

文章编号: 1006-4710(2015)02-0195-06

# 基于 GT-COOL/FLUENT 的汽车发动机 冷却系调温器联合仿真研究

孔祥健, 李言, 杨明顺, 孟文煜

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 本文利用 GT-COOL 软件建立某发动机的冷却系统一维模型, 并对其进行仿真, 得到冷却系统各个管路的流量、温度和压力等数据; 然后将所得结果作为边界条件, 利用 FLUENT 软件, 对系统中的调温器进行三维仿真分析, 实现一维与三维流动问题的联合仿真计算。通过仿真分析得到调温器中冷却水的温度场、压力场等数据, 进而了解调温器内部流动状态和工作性能, 为调温器结构优化提供数据支持。

**关键词:** 冷却系统; GT-COOL; 调温器; 仿真分析

**中图分类号:** TK402      **文献标志码:** A

## United simulation research on the thermostat in automotive cooling system

KONG Xiangjian, LI Yan, YANG Mingshun, MENG Wenyu

(Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Based on the GT-COOL software, the one-dimensional model of the engine cooling system can be built. The data of the engine cooling system, such as the flow of each line, the temperature, the pressure, etc., can be obtained by the simulation. And then, the obtained results are used as the boundary conditions; FLUENT software is used to carry out three-dimensional simulation analysis of the thermostate in the system, so as to achieve the one-dimensional and the three-dimensional united simulation calculation of flow problem. The data of temperature field and pressure field, etc. of cooling water in the thermostat are obtained through the simulation analysis, whereby further understanding the inner flow state and working performances of the thermostat so as to provide data supports for optimizing the thermostat structure.

**Key words:** cooling system; GT-COOL software; thermostat; simulation analysis

发动机冷却系统是保障发动机正常稳定运行的重要辅助系统之一, 其主要功能是保证发动机在各种工况下都有最适宜的工作温度<sup>[1]</sup>。

调温器是汽车冷却系统的重要组成部分, 通过自动调节大小循环的流量实现对发动机工作温度的有效控制, 对发动机性能好坏起重要作用。国内外学者对发动机内部冷却水道的结构设计、腔内流动的组织 and 传热机理等方面展开了相关研究。在对调温器的研究方面主要是向着智能控制以及新型化方向发展。陈志恒、周连庚等人开展了新型记忆合金节温器的研制<sup>[2]</sup>; 袁丽艳、郭新民等人将节温器的阀

门设计成侧壁带孔的薄型圆筒, 由侧孔和中孔形成液流通道, 并选用黄铜或者铝做阀门的材料, 使阀门表面光滑, 从而达到降低阻力、提高节温器工作效率的目的<sup>[3]</sup>; 王帅、俞小丽等人在冷却系统中将电动三通比例阀代替传统的机械式节温器, 实现了节温器的智能电控化<sup>[4]</sup>; T. Mitchen 等人在采用石蜡节温器、电动两通阀、电动三通阀和不安装节温器四种情况下分别进行了发动机暖机实验, 认为电动三通阀在发动机暖机时间和燃油经济性方面的性能最好<sup>[5]</sup>; 刘鹏、谢剑刚等人开展了气动式节温器的研究<sup>[6]</sup>。

**收稿日期:** 2014-11-28

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51475366); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20116118110005); 陕西省教育厅重点实验室科学研究计划基金资助项目(12JS072)。

**作者简介:** 孔祥健, 男, 硕士生, 研究方向为先进制造技术。E-mail: xiangjiankong0224@163.com。

**通讯作者:** 李言, 男, 教授, 博导, 主要研究方向为加工工艺、难加工材料及深孔加工。E-mail: Jyxy-ly@xaut.edu.cn。

虽然新型调温器产品的技术含量越来越高,控制也越来越精确,但传统蜡式调温器因其良好的可靠性和性价比,在汽车发动机尤其是商用车发动机上的应用仍占据着绝对优势。蜡式调温器市场需求大,原理简单,工作不受发动机冷却系统的水压影响,水流阻力较小,寿命长,所以短时间内很难被取代。蜡式调温器的机械式结构和类阀门的工作原理决定它在结构改进和功能提升上有很大空间,运用有限元的方法对调温器流场进行数值模拟分析以实现其内部的可视化,对其流道的优化、工作性能的提升以及冷却系统的冷却能力的提高具有重要的理论和实际工程意义。

