

分类号: TM341

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2220110151



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

# 硕士学位论文

题 目      重型混动发动机冷却  
                 系统电气化附件研究

论 文 作 者      裴文俊

校 内 导 师      肖平(教授)

校 外 导 师      赵夕长(高级工程师)

专业学位类别      机械

研究方向(领域)      新能源汽车

论文提交日期: 2025 年 5 月 20 日

分类号: TM341

单位代码:10363

密 级: 公开

学 号:2220110151

## 重型混动发动机冷却系统电气化附件研究

### Research on Accessories for Electrification of Cooling Systems for Heavy-duty Hybrid Engines

学 生 姓 名: 裴文俊

指 导 教 师: 肖平（教授）

校 外 导 师: 赵夕长（高级工程师）

专 业: 机械

研 究 方 向: 新能源汽车

论文答辩日期: 2025 年 5 月 10 号

## 重型混动发动机冷却系统电气化附件研究

### 摘 要

水泵和风扇作为重型商用车发动机冷却系统的重要组成部分,显著影响了发动机的整体输出性能与热效率。传统机械水泵与机械风扇存在功耗高、无法智能控制等缺点;而电气化附件具有体积小、精度高、噪声小、能耗低、可靠性高等优点,可以有效提升发动机的工作效率和降低发动机工作负荷。为此,本文通过开发电子水泵与电子风扇实现发动机整体输出性能提升和能耗降低,重点是附件电机的开发。本文各章具体安排如下:

(1) 电机设计参数匹配。首先,对冷却风扇和冷却水泵的各个性能参数进行研究。其次,搭建传统附件功测试实验台架,采用电机驱动附件,并通过调节电机转速来控制风扇与水泵转速,以此确定不同工况下机械水泵与风扇的功耗。最后,根据发动机的附件尺寸安装空间确定附件电机的尺寸边界。

(2) 附件电机初步设计与电磁性能分析。首先,选用永磁同步电机作为附件电机,并根据附件电机设计要求与电机基本尺寸公式确定附件电机的初始尺寸,选择合适的槽极配比、材料与永磁体类型。通过调整电机结构参数,确定 18 槽 8 极、12 槽 8 极、12 槽 10 极三种电磁方案。其次,通过对比三种电磁方案的齿槽转矩与反电动势性

能，最终确定最佳槽极配比电磁方案。最后，对永磁同步电机空载、负载工况电磁性能进行仿真分析，完成附件电机的初步设计。

(3) 永磁同步电机多目标优化及热分析。首先，以输出转矩、转矩脉动、反电动势幅值为优化目标，利用 Optislang 模块对电机结构参数进行灵敏度分析，并采用 BOX-Bennken Design (BBD) 采样方法建立二次多项式响应面模型。其次，使用圆形正弦混沌映射、改进黄金正弦策略、自适应权重系数三种方法改进麻雀算法，并在 MATLAB 中利用改进麻雀算法优化响应面模型，完成附件电机的多目标优化。同时将优化后的电机与初始电机以及采用麻雀算法 (SSA)、遗传算法 (GA)、粒子群算法 (PSO) 优化后的电机性能进行对比分析。最后，对附件电机的冷却结构进行设计，并对电机额定工况和峰值工况进行温度场仿真。

(4) 发动机冷却系统散热分析。为了验证电子水泵和电子风扇的有效性。首先，对发动机的冷却系统及热平衡理论进行研究。其次，将本文设计的电子水泵、电子风扇以及发动机、散热器等参数输入冷却系统模型中，并制定控制策略。其中，水泵采用定速比控制策略，风扇采用温度控制策略。利用 AMESim 软件完成发动机冷却系统仿真模型搭建。最后，在稳态工况、低速大扭矩工况、额定工况下对发动机冷却系统的散热能力进行仿真分析。

**关键词：**传统附件功测试；永磁同步电机；电气化附件；多目标优化；  
发动机冷却系统

# RESEARCH ON ACCESSORIES FOR ELECTRIFICATION OF COOLING SYSTEMS FOR HEAVY-DUTY HYBRID ENGINES

## ABSTRACT

As an important part of the engine cooling system of heavy commercial vehicles, water pumps and fans significantly affect the overall output performance and thermal efficiency of the engine. The traditional mechanical water pump and mechanical fan have the disadvantages of high power consumption and cannot be controlled intelligently while the electrification accessory has the advantages of small volume, high precision, low noise, low energy consumption and high reliability, which can effectively improve the efficiency of the engine and reduce the engine workload. Therefore, this paper aims to enhance the overall output performance and reduce energy consumption of the engine by developing electronic water pumps and electronic fans, with a focus on the development of accessory motors. The specific arrangement of each chapter in this paper is as follows:

(1) Motor design parameter matching. Firstly, the various performance parameters of the cooling fan and cooling water pump are studied. Secondly, a traditional accessory power test bench is built, using a motor to drive the accessories, and by adjusting the motor speed to control the speed of the fan and water pump, the power consumption of the mechanical water pump and fan under different working conditions is determined. Finally, the size boundary of the accessory motor is determined based on the installation space of the engine's accessories.

(2) Preliminary design and electromagnetic performance analysis of the accessory motor. Firstly, a permanent magnet synchronous motor is selected as the accessory motor, and the initial size of the accessory motor is determined based on the design requirements of the accessory motor and the basic size formula of the motor. The appropriate slot-pole ratio, materials, and type of permanent magnet are selected. By adjusting the motor structure parameters, three electromagnetic schemes of 18 slots and 8 poles, 12 slots and 8 poles, and 12 slots and 10 poles are determined. Secondly, By comparing the cogging torque and back electromotive force performance of the three electromagnetic schemes, the optimal slot-pole ratio electromagnetic scheme is determined. Finally, the electromagnetic performance of the permanent magnet synchronous motor under no-load and load conditions is simulated and analyzed, completing the preliminary design of the accessory motor.

(3) Multi-objective optimization and thermal analysis of permanent magnet synchronous motors. Firstly, the output torque, torque ripple, and back electromotive force amplitude are taken as the optimization objectives. The sensitivity analysis of the motor structure parameters is conducted using the Optislang module, and the Box-Behnken Design (BBD) sampling method was adopted to establish the quadratic polynomial response surface model. Secondly, the sparrow search algorithm is improved by using circular sine chaotic mapping, improved golden sine strategy, and adaptive weight coefficient methods. The improved sparrow search algorithm is used to optimize the response surface model in MATLAB, completing the multi-objective optimization of the accessory motor. At the same time, the performance of the optimized motor is compared and analyzed with the initial motor and the motors optimized by the sparrow search algorithm (SSA), genetic algorithm (GA), and particle

swarm optimization algorithm (PSO). Finally, the cooling structure of the accessory motor is designed, and the temperature field simulation of the motor under rated and peak working conditions is carried out.

(4) Heat dissipation analysis of the engine cooling system. In this chapter, to verify the effectiveness of the electronic water pump and electronic fan, firstly, the engine's cooling system and thermal balance theory are studied. Secondly, the parameters of the electronic water pump, electronic fan, engine, radiator, etc. designed in this paper are input into the cooling system model, and a control strategy is formulated. The water pump adopts a constant speed ratio control strategy, and the fan adopts a temperature control strategy. The simulation model of the engine cooling system is built using AMESim software. Finally, the heat dissipation capacity of the engine cooling system is simulated and analyzed under steady-state conditions, low-speed high-torque conditions, and rated conditions.

**KEY WORDS:** conventional attachment power test; permanent magnet synchronous motor; electrified attachment; multi-objective optimal; engine cooling system simulation

## 目录

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 摘 要 .....                  | I   |
| ABSTRACT.....              | III |
| 目录 .....                   | VI  |
| 插图清单 .....                 | IX  |
| 插表清单 .....                 | XII |
| 第 1 章 绪论.....              | 1   |
| 1.1 研究背景与意义 .....          | 1   |
| 1.2 课题中关键技术国内外研究现状 .....   | 3   |
| 1.2.1 电气化附件国内外研究现状 .....   | 3   |
| 1.2.2 永磁同步电机优化设计研究现状 ..... | 6   |
| 1.3 本文主要研究内容 .....         | 7   |
| 1.4 本章小结 .....             | 8   |
| 第 2 章 电机设计参数匹配.....        | 9   |
| 2.1 冷却系统附件基本性能参数 .....     | 9   |
| 2.1.1 冷却风扇基本性能参数 .....     | 9   |
| 2.1.2 冷却水泵基本性能参数 .....     | 11  |
| 2.2 传统附件功测试实验 .....        | 13  |
| 2.2.1 实验方案布置与台架搭建 .....    | 14  |
| 2.2.2 实验方法 .....           | 15  |
| 2.3 实验结果数据处理与分析 .....      | 16  |
| 2.4 电机边界尺寸确定 .....         | 18  |
| 2.5 本章小结 .....             | 19  |
| 第 3 章 附件电机初步设计与电磁性能分析..... | 20  |
| 3.1 主要尺寸计算 .....           | 20  |
| 3.2 槽极配合的选取 .....          | 21  |
| 3.3 定转子结构设计 .....          | 21  |

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 3.3.1 定子槽设计 .....              | 21 |
| 3.3.2 定子绕组设计 .....             | 22 |
| 3.3.3 转子类型与气隙长度确定 .....        | 24 |
| 3.3.4 定转子材料选择 .....            | 25 |
| 3.3.5 永磁体设计 .....              | 26 |
| 3.4 不同槽极配合电磁性能分析 .....         | 27 |
| 3.5 永磁同步电机电磁性能分析 .....         | 29 |
| 3.5.1 空载工况下的电磁性能 .....         | 30 |
| 3.5.2 额定工况下的电磁性能 .....         | 31 |
| 3.5.3 峰值工况下的电磁性能 .....         | 33 |
| 3.6 本章小结 .....                 | 33 |
| 第 4 章 永磁同步电机多目标优化及热分析 .....    | 34 |
| 4.1 电机多目标优化设计 .....            | 34 |
| 4.1.1 确定优化参数与优化目标 .....        | 35 |
| 4.1.2 灵敏度分析 .....              | 36 |
| 4.1.3 响应面建模 .....              | 37 |
| 4.2 改进麻雀算法 .....               | 40 |
| 4.2.1 算法原理 .....               | 40 |
| 4.2.2 圆形正弦混沌映射策略优化初始种群分布 ..... | 40 |
| 4.2.3 改进黄金正弦策略更新发现者 .....      | 41 |
| 4.2.4 均匀分布的动态自适应权重改进跟随者 .....  | 42 |
| 4.2.5 算法性能验证 .....             | 43 |
| 4.3 基于改进麻雀算法的多目标优化 .....       | 45 |
| 4.3.1 多目标优化结果 .....            | 46 |
| 4.3.2 参数化分析 .....              | 47 |
| 4.3.3 优化结果分析 .....             | 48 |
| 4.4 电机热分析 .....                | 51 |
| 4.4.1 电机的热源 .....              | 51 |

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 4.4.2 电机冷却结构设计 .....       | 53 |
| 4.4.3 不同工况下温度场计算 .....     | 53 |
| 4.5 电机效率 Map 图及外特性分析 ..... | 55 |
| 4.6 样机制造 .....             | 56 |
| 4.7 本章小结 .....             | 58 |
| 第 5 章 发动机冷却系统散热分析 .....    | 59 |
| 5.1 发动机冷却系统介绍 .....        | 59 |
| 5.1.1 发动机冷却系统原理 .....      | 59 |
| 5.1.2 主要零部件介绍 .....        | 60 |
| 5.2 发动机冷却系统热平衡理论计算 .....   | 63 |
| 5.2.1 传热理论计算方法 .....       | 63 |
| 5.2.2 发动机热平衡方程 .....       | 63 |
| 5.2.3 发动机热平衡计算方法 .....     | 65 |
| 5.3 发动机冷却系统仿真模型搭建 .....    | 65 |
| 5.3.1 冷却系统主要子模型搭建 .....    | 65 |
| 5.3.2 冷却系统其他子模型介绍 .....    | 69 |
| 5.3.3 冷却系统整体模型搭建 .....     | 70 |
| 5.4 不同工况下冷却系统仿真分析 .....    | 71 |
| 5.4.1 稳态工况仿真分析 .....       | 71 |
| 5.4.2 低速大扭矩工况仿真分析 .....    | 72 |
| 5.4.3 额定工况仿真分析 .....       | 73 |
| 5.5 本章小结 .....             | 74 |
| 第 6 章 总结与展望 .....          | 76 |
| 6.1 全文总结 .....             | 76 |
| 6.2 工作展望 .....             | 77 |
| 参考文献 .....                 | 78 |
| 攻读硕士学位期间发表学术论文及参研项目 .....  | 85 |
| 致谢 .....                   | 86 |

## 插图清单

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 图 1-1 2017-2023 年汽车销量与增长率..... | 1  |
| 图 1-2 汽车运行能量平衡示意图.....         | 2  |
| 图 1-3 本文研究框架图.....             | 7  |
| 图 2-1 实验布置方案.....              | 14 |
| 图 2-2 实验台架示意图.....             | 15 |
| 图 2-3 实验台架实物图.....             | 15 |
| 图 2-4 工装节温器.....               | 16 |
| 图 2-5 风扇水泵总功耗测试.....           | 17 |
| 图 2-6 水泵功耗测试.....              | 18 |
| 图 2-7 发动机热管理系统方案.....          | 18 |
| 图 2-8 电机尺寸边界.....              | 19 |
| 图 3-1 平行齿槽槽型图.....             | 22 |
| 图 3-2 绕组接线图.....               | 24 |
| 图 3-3 三种转子铁芯类型.....            | 24 |
| 图 3-4 DW310-35 B-H 变化曲线.....   | 25 |
| 图 3-5 有限元模型图.....              | 27 |
| 图 3-6 相反电动势对比.....             | 28 |
| 图 3-7 齿槽转矩对比.....              | 29 |
| 图 3-8 空载磁场分布.....              | 30 |
| 图 3-9 空载反电动势及谐波分析.....         | 30 |
| 图 3-10 径向气隙磁密及谐波分析.....        | 31 |
| 图 3-11 额定工况磁场分布.....           | 31 |
| 图 3-12 额定输出转矩.....             | 32 |
| 图 3-13 额定工况电机铁损.....           | 32 |
| 图 3-14 峰值输出转矩.....             | 33 |
| 图 3-15 峰值线电压.....              | 33 |
| 图 4-1 多目标优化流程图.....            | 34 |

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 图 4-2 优化参数结构示意图 .....   | 35 |
| 图 4-3 灵敏度分析模型 .....     | 36 |
| 图 4-4 灵敏度分析 .....       | 37 |
| 图 4-5 DOE 采样点分布 .....   | 38 |
| 图 4-6 3D 响应面 .....      | 39 |
| 图 4-7 种群分布图 .....       | 41 |
| 图 4-8 改进麻雀算法流程图 .....   | 43 |
| 图 4-9 运行结果图 .....       | 45 |
| 图 4-10 优化流程图 .....      | 46 |
| 图 4-11 帕累托前沿 .....      | 46 |
| 图 4-12 参数化结果 .....      | 48 |
| 图 4-13 参数化结果 .....      | 48 |
| 图 4-14 输出转矩对比 .....     | 50 |
| 图 4-15 相反电动势及谐波对比 ..... | 50 |
| 图 4-16 齿槽转矩对比 .....     | 51 |
| 图 4-17 电机自然冷却结构图 .....  | 53 |
| 图 4-18 额定工况稳态温度分布 ..... | 54 |
| 图 4-19 峰值工况瞬态温升 .....   | 55 |
| 图 4-20 效率 Map 图 .....   | 56 |
| 图 4-21 电机外特性 .....      | 56 |
| 图 4-22 电机结构图 .....      | 57 |
| 图 4-23 样机各部件图 .....     | 57 |
| 图 5-1 发动机冷却系统示意图 .....  | 60 |
| 图 5-2 节温器结构示意图 .....    | 60 |
| 图 5-3 散热器结构示意图 .....    | 61 |
| 图 5-4 离心泵结构示意图 .....    | 61 |
| 图 5-5 风扇结构示意图 .....     | 62 |
| 图 5-6 发动机模型 .....       | 65 |

---

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 图 5-7 水泵模型 .....         | 66 |
| 图 5-8 水泵特性曲线 .....       | 66 |
| 图 5-9 散热器与风扇模型 .....     | 67 |
| 图 5-10 节温器模型 .....       | 68 |
| 图 5-11 补偿水桶模型 .....      | 69 |
| 图 5-12 发动机冷却系统模型 .....   | 70 |
| 图 5-13 稳态工况仿真结果 .....    | 72 |
| 图 5-14 低速大扭矩工况仿真结果 ..... | 73 |
| 图 5-15 额定工况仿真结果 .....    | 74 |

插表清单

表 1-1 不同电机性能对比 .....3

表 2-1 风扇基本性能参数 .....9

表 2-2 水泵基本性能参数 ..... 11

表 3-1 电机基本技术指标 .....20

表 3-2 定子槽主要尺寸 .....22

表 3-3 绕组设计方案 .....23

表 3-4 电机主要设计参数 .....27

表 4-1 优化参数取值范围 .....35

表 4-2 参数与显著水平 .....38

表 4-3 评估结果 .....39

表 4-4 测试函数 .....43

表 4-5 实验结果对比 .....45

表 4-6 优化前后结果对比 .....49

表 4-7 各零部件材料及其热属性 .....53

表 4-8 额定工况损耗 .....54

表 4-9 峰值工况损耗 .....55

表 5-1 发动机模型参数 .....65

表 5-2 散热器与风扇主要参数 .....67

表 5-3 补偿水桶参数 .....69

表 5-4 其他子模型信息 .....69

表 5-5 传统系统相关参数 ..... 71

# 第1章 绪论

## 1.1 研究背景与意义

近几年，伴随社会经济水平的显著提高和居民生活质量的不断改善，汽车保有量呈现出稳步增长的趋势。图 1-1 展示了我国近年来汽车保有量的增长趋势。截至 2023 年，我国汽车保有量已突破 3.36 亿辆，同比增长 6.6%，未来汽车销量有望继续保持增长势头。汽车的保有量的增加与普及给化石能源储备带来了巨大压力，同时也造成环境污染与全球变暖<sup>[1]</sup>。据统计，商用车在汽车保有量中占比仅为 20%，但其发动机排放的 CO<sub>2</sub> 却占交通领域总排放量的 40%。

因此，在应对全球气候变化、实现碳和的大趋势下，重型商用车作为一个能源消耗严重，CO<sub>2</sub> 排放量较高的运输工具，成为减少碳排放的重要对象<sup>[2]</sup>。为了解决汽车工业未来发展中的高碳排放问题，中国与全球 194 个国家共同签署了《巴黎协定》，承诺到 2030 年实现 CO<sub>2</sub> 排放达峰，并将单位 GDP 的 CO<sub>2</sub> 排放量较 2005 年减少 60%-65%<sup>[3-4]</sup>。国家文件《新能源汽车产业发展规划(2021-2035)》与《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》分析了全球汽车技术的未来趋势，明确提出“低碳化、信息化、智能化”是核心发展方向<sup>[5]</sup>。在相关排放法规 and 政策的推动下，解决重型商用车高排放与高能耗问题已经刻不容缓。

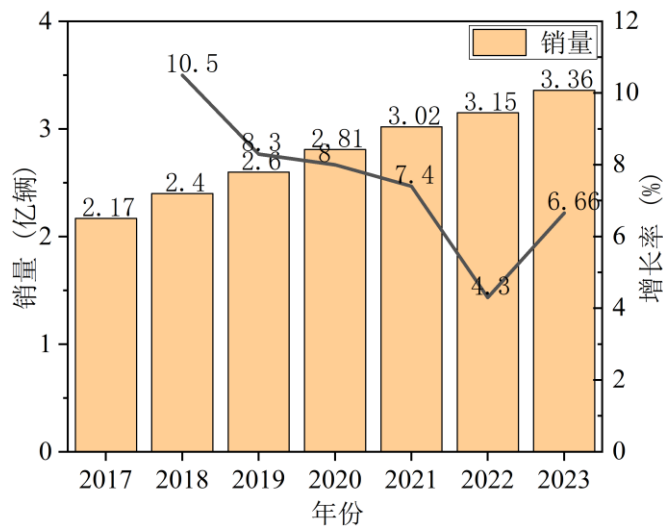


图 1-1 2017-2023 年汽车销量与增长率

发动机的热效率在很大程度上决定了发动机的能耗与排放。具体地，发动机热效率提升 1%，能耗降低幅度在 2%左右，相应的碳排放也降低 2%左右。传统重型商用车在运行过程中，发动机冷却系统消耗了大量能量，大大降低了发动机的热效率。图 1-2 展示了汽车高速运行时的能量平衡情况，从中可知，其中燃烧产生能量的 25%用于发动机轴输出，29%被发动机冷却系统以热量的形式散发。由此可知，冷却系统对于发动机而言是至关重要的，很大程度上影响着发动机的输出能力以及热效率。同时发动机冷却效果不佳会导致机体过热，从而会严重影响汽车运行的稳定性<sup>[6]</sup>。

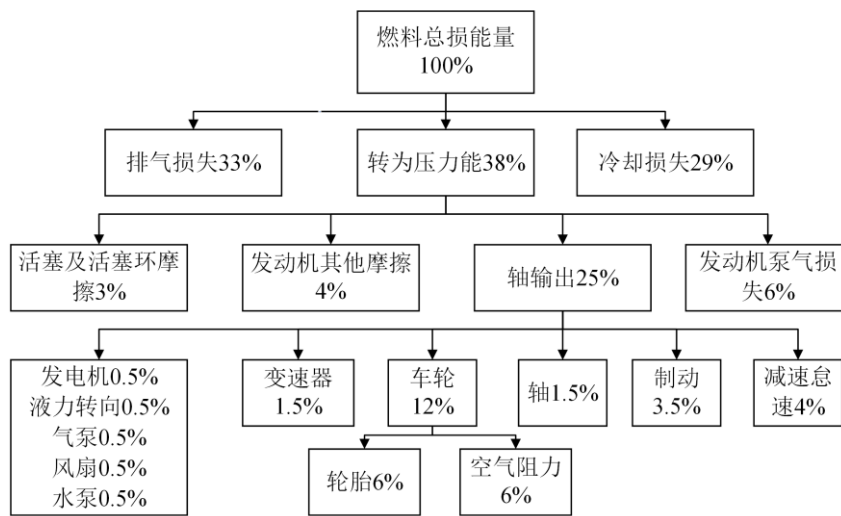


图 1-2 汽车运行能量平衡示意图

水泵和风扇是冷却系统的关键组件，对发动机冷却效果有重要影响。传统商用车的发动机附件通过皮带轮与曲轴连接，采用机械驱动方式。这种驱动方式，会使附件与发动机之间具有较强的关联性，导致附件的转速受限与发动机转速，会造成运行过程中冷却过剩或冷却不足的问题，严重影响发动机的工作效率<sup>[7]</sup>。而电子水泵和电子风扇通过电机驱动实现与发动机的解耦，支持智能化控制，并具备体积小、精度高、噪音低、能耗少、可靠性强等优势，能够显著降低发动机的能耗和排放。因此，深入研究发动机冷却系统电气化附件对降低重型商用车发动机能耗与排放和实现“双碳”目标是具有重大意义的。

风扇和水泵的驱动电机在很大程度上影响了电气化附件的效率，从而影响其节能潜力。例如：目前市场上水泵专用电机效率普遍较低，往往不足 70%，导致电子水泵效率低于 30%<sup>[8]</sup>。因此，开发满足电气化附件的高效节能驱动电机对提

升附件效率、提高发动机冷却效果、降低排放是具有重大意义的。表 1-1 为目前市场常用电机性能对比结果，由表可知永磁同步电机具有较高的效率，且调速范围广、可靠性好。因此，使用永磁同步电机驱动附件是提高电气化附件效率的关键途径。当前，车辆发动机结构正朝着集成化和复杂化方向发展，内部零件布局日益紧凑，这对冷却系统零部件的结构和性能提出了更高要求<sup>[9]</sup>。不同于乘用车，重型商用车的工作环境更加恶劣，发动机散热量更大，对电气化附件的要求更高。因此，高功率密度、可靠性强、高效的永磁同步电机对提高电气化附件的效率和降低发动机能耗是具有重大意义的。

表 1-1 不同电机性能对比

| 性能        | 直流电机      | 交流异步电机     | 永磁同步电机     | 开关磁阻电机 |
|-----------|-----------|------------|------------|--------|
| 功率密度      | 低         | 中          | 高          | 较高     |
| 转速范围(rpm) | 4000-6000 | 9000-15000 | 4000-15000 | >15000 |
| 最高效率      | 85-90     | 90-95      | 95-97      | <90    |
| 转矩性能      | 一般        | 较好         | 好          | 较好     |
| 可靠性       | 差         | 好          | 好          | 好      |

## 1.2 课题中关键技术国内外研究现状

### 1.2.1 电气化附件国内外研究现状

传统水泵与风扇都是采用机械式拖动方式，由于受限于发动机转速，导致发动机在低速大扭矩或启动预热时容易出现冷却不足或冷却过剩的问题，造成发动机能耗过高和预热缓慢。近年来，乘用车电气化附件发展迅速，为商用车电气化附件发展提供理论基础，同时大大推动了商用车电气化附件的发展进程。

#### (1) 电子水泵国内外研究现状

1997 年，法国 Valeo 公司开启了对电子水泵技术的研究，并在 1999 年，将电子水泵技术应用于发动机冷却系统，目的是为了提升发动机的散热能力和降低发动机能耗。这项技术使发动机与水泵实现了解耦，不仅加快了暖机速度，还显著降低了发动机的能耗<sup>[10]</sup>。2000 年，Elena-Cortona 团队着手将冷却系统从机械

驱动模式转向电控驱动模式，重点研究对象为电子水泵<sup>[11]</sup>。并在发动机控制器（ECU）的控制下，优化了发动机冷却系统的控制策略。最终得出结论：电子水泵功耗约为机械水泵的 15%<sup>[12]</sup>。2005 年，德国宝马汽车公司首次将电子水泵技术应用于 N52 系列汽油发动机，并成功实现量产<sup>[13]</sup>。电子水泵应用于发动机冷却系统可以实现与发动机的解耦。相比传统机械水泵，电子水泵在冷却液由 90℃ 上升到 110℃ 可以节省油耗 2%~5%，功耗可节约 2 kW<sup>[14]</sup>。2012 年，胜德号等<sup>[15]</sup>以客车为实验对象，对搭载电子水泵的发动机冷却系统进行了实验验证。最终实验结果表明：较传统机械水泵，搭载电子水泵的发动机在热机时间和油耗方面得到明显改善。2014 年，博格华纳研究了一款采用直流无刷电机驱动的电子水泵（ATCP），其工作电压在 8-18 V 之间，流量可达 25 L/min<sup>[16]</sup>。并在 2016 年，博格华纳将为中国 SUV 搭载功率为 100 W 的电子水泵系统，用于辅助涡轮增压系统，并间接为风冷系统供能<sup>[17]</sup>。2015 年，长安大学王永飞等<sup>[18]</sup>以宝马 520Li 发动机冷却系统的电子水泵为研究对象，对电子水泵进行性能仿真，结果显示：该电子水泵压力分布、速度分布都处于合理范围内。2017 年，韩军良等<sup>[19]</sup>采用无刷直流电机作为驱动电机设计开发了一款电子水泵，采用了无位置传感器的磁场定向控制方案，实验结果证明了该电子水泵系统的可行性。同年，胡攀等<sup>[20]</sup>在一款增程式发动机上搭载了电子水泵，并对此发动机进行相关实验验证，结果显示此发动机暖机时间和油耗得到了显著降低。2020 年，高腾麟等<sup>[21]</sup>使用电气化附件取代传统机械部件，并使用 Flowmaster 软件完成冷却系统建模，在新标欧洲循环测试（NEDC）工况下比较传统与电气化部件的功耗。结果表明：采用电气化附件的冷却系统节能效果显著。2021 年，李亚伟等<sup>[22]</sup>为了获得电子水泵有关振动噪声的实验数据，对不同电子水泵进行了 NVH 实验，并得出结论：电子水泵产生噪音的主要原因是脉冲宽度调制。2022 年，杨元健等<sup>[23]</sup>为了解决某一款电子水泵效率低、运行稳定性差的问题，对此款电子水泵的叶轮进行了优化。2024 年，龚元明等<sup>[24]</sup>为了，通过开发一种新型电子水泵测试平台，成功解决了目前电子水泵测试方法精度不够、自动化程度低等问题。

## （2）电子风扇国内外研究现状

1981 年，美国将传统的连轴式风扇改为电动风扇，至此电子风扇正式诞生

[25]。在 1989 年, Roger Clemente<sup>[26]</sup>首次将电子风扇应用于载重汽车的冷却系统。但当时受限于汽车电子风扇体积较大、功率较高, 导致应用场景较为有限。1992 年, 美国发明专利中将散热器布置在风扇后面, 以此达到散热的目的<sup>[27]</sup>。1995 年, 为了解决电机电流过大, 导致设计困难的问题, McCleer.P.J 使用 H 桥和双极总线驱动以及五相电机设计了一款电子风扇<sup>[28]</sup>。2007 年, 国际电机驱动会议提出了一种 24 V 电子风扇控制系统, 相较于 13 V 的有刷直流电机, 24 V 的无刷直流电机具有更高的效率以及对发动机有更好的冷却效果<sup>[29]</sup>。2014 年, 黎灿辉等<sup>[30]</sup>基于公交客车平台, 对比了电子风扇冷却的发动机热管理系统与皮带直驱风扇冷却系统的性能, 在两条不同公交路线测试结果显示: 搭载电子风扇的发动机冷却系统油耗分别降低 6.3%和 6.77%。2015 年, 李儒男等<sup>[31]</sup>提出了一种智能冷却系统的后冷却方案, 并通过车载实验对比分析, 确定了电子水泵与电子风扇协同工作的最优冷却方案, 显著提升了发动机冷却效果。2016 年, 张鹏飞等<sup>[32]</sup>根据风扇的一些主要参数, 推导出一种计算电子风扇散热性能的计算方法, 此方法有效提升了电子风扇开发效率, 降低风扇与发动机冷却系统的匹配难度。2019 年, 胡巧声等<sup>[33]</sup>基于实验数据建立以风扇转速为输出的控制函数, 采用无极调速控制策略, 实现发动机出水温度的精确控制。2020 年, 程振徐等<sup>[34]</sup>为了研究电子风扇和电子节温器的控制策略, 通过风扇转速 map 图, 制定了风扇与节温器的联合控制策略。结果表明: 此策略不经可以精准控制风扇转速, 还可以有效降低风扇功耗。同年, 邓彦波等<sup>[35]</sup>通过编写电子风扇控制策略, 对发动机水温进行智能化调节, 从而实现冷却效果的提升。2021 年, 张世强等<sup>[36]</sup>通过分析运行过程中的汽车电子风扇系统, 制定了控制系统的设计方案, 并研制出电子风扇控制器。通过实车性能验证得出: 采用电子风扇的发动机具有更好的节油效果。2022 年, 金亮等<sup>[37]</sup>为了解决电子风扇驱动电路物理特性复杂而造成仿真时间过长的问題, 提出了基于窗傅里叶变换和三次样条插值法的辐射电场时频域计算方法。2023 年, 韩前鹏等<sup>[38]</sup>根据乘用车电子风扇的结构特点, 提出了一种新型电子风扇简化模型, 并构建了风扇参数化模型。

当下新能源乘用车如奇瑞、比亚迪、特斯拉、宝马等已普遍搭载电子水泵与电子风扇, 但是电子水泵和电子风扇在重型商用车上的应用却是寥寥无几。不同

于乘用车，商用车冷却系统附件功率更高，常规的 12 V 或 24 V 电压无法满足功率输出。目前，商用车的冷却系统无法根据发动机的冷却需求去智能调节风量与水量，冷却方式较为被动，且在一定程度上能耗较高<sup>[39]</sup>。因此，深入研究混动发动机冷却系统电气化附件对降低发动机能耗和排放是具有重大意义的。

### 1.2.2 永磁同步电机优化设计研究现状

永磁同步电机因其高功率密度、宽调速范围和强过载能力等优势，已在多种电动汽车中得到广泛应用<sup>[40]</sup>。对于电子水泵和电子风扇来说，驱动电机的优化设计尤为重要，决定了电子水泵和电子风扇的工作效率和输出稳定性。目前永磁同步电机优化设计主要通过改变定转子拓扑结构来实现电机转矩、效率、损耗的优化。永磁同步电机性能通常由多个指标决定，多目标优化设计因此被提出。现阶段，永磁同步电机的多目标优化主要依赖多种优化算法完成。包括一些常见的粒子群算法<sup>[41]</sup>、遗传算法<sup>[42]</sup>、蚁群算法<sup>[43]</sup>等。

