

一种驱动电机冷却系统冷却液流量的仿真方法

任田良¹, 曹红军¹, 徐志远², 闫冬¹, 王伟¹

(1. 中车时代电动汽车股份有限公司, 湖南 株洲 412007; 2. 湘潭大学, 湖南 湘潭 411105)

摘要: 仿真分析某纯电动客车驱动电机冷却系统的流场, 参数化冷却系统各部件的流量压降特性, 模拟冷却系统冷却液流量, 实现对驱动电机冷却系统冷却效果预评估的目的。

关键词: 纯电动客车; 驱动电机; 冷却系统; CFD 仿真

中图分类号: U464.138

文献标志码: A

文章编号: 1006-3331(2023)02-0021-04

A Simulation Method of Coolant Flow for Driving Motor Cooling System

REN Tianliang¹, CAO Hongjun¹, XU Zhiyuan², YAN Dong¹, WANG Wei¹

(1. CRRC Electric Vehicle Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China; 2. Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

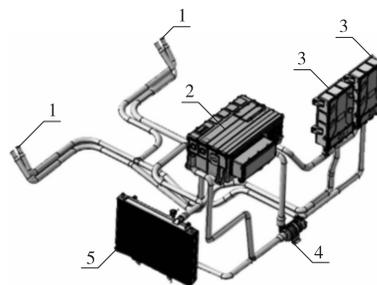
Abstract: The authors simulate and analyze the flow field of a pure electric bus cooling system, parameterize the pressure drop characteristics of each component in the cooling system, and simulate the coolant flow of the cooling system. Finally, they achieve the purpose of pre-evaluation of the cooling effect of driving motor cooling systems.

Key words: pure electric bus; driving motor; cooling system; CFD simulation

纯电动客车的驱动电机常采用永磁同步电机, 电机内部的永磁体一旦温度过高, 就会出现不可逆的消磁现象, 驱动电机会受到破坏性损伤。另外, 驱动电机是纯电动客车的唯一动力源, 不管是从经济性还是从安全性考虑, 电机冷却系统都尤为重要。

为了规避风险和节省新车开发周期, 在前期图纸设计阶段要进行驱动电机冷却系统的热力学仿真分析^[1-6], 常用的一维仿真软件有 AMESim, 用此类软件进行分析需结合试验验证, 不断修正等效参数才能准确地模拟冷却系统的运行和评估冷却效果。而三维仿真能够根据实车建立真实管路布置模型, 流量仿真精度更高, 所以本文直接采用三维流体仿真^[7-10], 在有限的热性能参数和流量压降参数下, 模拟电机冷却系统冷却液的流动情况, 判断冷却系统的合理性。

冷却系统的三维模型如图 1 所示, 主要由驱动电机(2 个)、四合一控制器(整车控制器、油泵控制器、气泵控制器以及 DC/DC)、电机控制器(2 个)、水泵和水箱散热器组成。在不补充冷却液的情况下, 膨胀水箱支路不影响电机冷却系统主管路冷却液流动, 故图 1 中未建立膨胀水箱模型。图 1 中水箱散热器和水泵串联在主管路上, 驱动电机以及电机控制器采用两路并联的连接方式。



