

文章编号:1000-582X(2009)10-1132-06

永磁交流伺服精密驱动系统机电耦合动力学分析

林利红, 陈小安, 周 伟, 缪莹贇

(重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400030)

摘 要:对永磁交流伺服精密驱动系统进行动力学分析时,必须考虑系统的机电耦合影响。从机电能量转换的角度,根据系统的全局耦合分析和局部耦合分析,建立了该系统全局耦合关系图和永磁同步电动机-精密传动装置子系统局部机电耦合关系图,然后采用拉格朗日-麦克斯韦方程建立了永磁同步电动机-精密传动装置子系统的物理模型和数学模型,推导了该子系统的动力学方程,并利用该模型进行了算例分析。结果表明,该模型是正确的,这为该系统的实验研究提供了理论依据。

关键词:精密传动;永磁交流伺服精密驱动系统;机电耦合;动力学

中图分类号:TN820.3;S220.31

文献标志码:A

Electromechanical coupling dynamic analysis of permanent magnet AC servo system

LIN Li-hong, CHEN Xiao-an, ZHOU Wei, MIAO Ying-yun

(State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: Electromechanical coupling effect is considered in the dynamic analysis on permanent magnet AC servo precision derive system. Using electromechanical energy conversion and according to the global coupling analysis and the local coupling analysis, the relation diagrams of global electromechanical coupling and local electromechanical coupling between the permanent magnet synchronous motor-precision transmission subsystem are established. Applying Lagrange-Maxwell equation, a physical model and a mathematic model of the subsystem are built up, the dynamic equations of the subsystem were derived, and the mathematic model is analyzed. The results show that the mathematic model is correct which provides theoretical basis for experimental study.

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

伺服系统由检测装置、信号转换线路、放大装置、执行元件和控制对象组成。若执行元件用力矩电机,则无需传动机构;然而,在大多数情况下,执行元件仍然需要经机械传动装置带动被控对象作运动。伺服系统同时也是一种机、电相结合的系统,它最终要将控制信号转换成相应的机械传动,执行元

件直接或经机械传动装置带动被控对象作运动,同时包含多种物理过程,通过多元多维运动来实现多种形式的能量传递与转换,由微变量信息流对系统的主过程进行调控,所有动态过程通过不同的耦合形式相互作用,是现代复杂机电系统的重要内涵^[1-4]。

收稿日期:2009-06-20

基金项目:重庆市重大科技攻关基金资助项目(2006AA3010);重庆市重大科技攻关基金资助项目(2005AC3029)

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。

在生产过程中,永磁交流伺服精密驱动系统在非平稳过渡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,这是由于永磁交流伺服电机的电磁参数与机械系统的力学参数相互耦合,共同影响整个系统的动力学性能。因此分析永磁交流伺服精密驱动系统中的伺服电机与精密传动装置的机电耦合机理对于工业生产来说具有重要意义。即在对该系统进行动力学分析的时候必须考虑机电耦合效应,才能为伺服系统的动态设计与分析、工况监测与预报、故障诊断提供理论依据。本文采用机电能量转换的方法建立了永磁交流伺服精密驱动系统的机电耦合物理模型和数学模型,推导出机电耦合动力学方程,研究了机电耦合的相互作用规律,同时也为该系统的实验研究提供理论依据。

1 永磁交流伺服精密驱动系统机电耦合分析

1.1 概述

永磁同步电动机因其结构简单、体积小、功率高、转矩电流比高、转动惯量低、易于散热及维护等优点已成为现代交流伺服系统的主流^[5-7]。而精密传动是双向高精度地传递运动的机械传动形式的统称,是一种重要的基础性零件^[8-9]。它是以高精度传递运动为主要目的的一类机械传动形式,具有高的运动精度、承载能力大、刚度大、保精度寿命长、结构紧凑、体积小、无间隙和响应快等特点。精密传动包括螺旋传动、齿轮传动、轮系传动、少齿差行星传动及谐波传动等。本文拟采用的机械传动装置(精密传动装置)是高轮齿接触率少齿差内啮合行星齿轮传动^[10-11]。

永磁交流伺服精密驱动系统是包括了驱动系统、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。各子系统之间存在着多物理过程、多参量复杂耦合关系。由于永磁交流伺服精密驱动系统的动态性能由各子系统之间的耦合关系和系统的输入等因素决定,而子系统的动态性能也不是仅由单个系统的结构参数就能完全确定,它要受到与之有耦合关系的其他子系统的影响。因此,在进行永磁交流伺服精密驱动系统机电耦合分析时,应先建立局部耦合模型,在此基础上将各局部耦合模型耦联起来,最终建立系统全局耦合模型^[12-14]。

