

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.12.034

# 基于灰色预测的农业机器人 GPS 导航系统硬故障隔离\*

周俊 张鹏

(南京农业大学工学院, 南京 210031)

**【摘要】** 采用卡方检验和灰色预测相结合的算法,综合利用卡尔曼滤波数据和 GPS 历史有效定位数据,在不增加额外传感器信息条件下,对农业机器人导航中常见的 GPS 定位数据突变故障进行了检测和隔离。实验结果表明,这类故障被有效隔离后,不会影响导航系统的正常工作。GPS 定位数据的灰色预测残差小于 10 cm,当虚警率仅为 0.05 时仍可降低卡方故障检验的漏检率。

**关键词:** 农业机器人 全球定位系统 故障隔离 卡方检验 灰色预测

**中图分类号:** TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)12-0165-04

## Hard Fault Isolation of GPS Navigation System Based on Gray Prediction for Agricultural Robot

Zhou Jun Zhang Peng

(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

### Abstract

By combining the chi-square test and gray prediction, an algorithm of hard fault detection and isolation was introduced for the navigation of agricultural robot. The Kalman filtered data and historical valid GPS data were applied to detect and isolate positioning fault caused by the GPS failure, and none of other sensors were applied. With the prototype of the agricultural wheeled mobile robot, the experimental results showed that the GPS positioning fault was isolated effectively and had no any effects on the robot navigation. The error of gray prediction of GPS positioning data were less than 10 cm, and the missing rate of fault detection was reduced further when the false alarm rate of the chi-square test method was only 0.05.

**Key words** Agricultural robot, GPS, Fault isolation, Chi-square test, Gray prediction

### 引言

在农业机械导航领域,基于 GPS 定位信息的组合导航是提高系统精度及可靠性的有效途径。但其中任何导航子系统发生故障而失效时,其余的子系统都会受影响,从而使整个组合导航系统失效或性能下降,这就要求对组合导航系统实时地进行故障检测与隔离。

突变故障是 GPS 接收机的一类常见故障,实际使用过程中,GPS 接收机经常会由于周围环境的干扰而产生数据突变,进而对组合导航系统产生影响,

使得导航系统性能下降。故障检测多采用基于卡尔曼滤波的卡方检验法,但通常需要额外的导航系统才能实现故障隔离和容错控制<sup>[1~4]</sup>。本文将卡方检验和灰色预测算法相结合,针对农业轮式机器人 GPS 导航系统,仅依靠 GPS 的历史有效数据,对 GPS 数据进行诊断和预测,并对突变故障进行替换处理,实现故障的诊断和隔离。

### 1 基于卡方检验的故障诊断

故障卡方检验法是通过检验所构造的高斯分布随机向量的均值和方差阵是否与假设值相符,来进

收稿日期:2010-02-22 修回日期:2010-06-07

\* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2006AA10Z259)

作者简介:周俊,副教授,博士,主要从事农业机器人、机器视觉与模式识别研究, E-mail: zhoujun@njau.edu.cn

行故障诊断的一种统计方法,可实时确定一组量测量的有效性。组合导航系统中,利用卡尔曼滤波算法的递推估计构造出服从正态分布的故障检测函数,通过判断函数值的大小来确定故障。

### 1.1 残差卡方故障检验法

残差卡方故障检验法的基本思路是:如果  $k-1$  时刻以前(包括  $k-1$  时刻)系统无故障,那么经过卡尔曼滤波得到的第  $k-1$  时刻的估计值  $\hat{\mathbf{X}}(k-1)$  应该是正确的。由系统状态方程可以得到  $k$  时刻系统状态的递推值

$$\hat{\mathbf{X}}(k, k-1) = \Phi(k, k-1)\hat{\mathbf{X}}(k-1) \quad (1)$$

由此可以得到  $k$  时刻系统量测量的预测值

$$\hat{\mathbf{Z}}(k, k-1) = \mathbf{H}(k)\hat{\mathbf{X}}(k, k-1) \quad (2)$$

卡尔曼滤波器中将  $\hat{\mathbf{Z}}(k, k-1)$  与  $\mathbf{Z}(k)$  之差称为新息,或称为残差,可表示成

$$\mathbf{D}(k) = \mathbf{Z}(k) - \hat{\mathbf{Z}}(k, k-1) \quad (3)$$

由新息理论可知,残差向量也是零均值高斯白噪声过程,其协方差矩阵为

$$\mathbf{S}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{P}(k, k-1)\mathbf{H}^T(k) + \mathbf{R}(k) \quad (4)$$

