

# 农田土地精细平整施工测量网格间距的适宜性分析

许迪, 李益农, 李福祥, 白美健

(国家节水灌溉北京工程技术研究中心, 中国水利水电科学研究院水利研究所, 北京 100044)

**摘要:** 基于不同测量网格间距得到的典型田块地面相对高程试验资料, 利用统计学方法对数据进行分析处理, 通过测量人力投入、田块微地形表述程度和平地土方量估算精度的对比, 探讨小田块土地精平作业中适宜采用的施工测量网格间距。结果表明: 平地土方量估算精度和测量作业人力投入对确定适宜的施工测量网格间距至为关键, 在适当保持土方量相对估值精度并有效减少测量人力投入前提下, 建议在小田块土地精细平整作业中, 使用 10~15 m 施工测量网格间距上得到的田面相对高程数据, 设计土地精细平整工程方案, 从而达到低投入高产出的预期平地效果。

**关键词:** 土地平整; 网格间距; 测量; 高程; 土方量

中图分类号: S281

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2005)02-0051-05

许迪, 李益农, 李福祥, 等. 农田土地精细平整施工测量网格间距的适宜性分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 51-55

Xu Di, Li Yimong, Li Fuxiang, et al. Analysis of feasible grid space in agricultural land levelling survey[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(2): 51-55 (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

利用激光控制平地技术对农田进行高精度平整是改善田间微地形条件、提高田面平整精度、改进地面灌溉技术的一项重要措施<sup>[1,2]</sup>, 可产生显著的节水增产效果<sup>[3,4]</sup>。平地作业前首先需按照适宜的网格开展地面相对高程的测量, 在此基础上拟定合理的土地平整工程设计方案, 给出平地后预期达到的田块地形设计平面, 随后通过整地施工将现状网格点高程分别调整到相应于设计田面所要求达到的高程处, 从而完成土地平整工作。在田面相对高程测量中, 施工测量网格的间距对测量人力投入和平地土方量估算精度的影响较为显著。当利用常规机械平地设备开展大面积土地平整时, 大尺度田块下需采用较大的施工测量网格间距, 如美国采用的典型网格间距为 30 m 左右<sup>[1]</sup>, 国内推荐使用 20~40 m 的网格间距<sup>[5]</sup>。在中国北方大多数井灌区和部分渠灌区内, 由于农作田块的面积相对较小, 当采用激光控制技术开展土地精细平整作业时, 较大的施工测量网格间距不利于平地土方量的精确估算, 进而影响土地精平效果, 亟待开展相关的适宜性分析研究。本文基于不同施工测量网格间距下得到的典型田块试验数据, 利用经典统计学和地质统计学方法对地面相对高程数据进行处理分析, 通过对测量人力投入、田块微地形表述程度和平地土方量估算精度的比较, 探讨在小田块(面积 < 3 hm<sup>2</sup> 左右)上开展土地精细平整作业时适宜采用的施工测量网格间距。

## 1 试验与方法

收稿日期: 2004-10-13 修订日期: 2004-12-27

基金项目: “十五”国家重大科技专项课题“精细地面灌溉技术研究”(2002AA 2Z2041)

作者简介: 许迪(1957-), 男, 北京人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事节水灌溉理论与技术研究, 北京市海淀区车公庄西路 20 号国家节水灌溉北京工程技术研究中心, 100044。

Email: xudi@iw.hr.com

### 1.1 试验地点和地形测量布设

农田土地精细平整下的施工测量网格间距田间试验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基地内进行, 典型试验田块的规格为 60~180 m, 面积 1.1 hm<sup>2</sup>。采用北京测绘仪器厂生产的具有自动校平功能的光学水准仪(DSZ-C24)在田块内开展人工地面相对高程的测量, 方形网格间距 2.5 m, 网格点数 1777 个。对实测的田面高程数据进行均布抽点处理后, 可分别获得 5、7.5、10、12.5、15、17.5、20 m 共 7 种网格间距下的田面相对高程数据。

