基于多领域协同仿真的动力装置动态特性研究

Research on dynamic characteristics for Powertrain based on Multi-Domain Collaborative Simulation

韩恺 赵长禄 张付军 高思远

(北京理工大学机械与车辆学院)

摘　要:　在对动力装置进行参数解耦分析的基础上，本文采用不同版本的 GT-Suite 软件包的不同模块分别建立了发动机模型、传动装置模型、液流系统模型和冷却空气系统模型等。并利用基于 HLA/RTI 技术的多领域协同仿真方法重点研究了动力装置动态过程中的功率流与热流之间的参数影响规律。结果充分证明名动力装置系统匹配分析的重要性和多领域协同仿真的有效性。

关键词:　动力装置; 多领域协同; GT-Suite; 协同仿真;

Abstract: On the basis of research on the parameters decoupling analysis of powertrain, subsystem models of powertrain, which include engine model, transmission model, liquation system model, cooling air system model and so on, are developed by utilizing different modules of GT-Sutie software packages in this paper. With the method of Multi-Domain Collaborative Simulation HLA/RTI based, System parameter matching between power current and thermal current of powertrain based on dynamic process is investigated. Results demonstrate that system matching analysis of powertrain is important, and Multi-Domain Collaborative Simulation is efficiently.

Key words: Powertrain; Multi-Domain Collaboration; GT-Sutie; Collaborative Simulation

1 引言

随着车辆综合性能的不断提高，动力舱体积功率迅速增加，对包含了发动机、传动系统和辅助系统的车辆动力装置体积和性能提出了更高的要求，更多先进技术的采用使得动力装置各系统之间机械、热、电、液压与控制等方面的相互作用不断增加，动力装置各子系统或部件之间呈现复杂的动态性和强耦合性。因此，在动力装置设计和分析过程中，仅仅进行部件级的设计分析是不够的，必须进行系统级匹配分析和优化设计，其目的是不求局部最先进，而求整体优化，满足动力装置总体性能要求。

但是，由于车辆动力装置各子系统或部件都属于不同的学科领域，整个设计过程涉及性能匹配、流体传热、结构分析、动力学计算等多个技术领域，建模工具和仿真分析手段种类繁多，并能产生数量庞大、种类繁多、类型不一的数据信息。而且，在每个设计阶段，需要复杂程度不同的仿真模

型以及相应的仿真工具，为了能够综合考虑动力装置各子系统之间的相互影响以及对车辆总体性能的影响，实现在整车环境下的动力装置综合匹配和系统优化，国外在进行车辆仿真设计时，都要根据车辆的物理逻辑，形成部件、子系统、系统等多层次结构，并分别进行模块化建模，再用不同的接口技术，如：DLL(Dynamic Link Library)、COM(Common Object Model)和 CORBA(Common Object Request Broker Architechture)等中间件技术[1][2]，实现基于协同仿真的系统模拟分析[3]。由于采用了模块化建模方法，因此，在保证输入和输出接口不变的情况下，可以方便地实现系统中某个部件或子系统模型的互换，而不用对整个系统的模型进行修改，这样极大程度地提高了整个动力装置模型对不同设计阶段的适应能力[4]。

随着计算机技术的进一步发展，仿真工具也有了很大变化。国外采用同一程序语言开发的软件包括了能够模拟发动机、变速箱、车辆、冷却系统等各子系统的功能模块，方便了动力装置的系统匹配和仿真分析。在同一仿真环境下，采用不同功能模块建立的各子系统仿真模型，可以实现直接耦合仿真，可交互参数不受限制，能够充分考虑瞬态工况下各子系统之间的相互影响，进而提高整个系统模型的计算精度。例如，CDAJ 公司的 GT-Suite 软件包在整个汽车设计过程中，可以利用不同的模块建立包括发动机模型、冷却系统、传动系统和整车模型、轴系动力学模型、供油系统动力学模型和燃油系统模型等不同系统，而且能够方便地实现各系统之间的耦合[5][6]。

