



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

(专业学位)

纯电动车电子冷却风扇匹配与控制策略优化

姓名：袁励

学号：1021180102

所在院系：汽车学院

职业类型：工程硕士

专业领域：车辆工程

指导教师：魏学哲 教授

副指导教师：杜江

二〇一五年九月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to
Tongji University in conformity with the requirements for
the degree of Master of Engineering

Pure Electric Vehicle Cooling Fan Application and Control Strategy Optimization

Candidate: Yuan Li

Student Number: 1021180102

School/Department: School of Automotive Studies

Discipline: Engineering Master

Major: Automotive Engineering

Supervisor: Wei Xuezhe

Vice Supervisor: Du Jiang

September, 2015

纯电动车电子冷却风扇匹配与控制策略优化

袁 励

同济大学

学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版；学校有权保留学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

摘要

论文主要根据纯电动车冷却风扇对节能和噪声控制的较高要求,结合虚拟仿真,零部件开发和整车试验达到节能降噪目标。

通过对空调制冷,电机和电机控制器冷却,电池冷却系统的设计需求分解,搭建对应的整车热管理回路,并通过整合回路精简系统。以粗选的冷却风扇性能曲线作为系统输入,基于发动机舱的数模布置,通过 Fluent 软件对不同车速工况下发动机舱的三维气流场进行仿真,以检验发动机舱布置以及得到在不同车速下的各前端换热器的进风风速。

利用三维仿真的数据作为输入,在 Flowmaster 软件一维仿真环境中搭建各系统回路模型,并将各回路部件以元件的形式在仿真模型中运行。通过一维仿真对系统的运行模拟,考核了空调制冷性能,电机和电机控制器冷却性能,以及电池冷却系统的性能。在仿真过程中,确认了冷却风扇的风量需求。

基于冷却风扇的风量性能以及噪声需求,完成了冷却风扇开发。结合电动车对于噪声和节能的需求,选择了 PWM 调速的转速控制形式。对于满足性能需求的冷却风扇,对其在各种恶劣工况下的可靠性做了全面的考核。

在整车上,以热环境风洞试验和夏季海南道路试验的形式对实际制冷及冷却效果做了完整的考核。确认冷却风扇的最大性能满足各系统实际要求。在道路试验中,通过平衡不同系统的需求来标定风扇开启参数的方法,控制风扇不同系统负荷下尽量在低转速运行。达到节能和噪声控制的目标。

关键词: 流场仿真, 热平衡仿真, 电子风扇调速, 风扇噪声控制, 电子风扇控制策略

ABSTRACT

This paper is focus on the high requirements on energy-saving and noise control of electric vehicles cooling fan application. These targets are achieved by the series of developing process such as virtual simulation, product developing and vehicle performance tests.

Through air conditioning cooling system, motor and motor-controller cooling system and battery cooling system requests analyzing, thermal system loops are founded. The loops are integrated by similarity of circuit medium and working temperature range. By the Fluent calculation of engine compartment air-flow field, the input of cooling fan initial flowrate performance curve and 3D layout is converted to the output of airflow speed through each heat-exchanger under different vehicle speed.

Take 3D flow field analysis result as input, Flowmaster is used to build 1-D loop model for systems with every system components built as parts in simulating model. AC cooling, motor and motor controller cooling and battery cooling performance are validated by 1-D system running. Through the validation, cooling air flowrate requirement of cooling fan is confirmed.

Based on cooling fan flowrate and noise requirement, the cooling fan component is developed. Cooling fan durability under critical environment situation is also validated.

Vehicle performance tests are raised in both climate wind tunnel and Hainan in summer. Cooling fan maximum performance was validated by thermal system performance on vehicle. The fan control mapping based on different system load is calibrated in road test under various road load situation. It is maintained that cooling fan is working under as slower as possible to achieve energy saving and noise control target.

Key Words: flow distribution simulation, thermal equilibrium state simulation, electric fan speed control, fan noise control, fan control calibration

目录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 电动车热管理系统及对电子冷却风扇的需求.....	1
1.2 电子冷却风扇的开发.....	2
1.2.1 电子冷却风扇的主要技术要求.....	2
1.2.2 电子冷却风扇开发流程.....	3
1.3 本文的研究目的.....	3
1.4 本文主要工作和思路.....	4
第 2 章 电动车各热管理系统方案及输入.....	6
2.1 电动车各热管理系统需求.....	6
2.1.1 空调制冷系统需求.....	6
2.1.2 驱动电机和电机控制器的冷却需求.....	6
2.1.3 动力电池冷却需求.....	7
2.2 建立并整合电动车热管理系统回路.....	7
2.2.1 建立空调制冷系统回路.....	7
2.2.2 建立驱动电机冷却系统回路.....	8
2.2.3 建立电机控制器冷却系统回路.....	9
2.2.4 建立动力电池冷却系统回路.....	9
2.2.5 整合各热管理系统回路.....	10
2.3 本章小结.....	11
第 3 章 发动机舱气流流速三维仿真分析.....	12
3.1 三维模拟仿真软件介绍与建模.....	12
3.1.1 三维气流流速场仿真建模的理论基础.....	12
3.1.2 建立三维仿真模型.....	12
3.2 本项目三维仿真数值计算方法和边界条件.....	14
3.2.1 三维仿真数值计算方法.....	14
3.2.2 三维仿真边界条件.....	15
3.3 发动机舱内气流速度场仿真分析结果.....	16
3.3.1 50km/h 行驶工况流速场分析结果.....	16
3.3.2 怠速工况流速场分析结果.....	18
3.3.3 发动机舱流场各部件静压压降分布.....	19
3.3.4 发动机舱气流流速三维仿真分析结果汇总.....	19
3.4 本章小结.....	20

第 4 章 电动车各热管理系统一维热平衡仿真.....	22
4.1 一维热平衡仿真介绍.....	22
4.1.1 一维热平衡仿真建模规则.....	22
4.1.2 一维热平衡仿真建模的理论基础.....	23
4.1.3 各热管理系统一维仿真主要元件.....	24
4.2 空调制冷系统仿真分析.....	28
4.2.1 空调制冷系统仿真目标.....	28
4.2.2 空调制冷系统的仿真假设.....	28
4.2.3 空调制冷系统仿真回路.....	28
4.2.4 空调制冷系统仿真工况.....	29
4.2.5 空调制冷系统仿真结果.....	30
4.2.6 空调制冷仿真结论.....	30
4.3 驱动电机和电机控制器冷却系统仿真分析.....	30
4.3.1 驱动电机和电机控制器冷却仿真目标.....	30
4.3.2 驱动电机和电机控制器冷却仿真假设.....	30
4.3.3 驱动电机和电机控制器冷却仿真回路.....	31
4.3.4 驱动电机和电机控制器冷却仿真工况.....	32
4.3.5 驱动电机和电机控制器冷却仿真结果.....	32
4.4 动力电池冷却系统仿真分析.....	32
4.4.1 动力电池冷却系统仿真目标.....	33
4.4.2 动力电池冷却系统仿真假设.....	33
4.4.3 动力电池冷却系统仿真回路.....	34
4.4.4 动力电池冷却系统仿真工况.....	34
4.4.5 动力电池冷却系统仿真结果.....	34
4.5 本章小结.....	35
第 5 章 冷却风扇开发过程.....	37
5.1 冷却风扇的组成部件及功能.....	37
5.1.1 冷却风扇电机的功能.....	37
5.1.2 冷却风扇风叶的功能.....	37
5.1.3 冷却风扇调速模块的功能.....	37
5.1.4 冷却风扇护风罩的功能.....	38
5.2 冷却风扇的主要技术要求.....	38
5.2.1 冷却风扇最大转速风量要求.....	38
5.2.2 冷却风扇运行噪声要求.....	38
5.2.3 风扇输入功率要求.....	39
5.3 冷却风扇的最大转速风量性能开发.....	39
5.3.1 冷却风扇风叶选型.....	39

5.3.2	冷却风扇电机性能开发.....	40
5.3.3	冷却风扇样件试制及性能测试.....	42
5.4	冷却风扇的转速控制方式选择.....	43
5.4.1	转子绕组串并联调速方式.....	43
5.4.2	串联电阻分压调速方式.....	44
5.4.3	PWM 信号调速方式.....	45
5.4.4	对比和选择调速方式.....	47
5.5	冷却风扇的可靠性开发验证试验.....	47
5.5.1	冷却风扇功能检查试验.....	47
5.5.2	冷却风扇机电性能试验.....	47
5.5.3	冷却风扇耐环境试验.....	47
5.5.4	冷却风扇耐久性试验.....	48
5.6	本章小结.....	50
第 6 章	整车热管理性能验证试验.....	51
6.1	整车热管理性能验证试验的目的.....	51
6.2	整车热管理性能验证试验的过程.....	51
6.2.1	整车试验的前期准备.....	51
6.2.2	整车试验测试环境准备.....	52
6.2.3	整车热管理性能行驶工况和目标.....	52
6.3	整车热管理性能验证试验结果.....	53
6.3.1	热环境风洞整车热管理试验结果.....	53
6.3.2	海南夏季道路整车空调及冷却试验结果.....	54
6.4	风扇相关的整车性能验证试验.....	54
6.4.1	整车风扇噪声试验.....	54
6.5	本章小结.....	55
第 7 章	冷却风扇控制策略的优化.....	56
7.1	冷却风扇控制策略优化的目标.....	56
7.2	冷却风扇控制逻辑结构.....	56
7.2.1	空调 AC/OFF 状态的控制逻辑结构.....	57
7.2.2	空调 AC/ON 状态的控制策略结构.....	58
7.3	冷却风扇控制策略优化方法.....	59
7.4	冷却风扇控制策略优化结果和效果.....	61
7.4.1	AC/OFF 工况下, 风扇控制策略优化结果.....	61
7.4.2	AC/ON 工况下, 风扇控制策略优化结果.....	61
7.4.3	风扇控制策略优化前后的结果和效果.....	62
7.5	本章小结.....	63
第 8 章	结论与展望.....	64

8.1 结论.....	64
8.2 进一步工作的方向.....	64
致谢	66
参考文献	67
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果	70

图目录

图 1.1 电动车热管理系统构成.....	1
图 1.2 冷却风扇开发流程.....	3
图 1.3 本文论述结构.....	5
图 2.1 空调制冷系统回路图.....	8
图 2.2 驱动电机冷却系统回路图.....	9
图 2.3 电机控制器冷却系统回路.....	9
图 2.4 动力电池冷却系统回路.....	10
图 2.5 热管理系统总回路图.....	11
图 3.1 车辆简化后模型.....	13
图 3.2 前舱简化模型（俯视）.....	13
图 3.3 前舱简化模型（侧视）.....	13
图 3.4 前舱简化模型（正视）.....	14
图 3.5 计算域模型.....	14
图 3.6 风扇流量及风速曲线.....	15
图 3.7 Y=0.1 截面位置示意.....	16
图 3.8 50 km/h, Y=0.1 截面空气流速场图（单位 m/s）.....	17
图 3.9 Z=0.36 截面示意.....	17
图 3.10 50 km/h, Z=0.36 截面空气流速场图（单位 m/s）.....	17
图 3.11 IdleY=0.1 截面流速场图.....	18
图 3.12 Ilde, Z=0.53 截面流速场图.....	18
图 3.13 静压分布分析线.....	19
图 3.14 静压分配图.....	19
图 3.15 风扇提供的流量随车速变化曲线.....	21
图 4.1 驱动电机和电机控制器.....	24
图 4.2 散热器、冷凝器和冷却风扇.....	25

图 4.3 电子水泵	26
图 4.4 电动压缩机	26
图 4.5 电池冷却器	27
图 4.6 电机和电机控制器冷却管路图	27
图 4.7 电池冷却器未开启时的制冷剂回路	28
图 4.8 空调制冷和电池冷却器同时开启时的制冷剂回路	29
图 4.9 驱动电机和电机控制器冷却系统仿真回路	31
图 4.10 电池单元传热建模原理示意	33
图 4.11 动力电池冷却系统仿真回路	34
图 4.12 电池冷却仿真热启动工况	35
图 4.13 电池冷却仿真寿命晚期最大负荷工况	35
图 5.1 冷却风扇爆炸图	37
图 5.2 噪声测试试验	38
图 5.3 风叶的等转速流量-静压曲线	39
图 5.4 风叶的转速-轴扭矩曲线	40
图 5.5 电机测功机	41
图 5.6 电机性能曲线	41
图 5.7 电机转速扭矩方程和电机扭矩方程解出工作点	42
图 5.8 风扇实测风量性能曲线	43
图 5.9 转子绕组串并联调速电路示意	43
图 5.10 串联电阻调速方式电路示意	44
图 5.11 PWM 信号调速方式电路示意	45
图 5.12 PWM 信号示意图	46
图 5.13 风扇验证试验序列	48

表目录

表 1.1 内燃机车辆和电动车热管理系统温度需求	2
表 2.1 空调制冷系统一般考核标准	6
表 2.2 电机和电机控制器的冷却需求	7
表 2.3 动力电池冷却需求	7
表 2.4 各系统信息统计	10
表 3.1 行驶车速对应进风风速	15
表 3.2 风扇最高速开启时的各工况空气流量和流速	20

表 3.3 风扇关闭时的各工况空气流量和流速	20
表 4.1 电池冷却器关闭状态仿真工况	29
表 4.2 电池冷却器开启状态仿真工况	29
表 4.3 空调制冷仿真结果	30
表 4.4 驱动电机和电机控制器冷却仿真工况	32
表 4.5 驱动电机和电机控制器冷却仿真结果	32
表 4.6 动力电池仿真工况	34
表 5.1 绕组调速转速档状态表	44
表 5.2 电阻调速转速档状态表	45
表 5.3 各种调速方式优劣汇总	47
表 5.4 风扇试验结果汇总	49
表 6.1 空调最大制冷试验工况和考核目标	52
表 6.2 冷却性能试验工况和考核目标	53
表 6.3 空调最大制冷试验结果	53
表 6.4 冷却性能试验结果	54
表 6.5 海南夏季道路空调制冷试验数据	54
表 6.6 海南夏季冷却试验 120 km/h 测试数据	54
表 6.7 整车风扇噪声测试结果与台架比较	55
表 7.1 风扇不同转速下的功率及噪声	56
表 7.2 风扇转速与档位对应关系表	57
表 7.3 AC/OFF 状态风扇转速真值表 (空)	58
表 7.4 AC/ON 状态风扇转速真值表 (空)	59
表 7.5 风扇标定状态记录表(空表)	61
表 7.6 AC/OFF 状态风扇转速真值表	61
表 7.7 AC/ON 状态风扇转速真值表	62
表 7.8 控制策略优化后不同工况下风扇开启状态	62
表 7.9 控制策略优化前后风扇输入功率对比	63
表 7.10 控制策略优化前后风扇的车内、外噪声对比	63

第1章 绪论

1.1 电动车热管理系统及对电子冷却风扇的需求

纯电动汽车是一种采用蓄电池作为单一储能动力源的汽车，即以车载动力电池为动力，用电机驱动车轮行驶，符合道路交通、安全法规各项要求的车辆^[1]。它利用动力高压蓄电池作为储能动力源，通过电池向电机提供电能，驱动电动机运转，从而推动汽车前进。汽车的热管理系统的运行目标，是将车辆的各系统在使用工况下均维持在适宜的温度范围内。

与内燃机车辆相比，电动车的热管理系统主要包含三个部分^[2-8]：

- 1) 电机和电机控制器冷却系统；
- 2) 动力电池冷却系统；
- 3) 乘客舱空调制冷系统。

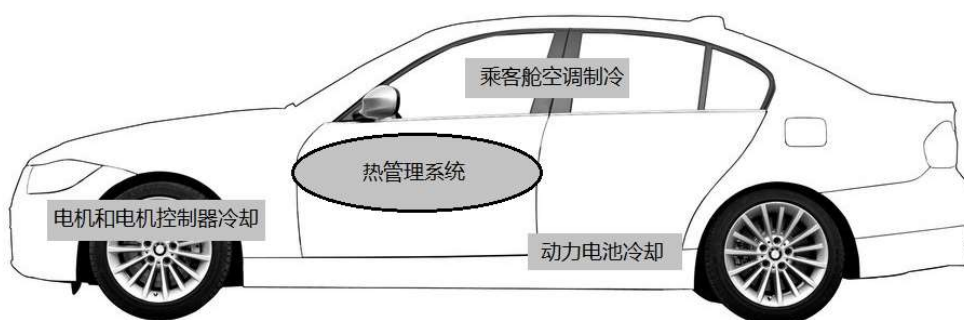


图 1.1 电动车热管理系统构成

而内燃机车辆的热管理系统主要包含两个部分^[9]：

- 1) 发动机及动力总成附件冷却；
- 2) 乘客舱空调制冷。

可以看出，电动车的热管理系统相比内燃机车辆包含了额外的电池冷却系统，而且在各系统的适宜工作温度区间上，也存在较大差异。对比如下表：

表 1.1 内燃机车辆和电动车热管理系统温度需求

	适宜工作温度区间 °C		
	内燃机车辆	电动车	
发动机及附件冷却	<120	<75	电机和控制器冷却
乘客空调制冷需求	~25	~25	乘客空调制冷需求
		20~30	动力电池冷却

电动车和内燃机车辆的热管理系统的运行方式均为将热量由目标系统经过介质传递到与空气接触的换热器，再经由换热器和流动空气的热交换，将热量释放到空气中。最后的将热量释放到空气中的换热过程，都需要电子冷却风扇提供一定风速持续流动的空气完成热交换或者由车辆行驶过程中车速带来的前端进风提供。在车辆速度较低或停止状态下，而热管理系统有换热需求时，就需要冷却风扇辅助或者独立提供热交换的空气流量。

电动车对冷却风扇的使用要求，仍存在特殊性。具体原因在于：

- 1) 纯电动车对续航里程非常敏感，冷却风扇的输入电功率一般在 200W 以上，属于大功率的用电器，电能的过度消耗会降低车辆续航里程；
- 2) 纯电动车不存在怠速工况，行驶中临时停车驱动电机即停止工作，但如有空调系统制冷需求，则冷却风扇会继续运行；此时风扇作为主要噪声源单独运行，没有其他声源掩盖，会非常容易被乘客感受到，引起抱怨。

基于这两点原因纯电动车对电子冷却风扇有两项特殊要求：

- 1) 在各工况下尽量减少功率消耗，为电动车续航里程做出贡献；
- 2) 在各工况下尽量降低风扇噪声，减少客户对噪声的抱怨。

1.2 电子冷却风扇的开发

1.2.1 电子冷却风扇的主要技术要求

冷却风扇作为传统内燃机最大功率的电机驱动部件之一，目前对轿车用电子冷却风扇主要的技术要求体现在^[10-13]：

1) 最大风量性能要求

风扇在开发过程中，需满足整车各系统对于风扇风量的需求，一般为对应整车前舱阻力对应的压力损失下的最小风量需求。

2) 输入电功率限制

由于车载电源以及线束的容量限制，以及整车节能降耗考虑，风扇在满足风

量性能的前提下，尽量少的消耗功率；在轿车领域，冷却风扇的输入电功率一般在有刷电机 100~500W，无刷电机 300~1000W。

3) 冷却风扇的噪声水平

对冷却风扇总声压级的要求，一般来说，风扇的风量越大，整体噪声水平越高。

4) 对风扇可靠性的要求

布置在发动机舱的冷却风扇，需要考虑到在高温，涉水，颠簸等严苛状况下的功能保证，对风扇的可靠性考核主要包括：

- (1) 电机及电气回路的常见异常状态可靠性考核；
- (2) 针对气候及腐蚀的耐受性考核；
- (3) EMC 性能考核。

1.2.2 电子冷却风扇开发流程

纯电动车冷却风扇性能和控制策略开发流程主要分为热管理系统需求和系统关键参数输入，流场仿真及系统一维仿真分析，冷却风扇产品开发，整车性能验证，风扇的控制策略优化几个步骤。