### 1.2 统计分析方法

利用经典统计学方法对地面相对高程数据的均值  $\bar{x}$ 、标准偏差  $S$  和变差系数  $C_v$  等统计特征值进行分析, 描述田块的整体地貌特征。其中  $C_v$  反映了高程变量的离散程度和空间变异强度, 当  $C_v < 0.1$  时, 为弱变异性;  $0.1 < C_v < 1$  时, 为中等变异性;  $C_v > 1$ , 为强变异性<sup>[6]</sup>。

利用地质统计学方法描述地面相对高程的田面分布状况和田间微地形变化特征。采用 Kriging 插值法<sup>[7]</sup>进行高程的空间样点插值计算。该法根据地面相对高程未知点周围的若干已知点的信息, 依据空间分布相关距离范围内各已知点参数间建立的空间相关结构关系, 对未知高程点进行估值插补。地面相对高程的空间相关结构关系可借助半方差函数  $\gamma(h)$  表示

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

式中  $x_i$ ——已知点的空间坐标位置;  $Z(x_i)$ ——相应点的地面相对高程;  $h$ ——两已知点的间距;  $N$ ——已知点数量。对式(1)而言, 随着  $h$  的逐渐增大,  $\gamma(h)$  增加, 当  $h = R$  时,  $\gamma(h) = s^2$ , 即半方差等于方差, 此时的  $R$  称为地面相对高程的空间分布相关距离。

Kriging 插值法建立在估值  $Z^*(x_0)$  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基础假设上, 由于半方差函数给出相邻成对采样点之间的地面相对高程的相关关系, 故任一未知内插点  $x_0$  处的高

程估值  $Z^*(x_0)$  可通过环绕其四周且处于空间分布相关距离范围内的  $n$  个已知点  $Z(x_i)$  估算如下

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda Z(x_i) \quad (2)$$

式中  $\lambda$ ——待定权重因子,由式(1)给出的半方差函数计算得到<sup>[7]</sup>。

### 1.3 平地工程设计方法

平地工程施工的设计原则是在有利于提高地面灌溉质量、促进作物生长和防止田间水土流失的前提下,使平地的土方运移量最小且搬运的距离最短。由于地面填方区的土壤密度相对较小,填土遇水下沉后会影响到地面平整精度,故挖方量一般应大于填方量,设计中通常保持挖方与填方的比例为 1.1~1.5。平地工程施工的设计方法主要有平面法、断面法、等高线调整法等<sup>[8]</sup>。本文采用以平面法为基础的修正平面法,将田块划分为若干个方形网格,利用最小二乘法或线性回归拟合法对二维田块内所有的网格点高程进行计算,根据建立的平面方程确定田块的设计纵、横向坡度,并依据网格面积加权计算法得到田间平均高程,完成挖填方比的平衡计算<sup>[9]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 田面相对高程统计特征值分析

表 1 给出不同施工测量网格间距下的地面相对高程统计特征值。随着测量网格间距的扩大和测点样本数量的减少,样本均值的变化较为稳定,而反映田面平整度的标准偏差值  $S$  却趋于增加,从 2.9 cm 上升到 3.4 cm,这与中国北方平原井灌区现有农田地面平整度通常在 3~6 cm 范围的调查结果相吻合<sup>[2]</sup>。此外,反映田面相对高程离散程度的  $C_v$  值虽有所增加,但都在 0.1 左右,空间变异强度均属于弱变异性。

表 1 不同网格间距下的地面相对高程统计特征值

网格间距 /m	2.5	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20
样本数量	1777	466	217	127	90	63	57	38
均值 $\bar{x}$ /cm	29.3	29.1	29.2	29.1	29.3	29.2	29.3	29.4
标准偏差 $S$ /cm	2.9	2.9	3.2	3.2	3.3	3.4	3.3	3.4
变差系数 $C_v$	0.098	0.100	0.109	0.109	0.110	0.115	0.116	0.116

