

## 4.2 风险评估

航空企业可通过设计可能性-影响程度二维矩阵,划分风险等级,基于XG Boost算法,设计风险评估模型,输入特征变量,包括:部件属性(寿命剩余率、历史故障次数);操作因素(维修人员资质等级、近期工时);环境因素(维修场地温湿度、航班周转压力)。该模型可根据历史故障数据训练,保证风险等级预测准确率超过80%。应用时,系统会自动输入实时数据,并在10秒内输出风险值与等级,辅助管理人员决策。

## 4.3 风险处置

对于重度风险来说,应在接到预警后,10分钟内启动应急小组,通过视频会议制定处置方案。并在30分钟内完成关键部件调拨、协调机场提供专用维修机位、安排备用飞机保障旅客;之后,采用“双人复核”制度,关键步骤,比如部件安装、压力测试,需2名持证工程师签字确认,维修过程全程录像,实时传输至监管部门。待完成维修后,先进行地面测试,比如发动机冷转,再执行2小时本场试飞,确认无故障后申请复航。

对于中度风险来说,要在24小时内出具整改方案,方案需同步抄送质量控制部与监管机构,接受全程监督。以某航司针对“A320 液压系统泄漏”风险为例,该企业在24小时内制定方案,明确由液压组牵头,48小时内完成密封件更换与压力测试,验证标准细化至“静态压力衰减低于0.2MPa/小时”。同时在整改期间,可采用“替代技术+负荷控制”的保障机制,比如液压系统故障未修复前,可启用备用液压泵,限制航班执飞高原等特殊航线。或是在起落架异响整改期间,减少飞机最大起飞重量10%,降低部件负荷。

对于轻度风险,则可将其纳入日常巡检+定期复查管理体系,由维修人员每日航班间隙检查,比如确认客舱灯光亮度、供水压力,每周提交监测报告。同时,还要定期组织照明线路绝缘测试、供水管道密封性检查,避免低风险累积升级。

## 4.4 技术迭代与标准更新

针对AI、量子传感等新技术应用中的问题,每半年更新一次智能维修技术操作手册,比如对于量子传感器在高温环境数据漂移问题,可补充温度补偿算法参数。对于AI故障诊断对新型电动飞机电池故障识别率低的问题,可新增电池故障样本训练模型。同时,企业也要紧跟新型航空器研发进度,建立维修标准同步制定机制,在飞机研发阶段,派维修工程师参与技术研讨,提前梳理维修难点<sup>[1]</sup>。

## 5 案例验证

### 5.1 案例背景

为验证上述方法的可靠性与有效性,文章以某航工程技术公司作为研究对象,根据调查显示,该公司承担54架

飞机的维修保障任务,并面临三大维修痛点:一是安全信息人工分析效率低,风险预警滞后;二是人为差错占比高;三是供应链响应慢。为解决上述问题,该企业决定引入本文提出的智能预防-韧性保障-闭环控制体系,实现安全管理全面升级。

### 5.2 核心实施措施

首先该企业搭建基于BERT模型的故障筛查平台,接入近5年维修记录,覆盖发动机、起落架等系统。保证日均处理数据时间缩短至0.5小时,重复故障识别准确率超过96%。结合数字孪生模型,开发高风险维修场景的VR培训模块,将新员工培训周期缩短至1.5个月,实操失误率降至11%。依靠虚拟测试发现潜在隐患,提前调整维修方案。

其次该公司在工程基地建设中部航空备件枢纽,储备发动机模块、起落架等关键备件,用以压缩关键备件调拨时间。并将相关数据信息接入航旅安全链平台,实现备件全生命周期溯源,在精准拦截不合格产品的同时,也能让乘客通过APP查询备件信息,从而提高对航空公司的信任度与满意度。

最后,该公司部署数据实时传输系统、维修场地智能监测传感器,并为维修人员智能手环,形成空-地-人数据链,以此动态完成风险识别,将风险响应时间从以往的1小时缩短至10分钟。通过严格落实三级风险处置流程,缩短风险处置时间,保证整改一次通过率达到94%。

