

1 绪 论

1.1 研究背景及意义

我国地域辽阔,人口众多,经济持续快速发展,作为承担长距离、大运量的客货运输任务的主力军,铁路交通在市场中发挥着十分重要的作用,也一直是基础设施建设的重要环节。自 2008 年 11 月《中长期铁路网规划(2008 年调整)》实施以来,我国铁路的客货运输水平得到了极大提升。据 2015 年全国铁道统计公报数据,全国铁路营业里程达到 1.21×10^5 km,提前完成了 2020 年铁路营业里程达到 12×10^5 km 的目标。其中高铁营业里程达到 1.95×10^4 km,复线里程 6.4×10^4 km,复线率为 52.9%,电气化里程 7.4×10^4 km,电气化率为 60.8%。西部地区营业里程达到了 4.8×10^4 km,比 2014 年增加 4401 km,增长 10.1%,图 1-1 为 2011—2015 年全国铁路营业里程。

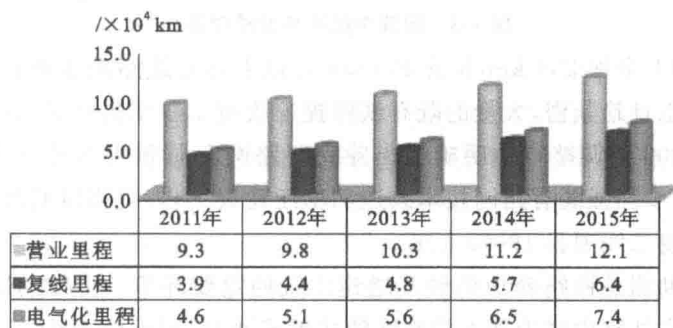


图 1-1 2011—2015 年全国铁路营业里程

图 1-2、图 1-3 分别是运营中的高铁及客货共线铁路,其共同特点是线路行车密度大、养护维修标准高、检修作业时间短,对线路的检测手段、处理方法等方面提出了一些新的要求。

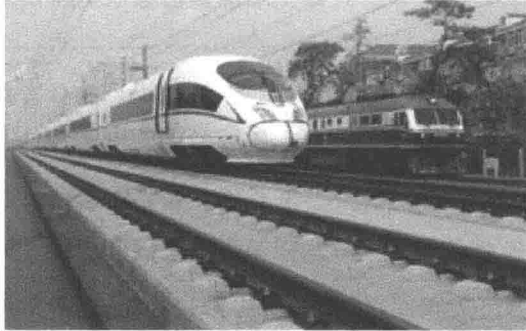


图 1-2 运营中的高铁

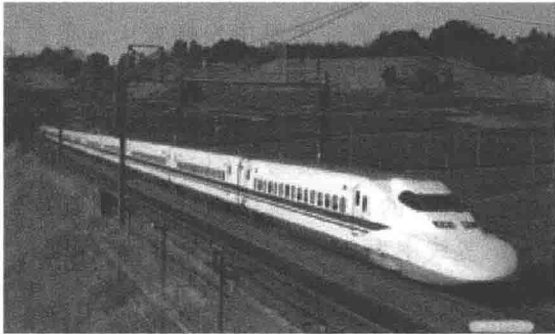


图 1-3 运营中的客货共线铁路

同时,随着全国 200 km/h 及 200 km/h 以上运行线路的逐渐扩展,与既有铁路的衔接也日趋紧密,大量的既有铁路提速改造工程相应开展,在《中长期铁路网规划(2008 年调整)》中明确提出除完善路网布局和西部开发性新线建设外,还要进一步加强既有路网技术改造和枢纽建设工作,提高既有线路运能,规划既有线增建二线项目 19000 km。

既有线勘测是铁路养护维修及增建二线的重要环节。传统的既有线测量基本是以既有铁路中线为基本控制线的接触式测量,对运营干扰大,安全性低,数据采集效率不高。随着提速铁路、客运专线高平顺性和高舒适性要求的提出,传统既有线静态测量所获取的数据及轨道不平顺处理方法与新标准之间存在工作盲区,亟待行之有效的新方法来解决。引入各方面的最新科技成果,改进勘测手段,提高勘测效率就显得十分必要。高质量、高精度的勘测方法既可

以有效提高既有铁路的外业勘测水平,又可以在日常养护维修、轨道状态检测中发挥重要作用。

因此,为适应铁路线路高平顺性和高舒适性要求,基于点云的连续性、非接触性、主动性数据特点,将地面三维激光扫描技术引入既有铁路勘测设计,通过实时连续点云数据的采集、处理、分析及利用,从精度、效率、智能化几个层面依次对地面三维激光扫描技术在铁路勘测设计领域的应用进行一个初步的系统性试验研究,为该技术在铁路建设领域的专业应用进行技术积累具有十分重要的理论及应用价值。

1.2 研究现状及发展动态

1.2.1 既有线勘测方法的国内外研究现状及发展动态

卓宝熙在系统回顾我国铁路工程勘测技术发展历程的基础上,对铁路勘测中存在的问题进行了深入分析,并结合铁路勘测设计“一体化、智能化”的发展方向,对新型、高精度、高速度现代化测量手段的应用前景进行了展望,对铁路各专业领域全方位引进数字化、模块化和自动化的测量新技术指明了方向。

