

大型高效电动机冷却器弧板结构对 冷却器综合性能的影响

向善海, 唐 跃, 崔 伟, 陈 华

(湘潭电机股份有限公司, 湖南 湘潭 411101)

摘 要: 为了研究空冷电机弧板结构对冷却器综合性能的影响, 依据计算流体力学与数值传热学理论, 以一台 YXKK710-4, 4 000 kW 大型高效异步电动机为参考样机, 建立了冷却器的物理模型和数学模型, 给出相应的基本假设和边界条件, 并进行耦合场数值计算和分析; 在保证弧板区域轴向长度不变的前提下, 对冷却器弧板结构进行了优化计算, 优化后的弧板区域涡流明显减少, 同时冷却性能有所提高; 以此作为依据重新生产制造了一台冷却器, 测量得到了额定状态下新旧结构冷却器各自的流量, 并对新旧结构冷却器各冷却管的流量分配进行了测量和细致分析; 测量了冷却器内外风路各出口处的温度, 并和数值计算结果进行了对比. 实验证明优化弧板结构后的冷却器综合性能更好, 研究结果为高效电动机的优化设计提供了理论依据和新方法.

关键词: 高效异步电动机; 耦合场; 冷却器; 流量分配; 优化设计

中图分类号: TM 301.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2014)01-0079-06

Influence of Arc Board Structure of Cooler on Overall Performance of Cooler of Large Efficient Motor

XIANG Shan-hai, TANG Yue, CUI Wei, CHEN Hua

(Xiangtan Electric Manufacturing Co. LTD, Xiangtan 411101, China)

Abstract: In order to study the influence of arc board structure on overall performance of cooler of air cooler motor, according to the theory of Computational Fluid Dynamic (CFD) and Numerical Heat Transfer (NHT), a YX-KK710-4, 4 000 kW large efficient asynchronous motor was taken as an example. The physical and mathematical model of cooler were created, and basic assumptions and boundary conditions were determined. The coupled field of cooler was calculated and analyzed. Based on the length of the arc board region as a constant, the flow shows that the vortex become less obvious than the original cooler's, and the cooling performance was enhanced. A new cooler was manufactured according to the numerical result, the rated volume flow of original cooler and new cooler were measured, then the flow distribution of all cooling pipes was measured and analyzed carefully. The temperature of every outlet of cooler was measured and compared with the result of numerical calculation. The experiments shows that the new cooler has a better overall performance, and it can provide theoretical basis and new method for optimization design of efficient motor.

Key words: efficient asynchronous motor; coupled field; cooler; flow distribution; optimization design

收稿日期: 2013-08-24

作者简介: 向善海(1976—), 男, 工程师;

崔 伟(1982—), 男, 工程师.

通讯作者: 唐 跃(1987—), 男, 硕士, E-mail: tangyue@126.com.

0 引言

对于大型空冷电动机而言,其冷却系统直接关系到电机的性能和经济指标.合理的风路设计可使电动机的温升降低,同时也提高了电动机的使用寿命^[1].

国内对电机绕组端部、定转子通风沟和气隙内的流体场与温度场的研究较多^[2-4],但是对电机冷却系统方面研究的文献却很有限^[5],对电机外风路的流量和风量特性方面研究的论文就更少了^[6].然而对于外置冷却器的电机而言,其外风路在整个电机风路中的作用十分重要^[7].国内对冷却器的研究大多以实验和经验公式为主^[8],前者可信度高但费时且成本高,后者节省时间但计算不够精确.本文采用数值计算和实验相结合的方法来研究电机的冷却器.先用数值计算方法来研究冷却器内部流体场和温度场的分布,之后采用实验的方法来研究冷却器的流量分配和风量特性,最后用实验结果对数值计算结果进行验证.

国内对空冷冷却系统的研究多侧重在冷却管和外风扇上^[9-11],往往忽略对冷却器中弧板结构的研究.弧板的作用也很关键,其作用是约束和引流,即在尽可能少的能量损失的前提下,改变流体的运动方向,而本文中的改流方向是 90° ,由于运动方向改变的较大,所以能量损失不可避免,但是合理的弧板结构能够有效的降低这种能量损失.合理的弧板结构能有效降低外风路的风阻,提高外风路的流量,从而达到提高冷却系统散热能力的目的.

