

本文全文线上首发由
上海电机系统节能工程技术
研究中心有限公司
支持

李广阔,冯桂宏,张炳义.
基于磁热耦合法的提花喷气织机直驱
永磁电机设计.
电机与控制应用,2022,49(1):88.

MTST系列 电机型式试验系统



MTST系列 电机型式试验系统①



MTST系列 电机型式试验系统②



MTST系列 电机型式试验系统③



MTST系列 电机型式试验系统④



MTST系列 电机型式试验系统⑤

CS-XY型电机出厂试验测试系统



DZC系列电机定子性能综合测试仪



Tz型电机堵转转矩测试仪



RZJ系列绕组匝间冲击耐电压测试仪



SEARI
上电科



地址: 上海市武宁路505号 传真: 021-62163904

电话: 021-62574990-436、18918357509

邮编: 200063

邮箱: wangcj@seari.com.cn

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 www.seari.com.cn

基于磁热耦合法的提花喷气织机直驱永磁电机设计

李广阔, 冯桂宏, 张炳义

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要: 针对传统异步电机驱动提花喷气织机传动链冗长、系统效率低、噪音大等问题, 提出一种永磁电机直驱系统。为保证布匹质量, 采用遗传算法优化转子偏心距和极弧系数, 削弱电机转矩脉动。由于提花喷气织机负载不断变化, 持续影响电机磁热性能, 提出一种瞬态磁热双向耦合逐次逼近稳态温升的计算方法。对比分析了不同功率点下电机温升分布规律及电磁性能, 得到最佳功率点。最后研制了一台 3.1 kW 的样机并进行试验, 试验数据与仿真结果基本吻合, 验证了所提的采用瞬态磁热双向耦合逐次逼近稳态温升进而选取最佳功率点的合理性, 为提花喷气织机直驱永磁电机设计提供了依据。

关键词: 提花喷气织机; 永磁电机; 转矩脉动; 瞬态磁热双向耦合; 最佳功率点

中图分类号: TM351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2022)01-0088-08

doi: 10.12177/emca.2021.161

Design of Jacquard Air Jet Loom Direct-Drive Permanent Magnet Motor Based on Magneto-Thermal Coupling Method

LI Guangkuo, FENG Guihong, ZHANG Bingyi

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: Aiming at the problems of long transmission chain, low system efficiency and high noise of traditional asynchronous motor driven jacquard air jet loom, a permanent magnet motor direct-drive system is proposed. In order to ensure the cloth quality, the genetic algorithm is used to optimize rotor eccentricity and pole arc coefficient and reduce torque ripple. Due to the continuous change of the load of jacquard air jet loom, the magneto-thermal performance of the motor is constantly affected. A calculation method of transient magneto-thermal bi-directional coupling is proposed to approach the steady-state temperature rise step by step. The temperature rise distribution law and electromagnetic performance of the motor at different power points are compared and analyzed, and the optimal power point is obtained. Finally, a 3.1 kW prototype is developed and tested, and the experimental data are basically consistent with the simulation results. The rationality of using transient magneto-thermal bi-directional coupling to approach steady-state temperature rise successively and select the optimal power point is verified, which provides a basis for the design of direct-drive permanent magnet motor in jacquard air jet loom.

Key words: jacquard air jet loom; permanent magnet motor; torque ripple; transient magneto-thermal bi-directional coupling; optimal power point