### 5.3 实施效果

根据研究结果显示,在采用安全管理策略与风险控制路径的6个月后,项目基地实现维修差错率大幅度降低,航班延误率降至2.8%,备件短缺率不足3%,故障主动拦截率升至99%,证明文章本文提出的安全管理体系具有一定的推广价值。

## 6 结语

综上所述,通过对航空器维修作业的安全管理策略与风险控制路径开展分析讨论,利用AI诊断、数字孪生重构技术预防维度,解决隐性故障漏检难题。凭借区域化供应链与区块链溯源强化外部韧性,破解备件短缺瓶颈。结合识别、评估、处置、迭代的闭环机制,实现风险全周期管控。根据实践案例验证结果显示,该体系可将故障主动拦截率提升至99%,并从以往的事后补救转变为事前预防,以此为航空维修安全提供极具实践可操作性的解决方案。

### 参考文献

- [1] 张婧.民用航空器维修质量管理探讨[J].中国设备工程,2024,(20):45-47.
- [2] 李伟,胡腾飞,刘鹏飞,等.预防性维修在航空维修中的应用[J].中国军转民,2024,(19):48-49.
- [3] 姜汇洋.航空器仪表电子设备维修管理分析[J].飞机设计,2023,43(05):77-80.

# Application and Research of the Double-Station Method Linked Triangle Measurement Technology

Jianmin Gao

China Railway No.11 Engineering Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430074, China

## Abstract

In recent years, the construction progress of urban subways has been accelerating continuously, and the length of interval tunnels has been extending. The accuracy of the underground control network in long-distance construction directly affects the quality of shield tunneling construction. The traditional single-shaft orientation survey method can no longer meet the requirements for high precision and high efficiency. Therefore, this paper obtains sufficient redundant observation data by reasonably increasing the number of ground and underground near-well point layouts to offset the accidental errors in the survey process and improve data reliability. Subsequently, a rigorous adjustment calculation is carried out to solve the coordinates and azimuth angles of the underground near-well points. This method is simple to operate and efficient in calculation, and its precision meets the control requirements of subway construction. It provides reliable technical support for long tunnel construction and greatly facilitates the control survey work of subway construction.

## Keywords

Subway construction survey; Single-shaft orientation; Connecting triangle

## 双测站法联系三角形测量技术的运用与研究

高健民

中铁十一局集团有限公司, 中国 · 湖北 武汉 430074

## 摘 要

近年来, 城市地铁建设进程持续加快, 区间隧道长度不断延伸, 长距离施工中地下控制网的精度直接影响盾构施工质量, 传统一井定向测量方法已难以满足高精度、高效率的需求。为此, 本文通过合理增加地面及地下近井点布设数量, 获取充足的多余观测数据, 抵消测量过程中的偶然误差, 提升数据可靠性; 随后进行严密平差计算, 解算地下近井点的坐标与方位角。该方法操作简便、计算高效, 且精度满足地铁施工控制要求, 为长隧道施工提供了可靠技术支撑, 极大便利了地铁施工控制测量工作。

## 关键词

地铁施工测量; 一井定向; 联系三角形

## 1 引言

随着我国城市化进程的深度推进, 地铁建设规模不断扩大, 隧道施工逐渐向长距离、大埋深方向发展。地下控制网作为盾构掘进、线路铺设的基准保障, 其精度直接决定了隧道贯通误差是否在允许范围内, 进而影响地铁运营后的行车安全与舒适度。传统一井定向测量仅依赖单个地面近井点与竖井内两根悬挂钢丝构成单一联系三角形, 由于观测数据冗余度不足, 难以有效抵消测量过程中仪器误差、环境干扰(如竖井内气流扰动、温度波动)等带来的偶然误差, 且解算过程中缺乏独立检核条件, 一旦出现数据偏差易导致后续施工偏差。若要提升传统方法的精度, 需反复增加观测次数, 不仅延长了作业周期(单次额外观测需增加 2-3 小时作业时