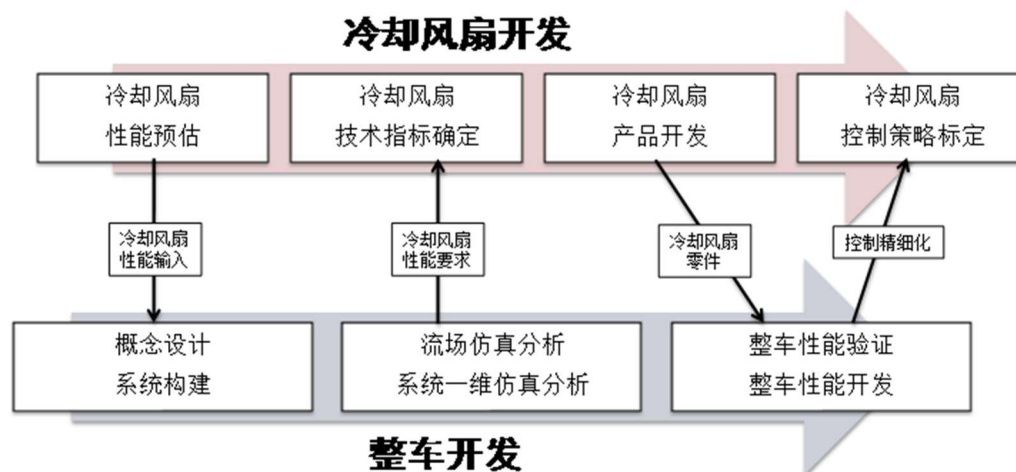


图 1.2 冷却风扇开发流程

1.3 本文的研究目的

车辆冷却风扇的匹配，涉及到很多交叉领域：电机学，空气动力学，NVH和整车布置集成等。本文期望在纯电动车开发过程中，针对电动车热管理系统对

冷却风扇的特殊要求，利用软件仿真分析和整车验证结合对照来完成符合各系统风量需求的冷却风扇应用设计；并基于整车各使用工况数据研究，优化冷却风扇的控制策略，以达到能耗经济性和风扇噪声优化的目的。对于电动车来讲，续航里程和噪声感受的提升，不但对于环境保护有积极的意义，也有助于企业提升产品竞争力。

1.4 本文主要工作和思路

- 1) 按照电动车各热管理系统工作温度区间要求，组件各介质换热回路；
- 2) 按照车辆发动机舱布置进行不同车速下的进风量仿真分析，得到不同车速下换热器空气流量数据，并将预估的风扇最大风量曲线耦合计算，得到风扇开启与关闭时换热器空气流量差异；
- 3) 以发动机舱流场仿真结果作为不同车速的输入，搜集热管理系统各部件的信息，作为一维性能仿真计算的输入，通过一维仿真完成各系统实际运行情况分析，确认系统性能状态，确认风扇最大风量需求；
- 4) 根据风扇最大风量需求开发冷却风扇，并考核其他主要性能要求；
- 5) 在整车条件下验证各系统实际能力，对照仿真结果确认风扇最大性能有效性；
- 6) 基于风扇控制策略结构，在整车各工况试验中优化风扇控制参数，以达到节能和降低噪声的目标；
- 7) 通过对整个开发过程的总结，冷却风扇的匹配与标定方法推广到包括传统内燃机车辆在内的其他电子冷却风扇开发过程中。

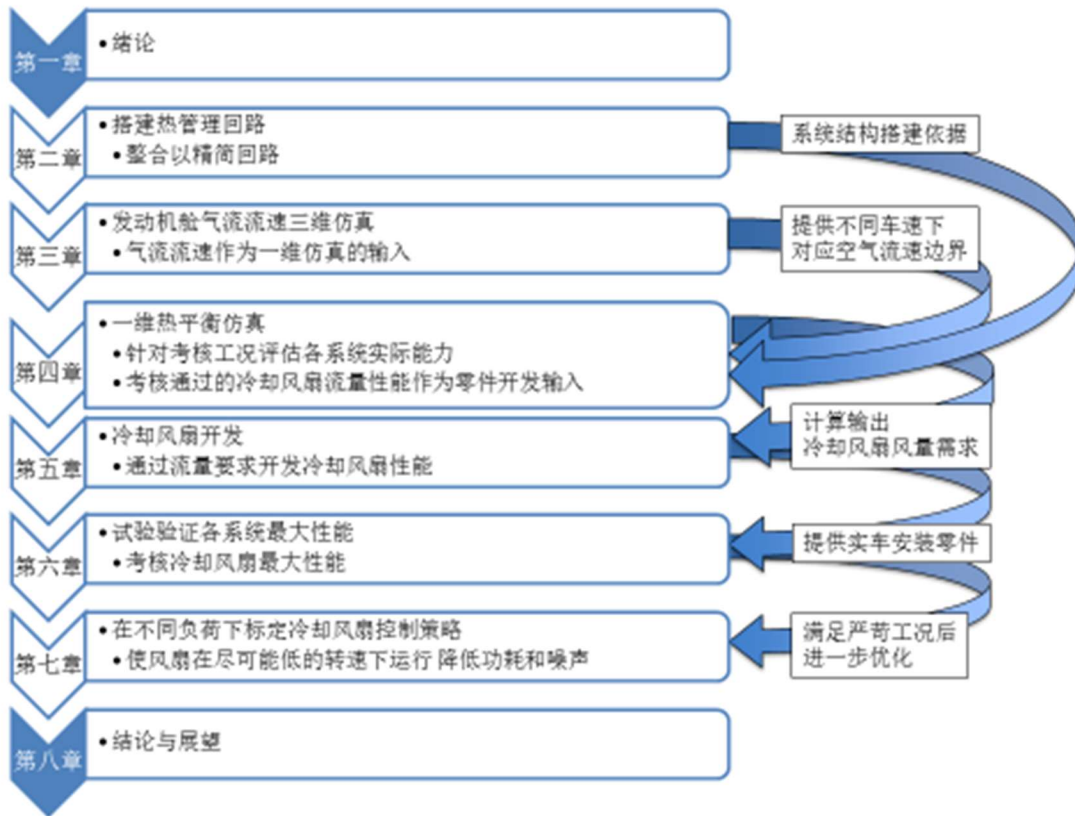


图 1.3 本文论述结构

第2章 电动车各热管理系统方案及输入

2.1 电动车各热管理系统需求

由于本文主要针对电动车冷却风扇的开发匹配过程进行论述，因此电空调及热管理系统开发主要以电机控制器-驱动电机冷却系统，空调制冷系统以及电池冷却系统三个子系统的开发及各子系统开发的集成来实现，以纯电动汽车为例总体方案如下图所示，具体的技术方案按三个子系统开发说明。

2.1.1 空调制冷系统需求

空调制冷系统与传统内燃机车的需求相同，需要通过制冷剂回路的相变降低蒸发器周围空气的温度，再由空调鼓风机将较低温的空气由空调出风口吹入乘客舱，达到在炎热天气里保持乘客舱适宜温度的目的。一般来说，按照传统空调系统的开发经验，按照固定工况来考核特定时间点考核乘客舱呼吸点温度的平均值是否达到水平。推荐的考核指标见下表，能达到每一个水平，表示空调制冷效果在最炎热的夏季能达到绝大部分乘客舒适的程度^[14-16]。

表 2.1 空调制冷系统一般考核标准

试验开始时间 h	行驶车速 km/h	呼吸点平均温度 °C
0.5	50	<24
1	80	<22
1.5	120	<20
2	Idle	<28

根据经验，在外温 38 °C，湿度 40%，80 km/h 工况下，外循环模式下，如出风口温度能达到 14±1 °C，可以认为空调能达到制冷的舒适目标。

2.1.2 驱动电机和电机控制器的冷却需求

驱动电机和电机控制器在行驶过程中持续发热，主要热量来源于电路本身内阻的电流热效应。总体来说，车速越快，电路发热量越大，行驶负荷越大，电机发热量越大。同时，电机和电机控制器本身工作温度过高会引起线路内阻增高，效率降低降低。电机长期高温运转会影响绝缘寿命，电机控制器工作时得不到散热会影响主要功率元件的寿命。电机和电机控制器的冷却需求来自电机和电机控

制器的供应商台架测试数据。电机和电机控制器对冷却系统要求如下表^[17-18]：

表 2.2 电机和电机控制器的冷却需求

工况 气温 38 °C	电机控制器冷却要求	电机冷却要求
50 km/h, 7.2%坡度	入口冷却液温度 < 75 °C; 最小冷却液流量 > 8L /min	入口冷却液温度 < 90 °C; 最小冷却液流量 > 8 L/min
120 km/h	入口冷却液温度 < 75 °C; 最小冷却液流量 > 8 L/min	入口冷却液温度 < 90 °C; 最小冷却液流量 > 8 L/min

2.1.3 动力电池冷却需求

本项目动力电池采用磷酸铁锂电池，电池在放电过程中会由于电池内阻的电流热效应放热。电池的最佳工作特性在 20~30°C 范围，温度过高会导致动力电池寿命降低，因此需要额外冷却系统给电池散热。本项目动力电池采用液冷式散热，电池的冷却需求如下表^[19-22]：

表 2.3 动力电池冷却需求

工况气温 38 °C	动力电池冷却要求
50 km/h, 7.2%坡度	电池芯体温度 20~30 °C，不超过 45 °C； 最小冷却液流量 > 8 L/min
120 km/h	电池芯体温度 20~30 °C，不超过 45 °C； 最小冷却液流量 > 8 L/min

2.2 建立并整合电动车热管理系统回路

通过搜集各系统需求，需要对各系统建立回路，建立回路的基本原则如下：

- 1) 热量流动方向上要有温度梯度；
- 2) 每种介质的流动都要有对应的动力源；
- 3) 尽量整合冷却要求接近的系统以减少系统回路数量，减轻系统总重量，降低成本。

2.2.1 建立空调制冷系统回路

电动车空调制冷系统回路和传统车空调系统回路构成完全一致。空调系统通过电动压缩机建立制冷剂流动动力，通过低温制冷剂蒸汽冷却乘客舱进风，压缩机压缩制冷剂蒸汽，并在冷凝器中冷凝成液态制冷剂，在过程中放出热量，经由

流过冷凝器的空气带走。

空调系统回路的介质是制冷剂，介质流动动力源是压缩机，换热元件是发动机舱的冷凝器和乘客舱空调箱内的蒸发器，另外由膨胀阀来控制制冷剂流量和流入蒸发器的制冷剂压力^[23-25]。

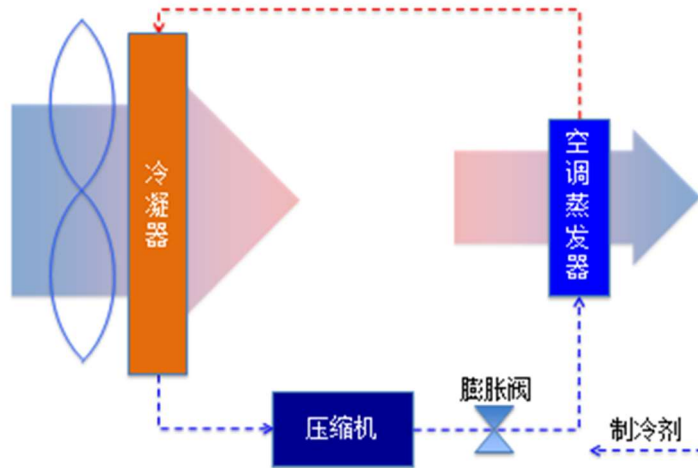
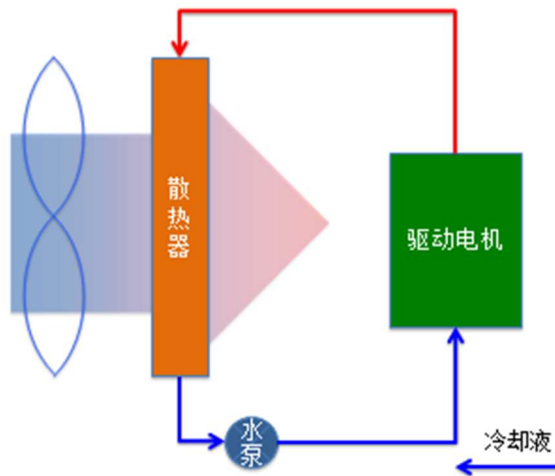


图 2.1 空调制冷系统回路图

2.2.2 建立驱动电机冷却系统回路

根据驱动电机的冷却需求，驱动电机的最高工作温度要求高于气温，因此可以利用驱动电机-冷却介质-空气的温度梯度向大气散热。考虑到电动车需要在低于 0℃ 的环境中使用，选用和传统内燃机车辆使用的 50%乙二醇水溶液做冷却液介质。电动车没有发动机皮带轮驱动的机械水泵，故采用电子水泵作为回路的循环动力。利用布置在发动机舱内的散热器使冷却液与空气进行热交换，将热量排



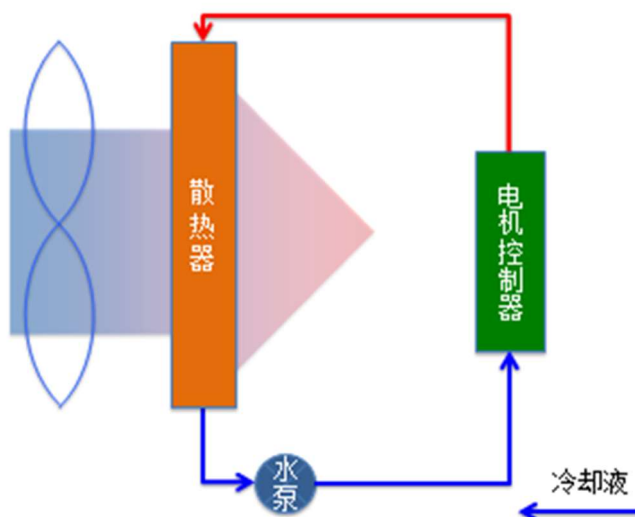
入大气中。

图 2.2 驱动电机冷却系统回路图

2.2.3 建立电机控制器冷却系统回路

电机控制器最高工作温度同样高于气温，因此可以和驱动电机冷却回路一样：

1) 以 50%乙二醇水溶液作为冷却介质；



2) 以电子水泵提供流量驱动；

3) 利用散热器将系统热量排入大气中。

图 2.3 电机控制器冷却系统回路

2.2.4 建立动力电池冷却系统回路

使用锂电池的动力电池的最佳温度范围在 20~30℃，温度过高会影响其使用寿命。因此在气温高于 30℃时，电池与空气之间无法建立温度梯度，无法直接使用冷却液回路对电池散热。需要考虑采用低于 20℃的介质与电池建立热交换。制冷剂回路压力较高，且蒸发侧温度过低，直接将制冷剂回路接入电池无法达到电池的冷却需求。最终通过引入制冷剂-冷却液换热的关键部件，通过制冷剂回路将冷却液温度降低到 15℃以下，再将低温冷却液引入电池冷却板冷却电池，热量通过冷却液回路传递到制冷剂回路再经由冷凝器排入大气。

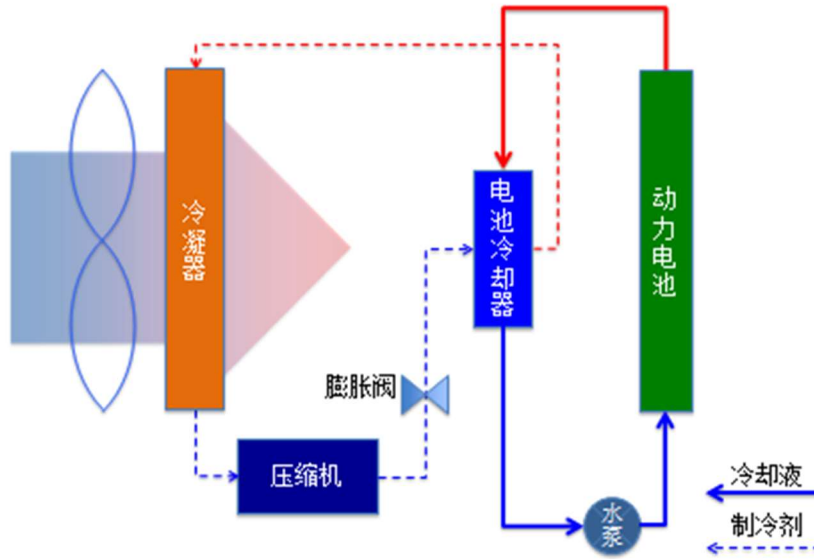


图 2.4 动力电池冷却系统回路

2.2.5 整合各热管理系统回路

已经建立的系统回路和相关信息如下表：

表 2.4 各系统信息统计

系统名称	系统介质	入口介质温度 $^{\circ}\text{C}$	循环动力
空调制冷	制冷剂	~ 5	电压缩机
驱动电机冷却	冷却液	< 90	电子水泵
电机控制器冷却	冷却液	< 75	电子水泵
动力电池冷却	制冷剂/冷却液	$\sim 5 / < 15$	电压缩机

可以发现，空调制冷系统的制冷剂回路与动力电池冷却的制冷剂回路介质和需求完全相同，差异仅区别于使用工况；驱动电机和电机控制器冷却系统的介质和温度要求十分接近，运行时的高负荷工况也基本相同。因此，按照建立回路的原则：

- 1) 将空调制冷系统的制冷剂回路与动力电池冷却系统的制冷剂回路并联，用独立控制的电子膨胀阀独立控制两个系统的制冷剂流量；
- 2) 将电机控制器和驱动电机冷却的冷却液系统串联，利用这两者的温度需求差异，在回路中，经过散热的低温冷却液先经过电机控制器，再经过温度要求较高的驱动电机；
- 3) 动力电池冷却系统的冷却液回路，由于特殊的温度要求，独立成一个回路

完成的整体回路结构见下图：

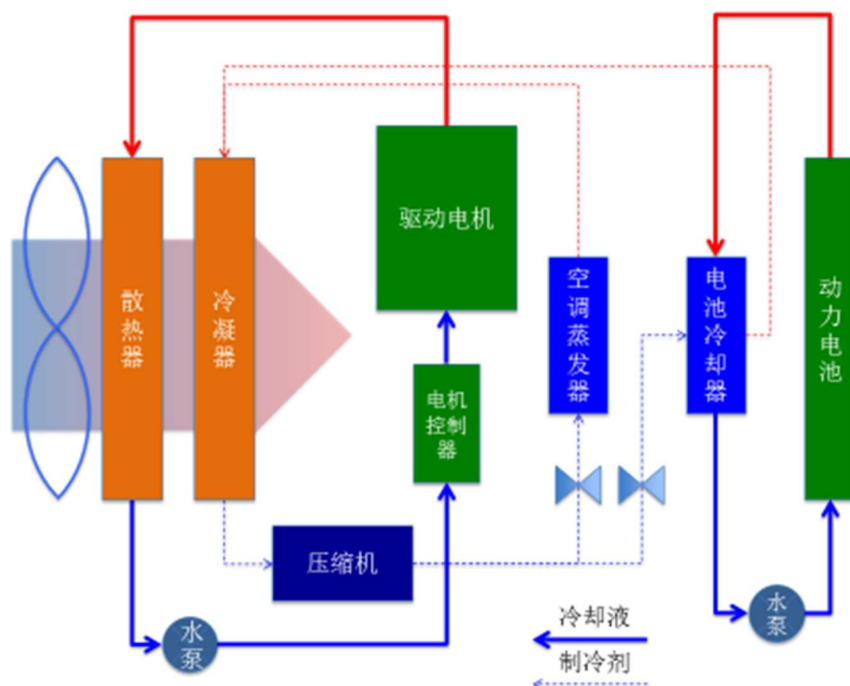


图 2.5 热管理系统总回路图

2.3 本章小结

本章根据各系统的冷却需求，选用合适的冷却系统介质和介质驱动部件及换热器；再通过对对比系统之间的异同的方法，以并联的方式组合了电池冷却系统和乘客舱制冷系统的制冷剂回路，以串联的方式组合了电机驱动器和电机的冷却液回路。以此达到了精简系统部件的目的，为整车节省了部件成本，减轻了重量。以制冷剂回路为例，节省的部件为一个电动压缩机和一个冷凝器，预估节省成本超过 2000 元人民币，减轻整车重量超过 4kg。