但是，在现有的类似 GT-Suite 多领域仿真平台下进行动力装置匹配仿真，由于软件模块的不断升级，各版本之间的不兼容性，造成各子系统模型无法重用。同时，在同一仿真环境下建立的动力装置耦合模型包含了不同的循环回路，如发动机气路、冷却水路、冷却空气路等，由于不同循环回路物理特性的差别，需要采用不同的求解方式，致使整个模型的计算收敛速度变慢。此外，整个模型的建立对设计人员也提出了更高的要求。

因此，本文利用 HLA/RTI 技术实现动力装置的多领域协同仿真。在此基础上，通过对动力装置的参数解耦分析和模块化建模，构建动力装置动态集成仿真系统，并进行车辆加速过程中的动力装置动态特性分析。重点通过研究动态过程中动力装置功率流与热流之间的系统参数匹配，体现动力装置系统匹配分析的重要性，并试图证明该多领域协同仿真方法的有效性，并可推广到其他方面的动力装置系统匹配研究。

2 动力装置仿真模型

2.1 动力装置参数关系模型

为了实现动力装置的模块化建模和层次化分析，更好地研究各系统之间的参数影响关系，需要打破传统组成的物理界限，按照学科内涵和功能对动力装置进行参数和模型解耦分析。如图 1 所示，为动力装置参数关系模型。限于篇幅，本文对动力装置各子系统进行了适当的合并，形成了发动机模型（包括增压器和进、排气系统）、传动装置模型（包括整车模型）、液流系统模型（包括中冷器）

和冷却空气系统模型等四个模型。

根据参数关系模型中的箭头指向可以确定四个模型各自的输入参数和输出参数。这些输入参数和输出参数将作为各仿真模型之间的交互数据。同时，按照动力装置参数关系模型分别建立上述四个子系统仿真模型。

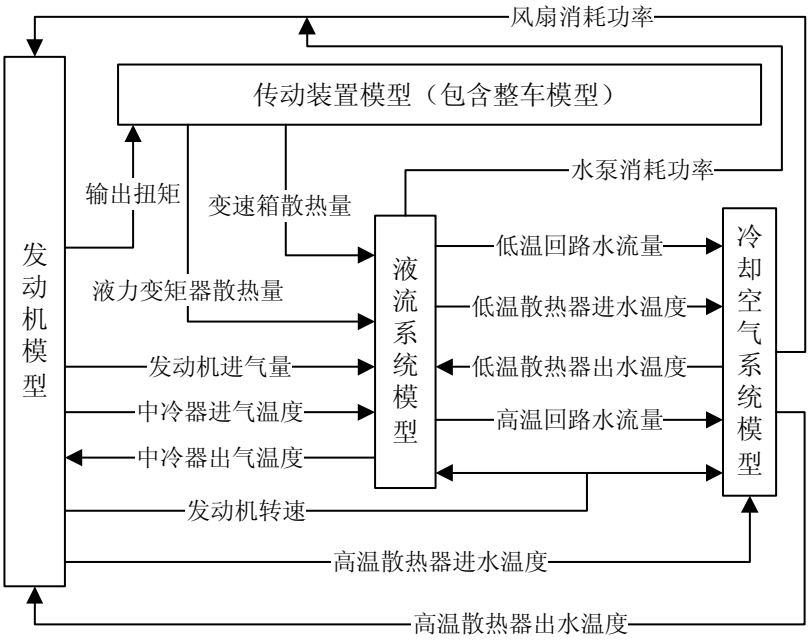

图 1 动力装置参数关系模型

2.2 发动机模型

发动机模型的主要功能是根据加速工况下车速的需求，计算整车所需的驱动力矩，该驱动力矩是扣除风扇、水泵等附件功耗后的净输出扭矩。同时还要计算在此过程中发动机的散热量。如图 2 所示，为利用 GT-Power（GT-Suite6.1.0 版本）软件建立的八缸涡轮增压发动机瞬态循环模型。发动机外特性喷油量按照试验数据给定，并利用缸压试验数据校核发动机的燃烧模型。此外，该模型中还包含了 GT-Power 软件提供的 S-Function 模块以及输入输出参数信号，用以实现各仿真模型之间的参数传递。其它模型遵循同样的建模原则，以下不

