

文章编号: 1000-582X(2011)03-007-06

高速电主轴的电压解耦与负载特性

康辉民¹, 陈小安¹, 周明红¹, 李浩如², 邢利娜¹, 陈文曲¹

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆长安汽车工程研究院动力中心, 重庆 401120)

摘要: 为了研究高速电主轴动态数学模型中耦合回路对高速电主轴负载特性的影响, 根据控制理论的不变性原理, 在高速电主轴给定电流和反馈电流的偏差处引入外部解耦支路来消除耦合电压的影响, 研究解耦后高速电主轴的励磁电流和转矩电流在负载变化时对主轴磁通、电磁转矩以及负载特性的影响方式, 并利用高速电主轴性能测试试验平台进行负载特性测试。理论分析和试验结果表明: 高速电主轴的解耦效果会直接影响主轴磁通的稳定性和转矩电流对负载的线性跟踪能力, 并通过不同频率下机械特性曲线的平行度、电磁转矩脉动程度、主轴的载荷能力、功率因素和效率等特性参数直接体现。因此, 可以根据包含上述特征信息的机械特性曲线、功率因素曲线和效率曲线的变化趋势, 判断高速电主轴的实际解耦效果, 并预测高速电主轴在该控制方式下的动态性能。

关键词: 高速电主轴; 耦合电路; 负载测试; 载荷能力; 动态分析

中图分类号: TH134; TM921

文献标志码: A

Voltage decoupling and load characteristics of high-speed motorized spindle

KANG Hui-min¹, CHEN Xiao-an¹, ZHOU Ming-hong¹,
LI Hao-ru², XING Li-na¹, CHEN Wen-qu¹

(1. The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;
2. Power Center of Chana Automobile Engineering Research Institute of Chongqing,
Chongqing 401120, P. R. China)

Abstract: To study the impact of coupling circuits in high speed motorized spindle's dynamic mathematical model on load characteristics of the spindle, according to invariance principle of control theory, external decoupling branches is introduced into the point where the difference between reference current and feedback current of the high speed motorized spindle is, to eliminate the impact of coupling voltage, and then the impact way of excitation current changes and torque current changes on the spindle's flux, electromagnetic torque, and load characteristics are studied when the load varies. Meanwhile, the load characteristics are tested on the test platform of high speed motorized spindle. Theoretical analysis and experimental results show that the decoupling effect of high speed motorized spindle directly affects the stability of the spindle's flux and the linear tracking ability of the torque current on load, which is reflected by the parallelism of mechanical characteristic curve under different frequencies, the pulse level of electromagnetic torque, the load capacity of the spindle, power factor, efficiency and other parameters. Therefore the spindle's actual decoupling results and dynamic performance under the control mode can be judged and forecasted, according to the trends of mechanical characteristic curve, power factor curve and efficiency curve.

Key words: high-speed motorized spindle; coupling circuits; load testing; load carrying capacity; dynamic analysis

收稿日期: 2010-10-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50675233); 重庆市重大科技攻关基金资助项目(2006AA3010)

作者简介: 康辉民(1975-), 男, 重庆大学博士研究生, 研究方向为机电传动及智能化控制系统。

陈小安(联系人), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, (E-mail) xachen@cqu.edu.cn。

高速电主轴作为高速机床的核心部件,其内部参数耦合性能复杂,且输出性能会直接影响工件的加工质量,而耦合电压作为高速电主轴电磁参数耦合的一种重要形式,是影响高速电主轴转矩响应速度、带负载能力和抗扰动性能的关键因素。因此,研究高速电主轴的电压解耦机理,提高主轴的负载性能,成为高速电主轴研究的重要内容之一。国际上,Chang 等^[1]应用频谱分析技术对高速电主轴的振动进行监测分析;Nakkiew 等^[2]通过测量工件的加工轨迹来量化主轴加工过程的径向误差,进而判断高速电主轴的转矩精度;Chen 等^[3]研究了高速电主轴在高速运转下的离心力对轴承自身刚度和高速电主轴带负载能力的影响。国内主要有孟杰等^[4]对高速电主轴的加载方式和加载性能进行了研究;而吕浪等^[5-7]重点研究了高速电主轴的转子动力学耦合性能。尽管上述研究对高速电主轴的输出性能从不同的方面进行了阐述,但均未对高速电主轴动态数学模型中的耦合变量与控制方法、解耦效果与高速电主轴负载特性之间的关系进行深入的分析。

