

积分滤波非线性拟合科氏流量计驱动系统改进

徐同旭¹, 黄丹平^{1,2,3}, 于少东³, 郭康¹, 侯山山¹

(1. 四川理工学院机械工程学院, 四川 自贡 643000; 2. 人工智能四川省重点实验室, 四川 自贡 643000;
3. 过程装备与控制工程四川省高校重点实验室, 四川 自贡 643000)

摘要:稳定振动的流量管保证着科氏流量计流量测量的准确性,而维持流量管振动的关键是流量计驱动系统。针对科氏流量计模拟驱动电路起振速度慢、受随机干扰影响振动不稳定问题,研发基于积分滤波非线性拟合法改进驱动系统。改进驱动系统采用积分滤波方法削弱传感器信号中随机干扰,应用非线性拟合法对积分信号进行频率估计,然后合成驱动信号驱动流量管振动。改进驱动系统中积分滤波可以有效抑制随机干扰,非线性拟合法考虑信号整体不受个别采样信号影响,提高频率测量精度与增强振动稳定性。仿真实验表明,基于积分滤波的非线性拟合法具有较高的频率测量精度,适用于流量计起振频率估计与振动频率监测。实际改进驱动系统测试表明,改进驱动系统提高了流量计起振速度,增强振动稳定性。

关键词:科氏流量计;改进驱动系统;积分滤波;非线性拟合;合成信号驱动

中图分类号:TH814.6

文献标志码:A

引言

科氏质量流量计是发展迅速的新型质量流量计之一,因其测量流体质量具有高准确度、较长使用寿命与不受流体压强、腐蚀性影响的特点,在工业上得到广泛应用。科氏流量计^[1]主要由两部分组成,其一为一次仪表(又称流量传感器),由流量管、速度传感器、温度检测传感器、电磁激振器组成;其二为二次仪表(又称流量变送器),由信号处理系统、显示模块和驱动系统组成,其中驱动系统为流量管稳定振动提供能量,是流量计正常、准确工作的前提。

国外对科氏流量计驱动系统研究,主要以专利形式出现,国内以徐科军为代表,在科氏流量计驱动方法上作了一些研究,如科氏流量计模拟驱动方法研究^[1]、基于FPGA的科氏流量计驱动技术实现^[2]等。国内厂商基本使用模拟驱动系统驱动流量管振动,模拟驱动系统是自激振动系统,易受干扰信号影响,导致流量管起振时间慢与振动不稳定,从而影响流量测量的准确性。

波形合成驱动方法可以快速提高流量管起振时间与增强振动稳定性,可有效避免随机干扰影响,其信号频率估计至关重要。因此,为提高流量管起振速度与增强振动稳定性,提出在积分滤波基础上,采用非线性

收稿日期:2017-09-14

基金项目:过程装备与控制工程四川省高校重点实验室开放基金项目(GK201602)

作者简介:徐同旭(1991-),男,江苏淮安人,硕士生,主要从事智能仪器仪表方面的研究,(E-mail)1966500807@qq.com

通信作者:黄丹平(1968-),男,四川自贡人,副教授,博士,主要从事测控技术方面的研究,(E-mail)18739185581@163.com

拟合方法估计信号频率,然后合成驱动信号驱动流量管振动。

1 模拟驱动系统及改进方法

在模拟驱动系统基础上改进驱动系统的流程如图1所示。模拟驱动系统由一次仪表、初级放大电路、低通滤波、自动增益控制模块、功率放大模块组成,该系统为自激振动^[3-8]系统。模拟驱动系统自动增益控制模块实时跟随传感器信号,易跟随信号中干扰,导致驱动信号不稳定。因而在改进驱动系统中,采用积分滤波与非线性拟合频率估计算法,合成驱动信号驱动流量管振动。