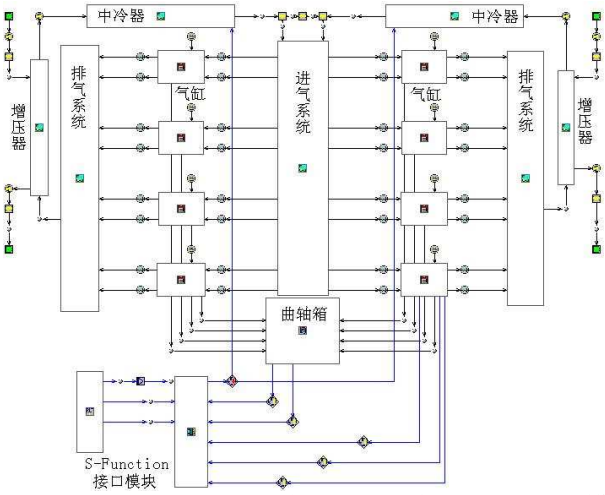

图 2 利用 GT-Power 软件建立的发动机的瞬态循环模型

再敷述。

2.3 传动装置和整车模型

传动装置（包括整车）仿真模型的主要功能是计算整车的加速特性，以及液力变矩器和变速箱的散热量。该模型包括液力变矩器模型、变速箱模型和整车模型和路面阻力模型等，如图 3 所示，为利用 GT-Drive（GT-Suite6.1.0 版本）建立的传动装置（包括整车）的仿真模型。

该传动装置模型需要给出涡轮和泵轮的转动惯量，并根据车速和变速箱挡位实现液力变矩器的闭锁控制。液力变矩器的散热量直接根据效率和闭锁情况计算得到。液力变矩器的特性由试验获得。并根据车速建立换挡策略模型实现变速箱的换挡控制。变速箱的散热量直接根据挡位和效率计算得到。

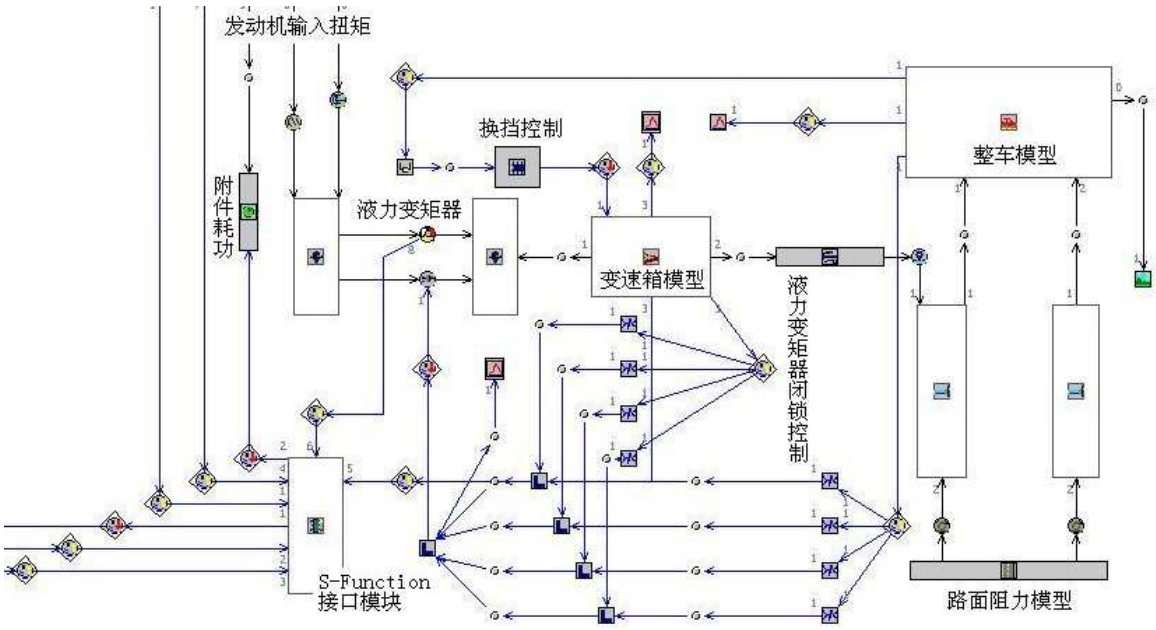

图 3 利用 GT-Drive 建立的传动装置（包含整车）仿真模型

2.4 液流系统模型

整个动力装置液流系统采用高、低温双泵双循环冷却方案。液流系统仿真模型的主要功能是计算液流系统高、低温循环回路的冷却水流量和两个水泵消耗的功率，并通过建立中冷器和传动油换热器的模型计算中冷器出气温度（即发动机进气温度）、传动油换热量，以及低温散热器进水温度（即传动油换热器的出

