

冷却系统优化对某车型油耗影响的研究

魏泽鑫，王宏志，赵丹，张伟伟，邱鹏程
一汽解放汽车有限公司

【摘要】本文通过对一款重型商用车进行热管理高效节能方面的优化开发，包括提升散热器性能、提升通风系统性能、优化风扇策略、提升中冷器性能等措施，实现了该车型的油耗降低了 0.4L/100km 以上。

【关键词】冷却系统，热管理，油耗，风扇，散热器，中冷器

Study on the Influence of Cooling System Optimization on Fuel Consumption of a Certain Vehicle

Wei Zexin, Wang Hongzhi, Zhao Dan, Zhang Weiwei, Qiu Pengcheng
FAW Jiefang Automobile Co., Ltd.

Abstract: In this paper, the fuel consumption of a heavy-duty commercial vehicle was reduced by more than 0.4L/100km by optimizing the thermal management and energy saving aspects, including improving radiator performance, improving ventilation system performance, optimizing fan strategy, and improving intercooler performance.

Key words: cooling system, thermal management, fuel consumption, fan, radiator, charge air cooler

引言

当前商用车风扇驱动已经步入电控风扇离合器时代，电控风扇离合器可以使风扇按需运行，但受限于整车散热性能和发动机高温可靠性，当前国内行业的电控风扇控制策略相对保守，风扇工作转速和时间都较高。

为满足商用车日益严格的油耗法规要求，本文进行了整车热管理冷却系统高效节能的系统开发。结合发动机高温可靠性的进步，本文优化了电控风扇控制策略，提高了发动机常用工作温度。开发了高效散热器，可提高散热性能。通过对通风系统的研究分析，创新性地开发了高效无轮毂环形风扇及带导风翅片的迷宫护风罩，提升了冷却系统通风性能，降低了风扇转速及噪声。另外通过降低中冷器出气温度和内阻，综合实现整车油耗降低。

1 冷却系统介绍

冷却系统是车辆热管理的基础，功能是保证车辆在任何环境、任何工况下保持最佳的工作温度，满足车辆动力性、经济性、舒适性等需求。冷却系统主要由散热器、中冷器、风扇、风扇离合器、护风罩、膨胀水箱、管路等部分组成。其中散热器、中冷器、风扇、风扇离合器、护风罩等都会对油耗有一定影响。

2 冷却系统热管理降油耗开发

本文主要从两个维度进行冷却系统热管理降油耗的开发。

其一是减少风扇的能耗，通过优化风扇控制策略，提高冷却系统温度，降低发动机比油耗，同时可提高冷却系统散热性能，另外同步开发了高效散热器及通风系统，也可提升散热性能，减少风扇的转速和运行的时间，从而实现油耗的

降低。

其二是降低中冷器的阻力和中冷器出气温度，实现发动机进气阻力、进气温度的降低，从而实现油耗的降低。

下面进行详细论述。

2.1 降低风扇能耗

降低风扇能耗的方法针对冷却系统主要有三个方面：其一是改进风扇的控制策略，其二是提升风扇和通风效率，其三是提升散热器性能。

(1) 优化风扇控制策略 风扇首要控制策略是风扇转速对应发动机冷却液温度的关系，采用电控风扇离合器的车型，可以实现不同发动机冷却液温度与不同风扇转速的控制，冷却液温度越高，对应的风扇转速也越高。

通过对发动机平均出水温度和比油耗对应关系的试验分析，在当前发动机允许的出水温度范围内，得出发动机平均出水温度升高，发动机比油耗可降低，如图 1 所示。对于常用工况，发动机出水温度从 83℃ 提高到 93℃，比油耗下降约 0.85g/kW·h，降油耗比率约为 0.45%；发动机出水温度从 93℃ 提高到 103℃，比油耗再有约 0.75g/kW·h 的下降，降油耗比率约为 0.4%。