1.2 全局耦合分析

永磁交流伺服精密驱动系统全局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。

对永磁交流伺服精密驱动系统首先进行局部耦合分析,包括电动机驱动系统的电磁参数与伺服系统的力学参数耦合分析,即电磁转矩直接耦合分析;

电动机驱动系统电枢回路中的电流谐波分量与传动系统耦合分析,即电流谐波分量在电动机定子与转子间通过电磁场相互作用发生机电耦合,是传动系统振动的直接激励源;电动机调速控制系统控制参数微变量与伺服系统的力学参数耦合分析,控制变量对系统主运动产生扰动,与系统主运动的力学参数构成弱变量耦合形式;伺服系统与负载系统耦合分析,外负载作为界面耦合参数,对系统主运动形态有重要的扰动,同时又对电磁参数有影响等。因此可得到图 1 所示的全局耦合关系图。

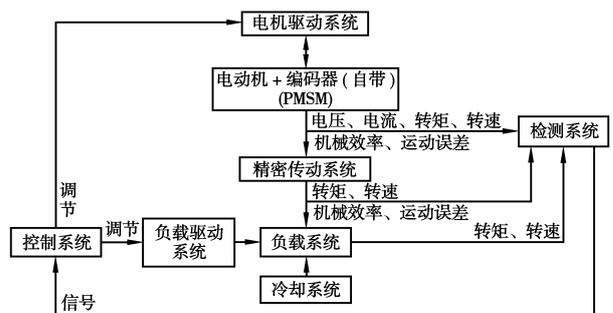


图 1 全局耦合关系图

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。

1.3 局部耦合分析

笔者主要将永磁同步伺服电动机—精密传动装置(子系统)从全局耦合中分离出来进行分析,用图 2 所示的框图来描述该子系统的局部耦合情况。永磁同步电动机—精密传动装置子系统不仅包含了电机驱动系统的电磁参数,而且还要受伺服系统力学参数的影响,因此在对该子系统进行动力学分析时,首先建立其物理模型,然后采用机电系统分析动力学方法来进行机电耦合分析和建模^[15],最终推导出其动力学方程。

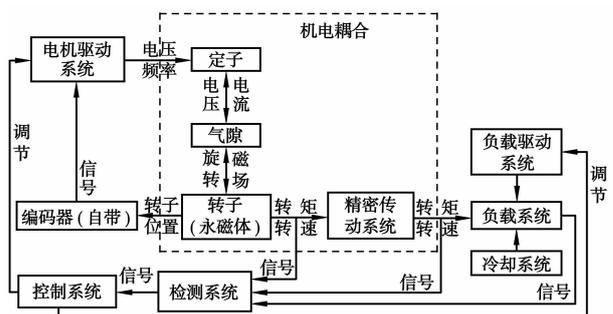


图 2 永磁同步电动机—精密传动装置机电耦合关系图

2 永磁同步伺服电动机—精密传动装置机电耦合建模

2.1 物理模型

永磁同步伺服电动机主要由定子和转子两大部分组成,定子和普通电励磁三相同步电机是相似的,转子是稀土永磁体。当定子通以相位相差 120° 的三相正弦交流电时,定子产生空间匀速旋转的磁场,磁场旋转的速度与定子正弦波频率有关,定子将接受的电能转换为旋转的磁场。定子磁场与转子磁场相互作用产生推动转矩,使转子旋转,完成电能到机械能的转化。当电磁转矩大于负载转矩时,电动机将带动负载运转。

当负载 T_L 增大时,转子磁极轴线与定子旋转磁场轴线之间的夹角(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。由于输出功率要增大,输入功率也跟着增大。也就是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,电机驱动系统的电磁参数与系统的力学参数相互作用,实现了系统中的机电耦合。笔者采用表面凸装式永磁同步电动机,根据上面的描述,可建立如图所示的永磁同步电动机—精密传动(减速器)系统的物理模型。

