飞马无人机低空遥感技术在高速铁路施工管理中的应用

岳峰 王立辉 谭小松 王云会
【陕西中创勘察测绘有限公司】

摘要：

高速铁路是交通运输领域的重大成果，具有运营速度快、建设标准高、施工难度大、施工工艺新等特点，在国家交通、城市化建设、经济发展、国家外交等方面发挥着重大作用，已成为世界各国铁路发展的总趋势，截至 2020 年年底，我国高速铁路运营总里程达 3.79 万公里，稳居世界第一。本文以潍烟高铁为例，重点介绍了飞马无人机低空遥感技术在高速铁路建设过程中，实时获取空间数据信息并深度挖掘和应用的过程，完成了施工过程现代化向信息化的转变，有效的辅助了项目管理人员更加科学的指导施工。

关键词：

高速铁路；低空遥感；空间数据；信息化；施工管理。

1 项目背景

潍烟高速铁路（Weifang-Yantai High-speed Railway），是一条连接山东省潍坊市与烟台市的高速铁路，是国家“八纵八横”高铁网中沿海高铁通道的重要组成部分，项目位于山东省东北部潍坊、青岛、烟台市境内，线路起自潍莱铁路昌邑南站，途经潍坊昌邑市、青岛平度市、烟台莱州市、招远市、龙口市、蓬莱市、烟台开发区、福山区，接入青荣城际铁路龙王山线路，连通烟台站及荣成方向。正线全长 236.452 公里（其中潍坊市境内 19.17 公里，青岛市境内 13.95 公里，烟台市境内 203.33 公里），新建桥梁 85 座 157.22 公里，隧道 10 座 11.858 公里，桥隧比 71.5%，设计速度 350 公里/小时。

图 1　潍烟高铁施工总平面布置图

潍烟高速铁路作为山东省重点交通基础设施项目，对补齐胶东半岛地区高速铁路发展短板，构建胶东半岛环状高铁网，推动胶东经济圈一体化，打造轨道上的半岛城市群，具有重要意义。山东省政府、铁投集团领导多次视察潍烟铁路的建设情况，对其技术标准、质量、安全、工期等都提出了较高要求。在此背景下，针对现代化的工程技术，需要打破传统的项目管理理论，载入信息化技术手段，可以丰富管理者的知识结构和工作经验，提高组织协调和判断能力，对于降低施工风险、提高工程质量、缩短工期、节约成本等方面都具有十分重要的意义。

图 2　潍烟高铁在胶东半岛的地理位置

2 技术路线

潍烟高铁的管理者想要高质量的完成建设目标，需要科学的管理手段，支撑基础必然是施工过程的空间信息数据。随着低空遥感技术的日渐成熟，我们已经能够较为真实的记录和反映施工现场环境，并且具有结构准、纹理真、要素全等特点，管理者可掌控施工动态发展的过程，编制最优的施工组织方案，准确的进行进度和风险管控，最终达到科学指导施工的目的。

具体作业中，我们需要通过无人机平台搭载五镜头，从五个（一个垂直、四个倾斜）不同视角同步进行影像采集，获取地理环境中的高清纹理信息，最大程度的反映测区真实的实景情况，最后对获取的各种数据进行解译和应用，例如：我们可以在实景模型中查看构筑物的外观和尺寸，就能检查施工质量，排查安全隐患；预先在模型中展绘施工线路和工点位置，可合理的进行场地规划，排除施工干扰；通过应用平台，还可以在各工点进行技术交底，实现交互式作业等。

图 3　潍烟高铁数字化项目技术路线图

3 航摄仪及数据处理软件的选择

潍烟高铁线路长，施工过程是动态发展变化的，施工环境复杂，干扰大，想要真正意义的实现辅助管理，无人机系统平台和数据处理软件需要满足以下要求：

（1）施工区域人员密集，机械设备较多，无人机平台要求安全可靠，性能稳定；

（2）施工场地干扰大，起飞条件苛刻，要求无人机平台轻便，起降灵活；

（3）施工过程是动态发展变化的，要求飞行频率高，航时长；

（4）项目管理人员对获取信息的全面性、时效性要求较高，数据生产要高效，精度要可靠；

（5）数据应用过程要偏向于施工技术和管理。

根据上述要求，我们在市场上做了大量调研，最终确定选用飞马 D2000 无人机系统，搭载五镜头 OP3000 进行数据采集，它具有小型、长航时、高精度等特点，全系统模块化分解后可集成在一个作业箱中，便于携带和运输；数据生产用瞰景 Smart3D，空三一遍过，模型细节纹理更清晰，人工修补少，精度可控，效率高；后期数据应用需要开发一个偏向于施工管理的平台。

