

高精度数字水准仪在道路测量中的误差来源及消减措施研究

王 哲

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450001

【摘要】：随着高等级公路建设对高程测量精度要求的提高，具有读数客观、精度稳定、工作效率高等优点的高精度数字水准仪成为了道路高程控制测量的主要工具之一。本文立足于数字水准仪工作原理及道路测量实际，总结了主要影响数字水准仪测量成果的仪器误差、观测误差以及环境条件误差产生的原因，明确各类误差对最终成果的影响程度。针对不同误差来源，从仪器校准、观测规范、环境适应、数据处理四个维度提出针对性消减措施，结合具体工程案例验证措施的有效性。研究表明，通过严格执行仪器校准流程、规范观测操作、优化环境适应策略及科学的数据处理方法，可有效控制数字水准仪测量误差，确保道路高程测量精度满足二等水准标准，为高等级道路工程设计、施工及验收提供精准的数据支撑。本文研究成果对提升道路测量效率与质量具有实际应用价值，可为同类工程测量提供参考。

【关键词】：高精度数字水准仪；道路测量；误差来源；消减措施；高程控制

DOI:10.12417/2811-0528.26.12.081

引言

在道路工程从立项建设到竣工验收的全过程中，高程测量工作贯穿始终，并直接影响着路线是否顺畅、构造物是否稳定、交通流是否安全。普通光学水准仪采用目视法估读，受观测者技术水平的影响较大，在一定程度上限制了测量速度，且误差控制难度大，不能适应当前高等级公路对测量精度的要求。精密数字水准仪将光机电技术有机结合，做到读数自动记录、计算自动化，大大减少人为操作引起的误差，每公里往返测标准差可达0.2~0.3mm，单站测量时间不足3秒，广泛应用于高速公路、城市快速路等重点工程的高程控制测量中。但在实际道路测量作业中，受仪器自身性能、观测操作规范性、外界环境条件等多重因素影响，测量数据仍会产生各类误差，若误差累积超出规范限值，可能导致道路纵断面高程偏差、横断面坡度不符，甚至引发路面沉降、桥头跳车等工程隐患。因此，系统剖析数字水准仪在道路测量中的误差来源，探索科学可行的消减措施，对保障道路测量精度、提升工程建设质量具有重要的现实意义。

1 数字水准仪测量原理与技术特点

1.1 数字水准仪工作原理

数字水准仪的基本原理为将测量目标点位投射到电子经纬仪上的目镜端，再由CCD拍摄下来，并经过A/D转换送入CPU进行计算处理，最后得出准确的数据结果。其核心优势体现在三个方面：读数客观性强，完全避免人工估读带来的主观误差，读数精度更具保障；测量精度高，一等水准测量每公里往返测标准差可达0.2~0.3mm，能够满足高等级道路对高程测量的精度要求；测量效率高，单站测量时间控制在3秒以内，支持数据自动存储与后续处理，大幅减少人工记录与计算工作

量，降低数据传输与记录过程中的错误率。

1.2 道路测量中的关键技术参数

数字水准仪的技术参数直接决定其在道路测量中的适用性与测量精度，结合高等级道路高程测量要求，关键技术参数及影响如表1所示，各参数的合理匹配的是保障测量工作高效、精准开展的基础。

表1 数字水准仪在道路测量中的关键技术参数及影响分析

参数	技术要求	影响分析
测量精度	±0.2~0.3mm/km (一等水准)	直接决定道路纵断面设计与施工的准确性，是高程控制的核心指标
测程	30~105m (视条码标尺类型而定)	影响单站观测效率，测程选择需结合道路地形与测量密度要求
补偿范围	±10' (自动安平补偿器)	限制仪器架设的地形适应性，补偿范围不足会增加整平难度与误差
环境光照强度	≥20lux (最低工作条件)	决定弱光环境下测量的可行性，光照不足会影响条码成像质量

由表1可知，测量精度是核心技术参数，直接关系到道路工程的施工质量；测程与补偿范围需结合道路测量的实际场景合理选择，光照强度则决定了测量作业的时段适应性，各类参数相互配合，共同保障测量工作的顺利开展。