### 2.2 田面相对高程空间变异特征值分析

表 2 给出不同网格间距下的地面相对高程空间变异特征值,其空间相关性可根据基底方差与基台值的比值进行分类,当该值小于 25% 时,表明较强的空间相关性,在 25%~75% 之间,属中等空间相关性,大于 75% 则意味着较弱的空间相关性<sup>[10]</sup>。据此分类,不同网格间距下的地面相对高程均呈现出中等程度的空间相关性,基底方差与基台值的比值变化范围在 45.9%~67.7%

之间,相关距离在 36.8~46.3 m 之间变动。尽管随着地面相对高程空间相关性的变化,其相关距离之间存在着规律性的差异,但测量网格间距尺度对地面相对高程空间变异特征值的影响并不显著。

表 2 不同网格间距下的地面相对高程空间变异特征值

Table 2 Spatial variations of surface relative elevation under different grid spaces

网格间距 /m	基底方差	基台值	相关距离 /m	基底方差/基台值/%	备注
2.5	5.7	8.41	36.8	67.7	模拟函数 均为指数 函数
5.0	5.0	8.41	37.5	59.4	
7.5	5.1	10.24	43.7	49.8	
10.0	6.2	10.24	37.2	60.5	
12.5	5.5	10.89	44.5	50.5	
15.0	7.0	11.56	37.2	60.5	
17.5	5.0	10.89	46.3	45.9	
20.0	6.4	11.56	43.3	53.6	

### 2.3 田面相对高程空间分布状况

根据表 2 给出的田面相对高程空间变异特征值分析结果,图 1 显示出基于不同施工测量网格间距下测定的地面相对高程数据并利用 Kriging 内插估值法绘制的田面相对高程的空间分布状况。

如图 1 所示,对田块地貌特征的表述程度和对田间微地形的描述精度明显受到不同施工测量网格间距差异的影响。随着土地平整施工测量网格间距的增大,对田面真实地形状况的描述精度逐渐变差,整个田块地貌特征表述程度逐渐趋于整体概化,田面微地形分布特征描述精度则逐渐趋于粗化。

### 2.4 测量作业人力投入

在田块地形测量作业的人力投入上,2.5 m 网格间距下的高程测量共投入人力 8 人,其中 2 人负责水准仪的观测和数据记录,6 人持水准塔尺在田块内同时开展测量,测点总数 1777 个,共耗时 8 h,总计投入 64 个人时,平均工作效率为 0.036 人时/测点。若考虑人力投入数量不变,其它网格间距下的测量工作量假定按平均工作效率与实测点数的乘积进行大致估算,则完成 10 m 间距下的 127 个高程测点共需投入 4.6 个人时,而 20 m 间距下的 38 个测点则只需投入 1.4 个人时。

### 2.5 平地土方量估算精度

表 3 给出基于不同施工测量网格间距下的田面相对高程数据设计的田块地形平面上,利用修正平面法<sup>[9]</sup>估算得到的平地土方量,其中各方案的挖方与填方之比均大于 1.1。

表 3 不同施工测量网格间距下估算的平地土方量

Table 3 Estimated earthworks for land leveling under different grid spaces

网格间距/m	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0
挖方 $V_c$ /m <sup>3</sup>	92.8	91.2	88.4	82.0	82.3	83.1	76.7	79.3
填方 $V_f$ /m <sup>3</sup>	81.8	82.3	82.2	74.1	72.4	75.2	68.4	71.8
土方量 $V$ /m <sup>3</sup>	174.6	173.5	170.6	156.1	154.7	158.3	145.1	151.1