3.1 飞马 D2000 无人机系统关键参数

3.1.1 D2000 飞行平台性能

（1）标准起飞重量：2.8kg；

（2）外形展开尺寸：495mm×442mm×279mm；

（3）飞行器最大速度：20m/s；

（4）最远航程巡航速度：13.5m/s（最远航程 50km）；

（5）最长航时巡航速度：7.0m/s（最长航时 74min）；

（6）最大起飞海拔高度：6000m；

（7）抗风能力：6 级（10.8-13.8m/s）；

（8）起降方式：无遥控器垂直起降。

图 4　飞行平台及传感器

3.1.2 OP3000 传感器性能

（1）相机型号：SONY A6000；
（2）传感器尺寸：23.5×15.6mm（aps-c）；
（3）有效像素：约 2430 万×5 像素；
（4）镜头焦距：25mm 定焦(下视) 35mm 定焦(倾斜)。

3.1.3 D2000 系统平台理论作业效率

按照一个区块一天 6 架次，航向重叠度 80%，旁向重叠度 65%，常规航线设计。

表 1　D2000 倾斜作业效率表

航速 (m/s)	GSD (cm)	航高 (m)	单架次作业面积(km^2)		一天飞行面积(km^2)		航程 (km)
			纹理最佳	纹理普通	纹理最佳	纹理普通	
8	1.5	96	0.42	0.68	3.63	4.34	24
8	2	128	0.93	1.44	7.81	9.19	24
13.5	2.5	160	1.08	1.78	9.51	11.44	38
13.5	3	192	1.21	2.12	11.15	13.66	38

3.2 瞰景 Smart3D 主要性能

（1）无限空三一遍过（测试 64GB 内存，5 万张照片空三一遍过）；
（2）不限数据，空地一体多样数据，无需手工加点，精细化建模；
（3）引擎支持一机多开，分布式缓存；
（4）支持导入 KML 和 SHP 文件，可对数据进行多边形裁剪，去除不需要的冗余部分，节约建模时间，提高建模效率；
（5）成果多元化，可生成 Mesh 模型（S3M）/DSM/DEM/DOM/TDOM/Pointcloud 等；
（6）自带修模功能，去除漂浮物、压水等操作简单且高效；
（7）遇突发应急情况，可将瞰景 Smart3D 软件打包到市场镜像，通过市场 IMS+华为云 IAAS 方式部署，实现多节点，高效快速建模。

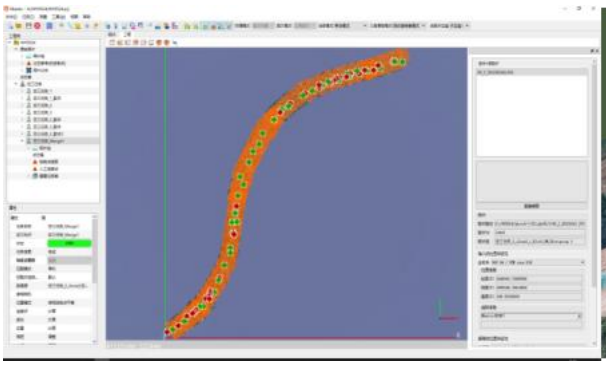

图 5　瞰景 Smart3D 软件界面

图 6　潍烟高铁施工场地模型

3.3 中创空间信息平台的主要功能

中创空间信息平台开发的主要目的是根据管理者的需求，将集成的潍烟高铁施工发展过程中的空间数据解译后应用到施工管理中去，帮助管理者以数据为依据，科学的指导施工。主要功能如下：

