

文章编号:1000-582X(2010)05-022-07

永磁交流伺服精密驱动系统机电耦合试验分析

林利红, 陈小安, 周 伟

(重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

摘 要: 为了研究永磁交流伺服精密驱动系统多因数耦合下的动态特性, 构建了以 PMAC 多轴运动控制卡为核心, 以 IPC 为支撑平台的永磁交流伺服精密驱动系统的试验体系结构。通过软件原型系统, 采集了系统在空载和加载运行状态下的电流、转速和转矩等响应信号, 并将物理试验研究与理论分析结果进行了对比, 验证了永磁交流伺服精密驱动系统机电耦合分析的正确性。研究内容和结果有助于分析设计参数和机电耦合参数对系统性能指标的影响机理和规律, 有利于对永磁交流伺服精密驱动系统进行动态设计。

关键词: 永磁交流伺服精密驱动系统; 机电耦合; 精密传动; 动力学

中图分类号: TN820. 3; S220. 31

文献标志码: A

Electromechanical coupling experimental analysis of permanent magnet AC servo precision drive system

LIN Li-hong, CHEN Xiao-an, ZHOU Wei

(State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University,
Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: To research the dynamic characteristics of the permanent magnet AC servo precision drive system coupled with multi-factors, the experiment system is constructed with PMAC as the core and IPC as the support platform. Through software prototype system, response signals such as the current, speed and torque are acquired when the system is in the no-load and in the loading operating state, then the theoretical analysis results are compared with the experimental results. So the experiment validates that the electromechanical coupling analysis of the system is correct. This research helps to analyze the influence mechanism and law that the design parameters and electromechanical coupling parameters exerted on the system performance. At the same time, the research is beneficial for dynamic design of the permanent magnet AC servo precision drive system.

Key words: permanent magnet AC servo precision derive system; electromechanical coupling; precision transmission; dynamics

永磁交流伺服精密驱动系统是包括了驱动系统、精密传动系统、控制系统、负载系统、冷却系统等子系统的典型复杂机电系统^[1], 它在完成特定功能的同时, 往往潜藏着或表露出种种不良工况, 以致难

以生产出高质量的产品, 甚至出现重大故障, 尤其在生产过程中, 该系统在非平稳过程中所表现出来的机电耦合现象对系统的安全运行具有极大的危害性, 这是由于该系统的电气参数与力学参数相互耦

收稿日期: 2009-12-29

基金项目: 重庆市科技攻关资助项目(2007AB3030)

作者简介: 林利红(1972-), 女, 重庆大学博士, 主要从事机电耦合方面的研究, (E-mail)cqullh@126.com.

合,共同影响了整个系统的动力学性能。而造成这些设备产生不良状态的原因是对系统中这种多物理过程、多参数间多元多维耦合关系缺乏深层次的机理研究。

在机电耦合问题的研究方面,国内外学者进行了大量的研究^[2-12]。文献[2]对永磁悬浮-机械动压轴承混合支承式飞轮储能系统的机电耦合非线性振动问题进行了研究;文献[3]对复杂机电系统进行了机电耦合分析与解耦控制技术的研究,实现了冷轧带钢平整机张力速度的解耦控制;文献[4]对机电耦合情况下振动机的同相同步特性进行了仿真研究。这些都是近年来机电耦合研究的经典性工作,但由于受条件限制试验研究较弱。因此,笔者在永磁交流伺服精密驱动系统机电耦合动力学分析的基础上,进行了该系统的机电耦合试验研究,探讨系统多因数耦合下的动态特性,揭示永磁交流伺服电机的综合参量、精密传动装置的力学参数、负载子系统的力学参数间相互影响的机理和规律,以及永磁交流

伺服精密驱动系统设计参数、机电耦合参数对系统性能指标的影响机理和规律。

1 永磁交流伺服精密驱动系统机电耦合模型

机电耦合现象普遍存在于各类机电系统中,任何机电耦合系统都是由机械系统、电磁系统和联系二者的耦合电磁场组成,其实质是通过电磁耦合场将相关的电端口和机械端口联系起来并实现机电能量交换的系统。对系统进行机电耦合分析的根本目的在于探索耦合对运动的约束机制,分析耦合参数与系统主体运动及功能的相关机理,研究系统功能生成的组织规律,进行奇异工况预测和故障预控。

