

# 增量式编码器低速段测速改进方法

王明玥<sup>1,2</sup>, 金书辉<sup>1,2</sup>, 张策<sup>1,2</sup>, 张东阳<sup>1,2</sup>, 于守泉<sup>1,2</sup>

(1. 天津电气科学研究院有限公司, 天津 300180;

2. 电气传动国家工程研究中心, 天津 300180)

**摘要:** 转速的精确测量对电机控制系统十分重要。针对增量式编码器在定点计算时低速段测速精确度低的问题, 提出了一种增量式编码器低速段测速改进方法。根据定点系统乘除法计算特点, 提出了一种自适应系数计算转速的方法, 可以减小低速段编码器测速误差, 并降低嵌入式芯片的计算负荷; 针对低速段转速值保持不变的“台阶”现象, 采用降速补充采样和转速平滑处理相结合的方式, 使电机在升、降速过程中的测量转速更接近实际曲线, 保证转速准确且平滑输出。仿真和实验验证了所提控制方法的有效性。

**关键词:** 增量式编码器; 低速段测速; M/T法; 电机控制系统

**中图分类号:** TM921.2    **文献标识码:** A    **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed26654

## An Improved Method for Measuring Speed of Incremental Encoder in Low-speed Section

WANG Mingyue<sup>1,2</sup>, JIN Shuhui<sup>1,2</sup>, ZHANG Ce<sup>1,2</sup>, ZHANG Dongyang<sup>1,2</sup>, YU Shouquan<sup>1,2</sup>

(1. Tianjin Research Institute of Electric Science Co., Ltd., Tianjin 300180, China;

2. National Engineering Research Center of Electric Drive, Tianjin 300180, China)

**Abstract:** Precise speed measurement is very important for motor control system. To address the issue of low measurement accuracy at low speeds when performing fixed-point calculations in incremental encoder, an improved method for speed measurement at low-speed ranges was proposed. According to the calculation characteristics of the fixed-point system, an adaptive coefficient calculation method was proposed, which can reduce the speed measurement error in low-speed section and reduce the calculation load of embedded chip. For the phenomenon of "step" that the speed value remains unchanged in low-speed section, the methods of speed-down additional-sampling and smooth-processing were adopted to ensure the accurate and smooth of the speed, which specially make the speed closer to the actual ideal curve during the process of motor increase and decrease. The effectiveness of the control method proposed was verified by simulation and experiment.

**Key words:** incremental encoder; low-speed section speed measurement; M/T method; motor control system

在工业自动化、机器人技术等需要精确速度控制的领域, 编码器作为主流速度检测元件, 因成本低、结构简单、响应速度快等优势被广泛应用。编码器测速性能对系统控制至关重要, 然而在低速工况下, 其测速面临诸多挑战。极低的转速使编码器脉冲回馈时间变长, 脉冲间隔时间大于速度采样周期, 导致在接收到脉冲信号前, 转速无法计算或更新, 只能沿用前一拍的历史转速<sup>[1-2]</sup>。这将使速度测量存在较大误差与滞后, 影响设备轨迹跟踪与精准控制, 成为制约高端装备动态性能提升的瓶颈之一。

增量式编码器利用光电转换原理输出三组方波 A、B 和 Z, 其测速原理基于脉冲的计数和计时, 主要测速方法有 M 法、T 法和 M/T 法等<sup>[3]</sup>, 在低速时存在测速精度低、更新死区与滞后等问题。为解决这些问题, 国内外学者开展了大量研究, 有研究提出扩展 M/T 法、改进 T 法等, 通过优化算法提高低速检测精度; 还有研究利用扰动观测器、扩展状态观测器等改善系统低速性能<sup>[4-6]</sup>。这些方法存在计算复杂、运算负荷增加等情况。因此, 探寻一种有效提升增量式编码器低速段测速精度与实时性的方法具有重要现实意义。