既有线外业勘测是我国铁路工程建设中铁路养护维修及增建二线的重要环节,从里程丈量、高程测量、线路设备调绘、横断面及地形测量等方面进行外业工作。较为传统的既有线测量主要是以既有铁路中线为勘察、设计控制线,在线路上完成大量的外业测量工作,在行车密度较小的条件下具有较长的作业时间和可实施性。但是,随着我国的经济的发展,行车密度增加,速度提高,测量的作业条件 and 安全性得不到保障,加上很多时候,既有线勘测现场施工还需要较长时间,采用“经纬仪+水准仪”或者“光电测距仪+全站仪”等传统技术作业模式需要在路肩设置与既有线平行的中线外移桩或护桩,并以此为基准点进行相关后续工作。

为此,覃庆采用坐标法测量既有曲线,设计任意点置镜的测量方法,在每条曲线上建立独立直角坐标系,一次性进行里程、线路方向、小偏角、轨面高程等的测量工作,极大提高了勘测效率。但其外业勘测的基本思路没有改变,只是在施测方法及外业劳动强度上有所改善。

随着测绘仪器的发展,近年来陆续研究 GPS/GPS-RTK 技术在既有铁路勘测中的应用方法。该方法在测量基准点的选取、测量数据的处理等方面与传统的测量模式有显著不同。可在任意点置镜,减少了运营干扰,克服了视线不良、误差累积等问题,且所得数据直接为三维坐标,便于后续内业处理。许多专家学者在该方面进行了大量的研究工作。

朱福研究实时差分动态 GPS 在铁路复测中应用的可行性,从勘测硬件指标、相对应的作业模式、测点布设方法及精度控制要求等方面提出了一些初步构想。

韩峰和李斌等结合 GPS-RTK 技术的基本原理,具体研究该技术在铁路施工全过程中的应用方法,并对其在既有铁路复测中应用的可行性进行了初步探究。

王斌和胡珠寿等结合具体线路改建工程,在 GPS 控制测量的基础上,采用 GPS-RTK 技术进行线路中线测量。GPS-RTK 技术在缩短勘测工期、减少外业工作强度等方面效果明显。

张建民和刘晓明研究应用 GPS-RTK 技术实现既有铁路三维一体化勘测方法,整合里程、平面、高程等方面测量工序,合理安排作业人员及工序,在缩短作业时间、提高效率、降低测量风险等方面有较大改进。

但是,应用 GPS-RTK 技术施测依然是接触式作业模式,对铁路运营有干扰。同时,该技术需要较好的观测条件才能取得理想结果,当遇到信号遮挡严重,尤其是城市和铁路站场附近,得不到卫星定位解,还需采用传统方法加以补充。此外,由于该技术在高程测量方面存在一定的缺陷,其应用及推广还需要更进一步地深入研究。

国外从 20 世纪 90 年代开始 GPS 技术在轨道测量中的应用可行性研究,其研究成果表明 GPS 测得的方向绝对误差最高约为 $\pm 6\text{ mm}$,水平测量的精度更差一些,不能满足既有线勘测要求。但随着 EM-SAT 测量小车的应用,使用激光基准弦和 GPS 同时测量实际轨道,可将相对于激光基准弦精度较高的测量数据转换为绝对坐标中的数据,利用 GPS 代替固定点,取得了很好的应用效果。

目前,国内外的研究主要集中在 GPS、GIS、RS 相结合的“3S”综合技术在道路、铁路各个领域的应用方面,为全面实现铁路建设的数字化、一体化奠定了良好的基础。

1.2.2 地面三维激光扫描技术的国内外研究现状及发展动态

随着科技的不断发展与进步,新的数据获取手段以及三维模拟、实物重构、虚拟现实等理论迅速发展,要求从平面二维空间逐渐转向空间三维立体思维模式来实现对事物的认知及分析。地面三维激光扫描 LIDAR/LADAR(Light/Laser Detect And Ranging)技术是一种通过位置、距离、角度、反射强度等观测数据直接获取对象表面点三维坐标,形成点云数据,实现地表信息实时提取和准确重建三维场景的对地观测技术。地面三维激光扫描仪测量原理如图 1-4 所示。

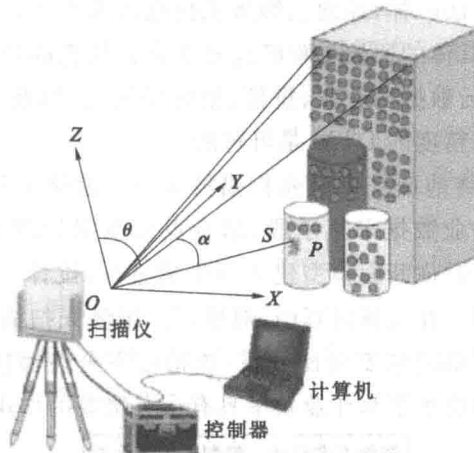


图 1-4 地面三维激光扫描仪测量原理

在地面三维激光扫描仪内部建立 $OXYZ$ 空间坐标系,在 XOY 平面及其垂直面各有一反射镜,同时快速旋转作业,引导激光依次扫过被测区域,系统自动同步测量各激光脉冲的空间距离、水平角和天顶距。可以按照式(1-1)来计算每个激光点的三维坐标,采用一定的坐标转换方法即可实现与实际地面坐标的对接,同时记录的反射强度和颜色信息可以在三维表达方面起到很好的视觉效果。

$$\begin{cases} X = S \sin \theta \sin \alpha \\ Y = S \sin \theta \cos \alpha \\ Z = S \cos \theta \end{cases} \quad (1-1)$$