1.1 全局耦合和局部耦合

对永磁交流伺服精密驱动系统进行机电耦合分析,可获得如图 1 所示的永磁交流伺服精密驱动系统的全局耦合关系图。

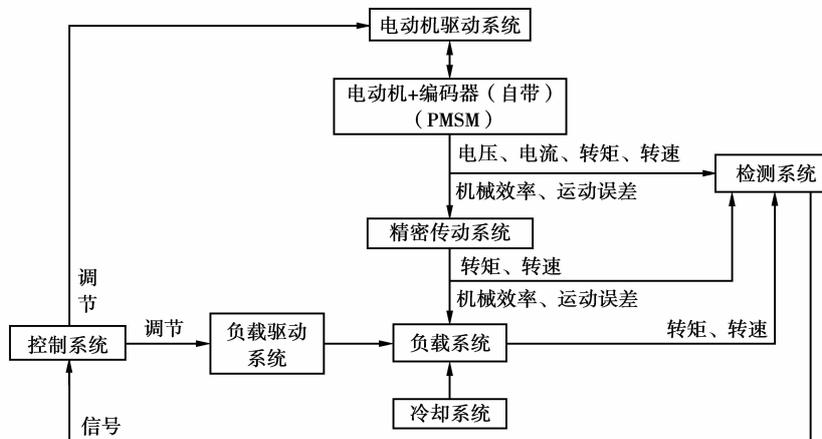


图 1 全局耦合关系图

根据图 1,可将具有全局耦合关系的系统分解成局部耦合的子系统:电动机驱动系统与精密传动系统耦合的子系统;电动机调速控制系统与精密传动系统耦合的子系统;电动机驱动系统与精密传动系统、负载系统耦合的子系统;电动机调速控制系统与精密传动系统、负载系统耦合的子系统。其中永磁同步伺服电动机(PMSM)一精密传动装置(子系统)的局部耦合关系如图 2 所示。

1.2 PMSM—精密传动装置机电耦合数学模型

PMSM 转子为 NdFeB 永磁体,永磁体转子产生恒定的电磁场,在气隙中产生的磁通密度呈正弦形分布。当定子绕组通以相位相差 120°的三相对称正弦波交流电时,在定子绕组中将流过三相对称的

电流 i_u 、 i_v 和 i_w 。定子将接受的电能转换为旋转的磁场,这三相电流将在转子与定子间的气隙内产生同步旋转磁动势。转子以同步速度旋转时,在定子上产生的反电势波形是正弦波。因此,定子磁场与转子磁场相互作用产生电磁转矩,推动电动机转子旋转,通过气隙磁场完成电能到机械能的转化,存在电磁耦合关系。如果改变定子三相电源的频率和相位,就可以改变转子的速度和位置。当负载转矩 T_L 增大时,转子磁极轴线与定子旋转磁场轴线之间的功率角要增大,因此电磁转矩要增大,直至与负载转矩相平衡,即定子电流会随着负载的增加而增大,同时电枢反应会造成气隙磁链和定子反电动势的加大,迫使定子电压升高。因此,电动机驱动系统的电