第3章 发动机舱气流流速三维仿真分析

3.1 三维模拟仿真软件介绍与建模

随着近年汽车工业的迅猛发展，整车厂面临的竞争越来越激烈，如何尽快推出新产品缩短开发周期已经成为赢得市场的关键因素，CFD 技术的出现使得这种快速开发成为可能。近几十年随着计算机技术的发展，CFD 技术被越来越多的应用到了汽车设计中，通过在各设计阶段的 CFD 模拟分析的介入，可以及时验证设计，同时帮助优化设计方案，缩短开发周期，节约开发成本。

ANSYS FLUENT 软件包含为流场，湍流，热传递和反应建模所需的广泛的物理建模功能，它的工业应用范围非常广阔，包含从飞机机翼的气流直到锅炉中的燃烧，从泡罩塔到采油平台，从血流分析到半导体制造，从无尘室设计到污水处理厂。软件有所包含的模拟缸内燃烧，气动声学，涡轮机，多相系统的特殊模型进一步扩大了其应用覆盖面。

世界上许多公司从使用 ANSYS FLUENT 软件作为其产品开发的设计和 optimization 阶段的一个组成部分而受益。先进的求解器技术提供快速、准确的 CFD 结果，网格可以灵活的改变和调整，具有很强的可扩展性。ANSYS FLUENT 的求解器的互动设置，解决方案和后处理功能可以简便的暂停计算，检查，结合处理结果，更改任何设置，然后继续应用程序的计算^[26]。

在本项目中，利用 CFD 分析工具针对该纯电动车不同阶段的前端布置进行分析检查，为一维仿真分析提供输入。

3.1.1 三维气流流速场仿真建模的理论基础

本文中发动机舱的气流模拟选用 Fluent 求解器，Fluent 包含所有的求解方程，可以直接得到计算结果也可以进行后处理。选用 K- ϵ 不可压湍流模型进行稳态计算，差分格式为二阶迎风格式，隐式解法，残差曲线判定精度为 $1.0e-6$ 。在求解初始化时，将三个方向的初始速度设为零。地面固定不动(模拟风洞实验)^[27-29]。

3.1.2 建立三维仿真模型

将 CAD 模型导入 ANSA 中进行几何处理，稍作简化，建立求解域，尺寸：

车前 2.5 倍车长，车后 2.5 倍车长，两侧各 1 倍车宽，计算域高度为 3 倍车高。将在 ANSA 中生成的面网格导入 TGrid 生成体网格，最后将生成的体网格读入 Fluent 中求解计算，总网格数 5,814,522,节点数 1,055,376。

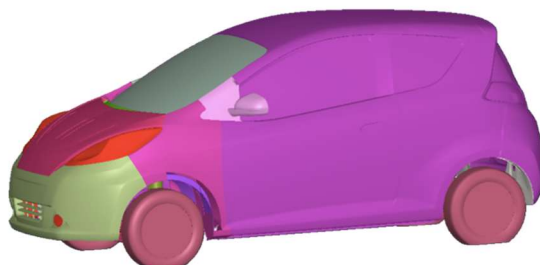


图 3.1 车辆简化后模型

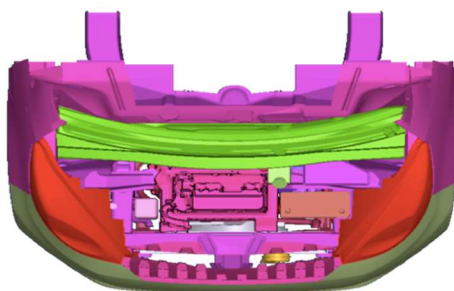


图 3.2 前舱简化模型（俯视）

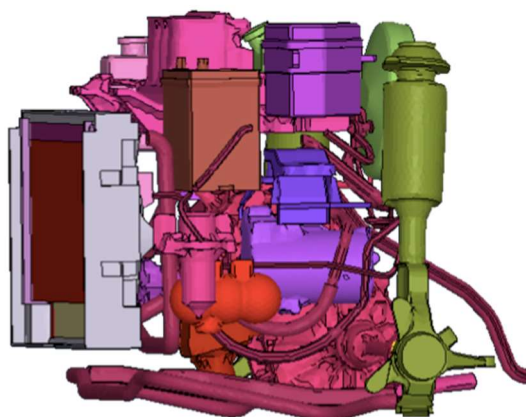


图 3.3 前舱简化模型（侧视）

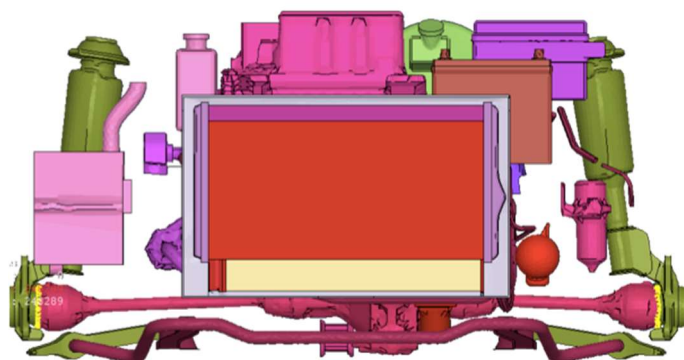


图 3.4 前舱简化模型（正视）

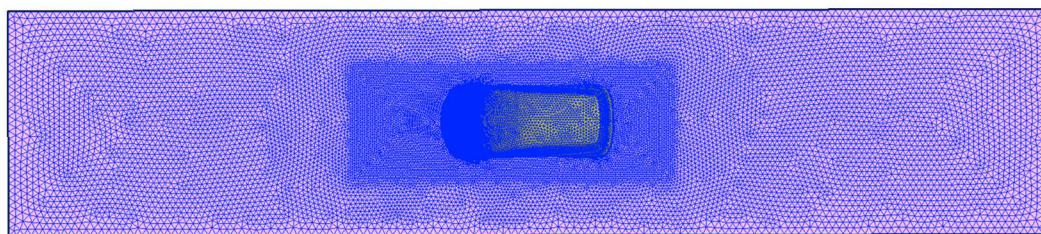


图 3.5 计算域模型

3.2 本项目三维仿真数值计算方法和边界条件

3.2.1 三维仿真数值计算方法

本次计算是对发动机舱内的不可压流动的计算，且为定常计算。数值模拟采用求解“N-S 方程组”的迭代求解方法。N-S 方程组中包含了连续性方程、动量方程，计算式如下^[30-31]：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = S_m \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (3.3)$$

根据本计算的数值模拟问题的物理特点，采用了求解器 Pressure-Based Simple Solver，所选择的湍流模型为标准的 k-ε 两方程湍流模型^[31-32]。

3.2.2 三维仿真边界条件

1) 计算域进口：选用速度进口边界，分别设定为 0.3 m/s, 13.89 m/s, 22.22m/s 和 33.33m/s（相当于怠速，50 km/h，80 km/h，120 km/h 车速）；

表 3.1 行驶车速对应进风风速

行驶车速	怠速	50 km/h	80 km/h	120 km/h
对应进风风速	0.3 m/s	13.89 m/s	22.22 m/s	33.33 m/s

2) 计算域出口：发动机舱气流出口设为压力出口边界；

3) 风扇模型：选用 Fluent 自带风扇模型，通过风扇试验数据的流量-压头曲线，通过拟合风扇的进风面积，得出风速-压头的多项式系数^[33]；在本项目中，先利用现有项目的风扇最高转速流量曲线作为拟合输入。输入的风扇流量曲线以及计算后的风速曲线如下：

对应的压差 y, 风速 x, 拟合多项式为：

$$y = -2.030x^2 + 179.4 \quad (3.4)$$

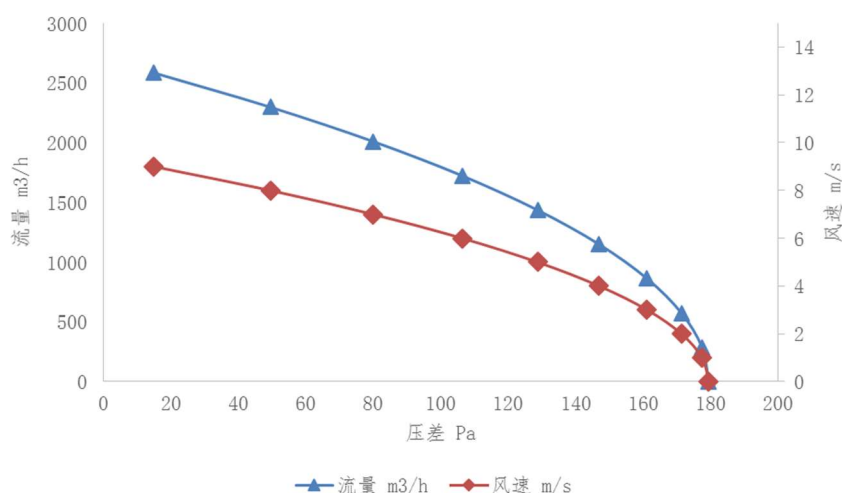


图 3.6 风扇流量及风速曲线

在各个模拟工况中，风扇均以最大转速运行；

4) 换热器模型: 多孔介质, 域内阻力系数由相关换热器的试验数据整理得出, 包括冷凝器、散热器^[27];

冷凝器按照多孔介质的模型计算, 按照产品设计经验, 冷凝器翅片密度和翅片高度, 计算获得冷凝器的惯性阻力系数为 320.0, 粘性阻力系数为 3.65;

散热器与冷凝器结构相似, 因此也指定为多孔介质模型进行计算^[33]。按照散热器的翅片密度和高度, 计算得到散热器的惯性阻力系数为 472.1, 粘性阻力系数为 2.59;

5) 流动介质: 空气温度为 20 °C, 空气密度为 1.225 kg/m³;

6) 车体、风扇、换热器为流体区域。

3.3 发动机舱内气流速度场仿真分析结果

3.3.1 50km/h 行驶工况流速场分析结果

1) 选取的结果显示截面: Y=0.1 平面, 截面位置见图 3.7 示意:

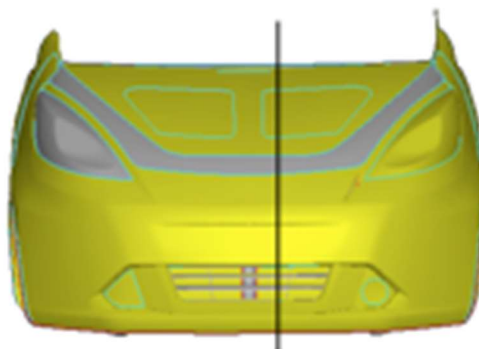


图 3.7 Y=0.1 截面位置示意

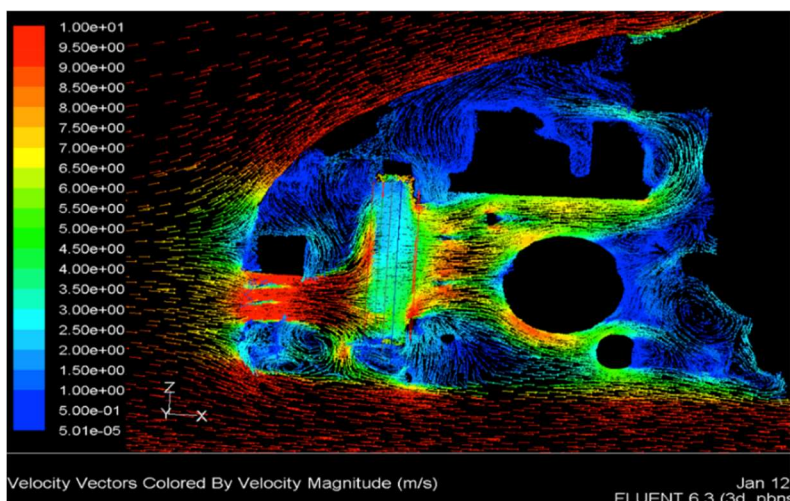


图 3.8 50 km/h, Y=0.1 截面空气流速场图（单位 m/s）

2) 选取的结果显示截面： $Z=0.36$ 平面，截面位置见图 3.9 示意：

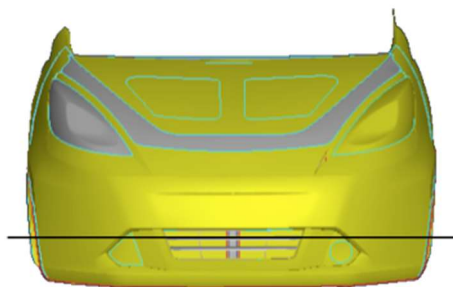


图 3.9 Z=0.36 截面示意

在 50kph 工况下： $Y=0.1$ 截面上，在电机和电机驱动器后侧有部分回流； $Z=0.36$ 平面上，在进气格栅进口后侧有部分回流。这两部分回流均在可接受范围内。

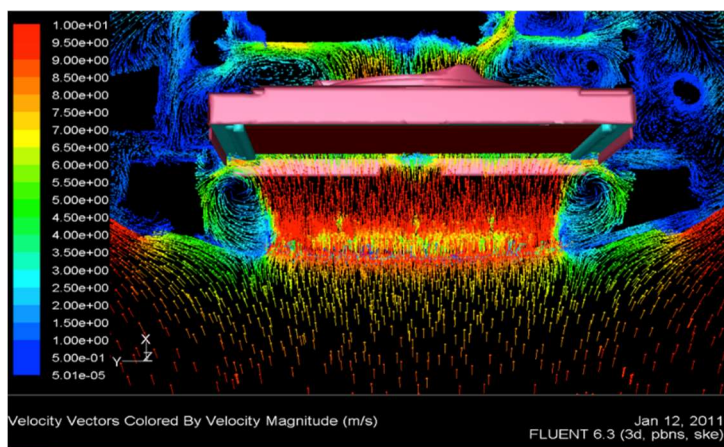


图 3.10 50 km/h, Z=0.36 截面空气流速场图（单位 m/s）

3.3.2 怠速工况流速场分析结果

在怠速工况下，仅由风扇提供空气流量。

1) 选取的结果显示截面： $Y=0.1$ 平面，截面位置见图 3.7 示意：

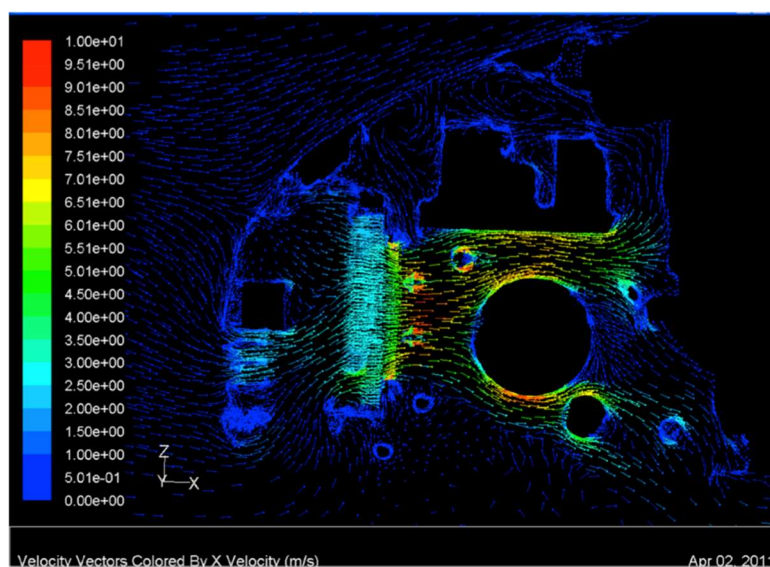


图 3.11 Idle $Y=0.1$ 截面流速场图

2) 选取的结果显示截面： $Z=0.53$ 平面，截面位置见图 3.9 示意：

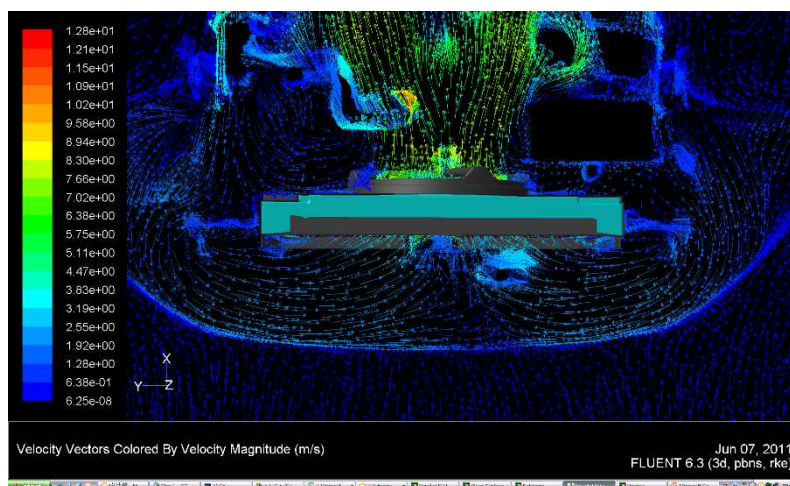


图 3.12 Idle, $Z=0.53$ 截面流速场图

在只有风扇运转的 Idle 工况下：在 $y=0.1$ 和 $z=0.53$ 这两个截面上来看，均未发现明显的回流。

3.3.3 发动机舱流场各部件静压压降分布

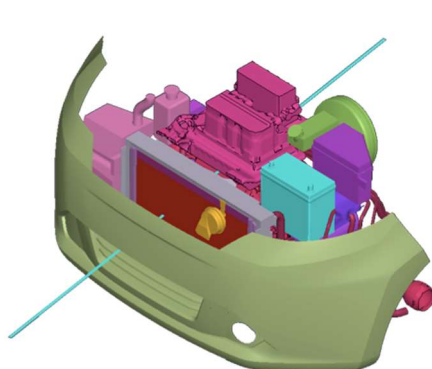


图 3.13 静压分布分析线

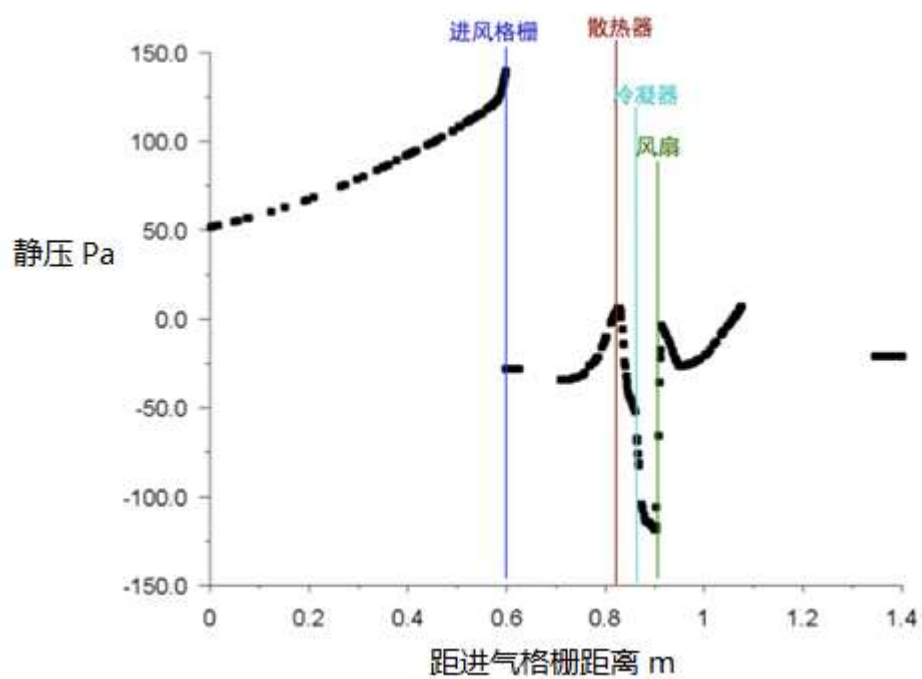


图 3.14 静压分配图

3.3.4 发动机舱气流流速三维仿真分析结果汇总

- 1) 风扇最高转速开启时

表 3.2 风扇最高速开启时的各工况空气流量和流速

		冷凝器	散热器	风扇	格栅
面积 (m ²)		0.1778	0.0577	0.087493	0.0533
Idle	质量流量 (kg/s)	0.2731	0.3817	0.3999	0.0914
	空气流速 (m/s)	1.2856	1.6698	4.3289	1.3614
50 km/h	质量流量 (kg/s)	0.3094	0.4088	0.4303	0.9381
	空气流速 (m/s)	1.7995	1.7901	4.6579	14.1265
80 km/h	质量流量 (kg/s)	0.353	0.4537	0.4803	1.5031
	空气流速 (m/s)	2.0558	1.9869	5.1987	22.6352
120 km/h	质量流量 (kg/s)	0.4272	0.5337	0.5657	2.2597
	空气流速 (m/s)	2.4894	2.3365	6.1234	34.0326

