

[编码器]

增量式编码器对转速的测量方法与精度分析

文/杜 琼 王永红 肖 哲
上海能传电气有限公司

转速精度是变频器驱动电动机运行的重要指标，如何对电动机转速进行有效测量，以及如何对转速精度进行合理标定以确定变频器的控制性能更加值得关注。以增量式编码器测速为例，阐述了变频器测量电动机转速的方法，并对如何进行精度的标定做了相关说明。

转速是反映旋转机械运行状态的一个重要参数，是旋转机械动力转矩、惯性转矩和负载转矩共同作用的结果。通过对转速瞬时值的测量，可以定量了解转动机械内部动力发生装置的瞬时工作状态，了解负载的施加过程，为保障设备正常运转、分析机械瞬态性能、进行机械故障诊断提供依据。在变频装置驱动电动机进行调速控制的相关领域，电动机的转速检测常将增量式编码器安装于被测电动机轴上进行，对于一些对转速精度要求较高的场合，工艺上需要电动机的稳速精度达到万分之一，如何实现对转速的准确测量是对精度进行有效分析的前提。本文将从编码器的内部结构以及安装工艺方面入手，结合变频器对编码器测速的方法进行综合分析，最终获得合理有效的转速精度测量方法。

测速方法

增量式编码器常以ABZ信号代表相关测速脉冲信号，其中AB信号为理论上正交的差分信号，为旋转一圈过程中输出的固定脉冲数，Z信号为编码器旋转一周的脉冲信号，如图1所示。

定义电动机的额定转速为 n_1 (RPM)，调速范围在 $n_0 \sim n_1$ 之间，编码器每转脉冲数为 P ，计数脉冲

频率为 f_c 。采用变速M/T法测速，每个计算频率 f_s 的编码器脉冲数为 m_1 ，每个计数周期的计数脉冲数为 m_2 。变速M/T法测速示意图如图2所示。

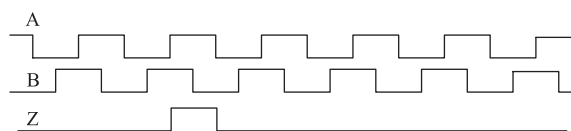


图1 编码器ABZ信号示意图

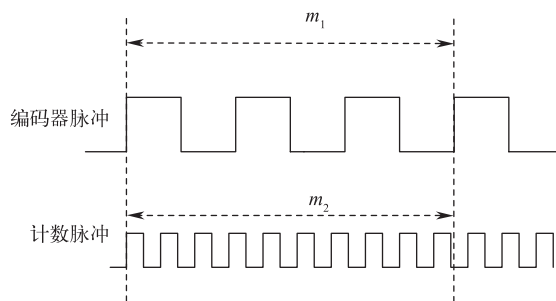


图2 变速M/T法测速示意图

转速的计算公式为

$$n = \frac{f_c}{P m_2 / m_1} \times 60 \quad (1)$$

在计算得到实时转速后，为确保每个采样周期都能有实时转速更新，通过下式

$$m_1 = (\text{int}) \frac{Pn/60}{f_s} \quad (2)$$

重新计算 m_1 ，在实际应用中， m_1 取值为整数（向下取整）。

测速精度分析

采用变速M/T法测速的系统误差为

$$\varepsilon_c = \frac{1}{m_2} = \frac{Pn}{60m_1 f_c} = \frac{P}{60f_c} \times (\text{int}) \frac{60f_s}{P} \approx \frac{f_s}{f_c} \quad (3)$$

比如在变频器测速系统中，计数脉冲 f_c 为640 MHz，编码器测速执行频率 f_s 为640 Hz，则测速系统误差为

$$\varepsilon_c = \frac{640}{40 \times 10^6} = 0.0016\% \quad (4)$$

因此采用M/T测速，理论上只要计数频率足够高，均能够达到万分之一以内的控制精度。但实际上在编码器安装时，不可避免地存在安装精度的差异，需要在测量时考虑编码器安装的工艺与精度，如图3所示。图3a是理想安装工况下的示意图，实际安装过程中由于安装工艺等相关的局限性，安装的效果图如图3b所示，编码器与电动机转子无法达到理论上完全的同心同轴。