李放等<sup>[44]</sup>为了改善永磁同步电机的电磁振动性能，提出了基于多目标遗传算法的分层优化策略。优化结果显示：在满足输出性能和强度的情况下，电磁振动得到了有效抑制。华逸舟等<sup>[45]</sup>为了提高永磁同步电机的转矩和悬浮性能，提出了一种结合响应面法与粒子群优化算法的多目标优化设计方法。以输出转矩和转矩脉动为优化目标，并采用改进粒子群算法对响应面模型寻优。优化结果表明，电机的转矩和悬浮性能显著提高。柳洪等<sup>[46]</sup>为了提升永磁同步电机的整体性能，以永磁体尺寸为优化变量，以输出转矩、转矩脉动和齿槽转矩为目标，利用广义回归神经网络拟合仿真数据并建立非线性模型，最终通过果蝇算法完成优化。林玥兵等<sup>[47]</sup>为了提升电机转矩密度与全转矩范围内运行效率，提出一种从磁极局部优化到电机整体模型-数据融合优化的设计方法。陈启明等<sup>[48]</sup>针对电机气隙磁密谐波含量高的问题，对转子做了偏心设计。Dong-Kuk Lim 等<sup>[49]</sup>为了改善电动汽车永磁同步电机性能，提出了一种新型代理辅助多目标优化算法。以转矩脉动、转矩幅值、永磁体用量为优化目标，改善电机噪声、振动和成本。Arash Abroshan 等<sup>[50]</sup>为了抑制永磁同步电机的齿槽转矩，提出了一种结合设计参数分层和响应面法（RSM）相的多目标优化方法。以永磁体宽度、磁极张开角、定子槽宽等作为优化变量，齿槽转矩幅值和平均转矩作为优化目标。优化结果显示：齿槽转矩

下降 71.5%，转矩脉动下降 65.6%，平均转矩提高 12%。Reza Ilka 等<sup>[51]</sup>通过采用多目标优化方法非支配排序遗传算法（NSGA-II）去寻找表贴式永磁同步电机的最优设计，从优化得到的帕累托集合中选择最佳设计方案。在此设计方案下永磁同步电机的齿槽转矩得到了大幅降低，有效改善了电机的振动噪声。Jong-Woon Park 等<sup>[52]</sup>采用混合人工蜂群算法-支持向量机（HAS）算法，对车用永磁同步电机优化设计进行了全面研究。为了验证算法的有效性，本研究利用两个测试函数对比此算法和传统算法的寻优能力，验证了此算法的优越性能。

目前，永磁同步电机的优化效果在很大程度上决定了电机的整体性能。因此，选择一种合适的优化方法对永磁同步电机优化设计是至关重要的。同时，具有卓越性能的永磁同步电机可以有效改善电气化附件的工作性能，可以有效降低能量的损耗，提升电气化附件的整体效率。

### 1.3 本文主要研究内容

本文以一款重型商用车 13 L 气体发动机的冷却系统为研究对象，根据发动机实际冷却需求设计了电子水泵与电子风扇，本文重点是附件电机的设计。首先，根据传统附件功测试实验确定不同转速下传统水泵、风扇的功耗、流量、扭矩等参数，确定附件电机的设计要求，并且根据水泵、风扇安装空间确定附件电机的尺寸边界。其次，基于设计要求利用 Motor-CAD 软件完成永磁同步电机的初步设计，并采用改进麻雀算法对永磁同步电机进行多目标优化。最后，利用 AMEsim 软件搭建发动机冷却系统模型，通过对发动机冷却系统散热性能的仿真分析，验证电子水泵与电子风扇的可行性。本文的研究内容如图 1-3 所示：

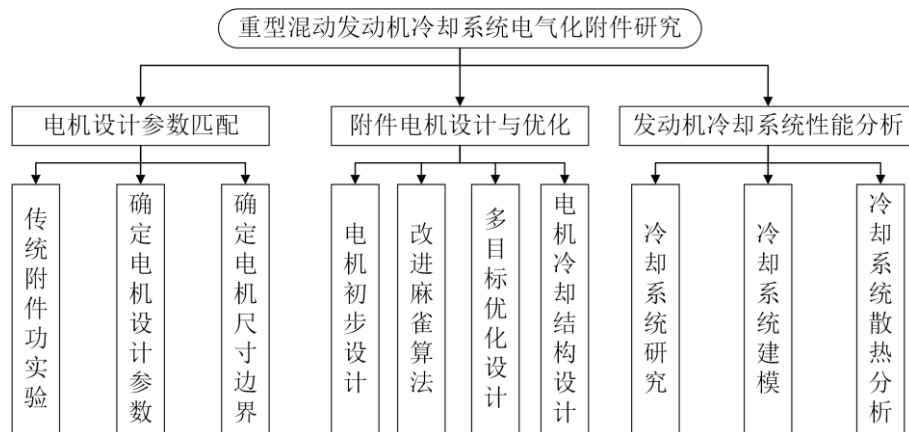


图 1-3 本文研究框架图

基于对发动机冷却系统电子水泵和电子风扇的研究，全文安排如下：

第 1 章为绪论。介绍了本文的研究背景与意义，总结了重型商用车冷却系统目前存在的问题，以及不同电机的优劣势。并对电子水泵、电子风扇、永磁同步电机优化设计的国内外研究现状进行了分析。

第 2 章为电机设计参数匹配。首先，根据实验计划搭建实验台架，利用电机驱动水泵和风扇的形式，测试发动机不同转速下水泵和风扇的转速、扭矩，从而确定附件电机的设计要求。再根据发动机的安装空间确定附件电机的尺寸边界。

第 3 章为附件电机初步设计与电磁性能分析。首先，根据第一章确定的电机设计要求，根据电机的理论设计确定电机的主要设计参数，利用 Motor-CAD 软件搭建初始电机模型。其次，通过对比不同槽极配比方案下的电磁性能，确定最佳槽极配比。最后，对永磁同步电机的不同工况进行仿真分析。

第 4 章为永磁同步电机多目标优化热分析。首先，以输出转矩、转矩脉动、反电动势幅值为优化目标，以永磁体宽度、槽口宽度、隔磁桥宽度等参数为优化参数，对结构参数进行灵敏度分析，并使用二次线性回归方程建立响应面模型。其次，对麻雀算法进行改进，并对比改进麻雀算法和传统算法的寻优能力。最后，使用改进麻雀算法对电机进行多目标优化，并对优化后电机的冷却结构进行设计。

第 5 章为发动机冷却系统散热分析。首先，对重型商用车发动机冷却系统进行，并分析发动机冷却系统的影响因素。其次，基于所设计的电子水泵与电子风扇搭建发动机冷却系统仿真模型。最后，分别仿真计算发动机冷却系统在不同工况下的散热能力。

第 6 章为总结与展望。总结了本文主要研究内容以及得到的结论，并对待研究的问题进行了展望。

#### 1.4 本章小结

本章对汽车发展趋势以及目前重型商用车面临的问题进行了阐述，分析了传统商用车发动机冷却系统附件存在的问题，引出了研究电子水泵、电子风扇的必要性，并介绍了国内外电气化附件与永磁同步电机的研究现状。最后对论文的各个部分内容进行了简述。

## 第2章 电机设计参数匹配

为了确定附件电机的设计参数,本章对传统水泵与风扇进行了附件功测试实验。首先,对冷却水泵与冷却风扇的基本性能参数进行研究,为后续传统附件功测试提供理论基础与实验方向;其次,搭建传统附件功测试台架与制定实验计划;最后,根据实验数据以及发动机实际运行工况特点确定附件电机的功率、转速,并根据冷却附件在发动机上的实际安装空间确定附件电机的尺寸边界,完成附件电机设计参数确定。

### 2.1 冷却系统附件基本性能参数

#### 2.1.1 冷却风扇基本性能参数

冷却风扇的主要性能参数包括风量、功率、静压效率、噪声性能<sup>[53]</sup>。风扇基本性能参数信息如表 2-1 所示。如表可知,冷却风扇的最大功率为 36.088 kW,最大风量为 12.9 kg/s。

表 2-1 风扇基本性能参数

| 参数                      | 值      |
|-------------------------|--------|
| 出风口有效面积/mm <sup>2</sup> | 0.408  |
| 最大转速/rpm                | 2100   |
| 最大风量/(kg/s)             | 12.9   |
| 最大功率/kW                 | 36.088 |
| 最大静压/kpa                | 3.108  |
| 最高效率/%                  | 46.79  |

每个性能参数的表现取决于冷却风扇结构、叶片形状参数、以及冷却风扇所处工作环境。其中,冷却风扇结构决定了风扇性能。

以下是风扇基本性能参数的具体说明:

##### (1) 风量

风量是冷却风扇能够输送空气的体积,对于车用冷却风扇,风量越大,散热

效果越好。风量的大小可以通过风扇的转速、叶片的尺寸以及风扇的效率等因素来确定。计算公式为：

$$Q = A \cdot v \quad (2-1)$$

式中， $Q$  为风量，单位为  $\text{m}^3/\text{min}$ ； $A$  为风扇出风口的有效面积，单位为  $\text{m}^2$ ； $v$  为风速，单位为  $\text{m}/\text{min}$ 。

## (2) 静压

静压是指冷却风扇所产生的气流压力，与风扇的风量成反比。具体来说，静压是指风扇运行时，风扇前端产生的空气压力，它是空气流动所需克服阻力的一部分。其计算公式为：

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (2-2)$$

式中， $P$  为静压，单位为  $\text{Pa}$ ； $\rho$  为空气密度，通常取  $1.225\text{kg}/\text{m}^3$ 。

## (3) 功率

功率指的是冷却风扇在运行过程中所消耗的机械功率，风扇的功率与风扇转速、扭矩相关。其计算公式为：

$$N_t = \frac{T \cdot n}{9.55} \quad (2-3)$$

式中， $T$  为风扇轴端输入扭矩，单位为  $\text{Nm}$ ； $n$  为风扇轴转速，单位为  $\text{rpm}$ ； $N_t$  为轴端输入功率，单位为  $\text{W}$ 。

## (4) 静压效率

风扇的有效功率是指风扇将电能转化为使空气流动的机械能的功率。计算公式为：

$$N_{st} = P \cdot Q \quad (2-4)$$

式中， $N_{st}$  为静压有效功率，单位为  $\text{W}$ 。

静压效率  $\eta$  通常是通过比较风扇输入功率和实际产生的空气静压功率得出的。其计算公式为：

$$\eta = \frac{N_{st}}{N_t} \quad (2-5)$$

在汽车冷却系统中，静压效率越高的风扇能够在较小的功率消耗下产生足够

的静压，从而推动空气通过发动机散热器和冷却器。这不仅提高了系统的散热效果，还降低了对发动机功率的需求，有助于提高汽车的整体能效。

#### (5) 噪声

冷却风扇的噪音是另一个重要的性能指标。噪音通常以分贝 (dB) 来表示。噪音的产生受到风扇的叶片设计、转速、空气流动等因素的影响。通常通过实验室测试来测量噪音。空气动力噪声是风扇噪声的主要来源之一，尤其在高转速和大风量的风扇中尤为显著。风扇叶片在旋转时，与空气的相对运动会引起一系列气流现象，包括压力波动、湍流、分离流等，这些都会产生噪声。空气动力噪声一般分为三类：单极子噪音、偶极子噪音和四极子噪音<sup>[54]</sup>。

#### 2.1.2 冷却水泵基本性能参数

冷却水泵的主要性能参数决定了泵的工作能力、效率以及在特定冷却系统中的适用性。其主要性能参数包括流量、扬程、转速、功率及效率等<sup>[55]</sup>。水泵基本性能参数信息如表 2-2 所示。如表可知水泵最大功率为 7.37 kW，最大流量为 1219 L/min。

表 2-2 水泵基本性能参数

| 参数           | 值     |
|--------------|-------|
| 最大流量/(L/min) | 1219  |
| 最大转速/rpm     | 3530  |
| 最大扬程/m       | 25.84 |
| 最大功率/kW      | 7.37  |
| 最高效率/%       | 60.14 |

以下是水泵基本性能参数的具体说明：

##### (1) 流量

流量指的是液体单位时间内流过水泵的体积或者质量，因此，液体流量有体积流量和质量流量两种表达方式。其两者关系如下：

$$Q_m = Q_v \cdot \rho \quad (2-6)$$

式中， $Q_v$  为体积流量，单位为 L/min； $\rho$  为液体密度，单位为 g/L； $Q_m$  为质量流量，单位为 g/min。

## (2) 扬程

扬程是指水泵克服管道和设备的阻力，能够推动冷却液流动的能力。其表达式如下：

$$H = E_d - E_s \quad (2-7)$$

式中， $H$  为扬程，单位为  $m$ ； $E_d$  单位冷却液在泵出口的能量； $E_s$  为单位冷却液在泵入口的能量。

## (3) 转速

转速指的是冷却水泵轴旋转速度，单位为  $rpm$ 。水泵的流量与转速之间有着密切的关系，水泵流量随着水泵转速增加而增加。

## (4) 功率和效率

冷却水泵功率分为输出功率和输入功率，输入功率水泵运行所需的轴功率，用符号  $P$  表示。输出功率指是指水泵在实际工作中传递给流体的有效功率，用  $P_e$  表示，其公式如下：

$$P_e = \frac{HQ_m g}{1000} = \frac{\rho g Q_v H}{1000} = \frac{\gamma Q_v H}{1000} \quad (2-8)$$

式中， $\rho$  为冷却液的密度，单位为  $kg/m^3$ ； $g$  为重力加速度，单位为  $m/s^2$ ； $\gamma$  为冷却水泵中输送介质的重度，单位为  $N/m^3$ 。

冷却水泵在流动时产生的摩擦损失是由于水泵内部和外部的流体与固体界面（如泵体、管道、叶轮等）之间的摩擦作用所造成的能量损耗  $\sum h_p$ ；由冷却液在水泵内部流动时，因扩张、收缩或转弯等过程会产生冲击，造成的能量损失  $\sum h_m$ ；单位重量的冷却液在水泵中流动而损失的总能量称为水力损失  $\sum h_h$ 。由于水力损失的存在，使得实际扬程  $H$  比理论扬程  $H_T$  要小。其表达式为：

$$H = H_T - \sum h_h \quad (2-9)$$

水泵能量损失通常是由于各种物理现象、流体与固体表面之间的相互作用、以及泵和系统设计等因素引起的。每种能量损失都有其效率，按照能量损失方式的不同，可分为：机械损失、水利损失、容积损失，分别对应的效率为机械效率、水力效率、容积效率<sup>[56]</sup>。

水力效率表示水泵将输入的机械能（由电机或其他驱动源提供）转化为流体能量（即水流的扬程和流量）的比例，用 $\eta_h$ 表示。简言之，就是水泵在流体传递过程中的能量转化效率。其表达式如下：

$$\eta_h = \frac{\rho g Q_V H}{\rho g Q_T H_T} = \frac{H}{H_T} \quad (2-10)$$

容积损失 $P_V$ 是由于泵内流体在工作过程中，部分流体未能有效被输送，造成有效输送量减少的损失。这类损失通常发生在泵的内部密封和容积变化过程中，如叶轮、泵壳、轴承或密封部分的间隙中。回流的液体量为称为泄漏量 $q$ ，因此泵的实际流量 $Q_V$ 为理论流量 $Q_T$ 与泄漏量 $q$ 的差值。泵的容积效率 $\eta_V$ 为水泵实际流量功率与理论流量功率的比值。其表达式如下所示：

$$Q_V = Q_T - q \quad (2-11)$$

$$\eta_V = \frac{\rho g H_T Q_T - \rho g H_T q}{\rho g H_T Q_T} = \frac{\rho g H_T Q_V}{\rho g H_T Q_T} = \frac{Q_V}{Q_T} \quad (2-12)$$

冷却水泵的机械损失 $P_m$ 是指在水泵运行过程中，泵的机械部件（如轴承、密封、叶轮等）由于摩擦、振动、磨损等因素产生的能量损失。机械效率 $\eta_m$ 与机械损失 $P_m$ 关系式如下：

$$\eta_m = \frac{P - P_m}{P} = \frac{\rho g H_T Q_T}{P} \quad (2-13)$$

因此，水泵的总效率为 $\eta$ 为各个效率的乘积，其表达式如下：

$$\eta = \frac{\rho g Q_V H}{P} = \frac{\rho g Q_V H}{P} \frac{H_T Q_T}{H_T Q_T} = \frac{\rho g H_T Q_T}{P} \frac{Q_V}{Q_T} \frac{H}{H_T} = \eta_m \eta_V \eta_h \quad (2-14)$$

## 2.2 传统附件功测试实验

为了确定传统机械水泵与风扇在不同转速下实际功率与扭矩，本文对传统附件功耗进行了测试。由于普通台架无法模拟真实汽车行驶环境，且传统水泵与风扇是依靠发动机驱动，难以自动调节附件转速。因此，本实验通过电机拖动风扇与水泵，并且在整车台架上模拟发动机实际工况下风扇与水泵的运行情况，确保所测得的水泵与风扇功耗符合车辆实际运行工况。

### 2.2.1 实验方案布置与台架搭建

为了使实验布置方案能够相对简单减少工作量,本实验采用一个电机支架固定于发动机下方,然后将电机与支架相固定,实验布置方案如图 2-1 所示。此外为了使电机能够驱动风扇和水泵,设计了一款新型皮带轮取代传统曲轴皮带轮。此皮带轮与曲轴空套,旋转不受发动机影响,由前后两个带轮组成,前带轮用于和电机皮带轮传动,后皮带轮用于带动附件皮带轮,从而驱动附件。考虑到此电机的转速较高,因此本次传动设为减速,电机与风扇、水泵速比分别为 2.76、1.69。

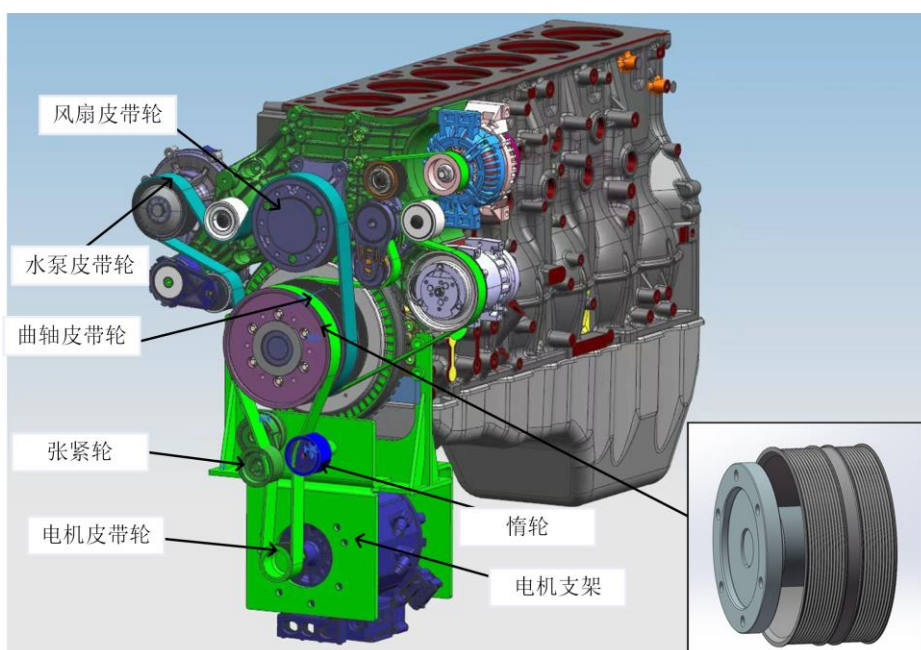


图 2-1 实验布置方案

本实验为了测试不同工况下的风扇与水泵的功耗,搭建了传统附件功测试整车台架,整车实验台架示意图和整车实验台架实物图如图 2-2 和 2-3 所示。整车实验台架包括发动机、驱动电机、风扇、水泵、电机控制器、上位机、稳压电源、变频器、传感器、采集柜。实验过程中,变频器从电路中获得 380 V 交流电压,然后变频器向电机控制器提供 540 V 直流电压,电机控制器经过逆变向驱动电机输入交流电压。上位机采用速度模式向电机控制器发送控制指令,实现对电机转速控制,从而实现水泵与风扇转速的调节,同时监控电机电流、扭矩、转速等参数,台架上位机监控风扇转速、水泵进出水温度、压力、流量等参数。

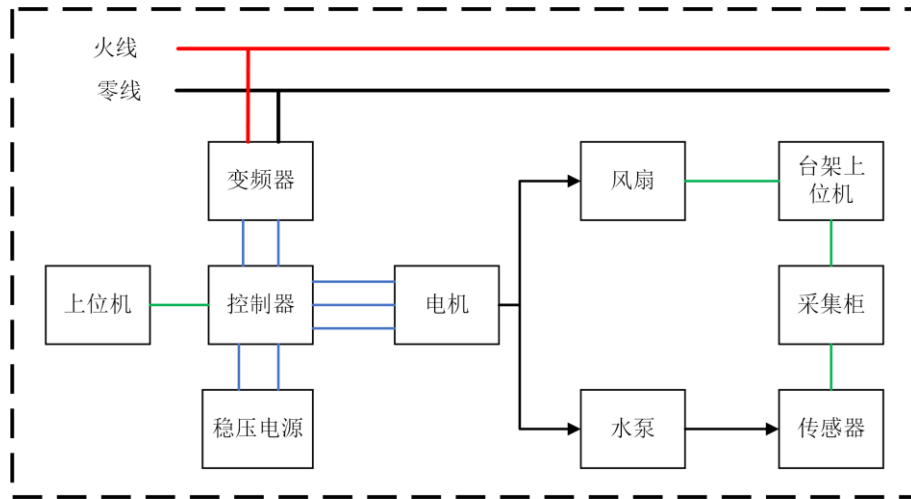


图 2-2 实验台架示意图

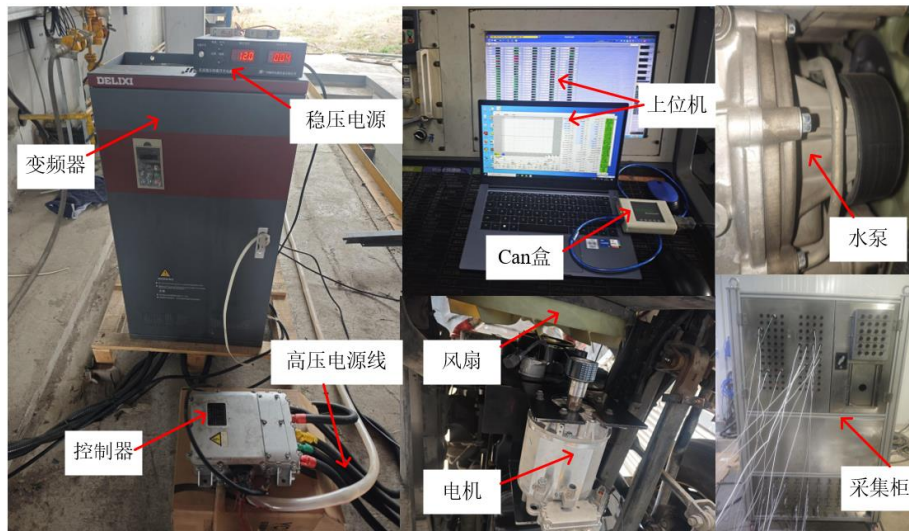


图 2-3 实验台架实物图

## 2.2.2 实验方法

本文测试对象为一台 13 L 的气体发动机的电控硅油离合风扇和机械水泵。其中电控硅油离合风扇的外径为 770 mm，叶片外圈带有圆环，称为环形风扇；机械水泵的最大流量大于 1200 L/min，最大扬程大于 25 m。本次实验为了模拟传统水泵与风扇的真实工况，根据发动机与水泵和风扇的速比，测试发动机从 600 rpm 到 1700 rpm 下风扇与水泵的功耗。由于本次实验装置无法单独测试风扇与水泵功耗，因此本次实验将先测试水泵与风扇在对应转速下的总功耗，然后将风扇拆卸，单独测试水泵的功耗，最终利用总功耗减去水泵功耗得到风扇功耗。本次实验计划如下所示：

### （1）风扇水泵总功耗测试

发动机停机，节温器 100%开度，发动机转速从 600 rpm—1700 rpm，步长为 100 rpm，安装风扇，进行水泵与风扇总功耗测试。

## (2) 水泵功耗测试

发动机停机，控制节温器开度分别为 100%，75%，50%，25%，0%，发动机转速从 600 rpm—1700 rpm，步长为 100 rpm，风扇不安装，进行水泵功耗测试。

由于皮带轮传动存在打滑现象。因此，为了控制实验误差，在实验前会对带轮的滑差率进行验证，确保滑差率在要求范围之内。在滑差率较低的情况下，损耗较低，可以近似认为电机功率等于水泵功率+风扇功率。同时为了能够主动调节节温器开度，本实验对采用工装节温器，破坏原有节温器结构，使石蜡作用失效，如图 2-4 所示。此款节温器的总行程为 10 mm，通过在节温器底部焊接不同高度的铁圆环控制节温器开度，实现冷却系统水流量和水阻力调节。

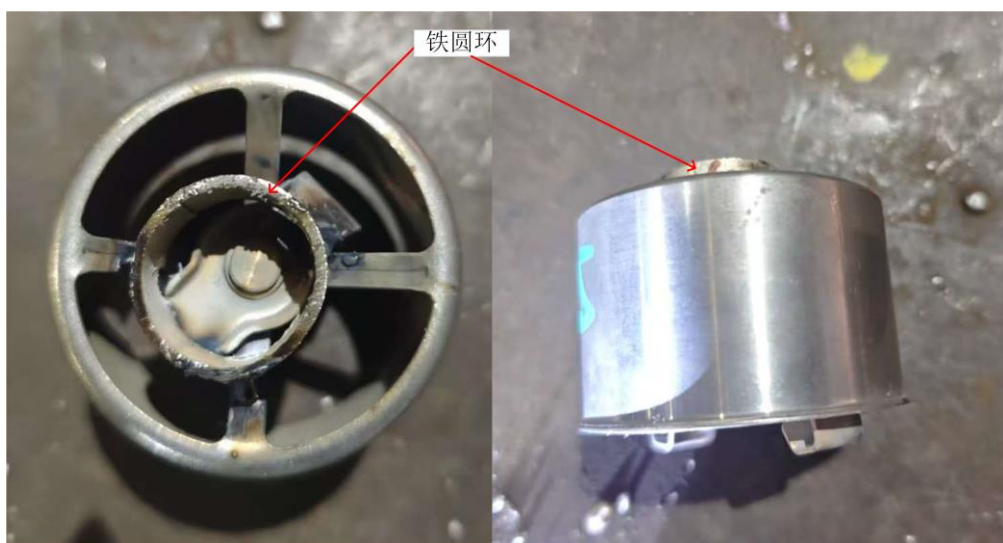


图 2-4 工装节温器

## 2.3 实验结果数据处理与分析

图 2-5 为风扇水泵总功耗测试图。由图 2-5 (a), (b)可知，随着电机转速的增加，驱动电机电流有效值、扭矩、功率增加，最大值分别为 105 A、60 Nm、36.1 kW。这是由于风扇、水泵与驱动电机是定速比传动，当电机转速的上升时，风扇和水泵的转速也会随之增加，促使电机输出功率增加。

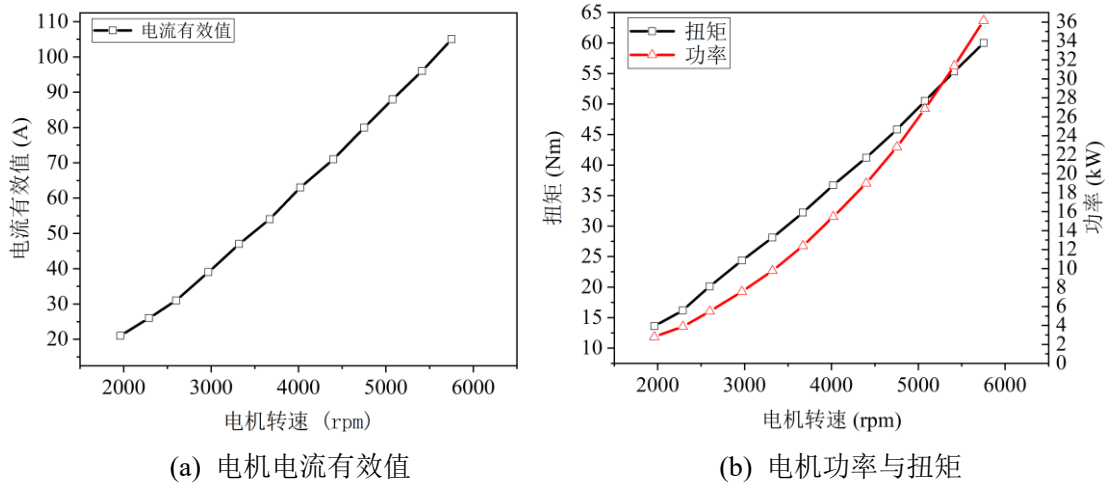
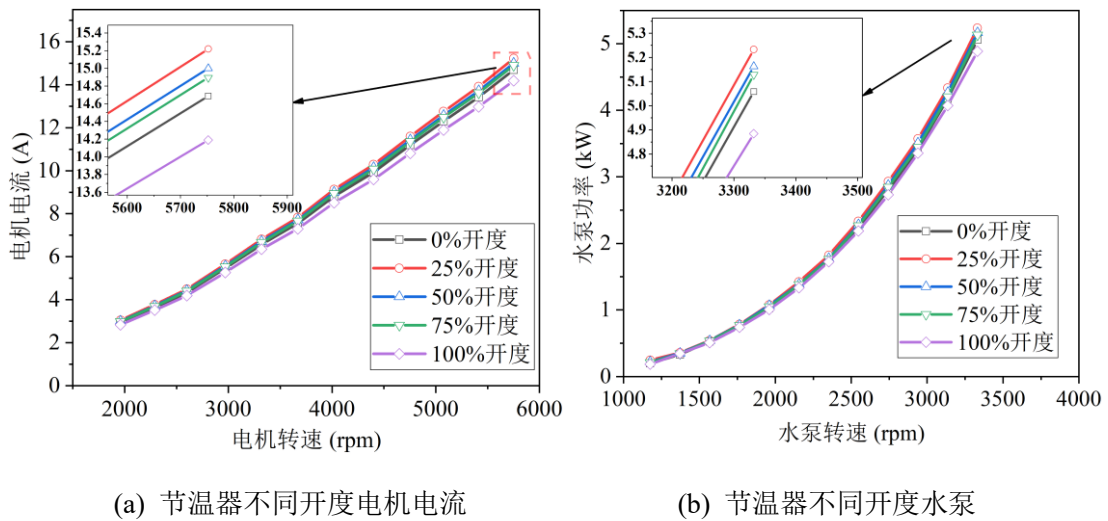


图 2-5 风扇水泵总功耗测试

图 2-6 为水泵功耗测试图，由图 2-6 (a)、(b)、(c)可知，随着电机转速和水泵转速的上升，电机电流、水泵功率、流量都在增加。此外，发动机转速为 1700 rpm，节温器开度为 25%时，水泵流量和功率最大，分别为 830 L/min、5.2 kW。这是因为当节温器开度为 25%时，系统的水阻力最小，使得水泵流量最大，但此时经过散热器的流量并非最大。当节温器开度为 100%时，发动机冷却系统散热能力达到最强，此时流经散热器的水流量达到最大，水泵总流量为 741.4 L/min。

由于发动机的常用转速为 1000 -1400 rpm，额定转速为 1700 rpm。因此，取发动机转速 1400 rpm 为额定工况点，此时水泵功率约为 2.8 kW；取发动机 1700 rpm 为水泵的峰值工况，此时水泵功率约为 5.2 kW。由图 2-6 (d)可知，风扇的最大功率约为 31 kW，峰值扭矩为 146.3 Nm。



