

文章编号:1001-9081(2009)07-1963-03

基于 KULI 的发动机热管理瞬态模型的参数设置与仿真

顾 宁, 倪计民, 仲 韵, 齐 斌, 梁乐华

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

(gn040520@126.com)

摘要:以某重型柴油机为原型,利用 KULI 软件建立了发动机冷却系统模型,阐述了模型中发动机参数的设置原理,进行了瞬态工况下冷却液温度以及润滑油温度变化的仿真。结果说明:其仿真结果与实验数值吻合较好,模型精度可靠,模型中发动机的参数设置原理为发动机热管理瞬态模型的设置提供了一种方法,使用该方法可用来设置不同类型的发动机,为发动机热管理系统的仿真计算提供较为准确的放热边界条件,并进一步用来仿真完整的发动机热管理系统。

关键词:发动机;冷却系统;瞬态;仿真;KULI 软件

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:**A

Parameters setting parameters and simulation of transient state model in engine thermal management based on KULI

GU Ning, NI Ji-min, ZHONG Yun, QI Bin, LIANG Le-hua

(School of Automotive Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: On a basis of a heavy-duty diesel engine the cooling system model was established using KULI software, and the temperature of coolant and oil was simulated at transient state. The paper mainly described that how to set engine model parameters in a transient state model with KULI software. The results show that using the engine model, the simulated results are in good accordance with experimental data, so the model is reliable and the principle of parameters setting provides a method for setting engine thermal management transient model which can be used to other engines. The engine model supplies appropriate thermal boundary environment for Engine Thermal Management System (ETMS), and it can be used to simulate the whole ETMS.

Key words: engine; cooling system; transient state; simulation; KULI software

0 引言

近年来,发动机热管理系统的优化备受人们关注,而利用软件对发动机热管理系统的仿真也逐渐成为一种趋势。现有可用来计算发动机(整车)热管理系统的软件主要有 KULI、AMESim、FLOWMASTER、GT-Cool 等^[1-5]。在所有的软件模型中,发动机参数的设置都非常关键。在发动机的运行工况中,瞬态特性(汽车的启动、加速、减速、刹车等)占重要比例,在此过程中,发动机的温度变化对油耗及排放的影响起着至关重要的作用,尤其是在冷启动过程中,迅速的暖机可以在很大程度上减少燃油消耗及排放。因此对其瞬态的热管理研究非常重要,只有对发动机瞬态模拟正确后,才能进一步用该发动机模型去模拟整个热管理系统的冷却介质(冷却液、机油、空气)的传热与流动状况。但因发动机的结构和燃烧过程、冷却介质的传热特性以及对瞬态的模拟都十分复杂,鉴于需要瞬态的实验数据进行校核,由于瞬态模拟的重要性,近年来对发动机瞬态热管理特性的研究在国外越来越多^[1-5],例如德国斯图加特大学内燃机与汽车工程研究所(IVK)利用 KULI 与 Flowmaster 软件为福特汽车某一车型进行冷却系统瞬态性能的优化,同时结合必要的风洞实验证在仿真过程中提出的改进措施,有效地改善冷启动时间内的燃油经济

性^[5]。奥地利 AVL List 公司利用其自身研制的发动机燃烧模拟软件 Boost,动力总成匹配软件 Cruise,结合 Flowmaster 与 KULI 软件,建立完整的从发动机到冷却系统,最后到整车的热管理分析平台^[1]。国内的研究则处于刚起步阶段,相关研究多数是对燃料电池汽车及混合动力汽车发动机热管理的研究,对于传统的发动机,目前主要局限于部分高校。

软件 KULI 在发动机瞬态特性的模拟中利用其独特的四质量块模型思想综合考虑发动机及其冷却介质在瞬态工况下的热容及传热过程,通过与实验数据的比较,得到合适的系数来模拟发动机的瞬态工况下冷却介质的流动与传热性能,本文阐述了 KULI 软件中发动机热管理的瞬态模型的建模原理,针对某款重型发动机,根据模型所需数据设计实验台架,并测量相关数据,计算发动机冷却液温度及机油温度在瞬态工况下的变化情况,并用实验数据进行验证,经验证后的模型可进一步为热管理系统的优化设计提供可靠的放热边界条件和计算依据。

