

# 获得转速脉冲触发阈值的精确时标研究

李之雄, 郭瑜, 刘文彬

(昆明理工大学机械电子工程系, 云南昆明 650093)

**摘要:** 提出了一种基于脉冲沿准确估计的阈值时标精确插值新方法. 在 LabVIEW 平台下, 用模拟变速随机脉冲信号和实测转子试验台的光电转速脉冲对该算法进行了测试, 证明该方法能有效消除阈值对误差的影响, 能在较低采样率下实现阈值时标的精确插值. 本方法比传统的线性插值方法具有更高的精度, 在提高转速计算精度上具有重要应用价值和现实意义.

**关键词:** 插值; 转速; 脉冲; 阈值; LabVIEW; 旋转机械

**中图分类号:** TH115 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2007)06-0012-05

## Study on Obtaining Thresholds Precise Time Mark of Tacho Pulses

LI Zhi-xiong, GUO Yu, LIU Wen-bin

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** A new interpolation method based on precisely estimating edge of pulse is introduced in this paper. The algorithm is tested by using the new method to process both simulated random speed variable tacho pulse and actual testing tacho pulse on LabVIEW platform. It is proved through the results that the new interpolation method effectively eliminates the error caused by threshold and achieves high interpolation precision even under some low sample frequency. The method is able to achieve higher interpolation precision than traditional linear interpolation method, which is of great importance in improving precision on speed calculation.

**Key words:** interpolation; tacho; pulse; threshold; LabVIEW; rotating machinery

### 0 引言

在应用采集到的转速脉冲计算旋转机械的转速时, 如何精确获得触发阈值处的精确时标, 是旋转机械转速计算和计算阶比分析中等角度间隔重采样时标的确定中普遍存在的问题<sup>[1~4]</sup>. 特别是旋转机械转速很高时, 触发阈值处时标的精度对转速计算的精度影响愈发明显. 一般来说, 要较精确地获得触发沿时标, 应保证每个沿上至少采 1 个点, 否则将无法准确获得脉冲沿的位置, 更不可能精确获得触发沿时标. 在满足每个脉冲沿, 至少采 1 点的前提下, 如何实现阈值时标精确插值呢? 相关资料表明, 获得脉冲沿阈值时标的方法, 如 NI 公司的阶比分析工具包<sup>[1]</sup>中转速计算所采用的, 均是线性插值法来获得转速脉冲阈值时标的, 其算法如下:

$$t_i = \begin{cases} t_j + \frac{y_s - y_j}{y_{j+1} - y_j} \cdot \frac{1}{f_s} & |y - y_j| \leq |y - y_{j+1}| \\ t_{j+1} + \frac{y_s - y_{j+1}}{y_{j+1} - y_j} \cdot \frac{1}{f_s} & |y - y_{j+1}| < |y - y_j| \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $f_s$  为采样频率;  $y_s$  为阈值;  $y_j, y_{j+1}$  分别为阈值紧前采样值和紧后采样值,  $t_i$  为第  $i$  个  $t_i$  为脉冲触发阈值的线性插值时标,  $t_j, t_{j+1}$  分别为触发阈值的紧前和紧后采样点时标,  $j, j+1$  分别为阈值紧前采样点和紧后采样点的索引号. 由此可计算出两相邻脉冲间的平均转速

收稿日期: 2007-04-20. 基金项目: 云南省自然科学基金资助项目(项目编号: 2004E0011Q).

第一作者简介: 李之雄(1980-), 男, 在读硕士研究生. 主要研究方向: 测试技术与信号处理.

E-mail: zhixiongli@tom.com

$$n_i = \frac{60}{k(t_{i+1} - t_i)} \tag{2}$$

其中,  $k$  为每转的脉冲数.