2) 风扇关闭时

表 3.3 风扇关闭时的各工况空气流量和流速

		冷凝器	散热器	风扇	格栅
面积 (m ²)		0.1778	0.0577	0.087493	0.0533
50 km/h	质量流量 (kg/s)	0.0974	0.1394	0.1551	0.9309
	空气流速 (m/s)	0.5678	0.6093	1.6789	14.0195
80 km/h	质量流量 (kg/s)	0.1943	0.2582	0.2798	1.4995
	空气流速 (m/s)	1.1306	1.1291	3.028	22.5845
120 km/h	质量流量 (kg/s)	0.3353	0.4246	0.4523	2.2594
	空气流速 (m/s)	1.9509	1.8575	4.8947	34.0299

3.4 本章小结

基于发动机舱的各部件数学模型，采用 ANSYS FLUENT 软件模拟了不同车速下前舱的流场矢量分布。基于流场的分布，检查了行驶状态和怠速状态前舱气流组织的问题，并得出了各工况下换热器中心流速的数值。基于流速和换热器迎风面积，得出了不同车速下通过各换热器的控制质量流量。不同车速下的空气质量流量-风速数据在下一部分一维分析中为不同车速的前段空气换热计算提供输入。三维仿真为一维热平衡仿真提供了前端进风的边界数据。

从风扇开启和风扇关闭的对照情况来看，随着车速的增高，风扇开启所提供的风量增量逐渐减小；说明车辆的前端冷却风量在低速以及怠速状态下更依赖于风扇的运转。以通过冷凝器的空气质量流量为例，如图 3.15：

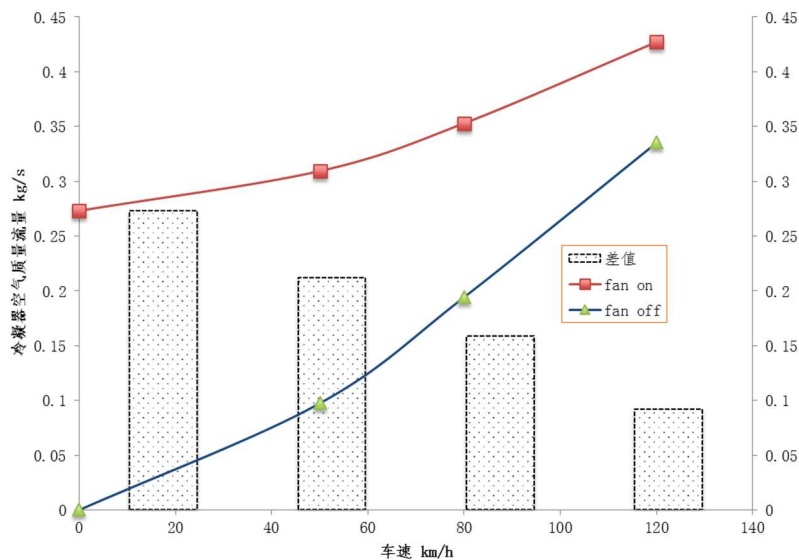


图 3.15 风扇提供的流量随车速变化曲线

第4章 电动车各热管理系统一维热平衡仿真

4.1 一维热平衡仿真介绍

Flowmaster 是全球领先的一维流体系统仿真解算工具,是面向工程的完备的流体系统仿真软件包,对于各种复杂的流体系统,工程师可以利用 Flowmaster 快速有效的建立精确的系统模型,并进行完备的分析。

三维 CFD 软件是在单个元器件的尺度上进行三维流场仿真,而 Flowmaster 关心的是系统尺度上所发生的事情。每个流体系统由许多的组件构成,如泵、阀、管路、散热器等等,Flowmaster 可以监视系统的运行情况,如改变泵转速、开启和关闭阀门时系统的变化情况,如各支路流量的变化及各节点压力的变化,Flowmaster 可以对系统中的各个环节进行精确的压力、流量、温度、流速分析,快速的帮助工程师完成和优化系统的设计。

Flowmaster 具备的分析模块可以对流体系统(含液压系统)进行稳态和瞬态分析;Flowmaster 可以对不可压缩流体和可压缩流体系统进行分析,可以对系统进行热传导分析;Flowmaster 所仿真的流体系统内的介质可以是液体,也可以是气体,并且可以对包含气液相变的空调系统进行仿真;Flowmaster 所具备的动态色彩显示和图表显示等强大的后处理功能能够对系统部件性能进行实时的监测和评估^[34-36]。

本文采用 Flowmaster 对纯电动汽车的电机-电机控制器冷却系统,空调制冷系统和电池冷却系统系统进行热平衡分析。在分析过程中,将把三维仿真中流场的质量流量以及流速等信息作为整车不同行驶工况的输入;将系统中各关键部件,包括冷却模块的散热器和冷凝器,压缩机,电子水泵管路等组成部件,选用系统中合适的预设模型,在将零部件测试的性能参数代入。通过对各系统热平衡状态的分析,来预测实际系统是否能够达到整车如空调出风口温度,电池热平衡温度的需求,并以此确定系统的最终设计方案。

4.1.1 一维热平衡仿真建模规则

为了准确有效的建立仿真系统模型,需要在建模过程中符合以下规则:

- 1) 系统模型必须真实反映出系统的行为特征;
- 2) 根据该系统子部件类型,在模型组件库中选择对应的部件来建立模型;

3) 系统模型中的部件要与真实系统中的部件一一对应，包括在系统中的布置顺序，布置形式，支路位置等；

4) 对系统影响较小的特征，例如弯头的流动阻力对系统压力损失的影响，管路系统的散热对系统温度的影响等，可进行简化，关键部件以及系统的关键边界细节不可简化；

5) 各组件的输入参数要与系统中各组成部件的关键参数一一对应；

6) 各组件的输入参数要能准确反映系统中对应部件的几何特征与性能表现；

7) 环境设置要需要与分析实际运行工况环境一致；

8) 分析实际运行状态要与系统在对应工况下的行为相一致。

4.1.2 一维热平衡仿真建模的理论基础

流动阻力方程：

$$p_1 - p_2 = \xi \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U^2 \quad (4.1)$$

其中： p_1 、 p_2 分别为元器件进、出口的压力，单位为 kPa；

ξ 为元器件的沿流动方向的流动损失系数，即元件进出口流通时的损失系数；

ρ 为流体的密度， kg/m^3 ；

U 为流速， m/s ；

质量守恒方程：

$$Q = A_1 u_1 = A_2 u_2 \quad (4.2)$$

其中： u_1 、 u_2 为流速， m/s ；

A_1 、 A_2 为元器件边界处的面积， m^2 ；

上式的含义为：系统中各处的流量相等。

压力损失方程：

$$\Delta p = \left(p_1 + \frac{\rho_1 \cdot v_1^2}{2} \right) - \left(p_2 + \frac{\rho_2 \cdot v_2^2}{2} \right) + \rho \cdot g(z_1 - z_2) \quad (4.3)$$

其中： p 为静压力，Pa；

$(\rho \cdot v^2)/2$ 为动压力，Pa；

z 为该位置中心处的标高，m；

下标 1、2 分别表示进口和出口的位置；

上式的含义为：流体流经元器件的压力损失等于进、出口的全压（静压力+动压力）差与高度差压头的和。此方程可以对系统中任意两处位置进行分析。

换热方程：

$$T_2 = T_1 + \frac{Q}{m \cdot C_p} \quad (4.4)$$

其中： T_2 为组件出口的温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

T_1 为组件进口的温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

Q 为在该组件处流体吸热/放热的功率，kW；

m 为流体的质量流量，kg/s；

C_p 为流体的定压比热，kJ/kg·K。

上式的含义为：元器件进出口的温差等于流体在该组件处的换热量除以流体的质量流量与定压比热的商，即遵循能量守恒原则^[37-40]。

4.1.3 各热管理系统一维仿真主要元件

1) 驱动电机和电机控制器

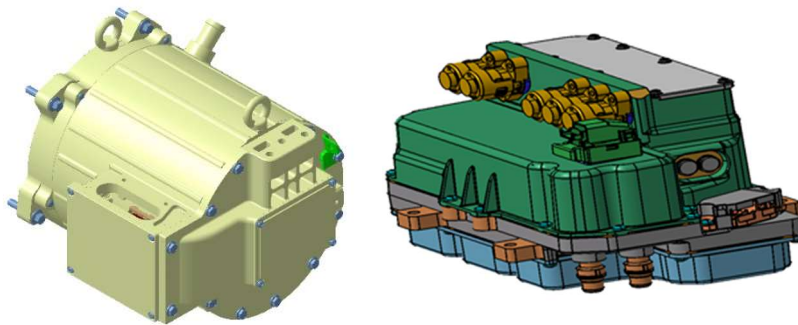


图 4.1 驱动电机和电机控制器

驱动电机和电机控制器在一维仿真中仅作为电加热器，采用软件中的发热器元件表示。在稳态中，主要特征参数为放热量，和水道的换热面积。另外作为整个流道的组成部分，电机和电机控制器在回路中还体现为其流阻特性。电机和电机控制器的阻力曲线，通过组成冷却液回路后，改变系统的流量并同时记录被测组件对应流量下的管路进-出口压差测试并记录，组成流量-压差的曲线，即为该

组件的流阻曲线。由于电机及电机控制器在同一回路中，故将电机和电机控制器的对应放热量在各考核工况下相加，两者的和作为输入。

3) 散热器，冷凝器，冷却风扇

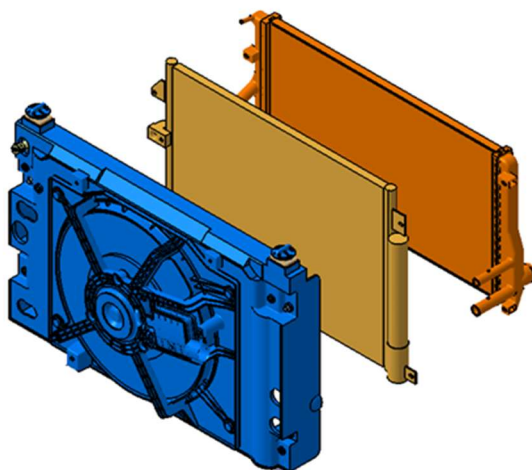


图 4.2 散热器、冷凝器和冷却风扇

系统仿真中，风扇不作为元件设置，系统的冷却风量以持续均匀的风速代替；风速来自于发动机舱 CFD 分析结果中风扇以最大风量运行时的计算结果。

散热器选用软件中的散热器组件，通过零部件测试数据，输入水侧阻力曲线，空气侧阻力曲线，换热性能数据。散热器空气侧阻力曲线通过供应商台架测出，通过测试在变流量的风洞中的对应流量下散热器两侧的压力差异得出。水侧阻力和电机，电机控制器测试方法相同，通过改变回路中的流量测试散热器冷却液进出口压力差来获得。散热器换热量性能数据，通过供应商换热性能测试台得出。测试结果为对应的空气侧-水侧流量矩阵下的换热量。

冷凝器选用软件中的冷凝器组件，需要输入风侧阻力曲线，液侧阻力曲线和换热量数据。冷凝器的风阻，流阻测试方法和散热器相关输入完全一致。换热性能由供应商焓差台测试得出。

4) 电子水泵



图 4.3 电子水泵

电子水泵作为整个回路的流量驱动部件,在 Flowmaster 中有对应水泵组件,将标示水泵性能的流量-压力曲线输入作为该组件的参数;在计算过程中,均只考虑水泵最高转速运行的情况,由于使用的是电子水泵,转速仅为参考输入。

5) 电动压缩机

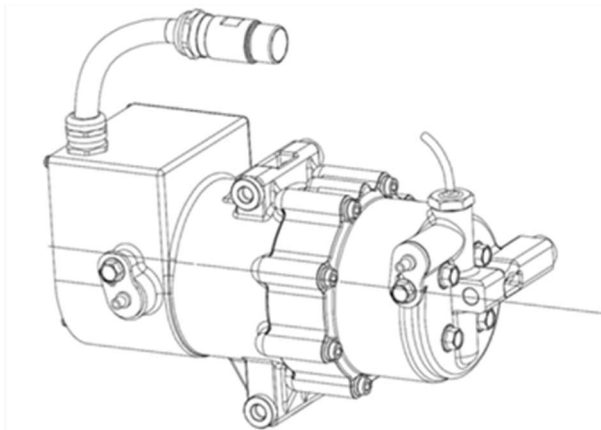


图 4.4 电动压缩机

压缩机直接选用软件中的压缩机组件,根据供应商提供的测试数据,输入排量,绝热效率和余隙因子。

6) 蒸发器

蒸发器选用软件中的 Evaporator 组件,主要输入参数是制冷剂侧流阻,空气侧风阻和换热量性能。使用 ASCOP 功能将蒸发器性能拟合后,作为组件的性能参数。在本项目中乘客舱模型是采用对实际空间大小相近的车辆实际测量得出的。主要参与蒸发器侧换热过程模拟的参数是乘客舱的出风流量。

7) 电池冷却器



图 4.5 电池冷却器

在系统运行中提供制冷剂回路和电池回路换热,为简化模型,使用通用组件,在空调制冷性能的分析过程中,电池冷却器只模拟 1.45kw 的换热量和压降。

8) 冷却管路

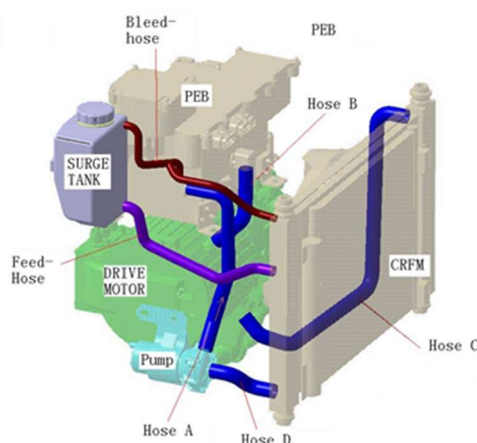


图 4.6 电机和电机控制器冷却管路图

冷却管路是冷却回路的链接件,多采用 EPDM 材料配合支持结构的编织层构成。在仿真过程中,忽略了管路对外的热交换,在整个系统中体现的主要是其阻力特性。阻力特性主要是由其长度,直径以及转弯半径和转弯角度参数构成。系统中所有管路内径均为 20 mm;管路的分段长度以及各个弯头的半径-角度数据按照实际布置完成的管路 3D 数据测量得出。

4.2 空调制冷系统仿真分析

4.2.1 空调制冷系统仿真目标

- 1) 通过仿真评估设计状态是否能满足空调系统的性能要求;
- 2) 由于采用双蒸系统, 电池冷却器的开启会影响制冷剂回路的热负荷, 影响空调制冷效果。因此需要通过模拟比较电池冷却器开启与否对空调系统制冷性能的影响大小。

4.2.2 空调制冷系统的仿真假设

- 1) 电池冷却器的换热量设置为 1.45kW, 此输入来自电池冷却器供应商基于电池冷却系统的仿真分析结果; 电池冷却器在分析中只模拟换热量和相应压降阻力;
- 2) 由于缺少车厢模型, 仅利用恒定温度进行空调系统模拟, 以计算结果中的出风口温度作为判断依据; 通过模拟考核在外温 38℃, 湿度 40%, 80km/h 工况下, 外循环模式下, 出风口温度是否能达到 $14 \pm 1^\circ\text{C}$;
- 3) 使用 FLOWMASTER 中的 TXV 组件控制空调系统的过热度控制在 5 度左右;
- 4) 所有管路均假设是绝热的, 且不受高度的影响。

4.2.3 空调制冷系统仿真回路

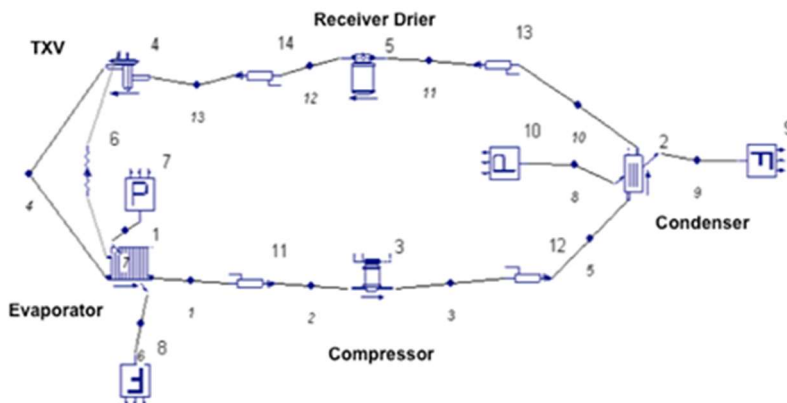


图 4.7 电池冷却器未开启时的制冷剂回路

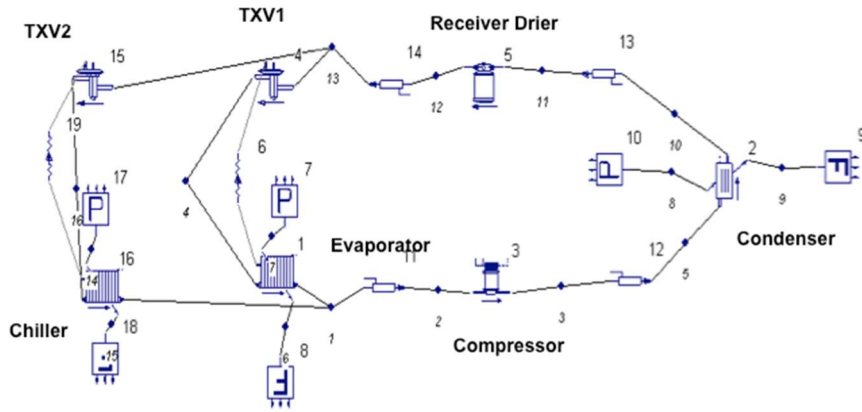


图 4.8 空调制冷和电池冷却器同时开启时的制冷剂回路

4.2.4 空调制冷系统仿真工况

表 4.1 电池冷却器关闭状态仿真工况

No	测试工况	蒸发器			冷凝器		压缩机
		入口气温	湿度	空气 体积流量	入口 气温	空气流速	转速
		°C	%	m ³ /h	°C	m/s	r/min
1	Idle	38	40	340	38	1.2856	8500
2	50 km/h	38	40	340	40.64	1.7995	8500
3	80 km/h	38	40	340	41.95	2.0558	8500
4	120 km/h	38	40	340	47.28	2.4894	8500

表 4.2 电池冷却器开启状态仿真工况

No	测试工况	蒸发器			冷凝器		电池冷却器	压缩机
		入口气温	湿度	空气 体积流量	入口 气温	空气流速	冷却功率	转速
		°C	%	m ³ /h	°C	m/s	kW	r/min
5	Idle	38	40	340	38	1.2856	1.45	8500
6	50 km/h	38	40	340	40.64	1.7995	1.45	8500
7	80 km/h	38	40	340	41.95	2.0558	1.45	8500
8	120 km/h	38	40	340	47.28	2.4894	1.45	8500

