

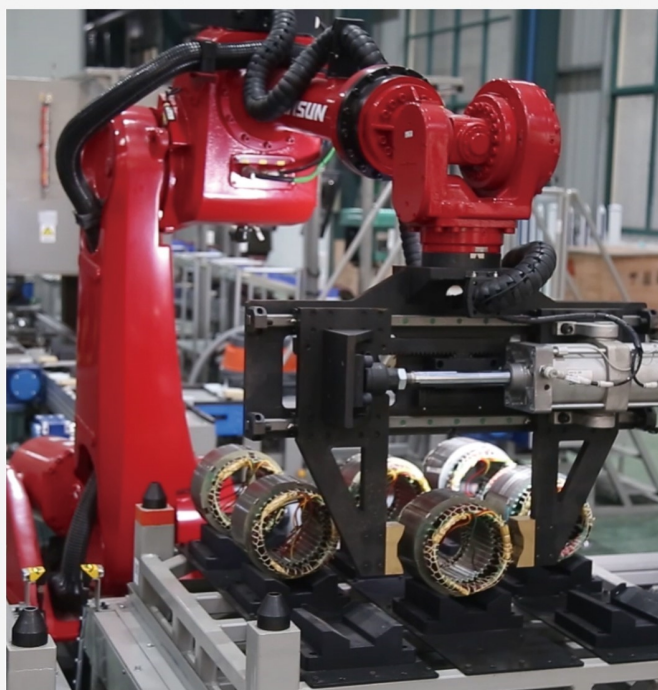
本文全文线上首发由
上海电器科学研究所
(集团) 有限公司
支持

王浩潇, 韩雪岩, 马鑫, 宁杰.
起重机驱动装置冷却结构设计及温升
运行特性分析.
电机与控制应用, 2021, 48(11): 51.



中国智能制造系统解决方案供应商联盟 (成员)
上海智能制造系统解决方案供应商 (首批)

电机 · 智能制造



咨询服务

规划设计

设计制造

信息化系统

项目实施



扫码联系
我们

联系人: 黄先锋 手机: 13501892388
上海电器科学研究所 (集团) 有限公司
上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司
上海市武宁路505号9号楼6层

起重机驱动装置冷却结构设计及温升运行特性分析

王浩潇, 韩雪岩, 马鑫, 宁杰

(沈阳工业大学 国家稀土永磁电机工程技术中心, 辽宁 沈阳 110870)

摘要: 起重机用新型驱动装置采用外转子结构, 且相对于传统起升机构的一体化程度更高, 易造成定子绕组散热困难。有别于传统电机设备的断续工作制, 对温升计算提出了新的问题。根据设备特点, 设计空心轴风冷的冷却结构。基于流体力学和传热学基本原理, 建立流固耦合数学模型。以一台额定功率为 90 kW 的驱动装置为例, 通过计算流体力学软件及其嵌入的自定义函数, 依据传统起重机械设计要求的机构工作级别和极限操作工况, 进行编程及模拟仿真。将温升计算结果与同等条件下试验数据进行对比, 验证计算方法的科学性, 并分析冷却机构的合理性, 最终结果为后续起重机驱动装置的散热研究提供参考依据。

关键词: 起重机机构; 流固耦合; 空心轴风冷; 温度场计算; 断续工作制

中图分类号: TM 303 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)11-0051-07

doi: 10.12177/emca.2021.110

Design of Cooling Structure and Analysis of Temperature Rise Operation Characteristics of Crane Driving Device