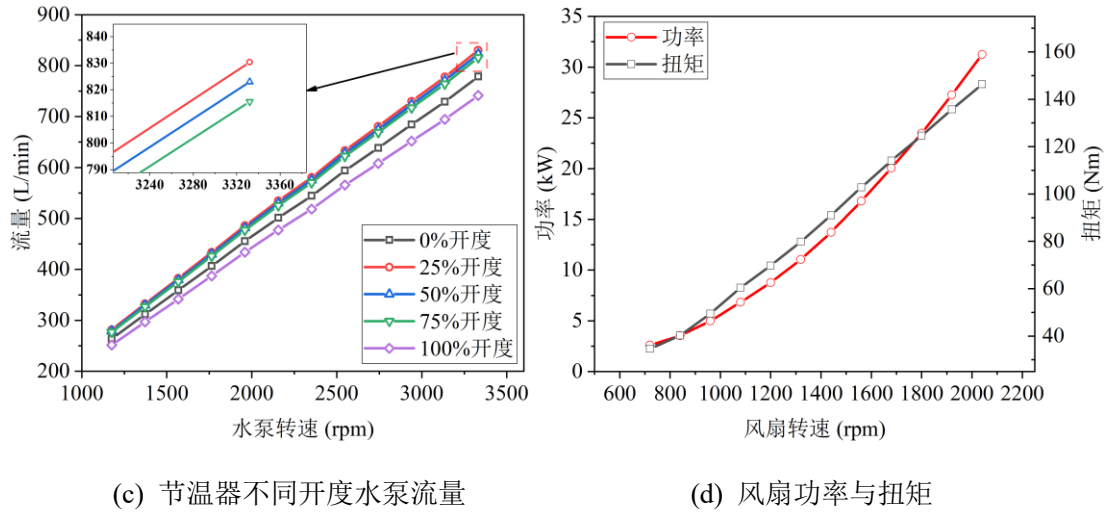


图 2-6 水泵功耗测试

根据上述实验数据可知，风扇的输入功率约为水泵输入功率的 6 倍。因此，为了减少附件电机设计的工作量以及电机加工成本，计划将采用 6 个水泵电机驱动风扇，将风扇拆分成 6 个独立的小风扇，如图 2-7 (a)电子风扇布置图所示。与此同时，为了解决传统水泵、风扇能量损耗大、冷却效果不佳等问题，采用散热器+电子水泵+电子风扇电气化发动机热管理系统方案（如图 2-7 (b)所示），此方案具有风阻小，风扇功耗低，响应迅速、峰值功率大等特点。

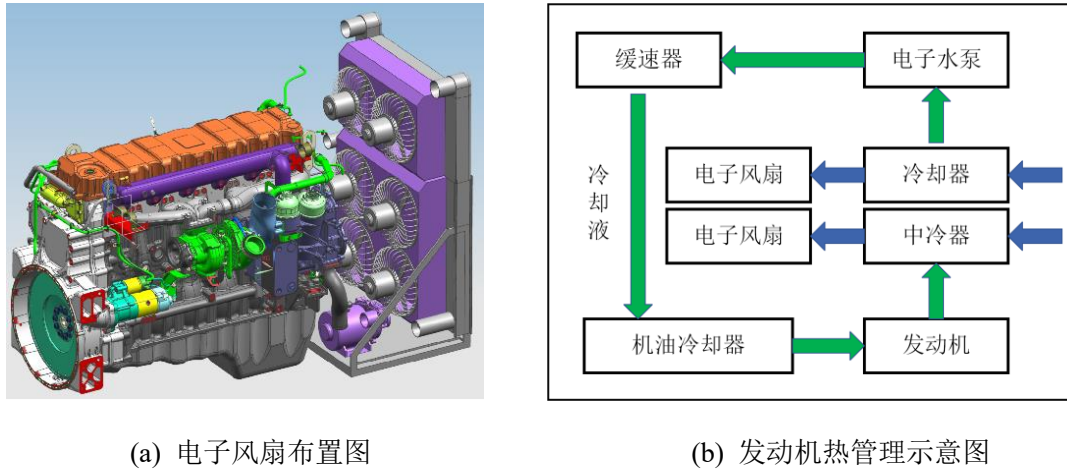


图 2-7 发动机热管理系统方案

## 2.4 电机边界尺寸确定

由 2.3 节实验结果可知，风扇和水泵将采用同一个电机。相较于风扇电机，水泵电机的安装条件较为苛刻。因为水泵是布置发动机轮系端，这导致水泵电机

的径向尺寸受限于节温器座、轮系、支架等。此外，水泵电机的轴向空间受限于风扇，水泵与风扇之间要留有足够空间，以防止风扇在高速旋转发生前后窜动，从而造成与水泵的接触。水泵电机轴向尺寸边界和径向尺寸边界如图 2-8 所示。

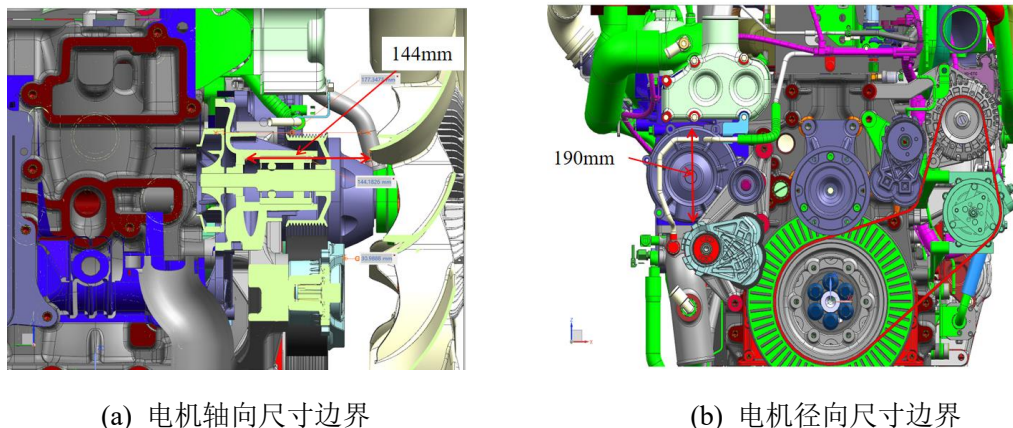


图 2-8 电机尺寸边界

由图 2-8 (a)可知，从水泵电机的安装面到风扇的长度为 144mm，因此为了防止水泵触碰到风扇，电机的轴向长度（不包含电机轴长）需要小于 144mm。由图 2-8 (b)可知，电机径向尺寸需要小于水泵壳体直径 190mm，确保电机能够和水泵壳体配合。此外电机与水泵采用同轴设计，且水泵与电机之间设有水封结构，防止冷却液进入电机内部。

## 2.5 本章小结

本章首先对水泵与风扇性能参数及相关公式进行了研究，为后续传统附件功实验与附件电机参数确定打下基础。其次，进行传统附件功测试实验，确定不同工况下风扇和水泵功率、扭矩、流量、压力等数据。通过对实验数据的分析，得出采用六个水泵电机驱动风扇的方案，并确定附件电机的额定功率为 2.8 kW，峰值功率为 5.2 kW。最后，通过发动机安装空间确定附件电机的轴向尺寸边界和径向尺寸边界分别为 144 mm 和 190 mm。

### 第3章 附件电机初步设计与电磁性能分析

本课题所研究的重型商用车冷却系统对电子水泵、电子风扇要求较高，受限  
于附件的安装空间有限。永磁同步电机因其高功率密度、小体积和高效率等优势，  
在汽车、航天、医疗器材等多个领域得到广泛应用<sup>[57]</sup>。因此，本文采用永磁同步  
电机作为附件驱动电机。本章根据上一章确定的电机设计要求，利用电机的相关  
尺寸公式确定电机的初步电磁设计方案。并通过对比 3 种槽极配合的电磁性能，  
确定了最优的槽极配合方案。此外，本章对所确定的初步电磁设计方案进行空载  
与负载工况的仿真分析，以验证初步设计电机的电磁性能。

#### 3.1 主要尺寸计算

本课题研究的是电子水泵与电子风扇用永磁同步电机的基本技术指标如表  
3-1 所示。由表可知电机最大转速不低于 5000 r/min，峰值功率为 5.2 kW，额定  
功率为 2.8 kW。

表 3-1 电机基本技术指标

| 参数          | 数值    | 参数       | 数值   |
|-------------|-------|----------|------|
| 额定功率(W)     | 2800  | 额定转矩(Nm) | 9.55 |
| 直流电压(V)     | 540   | 峰值功率(W)  | 5200 |
| 额定转速(r/min) | 2800  | 绝缘等级     | F    |
| 最大转速(r/min) | ≥5000 | 冷却形式     | 自然冷却 |

在初步设计永磁同步电机时，可以通过主要尺寸公式来确定电机的主要尺寸。  
主要尺寸主要指的是定子铁芯内径  $D_{i1}$  和铁芯长度  $L_{ef}$ ，主要尺寸公式主要是用来  
描述电机主要尺寸和各参数之间的关系。主要尺寸公式如下所示<sup>[58]</sup>：

$$\frac{D_{i1}^2 L_{ef} n}{P'} = \frac{6.1}{\alpha'_p K_{Nm} K_{dp} A B_\delta} \quad (3-1)$$

式中， $n$  为电机转速，r/min； $P'$  为计算功率，kW； $\alpha'_p$  为计算极弧系数，取值范围  
为 0.63~0.72； $K_{dp}$  为绕组系数； $K_{Nm}$  为气隙磁密波形系数； $A$  为电负荷，A/m； $B_\delta$   
为磁负荷，指气隙磁密幅值，T。

在上述公式中,绕组系数  $K_{dp}$  为短距系数和分布系数的乘积,数值接近于 1,数值越大代表输出能力越强。气隙磁密波形系数  $K_{Nm}$  数值一般接近于 1,变化范围较小。在电机设计中电负荷  $A$  和磁负荷  $B_\delta$  的取值较为重要。电负荷和磁负荷取值越大,电机尺寸越小,功率密度越高。然而,电负荷过大会导致绕组铜耗增加,电机温升升高,对冷却系统和材料要求更高;磁负荷过大则会使定转子铁损增加,电机温度上升。一般情况下,永磁同步电机磁负荷  $B_\delta$  小于 1.1 T,取值在 0.5~0.9T 之间,有时为了满足的输出能力而取稍大的值<sup>[59]</sup>。

## 3.2 槽极配合的选取

槽极配合对电机性能有着极大的影响,应根据电机功率、尺寸以及应用场景选择合适的槽极配比。此外,槽极配合也会对绕组的结构和分布产生影响,进而影响电机的效率<sup>[60]</sup>。针对槽极配合的选取,有一个重要的衡量参数,即每极每相槽数  $q$ ,一般由式(3-2)确定。

$$q = \frac{Z}{2mp} \quad (3-2)$$

式中,  $Z$  为槽数,  $m$  为相数, 本文取 3;  $p$  为极对数。

若  $q$  为整数,电机绕组形式称为整数槽绕组;若  $q$  为分数,则称为分数槽绕组。其中分数槽绕组具有谐波含量低、反电动势波形平滑、输出稳定等特点。因此,本文选择分数槽绕组作为电机的槽极配合类型,选择常用极数 8 极和 10 极。初步确定三种槽极配合形式分别为 12 槽 8 极、12 槽 10 极、18 槽 8 极,并将三个电机模型记为 M-12-8、M-12-10、M-18-8。

## 3.3 定转子结构设计

### 3.3.1 定子槽设计

本课题设计的电机为内转子永磁同步电机,线圈槽在定子侧。定子槽尺寸设计一般有以下几点要求:(1)槽满率不能设置过高,确保槽满率不超过 75%,留有足够空间下线和绝缘处理;(2)定子齿部尺寸和轭部尺寸不能过小,避免出现磁饱和现象;(3)定子轭部不能太小,保证定子满足强度要求。

根据以上要求，本文选择平行齿槽型，平行齿槽型具有槽利用率高、齿部磁密分布均匀、运行性能好等优点。平行齿槽的相关尺寸如图 3-1 所示：

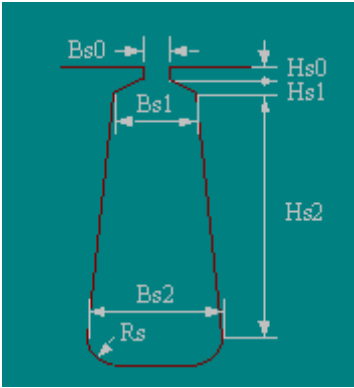


图 3-1 平行齿槽槽型图

为了有效抑制齿槽转矩，在满足绕线的需求下，槽口宽设计可以尽量小一点。此外，槽宽不能设计过大，槽宽过大会造成齿部磁密偏高甚至出现饱和现象，增加电机磁路损耗，从而影响电机效率。表 3-2 为设计得到的三种槽极配合下的定子槽主要尺寸。

表 3-2 定子槽主要尺寸

| 参数  | M-12-8 | M-12-10 | M-18-8 |
|-----|--------|---------|--------|
| Hs0 | 1      | 1       | 1      |
| Hs1 | 3.06   | 3.34    | 1.58   |
| Hs2 | 18.7   | 18.34   | 20.93  |
| Bs0 | 2.5    | 2.5     | 2.5    |
| Bs1 | 15.62  | 16.8    | 8.78   |
| Bs2 | 25.65  | 26.6    | 16.17  |
| Rs  | 0      | 0       | 0      |

### 3.3.2 定子绕组设计

绕组设计中线圈节距在很大程度上决定了电机的输出性能。短距绕组由于线圈两槽之间的电角度小于  $180^\circ$ ，使得两槽绕组的反电动势在叠加时存在角度差，造成高次谐波之间的相互抵消，从而有效降低谐波含量，提升反电动势波形的正弦度。采用 Y 型接法的多层绕组能够减少涡流损耗，提高电机的运行性能<sup>[61]</sup>。因此，本文采用电机绕组采用短距双层绕组。

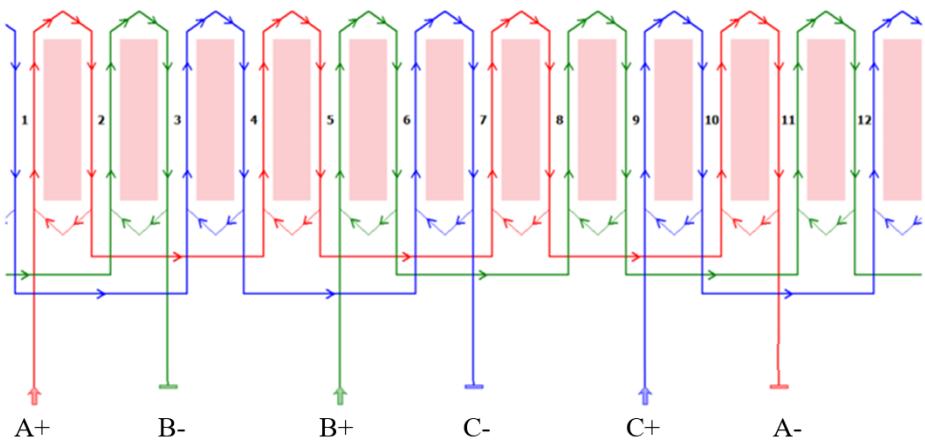
考虑到本次电机的功率较小，电流密度较低，因此并联支路数  $a$  取 1。首先根据功率、电压、功率因素、效率确定电流  $I$ ，初步选择电负荷  $A$  为  $350\text{A/cm}$ ，电流密度  $J$  为  $4\text{A/mm}^2$ 。每相串联匝数  $N_t$  和导线截面积  $A_{cu}$  与电流、电负荷等参数关系如下所示：

$$\begin{cases} N_t = \frac{\pi D_{il} A}{2mI} \\ A_{cu} = \frac{I}{aN_t J} \end{cases} \quad (3-3)$$

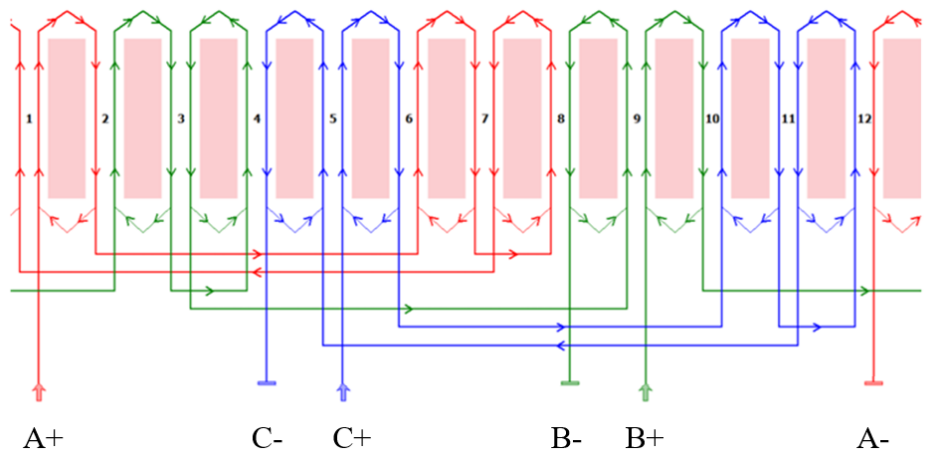
经过计算，得到的三种槽极配合绕组方案如表 3-3 所示，三种槽极配合绕组接线图如图 3-2 所示。

表 3-3 绕组设计方案

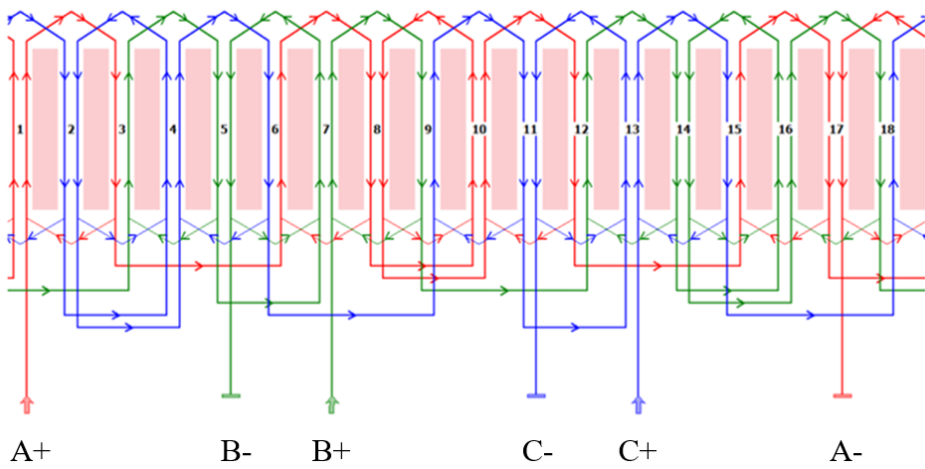
| 参数   | M-12-8 | M-12-10 | M-18-8 |
|------|--------|---------|--------|
| 节距   | 1      | 1       | 2      |
| 匝数   | 72     | 68      | 50     |
| 并绕根数 | 4      | 4       | 4      |
| 线径   | 0.706  | 0.706   | 0.675  |
| 槽满率  | 0.73   | 0.66    | 0.72   |
| 绕组层数 | 2      | 2       | 2      |



(a) 12 槽 8 极接线图



(b) 12 槽 10 极接线图



(c) 18 槽 8 极接线图

图 3-2 绕组接线图

3.3.3 转子类型与气隙长度确定

目前内置式永磁同步电机常用的转子类型有一型、V 型、V+一型。三种转子如下图 3-3 所示。

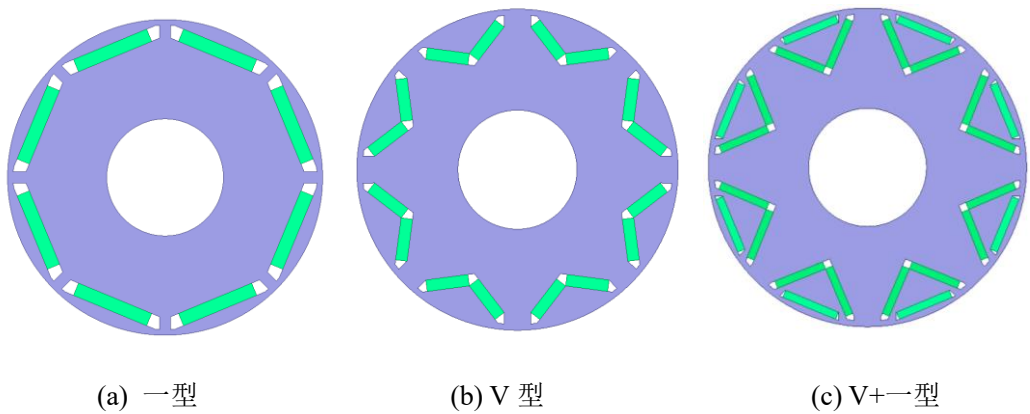


图 3-3 三种转子铁芯类型

一般来说,内置式永磁同步电机转子铁芯类型选取不仅需要考虑永磁体用量成本,还需要考虑到性能因素,包括  $dq$  轴电感、漏磁系数等因素<sup>[62]</sup>。其中,一型转子结构简单、加工容易,但存在损耗较高和效率低的问题。V 型转子结构简单、效率高、成本低,但在高速下难以维持较高输出。V+一型转子具有聚磁效果,磁密较高且输出能力较强,此外由于凸极比较大,电机的峰值功率较大。因此,综上本文选择 V+一型转子方案。

气隙指的是永磁同步电机定子和转子之间的间隙,它是电机磁路设计中的重要部分,对电机的输出能力以及可靠性影响很大。气隙的选择对电机输出能力有较大影响,气隙较小可以有效提升电机输出能力。因此,应当在确保转子与定子不发生摩擦的情况下,选择较小的气隙。初步设计气隙长度,可以根据公式(3-4)进行预估,并根据需求对其进行微调。

$$\delta = 0.3(0.4 + 7\sqrt{D_{fl}}) \times 10^{-3} \quad (3-4)$$

式中,  $\delta$  为气隙长度(m)。

### 3.3.4 定转子材料选择

目前定转子铁芯材料主要采用硅钢片,不同硅钢片材料损耗差异较大,对电机的效率有极大地影响。为了降低铁芯损耗,永磁同步电机的定转子铁芯都采用叠压的形式。本文综合考虑硅钢片价格与性能,最终选择 DW310-35 作为铁芯材料,其厚度为 0.35 mm,在频率为 50 HZ,波形为正弦的磁感峰值为 1.5 T 下铁损值为 3.1 W/kg,损耗较低。其磁密  $B$  随磁场强度  $H$  变化曲线如图 3-4 所示。

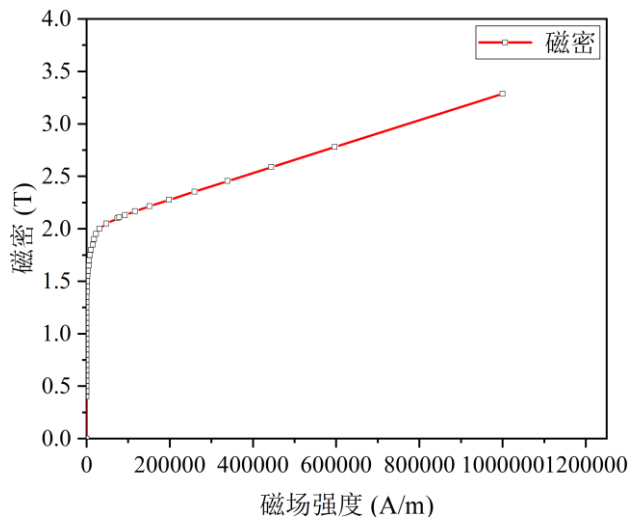


图 3-4 DW310-35 B-H 变化曲线

由图可知曲线的拐点磁密较高约为 2.0 T，证明当硅钢片磁密大于 2.0 T 时，磁路才会饱和，硅钢片性能较好。相较于普通硅钢片，采用此硅钢片可以将电机磁密设计的更高，以此来提升电机输出能力，进而提升电机功率密度。

### 3.3.5 永磁体设计

永磁体设计指的是材料的选择以及尺寸的设计。在设计永磁体尺寸之前应当确定永磁体材料，不同材料之间性能差异明显，会影响永磁体的尺寸设计。

当前主流的永磁材料包括铁氧体、稀土钴和钕铁硼三种。铁氧体永磁材料属于非金属材料，具有成本低、工艺简单等优势，但其剩磁密度较低，难以满足高功率密度永磁同步电机的需求<sup>[63]</sup>。稀土钴永磁材料与铁氧体材料相反，具有高剩磁、大矫顽力和高温抗退磁性，但价格较高。钕铁硼作为永磁同步电机最常用的永磁材料，它具有极高的剩磁密度磁感应矫顽力可达 992 kA/m，是目前磁性能最高的材料<sup>[64]</sup>。相较于稀土钴，钕铁硼价格较低，且地表中含量高。最后，本文考虑选择 N35SH 作为永磁体材料。其剩磁密度  $B_r$  为 1.21 T，矫顽力  $H_c$  为 924 kA/m，耐温等级为 150℃。

永磁体的轴向长度近似等于定转子铁芯长度，而厚度  $h_M$  的设计尤为关键，永磁体厚度大可以提升磁密，进而提升电机输出能力。但是厚度过大，会使 d 轴电感过小，导致特征电流增大，会降低电机的高速弱磁能力。永磁体宽度  $b_M$  受限于转子尺寸和极数，且永磁体宽度在一定程度会影响气隙磁密的分布，对电机的输出稳定性有较大的影响。因此，需要合理的设计永磁体的厚度与宽度。永磁体尺寸公式如下所示：

$$\begin{cases} h_M = \frac{K_s K_a b_{m0} \delta}{(1 - b_{m0}) \delta_0} \\ b_M = \frac{2 \delta_0 B_{\delta 1} \tau_1 L_{ef}}{\pi b_{m0} B_r K_\phi L_M} \end{cases} \quad (3-5)$$

式中， $K_s$  为饱和系数； $K_a$  为结构系数，一般在 0.7-1.2 之间； $b_{m0}$  为永磁体空载工作点； $\delta_0$  为空载漏磁系数； $B_{\delta 1}$  气隙磁密基波幅值； $K_\phi$  为气隙磁通波形系数。

利用 Mortor-CAD 软件经过反复调整参数和计算得到初步永磁同步电机电磁方案如表 3-4 所示。

表 3-4 电机主要设计参数

| 参数       | M-12-8 | M-12-10 | M-18-8 |
|----------|--------|---------|--------|
| 定子外径     | 145    | 145     | 145    |
| 定子内径     | 85     | 85      | 85     |
| 铁芯长度     | 47.5   | 47.5    | 47.5   |
| 气隙长度     | 0.7    | 0.7     | 0.7    |
| 节距       | 1      | 1       | 2      |
| 永磁体 1 宽度 | 28     | 24      | 28     |
| 永磁体 1 厚度 | 2      | 2       | 2      |
| 永磁体 2 宽度 | 16     | 12      | 13.8   |
| 永磁体 2 厚度 | 2      | 2       | 2      |
| 齿宽       | 9      | 8       | 7      |

3.4 不同槽极配合电磁性能分析

为了确定最佳槽极配合，对电机模型 M-12-8、M-12-10、M-18-8 进行电磁性能对比分析。利用电机设计软件给各个部件添加材料，添加运动区域以及边界，完成三个电机有限元模型的搭建。有限元模型如图 3-5 所示。为了保证对比分析的公平性，三个电机模型的定转子铁芯长度、永磁体长度、材料均相同，均采用 V+一型转子结构。同时在电机转速为 2800 rpm 的空载工况下比较三种槽极配比的相反电动势及齿槽转矩结果。

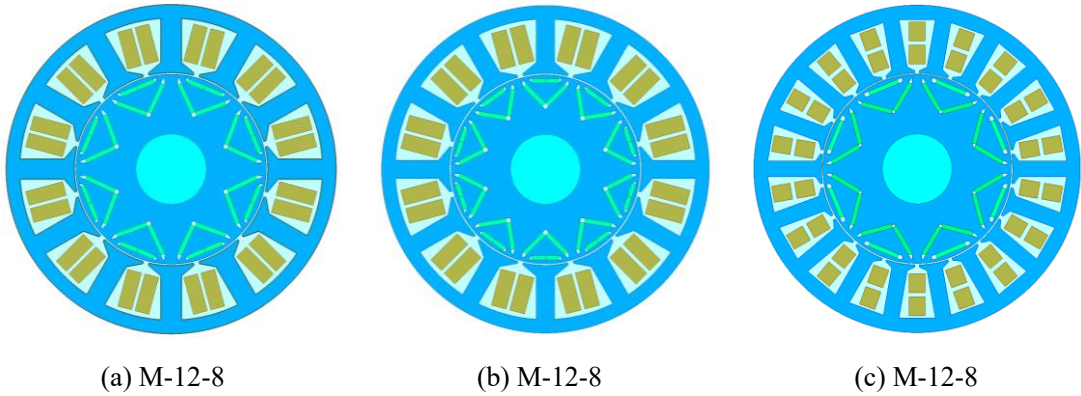


图 3-5 有限元模型图

反电动势对电机的影响主要有以下几点：1、反电动势的大小直接影响电机的输出能力；2、反电动势波形的畸变率直接影响电机输出转矩脉动，会对电机输出稳定性产生较大的影响；3、反电动势的大小还会影响电机弱磁点的分布，从而影响效率 map 图的分布<sup>[65]</sup>。

图 3-6 为三种槽极配比下相反电动势波形及谐波的对比结果。如图 3-6 (a)可知，M-18-8 的反电动势幅值最大为 249.7 V，而 M-12-8 和 M-12-10 电机模型的相反电动势幅值分别为 237.6 V 和 246.1 V，证明较其他两个电机模型 M-18-8 电机输出能力最强。同时由图 3-6 (b)可知，M-18-8 的基波幅值要远高于其他两个电机模型，达到了 271.6 V。定义波形畸变率  $THD$  如式(3-6)，通过计算得出 M-18-8、M-12-8 和 M-12-10 的畸变率分别为 7.75%、8.88%、8.04%，M-18-8 的畸变率最低，畸变率降低可以提高反电动势波形的正弦度，从而提高电机输出的稳定性。

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^H E_n^2}}{E_1} \quad (3-6)$$

式中， $E_n$  为第  $n$  次谐波幅值； $E_1$  为基波幅值； $H$  为最高谐波次。

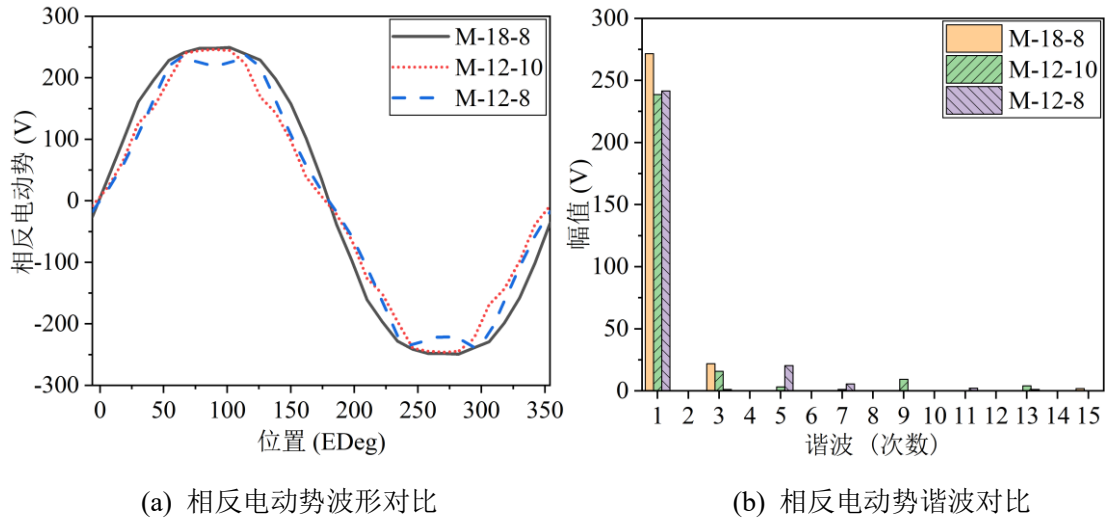


图 3-6 相反电动势对比

齿槽转矩是电机回转一周内产生的一种周期性力矩，是永磁同步电机因为其结构设置而特有的<sup>[66]</sup>。齿槽转矩是造成振动噪声的重要原因，通常齿槽转矩需要小于额定转矩的 5%。由图 3-7 可知 M-18-8 的齿槽转矩幅值最低，其值为 106.07 mNm，满足设计要求。这是因为齿槽转矩的幅值和槽数极数有直接的关系，在三