0 引言

提花喷气织机作为先进的纺织设备, 因可织

造出幅度宽、花纹复杂的织物, 在纺织行业中应用广泛。现有提花喷气织机主传动多采用单台高起
动转矩异步电机作为主电机, 经负载的传动机构

收稿日期: 2021-11-18; 收到修改稿日期: 2021-12-10

作者简介: 李广阔(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为特种电机及其控制。

冯桂宏(1963—), 女, 硕士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为特种电机及其控制。

张炳义(1954—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为特种电机及其控制。

带动织机主轴和提花机主轴旋转。其主传动存在系统效率低、传动链冗长、需定期维护等不足,不符合一体化、智能化、节能化的发展趋势。

永磁同步电机(PMSM)因具有宽运行范围、高效率 and 功率因数等优点可应用于提花喷气织机中^[1]。采用两台永磁电机分别直驱提花喷气织机两个主轴可以实现电机转矩直接作用于负载,并利用电同步方式实现两台电机的转速比例同步,大幅度精简了传统的冗长的机械传动系统。但织机和提花机负载转矩呈近似周期性变化规律,给电机的额定功率点选取带来了困难。若按照负载所需最大转矩进行电磁设计,尽管温升不会过高,但是电机体积大,转矩密度小,电机长时间工作在轻载状态,浪费材料;若按照负载所需最小负载进行设计,尽管电机体积小,转矩密度大,但是极有可能会因为长时间的过载状态而使温升大,导致电机效率低,永磁体磁性能降低等问题。因此,对于变化负载情况,通过采用有效的温升计算方法确定最佳功率点具有重要意义。

目前少有学者针对变化负载进行深入研究,且对于温升,更多的集中在某一特定负载下的稳态温升进行研究。文献[2]分析了负载变化对电机转矩脉动和铁心损耗的影响,但是并未提及对于变化负载下额定功率点如何选取。文献[3]利用场路耦合法分析了额定转速不同负载下的温升分布,但是仅仅给出了各部件最高温升的变化规律。文献[4]提出了一种V型组合极PMSM,分析了不同温度下永磁体退磁特性对电机电磁性能的影响。但是仅仅考虑了额定负载和轻载高速下的温升情况,并未涉及过载情况下永磁体磁性能对电机电磁参数的影响。文献[5-6]对一类短时高过载高功率密度PMSM的温升进行了研究,但是仅仅局限于短时工作制和短时高过载,并未涉及长时间运行在波动负载下的温升特性。

本文针对变化性负载,提出了一种瞬态磁热双向耦合逐次逼近稳态温升的计算方法。首先给出提花喷气织机永磁电机直驱系统及提花机现场实测负载情况,其次采用遗传算法削弱电机转矩脉动。在此基础上,采用瞬态磁热双向耦合逐次逼近稳态温升的方法,对比分析了2.4、3.1、3.8 kW额定功率下电机的温升分布、永磁体磁性能、动态效率及材料用量等情况,得出最佳功率

点,最后研制出一台额定功率为3.1 kW的样机进行试验验证,得出提花喷气织机直驱永磁电机设计方法。

1 无立轴传动系统及主轴转矩特性

1.1 提花喷气织机无立轴传动系统

现有提花喷气织机多采用带有刹车装置的高起动转矩三相异步电动机经皮带轮、减速齿轮带动织机主轴转动,同时,皮带轮经联轴器与锥齿轮连接,实现水平位和垂直位运动的转换,经万向节—立轴—万向节再与锥齿轮连接,将运动再转回到水平位带动提花机主轴旋转。提花喷气织机传动示意图如图1所示。

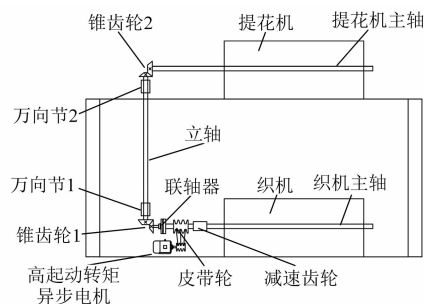


图1 提花喷气织机立轴传动系统

锥齿轮、万向节、立轴等机械传动的存在,使得系统存在噪音大、油箱漏油需定期维护等问题,且采用异步电动机驱动调速不便,效率和功率因数低。

去除冗长机械传动,分别采用两台永磁电机直驱主轴,利用电气控制实现两主轴转速比例同步,可避免上述传动带来的不足。本文所提出的无立轴直驱永磁电机传动示意图如图2所示。