4.2.5 空调制冷系统仿真结果

表 4.3 空调制冷仿真结果

电池冷却器	No	蒸发器			冷凝器		
		出风口温度	热交换功率	压力	出风口温度	热交换功率	压力
		°C	kW	bar	°C	kW	bar
工作	1	19.2	3.04	3.42	75.5	6.96	27.17
	2	18.6	3.18	3.32	67.3	7.08	24.68
	3	19.8	3.23	3.3	65.21	7.09	23.66
	4	19.2	3.05	3.36	66.1	6.96	26.8
关闭	5	16.2	3.69	2.98	68	5.78	28.2
	6	14.1	4.14	2.99	64.1	6.29	22.3
	7	14	4.16	2.99	62.6	6.36	22
	8	15	3.94	3.02	64.3	6.17	24.22

4.2.6 空调制冷仿真结论

1) 电池冷却器关闭状态下，压缩机转速在 8500 r/min 的最大性能时，在外循环模式下出风口温度达到 15 °C 左右，基本可以满足制冷需求；

2) 电池冷却器开启状态下，空调制冷性能明显降低，在最大制冷工况下，出风口温度大约在 19 °C 左右。因此如果电池冷却器和空调同时需要工作时，压缩机建议在最大转速工作。考虑到仿真假设中电池冷却器功率为持续最大功率，但实际运行工况电池冷却器并不需要持续最大功率运行；虽然电池冷却器开启状态空调制冷性能未达到目标，也认为风险较低。对电池冷却器实际开启状态下的空调制冷性能，在整车试验中进行验证。

4.3 驱动电机和电机控制器冷却系统仿真分析

4.3.1 驱动电机和电机控制器冷却仿真目标

- 1) 通过仿真，确认驱动电机和电机控制器冷却系统是否满足性能要求；
- 2) 对比散热器前置和冷凝器前置两种方案，通过评估做出方案选择。

4.3.2 驱动电机和电机控制器冷却仿真假设

- 1) 在冷却系统仿真过程中，冷凝器的换热量设定为 5kw，以简化分析模型；
- 2) 仿真系统中，风扇并不运行，系统的冷却风量以持续均匀的模拟风速代替；模拟风速来自于发动机舱 CFD 分析结果中风扇以最大风量运行时与不同车速前端进风的计算结果；
- 3) 电机和电机控制器的发热量数据由零件负责部门计算并提供，热量在现实状态下会被冷却液和空气同时冷却；但在冷却系统计算中，将该热量均作为冷却系统中的热量输入；
- 4) 电子水泵始终在最高转速持续运行；
- 5) 表面效率系数按照开发经验设置为 0.8；
- 6) 所有的管路均被设置为绝热的，并不受高度的影响。

4.3.3 驱动电机和电机控制器冷却仿真回路

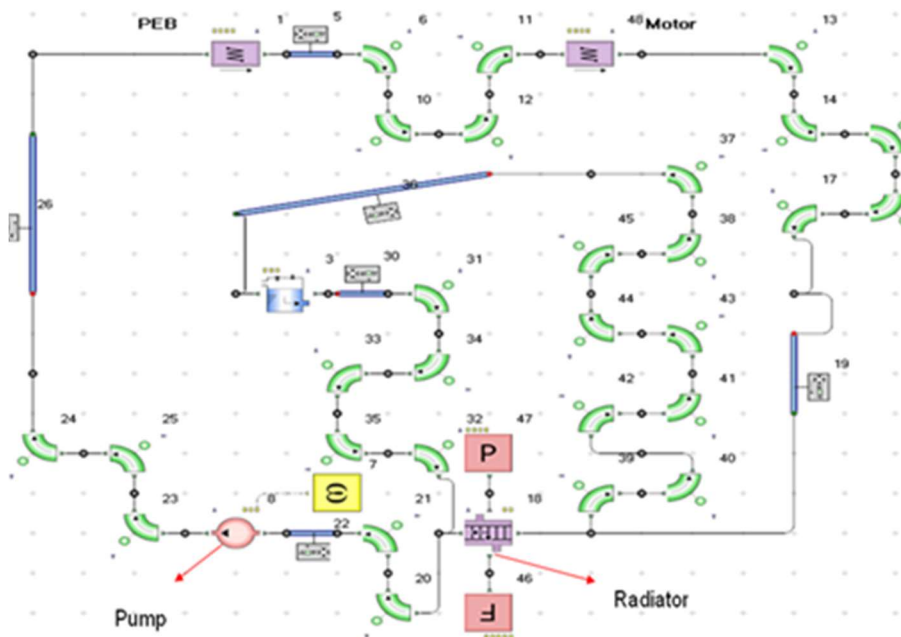


图 4.9 驱动电机和电机控制器冷却系统仿真回路

4.3.4 驱动电机和电机控制器冷却仿真工况

表 4.4 驱动电机和电机控制器冷却仿真工况

	No	行驶工况				
		行驶情况		空气侧情况		热负荷
		速度	坡度	入口气温	冷凝器热负荷	电机和电机控制器
		km/h	%	°C	kW	kW
冷凝器前置	1	50	0	340	5	0.998
	2	50	10	340	5	1.377
	3	80	0	340	5	1.661
	4	120	0	340	5	4.572
冷凝器后置	1	50	0	340	0	0.998
	2	50	10	340	0	1.377
	3	80	0	340	0	1.661
	4	120	0	340	0	4.572

4.3.5 驱动电机和电机控制器冷却仿真结果

表 4.5 驱动电机和电机控制器冷却仿真结果

	No	行驶工况					散热器出口温度 °C
		行驶情况		空气侧情况		热负荷	
		速度	坡度	入口气温	冷凝器热负荷	电机和电机控制器	
		km/h	%	°C	kW	kW	
冷凝器前置	1	50	0	38	5	0.998	57.64
	2	50	10	38	5	1.377	59.41
	3	80	0	38	5	1.661	58.7
	4	120	0	38	5	4.572	67.44
冷凝器后置	1	50	0	38	0	0.998	42.71
	2	50	10	38	0	1.377	44.49
	3	80	0	38	0	1.661	45.25
	4	120	0	38	0	4.572	57.96

4.4 动力电池冷却系统仿真分析

4.4.1 动力电池冷却系统仿真目标

- 1) 研究电池热管理系统的热量分布；
- 2) 评估冷却性能是否能够满足整个电池需求。

4.4.2 动力电池冷却系统仿真假设

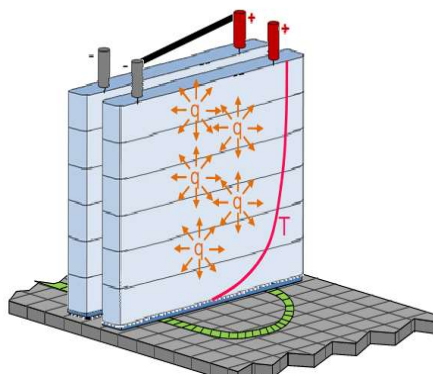


图 4.10 电池单元传热建模原理示意

本项目的动力电池的单元冷却，是由电池单元堆叠之后，再与电池板接触传热后完成。由于需要考虑每个电池单元均能达到目标温度，因此需要在仿真模型中考虑电池单元之间的温度差异。可以看出，顶部电池单元的温度始终较高，仿真中以顶部电池单元温度作为考核对象。

仿真的假设如下：

- 1) 仅按照最恶劣的电池发热量（快速充电-放电工况）来模拟真实电池；
- 2) 电子水泵的开关控制策略为电池温度降到 20 度时水泵关，当电池温度升到 30 度时水泵开；
- 3) 电池冷却器的换热量保持恒定 1.45 kW,仅评估稳定后的电池温度；
- 4) 根据空调系统能力，假设散热器制冷剂进口温度控制在 10 度。

4.4.3 动力电池冷却系统仿真回路

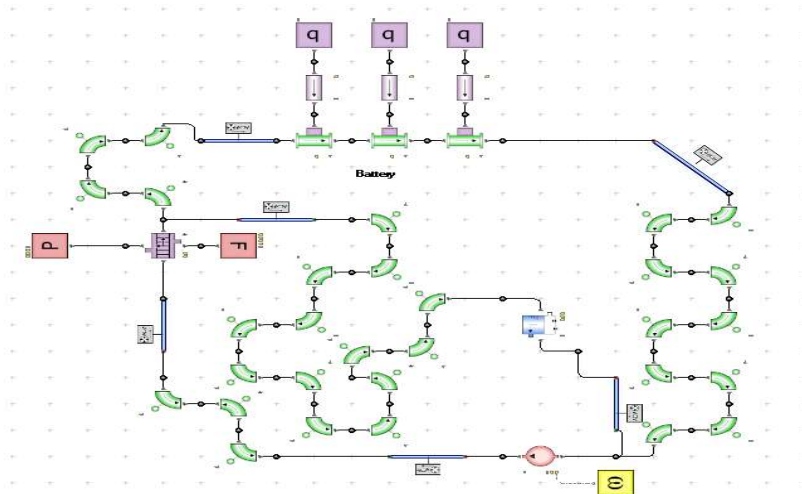


图 4.11 动力电池冷却系统仿真回路

4.4.4 动力电池冷却系统仿真工况

动力电池仿真工况，主要考虑两种最严苛工况，发热量来自电池供应商的仿真数据：

- 1) 新动力电池的热启动，普通道路工况，在此工况下在高温环境下稳定温度的电池初始温度 45 °C，电池放热功率 558 W；
- 2) 动力电池接近寿命结束时的高速行驶工况，在此工况下，电池初始温度为 30 °C，电池放热功率为 1450 W。

表 4.6 动力电池仿真工况

工况	起始电芯温度 °C	电池发热功率 W
热启动普通负荷	45	558
寿命晚期最大负荷	30	1450

4.4.5 动力电池冷却系统仿真结果

1) 热启动工况

在热启动工况下，电池温度持续降低，在 1200 s 内并未达到 30°C 的理想温度，但始终保持在 45°C 的考核值以下并持续下降；考虑到电池本身在电芯温度超过 30°C 时会做降功率处理，放热量会更低，热启动工况实际运行仿真结果达到系统要求。

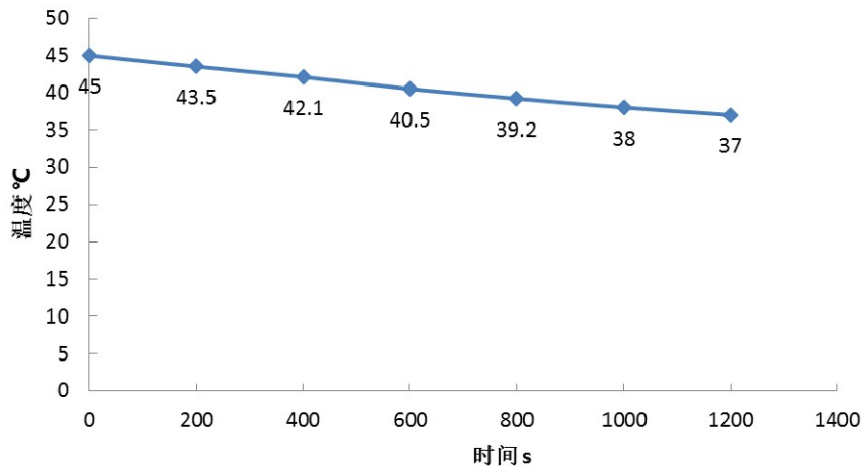


图 4.12 电池冷却仿真热启动工况

2) 寿命晚期最大负荷

在寿命晚期最大负荷工况仿真中，电池温度缓慢上升，到 7000 s 仍然仅仅接近 35 °C。在实际运行工况中，已经超过了本项目电动车的最大续航里程（约 120 km）上限。冷却系统可以满足电池寿命晚期的冷却需求。

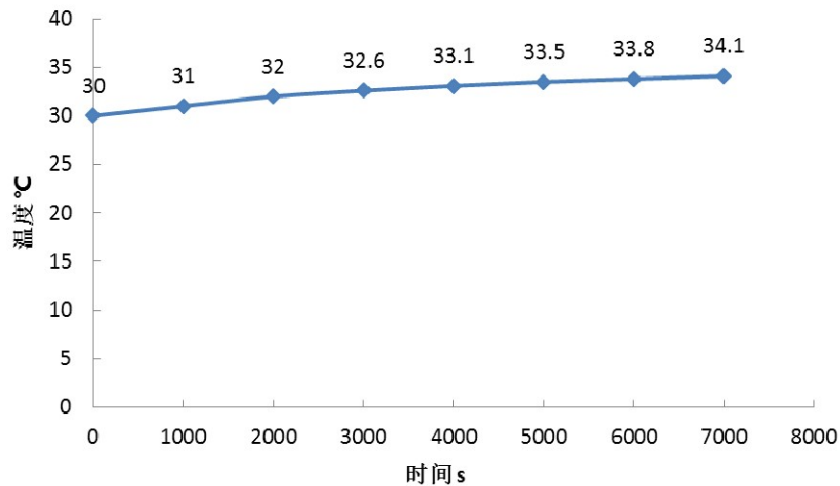


图 4.13 电池冷却仿真寿命晚期最大负荷工况

4.5 本章小结

使用 Flowmaster 软件建立电机和电机控制器冷却液回路和空调制冷剂回路的一维模型，并通过对回路关键部件的性能测量作为分析中的元件输入。通过一维仿真，确认了目前的各系统设计状态：冷却系统的仿真中，确认了电动车的前端布置，更适合采用不同于传统内燃机车的冷凝器后置布置；空调制冷系统分析

中，确认了电池冷却器工作时，虽然会影响空调制冷效果，但空调制冷仍然能够达到预期目标；电池冷却系统的分析看出，电池冷却系统能维持所有的电池芯体温度在要求范围内，但由于电池芯体本身的导热效率问题，电芯上下温差较大，可以考虑通过改变电芯的布置或增强电芯间导热来进一步优化。在此过程中，确认了整个热管理系统对冷却风扇的最大风量需求。

通过一维热平衡仿真，完成了系统方案选择以及各主要部件性能匹配的验算。避免了不能达到要求的系统方案在实车完成制造后才被确认能力不足带来的重新设计风险，通过仿真节省了可能因为仿真引起的开发费用损失和时间损失，加快了整车项目的开发速度。

第5章 冷却风扇开发过程

5.1 冷却风扇的组成部件及功能

以本项目的冷却风扇为例,由电机、风扇、护风罩和调速模块四个部分组成。

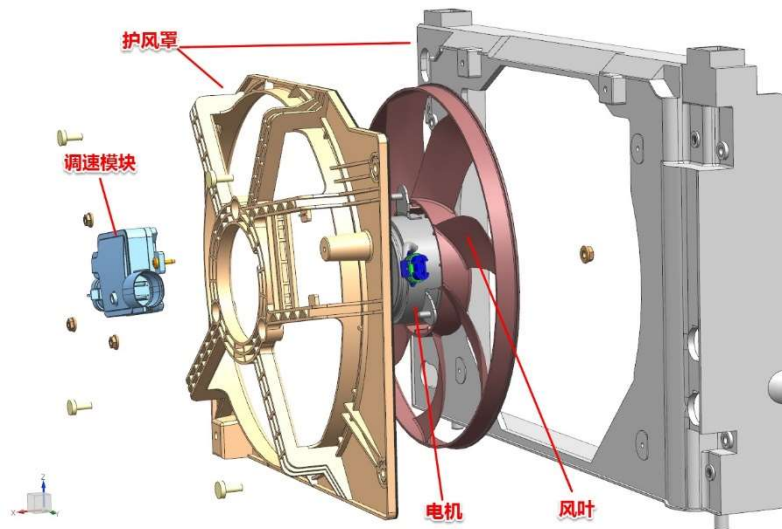


图 5.1 冷却风扇爆炸图

5.1.1 冷却风扇电机的功能

电机是冷却风扇的核心部件,通过电能到机械能的转换将电路中的电能转化为风叶旋转的机械能。一般乘用车用电子冷却风扇电机均为直流电机,一般分为直流有刷电机和直流无刷电机。本项目选用的是永磁体励磁的直流有刷电机。

5.1.2 冷却风扇风叶的功能

实现由电机提供的转动动能到冷却气流动能的能量转移。风机风量主要与风扇的直径、转速、叶片形状、叶片角度、叶片数有关。叶片的断面形状有圆弧形和翼型两种,翼型风叶效率高,消耗功率少,在小型乘用车上得到了广泛的应用。一般叶片数为4、5、6或7片。叶片间隔角或相等,或不相等。间隔角不等的叶片可以减小叶片旋转时的振动和噪声^[41]。

5.1.3 冷却风扇调速模块的功能

整车接受信号以及电能输入，根据输入信号决定输出电压，以调节电机转速；通常有电机串并联改变调速，串联电阻调速以及 PWM 模块调速等方式。

5.1.4 冷却风扇护风罩的功能

护风罩一方面对内部的电机提供安装支持，另一方面提供整个冷却风扇连接到整车的散热器冷凝器，或者直接连接到车身的安装支持；为风扇提供的流量导流，一款流场设计好的护风罩，可以有效的提升产生冷却风量的效率。

5.2 冷却风扇的主要技术要求

5.2.1 冷却风扇最大转速风量要求

由一维系统仿真的结果确认：

在风扇两侧 90 Pa 静压状态下，要求风扇的风量不小于 1700 m³/h；

在风扇两侧 0 Pa 静压状态下，要求风扇的风量不小于 2300 m³/h。

5.2.2 冷却风扇运行噪声要求

根据经验整理的轴流式风扇噪声和空气流动功率的关系：最大风量需求对应的空气流动功率为 45 W。对应的风扇噪声需求为小于 73 dB(A)。测试方法为：

试品风扇以装车状态安装在实际散热器上，测试电压： $U=13.5\pm 0.2V$ ，以不同转速运转，测点距地面垂直距离 1.0m，距风扇总成水平距离 1.0m，检测试品 A 计权噪声值。



图 5.2 噪声测试试验

5.2.3 风扇输入功率要求

对冷却风扇的功率要求，主要是通过限制功率来避免使用过低效率的系统方案，来节省能耗。一般风扇的效率约为 20% 至 30%。由此限制在 13.5V 下，风扇电流不超过 15A，输入功率不超过 210W。