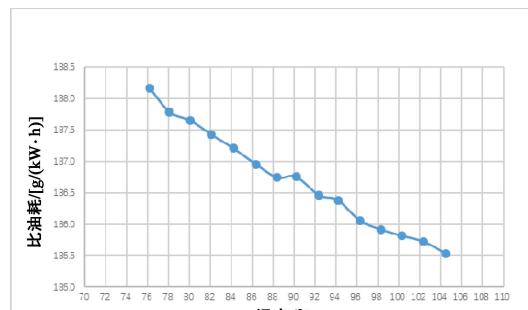


图 1 某柴油机常用工况冷却液温度和比油耗曲线

提升电控风扇控制温度，即可提高发动机最高出水温度。随着发动机出水温度的提升，散热器液气温差加大，冷却系统散热能力也同步提升，可减少风扇工作时间，就可以再次降低发动机油耗。

利用 KULI 软件搭建冷却系统模型，输入给定常用工况的发动机散热量、水流量等，并匹配相应散热器、中冷器、风扇的试验数据后，完成冷却系统模型搭建，如图 2 所示。

根据设定的风扇-冷却液温度控制策略的新目标，可通过完工况目标优化方法，计算出新的风扇转速，并编制新的风扇控制策略，见表 1、表 2。其中原风扇控制策略见表 1，考虑可靠性，提升冷却液温度 5°C 对应的风扇转速见表 2，发动机冷却液温度的提升实现了散热器液气温差的增加，实现风扇转速的降低。通过计算结果可以看出发动机出水温度提高 5°C，可降低风扇的耗能，风扇转速（风量）平均可降低 10%，风扇消耗功率约可降低 30%。

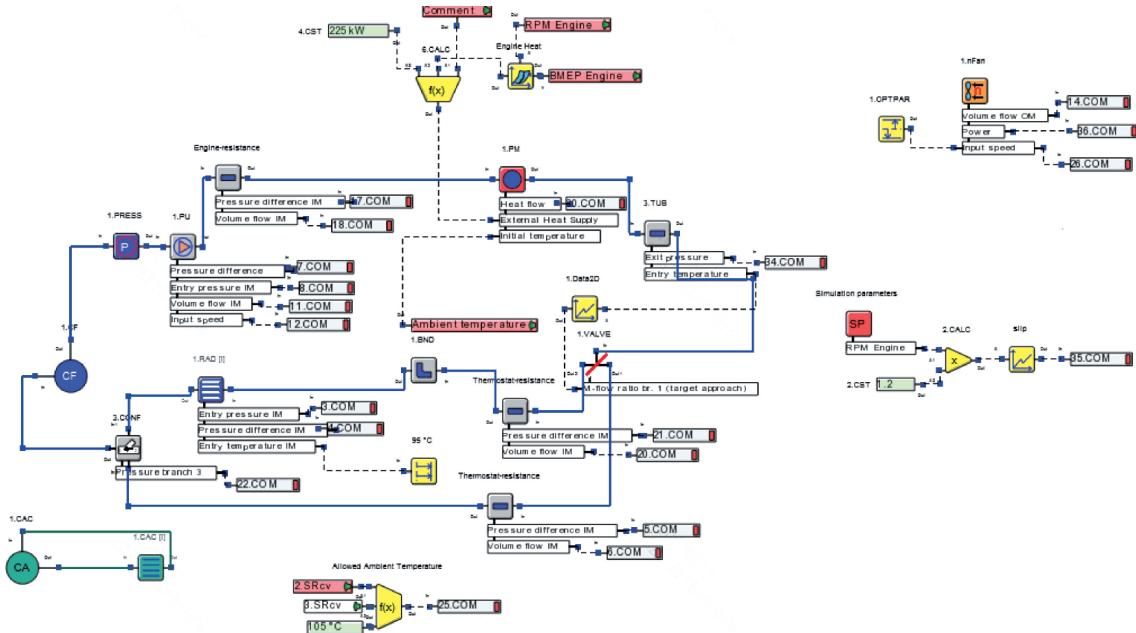


图 2 某车型冷却系统 KULI 模型

表 1 原风扇控制策略

冷却液温度/°C	91	92	93	94	95
风扇转速/(r/min)	0	500	1000	1500	2000

表 2 新风扇控制策略

冷却液温度/°C	96	97	98	99	100
风扇转速/(r/min)	0	450	900	1350	1800

(2) 改善风扇通风系统 通过对各类风扇及护风罩的试验研究，我们发现采用新的无轮毂结构的环形风扇匹配带防回流结构的迷宫式护风罩，不仅能提高风量，提升风扇效率，还可降低风扇噪声。图 3 为原风扇及新型无轮毂风扇结构对比图。对原风扇和新风扇经过计算流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）分析，发现新风扇叶片区空气湍流明显减小，可以有效提升新风扇的性能降低风扇噪声，如图 4 所示。

