

农田土地精细平整技术

李益农 许迪 白美健 刘刚 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

农田土地精细平整技术

李益农 许迪 白美健 刘刚 等 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内容提要

本书依据中国水利水电科学研究院水利研究所多年来开展的农田土地精细平整技术研究成果撰写而成。主要内容涉及农田微地形及其测量技术、农田微地形时空变异特性和数值模拟方法、农田微地形对地面灌溉系统性能影响分析评价、激光控制土地精细平整设备和国产成套设备的研发、农田土地精细平整工程设计与施工、激光控制土地精细平整技术应用等，既包括技术基础理论、技术应用模式、成套设备研发等研究成果，又含有土地精细平整工程设计与、农田土地精细平整辅助决策支持系统、激光控制土地精细平整技术应用效果分析等实用工具介绍。

本书资料翔实，内容丰富，具有技术研究与实际应用相结合的显著特点，可供广大从事农田土地平整和地面灌溉技术研究和推广应用的科技人员以及相关专业的的大专院校师生参考。

图书在版编目（C I P）数据

农田土地精细平整技术 / 李益农等著. — 北京 :
中国水利水电出版社, 2016. 1
ISBN 978-7-5170-4070-5

I. ①农… II. ①李… III. ①农田—土地整理—研究—中国 IV. ①F321. 1

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第022903号

书 名	农田土地精细平整技术
作 者	李益农 许迪 白美健 刘刚 等 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	枣庄市大有文化传媒有限公司
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 12.5 印张 320 千字
版 次	2016 年 1 月第 1 版 2016 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—1500 册
定 价	38.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换
版权所有·侵权必究

前 言

农田土地平整是实现地面灌溉系统高效运行的重要前提之一，在学术研究和生产实践中都深受重视。平整的农田表面有利于灌溉水在田块内的分布更均匀，使作物根区内土壤水分入渗保持较好的均一性，起到提高田间水利用率和灌溉均匀度的作用。由于灌溉均匀度的提高，使得作物出苗条件得以改善，出苗率增加；灌溉水在作物根区内的均匀分布有效减少了土壤中肥料和养分的淋洗损失，达到节水增产的目的；平整后的农田还有益于田间农机耕作和其他农业栽培措施的实施，可以显著提高农机作业效率。进入 21 世纪以来，我国节水灌溉已经取得了快速发展，但与国民经济和社会发展的要求相比仍然是滞后的，特别是占灌溉总面积 90% 以上的地面灌溉普遍存在土地平整条件差、田间工程不配套、灌溉管理粗放等问题，使我国农田灌溉水利用效率仍然整体较低。改进传统地面灌溉技术，大幅度提高地面灌溉系统性能指标，是保障我国粮食安全、水安全，从根本上缓解我国农业水资源短缺矛盾的重要技术措施。正是基于此，系统开展农田土地精细平整技术应用研究具有重要现实意义。

自 20 世纪 90 年代中叶起，中国水利水电科学研究院水利研究所先后承担了一系列农田土地精细平整技术研究课题。从欧洲联盟与瑞士政府资助的中国-欧洲联盟科技合作项目“黄淮海平原农业持续发展水土资源管理”开始，对激光控制土地精细平整技术进行应用研究。在同期实施的“九五”科技攻关项目“节水农业技术与示范”的子专题“水平畦田灌水技术研究”中，我们又对土地精细平整技术进行了大规模的田间试验示范研究，全面系统地掌握了激光控制土地平整技术的设备构成、性能和特性、技术参数以及田间应用程序等。在随后实施的“十五”国家“863”计划课题“精细地面灌溉技术及设备”及国家重大科技专项课题“精细地面灌溉技术研究”、“十一五”国家“863”计划课题“激光控制平地与地面灌溉设备”、水利部科技创新项目“激光控制平地铲运设备及其液压系统研

制”等研究课题中持续开展了农田土地精细平整技术应用和设备的研究开发工作。通过国家自然科学基金课题“微地形和入渗空间变异对畦灌性能组合影响研究”对相关技术应用的基础理论进行了探讨，并结合科技部农业科技成果转化资金项目“激光控制平地技术及国产铲运设备示范应用”对技术成果进行了熟化。基于上述课题相关研究成果，我们撰写了本专著。