地面三维激光扫描技术具有自动化程度高、全天候测量、数据信息量大、生

产周期短、精度高等特点,是目前最先进的能实时获取地形表面三维空间信息和影像的航空遥感系统,也是国内外目前在获取高效率空间数据方面的研究热点。该技术使用方法简单,环境适应性强,测量成本低,目前在国内外大量工程中得以应用,在地形测量、变形监测、文物保护、道路工程、路面检测、轨道测量等领域均有较大的发展空间。

张启福、徐进军、宋宏等在详细研究地面三维激光扫描仪测距、测角、扫描及定向的若干方法基础上,结合目前国内外的地面三维激光扫描设备现状,对其测程、扫描速率与精度之间的关系进行深入分析,对地面三维激光扫描仪在不同领域的应用提出了一些参考意见。

与传统的测量方法一样,地面三维激光扫描技术首先在地形测绘中开展应用研究,董秀军结合具体的边坡工程研究基于点云信息的数字地形模型快速获取方法,重点研究点云数据的获取、拼接、坐标校正、去噪及DTM建模等,验证在一定范围内获取高精度的DTM是可行的。

马利、谢孔振等将地面三维激光扫描技术引入道路工程测绘领域,以地面三维激光扫描仪为外业数据采集手段,结合点云数据处理方法,完成DTM建模、线路等高线绘制、纵横断面模型建立与生成过程,设计了如图1-5所示的数据采集与处理流程图。在实施过程中,对地面三维激光扫描仪获取数据与全站仪实测数据进行了详细的精度对比分析,该精度完全能够达到道路设计要求,对提高道路工程的测绘水平和作业效率具有十分重要的作用。

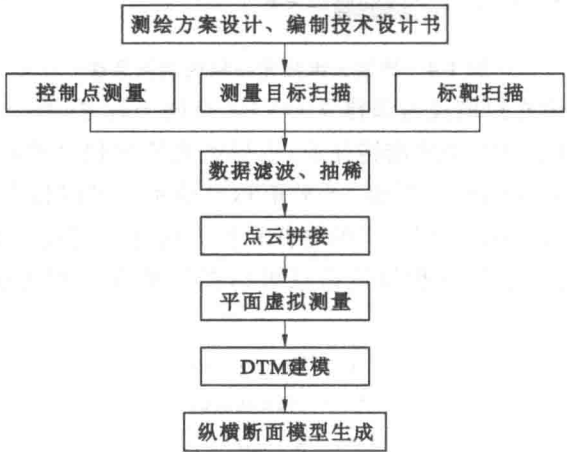


图 1-5 数据采集与处理流程图

王鑫森、孔立等对基于地面三维激光扫描的公路路线特征提取方面进行了深入的研究,通过控制点云采集的参数来优化点云密度分布,在多站点云数据配准中采用基于四元数的 ICP 算法进行优化,提高配准精度,在点云数据处理过程中引入了局部点离群算法进行点云去噪,建立可靠的数据源。同时,根据数据点及其周围点的分布均匀性提取边界点,采用最小二乘法拟合左右边界,以点数多的一边边界点为基准,根据距离最短原则寻找另一边界匹配点对,计算中线坐标,获取相关设计参数,为地面三维激光扫描仪在道路与铁道工程中的应用提供一定的参考。

王星杰将地面三维激光扫描技术应用于道路竣工测量中,研究其内、外业测量及数据处理方法,并进行了全面的精度检验,实现了地形图、纵横断面图、路口大样图等的生成,实验数据精度完全符合道路竣工测量要求,为地面三维激光扫描技术的进一步应用提供了很好的借鉴作用。

徐进军等提出采用距离与时间控制相结合的方法实现地面三维激光扫描技术在路面测量中的应用,在点云数据处理及点云密度控制等方面提出一些合理化建议。

国外的专家在数据的获取及精度分析等方面开展了大量的研究工作,Huang Chia-Chun 在曲面三维扫描过程中应用快速傅里叶变换和小波变换方法,提高三维数据获取效率。Zhou Limin 等提出采用多维拟合标定法提高扫描精度。K Harding 在对扫描系统进行误差分析的基础上,提出校正方法。普遍认为,测量误差主要与观测物体的几何形位及扫描距离有关。

刘春、张蕴灵等,郑德华、沈云中等,谢瑞、胡敏捷等,Johansson 从不同方面研究地面三维激光扫描仪测量误差及检校方法,对不同测量条件下的点位密度进行分析,找出测量距离、角度、反射面、气温等因素对测设精度的影响,并提出相应的精度控制措施,为其在工程领域的应用提供精度保障。