为了排除光电传感器阶跃响应的对脉冲沿识别的影响,阈值的取值范围设为触发沿的中间 75% 段 (阈值下限  $y_{s-\min} = y_l + (y_h - y_l)/8$ , 阈值上限  $y_{s-\max} = y_h - (y_h - y_l)/8$ , 其中  $y_l, y_h$  分别为转速脉冲高电平稳态值和低电平稳态值), 设第  $i$  个脉冲沿的阈值时标误差为  $E_i$ . 则由 (1)、(2) 两式可知脉冲沿时标误差  $E_{ti}$  和转速计算的相对误差  $E_{rni}$  可由下列两式来计算:

$$E_{ti} = t_i - t_{ai} \tag{3}$$

$$E_{rni} = \frac{|E_{i+1} - E_i|}{T_i} = \frac{n_{ai} |E_{i+1} - E_i|}{60} \tag{4}$$

其中,  $T_i$  为第  $i$  个脉冲沿与第  $i+1$  个脉冲沿的时间间隔,  $n_{ai}$  为该段时间内的实际转速,  $t_{ai}$  为第  $i$  个脉冲沿的真实时标.

由上式可看出该算法的相对误差  $E$  跟转子转速、采样频率和触发沿时标定位误差有关. 并且对触发阈值的设置敏感, 当触发阈值处域值中值附近时会出现最小值, 当阈值靠近阈值上限  $y_{s-\max}$  或下限  $y_{s-\min}$  时误差会显著增大. 图 1 为: 在每个脉冲沿上的  $[y_{s-\min}, y_{s-\max}]$  段上刚好能采到一个点的采样条件下, 且阈值  $y_s = y_{s-\min}$  时, 用线性插值的方法来计算阈值时标的误差示意图. 这种算法误差在转速较高情况下相当大, 且会随阈值设置的不同而显著变化. 这在很多应用场合是不可忍受的. 本研究将围绕寻找一种精确获得触发阈值处的精确时标的算法而展开.

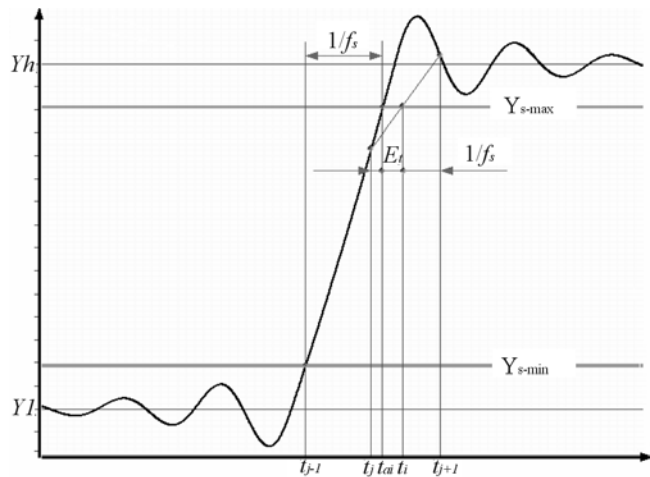


图1 线性插值法的误差示意图

Fig.1 Chart of the error caused by linear interpolation method

### 1 新算法的提出

用光电传感器获取键相脉冲信号时, 脉冲沿的形状是由光电传感器的阶跃响应特性决定的, 与转子的转速无关. 这可从实验时采集的转子试验台降速过程的转速脉冲信号得到证明, 在这个历程中, 无论转速为何值各脉冲沿上的采样点数不变. 而光电传感器的阶跃响应特性在一定时间内是稳定的, 亦即其脉冲沿的形状在一定时间内是基本不变的, 若能得到脉冲沿的准确  $y-t$  曲线, 就能在脉冲沿上至少有一点的采样条件下, 实现脉冲沿阈值时标的精确插值, 准确计算出转速.

现在的问题是: 脉冲沿的过度时间很短, 而在采集系统振动信号, 从实用、经济的角度考虑, 选用的采样频率无需很高, 如在用某转子试验台做试验时, 在不同采样率: 40 kHz, 100 kHz 下, 位于脉冲沿 (从  $y_l + (y_h - y_l)/8$  过度到  $y_h - (y_h - y_l)/8$  上的平均采样点数分别为: 1.40, 3.47. 这样少的点数对脉冲沿进行插值精度不会太高.