1 发动机模型

1.1 模型假设

为了充分考虑发动机的瞬态特性,同时又能简化模型,软件中的计算做了如下的假设(参见 KULI 手册):

收稿日期:2008-12-22;修回日期:2009-03-26。

作者简介: 顾宁(1982-),女,安徽宿州人,博士,主要研究方向:汽车热管理; 倪计民(1963-),男,浙江温州人,教授,主要研究方向:内燃机节能与排放; 仲韵(1983-),男,上海人,硕士,主要研究方向:汽车热管理; 齐斌(1979-),山东莱芜人,硕士,主要研究方向:汽车热管理; 梁乐华(1983-),男,广东番禺人,硕士,主要研究方向:汽车热管理。

- 1) 发动机质量由直接受热质量和间接受热质量组成。其中直接受热质量的温度能即时随发动机运行工况发生变化;而另一部分质量的温度不能即时随发动机运行工况发生变化,具有一定滞后反应时间,称其为间接受热质量;
- 2) 进入到冷却系统和润滑系统的热量是分开的;
- 3) 发动机中由摩擦产生的热量同时进入冷却系统和润滑系统;
- 4) 在冷却系统与润滑系统中都分别有直接受热质量与间接受热质量;
- 5) 直接受热质量与间接受热质量之间存在热传递。

1.2 模型原理

根据上述五点假设,应用 KULI 软件建立一个发动机瞬态 4 质量模型,即水冷循环直接受热质量、水冷循环间接受热质量、油冷循环直接受热质量、油冷循环间接受热质量,发动机冷却水及冷却润滑油的温度变化与热流动状况依靠其四质量块及周围空气之间的热交换状况来模拟,其热交换原理如图 1 所示。其中热源主要由三部分组成:进入到冷却液的热量、进入到润滑油的热量和由摩擦产生的热量(参见 2008 年 KULI 年会的 workshop)。

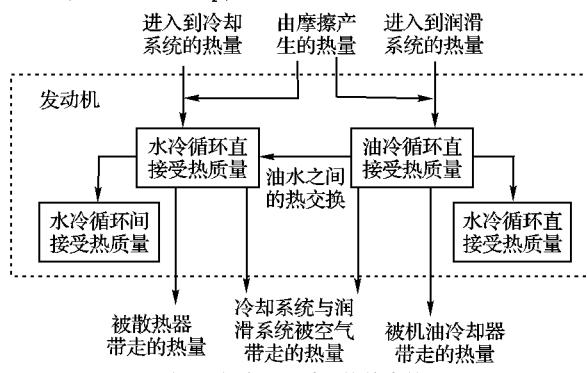


图 1 发动机四质量块热交换原理

从图中可以看出,发动机内部存在两个循环,即水冷循环和油冷循环。在水冷循环中,燃料燃烧流进冷却液的热量和一部分由摩擦产生的热量进入到水冷循环的直接受热质量,直接受热质量温度迅速发生变化;同时经过直接受热质量与间接受热质量之间的热传导,一部分热量传递给水冷循环中间接受热质量。由于热传导的迟滞和直接受热质量的热容的作用,使间接受热质量温度变化较慢。水冷循环中散热器(或强制冷却器)从循环中带走大部分热量,由于空气与发动机壳体和冷却液管道之间存在热对流,另外小部分热量被空气带走。油冷循环的热流传递原理基本与水冷循环相同,不同点在于除了通过油底壳与空气发生对流之外,还有一部分热量通过润滑油冷却器传递给水冷循环,最后通过水冷循环带走。