鉴于此,笔者通过对高速电主轴动态数学模型中耦合变量的分析,依据控制理论的不变性原理,从高速电主轴定子给定电流和反馈电流的偏差处引入外部解耦支路来抵消高速电主轴的交叉耦合电压项的影响,并用 VFD-V 型台达变频器按所提解耦方法进行器件布置和参数设置,为 120MD60Y6 油雾润滑型电主轴提供控制指令;同时,采用对拖的方法对高速电主轴进行加载,系统测试高速电主轴在所

提解耦方法下的带负载能力、定子电流的变化趋势、效率以及功率因素等负载特性参数,定性评价高速电主轴的解耦效果对主轴输出性能所产生的影响。

1 高速电主轴交叉耦合电压分析

在以转子磁场定向的 $M-T$ 坐标系下,高速电主轴定子电压的动态数学模型为^[8]

$$\left. \begin{aligned} u_{M1} &= (R_s + \sigma L_s p) i_{M1} - \omega_1 \sigma L_s i_{T1} + p \frac{L_m}{L_r} \psi_r, \\ u_{T1} &= (R_s + \sigma L_s p) i_{T1} + \omega_1 \sigma L_s i_{M1} + \omega_1 \frac{L_m}{L_r} \psi_r, \\ 0 &= -\frac{R_r L_m}{L_r} i_{M1} + \left(p + \frac{R_r}{L_r} \right) \psi_r, \\ 0 &= -\frac{R_r L_m}{L_r} i_{T1} + \Delta \omega \psi_r, \\ T_e &= p_m \frac{L_m}{L_r} i_{T1} \psi_r, \\ T_e - T_L &= \frac{J}{p_m} \frac{d\omega_r}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: σ 为漏磁系数, $\sigma=1-\frac{L_m^2}{L_s L_r}$; R_s 为定子电阻; R_r 为转子电阻; L_m 为定子和转子之间的互感; L_s 为定子自感; L_r 为转子自感; i_{M1} 为励磁电流; i_{T1} 为转矩电流; ω_1 为同步角频率; ω_r 为转子角频率; $\Delta\omega$ 为转差角频率, $\Delta\omega=\omega_1-\omega_r$; p_m 为电机的磁极对数; ψ_r 为转子磁链; T_e 为电磁转矩; T_L 为负载转矩; p 为微分算子, $p=\frac{d}{dt}$ 。