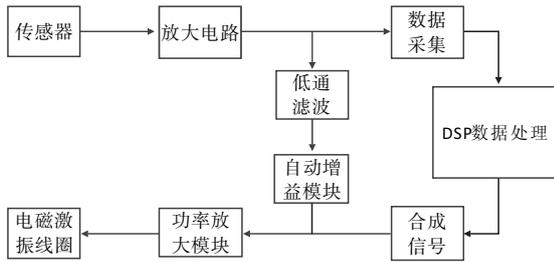


图1 科氏流量计改进驱动系统

合成驱动信号流程如图2所示。在模拟驱动工作时,采集传感器数据,对其进行积分滤波与频率预估计,然后对积分滤波后数据进行非线性拟合,估计出频率值,并与上次频率值进行对比,判断是否满足频率精度要求。若满足则合成驱动信号,通过功放直接驱动流量管;若不满足,则继续下一轮频率估计。改进部分不仅在起振初期工作,在流量测量过程中一直运行。若频率发生变化则可自动调整驱动信号频率,实现对流量管主频跟踪及驱动流量管稳定振动。

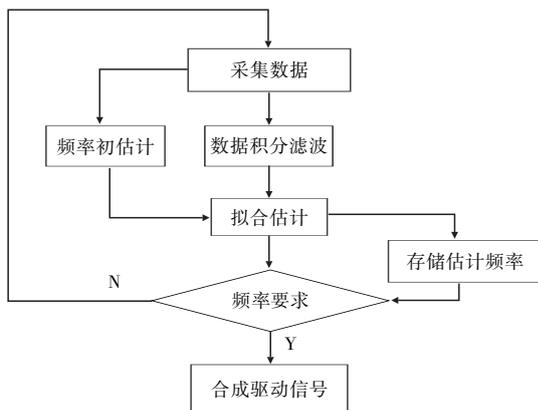


图2 合成驱动信号流程

2 基于积分滤波非线性拟合法

2.1 信号频率对起振的影响

不同频率合成信号驱动流量管时,其传感器信号幅值包络及起振时间有所区别。模拟驱动传感器输出信号可参考文献[9]里面的数据波形,现对中测科技有限公司的TH010型流量计进行测试,使用几个频率值驱动信号驱动流量管,实验结果如图3所示。由图3可知,在一定频率范围内不同频率信号驱动,传感器信号峰值不同,且稳定快慢有所差别,只有接近主频信号驱动更快。

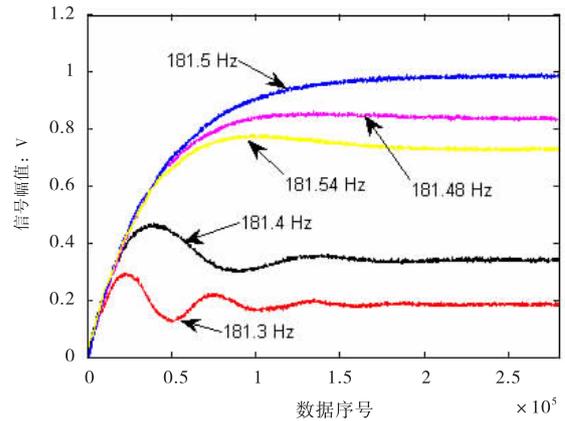


图3 传感器信号幅值包络曲线

实际模拟驱动系统,传感器信号滤波后仍会带有随机干扰,这些干扰将影响频率估计精度,进而影响合成信号驱动效果。积分滤波可以有效削弱信号中随机干扰成分,故采用积分滤波法对信号进行滤波处理。

2.2 积分滤波

流量管的快速起振、稳幅与信号频率密切相关。在合成信号时,频率估计的准确度至关重要。采集信号中随机干扰信号,其信号幅值在0 mV ~ 35 mV之间,大幅值干扰信号将影响流量计频率估计精度。

对于采集信号,相邻离散数据所受干扰同正负概率不大,连续几个采集数据所受干扰同正负的概率更小。利用连续采集数据所受干扰同正负的小概率事件,对其进行积分(求和),随机噪声相互削弱,从而在积分信号中减少噪声影响。

对于幅值为A、频率 ω 、初相 φ 的流量计信号 $x(t) = A\sin(\omega t + \varphi)$,其在区间 $[t, t + L]$ 内的积分为:

$$-\frac{A}{\omega} \cos(\omega t + \varphi) \Big|_t^{t+L} =$$

$$-\frac{A}{\omega}[\cos(\omega(t+L)+\varphi)-\cos(\omega t+\varphi)]+C_0 \Leftrightarrow b\sin(\omega t+\alpha)+C \quad (1)$$

