

德国 MTU 发动机冷却系统剖析

The Analysis of German MTU engine cooling system

乔国辉 高晗 徐宇工

(北京交通大学机电学院)

摘要：本文对德国 MTU890 柴油机冷却系统用 GT—COOL 软件建立了仿真计算模型，并对冷却系统中的换热和流动过程进行了模拟运算。建立的模型可以预测发动机冷却系统的压力、温度分布及压力损失等。

关键词：柴油机；冷却系统；GT—COOL；仿真

Abstract: In this paper, a numerical water-cooling system model of German MTU engine is established in the GT-COOL environment. Simulation calculation of the heat exchange and fluid flow in the cooling system is performed by means of computer. The model provides a good predication of the pressure distribution, temperature distribution and pressure losses in the cooling system.

Keywords: diesel engine ; cooling system ; GT—COOL ; simulation

1. 引言

在大功率履带车辆动力领域，德国 MTU 公司多年来一直处于无可争议的地位。该公司研发的 890 系列柴油机单位功率质量小于 1kg/kW，是世界上在研发系列柴油机中最好的。其 6 缸机型高 590mm，宽 700mm，长 760mm，质量仅为 520kg，功率高达 550kW。本文基于热力学和传热学的理论，在 GT—COOL 软件环境中建立了 MTU890 系列发动机中 6 缸机冷却系统的一维仿真模型，通过分析计算来研究发动机冷却系统的流动与传热状况，预测其冷却系统的技术参数，以期对我国高功率密度发动机冷却系统的研发提供参考。

2. 发动机冷却系统的结构

发动机冷却系统的主要任务是保障发动机在最适宜的温度状态下工作，维持最佳的冷却水温。该发动机冷却系统简图如图1所示，该冷却系统是一种全新设计，主要是采用了高低温双循环冷却技术和高温冷却技术。系统的最高冷却液温度比以前的装甲车辆发动机的高出 20℃，为130℃。该冷却系统由一个高温回路和一个低温回路组成，采用高、低温双循环回路可以将高温热源负载与低温热源负载分开，低温回路可以实现某些零部件（如二级增压中冷器、发动机机油换热器以及主传动箱机油换热器）的低温冷却需求，高温回路主要为核心

发动机（即缸套、缸盖等零部件）以及一级增压中冷器提供冷却。采用高温冷却技术则可以满足在较小的空间内实现极高的冷却能力，因此流入发动机冷却液的热量非常少，可以大幅度地缩小冷却系统的质量和体积，提高冷却系统效率。

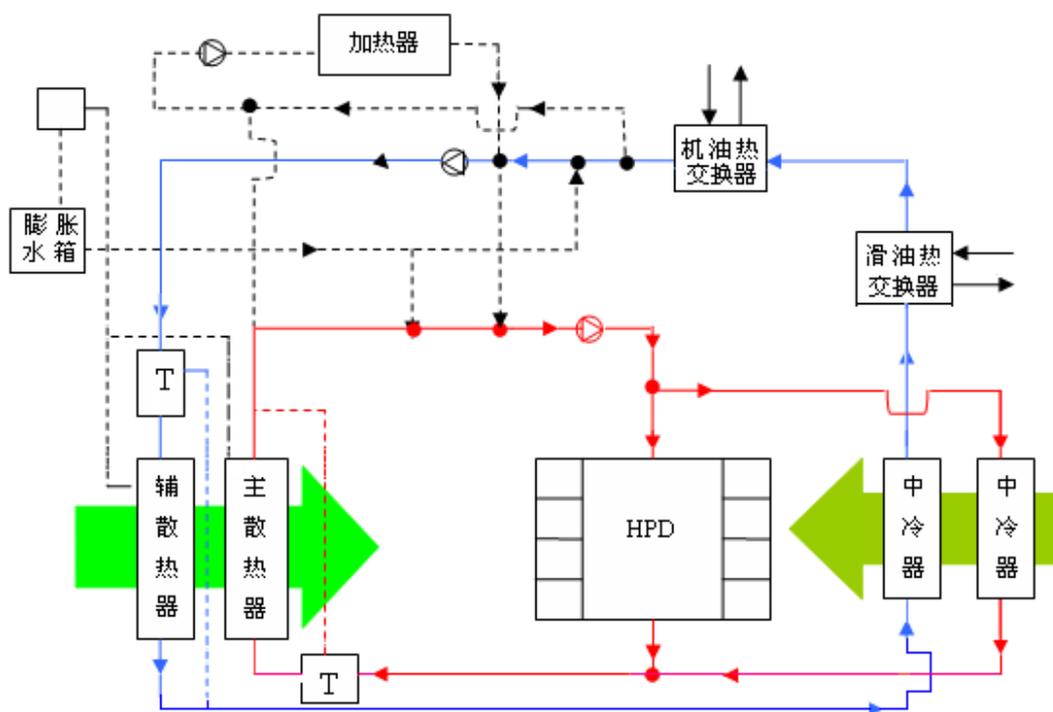


图 1 HPD 发动机冷却系统原理图

3. 发动机冷却系统仿真计算

通过试验设计发动机的冷却系统，使之满足规定的要求，耗时、耗力、耗材，并非易事。作为替代方案，数值仿真的方法，在计算机技术高速发展的今天，已被越来越多的人所采用。这种数值试验的方法，不但可以节省大量的试验费用，而且还可以进行大量的预测研究。