（1）可将数据模型上传至网络服务器中，相关施工人员只用登录账号，就可以根据相应的权限查看数据，解决了本地端模型数据量大，相互传输时间久的问题；

（2）模型文件、矢量文件的导入导出，二者可叠加显示，并标记点、线、面；

（3）在施工现场获取实时的空间信息，包括施工环境、坐标数据、构筑物尺寸、构筑物外观等；

（4）在不同时期的模型数据中，提取同一区域的数据，可计算工程量，进行收方计量；

（5）获取构筑物的坐标、尺寸、外观等信息，可检查施工质量；

（6）实景模型可全方位浏览场地全貌，进行施工安全隐患排查；

（7）支持导入多期模型，进行进度对比和施工规划；

（8）在实景模型中增加交互式工作模式，施工作业人员可根据不同权限，查看项目情况。

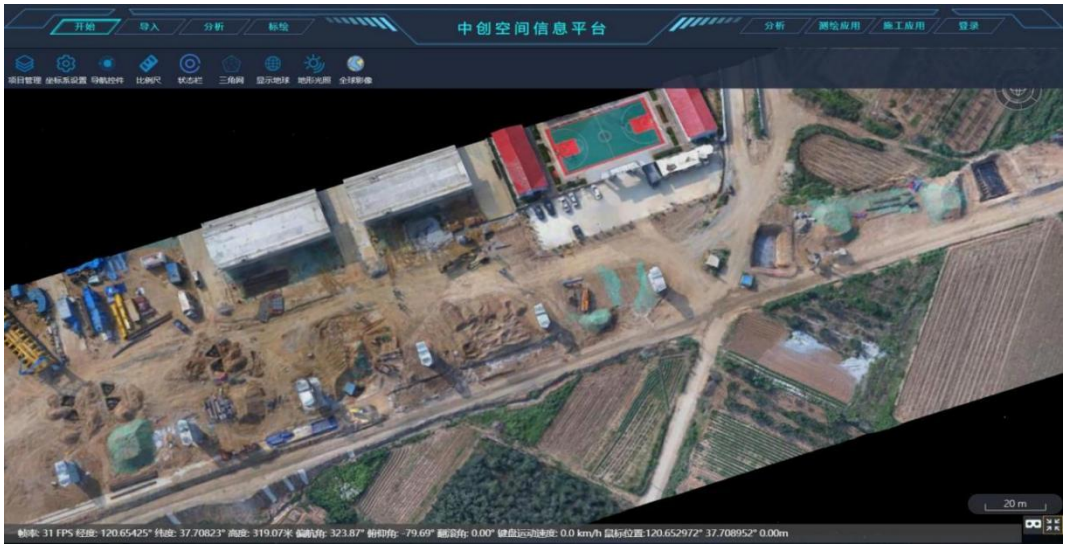

图 7　中创空间信息平台界面

4 作业流程

4.1 空间数据信息的采集

通过飞马 D2000 无人机系统平台，在潍烟高铁施工过程中，定期采集线路两侧各 250m 的影像数据，考虑项目需要检查构筑物的结构尺寸，观察表面外观，采集精度应控制在 5cm 内。作业过程中应重点注意以下几点：

（1）在航线规划中，最低点分辨率应优于 1.5cm，最高点航向重叠度≥80%，旁向重叠度≥65%，航线为偶数。

（2）像控点采用“Z”字型均匀布设，避免压盖航线，纵向间距不大于 500m，拐点处相应加点，保证每公里平高控制点数≥8，现场条件不允许的点位可适当删除，但剔除率不得超过 40%；本项目飞行频率较高，像控点应为永久标志，要求在不干扰施工的场地设置长 50cm 宽 50cm 高 100cm 的水泥墩，表面中心设钢钉标志，并涂米字形油漆，点位辨识宽度 30cm 为宜。