在离散采样信号 $x(n) = A\sin(\omega n\Delta t + \varphi)$ 中,算法实现步骤如下:

第一步,离散采集 $N(N > 100)$ 个数据,设置积分数据长度为 10。

第二步,积分后数据 $y(k), 1 \leq k \leq N-9$, 其中积分值为:

$$y(k) = \sum_{n=k}^{k+9} x(n) \quad (2)$$

叠加随机干扰的正弦信号与进行积分滤波后的仿真结果如图 4 所示。从仿真实验可知,积分滤波有效削弱了随机干扰对信号的影响。结合公式(1),积分后的信号为与原信号同频率正弦信号,且信号整体产生固定偏移。故可用积分后信号进行频率估计,且因随机干扰的削弱,有利于提高频率测量精度。

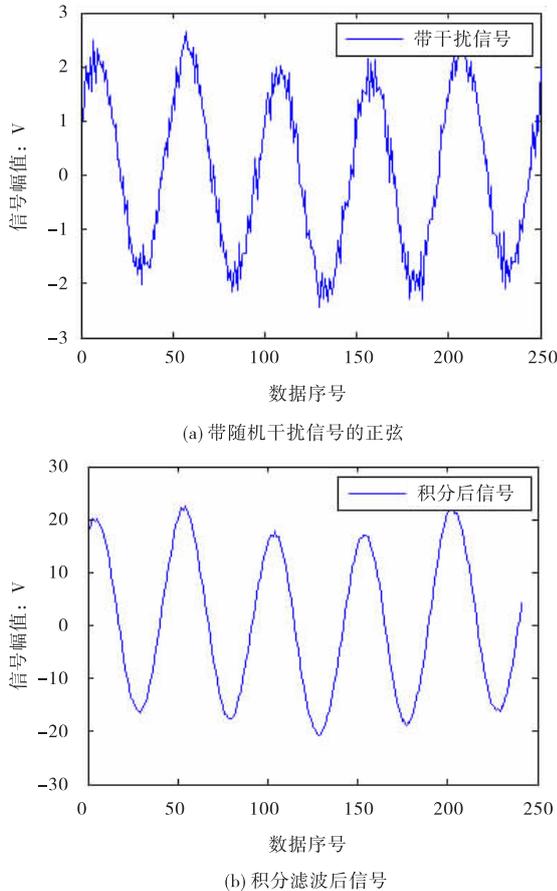


图4 积分滤波仿真实验结果

2.3 非线性拟合法

频率估计^[9-15]经典方法过零检测法,算法简单快速,

但其在估计信号频率时,要求信号采集数据长度大于 1 倍周期,且对数据零点稳定性要求高。然而随机干扰对零点信号有影响,从而影响过零检测法频率测量精度。因非线性拟合法考虑信号整体,不受信号零点值的影响,故而采用非线性拟合方法来测量信号频率。

非线性拟合法^[16-17]是数据关系预测算法,常用来分析数据之间的关系。常用的拟合函数为二次多项式、三次多项式、切比雪夫多项式和高阶多项式,通常使用时未知数据变量之间的关系。在科氏流量计信号处理中,由于传感器输出信号为带干扰正弦信号,其理论波形已知,故可以直接使用正弦函数对积分后信号进行拟合。设拟合函数为:

$$z(t) = B\sin(\omega t + \gamma) + d \quad (3)$$

拟合函数的求解,即是求出使最小二乘函数 $G(B, \omega, \gamma, d)$ 值最小的参数 B, ω, γ 和 d , 其中最小二乘函数为:

$$G(B, \omega, \gamma, d) = \sum_{n=1}^N (z(n\Delta t) - y(n))^2 \quad (4)$$

对于公式(4)中最小二乘函数最小值求解,若直接搜索四维参数空间,数据计算量庞大。对积分信号去偏置,则公式(4)将变为:

$$H(B, \omega, \gamma) = B \sum_{n=1}^N B\sin^2(\omega n\Delta t + \gamma) - \sum_{n=1}^N 2By(n)\sin(\omega n\Delta t + \gamma) + \sum_{n=1}^N y^2(n) \quad (5)$$