本文以一台 YXKK710-4,4 000 kW 大型高效异步电动机为参考样机,运用 CFD (computational fluid dynamics) 软件 FLUENT 对原电机的冷却器进行了数值计算,以弧板区域的流体场分布为依据,对弧板结构进行优化,并对优化后的冷却器进行了数值计算;根据数值计算结果做出了样机,并对优化前后两电机的风量特性和冷却性能进行了测试,最后对数值计算结果进行了验证,得出了一些有意义的结论.

1 冷却器区域耦合场计算

1.1 电机通风系统结构

YXKK710-4,4 000 kW 大型高效异步电动机通风结构如图 1 所示.

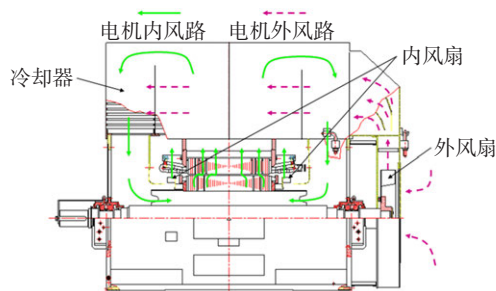


图1 电机通风结构

其中,内风路为密闭循环结构,内部安装挡风板对流体的流动路径进行约束,同时在电机左侧和右侧的端部各安置一个离心式风扇,如图 1 中内风扇.由于冷却器内腔在中部是完全隔断的,且内风路的通风结构关于轴中心线左右对称,所以这里只对右半部分的内风路进行叙述.通过内风扇的强迫施压,一部分一次冷却气体吹拂电机定子绕组端部后直接进入冷却器;其余在转子通风沟内的一次冷却气体在科里奥利力的作用下依次进入气隙、定子通风沟,最后进入冷却器内腔.一次冷却气体在和冷却管进行热交换后依次进入电机右侧端部气腔和轴向通风沟形成密闭循环系统;图中实线箭头所指方向即为内风路一次冷却气体的循环方向.为降低一次冷却气体的温度,在电机外部安装有冷却器,利用外风扇将低温二次冷却气体持续压入冷却器内部的冷风管道内,升温后的一次冷却气体在冷却管外部环绕流动,与低温冷却管进行接触换热,这样,二次冷却气体间接地将电动机运行时产生的热量带到电机外部,图中虚线箭头所指方向即为二次冷却气体的流动方向.

1.2 物理模型和数学模型

1.2.1 物理模型

由于整个冷却器有 913 根厚度 2 mm 的冷却铝管,每根铝管长约 2.4 m,所以如果以整个冷却器为研究对象,计算量是非常大的;再者本文旨在获得冷却器内部的温度场和流体场分布,所以只取了 3 列冷却管进行研究.冷却器物理模型如图 2 所示.

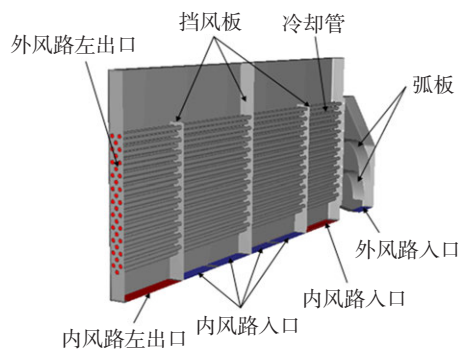


图2 冷却器物理模型

1.2.2 数学模型

针对稳态流动,质量守恒方程及动量守恒方程见流场研究文 [1-12],对于湍流数学模型,采用标准 $k-\varepsilon$ 两方程模型 [3];能量控制方程采用通用形式的能量守恒方程 [4]。

1.3 基本假设和边界条件

1.3.1 基本假设

- 1) 冷却器内空气视为不可压缩流体;
- 2) 忽略重力对空气流动的影响;
- 3) 冷却器内流动的空气处于湍流状态;
- 4) 仅研究冷却器内流体稳态流动;
- 5) 本文将冷却器对电动机的冷却效果等效为沿圆周方向相同 [5]。

1.3.2 边界条件

根据实验测得的额定状态下冷却器出入口的风速和温度,具体边界条件设置如下:

- 1) 外风路入口采用速度入口,入口风速为 10 m/s ,为了和后面实验的环境温度相对应,入口温度设为 310 K ;
- 2) 外风路出口采用压力出口,出口静压设置为 0 ;
- 3) 内风路入口采用速度入口,入口速度为 5 m/s ,入口温度为 350 K ;
- 4) 内风路出口采用压力出口,出口静压设置为 0 ;
- 5) 所有流体和固体的交界面设置为耦合壁面,冷却器外壳和外界空气对流换热,对流换热系数设为 $14.2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ [4]。

1.4 原结构冷却器数值计算

因为冷却铝管区域的冷却罩外表面都设置成了和空气进行对流换热的面,所以冷却器中部温度应该是相对较高的,因此重点研究冷却器中部截面的温度场和流体场分布。冷却器区域中部截面的温度场分布和流体场分布分别如图 3 和图 4 所示。

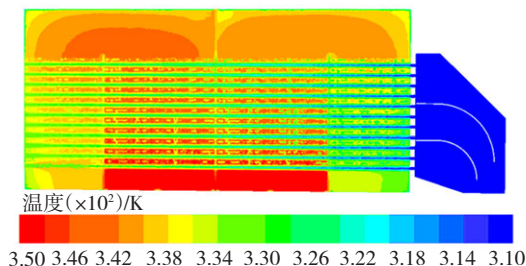


图 3 冷却器中部截面温度云图

通过图 3 可见,冷却器右半部分冷却效果更好,这是因为刚进入冷却铝管的空气温度较低,等到一次冷却气体进入右半部分冷却管的时候,气体温度已经有所上升,所以对内风路而言,左侧出口温度大于右侧出口温度。

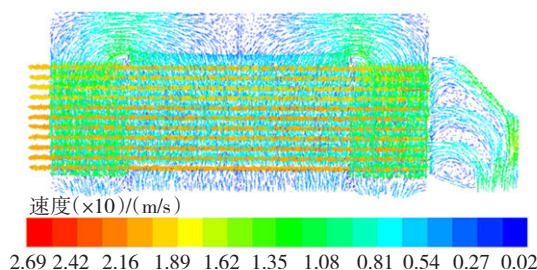


图 4 冷却器中部截面速度矢量图

从图 4 可以发现,冷却器内腔内没有较大涡流,而弧板区域的涡流却很大,这将造成较大的能量损失,同时说明冷却器弧板结构有待优化。

1.5 冷却器弧板结构的优化计算

在保证弧板区域轴向长度、竖直高度和周向宽度都不变的情况下,对弧板的结构进行了优化。弧板结构优化后,一方面使所分成的 3 个流道截面积的变化梯度变小,另一方面使流体运动方向的改变减缓 [7]。优化前后的弧板结构如图 5 所示。

从图 5 可以发现,原弧板结构中,空气从弧板区入口进入后先是经过很大强度的方向改变,之后有一段水平直线运动,而新结构中这一小段直线运动没有了,这样在改变流体流动方向的进程会减缓一些,相对能量损失会减小。同时 3 个流道的各自的截面积变化减小,这样可以减少涡流的产生。

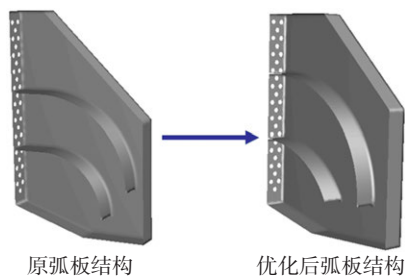


图 5 优化前后弧板结构图

对新结构的冷却器耦合场进行数值计算。为了比较弧板区的涡流情况,给出了优化前后弧板区速度矢量图的对比,如图 6 所示。

从图 6 可以观察到,优化结构后的弧板区域内涡流明显减少,基本达到了图 5 中弧板设计的预期效果。

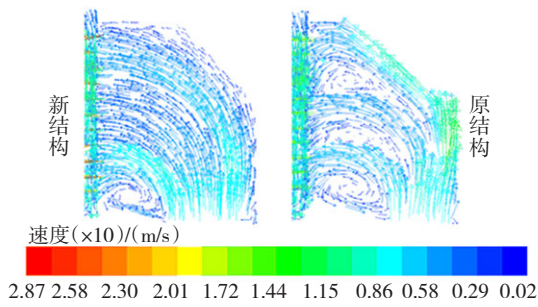


图 6 速度矢量图对比

为了比较优化前后冷却器的散热能力,对计算得到的优化前后冷却器内外风路各出口面的温度值做了对比,如表 1 所示.