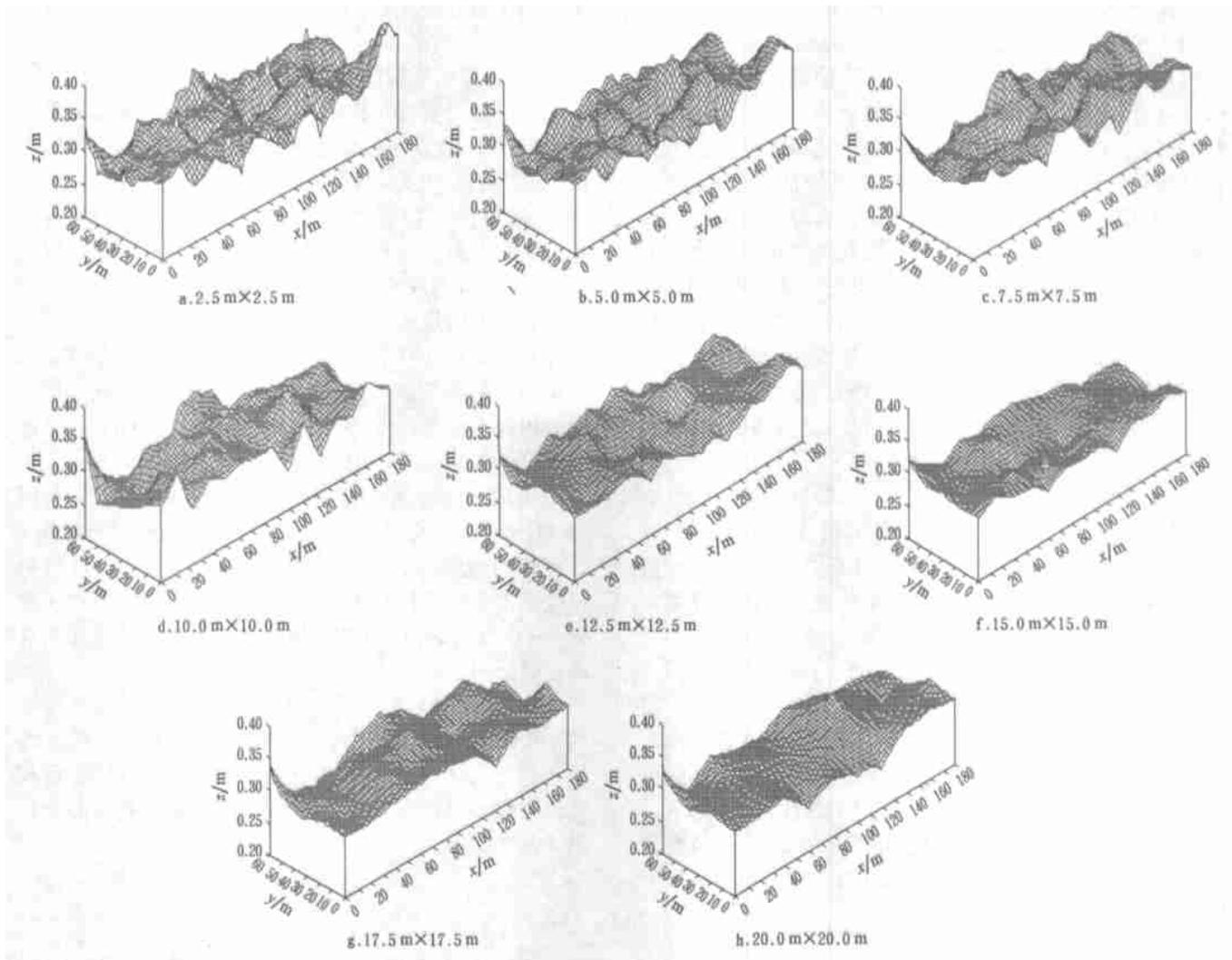


图 1 不同施工测量网格间距下的三维田块地形分布状况

Fig 1 3-D digital terrain models under different grid spaces

从修正平面法的计算过程可知, 测量网格面积的大小将直接影响田块设计平面方程的求解和挖、填土方量的计算。其中网格面积的大小对求解通过田块中心点的设计平面方程至关重要, 对给定面积的田块而言, 测量网格的面积愈小, 得到的网格数目愈多, 则计算的田块中心点坐标  $(x_c, y_c)$  愈精确, 此外, 网格面积的大小还直接影响设计平面方程中常数项  $E_c$  的估值精度。另一方面, 由于平地工程中的挖方量  $V_c$  和填方量  $V_f$  的计算分别为每个网格的挖方量  $V_{c_i}$  和填方量  $V_{f_i}$  的累计总和, 即  $V_c = \sum_{i=1}^n V_{c_i}$  和  $V_f = \sum_{i=1}^n V_{f_i}$ 。因此, 测量网格面积被划分的愈小, 得到的网格数目  $n$  愈多, 则愈有利于提高挖、填土方量的估算精度, 使土地平整效果愈加逼近设计的平地预期目标。若假设 2.5 m 网格间距下估算的平地土方量最为接近实际真值, 将其它间距下计算的土方量与 2.5 m 间距下的土方量估值的比值称为相对估值精度, 其中 2.5 m 间距下的相对估值精度为 100%, 则从图 2 显示的相对估值精度随施工测量网格间距的变化趋势中可以看出, 随着网格间距与网格面积的增大, 对土方

量的相对估值精度呈现出下降趋势, 两者间具有一定的相关性 ( $R^2 = 0.81$ )。其中网格间距低于 7.5 m 下计算的土方量较为接近真值, 对应的相对估值精度均大于 95% 以上, 网格间距在 10~ 15 m 之间的相对估值精度约在 88% ~ 90% 之间, 超过 15 m 间距后估算的土方量精度随网格间距增大呈下降趋势, 其中 20m 间距下的