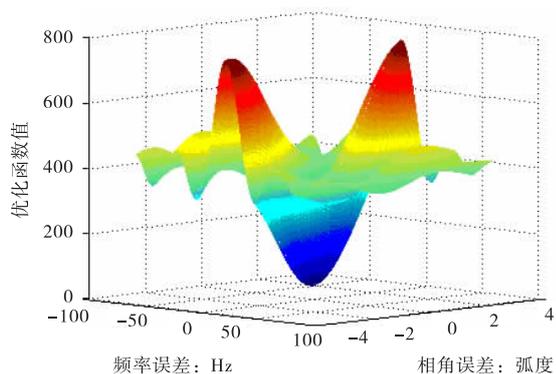
显然,此函数值与幅值 B 是线性相关,拟合信号相当于非偏置信号压缩映射,不影响信号频率、相位。故可以简化最小二乘函数,可得优化函数:

$$S(\omega, \gamma) = B_0 \sum_{n=1}^N B_0\sin^2(\omega n\Delta t + \gamma) - \sum_{n=1}^N 2B_0y(n)\sin(\omega n\Delta t + \gamma) + \sum_{n=1}^N y^2(n) \quad (6)$$

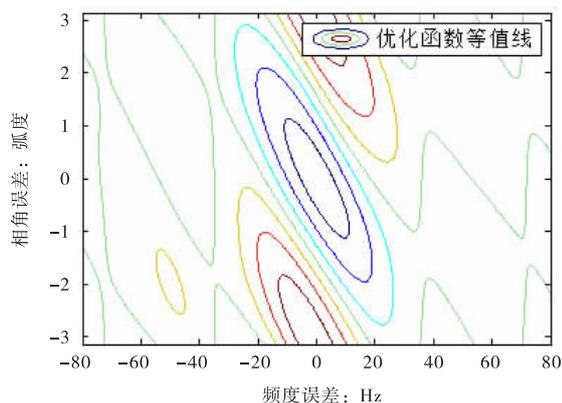
其中 B_0 为去偏置积分信号最大值。此时,频率、相位参数求解变为二维参数空间搜索参数值,数据计算量相对于四维参数空间极大降低。

频率、相位参数空间下优化函数取值曲面如图 5 所示。由图 5(a)可知,优化函数有唯一最小值,多个极大值。结合图 5(b)优化函数等值线图,可知当相位在一定范围取定值、频率在一定取值区间时,优化函数值是频率的凹函数,可取到最小值。同样,当频率在一定范

围取定值、相位在一定区间取值时,优化函数值也是相位的凹函数,可取到最小值。



(a) 优化函数曲面图



(b) 优化函数等值线图

图5 参数空间下优化函数值

因此,参数搜索采用二分法,分别对频率、相位进行搜索,求出满足频率、相位精度要求的参数。积分后流量计信号非线性拟合法步骤如下:

Step 1 对积分后信号去偏置,设偏置参数 d_0 , 去偏置信号 $y^*(n) = y(n) - d_0$, 其中

$$d_0 = \frac{\max\{y(n)\} + \min\{y(n)\}}{2}$$

Step 2 过零检测法估计频率初始值 f_0 , 估计出相位初始值 γ_0 , $\omega_0 = 2\pi f_0$, 参考优化函数等值线, 给出频率参数区间 $[f_0 - 15, f_0 + 15]$ 、相位参数区间 $[\gamma_0 - 1.5, \gamma_0 + 1.5]$ 。

Step 3 设置频率搜索精度 $ef = 0.001$ Hz, 相位搜索精度 $e\gamma = 0.001$ 弧度。

Step 4 取相位区间边值 γ_1, γ_2 , 对给定频率搜索区间, 采用二分法, 计算优化函数 $S(\omega, \gamma)$ 数值, 得到满足频率精度的函数值 S_1, S_2 , 以及频率 f_1, f_2 。