WANG Haoxiao, HAN Xueyan, MA Xin, NING Jie

(National Engineering Research Center for Rare-Earth Permanent Magnetic Machines,
Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: Because the new drive device for the crane has an outer rotor structure and is more integrated than the traditional hoisting mechanism, it is easy to cause difficulty in dissipating heat from the stator winding. It is different from the intermittent working system of traditional electrical equipment, which puts forward a new problem for the calculation of temperature rise. According to the characteristics of the equipment, the air cooling structure of hollow shaft is designed. Based on the basic principles of fluid mechanics and heat transfer, a mathematical model of fluid-structure coupling is established. Taking a 90 kW rated power drive device as an example, using the computational fluid dynamics (CFD) software and its embedded user-defined function, according to the mechanism working level and limit operation conditions required by the traditional crane design, programming and simulation are carried out. The temperature rise calculation results are compared with the experimental data under the same conditions to verify the scientificity of the calculation method, and the rationality of the cooling structure is analyzed. The final conclusion provides a reference for the follow-up research on the heat dissipation of crane drive devices.

Key words: mechanism of crane; fluid-structure coupling; air cooling of hollow shaft; temperature field calculation; intermittent duty

收稿日期: 2021-09-07; 收到修改稿日期: 2021-09-28

作者简介: 王浩潇(1986—), 男, 硕士, 研究方向为特种电机及其控制。

韩雪岩(1979—), 女, 博士, 教授, 研究方向为特种电机及其控制。

马鑫(1981—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为特种电机及其控制。

0 引言

传统起重机起升机构的电动驱动装置通常由减速器、制动器、联轴器、电动机、卷筒等组成。为了应对不同重量的货物可能还设有主、副钩起升机构,需配备两套不同容量的传动装置,使得结构更为复杂。本文研究的适用于起重机的新型驱动装置采用了外转子低速大转矩永磁同步电机(PMSM)直驱的方式。直驱的结构省去了减速机、联轴器等部件,减少了连接部件以及传动路线上的机械损耗,提高了传动效率。永磁电机本身具备体积小、质量轻、运行可靠等优点。本驱动装置还实施了外转子与卷筒一体化的设计,利用变频调速功能应对不同重量的起升,比传统结构做到了极大的简化^[1]。

新型驱动装置,即卷筒一体化电机,在提升重物时,PMSM 负载大,电流大,所产生的铜耗就会很大。而电机为外转子结构,定子区域被气隙隔开,气隙热阻较大,热量不能很好地散出。起重机频繁起停的特点也有别于其他设备。

对于起重机新型驱动装置温度场和散热结构设计,文献[2]对一台 9.76 kW 小功率起重机用 PMSM 冷却系统进行了设计及优化,对比了空心轴冷却方式和由端盖引风在定子轴向设冷却风道的冷却结果,认为后一种冷却方式较为理想。文献[3]基于 Fluent 软件,针对 S3 电机工作制,采用加载时变热源的方式,对起重机用外转子永磁电机进行了三维瞬态温度场数值计算与分析,通过与试验结果对比证明此方法较为准确。文献[4]采用热网络法对外转子电机温升进行了瞬态计算,编程的方法在计算速率上较快,但相对于有限体积法等方法存在一定误差。

本文基于流固耦合和传热学理论模型,利用 Fluent 仿真软件对起重机用卷筒一体化电机进行瞬态温度场仿真分析。通过软件的三维瞬态温度场计算具有一定的准确性^[5],通过仿真结果与样机试验的对比加以证明。本计算针对大功率卷筒一体化电机,结合起重机设计标准和永磁电机的特点以及绝缘等级的要求设计冷却结构,并分析其在各工况下的温升情况及适用性。

1 起重机运行特点及电机物理模型

根据起重机设计手册^[6],机构工作级别是设

计起重机结构的基础,卷筒一体化电机作为起重机执行机构首先应满足基本设计要求。表明机构运行时长的机构利用等级设置为 $T_0 \sim T_9$,如表 1 所示。表明结构受载情况的载荷状态设置为 $L_1 \sim L_4$,如图 1 所示,横坐标为机构在每 100 min 内不同载荷下的使用时间,纵坐标为负载率。

表 1 机构利用等级

利用等级	总使用时间/h	平均每天运转小时数/h
T_0	200	
T_1	400	
T_2	800	
T_3	1 600	
T_4	3 200	0.64
T_5	6 300	1.28
T_6	12 500	2.56
T_7	25 000	5.12
T_8	50 000	10.24
T_9	100 000	20.48