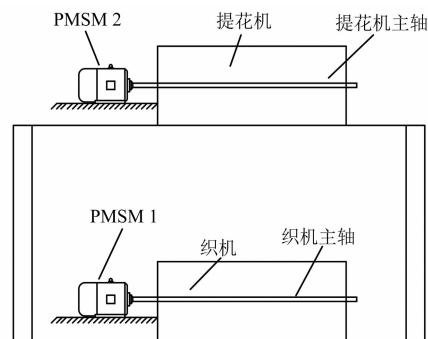


图2 提花喷气织机无立轴传动系统

1.2 主轴转矩特性

本文以提花机主轴为分析对象,从负载需求

出发进行负载特性的分析。在某纺织车间利用扭矩传感器,安装外设仪表测量主轴转矩,近似拟合成如图 3 所示的主轴转矩随时间变化曲线。

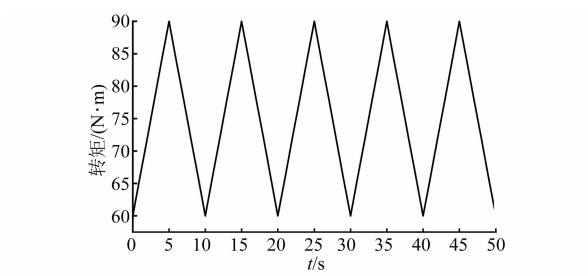


图 3 提花机主轴转矩

2 织机主轴直驱永磁电机设计

2.1 织机直轴电机主要参数

织机主轴电机年运行时间达 7 000 h 以上,这对电机的各项性能指标提出了较高的要求。电机温升过高不仅会导致永磁体退磁、加速绕组绝缘的老化^[7],还会导致车间温度过高,环境中的棉絮发生自燃。此外,电机的振动要尽可能小,振动过大会导致织出的布匹质量较差。

根据现有国产织机运行车速要求,设定额定转速为 400 r/min。由于电机频率较低,铁耗较小,本文采用热负荷衡量电机发热情况。根据转矩变化分别选取额定功率为 2.4、3.1、3.8 kW 的电机进行优化设计。为便于对比分析,各功率等级选定同一热负荷,保持转定子冲片不变,空载反电动势、磁负荷相等,只改变各自的绕组和铁心长度。基本参数如表 1 所示。

表 1 直驱永磁电机基本参数	
参数名称	参数值
额定功率/kW	2.4、3.1、3.8
极槽数	10/36
额定电压/V	380
定子内外径/mm	210/138
气隙长度/mm	0.6
冷却方式	自扇冷却

2.2 基于遗传算法的织机主轴永磁电机优化设计

为保证布匹质量,以额定功率 3.1 kW 的电机为例,采用遗传算法,以转子偏心距及极弧系数为

优化变量,以转矩脉动最小为优化目标进行优化设计。转子 1/10 拓扑结构如图 4 所示。

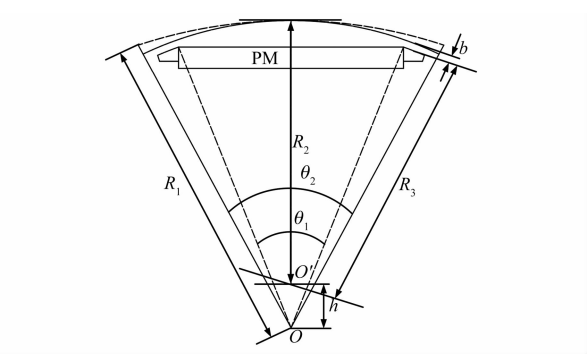


图 4 转子拓扑结构

图 4 中,OO'为转子偏心距,OO'=h;α_p为极弧系数,α_p=θ₁/θ₂;b为隔磁桥厚度,b=R₂-R₃。定义转矩脉动系数:

$$k_R = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} + T_{\min}} \times 100\% \tag{1}$$

式中:T_{max}、T_{min}分别为输出转矩的最大值和最小值。

优化变量、约束条件、目标函数如式(2)~式(4)所示:

$$\mathbf{X}^T = [h, \alpha]^T \tag{2}$$

$$\begin{cases} 0 \leq h \leq R_1 \\ 0.7 \leq b \leq 1.1 \\ 0.75 \leq \alpha_p \leq 0.88 \\ 0.9U_N \leq E_0 \leq 0.95U_N \\ 0.7 \leq B_\delta \leq 0.8 \end{cases} \tag{3}$$

$$\min f(\mathbf{X}) = k_R \tag{4}$$

式中:X为优化变量;U_N为额定相电压;E₀为空载相反电动势;B_δ为径向气隙磁密。

为验证采用遗传算法的有效性,优化前后结果对比如表 2 所示。

表 2 优化结果		
参数名称	优化前	优化后
偏心距 h/mm	0	10.43
极弧系数 α _p	0.814	0.836
空载反电动势 E ₀ /V	197.38	197.26
转矩脉动 k _R /%	4.32	2.01
输出转矩 T _N /(N·m)	74.84	74.67