间), 还增加了人力与设备成本, 已无法适配现代地铁长隧道施工对高效高精度测量的迫切需求。

## 2 测量步骤

在实施联系测量作业前, 需先依据《城市轨道交通工程测量规范》(GB 50308-2017)中精密导线测量的精度标准, 完成地面控制点坐标向竖井的引测工作。具体操作是在井口附近地势平坦、视野开阔且远离振动源(如施工机械、车辆通行道路)的区域, 布设并埋设 JJ1、JJ2 两个近井点(点位分布详见图 1), 近井点采用混凝土浇筑固定, 埋深不小于 0.8m, 顶部安装强制对中装置, 再通过 I 级全站仪按精密导线测量流程测定这两个近井点的精确坐标, 坐标中误差控制在  $\pm 2\text{mm}$  以内。

首先在竖井内悬挂两根测量钢丝(记为 GS1 与 GS2), 为提升后续计算精度, 需尽可能增大两根钢丝之间的间距(最大可至竖井断面宽度的 80%), 并在每根钢丝的上部(距

【作者简介】高健民(1989-), 男, 中国湖北荆州人, 本科, 工程师, 从事地铁盾构施工研究。

井口 1.5m 处)与下部(距井底 0.5m 处)位置粘贴圆形高反射率反射片(直径 50mm, 反射率 ≥ 90%), 反射片粘贴时需确保表面平整且与钢丝轴线垂直, 避免因反射信号偏移导致测距误差超过 1mm。

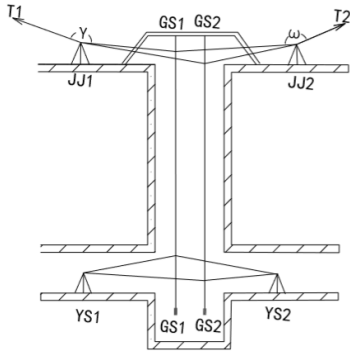


图 1 两点法一并定向示意图

第二步, 分别将全站仪安置于近井点 DJ1 和 DJ2 上, 完成仪器对中(对中误差 ≤ 0.5mm)与整平(整平误差 ≤ 2")后, 参照城市轨道交通工程精密导线测量流程开展观测: 一方面测量后视方向(选取地面已知高精度控制点 T 作为后视点)与 GS1、GS2 连线之间的水平角, 另一方面直接测量测站点到 GS1、GS2 反射片的直线距离。观测过程中需实时关注环境因素, 避开强风(风速超过 5m/s 时暂停观测)、强光(正午阳光直射时需搭建遮光棚)时段, 若遇温度骤变(1 小时内温差超过 5℃)需暂停观测, 待仪器与环境温度稳定后再继续, 减少环境干扰对测量数据的影响。

第三步, 完成双测站(DJ1、DJ2)的角度与距离数据采集后, 运用双测站极坐标测量原理, 结合地面已知控制点的坐标与方位角, 对两根钢丝 GS1、GS2 在地面坐标系中的三维坐标(x、y、z)进行解算, 最终得到其精确坐标值, 坐标解算误差需控制在 ± 1mm 以内。

(1) 布网要求: 在布设联系三角形时, 需遵循以下规范: ①竖井中沿线路方向布设悬挂的钢丝 GS1-GS2 的距离应尽可能长, 最长可达竖井断面允许的极限间距, 以提升三角形图形强度, 减少角度观测误差对坐标解算的影响; ②联系三角形的连接角(即近井点与钢丝连线形成的夹角)宜小于 1°, 呈直伸三角形, 确保观测角度的敏感性与解算精度; ③近井点 DJ1、DJ2 到钢丝间最短的距离与最长距离的比值宜小于 1.5, 避免因距离差异过大导致误差放大; ④悬挂钢丝的直径宜为 0.3mm, 选用高强度碳素钢丝(抗拉强度 ≥ 1800MPa), 兼具强度与柔韧性, 可减少自重下垂带来的误差; 悬挂 10kg 锤球(锤球材质为铸铁, 表面光滑无锈蚀), 锤球应浸泡在阻尼液中, 阻尼液可选用机油或专用阻尼剂, 有效抑制钢丝因气流扰动产生的摆动, 保证钢丝处于稳定铅垂状态。