由光电传感器稳定工作时其脉冲沿的  $y-t$  曲线不变性, 可想到用多个脉冲沿采样点来精确估计出脉冲沿的  $y-t$  曲线, 再用此曲线对脉冲沿进行精确插值, 用多个沿上的采样点来对进行脉冲沿形状估计的关键问题在于将各沿上的采样点映射到一个沿上时如何确定各采样点之间的时间间隔.

由于转子在运行过程中, 转速的变化受诸多工况因素的影响, 故当采样频率一定时脉冲沿相对于采样时刻的位置是随机的, 在一个采样历程中, 采到脉冲沿上任何一个点的概率是均等的. 一个采样历程中, 搜索落在上落在沿上的  $y_{s-\min}$  到  $y_{s-\max}$  段上的所有采样点, 其总数设为  $M$ , 历程中的脉冲沿个数设为  $K$ , 则脉

冲沿从  $y_{s-\min}$  过渡到  $y_{s-\max}$  的时间

$$t_s = M / (Kf_s) \tag{5}$$

为了实现脉冲沿的准确插值应保证  $M/K$  不小于 1. 而  $t_s$  是由光电传感器的相应特性决定的, 故要使  $M/K \geq 1$ , 采样频率  $f_s$  须满足:  $f_s \geq M / (Kt_s)$ .

当脉冲沿上的采样点数大于等于 2 时, 相邻 2 个采样点间的采样数是相同的, 且等于整个历程的脉冲沿总数  $K$ . 由于实测脉冲信号受系统噪声干扰和光电传感器的工作稳定性的影响, 在整个历程中难免有不可靠沿(不能用于脉冲沿的  $y-t$  曲线估计), 利用这个条件可对实测脉冲信号进行可靠性判别, 当某个沿上的 2 个相邻采样点之间的采样数远偏离这个历程中的脉冲沿个数时, 就可认为这个脉冲沿受干扰沿或不稳定沿, 不能用于脉冲沿的  $y-t$  曲线估计, 应予以剔除. 设剔除可靠沿后历程中, 落在沿上的  $y_{s-\min}$  到  $y_{s-\max}$  段上的所有采样点数为  $N$ , 可靠沿总数为  $P$ , 则(5)可修正为

$$t_s = N / (Pf_s) \tag{6}$$

将历程中所有可靠沿上的采样点按幅值大小顺序排列. 则第  $i$  个值处的时标为:

$$t_i = i / (Pf_s) \quad (i = 0, 1, 2, \dots, N) \tag{7}$$

于是可得到系列离散点  $(y_i, t_i)$ , 用这些离散点, 可以拟合出 1 条曲线:  $t = f_1(y)$

这是脉冲沿的 1 条逼近曲线, 当较多的沿上都有 2 个或 2 个以上的采样点时, 下一步假定沿上任意一点位于拟合曲线上, 为了编制算法的方便, 现假定最靠近阈值的点位于拟合沿上, 用下列公式就可得到沿上其它点的时标.

$$t_{\text{near}} = f_1(y_{\text{near}}) \tag{8}$$

$$t_{\text{other}} = t_{\text{near}} + (i_{\text{other}} - i_{\text{near}}) / f \tag{9}$$

于是又可得到系列离散点  $(y_i, t_i)$ , 用这些离散点, 可以拟合出一条曲线:  $t = f_2(y)$

$$\text{如此反复几次就可得到精度很高的脉冲沿拟合曲线: } t = f(y) \tag{10}$$

以这种方式获得阈值时标, 来计算转速的算法如下:

$$n_i = \frac{60}{k[(j_i + 1 - j_i) / f_s + f(j_i) - f(y_{j_{i+1}})]} \tag{11}$$

其中,  $j_i, j_{i+1}$  分别为第  $i$  个脉冲和第  $i+1$  个脉冲的沿上的靠近阈值的采样点索引号.

该算法的相对误差可由下式来计算:

$$E_{m_i} = \frac{E_{y_i} - E_{y_{i+1}}}{T_i} = \frac{n_{ai}(f(y_i) - g(y_i)) - (f(y_{i+1}) - g(y_{i+1}))}{60} \tag{12}$$

其中,  $t = g(y)$  为脉冲沿真实曲线.