表 1 新旧结构冷却器各出口温度对比

结构	外风路出口 温度/K	内风路左出口 温度/K	内风路右出口 温度/K
原结构	326.545 2	331.126 1	326.321 3
优化后	326.041 3	330.354 8	325.656 1

从表 1 可知,优化弧板后的冷却器散热性能有所提高,内风路左右出入口的温度都有所降低,而外风路出口的温度也是降低的,这是因为整个外风路的流量增加,所以冷却空气在冷却管内停留的时间缩短,热交换后冷却管出口处的温度略有下降,但单位时间内,整个外风路带走的热量却是增多的.

2 优化计算的实验验证

由于本文优化的对象只为冷却器中的弧板,且没有改变优化前后弧板区域的轴向长度、竖直高度和周向宽度,只是对弧板的形状和放置位置做了改动,所以制作一台新型的冷却器比较容易.为验证数值计算结果的正确性,对新旧结构的冷却器的流量和内外风路各出口的温度进行了测量.

2.1 冷却风量的测量

对原冷却器进行了实验,测量得到了冷却器的流量分布,并计算出了冷却器额定工况下的流量.冷却管的排列方式为交错式排列,出风口风速测量每隔两行测量,共测 8 行,每行从左向右测 4 个点,测量点分布如图 7 所示.

测量仪器为毕托管,分别测出了如图 7 中十字符号标记的管子的风速,具体测量值如表 2 所示.

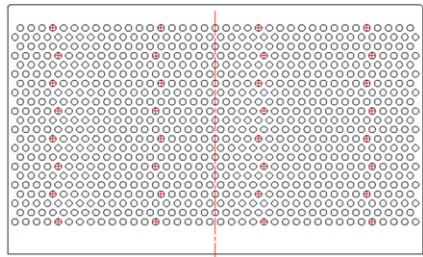


图 7 测量点分布

表 2 原冷却器出口风速测量数据 单位: m/s

	第 1 列	第 2 列	第 3 列	第 4 列
第 1 行	16.0	15.3	18.4	18.0
第 2 行	16.5	16.7	18.1	17.7
第 3 行	15.7	15.3	17.2	16.8
第 4 行	16.0	13.7	14.2	18.5
第 5 行	17.2	18.8	17.3	15.6
第 6 行	14.8	16.1	16.7	16.1
第 7 行	13.2	13.6	14.6	15.6
第 8 行	13.4	11.6	13.1	15.1

通过表 2 可以计算出冷却管子的平均风速,进而可以计算出冷却器的外风路的体积流量.经计算,冷却管的平均风速为 15.84 m/s,冷却器风量为 4.56 m³/s.

以数值优化的弧板结构为依据,设计制造一台新的冷却器,并安装在相同型号的电机上,对新冷却器外风路的出口风速进行了测量,测量点分布不变,测量数据如表 3 所示.

表 3 新冷却器出口风速测量数据 单位: m/s

	第 1 列	第 2 列	第 3 列	第 4 列
第 1 行	16.1	17.5	16.6	17.7
第 2 行	16.0	16.5	17.5	18.6
第 3 行	15.9	18.7	18.0	18.3
第 4 行	15.9	16.6	19.1	18.7
第 5 行	16.0	16.2	17.5	18.3
第 6 行	15.5	15.8	15.2	17.1
第 7 行	14.6	14.7	15.6	17.0
第 8 行	14.6	14.5	15.0	17.1

通过表 3 的数据,计算得冷却管出口的平均风速为 16.64 m/s,流量为 4.79 m³/s.新冷却器的额定流量比原冷却器的额定流量增加了 0.23 m³/s,流量提升了 5%.其流量增加的原因如图 8 所示.

