

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.030

# 低速智能农业车辆多分辨率自适应测速系统设计\*

田光兆 安秋 姬长英 顾宝兴 王海青 赵建东

(南京农业大学工学院, 南京 210031)

**摘要:** 根据智能化农业车辆低速工作的特点,采用 CAN 总线通信技术和多线程技术,设计并实现了基于脉冲式多普勒雷达的智能测速系统。通过速度分级和可变滑窗灰色预测,为系统建立了多分辨率自适应机制,在保证测量精度的同时降低其对系统资源的消耗。试验表明:启动分辨率自适应机制后,车辆速度为 0.2 m/s 时,测量平均误差为 1.45%,分辨率发生器工作频率降低 76.7%;车辆速度为 0.8 m/s 时,测量平均误差降低到 0.61%,分辨率发生器工作频率降低 90.0%。变速运动过程中,能够获得 9.6 Hz 的稳定输出频率,同时大幅降低分辨率发生器工作频率。

**关键词:** 农业车辆 多普勒雷达 多分辨率 自适应测速 CAN 总线 可变滑窗灰色预测

**中图分类号:** S219.1; TN953+.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)02-0159-06

## Design of Multiresolution Adaptive Speed Measurement System for Low-speed Intelligent Agricultural Vehicle

Tian Guangzhao An Qiu Ji Changying Gu Baoxing Wang Haiqing Zhao Jiandong

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

**Abstract:** A pulse Doppler radar based real-time speed measurement system was designed by using CAN bus communication technology and multithreading technology according to the low speed characteristic of intelligent agricultural vehicle. In order to obtain a high precision result with the least system resource consumption, the multiresolution adaptive policy was designed by dividing speed level and variable sliding-window gray prediction. Experiments showed that the average error was 1.45% and the working frequency of resolution generator was reduced by 76.7% after adaptive policy started when the speed of vehicle was 0.2 m/s. The average error was 0.61% and the working frequency of resolution generator was reduced by 90.0% after policy started when the speed of vehicle was 0.8 m/s. The output frequency of system was steady 9.6 Hz and the frequency of resolution generator was dramatically reduced during variable speed movement.

**Key words:** Agricultural vehicle Doppler radar Multiresolution Adaptive speed measurement CAN bus Variable sliding-window gray prediction

### 引言

智能化农业车辆作为精准农业智能作业系统的移动平台,必须具有测量精度高、实时性强、可靠易

用的对地测速系统。这是保证智能测产系统、变量施肥施药系统、精密播种监控系统等其他子系统精准工作的前提。因此,智能化农业车辆实时测速系统的设计是至关重要的一个环节。针对农业车辆低

收稿日期: 2012-02-26 修回日期: 2012-03-23

\* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2006AA10Z259)、中央高校基本科研业务费资助项目(KYZ201006)和南京农业大学青年科技创新基金资助项目(KJ09030)

作者简介: 田光兆, 博士生, 主要从事车辆导航技术研究, E-mail: tianneer@foxmail.com

通讯作者: 姬长英, 教授, 博士生导师, 主要从事精确农业理论与技术研究, E-mail: chyji@njau.edu.cn

速工作的特点,目前常用的测速方法有标杆测速法、轮速传感器测速法和 GPS 测速法<sup>[1]</sup>。标杆测速法是通过计时工具计算作业车辆通过固定标杆的时间,再根据速度、距离和时间之间的关系计算出作业车辆的平均速度<sup>[2]</sup>。轮速传感器测速法是通过霍尔传感器或光电编码器等测量单位时间内的车轮转动角度,然后换算为作业车辆的前进速度<sup>[3]</sup>。GPS 测速法根据其原理不同,又可分为多普勒观测值测速法、位置差分测速法和载波相位中心差分测速法<sup>[4-5]</sup>。它们均可以通过解析 GPS 接收机输出的 NMEA 语句来获取车辆的即时速度。标杆测速法简单易行,但是只能获取车辆平均速度,无法获取即时速度;轮速传感器测速法能获得较为准确的车轮转动角速度,但是由于地面土质松软、轮胎滑移等因素的影响,测量车辆对地速度时误差较大;GPS 测速法测量精度高,但是卫星信号一旦被山坡或树木所遮挡,该方法立即失效。