定义故障检测函数

$$F(k) = \mathbf{D}^T(k)\mathbf{S}^{-1}(k)\mathbf{D}(k) \quad (5)$$

由新息序列的统计特性可知,  $F(k)$  服从自由度为  $m$  (观测向量的维数)的卡方分布。当故障发生时,残差  $\mathbf{D}(k)$  将不再是零均值白噪声过程,  $F(k)$  会变大。所以可据此来检测故障,取  $F(k)$  大于门限  $T_d$  的概率为  $\alpha$ , 即

$$P\{F(k) > T_d\} = \alpha \quad (6)$$

其中  $\alpha$  为允许的虚警概率,则检测过程为:当  $F(k) > T_d$  时,系统故障发生;当  $F(k) \leq T_d$  时,系统工作正常。当  $\alpha$  选定后,门限  $T_d$  可方便地从卡方分布表中查得。 $T_d$  的选取需要兼顾虚警率  $\alpha$  和漏检概率  $\beta$  两个因素。

### 1.2 卡方检验实验

实验中使用的 GPS 为 Trimble 公司的 AgGPS 132 差分 GPS,定位数据在自制的农业轮式移动机器人平台导航过程中进行采集,对其作卡尔曼滤波处理后,进行残差卡方故障检验实验。取虚警率  $\alpha = 0.05$ , 对应的故障检测门限  $T_d = 7.815$ 。实验中设置了 4 个突变故障点,采用在实际位置上叠加 1~20 倍的 GPS 定位误差的标准差来表示,其中 3 个故障点数据附加的偏差在 5~10 倍以上,1 个故障点数据叠加偏差仅为 3 倍。根据文献[5]以及实测结果,该标准差值选为 0.35 m。

实验结果如图 1 所示。由图可知, GPS 突变数据造成了卡尔曼滤波数据的跳变,这将会导致路径跟踪不再平滑稳定;突变数据点的残差卡方检验值

跟随突变点同时发生了突变,表明残差卡方检验方法能够实时有效地检测出数据突变故障。但是对于其中的叠加偏差量比较小的点,按照前面设定的检测门限,卡方检验方法无法检测出该故障。所以,下面将继续讨论基于灰色预测的 GPS 数据预测方法,以此对卡方故障检验方法进行补充,并替换故障点,实现故障隔离。

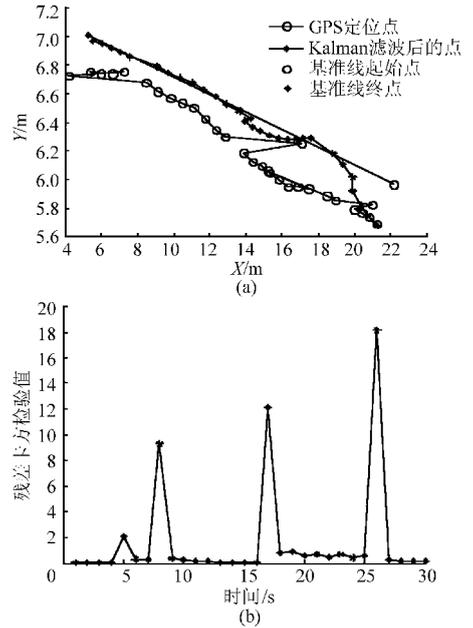


图1 GPS 定位故障数据卡方检验结果

Fig.1 Results of detection of GPS positioning fault based on chi-square test method