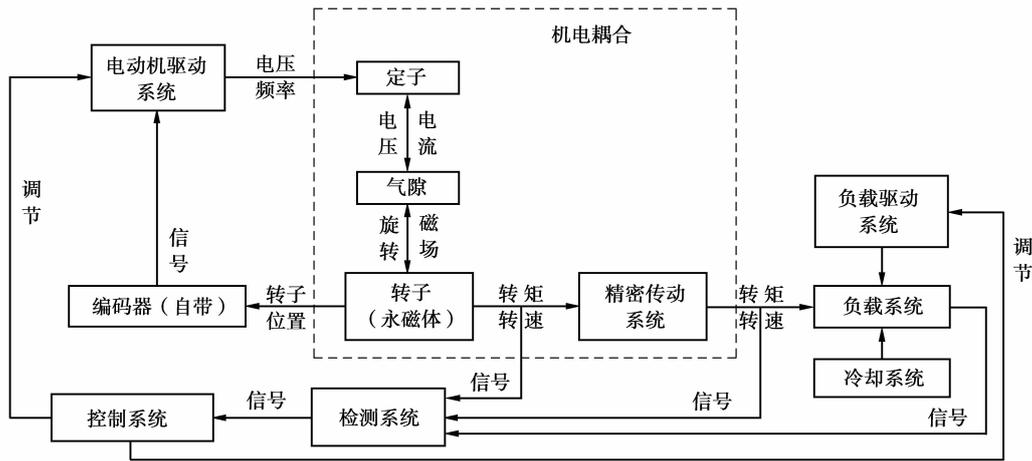


图 2 PMSM—精密传动装置机电耦合关系图

磁参数与系统的力学参数相互作用,实现了系统的机电耦合。故可获得如图 3 所示的 PMSM—精密传动装置子系统的等效物理模型。

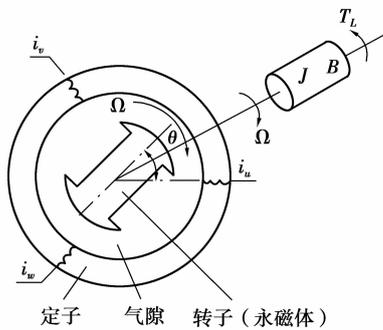


图 3 PMSM—精密传动装置子系统等效物理模型

根据子系统的等效物理模型,基于机电能量转换,采用拉格朗日-麦克斯韦方程,可得系统的拉格朗日方程

$$L = \frac{1}{2}(J_1 + J_e)\Omega^2 + \frac{1}{2}Li_u^2 + \frac{1}{2}Li_v^2 + \frac{1}{2}Li_w^2 + Mi_u i_v + Mi_v i_w + Mi_u i_w + C + i_u \psi_f \cos\theta + i_v \psi_f \cos\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) + i_w \psi_f \cos\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right), \quad (1)$$

式中: J_1 为 PMSM 的转动惯量; J_e 为精密传动装置相对于输入轴的等效转动惯量; L 和 M 为凸装式永磁同步电动机的定子三相绕组的自感和互感; C 为常数; ψ_f 为永磁体产生的磁链; θ 为转子位置角。

系统耗散函数

$$F = \frac{1}{2}R_u i_u^2 + \frac{1}{2}R_v i_v^2 + \frac{1}{2}R_w i_w^2 + \frac{1}{2}(B_1 + B_e)\Omega^2, \quad (2)$$

式中: R_u, R_v 和 R_w 为 PMSM 三相定子绕组电阻; B_1

为 PMSM 的黏滞阻尼系数; B_e 为精密传动装置的等效黏滞阻尼系数。

最终可推导出定子绕组 u, v 和 w 的电压方程为

$$u_u = U_1 = \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{e}_1}\right) - \frac{\partial L}{\partial e_1} + \frac{\partial F}{\partial \dot{e}_1} = L \frac{di_u}{dt} + M \frac{di_v}{dt} + M \frac{di_w}{dt} + \frac{d}{dt}(\psi_f \cos\theta) + R_u i_u, \quad (3)$$

$$u_v = U_2 = \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{e}_2}\right) - \frac{\partial L}{\partial e_2} + \frac{\partial F}{\partial \dot{e}_2} = L \frac{di_v}{dt} + M \frac{di_u}{dt} + M \frac{di_w}{dt} + \frac{d}{dt}\left(\psi_f \cos\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right)\right) + R_v i_v, \quad (4)$$

$$u_w = U_3 = \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{e}_3}\right) - \frac{\partial L}{\partial e_3} + \frac{\partial F}{\partial \dot{e}_3} = L \frac{di_w}{dt} + M \frac{di_u}{dt} + M \frac{di_v}{dt} + \frac{d}{dt}\left(\psi_f \cos\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right)\right) + R_w i_w, \quad (5)$$

机械系统的运动方程为

$$(J_1 + J_e) \frac{d\Omega}{dt} = -i_u \psi_f \sin\theta - i_v \psi_f \sin\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) - i_w \psi_f \sin\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) - (B_1 + B_e)\Omega - T_L. \quad (6)$$