脉冲式多普勒测速雷达作为一种新的测速工具,具有测量精度高、不易受自然环境干扰等特点<sup>[6]</sup>。对于多普勒雷达信号的处理方式,已有学者作了相关研究<sup>[7-8]</sup>。本文采用脉冲式多普勒雷达和 CAN 总线技术,设计基于灰色预测理论的分辨率自适应测速系统,旨在利用经济实用的硬件设备,在保证测量精度的同时降低系统负荷,使系统稳定工作。

## 1 测速原理

多普勒雷达工作时,雷达的发送器发出频率为  $f_s$  的雷达波,波速  $w$  为常量。假设某一物体相对于雷达的运动速度为  $v$ 。由于多普勒效应,雷达的接收器收到运动物体反射回来的回波频率将是 2 次多普勒效应叠加后的频率,即变为  $f_r$ 。那么多普勒频移可表示为<sup>[9]</sup>

$$f_d = f_r - f_s = \frac{2v}{w+v} \approx \frac{2f_s}{w}v \quad (1)$$

由式(1)得

$$v = \frac{w}{2f_s}f_d \quad (2)$$

若雷达波与地平面夹角为  $\alpha$  (图 1),则牵引力方向的速度可表示为

$$v_f = \frac{v}{\cos\alpha} = \frac{w}{2f_s \cos\alpha}f_d \quad (3)$$

## 2 系统设计

### 2.1 设计思想

智能化农业车辆导航采用的是基于 CAN 总线

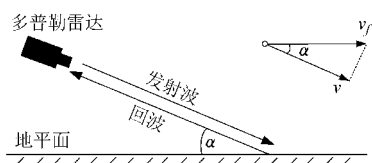


图 1 多普勒雷达的测速原理图

Fig. 1 Schematic of speed measuring with Doppler radar

的分布式管理系统。由于设计的测速系统是作为原有导航系统的一个子系统来使用,所以它也应该作为一个独立的 CAN 节点连接到原有的 CAN 总线上,其系统结构如图 2 所示。

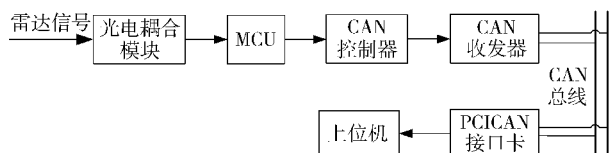


图 2 测速系统结构图

Fig. 2 Structure of speed measurement system

多普勒雷达输出为脉冲信号,其脉冲频率即为多普勒频移  $f_d$ 。由于车辆移动速度较低,通过高优先级定时器产生一个基准时长  $\delta$ ,然后用此基准时长来测算单个脉冲的周期,最后将脉冲周期转换为频率,即周期测量法<sup>[10]</sup>。该定时器称为分辨率发生器,基准时长  $\delta$  称为测量分辨率。

若分辨率过大,会导致测量精度降低;分辨率过小,会导致分辨率发生器工作频繁,对 MCU 系统资源的消耗增加,同时也影响到其他中断程序的执行(如 CAN 总线数据接收中断)。

### 2.2 硬件设计

从经济实用方面考虑,选用 STC89C52 型单片机作为测速系统的 MCU。选用研华 UNO-3084 型工控机作为上位机,通过 PCI5810i CAN 总线接口卡,将上位机接入 CAN 总线。选用美国 DjRVS II 型多普勒雷达测量车辆行驶速度和 AHRS 航姿传感器测量雷达波与地面夹角  $\alpha$ 。

