

不同转子通风结构对高压异步电机传热特性的影响^{*}

王晓俊¹, 曲振业¹, 蔡合超¹, 吴宣东¹, 杨立权²

(1. 卧龙电气南阳防爆集团股份有限公司, 河南 南阳 473008;

2. 平顶山学院 河南省超声技术应用工程研究中心, 河南 平顶山 467000)

摘要: 为了降低高压异步电机的温升、强化电机内部的对流传热, 以一台额定功率为 1 250 kW 的高压异步电机为研究对象, 基于计算流体力学和对流传热优化的场协同理论, 设计了新的转子通风结构。建立电机三维耦合分析模型, 对电机进行流热耦合分析, 借助数字化仿真技术计算并比较了新老转子通风结构下的电机各个通风道的流体流动及传热特性。从对流传热优化的场协同角度, 得出了不同转子通风结构下的电机温升和温度分布规律, 为高压异步电机通风结构优化设计提供参考依据。最后, 将新电机结构的温升计算结果与样机的型式试验结果进行对比, 温升误差仅为 4%, 验证了计算方法的准确性和有效性。

关键词: 高压异步电机; 转子通风结构; 流热耦合; 温升

中图分类号: TM343 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)04-0077-06

doi: 10.12177/emca.2021.217

Influence of Different Rotor Ventilation Structures on Heat Transfer Performance of High Voltage Induction Motor^{*}

WANG Xiaojun¹, QU Zhenye¹, CAI Hechao¹, WU Xuandong¹, YANG Liquan²

(1. Wolong Electric Nanyang Explosion Protection Group Co., Ltd., Nanyang 473008, China;

2. Henan Province Engineering Research Center of Ultrasonic Technology Application, Pingdingshan University, Pingdingshan 467000, China)

Abstract: In order to reduce the temperature rise of high voltage induction motor and strengthen the convective heat transfer inside the motor, taking a high voltage induction motor with the rated power of 1 250 kW as the research object, a new rotor ventilation structure is designed based on computational fluid dynamics theory and convective heat transfer optimization. The three-dimensional coupling analysis model is established to analyze fluid thermal coupling of the motor. With the help of digital simulation technology, the fluid flow and heat transfer characteristics of each ventilation duct of the motor under the ventilation structure of new and old rotors are calculated and compared. From the perspective of field synergy of convection heat transfer optimization, the temperature rise and temperature distribution of the motor under different rotor ventilation structures are obtained, providing a reference for the optimization design of the ventilation structure of high voltage induction motors. Finally, the temperature rise calculation results of the new motor structure are compared with the type test results of the prototype, and the temperature rise error is only 4%, which verifies the accuracy and validity of the calculation method.

Key words: high voltage induction motor; rotor ventilation structure; fluid thermal coupling; temperature rise

收稿日期: 2021-11-29; 收到修改稿日期: 2022-03-08

^{*} 基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(20A210029); 平顶山学院重点科研基金项目(PXY-QNJJ-2019002、PXY-HX-202102)

作者简介: 王晓俊(1986—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电机设计及多物理场仿真计算。

曲振业(1974—), 男, 高级工程师, 研究方向为电机设计与优化。

杨立权(1984—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电机设计与优化。(通信作者)

0 引言

随着工业发展的需求提高,高压异步电机单机容量越做越大,结构要求越来越紧凑。因此,要求有限的散热面积带走更多的热量,电机内部发热问题变得尤为突出,如何使电机内部快速冷却成了电机研发领域的重要课题。

近年来,国内外专家学者对于各类电机流体场及流体温度耦合场做了一定的研究,取得了丰硕的成果。电机定子局部温度场^[1-3]、转子局部耦合场^[4-5]、冷却器数值分析与设计^[6]、流体分析^[7]、温升计算^[8]、电机全域预测仿真计算^[9]和热分析^[10-14]工作展开的研究相对较多。大量的研究成果表明计算流体力学(CFD)数字化仿真技术在电机的热设计和冷却结构优化方面已经得到有效地应用,可以大大降低原型机的制造试验费用和产品的开发周期,有助于传统的电机企业数字化转型升级。

在已有的研究成果基础上,结合电机的通风结构特点,基于计算流体力学和对流传热优化的场协同理论,优化了转子通风孔结构,从流热耦合场的角度对新老结构电机内部的流体流动特性及传热进行对比研究,获得了电机流体流变特性和温度分布耦合规律。同时,并将新结构应用于制造样机,温升计算结果与样机温升测试数据对比,验证了其计算结果和计算方法的准确性。CFD 数字化仿真技术的散热设计应用在传统工业电机上,有利于企业数字化转型升级,精准设计产品。且对高压高功率密度异步电机通风系统设计及优化有一定的理论价值及工程指导意义。