联立方程(1)-(6)即构成了 PMSM—精密传动装置子系统的数学模型。该模型表示的是一个多变量耦合的非线性系统,反映了机械系统和电机系统之间的相互耦合关系。

2 试验系统

2.1 硬件结构

为了探讨永磁交流伺服精密驱动系统的机电耦合影响,搭建了永磁交流伺服精密驱动系统试验台。试验台由 PMSM 及其驱动器、高速电压传感器、高速电流传感器、扭矩传感器、光栅尺、精密减速器、PMAC 运动控制卡^[13]、磁粉制动器及其驱动器、冷却系统、ADLINK 数据采集卡及工控机等组成。

试验台选用安川伺服电机 SGMGH-13ACA61,其配套驱动器为 SGDM-15ADA;选用韩国 SEJIN-iGB 公司生产的少齿差内啮合行星齿轮传动装置为试验台所研究的精密传动系统^[14],其具体型号为 RD-006-39-S-B-11,减速比为 39;负载部分选用海安恒业的 CZ-5 型磁粉制动器和 COPLEY 驱动器,驱动器接收来自 PMAC 运动控制卡发出的模拟信号命令控制磁粉制动器产生所需的负载扭矩,该磁粉制动器必须要有冷却系统。试验台结构如图 4 所示。

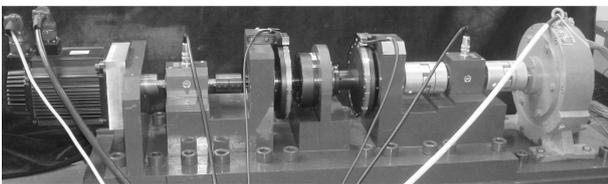


图 4 试验台结构

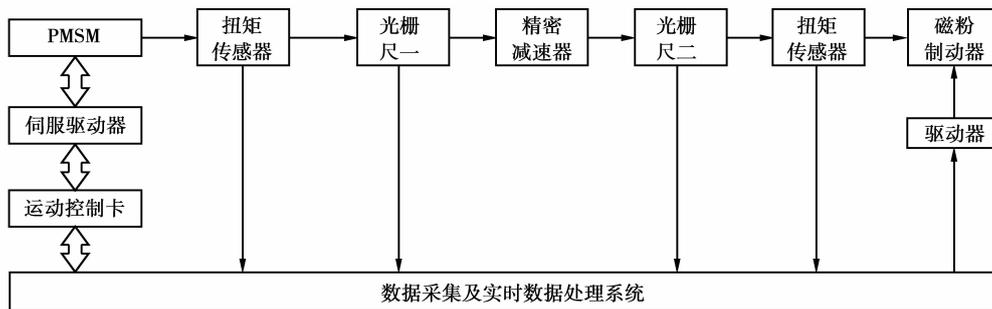


图 5 试验台测试系统原理图

试验系统是在工业控制机平台基础之上,采用 PMAC 运动控制卡构成的控制系统。工控机 IPC 上的 CPU 与 PMAC 卡上的 CPU 构成了主从式双微处理器结构,2 个 CPU 各自实现相应的功能,工控机主要负责故障诊断、系统的管理与人机交互等任务,这样保证了系统控制的安全性、可靠性和实时性。“IPC 机+运动控制卡”这种方案可充分利用计算机资源,它具有信息处理能力强、开放程度高、可靠性高、运动轨迹控制精确、通用性好等特点。控制系统能够对电机的启动、停止、转速、转向、转角进行

2.2 测试原理及控制方式

试验台测试系统原理如图 5 所示。PMSM 提供试验所需的动力,由插在工控机主板上的运动控制卡及伺服驱动器来控制 and 驱动;高速电压传感器和高速电流传感器可以采集 PMSM 动力线上的三相电压和电流;2 个扭矩传感器分别安装在精密减速器的输入、输出端,用来测试精密减速器输入、输出端的扭矩,然后通过 ADLINK 数据采集卡对扭矩传感器的信号进行 A/D 转换,最终将数据传送至工控机;采用高精度圆光栅作为位置传感器,可获取精密减速器的位置信息,同时通过 PMAC 运动控制卡可将光栅的信号处理为速度信息,这两个圆光栅分别安装在精密减速器的输入、输出端,用来测量精密减速器的输入、输出轴转角和转速,并将数据通过 PMAC 运动控制卡传送至工控机,同时光栅尺一的信号作为电机位置控制反馈信号;磁粉制动器为试验提供负载,而负载的大小由直流控制电源来控制,同时 PMAC 运动控制卡对磁粉制动器也会发出控制信号。整个试验装置的冷却系统保证磁粉制动器的安全工作。测试信号采用高速 ADLINK 数据采集卡进行同步采集,采集的所有数据进行实时同步处理并自动进行数据存储。该试验系统具有过压、过流、过载的自动保护功能。