5.3 冷却风扇的最大转速风量性能开发

5.3.1 冷却风扇风叶选型

乘用车所应用的电子冷却风扇的扇叶，比较流行采用翼型设计。风叶的选型依据需要考虑两方面内容，提供需求流量需要达到的转速以及该转速下需要的驱动扭矩。

对照风扇的等转速风量-静压曲线以及流量需求，我们可以看出所需流量在 2500 r/m 的等转速曲线上能够被满足。

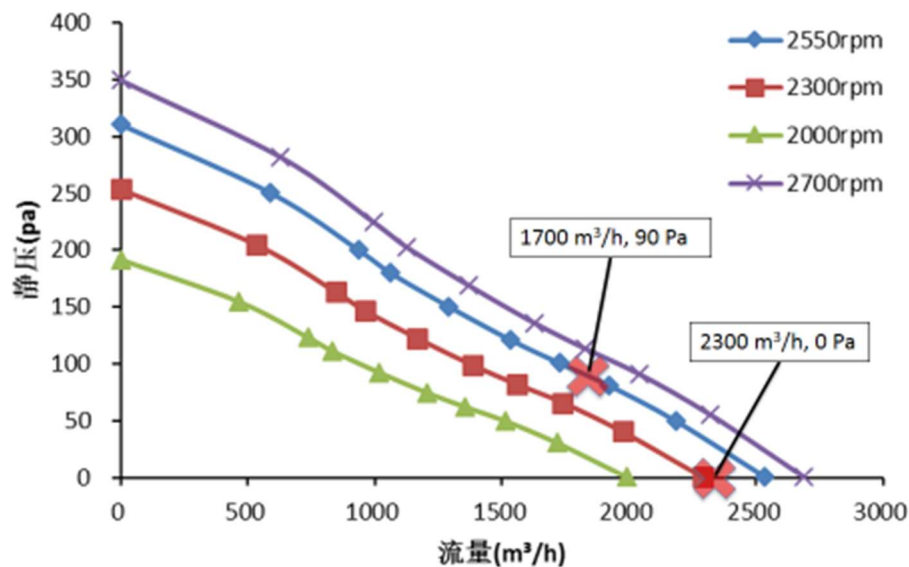


图 5.3 风叶的等转速流量-静压曲线

对照风叶的转速-轴扭矩曲线，找出 2500 r/min 所对应的转速，确认驱动该流量需要的驱动扭矩为 0.42 Nm。

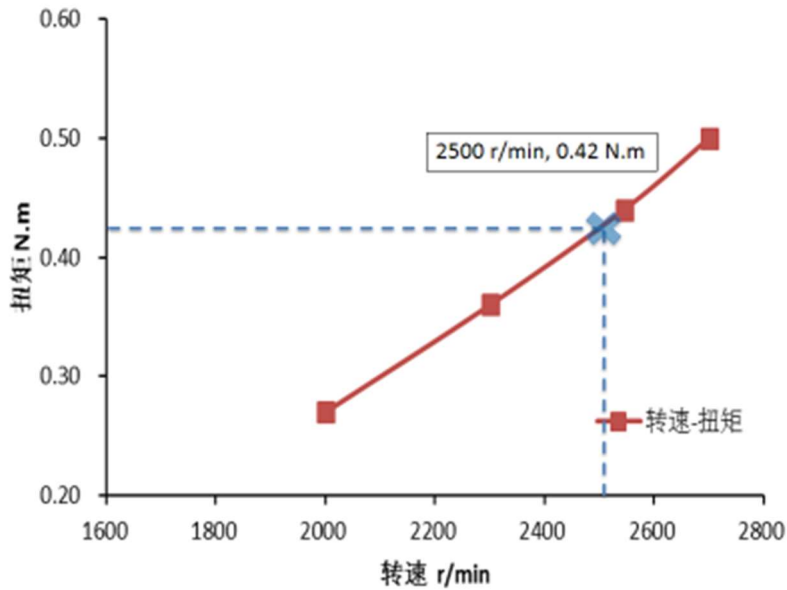


图 5.4 风叶的转速-轴扭矩曲线

风叶扭矩转速方程^[42]:

$$S = K_f \sqrt{T} \quad (5.1)$$

其中：S 为风叶转速，r/min；

K_f 为扭矩转速系数；

T 为风叶转动所需轴扭矩，Nm。

电机功率转速方程：

$$P = K(S)^3 \quad (5.2)$$

其中：P 为电机输入功率，W；

K 为电机转速功率系数；

S 为电机转速，r/min。

从转速-扭矩曲线可以看出风叶转速和所需驱动轴扭矩的关系，如果转速提高两倍，则需要 4 倍的扭矩，同时需要 8 倍的功率。

5.3.2 冷却风扇电机性能开发

本项目选用的直流有刷电机，按照流量需求，以及风叶的性能数据，得到

风叶在对应流量工作点的转速-扭矩值；此转速-扭矩即为匹配该风叶达到流量需求的电机性能参数。

电机性能的测试，在风扇供应商的测功机上进行。

根据此参数，选用并试制电机，经测功机得出电机的性能曲线，电机满足 0.42N.m, 2500 r/min 的要求。

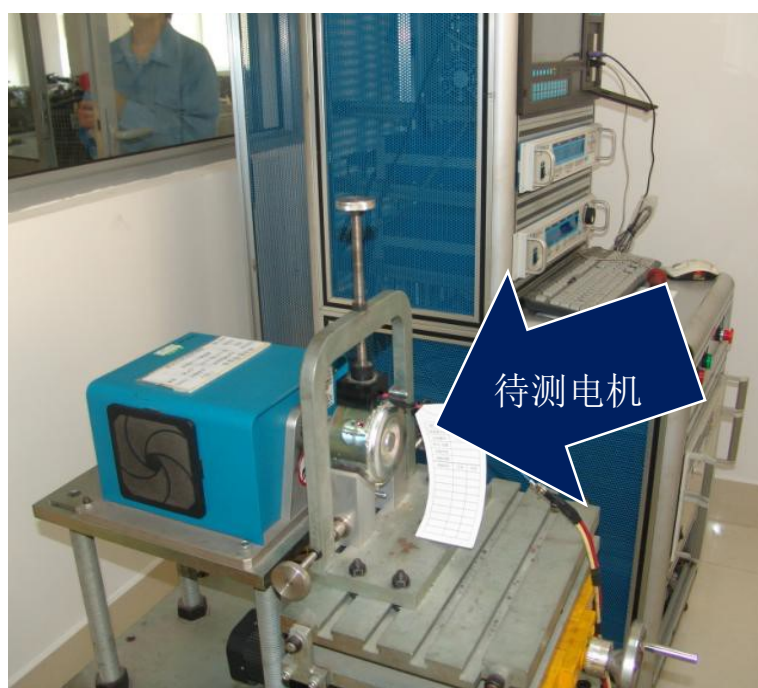


图 5.5 电机测功机

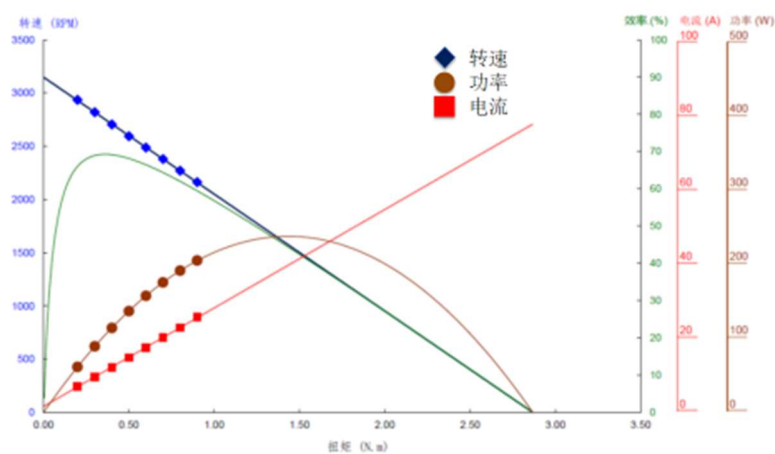


图 5.6 电机性能曲线

直流电机的转速扭矩方程^[43]:

$$S = -mT + S_{nl} \quad (5.3)$$

其中:S 为直流电机转速, r/min;

m 为转速扭矩系数;

T 为扭矩, Nm;

S_{nl} 为电机空载转速, r/min。

与风叶扭矩方程 (5.1) 建立成方程组, 即解出目前风叶-电机匹配的工作点转速-扭矩点, 见图 5.7。

预测该电机和风叶匹配后, 转速-扭矩为 2600 r/min, 0.46 Nm 对应的转速略微超过预期, 可以达到 > 2500 r/min. 的目标。预计风扇流量也会略微高于目标。

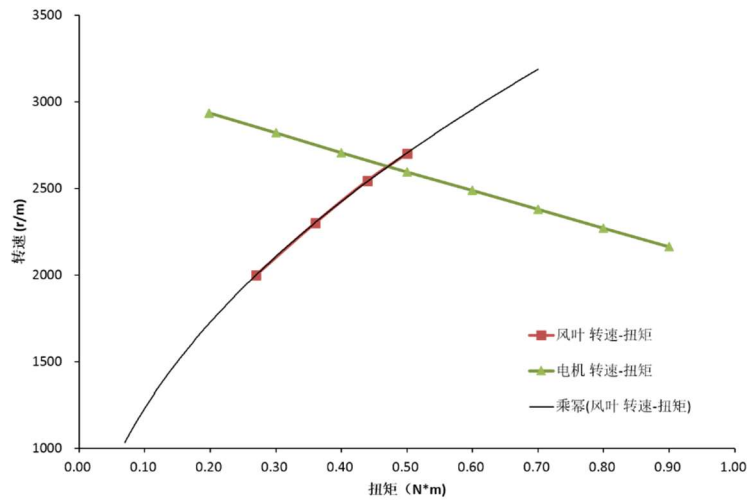


图 5.7 电机转速扭矩方程和电机扭矩方程解出工作点

5.3.3 冷却风扇样件试制及性能测试

将该电机和风叶组合试制样件, 测试其最大转速下风量曲线。确认风量符合要求。在工作点 90 Pa 左右, 风扇功率 <210 W 符合要求。测试号结果见图 5.8。

进行不同转速下的噪声测试, 最大转速下噪声水平为 72.1 dB(A), <73 dB(A), 达到要求。

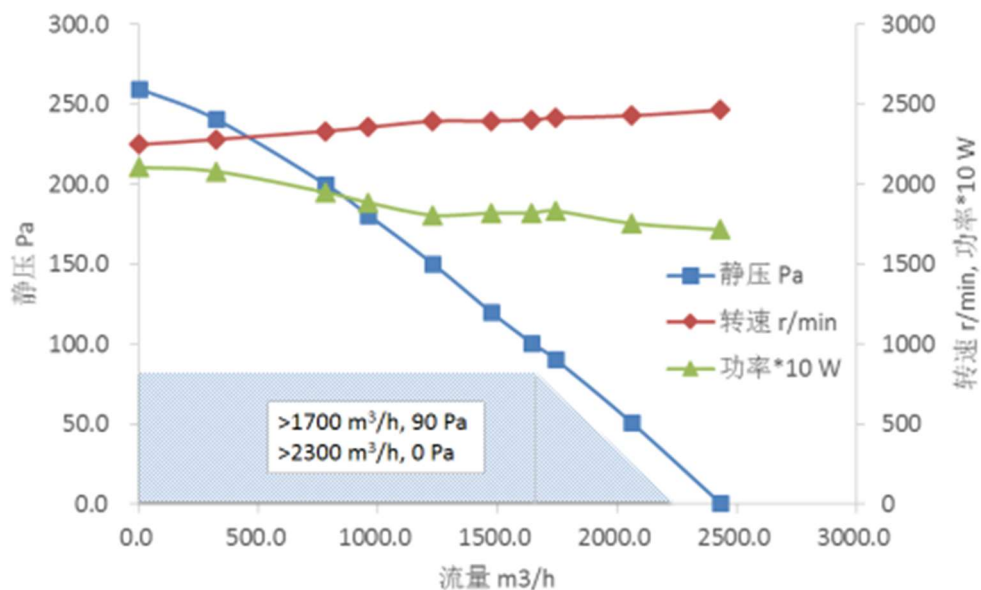


图 5.8 风扇实测风量性能曲线

5.4 冷却风扇的转速控制方式选择

乘用车用电子冷却风扇的转速控制方式主要有转子绕组串并联调速，串联电阻分压调速和 PWM 信号调速三种方式。

5.4.1 转子绕组串并联调速方式

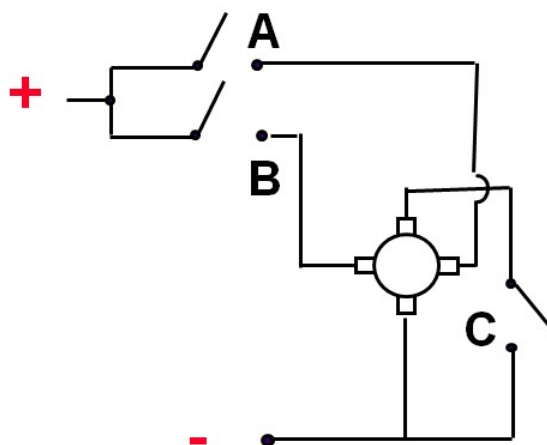


图 5.9 转子绕组串并联调速电路示意

电机转子绕组串并联调速方式是一种比较传统的调速方式，原理就是改变运行过程中电机转子绕组接入电路的不同组合。

如图 5.9，这是一种标准的绕组调速模式的电路的电路图。这种电路可以为冷却风扇提供高中低三种转速，各开关的状态和对应的转速如表 5.1。

表 5.1 绕组调速转速档状态表

转速档	A	B	C
低速	ON	OFF	OFF
中速	ON	ON	OFF
高速	ON	ON	ON

在低速档，只有开关 A 导通，转子线圈中只有 1/4 接入电路；在中速档，开关 A, B 导通,有两组 1/4 线圈并联接入电路；在高速档，所有开关导通，4 组 1/4 线圈均并联接入电路。3 种调速档下，由于接入线路的线圈数量不同，受磁场产生的电流转矩不同，以此来产生不同的转速。

优势：

成本低：成本优势是这种调速方式最显著的特点，由于利用电机本身的结构进行调速，除了用作开关的 3 个继电器以外，没有其他额外的零件需求。

劣势：

电机寿命：由于这种调速方式在实际使用中，低速档接入的 1/4 线圈在各档运行中都会被接入电路。相应的这两只电刷使用的时间就远高于另外两只。这样的后果就是对应碳刷的损耗相对较大，直流有刷电机的寿命主要表现在电刷的损耗，所以碳刷的较快损耗就表现为较低的电机寿命。

调速局限：这种调速方式由于是改变电机内部的电路连接，因此可选择的转速档由电机本身的特性决定，并不能根据实际的需求调整各转速档的转速。

5.4.2 串联电阻分压调速方式

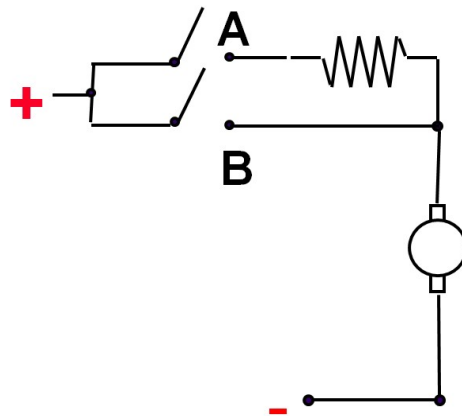


图 5.10 串联电阻调速方式电路示意

串联电阻调速方式是目前比较常见的一种调速方式，其原理是在线路中串联入电阻进行分压，使得电机两端实际分压较小，达到调速的目的；实际产品中可能有多转速档的情况，主要靠串联不同电阻阻值来区分转速。

运行状态如表 5.2:

表 5.2 电阻调速转速档状态表

转速档	A	B
高速	-	ON
低速	ON	OFF

优势:

高速档电效率高: 由于高速档运行状态下，线路中只有电机的存在，没有其他部件的损耗，电能得到了充分的利用。

转速可调整: 低速或其他转速档的实际转速可以按照实际需求调整，调整方法是改变串联入电路电阻的阻值，使得电机两端的分压改变。

劣势:

低速档电效率低: 由于低速运行状态下，串入线路的电阻通过发热来消耗能量，这部分能量以热量的形式白白浪费了。一般电阻调速的 2 速风扇，低速档下大致只有 50%左右的能量用于电机做功，剩余 50%则以热能方式消耗了。

低速电阻的可靠性较差: 低速电阻是高发热的原件，在实际运行中，容易发生两方面的问题：一是电阻本身由于高热而老化，导致电阻自身断开，最后结果就是冷却风扇无低速档，在所有情况下均高速运行，这种情况很容易引起客户抱怨；二是布置不当的电阻的发热造成周围塑料部件的融蚀，更严重的后果会引起明火，后果非常严重。

5.4.3 PWM 信号调速方式

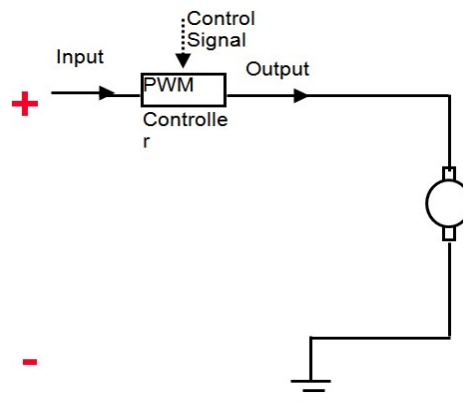


图 5.11 PWM 信号调速方式电路示意

PWM 脉冲宽度调制(PWM), 是 “Pulse Width Modulation” 的缩写, 简称脉宽调制, 是利用微处理器的数字输出来对模拟电路进行控制的一种非常有效的技术。实际车辆上的实现就是通过风扇上的 PWM 控制模块, 接收 EMS 发出的变脉宽波形信号 (见图 5.12), 按照输入波形的占空比 (波形持续开启时间占整个波形周期的比例) 来对应的输出电压给电机。

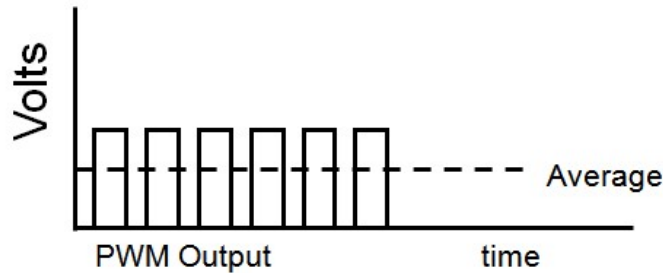


图 5.12 PWM 信号示意图

优势:

无极变速: PWM 调速方式理论上讲, 可以提供从最大转速的 10%到 100%之间的任意转速, 可以依据各转速档的实际流量需要而任意更改转速。

软启动: 可以以可控的转速提升速率启动, 从而避免直接由低速切换到高速产生大的冲击电流, 降低电机和整个线路的寿命。

效率高: 在最高速下电机直接接入电路, 无其他能量损耗; 在其他转速下, 由于 PWM 控制模块发热较小, 在调速过程中能量转化效率也非常高。

堵转保护以及自恢复功能: 目前市场上常见的 PWM 模块一般都具有堵转以及其他电气异常状态的保护, 由于是电子保护, 保护动作非常快, 可以避免所有可能发生的线路损害; 同时, 一般 PWM 模块的保护功能都会在一定时间以后尝试重新启动, 如果故障已排除, 无需更换风扇或者控制模块就可以继续工作。

劣势:

价格高: PWM 模块由于是电子部件, 目前国内开发能力比较有限, 价格相对于其他调速方式比较高。

需要占用 EMS 的信号专用接口: 由于需要 PWM 信号的输入, EMS 必须具有能够提供 PWM 信号的端口^[44]。

5.4.4 对比和选择调速方式

表 5.3 各种调速方式优劣汇总

	节能	噪声控制	转速档位	寿命	堵转保护	智能交互
转子绕组串并联	0	+	2	-	N/A	N/A
串联电阻	0	+	2-3	0	不可恢复	N/A
PWM 控制器	++	++	>10	+	临时故障排除后可自动恢复	+

在本项目中，按照电动车对能耗，噪声，可靠性以及智能交互的综合要求，最终选用了 PWM 控制方式。

对于控制噪声：在较低负荷下，有限档位的风扇仅能选用最高档位的 50% 左右作为最低档位，PWM 可以提供可能的接近 10% 的更低转速，以保证在低负荷下的低噪声。

5.5 冷却风扇的可靠性开发验证试验

冷却风扇的可靠性开发验证主要包含以下几个部分：

5.5.1 冷却风扇功能检查试验

功能检查性试验包含性能试验，噪声试验和尺寸测试等针对风扇本身特性的试验。这些试验的主要目的是确认试验前零件状态；这些试验通常会在试验序列结束后复测，来对比试验前后风扇性能的改变程度并考核变化量是否在可接受的范围内，一般为性能和尺寸改变量不应超过 10%。