1 电机物理模型与数学模型

1.1 电机参数及通风结构

本文的研究对象在原产品基础上进行升级换代,功率提高了约 1.5 倍。根据电机几何相似定律^[1],功率密度的增加势必会使内部散热问题突显出来。电机主要参数如表 1 所示。

YXKK 系列电机为封闭式带空空冷却器的高压异步电机,其风路分为内风路和外风路两部分。内风路是轴径向混合通风形式,采用密闭循环结构,在电机轴伸端安装一个离心风扇,通过离心风

扇产生足够的压力迫使内部流体进行循环流动。外风路电机同轴安装外风扇,使外界低温大气进入冷却管,通过冷却管内外的强制对流换热达到冷却内风路流体的目的。电机通风结构如图 1 所示。

表 1 电机主要参数

参数名称	参数值
额定功率/kW	1 250
额定电压/kV	10
额定频率/Hz	50
定子槽数	48
转子槽数	40
定子外径/mm	780
定子内径/mm	430
气隙长度/mm	5
径向通风道宽度/mm	10

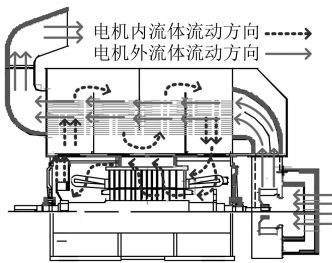


图 1 电机通风结构示意图

1.2 基本假设

根据电机的结构特征以及电机通风散热的特点,做出如下假设^[8]:

- (1) 电机流体域流体的雷诺数很大 ($Re > 2\ 300$),此时流体处于湍流流动状态,故采用湍流模型对电机内部流场进行仿真模拟;
- (2) 电机流体域中,流体流速远小于声速,即马赫数很小,故把流体视作不可压缩流体处理;
- (3) 忽略通风道内流体的浮力和重力;
- (4) 研究电机流体域流体流速的稳定状态,即定常流动,控制方程中不含有时间项;
- (5) 将电机定子铁心段的叠压硅钢片看成一个整体进行建模;
- (6) 定子槽直线段填满,与定子铁心接触没有间隙,端部线圈按照实际绕组形状建模;
- (7) 假定电机内各部件紧密接触,无接触

热阻。

1.3 电机温度耦合场物理模型

根据电机的结构特点,采用 SolidWorks 2016 软件,忽略不影响电机流场和温度场的螺栓连接件、密封圈等部件,简化建立仿真分析用两种转子通风孔结构下的电机温度场计算模型,如图 2 所示。转子通风孔结构如图 3 所示。

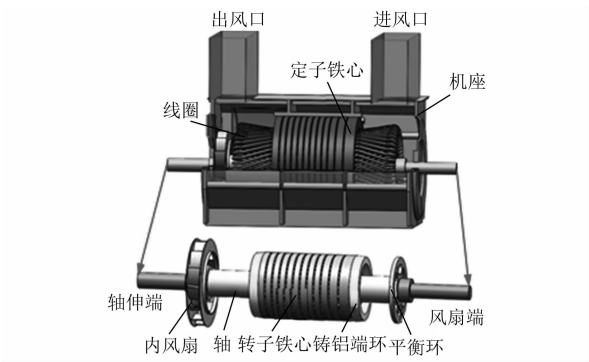


图 2 温度场计算模型

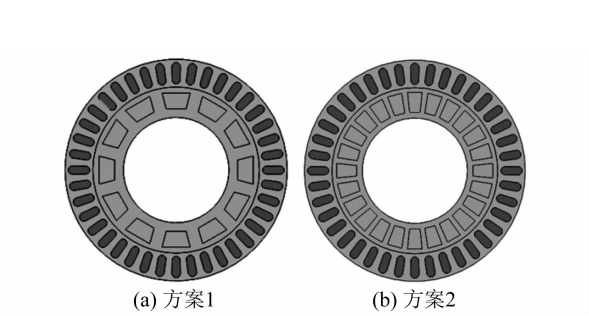


图 3 转子通风孔结构

1.4 边界条件

(1) 环境温度 24 ℃,进口边界采用整机流场得到的速度,方案 1 进口速度大小为 4.3 m/s,方案 2 进口速度大小为 4.7 m/s;根据外风路得到的冷却风量和能量守恒关系计算得到进风口温度为 55 ℃,出风口为压力出口设置为 0;电机机壳外表面为自然对流,设置对流换热系数为 9.73 W/(m²·K)。