## 2 算法的软件实现和性能测试

2.1 在 LabVIEW 平台上, 依据前述原理开发出一个获得转速脉冲沿  $y-t$  曲线的 VI. 该 VI 的程序流程图如图 2 所示.

2.2 下面以模拟信号和实测信号来验证该算法的可靠性.

### 2.1.1 用模拟信号对算法进行测试

在 LabVIEW 平台上构造一个随机变速脉冲信号, 其离散表达式如下:

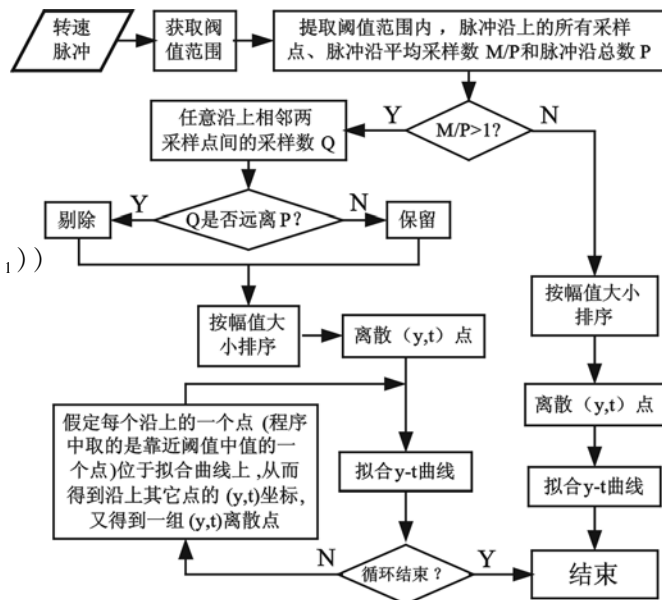


图 2 获得转速脉冲沿  $y-t$  曲线的 VI 程序流程图

Fig 2 VI program diagram for obtaining  $y-t$  plot of tachometer pulse edge

$$s(n) = \begin{cases} y_h + A_1 e^{\beta(n/f_s - R_i - t_{1i})} \sin\omega(t_{1i} - n/f_s + R_i) \cdots \cdots (R_i + \sum_{k=0}^{i-1} T_k \leq \frac{n}{f_s} < R_i + t_{1i} + \sum_{k=0}^{i-1} T_k) \\ Ae^{-a(n/f_s - R_i - t_{2i})} - C \cdots \cdots (R_i + t_{1i} + \sum_{k=0}^{i-1} T_k \leq \frac{n}{f_s} \leq R_i + t_{2i} + \sum_{k=0}^{i-1} T_k) \\ y_l + Ae^{-\beta(n/f_s - t_{2i} - R_i)} \sin\omega(t_{2i} - n/f_s + R_i) \cdots \cdots (R_i + t_{2i} + \sum_{k=0}^{i-1} T_k \leq \frac{n}{f_s} < R_i + t_{3i} + \sum_{k=0}^{i-1} T_k) \\ y_l + A_3 \cos\omega_{1i}(n/f_s - t_{3i} - R_i) \cdots \cdots (R_i + t_{3i} + \sum_{k=0}^{i-1} T_k \leq \frac{n}{f_s} \leq R_i + t_{4i} + \sum_{k=0}^{i-1} T_k) \\ y_l + A_2 e^{\beta(t - t_{5i} - R_i)} \sin\omega(n/f_s - t_{5i} - R_i) \cdots \cdots (R_i + t_{4i} + \sum_{k=0}^{i-1} T_k < \frac{n}{f_s} < R_i + t_{5i} + \sum_{k=0}^{i-1} T_k) \\ Ae^{a(n/f_s - t_{5i} - R_i)} - C \cdots \cdots (R_i + t_{5i} + \sum_{k=0}^{i-1} T_k \leq \frac{n}{f_s} \leq R_i + t_{6i} + \sum_{k=0}^{i-1} T_k) \\ y_h + A_1 e^{-\beta(n/f_s - t_{6i} - R_i)} \cdots \cdots (R_i + t_{6i} + \sum_{k=0}^{i-1} T_k < t < R_i + T_i + \sum_{k=0}^{i-1} T_k) \end{cases} \quad (13)$$