GT-COOL 软件是专门用于发动机冷却系统仿真分析的软件，广泛应用于发动机冷却系统的设计、开发等工作。该软件具有丰富的物理模型和分析功能，使得它能够对发动机冷却系统进行专业权威性分析。该软件基于流体及热力学计算理论，所采用的隐式格式流动求解器，使得求解快速、稳定、可靠。

GT-COOL 分为前、后处理两个模块。前处理模块包括搭建冷却系统所需的所有模型，可以模拟空气侧、冷却水侧、发动机机油/传动箱机油冷却器，以及其它流体系统。主要作用是搭建冷却系统一维仿真模型，根据冷却系各组成部件的结构参数和运行参数进行参数设置，并对冷却系统进行模拟计算。GT-COOL 的后处理由 GT-POST 完成，GT-POST 是一个功能强大的数据分析工具，可以显示、查看、处理由前处理模块计算的数据结果，可以对冷

却介质的压力分布、温度分布、流量分配以及换热量的变化进行分析，进而对发动机冷却系统的各个部件以及总体性能指标进行全面分析。

3.1 发动机冷却系统计算模型的建立

构成发动机冷却系统基本部件为：发动机、散热器和水泵。在模拟计算中根据发动机冷却系统原理图，模型中除了考虑上述三类部件外，还将各类油水热交换器、节温器、膨胀水箱考虑在内。这样高温回路冷却系统的主要部件有发动机、一级中冷器、散热器、水泵；低温回路冷却系统的主要部件有水泵、散热器、二级中冷器、主传动箱机油换热器、发动机润滑油换热器。模拟计算工作主要针对发动机额定工况下工作时冷却系统的情况进行。所建立的发动机冷却系统计算模型如图2所示。