全书共分 7 章。第 1 章给出了农田微地形的定义及其评价指标，重点介绍目前应用广泛的两种农田微地形测量方法-水准仪测量方法和 GPS 测量方法，并讨论了小尺度田块条件下土地平整施工时适宜的农田微地形测量网格间距的确定问题。第 2 章以大量农田微地形实测数据为依据，采用经典地质统计方法分析确定了各类农田的地面相对高程空间分布结构特征、函数关系以及用来估算空间变异特征参数的经验公式，评价了农田微地形时空变异特性，探讨了不同田块规格条件下影响农田微地形时空变异分布状况的主要因素。第 3 章针对农田地面相对高程分布同时具备随机性和确定性空间相关结构的物理特征，基于 Monte - Carlo 模拟方法、地质统计学和 Kriging 最优内插法等现代数学方法和计算机模拟工具，建立了客观描述农田微地形空间分布状况的数学模拟方法。第 4 章分别利用田间试验和数值模拟两种方法开展了农田微地形对地面灌溉性能影响的研究，将第 3 章提出的农田微地形模拟方法与地面灌溉二维模拟模型 B2D 相结合，模拟分析了微地形起伏幅度、微地形起伏位置空间分布差异及微地形空间变异对畦灌过程和畦灌性能的影响。第 5 章以激光控制平地技术为例介绍了土地精细平整技术的原理、设备构成，给出了国产激光控制平地成套设备的开发和田间考核应用的历程。第 6 章从农田土地平整状况评估、土地平整方案设计和土地平整施工等三个环节介绍了农田土地精细平整工程的设计方法和施工过程，详细描述了中国水利水电科学研究院开发的具有地形数据处理、地形统计评估、图形评估、平整方案计算、方案优选评估等功能，适用于农田规划平整改造工程、农田土地精细平整工程的专用软件包—农田土地精细平整辅助决策支持系统。第 7 章以激光控制平地技术在山东的规模化应用和在新疆生产建设兵团的示范应用为例，从激光控制土地精细

平整效果、平地作业效率，平地技术应用经济性能等方面分析评价激光控制平地技术应用效果，提出适合我国国情的激光控制平地技术推广应用模式。

本书由参加上述研究项目工作的科技人员按章节内容分工合作撰写，李益农、白美健审定统稿。撰写人员名单如下：

第一章	李福祥	李益农	史源	
第二章	白美健	章少辉	史源	
第三章	白美健	许迪	章少辉	
第四章	白美健	吴彩丽	史源	
第五章	刘刚	李益农	李福祥	罗小全
第六章	李福祥	李益农	章少辉	吴彩丽
第七章	李益农	许迪	吴彩丽	

除上述人员外，先后参加研究工作的人员还有中国水利水电科学研究院水利研究所徐景东、杨继富、刘姗姗，山东横店草业畜牧有限公司王复东、张伟东，新疆生产建设兵团水利局节水办胡卫东、郑子文，北京昌平区水资源局百善水利管理服务站徐立宏，天津工程机械研究院宗跃、安治国。因此，本专著也包含了这些同志的劳动结晶。

在完成本专著相关研究课题过程中，得到了中国水利水电科学研究院、中国农业大学信息与电气工程学院、北京盛恒伟业科技发展有限公司有关领导和专家的指导和帮助，在此一并表示衷心的感谢。

本书撰写过程中我们尽了最大努力，但限于著者水平有限，书中可能存在欠妥或谬误之处，敬请读者批评指正。

著者
2015年8月

目 录

前言

第1章 农田微地形及其测量技术	1
1.1 农田微地形定义及评价指标	1
1.2 农田微地形测量技术	2
1.2.1 农田微地形水准测量技术	2
1.2.2 农田微地形全球定位(GPS)系统测量技术	5
1.2.3 水准仪与GPS测量结果对比分析	8
1.2.4 结论	13
1.3 适宜的高程测量网格间距的确定	14
1.3.1 田间试验与分析方法	14
1.3.2 测量网格对田面微地形空间分布状况的影响	15
1.3.3 土地精平施工测量网格间距的适宜性分析	16
1.3.4 结论	19
第2章 农田微地形时空变异特性	21
2.1 农田微地形空间分布特性	22
2.1.1 基础数据与分析方法	22
2.1.2 田面相对高程统计特征分析	23
2.1.3 田面相对高程空间结构分析	25
2.1.4 田块参数与田面相对高程空间变异特征参数间的相关性	26
2.1.5 田面相对高程空间变异特征参数的确定	28
2.1.6 结论	29
2.2 农田微地形时间变异特性	30
2.2.1 田间试验	30
2.2.2 田面相对高程统计特征值时间变异性	30
2.2.3 田面微地形空间分布时间变异性	33
2.2.4 田块规格对田面微地形时空变异分布状况的影响	34
2.3 结论	35
第3章 农田微地形模拟方法	36
3.1 数值模拟获得农田微地形空间分布	36
3.1.1 基于Monte-Carlo方法随机生成田面相对高程	37
3.1.2 随机生成的田面相对高程物理属性修正	38
3.2 农田微地形空间分布的最小样本容量	41
3.2.1 畦灌性能指标统计特征值与农田微地形空间分布的样本容量间关系	42
3.2.2 农田微地形空间分布最小样本容量的确定	46