对调温器流场进行仿真分析所需要的边界条件较多,这些边界条件企业难以提供,用实验方法测量又比较复杂,本文考虑通过 GT-COOL 软件建立冷却系统一维模型,分析冷却系统的工作规律以及调温器对冷却系统的调节作用,通过仿真得到系统中冷却水循环流量、温度、压力等参数的变化情况;在此基础上,用所得数据作为边界条件,对调温器进行 CFD 分析,得到调温器流场的相关特性,并找出影响其工作的因素,为优化其结构提供条件。

## 1 调温器及其工作原理

调温器可分为普通调温器、压力平衡式调温器、单体调温器等。普通蜡式调温器按照型号的不同可以分为底通型、直通型、旁通型、组合式旁通型等。单体调温器根据单体的材料不同又分为铝单体调温器和塑料单体调温器。

图 1(a)为常用的蜡式调温器,主要由外壳、蜡丸、推杆、胶管、弹簧、主阀门等部件组成;图 1(b)为调温器的感温体,外部以铜为材料,既有利于导热,又不易热变形,一般厚度为 1~2 mm。单体调温器除了这些结构以外,还有 3 个或 3 个以上的通道接外部零部件。

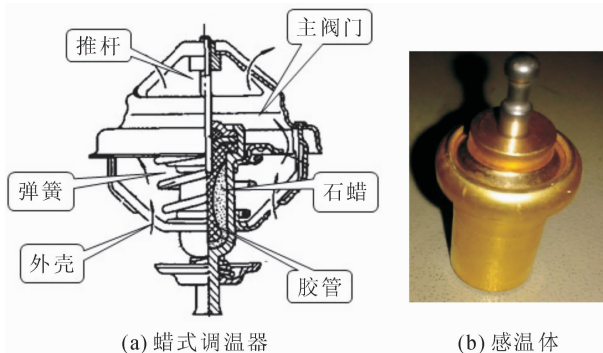


图 1 蜡式调温器的结构

Fig. 1 The structure of the wax type thermostat

蜡式调温器的工作原理如图 2 所示:当温度升高时,感温包内的蜡丸受热膨胀,体积增大推动推杆,推杆产生的反作用力推动阀体,在弹簧作用下阀门打开,根据温度的高低阀门开度不同。调温器就是通过改变阀门的开度而控制冷却系统流量循环的大小,以调节冷却系的散热能力,保证发动机在合适的温度范围内工作。

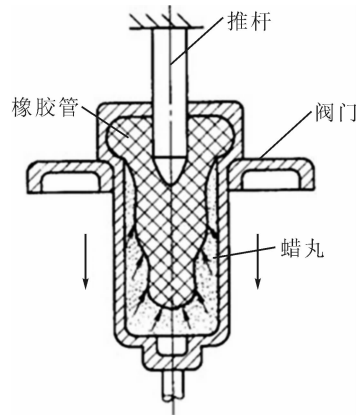


图 2 感温体的工作原理

Fig. 2 The working principle of the thermal pellet

## 2 冷却系统仿真分析

### 2.1 仿真模型的建立

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,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<sup>[4]</sup>。通过 GT-COOL 建立一个某型号的汽油发动机冷却系统一维模型,如图 3 所示。模型中包含了冷却系统的主要元件:发动机刚体、水泵、节温器、散热器、膨胀水箱等。

### 2.2 仿真条件

取发动机转速为 2 000 r/min,水泵的传动比为 1.0,泵的参考流量为 0.004 kg/s,参考压力取 1.4 bar,调温器的温度-开度特性曲线如图 4 所示,其余数据部分采用系统默认值,仿真时间设定为 600 s。

### 2.3 仿真结果

对冷却系统的研究主要涉及 3 种参数:冷却液的流量、系统压力、系统温度。通过仿真得到在发动机转速为 2 000 r/min 下该冷却系统大小循环的流量、温度随时间的变化曲线以及系统的温度分布。图 5 为流量变化曲线,图 6 为温度变化曲线,图 7 为阀门升程曲线。

