

# 基于 GNSS 的农田快速平整系统设计与试验

康熙<sup>1</sup> 李笑<sup>2</sup> 夏友祥<sup>2</sup> 刘刚<sup>1,2</sup>

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;  
2. 中国农业大学农业部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 针对当前全球导航卫星系统(GNSS)农田土地平整过程中,操作复杂,地形测量费时费力的问题,设计了基于GNSS的农田快速平整系统。该系统可实现快速农田基准设计,农田水平平整,农田坡面平整等功能。农田坡度设计算法在前期系统算法基础上进行了优化,提出适用于快速平整系统的坡面平整算法,坡面平整后可以达到灌溉时水流速度快、水量覆盖均匀,减少挖填土方量、提高平整速度的目的。平整试验结果表明,水平面平整后最大高程差从18.9 cm降到8.1 cm,高程标准差从11.2 cm降到5.5 cm,平地误差小于5 cm的测点累积百分比从75.693%上升到90.674%;坡面平整后,农田实际坡度与设计坡度基本一致,平整速度快,平整效果良好。

**关键词:** 农田快速平整; 全球导航卫星系统; 基准面设计

**中图分类号:** S24;S281      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2016)S0-0013-08

## Design of Fast Land Leveling System Based on GNSS

Kang Xi<sup>1</sup> Li Xiao<sup>2</sup> Xia Youxiang<sup>2</sup> Liu Gang<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory for Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China  
2. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** GNSS-controlled land leveling system is complicated to operate and farmland measuring is time-consuming, in order to solve these problems, this paper aimed at developing a fast GNSS-controlled land leveling system. The system including the core processing platform, GNSS signal receiving device and hydraulic. The system can achieve the fast farmland reference design, graphic land leveling, slope land leveling; the farmland reference design meant real-time correction calculation of the reference plane prior operation and in operation without farmland measuring, which increased the accuracy; the algorithm of slope land design was optimized based on the early stage of the system algorithm, and the slope land leveling algorithm applied to the fast GNSS-controlled land leveling system was proposed. Since this system can work without farmland measuring, it can be applied to the paddy field leveling which couldn't be measured. After slope leveling, it can achieve the fast irrigation water and the uniform water coverage, reduce the amount of cutting and filling soil as well as improve the leveling speed. Long-term experiment was done to test the system and results showed that after the graphic leveling, the maximum elevation difference was decreased from 18.9 cm to 8.1 cm, elevation standard deviation was decreased from 11.2 cm to 5.5 cm, the average land leveling measuring point error was less than 5 cm, and the cumulative percentage rose from 75.693% to 90.674%. After slope leveling, the actual farmland slope was similar to the designed slope, leveling speed was fast and leveling effect was good.

**Key words:** fast land leveling system; GNSS; farmland reference design

收稿日期: 2016-07-20    修回日期: 2016-08-22  
基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201203059)  
作者简介: 康熙(1992—),男,硕士生,主要从事控制工程与控制系统在农业应用研究, E-mail: 371687626@qq.com  
通信作者: 刘刚(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事精细农业及其支持技术研究, E-mail: pac@cau.edu.cn

## 引言

土地平整可以使田块满足灌溉要求,对合理灌溉、节约用水、改善土壤质量、保持土壤肥料、提高劳动生产率等起到重要的作用<sup>[1-3]</sup>。

全球导航卫星系统(GNSS)控制平地技术是在国内外最先进的土地平整技术,已经在美国等发达国家得到了应用;GNSS平地技术是通过GNSS差分定位获取农田地势三维数据,通过计算机处理和设计最佳平整面,根据农田地势的实际高程与设计高程的落差自动精准控制铲车的升降从而实现土地平整<sup>[4-5]</sup>。相较于其他平地技术,GNSS控制平地技术适用于各种地形,具有不受阳光、风力、地势起伏等外界因素影响的优点,可以非常便捷地进行地形测量、设计基准面和土地平整,智能化和自动化程度较高,并且可扩展功能多,有着非常好的工作效率与发展前景<sup>[6-7]</sup>。

前期研究的GNSS农田平整集成系统已具有相对完善的功能,适用于大部分农田平整的要求,具有较好的土地平整效果。但是,GNSS农田平整集成系统仍存在一定不足:①GNSS农田平整规划系统操作相对复杂,功能上的完善从另一方面导致在平整前期需要进行过多的参数设置,对于需要进行快速平整的农田,在操作上需要耗费大量时间。②地形测量等功能会在一定程度压实待平整的农田,反而增加了农田平整的负载。③在旱田平整作业中,地形测量功能具有指导平整作业的效果,但是在水田的平整作业中,由于水田作业的特殊性,为防止水田平整前出现车辙过深的情况,水田平整作业前不适宜进行地形测量的操作,GNSS农田平整集成系统过多的操作反而对水田的平整效果造成影响。