由表 2 可知,在保证电机输出转矩的同时,优

化后转矩脉由 4.32% 减小到了 2.01%, 效果显著。优化前后的空载磁密云图、其中一相空载反电动势波形图、径向气隙磁密傅里叶分解、输出电磁转矩波形图如图 5~图 8 所示。由图 5~图 8 可知, 优化后, 磁密未出现饱和, 径向气隙磁密基波幅值、输出转矩基本未降低, 气隙磁密谐波畸变率大幅度降低, 从而大大削弱了转矩脉动。



图5 优化后空载磁密云图

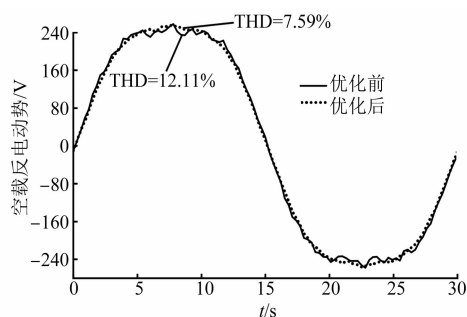


图6 优化前后空载反电势波形图

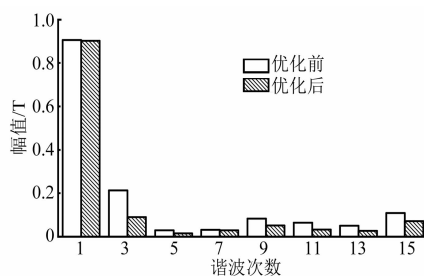


图7 优化前后径向气隙磁密谐波分布

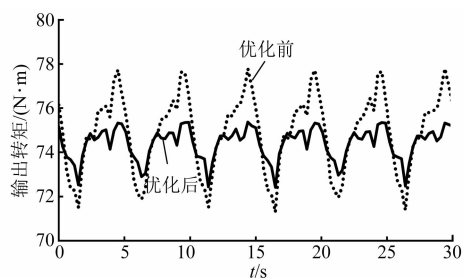


图8 优化前后输出转矩

3 基于瞬态磁热双向耦合功率点的选取

针对功率分别为 2.4、3.1、3.8 kW 的电机, 通过本文提出的瞬态磁热双向耦合逐次逼近稳态温升的计算方法对比各自温升分布规律和各自电磁性能, 最终选择最佳额定功率点。

3.1 传热理论及热源分析

3.1.1 自扇冷却方式下的内热交换理论

电机中的损耗会产生热量, 一般来说热量首先由热源内部传导到物体表面, 进而通过对流和辐射散发到周围介质中。热传导传热过程遵循式(5)规律:

$$Q = -\lambda A \frac{d\theta}{dn} \quad (5)$$

式中: Q 为热流密度; $d\theta/dn$ 为物体温度对单位向量的导数; A 为导热面积; λ 为导热系数。

采用自扇冷却方式, 由风扇带走的热量要比辐射带走的大得多^[8], 因此忽略热辐射的影响。热对流一般采用式(6)所示牛顿冷却定律^[9]进行计算:

$$Q = \alpha(\theta_1 - \theta_2) \quad (6)$$

式中: Q 为热流密度; α 为对流换热系数; θ_1 、 θ_2 分别为固体和流体的温度。

本文采用的冷却方式为自扇冷却即空气作为冷却介质, 物理特性相对比较稳定。近似认为对流换热系数仅与空气流速有关, 则当空气流速为 5~25 m/s 时满足:

$$\alpha = \alpha_0(1 + k\sqrt{v}) \quad (7)$$

式中: α_0 为发热表面在平静空气中的对流换热系数, 如电机机壳和轴承外壳取 $14.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 绕组表面取 $13.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; k 为考虑空气吹拂效率系数; v 为空气吹拂表面流速。为确定电机各元件的温度分布情况, 需要建立场方程, 对于各向同性介质, 热传导方程如式(8)所示^[10]:

$$q_v + \lambda \nabla^2 \theta = c\rho \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (8)$$

式中: q_v 为生热率; c 、 ρ 分别为材料的比热容和密度; 在直角坐标系下, $\nabla^2 \theta = \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}$ 。

