>[10]</sup>。其自身具备温度传感器,可实时感受温度变化,对数据做出有效补偿。另外,该设备还具有如下两个附件:

T-probe 附件:属于一类可移动的通信测量设备,主要通过不同长度的探针进行测量,便于测量一些较为隐蔽且测量难度大的工件。

T-Scan 附件:非接触式扫描仪,扫描速度快,适用于形状和结构复杂的测件,具备人工调节温度的功能。在本次实验中,主要利用该附件扫描蒙皮区域,获取设备的外形点云。

除激光扫描设备外,还选用 Metra SCAN 3D 750 三维空间扫描仪,不同设备的具体参数如表1所示。

表1 不同设备的工作参数表

设备类型	参数类型	具体数值
激光扫描仪	测量范围	25 m×20 m×10 m
	标定时间	≤3 min
	电源规格	220 V
	工作温度	-10℃~50℃
	湿度范围	10%~70%
	适用风速	小于4级
	分辨率	0.05 mm
	基准距离	350 mm
Metra SCAN 3D 750	扫描区域	325×250 cm
	重量	1.45 kg
	连接方式	USB3.0

在复合超级壁板上选择若干个目标点,分别利用两种不同的激光设备对这些点进行扫描测量,确定点的坐标,两种设备的测量结果如图4所示。

由图4可以看出,对于这些测量点,两种设备在实验过程中都能获取目标点的位置,没有出现测量失效的现象,虽然测出的结果和实际位置之间会存在一定误差,但这只是初步测量,还需将二者测量结果融合,缩小误差,提高精度<sup>[11]</sup>。

为突出所提方法测量结果的优势,将本文方法和激光扫描、柔性测量技术进行对比,生成不同算法的点云信

息,结果如图5—图7所示。

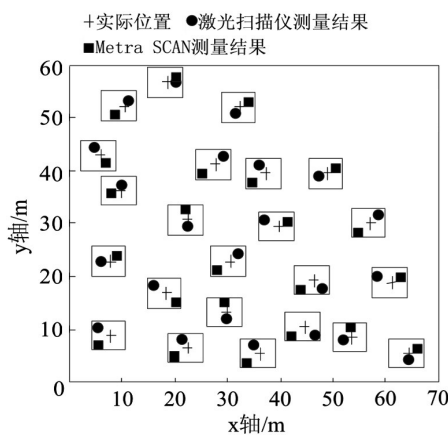


图4 不同测量设备的测量结果示意图



图5 激光扫描技术点云生成结果



图6 柔性测量技术点云生成结果



图7 激光扫描与Metra SCAN相结合的点云生成结果

观察图5—图7可以发现,所提方法获取的点云信息较为完整,且与实际复合壁板相符,舱门位置等信息表现十分准确,而其他两种方法难以采集完整的点云数据,部分数据丢失,会影响后续的测量精度<sup>[12]</sup>。

将均方根误差作为评价指标以此分析上述三种方法的测量误差,指标公式如下:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{I_i} \sum_{j=1}^{I_i} d_j^2(P_i, Q_i)} \quad (17)$$

式中,  $I_i$  为点云  $P_i$  的总数,  $d_j^2(P_i, Q_i)$  为点云  $P_i$  中,点  $i'$  与模型中的点  $Q_i$  之间的距离。不同方法实验对比结果如图8所示。

从实验对比结果中可以看出,所提方法的均方根误差平均水平较低,且误差曲线平稳,而其他两种方法误差忽高忽低,说明测量方法的稳定性较差。所提方法之所以能够获得高精度测量结果,是因为采集到的点云信息并不是来自单一传感器,而是融合了两个设备的测量信息,减少了测量数据的随机性。

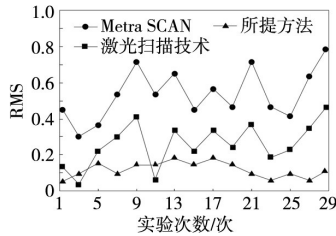


图8 不同方法RMS对比图

## 4 结束语

飞机装配是一项庞大而复杂的工程,必须确保机体外形与部件之间对接协调。为此,提出一种基于数据融合的复合超级壁板数字化测量技术。将激光扫描设备和Metra SCAN扫描系统相结合,全方位获取测量数据,根据不同设备的测量权重,实现误差补偿。实验结果证明,该方法获得的点云数据更加全面,不会出现数据缺失情况,进而减少测量误差。在今后研究中,还需根据激光雷达、Metra SCAN等测量技术特点,构建集成系统,规范测量过程,引入更多的扫描技术,丰富测量数据,扩宽数字化测量的应用领域。

### 参考文献:

- [1] 黎雪婷, 安鲁陵, 岳烜德, 等. 飞机复合材料壁板装配中临时紧固件数量与布局优化方法[J]. 复合材料学报, 2022, 39(8): 4102-4116.
- [2] 邵家儒, 张月月, 曾宪君, 等. 复合材料机身壁板连接分析及轻量化设计[J]. 复合材料科学与工程, 2021(1): 28-34.