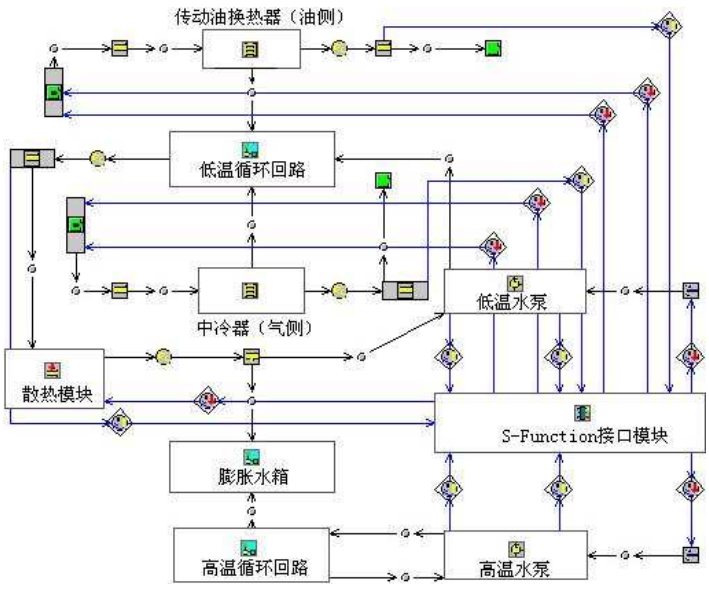

图 4 利用 GT-Cool 建立的液流系统仿真模型

水温度)。在建立液流系统物理仿真模型时，高、低温循环回路的系统阻力和两个水泵的特性曲线都由试验获得。此外，还需要中冷器和传动油换热器的传热特性数据，这两个部件的传热特性也是通过部件试验得到的试验数据。图 4 为利用 GT-Cool（GT-Suite6.1.0 版本）建立的液流系统仿真模型。

2.5 冷却空气系统模型

根据动力舱的结构布局，利用 GT-Suite（6.2.0 版本）中的 Cool3D 模块所提供的流动空间、散热器、风扇、障碍物等组件建立动力舱和冷却风道(包括进排气百叶窗、散热器、风扇和动力装置等)的三维模型。并选择合适的离散长度离散成大量的小块体积，自动生成 GT-Cool 一维仿真模型。

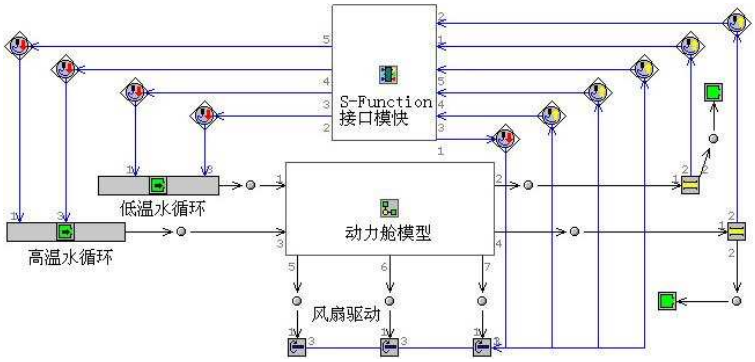

图 5 利用 Cool3D 和 GT-Cool 建立的冷却空气系统模型

最后与风扇驱动模块和高、低温水循环回路一起形成如图 5 所示的完整冷却空气系统模型。由于该冷却风道为 L 型，因此特殊风道的建模需采用边界耦合法保证流场的连续性[7]。