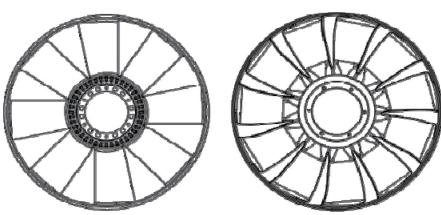


图 3 原风扇、新风扇结构对比图

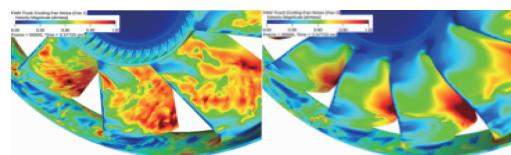


图 4 原风扇、新风扇 CFD 分析

通过风扇性能试验台架，我们对比了同风扇直径的国际友商产品、新风扇、原风扇的风扇性能，新开发的无轮毂结构的环形风扇在同样转速下风量比原产品性能提升 18.3%，风扇性能水平达到国际一流水平，如图 5 所示。



图 5 风扇性能台架试验结果

在风扇开发中，利用整车噪声分析软件对三款风扇的噪声进行了评价，噪声评价点如图 6 所示。通过分析发现，新风扇噪声比原产品有显著下降，已达到国际一流水平，如图 7 所示。

在风扇匹配中，风扇护风罩的设计也是影响风扇性能的重要因素。为了避免风扇与护风罩之间干涉，两者之间一般

预留有一定的间隙，以防止风扇运行时刷蹭护风罩。风扇会通过此间隙从外部吸风，此部分风量不经过散热器，属于无效功，一般此间隙越大，风扇的无效功越多，风扇效率越低。

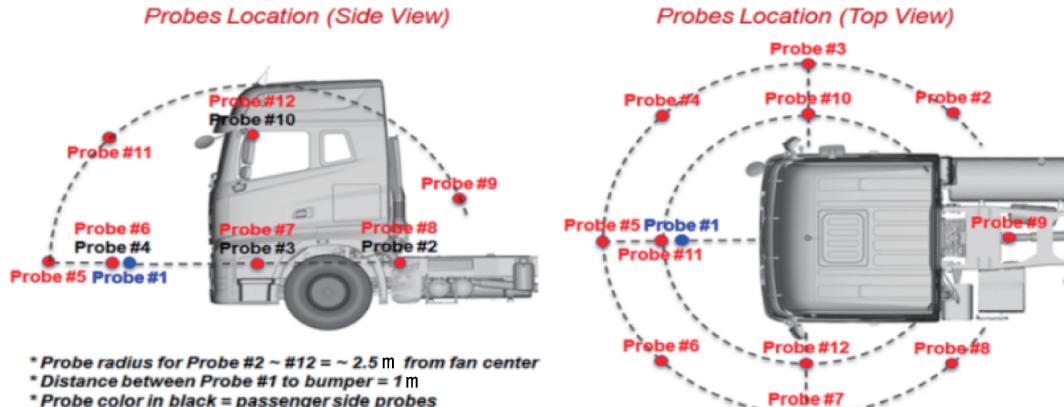


图 6 整车风扇噪声分析测点选取

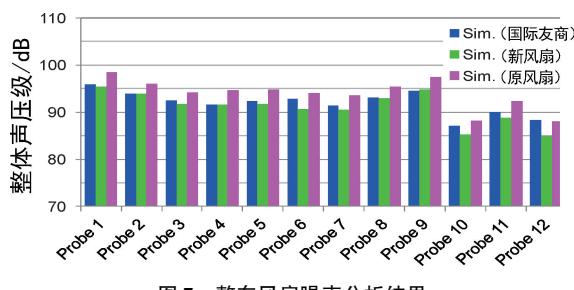


图 7 整车风扇噪声分析结果