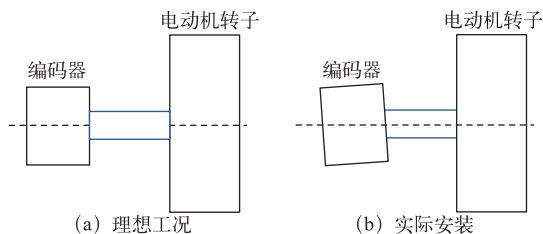


图3 编码器安装示意图

图3b带来的结果是，即使电动机转子匀速旋转，编码器的转速在一个旋转周期内仍有转速波动，转速信号如图4所示。编码器旋转一周的时间与电动机转子旋转一周的时间一致，但在旋转一周之内的不同位置，转速会略有差异。

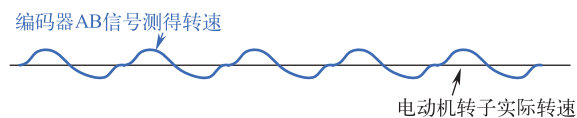


图4 编码器信号测速波形示意图

除上述安装工艺所带来的测速误差外，编码器在制作工艺上也存在相关误差，图5为光电编码器测速结构示意图，当机械系统旋转时，光栅板跟随

系统旋转，通过光电转换形成ABZ信号。

若光电编码器半径为50 mm，则其外围弧长约为314 mm，若光电编码器脉冲数为一圈2 500个脉冲，则需要在314 mm的弧长上均匀分布2 500个光栅，每个光栅之间的间距为0.125 6 mm。

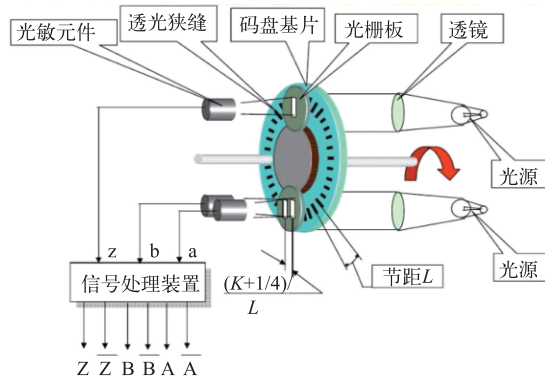


图5 增量式编码器结构示意图

若编码器做理论上的匀速旋转，则编码器每个脉冲所产生的时间间隔应该完全一致，但考虑光栅制作工艺以及制作精度，实现间隔完全一致不现实，若要达到0.01%的测速精度，则要保证光栅之间的间距误差不大于0.01%，即每个光栅之间的距离误差不得大于12.56 nm，而12.56 nm的制作标准对编码器光栅的制作工艺要求极高。匀速旋转时理论上任意时间内编码器相邻间隔的两脉冲间隔 x_1 与 x_2 应该相等，如图6所示，但各编码器技术手册中均有相邻脉冲之间允许误差为 $\pm 5\%$ 甚至更高的相关声明，这主要也是考虑光栅制作工艺造成的系统误差。

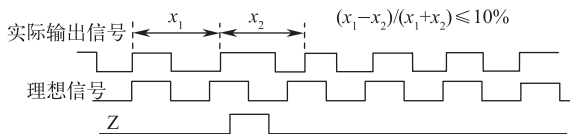


图6 编码器相邻脉冲差异示意图

因此，通过M/T法实时计算得到的转速，必然包含由于制作工艺以及安装工艺所带来的编码器系统误差，实时转速作为反馈信号进行速度环节的控制，体现在输出转矩指令中就是包含相关波动信息，但此类波动对于驱动的机械设备来说变化数值较小，不足以引起电动机系统旋转一周内较大波动，经实际测试验证此类误差可被控制系统忽略，编码器安装精度控制在0.1%以内，基本不影响系统