高速电主轴的等效电路如图 1 所示。

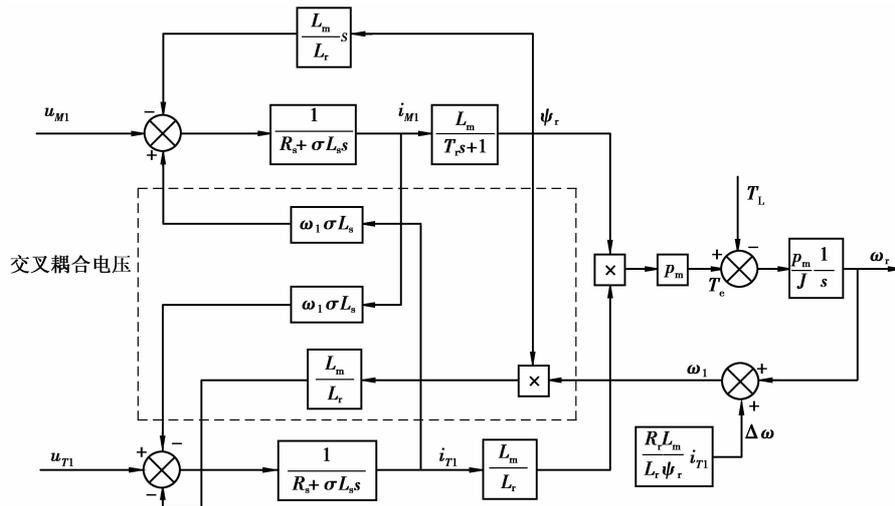


图 1 高速电主轴 $M-T$ 坐标系下动态结构框图

由图 1 知,输入电压 u_{M1} 和 u_{T1} (即 M 轴和 T 轴) 之间除存在交叉耦合分量 $-\omega_1 \sigma L_s i_{M1}$ 和 $\omega_1 \sigma L_s i_{T1}$ 外,还存在反电势分量 $p \frac{L_m}{L_r} \psi_r$ 和 $\omega_1 \frac{L_m}{L_r} \psi_r$,但因 ψ_r 仅受 i_{M1} 的影响,所以反电势分量 $p \frac{L_m}{L_r} \psi_r$ 不对 u_{T1} 造成影

响, M 、 T 轴之间的交叉耦合电压可表示为

$$\left. \begin{aligned} u_{MT} &= - \left[\omega_1 \sigma L_s i_{M1} + \omega_1 \left(\frac{L_m}{L_r} \right) \psi_r \right], \\ u_{TM} &= \omega_1 \sigma L_s i_{T1}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(2)表明, M 轴和 T 轴之间的交叉耦合电压除受

主轴的电磁参数与电流的影响外,还受旋转磁场的同步转速 ω_1 的影响,且随着转速的上升, M 轴和 T 轴之间的耦合电压在输出电压中所占的比例会越来越大,将严重影响电流的控制效果,偏差解耦正是针对上述问题而提出。

2 偏差解耦控制原理

由图 1 知,高速电主轴励磁电流通道和转矩电流

通道之间的耦合作用是由实际的励磁电流和转矩电流引起,为了有效消除式(2)中的耦合电压,根据控制理论的不变性原理,在图 1 所示的输入给定电压 u_{M1} 和 u_{T1} 处添加一个解耦回路,即在高速电主轴的给定电流和实际电流反馈值的偏差处引入外部解耦支路,使解耦电压分别与耦合电压 u_{MT} 和 u_{TM} 的大小相等,以抵消两者对 M 轴电流和 T 轴电流的影响,其原理如图 2 所示(图中只画出了耦合回路和解耦回路)^[9-10]。