针对上述的问题,本文在前期研究的基础上,开展GNSS农田快速平整系统研究,进行Android系统下的GNSS农田快速平整系统开发,可作为独立的GNSS农田快速平整系统,以便于推广应用。

## 1 系统设计

为了实现基本平地作业,并且简化系统操作,GNSS农田快速平整系统应具有基本的平整功能,尽量减少其他附属功能。根据实际工作情况,提出系统的设计方案,在方法、硬件及软件方面进行改进设计。系统组成及系统总体框架如图1、2所示。

GNSS农田快速平整系统硬件包括GNSS接收设备、核心处理平台和液压控制模块3部分。软件由2部分功能组成:平面平整功能与坡面平整功能,并伴有使用帮助、系统配置等功能作为补充。其中

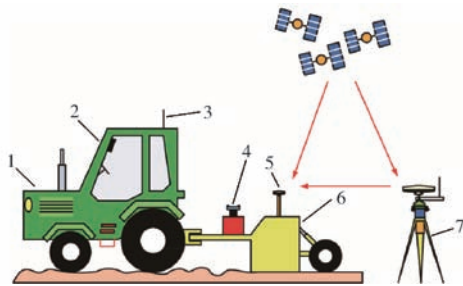


图1 系统组成

Fig. 1 System components

1. 拖拉机
2. 集成控制终端
3. 移动站电台天线
4. 液压系统
5. 移动站卫星天线
6. 平地铲
7. 基站

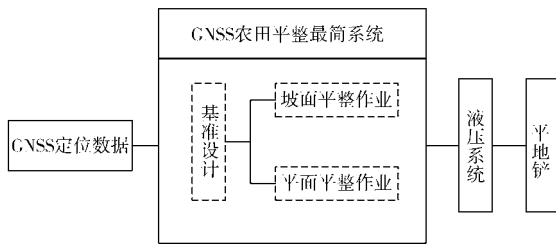


图2 GNSS农田快速平整系统原理框图

Fig. 2 Block diagram of fast GNSS-controlled land leveling system

平面平整与坡面平整各包含基准面设计与平整作业两部分内容;实现了系统操作的简便性与实用性。

对前期研究的GNSS农田平整集成系统中的基准设置进行重新设计,提出一种不需要地形测量的快速生成基准面方法,并为适用于农田出水口位置,提出一种基于GNSS的土地坡面平整方法,通过基准面的设计可以进行农田任意坡度坡面的平整作业,实现平面与坡面平整功能,使系统更加完善。

### 1.1 硬件设计

在前期研究的基础上,进行了Android系统下的GNSS农田快速平整系统的研究;基于Android系统的GNSS农田快速平整系统是由GNSS接收设备、核心处理平台、液压控制模块及平地铲构成,如图3所示。

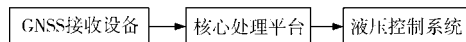


图3 硬件设计框图

Fig. 3 Hardware design block diagram

GNSS农田快速平整系统中,核心处理平台的主要功能是通过串口接收GNSS设备发送的GNSS差分定位信号,通过系统的分析与计算,再通过串口输出控制信号给液压控制系统,完成平整作业。本文设计的核心处理平台主要包括:串口通信电路、核心板与电源转换电路等,如图4所示。