其中, 用  $A_1, A_2, C, \beta, \omega, t_r$  模拟由光电传感器相应特性决定而与转子转速无关的常数; 用不变的脉宽比  $n = T_i/T_{pi}$  来表征键相器的结构特征;  $T_i$  为第  $i$  个脉冲的持续时间,  $R_i$  为随机序列  $R$  中的第  $i$  个元素,  $R_i \in (-0.5/f_s, 0.5/f_s), i = 0, 1, \dots, J$ ; 图 3 为第  $i$  个脉冲, 由图可知  $t_{1i}, t_{2i}$  分别为第  $i$  个脉冲由高电平稳态值  $y_h$  过渡到低电平稳态值  $y_l$  的起止时刻,  $t_{5i}, t_{6i}$  分别为第  $i$  个脉冲由  $y_l$  过渡到  $y_h$  的起止时刻;  $t_r = t_{2i} - t_{1i} - t_{6i} - t_{5i}$  为模拟信号的上升(下降)时间。

程序设计时设定采样率为  $f_s$ , 信号控制参数为  $A_1, A_2, \beta, t_r, y_l, y_h, n, T_i$ , 由函数的连续可导条件和前面的条件就可确定应变参数:  $A, a, C, \omega, \omega_{1i}, t_{1i}, t_{2i}, t_{3i}, t_{4i}, t_{5i}, t_{6i}$ 。

将该模拟信号编制成 VI 后, 设置为:  $f_s = 100$  kHz,  $A_1 = 0.25, A_2 = 0.1, \beta = 20\ 000, t_r = 10^{-5}, y_h = 8.5, y_l = 1.2, T_i/T_{pi} = 36$ , 频率从 100 Hz 变到 280 Hz, 频率变化率为 0.1 Hz/pulse。

对该模拟随机变速脉冲信号用新算法——基于脉冲沿准确估计的脉冲沿阈值时标精确插值法, 进行处理, 得到一脉冲沿的拟合曲线:  $t = f(y)$ 。

接着对算法进行误差分析, 其基本思想是: 取整个历程的所有上升沿(或下降)假定每一个沿上任意一个点位于拟合曲线上, 便可得到沿上其它点的拟合时标  $t_{fi}$ , 和相对于基点的真实时标  $t_{ai}$ , 则整个历程的时标拟合的均方误差 MSE 可由下式计算:

$$MSE = \frac{1}{N_p - N_E} \sum_{i=1}^M (t_{fi} - t_{ai})^2 \quad (14)$$

其中  $N_p$  为整个历程中所有脉冲沿上采样数,  $N_E$  为整个历程的总脉冲沿数。

该模拟随机变速历程的 MSE 为  $10^{-19}$  数量级, 最大偏差  $e_{max}$  为  $10^{-9}$  数量级。

而对同一信号用线性插值法获得阈值时标, 其修正值的二阶中心矩

$$\sigma_2^M = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P (\Delta t_i - \mu)^2 \quad (15)$$

当阈值为阈值范围的中值时插值误差最小, 即使在阈值设置最佳的情况下,  $\sigma_2^M$  的数量级为  $10^{-12}$ , 修正值的标准差数量级为  $10^{-6}$ , 由此可见线性插值法精度低于基于脉冲沿准确估计的脉冲沿阈值时标精确插值法 3 个数量级。