(2) 电机属于旋转机械,采用多重参考坐标系。湍流模型使用 RNG *k-ε* 模型,推荐采用增强壁面函数法^[8]。

1.5 数学模型

在工程实际应用中,由于电机流体域流速远小于声速,空气密度的变化是很小的,可以将气体看作是不可压缩流体。电机流体域流体的流动满足质量守恒、动量守恒和能量守恒方程。相应

的控制方程^[10]如下:

质量守恒方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: *u*、*v*、*w* 分别为 *x*、*y* 和 *z* 方向的速度分量。

动量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \\ &\frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial(\rho vu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \\ &\frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{\partial(\rho wu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho wv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \\ &\frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度; μ 为动力黏度。

能量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} &= \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_T \end{aligned} \quad (3)$$

式中: c_p 为比热容; *T* 为温度; *k* 为流体的传热系数; S_T 为流体的内热源及由于黏性作用流体机械能转换为热能的部分,有时简称为黏性耗散项。

2 数值模拟及结果分析

采用流热耦合传热计算对电机进行温度场分析,电机运行过程中产生的损耗会转化成热量,转子通风孔开在转子轭部区域,该开孔限定区域基本不发热,电磁验证不影响转子热源大小,电机主要部件热源密度如表 2 所示。

表 2 电机热源密度 (W·m⁻³)

损耗分布位置	参数值
定子铁心轭部	103 192
定子铁心齿部	107 472
定子线圈	160 471
转子导条	421 615
转子铁心齿部	161 400

为了进一步研究改变转子轴向通风结构对定

子铁心部分的流动和温度的影响,在各个径向通风道中画线 L_1 和 L_2 ,位置如图4所示。选取各个定子径向通风道的风速分布进行分析研究。

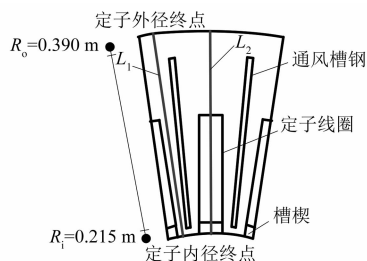


图4 定子径向通风道采样线位置

定子径向通风道风速变化如图5所示,发现两种转子通风结构下定子径向通风道的风速变化趋势基本一致,从第1个风道到第11个风道风速逐渐减小,越接近出口处的通风道其流速越快。这与单侧风路结构特征有关,随着气流的流动,通风截面逐渐变大,速度越来越小,且第3至第8风道在定子轭部出口处出现小波动,这是因为背部气流对风道的气流有圆周方向的冲击,使其流动方向发生偏移,速度出现陡降后回升。方案2各个风道的风速曲线分布相对方案1比较集中,最小风速增加到了10 m/s,其他风道控制在10~20 m/s之间,比方案1出风风速分布更加集中均匀和稳定。

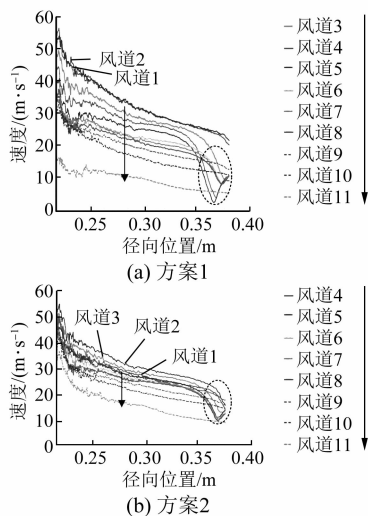


图5 定子径向通风道风速变化

定子径向通风道气体温度变化如图6所示,温度曲线呈现陡然上升又回落再平稳上升变化形

态;随着气体从气隙进入定子径向通风道,受槽钢的影响,截面突然缩小,导致速度突然增加;随着气体的沿程流动,通风截面属于扇形变化区域,风扇减小和气体吸热,风温又出现逐渐增加的现象。由于方案2的风速比方案1大,对流换热强度增加,风温比方案1降低了10 K左右。

