

转动惯量自检测在同步电机位置控制系统中的应用

陈 荣

(盐城工学院 信息工程学院,江苏 盐城 224051)

摘要:同步电机位置控制系统中,影响系统位置响应性能的因素很多,其中最主要的因素是对象负载情况及对象电机轴联转动惯量的变化。分析了轴联转动惯量变化对电机位置响应性能的影响,提出借助电机运动方程实施电机轴联转动惯量的检测,其检测精度满足实际工程需要。通过检测结果,位置控制系统可以实施控制参数的在线自动调整,以保证控制对象获得优异的位置响应性能。

关键词:同步电机;转动惯量;自检测;参数调整;位置响应

中图分类号:TM341 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5322(2011)01-0001-04

按照调节器工程设计方法,对永磁同步电机位置控制系统位置环设计、仿真与实验分析,为保证位置系统响应快速且不超调,位置环应该按照典型I型系统设计,调节器应为比例调节器^[1]。在负载变动、轴联转动惯量、位置给定及调节器输出限幅数值(电机最大速度)发生变化时,调节器的参数应按照对象具体情况适当调整,以保证系统获得优异的位置响应^[2-4]。所有因素中,负载变化及轴联转动惯量变动是影响系统位置响应的主要因素。研究表明,若对系统定位精度要求高,而响应快速性在空载运行时所确定的调节器参数下可以满足要求,实际控制系统可以不考虑负载对位置响应过程的影响,调节器参数可以保持不变。本文将探讨电机轴联转动惯量对系统的影响及其轴联转动惯量自检测用于控制系统调节器参数的调整方法。

1 电机轴联转动惯量变化对系统的影响

系统位置环按典型I型系统设计,其参数必须满足式(1)的要求,目的是不希望控制系统出现位置响应超调。

$$K_{p\omega}K_{\omega}T_{\omega}/9.55 \approx 0.25 \quad (1)$$

式中 $K_{p\omega}$ 、 K_{ω} 、 T_{ω} 分别为位置调节器比例系数、速度闭环等效惯性环节比例系数和等效时间

常数。按照位置环的设计分析,位置调节器应为比例调节器。位置给定时,位置调节器输出有有限幅,该值对应系统对象电机所允许的速度限幅。实例试验系统速度限幅为2 000 r/min时,位置环响应仿真结果如图1所示。

图1为单电机空载时位置响应,左图为实例试验系统按设计参数的位置响应,可见,此时响应过程并非最优。将调节器比例系数调整到合适值时位置响应较好,见中间图。右图为比例系数偏大时的响应,此时,出现了位置响应超调。

图中,上图为电机速度与位置响应曲线,下图为电机交轴电流波形。

当电机转动惯量2倍、3倍、4倍、5倍时,位置调节器比例系数调整约为图1最优响应情况下的1/2、1/3、1/4、1/5时,控制系统可获得最优位置响应过程。由此可见,随着电机轴联转动惯量增加,位置控制系统为获得最优位置响应,调节器比例系数将随之比例减小。

工程设计时,将速度闭环用等效一阶惯性环节代替,由此完成位置环的工程设计。从工程设计到仿真分析,可以看出这种简化等效可以满足实际工程需要,工程设计参数与仿真结果接近,说明调节器工程设计方法可应用于位置环调节器的设计。

收稿日期:2010-09-29

基金资助:江苏省高校自然科学研究计划项目(08KJB470004);盐城工学院开放研究项目(XKY2009067)