3 动力装置多领域协同仿真实现

3.1 仿真系统的建立

仿真模型准备完毕后，首先，根据动力装置参数关系模型配置各仿真模型之间的交互参数，建立各仿真模型所对应的对象信息模型，图 6 为 XML（可扩展性标识语言）格式的发动机模型所对应的对象信息模型。HLA 就是通过 RTI 把各个模型的对象信息分发到分布在不同计算机上的仿真模型中，实现模型之间的数据传递和共享，以及各个模型之间输入、输出参数的一一映射。然后，利用开发的 MATLAB-RTI 接口并借助 GT-Suite 软件提供的 S-Function 模块实现各异构仿真模型与 RTI 之间的参数传递和命令交互。通过开发的仿真运行管理器创建动力装置多领域协同仿真系统，并把分布在不同计算机上的仿真模型加入到该仿真系统中，完成整个动态协同仿真系统建立[8]。

```
<?xml version="1.0" encoding="gb2312" ?>
- <DATA>
  - <INPUTPARAMETER count="5">
      <PARAMETERINFO parameterid="1" member="液流系统成员" fomclass="Liquor" parameter="中冷后温度"
        subscribename="TempAfterCold" InitialValue="323.000000" />
      <PARAMETERINFO parameterid="2" member="液流系统成员" fomclass="Liquor" parameter="低温水泵耗功"
        subscribename="LowWork" InitialValue="3000.000000" />
      <PARAMETERINFO parameterid="3" member="冷却空气系统成员" fomclass="ColdingAir" parameter="风扇耗功"
        subscribename="FanWork" InitialValue="60000.000000" />
      <PARAMETERINFO parameterid="5" member="冷却空气系统成员" fomclass="ColdingAir" parameter="高温散热器出口温度"
        subscribename="HighTemp" InitialValue="350.000000" />
    </INPUTPARAMETER>
  - <OUTPUTPARAMETER count="5" OutCount="">
      <PARAMETERINFO parameterid="1" member="发动机成员" fomclass="EngineHeat" parameter="发动机转速"
        subscribename="Speed" />
      <PARAMETERINFO parameterid="2" member="发动机成员" fomclass="EngineHeat" parameter="发动机进气量"
        subscribename="IncomingGas" />
      <PARAMETERINFO parameterid="3" member="发动机成员" fomclass="EngineHeat" parameter="压气机出口温度"
        subscribename="ExportingTep" />
      <PARAMETERINFO parameterid="4" member="发动机成员" fomclass="EngineHeat" parameter="发动机冷却水出口温度"
        subscribename="ColdingTep" />
      <PARAMETERINFO parameterid="5" member="发动机成员" fomclass="EngineHeat" parameter="发动机扭矩"
        subscribename="Moment" />
    </OUTPUTPARAMETER>
</DATA>
```

图 6 发动机模型输入和输出参数的对象信息

3.2 仿真系统的运行

为了充分反映基于加速过程的动力装置整体性能的动态特性和参数影响规律，必须要求各个仿真模型同步推进。根据仿真目的和仿真模型的特性，四个仿真模型的仿真时间步长都设置为 0.01s，

整个仿真时间为 80s。每个模型仿真计算的第一步是按照给定的输入参数的初始值进行计算的，第一步计算完成之后，各模型的输入参数即变为其他模型的输出参数，如此循环推进，完成整个仿真系统的计算。图 7 为动力装置仿真系统运行过程和仿真结果的动态可视化界面。从图中各仿真模型的运行结果来看，整个动力装置动态集成仿真系统实现了仿真时间的同步推进。