1-驱动电机安装位置; 2-四合一控制器;
3-电机控制器; 4-水泵; 5-水箱散热器

图 1 驱动电机冷却系统

1 驱动电机冷却系统

1.1 驱动电机冷却系统结构

一款轮边驱动的 8.9 m 纯电动客车的驱动电机

收稿日期: 2022-09-07。

第一作者: 任田良(1984—), 男, 工程师; 主要从事客车电气设计工作。E-mail: tliang_r@163.com。

通讯作者: 曹红军(1984—), 男, 工程师; 主要从事 CFD 流体仿真工作。E-mail: caohong1984jun@126.com。

1.2 驱动电机冷却系统特点

1) 冷却系统每条并联支路的冷却液流量只有主管路的 50% 左右, 散热能力比主管路差。

2) 冷却支路上驱动电机的发热量远远高于其他电器件。

3) 图 1 显示驱动电机在所有电器件的下游, 其冷却液的平均温度是系统里最高的。

通过以上分析可知, 驱动电机是整个冷却系统中最有可能出现高温报警的地方, 只要满足了驱动电机的冷却需求, 整个冷却系统设计就是可行的。

2 仿真分析及验证

利用某三维流体仿真软件搭建仿真模型并进行三维流场仿真。

2.1 三维流体仿真模型

驱动电机、四合一控制器、电机控制器以及水箱散热器内部结构复杂, 若无法得到详细的内部冷却结构, 可根据各部件的试验流量压降曲线建立等效模型, 不仅能确保仿真精度, 还能简化仿真模型, 提高仿真效率。

电机控制器以及驱动电机等效模型为直径 20 mm、长度 10 mm 的圆管; 四合一控制器等效模型为直径 25 mm、长度 10 mm 的圆管; 水箱散热器等效模型为直径 35 mm、长度 10 mm 的圆管; 水泵直接通过设定水泵进出口边界条件等效, 不建立三维实体模型。最终用于三维流体仿真分析的几何模型如图 2 所示。

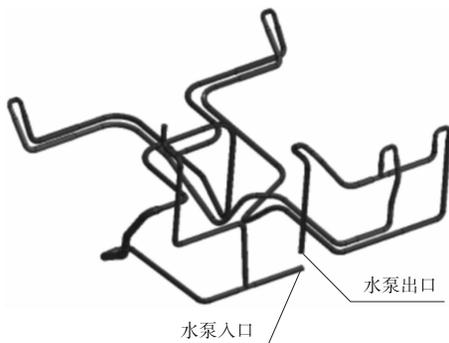


图 2 用于三维流体仿真分析的几何模型

模型为管路结构, 管路截面尺寸偏小, 因此网格尺寸设置为 2 mm, 流体边界层第一层厚度为 0.05 mm, 网格模型局部放大图如图 3 所示。

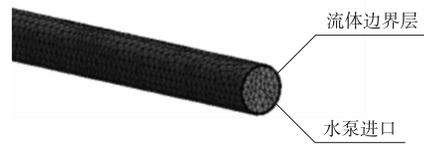


图 3 水泵进口网格特征(局部放大图)

2.2 仿真模型边界参数设置

仿真软件采用 ANSYS16.0 中的 CFX 模块, 仿真模型边界参数设置如下:

1) 水泵进口压力。此电机冷却系统可看作一个密封系统, 因此设置水泵进口压力为 0 kPa(此处为表压), 仿真模型的参考压力为 101 kPa(即 1 个标准大气压)。

2) 水泵进口冷却液温度。依据电机系统冷却原理图以及试验数据设定水泵进口冷却液温度为 65 °C。

3) 水泵出口压力。水泵出口压力采用流量压力函数等效设置, 此函数由流量扬程数据曲线转换得到。本车型的水泵扬程流量曲线如图 4 所示, 扬程为水泵水头高度数据, 需通过势能公式 $P = \rho \cdot g \cdot H$ ^[11] 转换成压力数据, 式中, P 为水泵出口压力; ρ 为冷却液密度; g 为重力加速度; H 为水泵扬程。