(a) 卡尔曼滤波数据 (b) 残差卡方检验值

## 2 基于灰色预测的 GPS 故障数据隔离

灰色系统的基本观点是把随机变量看作在一定范围内变化的灰色量。根据灰色系统理论,处理灰色量不是采用通常的数理统计方法,而是根据数据生成方法来寻求其中的规律性。这里将利用此规律性来预测未来时刻 GPS 的定位数据,以便在出现故障时替换故障点数据,实现定位数据故障的有效隔离,消除定位数据突变对系统的影响。

### 2.1 灰色预测建模

在灰色建模过程中常用一阶单变量 GM(1, 1) 模型作为过程的预测模型,它是由一个只包含单变量的微分方程构成的模型<sup>[6]</sup>。

设 GM(1, 1) 建模的原始数据序列为

$$\mathbf{X}^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)) \quad (7)$$

其中  $n$  为数列长度,一般取  $n \geq 4$ 。如果原始数列是非负数列,可直接转换为单增数列;如果原始数据有负数,则需先引入指数映射转换为正数列。利用一次累加生成 1-AGO 单增序列,设  $\mathbf{X}^{(1)}$  为  $\mathbf{X}^{(0)}$  的 1-AGO 序列

$$\mathbf{X}^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)) \quad (8)$$

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i) \quad (9)$$

令  $\mathbf{Z}^{(1)}$  为  $\mathbf{X}^{(1)}$  的紧邻均值生成序列

$$\mathbf{Z}^{(1)} = (z^{(1)}(2), z^{(1)}(3), \dots, z^{(1)}(n)) \quad (10)$$

$$z^{(1)}(k) = 0.5x^{(1)}(k) + 0.5x^{(1)}(k-1) \quad (11)$$

则 GM(1,1) 的灰色微分方程为

$$x^{(0)}(k) + ax^{(1)}(k) = b \quad (12)$$

式中  $x^{(0)}(k)$  —— 灰导数  $a$  —— 发展系数

$z^{(1)}(k)$  —— 背景值  $b$  —— 灰作用量

以  $k=2, 3, \dots, n$  代入式(12), 并写成矩阵形式

$$\mathbf{Y} = \mathbf{BP} \quad (13)$$

其中  $\mathbf{Y} = [x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n)]^T$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{P} = [a, b]^T$$

式中  $\mathbf{B}$  —— 数据矩阵  $\mathbf{Y}$  —— 数据向量

$\mathbf{P}$  —— 参数向量

利用最小二乘法求解, 得到

$$\mathbf{P} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{Y} \quad (14)$$

将  $\mathbf{P} = [a, b]^T$  代入式(12), 取  $x^{(1)}(0) = x^{(0)}(1)$ , 求得的方程解也称时间响应函数

$$x^{(1)}(t) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}\right)e^{-at} + \frac{b}{a} \quad (15)$$

可得 GM(1,1) 灰色微分方程的时间响应序列为

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}\right)e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (16)$$

灰色建模是将无规律的原始数据变为较有规律的生成数列再建模, 所以灰色模型实际上是生成数列的模型, 模型预测的数据需要经过逆生成作还原后才可使用。还原值为

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (17)$$

残差

$$\varepsilon(k) = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k) \quad (18)$$

相对误差

$$\Delta k = \frac{x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)}{x^{(0)}(k)} = \frac{|\varepsilon(k)|}{x^{(0)}(k)} \quad (19)$$

## 2.2 灰色预测方法实验

GM(1,1) 建模过程中采用一步预测, 即认为当前时刻以前的历史数据都是正确的, 通过当前时刻的前 5 个历史数据, 来预测当前点 GPS 点的坐标值。对图 1 实验里叠加故障偏差前 GPS 的 X、Y 坐

标数据作灰色预测处理, 结果如图 2 所示。图中结果表明, GM(1,1) 灰色预测模型能够很好地跟随原始 GPS 定位数据的动态变化, 预测残差小于 10 cm。