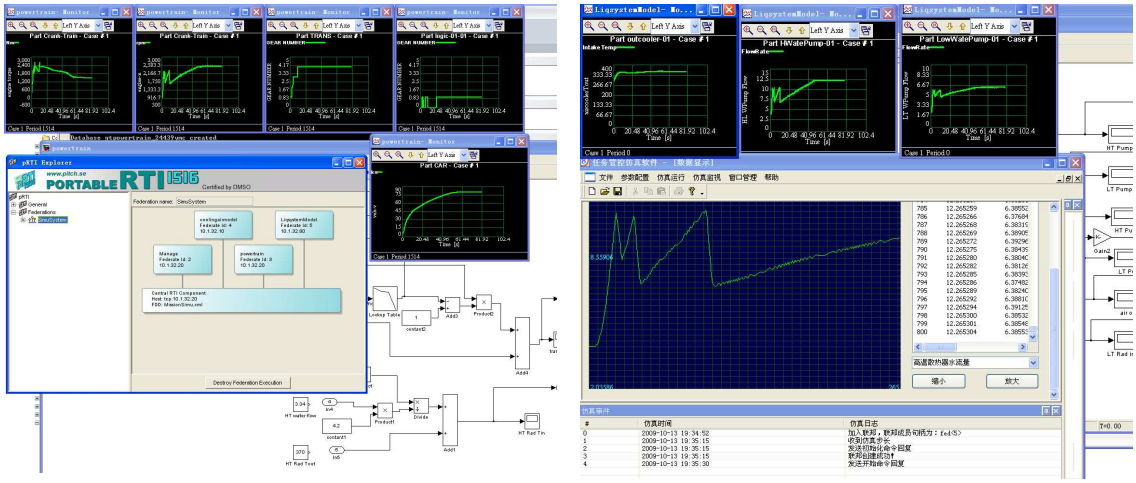

图 7 仿真系统的运行及结果可视化

4 动力装置动态特性分析

为了体现动力装置集成设计系统匹配分析的重要性，本文把基于加速过程的功率流和热流的系统匹配结果（以下简称“系统匹配”）与单独的功率流计算结果（以下简称“单独计算”）进行对比分析，研究动力装置各系统参数之间的相互影响。

在进行系统匹配分析时，由于考虑了风扇消耗的功率，致使整车驱动功率相比单独计算有了明显的变化，如图 8 所示。发动机到达标定功率点的时间相差了 16s 左右，在此之前整车的驱动功率都明显低于单独计算的结果。这种差异使得整车加速性有了明显降低， 0~32km 加速比单独的功率计算慢了 1s 左右的时间；换挡时刻相比单独计算也有所滞后，二挡换三挡滞后 0.6s 左右，三挡换四挡滞后 1.9s 左右。图 10 给出了车速和变速箱挡位的对比结果。

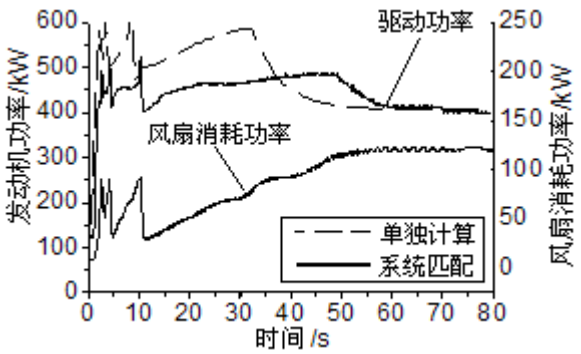

图 8 整车驱动功率和风扇消耗功率与单独的功率流计算的对比

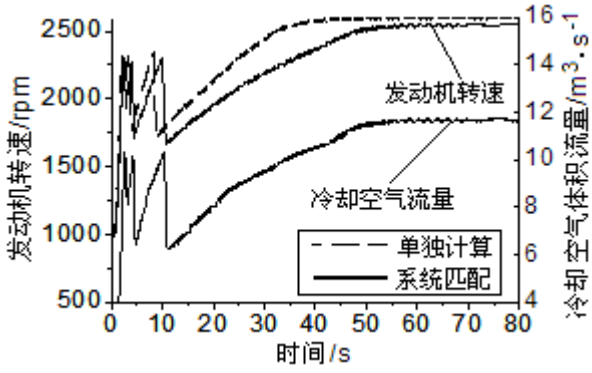

图 9 发动机转速和冷却空气流量与单独的功率流计算的对比

在进行系统匹配分析时，由于发动机到达标定功率点的时间相比单独计算滞后了 16s 左右，因此发动机达到稳定转速的时间也有了明显滞后，这直接反映在达到最大车速所用时间的差异上（此时液力变矩器处在闭锁状态）。从图 10 可以看出，相比单独计算，系统匹配达到最大车速所用时间增加了 10.4s 左右。当发动机到达标定功率点后，为了平衡外界阻力，发动机转速继续增加，最终发动机平衡在调速特性线的某个转速下。由于当发动机转速稳定时，系统匹配的发动机实际输出功率要比单独计算的发动机实际输出功率大，所以两者的最高车速相差 2.2km/hr。