在开展大量研究工作的基础上,作为精度要求非常高的铁路线路工程也逐步引入地面三维激光扫描技术。易思蓉等对铁路 BIM 应用中线路构造与设备三维信息建模、三维地质环境建模等方面开展了大量的深入研究工作,对地面三维激光扫描技术的应用提供了非常好的技术支撑。

金星从铁路 BIM 技术应用领域分析入手,研究铁路 BIM 技术与虚拟环境选线技术之间的关系,并提出使用激光扫描技术作为三维数据来源的一项重要手段,设计了铁路勘测设计 BIM 应用领域图,如图 1-6 所示。

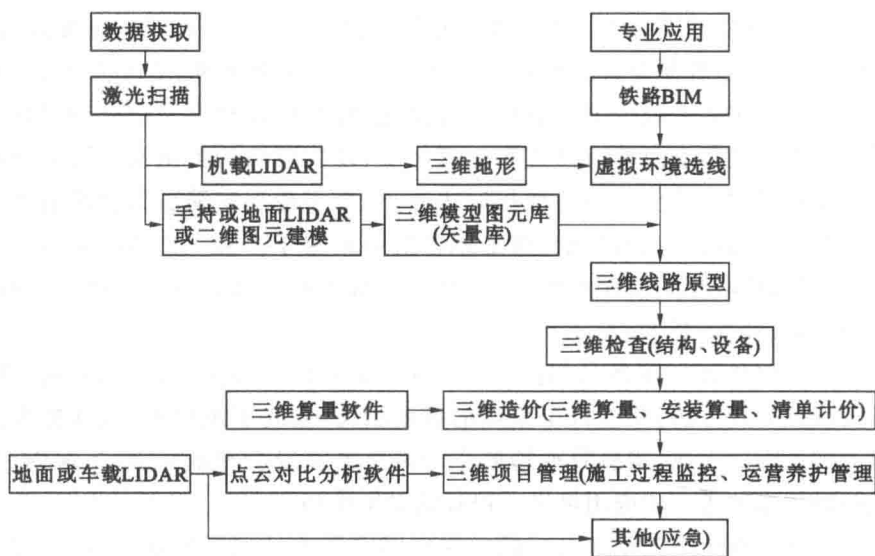


图 1-6 铁路勘测设计 BIM 应用领域图

在法国巴黎,最早的圣·拉扎尔火车站改造项目中采用 Trimble EX 扫描仪与 Trimble S8 全站仪相结合,全站仪仅提供控制点坐标测量,其他功能均由扫描仪来实现,大大提高了工作效率,并实现了项目三维可视化,尤其是采用的双程扫描功能大大提高了测量精度,完全满足轨道测量的精度要求。

Trimble 公司生产的 GEDO Scan 铁路测量系统产品,如图 1-7 所示,综合了轨检小车、扫描仪及相关软件,能满足既有铁路轨道检查、建筑限界提取、隧道断面测量等方面的应用要求,图 1-8 为相关应用效果图。



图 1-7 GEDO Scan 铁路测量系统

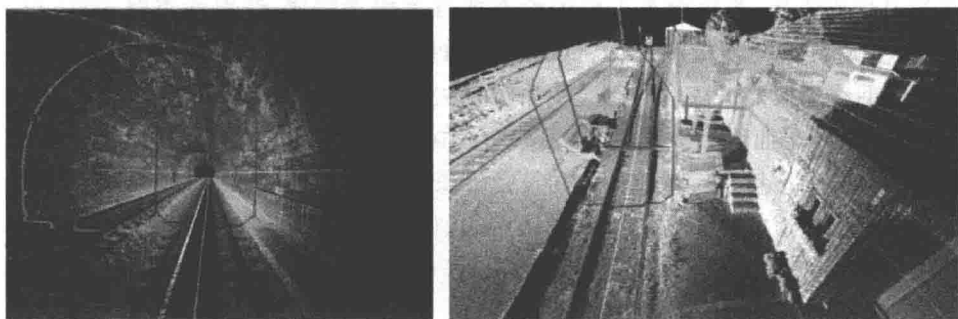


图 1-8 GEDO Scan 应用效果图

近年来,随着测绘技术的发展,越来越多的新技术被专家、学者引入既有铁路勘测领域过程中,其中李建强和 Han Feng 对地面三维激光扫描技术在既有铁路勘察领域的应用进行了初步研究,从测量方案设计、点云数据后处理以及在线路特征提取和应用方面为地面三维激光扫描技术在既有铁路勘测领域的应用提出了成套办法。

1.2.3 轨道几何形位检查及质量状态评价方法研究现状及发展动态

轨道检测分为静态检测和动态检测。静态检测即在无荷载作用情况下的线路几何状态检测,常用的检测方法为轨距尺、弦线测量及各类轨道几何测量检查仪。动态检测即在有荷载作用情况下的线路几何状态检测。动态检测的手段和方法包括综合检测列车、轨检车、线路检查仪(车载、便携)和人工添乘仪。轨道的动、静态检测对于指导轨道施工验收、后期线路的养护维修,以及保障行车安全具有十分重要的作用。

1.2.3.1 轨道静态检测

(1) 人工检测

目前,铁路轨道静态检测还是以人工检测为主,检测工具主要是道尺、弦绳及板尺等,一般按照 10 m、20 m 的等间距进行。线路几何尺寸检查的主要项目有轨距、水平、轨向、高低、轨底坡、曲线正矢及道岔尺寸检查等。