### 2.3 软件设计

#### 2.3.1 下位机软件设计

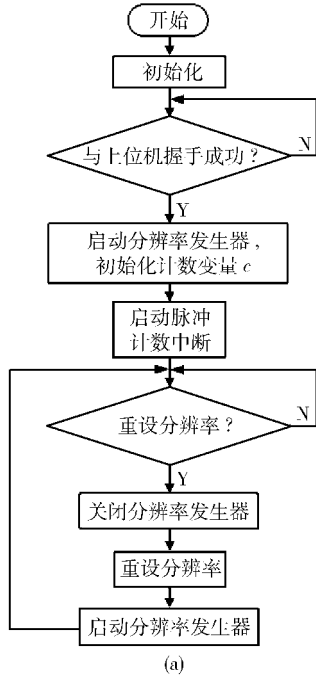
下位机程序采用 C 语言开发完成,其主程序工作流程图如图 3a 所示。

计数变量  $c$  用来统计分辨率发生器工作次数。分辨率发生器每工作一次,变量  $c$  自增 1。

脉冲计数中断的主要功能是检测雷达的输出脉冲,并计算脉冲周期,将脉冲周期转换为脉冲频率,并通过 CAN 总线发给上位机,其流程图如图 3b 所示。

外部中断 0 的主要功能是接收并解读上位机通过 CAN 总线发回的命令信息。如果需要重设

测量分辨率,则通知主程序,其流程图如图 3c 所示。



(a)

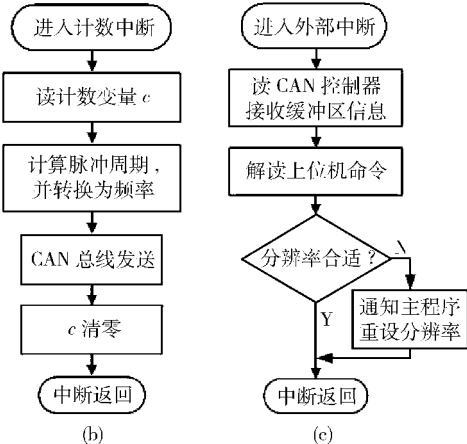


图 3 下位机程序流程图

Fig. 3 Flow chart of guest node

(a) 主程序 (b) 计数中断程序 (c) 外部中断程序

### 2.3.2 上位机软件设计

上位机程序采用 C++ 开发完成。为了保证程序高效稳定地运行,设计中采用了多线程处理技术,其程序流程图和软件界面分别如图 4、5 所示。

### 2.3.3 CAN 通信协议制定

测速系统中使用 CAN 2.0B Pelican 模式的标准数据帧。总线通信速率设定为 1 Mb/s。下位机发送的速度数据帧和上位机发送的分辨率调整数据帧格式分别如表 1、2 所示。