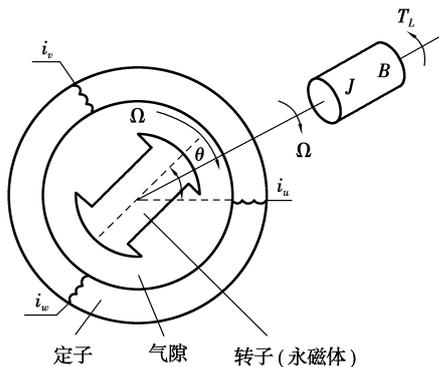


图 3 永磁同步电动机—精密减速器系统简化物理模型

2.2 数学模型

根据系统的物理模型,建立其数学模型。在进行数学建模前先作如下假设。

1) 忽略铁心饱和;不计涡流和磁滞损耗。

2) 气隙分布均匀,磁回路与转子的位置无关,即各项绕组的自感和绕组间的互感与转子位置无关,定子绕组为星形连接。

3) 转子上无阻尼绕组,永磁体无阻尼作用,且反电动势是正弦的。

基于机电分析动力学基本原理,从机电能量转换的角度,采用拉格朗日—麦克斯韦方程建立数学模型如下:

1) 确定系统广义坐标。系统共有 5 个广义坐标,其中 4 个属于电磁系统($k=1,2,3,4$),1 个属于机械系统($j=1$),如表 1 所示。

表 1 永磁同步伺服电动机—精密传动机构广义坐标

广义坐标	电磁系统				机械系统 $j=1$
	定子		转子 (永磁体)		
	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=4$	
$e_k(q_j)$	—	—	—	ψ_f	θ
$\dot{e}_k(\dot{q}_j)$	i_u	i_v	i_w	—	Ω
$U_k(Q_j)$	u_u	u_v	u_w	—	$-T_L$

2) 列写系统的能量关系。

① 系统动能 T

$$T = \frac{1}{2} J_1 \Omega^2 + \frac{1}{2} J_e \Omega^2. \quad (1)$$

式中 J_1 为永磁同步伺服电动机的转动惯量, J_e 为精密减速器相对于输入轴的等效转动惯量。

② 系统磁能 W_m

对于永磁电机来说,电机的磁能 W_m 包括三个部分^[16],即 $W_m = W_{m1} + W_{m2} + W_{m21}$ 。 W_{m1} 为定子电流产生的磁能:

$$W_{m1} = \frac{1}{2} L_u i_u^2 + \frac{1}{2} L_v i_v^2 + \frac{1}{2} L_w i_w^2 + M i_u i_v + M i_v i_w + M i_u i_w. \quad (2)$$

式中 L 和 M 为定子三相绕组的自感和互感,对于凸装式永磁同步电动机,有 $M_{uv} = M_{vu} = M_{vw} = M_{wv} = M_{uw} = M_{wu} = M$; i_u, i_v, i_w 为各项绕组两端的电流;且 $L_u = L_v = L_w = L$ 。

W_{m2} 为转子永磁体产生的磁能。对于 60° 相带分布绕组,由于每极每相槽数 q 较大(一般为 2 以上),可认为气隙磁能 W_{m2} 不随转子的转动变化,即 $W_{m2} = C$ (C 为常数)。

W_{m21} 为转子在定子中产生磁链与定子电流作用产生的磁能,即:

$$W_{m21} = i_u \psi_f \cos \theta + i_v \psi_f \cos \left(\theta - \frac{2}{3} \pi \right) + i_w \psi_f \cos \left(\theta + \frac{2}{3} \pi \right). \quad (3)$$

式中 ψ_f 为永磁体产生的磁链, θ 为转子位置角。

③ 系统势能

$$V = 0.$$

④系统拉格朗日函数

$$L = T + W_m - V = \frac{1}{2}(J_1 + J_e)\Omega^2 + \frac{1}{2}L_u i_u^2 + \frac{1}{2}L_v i_v^2 + \frac{1}{2}L_w i_w^2 + Mi_u i_v + Mi_v i_w + Mi_u i_w + C + i_u \psi_f \cos\theta + i_v \psi_f \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) + i_w \psi_f \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \quad (4)$$

3) 系统耗散函数

电磁系统耗散函数 $F_e = \frac{1}{2}R_u i_u^2 + \frac{1}{2}R_v i_v^2 + \frac{1}{2}R_w i_w^2$, 机械系统耗散函数 $F_m = \frac{1}{2}(B_1 + B_e)\Omega^2$, 则系统耗散函数:

$$F = F_e + F_m = \frac{1}{2}R_u i_u^2 + \frac{1}{2}R_v i_v^2 + \frac{1}{2}R_w i_w^2 + \frac{1}{2}(B_1 + B_e)\Omega^2 \quad (5)$$