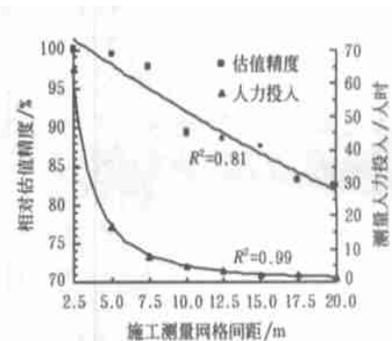


图 2 平地土方量相对估值精度和测量人力投入随施工测量网格间距的变化趋势

Fig 2 Tendency for relative precision of the estimated earthworks and manpower input with the variation of the grid spaces

相对估值精度下降到 82%。这表明增加施工测量网格间距, 虽能大幅度减少测点数目和降低测量作业投入量, 但平地土方量的估算精度却大为降低。

### 2.6 施工测量网格间距的适宜性分析

综上所述, 在确定适宜的农田土地精细平整施工测量网格间距过程中, 需考虑田块地形特征表述程度、平地土方量估算精度、测量作业人力投入等各种因素的影响, 其中尤以平地土方量估算精度和测量作业人力投入最为关键。通常对田块微地形状况的表述程度愈细, 估算平地土方量的精度则愈高, 预期的平地效果会愈加明显, 但相应的测量人力投入将急剧增大。为此, 应依据三者间的动态变化相关趋势寻找平衡点, 在既保证一定的土方量估值精度又能有效降低测量人力投入的基础上, 确定适宜的平地施工测量网格间距。

图 2 显示的结果表明, 对应于 10、12.5 和 15 m 施工测量网格间距的土方量相对估值精度在 88%~90% 之间, 介于相对估值精度变化区间的中间位置, 具有相对准确的估值精度, 而相应的测量作业人力投入分别为 4.6、3.3 和 2.3 人时, 比 2.5 m 网格间距下的 64 人时分别减少近 14、20 和 28 倍, 与此相应, 对图 1 给出的三维田块地形分布状况进行目视判别表明, 10~15 m 测量网格间距下的田块地形特征既体现了田块的整体地貌特征又反映出一定精度的田间微地形状况。由此可见, 适宜的农田土地精细平整施工测量网格间距应在 10~15 m 之间, 该结论与联合国粮农组织 (FAO) 推荐采用的相应网格间距基本相近。FAO 建议在小田块土