3.3 农田微地形模拟方法的验证.....	48
3.4 结论.....	51
第4章 农田微地形对地面灌溉性能的影响.....	52
4.1 地面灌溉性能评价指标.....	52
4.1.1 灌溉效率.....	53
4.1.2 灌溉均匀度.....	54
4.1.3 储水效率.....	54
4.1.4 灌溉性能指标与灌水深度和作物需水量间的关系.....	54
4.2 农田微地形对地面灌溉性能影响的田间试验分析.....	56
4.2.1 田间畦灌试验.....	56
4.2.2 微地形对畦田水流推进与消退的影响.....	56
4.2.3 微地形对畦田入渗水深分布的影响.....	57
4.2.4 微地形对畦灌系统性能的影响.....	58
4.3 农田微地形对地面灌溉性能影响的数值模拟分析.....	59
4.3.1 基于微地形随机模拟和灌溉模拟的畦灌数值模拟评价方法田间验证.....	60
4.3.2 畦灌性能评价数值模拟试验设计.....	76
4.3.3 微地形起伏幅度对畦灌性能影响的模拟分析.....	76
4.3.4 微地形起伏位置空间分布差异对畦灌性能影响的模拟分析.....	79
4.3.5 微地形空间变异对畦灌性能影响的模拟分析.....	83
4.4 结论.....	86
第5章 激光控制土地精细平整设备及其产业化开发.....	87
5.1 激光控制土地精细平整原理与方法.....	87
5.1.1 平地原理.....	87
5.1.2 激光发射器的光学原理.....	87
5.1.3 激光接收器的光学原理.....	89
5.1.4 液压系统原理.....	94
5.1.5 平地作业方法.....	95
5.2 激光控制土地精细平整设备.....	97
5.3 国产激光控制土地精细平整设备产业化开发.....	104
5.3.1 国产激光发射器.....	104
5.3.2 国产激光接收器.....	105
5.3.3 国产激光控制器.....	109
5.3.4 国产液压系统.....	112
5.3.5 国产平地铲.....	115
5.4 结论.....	119
第6章 农田土地精细平整工程设计与施工.....	121
6.1 农田土地平整状况评估方法.....	121
6.1.1 田块地形数理统计评估.....	121
6.1.2 概率统计分析.....	122

6.1.3	地形图绘制与地形属性评估	123
6.1.4	Kriging 插值算法	126
6.1.5	反距离 (IDP) 加权插值算法	128
6.1.6	不规则三角网 (TIN) 插值算法	129
6.2	土地精细平整工程设计原则与方法	129
6.2.1	设计原则	129
6.2.2	设计方法	130
6.3	土地精细平整工程机械施工方案选择	136
6.3.1	传统土地平整土方调配算法	136
6.3.2	土地精细平整施工方案理论算法	137
6.3.3	土地精细平整施工方案经验算法	139
6.4	农田土地精细平整辅助决策支持系统开发	141
6.4.1	系统框架构建	141
6.4.2	人工交互界面	145
6.4.3	农田土地平整辅助决策支持系统应用	146
6.5	农田土地精细平整工程施工	158
6.5.1	施工机械选择	158
6.5.2	土地平整施工作业	159
6.6	农田土地精细平整工程评估	160
6.6.1	土地平整与改善度评估	160
6.6.2	成本费用与施工效率评估	162
第7章	激光控制土地精细平整技术应用	164
7.1	激光控制平地技术在国内的应用发展过程	164
7.2	激光控制土地精细平整技术规模化应用效果评价——山东	166
7.2.1	应用状况	166
7.2.2	土地精平效果分析	168
7.2.3	土地精平作业效率分析	169
7.2.4	土地精平经济性能分析	170
7.3	激光控制土地精细平整技术示范应用效果评价——新疆兵团	171
7.3.1	示范区基本状况	171
7.3.2	示范区土地平整作业	176
7.3.3	示范区土地精平效果分析	177
7.3.4	示范区土地精平作业效率分析	178
7.3.5	示范区激光控制平地技术经济性能分析	179
7.4	激光控制平地节水技术优势分析	184
7.4.1	田间灌溉技术形式及节水效果	184
7.4.2	不同节水灌溉技术形式的投入分析	185
7.4.3	激光控制平地技术应用模式	185

第 1 章 农田微地形及其测量技术

在农田土地平整工程的设计和评价、地面灌溉系统设计及管理评价中,均需要首先获取田面高程数据,以便确定合理的平地工程和灌溉工程设计方案,对平地效果和灌溉效果进行定量评价。对田面高程的测量,以往通常采用人工操作水准仪的方法,该方法具有测量准确、设备易于操作且相对便宜的优点,但耗时费工、工作效率低下,在实施大规模土地平整作业时已成为制约现代土地平整高新技术应用的瓶颈。近年来,一些新的测量技术与仪器已在国内外农田土地平整作业中得到初步应用(Clark 和 Lee, 1998; 岳建平和岳东杰, 1999; 李益农等, 2005)。其中借助 GPS 技术与设备可自动、快速、准确地获得田间任意位置处的平面坐标和地面高程,既可利用 GPS 进行人工定点测量,也可将 GPS 安装在车辆顶部进行车载移动测量。与人工水准测量方法相比, GPS 技术具有测量地面高程速度快和测量工作效率高的突出特点,有利于加快激光控制平地作业进程,为高效率、大规模地实施激光控制平地技术提供重要的支撑条件。