种电机模型中 M-18-8 的槽极最小公倍数最大，其值为 72。齿槽转矩的幅值随槽极最小公倍数的增大而减小。

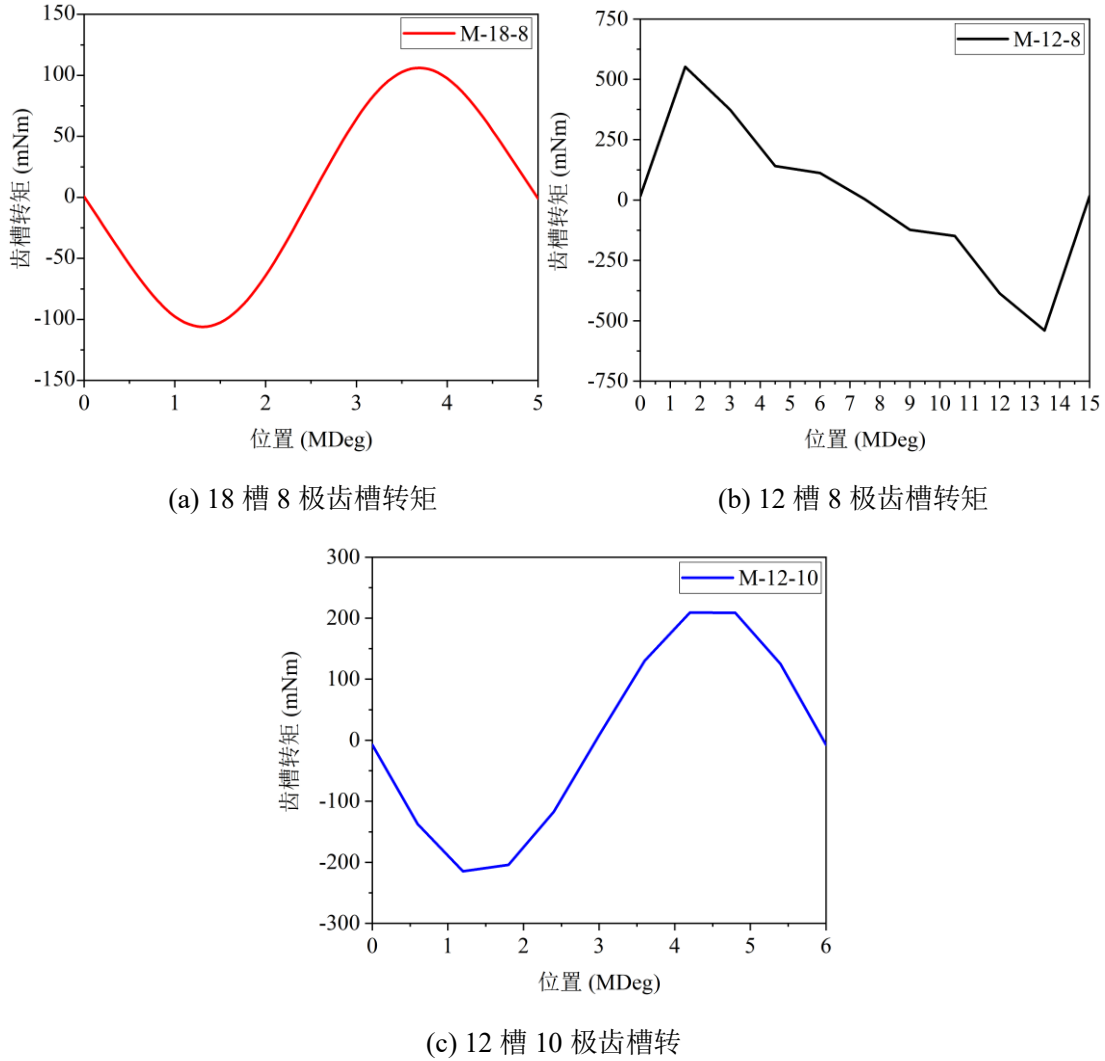


图 3-7 齿槽转矩对比

综合对比分析 M-18-8、M-12-8、M-12-10 的反电动势和齿槽转矩结果可知，电机 M-18-8 反电动势幅值最大且畸变率最低，同时其齿槽转矩幅值最小。证明 18 槽 8 极的槽极配比相较与 12 槽 8 极、12 槽 10 极的输出能力更强更加平稳，因此，本文最终确定选择 18 槽 8 极作为电气化附件电机的槽极配比方案。

### 3.5 永磁同步电机电磁性能分析

永磁同步电机的主要工况包括空载、额定和峰值三种。其中空载工况主要指电机在没有负载下工作情况，额定工况指的是电机长时间运行的最大输出功率点，峰值工况指的是电机的极限工作工况。通过仿真分析空载、额定和峰值三种工况

下的电磁性能，可以评估电机的输出能力及其他性能是否符合设计要求。

### 3.5.1 空载工况下的电磁性能

图 3-8 为空载工况下永磁同步电机的磁密与磁力线分布。由图 3-8 (a)可知，在空载状态下，定子铁芯齿部的磁密幅值约为 1.52 T，轭部的磁密幅值约为 1.25 T,隔磁桥附近磁密饱和可有效抑制漏磁，磁密分布基本符合设计要求。由图 3-8 (b)磁力线分布可知，磁力线几乎都是 N 极出发经过齿部回到 S 极，漏磁率很低。

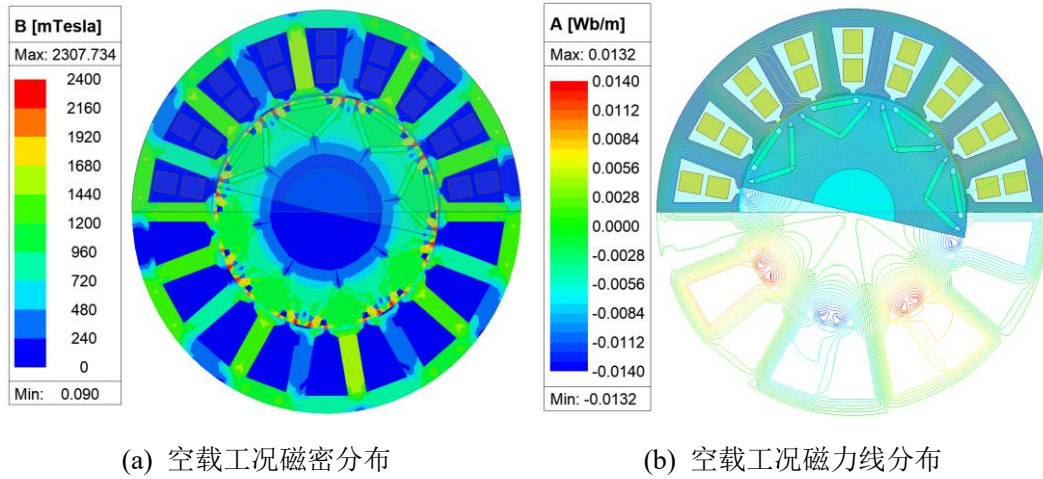


图 3-8 空载磁场分布

由图 3-9 (a)可知相反电动势的波形趋于正弦波形，波形状况较佳，相反电动势幅值为 249.7 V，有效值为 192.7 V 满足设计要求。由图 3-9 (b)可知，基波幅值为 271.6 V,谐波含量降低，除了 3 次谐波较高，其他高次谐波幅值接近于 0，畸变率为 7.75%，基本满足设计要求，但是畸变率可以进一步优化。

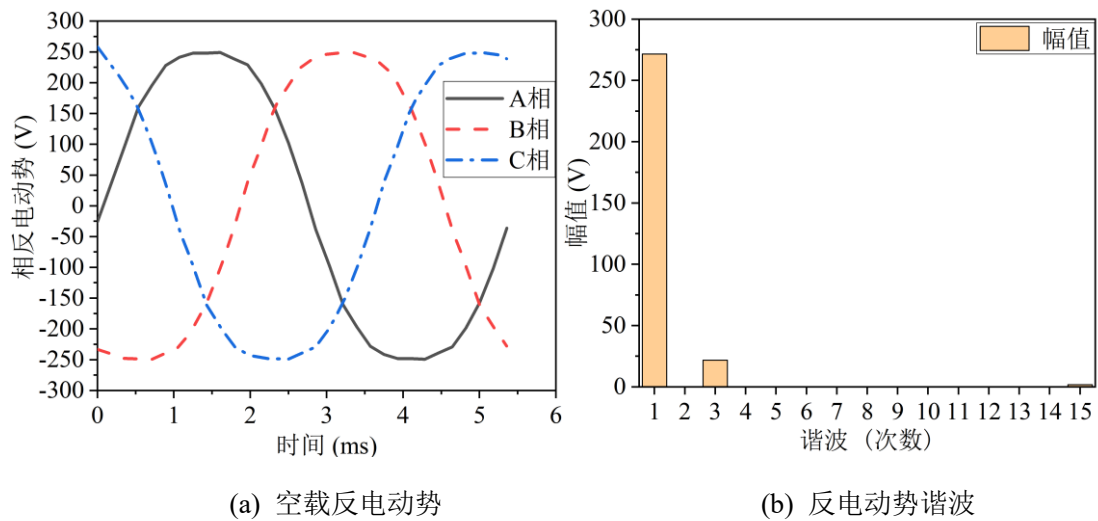


图 3-9 空载反电动势及谐波分析

为了研究空载气隙磁密波形及其大小,对气隙磁密进行仿真分析,径向气隙磁密分布如图 3-10。由图 3-10 (a)可知,气隙磁密波形出现了凸起和凹陷,这是因为定子侧开槽导致磁路中磁阻不同。气隙磁密幅值为 0.9 T,磁密分布较为合理。由图 3-10 (b)可知,径向气隙磁密中除了含有大量的基波外,还有丰富的谐波成分。

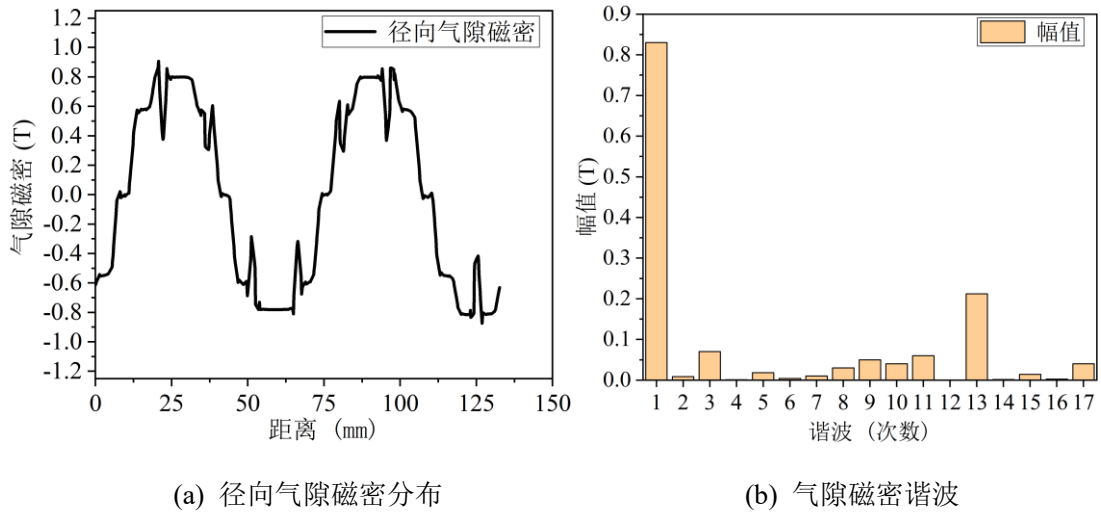


图 3-10 径向气隙磁密及谐波分析

### 3.5.2 额定工况下的电磁性能

在 Maxwell 2D 瞬态场中,输入有效值为 5 A,并输入额定转速为 2800 rpm,并输入额定电流最佳控制角为  $25^\circ$ 。图 3-11 为额定工况下磁密分布情况。由图 3-11 (a)可知,定子铁芯齿部的磁密幅值约为 1.65 T,轭部的磁密幅值约为 1.6 T。额定工况下磁密较空载工况下有明显提升,但均未饱和,磁密分布合理。

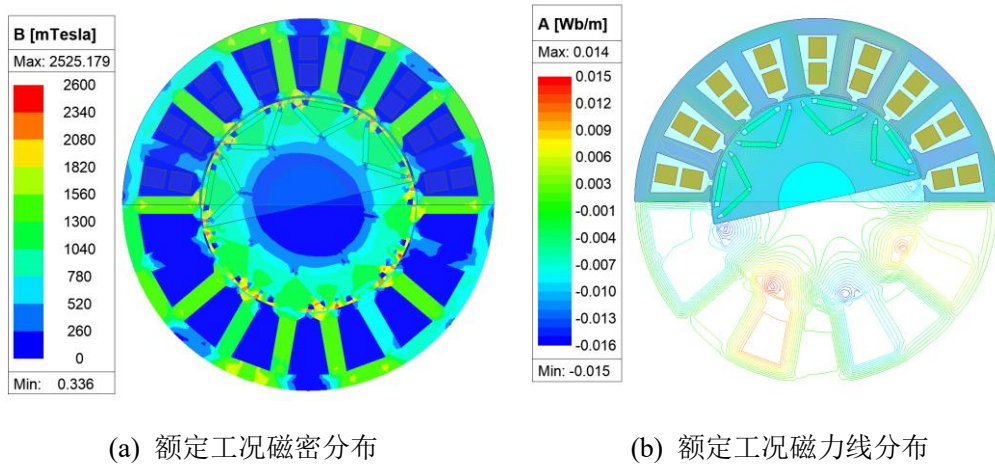


图 3-11 额定工况磁场分布

输出转矩大小是用来衡量电机输出能力的指标，决定了电机的功率密度。由图 3-12 可知，电机的平均输出转矩  $T_{avg}$  为 9.71 Nm，满足额定输出需求。定义转矩脉动公式(3-7)，计算得出转矩脉动  $T_{ripple}$  为 6.4%，基本满足要求。

$$T_{ripple} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{avg}} \quad (3-7)$$

式中， $T_{max}$  为输出转矩幅值； $T_{min}$  为输出转矩最小值。

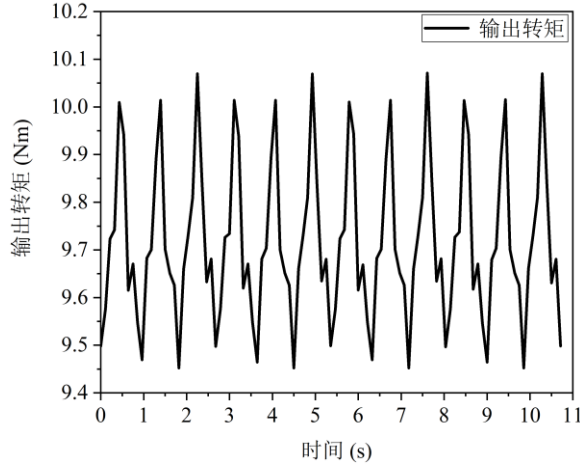


图 3-12 额定输出转矩

电机温升主要是因为电机在工作时产生的损耗转化为了热能，且电机效率随着损耗的增加而下降<sup>[67]</sup>。在 Maxwell 2D 瞬态场中，损耗设置中勾选定转子、涡流损耗中勾选永磁体，并给永磁体添加大小为 0 激励电流，进行仿真计算得到图 3-13 额定工况电机铁损。由图可知定子铁芯损耗占总铁耗的绝大部分，约为 35.8 W，转子铁芯损耗占比较小约为 1.9 W，涡流损耗约为 13.1 W。绕组的铜耗可以根据欧姆定律直接计算，其大小主要取决于电流大小和电阻大小。

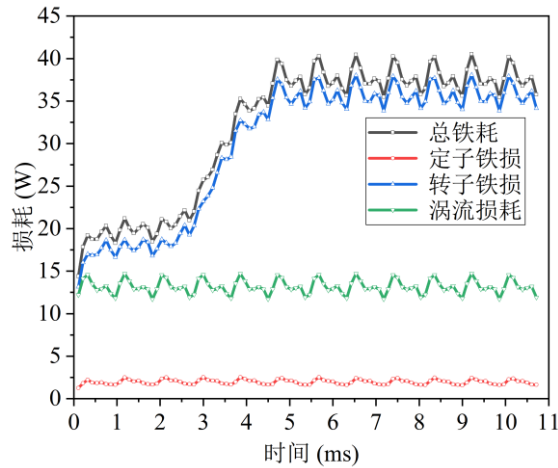


图 3-13 额定工况电机铁损

### 3.5.3 峰值工况下的电磁性能

在 Maxwell 2D 瞬态场中，输入有效值为 10.5A 的三相正弦电流源，控制角为  $40^\circ$ ，转速为 2600 rpm。由图 3-14 可知，平均峰值转矩为 19.6 Nm，转矩脉动为 5.3%，满足设计要求。由图 3-15 可知，在峰值工况出线电压幅值为 534V，接近电压极限的 540V，证明峰值工况点设计合理。

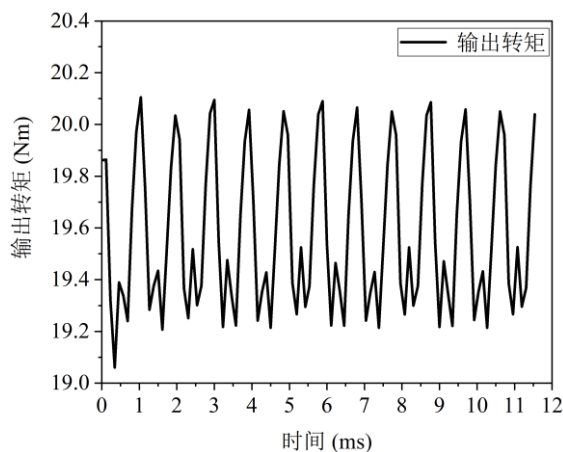


图 3-14 峰值输出转矩

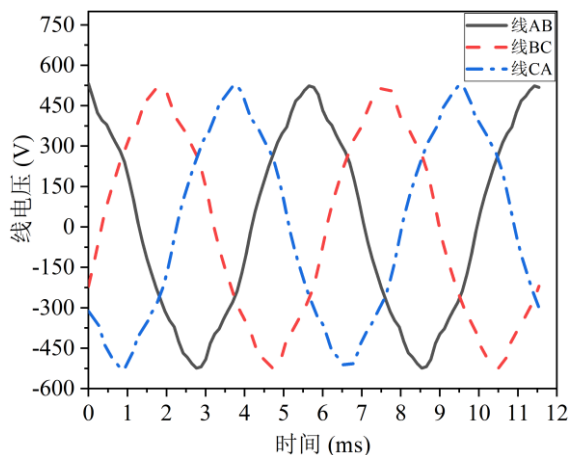


图 3-15 峰值线电压

## 3.6 本章小结

本章首先根据 2.8kW 永磁同步电机的性能指标，结合路算方法完成绕组、永磁体、定转子等设计，确定了三种不同的电磁方案。其次，通过对比分析三种方案下齿槽转矩和相反电动势结果确定了 18 槽 8 极槽极方案。最后，在不同工况下，对初始电机方案进行电磁性能仿真分析。结果证明初始电机方案在磁密分布、输出转矩、反电动势等性能上均满足设计要求。

## 第4章 永磁同步电机多目标优化及热分析

麻雀算法相比其他算法，具有全局搜索能力强、收敛快、鲁棒性好的优点，适用于函数优化、神经网络训练、路径规划等领域的优化问题。因此，为了实现永磁同步电机的多目标优化，本章对麻雀算法进行改进首先。首先，以输出转矩( $T_{avg}$ )、相反电动势幅值( $E$ )、转矩脉动( $T_{ripple}$ )为优化目标，以永磁体宽度、肋宽、槽口宽度等参数为优化参数建立响应面模型。其次，采用圆形正弦混沌映射、改进黄金正弦策略、自适应权重系数三种方法改进麻雀算法，实现算法收敛速度和精度的提升。最后，利用改进麻雀算法完成永磁同步电机多目标优化。

### 4.1 电机多目标优化设计

由于决定永磁同步电机性能的目标不止一个，且各优化目标之间具有很强的耦合性因此提出多目标优化设计。永磁同步电机的多目标优化主要分为以下步骤：确定优化目标、结构参数灵敏度分析、响应面模型建立、多目标算法优化，如图4-1所示。一般地，多目标优化问题可以表述为<sup>[68]</sup>：

$$\begin{aligned} \min & \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)\} \\ \text{s.t.} & g_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, p \\ & h_j(x) = 0, j = 1, 2, \dots, q \end{aligned} \quad (4-1)$$

式中， $f(x)$ 为优化目标， $m$ 为目标函数个数，且 $m \geq 2$ ； $g(x)$ 为不等式约束函数， $h(x)$ 为等式约束函数， $p, q$ 分别代表其个数； $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 为优化参数， $n$ 为优化参数个数。

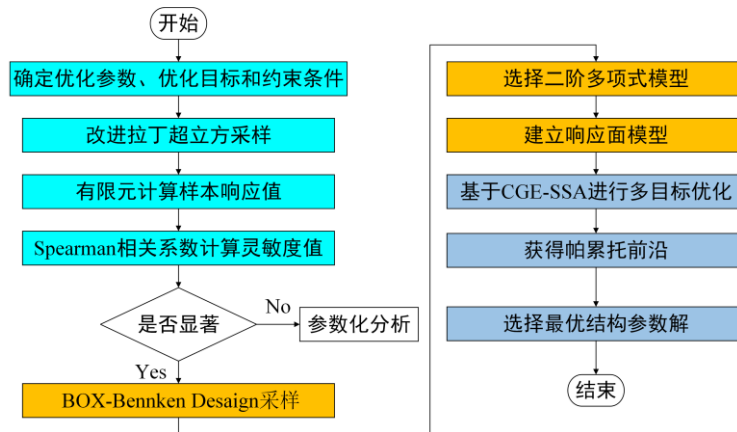


图 4-1 多目标优化流程图

#### 4.1.1 确定优化参数与优化目标

本课题研究的是一台 V+ 型的内置式永磁同步电机，永磁同步电机的输出性能主要受定转子结构参数影响。因此，本文选择了 8 个结构参数作为优化参数，其优化参数结构示意图如图 4-2 所示，优化参数初始值及范围如表 4-1 所示。

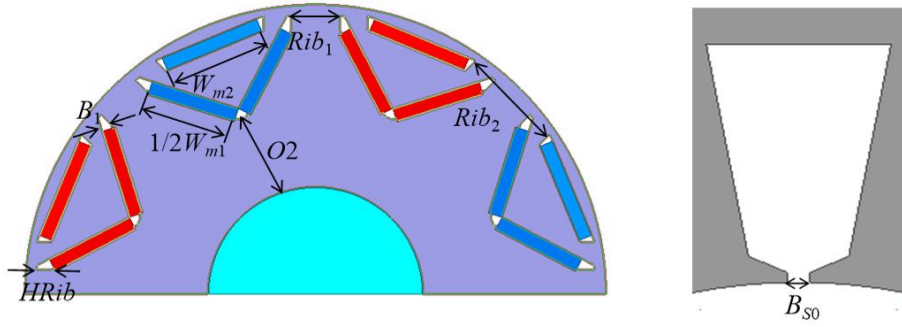


图 4-2 优化参数结构示意图

表 4-1 优化参数取值范围

| 名称         | 参数       | 初始值/mm | 取值范围/mm |
|------------|----------|--------|---------|
| 肋宽 1       | $Rib_1$  | 4.1    | 4-7     |
| 管道厚度       | $B_1$    | 1.5    | 1-2     |
| 永磁体 1 宽度   | $W_{m1}$ | 28     | 25-30   |
| 永磁体 1 与轴间距 | $O_2$    | 11     | 9-11    |
| 肋宽 2       | $Rib_2$  | 13     | 11-15   |
| 永磁体 2 宽度   | $W_{m2}$ | 13.8   | 11-15   |
| 槽口宽        | $B_{s0}$ | 2.5    | 1-3     |
| 肋高         | $HRib$   | 2      | 1-2     |

永磁同步电机一般需要在满足输出能力的同时需要维持一定的输出稳定性和较高整体效率。因此，将转矩脉动、输出转矩、相反电动势幅值作为优化目标。通常当永磁同步电机的转矩脉动小于 5% 时，电机输出较为平稳。考虑到初始电机模型的输出转矩为 9.72 Nm，反电动势幅值为 249.7 V，为了更好的提升电机性能，同时为了让算法优化后得到的解集均满足优化要求，多目标优化问题以及

约束条件可表示为:

$$\min \begin{cases} f_1(x) = -T_{avg} \\ f_2(x) = T_{ripple} \\ f_3(x) = -E \end{cases} \quad (4-2)$$

$$T_{avg} > 9.72 \text{ Nm}, E > 249.7 \text{ V}, T_{ripple} < 5\% \quad (4-3)$$

#### 4.1.2 灵敏度分析

由于需要优化的参数有 8 个, 会增加试验的复杂性和影响优化的精确性, 为降低试验工作量并提升优化精度, 引入了灵敏度分析<sup>[69]</sup>。为了使样本的采样更加均匀, 提高灵敏度计算的准确性, 本文采用改进拉丁超立方采样方法获取样本点。同时为了避免设计变量过多而造成拟合函数精度不高的问题, 本文采用 Speaman 相关系数来评价灵敏度值, 评价公式如下<sup>[70]</sup>:

$$S(x) = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (4-4)$$

式中,  $x_i$ ,  $Y_i$  为第  $i$  个样本点的设计参数值和设计目标值;  $\bar{x}$ ,  $\bar{Y}$  为设计参数平均值和设计目标平均值;  $N$  为样本点个数。

本文使用 Maxwell 2D 和 Workbench 进行联合仿真, 分别搭建空载电磁仿真模型与负载电磁仿真模型, 并与灵敏度分析模块连接, 进行优化目标与优化参数设置, 完成灵敏度计算。灵敏度分析模型如图 4-3 所示。

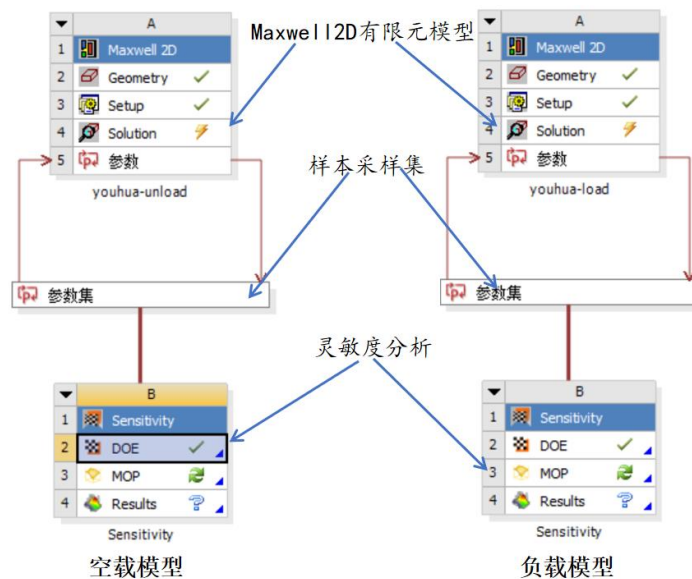


图 4-3 灵敏度分析模型

为研究单个参数对多个优化目标的影响，需引入综合灵敏度公式，并通过权重系数反映各优化目标的重要性。考虑到永磁同步电机对转矩脉动具有较高的要求，同时转矩脉动作为电机输出性能的重要衡量指标，因此为了体现不同优化目标的重要程度引入了权重系数。综合灵敏度公式如式 4-5：

$$G_x = \gamma_1 S_1(x_i) + \gamma_2 S_2(x_i) + \gamma_3 S_3(x_i) \quad (4-5)$$

式中， $G_x$  为综合灵敏度； $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  分别为  $T_{rip}$ 、 $E$ 、 $T_{avg}$  的灵敏度； $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ 、 $\gamma_3$  分别为对应的权重系数，取值为 0.4、0.3、0.3。

灵敏度计算结果如图 4-4 所示。由图 4-4 (a)可知， $W_{m1}$  和  $W_{m2}$  对输出转矩影响较大，这是因为永磁体的宽度会直接改变磁场强度，从而影响输出转矩大小。 $Rib_1$  和  $W_{m1}$  对转矩脉动影响较大，这是因为肋宽和永磁体宽度会改变气隙磁密的波形形状，进而影响电机输出的稳定性。由图 4-4 (b)可知， $Rib_1$ 、 $Rib_2$ 、 $W_{m1}$ 、 $W_{m2}$  的综合灵敏度值较高，对三个优化目标的综合影响较大，因此将这四个参数定义为高灵敏度参数，并采用算法优化高灵敏度参数。

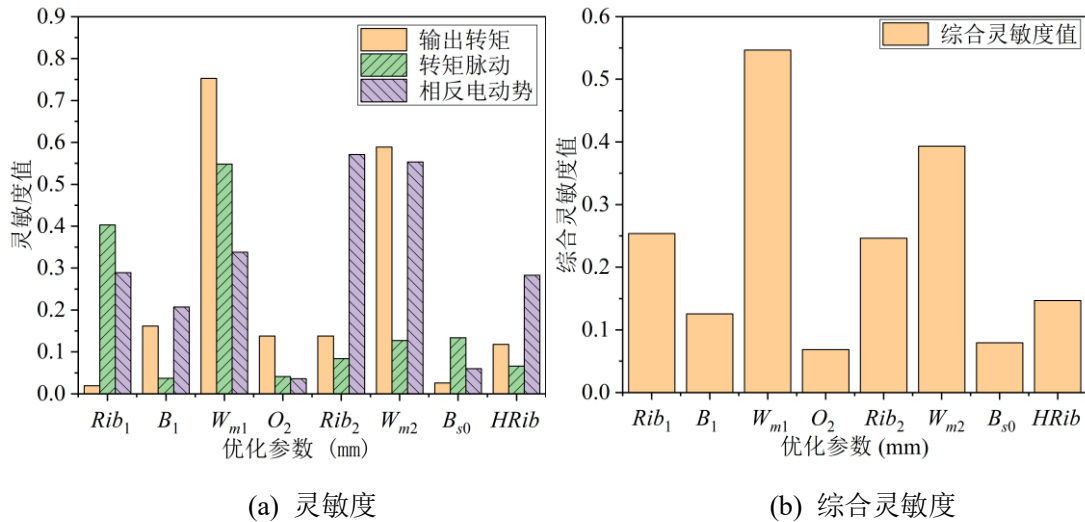


图 4-4 灵敏度分析

#### 4.1.3 响应面建模

响应曲面设计方法 (RSM) 是一种常用的基于统计分析和设计优化的数学方法<sup>[71]</sup>。此方法具有优化效率高、优化精度高等优点，适合解决复杂的多目标优化问题。通过对比不同回归方程建立的响应面模型精度，得出采用二阶多项式建立响应面模型精度最高。因此，本文选择二阶多项式建立响应面模型，如下式所示。

$$f(x) = \beta_0 + \beta_i \sum_{i=1}^k x_i + \beta_{ii} \sum_{i=1}^k x_i^2 + \beta_{ij} \sum_{i < j}^k x_i x_j + \varepsilon \quad (4-6)$$

式中,  $\beta_0$ 为常数项;  $\beta_i$ 为一阶系数;  $\beta_{ii}$ 为二阶系数;  $\beta_{ij}$ 为二阶交互系数;  $\varepsilon$ 为误差常量。

本文采用 DOE 生成数据点, 再利用 Ansys Maxwell 计算样本点数据, 然后采用二阶多项式拟合数值建立响应面模型。图 4-5 为两种采样方式的示意图。

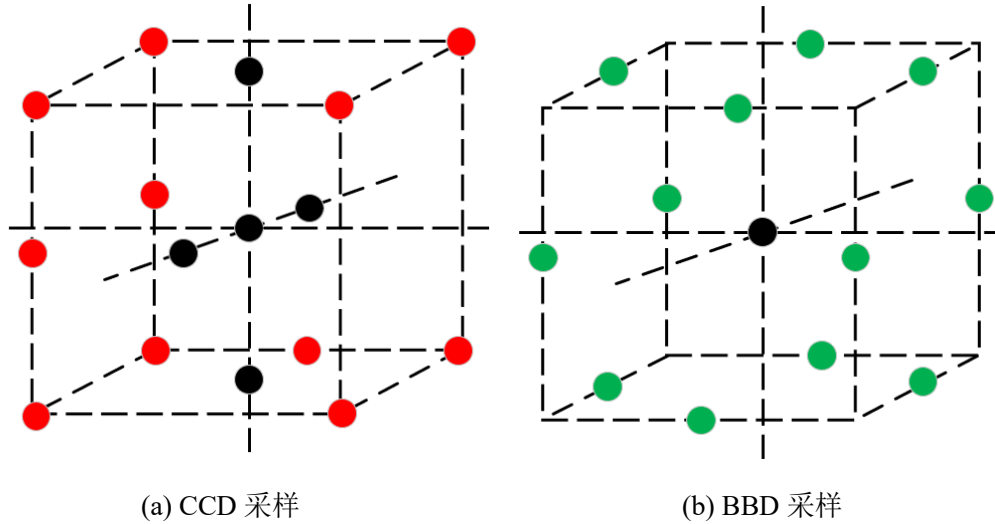


图 4-5 DOE 采样点分布

图 4-5(a)为中心复合设计(Central Composite design,CCD)采样方式, 该方式适合设计变量较多的情况, 但是可能会超出结构参数范围<sup>[72]</sup>。图 4-5 (b)为箱线图设计(Box-Behnken Design,BBD)采样, 这种方式适合设计变量较少的情况, 且不会超出结构参数范围, 可以有效减少试验次数。因此, 本文采用 BBD 采样方式采样 29 个样本点建立一个三水平四因素实验模型。参数与显著水平见表 4-2。