作者简介:陈荣(1963-),男,江苏大丰人,教授,博士,主要研究方向为电机调速技术、交流伺服系统。

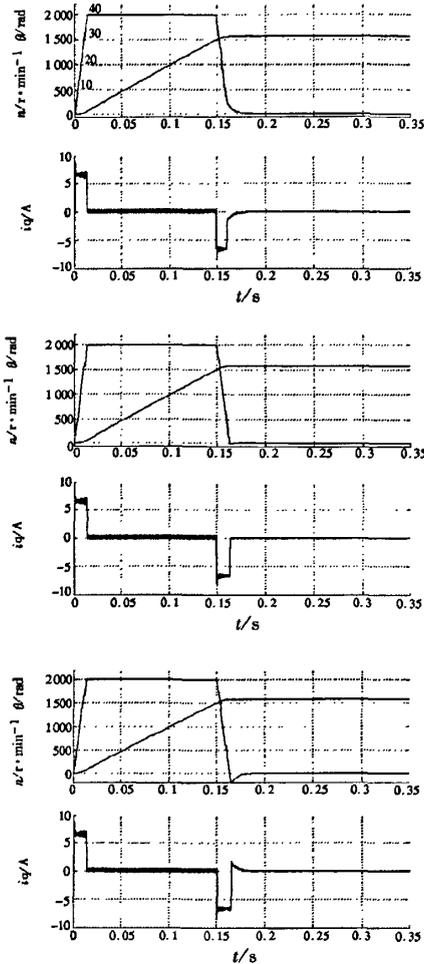


图 1 位置调节器参数调整时的位置响应
Fig. 1 The position response when regulating parameter was changed

对象转动惯量恒定,通过调整调节器比例系数,可以使系统位置环获得优异的响应性能。系统获得最优位置响应时,系统的最后定位就是电机的制动过程,当电机制动结束时,系统的定位过程便同时完成,因此,需要调节器参数和对象参数之间很好地配合,也就是要满足式(1)。

电机转动惯量增加时,为避免位置响应过程超调,保证位置响应既快又准,调节器的比例放大系数要相应减小,否则,系统会因为闭环主极点的减小,而延缓响应过程,系统进入稳定的时间延长。因此,为获得最优位置响应,调节器参数必须随着转动惯量的变化而适时调整^[5-9]。

2 电机轴联转动惯量的自检测

实际电机控制系统运行过程中,其轴联转动惯量可能发生变化,为使控制系统在负载转动惯量变化时具有自适应性,调节器的参数必须随着轴联负载转动惯量的变化而实时修改。理论上讲,不论负载转动惯量多大,经过调整,总可以使位置响应过程最优。但这种调整工作是离线进行的,需要运行人员清晰了解被控对象,并且熟悉系统参数调整,这在实际工作中是很难做到。如在控制系统中加入参数自检测技术,通过检测结果自动调整调节器参数,可以在轴联负载转动惯量变动情况下获得比较好的位置响应。

如果位置控制系统能够实时检测负载转动惯量,并在检测完成后对调节器参数进行修改,可以使位置控制系统对负载转动惯量参数变化有适应性。根据电机运动方程,如已知电机动态加速力矩,就可以借助于该方程实现电机转动惯量的在线测量。但在方程中,存在和速度成正比的磨擦阻力矩,且磨擦系数未知,如考虑这个因素,在线测量将比较困难。然而,该磨擦阻力矩占额定电磁力矩的比例较小,忽略它并不会引起过大的测量误差,故在在线测量时可先认为其数值等于零,空载时由电机运动方程得:

$$T_{em} = J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (2)$$

观察图 1,电机速度阶跃过程中,速度基本按线性规律变化,电机加、减速力矩为系统所设最大力矩。在电机动态升降速过程中,假定选择测量的两点速度分别为 ω_{r1} 、 ω_{r2} , 两点的时间点为 t_1 、 t_2 ,代入方程(2)得:

$$J = \frac{T_{em}(t_2 - t_1)}{\omega_{r2} - \omega_{r1}} \quad (3)$$

由式(3)可以在线测量位置控制系统被控对象转动惯量的数值。

很显然,这里的计算因忽略磨擦阻力矩而带来测量误差,且在电机启动和制动时所测数值将不一样。为提高在线检测准确度,可假定电机速度变动过程中磨擦阻力矩恒定,并分别检测电机启动和制动时的转动惯量。则有:

$$T_{em} - T_{\Omega} = J \frac{\omega_{r2} - \omega_{r1}}{t_2 - t_1} \quad (4)$$

$$-T_{em} - T_{\Omega} = J \frac{\omega_{r4} - \omega_{r3}}{t_4 - t_3} \quad (5)$$