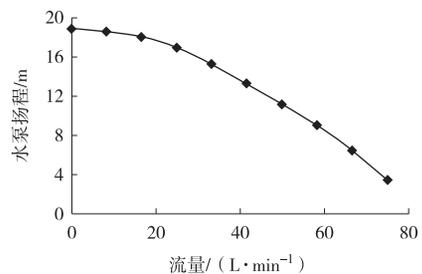


图 4 水泵流量扬程曲线

通过势能公式转换后, 本车型的流量压力曲线如图 5 所示。

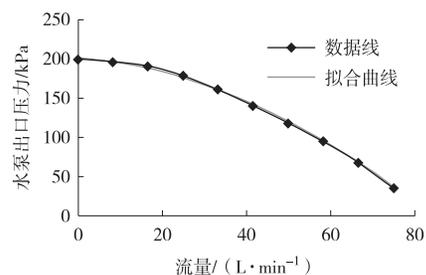


图 5 水泵流量压力曲线

在图 5 中通过二次样条曲线拟合流量压力曲线的方式提取流量压力函数:

$$y = -0.024 1x^2 - 0.414 2x + 201.58 \quad (1)$$

其中 x 为水泵出口流量, CFX 模块前处理中设置的 x 如式(2):

$$x = \text{abs}(\text{areaint}(u) @ \text{inlet}) \quad (2)$$

式中: $\text{abs}()$ 表示绝对值函数; $\text{areaint}()$ 表示面积分函数; u 为水泵出口截面法向平均速度; inlet 表示水泵出口位置。

y 表达式需要在仿真软件中利用 Expressions 功能设置, 设置水泵出口边界时, 先选择总压边界类型, 再输入 y 表达式即可。

4) 驱动电机、电机控制器、四合一控制器以及水箱散热器的流量压降。在仿真模型中此 4 个部件等效成圆柱模型, 设置流场损失模型来模拟 4 个系统的流量压降。损失模型设置采用 Subdomain 里面的各向异性损失模型(directional loss model), 其中冷却液沿管道流动的方向为压力损失主方向, 管道横截面半径方向为压力损失次方向。损失模型主要有渗透率 K 和损失系数 K_{loss} 2 个参数^[12]。

$$K = Q \cdot \mu \cdot L / (A \cdot \Delta P) \quad (3)$$

$$\text{其中: } Q = v \cdot A \quad (4)$$

$$K_{\text{loss}} = 2 \times \Delta P \cdot L / (\rho \cdot v^2) \quad (5)$$

式中: Q 为流量; μ 为动力粘度; L 为等效模型流通长度; A 为等效模型横截面积; ΔP 为压降; v 为冷却液流速; ρ 为冷却液密度。

式(3)和式(5)中的 ΔP 可表示成变量为流量的函数。通过试验获得不同冷却液流量下的压降, 整理形成流量压降数据表, 再利用 CFX 中的自定义函数(user function)功能定义流量压降函数, 如图 6 所示。

式(4)和式(5)中的 v 同样采用仿真软件自带公式实时提取, 式(3)和式(5)中的其他参数为常数。通过整理分析式(3)和式(5), 渗透率以及损失系数最终可转换成变量为流量的函数, 利用 Expressions 功能设置渗透率和损失系数的函数表达式, 并设置流场损失模型, 如图 7 所示。

完成所有仿真模型边界条件的设置后开始迭代仿真计算工作。



图 6 自定义函数设置



图 7 等效模型流阻设置

5) 管路壁面。壁面粗糙度都设置为 0.012 5 mm, 所有壁面为无滑移壁面。

2.3 仿真结果及验证

仿真模型部分边界采用函数表达式, 因此在仿真过程中需要实时查看管道内的冷却液流量仿真结果, 并不断调整所输入的各部件的流量压降数据, 直到系统压降与水泵扬程达到平衡状态, 此时冷却系统仿真