表 1 下位机发送的速度数据帧格式

Tab.1 Speed data frame from guest node

字节 1	字节 2~3	字节 4~5	字节 6
0x03	报文 ID	多普勒频移	分辨率等级

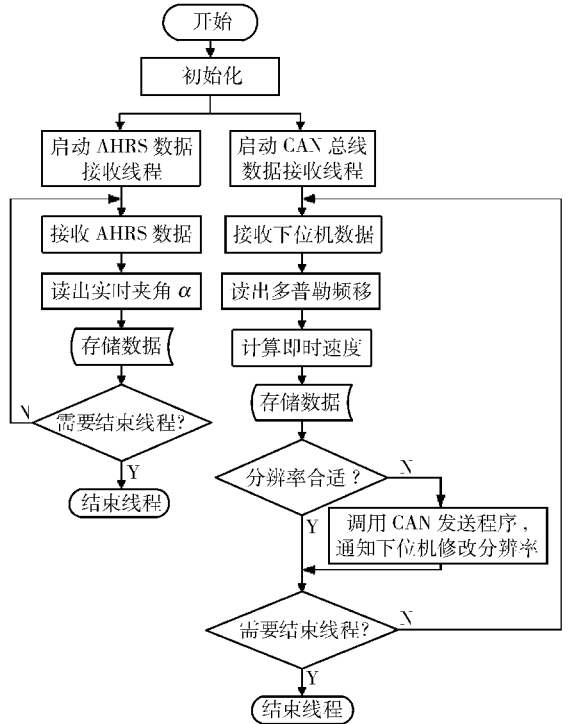


图 4 上位机程序流程图

Fig. 4 Flow chart of host node

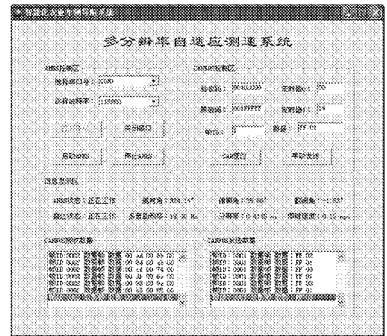


图 5 上位机软件界面

Fig. 5 Interface of host node

表 2 上位机发送的分辨率调整数据帧格式

Tab.2 Adjustment of resolution data frame from host node

字节 1	字节 2~3	字节 4	字节 5~6	字节 7~8
0x05	报文 ID	分辨率调整标记	分辨率发生器初值	脉冲计数器初值

## 3 分辨率自适应机制

### 3.1 速度分级

由于作业对象和作业空间的特殊性,农业车辆作业时速度较低。将 0.1~1.0 m/s 的常用速度区间分为 0~9 范围内 10 个等级。每一个速度等级对应一个测量分辨率等级,如图 6 所示。当速度由一个等级变化到另外一个等级时,需要通知下位机及时调整测量分辨率。

### 3.2 可变滑窗灰色预测

GM(1,1) 灰色预测理论具有建模数据需求量

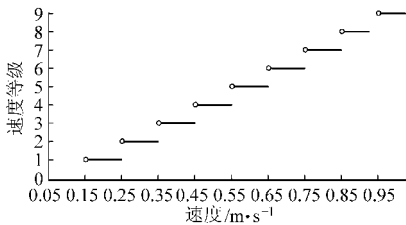


图6 速度等级划分

Fig. 6 Dividing speed level

小、短期预测精度高等优点<sup>[11]</sup>。假设通过 CAN 总线接收到下位机发送的原始多普勒速度序列样本为

$$\mathbf{Y}^{(0)} = [y^{(0)}(1) \quad y^{(0)}(2) \quad \cdots \quad y^{(0)}(n)]^T \quad (4)$$

为了降低干扰数据对有效数据的影响,对其进行一次累加,得到  $\mathbf{Y}^{(0)}$  的 1-AGO 序列为

$$\mathbf{Y}^{(1)} = [y^{(1)}(1) \quad y^{(1)}(2) \quad \cdots \quad y^{(1)}(n)]^T \quad (5)$$

其中  $y^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k y^{(0)}(i)$  ( $k=1, 2, \dots, n$ )

则 GM(1,1) 的表达式为一阶方程

$$\frac{dy^{(1)}}{dt} + ay^{(1)} = b \quad (6)$$

按照最小二乘法求出  $a, b$  的估计值

$$\begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \end{bmatrix} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{Y}_N \quad (7)$$

其中

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(y^{(1)}(1) + y^{(1)}(2)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(y^{(1)}(2) + y^{(1)}(3)) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}(y^{(1)}(n-1) + y^{(1)}(n)) & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Y}_N = [y^{(0)}(2) \quad y^{(0)}(3) \quad \cdots \quad y^{(0)}(n)]^T \quad (8)$$

将  $a, b$  的估计值代入式(6)即可得到 GM(1,1) 的白化方程。白化方程的解即为时间响应函数。离散化后,可得出预测模型

$$\begin{cases} \hat{y}^{(1)}(k+1) = \left(y^{(0)}(1) - \frac{\hat{b}}{\hat{a}}\right) e^{-\hat{a}k} + \frac{\hat{b}}{\hat{a}} \\ \hat{y}^{(0)}(k+1) = \hat{y}^{(1)}(k+1) - \hat{y}^{(1)}(k) = \\ \left(y^{(0)}(1) - \frac{\hat{b}}{\hat{a}}\right) [e^{-\hat{a}k} - e^{-\hat{a}(k-1)}] \end{cases} \quad (9)$$

