

# 农田土地精平工程优化设计与评价软件<sup>\*</sup>

李益农 许迪 李福祥

**【摘要】** 以修正平面法作为平地工程优化设计方法,开发具有田面高程数据录入与统计分析、田面微地形表述、平地土方量估算等多功能的农田土地精平工程优化设计与评价软件,并基于土地精平田面高程实测数据,对比评价3种数据网格插值计算方法的适用性。研究表明,基于3种插值方法获得的田面相对高程网格化数据都可用来描述田面微地形的整体分布状况,其中根据 Kriging 插值法得到的田面相对高程插值估算精度相对较高,据此估算的土地精平挖、填方量之间的差异和土方总量接近实际状况,可优先应用于土地精平工程优化设计工作中。

**关键词:** 土地精平 优化设计 评价 软件

**中图分类号:** S281 **文献标识码:** A

## Design and Evaluation Software for Precision Farm Land Levelling Engineering

Li Yinong Xu Di Li Fuxiang

(National Center of Efficient Irrigation Engineering and Technology Research)

### Abstract

A design and evaluation software for precision farm land levelling engineering was developed with the application of modified plane method. The software has different functions such as farm land elevation data input and statistic analysis, description of microtopography conditions as well as estimation of earthwork. The application effects of three different interpolated methods on software were evaluated based on field data. The results showed that three interpolated methods could be used to produce grid elevation data in farm land and give out the general description of surface condition. However, the Kriging interpolated method gave out the best estimations for both grid elevation data and the earthwork volume. It is suggested that the Kriging interpolated method is applied in designing for farm land precision land levelling engineering.

**Key words** Precision land levelling, Optimizing design, Evaluation, Software

### 引言

基于激光控制技术、全球定位系统 GPS 和地理信息系统 GIS、先进机械制造技术等构建的激光控制土地精平技术,利用现代高科技手段对传统的农田平地方法进行升级改造、大幅度提升常规平地技术科技含量,是现代精准农业技术发展的重要组成部分<sup>[1~2]</sup>,可获得显著的节水、增产、省工、提高土地利用效率等效果<sup>[3]</sup>,并为实现精量播种、精量施肥、精确收割等一系列农业生产环节奠定基础<sup>[4]</sup>。

激光控制土地精平工程优化设计的原则是在提高地面灌溉质量、满足农田灌排要求、获得最佳投资

效益、促进作物生长、防止田间水土流失的前提下,通过合理调配土方,使平地过程中的土方运移量达到最小、相应的搬运距离最短,尽力做到土方挖填之间的平衡。由于填方区的土壤密度相对较小,填土遇水下沉后会影响到田面平整状况,故挖方量一般应大于填方量,使挖方与填方的比例保持在 1.1~1.5 之间<sup>[5]</sup>。本文以修正平面法作为平地工程优化设计方法,开发具有田面高程数据录入与统计分析、田面微地形表述、平地土方量估算等多功能的农田土地精平工程优化设计与评价软件,基于土地精平田面相对高程实测数据,对比评价3种数据网格插值计算方法的适用性。

收稿日期: 2007-03-15

<sup>\*</sup> 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(项目编号:2006AA100210)

李益农 国家节水灌溉工程技术研究中心(北京) 教授级高级工程师, 100044 北京市

许迪 国家节水灌溉工程技术研究中心(北京) 教授级高级工程师

李福祥 国家节水灌溉工程技术研究中心(北京) 高级工程师

## 1 软件结构与功能

针对农田土地精平工程优化设计要求,基于 Windows XP 操作平台,利用 Visual Basic 语言开发土地精平工程优化设计与评价软件,具有录入田面高程信息数据并对其进行统计分析、表述田面微地形分布状况并绘制相关的平面与三维分布图形、依据网格化的田面高程数据开展平地土方量平衡计算并估算土方量及绘制平地工程设计简图等一系列功能,可用于评估农田土地平整状况、设计土地精平工程优化方案、计算平地土方量和描述平地前后田面微地形的分布状况等。

### 1.1 田面高程数据录入

将实测的田面相对高程原始数据录入数据文件,包括测点位置坐标和相对高程值。在数据录入过程中,可利用记事本、写字板、Excel 或支撑软件系统提供的其他数据编辑模块,按顺序逐个输入田面相对高程数据,并以文本文件(\*.TXT)的格式进行保存。采用相关的软件可对现有数据文件进行增减、修改、复制等编辑工作。