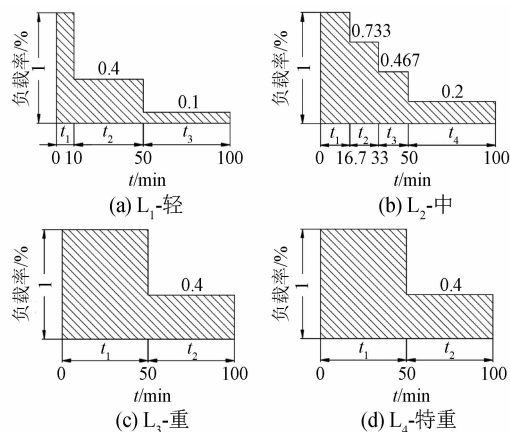


图 1 典型载荷图

其中由载荷状态 $L_1 \sim L_4$ 与机构利用等级 $T_0 \sim T_9$ 组合成机构工作级别 $M_1 \sim M_8$ 。 M_8 为机构工作最高级别,对应组合 $L_1 T_9$ 、 $L_2 T_8$ 、 $L_3 T_7$ 、 $L_4 T_6$ 。

卷筒一体化电机为细长型结构,设备两端支撑固定,一侧装有编码器,另一侧端盖设为制动盘,外转子作为卷筒使用,永磁体粘贴在卷筒内壁,其结构及详细尺寸如图 2 及表 2 所示。

2 流体场温度场数学模型

2.1 流体场及温度场数学模型

在求解卷筒一体化电机冷却系统流体流动时需利用到流体质量守恒方程:

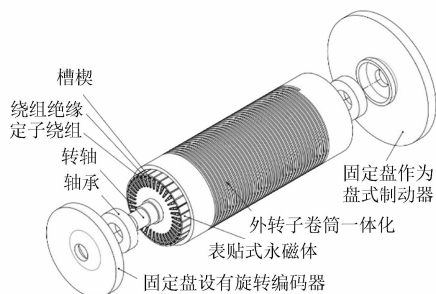


图2 卷筒一体化电机爆炸图

表2 样机尺寸参数

参数名称	参数值
额定功率/kW	90
额定电压/V	380
额定转速/(r·min ⁻¹)	12.8
极数	30
槽数	36
额定转矩/(N·m)	67 143
定子外径/mm	688.4
定子内径/mm	430
轴向长度/mm	1 850
转子外径/mm	800
转子内径/mm	720
气隙长度/mm	1.8
永磁体宽度/mm	62
永磁体磁化方向长度/mm	14

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} = \rho F + \nabla p + \frac{\mu}{3} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度; $\mathbf{u}$ 为流体的速度矢量。

在处理流体黏性作用时要满足动量守恒方程。

X 方向动量守恒方程为

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \nabla(\rho u_x \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (2)$$

Y 方向动量守恒方程为

$$\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t} + \nabla(\rho u_y \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (3)$$

Z 方向动量守恒方程为

$$\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t} + \nabla(\rho u_z \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (4)$$

式中: p 为流体单元上所受的压强; τ_{xx} 、 τ_{yx} 、 τ_{zx} 、 τ_{xy} 、 τ_{yy} 、 τ_{zy} 、 τ_{xz} 、 τ_{yz} 、 τ_{zz} 为流体单元的剪应力分量; f_x 、 f_y 、 f_z 为流体单元在 x 、 y 、 z 方向所受的单位质量力。

电机内部热交换需要满足能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v h)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w h)}{\partial z} = -P \operatorname{div} \mathbf{U} + \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + \Phi + S_h \quad (5)$$

式中: u 、 v 、 w 分别为流体的速度分量; h 为流体的比焓; T 为流体温度; λ 为导热系数; S_h 为流体的内热源; Φ 为由于黏性作用机械能转化为热能的部分。