地精细平整作业中, 适宜的施工测量网格间距为 10 m 左右<sup>[1]</sup>。

### 2.7 适宜网格间距的随机模拟验证

地块相对高程在田面内的随机分布通常呈现出正态分布状态, 故基于假定的田块地面相对高程统计特征值 (如均值、标准偏差、最大和最小值), 可利用 Monte-Carlo 随机法<sup>[11]</sup> 定点生成相对高程随机数, 获得相应的相对高程田面分布状况。然后, 依据给定的平地工程设计方案, 进行不同平地土方量相对估值精度的比较, 对适宜的施工测量网格间距开展随机模拟验证。

某地块长 270 m、宽 100 m, 面积 2.7 hm<sup>2</sup>, 若按 5 m 测量网格间距考虑, 共有结点数 1155 个。假定该地块的地面相对高程统计特征值分别为: 均值  $\bar{x} = 58$  cm, 标准偏差  $S = 6.1$  cm, 最大和最小高程值为 85 和 28 cm。依据给出的地面相对高程空间分布结构和特征值, 利用 Monte-Carlo 法可获得 1155 个相对高程随机数, 得到 5 m 测量网格间距下的田面相对高程分布状况。在对模拟生成的相对高程数据进行均布抽点处理后, 分别获得与 10、15、20、25、30 m 共 5 种网格间距对应的田面相对高程数据组。

为便于比较, 图 3 仅给出使用 Kriging 估值法绘制的 10、15、20 m 测量网格间距下的田面相对高程空间分布状况, 其中网格间距差异对田块地貌的表述程度和对田间微地形描述精度的影响趋势与图 1 显示的变化规律基本相同。

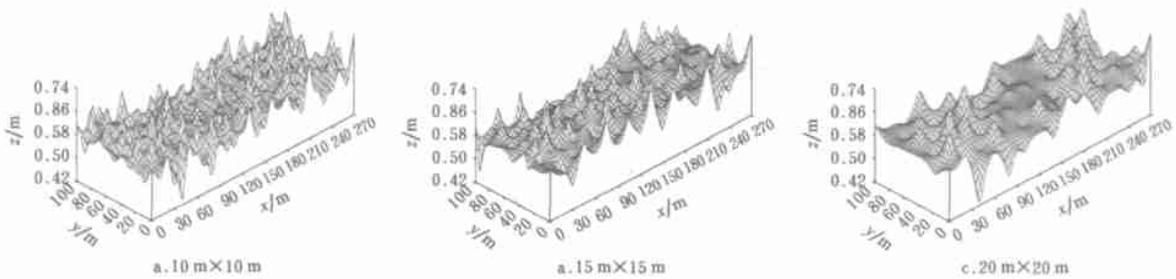


图 3 不同施工测量网格间距下的田面高程空间分布状况

Fig. 3 3-D digital terrain elevation models from Kriging method under different grid spaces

从图 4 给出的平地土方量相对估值精度随施工测量网格间距增大而呈下降的趋势中可以发现, 测量网格间距低于 15 m 下估算的土方量均较为接近真值, 相对估值精度都大于 95% 以上, 而网格间距超过 15 m 后估算的土方量精度则明显下降, 都低于 87%。此外, 测量人力投入随测量网格间距的增加而大幅度降低的变化趋势如图 2 所示, 这里不再重述。

对施工测量网格间距的随机模拟验证结果表明, 对小田块 (面积 < 3 hm<sup>2</sup>) 而言, 精细土地平整作业中宜采用的施工测量网格间距在 10~15 m 的结论具有其普适性。