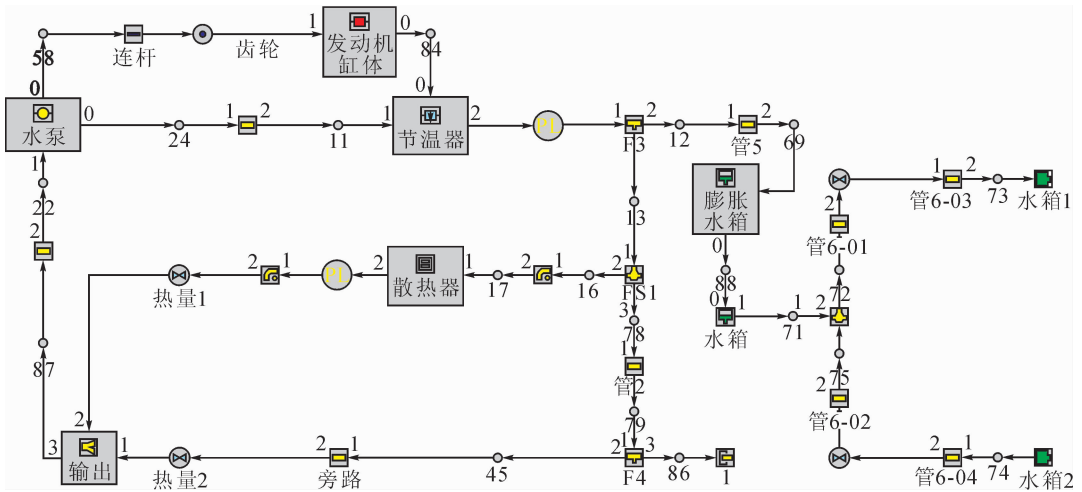


图3 某型号的汽油发动机冷却系统 GT-COOL 模型

Fig. 3 The GT-COOL model of some gasoline engine cooling system

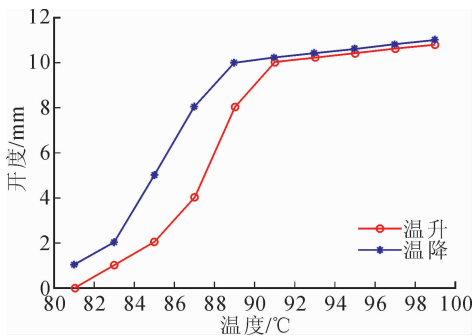


图4 调温器温度特性曲线

Fig. 4 The temperature curve of the thermostat

200 s 时,调温器阀门逐渐开启,部分冷却水开始逐渐流经大循环,保证冷却系统的温度稳定。由此说明所建立的冷却系统模型是正确的,可以预测冷却系统及调温器的工作规律。