流固耦合热传导瞬态方程:

$$\lambda_x \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q = c_y \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (6)$$

式中: λ_x 、 λ_y 、 λ_z 分别为电机导热介质在 x 、 y 、 z 方向的导热系数; q 为流体温度。

2.2 标准 k - ε 紊流数学模型

由于卷筒一体化电机内流体雷诺数较大,属于紊流状态。因此采用标准 k - ε 紊流数学模型,其控制方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon (C_{\varepsilon 1} G_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon)}{k} \end{cases} \quad (7)$$

式中: k 为脉动动能,即 k 方程; ε 为能量耗散率,即 ε 方程; G_k 为紊流产生率; $\mathbf{u}$ 为流体的速度矢量; ρ 为流体密度; μ_i 为紊流黏性系数; $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 为常量; σ_k 、 σ_ε 为紊流普朗克常数。

3 驱动装置冷却结构设计

卷筒一体化电机绕组温升按 F 绝缘考核^[6],根据机构工作级别,分别对 4 种载荷状态的最高

级别 M8 进行温升瞬态仿真,得出在最大载荷状态下的最优冷却方案。

由于起重机应用环境复杂多变,对于密闭性有一定要求,考虑电机定子绕组为主要发热源且靠近电机轴侧,采用如图 3 的空心轴冷却结构。

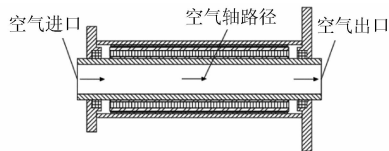


图 3 空心轴冷却结构图

对于外转子电机,轴向风冷效果较好^[7],在轴内开孔工艺上相对简单且不破坏电机主体结构及封闭性,封闭式风冷结构能有效地解决灰尘问题,并减小风扇噪声^[8]。电机转速为 12.8 r/min。数值较低,对转轴通风影响较小,本文针对空心轴风冷冷却方式的考虑,忽略了转轴的转动影响。本电机转轴轴径较大,设计空心轴冷却时,可开取较大孔径,适合配轴流风机强制风冷保证一定的风量来提高冷却效果。

保证电机高效运行,需要合理设计通风结构尺寸。通过 Fluent 软件对空心轴流体进行仿真,对不同流速及空心轴孔径进行比较,确定适用的冷却结构条件。

图 4 所示为 3 种流速下不同空心轴管径的阻力值,可见所选管径在 310 mm 时阻力值最低,相对流体流动效率较高。

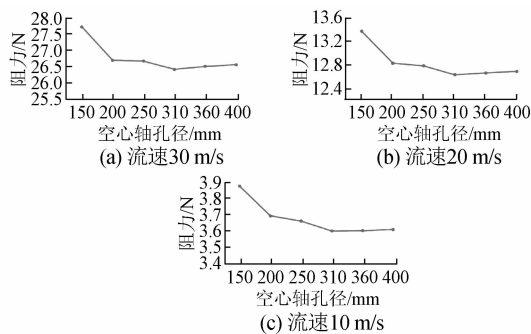


图 4 空气流速与空心轴管径关系图

选定空心轴孔径为 310 mm,计算在统一管径相同流速下的阻力值,如图 5 所示。空心轴轴孔通入气体后,流体流阻随流速增加而增大。在温度场仿真计算时,按达到绝缘等级要求为条件选取最适流速。