表 4-2 参数与显著水平

| 参数名称/水平            | -1 | 0    | 1  |
|--------------------|----|------|----|
| $Rib_1/\text{mm}$  | 4  | 5.5  | 7  |
| $W_{m1}/\text{mm}$ | 25 | 27.5 | 30 |
| $Rib_2/\text{mm}$  | 11 | 13   | 15 |
| $W_{m2}/\text{mm}$ | 11 | 13   | 15 |

目标模型评估结果如表 4-3。由表可知, 三个二次响应面模型精度均大于 0.9, 信噪比均大于 4dB, 且 CV 均小于 10%, 证明模型的可信度和精确度高, 表明该

响应面模型能够说明变量与目标变量之间的关系。如图 4-6 为优化参数  $W_{m1}$ 、 $Rib_1$  与优化目标  $T_{avg}$ 、 $T_{ripple}$ 、 $E$  的 3D 响应面。由图可知每个响应面都有极值，当  $W_{m1}$  越大时输出转矩越大，当  $W_{m1}$  和  $Rib_1$  越大时反电动势幅值越大，而当  $W_{m1}$  和  $Rib_1$  越小时转矩脉动越小，证明每个响应面模型的最佳取值范围均不相同。

表 4-3 评估结果

| 优化目标         | 模型        | R <sup>2</sup> | CV/% | 信噪比/dB |
|--------------|-----------|----------------|------|--------|
| $T_{avg}$    | Quadratic | 0.99           | 0.16 | 153.96 |
| $T_{ripple}$ | Quadratic | 0.94           | 6.28 | 14.9   |
| $E$          | Quadratic | 0.99           | 0.46 | 47.97  |

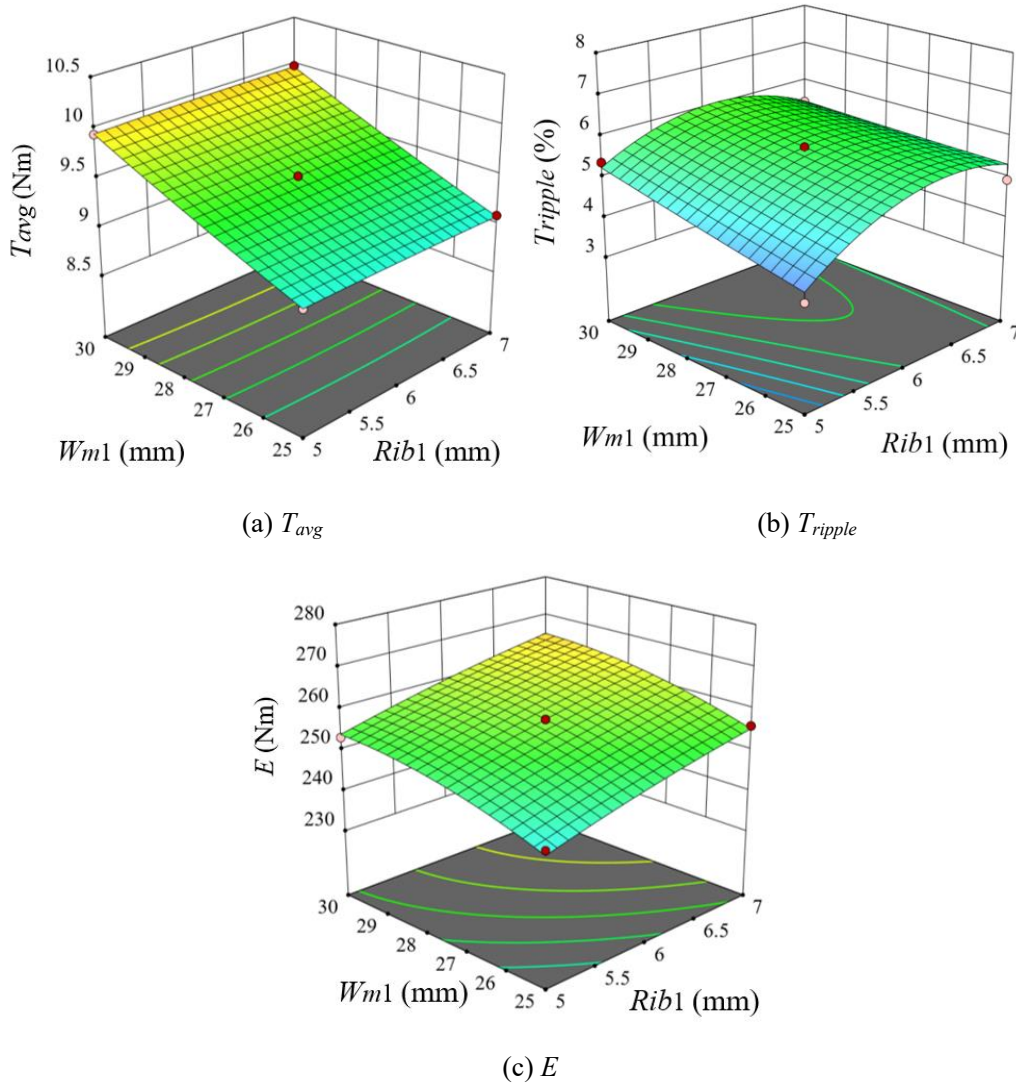


图 4-6 3D 响应面

## 4.2 改进麻雀算法

### 4.2.1 算法原理

麻雀搜索算法是由薛建凯等人于 2020 年提出<sup>[73]</sup>，该算法主要利用了麻雀觅食和避敌行为的特点，是一种智能优化算法。麻雀种群主要由发现者、跟随者、预警者组成。发现者主要负责寻找食物并与其他麻雀个体指明方向，发现者拥有较强的洞察力和搜索能力，能够在复杂环境中找到食物，其数量约占麻雀种群的 20%。跟随者跟随发现者的脚步，在觅食的过程中，跟随者根据发现者的移动路线调整自身的运动路线，其数目约占麻雀种群的 80%。除此之外，种群中有一部分个体为预警者，时刻观察周围的存在危险，当遇到危险时，会采取反捕食行为，防止麻雀种群受到危害。传统麻雀算法存在种群初始化分布不均匀、易于陷入局部最优、全局搜索能力差等问题，因此本文针对传统麻雀算法的缺点进行如下三点改进，以提升算法收敛速度和精度。

### 4.2.2 圆形正弦混沌映射策略优化初始种群分布

为了使麻雀初始种群能够均匀分布，本文引入了正弦混沌映射策略。正弦混沌映射可以解决算法容易陷入局部最优和收敛速度慢的缺点<sup>[74]</sup>。同时引入圆形混沌映射对种群分布进行调整，通过添加权重系数形成圆形正弦混沌映射。圆形正弦混沌映射方程如式(4-7)所示。此策略首先通过  $X(i)$  生成随机值，再利用式(4-7)产生混沌值，再将混沌值映射到麻雀个体上，实现麻雀种群初始化。

$$X(i+1) = \text{mod}(X(i) + b - (\frac{a}{2\pi})\sin(2\pi X(i)) + \omega \cdot c \cdot \sin(\pi X(i)), 1) \quad (4-7)$$

式中， $\text{mod}$  表示取余函数； $X(i) \in [lb, ub]$ ； $ub, lb$  分别为搜索空间上下限； $X(i+1)$  为混沌值， $X(i+1) \in [lb, ub]$ ； $a, b, c$  为控制参数，经过测试对比分别取 0.16, 0.556, 0.24； $\omega$  为权重系数，经过测试对比取值 0.2。

为了验证圆形正弦混沌映射策略的有效性，设置种群数量为 200，初始化麻雀种群。随机分布和圆形正弦混沌映射种群分布如图 4-7 所示。由图可知，相较于随机分布策略，采用圆形混沌映射策略初始化的种群分布更加均匀，能够充分搜索整个空间，可以有效避免算法在寻优过程中陷入局部最优，并提高算法寻优精度。为了进一步提升算法性能，需要在此基础上对发现者位置更新公式进行改进，改进方法见 4.2.3。

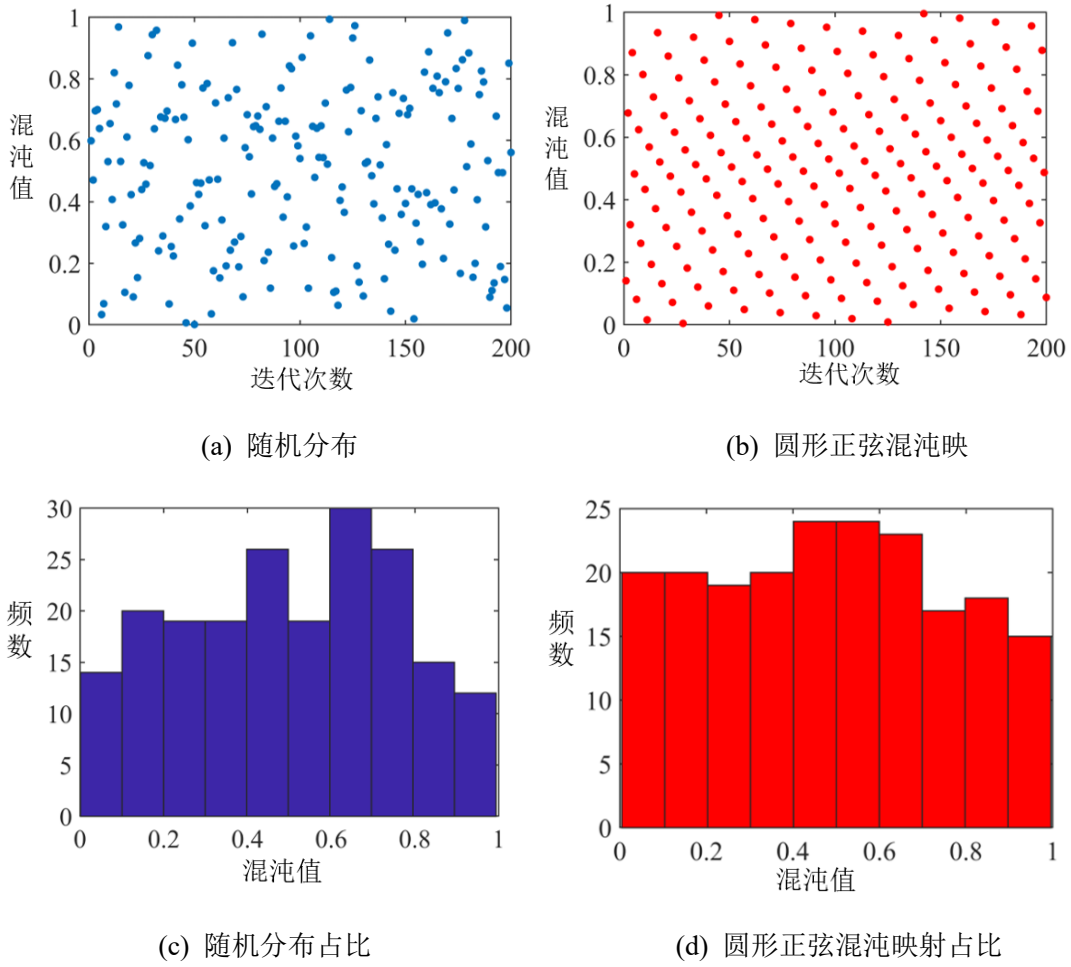


图 4-7 种群分布图

#### 4.2.3 改进黄金正弦策略更新发现者

为了解决传统 SSA 算法中发现者位置更新收敛过早而造成算法精度低的问题。本文通过在发现者更新公式中引入正弦函数来扩大其搜索空间，并提升全局寻优能力。同时，通过黄金分割系数增强局部搜索能力，避免陷入局部最优<sup>[75]</sup>。为了使算法更容易跳出局部最优解并探索更广泛的解空间，在黄金正弦搜索里添加最佳解扰动策略。改进后的发现者更新公式如下：

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{i,j}^t \cdot |\sin(r_1)| + r_2 \cdot |\sin(r_1)| \cdot |x_1 \cdot X_{best1}^t - x_2 \cdot X_{best}^t| & \text{if } R < ST \\ X_{i,j}^t + Q \cdot L & \text{if } R \geq ST \end{cases} \quad (4-8)$$

$$X_{best1}^t = X_{best}^t + |X_{i,j}^t - X_{best}^t| \cdot A^+ \cdot L \quad (4-9)$$

式中： $X_{i,j}$  为麻雀的位置； $X_{best}$  为全局最佳位置； $X_{best1}$  为扰动后的全局最佳位置； $Q$  是服从正态分布的随机数； $r_1 \in [0, 2\pi]$ 、 $r_2 \in [0, \pi]$ ，分别是决定下次迭代个体的运

动距离、运动方向的随机数； $x_1 = -\pi + 2\pi(1-\tau)$ ， $x_2 = -\pi + 2\pi\tau$  是根据黄金分割数  $\tau$  得到的系数； $\tau = (\sqrt{5} - 1)/2$ ， $L$  是一个  $1 \times \dim$ ，元素均为 1 的矩阵；其中  $A^+ = A^T(AA^T)^{-1}$ ， $A$  是一个  $1 \times \dim$ ，元素为 -1 或 1 的矩阵。

当  $R \geq ST$  时，表示部分麻雀已发现危险，此时发现者会按照正态分布随机移动到当前位置的附近，进行局部搜索。当  $R < ST$  时，通过加入随机扰动，使全局最佳位置不是一个定值，增加搜索范围，进行全局搜索。通过引入策略可以有效提升发现者的搜索能力，从而提升算法精度。由于跟随者的位置更新与发现者相关，因此为了使跟随者能够有更好的搜索能力，需对跟随者位置更新公式进行改进，改进方法见 4.2.4。

#### 4.2.4 均匀分布的动态自适应权重改进跟随者

传统 SSA 算法中，跟随者的全局搜索能力和局部开发能力不足，易于陷入局部最优，造成搜索精度较低。因此，借鉴传统的惯性权重可以提高算法的全局搜索能力思想<sup>[76]</sup>，提出了均匀分布的动态自适应权重协调算法的全局搜索与局部开发能力。改进后的位置更新公式如下：

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} \beta \cdot Q \cdot \exp\left(\frac{X_{worst}^t - X_{i,j}^t}{i^2}\right) & i > \frac{n}{2} \\ X_p^{t+1} + |X_{i,j}^t - X_p^{t+1}| \cdot A^+ \cdot L & i \leq \frac{n}{2} \end{cases} \quad (4-10)$$

$$\beta = \delta \left( \beta_{initial} - (\beta_{initial} - \beta_{final}) \frac{1}{\exp(1) - 1} \right) \left( \exp\left(\frac{t}{T}\right) - 1 \right) \quad (4-11)$$

式中， $X_p$  是发现者发现的最优位置； $X_{worst}$  是发现者发现的最差的位置； $\beta$  为动态权重； $\delta$  为 0 到 1 的均匀分布的随机数； $\beta_{initial}$  和  $\beta_{final}$  分别为权重初始值和结束值，分别取 1 和 0； $T$  为最大迭代次数。

图 4-8 为改进麻雀算法流程图。由图可知，改进后的麻雀算法迭代过程中，初始化种群公式、发现者位置更新公式、跟随者位置更新公式发生了改变，预警者位置更新公式保持不变。其迭代主要步骤为：首先，进行麻雀算法的种群数目、迭代次数等相关参数设置，并通过初始化种群确定种群最佳位置及其最佳适应度值；其次，进行适应度值排序，确定发现者与跟随者，并更新麻雀个体位置；最后，更新最优位置与最佳适应度值，并循环运行直至达到最大迭代次数，输出最优位置与最佳适应度值，算法终止运行。

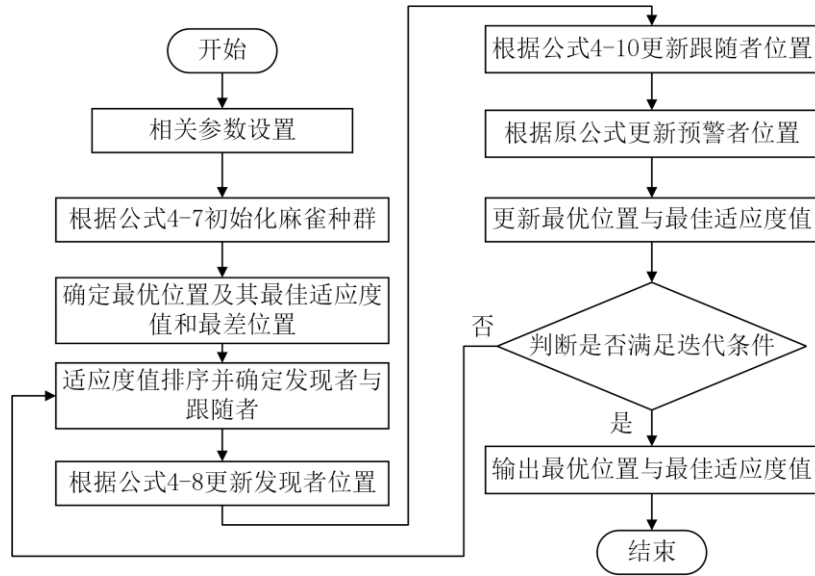


图 4-8 改进麻雀算法流程图

#### 4.2.5 算法性能验证

为了验证 CGE-SSA 算法的有效性,选取 6 个测试函数(3 个单峰函数,3 个多峰函数)进行测试,通过与传统麻雀算法(SSA)、遗传算法(GA)、粒子群算法(PSO)优化对比来测试 CGE-SSA 算法全局求解能力以及跳出局部最优能力。测试函数描述如表 4-4。

为了比较不同算法的优劣性,设置种群规模设为 30,迭代次数为 200,并循环 50 次,取每次循环的最优适应度的平均值和标准差来衡量算法的性能指标,并通过迭代曲线比较算法的收敛速度和收敛精度。

表 4-4 测试函数

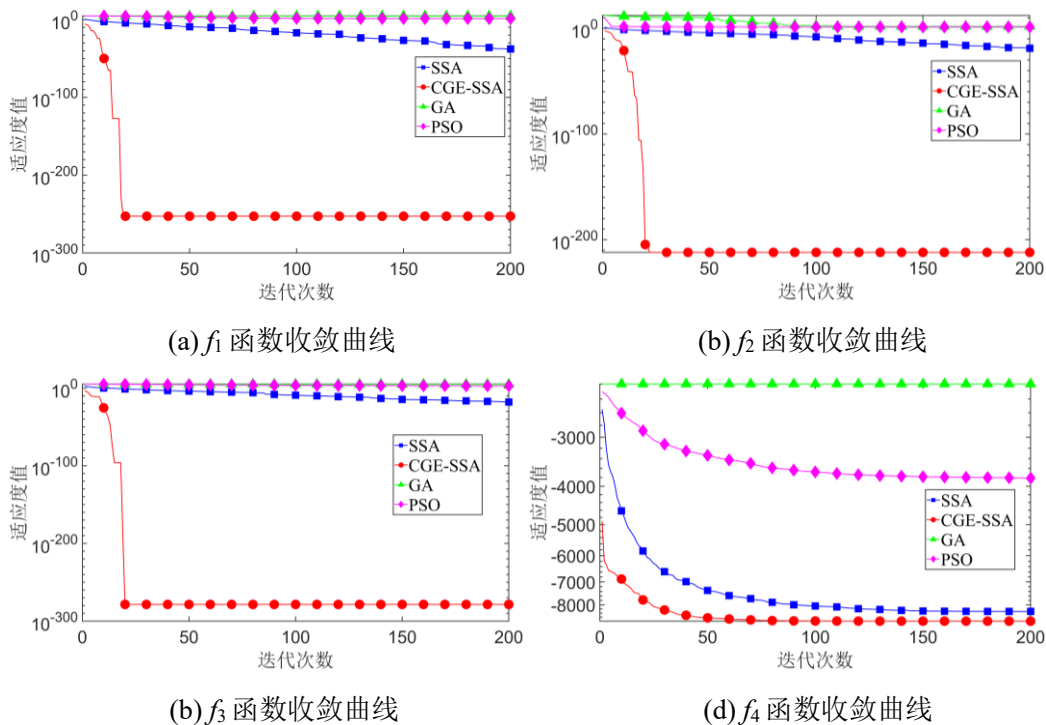
| 函数                                                     | 维度 | 范围         |
|--------------------------------------------------------|----|------------|
| $f_1 = \sum_{i=1}^n x_i^2$                             | 30 | [-100,100] |
| $f_2 = \sum_{i=1}^n  x_i  + \prod_{i=1}^n  x_i $       | 30 | [-10,10]   |
| $f_3 = \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^i x_j \right)^2$ | 30 | [-100,100] |
| $f_4 = \sum_{i=1}^n -x_i \sin(\sqrt{ x_i })$           | 30 | [-500,500] |

续表 4-4 测试函数

| 函数                                                                                                      | 维度 | 范围                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|---------------------|
| $f_5 = \left( \frac{1}{500} + \sum_{j=1}^{25} \frac{1}{j + \sum_{i=1}^2 (x_i - a_{ij})^6} \right)^{-1}$ | 2  | $[-65.536, 65.536]$ |
| $f_6 = -\sum_{i=1}^5 [(x - a_i)(x - a_i)^T + c_i]^{-1}$                                                 | 4  | $[0, 4]$            |

运行 50 次实验结果如图 4-9 和表 4-5 所示。由图 4-9 (a)、(b)、(c)、(d) 可知，采用 CGE-SSA 四个函数迭代曲线分别在第 19 代、第 22 代、第 20 代、第 194 代收敛。采用 SSA 四个函数迭代曲线均未收敛，且最后一代结果分别为 1.6E-38、1.42E-19、1.06E-18、-8319.1。采用 GA 的  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ 、 $f_4$  函数曲线收敛，收敛结果分别为 30862.8、70.6、56386.4、-2198。采用 PSO 的  $f_2$  函数曲线收敛，收敛结果为 19.7。由图 4-9 (c)、(d) 可知，CGE-SSA 迭代曲线的收敛速度与精度要明显高于其他算法。

由各测试函数收敛曲线和实验结果对比可知，CGE-SSA 较 SSA、GA、PSO 有更好的收敛速度和精度，且最优适应度的标准差和均值更小，尤其在单峰函数上，CGE-SSA 算法的优化效果远超过其他算法，体现了 CGE-SSA 算法的优越性与稳定性。综上可知，相较于其他算法，CGE-SSA 搜索性能最佳。



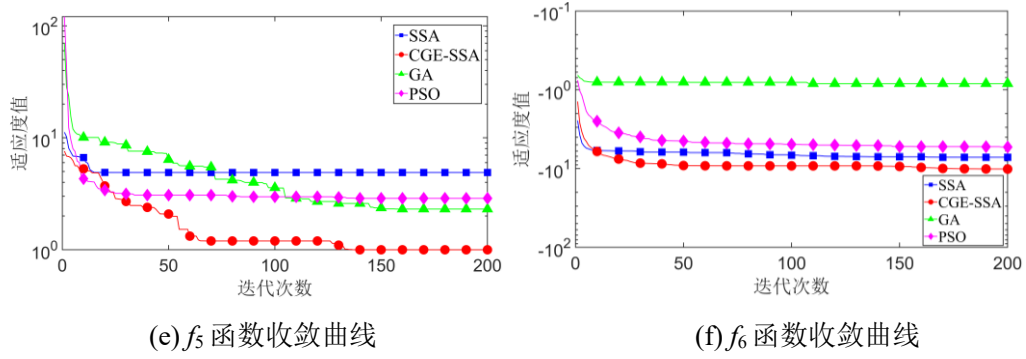


图 4-9 运行结果图

表 4-5 实验结果对比

| 函数    | 参数  | SSA      | CGE-SSA | GA      | PSO     |
|-------|-----|----------|---------|---------|---------|
| $f_1$ | 平均值 | 1.6E-38  | 0       | 30862.7 | 21      |
|       | 标准差 | 1.05E-37 | 0       | 9157.3  | 2.8     |
| $f_2$ | 平均值 | 1.42E-19 | 0       | 70.6    | 19.7    |
|       | 标准差 | 9.91E-19 | 0       | 10.4    | 2.1     |
| $f_3$ | 平均值 | 1.06E-18 | 0       | 56386.4 | 567.7   |
|       | 标准差 | 2.65E-17 | 0       | 19970   | 243     |
| $f_4$ | 平均值 | -8319.1  | -8803.1 | -2198   | -3812.3 |
|       | 标准差 | 787.8    | 307.9   | 370.8   | 658.4   |
| $f_5$ | 平均值 | 4.9      | 0.99    | 2.31    | 2.87    |
|       | 标准差 | 5.1      | 0.83    | 1.38    | 1.93    |
| $f_6$ | 平均值 | -7.2     | -10.15  | -0.84   | -5.33   |
|       | 标准差 | 2.5      | 7.8E-7  | 0.43    | 2.4     |

### 4.3 基于改进麻雀算法的多目标优化

不同于单目标算法，多目标算法个体的适应度值是多个指标决定的，无法直接比较得出最优个体。因此，通过在 CGE-SSA 算法中添加非支配性排序程序和拥挤空间计算程序，实现多目标个体之间适应度值的对比，多目标麻雀算法优化流程图如图 4-10 所示。首先，初始化麻雀种群并通过适应度函数计算各麻雀个体的适应度值，并对其进行非支配性排序确定最优个体及最优位置；其次，根据

三种迭代公式更新三种麻雀个体的位置，并与个体的历史适应度值进行比较，重新排序麻雀个体以及更新非支配性解集；最后，循环此迭代步骤直至达到最大迭代次数，输出最终非支配性解集。

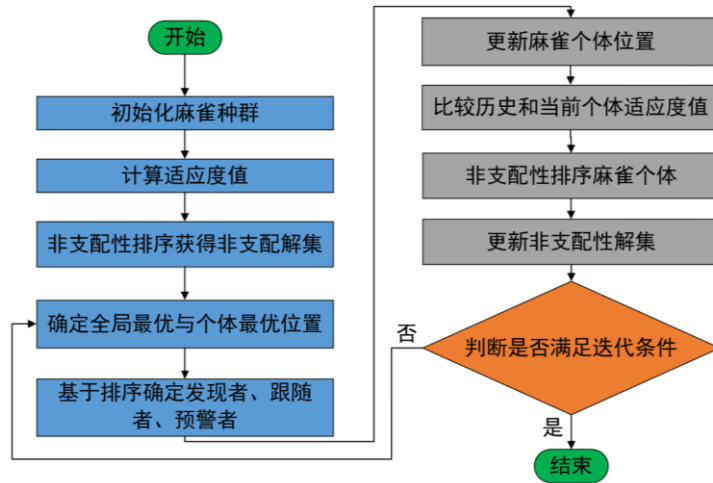


图 4-10 优化流程图

#### 4.3.1 多目标优化结果

本文通过响应面分析法拟合优化结构参数和优化目标之间的二阶回归方程，然后采用 MATLAB 软件编写改进的多目标麻雀算法程序，并将拟合的目标函数写入程序中，定义各参数的上下限以及优化目标的约束条件。设置维度为 4，麻雀种群数量为 50，非支配解集储存库为 50，最大迭代次数为 200 次，对优化目标进行寻优，得到 Pareto 前沿解集。运行程序结果如图 4-11：

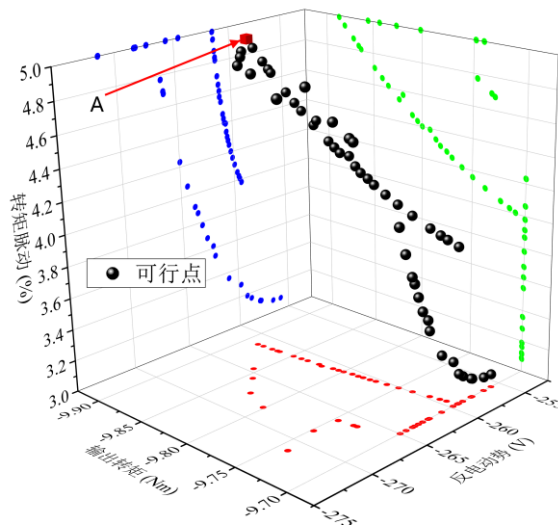


图 4-11 帕累托前沿

由图 4-11 可知, 50 个点均满足优化要求, 其中 A 点在满足转矩脉动小于 5% 的条件下, 输出转矩高于其他 49 个点, 输出转矩最大为 9.88 Nm, 相反电动势幅值为 261.5 V。因此, 为了使电机在满足其他性能要求下具有较高的输出能力, 选择 A 点作为最优点。

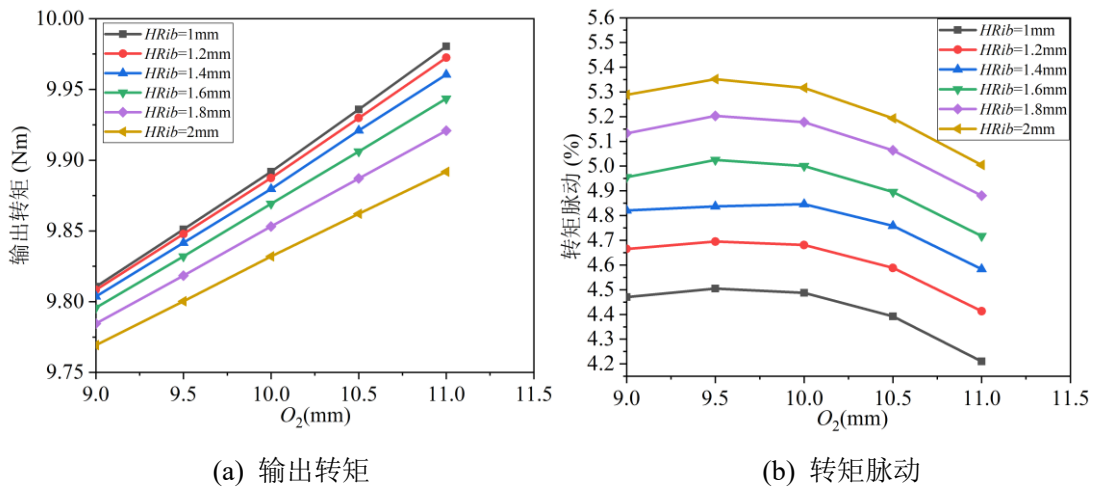
#### 4.3.2 参数化分析

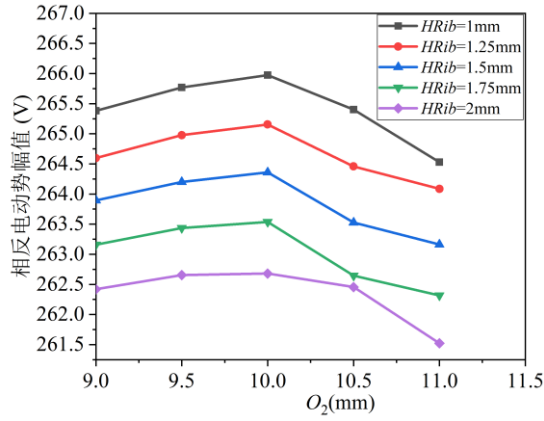
在上一节中使用改进麻雀算法完成了对高灵敏度参数  $Rib_1$ 、 $Rib_2$ 、 $W_{m1}$ 、 $W_{m2}$  的优化。为了继续完成对永磁同步电机其余 4 个参数的优化, 本节在多目标麻雀算法优化的基础之上, 使用参数化的方法对低灵敏度参数  $B_1$ 、 $O_2$ 、 $HRib$ 、 $B_{s0}$  进行寻优。为了简化参数分析难度, 本文将 4 个参数分为两组分别分析, 这样不仅可以有效降低参数化计算量, 还能提升优化精度。

##### (1) $HRib$ 和 $O_2$ 参数化分析

肋高  $HRib$  和永磁体与轴间距  $O_2$  决定了永磁体的形状, 从而影响气隙磁密波形以及大小。本文利用 Maxwell 软件进行参数化分析, 设置  $HRib$ 、 $O_2$  范围分别为 1-2 mm, 9-11 mm, 以输出转矩、转矩脉动、相反电动势幅值为分析目标。参数化结果如图 4-12 所示。

由图 4-12 (a)、(b)、(c)可知输出转矩、相反电动势幅值随着  $HRib$  增大而减小, 转矩脉动随着  $HRib$  增大而增大, 且输出转矩呈直线上升。因此, 取  $HRib$  最优值取 1 mm。当  $HRib=1$  时对于参数  $O_2$ ,  $O_2=11$  mm 时转矩脉动达到最小, 输出转矩达到最大, 但是相反电动势幅值小于 265 V, 其余均大于 265 V。因此, 选择  $O_2=10.5$  mm 为最优值。