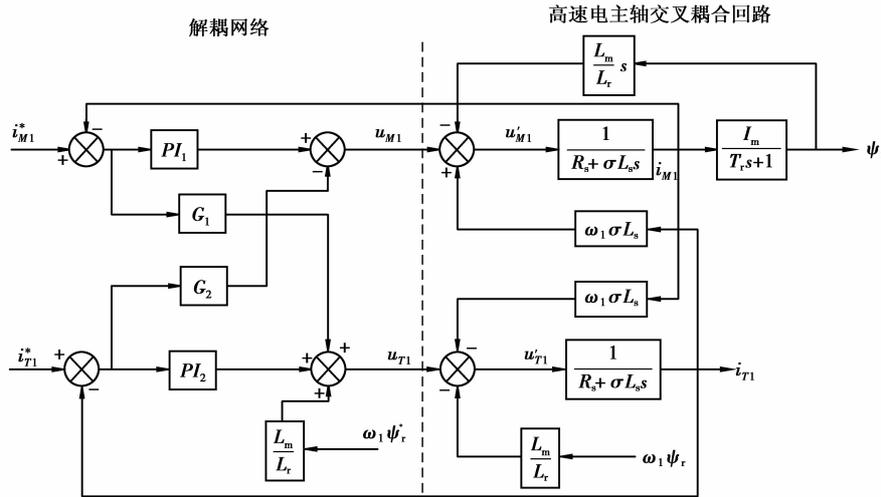


图 2 引入解耦支路后高速电主轴原理图

图 2 中, PI_1 、 PI_2 分别为 M 轴和 T 轴电流的比例积分环节,是构成 M 轴电流和 T 轴电流控制闭环的核心,以提高定子电流的动态响应。在计算解耦支路中的传递函数时,由于反电势分量对解耦支路传递函数表达式的计算不造成影响,可忽略^[11-14],并根据虚线左右两端电压相等的原则,可得如下关系式:

$$\left. \begin{aligned} PI_1(i_{M1}^* - i_{M1}) - G_2(i_{T1}^* - i_{T1}) &= (R_s + \sigma L_s s)i_{M1} - \omega_1 \sigma L_s i_{T1}, \\ PI_2(i_{T1}^* - i_{T1}) + G_1(i_{M1}^* - i_{M1}) &= (R_s + \sigma L_s s)i_{T1} + \omega_1 \sigma L_s i_{M1}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

将式(3)中的两个方程整理后,可得

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{PI_1}{G_2} + \frac{G_1}{PI_2}\right)(i_{M1}^* - i_{M1}) &= \left(\frac{R_s + \sigma L_s s}{G_2} - \frac{\omega_1 \sigma L_s}{PI_2}\right)i_{M1} + \left(\frac{\omega_1 \sigma L_s}{G_2} + \frac{R_s + \sigma L_s s}{PI_2}\right)i_{T1}, \\ \left(\frac{PI_2}{G_1} + \frac{G_2}{PI_1}\right)(i_{T1}^* - i_{T1}) &= \left(\frac{R_s + \sigma L_s s}{G_1} - \frac{\omega_1 \sigma L_s}{PI_1}\right)i_{T1} + \left(\frac{\omega_1 \sigma L_s}{G_1} - \frac{R_s + \sigma L_s s}{PI_1}\right)i_{M1}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

由式(4)知,根据完全解耦条件, M 轴励磁电流 i_{M1} 仅受其给定值 i_{M1}^* 的控制,而与 T 轴转矩电流 i_{T1} 无关;同理, T 轴转矩电流 i_{T1} 只受其给定值 i_{T1}^* 的控制,与 M 轴励磁电流 i_{M1} 无关,因此可得 G_1 、 G_2 的表达式分别为:

$$\left. \begin{aligned} G_1 &= \frac{\omega_1 \sigma L_s}{R_s + \sigma L_s s} PI_1, \\ G_2 &= -\frac{\omega_1 \sigma L_s}{R_s + \sigma L_s s} PI_2. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

结合图 2 和式(5),可得到偏差解耦控制框图如图 3 所示。

图 3 中,若令励磁电流和转矩电流比例积分环节的传递函数 $PI_1 = PI_2 = k_p + \frac{k_i}{s}$ (其中 k_p 为比例系数, k_i 为积分常数),则高速电主轴输入端的给定电压 u_{M1}^* 和 u_{T1}^* 分别为

$$\left. \begin{aligned} u_{M1}^* &= \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right) \left[(i_{M1}^* - i_{M1}) - \frac{\omega_1 \sigma L_s}{R_s + \sigma L_s s} (i_{T1}^* - i_{T1}) \right], \\ u_{T1}^* &= \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right) \left[(i_{T1}^* - i_{T1}) + \frac{\omega_1 \sigma L_s}{R_s + \sigma L_s s} (i_{M1}^* - i_{M1}) \right] + \frac{L_m}{L_r} \omega_1 \psi_r^*. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式(6)中, $i_{M1}^* = \psi_r^* / L_m$,所以在调速系统中, i_{M1}^* 可由磁链给定值 ψ_r^* 确定,而 i_{T1}^* 则由所需的转矩 T^* 来确定,且 i_{T1} 与 T 呈线性关系,故 i_{T1}^* 可直接由速度调节器的输出给定。根据式(2)和(6)可得高速电主轴偏差解耦电压型矢量控制系统框图,如图 4 所示。