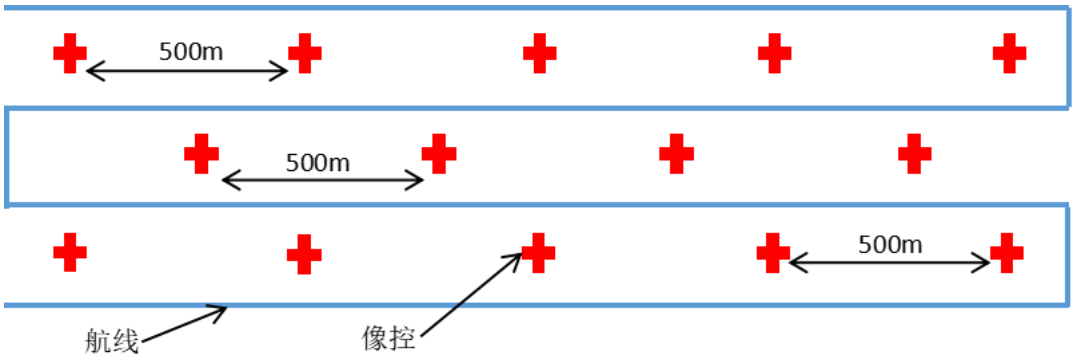

图 8　像控点布设示意图

图 9　像控点永久标识

（3）像控点坐标采集用千寻之寸 Find CM（厘米级），起算数据为潍烟高铁基础控制网，流动站必须在千寻有效服务范围内，观测前应就近检核一个已知控制点，并检查仪器内置参数，确保成果的准确性。观测时采用图根法，3 个测回（测回间应将仪器初始化），每测回 30 个历元，每测回平面、高程的互差应小于 3cm。

图 10　数据采集设置示意图

（4）D2000 起飞需要选择 10m×10m 空旷场地，红色脚架为机头方向，机头不要对准人，依次对飞行平台进行起降设置、荷载检查、飞机自检、任务上传、飞行情况汇总，最后点击解锁，螺旋桨转动顺畅，且确认环境安全后，点击起飞。飞行结束后，拷贝照片、POS、基准站数据等文件，并检查下载的数据是否完整。

图 11　现场飞行照片

（5）飞马 D2000 飞行平台搭载五相机 OP3000 在数据获取过程中，每个镜头都是按照拍照顺序进行存储的，没有对架次进行分类，后期影像整理过程浪费大量时间，以往作业中有两种解决办法：