选择广州友善之臂公司生产的Tiny6410作为核心板,Tiny6410是一款以ARM11芯片(三星S3C6410)作为主处理器的嵌入式核心板,该CPU基

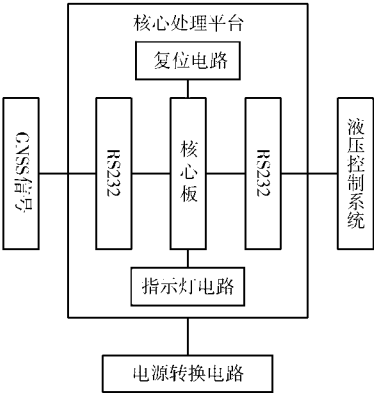


图4 核心处理平台  
Fig.4 Core processing platform

于 ARM1176JZF-S 核设计,内部集成了强大的多媒体处理单元,方便开发者进行二次开发使用。图5为开发板实体图。

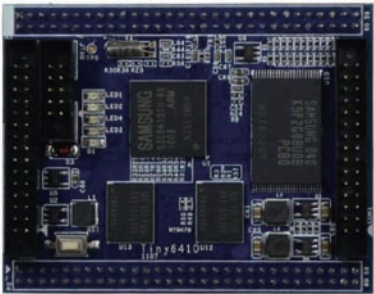


图5 核心板  
Fig.5 Core board

1.2 方法设计

1.2.1 基准面生成方法

在土地平整前期,无论平面平整作业还是坡面平整作业,均需要生成基准面;基准设计功能包括标定参考点、坡度设计和基准方程计算3部分,如图6所示。

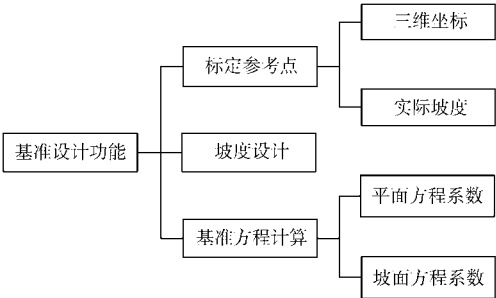


图6 基准设计功能设计框图

Fig.6 Schematic of reference design model

(1)平面基准设计

本文设计的平面基准是采用多点均值方法。在平整前,将拖拉机停放在待平整农田中心位置,开始记录测点高程,同时任意驾驶拖拉机,行驶30s,完成数据采集;将采集到的数据进行均值计算,得到平整基准高程。公式为

$$Z_D = \frac{\sum Z_n}{n} \tag{1}$$

式中  $Z_D$ ——均值高程  
 $Z_n$ ——各点高程  
 $n$ ——记录点个数

(2)坡面基准方程设计

基准设计功能主要包括:①标定参考点:用户自主根据出水口位置,判断坡面数量  $P(P \leq 4)$ ,以出水口为原点,平行于农田边界方向为坐标轴建立平面直角坐标系,在坐标轴上选定  $P$  个位置作为参考点,则原点与参考点连接线方向为坡向。②坡度设计:选定坡向后,根据水流灌溉方向确定坡向类型,平行于水流灌溉的坡向为灌溉坡向,灌溉坡向的坡度需根据土壤类型自主设定<sup>[8-9]</sup>,保证灌溉时,水流速度快,水量分布均匀。垂直于水流灌溉方向的坡向为平整坡向,平整坡向的坡度以测量值为基准自动生成,保持原有土地坡度,减少挖填土方量,加快作业效率。③基准方程计算:根据设计坡度和测量坡度,计算基准面方程,可以实现平面设计和坡面设计。

为了保证灌溉水流均匀推进,通常设计田面坡度为顺水流方向<sup>[10-12]</sup>,由于灌溉出水口在农田中的位置不统一,需要设定以出水口为原点的至多四向坡度,本研究设计的基准方程是利用标定的原点和参考点  $A、B、C、D$ ,通过几何学空间向量法建立的。在农田出水处位置选择一个主基准点,即坐标原点  $O$ ;根据出水位置判断坡面数量,并在坡向位置选取一个点作为次基准点,次基准点根据灌溉方向分为灌溉基准点和平整基准点,如图7所示,通过设置的灌溉坡度与测量的平整坡度生成基准坡面设计方程,达到实现二维方向任意坡度坡面设计的效果。

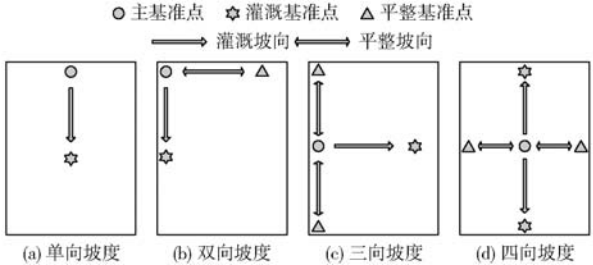


图7 坡面设计示意图

Fig.7 Schematic of slope design

如图8所示,设标定后原点  $O$  坐标为  $(0,0,Z'_0)$ ,参考点  $A$  相对原点坐标为  $(X'_A,Y'_A,Z'_A)$ ,参考点  $B$  相对原点坐标为  $(X'_B,Y'_B,Z'_B)$ ,参考点  $C$  相对原点坐标为  $(X'_C,Y'_C,Z'_C)$ ,参考点  $D$  相对原点坐标为  $(X'_D,Y'_D,Z'_D)$ ,则