旋转一周的转速。若实际项目应用中所驱动负载为风机类负载，其转动惯量较大，变频器输出转矩指令的较小波动对系统驱动性能的影响则更小。

综合上述编码器制作工艺与编码器安装工艺的客观原因，在实际考核转速稳定性时，采取对一个完整的旋转周期的Z信号进行转速的衡量，可有效避免编码器安装与制造工艺所带来的系统误差。如果测得相邻Z信号上升沿的间隔时间 Δt ，则可计算出当前的转速，计算公式为

$$n=1/\Delta t\times 60\tag{5}$$

验证性测试

为验证上述推论的正确性，采用变频器驱动电动机进行了实际驱动测试。首先将电动机驱动至较高转速后，对变频器进行封锁驱动脉冲操作以使电动机惰转停车，图7曲线是电动机惰转时截取编码器惰转两圈的实时测速数据，直线为选取编码器测速曲线中居中的两点拟合而成，理论上电动机自由停车短时间内转速为线性下降趋势，但实际测得的转速信号存在与旋转周期一致的转速波动。

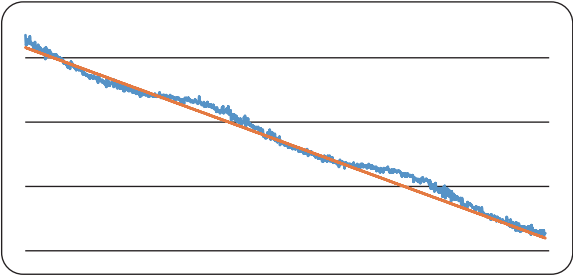


图7 电动机惰转测速曲线

图7曲线相减，可得到如图8所示波形，其中的两个峰值时间差刚好为电动机旋转一周的时间，其峰值为0.04%，即为编码器安装工艺导致的旋转一圈编码器反馈信号的波动。

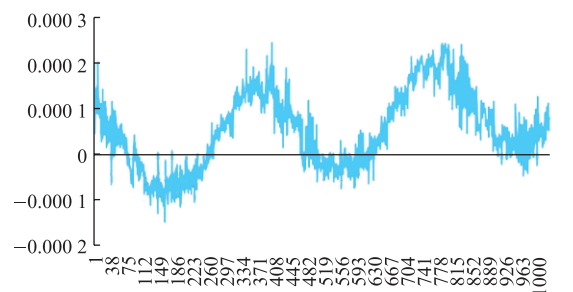


图8 电动机惰转周期波动波形示意图

当电动机稳速运行时，用示波器捕获Z信号的脉冲上升沿，可以计算出相邻Z信号的周期与频率，从而可以获得电动机旋转一圈的速度，对各个驱动点稳态运行时随机捕获任意两Z信号间隔并记录的数据见表1。从表1中可以看出，基于Z信号所计算的电动机转速，各个测试数据的电动机转速稳定性均能达到额定转速万分之一的精度范围。

表1 Z信号测速记录表

测试转速点	Z频率/Hz	转速/(r/min)	波动/(r/min)	转速波动率(%)
1	2.360 266	141.615 96	0.008 04	0.001 072
	2.360 168	141.610 08		
	2.360 132	141.607 92		
2	3.496 241	209.774 46	0.023 4	0.003 12
	3.496 437	209.786 22		
	3.496 631	209.797 86		
3	4.619 298	277.157 88	0.021 12	0.002 816
	4.619 564	277.173 84		
	4.619 212	277.152 72		
4	5.742 659	344.559 54	0.058 8	0.007 84
	5.742 13	344.527 8		
	5.743 11	344.586 6		
5	6.852 37	411.142 2	0.025 98	0.003 464
	6.851 939	411.116 34		
	6.852 372	411.142 32		
6	7.948 494	476.909 64	0.074 4	0.009 92
	7.949 336	476.960 16		
	7.949 734	476.984 04		
7	9.059 105	543.546 3	0.041 4	0.005 52
	9.059 795	543.587 7		
	9.059 502	543.570 12		
8	10.141 721	608.503 26	0.108 6	0.014 48
	10.143 106	608.586 36		
	10.143 531	608.611 86		
9	11.236 003	674.160 18	0.047 4	0.006 32
	11.236 474	674.188 44		
	11.236 793	674.207 58		
10	12.305 746	738.344 76	0.052 02	0.006 936
	12.305 393	738.323 58		
	12.30 626	738.375 6		