依据上述原理可知,每个质量块所容纳的热量见式(1),单位时间内与外界交换的热量见式(2):

$$Q = mC_p \Delta T_1 \quad (1)$$

$$q = kA \Delta T_2 \quad (2)$$

式中: Q 为质量块容纳的热量(kJ); m 为质量块的质量(kg); C_p 为质量块的比热容(kJ/(kg·K)); ΔT_1 为质量块前后温度差(K); q 为质量块单位时间内与外界交换的热量(kJ); k 为热交换系数(W/(m²·K)); A 为热交换面积(m²); ΔT_2 为质量块与环境温度差(K)。在 KULI 软件中建立发动机内部 4 质量瞬态模型,其中水冷或油冷直接受热质量和间接受热质量的 mC_p 大小,水冷循环或油冷循环与空气之间的 kA 值,水

冷循环与油冷循环之间的 kA 值,水冷或油冷循环中直接受热质量与间接受热质量之间传热的 kA 值,都需要利用 KULI 软件依据瞬态实验数据进行确定,确定系数的过程也就是发动机瞬态模型参数的调整过程,此过程需要准确的瞬态实验数据进行校核,要求瞬态过程仿真的结果曲线与实验曲线尽可能的吻合。

2 冷却系统模型

利用 KULI 软件建立发动机冷却系统模型如图 2 所示。水冷循环包括发动机、水泵、节温器、强制冷却器、润滑油冷却器;油冷循环包括发动机、润滑油冷却器。模型中根据需要分别设置发动机及各零部件的结构及性能参数。

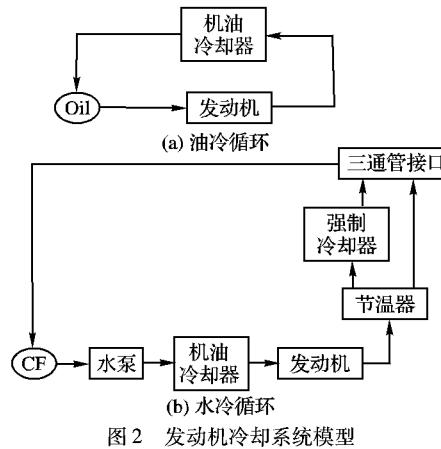


图 2 发动机冷却系统模型

3 实验台架结构

根据模型中参数设置的需要来设计与布置发动机放热测试台架,其结构如图 3 所示。所需测量的流量及温度测点分别如图中所标。

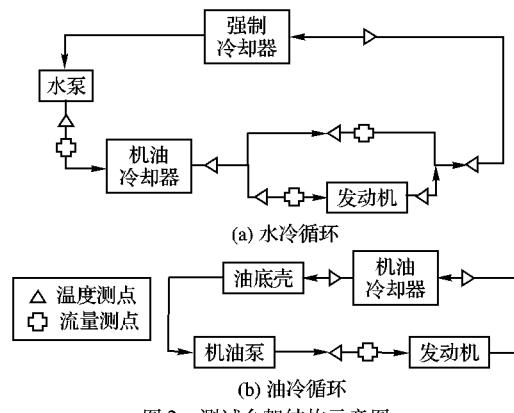


图 3 测试台架结构示意图

4 瞬态模型参数的设置与仿真结果的校核

4.1 模型参数设置原理

由上述描述可知,瞬态热管理系统中需要用质量块来描述发动机及其冷却介质的热容及传热特性,即要确定上述四质量块的热容(mC_p)及传热系数(kA)。该热容及传热系数直接反映了发动机热管理模型的瞬态特性,要保证其准确性与可靠性,需用瞬态实验来校核。

图 4 是 KULI 中瞬态发动机模型参数的设置原理。首先根据模型所需要的数据建立实验台架,初步设置发动机所需要的结构参数、性能参数及受热质量块之间的热交换参数,然后进行实验数据的测量,把测量结果与仿真结果进行对比