Step 5 若 $|\gamma_1 - \gamma_2| \leq e\gamma$, 则转 Step 7, 否则转 Step 6。

Step 6 改变相位值 γ_1, γ_2 , 其中

$$\begin{cases} \gamma_1 = \gamma_1, \gamma_2 = (\gamma_1 + \gamma_2)/2, & S_1 \leq S_2 \\ \gamma_2 = \gamma_2, \gamma_1 = (\gamma_1 + \gamma_2)/2, & S_1 > S_2 \end{cases}$$

转 Step 4。

Step 7 搜索结束, 优化函数参数为 $\gamma = \gamma_1$, $\omega = 2\pi f_1$, 优化函数值为 S_1 。

在上述第3步中所给参数精度, 满足流量计合成信号驱动对频率精度要求, 可在100步以内得出满足精度要求的结果。

3 仿真实验

为进行对比, 采用过零检测法与本文算法进行仿真对比。表1为在信号频率为181 Hz、采样频率为9000 Hz、固定频率比(约49.723), 在不同信噪比水平下仿真实验。表2为同一信噪比水平, 不同频率比下仿真实验。

表1 不同信噪比算法频率估计仿真结果

| 信噪比/dB | 过零检测法/Hz | 本文算法/Hz |
|--------|----------|---------|
| 31.022 | 186.524 | 181.165 |
| 31.164 | 183.359 | 180.925 |
| 33.769 | 183.200 | 180.863 |
| 48.679 | 181.838 | 181.037 |
| 48.283 | 181.928 | 181.171 |
| 47.898 | 181.602 | 181.108 |

表2 不同频率比下算法频率估计仿真结果

| 频率比 | 信噪比/dB | 过零检测法/Hz | 本文算法/Hz |
|--------|--------|----------|---------|
| 33.149 | 31.808 | 180.010 | 181.128 |
| 41.927 | 30.213 | 183.608 | 181.003 |
| 47.329 | 32.100 | 182.713 | 181.377 |
| 81.768 | 32.679 | 175.270 | 180.038 |
| 89.871 | 31.246 | 224.440 | 183.993 |
| 93.247 | 31.741 | 227.385 | 184.324 |

由表1中数据可知, 在信噪比较小时, 测量精度较低, 但本文算法在几组实验中具有较高精度。表2中数据可知, 在不同频率比值下, 本文算法频率估计结果优于过零检测法, 在后面三组数据中, 过零检测法频率估计结果误差大。

为了确定不同频率比与信噪比下采样信号对算法估计值影响,在 181 Hz 信号频率下,通过改变采样频率(即改变频率比值),及在不同信噪比水平上进行 100 组仿真测试,结果如图 6 所示。

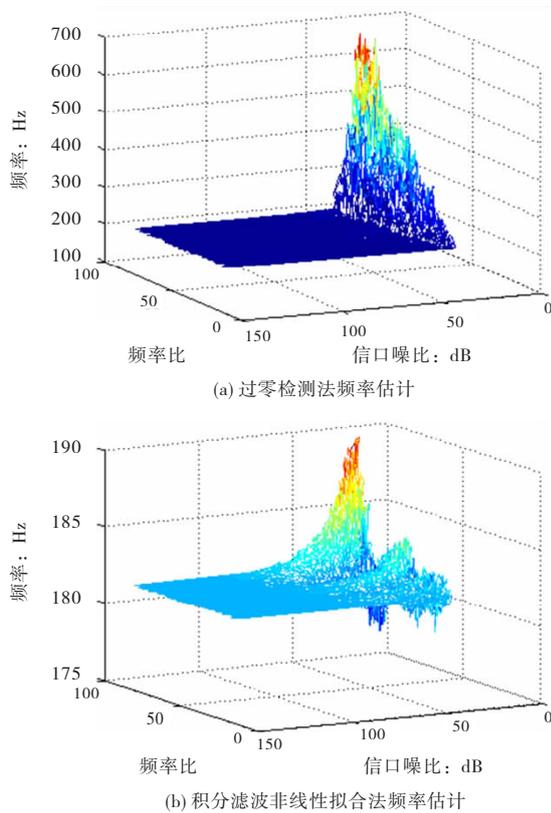


图 6 参数变化下算法频率估计仿真结果

对比图 6(a)与图 6(b)可知,在信噪比降低时,算法频率估计误差增大,且在低信噪比下,随着频率比的增加,频率估计误差具有变大趋势。尽管如此,基于积分滤波拟合算法在低信噪比下具有相对较高的频率估计精度。取仿真实验中三个信噪比水平,在不同频率比下算法估计的相对误差实验数据,结果如图 7 所示。