2 数字水准仪在道路测量中的误差来源分析

2.1 仪器误差

仪器误差是数字水准仪自身硬件性能缺陷或部件状态异常导致的固有误差,具有系统性和可重复性,是影响测量精度的基础因素。光学与机械部件误差主要包括圆水准器误差、调焦透镜运行误差和竖轴倾斜误差,圆水准器误差会在仪器未精确整平时导致视准轴倾斜,进而引发读数偏差^[1];调焦透镜运行过程中光路变化会造成视准轴偏移,影响瞄准精度;竖轴倾斜误差多由脚架不稳固或地面沉降引发,导致仪器垂直轴倾斜,传递至读数环节产生误差。自动补偿器误差同样不可忽视,其安平精度通常为 $\pm 0.5''$,残余误差会随视距增大而累积,迟滞效应会导致动态测量时响应延迟,强磁场环境还会干扰补偿器摆体运动,进一步增大误差。电子设备误差主要来源于CCD/CMOS传感器噪声和标尺照明不均,光照过强或过弱时,传感器噪声会降低条码成像对比度,引发识别错误,标尺表面反光差异则会导致图像边缘模糊,增加边缘检测误差^[2]。

2.2 观测误差

观测误差由观测人员操作不规范导致,具有偶然性,但在道路测量高强度作业场景中发生率较高,且易被忽视。整平误差是常见的观测误差,观测者未严格使水准管气泡居中,会导致视准轴倾斜,以DS3级水准仪为例,其水准管分划值为 $20''/2\text{mm}$,气泡偏离1mm时,80m视距下的读数误差可达4mm。照准与估读误差虽因数字水准仪自动读数而有所降低,但十字丝未精确对准标尺分划线仍会产生照准误差,放大倍率不足时该误差更为显著,标尺分划本身的误差也可能引入系统性偏差。标尺竖直误差在地面坡度较大的道路测量场景中影响突出,标尺前倾或后倾都会导致读数偏大,当标尺倾斜 2° 时,1m高差对应的读数误差可达3.5mm,对测量精度的影响较为明显。

2.3 环境条件误差

道路测量多在露天环境下开展,外界环境因素通过多种机制影响测量精度,此类误差具有随机性和不可控性,是误差控制的难点。地球曲率与大气折光会对视线产生影响,视距100m时,地球曲率引起的高差误差为0.08mm,大气折光的影响则随视线离地面距离的减小而增大,通常可通过保持前后视距相等的方式予以消除。温度与风力的影响同样显著,温度变化会导致仪器与外界产生温差,引发部件热胀冷缩,进而造成 i 角变化,影响测量精度;大风会导致标尺晃动或仪器气泡不稳定,增加观测随机误差^[3]。震动与光照也会带来误差,交通、施工机械的震动会导致补偿器失效,烈日下仪器部件受热不均,会使气泡缩短,引发系统性误差,强光直射还会影响条码成像质

量,进一步增大读数误差。

3 误差消减措施与工程应用

3.1 仪器误差控制

仪器误差的控制核心是做好仪器的校准、预热与性能优化,从源头减少固有误差。严格执行校准与预热流程是基础,每日作业前需测定 i 角,若 i 角变化超过 $5''$ 需重新校正,确保仪器视准轴与水准轴的夹角符合规范要求;作业前应将仪器置于阴影下30分钟,使仪器温度与外界环境温度保持一致,避免温差导致的部件变形,减少温度引发的仪器误差。补偿器性能优化可进一步提升误差控制效果,选择高精度补偿器如液体静力平衡补偿器,可使补偿器的迟滞效应降低50%,提升补偿精度;在高压输电线等强磁场区域作业时,使用磁屏蔽罩可减少磁场对补偿器摆体的干扰,保障补偿器正常工作,降低补偿误差。

3.2 观测误差控制

观测误差的控制关键在于规范操作流程,提升观测人员的操作水平。制定标准化观测流程是核心,采用“后-前-前-后”的观测顺序,可有效削弱仪器与标尺沉降带来的误差;采用偶数站设站方式,结合双面尺法,可消除标尺零点差,实际应用中该方法可使往返测高差较差控制在1mm以内。标尺竖直是保障减少观测误差的重要环节,使用带圆水准器的标尺,通过气泡居中确保标尺铅垂,避免标尺倾斜带来的读数偏差;采用摇尺法,读数时缓慢摇动标尺,取最小读数作为最终值,可有效抵消标尺轻微倾斜带来的误差,提升读数精度^[4]。

3.3 环境条件适应性改进

针对环境条件带来的误差,需通过优化观测时段、采取防护措施,提升仪器对环境的适应性。温度与风力的控制可通过合理选择观测时段实现,避开日出后半小时、日落前半小时及中午高温时段,选择气温相对稳定、风力较小的时段开展作业,减少温度与风力对测量的影响;在风力较大的区域,使用三脚架配重或防风罩,可有效减少标尺晃动与仪器摆动,降低风力带来的随机误差。光照调节可通过调整标尺方位与使用遮阳设备实现,旋转标尺使成像亮度均匀,避免标尺表面反光差异带来的成像误差;使用遮阳伞避免阳光直射仪器,防止仪器部件受热不均导致气泡缩短,减少强光引发的系统性误差^[5]。