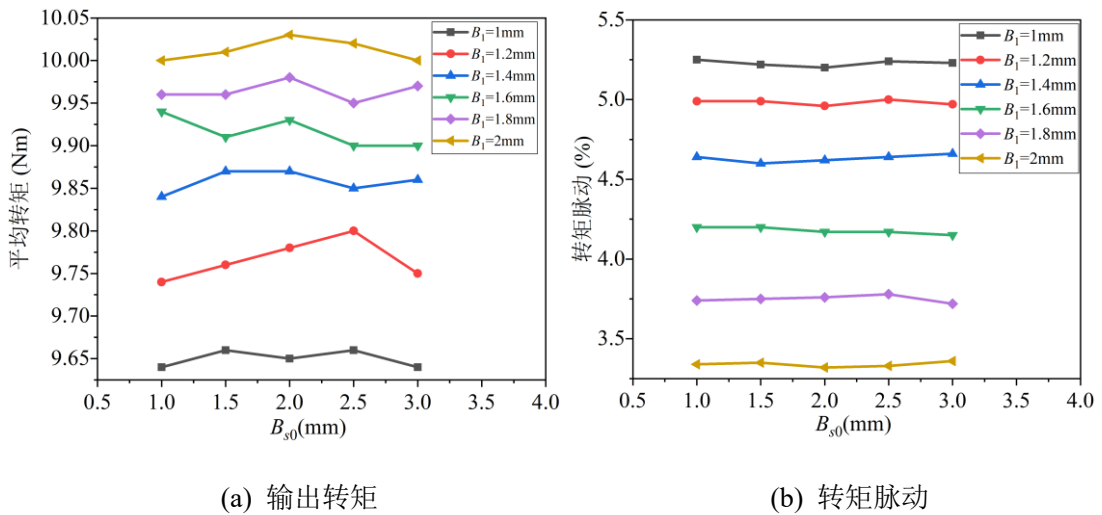
(c) 相反电动势

图 4-12 参数化结果

## (2) $B_{s0}$ 和 $B_1$ 参数化分析

槽口宽度  $B_{s0}$  的尺寸会影响齿槽转矩，进而影响电机的振动和噪声。管道厚度  $B_1$  影响磁力线的走向，如果  $B_1$  过小会造成漏磁严重，从而导致电机输出能力大大下降。本文设置  $B_{s0}$ 、 $B_1$  范围分别为 1-3 mm，1-2 mm，以输出转矩、转矩脉动为分析目标。参数化结果如图 4-13 所示。

由图可知，输出转矩随着  $B_1$  的增加而增加，转矩脉动随着  $B_1$  的增加而减小。因此， $B_1$  的最优值为 2 mm。当  $B_1=2$  mm 时，转矩脉动变化极小，输出转矩在  $B_{s0}=2$ mm 时取最大值。因此，取  $B_{s0}=2$ mm 为最优值。



(a) 输出转矩

(b) 转矩脉动

图 4-13 参数化结果

## 4.3.3 优化结果分析

本文利用改进麻雀算法优化高灵敏度参数，参数化分析优化低灵敏度参数。

为了验证改进麻雀算法对电机优化效果的优越性，将 CGE-SSA 优化后的结果分别于初始模型、SSA 优化、PSO 优化、GA 优化结果进行对比。表 4-6 为电机优化前后结果对比。

由表 4-6 可知，在结构参数合理变化范围内，采用四种算法优化后的电机模型较均符合优化目标要求，且较优化前输出转矩、转矩脉动和反电动势幅值有明显改善。相较于 SSA、GA、PSO 的优化结果，采用 CGE-SSA 优化后的电机具有更低的转矩脉动和更高的反电动势幅值以及更高的输出转矩。因此，CGE-SSA 较 SSA、GA、PSO 有更好的优化效果，优化后的电机输出性能更佳。

表 4-6 优化前后结果对比

| 优化参数               | 初始值   | CGE-SSA | SSA    | PSO    | GA     |
|--------------------|-------|---------|--------|--------|--------|
| $Rib_1/\text{mm}$  | 4.1   | 7       | 6.5    | 6.5    | 6.4    |
| $B_1/\text{mm}$    | 1.5   | 2       | 2      | 2      | 2      |
| $W_{m1}/\text{mm}$ | 28    | 27      | 27.5   | 27.2   | 27     |
| $O_2/\text{mm}$    | 11    | 10.5    | 11     | 10.8   | 11     |
| $Rib_2/\text{mm}$  | 13    | 15      | 14.5   | 14.7   | 14.5   |
| $W_{m2}/\text{mm}$ | 13.8  | 14.96   | 14     | 13.5   | 13.5   |
| $B_{s0}/\text{mm}$ | 2.5   | 2       | 2      | 2      | 2      |
| $HRib/\text{mm}$   | 2     | 1       | 1      | 1.5    | 2      |
| 输出转矩/Nm            | 9.72  | 10.03   | 9.99   | 9.84   | 9.78   |
| 转矩脉动/%             | 6.4   | 3.32    | 3.61   | 3.63   | 4.19   |
| 相反电动势幅值/V          | 249.7 | 268.3   | 265.04 | 261.86 | 258.86 |

图 4-14 为不同算法优化后输出转矩对比图。由图可知，采用 CGE-SSA 优化后的输出转矩曲线均在其他算法优化和初始值曲线的上方，证明采用 CGE-SSA 优化后的输出转矩最高，达到了 10.03 Nm。此外，由图可知采用 CGE-SSA 优化后的输出转矩波动最小为 3.32%，较初始值的 6.4%下降了 48%，转矩脉动得到了有效降低。

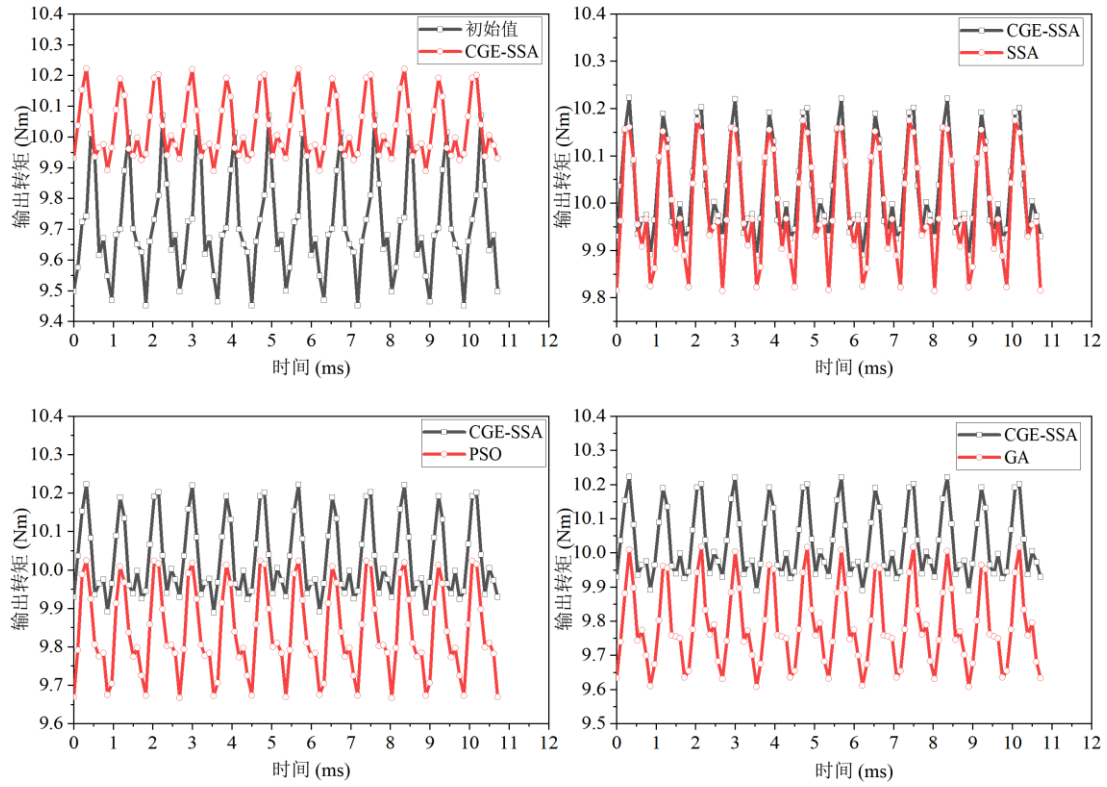
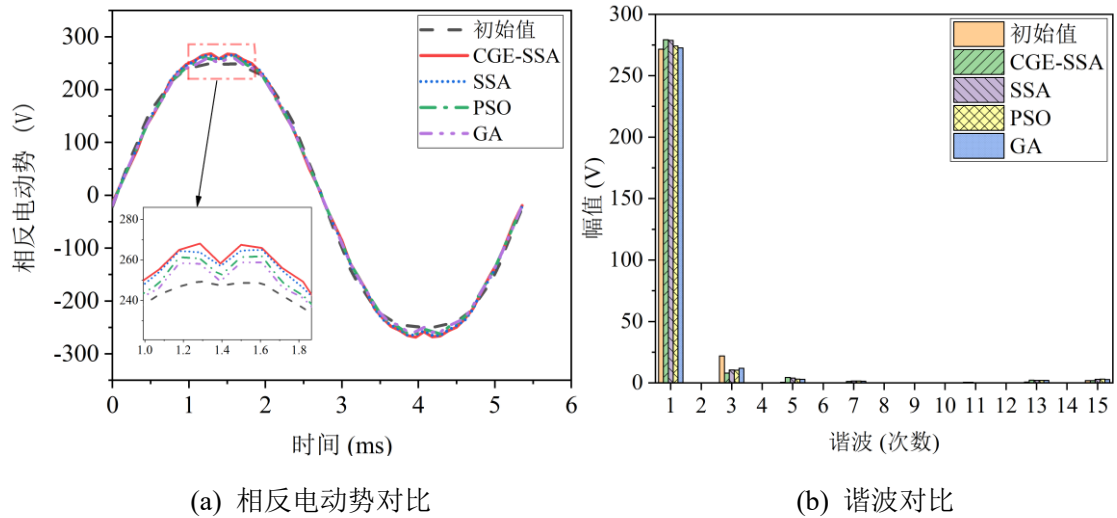


图 4-14 输出转矩对比

图 4-15 为相反电动势及谐波对比。由图 4-15 (a)、(b)可知，较 SSA、GA、PSO 优化，CGE-SSA 优化后的电机反电动势的幅值更高且畸变率更低。较初始电机，反电动势幅值由 249.7 V 提升到 268.3 V，增加 18.6 V。基波幅值由 271.67 V 增加到 279.1 V，3 次谐波由 21.95 V 降到 8.1 V，畸变率由 7.75% 下降到 3.61%，下降 53.4%。反电动势的增加可以有效提升电机整体的工作效率，畸变率降低可以提高反电动势波形的正弦度。



(a) 相反电动势对比

(b) 谐波对比

图 4-15 相反电动势及谐波对比

图 4-16 为齿槽转矩对比图, 由图可知, CGE-SSA 优化后的电机齿槽转矩得到了极大的降低, 较其他算法优化, 采用 CGE-SSA 优化后的齿槽转矩幅值最低。较初始电机, 齿槽转矩幅值从 106.07 mNm 下降到 14.38 mNm, 下降 86%, 极大地减少了电机的振动与噪声。综合以上对比分析证明, 较 SSA、GA、PSO 算法, CGE-SSA 算法的优化效果最佳。

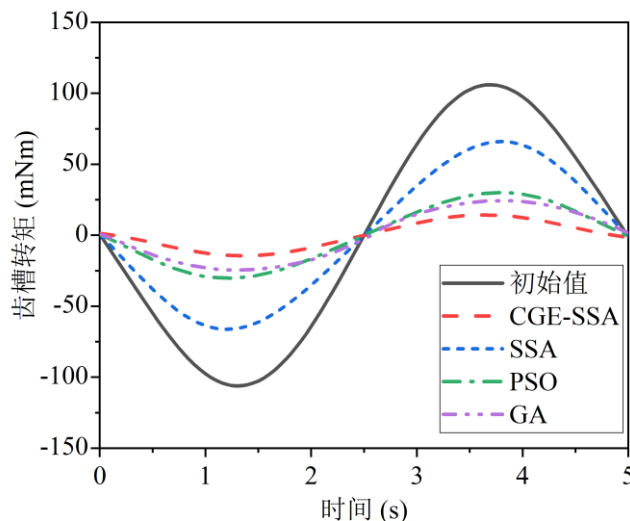


图 4-16 齿槽转矩对比

## 4.4 电机热分析

永磁同步电机的常用永磁体材料为钕铁硼, 钕铁硼在高温下会发生退磁从而造成电机输出能力的下降, 温度过高会造成永磁体失效。此外, 电机的绝缘材料在一定程度上存在温度限制, 若绕组温度过高会造成绝缘损坏进而导致出现导线短路现象。因此, 永磁同步电机的冷却结构设计及热分析是电机设计中重要的部分。在电机热分析计算中, 热网络法和有限元法是当前最常用的方法<sup>[77]</sup>。基于 Fluent 有限元法存在耗时长、计算效率低的问题, 因此本文采用热网络法进行电机热分析。

### 4.4.1 电机的热源

电机是机械能与电能之间的能量转换装置, 运行过程中会产生损耗, 这些损耗主要转化为热能, 导致电机各部位温度升高<sup>[78]</sup>。永磁同步电机的损耗主要有以下几种:

#### (1) 绕组铜耗

电机绕组铜耗是电流通过导线产生的焦耳损耗，包括直流铜耗和附加铜耗。直流铜耗是电流通过电阻产生的热损耗，附加铜耗则由集肤效应和多股线电流引起的杂散损耗组成，两者统称为交流损耗。直流铜耗可表示为<sup>[79]</sup>：

$$P_{DC} = mI^2R \quad (4-12)$$

式中， $m$  为电机相数； $I$  为电流的有效值，单位为 A； $R$  为绕组的相电阻，单位为  $\Omega$ 。

### （2）铁芯损耗

铁耗包括磁滞损耗、涡流损耗和附加损耗。磁滞损耗是铁芯材料中磁畴间摩擦消耗的能量；涡流损耗是铁芯在磁场中因涡流效应产生的热损耗，与电机转速相关；附加损耗则由铁芯磁化不均匀、磁畴移动导致的涡流分布不均和磁密局部波动引起。铁芯损耗可表示为：

$$P_{Fe} = P_h + P_e + P_a \quad (4-13)$$

式中， $P_h$  为磁滞损耗； $P_e$  为涡流损耗； $P_a$  为附加损耗。

### （3）机械损耗

永磁同步电机机械损耗分为空气摩损耗和机械摩擦损耗。风摩损耗是电机旋转时与空气阻力摩擦产生的损耗；摩擦损耗则是电机运行时轴与轴承摩擦引起的损耗。摩擦损耗可以近似用式(4-14)、(4-15)去估计。

其中摩擦损耗为：

$$P_f = 0.15 \frac{F}{d} v \times 10^{-5} \quad (4-14)$$

式中， $P_f$  为摩擦损耗； $F$  为轴承的载荷； $d$  为滚珠的直径； $v$  为滚珠质心的圆周速度。

风摩损耗为：

$$P_w = 1.75 q_v v^2 \quad (4-15)$$

式中， $q_v$  为空气流量； $v$  为转子的圆周速度。

### （4）附加损耗

附加损耗也称为杂散损耗，主要由电枢电流产生的漏磁场和高次谐波引起。由于难以精确计算，通常采用经验公式估算电机的附加损耗。

4.4.2 电机冷却结构设计

本文设计的永磁同步电机的额定电流密度小于  $5\text{ A/mm}^2$ 。因此，本文采用自然风冷的冷却结构，自然风冷具有结构简单、成本低、质量轻等优点。其结构图 4-17 如下所示：此冷却结构在电机机壳上均匀分布轴向散热片，散热片高度为  $5\text{ mm}$ ，厚度为  $3\text{ mm}$ ，散热片跨距为  $18\text{ mm}$ 。

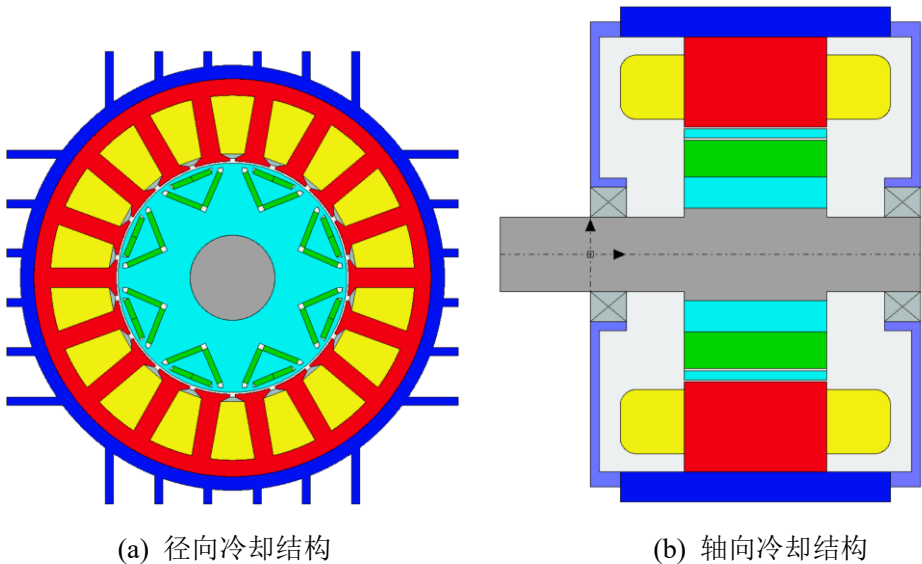


图 4-17 电机自然冷却结构图

4.4.3 不同工况下温度场计算

本文利用 Motor-CAD 的电磁与热耦合功能进行电机温度场计算，通过电磁模块计算得到的铜耗、铁耗传递到热模块，再利用热模块分别进行稳态和瞬态温升计算。电机的温升不仅和损耗有关，还与材料的导热性能相关，表 4-7 为各零部件的材料及其热属性。

表 4-7 各零部件材料及其热属性

| 电机各部件 | 材料       | 导热系数( $\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ ) | 比热( $\text{J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ ) | 密度( $\text{kg/m}^3$ ) |
|-------|----------|-------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------|
| 机壳    | 铝合金      | 168                                       | 830                                      | 2700                  |
| 定子铁芯  | DW310-35 | 30                                        | 450                                      | 7650                  |
| 转子铁芯  | DW310-35 | 30                                        | 450                                      | 7650                  |
| 永磁体   | N35SH    | 7.6                                       | 460                                      | 7500                  |
| 转轴    | 45 钢     | 60.5                                      | 460                                      | 7800                  |
| 绕组    | 铜        | 401                                       | 400                                      | 8954                  |

(1) 额定工况温度场计算

电机额定工况指的是电机长时间工作所能输出的最大能力,通过仿真得出电机在额定工况的主要损耗如表 4-8 所示。由表可知,电机的主要损耗为铜损,铁损中定子铁损占主要,永磁体损耗较少。

表 4-8 额定工况损耗

| 损耗       | 值     |
|----------|-------|
| 绕组铜损(W)  | 74.61 |
| 定子铁损(W)  | 39.2  |
| 转子铁损(W)  | 3.81  |
| 永磁体损耗(W) | 0.48  |

在电机热模块中设置环境温度为 40℃, 求解方式选择稳态。温度场计算结果如图 4-18 所示。由图可知稳定后绕组最高温度为 123.5℃, 小于 F 绝缘等级的限制温度 155℃, 且永磁体最高温度为 111.7℃, 小于 N35SH 的耐温等级 150℃。因此, 此电机的额定稳态温度满足温升要求。

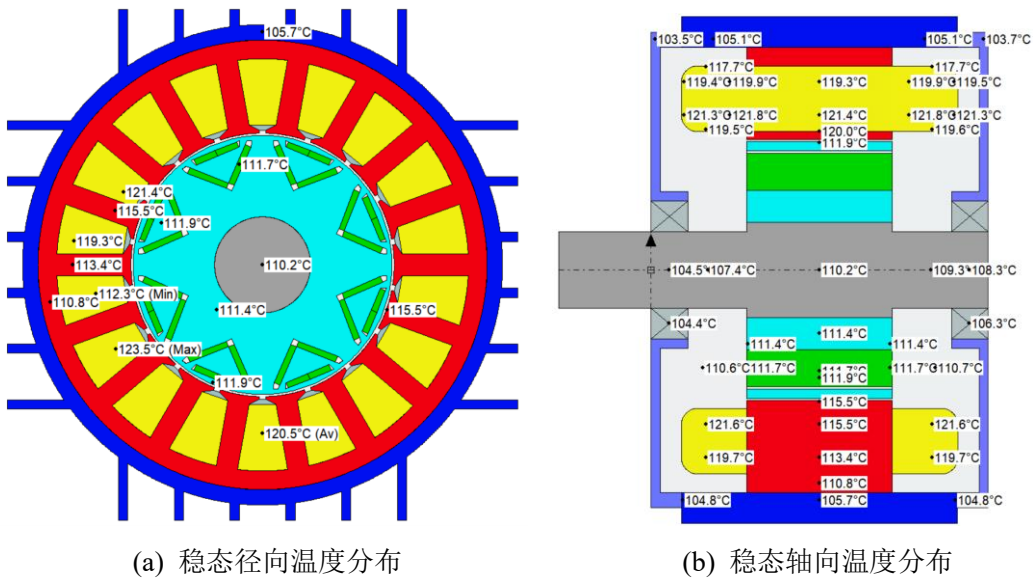


图 4-18 额定工况稳态温度分布

(2) 峰值工况温度场计算

峰值工况指的是电机短时间内所能达到的最大输出能力,本文利用有限元法得到的峰值工况下主要损耗如表 4-9 所示。由表可知,相较于额定工况,峰值工

况下的绕组损耗明显增加，这是因为电流的增加导致直流铜损的增加。

表 4-9 峰值工况损耗

| 损耗       | 值     |
|----------|-------|
| 绕组铜损(W)  | 329   |
| 定子铁损(W)  | 42.15 |
| 转子铁损(W)  | 7.086 |
| 永磁体损耗(W) | 1.892 |

在电机热模块中设置各部件初始温度为  $40^{\circ}\text{C}$ ，求解方式选择瞬态，考虑到发动机实际工况，设置峰值计算时长为 360S。温度场计算结果如图 4-19 所示。由图可知稳定后绕组最高温度为  $99.4^{\circ}\text{C}$ ，小于 F 绝缘等级的限制温度  $155^{\circ}\text{C}$ ，且永磁体最高温度为  $49.5^{\circ}\text{C}$ ，小于 N35SH 的耐温等级  $150^{\circ}\text{C}$ 。定转子铁芯最高温度均不是很高，证明此电机散热正常。综上所述，此电机的峰值瞬态温度满足要求。

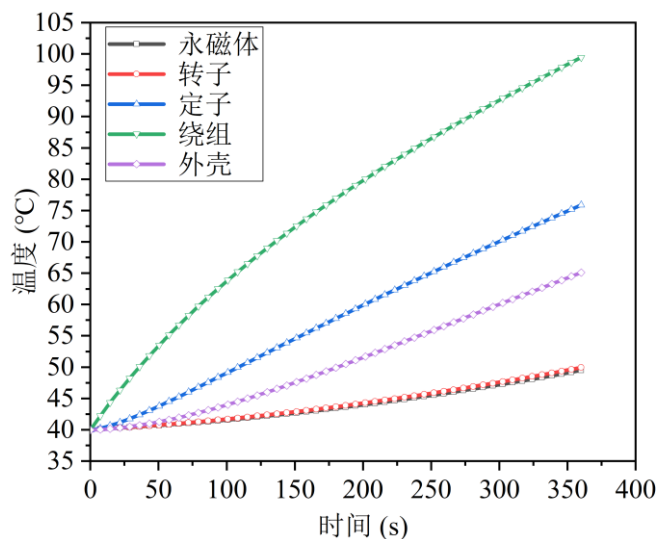


图 4-19 峰值工况瞬态温升

#### 4.5 电机效率 Map 图及外特性分析

电机的效率 map 图可以体现电机在全工况下效率分布情况，而外特性可以体现出电机在不同转速下的最大输出能力。图 4-20 为电机效率 Map 图，由图可

知电机的最大效率大于 96%，且高效区集中在 2000 rpm-4000 rpm 之间，额定工况点处于高效区，具有较高的效率。同时，电机大于 96%占比为 15.64%。证明电机在不同工况下运行都有着极佳的工作效率，且电机效率分布图较为合理。

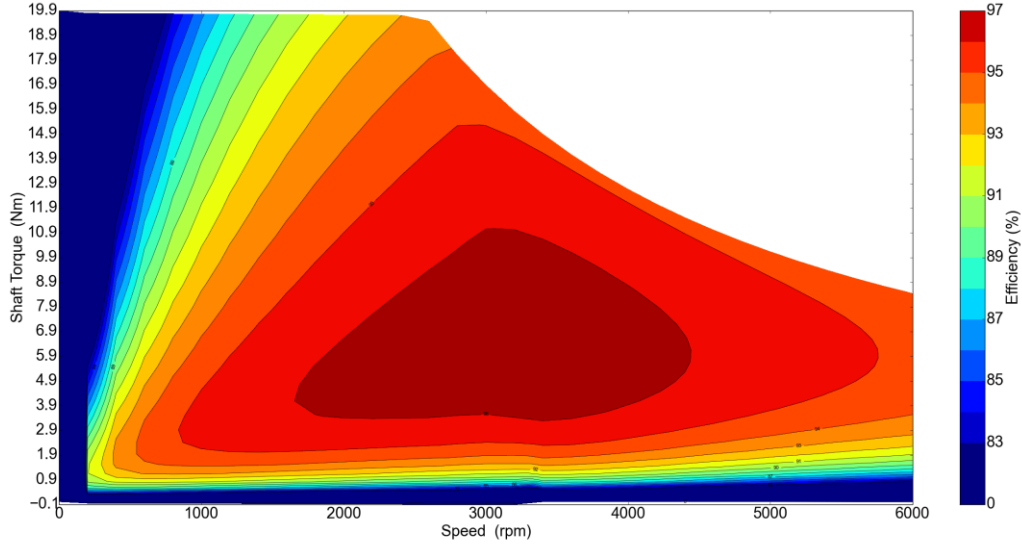


图 4-20 效率 Map 图

由图 4-21 可知，电机的最输出扭矩为 19.7 Nm，拐点转速约为 2600 rpm，峰值功率为 5.3 kW，满足电机峰值功率设计要求。此外，电机在高转速下依然能维持恒功率输出，电机整体具有不错的弱磁能力。

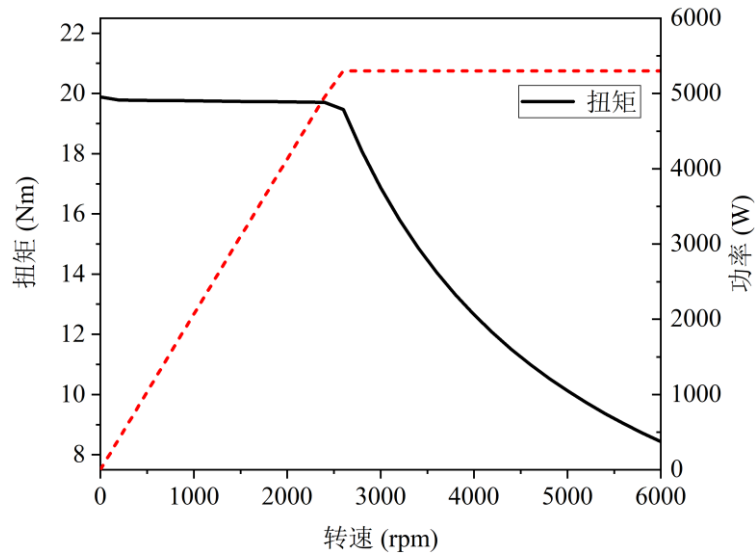


图 4-21 电机外特性

## 4.6 样机制造

本文设计的附件电机主要由定子、转子、机壳、前后端盖、绕组、永磁体组

成，电机结构图如图 4-22 所示，总重量约为 6kg。

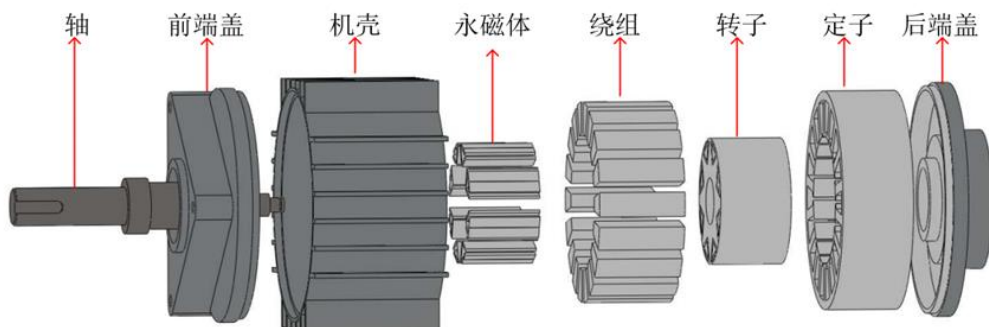


图 4-22 电机结构图

图 4-23 为样机各部件图以及总装图，轴、前后端盖、机壳、定转子材料分别为合金钢 40cr、铝、铝、DW310-35。其中轴采用阶梯轴形式方便装拆；后端盖留有出线口，采用旋变位置传感器；定子采用 18 槽 8 极配比，转子采用 V+ 一型结构；采用自然冷却，机壳上均匀分布散热片。

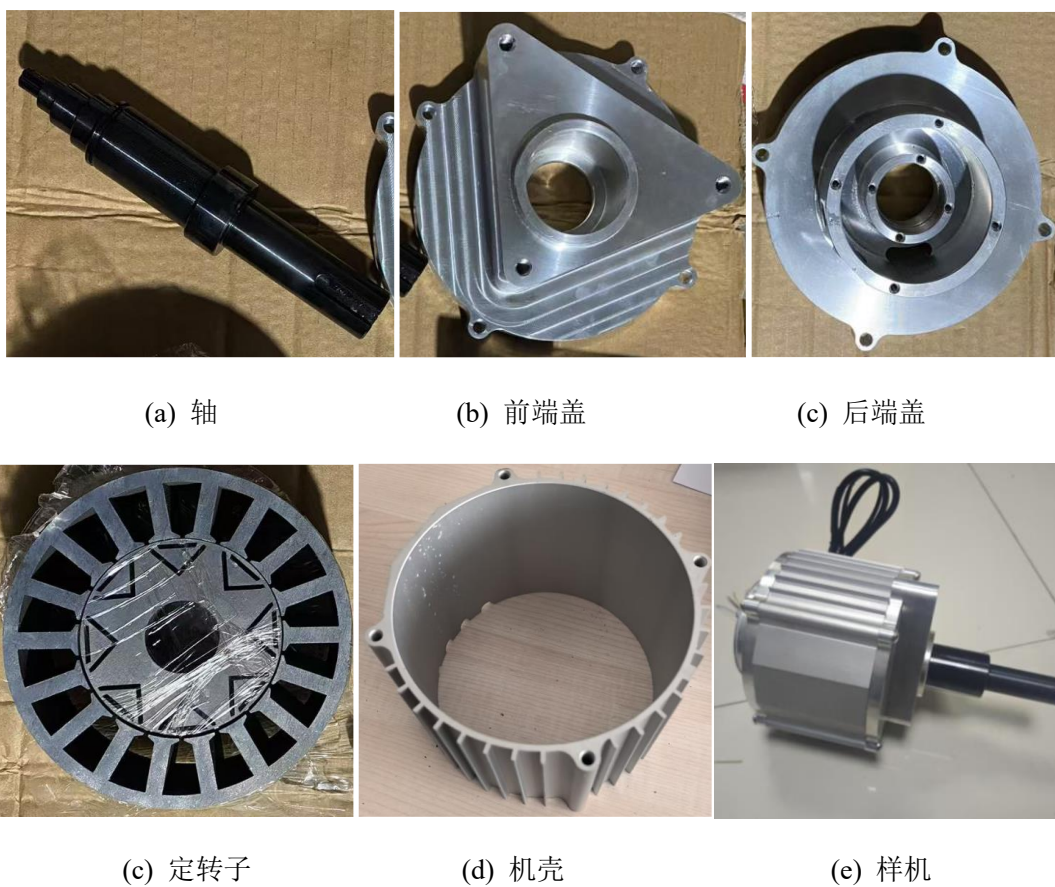


图 4-23 样机各部件图

## 4.7 本章小结

本章主要完成了永磁同步电机的优化设计以及冷却结构的设计。首先，本章对优化参数参数进行灵敏度分析并完成响应面模型建立。其次，对麻雀算法进行改进，通过对比分析得出改进后的麻雀算法较传统麻雀算法、粒子群算法、遗传算法性能有显著提升。然后，利用改进麻雀算法对电机进行多目标优化，结果显示：优化后，电机的整体性能显著提高。最后，对优化设计完成的永磁同步电机进行热分析。分析结果得出，电机在额定工况和峰值工况下温度均满足温升要求。此外，通过对电机效率 Map 图和外特性分析得出结论：优化后的电机具有较强的输出能力和极佳的工作效率。