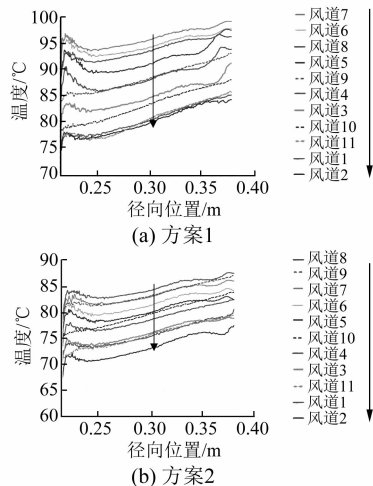


图6 定子径向通风道风温变化

3 温度特性分析及试验验证

电机子午面温度分布如图7所示,从图7中可以看出,电机温度轴向上,从进口到出口方向温度呈现梯度状增加的变化现象,定子铁心部分温度较高,方案2最高温度比方案1的降低了11 K。图8给出了定子绕组的对比变化图,更容易看出方案2的低温区域明显优于方案1,说明散热效果得到了改善。

从图9转转子午面温度分布可以看出,转子

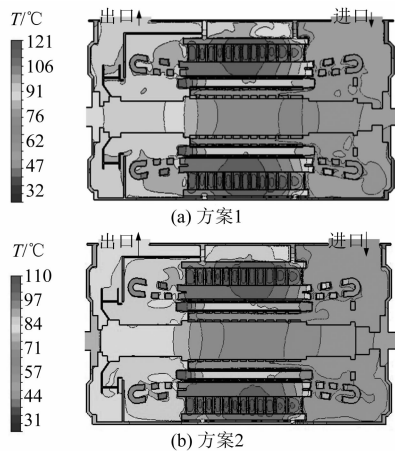


图7 子午面温度分布

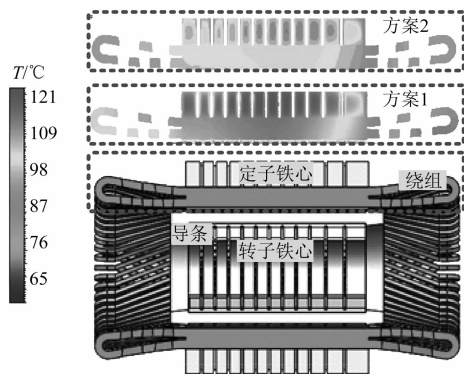


图8 定子绕组温度分布对比

的温度分布比较均匀,最高温度为 112 °C,转子通风散热效果比定子部分好,主要是因为转子导条和通风槽管类似风扇的作用,强化了对流换热。转子通风面积和轴向气流涡流的减少使方案 2 比方案 1 的最高温度降低了 9 K。

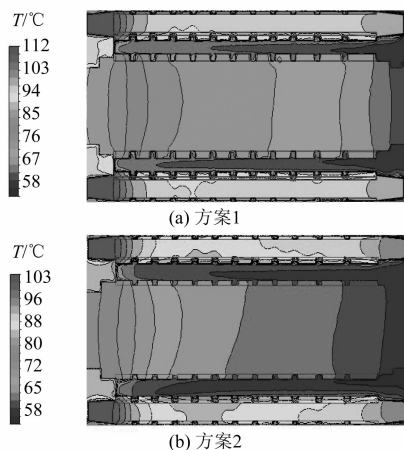
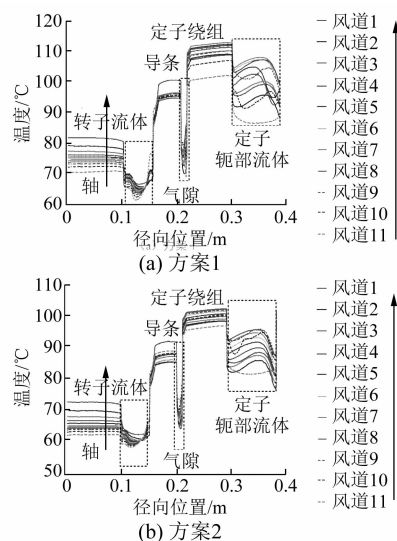


图9 转子子午面温度分布

图 10 是电机径向温度变化图,从图 10 中可以看到,温度沿径向呈现阶梯状增长趋势,定子绕组处温度达到最高,流体区域温度变化波动比较明显,这与冷却流体的流动比较复杂有关。受到发热部件的影响,越靠近发热部件流体温度越高。方案 1 和方案 2 呈现相同的变化趋势,温度大小上方案 1 比方案 2 低了 10 K,通风结构的改变对降低电机温度起到了决定性的作用。

根据方案 2 制造了一台样机,如图 11 所示。为了进行温升测试,定子绕组下线生产节点进行对上层绕组和下层绕组中间布置 3 个埋置式铂热电阻 PT100,U、V、W 相各布置一个,圆周方向