结束语

采用Z信号测速的方法，每旋转一周进行一次转速的测量，可有效避免编码器安装精度以及制作精度带来的系统误差，但刷新率不高，在一些需要

低速驱动运行且要求较高动态响应的场合并不适用,为有效解决转速精度与测量实时性的矛盾,可采取下述方法进行处理。

1) 对编码器的测速信号进行多线程测量,即针对A/B每个光栅信号进行旋转一周测量,比如分别对间隔约 90° 的脉冲信号进行旋转一周测量,则旋转一周可更新四组实时转速数据,理论上测量线程足够多,可实现对每个光栅信号旋转一周的速度测量,旋转一周可更新与编码器每转脉冲数等量的数据,即可实现实时测量转速,此测量方法在测量线程较多时占用系统资源量较大。

2) 如果系统更加关注各个调速点的稳速精度,则可采用陷波器方法将旋转一周的波动进行滤除,得到更加准确的实时测速数据,此测量方法仅需要增加带通滤波计算,占用资源较小,但对于转速不断变化的调速系统适用性较低,需要在不同转速点实时调整带通滤波参数。

综上所述,转速精度作为变频器驱动电动机运行的重要指标,很多变频器用户均要求设备具有较高的转速精度,然而对于转速精度的定义以及测量转速方式方法的合理性并无具体描述与要求,往往在出现工艺控制问题时造成一定的分歧。经过数据分析与实际验证不难发现,稳速精度是衡量变频器驱动电动机稳定运行的重要指标,可通过测量一定时间内转速的波动范围来确定变频系统的稳速精度,结合转速给定阶跃后的系统响应时间去判断变频器的驱动性能更具有参考价值。EA

(收稿日期: 2022-01-17)

参考文献

- [1] 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.
- [2] 陈晓荣,陈淑芬,杨甫勤.增量式编码器的相位编码细分研究[J].仪器仪表学报,2007,28(1): 4.
- [3] 张九才,王文祥,杨显志,等.增量式编码器抗抖性研究[J].自动化仪表,2005,26(10): 2.
- [4] 鲜浩,任爱芝,盛仲飏.增量式编码器数据采集[J].华北工学院学报,2003.
- [5] 梅荣军,骆敏舟,陈晓丹.基于FPGA的增量式编码器信号采集系统[J].测控技术,2014(7): 54-56.
- [6] 刘小树.基于FPGA的增量式编码器自动检测系统研究[D].北京:中国科学院大学,2016.
- [7] 时魁,高云国,赵勇志,等.增量式光栅编码器与绝对式编码器性能比较和分析[J].机械设计与制造,2011(1): 2.
- [8] 韩念琛,薛应芳,秦将.增量式编码器输出信号细分方法研究[J].太原理工大学学报,2011,42(1): 4.
- [9] 郭艳兵,许海涛.高性能交-直-交同步电动机变频调速系统的研究与应用[J].电气应用,2021,40(12): 26-33.
- [10] 张翼翔,王鑫.重载铁路牵引变电所电流增量保护动作分析[J].电气应用,2020,39(11): 80-85.

声 明

《电气时代》杂志唯一投稿渠道

登录电气时代官网www.eage.com.cn,点击“我要投稿”

咨询电话: 010 - 68993981