5.5.2 冷却风扇机电性能试验

机电性能试验主要针对电机在整车的 12V 线路中，需要耐受的短时恶劣工况冲击及在整车电路暂态异常的情况下的状态考核。

5.5.3 冷却风扇耐环境试验

耐环境试验主要针对风扇在各种潮湿，烟雾，高低温，温度交变等工况下的状态。主要考核风扇在各种持续的恶劣气候下，保证系统功能的能力。

5.5.4 冷却风扇耐久性试验

耐久性试验，主要包含长时间运行耐久以及频繁启停耐久试验。主要考核针对车辆的整个生命周期，冷却风扇的使用寿命情况。

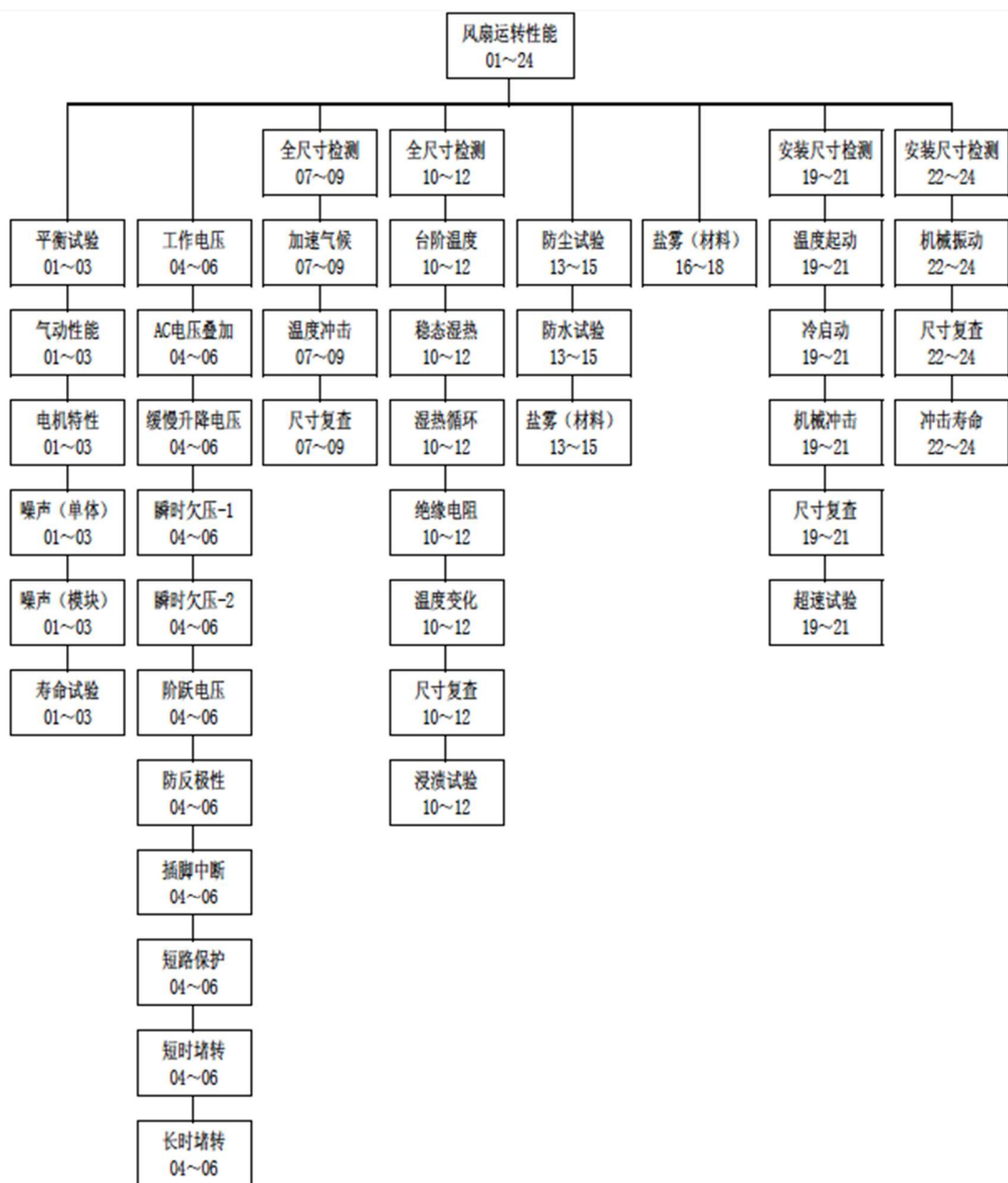


图 5.13 风扇验证试验序列

表 5.4 风扇试验结果汇总

试验项目		01~03	04~06	07~09	10~12	13~15	16~18	19~21	22~24
1	风扇运转测试	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
2	总成尺寸检查	/	/	OK	OK	/	/	OK	OK
3	平衡试验	OK	/	/	/	/	/	/	/
4	气动性能	OK	/	/	/	/	/	/	/
5	电机特性曲线	OK	/	/	/	/	/	/	/
6	噪声(单体)	OK	/	/	/	/	/	/	/
7	噪声(模块)	OK	/	/	/	/	/	/	/
8	工作电压	/	OK	/	/	/	/	/	/
9	AC电压叠加	/	OK	/	/	/	/	/	/
10	缓慢升降电压	/	OK	/	/	/	/	/	/
11	瞬时欠压1	/	OK	/	/	/	/	/	/
12	瞬时欠压2	/	OK	/	/	/	/	/	/
13	阶跃电压	/	OK	/	/	/	/	/	/
14	防反极性	/	OK	/	/	/	/	/	/
15	插脚中断	/	OK	/	/	/	/	/	/
16	短路保护	/	OK	/	/	/	/	/	/
17	短时堵转	/	OK	/	/	/	/	/	/
18	长时堵转	/	OK	/	/	/	/	/	/
19	塑料加速气候	/	/	OK	/	/	/	/	/
20	温度冲击	/	/	OK	/	/	/	/	/
21	盐雾(材料)	/	/	/	/	/	OK	/	/
22	台阶温度	/	/	/	OK	/	/	/	/
23	稳态湿热	/	/	/	OK	/	/	/	/
24	湿热循环	/	/	/	OK	/	/	/	/
25	绝缘电阻	/	/	/	OK	/	/	/	/
26	灰沙试验	/	/	/	/	OK	/	/	/
27	喷水试验	/	/	/	/	OK	/	/	/
28	盐雾(功能)	/	/	/	/	OK	/	/	/
29	温度变化	/	/	/	OK	/	/	/	/
30	浸渍试验	/	/	/	OK	/	/	/	/
31	寿命试验	OK	/	/	/	/	/	/	/
32	机械振动	/	/	/	/	/	/	/	OK
33	冲击寿命	/	/	/	/	/	/	/	OK
34	温度起动	/	/	/	/	/	/	OK	/
35	冷启动	/	/	/	/	/	/	OK	/
36	机械冲击	/	/	/	/	/	/	OK	/
37	超速试验	/	/	/	/	/	/	OK	/

5.6 本章小结

基于虚拟分析确定冷却风扇的性能要求后，通过电机和风叶的匹配，使得冷却风扇的最大转速风量，最大功率和噪声性能满足系统需求。通过对比风扇调速方式的优劣，对照电动车对冷却风扇的需求，选用了 PWM 调速的方式。为考核风扇对于各种恶劣条件的耐受力，通过模拟恶劣环境或状况的验证试验，确认冷却风扇的开发状态符合车辆的使用要求。

冷却风扇风叶与电机性能耦合的匹配方式，使得风扇性能准确的达到了预估的性能目标；通过选用 PWM 的控制方式，使得冷却风扇在整车上的控制有了更多的转速选择，减小噪声的效果，在整车控制策略优化部分会详细评价。

第6章 整车热管理性能验证试验

6.1 整车热管理性能验证试验的目的

整车开发验证试验的目的,是将在前期通过仿真分析得出的满足整车性能需求的系统方案,通过零部件和子系统的开发装备实际车辆。在实际车辆中按照开发需求的车辆行驶和使用工况做性能考核和确认。针对冷却风扇,主要考核风扇的最大性能在各系统最大负荷情况下是否能够满足需求^[45]。

6.2 整车热管理性能验证试验的过程

本文涉及的整车开发性能试验,主要包括空调最大制冷性能试验,冷却性能试验两部分。空调最大制冷性能试验主要是针对乘客舱空调在最炎热天气并暴露在一定日照辐射下,车辆暴晒后最快的冷却速度,考核的指标主要是空调开启后一定时间的出风口温度和乘客舱的平均温度。冷却性能试验主要的考核目标是在最大行驶负荷下,各被冷却部件的温度情况。空调最大性能试验和冷却试验均在热环境风洞和热带道路进行。本项目的热环境风洞选择同济大学热环境风洞实验室,而整车试验选择海南的琼海整车试验场和郊县道路进行。

6.2.1 整车试验的前期准备

试验前期准备主要包括车辆准备,测试数据采集设备准备两部分

1) 车辆准备

车辆准备的主要工作目标是保证车辆上安装的所有部件,均满足设计状态的性能需求,且性能完成零件台架试验检查。车辆必须能保证在考核所涉及的工况下能正常行驶。

2) 测试数据采集设备准备

空调最大制冷和冷却性能试验,主要用到的设备有测试电脑,数据采集仪,热电偶和压力传感器。所有的传感器需要在试验前按照标准布置到相应的管路,出风口,乘客舱呼吸点等位置。所有的传感器都需要按照测试点编号并连接到数据采集仪对应的借口,并用电脑为对应接口的显示值命名。在所有设备安装完毕后,需要进行调试,确认在车辆行驶状态检查对应测试点显示正常。

6.2.2 整车试验测试环境准备

整车试验分热能风洞实验室试验和整车道路试验两种。

热能风洞试验一般需要提前准备试验环境状态，将车辆驶上转毂后，将车辆用钢缆固定牢固，然后对环境加温并调节湿度，直到达到试验开始时的温度湿度要求。

整车道路试验的准备，主要是在特定的气温和光照情况下对车辆进行热浸泡，到达考核要求的初始条件后开始试验。试验选择在夏季午间进行，试验时车辆设置与热能风洞试验完全相同。对环境的要求是，外温 $>35^{\circ}\text{C}$ ，晴天或者多云。

6.2.3 整车热管理性能行驶工况和目标

热能风洞试验和整车道路试验的考核目标完全一致。

1) 空调最大制冷试验工况和考核目标

表 6.1 空调最大制冷试验工况和考核目标

测试条件	车速	持续时间	温度目标 MAX
外温： 38°C 湿度：40% 光照功率： $1000\text{W}/\text{m}^2$ 空调设置：内循环，吹面， 最大风量，温度设置最低 冷却风扇最大风速运行 起始电池电量：95% 热浸泡温度： 67°C	50km/h	10 min	出风口 Vent 16°C
	50km/h	20 min	舱内平均 Room 27°C
	80km/h	40 min	舱内平均 Room 25°C
	Idle	60 min	舱内平均 Room 31°C

2) 冷却性能试验工况和考核目标

表 6.2 冷却性能试验工况和考核目标

测试条件	测试项目	坡度	持续时间	散热器出口水温要求	电池温度要求
外温：38℃ 湿度：40% 光照功率：1000W/m ² 空调设置：外循环，吹面， 最大风量，温度设置最低 冷却风扇最大风速运行 起始电池电量：95%	50km/h	7.2%	达到热平衡	<65℃	<45℃
	120km/h	0%	达到热平衡	<65℃	<45℃

6.3 整车热管理性能验证试验结果

6.3.1 热环境风洞整车热管理试验结果

1) 空调最大制冷试验

电池冷却器工作与关闭状态，考核点对应试验结果如下。

表 6.3 空调最大制冷试验结果

车速 km/h	持续时间 min	温度目标 MAX °C	电池冷却器工作 实测值 °C	电池冷却器关闭 实测值 °C
50	10	出风口 16	3.2	-1.3
50	20	舱内平均 27	23.9	23.9
80	40	舱内平均 25	21.2	19.3
Idle	60	舱内平均 31	23	19.5

电池冷却器工作状态和关闭状态，所有考核点均达到考核目标。在 50km/h 考核点，电池冷却器是否开启几乎没有差异，在 80km/h 考核点乘客舱平均温度较，电池冷却器关闭状态温度要低 2℃，Idle 考核点电池冷却器关闭状态低 3.5℃。

2) 冷却性能试验结果

50 km/h 坡度 7.2%工况，热平衡状态，散热器出口水温 52.4℃，电池电芯最高温度 38℃，达到考核目标；

120 km/h 无坡度工况，热平衡状态，散热器出口水温 54.4℃，电池电芯最高温度 38℃，达到考核目标。

表 6.4 冷却性能试验结果

测试项目	坡度	散热器出口水温要求	散热器出口水温实测	电池温度要求	电池最高温度实测
50km/h	7.20%	<65℃	52.4℃	<45℃	38℃
120km/h	0%	<65℃	54.4℃	<45℃	38℃

6.3.2 海南夏季道路整车空调及冷却试验结果

1) 空调最大制冷试验，考虑到道路行驶过程中电池的运行安全，并未设置特殊的关闭电池冷却器的工况。试验结果符合考核要求；

表 6.5 海南夏季道路空调制冷试验数据

车速 km/h	持续时间 min	温度目标 MAX °C	实测值 °C
50	10	出风口 16	8.6
50	20	舱内平均 27	24.6
80	40	舱内平均 25	19.4
Idle	60	舱内平均 31	21.0

2) 冷却性能试验，由于海南道路并无持续坡度工况，且在热能风洞的冷却试验中发现 120 km/h 工况较 50 km/h 72%坡度工况更恶劣；海南道路试验中冷却性能仅进行 120 km/h 工况试验。

表 6.6 海南夏季冷却试验 120 km/h 测试数据

车速	坡度	散热器出口水温要求	散热器出口水温实测	电池温度要求	电池最高温度实测
120 km/h	0%	<65℃	48℃	<65℃	34℃

6.4 风扇相关的整车性能验证试验

6.4.1 整车风扇噪声试验

整车风扇噪声试验，是在单独运行风扇的情况下，测试风扇开启对车外及车内噪声的影像。车外噪声测试点为车头方向，距离车头 1 m，距离地面 0.5 m；车内噪声测试点为驾驶员右耳。车外噪声水平，和风扇台架噪声测试数据非常接近；车内噪声水平受到车身隔音水平的综合影响较大。从测试结果可以看出，最高风扇转速下，整车噪声水平较台架噪声水平低 4 dB(A)。

表 6.7 整车风扇噪声测试结果与台架比较

控制输入	车内 dB(A)	车外 dB(A)	台架噪声 dB(A)
10%	26.9	41.9	n/a
20%	27	46.8	n/a
30%	37.1	55.6	57.7
40%	35.1	56.4	n/a
50%	40.1	59.8	n/a
60%	41.1	61.3	65.8
70%	41.5	64.2	n/a
80%	43.3	66	n/a
90%	43.9	67.9	72.1

6.5 本章小结

通过整车环境风洞试验和夏季道路试验,验证了目前设计状态的系统满足整车空调制冷及各系统冷却性能需求。通过比较整车试验和台架试验的数据,积累了仿真的经验。风扇在整车安装状态的最大噪声水平也达到了预期。

第7章 冷却风扇控制策略的优化

7.1 冷却风扇控制策略优化的目标

本电动车项目选择了 PWM 模块控制的无极调速冷却风扇冷却风扇，并且在整车试验中已经验证了冷却风扇的最大风量能够满足各系统在最严苛工况下的散热需求。进一步的风扇控制策略的优化工作，主要研究在如何让冷却风扇更好的匹配系统的需求，达到以下两个目标^[46]。

1) 让冷却风扇尽量在较低转速工作，原因是高转速和低转速间，有较大的噪声差异，在高速状态下，冷却风扇将消耗更多的电能。

2) 风扇尽量少的切换转速，避免风扇的频繁切换。原因：风扇虽然是无极调速，但在 VCU 实际控制过程中，考虑到软件的容量和计算速度，通过输入 PWM 信号调制，只使用风扇的 8 个转速位。频繁切换风扇转速，会使电动车的乘客感觉到风扇噪声的波动，引起抱怨；也会因为频繁切换，由于电流冲击消耗线路上控制组件的寿命。

表 7.1 风扇不同转速下的功率及噪声

占空比输入%	转速 r/min	车外噪声 dB(A)	车内噪声 dB(A)	输入功率 W
30	1180	55.6	37.1	35
60	1820	61.3	41.1	90
90	2400	72.2	43.9	185

可以看出风扇在不同转速输出时功率及噪声差异明显，车内噪声最高速和中间转速差别 3 dB(A)左右，感受非常明显。

优化控制策略前，为了保证各系统不过热，风扇在任意运行工况，均以最高转速运行。

7.2 冷却风扇控制逻辑结构

冷却风扇的转速控制，主要需要考虑以下几个因素^[47]：

- 1) 压缩机状态，压缩机工作为 AC/ON，不工作为 AC/OFF；
- 2) 空调系统压力 P ，Pa；
- 3) 电机控制器入口冷却液温度 T_c ， $^{\circ}\text{C}$ ；
- 4) 车辆行驶速度 V ，km/h；
- 5) 环境温度 T_a ， $^{\circ}\text{C}$ 。

考虑到，在空调状态为 AC/ON 时，空调压力为主要影响因素；而 AC/OFF 时，电机控制器入口水温为主要影响因素。因此，将 AC/ON 和 AC/OFF 作为两种独立状态来考虑。

冷却风扇选用了可无极调速的 PWM 控制风扇，但由于整车控制器软件结构限制，不能选用连续调速的结构，只能选用有限档位控制，最大转速档位数为 8。

因此，预设冷却风扇转速档位的占空比如下表，下文档位均以 1-8 的数字简化表示，其中 90% 占空比对应的是风扇最高转速：

表 7.2 风扇转速与档位对应关系表

PWM 输入占空比 %	0	20	30	40	50	60	70	80	90
风扇转速档	0	1	2	3	4	5	6	7	8

7.2.1 空调 AC/OFF 状态的控制逻辑结构

当按照空调系统和电池冷却的需求，VCU 输出 AC/OFF 状态时，风扇的转速仅需要考虑车速，环境温度和电机控制器入口水温。风扇转速取值表如下表。

表 7.3 AC/OFF 状态风扇转速真值表（空）

冷却液温度（℃）	环境温度（℃）					行驶车速 (km/h)
	Ta<-5	-5≤Ta<9	9 ≤Ta<19	19≤Ta<29	29≤Ta	
<50 50≤Tc<60 60≤Tc<68 68≤Tc	风扇转速需求输出值（通过实验确定）					≤35
<50 50≤Tc<60 60≤Tc<68 68≤Tc	风扇转速需求输出值（通过实验确定）					35<V≤70
<50 50≤Tc<60 60≤Tc<68 68≤Tc	风扇转速需求输出值（通过实验确定）					70<V

7.2.2 空调 AC/ON 状态的控制策略结构

1) 空调压力较低时，表示制冷剂系统负荷较低，在这种情况下，风扇应以较低转速运行；

2) 空调压力中等时，在 1.2 MPa 和 1.8 MPa 之间时，表示空调系统工作状态良好，风扇转速调整需以保持空调系统运行在该压力区间内为目标；

3) 空调压力较高时，空调系统在高负荷下运行，风扇需要以最大转速运行以降低系统压力；

4) 与此同时，环境温度，车速和电机控制器入口水温也需要一同考虑。

表 7.4 AC/ON 状态风扇转速真值表（空）

空调压力 (MPa)											
冷却液温度 (°C)	空调压力 (MPa)										行驶车速 (km/h)
	P//1.2	1.2<P//1.8	1.8<P//2.3	2.3<P	P//1.2	1.2<P//1.8	1.8<P//2.3	2.3<P	P//1.2	1.2<P//1.8	
<50	风扇转速需求输出值（通过下文实验确定）										70 V V
50≤Tc											
<60											
60≤Tc											
<68	风扇转速需求输出值（通过下文实验确定）										35 V V // 70
68≤Tc											
<50											
50≤Tc											
<60	风扇转速需求输出值（通过下文实验确定）										V//35
60≤Tc											
<68											
68≤Tc											
环境温度 (°C)	Ta<-5		-5≤Ta<9			9 ≤Ta<19			19≤Ta<29		29≤Ta