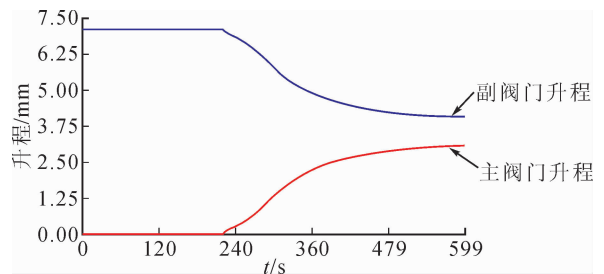


图7 调温器阀门行程曲线

Fig. 7 The lift curve of thermostat valve

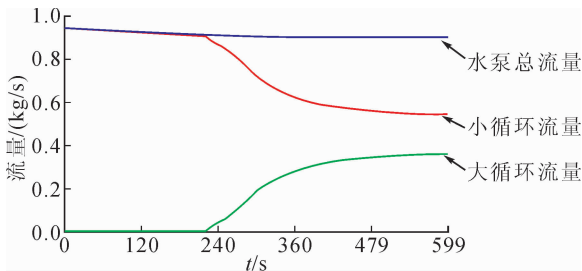


图5 大小循环流量变化曲线

Fig. 5 Size of circulation flow curves

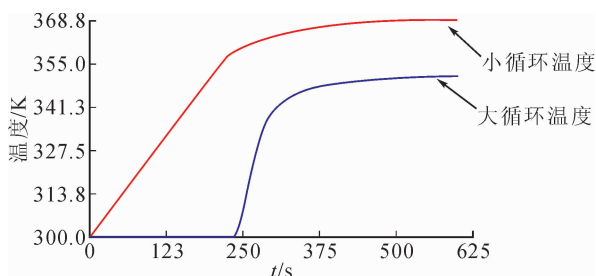


图6 大小循环温度变化曲线

Fig. 6 Size of circulation temperature curves

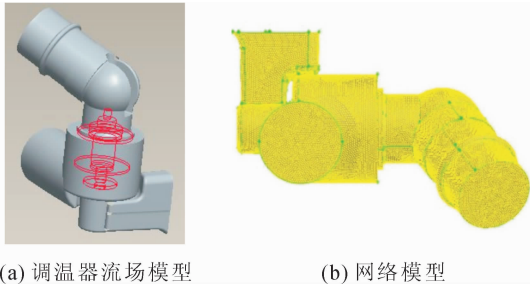
由获得的曲线可以看出,0 时刻发动机开始工作,水温逐渐升高,温度没达到调温器初开温度前,冷却水全部流经小循环。当温度逐渐再升高,到

### 3 调温器 CFD 分析

#### 3.1 建模与网格划分

由上面冷却系统的分析结果可以得到冷却系统大小循环的流量及温度,可以对发动机运转任意时刻调温器的状态作分析。确定某一时刻作为边界条件,本文取  $t=420$  s,此时主阀门的升程为 2.8 mm,用 PROE 建立该开度(主阀门的升程为 2.8 mm)的调温器流场模型,建模时忽略弹簧及部分支架以简化模型,建立的流场模型如图 8(a)所示。由于流场模型不对称,所以网格划分必须对整个三维流场进行,将 PRO/E 建立的流场模型转换成 IGES 通用格式,导入网格划分软件 GAMBIT 中进行网格划分,网格划分时对调温器流场模型的进出口进行适当延长以保证充分流动。采用的网格类型主要为四面体,中心处的温感区结构复杂,此处进行网格加密。划分所得的网格数越多,计算量也就越大,分析的效果也就越准确。本文经划分所得网格数为 233 181

个, 网格模型如图 8(b) 所示。



(a) 调温器流场模型 (b) 网络模型

图 8 调温器流场模型与网格划分

Fig. 8 The flow field model and mesh model of the thermostat

### 3.2 仿真分析

选择 Fluent 的三维单精度求解器, 采用 Pressure Based 求解器、隐式求解 (Implicit formulation)、定常流动 (Steady)。把网格模型导入 Fluent 中运算, 求得冷/热水入口速度分别为 0.58 m/s、0.9 m/s, 计算冷/热水入口的雷诺数与湍流强度, 冷、热水入口温度分别为 352 K、364 K, 求解方程采用三维不可压 N-S 方程, 湍流模型采用标准  $k-\epsilon$  模型, 近壁面区域采用壁面函数, 离散方程的求解方法采用 SIMPLE 算法, 采用隐式的全场迭代解法<sup>[5]</sup>, 边界条件规定进口速度与出口压力, 仿真迭代步数设为 600 步。

### 3.3 仿真结果

分析后建立适当的观察面对流场内部进行观察, 可以得到该开度下调温器内部截面的温度、压力、速度的分布。通过可视化结果, 可以清楚地看到冷却水在调温器中的流动状况, 以便于分析调温器的工作性能好坏, 为其结构优化提供条件。

#### 1) 截面温度云图

为了便于观察, 以调温器感温体和出口的中心为对称面, 分别建立 3 个截面 ( $X=220$  mm,  $Y=56$  mm,  $Z=-7$  mm) 以观察调温器流场的温度分布 (见图 9~11), 以方便观察该开度下调温器流场内部的热交换情况。

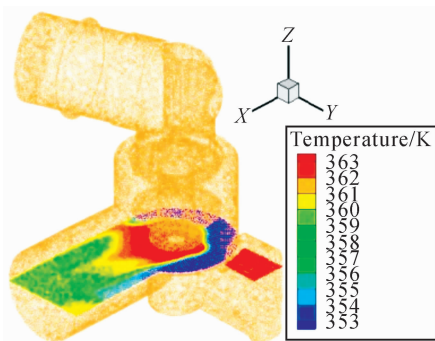


图 9  $X=220$  mm 截面温度分布

Fig. 9 The temperature distribution ( $X=220$  mm)