## 第5章 发动机冷却系统散热分析

将第4章优化后的永磁同步电机分别与传统风扇、水泵进行同轴连接完成电子风扇和电子水泵设计。为了验证电子水泵和电子风扇的有效性，本章基于二者搭建发动机冷却系统散热模型。首先对发动机冷却系统及热平衡理论进行了研究，随后在 AMESim 软件中输入发动机、节温器、散热器、电子风扇和电子水泵等参数，并制定控制策略，完成仿真模型搭建。最后，仿真分析发动机冷却系统在稳态工况、低速大扭矩工况、额定工况下的散热能力。

### 5.1 发动机冷却系统介绍

冷却系统是发动机的关键构成部分，直接影响发动机各部件的热负荷、热量分布以及燃油经济性<sup>[80]</sup>。其核心功能在于确保发动机运转期间，始终保持正常工作温度。其工作原理为：首先，通过冷却液与发动机本体接触进行热传导，其次，利用水泵驱动冷却液循环，使得冷却液流过散热器；最终，通过散热风扇加快空气流动，散发冷却液热量，从而降低发动机本体的温度。一般情况下，发动机的最佳出水温度在 90℃ 左右，不同类型的发动机最佳工作温度会有一些差别。

#### 5.1.1 发动机冷却系统原理

发动机冷却系统主要分为水冷和风冷两种形式，其中闭式强制循环水冷是汽车发动机最常用的冷却方式。其工作原理是通过水泵对冷却液加压，使其在发动机缸体、缸盖水套及其他循环通路中流动。

发动机冷却系统示意图如图 5-1 所示，冷却液在水泵的驱动下，冷却液压力上升，通过发动机进水管流入发动机水套中，然后冷却液吸发动机本体的热量并从发动机出水管流出。当发动机水温降低时，为了使发动机能够快速升温，节温器不开启，冷却液只经过小循环和暖风回路。随着发动机散热量的增加，小循环以及不能满足发动机的散热需求，节温器会逐渐开启，由于系统阻力的下降，水泵流量逐渐增加，冷却液会经过小循环、大循环、暖风回路回到水泵。当水温过高时，节温器完全打开，冷却液小循环关闭，水泵流量和散热能力达到最大值。这种循环方式可平衡冷却液温度，确保发动机处于最佳工作温度。

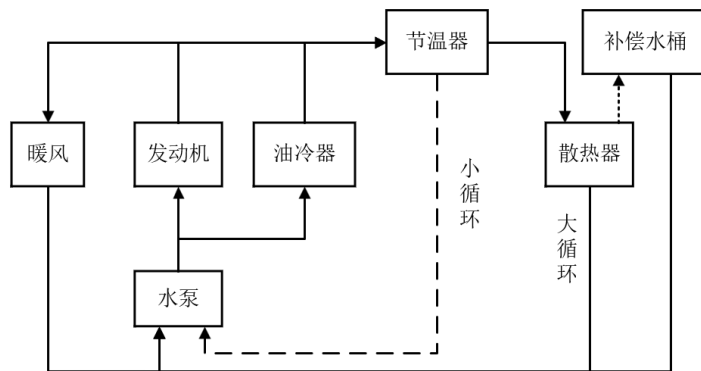


图 5-1 发动机冷却系统示意图

### 5.1.2 主要零部件介绍

#### (1) 节温器

节温器又称为调温器，一般通过节温器座安装在冷却回路中，用于调节冷却系统中大、小循环水流量，其结构如图 5-2 所示。节温器利用石蜡受热膨胀的特性工作。当发动机水温升高时，固态石蜡膨胀，压缩弹簧并推动阀门开启，冷却液通过节温器流入散热器，发动机冷却系统进入大循环。当温度达到设定值时，节温器完全打开，冷却系统完全进入大循环，小循环关闭，冷却液流量达到最大。反之，当温度较低时，石蜡体积缩小，阀门逐渐关闭，大循环回路关闭，此时冷却液只流过小循环回路。节温器开启温度一般在  $85^{\circ}\text{C}$  左右，全开温度和开启温度相差  $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 。节温器通过调节流入散热器的水流量来调整冷却系统的散热能力，使发动机出水温度保持在约  $90^{\circ}\text{C}$ 。

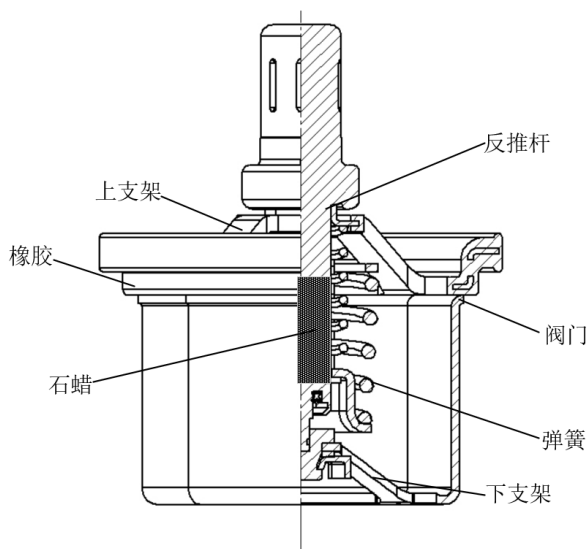


图 5-2 节温器结构示意图

## （2）散热器

对于重型商用车而言，散热器常常是和中冷器安装在一起的，散热器用来调节发动机进水温度，而中冷器是用来调节发动机进气温度。散热器外形一般为方形结构，如图 5-3 所示，其主要组成有：上水室、下水室、冷却管、散热器芯等。其工作原理为：高温冷却液在散热器芯内流动，通过与外部空气的热交换过程，冷却液中的热量被空气吸收，从而实现冷却液温度的降低。

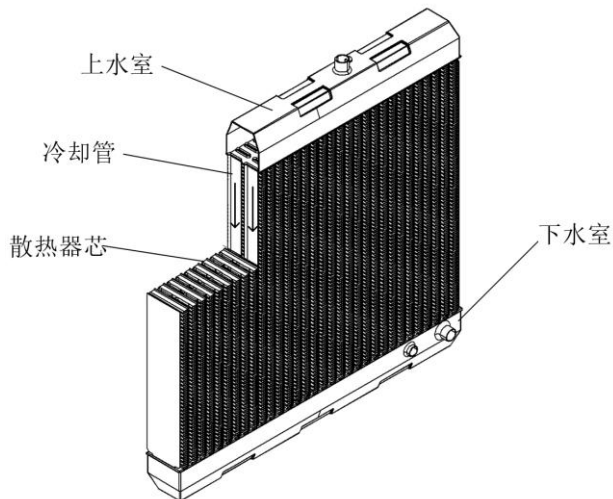


图 5-3 散热器结构示意图

## （3）水泵

作为发动机冷却系统的动力核心，水泵起着驱动冷却液循环的作用。在当代汽车发动机中，离心式水泵已成为冷却系统的主流选择，其通过旋转产生的离心力有效地推动冷却液在系统中持续流动。离心泵结构示意图如图 5-4 所示，其主要组成有：叶轮、蜗壳、进水口、出水口、轴。

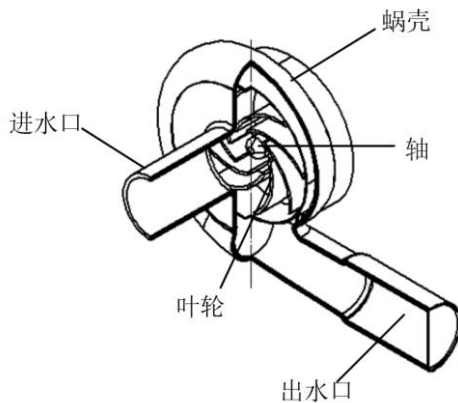


图 5-4 离心泵结构示意图

水泵主要分为机械水泵和电子水泵两种。传统机械水泵依靠发动机驱动，无法智能调节转速，水泵转速受限于发动机转速。冷却系统常常会出现冷却不足和冷却过剩的问题，造成能耗较高和发动机性能下降。电子水泵采用电机驱动，会根据散热需求智能调节水流量，具有节能、高效等优点。目前，乘用车电子水泵已被广泛应用，而对于重型商用车，电子水泵受限于功率过大、安装空间有限以及成本等因素，导致电子水泵在重型商用车上应用寥寥无几，主要还是以机械水泵为主。

#### （4）风扇

发动机冷却系统中，散热风扇是一个重要的散热装置，散热器中冷却水热量主要依靠风扇散发。风扇分为机械风扇、电子风扇，同水泵相同，机械风扇和电子风扇主要区别是驱动方式不同，机械风扇通过发动机固定传动比驱动，电子风扇依靠电机直连驱动。在机械风扇中电控硅油离合风扇应用最为普遍，较传统机械风扇，电控硅油离合风扇可以根据水温不同调节离合器结合程度，从而实现风扇转速可控，其结构如图 5-5 所示。

传统散热风扇由于功率较高，使得需要消耗发动机较高能量，因此对发动机的排放影响较大。实验表明，发动机约 5%-8% 的功率输出用于驱动风扇。因此，采用电子风扇结合智能化控制策略对降低发动机能耗与排放以及提升发动机整体性能是具有重大意义的。

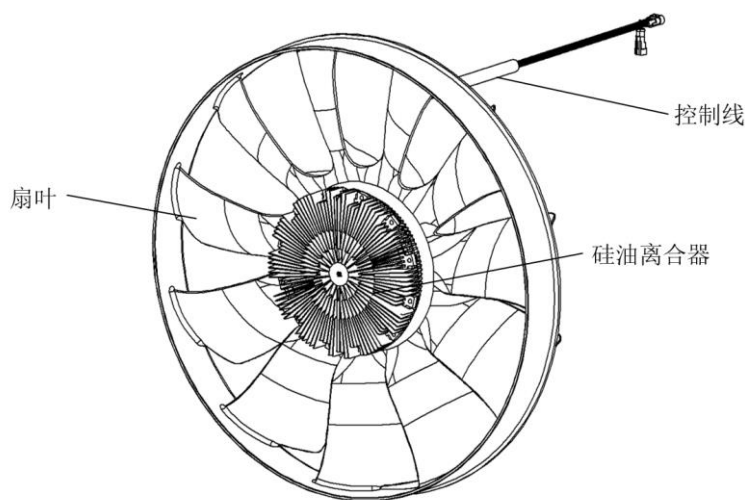


图 5-5 风扇结构示意图

## 5.2 发动机冷却系统热平衡理论计算

### 5.2.1 传热理论计算方法

做功和热传递是使物体内能发生变化的重要原因。发动机主要通过热传递的方式使系统各部件温度上升。热传递分为以下三种：

#### (1) 热传导

热传导指的是物体之间通过相互接触实现温度变化，这一过程主要依靠物质内部微观粒子的相互作用来实现，具体表现为粒子间的碰撞和晶格振动两种机制。其传热公式为：

$$q = -\lambda \text{grad}t \quad (5-1)$$

式中， $\text{grad}t$  为温度梯度函数， $\text{K/m}$ ； $\lambda$  为热导率， $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ； $q$  为热流密度， $\text{W/m}^2$ 。

#### (2) 热对流

热对流是流体中因温差引起密度变化而产生自发运动，进而实现热量传递的过程。受热流体因温度升高而密度减小，产生上升运动；较冷流体因密度较大而下沉，由此形成循环流动，使热量随流体运动传递至低温区域。其传热公式为：

$$q = h(t_w - t_f) \quad (5-2)$$

式中， $h$  为对流换热系数， $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ； $t_w$  为壁面温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $t_f$  为流体温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

#### (3) 热辐射

热辐射指的是物体通过电磁波向周围空间传递热能的过程。任何高于绝对零度的物体都会产生热辐射，其强度取决于物体温度及表面特性。这种辐射机制使物体能够与环境或其他物体进行热量交换。其传热公式为：

$$\Phi = \sigma AT^4 \quad (5-3)$$

式中， $\Phi$  为被加热物体吸热量，单位为  $\text{W}$ ； $\sigma$  为比例系数，对于黑体  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ ， $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$ ； $A$  为辐射表面积， $\text{m}^2$ 。

### 5.2.2 发动机热平衡方程

发动机热平衡表征了运行期间热量输入、转换、输出与损耗间的动态平衡关系。发动机燃烧主要遵循以下三个定律：

#### (1) 质量守恒方程

发动机质量守恒方程指的是发动机发生燃烧反应前后燃料总质量维持不变。

其方程为:

$$\frac{dm}{d\varphi} = \frac{dm_s}{d\varphi} + g_f \frac{dx}{d\varphi} - \frac{dm_e}{d\varphi} \quad (5-4)$$

式中,  $\frac{dm}{d\varphi}$  为燃烧的总质量, kg;  $\frac{dm_s}{d\varphi}$ ,  $\frac{dm_e}{d\varphi}$  为每循环进入和流出气;  $g_f$  为发动机每循环的喷油量, kg;  $\frac{dx}{d\varphi}$  为燃烧效率。

### (2) 能量守恒方程

即能量守恒定律作为热力学的核心原理, 阐明了物理系统中能量的转化与守恒关系。在发动机系统中, 该定律体现为发动机系统输入和输出能量维持不变, 遵循能量守恒。其方程如下所示:

$$\frac{d(m \cdot u)}{d\varphi} = \frac{dQ_B}{d\varphi} - P \frac{dV}{d\varphi} - \frac{dQ_w}{d\varphi} + h_s \frac{dm_s}{d\varphi} - h_e \frac{dm_e}{d\varphi} \quad (5-5)$$

式中,  $\frac{d(m \cdot u)}{d\varphi}$  为发动机气缸内能变化;  $\frac{dQ_B}{d\varphi}$  为燃料燃烧释放的能量;  $P \frac{dV}{d\varphi}$  为气体对活塞所做功;  $\frac{dQ_w}{d\varphi}$  为气体对气缸壁的散热量;  $h_s \frac{dm_s}{d\varphi}$ ,  $h_e \frac{dm_e}{d\varphi}$  为流入流出气缸的气体能量。

### (3) 理想气体状态方程

理想气体状态方程作为描述理想气体特性的基本关系式, 建立了气体压力、体积与温度之间的定量联系。该方程基于两个关键假设: 一是忽略气体分子间的相互作用力, 二是将分子体积视为可忽略不计。其状态方程为:

$$PV = \frac{mRT}{M} = nRT \quad (5-6)$$

式中,  $P$  为压强, Pa;  $V$  为气体体积,  $\text{m}^3$ ;  $T$  为气体温度, K;  $m$  为气体质量, g;  $M$  为摩尔质量, g/mol;  $n$  为气体的物质的量;  $R$  为气体常量, J/(mol·K)。

发动机传热计算方法作为冷却系统的理论基础, 可以为发动机冷却系统设计提供方向与方法, 而热平衡方程则可以量化热量输入、输出与系统内能变化的关系。通过热平衡方程的计算, 可以优化冷却液的流量、散热器的尺寸、系统的散热能力等, 从而保证发动机在安全温度范围内运行, 提高热效率, 降低能量损失, 并减少排放。

5.2.3 发动机热平衡计算方法

发动机在工作时，主要分为进气、压缩、做功和排气四个基本冲程，各冲程中通过机械功实现部分热能的转化。而其余的热量则通过热传递向周围的发动机部件、冷却系统（如水冷系统或油冷系统）和排气系统散发。 发动机燃烧能量变化转化方程如下：

$$Q_{\text{总}} = Q_e + Q_{ex} + Q_{w1} + Q_c + Q_u \tag{5-7}$$

式中， $Q_{\text{总}}$ 为燃烧产生的总热量； $Q_e$ 为气体对活塞做功； $Q_{ex}$ 为排气热量； $Q_{w1}$ 为冷却液散热量； $Q_c$ 为中冷器散热量； $Q_u$ 为其他热量。

5.3 发动机冷却系统仿真模型搭建

5.3.1 冷却系统主要子模型搭建

(1) 发动机模型

发动机作为产生热量的来源，发动机的散热量直接决定了冷却系统的热交换量。本文采用的发动机是一个 13 L 的气体机，其额定功率为 368 kW，额定转速为 1700 rpm。如图 5-6 为发动机模型，一共有 4 个端口，端口 2 和端口 4 为热液端口，分别与水泵与节温器相连。发动机模型参数如表 5-1 所示。

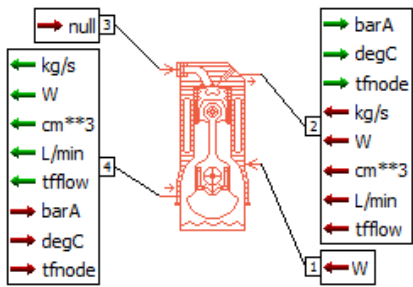


图 5-6 发动机模型

表 5-1 发动机模型参数

| 参数            | 数值    |
|---------------|-------|
| 端口 2 初始压力/bar | 1.013 |
| 端口 2 初始温度/°C  | 20    |
| 最大流量系数        | 1     |
| 冷却液体积/L       | 60    |

(2) 水泵模型

在发动机冷却系统中，水泵主要作用是推动冷却液，确保冷却液能够循环流动，从而达到散热的目的。通常传统机械水泵采用发动机驱动，本文将设计完成的电机与传统机械水泵同轴连接，实现电机驱动水泵，控制策略采用与发动机定速比控制策略，通过控制电机转速来调节水泵转速。水泵仿真模型如图 5-7 所示。

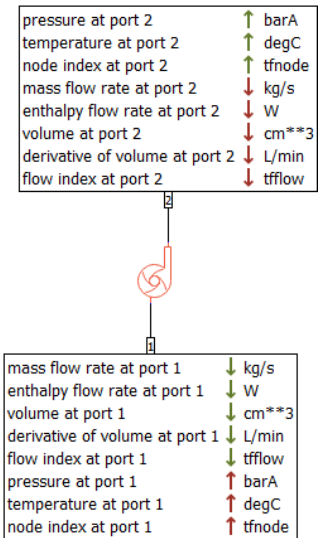


图 5-7 水泵模型

如图可知，水泵有端口 1 和端口 2，水泵模型分别为水泵的进水口和出水口，可以监控两个端口处流量、水温、压力等等参数变化。水泵模型主要需要输入转速-流量-静压特性曲线。水泵特性曲线如图 5-8 所示，如图可知，水泵的静压最大可达 2.79 bar，水泵最大流量可达 1219 L/min，水泵输出能力较强。

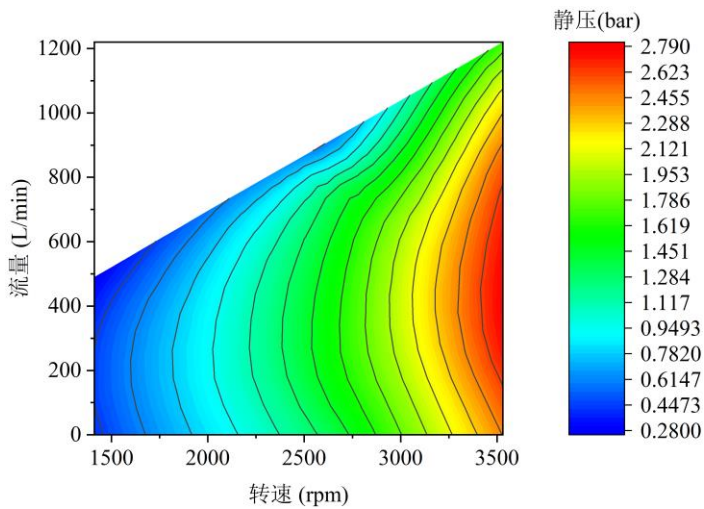


图 5-8 水泵特性曲线

(3) 散热器和风扇

散热器作为热交换设备，实现冷却液与空气间的热量交换以降低冷却液温度；风扇则通过增强气流速度来提升散热效率。本文将设计完成的电机与风扇同轴连接，实现电机驱动风扇。本文的风扇控制策略采用温度控制策略，当散热器出水温度达到 82℃时风扇开启，当散热器出水温度达到 92℃时，风扇转速达到最大。本文的散热器和风扇仿真模型如图 5-9 所示。

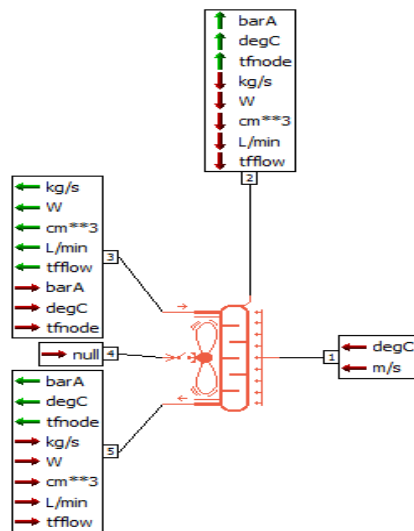


图 5-9 散热器与风扇模型

如图可知，此模型一共有 5 个端口，其中端口 1 接收环境温度和风速信号；端口 2 连接到补偿水桶；端口 3 和端口 5 分别为冷却液的进出口；端口 4 用于控制冷却风扇的转速。此模型主要需要输入风扇和散热器尺寸参数，主要参数如表 5-2 所示。

表 5-2 散热器与风扇主要参数

| 参数         | 值    |
|------------|------|
| 散热器冷却液体积/L | 8    |
| 风扇内径/mm    | 270  |
| 风扇外径/mm    | 770  |
| 散热器长度/mm   | 1000 |
| 散热器高度/mm   | 1073 |

由文献[81]可知，散热器的换热量主要取决于冷却液流量和空气流速，其函数关系可表示为：

$$H = f(V, q_h) \quad (5-8)$$

式中,  $H$  为散热器换热量, 单位为 W;  $V$  为空气流速, 单位为 m/s;  $q_h$  为散热器流量, 单位为 L/min。

散热器通风面的空气流速是空气流速与风扇开启后的增速之和, 其表达式为:

$$V_{vs} = V_{airin} + V_{fan} \quad (5-9)$$

式中,  $V_{vs}$  为散热器通风面的空气流速, 单位为 m/s;  $V_{airin}$  为散热器入口处的空气流速, 单位为 m/s;  $V_{fan}$  为风扇开启后的增速, 单位为 m/s。

#### (4) 节温器

节温器的作用是为了控制冷却水进入散热器的流量, 当发动机散热量过大, 小循环已经无法满足散热需求时, 通过控制节温器开启大循环回路可提升冷却系统散热性能。本研究采用蜡式节温器, 其开启温度为  $83^{\circ}\text{C}$ , 全开温度为  $95^{\circ}\text{C}$ 。鉴于节温器开启面积与温度呈线性关系, 设  $A$  为相对开启面积,  $T$  为石蜡温度,  $T_{min}$  和  $T_{max}$  分别为开启与全开温度, 则存在如下线性关系式:

当  $T > T_{max}$  时,  $A=1$ ; 当  $T < T_{min}$  时,  $A=0$ ;

当  $T_{min} < T < T_{max}$  时,  $A = \frac{T - T_{min}}{T_{max} - T_{min}}$ 。

节温器仿真模型如图 5-10 所示。

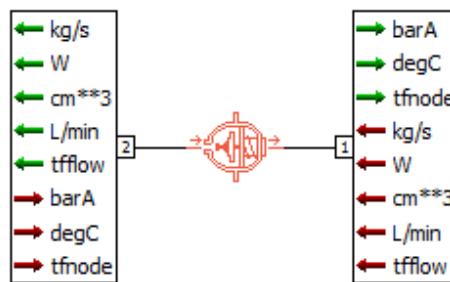


图 5-10 节温器模型

#### (5) 补偿水桶

补偿水桶主要输入参数为液压指数、体积、液体百分比、气液传导率等等, 具体数值如表 5-3 所示。本文液压指数和气液传导率设置为 1 和 0.465, 其余参数通过查询此款发动机补偿水桶获得。图 5-11 为补偿水桶模型。

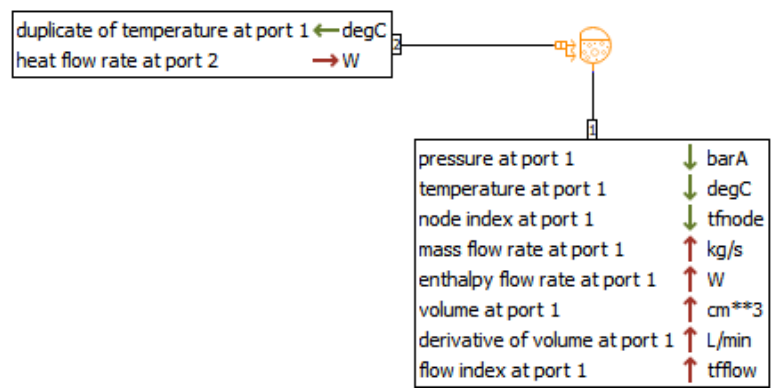


图 5-11 补偿水桶模型

表 5-3 补偿水桶参数

| 参数           | 值     |
|--------------|-------|
| 液压指数         | 1     |
| 液体的百分比/%     | 90    |
| 气液传导率/(W/°C) | 0.465 |
| 总体积/L        | 10    |

5.3.2 冷却系统其他子模型介绍

发动机冷却系统模型除了散热器、风扇、水泵、节温器、补偿水桶主要子模型外，还有一些其他同样重要的子模型。表 5-4 为各子模型的相关介绍以及相关参数输入值。

由表可知，其他子模型包括工况设定、环境条件模块、汽车参数模块等，其主要分为信号模块、实物模块、行驶状态模块三大类。为了使仿真结果更加接近于真实值，在输入子模型相关参数时需要输入真实数值。

表 5-4 其他子模型信息

| 模型                                                                                  | 名称     | 功能                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------|---------------------------------------------------------------------|
|  | 工况设定模块 | 用于模拟汽车行驶工况，根据需求输入车速、路况、变速箱档位、行驶时间等                                  |
|  | 环境条件模块 | 用于设置环境条件。在本文中，初始环境温度设置为 20°C，环境压力为 1barA                            |
|  | 汽车参数模块 | 用于模拟仿真汽车性能，本文设置发动机怠速转速为 600rpm，胎压为 3.5bar，迎风面积为 8m²，车满载重量为 49000kg。 |

续表 5-4 其他子模型信息

| 模型                                                                                 | 名称     | 功能                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------------------------------------------|
|   | 冷却液模块  | 用于设置冷却液的一些基本属性。                           |
|   | 暖风模块   | 用于模拟汽车暖风系统，需要输入冷却液体积、节流面积等。               |
|   | 温控开关模块 | 本文用这个模块来控制风扇开启温度，本文设置开启温度为 82℃，全开温度为 92℃。 |
|   | 车速信号模块 | 用于采集汽车行驶速度。                               |
|   | 信号增益模块 | 与车速信号模块相连，用于车速与风速之间的换算，本文设置为 0.2/3.6。     |
|   | 转换信号模块 | 可以接收无量纲信号，用于将采集到的风速信号输入到散热器端口。            |
|  | 信号模块   | 用于输入流量、风速等信号，本文在暖风模块和发动机模块端口分别接入了两个信号模块。  |

5.3.3 冷却系统整体模型搭建

鉴于发动机冷却系统结构的复杂性和不确定性特征，为便于模型构建与计算分析，本研究对系统模型进行了适当简化处理。图 5-12 为发动机冷却系统模型。由图可知，此发动机冷却系统一共有两条冷却回路，分别为散热器回路和暖风回路。发动机冷却系统通过控制节温器开启面积和水泵转速来控制两个冷却回路的水流量，以及配合散热器和风扇来维持发动机处于正常工作温度。

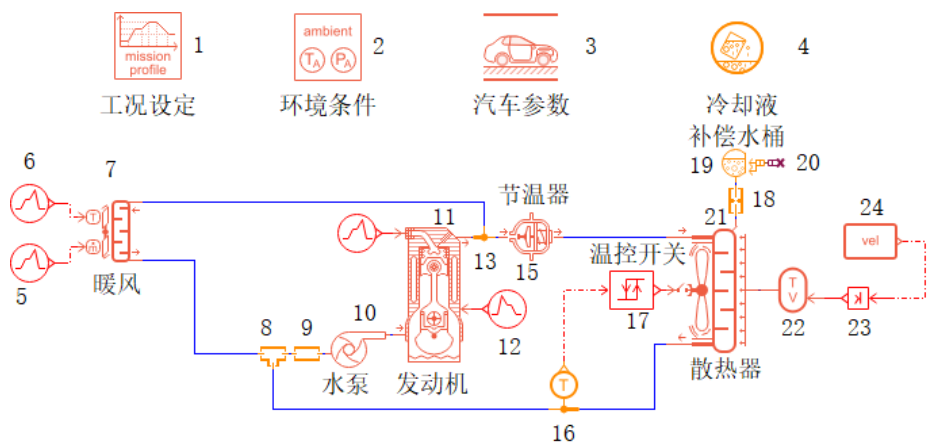


图 5-12 发动机冷却系统模型

## 5.4 不同工况下冷却系统仿真分析

为了验证设计的电子水泵和电子风扇的有效性,本文模拟仿真使用电子水泵和电子风扇的发动机冷却系统在不同工况下的散热能力。针对中型及以上载货汽车普遍存在的低速运行特征,将发动机最大扭矩工况设定为冷却系统设计基准工况,同时采用发动机额定功率工况作为系统性能验证工况<sup>[82]</sup>。因此,本文选择稳态工况、低速大扭矩工况、额定工况作为仿真实验工况。

本文实验汽车为重型牵引车,满载质量为 49 t,胎压为 350 kpa,汽车迎风面积为 8 m<sup>2</sup>。汽车传动系统的相关参数如表 5-5 所示,传动系统机械效率为 95%。

表 5-5 传统系统相关参数

| 档位          | 一档   | 二档   | 三档   | 四档           | 五档   | 六档   | 七档   | 八档 |
|-------------|------|------|------|--------------|------|------|------|----|
| 速比          | 11.8 | 8.23 | 5.78 | 4.04         | 2.91 | 2.03 | 1.43 | 1  |
| 主减速比: 2.533 |      |      |      | 车轮半径: 0.51 m |      |      |      |    |

### 5.4.1 稳态工况仿真分析

为了研究发动机冷却系统在稳态工况下的散热能力,设定环境温度和各模块的进出口温度为 20℃,环境压力为 1bar,在发动机转速为 1500 rpm 的条件下,分别设定车速为 45 km/h 和 80 km/h,计算重型商用车在低速和高速行驶时冷却系统散热情况。

由图 5-13 (a)可知,两种车速下发动机出水温度和散热器出水温度一开始呈斜线趋势上升,这是由于发动机冷却液温度尚未达到节温器启动阈值所致,此时冷却液只会流过暖风回路和小循环回路。当发动机出水温度达到节温器开启温度时,发动机出水温度开始出现波动,并最终趋于平稳。

在转速相同的情况下,车速 45 km/h 和 80 km/h 发动机出水温度稳定后分别为 84.11℃、86.03℃,由图 5-13 (b)可知,车速 45 km/h 和 80 km/h 节温器开启时间分别为 172 s、104 s,且稳定后节温器开度分别为 0.093、0.252。相较于车速 45 km/h 下,车速 80 km/h 下发动机稳定后出水温度更高且节温器开启时间更早,这是因为在转速相同的情况下,车速越大,阻力越大,输出功率越大,从而导致散热量更大。