由图 7 可知,不同频率比下,基于积分滤波拟合算法频率估计值的相对误差小于过零检测法。此外,可看出在三组信噪比下,频率比对基于积分滤波拟合算法频率估计影响变化趋势,为驱动系统中采集数据时采样频率设置提供了依据。

通过以上仿真测试,基于积分滤波非线性拟合算法能有效提高频率估计精度,利于流量计起振速度提高,以及稳定振动时对频率变化的监测。

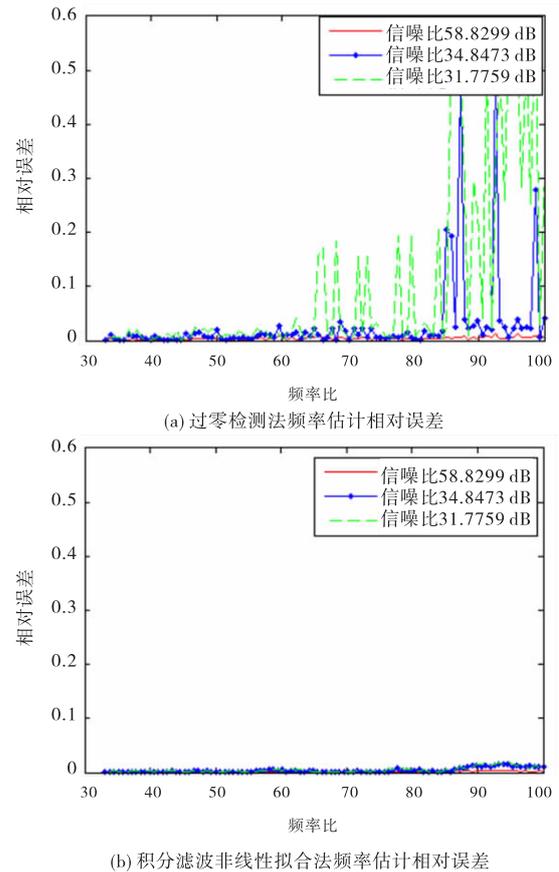


图 7 算法频率估计相对误差比较

4 改进驱动系统起振测试

四川中测科技发展有限公司 TH010 型流量传感器作为测试对象,流量计传感器流量管主频约为 181 Hz,流量计准确度 0.5 级,使用所研发改进驱动系统进行起振测试。测试中,采用 NI 的 PCI-1747U 数据采集卡采集传感器输出信号。

采集结束,导出驱动系统内部频率估计数据到 PC 机,同时将采集数据导入到 Matlab 中,以便于观察传感器信号起振时间曲线。图 8(a)为改进驱动系统流量管起振传感器信号曲线图,图 8(b)为频率估计曲线。在流量计上电后约 0.46 秒内,频率估计值远大于 181 Hz,在约 0.7 秒时传感器呈现出正弦波形,此后合成信号驱动流量管。图 8(b)只显示了合成信号驱动以后对传感器信号进行频率估计的结果。

文献[12]中模拟驱动以达到稳定幅值 80% 的时间作为流量管起振时间,其起振时间约为 22 秒。在模拟驱动系统下,TH010 型流量计传感器信号幅值达到稳定幅值