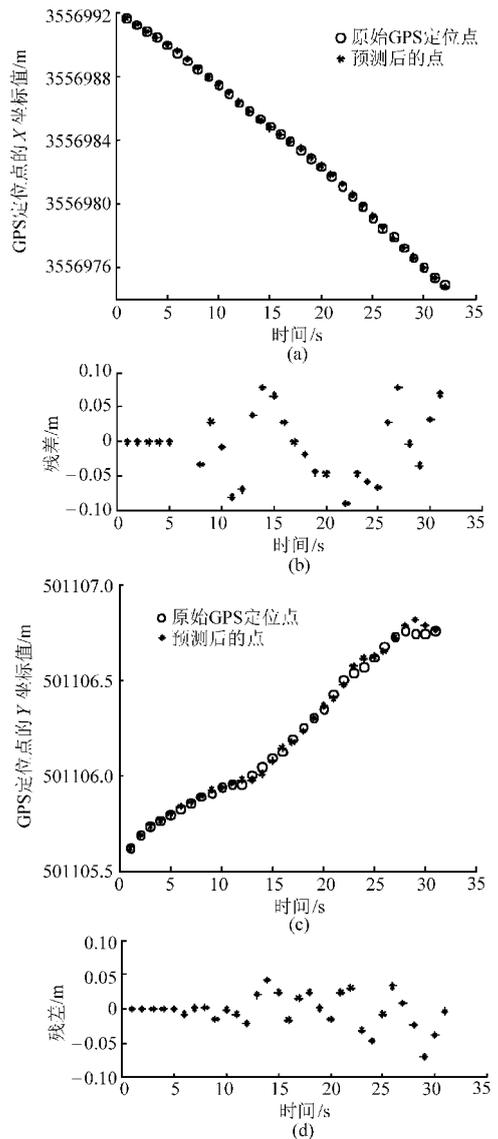


图 2 故障偏差叠加前 GPS 定位数据灰色预测

Fig. 2 Gray prediction of GPS positioning data without fault introduced

(a) X 坐标值灰色预测 (b) X 坐标值灰色预测残差  
(c) Y 坐标值灰色预测 (d) Y 坐标值灰色预测残差

如果将灰色预测模型直接应用于叠加了故障偏差的 GPS 数据时, 故障点处的预测残差就会十分明显(图 3)。这就可通过检验预测残差  $\varepsilon(k)$ , 再选取合适检测门限, 完全可以克服卡方检验方法中对突变量较小故障点无法检测的盲点, 实验中该门限值设为 GPS 定位误差标准差的 2 倍, 即  $\varepsilon(k) > 0.7$ 。

然而, 如果将超出残差门限的值, 即检测出的故障点用灰色预测值代替, 然后再继续后面的预测过程, 预测结果的准确性则会明显提高。预测的结果如图 4 所示, 可见预测残差仍然很小, 这样就可以消

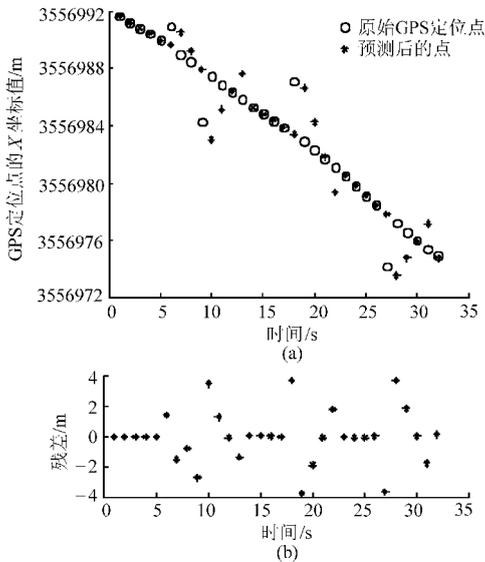


图3 故障隔离前 GPS 定位数据灰色预测

Fig. 3 Gray prediction of GPS positioning data with fault introduced

(a) X 坐标值灰色预测 (b) X 坐标值灰色预测残差

除故障数据带来的不利影响。因此,运用灰色预测不仅可以用来实现故障隔离,还可作为卡方故障检验方法的有效补充,对突变量较小的故障点进行检测。需要指出的是,如果 GPS 定位数据持续异常,灰色预测循环替换过程中引入的误差也将会不断累积直至定位预测失效,因此需要在连续多次异常发生时报警或停止自动导航。