**基金项目:** 天津电气科学研究院有限公司科研开发创新基金项目(YF2024ZL004)

**作者简介:** 王明玥(1988—), 女, 硕士研究生, 高级工程师, Email: mingyue12092091@163.com

在工业现场应用中,定点计算因硬件实现简单、运算速度快、功耗与成本低、兼容性强等特点,应用较广泛,尤其适合对响应速度要求较高的控制系统<sup>[7]</sup>。但定点计算精度范围受限,尤其在计算低转速时,精度损失大,影响设备整体控制精度。

本文针对增量式编码器低速段测速精度差的问题,根据定点系统乘除法计算特点,提出定点改进计算方法,减小低速段编码器测速误差,降低数字信号处理(digital signal process, DSP)等嵌入式芯片的计算负荷;针对低速测速“台阶”现象,提出低速段转速处理方法,保证转速平滑输出,升/降速过程转速输出更接近理想曲线。

本文所提方法基于增量式编码器通用测速原理,核心改进方法通过软件算法优化实现,关键系数可通过初始化配置以适配不同设备。本方法兼容各种线数的增量式编码器,支持一倍频、二倍频、四倍频等多种采样方式。适配不同品牌编码器和电机,适用于工业控制等领域中对低速段测速精度要求高的场景。

## 1 测速原理

### 1.1 增量式编码器测速

编码器采用A方波、B方波和Z方波输出形式,A,B方波为两个相位相差90°、占空比为50%的方波,Z方波为每机械周期发出的1个窄脉冲。

编码器测速采用倍频采样技术,常用方式包括一倍频、二倍频和四倍频<sup>[8]</sup>。定义一倍频对A相或B相脉冲的上升沿采样,二倍频对A相的上升沿和下降沿采样,四倍频对A相和B相的上升沿和下降沿采样。M/T法测速原理如图1所示。

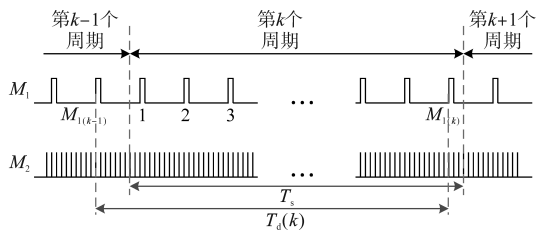


图1 M/T法测速原理

Fig.1 Principle of speed measurement by M/T method

设控制系统DSP的时钟频率为 $f_D$ ,采样周期为 $T_s$ ,电机额定速度为 $n_N$ ,编码器线数(即每机械周期A/B方波脉冲个数)为 $P_{ppr}$ ,倍频采样系数为 $P_\alpha$ ( $P_\alpha = 1, 2, 4$ )。

根据倍频采样结果产生脉冲,记录 $T_s$ 周期内

脉冲个数 $M_1$ ,和 $M_1$ 个脉冲对应的时钟个数为 $M_2$ 。定义 $T_d$ 为 $M_1$ 个脉冲所用的实际时间,则 $T_d = M_2/f_D$ ,且 $T_d$ 近似于 $T_s$ 。

编码器在 $k$ 时刻的转速 $n_{(k)}$ 计算如下式:

$$n_{(k)} = \frac{60 \cdot M_{1(k)}}{P_\alpha \cdot P_{ppr} \cdot n_N \cdot T_{d(k)}} = \frac{60 \cdot f_D \cdot M_{1(k)}}{P_\alpha \cdot P_{ppr} \cdot n_N \cdot M_{2(k)}} \quad (1)$$

其中,系数“60”用于将转速的单位从“r/s”转换到“r/min”。

### 1.2 低速段实际转速特点

交流电机在低速段运行时,由于现场干扰、安装准度、控制性能等问题,编码器实际采样大概率不再是相位相差90°、占空比为50%的方波。图2所示为0.1%转速(额定 $n_N = 1\,500$  r/min)的编码器实测方波信号图,以及对应转速示意图。

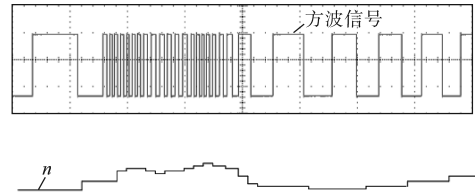


图2 低速段编码器测试图

Fig.2 Encoder square wave signal measured at low speed

这种情况下,编码器安装虽然仍在标准同心度范围内,但采样脉冲不再均匀分布,对编码器测速产生影响。在下一个脉冲信号之前,转速无法更新,导致这一段转速为恒定值,出现“台阶”现象。

### 1.3 定点计算误差

计算系统中数据结构的定义包括符号位、整数部分和小数部分,定点数指小数点在数中的位置是固定不变的。小数位置确定之后即标定了Q值。定义计算系统中数据格式为 $C_1QC_2$ ,其中 $C_1$ 为数据总位数, $C_2$ 为小数位数。常见的数据格式包括32Q22,16Q14等。以16Q14数据格式为例,其代表数据范围为-2~1.9999;在标么值计算中,数据范围为-200%~199.99%。

定点乘法等效结果实际是整型的被乘数乘以整型的乘数再右移的结果,在右移时舍弃结果时造成乘法计算误差;定点除法等效结果实际是整型的被除数除以整型的除数再左移,误差主要出现在被除数较小时。

例如:在定点计算系统中,采用16Q14数据格式,计算 $1\% \times 10\%$ 。那么 $1\% = 0.01 \times 2^{14} = 163$ ,  $10\% = 0.1 \times 2^{14} = 1\,638$ ,则 $163 \times 1\,638 = 266\,994$ ,即 $266\,994 / (2^{14} \times 2^{14}) = 0.099\%$ 。可见,定点计算虽

然响应速度快,但计算误差偏大,尤其在乘数或被乘数较小时,计算精度损失明显。

定点计算相对来说更快,适合对响应速度要求较高的控制系统。但定点计算会造成数据在一定程度上的精度损失。

## 2 定点改进计算

### 2.1 系数分解

根据编码器测速原理,令

$$K_1 = \frac{60 \cdot f_D}{P_\alpha \cdot P_{\text{ppr}} \cdot n_N} \quad (2)$$

在控制系统中, $K_1$ 由控制参数、电机参数等确定,在电机运行过程中保持不变,可认为是常量。则式(1)改写为

$$n_{(k)} = K_1 \cdot \frac{M_{1(k)}}{M_{2(k)}} \quad (3)$$

造成定点转速计算相对误差偏大的主要原因是:1)定点乘法计算 $K_1 M_1$ 存在误差,特别是在 $M_1$ 较小情况下;2)定点除法计算 $(K_1 M_1)/M_2$ 存在误差。通常情况下,除数 $M_2$ 较大,除法计算误差较小。因此只需要考虑 $K_1 M_1$ 的计算误差。

为降低DSP计算负荷,且 $K_1$ 值一般大于2,故在定点计算时, $K_1$ 的乘法采取“先左移再乘法”的分步计算方式,即 $K_1 = 2^{K_2} \times K_3$ 。其中,左移位数为 $K_2$ ,且为整数,乘数为 $K_3$ 。则有:

$$\begin{cases} K_2 = \text{round} \{ \log_2 [ \text{round} (K_1/2) \times 2 ] \} \\ K_3 = K_1/2^{K_2} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\text{round}()$ 为取整计算。

在实际运算中, $\text{round}()$ 通常为舍弃小数部分运算,不需要进行实际取整。需要注意的是,分析中发现在计算时应“先左移、再乘法”计算。如果顺序相反,则计算结果的平均误差将增大。

例如:电机额定转速 $n_N = 1500 \text{ r/min}$ ,编码器线数 $P_{\text{ppr}} = 1024 \text{ ppr}$ ,时钟频率 $f_D = 1 \text{ MHz}$ ,采用四倍频采样方式和16Q14数据格式。则根据式(3)可得: $K_1 = 9.77$ ;再根据式(4)可得: $K_2 = 3, K_3 = 122.07\%$ 。因此,将乘以 $K_1$ 分解为对 $M_1$ 先左移3位、再乘以系数122.07%的两步计算,等效为浮点计算的对 $M_1$ 乘以9.77的一步计算。

### 2.2 自适应系数定义

针对转速计算所导致的误差,本文采取适当放大输入 $M_1$ ,然后在乘法和除法之后再缩减同样倍数的方法。

定义 $M_1$ 放大倍数为 $A_1$ 。由于 $M_1$ 越小, $K_1 M_1$

误差越大,那么适当选择 $A_1$ 可使 $A_1 K_1 M_1$ 误差减小。 $A_1$ 应该在避免结果溢出的基础上,使 $M_1$ 尽可能地被放大。随电机转速升高, $M_1$ 变大,显然 $A_1$ 要减小;直到电机达到额定转速 $n_N$ 时,需要 $A_1 = 1$ 。即 $A_1$ 应随转速变化而变化,且与转速(即 $M_1$ )成反比。

设计 $A_1$ 为2的指数倍数,即令 $A_1 = 2^{A_2}$ ,其中 $A_2$ 为自然数,这样能够避免产生新的乘除法误差,避免增加较多计算量。按照 $A_1$ 设计思路,应使 $A_1 \geq 1$ ,且 $n_{(k)} \times 2^{C_2}$ 再放大 $A_1$ 倍不会溢出,即 $A_1 \times n_{(k)} \times 2^{C_2} \leq 2^{C_1-1} - 1$ ,其中 $2^{C_1-1} - 1$ 为 $C_1$ 位数据最大值。故有:

$$1 \leq A_1 \leq \frac{2^{C_1-1} - 1}{n_{(k)} \times 2^{C_2}} \quad (5)$$

由于 $T_s$ 与 $T_d$ 接近,且根据式(1),可导出:

$$1 \leq 2^{A_2} \leq \frac{(2^{C_1-1} - 1) \cdot P_\alpha P_{\text{ppr}} n_N T_s}{60 \cdot M_1 \cdot 2^{C_2}} \quad (6)$$

在该范围内, $A_2$ 取最大整数值。

令

$$K_4 = \frac{(2^{C_1-1} - 1) \cdot P_\alpha P_{\text{ppr}} n_N T_s}{60 \times 2^{C_2}} \quad (7)$$

与 $K_1$ 类似, $K_4$ 由控制参数、电机参数等确定,在电机运行过程中保持不变,可认为是常量。则整数 $A_2$ 为

$$A_2 = \begin{cases} \text{round} [ \log_2 (K_4/M_1) ] & K_4/M_1 \geq 1 \\ 0 & K_4/M_1 < 1 \end{cases} \quad (8)$$

例如:采样周期 $T_s = 400 \mu\text{s}$ ,电机额定转速 $n_N = 1500 \text{ r/min}$ ,编码器线数 $P_{\text{ppr}} = 1024 \text{ ppr}$ ,时钟频率 $f_D = 1 \text{ MHz}$ ,采用四倍频采样方式及16Q14数据格式,则有 $1 \leq A_1 \leq [32767/(n_{(k)} \times 2^{14})]$ 。根据式(7)可得: $K_4 = 81.9175$ ,再根据式(8)可得 $A_2$ 。

### 2.3 转速计算

完成系数分解和自适应系数计算即可计算电机转速。由 $K_1, A_1$ 关系可得:

$$n_{(k)} = K_1 \cdot \frac{M_{1(k)}}{M_{2(k)}} = \frac{(2^{(K_2 + A_2)} \cdot M_{1(k)}) \cdot K_3}{M_{2(k)} \cdot 2^{A_2}} \quad (9)$$

总结上述方法,计算编码器转速的定点改进计算步骤如下:

1)常量计算:采用不影响DSP使用率的计算方式(如初始化阶段计算、上位机计算后发送等),由式(2)、式(4)、式(7)计算 $K_1, K_2, K_3, K_4$ 。

2)脉冲计数:根据实际情况,采用一倍频、二倍频或四倍频对编码器A/B相信号进行采样,并

生成脉冲信号,记录第 $k$ 周期的 $M_{1(k)}, M_{2(k)}$ 。

3)系数计算:采用实时计算方式(如DSP计算、上位机计算后发送等),根据式(6)计算补偿系数 $A_2$ 。

4)计算过程量 $M'_{1(k)}$ :将 $M_{1(k)}$ 左移 $(K_2 + A_2)$ 位,得到 $M'_{1(k)}$ 。

5)计算过程量 $n'_{(k)}$ : $n'_{(k)} = M'_{1(k)} \times K_3 / M_{2(k)}$ 。

6)计算转速 $n_{(k)}$ :将 $n'_{(k)}$ 右移 $A_2$ 位,还原得到编码器转速 $n_{(k)}$ 。

上述定点改进计算方法,可以在低速段减小计算误差。由于在实现上仅增加了左移量,因此也可以降低DSP计算负荷。

### 3 低速段转速处理

编码器在较低转速下,可以通过转矩、角度、速度等变量计算低速段的电机转速<sup>[9-10]</sup>。但在定点计算系统中,这些变量也存在精度低、波动大等问题。因此在计算转速时,不引入转矩、角度等变量,仅根据脉冲信号、实测转速进行转速处理。本文采用降速补充采样和转速平滑处理两种方式,主要针对低速段转速“台阶”现象做出算法优化。

#### 3.1 降速补充采样

对低速段转速进行补充采样,与实际采样一同计算转速。如图3所示,在电机转速较低时,采样周期 $T_s$ 内没有脉冲到来, $M_1, M_2$ 均保持不变,因此转速不更新,一直保持上一个脉冲计算的转速。这导致低速段的转速长时间存在“台阶”,即图3中①所示转速。

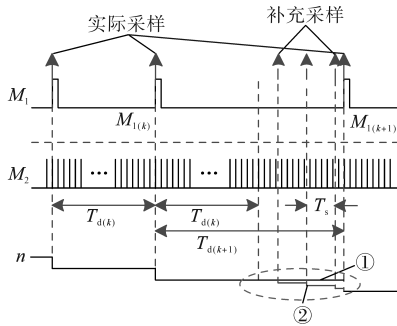


图3 实际采样与补充采样原理图  
Fig.3 Schematic diagram of actual sampling and supplemented sampling

为避免转速出现较长“台阶”而导致控制精度下降,本文对低速段脉冲采样点进行补充,即对 $M_1, M_2$ 进行补充采样,增加转速计算点。

低速段在 $M_1$ 长期保持不变时,比较本周期

$M_{2(k)}$ 与上一周期 $M_{2(k-1)}$ 的值。

1)当 $M_{2(k)} > M_{2(k-1)}$ 时,从此刻开始每个 $T_s$ 周期更新 $M_1, M_2$ 的值。由于此时没有脉冲到来, $M_{1(k)} = M_{1(k-1)}$ 保持不变,实际只更新 $M_2$ 。根据式(1),转速 $n_{(k)}$ 为

$$n_{(k)} \propto \frac{M_{1(k)}}{M_{2(k)}} \quad (10)$$

本周期计算电机转速 $n_{(k)}$ 降低,符合实际情况。直到下一个实际采样脉冲来临后, $M_{1(k)}, M_{2(k)}$ 同时更新,计算本周期真实转速 $n_{(k)}$ 。

2)当 $M_{2(k)} \leq M_{2(k-1)}$ 时,不存在补充采样点,转速 $n_{(k)}$ 根据实际采样脉冲计算。

降速补充采样主要根据图2所示低转速脉冲特点,在脉冲不均匀分布的情况下减小台阶末端长度。本方法执行条件通常是 $M_1$ 多周期保持不变,且只在降速时有效。采用降速补充采样后,测得转速如图3中②所示转速,增加了编码器低速段的测速精确度。

#### 3.2 转速平滑处理

当转速较低时,采用转速平滑处理以保证速度平滑输出。图4所示为转速平滑处理控制框图,其中,为保证中、高转速段的测速不受影响,对转速进行切换。

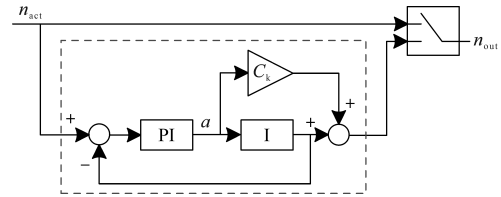


图4 转速平滑处理控制图

Fig.4 Schematic diagram of speed-smooth control

图4中虚线框部分为低速段采用的转速平滑处理方式。其中, $n_{act(k)}$ 为上节所述实际和补充采样后,计算得到的转速 $n_{(k)}$ ,本节为区分变量补充了下角标。 $n_{act(k)}$ 与负反馈差值输入PI调节器得到加速度 $a_{(k)}$ ,加速度经过积分环节、前馈环节,得到预测转速 $n_{out(k)}$ ,其中前馈环节用于对预测转速进行积分延时补偿。

PI调节器传递函数为 $G_{PI}(s) = k_p + k_i/s$ , $k_p$ 为比例系数, $k_i$ 为本环节积分系数;积分调节器I传递函数为 $G_I(s) = t_i/s$ , $t_i$ 为本环节积分系数;前馈环节中, $C_k$ 为前馈系数。

根据电机情况选择系数,计算转速的传递函数 $G(s)$ 为

$$G(s) = \frac{k_p C_k s^2 + (k_p t_i + k_i C_k) s + k_i t_i}{s^2 + k_p t_i s + k_i t_i} \quad (11)$$

考虑到实际调节情况,分别画出当PI调节器积分系数 $k_i = 0$ 和 $k_i \neq 0$ 时转速 $G(s)$ 的幅频特性曲线,如图5所示,其中 $G_1(s)$ 为 $k_i = 0$ 时的曲线, $G_2(s)$ 为 $k_i \neq 0$ 时的曲线。

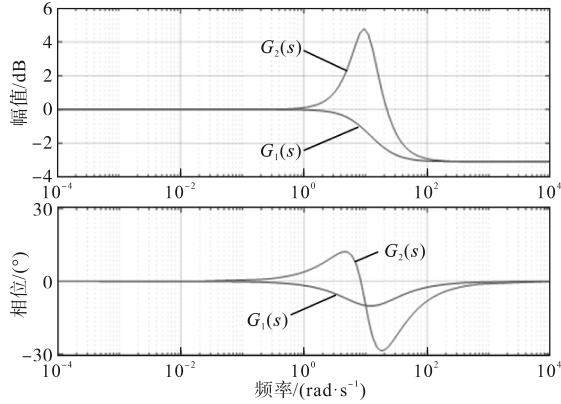


图5 转速传递函数幅频特性曲线图

Fig.5 The amplitude-frequency characteristic curves of the speed transmission function

从图5中可以看出,低频段速度控制稳定,满足要求;中、高频段的幅值增益削弱,会抑制转速输出。因此选择积分系数 $k_i = 0$ ,且转速平滑处理只在低速段使用,在控制中做转速切换。

结合定点改进计算方式,转速平滑处理在定点改进计算的步骤5)计算完过程量 $n'_{(k)}$ 之后执行,即 $n_{act(k)} = n'_{(k)}$ ;平滑处理后得到的转速 $n_{out(k)}$ 再进行后续步骤的右移计算,即 $n'_{(k)} = n_{out(k)}$ ,以增加低速段转速精度。

## 4 仿真应用

根据编码器测速原理,计算在不同采样周期的情况下,电机不同转速的编码器测速误差。计算相对误差 $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{n - n^*}{n^*} \times 100\% \quad (12)$$

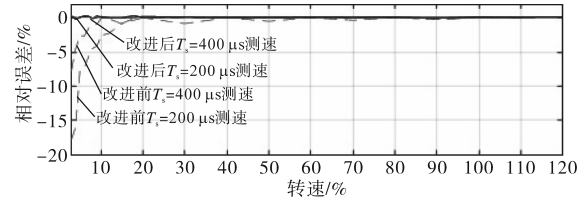
式中: $n$ 为计算转速; $n^*$ 为真实转速。

图6为定点计算改进前后相对误差对比图,图6a为120%转速范围内对比图,图6b为20%低速范围内对比图。从图6可得,原始定点计算在低速段相对误差较大,在中高速段相对误差较小;改进后的定点计算方式,相对误差明显减小,特别是在低速段尤为明显。