由图 4 知,偏差解耦采用给定电流与实际电流的偏差进行交叉耦合电压项的解耦电压计算,避免了反馈解耦中解耦电压计算的定子电流延迟,且电流值是

根据解耦所需的电流来提供,在系统耦合影响还没反应出来的时候就开始了解耦作用,从而使得偏差解耦对高速电主轴参数的变化有着较强的鲁棒性。

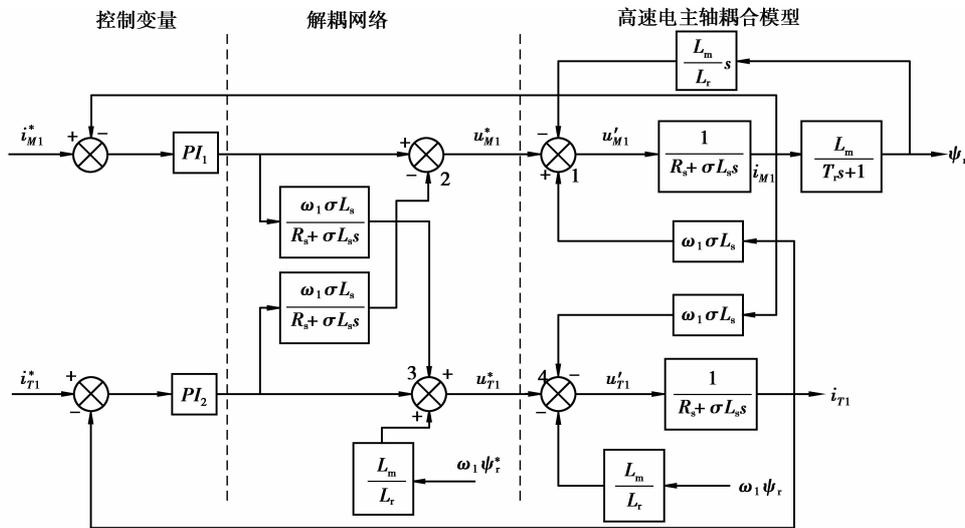


图 3 高速电主轴偏差解耦控制框图

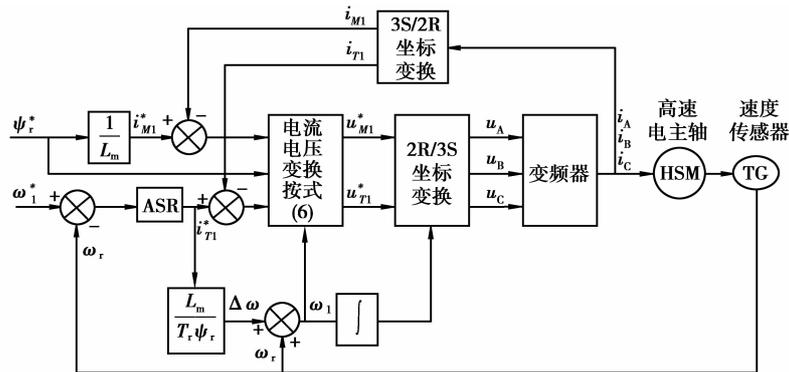


图 4 高速电主轴偏差解耦矢量控制系统框图

3 高速电主轴偏差解耦控制下的负载特性分析

为了验证上述解耦方法对高速电主轴的实际解耦效果,选用 VFD-V 型(额定电压 350 V,额定功率 7.5 kW)台达变频器作为 120MD60Y6(S6 制)油雾润滑型电主轴的控制电源,并按图 4 所示的要求进行器件布置和参数设置,对该型电主轴在各频率下的特性曲线进行系统测试。其中 120MD60Y6 型高速电主轴的额定参数如表 1 所示。

表 1 120MD60Y6 型高速电主轴的额定参数

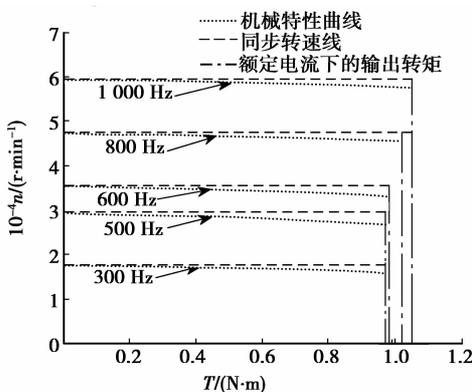
额定电压	额定电流	额定功率	额定转速	额定转矩
U_n/V	I_n/A	P_n/kW	$n/(r \cdot \min^{-1})$	$T/(N \cdot m)$
350	16	6	58 200	0.98
额定频率	极对数	工作制式	润滑方式	定子冷却方式
f_n/Hz	p			
1 000	1	S6	油雾	水冷

试验时,用同型号、容量比被测电主轴大一个等级的电主轴作为测功机,采用对拖的方式对被测电主轴施加力的作用。且在开始启动时,让被测电主轴和测功机在低频下同步空载启动,稳定运行 5 min 使被测电主轴和测功机进行充分“跑合”和预热,然后无极调速到最高频 1 000 Hz,空载稳定运行 3 min 后,逐步降低测功机的频率,使测功机和被测电主轴产生一个转速差,此时测功机被拖着旋转,起负载的作用。不断降低测功机的频率,两者的转速差不断加大,负载同时加大。当被测电主轴的定子电流达到其额定值时,测功机的频率停止降低,使两者以同样的转速稳定旋转 1 min,在主轴无速度、转矩突变及精度损失时,停止被测电主轴和测功机。在此过程中,用三相高频电动机专用测试仪(型号:89601C1)同步监测被测电主轴在负载过程中的电压、电流、转速、转矩、功率因素、输入/输出功率以及效率等特性参数,用所测得的数据分别绘制出能直

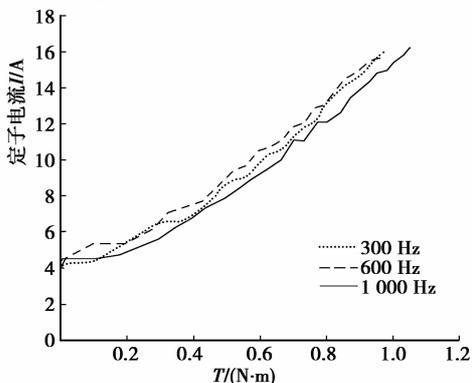
观反映被测电主轴负载性能的机械特性曲线、功率因素曲线、效率曲线及转矩/电流曲线等,如图5所示,并将各曲线的关键特征点数据记录在表2中。图5(a)中绘出了主轴在300、500、600、800、1 000 Hz下的机械特性曲线,而图5(b)~(d)为了图形清晰,只选取了具有代表性的300、600、1 000 Hz下的曲线。

表2 120MD60Y6型高速电主轴的特性参数

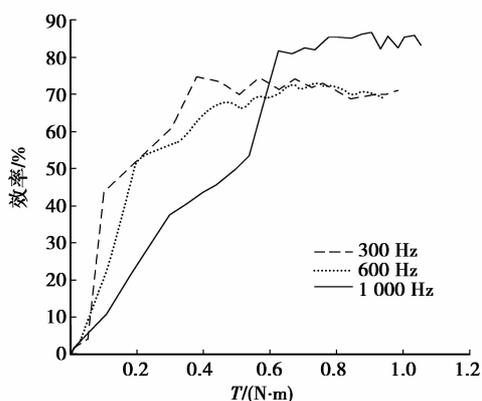
频率 f/Hz	空载电流 i/A	最大输出转矩 $T/(\text{N}\cdot\text{m})$	最大功率因素 $P\cdot F$	最大效率 $\eta/\%$
300	4.040	0.98	0.800	74.80
500	4.160	0.98	0.790	79.20
600	4.030	0.99	0.786	73.29
800	4.005	1.03	0.791	76.65
1 000	4.270	1.06	0.790	86.89



