

电主轴内置电机热性能分析<sup>①</sup>

任艳君, 李云松

重庆工商职业学院 机电工程系, 重庆 401520

**摘要:** 从电主轴结构特征入手, 应用电磁学理论和能量守恒定律建立内置电机的电磁损耗模型, 并结合系统状态方程, 分析电机内部产热, 制定电主轴加载试验, 测量电主轴运转过程中的电参数, 以此为依据计算定转子的主要能量损失——铜损和铁损, 并在不同工况下测试内置电机附近的壳体的温度变化规律, 为进一步分析电主轴动态特性提供依据.

**关键词:** 电主轴; 内置电机; 热态性能

**中图分类号:** TG584

**文献标志码:** A

电主轴是集“原动件—传动件—执行元件”为一体、实现“零传动”的特殊主轴, 具有速度高、振动小、噪声低、结构紧凑、扭矩匹配性好等优点, 用其取代传统机械主轴, 是高速机床工业发展的大趋势<sup>[1-4]</sup>. 内置电机的存在使得电主轴比传统机床主轴有着更为复杂的热特性, 而电主轴的热态性能和其机械性能耦合相关, 直接影响零件的加工质量<sup>[5-7]</sup>, 故建立合理模型分析电主轴内置电机的热态性能尤为紧迫.

以往研究在进行电机产热分析时, 一般只简单地将输入功率乘以一个效率系数来当作电机的能量损耗<sup>[8-9]</sup>, 鉴于此, 本研究建立电机的电磁损耗模型, 具体讨论电机内部各部分的能量损失, 并通过实验测试内置电机的热性能, 指导进一步的主轴动态性能分析.

## 1 电机电磁损耗模型

根据电主轴内置电机定、转子间的电磁转换关系, 可以以功率流的形式建立其电磁损耗模型(图 1).

由图 1 可知, 电机的输入功率为

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos\varphi \quad (1)$$

式中:  $U_1, I_1$  分别为定子绕组的线电压、线电流;  $\cos\varphi$  为定子绕组功率因数.

电机损耗可分为定子损耗和转子损耗, 而定子损耗  $P_S$  可分为定子铜耗  $P_{Cus}$  和定子铁耗  $P_{Fes}$ :

$$P_S = P_{Cus} + P_{Fes}, P_{Cus} = 3I_1^2 r_1, P_{Fes} = 3I_m^2 r_m \quad (2)$$

式中:  $r_1$  为定子电阻;  $I_m, r_m$  分别为励磁电流和励磁电阻.

余下的大部分功率通过电磁感应作用由定子传递到转子上, 称为电磁功率  $P_M$ . 转子损耗  $P_R$  可分为转

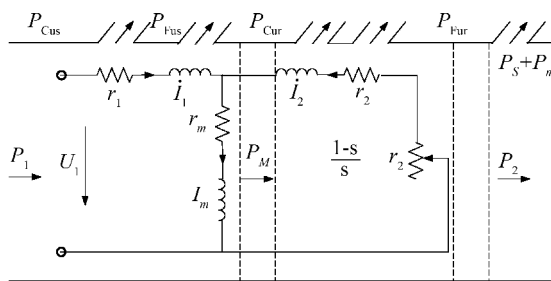


图 1 电机损耗模型

① 收稿日期: 2013-04-07

基金项目: 重庆市高等教育教学改革研究项目(102421).

作者简介: 任艳君(1973-), 女, 四川渠县人, 硕士, 副教授, 主要从事电气自动化控制方面的研究.

子铁耗  $P_{\text{Fer}}$  和转子铜耗  $P_{\text{Cur}}$ , 而电机正常运行时, 转差率  $s$  很低, 所以  $P_{\text{Fer}} \approx 0$ , 则:

$$P_R \approx P_{\text{Cur}} = 3I_2^2 r_2 = sP_M \quad (3)$$

式中:  $I_2, r_2$  分别为转子等效电流和等效电阻.

电主轴工作运行时, 还将产生因风阻摩擦和轴承摩擦引起的机械损耗  $p_m$ ; 此外还会产生杂散损耗  $p_s$ , 最后剩下的才是输出端的机械功率  $P_2$ .

电主轴为一个机电强耦合的系统, 施加在主轴上的外载荷会影响系统的电参数, 采用变分原理, 可得到电主轴系统的状态方程<sup>[10]</sup>:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i \\ n \\ \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -L^{-1} \left( r + \frac{dL}{dt} \right) & 0 & 0 \\ \frac{p}{2J} i^T \frac{\partial L}{\partial \theta} & -\frac{R_n}{J} & 0 \\ 0 & p & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i \\ n \\ \theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L^{-1} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ T_w \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中  $\{i, n, \theta\}^T$  为状态矢量;  $\{L^{-1} 0, 0 - 1/J, 0 0\}^T$  为控制矩阵;  $\{u, T_w\}^T$  为外加矩阵;  $L$  为电感;  $p$  为电机极对数;  $J$  为主轴转子转动惯量;  $T_w$  为外加载矩;  $R_n$  为主轴旋转阻力系数;  $u, i$  和  $r$  分别为电机的相电压、相电流和相电阻, 式(1) — (3) 中的电压、电流和电阻代表着其中的一相.

## 2 试 验

本文计算对象为 170MD15Y20 型号电主轴, 用电机自动测试系统测试电参数, 主轴的其它参数见表 1.

表 1 电主轴参数

额定相电压	额定线电流	额定功率	额定转速	额定频率	额定转矩
$U_n/V$	$I_1/A$	$P/kW$	$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$	$f/Hz$	$T/N \cdot m$
350	46	20	14 500	500	13
励磁电流 $I_m/A$	励磁电抗 $/\Omega$	定子漏电抗 $/\Omega$	转子漏电抗 $/\Omega$	定子电阻 $r/\Omega$	转子电阻 $r/\Omega$
8.0	21.3	0.95	0.97	0.11	0.21
极对数 $p$	工作制	润滑方式	定子冷却方式	定子绕组连接	转子型式
2	S6	油雾	水冷	Y	鼠笼

此外采用测功机与实验主轴对拖方式, 通过测功机和实验主轴的转速差实现了主轴高转速工况下的扭矩加载, 其加载示意图见图 2. 通过此实验系统和方案可测量电主轴不同转速和载荷工况下的电参数.

## 3 结果分析

根据测试所得的电参数和已知的主轴参数, 可通过内置电机电磁损耗模型计算主轴不同转速和载荷工

况下的电机损耗. 图 3 为加载转矩为  $4 \text{ N} \cdot \text{m}$  条件下主轴内主电机不同转速下的损耗, 由于电主轴采用的是  $u/f$  控制方式, 电频率越高, 主轴输入功率越大, 所以电机定子的铜损和铁损也增大. 而转子电流主要和加载转矩有关, 故转子铜耗变化不大.

电源频率为  $300 \text{ Hz}$  时(同步转速  $9\,000 \text{ r/min}$ ), 主轴内置电机在不同加载载荷下的损耗如图 4 所示, 空载时的转子电流约为 0, 主轴转速接近同步转速, 励磁电流等同于定子电流, 电机损耗几乎全来自于定子铜损和铁损. 随着负载的增大, 由式(4)所示的电主轴机电耦合模型可知, 主轴转速下降, 转子电流增大<sup>[10]</sup>, 而为维持磁动势的平衡, 定子电流也增大, 故定子和转子的铜耗也增大, 而定子铁耗变化不大.

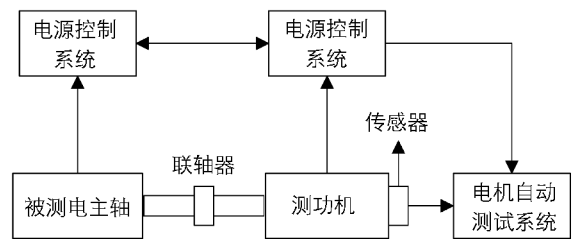


图 2 电主轴加载示意图

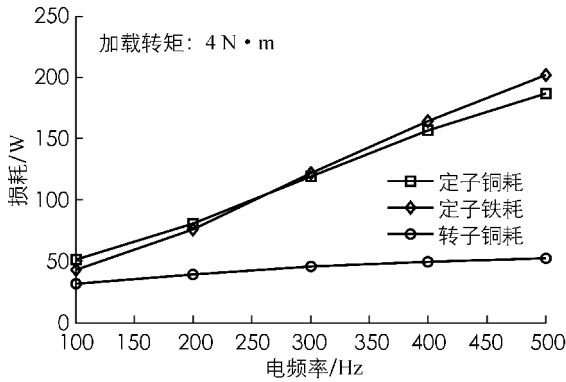


图 3 不同转速下的电机损耗

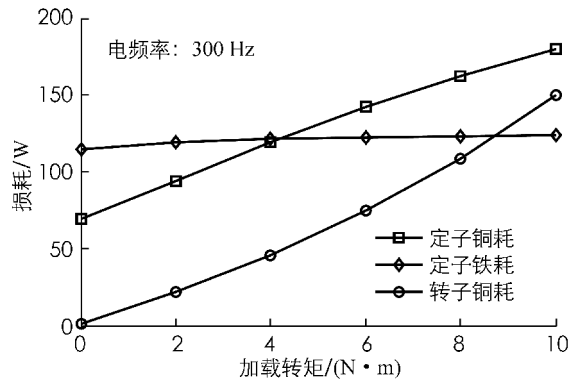
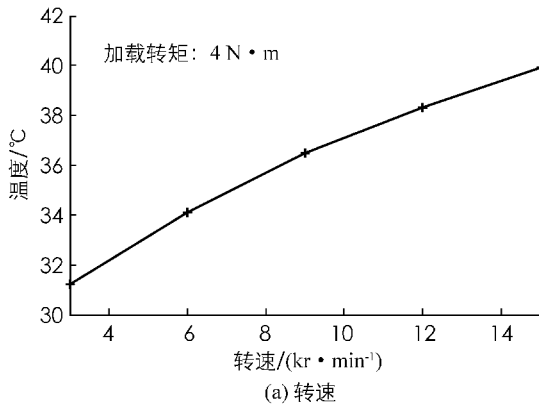


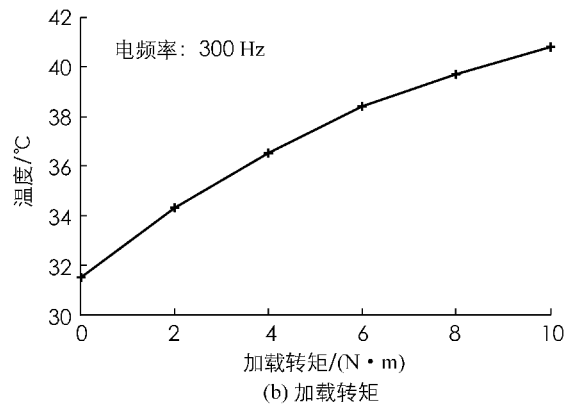
图 4 不同加载下的电机损耗

此外,用 TES-1310 型号温度表测温仪测试了电主轴壳体在不同电频率下的温度,为避免轴承产热的干扰,测试点在离前后轴承较远的壳体中段,外部环境温度为  $24.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,测试结果图 5 所示. 主轴壳体中段离前后轴承(系统另一主要热源)较远,其温度主要受与其接近的内置电机产热影响. 由图 5 可知,主轴壳体中段的温度随着转速和负载的升高而升高,和图 3,4 所示计算电机损耗结果规律相吻合,这也说明了所建模型的准确性. 不过由于壳体和内置电机中间设计有冷却水槽,壳体温度的上升趋势不是特别大.

图 3—5 所示的结果可作为理论分析的依据,也为进一步分析主轴动态特性提供了基础.



(a) 转速



(b) 加载转矩

图 5 主轴壳体温度不同工况下的变化规律

## 4 结 论

本文建立了高速机床主轴内置电机的电磁损耗模型,并结合实验分析了不同电频率和负载下内置电机的能量损耗及其附近壳体的温度变化规律,结果得出主轴在  $u/f$  控制下,定子铜损和铁损随着电频率的增大而增大,转子铜损相对较小,且和电频率关系不大,主要与加载载荷有关. 而负载增大时,定、转子的铜耗也增大,而定子铁耗变化不大. 此外,离内置电机较近、前后轴承较远的壳体中段的温度变化规律也与电机损耗规律相符,验证了模型的准确性. 实验所得数据可作为相关理论分析的依据.

### 参考文献:

- [1] HOLKFP T, CAO H, KOLÁR P, et al. Thermo-Mechanical Model of Spindles [J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2010, 59(1): 365—368.
- [2] ABELE E, ALTINTAS Y, BRECHEER C. Machine Tool Spindle Units [J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2010, 59(2): 1—22.
- [3] 王云霞, 王志亮, 鲁泳, 等. 基于 ADAMS 的内圆磨床与高速电主轴结构动力学模拟分析 [J]. 制造业自动化, 2012, 34(4): 62—65.

- [4] 梁双翼, 陈 晨, 尹辉俊. 基于有限元方法的电主轴模态分析 [J]. 制造业自动化, 2012, 34(1): 57-60.
- [5] 孙兴伟, 王 聪, 王 可, 等. 高速电主轴热态特性的研究 [J]. 制造业自动化, 2011, 33(10): 111-114.
- [6] 刘水发. 高速电主轴热态性能分析 [J]. 制造业自动化, 2011, 33(1): 141-144.
- [7] 商冬青, 杨玉霞. 高速卧式加工中心热态特性分析与实验验证 [J]. 制造业自动化, 2011, 33(10): 139-141.
- [8] 姜德美, 谢守勇, 甘露萍. 步进电机启动控制算法设计 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2007, 29(5): 128-132.
- [9] 李中华, 王 慧, 李 东. 有脉冲扰动的永磁同步电机混沌的直接力矩控制方法 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2010, 32(7): 139-145.
- [10] 孟 杰, 陈小安, 合 焯. 高速电主轴电动机一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.

## Analysis on Thermal Behaviors of Built-in Motor in Motorized Spindle

REN Yan-Jun, LI Yun-Song

*Department of Mechanical and Electrical Engineering, Chongqing Technology and Business Institute, Chongqing 401520, China*

**Abstract:** With the structure characteristics of motorized spindles, an electromagnetic loss model of the built-in motor has been established on the basis of law of conservation of energy and electromagnetic theory, and with the state equation of the system, the heat generation of the motor has been investigated. According to the experimental data, the copper loss and the iron loss, which are the main energy loss of the stator and rotor, have been studied, and the temperature change law at the housing near the built-in motor has been obtained. The results provide the basis for further analysis on dynamic behaviors of motorized spindles.

**Key words:** motorized spindle; built-in motor; thermal behavior

责任编辑 潘春燕