通过该模型,可以根据当前已测的数据预测出下一时刻车辆的速度  $v_r(k+1)$ 。此数据将用来校验下一时刻车辆实测速度的有效性。

但是随着时间的推移,样本数据  $\mathbf{Y}^{(0)}$  会逐渐增多。用过多过旧的样本数据来预测,不但会影响灰色预测的速度,还会影响预测精度。为了避免此情况的发生,需要建立滑窗机制,通过滑窗来剔除老化的样本数据,如图7所示。

由于农业车辆作业时速度变化缓慢,可以设定

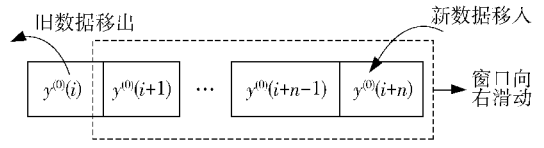


图7 滑窗工作示意图

Fig. 7 Principle of sliding window

窗口大小为

$$n = \text{int}(f_{d\max}) \quad (10)$$

式中  $\text{int}(x)$ ——四舍五入取整函数

$f_{d\max}$ ——区间内最大多普勒频移

随着速度的变化,窗口的大小也随之变化,所以称为可变滑窗灰色预测。

### 3.3 自适应方案

由于农业车辆工作环境恶劣,地面颠簸和本身的机械振动都会带来实测数据的短暂抖动。为了避免干扰因素造成分辨率的误调整,在获取下一刻车辆的实测速度  $v_f(k+1)$  后,需判断

$$|v_f(k+1) - v_r(k+1)| \leq 0.05 \quad (11)$$

是否成立。若式(11)成立,则说明测量数据有效;反之说明实测数据可能受到干扰,波动较大。

$$L(v_f(k+1)) = L(v_r(k)) \quad (12)$$

式中  $L(x)$ ——对速度  $x$  进行取速度等级运算

若式(12)成立,则说明当前分辨率合理,无需修改;反之,则通知下位机修改分辨率。分辨率的设置原则:保证对当前速度区间内最小脉冲周期的测量误差小于1%。

设当前速度区间内最大多普勒频移为  $f_{d\max}$ , 最小脉冲周期为  $T_{\min}$ , 期望的输出频率为 10 Hz, 则脉冲计数器容量  $N$  和最大多普勒频移  $f_{d\max}$  的关系为

$$N = \text{int} \left( \frac{f_{d\max}}{10} \right) \quad (13)$$

分辨率可表示为

$$\delta = 0.01 T_{\min} = \frac{0.01}{f_{d\max}} \quad (14)$$

则分辨率发生器的工作频率可表示为

$$f_g = \frac{1}{N\delta} = \frac{f_{d\max}}{0.01 \text{int} \left( \frac{f_{d\max}}{10} \right)} \quad (15)$$

根据式(15)计算结果,制定车辆在雷达波方向的速度与分辨率对照表(表3)。在使用过程中,根据该表调整分辨率发生器和脉冲计数器初值,即可实现测量分辨率的自动调整。

## 4 试验及分析

### 4.1 匀速试验

为验证设计的测速系统测量精度,需要建立一



表 3 车辆在雷达波方向速度与分辨率对照

Tab. 3 Relationship between revolution and speed in direction of radar wave

车辆在雷达波方向速度 $v/m \cdot s^{-1}$	最大多普勒频移 $f_{dmax}/Hz$	最小脉冲周期 $T_{min}/ms$	测量分辨率 $\delta/ms$	分辨率等级	计数器容量 $N$	计数器初值	分辨率发生器初值
0.10 ~ 0.15	24.13	41.4508	0.4145	0	2	FFFE	FD03
0.15 ~ 0.25	40.21	24.8705	0.2487	1	4	FFFC	FC6B
0.25 ~ 0.35	56.29	17.7646	0.1776	2	6	FFFA	FC29
0.35 ~ 0.45	72.38	13.8169	0.1382	3	7	FFF9	FC84
0.45 ~ 0.55	88.46	11.3048	0.1130	4	9	FFF7	FC56
0.55 ~ 0.65	104.54	9.5656	0.0957	5	10	FFF6	FC8E
0.65 ~ 0.75	120.63	8.2902	0.0829	6	12	FFF4	FC6B
0.75 ~ 0.85	136.71	7.3148	0.0731	7	14	FFF2	FC50
0.85 ~ 0.95	152.79	6.5449	0.0654	8	15	FFF1	FC77