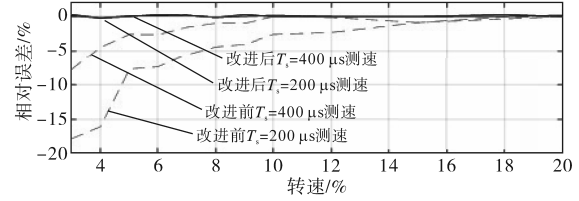
采用转速平滑处理,转速仿真结果如图7所示。图中弧线为理想计算结果, $n_{out}$ 为转速平滑根

据理想计算结果的实际转速输出。从仿真结果可以看出,转速平滑处理可以在低速段保证速度没有特别长的台阶,转速相对平滑。

在异步电机中实际测试,图8为低速段本文所提改进后方法实际测速图,图9为改进前后降速过程测速对比。可知,采用本文所提改进方法,编码器在低速段的测速精度大幅提升,极大地提高了异步电机在低速段以及全速域的控制性能,应用效果良好。



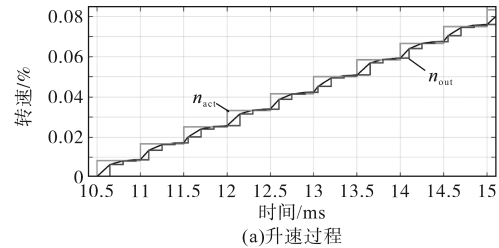
(a)120%转速范围内



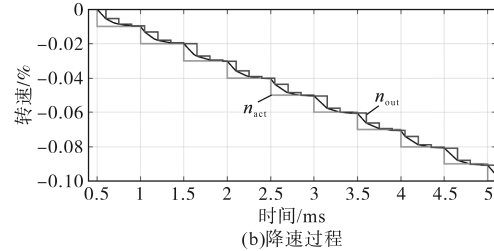
(b)20%转速范围内

图6 定点计算改进前后相对误差对比图

Fig.6 Comparison of relative errors before and after the improvement of fixed-point calculation



(a)升速过程



(b)降速过程

图7 转速平滑处理仿真结果

Fig.7 Simulation results of smoothed speed

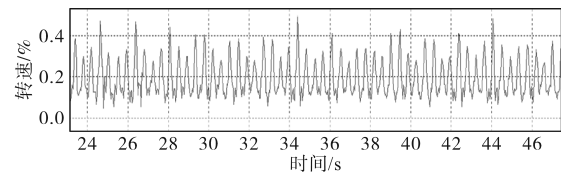


图8 低速段改进后实际测速图

Fig.8 Actual speed profile after improvement in the low-speed section

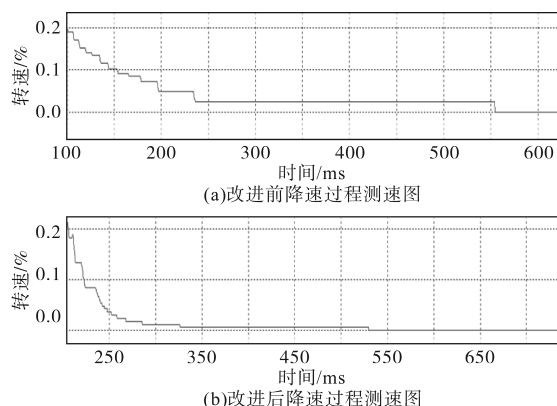


图9 低速段改进前后降速图

Fig.9 Deceleration diagram before and after improvement in the low-speed section

## 5 结论

在重噪声(如电磁干扰、机械振动)或极端工作条件(如高低温、粉尘、低速/高速极端工况)下,编码器输出脉冲易出现畸变、丢包或误触发,导致传统测速方法精度骤降。针对这一问题,结合现有改进方法的核心思路,可构建“噪声抑制—鲁棒计算—动态自适应”的改进总体模式。