[3] 李真, 王俊, 邓凡臣, 等. 复合材料机身壁板的强度分析与试验验证[J]. 航空学报, 2020, 41(9): 123-135.

[4] 汪俊, 李红卫. 飞机大尺寸自动化柔性测量技术研究进展[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(3): 353-362.

[5] 花蕾蕾, 安鲁陵, 赵一鸣, 等. 复合材料构件成型模具型板改进设计[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(6): 56-60.

[6] 赵安安, 王洲涛, 汪俊. 基于飞机壁板特征的扫描路径生成方法研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(3): 344-349.

[7] 欧发斌, 韦涛, 杨钦, 等. 基于3D SLAM算法的输电线路激光雷达移动测量系统设计[J]. 电子设计工程, 2022, 30(18): 123-127.

[8] 艾森, 王晓辉, 许向彦, 等. 飞机金属加筋壁板结构强度校核软件设计与实现[J]. 机械科学与技术, 2022, 41(2): 322-328.

[9] 丁磊, 刘晔. 基于激光雷达与LiEarth平台的输电线路三维可视化方法[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(5): 135-138.

[10] 邱冬, 刘刚, 李旭, 等. 10 kV T型电缆接头在交界面爬电下的多物理场特性研究[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(11): 179-183.

[11] 彭伟波, 聂俊, 李克郎, 等. 大型飞机机身壁板复合材料成型模具刚度优化[J]. 航空制造技术, 2022, 65(19): 114-118.

[12] 刘镇阳, 翟雨农, 李东升, 等. 飞机复合材料壁板装配变形控制技术研究与进展[J]. 航空制造技术, 2022, 65(18): 46-54, 78.

作者简介: 王宏博(1989-), 男, 本科, 中级工程师, 研究方向: 航空飞机复合材料零件的数控加工及数字化测量。

(上接第93页)

员对变电站的管理不善,致使变电站及电网内部容易发生异常,针对电网安全培训仿真系统设计方法存在的问题,提出基于虚拟现实的电网安全培训仿真系统设计方法。该方法首先利用虚拟现实技术在系统软件内设计构建了虚拟仿真环境,并设计了软件体系,实现系统软件设计;同时在系统内设计了不同的功能模块,实现电网安全培训仿真系统设计。该方法在电网安全培训仿真系统设计方法中发挥着重要作用,并为电网安全培训仿真系统设计方法提供了重要信息基础。

### 参考文献:

- [1] 刘练, 李林, 丁明, 等. 面向园区的光储型微电网设计与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 171-179.
- [2] 吴莹玉, 黄霞, 贾培培, 等. 护士工作场所暴力防范培训体系的构建[J]. 中华护理杂志, 2020, 55(4): 584-589.
- [3] 丛丛, 李俊辉, 秦凯. 城市轨道交通行车作业虚拟仿真实训系统的设计与应用[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(8): 44-49.
- [4] 司明舒, 梁栋, 徐晨悦, 等. 基于ISD模型的福建省医养护理人员培训体系设计探索[J]. 中国卫生事业管理, 2021, 38(1): 59-63.

[5] 董博恺, 张东胜, 冯国阳, 等. 罐区作业安全培训系统的设计与开发[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2021, 48(3): 88-98.

[6] 何坚, 张成龙, 张凡, 等. 基于虚拟现实的隧道交通设施与环境评估技术[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 215-222.

[7] 袁庆曙, 王若楠, 潘志庚, 等. 空间增强现实中的人机交互技术综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2021, 33(3): 321-332.

[8] 葛启杰, 史金龙, 孙蕴瀚. 基于二值空间编解码的结构光三维场景重建[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(2): 313-319.

[9] 张维, 徐华龙. 煤层气开采三维动画模拟关键技术[J]. 煤矿安全, 2021, 52(6): 158-162.

[10] 董博, 李鹏, 富晓鹏, 等. 基于改进增广节点方程的柔性互联配电网统一潮流计算方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 22-31.

作者简介: 王科鹏(1982-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 安全生产管理。