(2) 作业限差: 为确保测量数据精度, 作业过程中需严格控制以下限差: ①角度测量采用 I 级全站仪(测角精度 ≤ ± 1", 测距精度 ≤ ± (1mm+2ppm × D)) 方向观测法观

测六测回, 每测回之间需重新对中整平, 测角中误差应小于 ± 1"; ②距离观测应独立观测三个测回, 每测回读数三次, 各测回较差应小于 1mm, 三次读数平均值作为该测回的距离观测值; ③地上、地下丈量钢丝 GS1-GS2 间距的较差应小于 1mm, 确保上下观测数据的一致性; ④若采用钢尺量距, 应采用检定时的标准拉力, 并进行倾斜改正、温度改正、尺长改正, 确保距离测量的准确性。

(3) 内业计算: 钢丝 GS1、GS2 的坐标计算公式为:

$$\begin{aligned} x_{GS1} &= x_{DJ1} + S_{DJ1-GS1} \cos \alpha_{DJ1-GS1} \\ y_{GS1} &= y_{DJ1} + S_{DJ1-GS1} \sin \alpha_{DJ1-GS1} \end{aligned}$$

式中: SDJ1-GS1 为 DJ1-GS1 边的平均观测值(取三个测回距离观测值的平均值);

$\alpha_{DJ1-GS1}$  为 DJ1-GS1 边的坐标方位角, 其中  $\alpha_{DJ1-GS1} = \alpha_{DJ1-T} + \omega$  ( $\alpha_{DJ1-T}$  为 DJ1-T 边的已知坐标方位角,  $\beta$  为 DJ1-T 边与 DJ1-GS1 边的夹角观测值, 取六测回角度观测值的平均值)。

同理, 以 JJ2 为测站点进行观测计算, 可获取钢丝 GS1 的另一组坐标(x'GS1、y'GS1)。采用相同方法, 分别以 JJ1、JJ2 为测站完成观测与计算, 还能得到钢丝 GS2 对应的两组地面坐标(xGS2、yGS2)与(x'GS2、y'GS2)。每根测量钢丝均对应两套独立计算的坐标数据, 通过对同一条钢丝的两组坐标进行比对与检核, 可有效验证钢丝地面坐标测量结果的准确性, 保障数据精度符合要求。确定两测站对 GS1、GS2 的最终坐标测量值(取两组合格坐标的平均值)后, 即可实现地面控制点的坐标与方位角向两根钢丝(GS1、GS2)的传递, 为后续井下测量搭建起坐标基准。

在获取钢丝 GS1、GS2 的地面坐标后, 将测量仪器(同地面观测所用 I 级全站仪)分别安置于井下预先布设的导线点 YS1 与 YS2 上, 井下导线点同样采用混凝土固定并安装强制对中装置。参照地面测量的精度标准, 开展井下观测: 一方面测量测站点到 GS1、GS2 连线的水平角  $\theta$ , 另一方面通过全站仪对钢丝上的反射片直接测距, 得到测站点到 GS1、GS2 的距离 S1 与 S2。井下观测需提前通风降尘(确保能见度 ≥ 10m), 避免仪器受到井下潮湿环境(相对湿度超过 85% 时需配备除湿设备)的影响, 可在仪器外部套防潮湿罩保护设备。

基于已求得的 GS1、GS2 坐标, 通过两点间距离公式反算出两点间的水平距离 S3 ( $S3 = \sqrt{(x_{GS2} - x_{GS1})^2 + (y_{GS2} - y_{GS1})^2}$ )。结合观测得到的水平角  $\theta$ 、距离 S1、S2 以及反算的平距 S3, 依据三角形正弦定理  $\frac{S_2}{\sin \alpha} = \frac{S_3}{\sin \theta}$  (其中  $\gamma$ 、 $\delta$  为三角形其他两个内角)计算出图 B 中的角度  $\alpha$ , 最终通过坐标推算得到 YS1、YS2 两点在地面坐标系中的精确坐标。

根据三角形正弦定理, 再通过钢丝 GS1 的坐标, 可计算出 YS1 点的近似坐标: