

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.043

# 高速电主轴功率流模型与热态特性研究\*

陈小安 张朋 合焱 刘俊峰

(重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 根据能量守恒定律建立了高速电主轴功率流模型,研究了电动机电磁损耗、轴承摩擦损耗和风电阻损耗之间的关系,并且通过实验测量 2ZDG60 型高速电主轴运行过程中的电磁损耗参数,对此模型进行验证,其理论计算结果与实验结果吻合度较高。在此基础上,对 2ZDG60 型高速电主轴进行了热态有限元仿真,分析其不同转速下的温升分布,其中在集中产热区域轴承和电动机处温升较高,测量前轴承外圈以及壳体前部、中部、后部的温升情况,实验数据与仿真数据相比误差较小,进一步验证了高速电主轴功率流模型的准确性。

**关键词:** 高速电主轴 功率流 热态特性

**中图分类号:** TH133 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)09-0250-05

## Power Flow Model of High-speed Motorized Spindles and Its Thermal Characteristics

Chen Xiaohan Zhang Peng He Ye Liu Junfeng

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Based on the law of energy conservation, a power flow model of high-speed motorized spindles was presented. Quantitative power loss models of the built-in motor, bearings and air were developed. An experiment on the 2ZDG60 motorized spindle was carried out under several operating conditions. The good agreement between the theoretical results and the experimental data indicated that the power flow model was capable of accurately predicting the power loss of high-speed motorized spindles. And on all these points, the thermal simulation data of 2ZDG60 motorized spindle showed that the temperature rose on the areas of bearings and motor was higher. The little error of testing data and simulation data of temperature rise proved the correctness of the power flow model.

**Key words:** High-speed motorized spindles Power flow Thermal characteristics

### 引言

高速电主轴是集原动机—传动装置—执行机构—控制系统于一身、实现“近零传动”的机电耦合系统,它已经成为高端数控机床的核心功能部件<sup>[1-2]</sup>。

高速电主轴各种电磁及摩擦损耗造成了其功率的大量损失,这也是其发热升温的重要因素。Bernd Bossmanns 等<sup>[3-4]</sup>建立了一种高速电主轴功率损耗产热和传热于一体的功率流模型,分析了各个损耗产热及其在电主轴内部的流动情况,计算了各个部

分的温升情况。Xu Min 等<sup>[5]</sup>根据分形理论建立基于接触热阻的磨削主轴热态模型,计算了主轴系统的温升变形情况,分析了其对加工误差的影响。Jorgenson B R<sup>[6-7]</sup>将轴承摩擦力矩分配到内外圈,并且推导出了计算模型。Hongqi Li 等<sup>[8-9]</sup>建立了高速电主轴的机热耦合模型,计算了耦合因素作用下主轴热态特性和动力学特性。Zhao Haitao 等<sup>[10]</sup>分析了主轴热态特性,根据计算结果研究了其热关键点的分布状况。

以上研究虽然都分析了主轴系统功率的损耗和热态特性,但是并没有研究各种损耗之间的关系,尤

收稿日期: 2012-09-04 修回日期: 2012-10-08

\* 国家自然科学基金资助项目(51005259)

作者简介: 陈小安,教授,博士,主要从事机电传动及智能控制研究, E-mail: xachen@cqu.edu.cn

其是对电动机损耗模型的计算更为简化,导致其热态模型的产热模型不准确。针对以上不足,本文建立一种高速电主轴功率流模型,深入讨论功率在其运转过程中的流动情况,分析各种损耗功率之间的关系,并且根据电磁理论建立电动机损耗模型。

## 1 功率流模型的建立

### 1.1 功率流模型

根据能量守恒定律,分析高速电主轴功率的输入、损耗、输出,建立功率流模型如图1所示:高速电主轴以电功率形式输入电动机定子,产生定子损耗,经过电磁转换功率流入转子,产生转子损耗的同时,主轴高速转动,由于摩擦的存在产生轴承损耗和风电阻损耗,最后以机械形式输出功率。

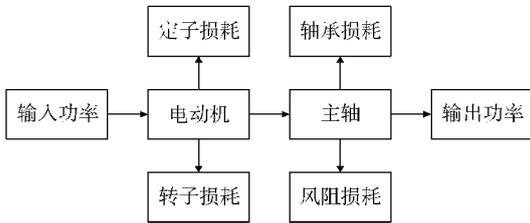


图1 功率流模型

Fig.1 Power flow model

### 1.2 电动机损耗模型

分析异步电动机的工作原理<sup>[11]</sup>,根据定转子之间的电磁转换关系,以功率流的形式建立高速电主轴电动机损耗模型,如图2所示。

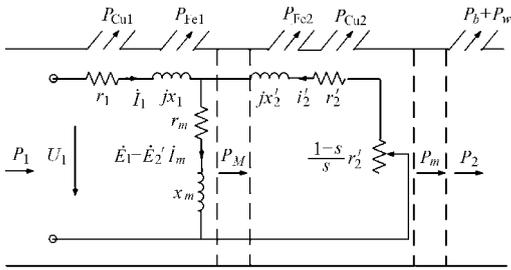


图2 电动机损耗模型

Fig.2 Loss model of motor

电动机输入功率

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos\varphi_1 \quad (1)$$

式中  $U_1$ 、 $I_1$ ——线电压、线电流  
 $\cos\varphi_1$ ——定子绕组功率因数

电动机损耗分为定子损耗和转子损耗,定子损耗  $P_S$  分为定子铜耗  $P_{Cu1}$  和定子铁耗  $P_{Fe1}$ ,有

$$\begin{cases} P_S = P_{Cu1} + P_{Fe1} \\ P_{Cu1} = 3I_1^2 r_1 \\ P_{Fe1} = 3I_m^2 r_m \end{cases} \quad (2)$$

式中  $r_1$ ——定子电阻

$I_m$ 、 $r_m$ ——励磁电流和励磁电阻

电动机电磁转换功率

$$P_M = P_1 - P_{Cu1} - P_{Fe1} \quad (3)$$

转子损耗  $P_R$  分为转子铜耗  $P_{Cu2}$  和转子铁耗  $P_{Fe2}$ ,而电动机正常运行时转差率  $s$  很低,所以  $P_{Fe2} \approx 0$ ,则

$$P_R \approx P_{Cu2} = 3I_2'^2 r_2' = sP_M \quad (4)$$

式中  $I_2'$ 、 $r_2'$ ——转子等效电流和等效电阻

电动机机械功率

$$P_m = P_M - P_{Cu2} = (1-s)P_M \quad (5)$$

轴承损耗和风电阻损耗为

$$P_b + P_w = P_m - P_2 \quad (6)$$

式中  $P_2$ ——电动机输出功率

### 1.3 轴承损耗

角接触球轴承高速运转过程中,由于润滑油粘度、滚动体与内外圈的接触压力等因素的影响,轴承产生剧烈的摩擦。因此,在考虑“热预紧”的情况下,可以把摩擦力矩分配到内外圈,钢球摩擦力矩的内外圈分量分别为<sup>[6~7]</sup>

$$M_{ij} = [0.675f_0 (\eta\omega_{rollj})^{\frac{2}{3}} D_b^3 + f_1 (Q_{ij}/Q_{imax})^{\frac{1}{3}} Q_{ij} D_b] \quad (7)$$

$$M_{ej} = [0.675f_0 (\eta\omega_{rollj})^{\frac{2}{3}} D_b^3 + f_1 (Q_{ej}/Q_{emax})^{\frac{1}{3}} Q_{ej} D_b] \quad (8)$$

式中  $f_0$ ——与轴承设计和润滑方式有关的系数

$f_1$ ——与轴承类型和所受载荷有关的系数

$\eta$ ——润滑剂的运动粘度

$\omega_{rollj}$ ——钢球公转角速度

$Q_{ij}$ 、 $Q_{ej}$ ——钢球与内、外圈接触力

$Q_{imax}$ 、 $Q_{emax}$ ——钢球与内、外圈最大接触力

$D_b$ ——钢球直径  $j$ ——钢球编号

轴承发热的另一个重要原因是钢球与内滚道接触区的自旋摩擦力矩<sup>[12]</sup>

$$M_{sij} = 3\mu_{si} Q_{ij} \zeta_{ij} \varepsilon_{ij} / 8 \quad (9)$$

式中  $\mu_{si}$ ——钢球与内滚道接触区摩擦因数

$\zeta_{ij}$ ——内滚道赫兹接触椭圆的长半轴长度

$\varepsilon_{ij}$ ——内滚道接触区第二类椭圆积分

将各种摩擦损耗平均分配到钢球和内外圈,则轴承损耗、钢球损耗、内圈损耗、外圈损耗分别为

$$P_b = \sum_{j=0}^Z (\omega_{rollj} M_{ij} + \omega_{rollj} M_{ej} + \omega_{sij} M_{sij}) \quad (10)$$

$$P_{bb} = 0.5 \sum_{j=0}^Z (\omega_{rollj} M_{ij} + \omega_{rollj} M_{ej} + \omega_{sij} M_{sij}) \quad (11)$$

$$P_{bi} = 0.5 \sum_{j=0}^Z (\omega_{rollj} M_{ij} + \omega_{sij} M_{sij}) \quad (12)$$

$$P_{be} = 0.5 \sum_{j=0}^Z \omega_{rollj} M_{ej} \quad (13)$$

式中  $\omega_{sij}$ ——钢球自旋角速度

### 1.4 风阻损耗

虽然空气粘度很小,但是由于主轴的高速旋转,定转子间隙的空气摩擦十分严重,其摩擦力矩为<sup>[4]</sup>

$$M_w = 0.5\tau^2 d_r^3 l_r \mu_{air} f_r / h_g \quad (14)$$

式中  $d_r$ ——转子直径  $l_r$ ——转子长度  
 $\mu_{air}$ ——空气动力粘度  $\tau$ ——剪切应力  
 $f_r$ ——转子转频  $h_g$ ——间隙厚度

则风阻损耗为

$$P_w = M_w \Omega_z \quad (15)$$

式中  $\Omega_z$ ——转子转动角速度

## 2 热态模型的建立

### 2.1 热态模型

一方面高速电主轴通过定子损耗、转子损耗、轴承损耗和风阻损耗产生热量,另一方面又由冷却水和空气对流散热,最终达到热平衡,其热态模型如图3所示。

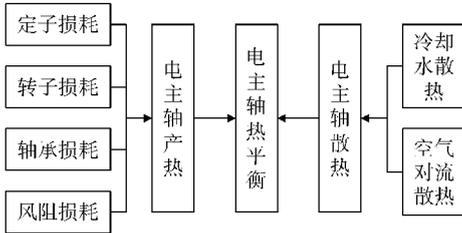


图3 高速电主轴热态模型

Fig.3 Thermal model of high-speed motorized spindles

### 2.2 瞬态热仿真单元

简化高速电主轴为轴对称结构,应用四节点轴对称瞬态传热单元对电主轴热态特性进行仿真分析<sup>[13]</sup>,单元如图4所示, $z$ 轴为对称轴。

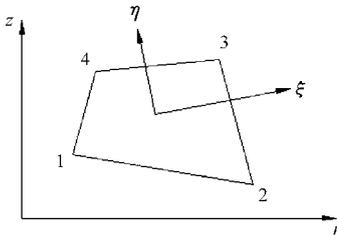


图4 热仿真单元

Fig.4 Thermal simulation element

单元瞬态传热方程为

$$C^e T'^e + K^e T^e = P^e \quad (16)$$

式中  $T^e$ 、 $T'^e$ ——单元节点温度向量和温度变化率向量

$C^e$ ——单元比热矩阵

$K^e$ ——单元传热矩阵

$P^e$ ——单元热载荷向量

### 2.3 热边界条件

高速电主轴通过冷却水和空气对流进行散热,

其热边界条件如表1所示<sup>[14]</sup>。前面3种换热系数计算之前需要计算流体努塞尔系数,而后面3种只需根据流体状态直接计算换热系数。表中  $Re$  为雷诺数; $Pr$  为普朗特数; $D$  为等效直径; $L$  为等效长度; $r_r$  为转子半径; $\lambda$  为导热系数; $u$  为平均流速; $c_0$ 、 $c_1$ 、 $c_2$  为相关系数。