从图 8 可以看出,外风扇提供的压头没有改变,冷却铝管的结构也没有改变,即冷却铝管区域的内

外风路的风阻都没有改变,而优化只针对弧板区域进行,优化后整个外风路的流量增大,以上事实证明优化结构后的弧板区域风阻减小了。

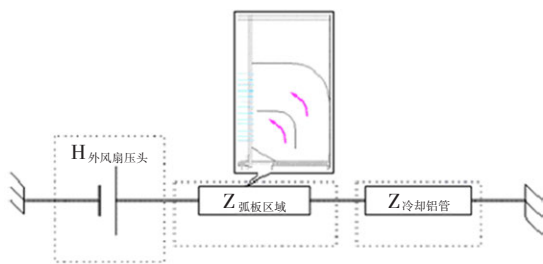


图 8 外风阻网络和各区域示意图

2.2 流量分配

为了研究弧板结构对冷却器流量分配的影响,将整个冷却器的出风口平均划分为 4 个列区域和 4 个行区域,分别研究优化前后对应行区域和列区域的流量分配情况。区域划分情况如图 9 所示。

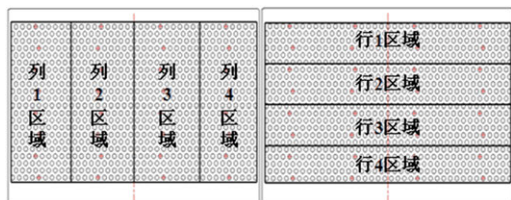


图 9 区域划分

分别对原结构和新结构冷却器所划分的各行区域和列区域的流量情况进行了统计,统计结果如图 10 所示。

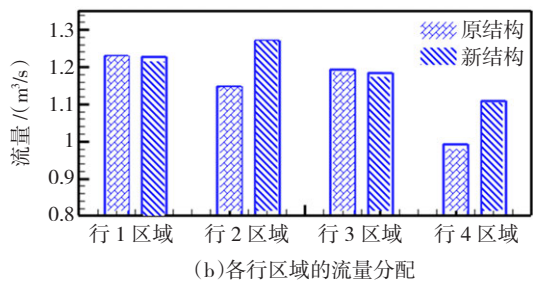
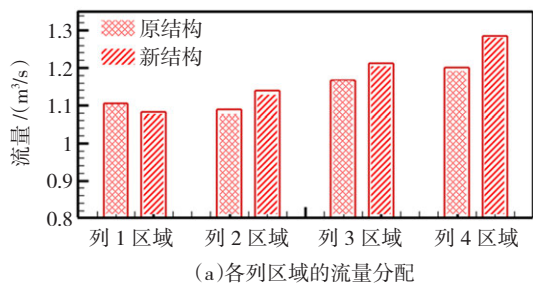


图 10 新旧结构冷却器流量分配对比

通过图 10 可以发现,新旧结构的冷却器,其列区域流量分布的整体趋势都是从左到右逐渐升高

的,这是由电机冷却风扇的旋转方向造成的,沿着电机外风扇的旋转方向各列区域的流量是逐渐升高的;新结构的冷却器除了其列 1 区域流量稍有降低,其它 3 列的流量都有较大幅度的提升,所以新结构冷却器的总流量增加;弧板的结构主要对各行区域的流量分配有较大影响,在优化前后行 1 区域和行 3 区域流量基本不变,而行 2 区域和行 4 区域的流量在优化后都有大幅度的提升,说明优化结构后的弧板对行 2 区域和行 4 区域内的涡流有大幅度的削弱。这也证明了之前数值计算所得的冷却器内流体场分布的正确性。

2.3 温升实验

对原结构和新结构冷却器的内外风路出口的温度分别进行了测量,在冷却器内外风路的出口埋设了测温元件,测温元件型号为 Pt100 三线制铂热电阻,其电阻值在 0℃ 时为 100Ω。其中对外风路的出口温度测量取多个冷却管出口温度的平均值;所有出口温度每隔半个小时测量一组数值,共测量 3 组,最后取平均值。表中的实验值是经过处理后的最终值。两组实验值和各自的数值计算值进行了比较,结果如表 4 所示。

表 4 新旧结构冷却器冷却性能的比较

风路出口	原结构冷却器温度/K		新结构冷却器温度/K	
	计算值	实验值	计算值	实验值
外风路出口	362.5	329.2	326.0	327.8
内风路左出口	331.1	334.3	330.4	333.2
内风路右出口	326.3	325.6	325.7	324.4