### 1.2 田面高程数据统计分析

对录入数据文件中的田面相对高程数据进行基本的统计分析,当输入的田面相对高程测量数据采用地理坐标时,先利用数据坐标转换模块将地理坐标转换为数学坐标。选用高程测量数据的极值、均值、极差值、中位数、方差、标准偏差、变差系数、偏度系数、峰度系数等指标作为统计分析特征参数,同时对各测点的偏差频数、频率、累积频率等进行统计分析,并绘制相应的统计分布图。

### 1.3 田面微地形表述

基于田面相对高程数据,采用平面和三维分布形式对田面微地形分布状况作出直观表述,绘制相关的微地形分布状况图。当田面高程实测点的分布不规则时,需根据各种数据网格插值计算方法将控制点的分布规则化,借助给定的网格规格开展高程数据的网格化插值计算。在此基础上,绘制田面相对高程等值线、田面网格起伏分布、三维田面高程数据立体状态等一系列相关的示意图。

### 1.4 土地平整量估算

根据待平地块的田面平整状况,基于土地精平工程优化设计方法,利用网格化的田面相对高程数据进行平地工程土方量平衡计算,估算精平方总量。此外,根据田面各控制节点处的挖(填)深度和控制网格上的土方运移量等数据,绘制土地精平工程优化设计简图,包括网格土方运移状况、挖(填)方区域分布、网格点原始数据与设计方案绝对偏差值

的区域分布等示意图。

## 2 土地精平工程优化设计方法

土地精平工程优化设计方法主要有平面法、断面法、等高线调整法等<sup>[6]</sup>。在开发的软件中,采用以平面法为基础的修正平面法作为土地精平工程优化设计方法,依据正方形网格面积加权法计算田面的平均高程,开展挖填土方量的平衡计算,估算施工土方量。

在修正平面法中,当田块近似为方形或长方形时,以田块平均高程点的位置为中心点,若为不规则形田块,则采用力矩法求得中心点的坐标,则相应的平面方程为

$$E(x, y) = H + K_x x + K_y y \quad (1)$$

式中  $E(x, y)$ ——田块平面点 $(x, y)$ 处的设计高程

$K_x$ —— $x$ 方向的田面坡度

$K_y$ —— $y$ 方向的田面坡度

$H$ ——修正系数

对式(1)中的  $K_x$ 、 $K_y$ ,可利用最小二乘法方程联立求解得到

$$\begin{cases} \sum (x - x_c)^2 K_x + \sum (x - x_c)(y - y_c) K_y = \sum (x - x_c)(E(x, y) - E_c) \\ \sum (y - y_c)^2 K_y + \sum (x - x_c)(y - y_c) K_x = \sum (y - y_c)(E(x, y) - E_c) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} K_x = \frac{BE - DC}{B^2 - DA} \\ K_y = \frac{BC - AE}{B^2 - DA} \end{cases} \quad (3)$$

其中  $A = \sum (x - x_c)^2$   $B = \sum (x - x_c)(y - y_c)$   
 $C = \sum (x - x_c)(E(x, y) - E_c)$   $D = \sum (y - y_c)^2$   $E = \sum (y - y_c)(E(x, y) - E_c)$

$$\begin{cases} E_c = \frac{\sum \frac{A(x, y)}{A_s} E(x, y)}{\sum \frac{A(x, y)}{A_s}} \\ y_c = \frac{\sum ny}{\sum n} \\ x_c = \frac{\sum mx}{\sum m} \end{cases} \quad (4)$$

式中  $x_c$ 、 $y_c$ ——田块中心点处坐标

$E_c$ ——田块中心点处高程

$A_s$ 、 $A(x, y)$ ——田块内各网格的标准控制

面积和实际控制面积

$m$ ——坐标为  $x$  点处  $y$  方向上的网格点数

$n$ ——坐标为  $y$  点处  $x$  方向上的网格点数

当任一平面均通过田块中心点  $(x_c, y_c)$  时,则有

$$H = E_c - K_x x_c - K_y y_c \quad (5)$$

联立求解式(1)和式(5),可得到已知平面方程为

$$E(x, y) = E_c - K_x x_c - K_y y_c + K_x x + K_y y \quad (6)$$

利用式(6)计算田块内各网格点处的设计高程,对每个网格上的挖、填土方量采用四点法计算为

$$V_{C_i} = \frac{A_i (\sum C(x, y))^2}{4 \left( \left| \sum C(x, y) \right| + \left| \sum F(x, y) \right| \right)} \quad (7)$$

$$V_{F_i} = \frac{A_i (\sum F(x, y))^2}{4 \left( \left| \sum C(x, y) \right| + \left| \sum F(x, y) \right| \right)} \quad (8)$$