表1 热边界条件

热边界条件	努塞尔系数 $Nu$	换热系数 $\alpha_c$
冷却水换热	$1.86(RePrD/L)^{1/3}$	$Nu\lambda/D$
气隙换热	$0.23(h_g/r_r)^{0.23}Re^{0.5}$	$Nu\lambda/D$
油气换热	$0.0225Re^{0.8}Pr^{0.3}$	$Nu\lambda/D$
端面换热		$28(1 + \sqrt{0.45u})$
旋转面换热		$c_0 + c_1 u^2$
外表面换热		9.7

## 3 仿真与实验

本文计算对象为2ZDG60型高速电主轴,其电动机参数和轴承参数分别如表2和表3所示。

表2 电动机参数

参数	取值	参数	取值
驱动方式	异步	额定功率/kW	6
相数	3	定子电阻/ $\Omega$	0.72
极对数	1	定子漏电抗/ $\Omega$	3.6
驱动频率/Hz	1000	转子等效电阻/ $\Omega$	0.87
绕组连接方式	Y-Y	转子漏电抗/ $\Omega$	4.3
额定电压/V	350	励磁电抗/ $\Omega$	133
额定电流/A	16		

表3 轴承参数

参数	取值	
型号	B7004C/P4Y	B7003C/P4Y
球径/mm	5	4
球数	13	13
内沟半径/mm	2.85	2.28
外沟半径/mm	2.70	2.16
内沟底直径/mm	25.98	21.98
外沟底直径/mm	36.02	30.01

### 3.1 功率流模型的验证

#### 3.1.1 电动机损耗功率

空载条件下( $P_2 = 0$ ),利用89601C1型三相高频电动机专用测试仪测量2ZDG60型高速电主轴18000、30000、36000、48000 r/min 4种转速下的输入电压、输入电流和转差率,测量数据见表4。

根据三相异步电动机空载条件下等效电路图和

表4 电动机测试数据  
Tab.4 Testing data of motor

励磁频率 $f/\text{Hz}$	300	500	600	800
输入电压 $U_1/\text{V}$	114.9	146.3	196.4	281.1
输入电流 $I_1/\text{A}$	4.041	3.463	3.532	4.007
转差率 $s$	0.0079	0.0085	0.0091	0.0133

电磁关系矢量图<sup>[11]</sup>计算电动机损耗,结果如表5所示:随着励磁频率的升高,定子铜耗随输入电流先降低再升高,定子铁耗和转子铜耗一直升高,而转差率较小,所以转子铜耗较小。

表5 电动机损耗功率  
Tab.5 Loss of motor

励磁频率 $f/\text{Hz}$	300	500	600	800
定子铜耗/W	35.27	25.90	26.95	34.68
定子铁耗/W	28.67	36.74	48.71	57.96
转子铜耗/W	0.435	1.103	1.610	4.084

### 3.1.2 轴承损耗功率

轴承损耗计算结果如图5所示:随着转速的升高,轴承损耗、内圈损耗、外圈损耗、钢球损耗均增大;由于轴承损耗模型把摩擦产热平均分配到钢球和套圈,所以钢球损耗高于套圈;高转速下,钢球的离心力作用使得钢球与外圈摩擦更为剧烈,所以外圈损耗略高于内圈。