精确地控制;能够在试验进行的任意时刻控制系统输出端所加载荷的大小。由于载荷是由磁粉制动器来提供,而载荷的大小由直流控制电源来控制,即可以通过 PMAC 卡控制磁粉制动器的驱动器,最终达到控制载荷大小的目的。

2.3 软件系统

软件主要实现试验系统的控制工作、数据采集及实时数据处理,以此揭示永磁交流伺服精密驱动系统的机电耦合现象,分析系统机电耦合机理。因此,试验系统软件的主要功能是实现试验参数的设

定;各种试验数据的检测,如精密减速器的输入转速和输出转速、输入转矩和输出转矩、输入轴转角和输出轴转角等;光栅尺、扭矩传感器、采集卡、PMAC卡与工控机的通讯;伺服电机转速、转向的控制;试验数据的处理,如各种实时曲线的显示、试验数据的保存等。软件采用卡尔曼滤波法成功解决了噪声对电流、转矩的影响^[15],并使用高性能计数器实现了对数据的实时采集等。软件原型系统的主界面如图 6 所示。

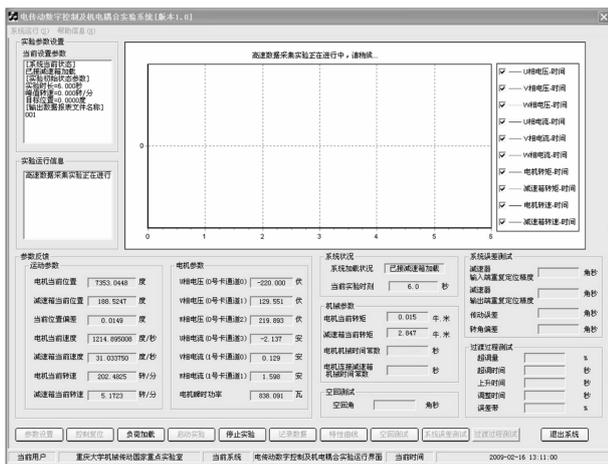


图 6 软件主界面

3 机电耦合试验研究

先采用过渡过程实验测试系统是否满足伺服驱动系统的性能,然后利用空载试验和加载试验探索永磁交流伺服精密驱动系统的机电耦合影响。

试验台在空载(加载)状态下可通过电压传感器、电流传感器、扭矩传感器、PMAC 运动控制卡、高速 AD 采集卡、光栅尺以及工控机等硬件实现对电压、电流、转速、转矩的实时采集,同时使用上述软件实时获取伺服电机的三相(UVW)电流波形、三相电压波形、减速机前后的转速波形以及减速机前后的转矩波形等。

3.1 过渡过程测试

其目的是测试试验系统是否符合伺服驱动系统的性能。进行过渡过程测试时,点击软件主界面“过渡过程测试”按钮,设定好参数之后,系统自动进行测试,测试值会在主界面上显示出来。该试验设定 PMSM 转速为 300 r/min,空载下测定的,其转速图如图 7 所示。由测试可知,超调量 $\sigma = 7.53\%$,在工程中,超调量一般控制在 10% 以内是合适的;上升时间 $t_r = 0.13$ s;超调时间 $t_p = 0.21$ s;调整时间 $t_s = 0.57$ s;误差带为 2.36%。由图 7 可知,经过过渡过

程后,伺服电机转速稳定在 300 r/min。因此可知,PMSM 启动后,迅速达到最大值(峰值),然后稳定在正常值,设计的控制系统快速性和振荡性较好,具有较好的静态特性和动态特性,符合试验的需要。