个标准参照系。试验中,将 AHRS 传感器紧固在雷达外侧,将雷达以  $\alpha = (35 \pm 3)^\circ$  安装在高精度移动机器人上。机器人分别以 0.2、0.4、0.6 和 0.8 m/s 的速度向前作匀速直线运动,时长 20 s。试验结果如表 4 所示。

从表 4 中可以看出,未启动分辨率自适应机制时,按照常规方法测得的速度数据误差较大。在速度 0.2 m/s 时,平均误差为 5.20%;0.8 m/s 时,平均

误差为 1.55%。而启动分辨率自适应机制后,速度 0.2 m/s 时,平均误差为 1.45%;0.8 m/s 时,平均误差为 0.61%。

表 4 中  $c$  均值直接反映了分辨率发生器的工作频率。启动分辨率自适应机制后,在速度 0.2 m/s 时,分辨率发生器频率降低了 76.7%;0.8 m/s 时,降低了 90.0%。分辨率发生器工作频率的降低将会减少中断冲突,使整个系统负荷降低,运行更稳定。

表 4 匀速试验结果

Tab. 4 Results of constant speed experiment

实际速度 $/m \cdot s^{-1}$	未启动分辨率自适应机制					启动分辨率自适应机制				
	平均输出频率/Hz	测量平均值/ $m \cdot s^{-1}$	标准差	平均误差/%	$c$ 均值	平均输出频率/Hz	测量平均值/ $m \cdot s^{-1}$	标准差	平均误差/%	$c$ 均值
0.2	24.1	0.2104	0.0249	5.20	150	9.8	0.2029	0.0161	1.45	35
0.4	47.8	0.4125	0.0211	3.13	115	9.5	0.4035	0.0130	0.87	23
0.6	74.0	0.6168	0.0189	2.80	114	9.6	0.6037	0.0095	0.62	14
0.8	98.8	0.8124	0.0163	1.55	110	9.8	0.8049	0.0111	0.61	11

4.2 变速试验

将 AHRS 传感器紧密固定在雷达外侧,将雷达以  $\alpha = (35 \pm 3)^\circ$  安装在移动车辆上作变速运动。速度的变化范围为 0 ~ 1.5 m/s。

在下位机发送的 CAN 2.0B Pelican 标准数据帧中加入实际的分辨率等级标记,以便上位机观察分辨率是否根据速度的变化自动调整。由图 8 可以看出,变速运动过程中车辆振动剧烈,产生的数据波

动幅度较大。试验结果如图 9、10 所示。

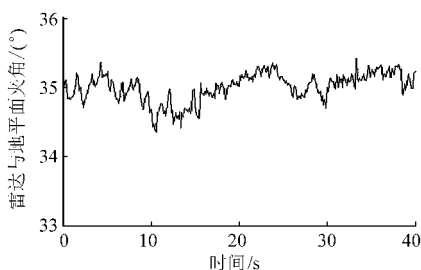


图 8 夹角  $\alpha$  的变化曲线

Fig. 8 Changing of  $\alpha$

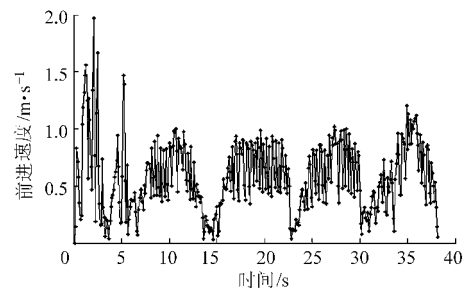


图 9 速度随时间的变化曲线

Fig. 9 Relationship between speed and time

从图 9 可看出,尽管速度变化剧烈,但是与表 4 中未启动分辨率自适应机制的数据相比,其输出频率相对稳定。40 s 内的平均输出频率为 9.6 Hz。从图 10 可知,下位机分辨率等级的变化与速度的变化趋势一致,分辨率自适应机制能够正常发挥作用。