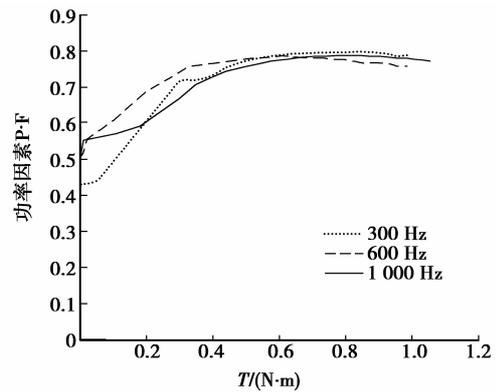
(a)高速电主轴的机械特性曲线



(b)高速电主轴定子电流曲线



(c)高速电主轴的效率曲线



(d)高速电主轴的功率因素曲线

图5 高速电主轴在各频率下的负载特性曲线

由图5(a)知,高速电主轴在各频率下的机械特性曲线近似平行,转速差基本不变,且最大输出转矩均大于或等于高速电主轴的额定输出转矩 $0.98 \text{ N}\cdot\text{m}$,而表2中的空载电流均为 4 A 左右。由此可知,主轴空载时,转矩电流为零,定子电流几乎全部用于励磁以产生主轴磁通。且在频率和负载变化时,机械特性曲线相互平行,说明主轴磁通恒定,转矩电流能随负载线性变化,结合主轴在低频下的转矩输出能力不变的事实,说明高速电主轴的耦合电压已经得到解耦。

而图5(b)的电流曲线表明,在不同频率下,同一转矩下的定子电流并不相等,表明在负载相同时,主轴的输入功率并不相同,这必导致主轴的功率因素和效率不相等。如在图5(c)、(d)所示的曲线中,主轴效率和功率因素的最高点并不出现在额定工作点。初始时,两者均随负载的增大而增加,并逐步达到最大,然后随着负载的增大,反而降低。但在这一变化过程中,两者变化的步调并不一致。如 300 Hz 时,在主轴效率的最大点 74.58% 处,功率因素只有 0.783 ;同样,在功率因素的最大点 0.802 处的效率只有 68.86% ;当电流和输出转矩都达到额定值时,功率因素和效率分别只有 0.792 和 68.21% ;分析其他频率下主轴的负载特性曲线,可得到类似的结论。这是因为主轴频率不同时,转速不同,在负载相同的情况下,系统的动能、电磁损耗及各部件间的机械耦合所导致的摩擦损耗不同,必导致系统输入功率不一样,所以效率不一样。另一方面,由于功率因素是高速电主轴内部有功功率与视在功率的比值,而有功功率是系统动能和负载功率的总和,更重要的是,系统动能是速度的函数,所以当负载功率相同时,系统的输入功率取决于主轴的动能,这也使得主轴功率因素的变化趋势相对于效率趋于平缓。

4 结 论

笔者针对高速电主轴多变量、非线性、强耦合的特点,研究了主轴频率和电流变化对耦合电压影响的途径和方式,并根据不变性原理,提出在高速电主轴输入电压的前端引入一解耦支路来消除内部耦合电压对主轴输出性能的影响。理论分析和试验结果表明,所提的偏差解耦方法能够对高速电主轴的耦合电压进行解耦,使主轴的磁通在频率变化时始终恒定,转矩的输出能力保持不变。且当主轴的模型参数发生变化时,可根据主轴的负载特性曲线,通过分析定子电流的稳定性、低频下的转矩输出能力以及效率和功率因素曲线的波动程度,来定性判断主轴的解耦效果。