7.3 冷却风扇控制策略优化方法

冷却风扇的控制策略优化，主要通过两种类型的道路试验进行风扇控制值的标定：空调最大制冷试验和空调舒适性道路试验。考核目标均为，系统在达到整车性能要求的前提下，在对应工况均能达到系统关键参数稳定无波动，风扇不出现频繁切换的情况。考核工况为城市工况，夏季在海南进行。

风扇标定第一关注参数为空调压力，其次是电机控制器水温。辅助关注参数有，电池水温，电池水泵，电池芯体温度。

1) 按照环境温度的不同分为三大组试验：38 度，27 度，17 度（阳光照度 1000 W/m^2 ）；

2) 车速分为怠速、30 km/h、50 km/h、75 km/h 和 100 km/h；

3) 空调分为关闭、启两种状态；

4) 寻找使水温和空调高压稳定的冷却风扇两端电压，记录平衡水温和空调高压。具体操作如下：

在上述车速下，开启空调（最大风量，温度设置为 low，内循环），冷却风扇的风速以预估值为基础。

如果压力介于 1.7 至 1.9 MPa 之间或者电机控制器水温在 60~68 摄氏度之间，则逐级增加风扇转速（10%至 90%），如果能使空调压力不高于 1.75MPa 且电机控制器水温低于 60 摄氏度，则在下列表中记录。如果不能使空调压力不高于 1.75MPa 且电机控制器水温低于 60 摄氏度，则逐级减少风扇转速（10%至 90%），使空调压力高于 1.85 MPa，但低于 1.9 MPa；

如果空调压力超过 1.9 MPa 或者电机控制器水温高于 68 摄氏度，则逐级增加风扇转速（10%至 90%），确定使空调压力不高于 1.9 MPa 且电机控制器水温稳定在低于 65 摄氏度（至少三分钟）。则在下列表中记录；

如果空调压力低于 1.7 MPa 或者电机控制器水温稳定在低于 60 摄氏度，则逐级减少风扇转速（10%至 90%），确定使空调压力不高于 1.7 MPa 且电机控制器水温稳定在不高于 60 摄氏度（至少三分钟）。则在下列表中记录；

注意：在电池冷却器开启和关闭时，空调压力有比较大的变化，在压力临界点处易发生风扇风速跳动。

表 7.5 风扇标定状态记录表(空表)

环境温度 °C 开启风扇状态 %	怠速	30km/h	45km/h	70km/h	90km/h	•
						AC On (电池冷却器 off)
						AC ON (电池冷却器 on)
						AC OFF (电池冷却器 on)
						AC OFF (电池冷却器 off)

记录内容：冷却风扇转速、空调压力、内外循环、电池是否需求降温和电机控制器水温等。

7.4 冷却风扇控制策略优化结果和效果

7.4.1 AC/OFF 工况下，风扇控制策略优化结果

表 7.6 AC/OFF 状态风扇转速真值表

Tc 冷却液温度 °C	Ta 温度 °C					V 车速 km/h
	Ta<-5	-5≤Ta<9	9≤Ta<19	19≤Ta<29	29≤Ta	
Tc<50	0	0	0	0	0	V<35
50≤Tc<60	1	1	1	1	1	
60≤Tc<68	2	3	4	4	5	
Tc≥68	7	8	8	8	8	
Tc<50	0	0	0	0	0	35<V≤70
50≤Tc<60	0	0	0	1	1	
60≤Tc<68	2	2	3	4	5	
Tc≥68	6	7	8	8	8	
Tc<50	0	0	0	0	0	V>70
50≤Tc<60	0	0	0	0	0	
60≤Tc<68	2	2	3	4	4	
Tc≥68	5	6	7	7	8	

AC/OFF 状态下：车速越高，冷却液温度越低或环境温度越低时风扇转速越低。各状态控制策略平滑，无异常点。

7.4.2 AC/ON 工况下，风扇控制策略优化结果

表 7.7 AC/ON 状态风扇转速真值表

Tc 冷却液温度 (°C)	空调压力 (MPa)																行驶车速 (km/h)				
	P<1.2	1.2<P<1.8	1.8<P<2.3	2.3<P	P<1.2	1.2<P<1.8	1.8<P<2.3	2.3<P	P<1.2	1.2<P<1.8	1.8<P<2.3	2.3<P	P<1.2	1.2<P<1.8	1.8<P<2.3	2.3<P					
Tc<50	0	1	3	6	1	2	3	7	1	2	3	7	2	3	5	8	3	4	6	8	70<V
50≤Tc<60	1	2	4	7	2	3	4	7	2	3	5	8	3	5	7	8	4	5	7	8	
60≤Tc<68	3	4	5	7	3	4	5	8	3	4	5	8	4	5	7	8	5	5	7	8	
68≤Tc	5	5	6	8	5	6	6	8	5	6	6	8	7	7	8	8	8	8	8	8	
Tc<50	1	2	3	7	1	2	3	7	2	3	4	8	3	5	7	8	3	6	8	8	35<V<70
50≤Tc<60	2	3	4	7	2	3	4	8	3	4	5	8	3	5	7	8	5	6	8	8	
60≤Tc<68	3	4	5	8	3	4	5	8	4	6	6	8	4	6	8	8	6	7	8	8	
68≤Tc	5	6	7	8	5	6	7	8	5	7	8	8	6	7	8	8	8	8	8	8	
<50	1	2	4	7	2	3	4	8	2	3	4	8	3	5	7	8	4	7	8	8	V<35
50≤Tc<60	2	3	5	7	3	4	5	8	3	4	5	8	3	5	7	8	5	7	8	8	
60≤Tc<68	3	5	6	8	4	5	6	8	4	5	6	8	5	7	8	8	6	8	8	8	
68≤Tc	5	6	8	8	5	6	8	8	5	7	8	8	7	7	8	8	8	8	8	8	
Ta 环境温度 (°C)	Ta<-5			-5≤Ta<9				9 ≤Ta<19				19≤Ta<29				29≤Ta					

从 AC/ON 状态下的控制策略趋势可看出，随着车速的降低，环境温度的升高，空调压力以及冷却液温度的升高；风扇在更高档位运转。各状态控制策略平滑，无异常点。

7.4.3 风扇控制策略优化前后的结果和效果

由于风扇控制策略优化过程的工况设定工况较为繁复，因此只对比在部分典型行驶工况下，优化前后风扇的开启状态。风扇控制策略优化前，由于需要保护系统在各工况下的系统散热，因此在所有工况下，风扇均按照最高转速运行。控制策略优化完成后，在下面工况中，风扇的转速如下。

表 7.8 控制策略优化后不同工况下风扇开启状态

	行驶工况 km/h	空调制冷状态	环境温度 °C	电机控制器水温 °C	电池冷却需求	优化后风扇转速占空比 %
工况 1	40	on	26	55	on	60
工况 2	怠速	off	5	40	on	30
工况 3	40	on	34	45	on	90

由此可看出，风扇在控制策略优化后在大部分工况转速均得到了下降。由此带来的收益，通过对比车内外噪声水平和风扇的能耗来评价。

表 7.9 控制策略优化前后风扇输入功率对比

	风扇输入功率 W	
	优化前	优化后
工况 1	185	90
工况 2	185	35
工况 3	185	185

表 7.10 控制策略优化前后风扇的车内、外噪声对比

	车外噪声 dB(A)		车内噪声 dB(A)	
	优化前	优化后	优化前	优化后
工况 1	67.9	61.3	43.9	41.1
工况 2	67.9	55.6	43.9	37.1
工况 3	67.9	67.9	43.9	43.9

可以看出，在差异最大的工况 2 下，风扇引起的车内噪声减小了 6.8 dB(A)，车外噪声减少了 12.3 dB(A)，能耗降低了 160W，86.5%，差异非常明显。需要说明的是，风扇控制策略标定对风扇转速的降低并不影响在最高负荷下的风扇状态；无论使用如何的控制策略和标定，在系统最高负荷下，风扇均为最高转速运行。

7.5 本章小结

通过整车试验，综合考虑空调开启状态，空调系统压力，电机控制器入口水温，电池入口水温，环境温度以及车辆行驶速度；对冷却风扇在不同工况下的转速进行控制策略优化。通过控制策略优化，降低了除了最高转速外的风扇转速，从而降低了风扇的耗能以及风扇产生的车内、外噪声。在差别最大的工况下，降低风扇功耗 86.5%，降低车外风扇噪声 12.3 dB(A)，降低车内风扇噪声 6.8 dB(A)。

第8章 结论与展望

8.1 结论

本文的研究工作基于纯电动车的实际使用状态,确认了电动车对冷却风扇的更高需求:

- 1) 在各工况下控制功率消耗;
- 2) 在各工况下控制风扇噪声。

通过实际的电动车电子冷却风扇的开发与标定过程,分步骤地完成目标:

1) 根据各系统的冷却需求,选用合适的冷却系统介质和介质驱动部件及换热器;以并联的方式组合了电池冷却系统和乘客舱制冷系统的制冷剂回路,以串联的方式组合了电机驱动器和电机的冷却液回路。为整车节省了部件成本,减轻了重量。在系统需求分析阶段,通过仿真分析的手段,较精确的确认风扇的风量需求,避免由于过量的风量性能造成的功率浪费和最大转速下的过大噪声;

2) 通过三维发动机舱流场仿真和一维热平衡仿真,完成了系统方案选择以及各主要部件性能匹配的验算。避免了不能达到要求的系统方案在实车完成制造后才被确认能力不足带来的重新设计风险,通过仿真节省了可能因为仿真引起的开发费损失和时间损失,加开了整车项目的开发速度;

3) 在风扇开发过程中,通过转速控制方式的选择,放弃了较耗能的电阻调速方式,选用了 PWM 调速的控制方式,为整车通过控制策略优化降低风扇的实际运转功率同时降低噪声提供了可能性;

4) 通过整车环境风洞试验和夏季道路试验,验证了目前设计状态的系统满足整车空调制冷及各系统冷却性能需求。通过比较整车试验和台架试验的数据,积累了仿真的经验。风扇在整车安装状态性能和的最大噪声水平也达到了预期。较保守的仿真结果成功避免了系统性能不足的风险。

5) 在整车试验的风扇控制策略优化过程中,通过对系统工况的各状态的详细标定,控制了风扇在各工况下的转速,使得风扇在尽量低的转速状态下工作,同时达到控制能耗和降低噪声的目标。在差别最大的工况下,降低风扇功耗 86.5%,降低车外风扇噪声 12.3 dB(A),降低车内风扇噪声 6.8 dB(A)

8.2 进一步工作的方向

本文的研究虽然取得了初步的成功，但依然任重道远，尚有许多有待进一步深入进行的研究工作，简述如下：

1) 在热管理系统开发中，除了在本文中涉及的冷却和制冷系统的内容外；还需要进一步考虑在寒冷环境中乘客舱制热系统以及电池的加热系统的设计与性能匹配；

2) 本项目中选择的冷却板式电池冷却方案，造成电池组内温差较大，不利于热量交换，在今后的项目中，可以考虑浸润式的空气或者冷却液冷却方式，达到更好的电池组内温度分布效果；

3) 风扇本体引起的噪声，除了控制风扇的噪声水平，通过改善风叶和风罩支持结果的设计进行噪声品质的控制，这部分工作已经利用供应商的分析资源基于其他项目开展；

4) 通过整车声学包研究增强对风扇噪声的吸收，并考虑采用带有主动吸收噪声的音响系统进一步提升系统的声音感受，在其他较高档的车型项目中，已有部分研究成果；

5) 对冷却风扇风量无需求较小的高速工况下，可考虑将风扇电路转变为发电回路，或者通过可变前舱进气格栅来减小整车行驶风阻等方式来进一步为系统节省能量；

6) 在今后的项目中，需要改进整车控制器的软件结构，以参数式的风扇控制策略实现无极调速；

7) 冷却风扇噪声，在电动车辆驻车使用空调制冷时非常显著，可以考虑通过远程控制提前开启乘客舱空调，在乘客上车后由于系统负荷已经得到降低，风扇在较低转速下运转，减少影响。

致谢

本课题的研究工作是在导师魏学哲教授悉心指下完成。魏老师学识渊博，治学严谨，诲人不倦。在论文的完成每一步过程中，导师都倾注了大量的时间和心血。对本人生活和工作，导师也给予了大力支持，使得论文可以顺利完成。在此，我谨向导师表示由衷的敬意和感谢！

本论文的研究工作还得到了上汽技术中心动力总成集部空调冷却科的大力支持，特别是刘启华博士、潘乐燕经理、刘涛博士、杜江博士提供的指导和帮助，以及各位参与电动车项目的同事们提供的各方面的支持，使得研究得以顺利进行。在此表示最真挚的感谢！

在论文的写作期间，本学院各位老师及研究所同门都给予了诸多的支持和帮助，在此也一并对他们表示最诚挚谢意！

此外，还要向为审阅本论文付出辛勤劳动的各位专家教授表示衷心感谢！
感谢同济大学对我的培养！

最后，还要感谢我的亲人们、朋友和同事们在完成论文过程中对我的理解、包容和支持。他们是我继续学习和奋斗的动力源泉！

2015年9月

参考文献

- [1] 毛开凯. 基于 3G 传输的纯电动汽车远程动态跟踪数据采集模块开发: [硕士学位论文]. 上海: 上海大学, 2013.
- [2] KENNEDY B, PATTERSON D, CAMILLERI S. Use of lithium-ion batteries in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 2000, 90(2): 156~162.
- [3] ENDERGAST D R, DEMAURO E P, FLETCHER M, et al. A recharge-able lithium-ion battery module for underwater use. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(2): 793~800.
- [4] 宁秋宇. 电动车空调系统的匹配设计: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [5] 朱晓彤. RAV-4 电动汽车电池组风冷系统的研究: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- [6] 张舟云, 徐国卿, 沈祥林. 用于电动汽车的电机和驱动器一体化冷却系统. *同济大学学报*, 2005, 33(10): 1367~1371.
- [7] 史保新, 马国远, 陈观生. 电动车用空调装置的研究. *流体机械*, 2002, 30(4): 48~50.
- [8] 司宗根. 电动汽车空调的发展现状及解决方案. *科技信息*, 2011(4), 135~136.
- [9] 于莹潇, 袁兆成, 田佳林, 等. 现代汽车热管理系统研究进展. *汽车技术*, 2009(8): 1~7.
- [10] 耿丽珍, 袁兆成, 李传兵, 等. 轿车发动机冷却风扇 CFD 仿真分析及降噪研究. *汽车工程*, 2009, 31(7): 664~668.
- [11] 郭新民, 高平, 孙世民, 等. 自控电动冷却风扇在汽车发动机上的应用. *内燃机工程*, 1993, 14(1): 79~82.
- [12] 郭新民, 王新源. 汽车发动机智能冷却系统的研究. *内燃机工程*, 2001, 22(1): 15~16.
- [13] 唐永伟. 汽车发动机冷却风扇气动性能和声学性能研究: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [14] 陈尹梅. 轿车空调制冷系统仿真平台应用研究: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2008.
- [15] 孙一宁. 车辆 HVAC 热环境舒适性评价及其分析方法: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [16] 瞿晓华. 电动汽车热系统性能及控制优化研究: [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [17] 张舟云, 徐国卿, 沈祥林. 用于电动汽车的电机和驱动器一体化冷却系统. *同济大学学报: 自然科学版*, 2006, 33(10): 1367~1371.
- [18] 李斌花, 王地川, 钟勇. 纯电动车电机驱动控制系统现状与发展趋势. *客车技术与研究*, 2005, 1: 5~6.
- [19] 车杜兰. 电动汽车锂离子电池包热特性研究与优化设计: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- [20] 齐晓霞, 王文, 邵力清. 混合动力电动车用电源热管理的技术现状. *电源技术*, 2005, 29(3): 178~181.
- [21] 谢先宇, 王潘, 安浩, 等. 汽车用动力锂离子电池发展现状. *上海汽车*, 2010, 1: 21~25.
- [22] 付正阳, 林成涛, 陈全世. 电动汽车电池组热管理系统的关键技术. *公路交通科技*, 2005, 22(3): 119~123.

- [23] 曾丹苓, 敖越, 张新铭, 等编. 工程热力学: 第三版. 北京: 高等教育出版社, 2002. 325~327.
- [24] 王晓丹. 纯电动客车空调系统参数匹配与设计研究: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [25] 张俊霞. 汽车空调制冷系统常见故障及诊断方法. 石家庄职业技术学院学报, 2009, 21(6): 41~43.
- [26] 姚征, 陈康民. CFD 通用软件综述. 上海理工大学学报, 2002, 24(2): 137~144.
- [27] 潘乐燕. 汽车前端冷却模块流场模拟与试验研究. 制冷技术, 2011, 2: 21~24.
- [28] 赵又群, 张海滨. 含地面效应, 发动机舱内流的轿车流场仿真. 中国机械工程, 2008, 19(17): 2138~2141.
- [29] 王晓明. 汽车发动机舱内流的模拟研究: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [30] 任玉新, 陈海昕编. 计算流体力学. 北京: 清华大学出版社, 2006. 184~196.
- [31] 张德军, 王文勇. 汽车发动机舱热管理的 CFD 技术应用. 机电产品开发与创新, 2012, 25(6): 120~122.
- [32] 熊莉芳, 林源, 李世武. $k-\epsilon$ 湍流模型及其在 FLUENT 软件中的应用. 工业加热, 2007, 36(4): 13~15.
- [33] 黄轶. 前保格栅对冷却模块性能影响的仿真与试验分析. 汽车电器, 2013, 6: 29~30+ 33.
- [34] 张光鹏, 许诺, 张武平. FLOWMASTER 在暖通空调中的应用. 制冷与空调(四川), 2006, 3: 37~39.
- [35] 梁小波, 袁侠义, 谷正气, 等. 运用一维/三维联合仿真的汽车热管理分析. 汽车工程, 2010, 32(9), 55~60+ 79.
- [36] 全静. 用 FLOWMASTER2 对空调制冷系统进行过程仿真分析. 制冷与空调, 2009, 23(5), 53~56.
- [37] 归柯庭, 汪军, 王秋颖编. 工程流体力学. 北京: 科学出版社, 2003. 157~202.
- [38] 过增元. 对流换热的物理机制及其控制: 速度场与热流场的协同. 科学通报, 2000, 45(19): 2118~2122.
- [39] 任林. 船用大功率中高速柴油机冷却系统数值分析与试验研究: [硕士学位论文]. 北京: 中国舰船研究院. 2012.
- [40] 王奇峰. 增压中冷汽油机热管理系统试验与仿真分析: [学位论文]. 长春: 吉林大学. 2013.
- [41] 曾令贤, 李海雄, 胡琛杰. 发动机冷却系统风扇及其驱动装置. 新技术新工艺, 2012, 4: 21~24.
- [42] 殷红敏. 汽车冷却系统计算方法研究. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2009, 32(B11): 128~130.
- [43] 汤蕴璆, 史乃编. 电机学. 北京: 机械工业出版社, 1999. 62~95.
- [44] 马源, 马彪. 车辆冷却风扇调速技术的现状和发展. 车辆与动力技术, 2003 (2): 50~53.
- [45] 齐斌, 倪计民, 顾宁, 等. 发动机热管理系统试验和仿真研究. 车用发动机, 2008, 177(4): 40~43.
- [46] 杨文荣, 朱鹏. 汽车发动机冷却风扇智能控制系统的研究. 微计算机信息, 2009, 25(2): 245~247.

- [47] 南金瑞, 孙逢春, 王建群. 纯电动汽车电池管理系统的设计及应用. 清华大学学报: 自然科学版, 2007, 47(2): 1831~1834.

个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历:

袁励, 男, 1983 年 9 月生。

2006 年 7 月毕业于上海交通大学电气工程及其自动化专业, 获学士学位。

2010 年 3 月入同济大学动力车辆工程专业, 攻读工程硕士学位。

发明专利:

[1] 袁励. 电子水泵的性能测试装置及其测试方法, 已公开, CN 103629098 A;

[2] 张良, 薛剑波, 王泰华, 袁励等. 一种车辆冷却风扇转速控制方法及混合动力车辆, 已公开, CN 102862473 A.