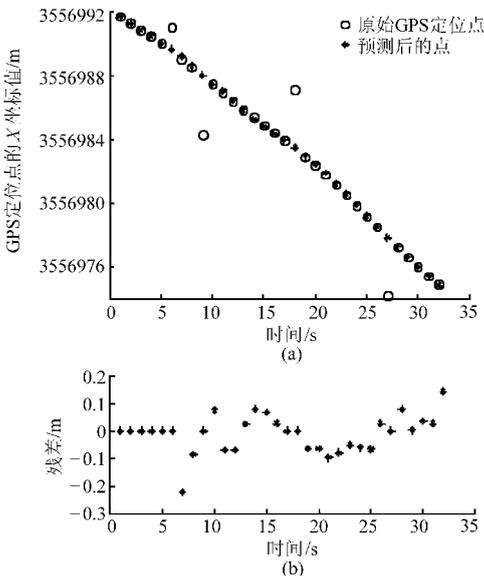


图4 故障隔离后 GPS 定位数据灰色预测

Fig. 4 Gray prediction of GPS positioning data with fault isolated

(a) X 坐标值灰色预测 (b) X 坐标值灰色预测残差

由于灰色预测模型的预测数据能够代替故障点,实现故障隔离,这里针对图 1 中的导航数据执行

此算法,然后再进行卡尔曼滤波处理,结果如图 5 所示。对照图 1 可见,卡尔曼滤波结果更加平滑,与导航实际轨迹吻合程度更高,这将有利于后续的导航控制。其次,这样处理后的 GPS 定位数据的卡方检验残差显著减小,远小于设定的故障检测门限 ( $T_d = 7.815$ ),这也证明了故障隔离的有效性。相对于通过增加额外传感器以及联合卡尔曼滤波等方法实现故障隔离,该方法仅利用了 GPS 的历史有效数据来实现故障数据的隔离,不仅降低了系统的复杂度,同时也降低了成本。

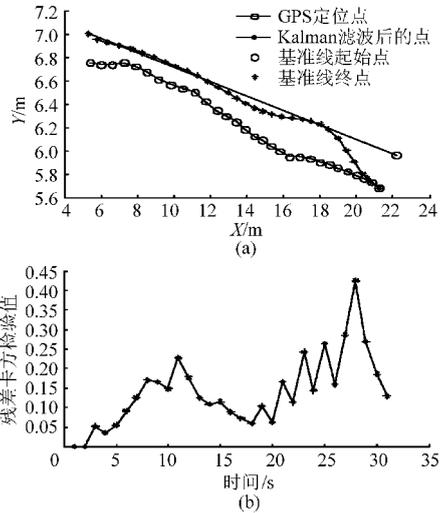


图5 GPS 定位故障灰色预测隔离后的导航轨迹

Fig. 5 Navigation track with GPS positioning fault isolated through gray prediction

(a) 卡尔曼滤波数据 (b) 残差卡方检验值

实验结果表明,在 GPS 数据正常的情况下,灰色模型生成的预测数据基本上可以还原出 GPS 原始数据。当 GPS 数据出现故障时,通过灰色模型预测该故障点的数据,将预测数据代入系统卡尔曼滤波方程,可以得到机器人更为准确的位置,以隔离故障点对导航系统的影响,为可靠导航提供了保证。

### 3 结束语

在卡尔曼滤波组合导航基础上,通过灰色预测对卡方故障检验法进行补充和改进,对 GPS 定位数据突变故障进行实时检测和替换。导航实验结果表明,GPS 数据突变故障可以被有效隔离,避免了系统其他部分受到影响。灰色预测得到的 GPS 数据残差小于 10 cm,虚警率仅为 0.05 时,灰色预测算法仍可有效降低卡方检验法的漏检率。该方法能够在不额外增加传感器信息条件下,实现系统故障的诊断和隔离,节约了导航系统成本。