参考文献:

- [1] CHANG C F, CHEN J J. Vibration monitoring of motorized spindles using spectral analysis techniques[J]. *Mechatronics*, 2009, 19(5): 726-734.
- [2] NAKKIEW W, LIN C W, TU J F. A new method to quantify radial error of a motorized end-milling cutter/spindle system at very high speed rotations [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, 46(7/8): 877-889.
- [3] CHEN J S, HWANG Y W. Centrifugal force induced dynamics of a motorized high-speed spindle [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, 30(1/2): 10-19.
- [4] 孟杰, 陈小安, 康辉民, 等. 高速电主轴加载试验的研究[J]. *机械强度*, 2009, 31(4): 689-692.
MENG JIE, CHENG XIAO-AN, KANG HUI-MIN, et al. Study on dynamic loading experiment of high speed motorized spindle [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2009, 31(4): 689-692.
- [5] LU LANG, XIONG WAN-LI, GAO HANG. Mechanical-electric coupling dynamical characteristics of an ultra-high speed grinding motorized spindle system[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering: English Edition*, 2008, 21(5): 34-40.
- [6] ZHANG BO-LIN, MA PING, XIAO SHU-HONG, et al. Zero transmission and its application in high speed CNC machine tools [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering: English Edition*, 2000, 13(3): 184-189.
- [7] 孟杰, 陈小安, 合焯. 高速电主轴电动机: 主轴系统的机电耦合动力学建模[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(12): 160-165.
MENG JIE, CHEN XIAO-AN, HE YE. Electromechanical coupled dynamical modeling of high speed motorized spindle's motor-spindle subsystem[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(12): 160-165.
- [8] 张庆春, 邢涛, 李国栋, 等. 电磁轴承磨床电主轴控制器的研究[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(11): 168-172.
ZHANG QING-CHUN, XING TAO, LI GUO-DONG, et al. Controller research on EMB system of grinding machine spindle [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(11): 168-172.
- [9] 周志刚. 一种感应电机的解耦控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(2): 121-125.
ZHOU ZHI-GANG. A induction motor de-couple control method [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(2): 121-125.
- [10] 李擎, 杨立永, 李正熙, 等. 异步电动机定子磁链与电磁转矩的逆系统解耦控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(6): 146-150.
LI QING, YANG LI-YONG, LI ZHENG-XI, et al. Stator flux and torque decoupling control of induction motor using inverse system method [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(6): 146-150.
- [11] LIOKA, D, MORI K, YOKOMIZU Y, et al. Load current model of electric apparatus based on load voltage characteristics during voltage sag [J]. *IEEE Transactions on Power and Energy*, 2007, 127(7): 840-846.
- [12] KORUNOVIC L M, STOJANOVIC D P, MILANOVIC J V. Identification of static load characteristics based on measurements in medium-voltage distribution network [J]. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2008, 2(2): 227-234.
- [13] LU Z S, MA B H. Research on key technology of hydrostatic motorized spindle and it's designing [J]. *Key Engineering Materials*, 2009, 392/394: 439-442.
- [14] 张岳, 王凤翔. 无刷双馈电动机的双馈运行特性实验研究[J]. *微特电机*, 2009, 42(1): 5-7.
ZHANG YUE, WANG FENG-XIANG. Study of doubly-fed operation performance of brushless doubly-fed based on matlab [J]. *Micromotors*, 2009, 42(1): 5-7.
- [15] XIONG W L, LU M Z, HUANG H W, et al. A method of monitoring large power grinding by using the current signal of the motorized spindle [J]. *Key Engineering Materials*, 2004, 259/260: 338-341.

(编辑 张 芊)