本章在介绍农田微地形评价指标的基础上,重点介绍田面高程水准仪测量方法和 GPS 测量方法,对比分析两种测量技术的观测结果,讨论了小尺度田块条件下土地平整施工时适宜的高程测量网格间距的确定问题。

1.1 农田微地形定义及评价指标

相对于田块设计坡面的地形起伏状态被称为田面微地形,由农田表面各节点相对高程组成。通常采用田面相对高程的标准偏差值 S_d 作为量化田面微地形状况的主要指标(Pereira 等, 1996; 许迪等, 2002)。图 1.1 给出了不同 S_d 下微地形空间分布状况。

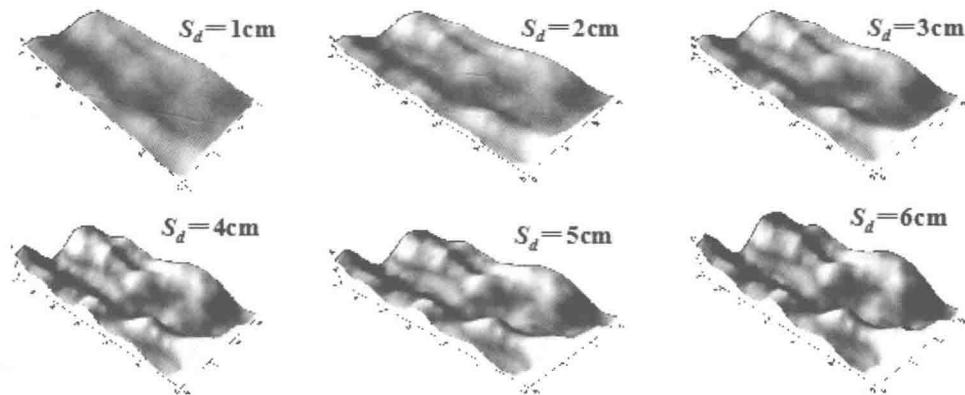


图 1.1 不同标准偏差值 S_d 下田面微地形起伏状况

相对于田块设计坡面的高程值被称为田面相对高程 Z_i ，田面各点的相对高程由式 (1.1) 计算：

$$Z_i = H_i - \overline{H_i} \quad (1.1)$$

式中： H_i 为田块内第 i 个测点的高程，cm； $\overline{H_i}$ 为设计坡面上相应测点的期望高程，cm。

通常采用田面相对高程的标准偏差值来定量评价微地形起伏状况，实际工程应用中又称为田面平整精度 S_d ：

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})^2}{n-1}} \quad (1.2)$$

式中： $\bar{Z}$ 为田面相对高程的平均值，cm； n 为测点数目。常规机械平地方法和激光控制平地技术能达到的最小天面平整精度 S_d 值，在美国分别为 2~2.5cm 和小于 1.2cm，葡萄牙则是 3~4cm 和小于 1.7cm。

田面相对高程的标准偏差值反映了田间地面平整度的总体状况。为确切地反映地面平整程度的分布状况，还可计算田块内所有测点高程与期望高程的绝对差值 ED_i ，根据小于某一绝对差值的测点累积百分比数评价田间地面形状的差异及其分布的特征。 ED_i 定义为：

$$ED_i = |H_i - \overline{H_i}| \quad (1.3)$$

美国土地利用局的标准为：采用激光控制技术进行平地后，田块内地面高程绝对差值 ED_i 小于 1.5cm 的测点累积百分数应在 80% 以上。

1.2 农田微地形测量技术

获取田块地形信息是实施农田土地平整工程的基础。没有准确的地形数据，就无法准确地反映田块实际情况，不能准确地进行土地平整方案设计计算。因此，田块地形测量是非常重要的工作环节。目前，地形测量主要有两类方法：一是水准测量，按自定义坐标系统，建立田块测点水平坐标，利用测量仪器人工进行测量，经过计算获得测点相对标准点的高程，从而得到田块地形的三维数据资料；二是利用全球定位系统（GPS）的实时测量（RTK）技术进行实时测量，直接获得测点三维坐标，经处理后得到田块地形数据。

1.2.1 农田微地形水准测量技术

水准测量的原理是借助水准仪提供的水平视线，配合水准尺测定地面上两点间的高差，然后根据已知点的高程来推求未知点的高程。

其测量原理如图 1.2 所示，已知 A 点高程为 H_A ，要测出 B 点高程 H_B ，在 A 、 B 两点间安置一台水准仪，并在 A 、 B 两点竖立水准尺，分别读出水准尺的读数 a 、 b ，则 A 、 B 两点间的高差为：

$$H_{AB}=a-b$$

(1.4)

如果测量是由 $A \rightarrow B$ 的方向前进, 则 A 点称为后视点, B 点称为前视点, a 及 b 分别为后视读数 and 前视读数, 两点间的高差就等于后视读数减去前视读数。如果 B 点高于 A 点, 则高差为正, 反之, 高差为负。