一般来讲,对于速度 200 km/h 以下线路,对正线线路和道岔每月检测 2 次(含轨检车检查)。对于速度 200 km/h 及 200 km/h 以上线路,对正线线路和道

岔每月检测 1 次,与轨检车重复的检查项目可按季完成;线路检查时,对轨距、水平、三角坑作全面检测;对高低、轨向、伤损钢轨、夹板和焊缝全面查看,重点检查。曲线地段要求每季全面检测曲线正矢 1 次。速度 200 km/h 及 200 km/h 以上线路,对于曲线平纵面位置,根据曲线观测控制桩每季检测 1 次。

目前,不同速度等级的线路轨道静态几何尺寸容许偏差管理值如表 1-1~表 1-2 所示。道岔静态几何尺寸容许偏差值及曲线正矢容许偏差管理值可参看相关速度等级的详细技术要求。

表 1-1 速度 200 km/h 及 200 km/h 以上线路轨道静态几何尺寸容许偏差值 (单位:mm)

项目	250 km/h≤v≤350 km/h 正线				200 km/h≤v≤250km/h 正线			
	作业验收	经常保养	临时补修	限速 (200km/h)	作业验收	经常保养	临时补修	限速 (160km/h)
轨距	+1	+4	+5	+6	+1	+4	+6	+8
	-1	-2	-3	-4	-1	-2	-4	-6
水平	2	4	6	7	2	5	8	10
高低	2	4	7	8	2	5	8	11
直线轨向	2	4	5	6	2	4	7	9
扭曲 (mm/3m)	2	3	5	6	2	4	6	8
轨距变化率	1/1500	1/1000	—	—	1/1500	1/1000	—	—

表 1-2 速度 200 km/h 以下线路轨道静态几何尺寸容许偏差值 (单位:mm)

项目	160 km/h<v≤200 km/h 正线			120 km/h<v≤160 km/h 正线			v≤120 km/h 正线及到发线		
	作业验收	经常保养	临时补修	作业验收	经常保养	临时补修	作业验收	经常保养	临时补修
轨距	+2	+4	+6	+4	+6	+8	+6	+7	+9
	-2	-2	-2	-2	-4	-4	-2	-4	-1
水平	3	5	8	4	6	8	4	6	10
高低	3	5	8	4	6	8	4	6	10
直线轨向	3	4	7	4	6	8	4	6	10
扭曲 缓线	3	4	6	4	5	6	4	5	7
三角坑 直线	3	4	6	4	6	8	4	6	9
圆曲线									

轨道静态检测中轨距测量使用轨距尺进行,轨距尺有 RTG-1、RTG-2、TGC-1A、TGC-A3 及新型的 DGJC 电子检测尺等多种类型,测量的精度不断提高,图 1-9 是现场轨距测量。



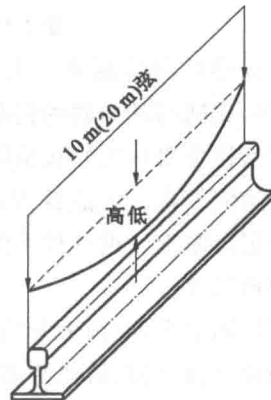
图 1-9 现场轨距测量

目前,水平、高低、轨向及轨底坡的检测大多采用目视圆顺的方式,图 1-10~图 1-12 为现场检测示意图。

而钢轨平直度检测是测定钢轨轨面的波浪形磨耗(波磨)深度、擦伤深度及焊接接头轨面和侧面的凸凹矢度。钢轨轨面的磨耗深度及擦伤深度使用 1 m 的平直尺和楔形插尺(或塞尺)检测,无缝线路的焊接接头轨面和侧面的凸凹矢度使用钢轨电子平直仪(图 1-13)检测。



(a)



(b)