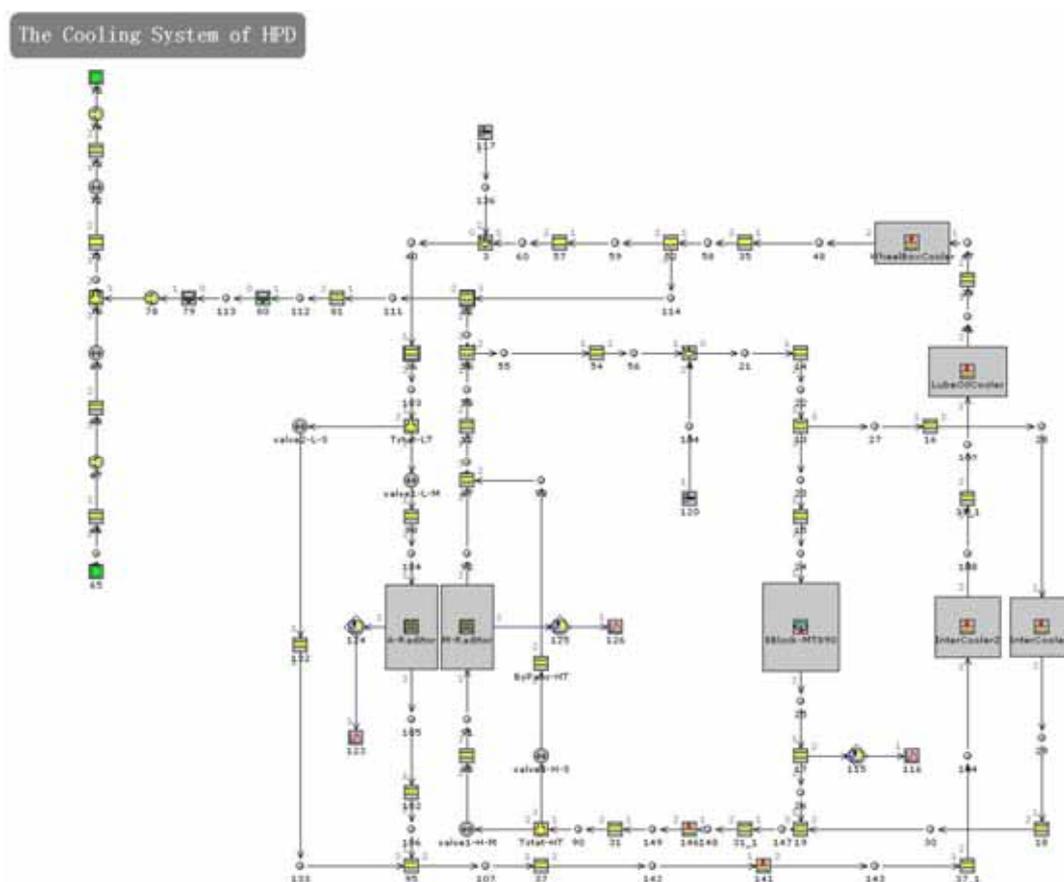


图 2 HPD 发动机冷却系统模型图

3.2 模拟计算结果

应用软件可以方便的计算出该冷却系统中各个部件的集总参数以及整个系统的温度、压力、流量等分布图，其主要计算结果见下表 1。

表 1 高、低温回路各部件主要计算结果

部件 参数	高温回路				低温回路				
	发动机	一级中冷器	管路	主散热器	二级中冷器	机油换热器	主传动箱油换热器	管路	辅助散热器
散热量 (kW)	-246.86	-44.1	-1.22	292.29	-58.8	-70	-36	-0.02	165.5
阻力 (bar)	1.05	0.86	0.44	0.48	0.315	0.2	0.136	0.69	0.5

通过热量平衡方程、压力平衡方程和质量守恒方程来验证模拟计算结果的合理性。

(1) 高温回路

能量平衡方程：

$$\Delta Q_{\text{主散热器}} = \Delta Q_{\text{发动机}} + \Delta Q_{\text{一级中冷器}} - \Delta Q_{\text{管路}} + \Delta Q_{\text{水泵}} \approx 292.29 \text{ kW}$$

从上面方程可以看出，主散热器的散热量大于高温回路各部件散热量之和，产生这种现象的原因，考虑是由于水泵的部分功率转化成热量，增加了主散热器散热负荷。高温回路水泵功率为 2.5kW，加上水泵功率，系统能量正好平衡。

压力平衡方程：

$$\Delta p_{\text{水泵}} = \Delta p_{\text{发动机}} + \Delta p_{\text{主散热器}} + \Delta p_{\text{管路}} = 1.05 + 0.48 + 0.44 = 1.97 \text{ bar}$$

(2) 低温回路

能量平衡方程：

$$\Delta q_{\text{辅散热器}} = \Delta q_{\text{机油换热器}} + \Delta q_{\text{主传动箱}} + \Delta q_{\text{二级中冷器}} - \Delta q_{\text{管路}} + \Delta q_{\text{水泵}} = 165.5 \text{ kW}$$

压力平衡方程：

$$\Delta p_{\text{水泵}} = \Delta p_{\text{机油换热器}} + \Delta p_{\text{主传动箱}} + \Delta p_{\text{二级中冷器}} + \Delta p_{\text{辅散热器}} + \Delta p_{\text{管路}} = 1.85 \text{ bar}$$

从上分析可以看出，高、低温回路的压力和能量方程均守恒，说明所搭建的一维仿真计算模型是合理的。

3.3 冷却系统参数的优化方法

GT—Suite 软件带有优化工具，对一些参数我们可以用优化工具箱来进行确定。如对管路直径的优化，优化后的结果应使冷却系统管路内流速在合理的范围内。发动机冷却系统管路中水流速度一般在 4~6m/s。影响水流速度的因素有冷却水流量和冷却系统的管路直径，在发动机冷却系统散热量确定的情况下，冷却水的流量也基本确定，因此，可以将管路直径设为变量，将水流速度设为目标值，这样就可以找到合适的管路直径。在优化计算中，我们取管内水流速度为 5m/s，通过计算可以确定冷却系统各段管路的具体尺寸。同理，我们可以

用同样的方法来确定其它的参数。

3.4 发动机冷却系统多参数多方案优化匹配仿真与分析研究

对于不同的环境条件，冷却系统的热负荷变化很大，在发动机额定工况下，对应不同的环境温度，散热器所需的空气流量是不同的。当环境温度从-35 ~ 45，散热器所需空气流量如图 3 所示。

在发动机额定工况下，对应不同的环境温度，散热器所需的空气流量是不同的，对应的发动机的出口温度也是变化的。当环境温度从-35 ~ 55，对应发动机出口温度的变化如图 4 所示，无论对散热器的哪一种布置方式，当环境温度小于 45 时，发动机出口水温均小于 130，满足要求。但当环境温度达到 55 时，散热器两种布置方式发动机出口温度均大于 130，因此，当环境温度过高时，发动机要降负荷运行，以免冷却系统水温过高。