式中 R_u, R_v 和 R_w 为电动机三相电阻; B_1 为电动机的黏滞阻尼系数; B_e 为精密减速器的等效黏滞阻尼系数。

4) 系统的非保守广义力

系统的非保守广义力 $Q_1 = -T_L$, 系统外电动势 $U_k = u_k$ 。

5) 系统的拉格朗日—麦克斯韦方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{e}_k} \right) - \frac{\partial L}{\partial e_k} + \frac{\partial F}{\partial \dot{e}_k} &= U_k; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} + \frac{\partial F}{\partial \dot{q}_j} &= Q_j. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

对于定子绕组 $u(k=1)$:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial e_1} &= 0, \\ \frac{\partial L}{\partial \dot{e}_1} = \frac{\partial L}{\partial i_u} &= L i_u + M i_v + M i_w + \psi_f \cos\theta, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{e}_1} \right) \rightarrow \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial i_u} \right) &= L \frac{di_u}{dt} + M \frac{di_v}{dt} + M \frac{di_w}{dt} + \frac{d}{dt}(\psi_f \cos\theta), \\ \frac{\partial F}{\partial \dot{e}_1} \rightarrow \frac{\partial F}{\partial i_u} &= R_u i_u, \\ U_1 &= \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{e}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial e_1} + \frac{\partial F}{\partial \dot{e}_1}, \\ u_u &= U_1. \end{aligned} \right.$$

所以定子绕组 u 的电压方程为:

$$u_u = U_1 = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{e}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial e_1} + \frac{\partial F}{\partial \dot{e}_1} = L \frac{di_u}{dt} + M \frac{di_v}{dt} + M \frac{di_w}{dt} + \frac{d}{dt}(\psi_f \cos\theta) + R_u i_u \quad (7)$$

同理可得定子绕组 $v(k=2)$ 的电压方程为:

$$u_v = U_2 = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{e}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial e_2} + \frac{\partial F}{\partial \dot{e}_2} = L \frac{di_v}{dt} + M \frac{di_u}{dt} + M \frac{di_w}{dt} + \frac{d}{dt}(\psi_f \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi)) + R_v i_v \quad (8)$$

同理可得定子绕组 $w(k=3)$ 的电压方程为:

$$u_w = U_3 = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{e}_3} \right) - \frac{\partial L}{\partial e_3} + \frac{\partial F}{\partial \dot{e}_3} = L \frac{di_w}{dt} + M \frac{di_u}{dt} + M \frac{di_v}{dt} + \frac{d}{dt}(\psi_f \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi)) + R_w i_w \quad (9)$$

式中 u_u, u_v, u_w 为各项绕组两端的电压。

对于转子为永磁体的情况 ($k=4$): 通常认为永磁体有效磁链 ψ_f 为恒定常值, 即 $\psi_f = C$, 所以不存在 $\frac{\partial L}{\partial \psi_f}$ 和 $\frac{\partial L}{\partial \dot{\psi}_f}$ 。

对于机械系统 ($j=1$):

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial q_1} \rightarrow \frac{\partial L}{\partial \theta} &= -i_u \psi_f \sin\theta - i_v \psi_f \sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) - i_w \psi_f \sin(\theta + \frac{2}{3}\pi), \\ \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1} \rightarrow \frac{\partial L}{\partial \Omega} &= (J_1 + J_e)\Omega, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1} \right) \rightarrow \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \Omega} \right) &= (J_1 + J_e) \frac{d\Omega}{dt}, \\ \frac{\partial F}{\partial \dot{q}_1} \rightarrow \frac{\partial F}{\partial \Omega} &= (B_1 + B_e)\Omega, \\ Q_1 &= \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_1} + \frac{\partial F}{\partial \dot{q}_1}, \\ Q_1 &= -T_L. \end{aligned} \right.$$

因此机械系统的运动方程为

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

令 $J = J_1 + J_e, B = B_1 + B_e$, 则机械系统的运动方程可写为:

$$J \frac{d\Omega}{dt} = -i_u \psi_f \sin\theta - i_v \psi_f \sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) - i_w \psi_f \sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) - B\Omega - T_L \quad (10)$$