通过将求解区域进行剖分, 采用等效热网络法对式(8)进行求解, 便可得到物体各个离散节

点的温度。

3.1.2 热源分析及计算

电机内部发热主要来自电机的各项损耗,准确计算各项损耗对电机温升的分析具有重要意义。

(1) 绕组的铜耗。所设计的织机主轴电机频率较低、线径小,因此可以忽略集肤效应和邻近效应的影响。对于三相供电 PMSM,绕组铜耗表达式如式(9)所示:

$$P_{Cu} = 3I_1(t)^2R_a(\theta)$$
 (9)

式中: $I_1(t)$ 为随时间变化的相电流有效值; $R_a(\theta)$ 为随温度变化的电阻。

(2) 铁心损耗。通常采用 Bertotii 公式^[11]:

$$P_{Fe} = P_h + P_c + P_e = k_h f B^\beta + k_c f^2 B^2 + k_e f^{1.5} B^{1.5}$$
 (10)

式中: P_h 、 P_c 、 P_e 分别为磁滞损耗、涡流损耗、附加损耗; k_h 、 k_c 、 k_e 分别为对应三个损耗系数; f 为铁心磁场交变频率; B 为磁密幅值; β 为磁滞损耗计算系数。

(3) 机械损耗。机械损耗包括摩擦损耗和风摩损耗,计算难度较高。织机主轴电机转速低,所产生的机械损耗很小,根据试验经验,机械损耗取额定功率的千分之五。

3.2 瞬态磁热双向耦合逼近稳态温升原理

对于图 3 所示的负载转矩波动,温度变化会对损耗带来影响,同时损耗的变化又会实时影响到温升。采用磁热单向耦合会产生较大误差^[12],因此不能用传统的仅计算额定点稳态温升来进行热分析。本文基于 MotorCad 平台的电磁热模块,在充分考虑热源分布特征的基础上,采用瞬态电磁场-温度场双向耦合逐次逼近稳态温升的方法,给出各功率等级的温升分布,瞬态磁热双向耦合逼近稳态温升计算流程图如图 9 所示。

3.3 温度场仿真模型

电机采用自扇冷却方式,各功率等级所用机座散热筋尺寸及数量、风扇尺寸及风叶数量、风罩、机壳表面流体情况等与散热相关设置均保证相同。电机三维模型如图 10 所示。电机主要导热介质材料参数如表 3 所示。

3.4 温度场仿真结果及分析

考虑到国内纺织厂大多集中在江浙地区,夏季炎热,此外车间多台织机长时间运转,设定环境

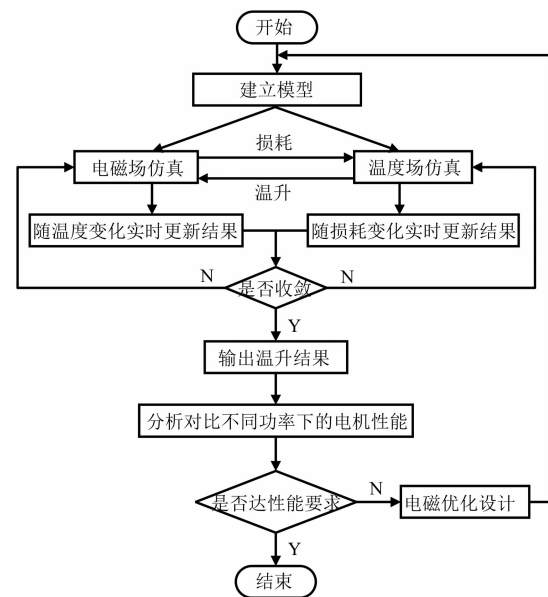


图 9 瞬态磁热双向耦合逐次逼近稳态温升计算流程图

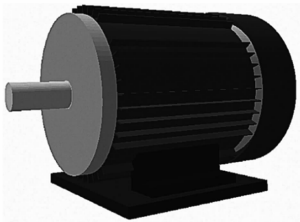


图 10 温度场仿真模型

表 3 电机主要导热介质材料参数

电机部件	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	比热容/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)
铸铁 *	52	420	7 272
定转子铁心	$\lambda_{Fe} *$	460	7 650
电枢绕组	401	385	8 933
绕组绝缘	0.21	1 700	1 400
槽楔	0.2	1 200	1 000
磁钢	7.6	460	7 500

注: * 铸铁部件包括机座、前后端盖等; ** 定转子铁心在轴向方向导热系数为 4 W/(m·K), 其他方向导热系数为 300 W/(m·K)