$$L_{OA} = \sqrt{X'^2_A + Y'^2_A} \tag{2}$$

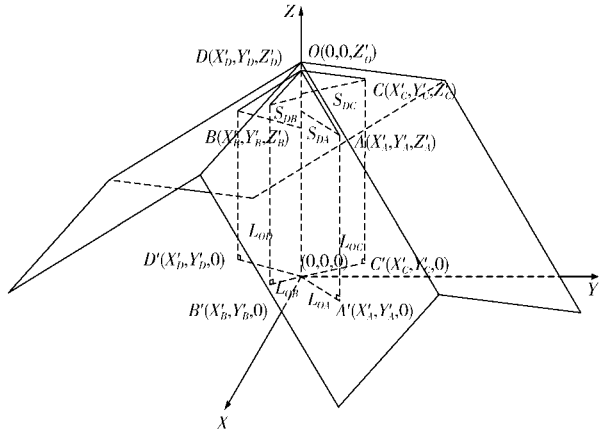


图 8 基准设计模型示意图

Fig. 8 Schematic of reference design model

$$S_A = \frac{Z'_A - Z'_0}{L_{OA}} \quad (3)$$

$$L_{OB} = \sqrt{X'^2_B + Y'^2_B} \quad (4)$$

$$S_B = \frac{Z'_B - Z'_0}{L_{OB}} \quad (5)$$

$$L_{OC} = \sqrt{X'^2_C + Y'^2_C} \quad (6)$$

$$S_C = \frac{Z'_C - Z'_0}{L_{OC}} \quad (7)$$

$$L_{OD} = \sqrt{X'^2_D + Y'^2_D} \quad (8)$$

$$S_D = \frac{Z'_D - Z'_0}{L_{OD}} \quad (9)$$

式中  $L_{OA}$ —— $OA$  的水平距离, m  
 $S_A$ —— $OA$  的实际坡度, %  
 $L_{OB}$ —— $OB$  的水平距离, m  
 $S_B$ —— $OB$  的实际坡度, %  
 $L_{OC}$ —— $OC$  的水平距离, m  
 $S_C$ —— $OC$  的实际坡度, %  
 $L_{OD}$ —— $OD$  的水平距离, m  
 $S_D$ —— $OD$  的实际坡度, %

设坡面基准方程为  $f: z = ax + by + c$ , 则原点与 2 个相邻参考点可确定一个坡面, 以参考点  $A$ 、 $B$  为例,  $OA$  设计坡度为  $S_{DA}$ , 农田平整前旋耕深度  $H_{RD}$ , 基准高度  $H_B$ , 则:

(1) 如果  $S_{DA} = 0$  且  $S_{DB} = 0$ , 即为平面方程, 则方程系数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为

$$\begin{cases} a = 0 \\ b = 0 \\ c = H_B + \frac{1}{2}H_{RD} \end{cases} \quad (10)$$

(2) 如果  $S_{DA} \neq 0$  或  $S_{DB} \neq 0$ , 即为坡面方程, 根据坡度的定义, 可知

$$Z'_{DA} = Z'_0 + L_{OA}S_{DA} \quad (11)$$

$$Z'_{DB} = Z'_0 + L_{OB}S_{DB} \quad (12)$$

式中  $Z'_{DA}$ —— $A$  点设计高度

$Z'_{DB}$ —— $B$  点测量高度

分别将原点  $O$  坐标  $(0, 0, Z'_0)$ 、参考点  $A$  设计坐标  $(X'_A, Y'_A, Z'_{DA})$  和参考点  $B$  实际坐标  $(X'_B, Y'_B, Z'_{DB})$  代入方程, 即可求出方程系数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为

$$\begin{cases} a = -\frac{(Z'_{DB} - Z'_0)Y'_A - (Z'_{DA} - Z'_0)Y'_B}{X'_AY'_B - X'_BY'_A} \\ b = -\frac{(Z'_{DA} - Z'_0)X'_B - (Z'_{DB} - Z'_0)X'_A}{X'_AY'_B - X'_BY'_A} \\ c = Z'_0 + \frac{1}{2}H_{RD} \end{cases} \quad (13)$$

### 1.2.2 平整作业方法研究

平整作业时, 实时获取当前位置坐标与高程信息, 通过与基准方程计算的设计高度进行对比, 根据高程差输出相应的控制命令, 驱动液压系统控制铲刀升降, 达到挖填作业的目的。

