

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2016.06.018

调速用旋变编码器误差分析与校正

宋佳佳¹, 程方斌¹, 吕慧明², 王文婷¹, 胡浩峰¹

(1. 海天驱动有限公司, 浙江 宁波 315803; 2. 宁波四中, 浙江 宁波 315016)

摘 要:旋变编码器受误差因素影响,会在转速位置测量时引入周期性波动,不利于运动控制。对此提出了基于电压矢量和转速的误差校正方法,采用电压矢量计算直流偏置和幅值偏差并对其进行校正;采用转速谐波幅值计算相位偏差并对其进行校正。实验结果表明转速位置波动得到了很好的抑制。该方法能有效校正旋变编码器误差。

关 键 词:旋变编码器;误差校正;电压矢量;转速谐波

中图分类号:TN764

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2016)06-0081-04

Error Analysis and Correction of Resolver in Adjust Speed Drive Systems

SONG Jiajia¹, CHENG Fangbin¹, LÜ Huiming², WANG Wenting¹, HU Haofeng¹

(1. Ningbo Haitian Drive Corporation, Ningbo, Zhejiang 315803, China;

2. Ningbo NO.4 Senior High School, Ningbo, Zhejiang 315016, China)

Abstract: Because of the error sources, a resolver may introduce periodic errors in speed and position measurement, and it is harmful to adjust speed drive systems. The correction method to different errors was proposed based on the voltage vector and speed. Computing DC offset and amplitude error was corrected by voltage vector. Computing phase imperfect quadrature was corrected by speed harmonic. Experimental results indicate that the speed and position fluctuations are well suppressed. The method can correct resolver error effectively.

Key words: resolver; error correction; voltage vector; speed harmonic

旋变编码器本质上是一个变耦合变压器,原边和副边的耦合程度随转子位置呈正弦变化^[1]。在原边输入一个励磁电压,副边输出调制后的正交电压矢量。机械输入最终转换成相应的电信号。通过专用芯片或者软件方式对电信号进行解码^[2],可以得到转子绝对位置和转速信息。

旋变编码器因其可靠性高,抗干扰性强,在调速控制系统中有广泛的应用,常作为电机的转速位置反馈元件。其解码后的精度与滤波延迟决定了电机的转速位置控制精度和系统带宽^[3]。然而不论采用何种解码方式,由于硬件电路元器件的分散性及编码器设计制造安装等原因,会导致输出电压信号存在干扰,引起转速和位置测量的波动,不利于机械平滑稳定运行,也限制了系统带宽,应尽量消除。

针对旋变误差校正,文献[4]通过检测电压矢量幅值的波动校正编码器,但不能排除幅值随器件变化的影响。文献[5]在永磁同步电机模型的基础上,通过检测磁轴电流波动校正编码器,因采用闭环方法,存在参数调节的问题,且未对直流偏置做出补偿说明。文献[6]中提出了基于电压矢量的校正方法,由于需要求解超越方程,在实际应用中对系统的实时性有很大影响。本文采用软件解码的方式,定量分析了主要误差源导致的转速、位置波动,根据电压矢量及转速波动,提出相应的补偿方法,并进行验证。

1 旋变解码及误差分析

1.1 反正切解码方法

以极对数为1的旋变为例,旋变编码器及反正切解码方法如图1所示。当原边输入一个电压 $U_{\text{ref}} =$

收稿日期:2016-04-17;修回日期:2016-06-20

专利项目:宋佳佳,冯旭红,沈刚勇,等.一种旋转编码器的励磁及输出信号调理电路(201420538428.7)。

作者简介:宋佳佳(1987),男,山东安丘人,硕士,工程师,主要从事塑机用伺服驱动器软件研发工作。E-mail:songjiajia2011@gmail.com

$E \sin 2\pi ft$ 时, 副边输出电压 $M_{\sin}, M_{\cos}$ 满足以下关系^[7]:

$$\left. \begin{aligned} M_{\sin} &= KE \sin 2\pi ft \sin \theta; \\ M_{\cos} &= KE \sin 2\pi ft \cos \theta_0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: t 是时间; K 是变比; E 是励磁电压幅值; f 是励磁信号的频率; θ 是转子位置角实际值。

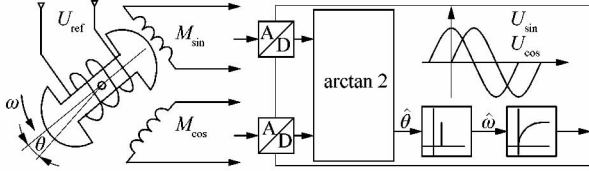


图1 旋变编码器及反正切解码框图

Figure 1 Block diagram of resolver and arc tangent decode method

选择与 f 相同的采样频率, 以周期内幅值最大处作为采样点, 即可对 $M_{\sin}, M_{\cos}$ 进行解调, 得到式(2), 并获得较高的采样信噪比, 为表述方便离散信号都以连续域形式表示:

$$\left. \begin{aligned} U_{\sin} &= \sin \theta; \\ U_{\cos} &= \cos \theta_0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $U_{\sin}, U_{\cos}$ 分别是标么后的电压矢量。

$\hat{\theta}, U_{\sin}, U_{\cos}$ 满足以下关系:

$$\hat{\theta} = \arctan 2(U_{\sin}, U_{\cos}). \quad (3)$$

式中: $\arctan 2$ 为四象限反正切函数; $\hat{\theta}$ 为转子位置计算值。对 $\hat{\theta}$ 求微分得到 $\hat{\omega}$, 因为系统噪声的影响, $\hat{\omega}$ 存在一定的干扰, 故还需对其进行滤波, 滤除高频部分。其中, ω 是转子角速度实际值, $\hat{\omega}$ 是转子角速度计算值, $\hat{\theta}$ 和滤波后的 $\hat{\omega}$ 可用于电机的矢量控制。

反正切方法简单直接, 运算效率高, 且不需要像闭环检测那样调整系统参数^[8-9]。本文采用该方法解码。

1.2 误差分析

定量分析电压矢量存在直流偏置, 幅值不对称, 相位不完全正交情况下的转速位置波动情况。

1) 对于直流偏置, 不失一般性电压矢量可以表示为:

$$\left. \begin{aligned} U_{\sin} &= \Delta_1 + \sin \theta; \\ U_{\cos} &= \Delta_2 + \cos \theta_0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: Δ_1, Δ_2 为直流偏置值。由 Δ_1, Δ_2 引起的转速波动 ω_{dc} 可以表示为:

$$\omega_{dc} = \hat{\omega} - \omega = [\arctan(U_{\sin}, U_{\cos})' - \omega]. \quad (5)$$

考虑到 Δ_1, Δ_2 较小的事实, 可以得到 ω_{dc} 近似式:

$$\omega_{dc} \approx (\Delta_1 \sin \theta + \Delta_2 \cos \theta) \cdot \omega_0. \quad (6)$$

2) 对于幅值不对称, 不失一般性, 电压矢量可以

表示为:

$$\left. \begin{aligned} U_{\sin} &= \sin \theta; \\ U_{\cos} &= (1 + \alpha) \cos \theta_0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: α 是幅值偏差值, 考虑到 α 较小的事实, 可以得到由 α 引起的转速波动 ω_{amp} 为:

$$\omega_{amp} \approx \frac{\alpha(1 - 2\cos^2 \theta)}{1 + 2\alpha\cos \theta} \omega \approx -\alpha \cos 2\theta \cdot \omega_0. \quad (8)$$

3) 对于相位不完全正交, 不失一般性, 电压矢量可以表示为:

$$\left. \begin{aligned} U_{\sin} &= \sin(\theta + \beta); \\ U_{\cos} &= \cos \theta_0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中 β 是相位偏差值, 考虑到 β 较小的事实, 可以得到由 β 引起的转速波动 ω_{ph} 为:

$$\omega_{ph} \approx \frac{-\sin 2\theta \cos \beta \sin \beta}{(\cos \theta)^2 + \sin^2(\theta + \beta)} \omega \approx -\beta \sin 2\theta \cdot \omega_0. \quad (10)$$

式(6), (8)和式(10)都是在近似条件下求得, 符合工程实际。不仅如此, 在以上3种误差同时存在的条件下, 利用式(5), 经过合理的近似, 仍能得到相同的结果。可见, 以上误差源导致的转速波动在工程范围内可以认为是相互独立的。对转速波动表达式进行积分, 选取合适的初值, 便可得到误差源导致的位置测量波动, 同理也可以认为他们是相互独立的。位置误差见表1。

表1 位置误差表

Table 1 Position error table

信号	误差		
	直流偏置	幅值不对称	相位不完全正交
$U_{\sin}$	$\Delta_1 + \sin \theta$	$\sin \theta$	$\sin(\theta + \beta)$
$U_{\cos}$	$\Delta_2 + \cos \theta$	$(1 + \alpha) \cos \theta$	$\cos \theta$
位置波动	$-\Delta_1 \cos \theta + \Delta_2 \sin \theta$	$(-\alpha/2) \sin 2\theta$	$(-\beta/2)(1 - \cos 2\theta)$

2 旋变误差补偿

根据不同的误差源, 采用不同的误差补偿方法。补偿方法的设计主要考虑以下几点:

1) 补偿方法简单可靠, 在处理器能力范围内, 满足实时性要求;

2) 补偿方法能同时补偿位置、转速波动和电压矢量误差;

3) 补偿方法具有通用性, 适合大多数调速范围, 能推广到其他误差波动形式。

2.1 直流偏置和幅值不对称补偿^{[6]45}

对于直流偏置, 考虑式(4), 对 $U_{\sin}, U_{\cos}$ 进行积分可得到直流偏置值。由于电机实际运行中, 速度并不

唯一,故仅取一个周期内电压矢量极值作为参考点,并多次测量求其平均值,补偿方法:

$$\left. \begin{aligned} S_{\text{com}} &= (\overline{U_{\text{smax}}} + \overline{U_{\text{smin}}})/2; \\ C_{\text{com}} &= (\overline{U_{\text{cmax}}} + \overline{U_{\text{cmin}}})/2. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: $S_{\text{com}}, C_{\text{com}}$ 分别为 U_{sin} 和 U_{cos} 的补偿值; $\overline{U_{\text{smax}}}, \overline{U_{\text{smin}}}, \overline{U_{\text{cmax}}}$ 和 $\overline{U_{\text{cmin}}}$ 为 $U_{\text{sin}}, U_{\text{cos}}$ 在多个周期内采样最大、最小值的平均值。补偿时将 $U_{\text{sin}}, U_{\text{cos}}$ 减去相应的补偿值 $S_{\text{com}}, C_{\text{com}}$ 。

幅值不对称的补偿可以直接利用式(11)中的计算结果,补偿方法:

$$A_{\text{com}} = \frac{\overline{U_{\text{smax}}} - \overline{U_{\text{smin}}}}{\overline{U_{\text{cmax}}} - \overline{U_{\text{cmin}}}}. \quad (12)$$

式中 A_{com} 为幅值补偿系数。公式(12)在计算过程中,是对幅值求差,至于是否存在直流偏置,并不影响对幅值的补偿。补偿时将 U_{com} 乘以补偿系数 A_{com} 即可。

以上补偿方法可以实时在线运行,经过多次迭代,幅值补偿稳定后,直流偏置补偿也趋于稳定,并且可以同时补偿位置、速度和电压矢量上的误差。

2.2 相位不完全正交补偿

根据1.2节中的结论,由相位不完全正交引起的转速、位置波动和其他2种误差因素相互独立。所以采用检测速度波动2次谐波正弦波分量的方法,可以求得 β 并用于误差校正, β 的计算离线进行,计算时给定调速系统一个固定的转速 ω_0 ,使稳态运行。补偿方法见图2。

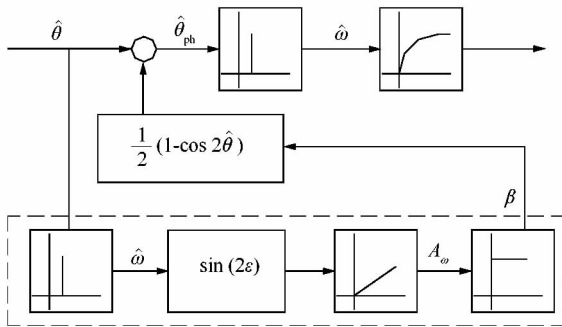


图2 相位不完全正交补偿框图

Figure 2 Block diagram of imperfect quadrature compensation

图2中: ϵ 是 ω_0 的积分, A_{ω} 是转速2次谐波正弦分量幅值, $\hat{\theta}_{\text{ph}}$ 为相位补偿后的角度计算值。

已知转速波动有式(10)的形式,利用正交特性可以计算出 A_{ω} :

$$A_{\omega} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \hat{\omega} \sin 2\epsilon d\epsilon. \quad (13)$$

由式(10)和表1,即可求得由不完全正交引起的位置波动 θ_{ph} :

$$\theta_{\text{ph}} = \frac{1}{2} (A_{\omega}/\omega_0) \cdot (1 - \cos 2\theta). \quad (14)$$

现已知 $\hat{\theta}$ 和 θ_{ph} ,可求实际角度。由于 θ_{ph} 是关于 θ 的函数, θ 未知,所以并不能直接相减。又因为 $\hat{\theta} \approx \theta$,所以使用 $\hat{\theta}$ 代替 θ 进行补偿,公式如下:

$$\theta_{\text{ph}} = \hat{\theta} - \theta_{\text{ph}} \approx \hat{\theta} - \frac{1}{2} (A_{\omega}/\omega_0) \cdot (1 - \cos 2\theta). \quad (15)$$

3 实验验证

使用16.5 kW永磁同步电机,多摩川旋变编码器TS2640N321E64搭建实验平台,构建上文中说明的解码方式和误差校正方法进行验证。速度反馈采用一阶滤波器,滤波时间4 ms,采样时间125 μs ,以1000 r/min为例截取一个机械周期(480个采样点)的转速,测试结果如图3~6所示。

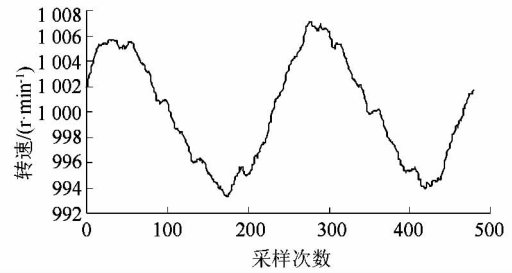


图3 补偿前转速波动

Figure 3 Speed disturbance before compensation

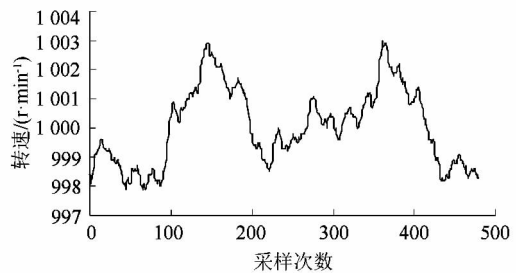


图4 补偿后转速波动

Figure 4 Speed disturbance after compensation

从时域上看,补偿前转速波动的峰值为15 r/min,补偿后转速波动峰值为5.4 r/min,转速波动得到了很好的抑制。

从频率域上看,补偿前转速波动中一次谐波和两次谐波幅值较大,补偿后,一次谐波及两次谐波虽然没有完全消失但也得到了很好的抑制,而高次谐波基本不变。

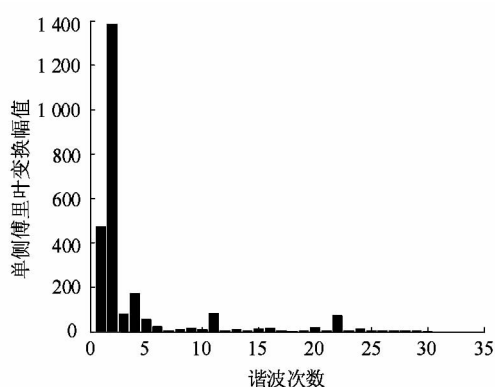


图5 补偿前转速频谱

Figure 5 Speed spectrum before compensation

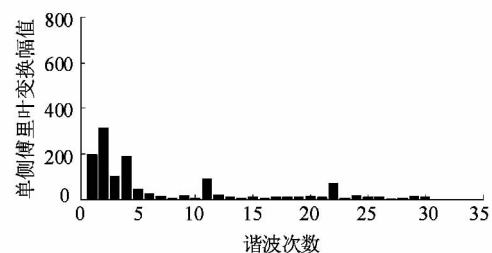


图6 补偿后转速频谱

Figure 6 Speed spectrum after compensation

因转速是由位置的微分求得,易知位置波动也得到了很好的抑制,验证了方法的有效性。

4 结语

本文针对旋变编码器误差特性提出了相应的补偿方法,补偿方法简单可行,易于编程实现。经理论分析和实验验证,该方法能同时补偿大部分位置和转速误差。对相位不完全正交的补偿本质上是一种谐波补偿

方法,如有必要可以推广到对其他谐波次数的转速位置误差补偿,同样也适用于基于芯片解码的系统,具有普遍意义。

参考文献:

- [1] Moog Components Group. Synchro and resolver engineering handbook [M]. Virginia: Moog Inc, 2004: 1-2.
- [2] 黄苏融, 罗志武, 王爽, 等. 车用磁阻式旋变解码器及其校正算法研究[J]. 电机与控制应用, 2011, 38(12): 1-6.
- [3] Axsys Technologies Inc. Pancake resolvers handbook[Z]. San Diego: Axsys Technologies Inc, 2005: 4.
- [4] BUNTE A, BEINEKE S. High-performance speed measurement by suppression of systematic resolver and encoder errors [J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2004, 51(1): 49-53.
- [5] HWANG S H, KIM H J, KIM J M, et al. Compensation of amplitude imbalance and imperfect quadrature in resolver signals for PMSM drives[J]. IEEE transactions on industry applications, 2010, 47(1): 134-143.
- [6] 刘新正, 邱德锋, 李予全, 等. 正余弦编码器细分算法误差分析及补偿[J]. 微电机, 2010, 43(11): 42-47.
- [7] SARMA S, AGRAWAL V K, UDUPA S. Software-based resolver-to-digital conversion using a DSP [J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2008, 55(1): 371-379.
- [8] BENAMMAR M, BEN-BRAHIM L, ALHAMADI M A. A high precision resolver-to-DC converter [J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 2005, 54(6): 2289-2296.
- [9] KHABURI D A. Software-based resolver-to-digital converter for DSP-based drives using an improved angle-tracking observer [J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 2012, 61(4): 922-929.
- [10] 宋佳佳, 冯旭红, 沈刚勇, 等. 一种旋转编码器的励磁及输出信号调理电路: 201420538428.7[P]. 2015-03-18.

(上接第76页)

值人民币的分拣包装,从而提高钱币处理行业的工作效率,减轻人工压力。

参考文献:

- [1] 杨胜峰, 吴志敏. 西门子 PLC 与变频器触摸屏综合应用教程[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [2] 王东署. S7-200 PLC 基础及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [3] 黄文凯, 伍冯洁. Arduino 开发实战指南[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [4] 顾绳谷. 电机及拖动基础[M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2008.

- [5] 邓星钟. 机电传动控制[M]. 5版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2011.
- [6] 伯特霍尔德·霍恩. 机器视觉[M]. 王亮, 蒋欣兰, 译. 北京: 中国青年出版社, 2014.
- [7] LAGANIERE R. OpenCV2 计算机视觉编程手册[M]. 张静, 译. 北京: 科学出版社, 2013.
- [8] BRADBURY A, EVERARD B. 树莓派 Python 编程指南[M]. 王文峰, 译. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [9] UPTON E, HALFACREE G. 树莓派用户指南[M]. 郭栋, 许金超, 王伟, 译. 3版. 北京: 人民邮电出版社, 2016.
- [10] 马新玲, 贺明明, 严武林. 一种手摇皮带式硬币分拣机: ZL201520738166.3[P]. 2015-02-30.