温度为 40 ℃。仿真时间设定为 33 000 s,绝缘等级按 F 级考核,各自功率等级对应的永磁体中心点温度如图 11 所示。

由图 11 可知,随着功率等级的增加,永磁体温度显著减小。

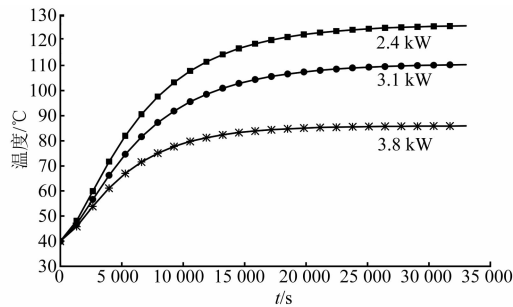


图 11 不同功率等级永磁体中点温度变化曲线

绕组是电机内部重要的发热源,选取铁心绕组中点及绕组端部某点进行瞬态温度场逐次逼近稳态温升分析,如图 12~图 13 所示,绕组温度随功率等级的增加而逐渐减小。由于绕组端部散热条件差,定子绕组的轴向温度分布呈中间低两端高分布趋势。为便于分析,达到稳态时,选取两个周期变化温度的平均值作为绕组最终的稳态温度,各自功率等级绕组稳态温度如表 4 所示。

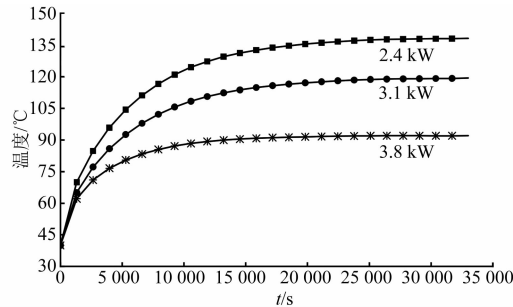


图 12 不同功率等级铁心绕组中点温度变化曲线

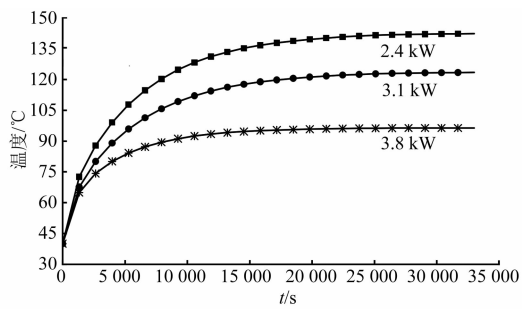


图 13 不同功率等级绕组端部某点温度变化曲线

表 4 电机主要部件导热参数

功率/kW	铁心绕组中点/℃	绕组端部某点/℃
2.4	138.23	142.45
3.1	119.33	123.53
3.8	104.17	108.49

3.5 性能对比

3.5.1 永磁体退磁情况

温度过高会使永磁体的磁性能降低,影响输出转矩的质量,严重时会发生不可逆去磁^[13]。将永磁体最终的稳态温度耦合到电磁场分析中,只考虑温度对永磁体磁性能的影响,各自功率等级对应永磁体平均磁密及最小磁密如表 5 所示。

表 5 不同功率等级稳态温度下永磁体磁密

功率/kW	平均磁密/T	最小磁密/T
2.4	0.796 9	0.594 8
3.1	0.812 0	0.605 7
3.8	0.824 4	0.623 5

由表 5 可知,按最小转矩进行电磁设计时,永磁体温度最高,导致磁性能下降,影响电机的正常运行。

3.5.2 动态效率情况

电机瞬时输入功率 $P_1(t)$ 和瞬时输出功率 $P_2(t)$ 表达式如式(11)~式(12)所示:

$$P_1(t) = u_d i_d + u_q i_q \quad (11)$$

$$P_2(t) = (T_{em} - T_0) \omega \quad (12)$$

式中: u_d 、 u_q 分别为 d 轴电压和 q 轴电压; i_d 、 i_q 分别为 d 轴电流和 q 轴电流; T_{em} 、 T_0 分别为电磁转矩和空载转矩; ω 为电机的机械角速度。

定义周期性变化负载下电机动态效率^[14]如式(13)所示:

$$\eta_d = \frac{1}{T} \sum_{t=t_1}^{t_1+T} [P_2(t) / P_1(t)] \times 100\% \quad (13)$$