本文通过定点改进计算、低速段转速处理方法,提高了增量式编码器在低速段的测速精度。提出的增量式编码器低速段测速改进方法主要优势体现在:

1)定点改进计算:在编码器计算转速时,将系数分解为“先左移再乘法”的计算方式,以降低嵌入式芯片的计算负荷。针对低速段转速计算误差大的问题,采用自适应补偿系数,该系数随电机转速增大而减小,能够减小低速段转速计算误差。

2)低速段转速处理:降速补充采样根据电机低速段实际转速特点,增加采样点更新数值,无新增计算环节;转速平滑处理根据历史转速和加速度预测当前值,计算转速平滑输出,升/降速过程转速输出更接近理想曲线。二者共同作用,消除低速段测速的“台阶”效应。

3)本方法关键系数由电机额定转速、编码器线数、采样周期等基础参数推导,可通过初始化配置以适配不同设备。支持一倍频、二倍频、四倍频等多种采样方式,兼容各种线数的增量式编码器。

4)本方法无需增加额外硬件,成本低,适配不同品牌编码器和电机,适用于工业控制等领域中对低速段测速精度要求高的场景。

## 参考文献

- [1] 马小亮. 高性能变频调速及其典型控制系统[M]. 北京:机械工业出版社,2010.  
Ma X L. High-performance frequency conversion speed control and its typical control system[M]. Beijing:China Machine Press, 2010.
- [2] 裴红平,宗胜悦,张飞,等. 绝对值编码器测距时的关键问题及解决方法[J]. 电气传动,2022,52(2):57-60.  
Pei H P, Zong S Y, Zhang F, et al. Key problems and solutions of using absolute value encoder to measure distance[J]. Electric Drive, 2022, 52(2): 57-60.
- [3] 马小亮. 高性能变频调速系统的几个应用问题[J]. 电气传动,2020,50(2):3-20.  
Ma X L. Application problems of high-performance inverter-fed motor drive systems[J]. Electric Drive, 2020, 50(2): 3-20.
- [4] 薛高飞,胡安. 一种基于编码器的全阶观测器测速方法[J]. 海军工程大学学报,2013,25(6):1-6.  
Xue G F, Hu A. A speed-measuring method of full-order observer based on quantized encoder[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2013, 25(6): 1-6.
- [5] 文晓燕,郑琼林,韦克康,等. 增量式编码器测速的典型问题分析及应对策略[J]. 电工技术学报,2012,27(2):185-189,209.  
Wen X Y, Zheng Q L, Wei K K, et al. Typical issues analysis and corresponding strategy for incremental encoder speed measurement[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 185-189, 209.
- [6] 李小闯,于强. 基于FPGA的变M/T归一化测速算法研究[J]. 计算机应用与软件,2019,36(9):122-129.  
Li X C, Yu Q. A modified M/T normalized velocity measurement algorithm based on FPGA[J]. Computer Applications and Software, 2019, 36(9): 122-129.
- [7] 唐朔飞. 计算机组成原理[M]. 北京:高等教育出版社,2020.  
Tang S F. Principles of computer organization[M]. Beijing: Higher Education Press, 2020.
- [8] 宋玉龙,楚广生,马天翔,等. 一种基于软件倍频的编码器细分方法[J]. 仪器仪表学报,2014,35(6):142-146.  
Song Y L, Chu G S, Ma T X, et al. Encoder subdivision method based on the software frequency doubling[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(6): 142-146.
- [9] Kovudhikulrungsri L, Koseki T. Precise speed estimation from a low-resolution encoder by dual-sampling-rate observer[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2006, 11(6): 661-670.
- [10] Velinsky S A, Lee S H, Lasky T A. Improved velocity estimation for low-speed and transient regimes using low-resolution encoders[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2004, 9(3): 553-560.

收稿日期:2025-06-10

修改稿日期:2025-08-18