式(5)中,制动时刻 t_3 、 t_4 所对应电机速度为 ω_3 、 ω_4 , 假定由式(2)求得转动惯量分别为 $J_1 = \frac{T_{em}(t_2 - t_1)}{\omega_2 - \omega_1}$ 、 $J_2 = \frac{T_{em}(t_4 - t_3)}{\omega_3 - \omega_4}$, 则由式(4)和式(5)得:

$$J = \frac{2J_1J_2}{J_1 + J_2} \quad (6)$$

由式(4)~(6)可见,考虑摩擦阻力矩时,电机实际转动惯量与启、制动时所测等效转动惯量有关,由于摩擦阻力矩占据系统额定电磁力矩比例较小, J_1 、 J_2 间的差值不大,实际转动惯量可以看成启、制动时所测等效转动惯量的算术平均值。

单电机转动惯量测量见图2,初始给定转动惯量为零,示波器显示检测结果对应直流电压0.123 V,按照式(2)计算得到转动惯量数值为 $3.1365 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。再看电机制动过程波形,发现其数值变化不大,测量数值为0.115 V,对应转动惯量数值为 $2.9325 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。按照式(6)求得电机实际转动惯量为 $3.031 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,与电机实际转动惯量的误差为3.5%,完全满足实际工程需要。实际上,转动惯量在线检测的目的是对电机控制器参数在一定范围内做调整,不需要连续调节,故本法所测数据完全满足在线自调整的需要。

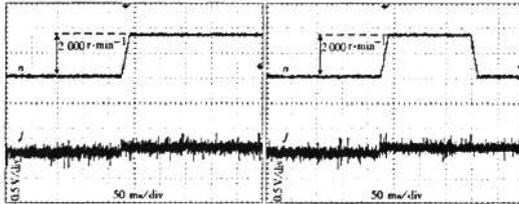


图2 单电机转动惯量的检测

Fig.2 The rotational inertia sketch map of detecting one motor

两电机通过联轴器 ($J = 5.887987 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$) 联接,对其进行轴联转动惯量检测,测量过程如图3。同样在开始时,设置转动惯量为零,电机启、制动时测量示波电压值分别为0.283 V和0.255 V,分别对应电机轴联负载转动惯量启动时为 $7.2165 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,制动时为 $6.5025 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,按照式(6)求得电机轴联转动惯量为 $6.84 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,与两电机转子转动惯量及联轴器转动惯量的和相当。

电机加标准惯性飞轮时 ($J = 10.0563 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$),电机启、制动示波检测直流电压为

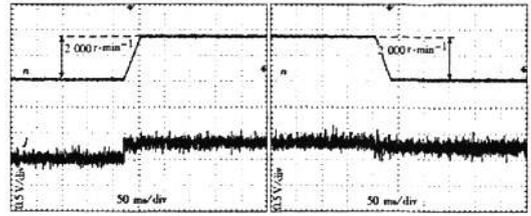


图3 两台电机轴联转动惯量的检测

Fig.3 The rotational inertia sketch map of detecting two motors

0.510 V 和 0.481 V,测试波形见图4所示。对应转动惯量在启动时 $13.005 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,制动时 $12.265 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,按照式(6)求得电机轴联转动惯量 $12.625 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。该检测值对整个轴联转动惯量检测误差为4.3%,完全满足实际工程参数调整的需要。

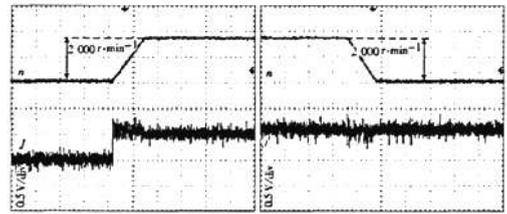


图4 电机带标准惯性飞轮时转动惯量的检测

Fig.4 The rotational inertia sketch map of detecting one motor with a standard flywheel

3 轴联转动惯量自检测的实际应用

通过负载转动惯量在线检测,电机位置控制系统获得电机轴联转动惯量的检测数值,然后,针对不同轴联转动惯量数值,设置相应的位置调节器参数,即按照式(1)调整位置调节器比例放大系数,使系统在轴联转动惯量变化时,不需要人为调整控制器参数,由系统自身调节就可以获得比较好的响应性能。按照这种思想,将轴联转动惯量分成几段,每一段对应一个调节器参数,获得位置响应见图5所示。

图5中,按照电机转动惯量 $J < 5 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 、 $5 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \leq J < 10 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 、 $J \geq 10 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 3种情况下,通过检测出电机同轴转动惯量,自动配置位置调节器参数情况下的位置响应。