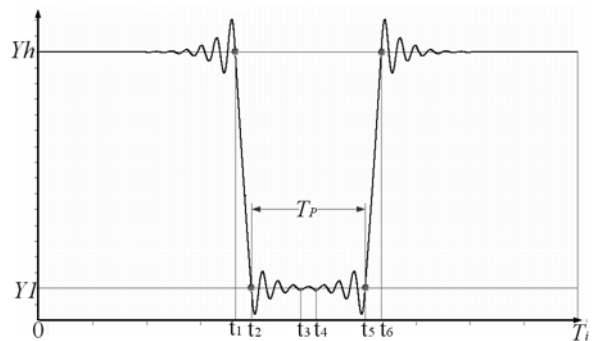


图 3 第  $i$  个脉冲的  $y-t$  图  
Fig 3  $y-t$  plot of the  $i$ -th pulse

### 2.1.2 用实测脉冲信号对算法进行测试

用该算法对用 NI 公司的 PXI 4472 数据采集设备,以 100 K 的采样频率采得的转子实验台从转速从 11 000 r/min 降速到 600 r/min 的整个降速过程的转速脉冲信号进行处理,结果如图 4 所示

对稳定沿求得  $MSE = 1.66 \cdot 10^{-14}$

对所有沿求得  $MSE = 2.25 \cdot 10^{-13}$

因为实测脉冲信号受光电传感器工作稳定性等诸多因素的影响,会出现一些不稳定的脉冲沿,如在该历程中总沿数为 1 191,其中不稳定沿数为 19,不稳定率为 1.6%. 稳定性较好,用该算法处理实测脉冲信号是有效可行的.

而对同一信号用线性插值法获得阈值时标,因为线性插值法对阈值的设置很敏感,当阈值设为域值范围的中值时插值误差最小,即使在阈值设置最佳的情况下,其修正值的二阶中心矩

$$\sigma_2^M = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P (\Delta t_i - \mu)^2 = 1.98 \cdot 10^{-12} \quad (16)$$

由此可见对于实际测试信号,新算法也比线性插值法的精度要提高一个数量级.

## 3 结论

用模拟脉冲信号和实测脉冲信号对该算法行的验证和误差估计表明:线性插值法对采样频率和阈值的误差敏感性都很高,而本论文提出的基于脉冲沿准确估计的脉冲沿阈值时标精确插值法对阈值和采样率的误差敏感性小,尤其是在较低采样率下,其仍然能获得较高的插值精度. 只要在拾取转速信号的光电传感器稳定工作的条件下,这个条件在通常的测试条件下都能满足,该算法就具有比传统线性插值算法更高的插值精度和稳健性.

### 参考文献:

- [1] Fyfe K R, Munk EDS Analysis of Computed Order Tracking. Mechanical Systems and Signal Processing. 1997, 11(2): 187 - 205.
- [2] 郭瑜, 秦树人, 梁玉前. 时频分析防比跟踪技术[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2002, 25(5): 12 - 20, 24.
- [3] 杨炯明, 秦树人, 季忠. 旋转机械阶比分析技术中阶比采样实现方式研究[J]. 中国机械工程, 2005, 16(3): 249 - 253.
- [4] 杨炯明, 秦树人. 基于数字微分和脉冲平均的旋转机械转速曲线算法研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(4): 1519 - 1523.

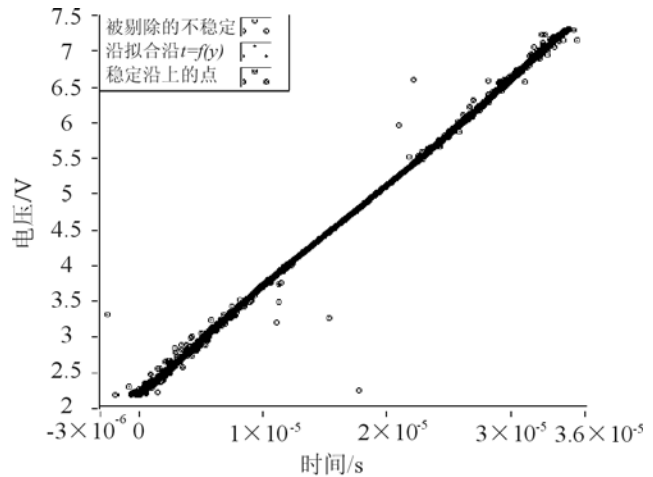


图 4 假定实测脉冲沿的一个点落在拟合沿上沿上其它点在拟合沿周围的分布情况

Fig 4 The distribution of other points in the vicinity of the fitted edge when presuming one point on the real testing pulse edge is on the fitted edge