式中  $V_{C_i}$ 、 $V_{F_i}$ ——第  $i$  个网格的挖、填土方量

$C(x, y)$ 、 $F(x, y)$ ——第  $i$  个网格 4 个顶点处的挖、填深度

$A_i$ ——网格的面积

对于挖填方比  $R = \sum_{i=1}^n V_{C_i} / \sum_{i=1}^n V_{F_i}$ ,若初次计算值超出 1.0~1.2 范围,则可通过调整田块中心点处的高程值,重新计算田块的挖方和填方量,直至  $R$  值达到适宜的范围为止。

### 3 数据网格插值计算方法

土地精平工程优化设计中的土方量估算是基于田面高程网格开展的,利用适宜的网格插值计算方法,根据已知测点高程进行田面高程的网格化插值计算,对提高平地土方量估算精度、改善土地平整设计方案质量具有重要意义。当利用车载 GPS 移动测量设备进行大规模的田面相对高程测量时,获取的高程数据由于具有离散分布的特点,无法直接用于土地精平工程优化设计工作,必须依据离散数据开展数据网格化插值计算。

现有数据网格插值计算方法通常包括临近法、反距离加权法、样条函数法、趋势面法、多元回归法、不规则三角网线性内插法、克里格法等<sup>[7]</sup>。根据插值算法对计算要素空间变异性和空间相关性反映程度的不同,选择反距离加权法、不规则三角网线性内插法和克里格法等 3 种插值方法,在给定的 2.5 m 网格间距下,基于车载 GPS 测量结果开展田面相对高程的网格化插值计算,将插值得到的网格点高程与相应的水准仪观测值进行统计结果的对比分析;依据不同的网格化高程数据,在相同的设计方案中,

开展土地精平工程设计,比较土方量估值间的差异,评价不同插值方法的适用性。

#### 3.1 插值计算方法

##### 3.1.1 反距离加权插值法(IDP)

该法综合了泰森多边形法和趋势面法的特点,根据距离衰减规律,基于控制测点间的空间距离进行加权计算,估算未知点的数值为

$$z(x, y) = \sum_{i=1}^{n_1} \lambda_i z(x_i, y_i) \quad (9)$$

其中  $\sum_{i=1}^{n_1} \lambda_i = 1$   $\lambda_i = h_i^{-a} / \sum_{i=1}^{n_1} h_i^{-a}$

$$h_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$$

式中  $x_i$ 、 $y_i$ ——已知点坐标

$h_i$ ——已知点与估值点间的距离

$a$ ——指数,通常为 2

$n_1$ ——参与估值计算的已知点个数

##### 3.1.2 不规则三角网线性内插法(TIN)

通过观测点间的相互连线组成若干个三角单元,每个三角单元不能与其他任意三角单元相交,且各三角单元均由 3 个高程实测点确定。假设三角单元是由 3 个高程观测点确定的斜平面,则相应的三角单元平面方程为

$$b_0 + b_1 x + b_2 y + b_3 z = 0 \quad (10)$$

其中  $b_0 = -b_1 x_1 - b_2 y_1 - b_3 z_1$

$$b_1 = y_1(z_2 - z_3) - y_2(z_3 - z_1) - y_3(z_1 - z_2)$$

$$b_2 = z_1(x_2 - x_3) - z_2(x_3 - x_1) - z_3(x_1 - x_2)$$

$$b_3 = x_1(y_1 - y_3) - x_2(y_3 - y_1) - x_3(y_1 - y_2)$$

上述参数可由三角单元的实际测点数据  $(x_1, y_1, z_1)$ 、 $(x_2, y_2, z_2)$ 、 $(x_3, y_3, z_3)$  求得。

三角单元平面上的任意待估点的田面高程值为

$$z = \frac{-b_1 x - b_2 y - b_0}{b_3} \quad (11)$$

##### 3.1.3 克里格(Kriging)插值法

该法建立在估值  $Z^*(x_0)$  对真值  $Z(x_0)$  的无偏估计以及估值与真值两者之差的方差最小假设基础上,依据在空间分布相关距离范围内由已知点高程建立的空间相关结构关系(试验半方差函数),对未知点进行估值插补

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^{n_1} \lambda_i Z(x_i) \quad (12)$$

式中  $\lambda_i$ ——待定权重因子,由建立的试验半方差函数计算得到

#### 3.2 供试田块与田面相对高程测量方法

土地精平田面相对高程观测在北京市大兴区国家节水灌溉北京工程技术研究中心灌溉试验研究基

地内进行,供试田块面积为  $60\text{ m} \times 90\text{ m}$  和  $60\text{ m} \times 80\text{ m}$ 。