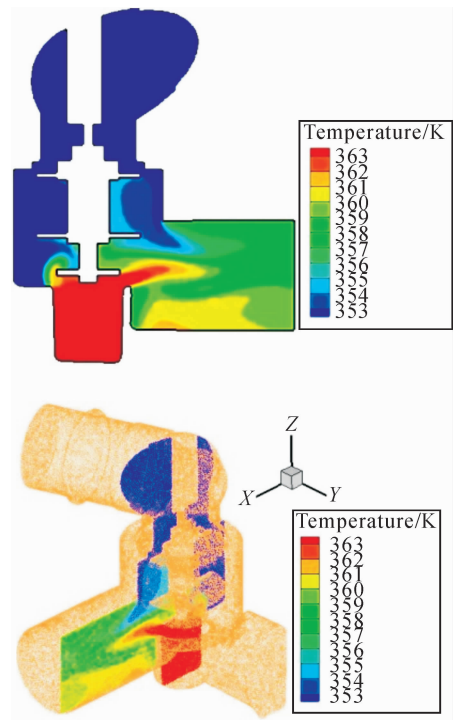


图 10  $Y=56$  mm 截面温度分布

Fig. 10 The temperature distribution ( $Y=56$  mm)

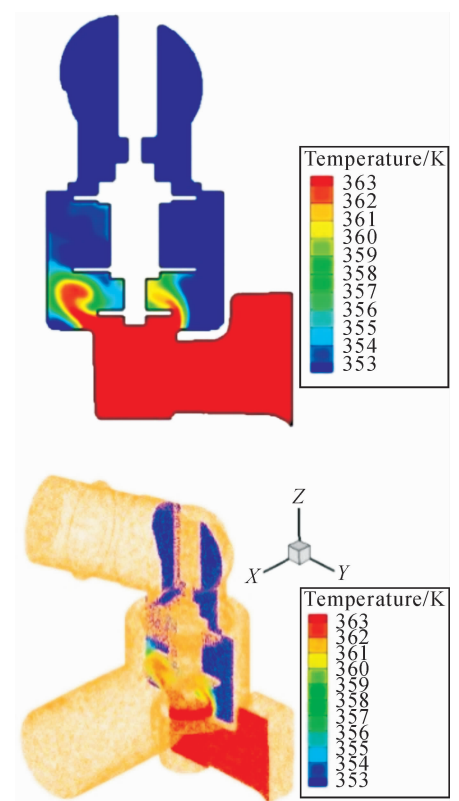


图 11  $Z=-7$  mm 截面温度分布

Fig. 11 The temperature distribution ( $Z=-7$  mm)

由图 9~11 可以看出在热水的出口处的感温体下部分区域, 是整个流场热交换最强的区域, 感温体周围基本被冷水包围, 说明该开度下感温体感知的



是冷水温度。

## 2) 感温体温度云图

建立调温器流场与感温体的耦合模型进行分析,对固体感温体进行网格划分,设置材料为铜,厚度 1 mm,分析后可得感温体表面的温度分布。

图 12 为调温器感温体的温度分布图。从图 12 可以看出感温体表面的温度等值线,还可看出感温包内的温度要比感温体附近的冷却水温度高,这是其迟滞性的表现,内部蜡丸的温度约为 356 K。