分析,如果误差过大则重新调整热交换参数,直到误差在允许的范围内。

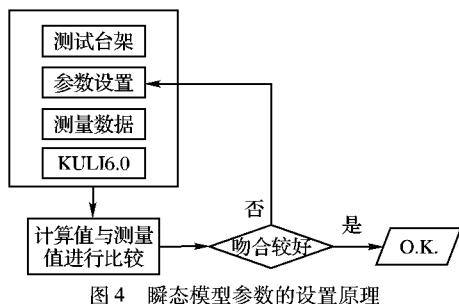


图4 瞬态模型参数的设置原理

4.2 瞬态工况参数设定校核

瞬态工况校核时需要实验数据支撑,实验采用Load-Step方法(负荷阶跃法),如图5所示。Load-Step方法要求在发动机的转速保持不变时,先维持低负荷工作一段时间,使发动机预热,然后突然在测功机上加载,使发动机负荷突然增大,同时发动机台架上要装有高速数据记录仪,将图3中的温度信号和流量信号自动记录下来(间距为1 s)。两个负荷之间的冷却液温度梯度至少要大于20℃,而且负荷阶跃方向必须是由低到高^[7]。

本实验的测试工况和环境参数参见表1,负荷加载的变化曲线和实验记录时间参见图5。

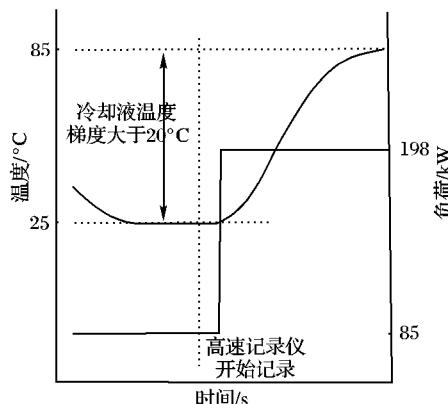


图5 负荷加载的变化曲线(发动机转速为2000r/min)

表1 实验测试工况及环境参数

参数名称	参数值
发动机转速/(r/min)	2000
加载前功率/kW	85
加载后功率/kW	198
实验记录时间/s	997
环境温度/℃	25
空气湿度/(%)	50
气压/Pa	1.013×10^5

4.3 瞬态模型参数的校核

首先根据经验初步设置发动机直接受热质量块与间接受热质量块的相关参数,其值如表2所示。

利用该组设置参数计算出来的结果与实验数据对比,如图6所示。

从图中可以看出,冷却液出口温度模拟值与实验值的拟合性较好,只是在起始的100 s内模拟值的曲线略高于实验值,原因可能是水冷直接受热质量热容过低造成的,其直接表现就是在负荷(发动机散热量)增加时,模拟计算的温度上升过快。

而油冷的模拟值曲线相对于实验值曲线呈现出先高后低的趋势,原因在于油冷直接受热质量的热容过低,造成机油出口温度在开始阶段上升过快;同时由于油冷直接受热质量与间接受热质量之间的换热系数和换热面积的乘积 kA 值过小,使得间接受热质量获得热量不足,从而导致在后一阶段传递给冷却液的热量也过小。

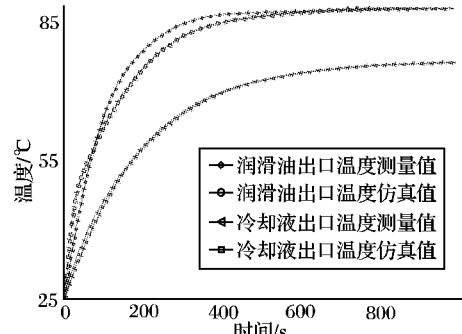


图6 初步设置的冷却液和润滑油出口温度对比

综上所示,可以通过适当调高水冷总受热质量热容、调低油冷直接受热质量热容和调低油冷直接受热质量与间接受热质量之间的换热系数和换热面积的乘积 kA 值来进一步改善模拟值与实验值之间的拟合效果。最后确定的参数值如表2所示。

表2 瞬态模型参数确定

模型设置参数	初设值	确定值
水冷循环直接受热质量热容 mC_p /(kJ/K)	134.3	140.8
水冷循环间接受热质量热容 mC_p /(kJ/K)	81.5	81.5
水冷循环总受热质量热容 mC_p /(kJ/K)	215.8	222.3
油冷循环直接受热质量热容 mC_p /(kJ/K)	168.7	173.5
油冷循环间接受热质量热容 mC_p /(kJ/K)	98.3	98.3
油冷循环总质量热容 mC_p /(kJ/K)	266.0	271.8
水冷循环与空气换热系数和换热面积的乘积 kA /(W/K)	125.7	125.7
油冷循环与空气换热系数和换热面积的乘积 kA /(W/K)	189.5	189.5
油冷循环与水冷循环间的换热系数和换热面积的乘积 kA /(W/K)	572.6	572.6
水侧直接受热质量与间接受热质量换热系数和换热面积的乘积 kA /(W/K)	243.3	243.3
油冷循环直接受热质量与间接受热质量换热系数和换热面积的乘积 kA /(W/K)	289.3	256.0