联立方程(1)-(10)就可以得到永磁同步电机—精密传动装置的机电耦合动力学方程组, 即建立起永磁同步电机—精密传动装置的数学模型。

3 机电耦合模型的算例分析

由于永磁同步电机—精密传动装置的机电耦合

动力学方程组是多变量、非线性的耦合模型,在对其求解时用解析法不易求解,下面用数值计算方法对永磁同步电动机—精密减速器子系统的动态过程进行研究,系统主要参数如表 2 所示。

表 2 系统主要参数

参数名	参数值
定子电阻 R/Ω	5.6
dq 轴电感 $L_d=L_q/\text{mH}$	11.57
转子永磁体磁通 ϕ_f/Wb	0.125
极对数 p_n	4
转子转动惯量 $J_1/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.384×10^{-4}
额定转矩 $T_N/(\text{N}\cdot\text{m})$	1.47
额定转速 $N/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	4 000
电机粘滞摩擦系数 $B_1/(\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	0
减速器转动惯量 $J_e/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	1.25×10^{-6}
减速器粘滞摩擦系数 $B_e/(\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	0.001

系统空载启动,电机转速设定为 800 r/min,系统输出波形如图 4~图 6 所示。

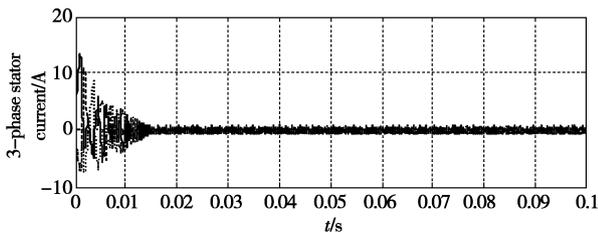


图 4 空载三相定子电流波形

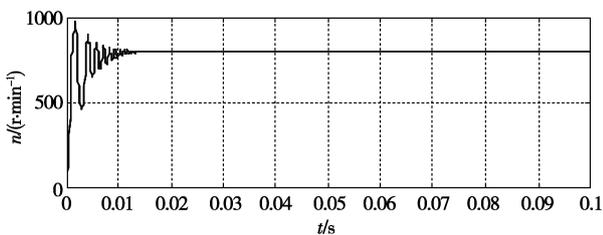


图 5 空载转速波形

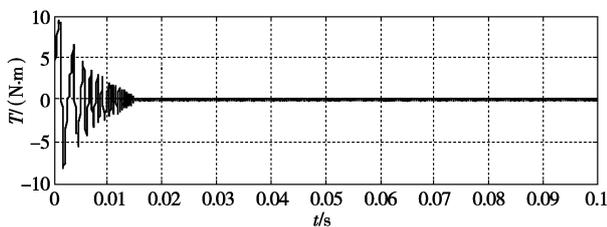


图 6 空载转矩波形

系统仍然空载启动,电机转速仍设定为 800 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$,在 0.06 s 时突加负载转矩 2 $\text{N}\cdot\text{m}$,输出波形如图 7~9 所示。