图 1-10 高低检测

(a) 高低目视检测;(b) 高低检测原理

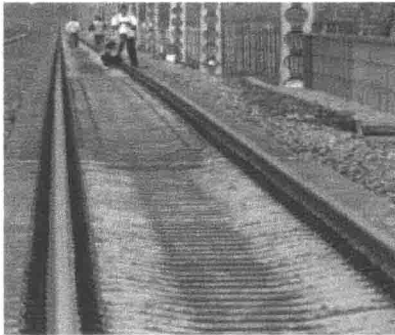


图 1-11 长距离大轨向

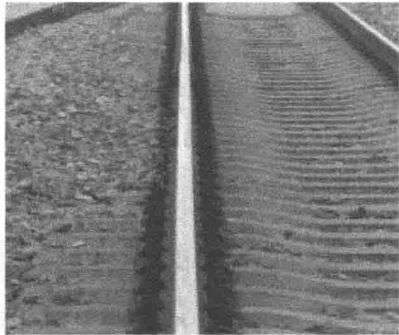


图 1-12 接头处小轨向

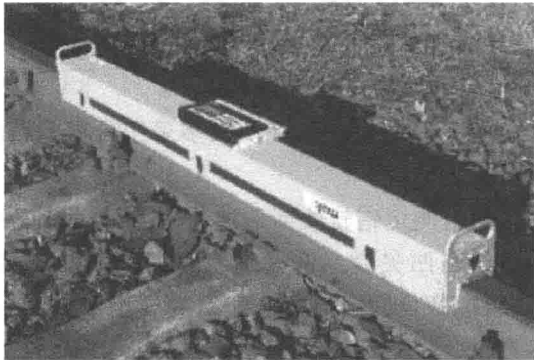


图 1-13 钢轨电子平直仪

道岔几何形位的检测项目主要有：道岔各部分轨距、水平、高低、导曲线支距、查照间隔、尖轨与基本轨的密贴程度等。高速道岔还应重点检查尖轨、心轨降低值。道岔检查要从尖轨接头轨距顺坡终点开始，至辙叉曲股前止。各项轨道几何尺寸均应按规定定点检查，道岔连接曲线按线路检查要求，记录在线路（曲线）检查记录簿上。道岔检测的主要工具包括塞尺、钢尺、支距尺、降低值检测尺和专用道尺等。

为提高检测水平，中南大学的龙京、应立军、贾文强研发的新型轨道静态几何参数检测仪，可以实现轨道静态参数的自动提取，可以检测轨距、高低、轨向、水平及里程等参数，功能较为齐全，但携带不便。西南交通大学的李芳芳则是从基础理论研究方面为新型摄像设备的引入提供技术支持。

兰州交通大学王保成、韩峰等在合武客专有砟轨道精调时研制的简易轨道

几何静态检查设备,可与全站仪结合自动显示检查轨道与设计之间的三维差值,但精度略有不足。

北京交通大学和太原铁路局联合研制的便携式线路几何参数非接触式激光测量系统,综合运用了嵌入式系统、激光、传感器及 CCD 技术,能够完成正常的轨道几何参数实时检测,该系统采用数字影像处理技术,通过模式识别、判断轨道内沿,提取相应的轨道参数,精度可以满足普通铁路需求。

(2) 轨检小车

轨检小车是一种检测轨道静态几何不平顺的综合检测工具。它采用 T 形走行车作为检测平台,其检测及数据处理设备主要包括电测传感器、专用便携式计算机、光纤陀螺仪等,可根据需要进行绝对或相对测量,检测内容包括轨距、高低、水平、扭曲、轨向等。目前,轨检小车在高速铁路客运专线及其他对平顺性要求较高的线路上广泛使用。同时,其在一些新建铁路的线路整道、铺设精度检查以及线路作业质量验收时得以广泛应用。图 1-14 为在德国高铁竣工测量、西班牙高铁无砟轨道施工、京津城际轨道第三方检测及武广客运专线施工中得到广泛应用的 GRP1000 轨检小车。图 1-15 为轨检小车在无砟轨道精调过程中的应用实景。

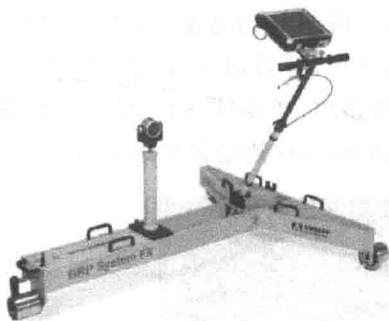


图 1-14 GRP1000 轨检小车



图 1-15 轨检小车用于无砟轨道精调

GRP1000 测量系统主要由手推式轨检小车和分析软件包两大部分组成。其可用于单独测量轨道水平、轨距等相对结合参数,一般配合 LEICA TPS 全站仪来实现平面位置和高程的绝对定位测量,采用全站仪的自动目标照准功能,通过与 GRP1000 轨检小车之间连续的无线电通信信号来完成绝对定位测量,如图 1-16 所示。

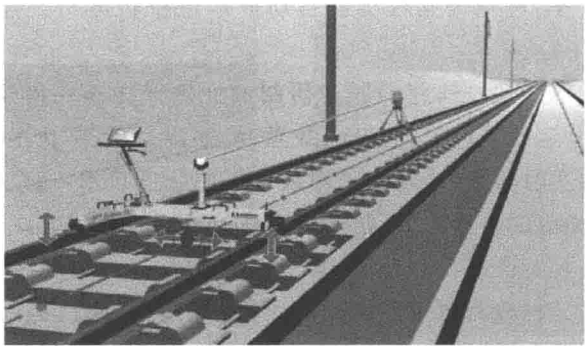


图 1-16 GRP1000 轨检小车测量原理示意图

测量外业完成后,该系统可以自动生成轨道几何测量的综合报表。可以根据检查项目要求选择报表的输出界面,选择性地输出需要的主要几何参数,包括轨道几何线位、轨距、水平、轨向及高低等。

近年来,为适应高铁和铁路提速需求,Trimble 公司在综合研究传统轨道测量作业方式、大型机械测量(EM-SET)、轨检小车作业方式的基础上,研究开发了 GEDO Vorsys 测量系统。该系统可采取绝对测量和相对测量等不同的模式,可一次性采集多种轨道数据,并与设计线路进行比较分析,解算出最优的起、拨道量及相关设计参数,指导大机作业。观测轨道数据,经专业软件处理后,会生成一个真实、高效的线性参数捣固文件,并以数字化方式传输给捣固机,进而指导捣固机实时作业,目前在北京铁路局、西安铁路局、成都铁路局、太原铁路局等单位均有使用,图 1-17 为 GEDO Vorsys 测量系统现场图。