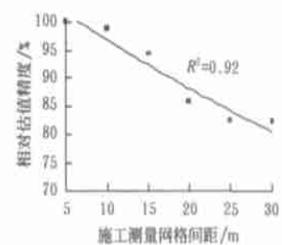


图 4 土方量相对估值精度随网格间距的变化趋势

Fig. 4 Tendency for relative precision of the estimated earthworks with the variation of the grid spaces

### 3 结 论

在农田土地精细平整条件下, 确定适宜的施工测量网格间距需考虑多种影响因素的作用, 其中平地土方量估算精度和测量作业人力投入至为关键。考虑到多种影响因素间存在的动态变化相关趋势, 在适当保持土方量相对估值精度并能有效降低测量人力投入基础上, 对小田块(面积 $< 3 \text{ hm}^2$ )而言, 建议采用 10~ 15 m 施工测量网格间距上获得的田面相对高程数据, 设计合理的平地工程方案, 以期达到低投入高产出的精细平地效果。

本研究结论是在中国北方平原井灌区现有农田地面平整度(3~ 6 cm)基础上, 通过实例研究(平整度 3.2 cm)和对随机模拟验证结果(平整度 6.1 cm)进行分析后获得的, 在 3~ 6 cm 的农田地面平整状况范围内, 地面平整度差异对研究结论基本没有影响。尽管研究结果仅适用于小田块这类典型的田块尺度, 但研究过程中揭示的各种因素对平地施工测量网格适宜间距的影响及其变化趋势却具有参考价值。

#### [参 考 文 献]

- [1] Walker W R. Guidelines for designing and evaluating surface irrigation systems[M]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper, 1989, 45, 1- 134
- [2] 李益农, 许迪, 杨继富, 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
- [3] Fangmerer D D, Clemmens A J, ElAnsary M, et al. Influence of land leveling precision on level-basin advances and performance[J]. Transactions of the ASAE, 1999, 42(4): 17- 27.
- [4] 李益农, 许迪, 李福祥. 田面平整精度对畦灌性能和作物产量影响的试验研究[J]. 水利学报, 2000, 12: 82- 87.
- [5] 高向军. 土地整理理论与实践[M]. 北京: 地质出版社, 2003: 1- 325
- [6] Hillel D. Application of soil physics[M]. New York: Academic Press, 1980: 1- 378
- [7] Warrick A W, Myers D E, Nielsen D R. Geostatistical methods applied to soil science[J]. Advance in Soil Science, 1985, 29: 388- 402
- [8] 李醒民. 水土保持工程学[M]. 台北: 徐氏基金会出版社, 1966: 1- 402
- [9] 许迪, 李益农, 李福祥, 等. 田间节水灌溉新技术研究与应用[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002: 1- 222
- [10] Miller M P, et al. Spatial variability of wheat yield and soil properties on complex hills[J]. Soil Sci Soc Am J, 1988, 52: 1133- 1141.
- [11] 华东水利学院. 水文统计概率计算中的数学基础[M]. 南京: 华东水利学院出版社, 1975: 1- 425

## Analysis of feasible grid space in agricultural land levelling survey

Xu Di, Li Yinong, Li Fuxiang, Bai Meijian

(National Center of Efficient Irrigation Engineering and Technology Research, Beijing,  
China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

**Abstract:** A statistic analysis was conducted for surface relative elevation data from typical field experiment under different survey grid spaces. The feasible survey grid space for the field with small dimension was discussed by comparison of the manpower input of the survey, description of the microtopography conditions and the precision of the estimated earthworks. The results show that the precision of the estimated earthworks, manpower input of the survey and description of the microtopography conditions are vital factors for determination of the feasible grid space. A 10~ 15 m grid space is suggested for land levelling survey in order to achieve the suitable precision of the estimated earthworks and less manpower input. The land levelling design for the field with small dimension could be based on such data from suggested grid space with the benefits of the higher precision and lower cost.

**Key words:** land levelling; grid space; survey; elevation; earthwork