设铲刀当前位置相对原点坐标为  $(X'_s, Y'_s, Z'_s)$ , 其中  $Z'_s$  为测量的当前位置的大地高, 当平面平整作业时, 将  $Z'_s$  与设定好的  $Z_D$  差值比较; 若为坡度平整作业时, 基准方程系数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  已经确定, 代入方程中, 可得当前位置设计高程  $Z_D$  为

$$Z_D = aX'_s + bY'_s + c \quad (14)$$

同时, 如图 9 所示, 在平整作业过程中, 可人工实时调整基准高程, 设基准调整高度为  $H_{AD}$ , 则地势落差  $\Delta H$  为

$$\Delta H = Z'_s - Z_D - H_{AD} \quad (15)$$

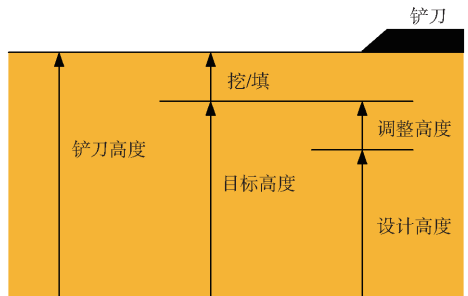


图 9 平整作业高度调整示意图

Fig. 9 Land leveling height adjustment schematic

设定地势落差适中范围为  $\pm 0.015$  m, 若  $-0.015 \text{ m} \leq \Delta H \leq 0.015 \text{ m}$ , 则地势为适中, 铲刀高度保持不变, 无需进行挖填作业; 若  $\Delta H < -0.015 \text{ m}$ , 则地势低, 需要提高铲刀高度, 进行填土作业; 若  $\Delta H > 0.015 \text{ m}$ , 则地势高, 需要降低铲刀高度, 进行挖土作业。

### 1.3 软件设计

为满足降低成本, 快速平整的需求, 简化了原有系统的操作流程, 适用于不必要进行地形测量与区域划分的农田, 是一种效率较高、低成本且携带方便的系统。在方法和功能上在前期基础上有了一定的创新和优化。本文从各个功能模块入手, 对该系统

进行描述。其基本框图如图 10 所示。

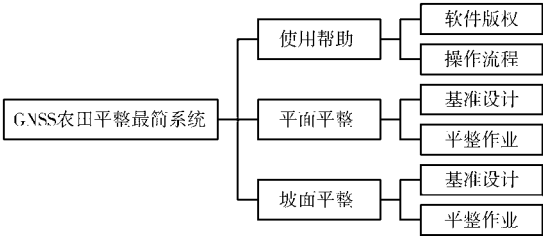


图 10 GNSS 农田快速平整系统设计基本框图

Fig. 10 Block diagram of GNSS-controlled land leveling system design

1.3.1 软件主界面

软件以主界面为核心,可以在主界面选择使用帮助、平面平整作业及坡面平整作业功能,如图 11 所示。



图 11 软件主界面

Fig. 11 Main interface of software

1.3.2 使用帮助

使用帮助主要包括:软件版权、操作步骤等功能。



图 12 使用帮助界面

Fig. 12 Help interface

1.3.3 平面平整作业界面

平面平整作业功能用 2 个界面实现:基准设置界面和土地平整界面。

(1) 基准设计界面

在进行平整作业前,需要先进行基准设计,软件自动读取 GGA 语句,从中提取出经度、纬度、大地高度、卫星数量、HDOP、差分状态等有效信息,并将经纬度进行坐标转换;当软件确定此时卫星状态为差分状态时,开始对农田进行原点标定,原点标定的意义是将高斯坐标转换为农田坐标系,方便工作人员进行方位判断;然后,进行基准标定,此时将拖拉机行驶至待平整农田的中心位置,进行 30 s 的数据读

取,求出平均值作为基准点高程,作为水平平整的基准;完成后进行水平平整作业。如图 13 所示。



图 13 平面平整基准面设计

Fig. 13 Graphic leveling datum plane design

(2) 土地平整界面

实时获取当前位置三维坐标值,通过与平整作业时基准方程计算的设计高度进行对比,根据高度差输出相应控制命令,驱动液压系统控制铲刀升降,达到挖填作业的目的。同时,当平整作业进行一段时间后,如果基准面不符合标准,可重新生成基准。界面如图 14 所示。



图 14 平面平整界面

Fig. 14 Graphic leveling interface

1.3.4 坡面平整作业界面

坡面平整作业功能用 2 个界面实现:基准设置界面和土地平整界面。

(1) 基准设置

坡度基准面生成前也需要先进行原点标定,得到拖拉机任意时刻在农田中的相对位置坐标及高程;进行参考点标定,根据出水口位置,分别在农田中选择  $P$  个参考点,作为坡度方程的必需参数;标定参考点后,进行坡度设置,分别设置标定的参考点与坐标原点之间的坡度值,在农田快速系统中,工作人员根据农田土地情况对农田进行坡度设置;设置完坡度后,开始生成基准面,进入坡面平整界面,如图 15 所示。

(2) 土地平整界面

坡面土地平整界面与平面土地平整界面相似,图 16 为坡面土地平整界面。

2 平地试验与分析

2.1 试验材料与方法

为验证 GNSS 农田快速平整系统的可行性和实



图 15 坡面土地平整基准设计

Fig. 15 Slope leveling datum plane design



图 16 坡面土地平整界面

Fig. 16 Slope leveling interface

用性,在中国农业大学上庄实验站选择 2 块 42 m × 50 m 的农田,分别进行了农田快速系统平面平整和任意坡度坡面平整试验。

试验步骤如下:

(1)平整作业前,采用 GNSS 设备对地势信息进行采集,得到农田平整前地势情况。

(2)进行农田平整试验,采用 GNSS 农田快速系统对 3 块农田分别进行平面平整、任意坡向坡面平整试验。

(3)平整作业完成后,再次采用 GNSS 设备对地势信息进行采集,得到农田平整后地势情况,与平地前进行对比,得出结论。

2.2 平地效果评价方法

评价土地平整效果的指标通常用平整度(农田表面相对高程的标准偏差值  $S_d$  表征)、高差分布列  $E_D$ 、最大高程差  $\Delta h_{\max}$  来衡量<sup>[13]</sup>。

(1)平整度指农田表面起伏程度,是土地平整效果的重要衡量指标。研究中通常用各测点到设计的基准平面垂直距离的标准差  $S_d$  来表征。标准差越小,说明田面起伏越小,即农田越平整。 $S_d$  计算式为

$$S_d = \sqrt{\sum_{i=1}^m (h_i - \bar{h})^2 / (m - 1)} \quad (16)$$

式中  $h_i$ ——田块内第  $i$  个测点的相对高程,cm  
 $\bar{h}$ ——期望相对高程,cm,一般指田块内各测点的平均相对高程,即平地设计高程  
 $m$ ——田块内所有测点的数量

(2)高差分布列  $E_D$  用来评价田间地面形状的差异

及其分布特征,它是通过计算田块内所有测点到拟合平面的垂直距离  $|h_i - \bar{h}|$ ,得到小于某一距离值(如 5 cm)的测点的累积百分数  $\alpha$ ,评价田间地面形状的差异及其分布的特征。

设随机变量  $X$ ,  $X$  表征是否满足  $|h_i - \bar{h}| < 5$  cm,若满足条件,  $X$  的值为 1,反之则为 0。

$$X = \begin{cases} 1 & (|h_i - \bar{h}| < 5 \text{ cm}) \\ 0 & (|h_i - \bar{h}| \geq 5 \text{ cm}) \end{cases} \quad (17)$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^m X_i / m \times 100\% \quad (18)$$

式(18)中  $\alpha$  越大,说明高差分布越均匀,平整效果越好。

(3)最大高程差  $\Delta h_{\max}$  是指各测点的高程中最大值与最小值的差,用以描述农田表面的最大起伏程度,计算式为

$$\Delta h_{\max} = h_{\max} - h_{\min} \quad (19)$$

式中  $h_{\max}$ ——田块内测点高程的最大值

$h_{\min}$ ——测点高程的最小值

通常最大高程差越小,平地效果越好。

2.3 试验结果与分析

2.3.1 平面平整

平面平整试验农田横向坡度设计为 0,纵向坡度为 0,平整时间为 2 h。平整前、后地形图如图 17 所示。平整前、后地势统计数据<sup>[14-15]</sup>见表 1。

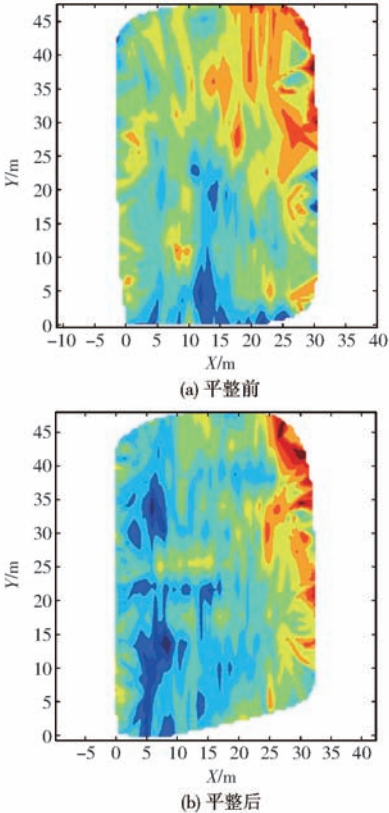


图 17 平面平整前后地形图

Fig. 17 Terrain of plane leveled

表 1 平面平整前后地势数据

| Tab. 1 Terrain data with and without leveling |         |        |         |
|-----------------------------------------------|---------|--------|---------|
| 平整状态                                          | 最大高差/cm | 平整度/cm | 高差分布列/% |
| 平地前                                           | 18.9    | 11.2   | 79.593  |
| 平地后                                           | 8.1     | 5.5    | 90.674  |