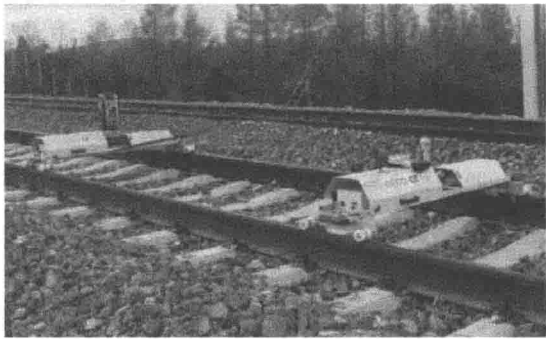


图 1-17 GEDO Vorsys 测量系统现场图

GEDO Vorsys 测量系统由 Trimble S8 全站仪、2 台 GEDO Vorsys 小车、TSC2 控制器以及相关外业数据采集和内业处理软件组成,具有测量速度快、工作效率高、数据质量高等特点。尤其是其数据后处理系统,人性化程度高,符合国内有砟铁路捣固系统习惯,并能实现与捣固机之间数据无缝连接。该系统作业数据流如图 1-18 所示。

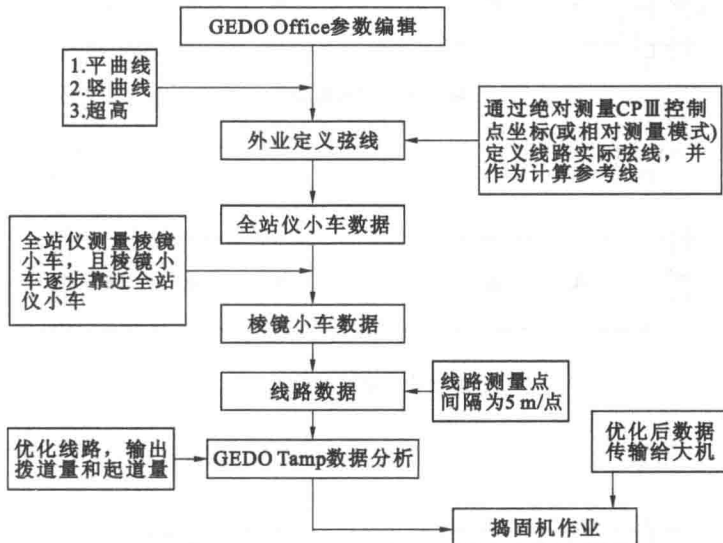


图 1-18 GEDO Vorsys 测量系统作业数据流

GEDO Vorsys 测量系统的主要测量模式可分为绝对测量、相对测量、相对约束测量三种。

绝对测量:利用线路两侧的参考点(CPⅢ控制网或其他控制点),采用绝对测量模式定义线路的弦线,通过测量轨道数据,后处理分析得到线路的拨道量和起道量。该模式不仅可以对线路进行平顺性优化,还可以由控制点数据来控制线路的绝对位置关系。绝对测量通常适用于速度在 160 km/h 及 160 km/h 以上的线路。绝对测量作业流程如图 1-19 所示。

相对测量:当线路两侧无参考点数据时,可自定义一条线路参数,采用相对测量模式定义弦线并测量轨道数据,后处理分析线路的拨道量和起道量。该模式只能对线路进行平顺性优化,无法实现线路的绝对位置控制。相对测量适用于速度在 120 km/h 以下的线路。相对测量作业流程如图 1-20 所示。