第 1 种：每飞一个架次，拷贝一次数据，现场数据拷贝时间较长，多次插拔数据卡，对硬件有一定损耗，降低使用寿命；

第 2 种：每架次连续飞行，在外业结束后统一对数据整理分类，这样需要找到地面拍摄的无效照片，分类提取每架次的有效航片，容易出错，也需要一定的时间进行数据拷贝。

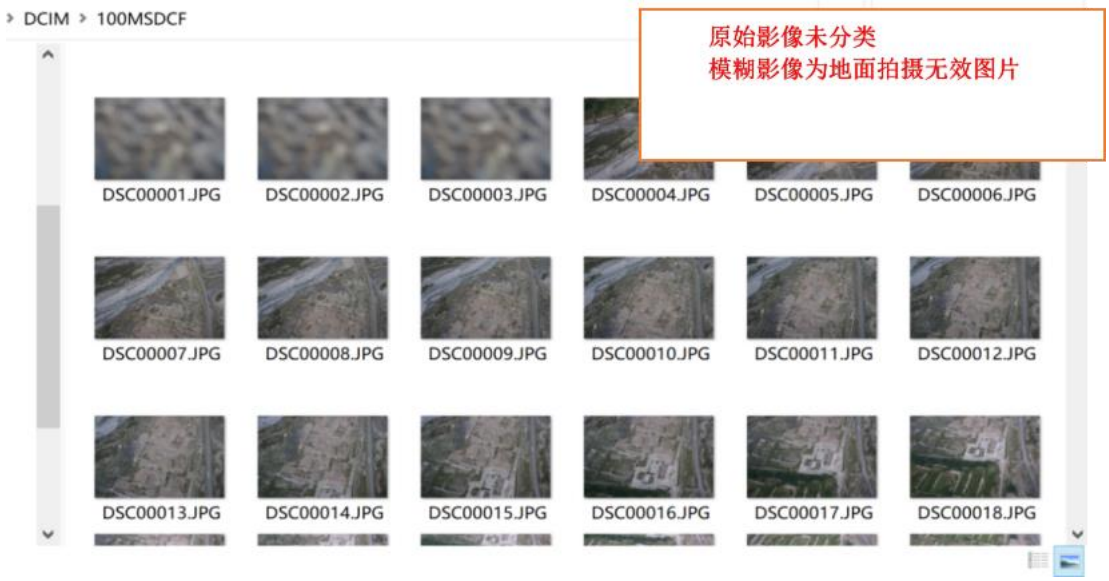

图 12　原始影像

针对上述情况，为了节约数据获取时间，提高野外飞行效率，我们开发了《中创航片整理工具 V1.3.0》，飞行过程中无需拷贝照片，每天飞行结束后，将存储卡取出，使用软件浏览原始照片路径，点击整编，航片自动按架次分类，并剔除地面拍摄的无效照片，查看整编结果，无误后点击开始整理，航片自动批量归纳整理，完成后使用 POS 整理功能，将航片和 POS 数据相匹配。通过测试，使用整理工具后，外业每天可多飞 2-3 架次。

图 13　中创航片整理工具界面

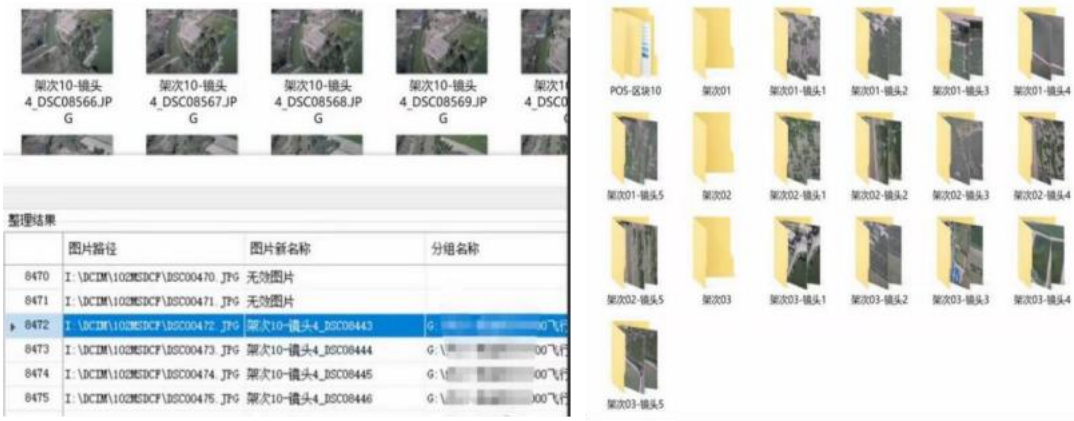

图 14　航片整理过程

4.2 实景模型数据的生产

潍烟高铁影像数据的处理选用瞰景 Smart3D 软件，生产步骤依次为建立工程、自由网空三、带控平差和重建任务。该软件除空三一遍过，效率高之外，用在本项目的主要作用是实现空地一体，可展示构筑物的外观细节，实现质量检查。