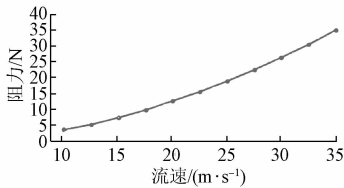


图 5 空心轴内流体流速与流阻关系图

4 样机温升试验及温度场计算

4.1 温升试验与仿真结果对比分析

对卷筒一体化电机样机进行试验,采用自动控制平台,只要将电机固定好,就可以对电机进行空载、负载试验,避免了人为误差对试验结果的影响,提高了试验结果的准确性。图 6 为试验平台实物图。测试当日室温 29 ℃,在样机电枢绕组表面预埋温度传感器测量绕组温度,仿真数值与测试点保持一致。电机的热试验,按照 S3-30% 工作制进行,设备运行时间为 450 min,在自然风冷条件下进行。按相同条件通过软件进行仿真计算,将测得试验所得数据与仿真数据进行比较分析。图 7 为通过软件进行瞬态仿真的绕组最大温升点曲线图,图 8 为试验实测数据曲线,表 3 为两者的温升值比较。

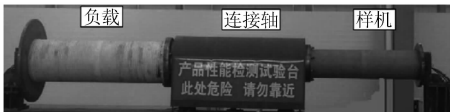


图 6 样机系统热试验实物图

表 3 温升值比较

运行时间/min	试验温升/K	仿真温升/K	误差/%
50	14.9	16.3	9.40
100	27.4	29.8	8.76
150	39.5	35.7	9.62
200	51.5	54.4	5.63
250	63.2	64.1	1.42
300	74.8	72.9	2.54
350	86.2	80.8	6.26
400	97.4	88.1	9.55
450	104.0	94.7	8.94

由表 3 中数据可知,在无冷却散热系统下,有限体积法温度场仿真温升值与试验温升值误差小

于 10%, 瞬态场温升仿真曲线与试验实测温升曲线趋势基本相同, 证明了温度场有限体积法的科学性。但在运行至 450 min 后, 绕组温升已接近绝缘等级的要求, 因此在确定算法有效性的前提下, 考虑设备的长期运行, 对增加空心轴冷却的情况进行仿真计算, 设计适用于系统的合理冷却结构。

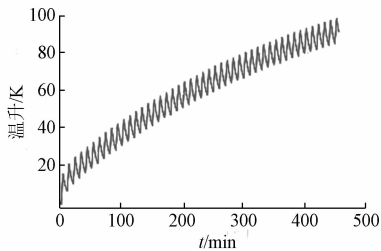


图 7 S3-30%工作制 450 min 绕组最大温升曲线图

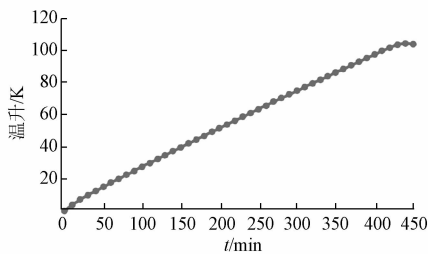


图 8 样机实测绕组最大温升曲线图

4.2 热源的确定

现代大中型电机的温度场计算中, 多认为电机热源是恒定的, 未考虑电机特殊工作制的影响、受材料特性的影响, 起重机用永磁电机中的各种损耗在电机运行过程中是时刻变化的^[9]; 在暂态计算中一般未考虑热源的时变效应^[10]。卷筒一体化电机中铜耗要远大于铁耗, 几乎是电机的主要损耗。为了简化计算, 在起重机用永磁电机瞬态热计算中忽略其他损耗的时变效应, 即不考虑温度变化引起的电机电磁性能及热源的变化, 只考虑起重机用驱动装置绕组铜耗的时变效应。

4.3 温度场仿真计算分析

由于起重机是断续工作制运行方式, 在仿真计算时需要加载时变热源, Fluent 的用户自定义功能(UDF)可以较好处理温升计算中自定义函数的问题, 根据所需的运行时间加载时变热源的条件进行编程, 再由软件加载后计算。

对起重机 4 种 M8 工作级别进行瞬态温升计算, 比较选出温升变化最高的一组, 对其进行后续

计算, 以证明冷却系统的适用性。

对 4 种工作级别都采用 300 min 模拟计算, 对于载荷状态的处理, 根据图 1 所示, 结合实际工况, 考虑载荷均匀分布, 取每 100 min 为一个载荷变化周期。机构利用等级, 参照电机 S3 断续工作制每 10 min 为一个变化周期, 对于 $T_6 \sim T_9$ 分别取负载持续率为 10%、20%、40%、80%, 进行近似计算。