风扇的效率是衡量风扇性能的重要指标，是风扇输出功率与轴功率的比值，见式（1），风扇效率越高，代表输出同样的风量下的风扇功耗更低、更节油。

$$\eta = \frac{P_1 \times 1000 \times 3600}{Qp} \times 100\% \quad (1)$$

式中， P_1 是风扇轴功率（kW）； Q 是流量（ m^3/h ）； p 是风压（Pa）。

图 8 为环形风扇的几类护风罩形式，根据护风罩在风扇环内或环外分为图 8 所示的外环、内环和迷宫形式，其中外环结构与传统的普通无环风扇的风扇布置相似。

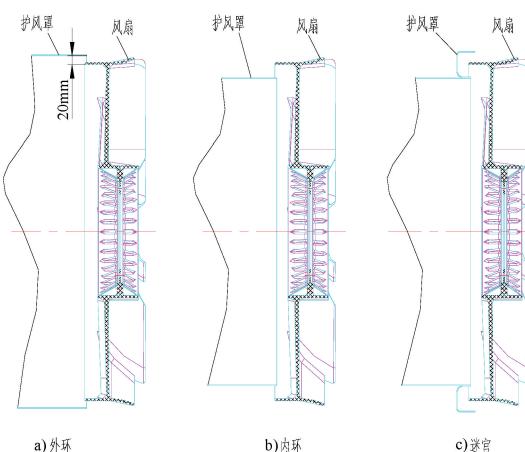


图 8 各类型护风罩结构对比

图 9 是原风扇匹配不同类型护风罩对风扇性能影响的试

验结果，从图中我们可发现，迷宫式护风罩的风扇性能和效率要明显优于外环和内环护风罩。

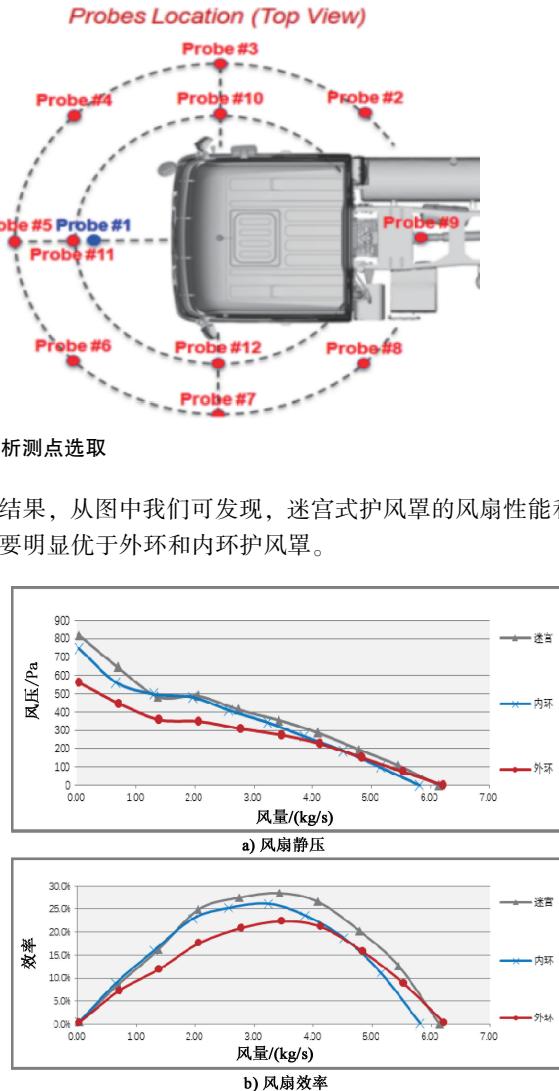


图 9 各类型护风罩对风扇性能的影响

本文在迷宫护风罩的迷宫环内，新设计了数条防回流的翅片，如图 10 所示，可以在风扇与迷宫护风罩间隙不变的前提下，更有效地提升风扇效率。将新风扇匹配带防回流翅片的迷宫护风罩后，经台架试验对比，风扇性能及效率提升效果明显，见表 3。