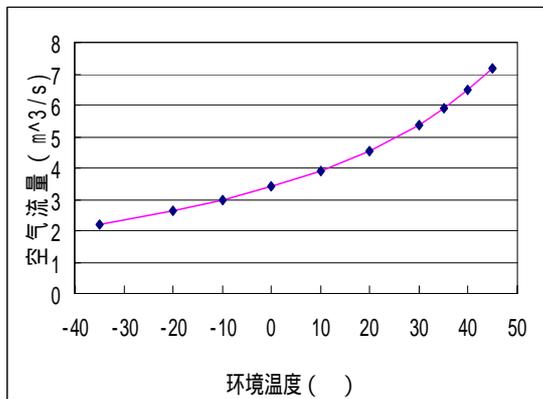


图 3 不同环境温度下散热器冷却空气流量

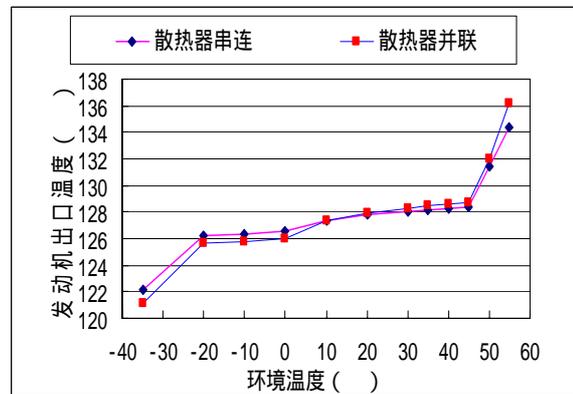


图 4 不同环境温度下发动机出口水温

4. 利用模拟计算结果进行实际工程选型

选型设计不同于它的工程设计，选型设计注重的是部件参数与冷却系统的总体匹配；工程设计则要使部件的具体结构、性能及其可靠性乃至工艺等满足多方面的工程要求。选型设计时，冷却系统对部件设计要求或称设计输入都已经确定。利用 GT—COOL 软件的计算结果可以方便的进行选型设计，以水泵为例，根据计算结果，软件能自动生成水泵的流量特性曲线，如图 5 所示，根据图 5，我们可以很方便的选择与冷却系统相匹配的水泵。

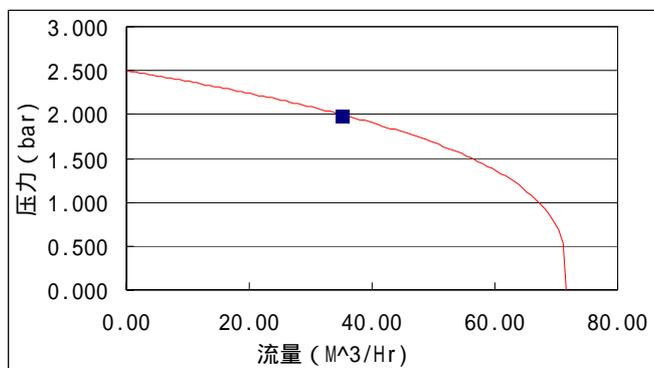


图 5 水泵特性曲线

5 结论

本文利用GT-COOL软件搭建了MTU890系列发动机中6缸机冷却系统的一维仿真模型,并进行模拟计算与分析。通过计算分析可以得到以下结论:

- (1) 该研究工作可以为发动机冷却系统的研制提供方便快捷的模拟计算平台;
- (2) 可以为发动机冷却系统具体方案的确定提供参考;
- (3) 可以为发动机冷却系统的设计提供合理的技术数据;
- (4) 可以为发动机冷却系统的部件选型提供依据和帮助。

需要改进之处:

(1) 在建模过程中作了较多的简化,比如忽略了管路的摩擦,管路的转弯、接头的设置与真实循环水路的结构不同;

(2) 由于软件只是进行一维模拟计算,冷却系统各元件采用集总参数,不能对冷却系统的流动与传热进行三维数值模拟,无法了解冷却系统各元件冷却液的流场、换热系数及压力场、温度场等的分布情况。

6 参考文献

- [1] Rüdiger Demark, Michael Grodeck, Georg Ruetz. Die neue Dieselmotoren-Baureihe 890 von MTU MTZ 2006.2 80-86
- [2] 肖成永,李健,张建武.发动机冷却系统的建模与仿真[J].计算机仿真 2003,Vol.20(9): 39-42
- [3] 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年
- [4] 向建华.坦克冷却系统的优化设计[D].北京:北京理工大学,2002.2
- [5] 张玉申.高功率密度柴油机及其关键技术[J]车用发动机 2004.6 5-7
- [6] 俞小莉,李婷.发动机热平衡仿真研究现状与发展趋势[J]车用发动机 2005.10 1-5