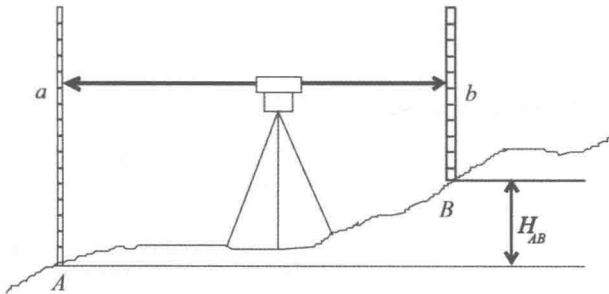


图 1.2 水准仪地形测量示意图

未知测点高程通过已知点与未知点高差计算确定, 例如: B 点 (未知点) 的高程等于 A 点 (已知点) 的高程加上两点间的高差, 即:

$$H_B=H_A+H_{AB}=H_A+(a-b)$$

(1.5)

常用水准仪按结构可分微倾水准仪、激光水准仪和数字水准仪 (又称“电子水准仪”) 等几种形式。微倾水准仪是借助螺旋获得水平视线, 望远镜与管水准器结成一体, 管水准器分划值小、灵敏度高; 激光水准仪利用激光束代替人工读数, 将激光器发出的激光束导入望远镜筒内使其沿视轴方向射出水平激光束, 而在水准标尺上配备能自动跟踪的光电接收靶, 即可进行水准测量; 数字水准仪是集光、机、电、计算机和图像处理等高新技术为一体的测量仪器。

目前使用比较普遍的是加装了自动安平补偿器的微倾水准仪, 称之为自动安平水准仪。它可以在重力作用下对望远镜做相对移动, 从而快速获得水平视线; 即: 在调整水准仪基座水平后, 不必进行管水准器的调平就可直接进行测量读数 (图 1.3 北测 DSZC24 水准仪和标准水准尺), 它易学、易用、成本低廉。测量时, 选定适宜的地点, 将水准仪安装固定在三脚架上, 利用 3 个机座螺丝使水平气泡居中 (基座水平) 后, 然后就可将望远镜对准测点上的塔尺, 读出塔尺读数并填写记录表, 以备室内进行高程数据计算。田块地形记录表格式见表 1.1。

表 1.1 田块地形测量记录表

仪器型号		观测者		记录者		测量单位		测量日期	
田块名称	测点编号	测点坐标		水准尺读数		高差 后视—前视	测点 高程		备注
		横坐标	纵坐标	后视	前视				
	1								
	2								
	3								
	4								
	5								

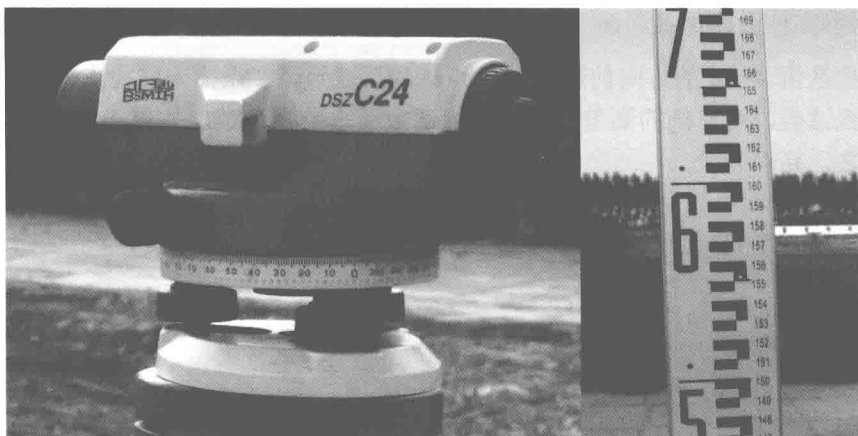


图 1.3 自动安平水准仪与水准尺

利用水准仪进行田块地形测量时，首先按一定规则将田块划分为多个网格，根据田块规格设定测量网格大小，通常测量网格为边长 5m、10m、20m 或 40m 的正方形或矩形，每个网格节点则为地形测量点；然后选定田块边界或形状变化的拐点以及地形突变的点作为特殊控制点（沈秀英等，1990），测量人员利用水准仪对网格测点和特殊控制点进行测量；最后将获得的高程值与测点横纵双向坐标构成三维数据，对田块地形起伏变化趋势进行描述。人工水准测量得到的地形数据资料是相对孤立的，与田块范围以外的大区域地形无任何联系，不能参与整体区域的地形描述分析。

土地精细平整工程对地形精度要求较高，测点密度相应较大，否则地形精度无法满足土地精细平整施工设计需求，利用水准测量田面地形时应遵照以下步骤。

1. 布置测点

在测点处插上标杆或木桩等。测点的布置依据田块规格来定，沿田块长度方向，若田长小于 100m，测点间距不宜大于 5m，若田长大于 100m，测点间距不宜大于 10m；沿畦田宽度方向，测点间距不宜大于 5m，而且最少应布置 3 条测线。