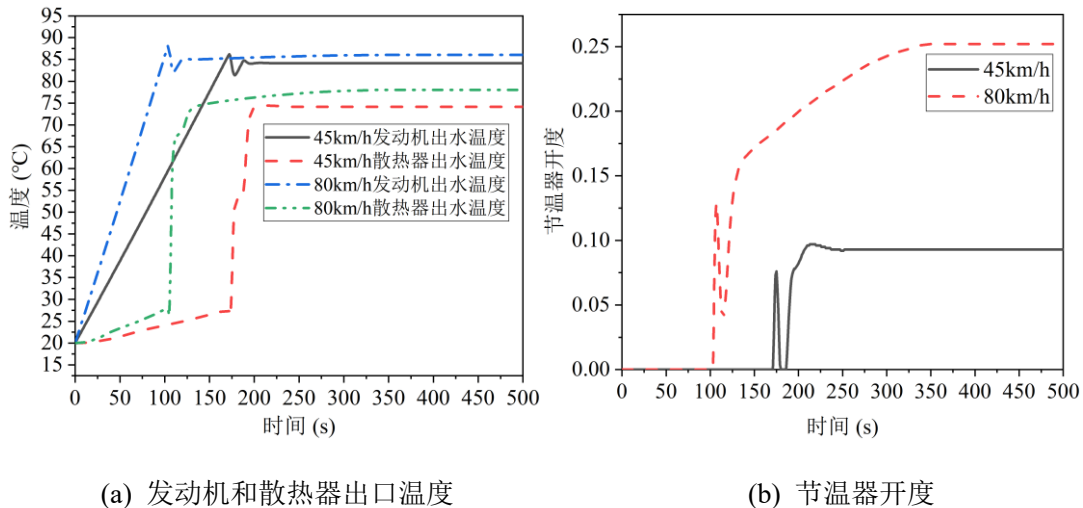


图 5-13 稳态工况仿真结果

仿真结果表明,系统达到稳态后,发动机出口与散热器出口温度均维持在正常工况区间内,且车速 80 km/h 条件下的发动机出水温度处于发动机高效工作温度范围内。在稳态工况下,该冷却系统在满足发动机的散热需求,证明本文设计的电子水泵和电子风扇满足发动机冷却系统在稳态工况下的冷却需求。

#### 5.4.2 低速大扭矩工况仿真分析

为了研究发动机在低速大扭矩工况下冷却系统散热能力,设定设定环境温度和各模块的进出口温度为 20℃,环境压力为 1bar,车速 30 km/h,发动机转速 1100 rpm,输出扭矩 2200 Nm,进行发动机冷却系统仿真计算。

由图 5-14 可知发动机和散热器出水温度一开始呈斜线趋势上升,在此阶段水泵流量一直维持不变为 235 L/min。在时间为 121 s 时,节温器开启,导致发动机与散热器出水温度出现明显波动,此时由于节温器打开促使冷却系统水阻力下降,从而使得水泵流量开始增加,直到节温器全开后,水泵流量达到最大的 515.2 L/min。随着发动机持续散发热量,节温器全开已经无法满足散热需求,直到散热器出水温度达到 92℃时,风扇全开。随着风扇和节温器全开,冷却系统最终趋于稳定,发动机出水温度最终稳定在 95.61℃。

仿真分析表明,在低速大扭矩工况下,发动机转速降低导致水泵转速及流量相应减小。仅仅依靠节温器全开已经无法满足散热需求,此时风扇开启,加快冷却液的散热,最终使冷却系统温度趋于稳定。由此证明本文设计的电子水泵和电子风扇满足发动机冷却系统在低速大扭矩工况下的冷却需求。

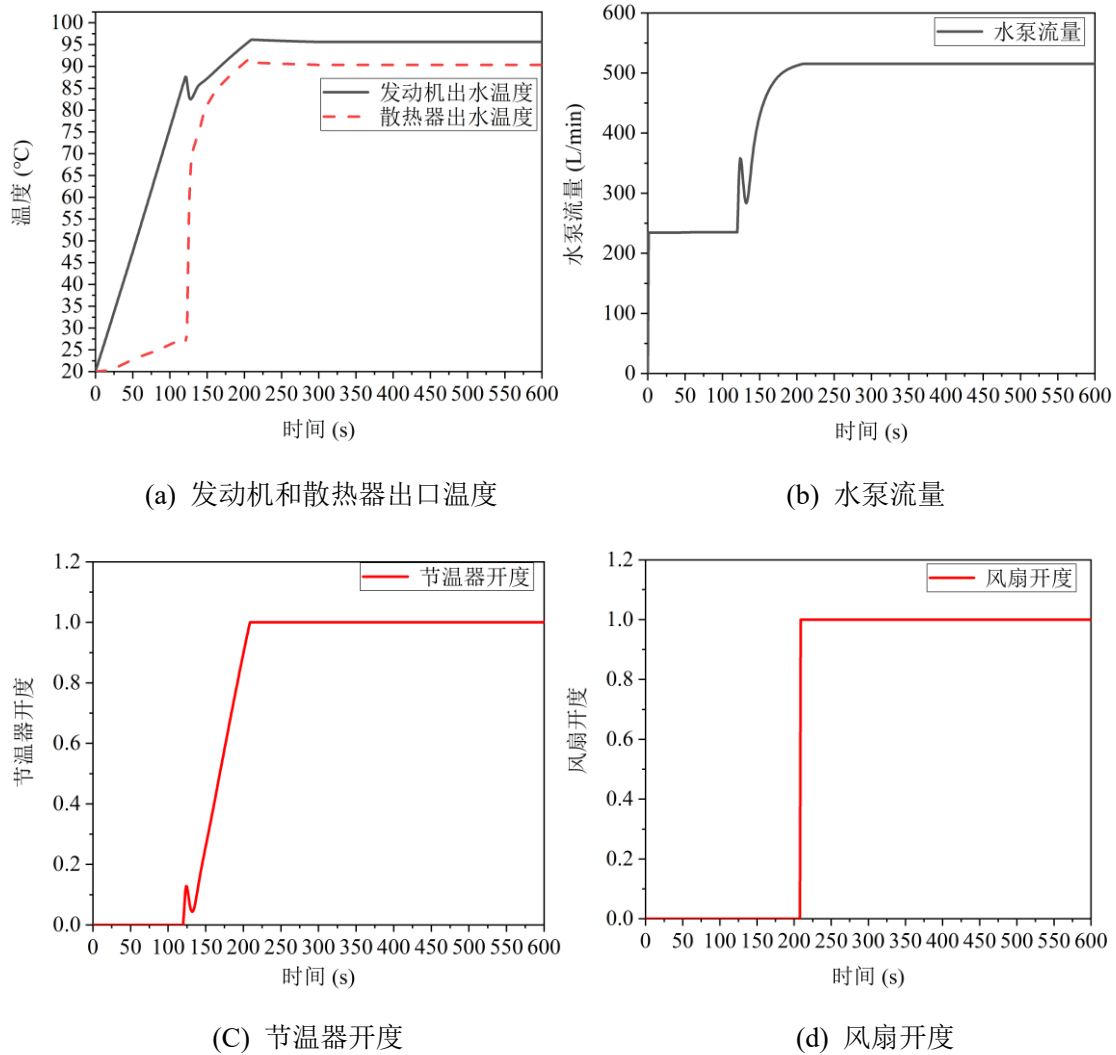


图 5-14 低速大扭矩工况仿真结果

#### 5.4.3 额定工况仿真分析

为了研究发动机在额定工况下冷却系统散热能力,设定环境温度和各模块的进出口温度为 20°C,环境压力为 1 bar,车速 100 km/h,发动机转速 1700 rpm,输出功率 368 kW,进行发动机冷却系统仿真计算。

由图 5-15 可知,由于额定工况下发动机转速为 1700 rpm,转速较高。由石蜡温度变化和节温器开度可知,在 79 s 时刻,石蜡温度达到了 83.35°C,超过了 83°C,节温器开启。随着节温器开度不断增加直至全开,水泵流量达到了 804.2 L/min,发动机出水温度和散热器出水温度最终稳定与 88.35°C、95.2°C。与低速大扭矩工况不同的是,在额定工况下的车速为 100 km/h,风速较高,导致未达到风扇开启条件。相较于传统机械风扇,本文的电子风扇采用的是温度控制策略,

使得汽车在高速行驶时，电子风扇并未开启工作，有效降低了整体能耗。

由仿真结果可知，额定工况下发动机出水温度和散热器出水温度符合正常变化特点，且稳定后的温度属于发动机正常工作温度。说明该冷却系统可以在额定工况下正常工作，同时证明本文设计的电子水泵和电子风扇满足该发动机冷却系统的散热需求。

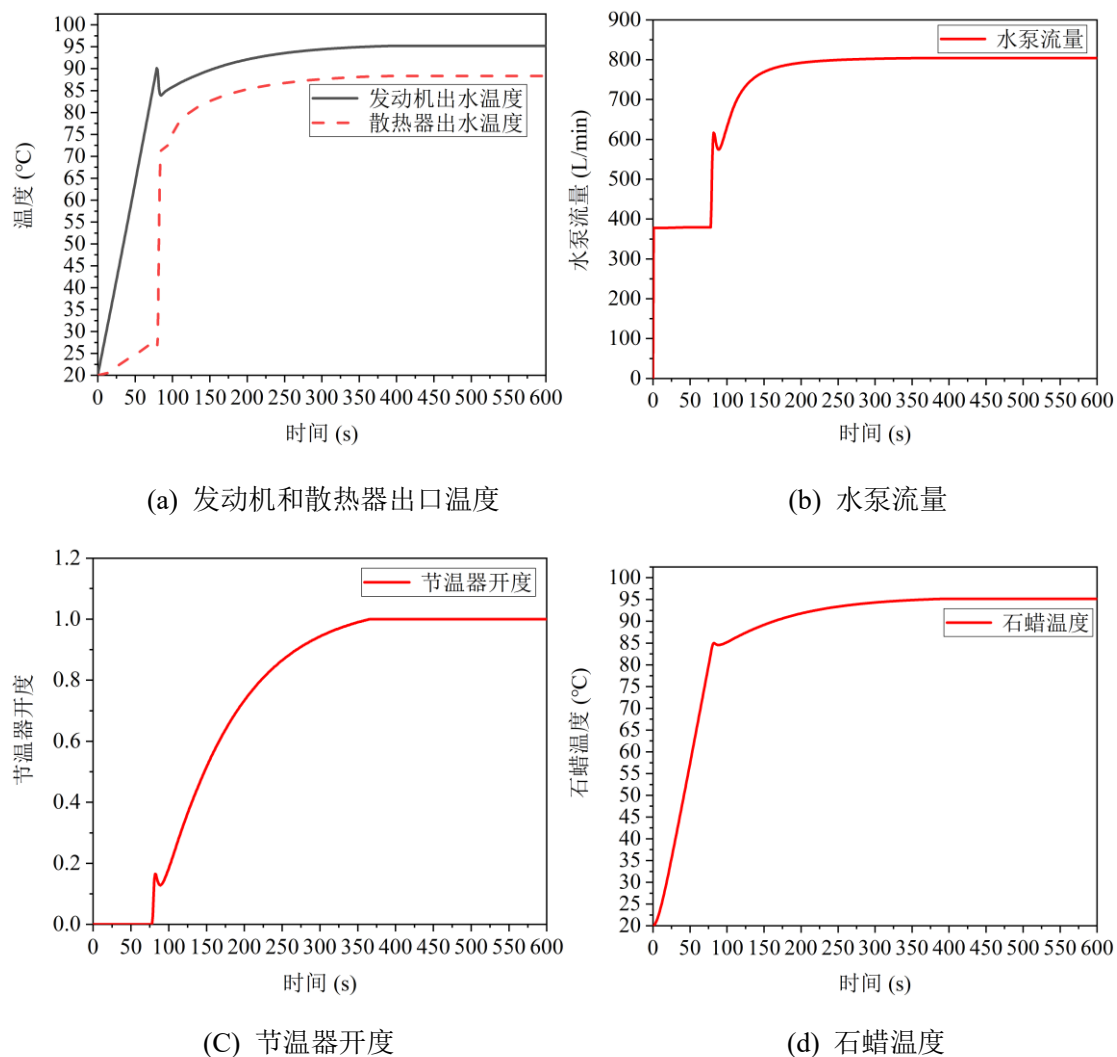


图 5-15 额定工况仿真结果

## 5.5 本章小结

本章节通过建立电子水泵与电子风扇的仿真模型，完成了发动机冷却系统的数值模拟与分析。本章首先阐述了发动机冷却系统的组成结构及各主要部件的功能特性；其次，系统介绍了冷却系统的热平衡理论体系，重点分析了传热模式、传热方程以及发动机热平衡方程的建立方法；然后，分别搭建了散热器、风扇、

水泵、发动机、节温器等其他零部件模型，并最终实现发动机冷却系统的搭建；最后，分别在稳态工况、低速大扭矩工况、额定工况下计算冷却系统散热能力，仿真结果显示：在不同工况下，冷却系统均满足发动机散热需求，发动机均处在正常工作温度下，验证了本文提出的电子水泵与电子风扇设计方案的有效性和可行性。

## 第 6 章 总结与展望

### 6.1 全文总结

本课题针对重型混动商用车冷却系统冷却效果不佳、能耗高等问题，对电子水泵与电子风扇进行了研究。借鉴乘用车电气化附件的开发方法，完成重型商用车发动机冷却系统电气化附件的开发，实现发动机能耗的降低与冷却系统散热性能的提升。首先，根据传统附件功测试实验确定水泵、风扇附件电机的设计参数；然后，采用 Motor-CAD 电机设计软件实现了附件电机的初步方案设计；其次，为了提高附件电机的整体性能，在 MATLAB 编写改进麻雀算法的程序，并结合 Maxwell 软件完成附件电机的优化设计，完成附件电机冷却系统的设计；最后，为了验证设计开发的电子水泵与电子风扇的可行性，搭建重型商用车发动机冷却系统散热模型，仿真计算不同工况下发动机冷却系统的散热能力。

各项工作内容的结论如下：

(1) 根据传统附件功实验要求搭建整车实验台架，采用电机驱动水泵与风扇的形式，测试不同工况附件功耗。本实验分别模拟发动机冷态和热态下水泵与风扇功耗，并且为了确保实验的准确性，在实验前需要完成皮带轮滑差率测试，确保滑差率在实验要求范围内。通过控制电机并采集数据，经过数据处理后得出不同转速下水泵流量、功耗以及风扇功耗，并最终确定电子水泵与电子风扇驱动电机的额定功率为 2.8kW,额定转速为 2800 rpm。此外，通过发动机附件电机布置空间确定附件电机的径向与轴向尺寸边界分别为 190 mm，144 mm。

(2) 根据所确定的电机设计参数，通过电机基本尺寸公式确定电机的初始尺寸，并通过查阅相关文献确定绕组形式和转子类型。为了对比不同槽极下电机性能的区别，本文利用 Motor-CAD 分别完成 18 槽 8 极、12 槽 10 极、12 槽 10 极三种槽极配比电机的初步设计，经过仿真结果得出，采用 18 槽 8 极的电机在齿槽转矩和反电动势上较其他两种方案更佳。经综合评估，确定采用 18 槽 8 极作为电机设计方案。通过 Motor-CAD 仿真分析，验证了该电机在空载、额定及峰值工况下，磁密分布与输出转矩均满足设计指标要求。

(3) 为提升附件电机性能指标，采用改进型麻雀搜索算法开展多目标优化

设计。首先基于灵敏度分析方法，将设计参数划分为高灵敏度与低灵敏度两类：对高灵敏度参数实施算法优化，而对低灵敏度参数则采用参数化优化策略；其次，采用圆形正弦混沌映射、改进正弦黄金策略、均匀分布的自适应权重系数三种方法对麻雀算法进行改进。然后，采用改进麻雀算法对附件电机进行优化设计，优化结果显示，优化后的电机输出转矩、转矩脉动、反电动势性能均得到了有效改善。最后，对采用自然冷却方式对电机冷却结构进行设计，并对电机额定工况与峰值工况进行温升仿真，仿真结果显示：电机在额定工况和峰值工况下的温升均符合设计规范要求。

（4）为了验证该电子水泵与电子风扇的可行性，对发动机冷却系统进行散热分析。首先，本文介绍了发动机冷却系统的基础知识，并对发动机热平衡计算进行了说明；其次，在 AMESim 软件中输入各个元件参数，并制定电子水泵与电子风扇的控制策略，完成发动机冷却系统模型的搭建；通过仿真分析发动机冷却系统在不同工况下的散热性能，结果表明：系统在稳态工况、额定工况及低速大扭矩工况下，发动机出水温度均稳定维持在 90℃左右，满足发动机水温要求，证明本文设计的电子水泵与电子风扇的可行性。

## 6.2 工作展望

（1）由于时间限制，本文电机水泵与电子风扇均采用传统的电机与水泵直连的驱动形式，并未对水泵、风扇和电机的耦合结构以及水泵与风扇本体进行深入研究。因此，可以进一步优化电子水泵和电子风扇的结构，这对提升电气化附件效率与性能从而降低能耗具有重大意义。

（2）本文对电子水泵和电子风扇进行了开发，但是对于发动机附件不仅仅包括水泵和风扇，还同时包括空调压缩机、空压机等等。因此，可以进一步完成发动机所有附件电气化附件研究，完成集成一体化电气化附件开发研究。

## 参考文献

- [1] 于飞, 朱延洁, 梁宏梅, 等. 新能源汽车产业发展现状及趋势[J]. 时代汽车, 2024, (20): 117-119.
- [2] 普文军, 孟国平, 周进平, 等. 国内外重型商用车油耗和碳排放法规趋势浅析[J]. 汽车科技, 2023, (05): 87-95.
- [3] 翁志鹏, 周京华, 李津, 等. 面向电动汽车有序充放电研究综述[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(14): 5827-5839.
- [4] 丁莉. “碳达峰、碳中和”背景下, 国内外汽车行业碳排放管理现状和发展建议[J]. 上海汽车, 2023, (07): 4-9.
- [5] 张天雄. 车用高转矩密度定子无轭轴向磁通永磁同步电机优化设计[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2024.
- [6] 唐景春, 吴鑫, 孙东方, 等. 内燃叉车冷却系统散热器耦合热分析及优化[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2024, 47(03): 317-323.
- [7] 高腾麟, 刘宇, 徐小俊. 发动机高效冷却系统 NEDC 循环节能效果仿真分析[J]. 车用发动机, 2020, (03): 64-70.
- [8] 王元昊. 新能源汽车电子水泵电机的设计研究[D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2020.
- [9] 李儒男. 乘用车智能冷却系统控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [10] 王顺. 车用无刷直流电机电子水泵控制系统研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2023.
- [11] 张凯. 汽车冷却系统在线测试台的设计与实现[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2022.
- [12] Cortona E, Onder C. Engine Thermal Management with Electric Cooling Pump[R]. SAE Technical paper, 2000.
- [13] 曹泽中. 基于 BLDC 的汽车电子水泵控制器研发[D]. 天津: 天津工业大学, 2019.
- [14] 冯天昱, 方存光. 车用电子水泵国内外发展综述[J]. 汽车实用技术, 2017, (22): 3-4.

- [15] 盛德号, 崔海梁, 李洪, 等. 发动机电控水泵冷却系统的设计与试验研究[J]. 流体机械, 2012, 40(04): 5-9.
- [16] 博格华纳布局新能源汽车市场[J]. 汽车工艺与材料, 2012, (04): 70-71.
- [17] 博格华纳为中国紧凑型 SUV 生产新型电子水泵[J]. 汽车零部件, 2016, (01): 63.
- [18] 王永飞. 基于 CFD 的电子水泵数值仿真与流场分析[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [19] 韩军良, 冯长虹, 周相青. 基于无传感器 FOC 控制的电子水泵研究与实现[J]. 山东工业技术, 2017, (20): 126-127.
- [20] 胡攀, 高勇飞, 贾学宏, 等. 电子水泵在混合动力发动机上的应用[J]. 内燃机, 2017, (06): 31-33.
- [21] 高腾麟, 刘宇, 徐小俊. 发动机高效冷却系统 NEDC 循环节能效果仿真分析[J]. 车用发动机, 2020, (03): 64-70.
- [22] 李亚伟, 马西沛, 刘宁宁, 等. 车用电子水泵噪声和振动特性试验分析[J]. 机床与液压, 2021, 49(11): 87-91.
- [23] 杨元健, 张莉, 王建长, 等. 基于 CFD 的电子水泵叶轮优化研究[J]. 机电工程, 2022, 39(02): 187-192.
- [24] 龚元明, 王磊, 吴长水. 车用小功率电子水泵性能测试平台设计[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2024, 38(06): 234-241.
- [25] 尹静, 孙燕, 郭新民. 发动机冷却系统驱动方式的现状及发展方向[J]. 山东内燃机, 2003, (04): 4-6.
- [26] Roger Clemente. Electric fan assembly for over-the-road trucks[P]. USA: 4875521, 1989-10-24.
- [27] Wolfgang P.Weinhold. Engine Ventilation An Automotive Vehicle[P]. USA: 5269264, 1993-12-14.
- [28] Jin H, Sung H G, Lee B K , et al. Development of High-efficiency 42V Cooling Fan Motor for Hybrid Electric Vehicle Applications[C]. 2006 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. IEEE, 2007.

- [29] Wang T W, Jagarwal A, Wagner J R, et al. Optimization of an Automotive Radiator Fan Array Operation to Reduce Power Consumption[J]. Ieee-Asme Transactions on Mechatronics 2015, 20 (5), 2359-2369.
- [30] 黎灿辉, 席力克, 刘凌. 发动机热管理系统对整车节油性能的评估[J]. 汽车电器, 2014, (03): 4-6+8.
- [31] 李儒男, 陈元梁, 陈俊玄. 车载智能冷却系统后冷却技术研究[C]. 中国内燃机学会. 第六届青年学术年会论文集. 杭州, 2015: 361-365.
- [32] 张鹏飞. 电子风扇散热性能的研究[J]. 黑龙江科技信息, 2016, (29): 39.
- [33] 胡巧声, 李永记, 宋伟, 等. 汽车电子风扇转速控制研究[J]. 中国工程机械学报, 2019, 17(03): 272-277.
- [34] 程振徐, 倪计民, 郝真真, 等. 电子风扇和电子节温器联合控制策略研究[J]. 车用发动机, 2020, (06): 71-76+82.
- [35] 邓彦波. 汽车电子风扇转速控制探究[J]. 科技资讯, 2020, 18(11): 53+55.
- [36] 张世强, 李洋, 马荣泽, 等. 电子风扇控制器硬件开发研究[J]. 汽车零部件, 2021, (07): 1-7.
- [37] 金亮, 曹佳豪, 杨庆新, 等. 一种汽车风扇驱动电路辐射电场的电磁兼容性预测方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(02): 156-165.
- [38] 韩前鹏, 余力, 王星. 乘用车电子冷却风扇参数化模型设计[J]. 江汉大学学报(自然科学版), 2023, 51(06): 80-88.
- [39] 龙俊华, 安瑞兵. 汽车冷却系统现状及发展趋势[J]. 汽车实用技术, 2020, (06): 75-77.
- [40] 周佳明. 电动叉车用永磁同步电机多物理场及多目标优化[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
- [41] 徐奇伟, 龙胜, 程智浩, 等. 基于改进粒子群算法的微直线电机定子位置辨识策略研究[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(08): 56-66.
- [42] 花为, 顾佳磊. 现代电机优化方法综述[J]. 导航与控制, 2021, 20(05): 13-25.

- 
- [43] Wu Q H, You X M, Liu S. Multi-ant colony optimization algorithm based on game strategy and hierarchical temporal memory model[J]. Cluster Computing-the Journal of Networks Software Tools and Applications 2024, 27 (3), 3113-3133.
  - [44] 李放, 卢焱华, 刘志恩, 等. 基于定转子结构参数分层的永磁同步电机低振动优化设计[J]. 武汉理工大学学报, 2024, 46(08):103-110+117.
  - [45] 华逸舟, 刘奕辰, 潘伟, 等. 基于改进粒子群算法的无轴承永磁同步电机多目标优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(11): 4443-4452.
  - [46] 柳洪, 陈玮, 王定龙, 等. 基于果蝇算法的永磁同步电机多目标优化设计[J]. 微电机, 2024, 57(07): 18-23.
  - [47] 林玥兵, 郑晓钦, 陈春涛. 正弦削极修正模型的表贴式多相永磁电机模型-数据融合优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(S1): 296-305.
  - [48] 陈启明, 方宇轩. 基于改进遗传算法的永磁伺服电机优化设计[J]. 武汉理工大学学报, 2023, 45(11): 139-147.
  - [49] Lim DK, Yi KP, Jung SY, Jung HK, Ro JS. Optimal Design of an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor by Using a New Surrogate-Assisted Multi-Objective Optimization[J]. Ieee Transactions on Magnetics. 2015, 51(11): 8207504.
  - [50] Abroshan A, Hasanzadeh S, Fard J R. Multi-objective optimization of a V-type line-start PM motor based on parameter stratification and RSM[J]. Electrical Engineering , 2024, 106 (2), 1683-1692.
  - [51] Lka R, Alinejad-Beromi Y, Yaghobi H. Cogging torque reduction of permanent magnet synchronous motor using multi-objective optimization[J]. 4 Mathematics and Computers in Simulation, 2018, 153:83-95.
  - [52] Park J W, Koo M M, Seo H U, Lim, D K. Optimizing the Design of an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicles with a Hybrid ABC-SVM Algorithm[J]. Energies , 2023, 16 (13): 5087.
  - [53] 余力. 乘用车冷却风扇数值模型参数化及仿真分析技术研究[D]. 武汉: 江汉大学, 2023.

- [54] Fischer A, Lylloff O, Grande E F, et al. Analytical Corrections for Acoustic Transmission in Kevlar-Walled Wind Tunnels[J]. Aiaa Journal, 2023, 61 (7), 3119-3133.
- [55] Teng S, Tian Y H, Li B, et al. Optimization of impeller blades of an electric water pump via computational fluid dynamics. Journal of Mechanical Science and Technology 2024, 38 (3), 1281-1291.
- [56] 徐雪汉. 汽车冷却用电子水泵结构设计与优化[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2021.
- [57] 袁超. 内置式永磁同步电机转矩性能及电磁振动优化设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2022.
- [58] 陶大军, 陈阳, 李凌霄, 等. MW 级双并列转子低速永磁直驱电机设计方法与性能分析[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(09): 82-90.
- [59] 陈利辉. 一体式压缩机用永磁同步电机设计与冷却结构研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022.
- [60] 胡林伟. 永磁同步电机分数槽集中绕组设计与分析研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [61] 陈滇斐, 汤俊, 马宏忠, 等. 星 - 三角接法的多层绕组分数槽永磁电机谐波磁动势分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(17): 6060-6071.
- [62] Ding B C, Huang K D, Lai C Y, et al. Correlated Inductance Modeling and Estimation of Permanent Magnet Synchronous Machines Considering Magnetic Saturation[J]. Ieee Transactions on Power Electronics, 2023, 38 (11), 14463-14474.
- [63] Lee, J. J.; Lee, K. D.; Kim, H. J.; Yoon, M. H. Design of Concentrated Flux Synchronous Motor with Ferrite Magnet Considering Mechanical Stress at High Speed[J]. Journal of Magnetism, 2021, 26 (2), 166-174.
- [64] Brody R M, Ohodnicki P R, Ghosh M K, Macias C, et al. Trade Study for Rare-Earth-Free Interior Permanent Magnet Synchronous Machine Using MnBi Permanent Magnets[J]. Ieee Transactions on Industry Applications, 2024, 60 (4), 6010-6022.

- [65] Zorig A, Kia S H, Chouder, Arabhi A. A comparative study for stator winding inter-turn short-circuit fault detection based on harmonic analysis of induction machine signatures[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2022, 196: 273-288.
- [66] 裴泽健. 车用内置式永磁同步电机的设计与振动优化研究[D]. 长春: 吉林大学, 2024.
- [67] 周佳明. 电动叉车用永磁同步电机多物理场及多目标优化[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
- [68] 徐晔鑒. 新能源汽车用永磁同步电机多目标优化设计研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
- [69] Xu X Z, Zhang Y Y, Feng H C, et al. Multi-objective optimisation design of a suspension-guided permanent magnet synchronous linear motor for ropeless elevator[J]. *Iet Electric Power Applications*, 2023, 17 (1), 80-91.
- [70] 张维煜, 李凯, 杨鑫. 基于参数优先级划分的飞轮电机多目标优化[J]. *西南交通大学学报*, 2023, 58(04): 922-932.
- [71] 胡晓磊. 75KW 空压机开关磁阻电机设计与优化研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2020.
- [72] 杨尚明, 马其华. 基于分层优化策略的永磁同步电机转子结构多目标优化[J]. *上海工程技术大学学报*, 2022, 36(04): 369-377.
- [73] 肖磊. 基于改进麻雀搜索算法的同时取送货车辆路径规划[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2023.
- [74] Ma J, Yu S, Cheng W. Composite Fault Diagnosis of Rolling Bearing Based on Chaotic Honey Badger Algorithm Optimizing VMD and ELM[J]. *Machines*, 2022, 10 (6): 469.
- [75] Li M Y, Liu Z L, Song H X. An improved algorithm optimization algorithm based on RungeKutta and golden sine strategy[J]. *Expert Systems with Applications* 2024, 247: 123262.

- [76] Khan M K, Zafar M H, Rashid S, et al. Improved Reptile Search Optimization Algorithm: Application on Regression and Classification Problems[J]. Applied Sciences-Basel 2023, 13 (2): 945.
- [77] 安然, 闫业翠, 马其华, 等. 电动汽车轮毂电机温度场计算研究综述[J]. 软件导刊, 2020, 19(08): 275-280.
- [78] Jeon K, Park M, Park J, et al. Analysis of Cooling Characteristics of Permanent Magnet Synchronous Motor with Different Water Jacket Design Using Electromagnetic-Thermal Fluid Coupled Analysis and Design of Experiment[J]. Machines, 2023, 11 (9): 903.
- [79] Li W L, Cao Z B, Zhang X C. Thermal Analysis of the Solid Rotor Permanent Magnet Synchronous Motors With Air-Cooled Hybrid Ventilation Systems. Ieee Transactions on Industrial Electronics[J], 2022, 69 (2), 1146-1156.
- [80] Zhang B, Zhang P, Zeng F M. Multiobjective optimization of the cooling system of a marine diesel engine[J]. Energy Science & Engineering, 2021, 9 (10), 1887-1907.
- [81] 管昭辉. 某混动汽车整车热管理系统建模与优化研究[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2024.
- [82] 余翔. 基于 AMESim 的汽车发动机冷却系统仿真分析[D]. 西安: 长安大学, 2014.

## 攻读硕士学位期间发表学术论文及参研项目

### 发表论文:

- [1] Pei Wenjun, Xiao Ping, Pan Jiabao, Li Zhihao. Multi-Objective Optimization Strategy for Commercial Vehicle Permanent Magnet Water Pump Motor Based on Improved Sparrow Algorithm. Applied Sciences-Basel 2024, 14 (21). (SCI 收录, 本人一作)
- [2] Li Zhihao, Xiao Ping, Pan Jiabao, Pei Wenjun. Energy management strategy for methanol hybrid commercial vehicles based on improved dung beetle algorithm optimization. PLoS ONE 20(1): e0313303. (SCI 收录)
- [3] 李智豪,肖平,裴文俊.并联式混动汽车双模糊控制能量管理策略研究[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2024,42(04):63-67+87.
- [4] 裴文俊,肖平,李智豪.基于改进分层的永磁同步电机多目标优化策略[J].东莞理工学院学报,2024,31(05):103-109.

### 参与项目:

- [1] 安徽省重点研究与开发计划项目(2022A05020007)
- [2] 国家自然科学基金面上项目(52375227)

## 致谢

随着论文的完成，我的硕士研究生求学生涯也即将圆满落幕。在安徽工程大学的三年时光，无数温暖与帮助如繁星照亮我前行的道路。值此离别之际，谨向各位师长、同窗及同仁致以最诚挚的谢意。

首先，我要向我的导师肖平教授致以最崇高的敬意与感激之情。在科研中，肖老师带领我们前行，提供了很多宝贵的建议与思想。在我初次接触到我的研究方向时，我是如此迷茫，感觉无从下手，您为我提供了很多学习建议和方法，让我能够快速的了解我的研究方向并理清研究思路。同时，在论文投稿过程中，是您指导我领会审稿人的修改意见，并对论文进行相应地修改。当我遇到问题和困难时，您总能在百忙中留出时间来帮助我解决问题，并提供有效的建议。您不仅在科研上引导我们前行，也在为人处世方面教会了我很多，让我学会了如何正确的与他人处理好关系。因为您的指导与教诲，让我能够在科研的道路上披荆斩棘，这份师恩，我将铭记一生。

我还要感谢我的同门师兄弟们。在学习上，我们互相学习、互相帮助、帮助我解决了一个又一个问题，大大提高了我学习效率；在生活中，我们相互关心彼此，共同前行。正是因为有你们，我的科研与生活才不会感到孤单，永远充满激情与活力。

最后，我要特别感谢参与论文评审和答辩的各位老师。感谢你们在繁忙的工作中抽出时间审阅我的论文，你们提出的宝贵意见和建议对论文的完善起到了重要作用。你们的专业点评和严格要求，不仅是对我工作成果的全面检验，更是我未来职业发展道路上的强大动力。在未来的工作中，我会以这些宝贵的意见为指引，不断提升自己，为团队创造更多价值，也期待能在你们的指导下，持续突破，取得更大的进步。

尚德敏学 唯实惟新