3.4 数据处理与平差

科学的数据处理与平差工作可进一步消减测量误差,提升数据精度。采用多次测站平均法,当单站往返测高差较差 $\leq 0.5\text{mm}$ 时取平均值作为最终数据,可有效抵消单次观测的随机误差;采用闭合水准路线平差方法,通过附合路线闭合差分

配,消除系统性误差,实际工程中闭合差控制在 $\pm 2\sqrt{L}$ mm (L 为路线长度, km) 范围内,可满足二等水准测量要求。数据处理过程中,需及时剔除异常数据,避免异常值对整体测量结果的影响,同时做好数据备份与核对工作,确保数据的准确性与完整性,为后续工程应用提供可靠支撑。

4 工程案例

4.1 项目概况

某高等级公路全长 50km,设计时速 120km/h,为双向八车道高速公路,项目要求高程控制网精度达到二等水准标准,即每公里往返测高差中误差 ≤ 2 mm。该项目沿线地形复杂,涵盖平原、丘陵路段,部分区域靠近高压输电线,且施工期间交通流量较大,震动与环境干扰较为明显,对测量精度的控制难度较高。为确保高程测量精度满足设计要求,项目采用高精度数字水准仪开展高程控制测量工作,并严格执行本文提出的误差消减措施。

4.2 误差消减措施实施

项目选用 Leica LS15 数字水准仪,该仪器补偿精度达 $\pm 0.2''$,测量精度为 ± 0.3 mm/km,配套因瓦条码标尺,满足项目二等水准测量要求。观测方案严格遵循误差消减措施,视距控制在 60m 以内,前后视距差不超过 2m,确保前后视距基本相等,消除大气折光与地球曲率的影响;每日作业前对仪器*i*角进行校准,作业中每 2 小时复核一次,确保*i*角变化控制在 $5''$ 以内;选择阴天或微风时段开展观测,避开中午高温、大风及日出日落前后的不利时段,减少环境因素带来的误差;在靠近高压输电线的区域,为仪器配备磁屏蔽罩,减少磁场对补

偿器的干扰;观测过程中采用“后-前-前-后”观测顺序,偶数站设站,使用摇尺法确保标尺竖直,提升观测精度;数据处理阶段采用多次测站平均与闭合水准路线平差方法,剔除异常数据,确保数据精度。

4.3 效果验证

项目通过闭合水准路线检测验证误差消减措施的有效性,选取 10km 长的水准路线进行检测,测得高差闭合差为 ± 1.8 mm,满足 $\pm 2\sqrt{L}$ mm ($L=10$ km 时,闭合差限值为 ± 6.3 mm) 的二等水准要求,测量精度完全符合项目设计标准。对比传统光学水准仪在该项目试点路段的测量数据,数字水准仪的测量效率显著提升,单公里测量时间大幅缩短,人工误差也大幅降低,有效减少了人为操作带来的误差影响。实践表明,本文提出的误差消减措施具有良好的可行性与有效性,能够有效控制数字水准仪在道路测量中的各类误差,为高等级公路高程控制测量提供可靠的技术保障。

5 结语

高精度数字水准仪的应用提高了道路高程测量精度及效率,但是,由于各类误差的影响仍然会降低高程测量结果的可靠性。本文通过对仪器误差、观测误差、环境条件误差产生的原因进行分析,并针对这些误差从仪器检定、观测方法、环境因素、内业计算四个维度提出消除方法,结合 Leica LS15 数字水准仪在高等级公路中的应用案例,验证了措施的有效性。研究表明,严格执行误差消减措施,可将数字水准仪测量误差控制在规范限值内,满足高等级道路高程测量的精度要求,为道路测量工作提供更高效、精准的技术支撑。

参考文献:

- [1] 王玉辉.对道路工程中的测量技术的探讨[J].汽车周刊,2025,(08):51-53.
- [2] 王浩宇.道路工程测量中高程控制问题及精度优化技术研究[J].汽车周刊,2025,(06):238-240.
- [3] 李志强.市政道路测量控制重难点问题及优化策略[J].四川建材,2025,51(01):160-162+166.
- [4] 郑国洪.利用先进测量技术提升居民小区市政道路施工精度[J].中国住宅设施,2024,(12):191-193.
- [5] 艾玉华.道路工程测量在施工中的实践分析[J].科技资讯,2023,21(03):77-80.