采用车载移动 GPS 测量技术开展田面相对高程的测量<sup>[8]</sup>,相关的 GPS 测量设备为美国 Trimble 公司生产的双频 GPS 接收机,采用差分 GPS 技术进行 RTK 方式测量,标称测量精度为:动态条件下,平面为  $10\text{ mm} + 1.0 \times 10^{-6} \times L$ ,高程为  $20\text{ mm} + 2.0 \times 10^{-6} \times L$ ;快速静态条件下,平面为  $5\text{ mm} + 0.5 \times 10^{-6} \times L$ ,高程为  $5\text{ mm} + 1.0 \times 10^{-6} \times L$ , $L$  为基线长度是指流动站与基准站之间的距离,以 km 计。在田面相对高程实测过程中,GPS 移动站放在测量车内,而 GPS 天线和无线电台天线则安装在测量车的顶部,车载移动站的测量间距为 1.5 m。车载移动站在供试田块内按一定的行进路径往返移动测量,并尽可能控制相邻测线间距与移动站设置的测量间距保持相同,实际测线间距可小于设置的测量间距,但不应大于所设置测量间距的 2 倍。此外,在供试田块内采用北京测绘仪器厂生产的具有自动校平功能的 DSZ-C24 型光学水准仪,按 2.5 m 的网格间距进行实地测量,得到相应的网格化田面相对高程数据。

### 3.3 估算效果对比评价

#### 3.3.1 田面相对高程网格化数据统计分析

表 1 给出基于 3 种数据网格插值计算方法和水准仪得到的供试田块田面相对高程网格化数据统计分析结果。根据 3 种插值方法得到的田面相对高程的均值  $\bar{z}$  之间无明显差异,且与水准仪的实测结果非常接近;另一方面,就标准偏差  $S_d$  和变差系数  $C_v$  而言,由 3 种插值方法得到的结果均低于水准仪的实测结果,但采用 Kriging 和 TIN 方法获得的相关结果相对接近水准仪的结果。由此可见,若以水准仪的实测结果为对比值,则根据 Kriging 和 TIN 插值方法构建的田面微地形分布状况更为接近实际情况。

表 1 田面相对高程网格化数据统计分析结果

Tab.1 Comparison of statistic characteristics from measured and interpolated grid relative elevation data

插值(实测) 方法	田块 1(60 m×90 m)			田块 2(60 m×80 m)		
	$\bar{z}/\text{m}$	$S_d/\text{m}$	$C_v$	$\bar{z}/\text{m}$	$S_d/\text{m}$	$C_v$
水准仪	0.112	0.028	0.248	0.099	0.023	0.228
IDP	0.112	0.017	0.153	0.098	0.012	0.126
TIN	0.113	0.023	0.208	0.100	0.019	0.189
Kriging	0.112	0.022	0.196	0.100	0.018	0.181

#### 3.3.2 土地精平工程量

假设供试田块土地精平设计目标为田面零坡度平整,则基于不同插值方法和水准仪得到的网格化

高程数据估算的土地精平工程量如表 2 所示。在基于修正平面法的相同精平工程设计方案下,依据不同插值方法获得的田面相对高程网格化数据估算的精平土方总量均低于根据水准仪数据得到的相关结果,但其中 Kriging 方法得到的工程量估值最为接近水准仪的相应结果,TIN 方法次之,而 IDP 方法最差。若以水准仪数据获得的估算结果为对比值,基于 Kriging 插值方法得到的网格化高程数据估算的土方总量最为接近实际状况,相应的土方估算平均误差在 10% 左右,而 IDP 和 TIN 插值方法得到的土方总量估值则与实际结果有较大出入,平均误差分别为 33% 和 17% 左右。

表 2 网格化高程数据估算的土地精平工程量

Tab.2 Estimated earthwork volume based on interpolated grid and measured data  $\text{m}^3$

插值(实测) 方法	田块 1(60 m×90 m)			田块 2(60 m×80 m)		
	挖方	填方	总量	挖方	填方	总量
水准仪	44.7	43.4	88.1	34.1	30.4	64.5
IDP	33.8	29.9	63.7	20.6	19.3	39.9
TIN	37.5	36.4	73.9	28.5	25.0	53.5
Kriging	40.5	37.2	77.7	30.7	27.7	58.4