冷却结构优先选取空心轴风冷, 空心孔径选取为 310 mm, 入口设轴向风机鼓风。在风冷系统中, 冷却介质空气的流速是影响冷却效果的一个重要因素, 经过分析, 初选取进口风速为 30 m/s, 进口风量为 7 884 m³/h, 进口压力约 217 Pa。按以上条件进行 Fluent 仿真计算。计算结果如图 9 及表 4 所示。

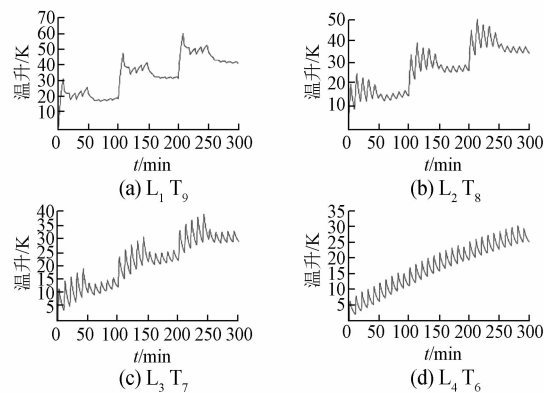


图 9 起重机 4 种工作级别瞬态温升曲线

表 4 300 min 瞬态计算绕组最大温升

机构利用等级	绕组温升/K
L ₁ T ₉	60
L ₂ T ₈	50
L ₃ T ₇	39
L ₄ T ₆	31

由表 4 可知, 绕组最大温升出现在 L₁ T₉ 时所对应的 M8 工作级别, 分别取空气流为 10、20、30 m/s 对其进行 24 h 瞬态温升计算。其结果如图 10 及表 5 所示。

在最大流速为 30 m/s 时, 绕组最大温升为 98.4 K, 温升小于 100 K, 符合 F 绝缘等级标准, 其他部件温升均小于此标准, 永磁体温度小于退磁温度。随着流速的增加, 流体流阻变大, 冷却效率低, 相对于 20 m/s 时冷却效果提升较小。在

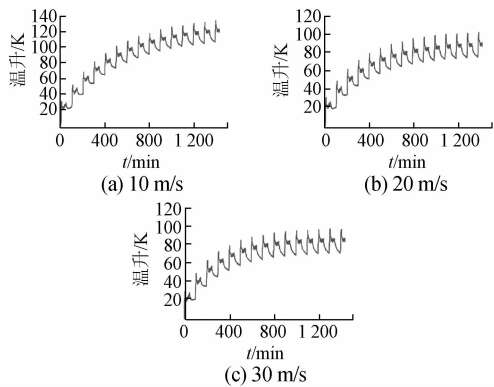


图 10 L₁ T₉工作级别 24 h 绕组最大温升曲线

表 5 24 h 瞬态计算各部件最大温升

空气流速/ (m·s ⁻¹)	绕组温 升/K	永磁体温 升/K	外转子温 升/K
10	133.8	89.4	87.5
20	102.6	72.9	71.4
30	98.4	65.9	64.8