达到最终收敛状态(即用CFX模块迭代计算直到仿真结果收敛)。图8和图9为收敛仿真结果的压力云图和速度流线图。

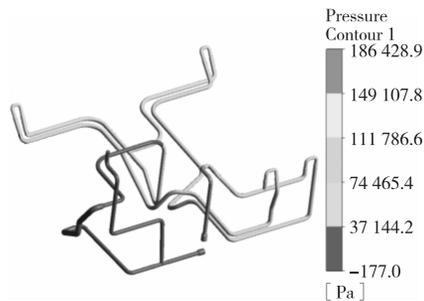


图8 冷却系统压力云图

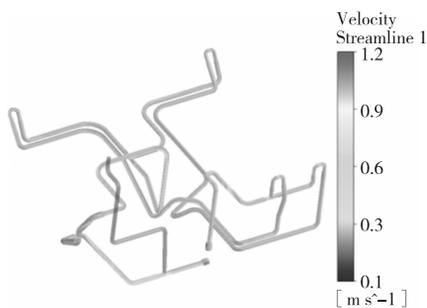


图9 冷却系统速度流线图

仿真过程中在冷却系统里实时查看的流量观测点如图10所示。收敛仿真结果中提取的观测点1、2、3、4、5的流量分别为20.9 L/min、10.4 L/min、10.5 L/min、10.4 L/min和10.5 L/min。其中观测点2和4在同一支路上，仿真结果显示其流量一样，符合质量守恒定律。

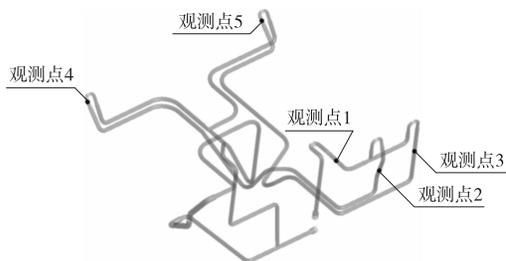


图10 流量观测点位置

实车进行流量数据测量验证时,因观测点1、4、5处于电器舱深处,无法安装测量设备,故只测量到观测点2、3的流量数据。实车验证测量的观测点2和3的流量分别为10.813 L/min和10.913 L/min。可见,仿真结果与实车验证测量数据误差在5%以内,仿

真结果可信。

驱动电机热性能参数如下:①系统允许最高水压为200 kPa;②允许冷却液最低流量为10 L/min。图8显示系统最高水压仅为186.4 kPa,满足要求;观测点4、5处的流量即为电机冷却液流量,刚好高于10 L/min,也满足要求。

车辆现场运行结果显示,电机冷却系统正常工作,整个驱动电机冷却系统未出现高温报警的情况,与仿真结果相符。

3 结束语

本文采用了驱动电机冷却系统三维流场仿真方法,仿真结果与实测数据基本一致,能够用于提前评估冷却系统的冷却效果。针对电器采用软水管连接的冷却系统,水冷管路随意弯曲,一维热力学分析软件无法精确模拟管路流量压降,本文方法能够更精确地模拟管路流量压降,达到准确预测冷却液流量的目的。

参考文献:

- [1] 张锦涛. 基于一维三维联合的汽车气动与热管理系统仿真研究[D]. 长春:吉林大学,2021.
- [2] 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(3):64-70.
- [3] 赖任海,张鹏飞,刘殿科. 某电动车动力系统热性能匹配[J]. 汽车实用技术,2021,46(6):18-19.
- [4] 耿亚林. 基于一维/三维联合仿真的商用车机舱散热研究[D]. 长春:吉林大学,2021.
- [5] 赵熙. 某轿车冷却系统仿真[J]. 时代汽车,2016(5):41-42.
- [6] 白爽. 发动机离心式冷却水泵内流场仿真分析[D]. 长春:吉林大学,2018.
- [7] 蒋文芝. 汽车冷却水泵设计与流场仿真分析[D]. 成都:四川大学,2018.
- [8] 林铁平,林卉,戴澍凯. 汽车前端冷却模块空气侧热流场仿真与试验研究[J]. 汽车工程学报,2014,4(5):384-390.
- [9] 李凯莹. 水冷式旋转电弧传感器温度场与流场仿真研究[D]. 南昌:南昌大学,2014.
- [10] 方达. 流体力学:第2版[M]. 南京:东南大学出版社,2018:258.