2. 水准仪安装调平

根据田块规格选择适宜的安放位置对水准仪进行安置。水准仪的具体安装要求应遵照说明书。水准仪安装完毕后，应保证水准仪上的水平气泡居中，水准仪安放高度应适中，保证观测者观测时两眼能平视观测镜。

3. 测量

人工将水准尺立在观测点上，尺子应竖直，不宜倾斜。观测者在标尺竖直、水准仪气泡居中、方向正确的前提下读取中横丝截取的尺面数字。读数前应判断水准尺的注记、分划特征和零点常数。读数时以“dm”注记为参照点，先读出注记的“m”数和“dm”数（如 1.3m），再读出“cm”数，最后估读不足 1cm 的“mm”数，综合起来即为 4 位的全读数（如 1.323m）。读数时一律从小向大的方向读数，读足 4 位，不要漏 0（如 1.302m）。另外，精平后应马上读

数，速度要快，以减少气泡移动引起读数误差。

4. 移站

对于规格较大的田块，如果一个测站不能观测到整个田块的田面高程，需移动水准仪位置。首先大致估计应设定几个测站，一个测站的覆盖范围观测完后，需移动到下一个测站；移动前需要选定转置点，然后在搬站前后分别测定该转置点的高程，以便数据处理时把不同测站下的观测值转换为相对于同一基准点的高程。

水准地形测量的优势在于设备成本低，测量技术易于掌握，工作环境要求宽松，只要视线不被遮挡，就可进行测量。它的缺点在于测点定位准确性差，工作效率低、强度大。在实际测量工作中，测点间距的大小直接影响测量工作量，进而影响对地形描述的准确程度。如果测点间距大，测点相对较少，那么测量工作进度快，但地形数据资料少，地形描述粗糙，不能准确地反映地形变化分布；如果测点间距小，虽能准确地反映地形状况，但是测点多，测量工作量大，进度缓慢，而且室内资料处理分析的工作量也极其繁重，将严重地影响地形测量的工作效率，利用水准仪密集布置测点进行地形测量难度较大。

1.2.2 农田微地形全球定位 (GPS)系统测量技术

随着科学技术的发展，全球定位系统 (GPS) 技术的不断成熟，其三维定位技术已在各领域得到广泛应用。目前，世界上全球定位系统主要有美国的 GPS 系统、俄罗斯的 GLONASS 系统、欧盟的 GALILEO (伽利略) 系统和中国的北斗系统 (COMPASS)。其中，美国的 GPS 系统发展最为成熟、应用最为广泛。

GPS 测量系统主要由 GPS 接收机、卫星接收天线、手薄 (含主机设置、数据采集、数据转换、传输等软件和存储卡)、无线电台、电台天线、三角支架及连接电缆等设备组成 (图 1.4)。

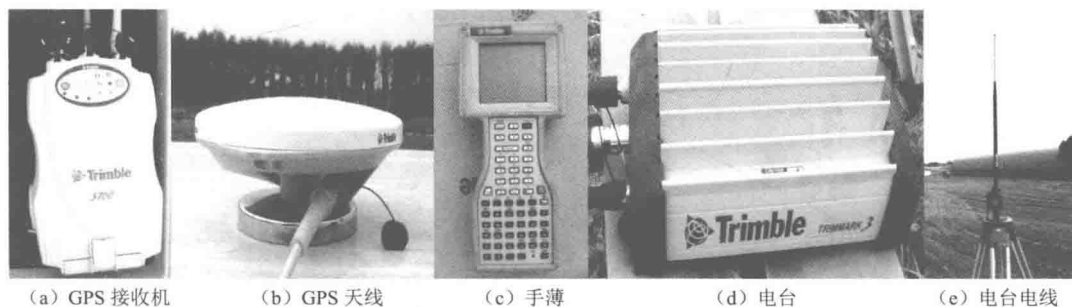


图 1.4 美国 Trimble 公司生产的 GPS 测量设备 (5700)

借助 GPS 的实时定位 (RTK) 测量技术可快速获取农田地形数据资料，差分计算方法又可提高 GPS 系统的测量精度，因此，GPS 实时定位 (RTK) 技术和差分计算方法联合使用可实现田块地形的快速、准确测量。差分计算方法是通过 GPS 基准站与流动站之间信息交流，流动站所测地形数据与基准站地形数据进行差分计算，一台基准站可以同时与多台流动站进行信息交换，即在基准站信号的有效覆盖区域内，可以有多台流动站同时进行三维地形测量工作。由于测量效率较高，一般情况下一台基准站只配一台流动站 (图 1.5) 就可满足田块地形测量

的工作需求。为了增加基准站无线信号的有效覆盖范围，基准站一般不使用 GPS 接收机自带的内置电台，而是为其配备独立的无线电台。由于基准站的手薄只是在安装设置时使用，在测量过程中只有流动站需要使用手薄，因此，基准站和流动站可以共用一个手薄。