30 m/s 时 Fluent 仿真各部件温升分布及流体状态如图 11 所示。

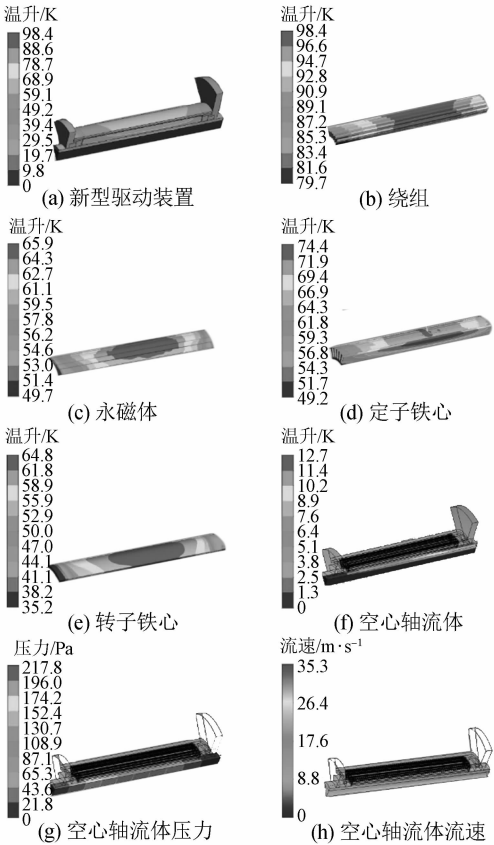


图 11 L₁ T₉工作级别各部件 24 h 最大温升与流体场仿真结果图

4.4 温升运行特性分析

根据起重机机构不同的工作等级,分析卷筒一体化电机温升受不同利用等级及载荷状态影响的趋势。在冷却条件不变的情况下,L₁ 轻载时,利用等级 T₆~T₉ 时温升变化如图 12、图 13 所示。

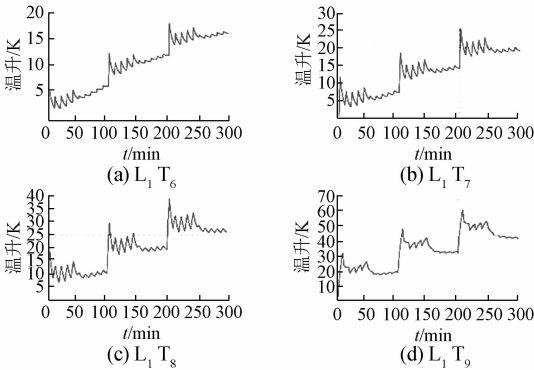


图 12 L₁ 载荷不同利用等级 300 min 绕组最大温升点曲线

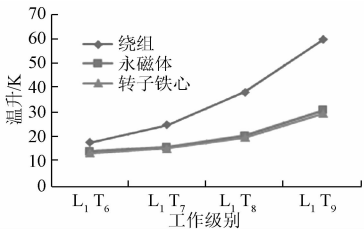


图 13 L₁ 载荷不同利用等级 300 min 主要部件温升对比

利用等级为 T₆ 时,不同载荷下的温升状态变化如图 14、图 15 所示。

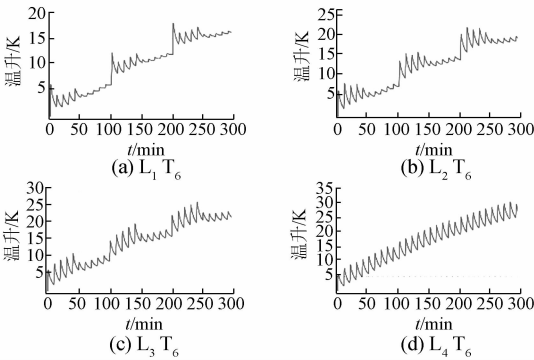


图 14 T₆ 利用等级不同载荷 300 min 绕组最大温升点曲线

电机温升随利用等级和载荷状态的提高都有一定的增加,而利用等级对温升影响更大,尤其对于绕组处温升。永磁体及转子铁心由于温升相对较小变化较不明显。

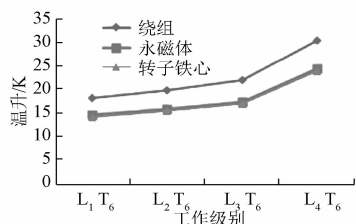


图 15 T_6 利用等级不同载荷 300 min 绕组最大温升点曲线

4.5 驱动装置极限运行温升分析

起重机设计手册主要针对驱动机构是传统异步电机的形式,本文所讨论的是以具有更强性能的永磁电机作为驱动主体的装置,而且起重机在实际使用当中难免会出现连续大负荷运行的情况,这时需要考虑在极端情况下起重机驱动装置适用的冷却方式。