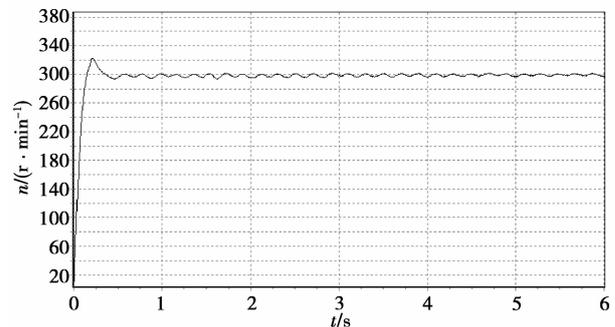


图 7 电机转速图

3.2 空载试验

设定 PMSM 转速为 400 r/min,在空载状态下获得的测试曲线波形如图 8 所示。

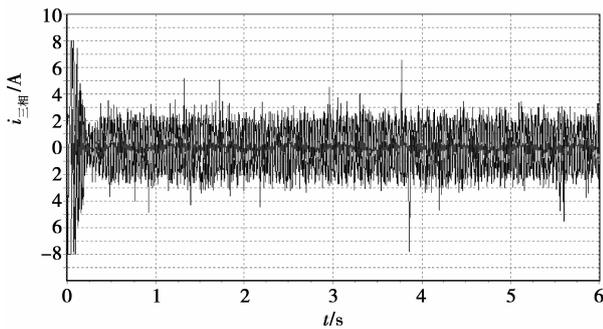
从图 8 可知,由于减速器空回的影响,电流曲线图出现了瞬时峰值;伺服电机启动后经过短暂的过渡过程,转速就稳定在设定值 400 r/min,而减速器的转速值稳定在 10.256 r/min,而 $400/10.256 = 39$,由于减速器传动比 $i = 39$,从而验证了软件实时采集的正确性;由图 8(d)图可知,电机空载启动时,减速机后的转矩值迅速稳定在 $1.0 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

3.3 加载试验

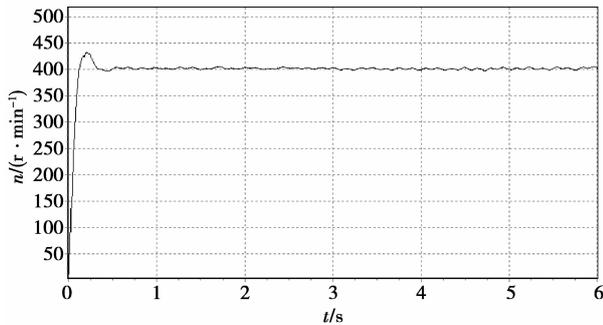
仍然设定 PMSM 转速为 400 r/min,在 2 s 时由磁粉制动器加载 $50 \text{ N} \cdot \text{m}$ 直至试验终止时刻 6 s。在加载状态下获得的测试曲线波形如图 9 所示。

由图 9 可知,由于减速器空回的影响,电流曲线图同样出现了瞬时峰值;伺服电机启动后经过短暂的过渡过程,转速也迅速稳定在设定值 400 r/min,减速器的转速值稳定在 10.256 r/min,因此有 $400/10.256 = 39 = i$ 。

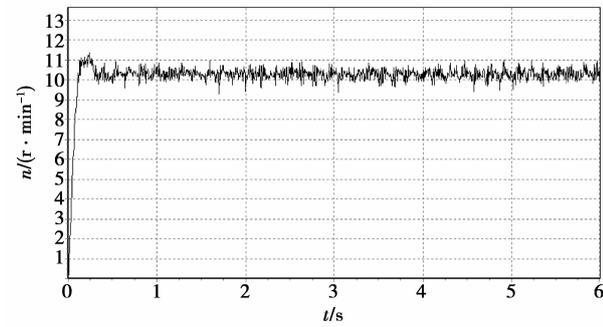
图 8 是伺服电机以转速 400 r/min 空载启动且一直未加载状态下获取的曲线波形图,而图 9 是伺服电机以转速 400 r/min 空载启动,在 2 s 时由磁粉制动器加载 $50 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的曲线波形图。比较图 8、图 9 可知,在 2 s 时由于磁粉制动器加载 $50 \text{ N} \cdot \text{m}$,经过一个短暂的延时,在电流图中的电流幅值明显增大;而加载时电机转速-时间曲线在 2 s 后速度只有很小的一个振荡过程就恢复平稳,这符合永磁交流伺服电机机械特性较硬的特点,而在同一个时间点,加载时减速器转速-时间曲线也有一个很小的一个振荡过程,但是没有电机振荡过程明显;而加载时