式中: η_d 为动态效率; T 为负载周期; t_1 为动态效率计算初始时刻。

随着绕组温度逐渐升高,定子绕组电阻增加,使得绕组铜耗逐渐增加。实时效率随负载的变化而变化,动态效率逐渐下降,直到温度达到稳态时不再改变。稳态时的动态效率如表 6 所示。

表 6 不同功率等级动态效率

额定功率/kW	动态效率/%
2.4	89.65
3.1	90.16
3.8	90.23

由表 6 可知,按 2.4 kW 的额定功率进行电磁

设计时,绕组铜耗大且功率等级低,效率最低,按 3.1 kW 和 3.8 kW 的额定功率均达到了 90% 以上,且差别不大。

3.5.3 材料利用情况

近年来,随着电机原材料价格飞速上涨,考虑电磁性能的同时,也要着重考虑材料用量和成本。在 MATLAB 中编写材料用量程序,分别计算出各功率等级用铜量和硅钢片质量如表 7 所示。

表 7 不同功率等级材料质量

额定功率/kW	铜重/kg	硅钢片重/kg
2.4	4.925 9	25.642 0
3.1	5.808 6	31.811 6
3.8	6.535 4	38.595 5

由上述对比分析可知,以 3.8 kW 为额定功率点的永磁体磁性能好且动态效率最高,但是其用铜量和硅钢片重量分别是以 2.4 kW 为额定功率的 1.33 倍和 1.51 倍,电机转矩密度低,材料成本高;以 2.4 kW 为额定功率点材料用量最小,转矩密度高,但是因温升过高带来永磁体磁性能降低、动态效率低;以 3.1 kW 作为额定功率点材料用量适中,且永磁体磁性能好,动态效率与 3.8 kW 相差不多,满足提花喷气织机负载需求。

4 试验验证

为验证提花喷气织机主轴直驱 PMSM 设计的合理性,制作出一台 3.1 kW 样机,基于国产威衡伺服控制测试系统进行测试。测试系统包括变频馈电柜、CTB 加载电机及其驱动器、WSP 转矩转速传感器、WH6100 电机性能分析仪、WH5800 多路温度测试仪、上位机软件等。系统原理为:电力测试软件和驱动器通信控制加载,台架被测试主轴直驱电机的转速转矩信号通过 WSP 转矩转速传感器经通信接口传到 WH6100 电机性能分析仪进而传到上位机软件上。

根据 GB/T 1032—2012 的埋置检温计法测试电机的温升。考虑到内埋的便捷性,且永磁体导热性能良好,分别在绕组端部和永磁体中部放置四路温度传感器进行测试。电机测试平台如图 14 所示。

将图 3 所示数据导入到上位机软件中,测试时间与仿真时间一致。仿真与试验下的永磁体温

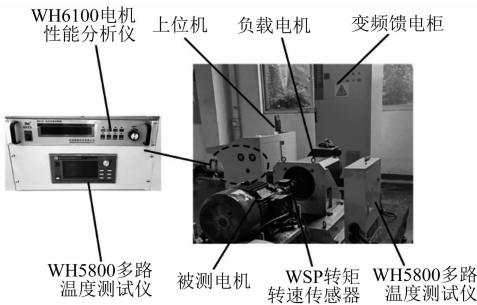


图 14 电机测试平台

升、绕组端部温升、效率和功率因数对比结果如表 8 所示。

表 8 电机试验与仿真对比

性能指标	测试值	仿真值	误差/%
绕组端部温升	85.27 K	83.50 K	2.08
永磁体温升	72.83 K	70.30 K	3.47
功率因数	0.95	0.97	2.10
转矩脉动	2.53%	2.01%	20.60
动态效率	88.68%	90.16%	1.67

由表 8 可知各项性能指标均在误差允许范围内,由于加工存在一定偏差,空载反电动势、功率因数和动态效率试验值偏低,且由于仿真时电流源激励未考虑谐波影响等因素,转矩脉动试验值相对偏高。