诚然,此处调节器参数是按轴联转动惯量的大小分段调整,且保证在本分段转动惯量范围内系统均不出现响应超调,不是单独针对电机当时

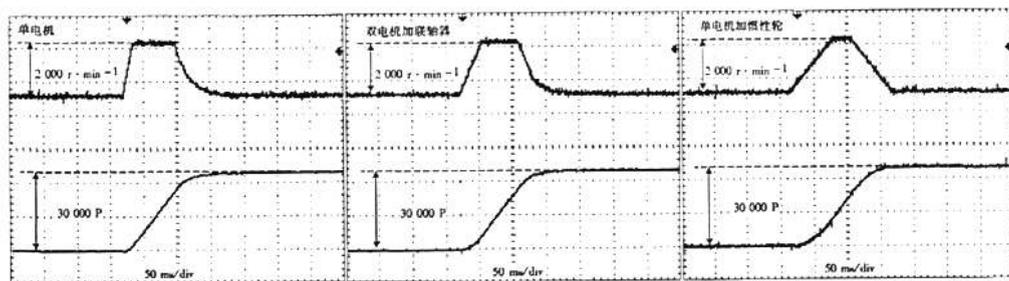


图 5 位置调节器参数自调整情况下的位置响应

Fig. 5 The position response when regulating parameter was changed itself

转动惯量所进行的适时调整。如要再提高其位置响应性能,可将轴联转动惯量的分段再小一点,可以保证在转动惯量有少量变化时也有很好响应。或建立调节器参数与被控对象转动惯量间的函数关系,系统根据该函数关系实时计算调节器参数,保证对象转动惯量变化时有最优响应。实际上,

由于控制系统在进行转动惯量自检测时,其检测结果本身就有误差,而且还受到诸如摩擦阻力矩等因素的影响,因此,实际系统过程不必也无法实现在任意转动惯量情况下均获得最优位置响应过程,只需满足在一定范围内获得近似最优响应过程即可。

参考文献:

- [1] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [2] Schulz S E, Rahman K M. High performance digital PI current regulator for EV switched reluctance motordrives[C]. 2002 IEEE Industry Applications Conference, 37th IAS Annual Meeting, vol. 3, Pittsburgh, Pennsylvania, USA:1 617 - 1 624.
- [3] Kadjoudj M, Benbouzid M E H. A Robust Hybrid Current Control for Permanent Magnet Synchronous Motor Drive[C]. IECON'01, 2001:2 068 - 2 073.
- [4] Jongsun Ko, Sungkoo youn, Youngil Kim. A Robust Adaptive Precision Position Control of PMSM[C]. IEEE2002 37th IAS Annual Meeting Vol. 1, Pittsburgh Pennsylvania, USA:120 - 125.
- [5] 张兴华等. 高性能伺服系统转动惯量辨识及控制[J]. 北华大学学报, 2005, 6(5):466 - 468.
- [6] 陈荣. 基于磁场定向控制的永磁同步电机参数测量[J]. 河海大学学报, 2004(6):684 - 688.
- [7] 周海方, 王雪帆. 电机转子转动惯量的测量[J]. 电气技术, 2006(12):37 - 40.
- [8] 李国丽, 王群京. 无传感器交流伺服系统中永磁电机的参数测试[J]. 微特电机, 1997(1):6 - 8.
- [9] 林飞, 马莉, 张春鹏, 等. 基于 Tabu 搜索的异步电机矢量控制 PI 参数优化[J]. 电工技术学报, 2003, 18(5):59 - 62.

Inertia Self - Detection Applied in PMSM Position Control System

CHEN Rong

(University of Information Technology, Yancheng Institute of Technology, Jiangsu Yancheng 224051, China)

Abstract: There are many factors which influence position response performance of PMSM position control system, all of which, the main factors are the load condition and the motor rotational inertia connected in shaft. The influence of rotational inertia on motor position response was analyzed. With the help of motor movement equation, the rotational inertia can be detected, and the detection precision satisfied practical requirements. By the detection result, the adjuster's parameter of position control system can be online regulated automatically, and excellent position response performance can be achieved.

Keywords: PMSM; Rotational Inertia; Self - Detection; Parameter Adjusting; Position Response

(责任编辑:沈建新;校对:张英健)