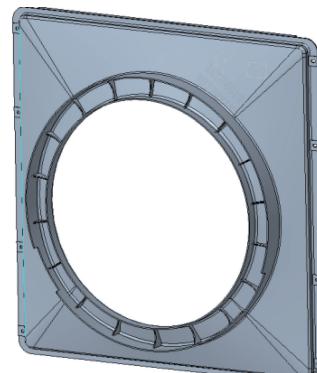


图 10 带防回流结构的迷宫护风罩

表 3 风扇效率提升对比

	普通迷宫	带防回流结构迷宫
风扇转速/(r/min)	1500	1500
风量/(m³/h)	21600	21600
风扇效率(%)	34.3	35.84

(3) 提升散热器性能 在冷却系设计中，散热器设计占重要位置，要求兼顾增大散热量和提高散热效率两个方面。设计中，要综合考虑散热面积、正面积、散热器风阻、水流速等多种因素。

为充分利用迎面风，一般希望设计出较大的散热器正面积，增大散热器芯正面积的途径，除了增大散热器外形尺寸外，还应当尽可能减小上下水室的正面积，因此在散热器外形界限尺寸已确定后，要合理确定水室位置和形状。

散热器的性能会直接影响冷却系统等能力，同样的外界条件，散热器能力越强，则整车的散热性能越好，即同样的散热条件下，所需要的风扇转速越低，这样就实现了降低风扇的能耗。

本开发方案，通过在散热器散热芯管内增加一定数量、一定排列方式的小凸起（丁坡），可以有效增加散热器芯管内液体扰流，从而提升散热器整体的散热性能。通过对一款散热面积 0.75m^2 的散热器进行系列仿真研究及台架试验对比发现，在散热器进水温度 85°C ，散热器进风温度 25°C ，散热器水流量 $220\text{L}/\text{min}$ ，散热器进风量 $6\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的条件下进行测试，散热器管内有凸起（图 11）和无凸起（图 12）及同面积国际友商产品的散热性能对比如图 13 所示。结果表明新型散热器性能水平已达到国际一流水平。

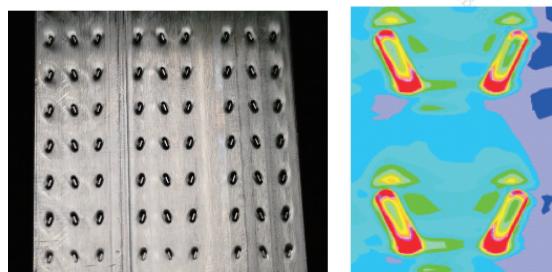


图 11 新方案有凸起（丁坡）的散热器芯管



图 12 原方案无凸起（丁坡）的散热器芯管



图 13 散热器性能对比

2.2 提升中冷器性能

提升中冷器节能性能的方式主要有两个方面：其一是降低中冷器的阻力，其二是降低中冷器出气的温度。由于空气的传热性能要远远低于水，所以单纯通过改变中冷器散热芯管结构的方式，往往很难取得很好的效果。目前改善中冷器性能的主要方式是增大中冷器的散热面积。

原 0.53m^2 散热面积的中冷器，在整车空间允许的前提下，将散热面积提升至 0.62m^2 。另外通过将原中冷器芯管焊接处内翻主片（图 14）改为外翻主片结构（图 15），使内部流动更为通顺，阻力降低。在中冷器内部进气温度 180°C ，中冷器外部进风温度 25°C ，中冷器内部空气流量 $0.4\text{kg}/\text{s}$ ，中冷器外部进风量 $6\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的条件下进行测试，中冷器性能对比见表 4。结果表明，新方案中冷器可实现中冷器散热性能提升，并降低了中冷器内部流动阻力。

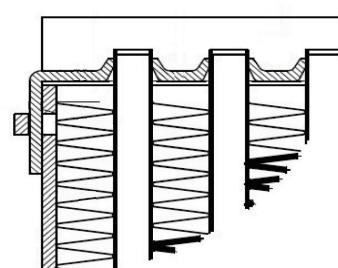


图 14 原方案（内翻主片结构）

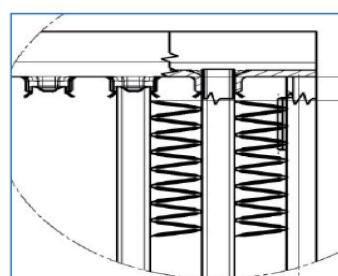


图 15 新方案（外翻主片结构）

表 4 中冷器性能对比

	原方案	新方案
散热量	54.2kW	55.3kW
内部阻力	8.54kPa	6.52kPa

(续)