5 结 语

本文针对传统提花喷气织机传动采用单台大功率异步电动机经机械同步驱动,主轴存在系统效率低、“大马拉小车”、功率因数低、布匹质量差等问题,提出采用两台永磁电机直驱主轴且实现两主轴的电气同步,系统传动链缩短,整体效率高,便于不同花型织造的控制。对提花龙头主轴转矩特性进行现场测试,转矩存在实时波动。针对此类负载,给出电磁设计及温升校核的一般性方法。经仿真计算和试验验证得出以下结论:

(1) 考虑电机振动过大会导致织出布匹的质量差,采用遗传算法对转矩脉动进行削弱,仿真结果表明,采用合理的转子偏心距和极弧系数可以大大削弱转矩脉动,从而减小振动。

(2) 针对波动性负载,基于瞬态磁热双向耦合逐次逼近稳态温升方法,分别对不同转矩点的

电磁方案进行温度场分析。结果表明,按照最小转矩进行电磁设计,电机长时间运行在过载状态,发热严重,动态效率低;按照最大转矩进行电磁设计,尽管发热程度最低,但是材料用量过大,电机大部分运行在轻载状态;基于中间转矩且留有一定裕度下的电磁性能良好,发热程度适中,适用于负载呈波动规律下电磁方案的校核。

【参考文献】

- [1] 顾溶时. 交流永磁同步电动机在纺织机械中的应用[J]. 电世界, 2000, 41(1): 6.
- [2] 杨江飞, 管华, 杨春华, 等. 负载变化对永磁同步电机性能的影响分析[J]. 电气工程学报, 2018, 13(9): 20.
- [3] 祝天利, 韩雪岩, 朱龙飞. 基于场路耦合的机器人永磁电动机损耗及其温升分析[J]. 电气技术, 2020, 21(6): 7.
- [4] WANG M, ZHU H, ZHOU C, et al. Analysis and optimization of a V-shape combined pole interior permanent magnet synchronous machine with temperature rise and demagnetization considered[J]. IEEE Access, 2021, 9: 64761.
- [5] 李立毅, 张江鹏, 赵国平, 等. 考虑极限热负荷下高过载永磁同步电机的研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 845.
- [6] 刘毓希, 李立毅, 曹继伟, 等. 短时高过载永磁同步电机电磁热研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(11): 2296.
- [7] CHU S, LIANG D, JIA S, et al. Research and analysis on design characteristics of high temperature and high-speed permanent magnet motor[C]//2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2020.
- [8] 陈世坤. 电机设计(下册)[M]. 北京:机械工业出版社, 1982.
- [9] PARK J B, MOOSAVI M, TOLIJAT H A. Electromagnetic thermal coupled analysis method for interior PMSM[C]//2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2015.
- [10] 胡田, 唐任远, 李岩, 等. 永磁风力发电机三维温度场计算及分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 122.
- [11] 冯威, 杨松, 张炳义. 高温超细长潜油永磁电机温升研究[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(2): 50.
- [12] 韩雪岩, 宋聪. 基于磁热耦合法车用永磁同步电机温升计算及影响因素的研究[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(2): 28.
- [13] 孔汉, 刘景林. 单相匝间短路对永磁电机损耗及温度分布的影响研究[J]. 微特电机, 2015, 43(7): 30.
- [14] 马雷, 姚守猷, 曹志彤. 周期性负载下永磁同步电动机动态效率分析[J]. 中小型电机, 1993(6): 3.

(上接第 79 页)

- [9] 闻邦椿. 高等转子动力学: 理论、技术与应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2000.
- [10] 韦福东, 李光耀, 姚丙雷, 等. 大中型高压高速电动机转轴静力学仿真分析[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(7): 62.
- [11] 王龙华. 直驱潜油螺杆泵用永磁同步电动机关键结构设计[D]. 青岛:中国石油大学, 2014.
- [12] 刘伟. 350 kW 高速永磁同步发电机的设计[D]. 长沙:湖南大学, 2014.
- [13] 王天煜. 高速永磁电机转子综合设计方法及动力学特性的研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2010.
- [14] 王秀和. 永磁电机[M]. 2 版. 北京:中国电力出版社, 2011.
- [15] 陈世坤. 电机设计[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社, 2017.
- [16] 闻邦椿. 机械设计手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.
- [17] 闵行, 刘书静, 诸文俊. 材料力学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2009.
- [18] 赖文海, 黄开胜, 杨国龙, 等. 电机气隙磁场谐波分析程序设计[J]. 微电机, 2015, 48(11): 21.