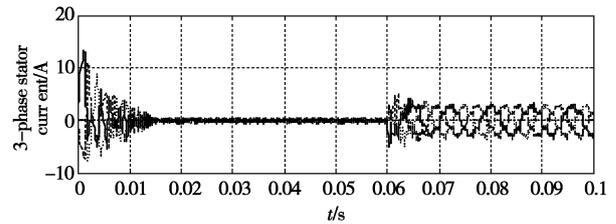


图 7 加载三相定子电流波形

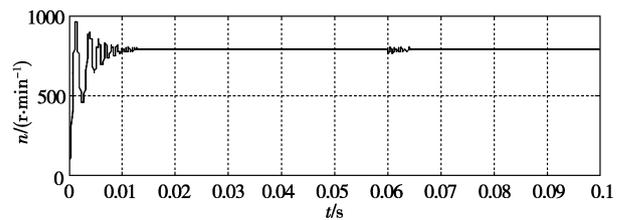


图 8 加载转速波形

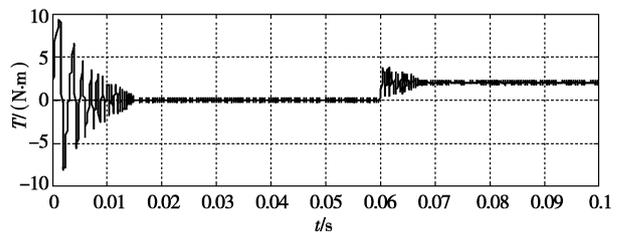


图 9 加载转矩波形

由图 4~图 9 的系统输出波形可以看出,在给定电机转速 800 r/min ,系统空载启动后未加载与系统空载启动后加载时的情况相比较,系统的三相定子电流、转矩波形在 0.06 s 时有明显的变化,经过一个振动过程后重新稳定在一个新值,比如转矩最后稳定在 2 $\text{N}\cdot\text{m}$ 。而转速在 0.06 s 时经过轻微的振动过程仍然稳定在 800 r/min ,这种现象符合 PMSM 的特性,也就是 PMSM 机械特性比较硬。因此,由图 4~图 9 所得的响应波形与实际情况相符,成功地模仿了系统的空载启动和突加负载过程,说明了所建立的数学模型正确性。

4 结 论

由于永磁交流伺服精密驱动系统是机电耦合系统,其主要特征是通过进行机电能量转换,因此提出了对该系统进行机电耦合分析的观点。

1) 从复杂机电系统的角度,对永磁交流伺服精密驱动系统进行了全局机电耦合分析和局部机电耦

合分析。

2)根据机电系统分析动力学理论,采用拉格朗日—麦克斯韦方程获得了永磁同步电动机—精密传动装置子系统的物理模型和数学模型,推导了该子系统的机电耦合动力学方程。

3)应用数值计算方法对模型进行了分析,图 4—图 9 所得的系统输出波形与实际情况相符,成功地模仿了系统的空载启动和突加负载过程,说明了所建立的数学模型的正确性,也为该系统的实验研究提供理论依据。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] WU J X, LI Q, ZHAO W G, et al. Dynamic analysis and optimization of electromechanical coupling system[C]// International Technology and Innovation Conference, Nov 6-7, 2006, Hangzhou, China. [s.l.]: IET, 2006: 1474-1478.
- [3] 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.
- [4] OREST V, IRINA V. Electromechanical coupling coefficient of isotropic sample with a marked electrostriction[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2007, 27(8/9): 2949-2952.
- [5] DONSON M P. Permanent magnet synchronous motors: Influence of the parameters on the control of a PMSM[J]. The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2008, 27(4): 946-957.
- [6] LIU L, LIU W X, CARTES D A. Particle swarm optimization-based parameter identification applied to permanent magnet synchronous motors [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2008, 21(7): 1092-1100.
- [7] MASARU H, KEIJU M. Design of a robust current controller to position estimation error for positioning of a sensorless control of interior permanent magnet synchronous motors under high-speed drives[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2008, 3(5): 560-568.
- [8] RATHINDRANATH M. A novel harmonic drive with pure involute tooth gear pair[J]. Journal of Mechanical Design, 2004, 126(1): 178-182.
- [9] SHIN J H, KWON S M. On the lobe profile design in a cycloid reducer using instant velocity center [J]. Mechanism and Machine Theory, 2006, 41(5): 596-616.
- [10] 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.
- [11] 魏延刚. 新结构高轮齿接触率 RV 传动装置的理论研究[J]. 大连交通大学学报, 2007, 28(1): 22-27.
- WEI YAN-GANG. Theoretical study of RV drive with new structure and large percentage of teeth in contact[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2007, 28(1): 22-27.
- [12] 孟杰. 高速电主轴动力学分析与实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [13] 毕鲁雁, 焦宗夏, 范圣韬. 复杂机电系统多学科设计与仿真集成框架[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(12): 3265-3269.
- BI LU-YAN, JIAO ZONG-XIA, FAN SHENG-TAO. Comprehensive electromechanical systems multi-disciplinary design and simulation integrated framework[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(12): 3265-3269.
- [14] 姜洪权, 高建民, 陈富民, 等. 基于网络特性的分布式复杂机电系统脆弱性分析[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(4): 791-796.
- JIANG HONG-QUAN, GAOJIAN-MIN, CHEN FU-MIN, et al. Vulnerability analysis to distributed and complex electromechanical system based on network property [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2009, 15(4): 791-796.
- [15] 温熙森, 邱静, 陶俊勇. 机电系统分析动力学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [16] 吴敬爱, 朱东起, 姜新建. 集中绕组永磁无刷电机的转矩研究[J]. 电工电能新技术, 2003, 22(3): 59-62.
- WU JING-AI, ZHU DONG-QI, JIANG XIN-JIAN. Calculating torque of concentrated winding brushless PM motor [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2003, 22(3): 59-62.

(编辑 张小强)