3 冷却系统降油耗效果

3.1 试验方案

在一台匹配 13L 发动机的牵引车上，将上述冷却系统降油耗方案一次性换装上车，新方案见表 5。分别对比换装前后车辆满载在等速工况及中国-世界瞬态车辆循环（China-World Transient Vehicle Cycle, C-WTVC）工况的油耗表现。

表 5 降油耗冷却系统方案对比

冷却方案	原方案	新方案
风扇控制策略	91℃起转	96℃起转
护风罩	普通迷宫	防回流迷宫
散热器	普通芯管	带凸起芯管
中冷器	内翻主片结构 0.53m ²	外翻主片结构 0.62m ²

3.2 试验结果

冷却系统方案改进前后油耗试验结果见表 6，风扇平均转速降低结果见表 7，中冷器后增压空气温度见表 8，其中以原方案的数据为基准值 0。在等速工况下，因车辆速度高，新的中冷器和散热器通风性能更好，所以油耗下降效果要明显优于 C-WTVC 综合工况。

表 6 油耗变化对比

试验工况	原方案	新方案
70km/h 等速	0	-0.8L/100km
80km/h 公里等速	0	-0.8L/100km

参 考 文 献

- [1] 姚仲鹏, 王新国. 车辆冷却传热 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2001.
- [2] KANEFSKY P, NELSON V, RANGER M. A systems approach to engine cooling design: SP-1541 [R]. Warrendale: SAE International, 1999.
- [3] SAE Cooling Systems Standards Committee. Heavy-duty vehicle cooling test procedures: SAE J1393 [S]. Warrendale: SAE International, 2023.
- [4] WEBB R L. Effect of material properties on performance and brazing of aluminum and copper/brass radiators: 971817 [R]. Warrendale: SAE International, 1997.
- [5] WEBB R L, FARRELL P A. Improved thermal and mechanical design of copper/brass radiators: 900724 [R]. Warrendale: SAE International, 1990.
- [6] 王刚, 李云清, 梁新月, 等. 对某型发动机冷却系统的设计与匹配研究 [J]. 车辆与动力技术, 2007 (4): 32-35.
- [7] 邓义斌. 车用发动机冷却系统匹配计算研究 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2011, 35 (2): 383-386.
- [8] 张克鹏. 某重型商用车冷却系统的一维仿真与匹配分析 [J]. 现代车用动力, 2013 (2): 19-23.
- [9] 张秉坤, 赵津, 马秀勤, 等. 基于 AMESim 发动机冷却系统的参数匹配仿真分析 [J]. 机械设计与制造, 2016 (12): 190-193.
- [10] 成强. 影响柴油机油耗因素及采取的节能措施 [J]. 内燃机与配件, 2023 (13): 78-80.
- [11] 王博, 张曼华. 基于 CFD 和整车试验一维热管理模型标定的对比 [J]. 汽车技术, 2015 (10): 15-18.
- [12] 毕道坤, 刘威亚, 陆增俊, 等. 重型商用车电控硅油风扇控制策略优化研究 [J]. 车用发动机, 2021 (5): 76-80, 86.
- [13] 傅晓磊, 王洪山, 朱杨, 等. 牵引车冷却系统的匹配优化 [J]. 内燃机与动力装置, 2019, 36 (5): 5-9.

表 7 风扇转速变化对比

试验工况	原方案	新方案
70km/h 等速	0	-78r/min
80km/h 等速	0	-158r/min
90km/h 等速	0	-152r/min
C-WTVC	0	-148r/min

表 8 中冷器后增压空气温度变化对比

试验工况	原方案	新方案
70km/h 等速	0	-17℃
80km/h 等速	0	-16℃
90km/h 等速	0	-15℃
C-WTVC	0	-10℃

4 结 论

改进风扇控制策略、提升风扇性能及护风罩通风效率、提升散热器性能对降低风扇能耗有明显的效果。增大中冷器的散热面积，可明显降低中冷器后的出气温度和内阻。这些系列化的热管理优化措施，提高了系统性能，实现该车型循环工况油耗降低 0.4L/100km 以上的效果。