依然采用空心轴通入空气的强制风冷方式,进口风速、风量、压力与上文条件保持一致,对新型驱动装置按满载状态下连续运行方式进行仿真。结果如图 16 所示。

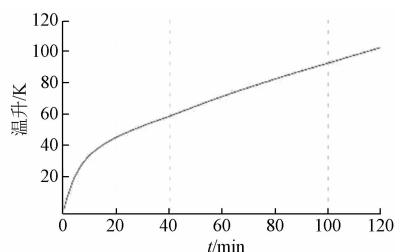


图 16 满载连续运行时绕组最大温升点曲线

驱动装置在连续工作至接近 120 min 时绕组最大温升已经超过 F 绝缘所要求的 100 K。其结果说明空心轴风冷结构可短时运行在满负荷连续工作制下,但是仍无法处理极端适用情况,所以此时需要考虑冷却效果更好的水冷方式。

5 结 语

本文根据起重机机构的运行特性,基于 Fluent 流体场仿真软件对一台 90 kW 起重机新型驱动装置进行仿真分析,设计不同散热结构,分析研究不同结构以及不同运行方式对冷却效果的影响。得出结论如下:

(1) 按照传统起重机配异步电机设计要求,根据机构工作级别,选取空心轴冷却方式进行结构设计及仿真计算,其温升值满足起重设备 F 级绝缘要求。

(2) 考虑以 PMSM 为核心组成的新型驱动装置相对于传统起重装备在性能优化上的提升,对其进行极限工作制仿真,得出空心轴风冷方式在 F 绝缘等级要求下可执行的最大工作时间为 120 min,且不适用于长期连续工作。

(3) 根据对温升运行特性的比较计算,起重机利用等级相对于载荷对于绕组最大温升值的影响更大。

(4) 通过有限体积法温度场仿真得到设备在 S3-30% 断续工作制、空心轴自然风冷状态下运行 450 min 多个时刻温升值,与实际样机试验温升值相比较,误差均小于 10%,证明有限体积法计算的准确性。

【参考文献】

- [1] 马鑫,韩雪岩,贾建国,等. 桥式起重机用细长型外转子永磁电机的研究设计[J]. 电工技术学报, 2015,30(14):511.
- [2] 韩雪岩,祁坤. 特殊结构起重机用 PMSM 冷却系统的优化[J]. 起重运输机械, 2015,4(1):1.
- [3] 韩雪岩,祁坤,段庆亮. 起重机用外转子 PMSM 全域三维瞬态温度场数值计算与分析[J]. 电机与控制学报, 2015,19(5):44.
- [4] 于占洋,韩雪岩,何心永. 基于瞬态热网络法的细长型永磁电机优化设计研究[J]. 大电机技术, 2018,4(1):23.
- [5] 谢颖,郭金鹏,单雪婷,等. 油田抽油机用感应电动机三维瞬态温度场计算分析[J]. 电机与控制学报, 2019,23(10):59.
- [6] 张质文. 起重机设计手册[M]. 北京:中国铁道出版社, 1998: 19.
- [7] YANG K, FENG Y J. Design of novel spiral magnetic poles and axial-cooling structure of outer-rotor PM torque motor [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2010, 20(3):838.
- [8] MIZUNO S, SHINICHI N, MAKOTO M, et al. Development of a totally enclosed fan-cooled traction motor [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013,49(4):1508.
- [9] JAWAD F, BABAK G, CHRISTIAN E C, et al. Temperature rise analysis of switched reluctance motors due to electromagnetic losses [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009,45(7):2927.
- [10] 付兴贺,林明耀,徐姐,等. 永磁感应子式混合励磁发电机三维暂态温度场的计算与分析[J]. 电工技术学报, 2013,28(3):107.