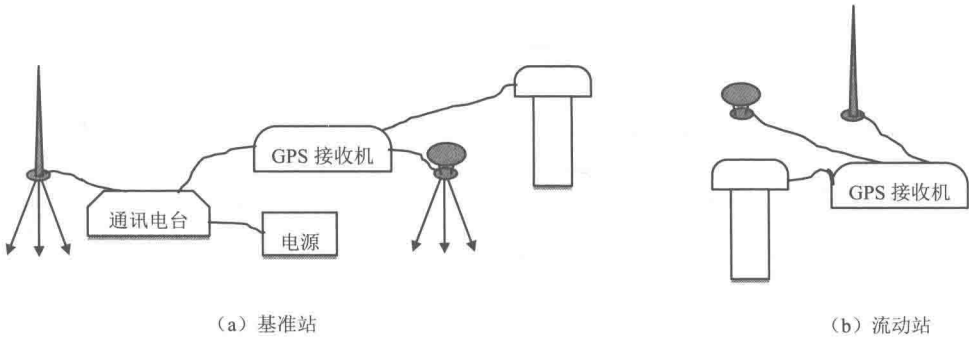


图 1.5 差分 GPS 测量系统构成示意图

对田块地形进行测量时，可以由测量人员身背流动站，手持 GPS 天线在田内行走进行定点测量[图 1.6(a)]。若将 GPS 流动站安装在测量车上，使用手薄设置测量方式后，测量车可在田块内以一定的规则轨迹行驶，在行驶过程 GPS 流动站就可按设定的测量方式（时间间隔或距离间隔）进行不间断的测量[图 1.6(b)]，获取三维地形数据。因此，采用 GPS 系统实时差分测量技术不仅可以大幅度地提高地形测量的工作效率，而且可以保证测量精度，还可以通过增加测点密度更加准确地掌握田块地形。

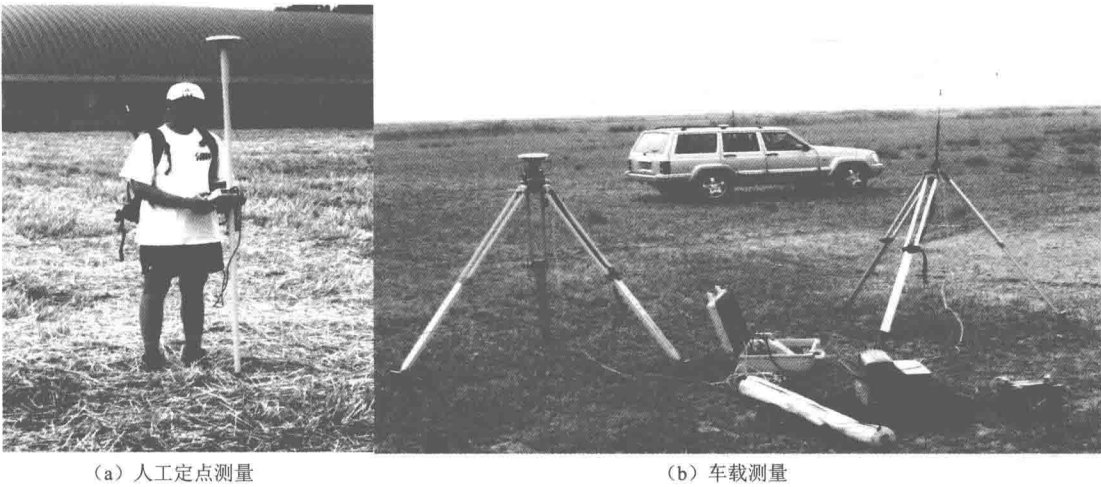


图 1.6 差分 GPS 测量系统田间应用

利用 GPS 系统对田块地形进行实时差分测量应遵守以下步骤:

1. 建立基准站

将 GPS 天线安装在三角架上, 将其与标准点垂直相对, 标准点一般为标准水准点或自定义的固定点, 以便日后重复测量, 使多次测量的地形数据具有可比性和一致性。将 GPS 接收机、无线电台、电台天线等设备正确安装、连接, 利用手簿设置基准站参数, 主要是 GPS 天线标高, 电台型号、频率等, 使其能够与流动站进行正常通信, 最后断开 GPS 接收机与手簿的连接。

2. 建立流动站

根据测量方式(人工、车载)建立流动站, 人工测量时将接收站放入特制背包中, 电台天线固定在背包上并将线缆与接收机相连, GPS 天线固定在测量杆顶端, 线缆与接收机相连, 将手簿与接收机连接后固定在测量杆上。车载测量则将 GPS 流动站设备和数据采集器置于搭载的车辆内, 利用磁性吸盘将卫星接收天线和电台天线固定在车辆顶部, 测量 GPS 天线离地面高度; 连接 GPS 接收机与 GPS 天线、电台天线和手簿。利用手簿设置 GPS 接收机相关参数和测量规则(手持定点、车载时间间隔/距离间隔)。检查手簿内置存储卡, 使其容量能够满足数据存储需求。