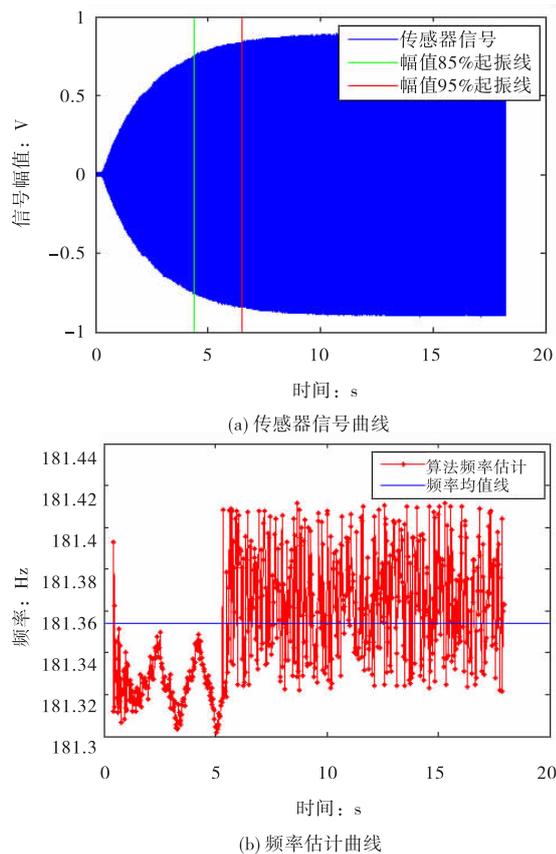


图8 起振曲线与频率估计曲线

80% 时间约 13 秒,从图 8(a)可知,改进驱动系统在稳定幅值 85%、95% 时起振时间均优于传统模拟驱动。

5 结束语

针对科氏流量计模拟驱动起振速度慢,受干扰信号影响导致振动不稳定问题,提出了基于积分滤波非线性拟合法估计信号频率,合成驱动信号驱动流量管振动的改进驱动系统。合成信号驱动方法避免了模拟驱动因干扰信号导致驱动不稳定问题,驱动流量管振动更稳定。积分滤波非线性拟合法能有效抑制随机干扰,提高频率测量精度。实际起振测试结果表明,基于积分滤波非线性拟合法科氏流量计改进驱动系统有效提高了起振速度与振动稳定性。

参考文献:

[1] 徐科军,徐文福.科氏质量流量计模拟驱动方法研究[J].计量学报,2005,26(2):149-154.
[2] 李志勇,张英敏,张鹏.基于FPGA的科氏流量计驱动

技术实现[J].测控技术,2010,29(2):4-7.

- [3] 徐科军,于翠欣,苏建徽,等.科里奥利质量流量计激振电路的研制[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2000,23(1):37-40.
[4] HENRY M P,ZAMORA M E.Start up and operational techniques for a digital flowmeter: US,6950760 [P].2005-09-27.
[5] 黄丹平,汪俊其,于少东,等.科氏质量流量计新型模拟驱动电路研究[J].自动化与仪表,2016,31(1):71-76.
[6] 李苗,徐科军,朱永强,等.科氏质量流量计的3种驱动方法研究[J].计量学报,2011,32(1):37-39.
[7] 陶波波,徐科军,侯其立,等.变传感器设定值的科氏质量流量管控制方法[J].仪器仪表学报,2015,36(3):712-719.
[8] 黄世震,欧阳锋.科氏质量流量计驱动系统模糊PI控制方法[J].太赫兹科学与电子信息学报,2014,12(1):127-131.
[9] 汪正军,潘磊,纪国瑞.基于离散相位差检测的频率测量方法[J].仪器仪表学报,2013,34(5):994-999.
[10] 涂亚庆,苏奋华,沈廷鳌,等.自适应陷波器的科氏流量计信号频率跟踪方法[J].重庆大学学报:自然科学版,2011,34(10):147-152.
[11] CHEN K,ZHENG D,FAN S,et al.Novel Coriolis mass flowmeter signal processing algorithms based on DFT and digital correlation [C]//Proceeding of 2010 IEEE Symposium on industrial electronics & applications, Penang, Malaysia, October 3-5, 2010:56-60.
[12] 金艳,王利军,胡亮,等.科氏流量计测量管固有频率在线预测方法[J].计量学报,2017,38(3):328-332.
[13] 林伟,赵静蕾.一种基于希尔伯特变换的科氏流量计信号处理算法[J].电子器件,2016,39(5):805-808.
[14] 任建新,暴苗刚,张鹏,等.一种基于自适应陷波器的科氏流量计频率解算新方法[J].传感技术学报,2012,25(4):339-343. (下转第39页)