自适应机制启动前、后,计数变量  $c$  与速度的关系如表 5 所示。通过自适应机制的处理,分辨率发

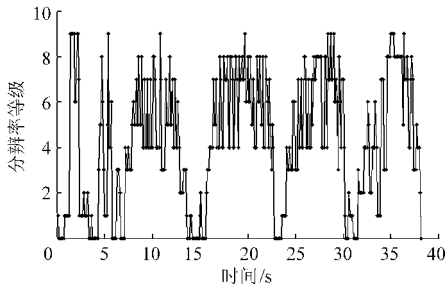


图10 分辨率随时间自动调整曲线

Fig. 10 Relationship between resolution and time

生器工作频率显著下降。

## 5 结论

(1)设计的测速系统硬、软件能够正常工作,能够对低速智能农业车辆行进速度测定。

**表5 分辨率发生器频率变化**  
**Tab. 5 Changing of revolution generator frequency**

车辆前进速度 $v_f/m \cdot s^{-1}$	启动前 $c$ 均值	启动后 $c$ 均值	分辨率发生器 频率降低率/%
0.1	181	90	50.3
0.2	150	35	76.7
0.3	99	22	77.8
0.4	115	23	80.0
0.5	112	18	83.9
0.6	114	14	87.7
0.7	115	13	88.7
0.8	110	11	90.0
0.9	105	9	91.4

(2)设计的多分辨率自适应机制能够有效提高测量精度,降低系统负荷,系统运行稳定,同时能够获得稳定的输出频率。

## 参 考 文 献

- 孟志军,刘卉,付卫强,等. 农田作业机械测速方法试验[J]. 农业工程学报,2010,26(6):141~145.  
Meng Zhijun, Liu Hui, Fu Weiqiang, et al. Evaluation of ground speed measurements for agricultural machinery [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(6): 141~145. (in Chinese)
- 史智兴. 精播机排种性能检测系统及其关键计算的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2002.  
Shi Zhixing. Study on the detection system and key techniques for seeding quality of precision planter [D]. Beijing: China Agricultural University, 2002. (in Chinese)
- 陈育中. 霍尔传感器测速系统的设计[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(30): 7 529~7 532.  
Chen Yuzhong. Design of the velocity-measuring system of hall sensor [J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(30): 7 529~7 532. (in Chinese)
- 何海波, 杨元喜, 孙中苗. 几种 GPS 测速方法的比较分析[J]. 测绘学报, 2002, 31(3): 217~221.  
He Haibo, Yang Yuanxi, Sun Zhongmiao. A comparison of several approaches for velocity determination with GPS [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2002, 31(3): 217~221. (in Chinese)
- 黄小英, 陈树人. 基于 GPS 技术的联合收割机测速探索[J]. 农机化研究, 2009, 25(12): 155~157.  
Huang Xiaoying, Chen Shuren. Explore research on determination of combine velocity based GPS [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 25(12): 155~157. (in Chinese)
- Mikael B L. High performance Doppler-inertial navigation experiment result [C] // OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition, 2000, 2: 1 449~1 456.
- 申越. 多普勒测速系统的信号处理技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.  
Shen Yue. Signal processing technology in Doppler velocity measurement system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese)
- 白宏阳, 薛晓中, 陈帅, 等. 多普勒雷达测速信号滤波方法分析[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(3): 89~91.  
Bai Hongyang, Xue Xiaozhong, Chen Shuai, et al. The analysis of data filter for Doppler radar [J]. Fire Control and Command Control, 2011, 36(3): 89~91. (in Chinese)
- 刘丽华. 多普勒雷达测速系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.  
Liu Lihua. Study on Doppler radar speed measurement system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- 张齐. 单片机原理与应用系统设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- 刘思峰, 党耀国, 方志耕. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.