以表 4 中的实验值为参考数据来计算新旧结构冷却器内风路的平均温升值,已知环境温度为 310 K,计算得原冷却器内风路出口的平均温升为 19.95 K,新结构冷却器内风路出口的平均温升为 18.8 K,新结构的温升比原结构的低了 1.15 K,即温升降低了 5.7%,所以新结构冷却器的冷却能力提升了 5.7%。

从表 4 可以看出两组数值计算结果和各自对应的实验测量的结果基本吻合,而且都是新结构的冷却器散热性能更好,说明新结构的冷却器冷却能力得到了提升;虽然内风路左侧出口温度的计算值和实验值相差稍大,有 3 K 左右,但是整体的温度分布是正确的,对整体而言计算结果是可信的。总而言之,对冷却器采用部分研究,计算得到的温度场分布比较准确,可以作为工程实际中的参考依据。

由于新结构冷却器弧板区域内涡流明显减少,所以冷却器产生的噪声也会相应减小。

综合来看优化弧板结构后,整个冷却器的综合性能得到了提升,从而改善了电机的运行性能.

3 结 语

本文通过对大型高压异步电机冷却器耦合场的数值计算和实验验证,得到如下结论:

1) 合理的弧板结构能有效抑制弧板区域内涡流的产生,从而减小电机外风路的风阻,提高电机外风路的流量,进而提高冷却器的散热能力.

2) 各冷却管的流量分布不是关于列中心线左右对称的,而是沿电机的旋转方向流量逐渐升高的,弧板对各行冷却管的流量分配有较大影响.

3) 本文只取了部分冷却管进行数值计算和研究,经实验验证计算所得的计算区域中部截面的流体场和温度场分布是比较准确的,可以作为工程实际中的参考依据.此方法大大减少了数值计算的计算量,为工程研究提供了新的简便方法.

参 考 文 献:

- [1] BOGLIETTI A, CAVAGNINO A, STATON D, et al. Evolution and Modern Approaches for Thermal Analysis of Electrical Machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 871-882.
- [2] 路义萍, 阴文豪, 韩家德, 等. 汽轮发电机转子端部及槽内绕组温升 [J]. 电工技术学报, 2010, 25(2): 1-5.
- [3] 温嘉斌, 鄢鸿羽. 定子通风槽钢对通风沟内流体流动形态的影响 [J]. 电机与控制学报, 2010, 14(11): 58-62.
- [4] 路义萍, 丰帆, 孙明琦, 等. 同步电机定子与气隙流场数值计算与分析 [J]. 电机与控制学报, 2011, 15(8): 47-51.
- [5] 鄢鸿羽. 中型高压异步电机流体流动与传热计算分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2011: 31-36.
- [6] 孟大伟, 何金泽, 夏云彦. 箱式 YJKK 紧凑型中型高压电动机全域流体预测 [J]. 电机与控制学报, 2012, 16(12): 66-71.
- [7] 邓东泉, 徐烈, 刘建权. 空气冷却器传热性能试验研究 [J]. 低温工程, 2002, 126(3): 53-58.
- [8] 袁再华. 中型封闭式电机的空-空冷却器和冷却风扇设计 [J]. 电机技术, 1998(4): 8-12.
- [9] 李贤明, 黄鲁斌, 张传林, 等. YKK 中型高压异步电动机空冷器的研究与设计 [J]. 大电机技术, 2003(6): 31-33.
- [10] 温嘉斌, 唐跃, 何金泽, 等. 高压异步电机外风扇流场数值计算及优化 [J]. 电机与控制学报, 2013, 17(9): 79-85.
- [11] 李永刚, 崔伟, 张喜乐, 等. 干式变压器绕组热点温度的一种计算方法 [J]. 变压器, 2011, 48(8): 5-8.
- [12] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 1-17.
- [13] 王福军. 计算流体动力学分析—CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 1-142.
- [14] 戈宝军, 张志强, 陶大军, 等. 轴向通风双馈异步发电机的温度场计算 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(21): 86-92.
- [15] 丁树业, 孙兆琼. 永磁风力发电机流场与温度场耦合分析 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 118-123.
- [16] 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): 122-126.
- [17] 魏永田, 孟大伟, 温嘉斌. 电机内热交换 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 209-250.

(编辑: 关 毅)