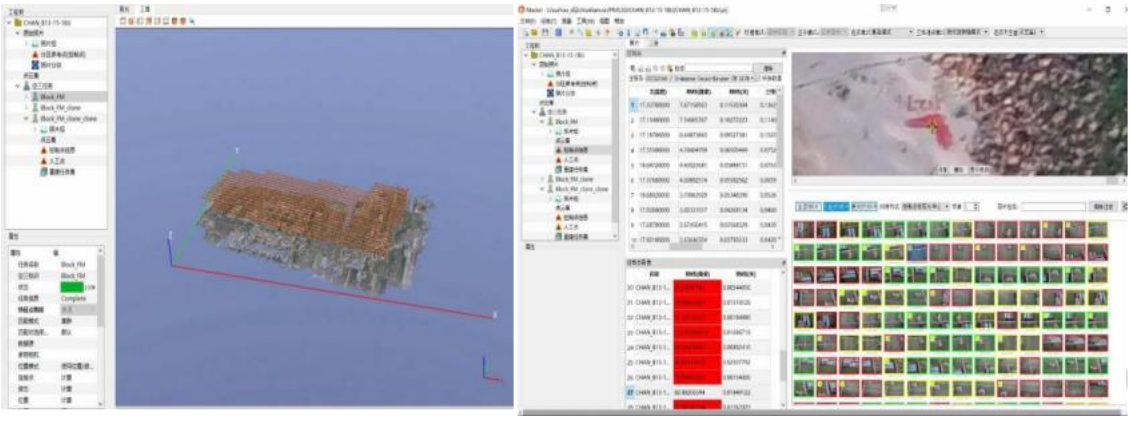

图 15　瞰景 Smart3D 软件界面

图 16　潍烟高铁施工过程实景模型-隧道洞口

图 17　潍烟高铁施工过程实景模型-路基施工

图 18　潍烟高铁施工过程实景模型-细节展示

4.3 空间数据信息的应用

中创空间信息平台需要将 OSGB 格式的模型数据切片处理，再把切片导入平台，根据不同的需求，在平台上提取相应的空间数据，解译成施工管理所需的信息。

图 19　空间信息平台切片工具界面

图 20　中创空间信息平台界面

4.4 空间数据质量评价

模型数据导入中创空间信息平台后，需要对其质量进行评估，标准以《高速铁路路基工程施工验收标准 TB10751-2018》、《高速铁路桥涵工程施工质量验收标准 TB10752-2018》为依据。

潍烟高铁模型数据抽样了 20km 路基、5 座涵洞、2 座梁桥，进行精度评定，最终结果均满足规范要求，现将部分抽样结果举例如下：

表 2　数据精度抽样表

部位	高程(m)			部位	中心坐标(cm)		部位	位置坐标(cm)	
路基 纵断高程	抽样	检查	差值	桥梁 群桩	限差	检查	涵洞 八字墙	限差	检查
DK156+420	1629.938	1629.913	0.025	3-1	5	3.2	1	5	2.4
DK156+440	1629.998	1630.007	-0.009	3-2	5	4.5	2	5	2.1
DK156+460	1630.058	1630.080	-0.022	3-3	5	4.3	3	5	3.6
DK156+480	1630.118	1630.116	0.002	3-4	5	4.6	4	5	3.1
DK156+500	1630.178	1630.186	-0.008	3-5	5	4.2	5	5	3.2
DK156+520	1630.238	1630.218	0.02	3-6	5	3.2	6	5	2.7
DK156+540	1630.298	1630.273	0.025	3-7	5	1.6	7	5	2.8
DK156+560	1630.358	1630.342	0.016	3-8	5	2.9	8	5	3.5
DK156+580	1630.418	1630.420	-0.002	3-9	5	4.7	9	5	3.8
DK156+600	1630.478	1630.506	-0.028	3-10	5	3.5	10	5	3.7
DK156+620	1630.491	1630.494	-0.003	3-12	5	2.7	11	5	2.1
DK156+640	1630.532	1630.541	-0.009	3-13	5	3.6	12	5	4.7
DK156+660	1630.557	1630.543	0.014	3-14	5	4.1	13	5	1.8
DK156+680	1630.563	1630.543	0.020	3-15	5	1.8	14	5	3.2

4.5 生产作业流程图

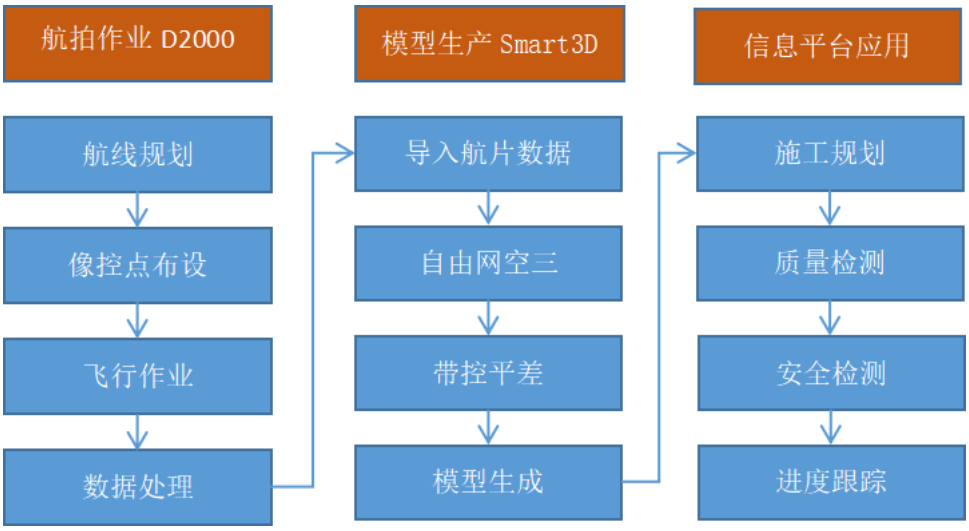

图 21　生产作业流程图

5 创新型应用

潍烟高铁线路长、工点多，获取信息数据要及时，数据解译应以施工需求为导向，具有针对性的解决项目管理问题。在项目实施前，我们对主要管理者做了调研，普遍反映以下几个问题：