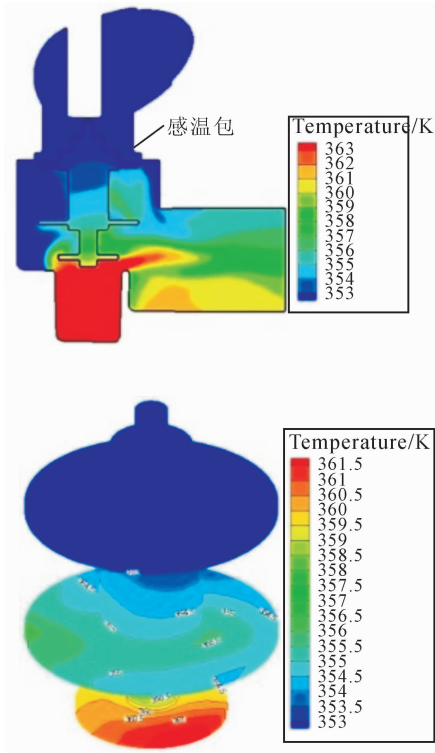


图 12 感温体温度分布

Fig. 12 The distribution of temperature in the thermal pellet

## 3) 截面速度云图与速度矢量图

从图 13(a)可看出,调温器内冷却水流速最快的区域为两阀门出口处,因为此处流通面积很小,流速能达到 2 m/s 左右,而流速最小的区域达到 0.2 m/s。

从图 13(b)可看出:涡流区的中心和出口的回流处流体的流速较小,而回流产生于出口的上下部分,出口中心处的流体流动比较平稳,这是由其流道的结构决定的,在设计中应该尽量使出口的流体流动平稳化;感温体两侧区域存在涡流,这是由调温器的结构决定的,此处产生涡流对调温器的感温是有利的,可以使冷热水在感温体周围充分流动换热,而出口处有部分回流产生,此处易产生真空,不利于冷却水迅速到达水泵。

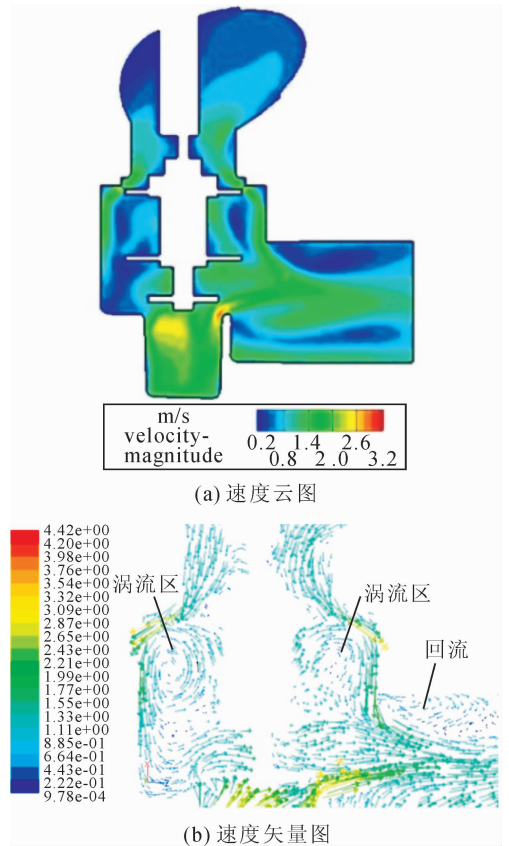


图 13 Y 截面速度云图与矢量图

Fig. 13 The distributions and vector diagram of velocity in Y section

## 4) 压力云图

图 14 为流场的总压分布和绝对压力分布图。

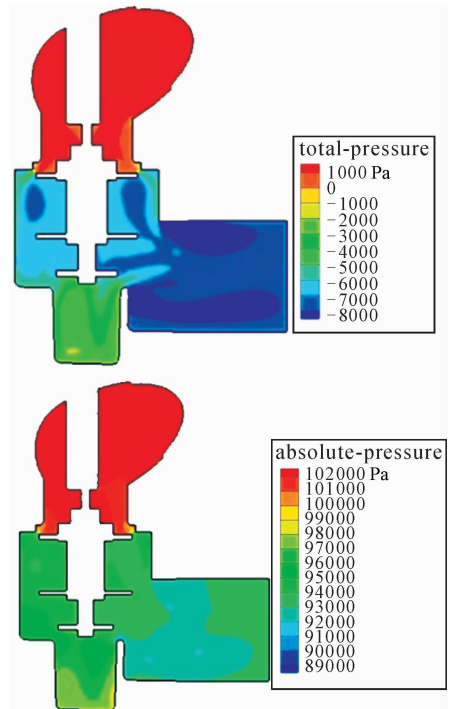


图 14 Y 截面压力云图

Fig. 14 The distributions of pressure in Y section

总压力是指不包含大气压力和流体的动压的压力,绝对压力是指包含大气压力与流体动压的压力。图14中出现的部分负压是由于调温器和水泵安装在一起,水泵入口处的负压导致调温器出口也会产生负压,调温器内绝对压力最大达到102 kPa,而最小压力达到89 kPa。