从平整前后地形图和地势数据可知:①经过 2 h 的平整,农田最大高程由 18.9 cm 下降到 8.1 cm,平整度由 11.2 cm 提高到 5.5 cm,表明激光控制平地作业后农田平整总体状况较好。②小于 5 cm 高差分布列由 79.593% 上升到 90.674%,表明农田表面平整程度的分布情况均得到了较大的改善。③相较于其他系统,在固定时间内平地效果更加理想。

2.3.2 任意坡向坡面平整

坡面平整试验农田横向坡度设计为 0.1%,纵向坡度为 0.1%,即将原点设计为农田最低点,平整时间为 2 h。平整前后地形图分别如图 18 所示。平整前后地势统计数据见表 2。

从平整前后地形图和地势数据可知:①经过 2 h 的平整,以原点为基准,农田地形横向和纵向分别呈坡度上升趋势,与设计坡向基本一致。②横向坡度由 0.020% 改善为 0.083%,与设计坡度基本相符,纵向坡度与原坡度基本保持不变。③农田最大高程由 20.6 cm 下降到 12.4 cm,平整度由 13.3 cm 提高到 5.4 cm,表明农田表面平整程度的分布情况均得到了较大的改善。④小于 5 cm 高差分布列由 66.845% 上升到 90.543%,表明农田地势分布得到了较大的改善。

3 结论

(1)设计了基于 GNSS 的农田快速平整系统,搭建了系统硬件框架,设计了核心处理平台,提高了系统的集成度,改善了系统的便携性,同时,在 Android 系统下,进行土地平整系统软件设计,完善系统坡度基准生成算法,简化了操作步骤,能够更方便快捷地进行土地平整作业。

(2)提高了作业效率,省去了地形测量等操作,改善了农田在平整前的土壤压实情况,能够实现农田快速平整。

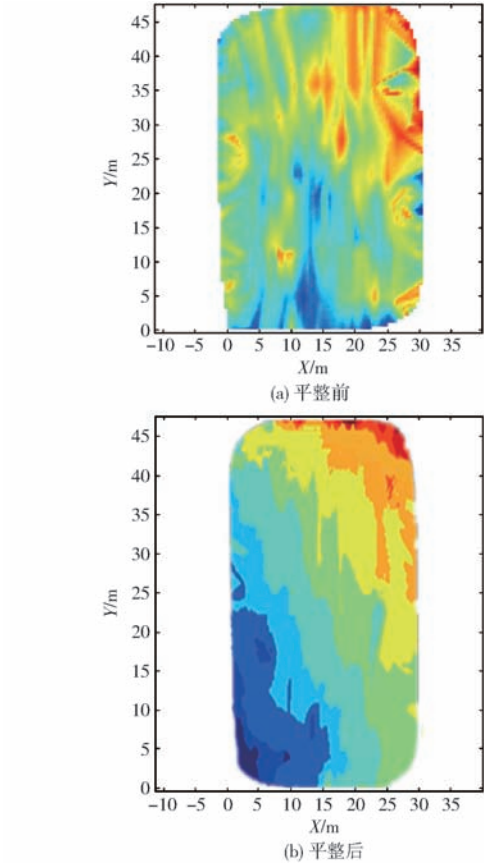


图 18 坡面平整前后地形图

Fig. 18 Terrain of slope leveled

表 2 坡面平整前后地势数据

| Tab. 2 Terrain data slope with and without leveling |        |        |         |        |         |
|-----------------------------------------------------|--------|--------|---------|--------|---------|
| 平地状态                                                | 横向坡度/% | 纵向坡度/% | 最大高差/cm | 平整度/cm | 高差分布列/% |
| 平地前                                                 | 0.020  | 0.036  | 20.6    | 13.3   | 66.845  |
| 平地后                                                 | 0.083  | 0.032  | 12.4    | 5.4    | 90.543  |

(3)设计了农田坡度基准设计方法,从单一坡度平整方法扩展为任意方向坡度平整,满足了任意农田类型的坡度平整需要。

(4)试验证明,该系统平面平整精度较高,平整度在 5 cm 左右;坡面平整后,农田坡度与设计坡度接近,满足平整需求。综合分析表明,系统工作稳定可靠,作业精度可满足土地精细平整与灌溉要求,适合作为精细灌溉和节水设备在我国进行推广应用。

参 考 文 献

1 WALKER W R. Guidelines for designing and evaluating surface irrigation systems [R]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper No. 45,1992.