（1）质量、安全巡查无数据支撑；

（2）在施工过程中，工序衔接较紧，测量双检制基本无法执行；

（3）基层技术人员与作业班组协调不畅，大量重复工作；

（4）技术交底和基层脱钩，一线施工人员对施工方案和技术要求理解不透彻；

（5）施工规划不合理，浪费较大。

针对上述问题，我们对空间信息数据提取的内容和解译的成果做了详细论证，制订了一些技术解决方案。

5.1 虚拟放样功能实现质量检查

在施工过程中，会发生测量人员在放样构筑物（如桥墩、桩基、涵洞等）的关键部位时发生偏差，导致后期施工错误，给项目造成了较大经济损失，针对这类情况，机关领导下发文件，要求施工现场必须执行测量双检制度，即首次放样完成后，需有质检人员重新测量，检测其精度是否满足规范要求，但现场各工序衔接紧密，人员配置不足等问题，基本无法执行双检制度。我们通过《中创空间数据信息平台》将模型和矢量文件相结合，施工前就将结构物重要位置标示在模型中，在施工过程中，继续对比模型数据，如安装模板阶段，和矢量位置不对应，说明存在施工风险，反之说明正确。通过后期精度验证，点位误差可控制在 6cm，作为质量检查的粗差已能满足施工需求。

图 22　虚拟放样功能-质量检查

5.2 虚拟放样功能助力施工规划

潍烟高铁的建设是由多个工点组成的，比如某涵洞工点、某桥梁工点、某路基工点，这些不同工点同时施工会产生干扰，还需要考虑目前环境是否具备开工条件等，以往项目管理者需要前往实地踏勘，进行组织规划，但踏勘具有一定的局限性。通过《中创空间数据信息平台》的虚拟放样功能，将工点矢量文件导入，提前查看施工环境，整体布局，排除施工干扰，辅助管理者进行科学的施工规划。

图 23　虚拟放样功能-施工规划

通过以上两张图片，在矢量文件叠加后，我们可以清楚的查看各个工点（每个桥墩和桩基的位置）相互之间的关系，工点和周围环境的关系，可规划便道，调整各工点的作业顺序，达到优化施工组织设计的目的。

5.3 多期模型数据实现工程量计算

在路基施工段落，通过两期数据模型，可提取 2 次 DEM，分别称为 DEM0823（8 月 23 日路基施工情况）和 DEM0923（9 月 23 日路基施工情况），将两期 DEM 叠加后，能精准计算出量差，即路基完成的工程量，可作为基层施工队月度计量的依据。