## 4 结 论

1) 通过GT-COOL建立的某发动机冷却系统模型为发动机冷却系统的研制提供方便快捷的模拟计算平台,并为发动机冷却系统的设计提供合理的技术数据。通过一维仿真结果,可以清晰地看到发动机在不同状态下和不同时刻冷却系统中各个部件及管路的工作状态,对预测发动机冷却系统性能状态有重要作用。

2) 由一维仿真结果可以得到冷却系统内部的相关参数,与三维仿真相结合可以,对冷却系统中的相关部件进行分析,得到部件内冷却液的流场、换热系数及压力场与温度场等的分布情况,为部件的优化提供条件。

3) 通过建立简单的冷却系模型,得到相关参数,用Fluent对调温器做了CFD分析,得到了发动机在某一时刻运转时,冷却系统中调温器的工作状态及内部流场的分布状况,根据其流场状态可以为结构优化提供数据支持。

### 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] 陈志恒,周连庚,严敏杰. 形状记忆合金节温器的研制[J]. 东华大学学报,2002,28(6):92-95.  
Chen Zhiheng, Zhou Liangeng, Yan Minjie. The development of shape memory alloy thermostat [J] Journal of Donghua University, 2002,28(6):92-95.
- [3] 袁燕利,邢娟,郭新民,等. 新型电控节温器的研究设计[J]. 农机化研究,2001,(1):78-80.  
Yuan Yanli, Xing Juan, Guo Xinmin, et al. The study of the new electronic thermostat design[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2001,(1):78-80.
- [4] 王帅,俞小丽. 电子节温器设计开发与试验验证[J]. 车用发动机,2011,(6):46-48.  
Wang Shuai, Yu Xiaoli. Electronic thermostat design de-

velopment and test [J]. Vehicle Engine, 2011,(6):46-48.

- [5] Mitchell T, Salah M, Wagner J, et al. Automotive thermostat valve configurations; enhanced warm-up performance [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2009,131:1-7.
- [6] 刘鹏. 气动式汽车节温器的研究与开发[D]. 武汉:武汉科技大学,2008.  
Liu Peng. Research and development on the aerodynamic thermostat [D]. Wuhan University of Science and Technology, 2008.
- [7] 丁攀,宋伟奇. 浅述节温器的发展[J]. 科技资讯,2012,36(2):56-57.  
Ding Pan, Song Weiqi. Discussion on the thermostat's development [J]. Science & Technology Information, 2012,36(2):56-57.
- [8] 潘永成. 基于CFD的调节阀内流场流动特性研究[J]. 机床与液压,2011,39(1):1-3.  
Pan Yongcheng. Analysis of inner flow field characteristics of a control valve based on CFD [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2011,39(1):1-3.
- [9] John R W, Darren M D, Egidio M. An advanced engine thermal management system; nonlinear control and test [J]. Transactions on mechatronics, 2005,10(2):210-220.
- [10] 崔艳伟,宋希庚. 某16缸柴油机冷却系统一维与三维联合仿真[J]. 内燃机与动力装置,2012,(6):26-33.  
Cui Yanwei, Song Xigeng. One-dimensional and three-dimensional co-simulation of cooling system in a 16-cylinder diesel engine [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2012,(6):26-33.
- [11] 石娟. 阀内三维流动与启闭过程的数值模拟及分析[J]. 上海理工大学学报,2005,27(6):499-501.  
Shi Juan. The three dimensional flow in the valve with the opening and closing process of numerical simulation and analysis [J]. Journal of Shanghai University of Science and Technology, 2005,27(6):499-501
- [12] 于秀敏,陈海波,等. 发动机冷却系统中流动与传热问题数值模拟进展[J]. 机械工程学报,2008,44(10):79-82.  
Yu Xiumin, Chen Haibo, et al. Development of numerical simulation on flow and heat transfer in internal combustion engine cooling system [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008,44(10):79-82

(责任编辑 王卫勋)