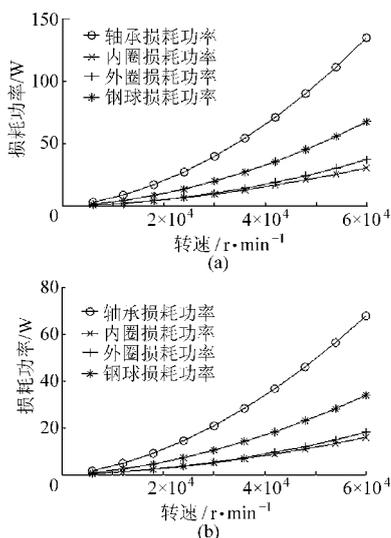


图5 轴承损耗计算结果

Fig.5 Calculated result of bearings loss

(a) B7004C/P4Y (b) B7003C/P4Y

### 3.1.3 风阻损耗功率

显而易见,风阻损耗会随着主轴转速的升高而增大,然而不同温度下的空气粘度有所不同,所以不同温度下的风阻损耗略有不同,如图6所示。

### 3.1.4 功率流模型的验证

在各种损耗计算的基础上,求其和得出2ZDG60型高速电主轴总损耗的理论值。根据

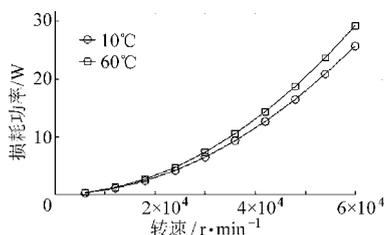


图6 风阻损耗计算结果

Fig.6 Calculated result of air loss

89601C1型三相高频电动机专用测试仪测量电主轴功率损失。损失功率理论值与实验值如表6所示,误差均在可接受范围内。

表6 总损耗功率数据对比

Tab.6 Data comparing of total power loss

励磁频率 $f/\text{Hz}$	300	500	600	800	
损耗功率/W	计算值	119.0	191.9	252.3	386.7
	测量值	127.5	202.3	268.2	400.1
误差/%	6.64	5.18	5.91	3.17	

### 3.2 温升

2ZDG60型高速电主轴工作温度为22°C,冷却水流量为1.24 L/min,油雾润滑系统的供气压力为0.26 MPa。根据各种损耗和热边界条件计算电主轴产热率和边界传热系数,应用四节点轴对称瞬态传热单元对18000、30000、36000、48000 r/min下的电主轴进行瞬态热分析。其中36000 r/min时的热仿真温度场如图7所示。

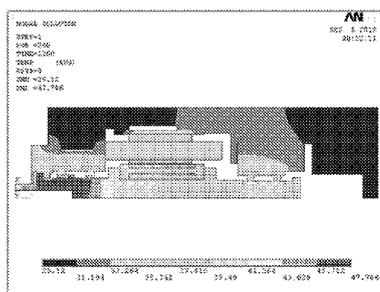


图7 温升分布

Fig.7 Distribution of temperature rise

电主轴前轴承处温度最高,主要原因是前轴承损耗功率最大;由于空载下定转子损耗功率较小,所以其温升不高;壳体前、中、后部温升较小,是因为离产热区域较远且散热条件优越。

在测量2ZDG60型高速电主轴电动机运行参数的同时,对主轴进行温升实验。采用热电偶传感器测量电主轴壳体前端、中端和后端温升,泰仕TES-1310温度仪测量前轴承外圈温升。其温升实验和仿真数据如图8所示。