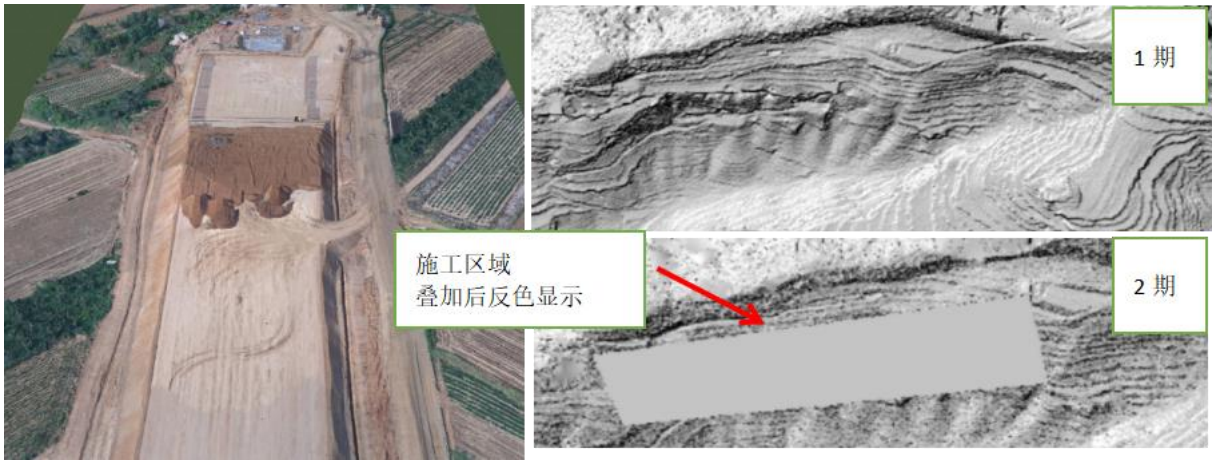

图 24　虚拟放样功能-施工规划

5.4 多期模型数据实现进度跟踪

平台支持分屏显示，通过多期模型数据，可直观的进行进度展示，若进度不满足当前施工要求，管理者可进行进度分析，及时修正施工方案，调整施工计划。若相关领导视察，也可通过大屏幕，调出多期模型数据，汇报施工进度。

图 25　涵洞-2021 年 3 月 27 日拍摄

图 26　涵洞-2021 年 4 月 20 日拍摄

图 27　桥墩-2021 年 4 月 23 日拍摄

图 28　桥墩-2021 年 6 月 15 日拍摄

5.5 实景模型助力安全隐患排查

在整个施工过程中，安全员每天在现场检查，仅仅能发现规模较小、人员操作不当的安全隐患，相对影响较大的需要数据监测提前预防，通过实景模型可排查隐患范围，提前制定防治措施。

图 29　山体滑坡图

5.6 实现交互式工作模式

潍烟高铁倾斜模型数据量大，飞行频率高，若信息平台采用桌面端单机版，数据存储难以解决，且无法共享工作信息，我们开发的《中创空间数据信息平台》是基于网络服务器的，只要相关人员，登录不同权限的帐号，便能进入服务器，查看相关信息。

平台分电脑桌面端和手机端，开发手机端的目的就是方便工作沟通，将工作协调的过程公开化，便于执行和监督。如：作业班组人员王某需要测量人员李某在 2#桥墩处测量，只需将工作任务上传至服务器，李某及相关人员变可看到，若规定时间内无法完成，手机端自动会将信息推送给相关领导，进行协调处理。

图 30　手机端实现交互式工作模式

5.7 建立施工技术交底窗口

项目建设过程中，人数较多，知识层次参差不齐，管理人员想要对所有作业人员进行技术交底和规范培训，难度较大，针对这一情况，《中创空间信息平台》建立了技术交底窗口，既在构筑物旁边竖立标志牌，点击会出现工点概况，技术标准和方案，安全注意事项等，辅助一线施工人员规范作业。

图 31　施工技术交底窗口

6 项目总结

高速铁路的发展推动了铁路科学技术登上了一个崭新的台阶，也是科技进步的必然和时代发展的需要，近年来我国“四纵四横”高铁网基本形成，技术成就赢得了国际声誉，显然中国高铁已经成为一张见证时代发展的名片。还有另外一项技术也得到了快速发展，它就是倾斜摄影测量，自 2010 年由刘先林院士自主研发的倾斜相机 SWDC-5 诞生，到武文忠司长在 2020 中国地理信息产业大会上发表了新型基础测绘与实景三维中国建设的演讲，明确了实景三维中国建设将分步实施，仅仅用了 10 年。目前实景三维技术在高铁建设过程中的应用还在探索阶段，但现代化的工业手段，必然需要大量的空间信息数据做支撑，相信在不久的将来，通过二者的不断探索和磨合，该项技术在高铁建设中的应用将会大面积普及，尤其记录施工过程的空间信息，对后期铁路的运营和维护也将起到至关重要的作用。

参考文献：

[1]曾建军.高铁项目施工测量技术与管理关键点[J].低碳世界,2016(16):205-206.

[2]徐亚军,王兵海.高速铁路施工测量质量管理与咨询评估[J].长沙铁道学院学报(社会科学版),2012,13(01):216-217.

[3]周东卫.高速铁路精密工程测量管理关键控制环节及对策[J].工程勘察,2015,43(06):66-72.

[4]梁志远.高速铁路测量技术质量控制措施分析[J].设备管理与维修,2020(06):42-43.