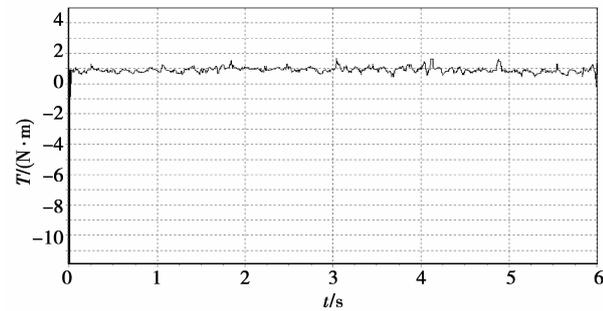
(a)空载三相电流-时间曲线



(b)空载电机转速-时间曲线

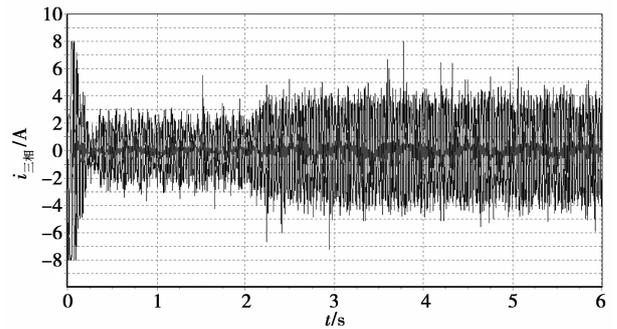


(c)空载减速器转速-时间曲线

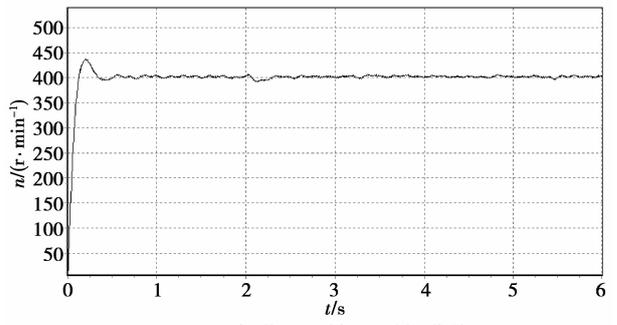


(d)空载减速器转矩-时间曲线

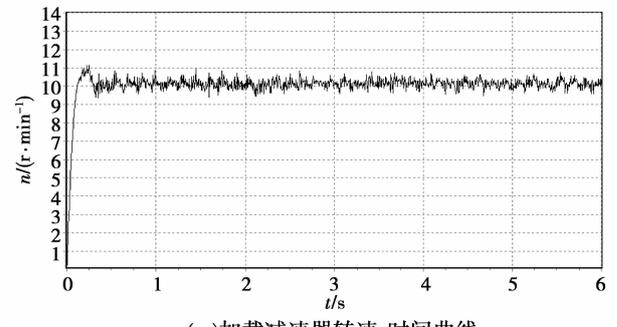
图 8 空载测试曲线波形



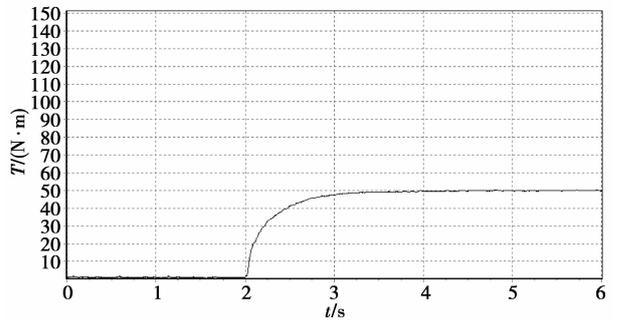
(a)加载三相电流-时间曲线



(b)加载电机转速-时间曲线



(c)加载减速器转速-时间曲线



(d)加载减速器转矩-时间曲线

图 9 加载测试曲线波形

减速器转矩-时间曲线在 2 s 时变化非常明显,有一个明显的突变过程,由图 9(d)图可知,减速器的转矩值最后稳定在 49.896 N·m。

因此,由图 8 和图 9 所得的结论与文献[16]算例结果非常吻合,用试验证明了永磁交流伺服精密驱动系统机电耦合分析的正确性。

4 结 语

对永磁交流伺服精密驱动系统进行了机电耦合分析,构建了以 PMAC 多轴运动控制卡为核心,以 IPC 为支撑平台的永磁交流伺服精密驱动系统的试验体系结构。使用专为试验台设计的软件实时采集了永磁交流伺服精密驱动系统在空载状态和加载状