修正后的模拟计算结果如图7所示。从结果图中可以看出仿真结果与实验结果吻合校好,由此可得该机型的瞬态模型。

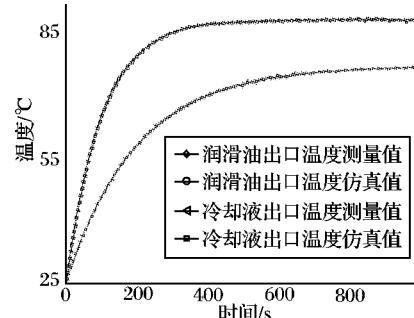


图7 最后修正后冷却液和润滑油出口温度对比

当然,模拟中仿真计算曲线可能会跟测试曲线出现不同形式的偏离,这些均可以通过调整不同热容及热交换系数的值来达到吻合的结果。
(下转第1977页)

iozone,通过全面测试比较tmpfs内存盘与系统硬盘的数据存取性能。数据表明,基于tmpfs的内存盘以明显优势胜出,特别是在“Write、Re-write、Random Write、Fwrite、Frewrite”等执行写操作的方面,而以time指令跟踪iozone的测试时间,发现在tmpfs内存盘上完成所有测试所需的时间仅为硬盘的1/16,速度优势十分明显。在tmpfs内存盘上构筑的WebGIS应用经杭州市政务信息资源共享及业务协同项目实际运行测试,证明在并发用户较多、数据读写频繁的情况下,较之普通基于硬盘的WebGIS在响应速度和用户体验上有明显提升。可见,应用内存存储解决磁盘I/O瓶颈,提升WebGIS的响应速度,在理论和实践上都是正确可行的。由于三层架构支持多层分布式应用,业务逻辑层和数据服务层可分别部署于基于内存存储的不同服务器之上,因此,系统不仅扩展性强,而且可支持海量数据应用。debian最高可支持64TiB的物理内存,存储容量已不再是内存存储应用的“短板”。

5 结语

磁盘I/O瓶颈是目前系统应用面临的普遍问题,在分布式应用不断扩展,中央处理器与硬盘性能差距日益扩大,内存价格大幅下降的今天,研发廉价可行的高速内存存储应用技术,具有现实意义。本文提出的内存式WebGIS解决方案不仅适用于GIS领域,也可推广、应用到其他领域,所不同的只是专业平台(如地图服务器)的变化。鉴于内存的易失性,稳定持续的电力供给十分重要,本项研究在实现中采用UPS保证电力供应的稳定,在推广应用到其他领域时,也应对系统的电力供应给予足够重视。

参考文献:

- [1] BRYANT R E, O'HALLRON D. 深入理解计算机系统[M]. 龚奕

(上接第1965页)

经过准确调整后的模型可以用来模拟发动机在瞬态工况下的放热性能,为发动机热管理系统的仿真及冷却系统零部件的优化提供可靠的热边界条件。

5 结语

依据四质量调节原理,发动机热管理瞬态模型可以有效地模拟发动机冷却水以及润滑油温度在发动机瞬态工况下的变化情况,为发动机及整车热管理系统提供可靠的放热边界条件,综上所述可得如下结论:

1) 基于一维流动传热理论建立的发动机热管理模型可以有效地模拟发动机向冷却介质释放的热量,从而进行整个热管理系统的仿真、匹配和优化;

2) 发动机瞬态模型的建立,使其传热过程更接近实际车辆行驶状态,更具实用性,对于某种机型,该瞬态模型需要专门的瞬态实验数据进行校核,校核正确后,该发动机的瞬态模型就可以用于该种机型的整个热管理系统中,从而进行整个系统的模拟;