由图可知,温升仿真值略高于实验值,其原因是实测损耗功率大于计算损耗功率,再加上有限元模型、热边界条件计算等误差,最终导致温升仿真值略

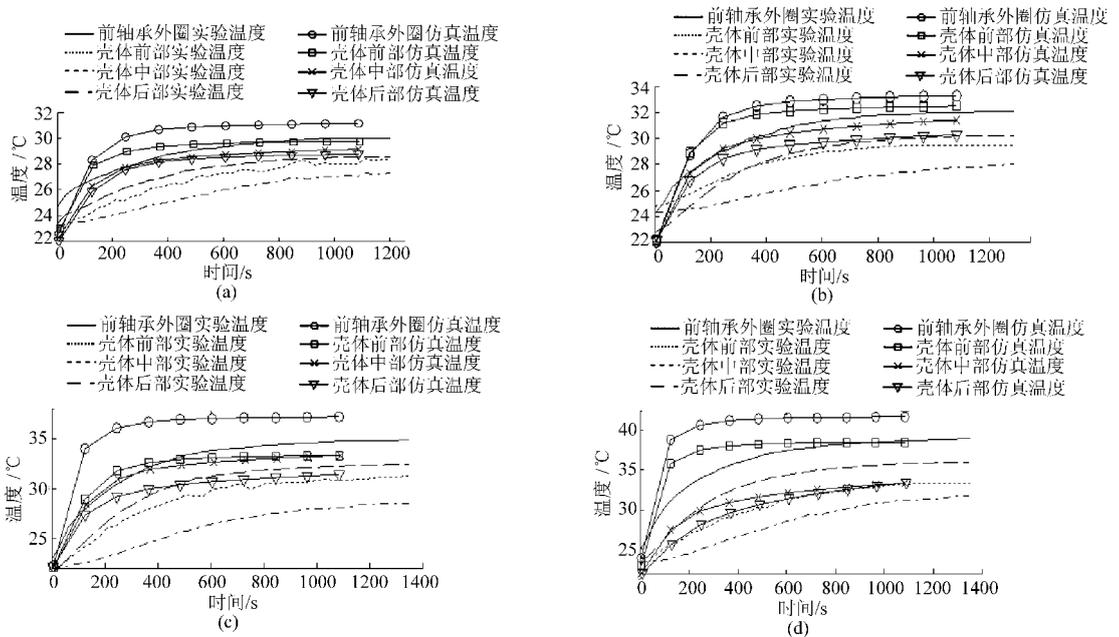


图8 温升仿真与实验曲线

Fig. 8 Simulation and testing curves of temperature rise

(a) 18 000 r/min (b) 30 000 r/min (c) 36 000 r/min (d) 48 000 r/min

高于实验值。但是,最大温升误差也在 $2^{\circ}\text{C}$ 之内,可以接受。

## 4 结论

(1)根据能量守恒定律建立了功率流模型,分析了各种损耗及其之间的关系,其理论计算结果与实验结果相比误差小,说明此模型具有客观性和准确性。

(2)电动机损耗模型根据电动机基本的电磁理论,从本质上分析电磁损耗,构成功率流模型的核心,其理论计算结果与实验结果吻合度较高。

(3)在功率流模型各种损耗计算的基础之上,应用高速电主轴热态模型分析了其温度场分布情况,其中电动机和轴承处的温升较高,且理论计算结果与实验结果高度吻合,因此应重点控制此部位温升。

## 参 考 文 献

- 1 Abele E, Altintas Y, Brecher C. Machinetool spindle units [J]. CIRP, Annals-Manufacturing Technology, 2010, 59(2): 1~22.
- 2 Jedrzejewski J, Kowal Z, Kwasny W, et al. High-speed precise machine tools spindle units improving [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 162~163: 615~621.
- 3 Bernd Bossmanns, Jay F T. A thermal model for high speed motorized spindles [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1999, 39(9):1345~1366.
- 4 Bernd Bossmanns, Jay F T. A power flow model for high speed motorized spindles—heat generation characterization [J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2001, 123(3):494~505.
- 5 Xu Min, Jiang Shuyun, Cai Ying. An improved thermal model for machine tool bearings [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47(1):53~62.
- 6 Jorgensen B R, Shin Y C. Dynamics of machine tool spindle/bearing systems under thermal growth [J]. ASME Journal of Tribology, 1997, 119(4): 875~882.
- 7 Jorgensen B R, Shin Y C. Robust modeling of high speed spindle-bearing dynamics under operating conditions [J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1998, 120(4): 387~394.
- 8 Hongqi Li, Yung C S. Integrated dynamic thermo-mechanical modeling of high speed spindles, part 1: model development [J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2004, 126(1): 148~158.
- 9 Li Hongqi, Yung C S. Integrated dynamic thermo-mechanical modeling of high speed spindles, part 2: solution procedure and validations [J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2004, 126(1): 159~168.
- 10 Zhao Haitao, Yang Jianguo, Shen Jinhua. Simulation of thermal behavior of a CNC machine tool spindle [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47(6): 1003~1010.
- 11 王正茂, 阎治安, 崔新艺, 等. 电动机学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000: 245~320.
- 12 吴玉厚. 数控机床电主轴单元技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 63~81.
- 13 伍义生, 吴永礼. 有限元方法基础教程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 359~597.
- 14 杨佐卫, 殷国富, 尚欣, 等. 高速电主轴热态特性与动力学特性耦合分析模型[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2011, 41(1): 100~105.