图10 电机径向温度变化(L_2 线)

均匀分布,引出引接线并标记。现场试验站根据国家标准 GB/T 1032—2012 对方案 2 的制造样机进行了型式试验测试,采用热阻法计算得到电机温升为 78 K,而仿真计算得出的温升为 75 K,误差为 4%,相对误差在工程实践的允许范围内,测试结果验证了数值模拟方法的合理性。全域耦合模型的计算精度比较高,适合于需要精确计算高压异步电机温升的场合。

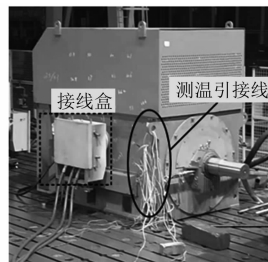


图11 现场测试样机

4 结 语

通过建立大功率高压异步电机流热耦合模型,对额定运行工况下的温度场进行仿真研究,同时探讨了不同转子通风结构下电机内流体流变特性和温度分布耦合规律。得到以下结论。

(1) 全域流体场与耦合场计算方法得到的计算结果与现场对样机温升试验进行了对比,相对误差在工程实践的允许范围内,验证了数值模拟方法的准确性和合理性。

(2) 借助于 CFD 数字化仿真技术,应用于企业生产实际,揭示了电机内部和外部冷却通道内流体的流动特性变化规律;从场的角度利用耦合场方法对电机进行仿真分析,得到了定子径向风道的流体流量、压力和温度变化特征,揭示了电机径向方向热量传递的变化规律,发现电机径向温度最高点出现在定子绕组处;获得了电机温升、整体温度分布和电机各部件的最高温度。

(3) 调整转子通风结构,提高电机流场与温度场的协同配合,优化电机内对流换热,为该通风类型电机的行业设计人员指明了电机降低温升的优化方向,为更高功率密度的电机设计提供了理论依据。

【参考文献】

- [1] CAMILLERI R, HOWEY D, MCCULLOCH M D. Predicting the temperature and flow distribution in a direct oil-cooled electrical machine with segmented stator [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(1): 82.
- [2] 李伟力,杨雪峰,顾德宝,等. 多风路空冷汽轮发电机定子内流体流动与传热耦合计算与分析[J]. 电工技术学报, 2009, 24(12): 24.
- [3] 王继豪,王安东,孙福春,等. 水内冷调相机定子温度场的计算与分析[J]. 大电机技术, 2020(4): 10.
- [4] 王艳武,杨立,陈翊,等. 异步电机转子三维温度场及热应力场研究[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(6): 27.
- [5] 孙永彪,王坤. 大型空冷汽轮发电机转子三维流场计算[J]. 大电机技术, 2021(2): 7.
- [6] 温嘉斌,郑军,于喜伟. YKK 中型高压异步电动机换热分析与冷却器优化[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(9): 33.
- [7] 贺文凯,顾德军,王鸿鹄. 两种不同通风结构对高压电机性能的影响[J]. 电机与控制应用, 2014, 41(6): 36.
- [8] BERSCH K, CONNOR P H, EASTWICK C N, et al. CFD optimization of the thermal design for a vented electrical machine [C] // 2017 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), 2017: 39.
- [9] 贾振宇,曲兵妮,宋建成,等. 紧凑型高压异步电机三维流体场分析及温度场仿真计算[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(6): 77.
- [10] 徐起连,陈秀平,李岩. 异步风力发电机流动与传热分析及优化设计[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(4): 81.
- [11] CAO Z, LI W, ZHANG X, et al. Influence of single/dual ventilation path on fluid field and temperature field of HVLSSR-PMSM with air-cooled hybrid ventilation systems [J]. Energies, 2018, 11(6): 1343.
- [12] 丁树业,仵程程. 具有径向通风结构的 5 兆瓦双馈风力发电机内流热特性[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(10): 68.
- [13] 吴胜男,李文杰,安忠良,等. 变速恒压混合励磁风力发电机的热分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(9): 1857.
- [14] 韩家得,孙鹏,朱凌波,等. 立式鼠笼异步电动机三维 CFD 热计算[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(12): 55.

(上接第 70 页)

- [9] GU G, RUAN L. A few questions about using the evaporative cooling method as the substitute for the water-cooling method in the Three Gorges' hydro-generator [C] // International Conference on Electrical Machines and Systems, 2005: 7.
- [10] 丁舜年. 大型电机的发热与冷却 [M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [11] 王福军. 计算流体力学分析: CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 7-11.
- [12] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 347-353.
- [13] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 4-30.