3. 地形测量

可采取手持定点或车载两种方式进行地形测量。定点测量是由人工背负 GPS 流动站设备, 手持装有卫星信号接收天线和数据采集器的测量杆在各测点进行高程测量, 同时将测量数据存储在手簿中。车载测量则驾驶测量车在田间往复行驶, 跑遍田内所有区域。车辆行进过程中, GPS 系统将按照设置的测量模式(一般采用距离间隔)进行地形自动测量并将所测得的地形数据自动存储在手簿中。车载测量时应根据地面起伏情形, 选择适宜的测量车行驶速度。如果过快, 测量车颠簸起伏太大, 将影响地形测量精度。而车速过慢将影响测量的工作效率, 根据田面起伏状况, 一般在 5~30km/h 范围内行驶。由于基准站和流动站是通过无线电信号进行信息交流, 所以流动站只能在无线电信号的有效覆盖范围内才能正常进行工作。

4. 数据处理

测量结束后, 利用手簿内部数据传输软件, 根据需求的文件格式将存储卡中地形数据传输到电脑中。由于 GPS 系统采用的是全球地理坐标系, 获得的测点定位坐标与田块走向并不一致, 直接利用所得资料进行田块平整方案设计将增加数据计算的复杂程度和计算的工作量。因此, 为了化繁为简, 更方便、更准确地计算田块坡度和挖、填土方量, 优化设计平整方案前, 需先对 GPS 测量的地形数据进行坐标转换, 将地理坐标转换为数学坐标, 并旋转坐标轴使田块数学坐标系的横、纵轴与田块走向一致(图 1.7), 将测点坐标最小值归零处理。坐标转换公式如下:

角度转换(角度转化为弧度):

$$\theta = \alpha\pi / 180 \quad (1.6)$$

式中： α 为角度； θ 为弧度。

坐标旋转：

$$x' = (x - x_{\min}) \cos \theta + (y - y_{\min}) \sin \theta \quad (1.7)$$

$$y' = (y - y_{\min}) \cos \theta - (x - x_{\min}) \sin \theta \quad (1.8)$$

式中： (x, y) 为实测点坐标； (x', y') 为旋转后测点新坐标； $x_{\min}$ 、 $y_{\min}$ 为测点系列坐标最小值。

流动站测量的高程数据是以基准站高程为参照标准进行差分计算得到的相对于基准站的高程，不需要进行预期处理。

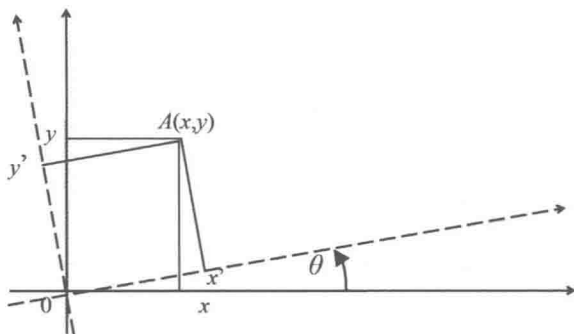


图 1.7 测点坐标转换 $A(x, y)$ $A' (x', y')$

GPS 系统地形测量的优点是效率高，测点多，分布密度大，可如实地反映地形状况，测量数据可直接导入计算机，避免了人工输入可能带来的数据错误。所测数据均可采用标准的全球地理坐标系统，所有原始资料可整合使用，构成大面积区域性地形资料，用于描述区域地形分布状态。

1.2.3 水准仪与 GPS 测量结果对比分析

与人工水准测量方法相比，GPS 技术具有测量地面高程速度快和测量工作效率高的突出特点，有利于加快激光控制平地作业进程，为高效率、大规模地实施激光控制平地技术提供重要的支撑条件。为此，根据平地前测量的田面高程数据和据此计算得到的平地土方量，对三维 GPS 测量设备的田间应用效果进行评价。利用统计方法对定点 GPS 与水准仪获得的地面高程数据进行对比，探讨行进速度对车载 GPS 地形测量精度的影响，分析采用 GPS 测量技术替代人工水准仪测量方法的可行性。在宽度为 60m、长度分别为 95m 和 82.5m 的两个田块上，同时采用定点 GPS、车载移动 GPS 和定点水准仪 3 种方式对地面高程进行测量。定点测量时，测点间距为 2.5m×2.5m，共计 1778 个测点。在各测点处，分别采用水准仪和 GPS 设备同步逐点测量地面高程。水准仪测量见图 1.8，车载移动和定点 GPS 测量见图 1.9。为了评价车载行进速度对 GPS 测量精度的影响，分别在 30km/h 和 15km/h 两种车载速度下测定田面高程数据，车载移动 GPS 测量中的测点间距为 5m，相应于两种车速的高程测点，数量分别为 1574 个和 1546 个。