2 李益农,许迪,李福祥,等. 农田土地激光平整技术应用及初步评价[J]. 农业工程学报,1999,15(2):79-84.  
LI Yinong, XU Di, LI Fuxiang, et al. Application and evaluation of laser-controlled land leveling technology[J]. Transactions of the CSAE,1999,15(2):79-84. (in Chinese)

3 许迪,李益农,李福祥,等. 常规土地平整方法与激光平地技术组合应用分析[J]. 水利学报,1999(10):52-56.  
XU Di, LI Yinong, LI Fuxiang, et al. Study on combination of conventional and laser-controlled land grading procedures[J].

- Journal of Hydraulic Engineering, 1999(10): 52 – 56. (in Chinese)
- 4 AZIZ S A, STEWARD B L, TANG Lie, et al. Multiple GPS measurements for digital elevation model[C] // Proceedings of the 4th World Congress of Computers in Agriculture and Natural Resources, ASABE, 2006: 329 – 334.
  - 5 李益农, 许迪, 李福祥, 等. GPS 在农田土地平整地形测量中应用的初步研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(1): 66 – 70.  
LI Yinong, XU Di, LI Fuxiang, et al. Application of GPS technology in agricultural land leveling survey[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(1): 66 – 70. (in Chinese)
  - 6 王泂, 刘刚, 刘寅, 等. 基于 GPS 的农田坡面平整技术与试验[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(5): 456 – 460.  
WANG Long, LIU Gang, LIU Yin, et al. GPS-based land slope leveling technique and its implementation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(5): 456 – 460. (in Chinese)
  - 7 柯晓山, 张玮, 王荣静, 等. 采用不规则三角网插值进行土地整理项目前期平整土方量的计算[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 243 – 247.  
KE Xiaoshan, ZHANG Wei, WANG Rongjing, et al. Application of triangulated irregular network interpolation to calculation of earthwork in prophase of land consolidation project[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(3): 243 – 247. (in Chinese)
  - 8 刘学军, 龚健雅, 周启鸣, 等. 基于 DEM 坡度坡向算法精度的分析研究[J], 测绘学报, 2004, 33(3): 258 – 263.  
LIU Xuejun, GONG Jianya, ZHOU Qiming, et al. A study of accuracy and algorithms for calculating slope and aspect based on grid digital elevation model (DEM)[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2004, 33(3): 258 – 263. (in Chinese)
  - 9 李天文, 刘学军, 陈正江, 等. 规格网 DEM 坡度坡向算法的比较分析[J], 干旱区地理, 2004, 27(3): 398 – 404.  
LI Tianwen, LIU Xuejun, CHEN Zhengjiang, et al. Study on the accuracy and algorithms for calculating slopes and aspects based on the digital elevation model[J]. Arid Land Geography, 2004, 27(3): 398 – 404. (in Chinese)
  - 10 朱成立, 张展羽, 莫建兵. 农田土地平整设计中几个问题的探讨[J]. 水利水电科技进展, 2003(6): 54 – 56.  
ZHU Chengli, ZHANG Zhanyu, MO Jianbing. Exploration on several problems about farmland leveling design[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2003(6): 54 – 56. (in Chinese)
  - 11 刘学军, 任志峰, 王彦芳, 等. 基于 DEM 的任意方向坡度计算方法[J]. 地域研究与开发, 2009(4): 139 – 141.  
LIU Xuejun, REN Zhifeng, WANG Yanfang, et al. Slope model at arbitrary direction derived from grid-based DEM[J]. Areal Research and Development, 2009(4): 139 – 141. (in Chinese)
  - 12 陈楠, 王钦敏, 汤国安. 自 DEM 由不同算法提取坡度的对比分析[J]. 测绘工程, 2006(1): 6 – 9.  
CHEN Nan, WANG Qinmin, TANG Guoan. A contrast analysis of slopes extracted by different algorithms based on DEM[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2006(1): 6 – 9. (in Chinese)
  - 13 司永胜, 刘刚, 杨政, 等. 激光平地系统的开发与试验[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2009, 30(5): 441 – 445.  
SI Yongsheng, LIU Gang, YANG Zheng, et al. Development and experiment of laser land leveling system[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2009, 30(5): 441 – 445. (in Chinese)
  - 14 贾文涛, 刘峻明, 于丽娜. 基于农田高程信息快速采集系统的平整精度评价方法[J]. 中国土地科学, 2009(5): 65 – 70.  
JIA Wentao, LIU Junming, YU Lina. Study on evaluation methods of farmland-leveling precision based on information fast collecting system of farmland altitude[J]. China Land Science, 2009(5): 65 – 70. (in Chinese)
  - 15 张发顺. 农田激光平整效果评价方法与试验研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2011.  
ZHANG Fashun. Study on the effect evaluation method and experiment of laser-controlled land leveling[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2011. (in Chinese)