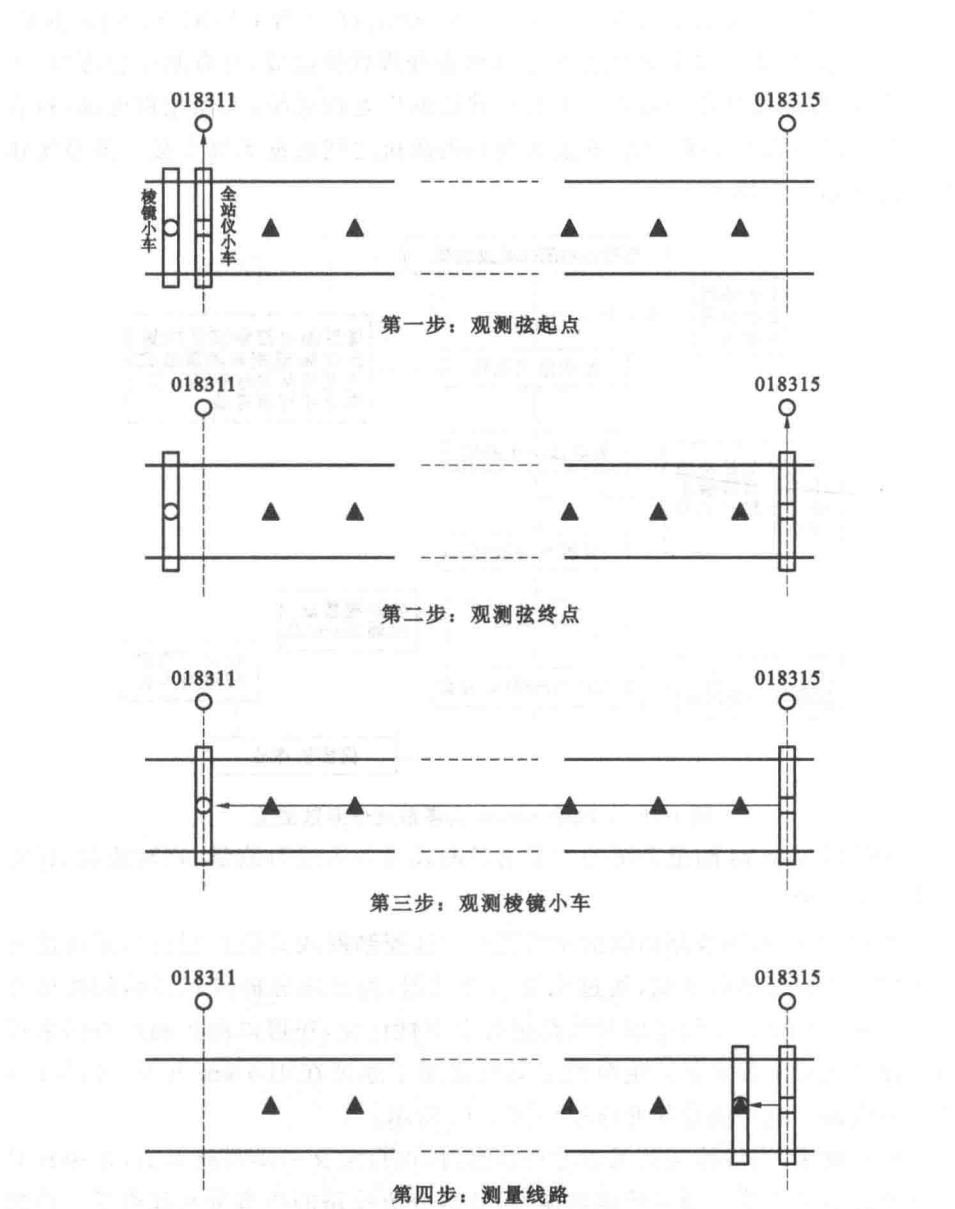


图 1-19 GEDO Vorsys 绝对测量作业流程

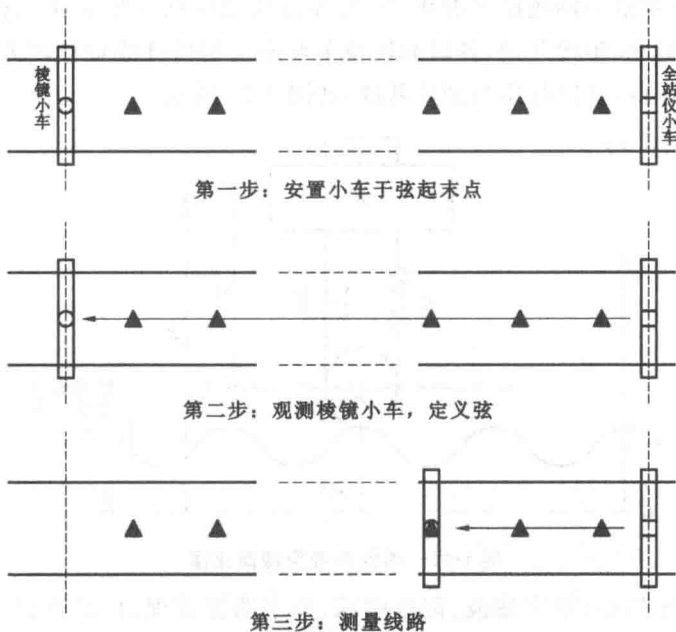


图 1-20 GEDO Vorsys 相对测量作业流程

相对约束测量: 线路两侧无参考点数据, 但是在特定位置上 (约束桩或接触网) 具有约束点标记, 用来约束线路的横向及高程差值; 采用约束点的横向和高程差值来定义弦线并测量轨道数据, 后处理分析线路的拨道量和起道量。该模式对线路的平顺性和绝对位置均可控制, 但精度比绝对测量低很多。相对约束测量模式适用于速度 $120 \sim 160 \text{ km/h}$ 的线路。

可以说, 轨道静态检测技术手段随着测绘仪器的不断发展而进步, 逐步向集成化、智能化的方向靠近, 也需要更为先进的技术、设备来支撑其发展。

1.2.3.2 轨道动态检测

轨道静态检测可以较为真实地反映轨道结构构件的使用状态, 确定维修计划安排, 但对于暗坑、吊板、扣件松脱和弹性不均匀等因素所造成的行车动态不平顺无法体现, 不能完全真实地反映轨道在荷载作用下的不平顺状态, 需要采用动态检测技术来实现线路轮轨作用、车辆振动与动态不平顺之间的关系测定, 并以此来判断轨道及线路整体养护维修质量。目前, 轨道动态检测主要设备有轨检车、机车车载式轨道动态检测装置、添乘仪等。