态下的测试曲线波形。通过试验获得的测试曲线波形,与文献[16]的数值算例结果相比较,验证了对永磁交流伺服精密驱动系统进行机电耦合分析的正确性,探索了永磁交流伺服精密驱动系统的机电耦合影响。

参考文献:

- [1] 林利红. 永磁交流伺服精密驱动系统机电耦合动力学分析与实验[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [2] JIANG S Y, JU L H. Study on electromechanical coupling nonlinear vibration of flywheel energy storage system[J]. *Science in China, Series E: Technological Sciences*, 2006, 49(1): 61-77.
- [3] 贺建军. 复杂机电系统机电耦合分析与解耦控制技术[D]. 湖南: 中南大学, 2004.
- [4] 张楠, 侯晓林, 闻邦椿. 机电耦合情况下振动机的同相同步特性[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2009, 30(10): 1477-1480.
ZHANG NAN, HOU XIAO-LIN, WEN BANG-CHUN. Cophase and synchronous characteristic of vibration machine under electromechanical coupling condition [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2009, 30(10): 1477-1480.
- [5] ZHONG J, YI Y P, CHEN J. Application of fractal method to optimum and decoupling design of electromechanical system[J]. *Journal of Central South University of Technology (English Edition)*, 1998, 5(1): 50-52.
- [6] SERMESANT M, DELINGETTE H, AYACHE N. An electromechanical model of the heart for image analysis and simulation [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2006, 25(5): 612-625.
- [7] ORIANO B, MARIO C, ALESSANDRA M. Advanced model for dynamic analysis of electromechanical devices [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2005, 41(11): 36-46.
- [8] YANG Y C, LI D L, SHANG Z G. Electromechanical coupling characteristics for force-balanced vacuum microelectronic accelerometer [J]. *Guangxue Jingmi Gongcheng/Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(6): 1361-1366.
- [9] ZHU S X, DING J L, FAN Z, et al. Surface electromechanical coupling on DLC film with conductive atomic force microscope[J]. *Plasma Science & Technology*, 2004, 6(3): 2342-2345.
- [10] CHO J, ANDERSON M, RICHARDS R, et al. Optimization of electromechanical coupling for a thin-film PZT membrane: I. Modeling [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, 15(10): 1797-1803.
- [11] OMAR A, JEONG C, ROBERT F R, et al. The effect of design and process parameters on electromechanical coupling for a thin-film PZT membrane[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2006, 15 (6): 1715-1725.
- [12] YAN S Z, XU F, LIU X J, et al. Electromechanical coupling characteristics of SMA wires under the constraints of stress and strain[J]. *Key Engineering Materials*, 2005, 280-283(1): 915-918.
- [13] 刘学鹏, 王斌. 基于 PMAC 的开放式高精度运动控制台的研究 [J]. *中国机械工程*, 2007, 18 (10): 1186-1188.
LIU XUE-PENG, WANG BIN. Study on open architecture high-precision motion stage based on PMAC [J]. *China Mechanical Engineering*, 2007, 18(10): 1186-1188.
- [14] 林先浩. 内啮合行星齿轮结构的传动装置: 中国, ZL01800872.0 [P]. 2005-5-18.
- [15] 秦侠, 沈兰荪. 基于小波变换的卡尔曼滤波法在 ICP-AES 中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2002, 22(6): 1009-1012.
QIN XIA, SHEN LAN-SUN. Application of kalman filtering based on wavelet transform in ICP-AES[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2002, 22 (6): 1009-1012.
- [16] 林利红, 陈小安, 周伟, 等. 永磁交流伺服精密驱动系统机电耦合动力学分析[J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2009, 32(10): 1132-1137.
LIN LI-HONG, CHEN XIAO-AN, ZHOU WEI, et al. Electromechanical coupling dynamic analysis of permanent magnet AC servo system [J]. *Journal of Chongqing university(Natural Science Edition)*, 2009, 32(10): 1132-1137.

(编辑 王维朗)