(下转第 177 页)

## 参 考 文 献

- 1 叶娜,黄川. 荷兰 Velos 智能化母猪饲养管理系统在国内猪场的应用[J]. 养猪,2009(2): 41~42.
- 2 苏希. 商品猪精细养殖生产管理数字化平台的构建与实现[D]. 北京:中国农业科学院,2005.  
Su Xi. The construction and realization of production management digitization platform for precision feeding of commercial pig [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Science, 2005. (in Chinese)
- 3 范永存,张长利,董守田,等. 奶牛精量饲喂系统研究[J]. 农业机械学报,2009,40(增刊): 65~68.  
Fan Yongcun, Zhang Changli, Dong Shoutian, et al. Research on precise feeding system of dairy cattle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(Supp): 65~68. (in Chinese)
- 4 熊本海,钱平,罗清尧,等. 基于奶牛个体体况的精细饲养方案的设计与实现[J]. 农业工程学报, 2005,21(10):118~123.  
Xiong Benhai, Qian Ping, Luo Qingyao, et al. Design and realization of solution to precision feeding of dairy cattle based on single body status [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005,21(10):118~123. (in Chinese)
- 5 Nikos Papandroulakis, Papaioannou Dimitris. An automated feeding system for intensive hatcheries [J]. Aquacultural Engineering, 2002,26(1): 13~26.
- 6 Tay M L, Patrick S K Chua, Sim S K, et al. Development of a flexible and programmable parts feeding system [J]. International Journal of Production Economics, 2005,98(2):227~237.
- 7 张扬,蔡春伟,孙建明,等. S7-200 PLC 原理与应用系统设计[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- 8 陈宏勋. 管道物料输送与工程应用[M]. 北京:化学工业出版社,2003.
- 9 倪志江,高振江,蒙贺伟,等. 智能化个体奶牛精确饲喂机设计与实验[J]. 农业机械学报,2009,40(12):205~209.  
Ni Zhijiang, Gao Zhenjiang, Meng Hewei, et al. Design and experiment on intelligent precising feeding machine for single dairy cow[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(12):205~209. (in Chinese)

~~~~~  
(上接第 168 页)

## 参 考 文 献

- 1 陶俊勇,陶利民,杨定新. 组合导航系统故障检测技术研究[J]. 国防科技大学学报,2001,23(1):31~35.  
Tao Junyong, Tao Limin, Yang Dingxin. New fault detection method for the integrated navigation system [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2001, 23(1):31~35. (in Chinese)
- 2 刘国良,张迎春,强文义,等. 组合导航系统故障检测方法的比较研究[J]. 控制工程,2006,13(2): 117~119.  
Liu Guoliang, Zhang Yingchun, Qiang Wenyi, et al. Comparative research on fault detection methods for integrated navigation system[J]. Control Engineering of China, 2006, 13(2): 117~119. (in Chinese)
- 3 张同双,陈锋,李晓勇,等. 航天测量船 INS/GPS/DVL 组合导航系统容错滤波方法[J]. 中国惯性技术学报,2006, 14(5):21~23.  
Zhang Tongshuang, Chen Feng, Li Xiaoyong, et al. Fault-tolerance filtering of TT&C ship's INS/GPS/DVL integrated navigation [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2006,14(5):21~23. (in Chinese)
- 4 刘剑慰,姜斌. 基于卡尔曼滤波的 GPS 导航系统故障检测[J]. 东南大学学报:自然科学版,2008, 38(11):46~49.  
Liu Jianwei, Jiang Bin. Fault detection in GPS navigation system based on Kalman filter [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2008, 38(11):46~49. (in Chinese)
- 5 冯斌. AgGPS132 定位测量技术研究[J]. 农业机械学报, 2002, 33(6):83~85.  
Feng Bin. Study on technology of AgGPS132 positioning measurement [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(6):83~85. (in Chinese)
- 6 刘思峰,党耀国,方志耕,等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,2004.