3) 发动机热管理瞬态模型中特性参数的调整过程是一种模型设置方法,本文主要介绍了这种方法的运用过程,该过程提出了发动机热瞬态过程的一种开发思想;

4) KULI软件采用发动机四质量块模型的模式能够较准确的模拟发动机的瞬态放热特性。通过以实验为依据的瞬态模型参数设置,其精度能够满足要求,可靠性得到保证;

利,雷迎春,译.修订版.北京:中国电力出版社,2004.

- [2] SCHMID P. HyperDrive 4 Redefines Solid State Storage : HyperDrive 4-the fastest hard disk in the world[EB/OL]. [2008-11-16]. http://www.tomshardware.com/reviews/hyperdrive-4-redefines-solid-state-storage_1719.html.
- [3] 邱世华. Linux操作系统之奥秘[M]. 北京:电子工业出版社,2008.
- [4] KROPLA B. Beginning MapServer: Open source GIS development [M]. Berkeley: Apress, Inc, 2005.
- [5] MCCARTY B. Learning debian GNU / Linux [M]. Sebastopol : O'Reilly, 1999.
- [6] 李大治. Linux2.6内核的Initrd机制解析[EB/OL]. [2008-11-16]. <http://www.ibm.com/developerworks/cn/Linux/lk26initrd/index.html>.
- [7] MCKENNA J, FAWCETT D, BUTLER H. An introduction to MapServer[EB/OL]. [2008-11-16]. <http://www.mapserver.org/introduction.html#mapserver-overview>.
- [8] ANDERSON B. A comparison of ArcIMS to MapServer[EB/OL]. [2008-11-16]. <http://www.refractions.net/expertise/whitepapers/mapserver-arcims/mapserver-vs-arcims.pdf>.
- [9] LANDLEY R. Introducing initramfs, a new model for initial RAM disks[EB/OL]. [2008-11-16]. <http://www.linuxdevices.com/articles/AT4017834659.html>.
- [10] MapServer 网站[EB/OL]. [2008-11-16]. <http://mapserver.org/>.
- [11] LANDLEY R. ramfs-rootfs-initramfs.txt[EB/OL]. [2008-11-16]. <http://www.kernel.org/doc/Documentation/filesystems/ramfs-rootfs-initramfs.txt>.
- [12] ROHLAND C, DICKINS H. tmpfs.txt[EB/OL]. [2008-11-16]. <http://www.kernel.org/doc/Documentation/filesystems/tmpfs.txt>.

5) 发动机热管理的模拟需要大量的实验数据进行校核,这就需要企业前期投入很大精力进行实验数据的收集与整理,但这也是发动机热管理发展的一个必然趋势,目前国内通用、一汽等几家大型汽车公司已经开始进行热管理相关方面研发的投入。

参考文献:

- [1] MAHMOUD K G, LOIBNER E, KRAMMER J. Integrated 1-d tools for modeling vehicle thermal management system[EB/OL]. [2008-10-25]. <http://www.sae.org/technical/papers/2004-01-3406>.
- [2] KITANOSKI F, PUNTIGAM P, KOZEK M, et al. An engine heat transfer model for comprehensive thermal simulations[EB/OL]. [2008-10-15]. <http://www.sae.org/technical/papers/2006-01-0882>.
- [3] PUNTIGAM W, ALMBAUER R, HAGER J. Transient co-simulation of compressive vehicle models by time dependent coupling[EB/OL]. [2008-10-15]. <http://www.sae.org/technical/papers/2006-01-1604>.
- [4] CHOUKROUN A, CHANFREAU M. Automatic control of electronic actuators for an optimized engine cooling thermal management[EB/OL]. [2008-10-25]. <http://www.sae.org/technical/papers/2001-01-1758>.
- [5] GENGER M. Optimierung eines fahrzeugkühlsystems im instationären betrieb aufgrund der anforderungen des thermomanagements[R]. Frankfurt am Main: Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen, 2004.