#### 3.3.3 方法评价

3 种插值方法在土地精平土方量估算中存在的差异主要取决于其对计算要素空间变异性和空间相关性的反映程度的差别。其中 IDP 算法主要是从数学意义上从事数据插值计算,物理意义不明确,同时在具体应用该法时尚存在设定临近空间范围与样本点合理数目、幂函数或指数函数形式空间加权以及对局部特异值的反映等问题<sup>[7]</sup>。TIN 方法虽在一定程度上考虑了插值要素的空间相关性,但由于采用三角拓扑方式进行插值计算,要素间的空间相关性被局限在三角单元内,致使对要素实际空间变异性的描述受到一定程度的制约,进而影响其描述精度<sup>[9]</sup>。Kriging 插值方法在选取权重系数时考虑了平均误差和误差方差,通过误差方差最小等数学处理可得出较为合理的加权系数,故较为全面地考虑了插值要素自身的空间距离与方向相关的问题<sup>[7]</sup>。综上所述,基于 Kriging 插值方法得到的网格化田面相对高程数据用于土地精平工程设计可取得相对较好的效果。

## 4 结束语

以修正平面法作为平地工程优化设计方法开发的农田土地精平工程优化设计与评价软件,具有田面高程数据录入与统计分析、田面微地形表述、平地

土方量估算等多种功能,可有效地提高土地精平工程优化设计工作的效率。基于本文讨论的3种数据网格插值计算方法获得的田面相对高程网格化数据都可用来描述田面微地形的整体分布状况,其中根

据 Kriging 插值法得到的田面相对高程插值估算精度相对较高,据此估算的土地精平挖、填方量之间的差异和土方总量相对接近实际状况,可优先应用于土地精平工程优化设计工作中。

### 参 考 文 献

- 1 李益农,许迪,李福祥,等. 农田土地激光平整技术应用及初步分析[J]. 农业工程学报, 1999, 15(2): 79~84.
- 2 刘刚,林建涵,司永胜,等. 激光控制平地系统设计与试验分析[J]. 农业机械学报, 2006, 37(1): 71~74.
- 3 Fangmeier D D, Clemmens A J, El-Ansary M, et al. Influence of land leveling precision on level-basin advance and performance[J]. Transactions of the ASAE, 1999, 42(4): 1 019~1 025.
- 4 任文涛,胡忠飞,崔红光,等. 激光平地乳牙直播节水效果的研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(3): 72~75.
- 5 Walker W R. Guidelines for designing and evaluating surface irrigation systems[M]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper No. 45, 1992.
- 6 李醒民. 水土保持工程学[M]. 台北: 徐氏基金会出版社, 1966.
- 7 朱会义,刘述林,贾绍凤. 自然地理要素空间插值的几个问题[J]. 地理研究, 2004(4): 425~432.
- 8 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.
- 9 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.

### (上接第 111 页)

- 2 Hansen P M, Schjoerring J K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 86(2): 542~553.
- 3 Ma B L, Yan W, Dwyer L M, et al. Graphic analysis of genotype, environment, nitrogen fertilizer and their interactions on spring wheat yield[J]. Agron. J., 2004, 96(1): 169~180.
- 4 Badra A, Parent L E, Desjardins Y, et al. Quantitative and qualitative responses of an established Kentucky bluegrass (*Poa pratensis* L.) turf to N, P, and K additions[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2005, 85(1): 193~204.
- 5 吴长山,项月琴,童庆禧,等. 利用高光谱数据对作物群体叶绿素密度估算的研究[J]. 遥感学报, 2000, 4(3): 228~232.
- 6 李云梅,倪绍祥,黄敬峰. 高光谱数据探讨水稻叶片叶绿素含量对叶片及冠层光谱反射特性的影响[J]. 遥感技术与应用, 2003, 18(1): 1~4.
- 7 谢瑞芝,周顺利,王纪华,等. 用冠层高光谱反射估测玉米植株色素时的采样点和指标选择[J]. 农业工程学报, 2006, 22(4): 135~138.
- 8 王珂,沈掌泉,王人潮,等. 不同钾营养水平的水稻冠层和叶片光谱特征研究初报[J]. 科技通报, 1997, 13(4): 211~214.
- 9 王兵. 基于 GIS 的植物营养光谱诊断的研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2005.
- 10 张霞,刘良云,赵春江,等. 利用高光谱遥感图像估算小麦氮含量[J]. 遥感学报, 2003, 7(3): 176~179.
- 11 Miller J R, Hare E W, Wu J. An inverted Gaussian reflectance model[J]. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11(10): 1 775~1 795.
- 12 田庆久,宫鹏,赵春江,等. 用光谱反射率诊断小麦水分状况的可行性分析[J]. 科学通报, 2000, 45(24): 2 645~2 650.