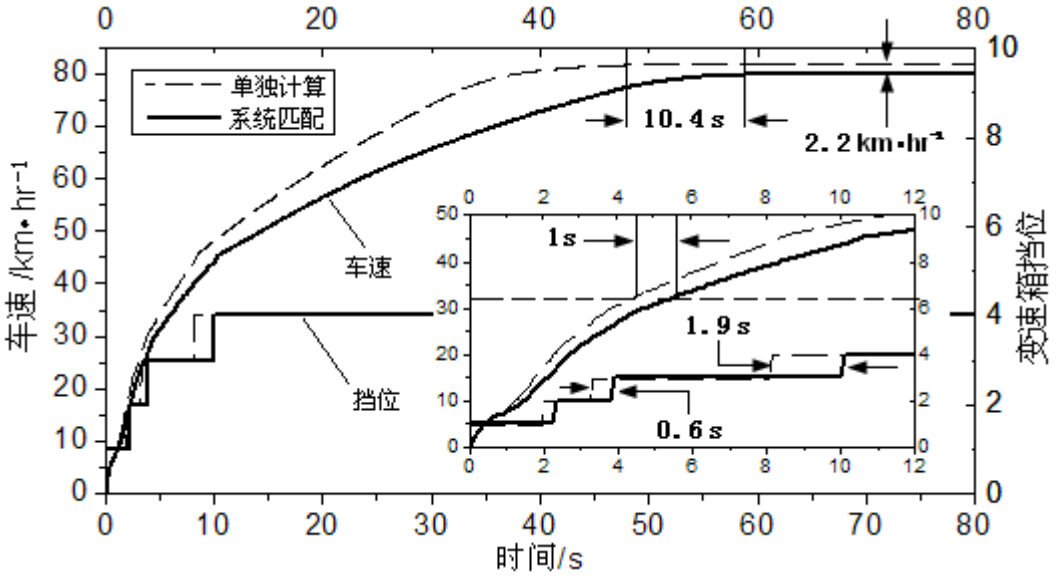

图 10 车速和变速箱挡位与单独的功率流计算的对比

图 11 给出了不同环境温度下传动装置散热量和液力变矩器闭锁状态的计算结果。闭锁信号为“0”时，液力变矩器解锁，闭锁信号为“1”时，液力变矩器闭锁。传动装置散热量包含液力变矩器发热量和变速箱传动效率损失两部分，从图 11 可以明显地看出，当液力变矩器解锁时，传动装置散热量急剧增加。当变速箱挡位从三挡升为四挡时，根据挡位和车速液力变矩器解锁，此时传动装置散热量基本保持在 140kW 左右，而当车速升高到一定程度时，液力变矩器闭锁，传动装置散热量开始减少，当达到最大车速时，传动装置散热量仅有 95kW 左右。因此，在传动装置机油换热器设计时，要充分考虑这种动态变化，选择合理的设计工况点。图 12 给出了冷却空气系统风扇进口处的压

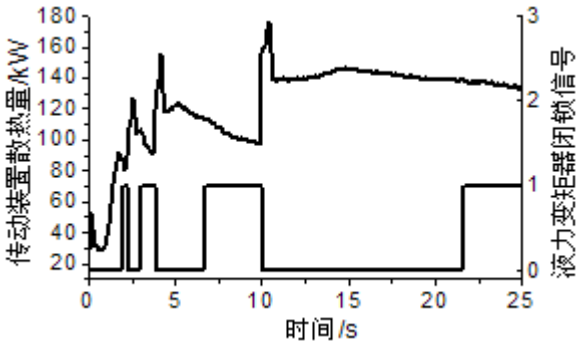

图 11 传动装置散热量与液力变矩器闭锁信号对比分析

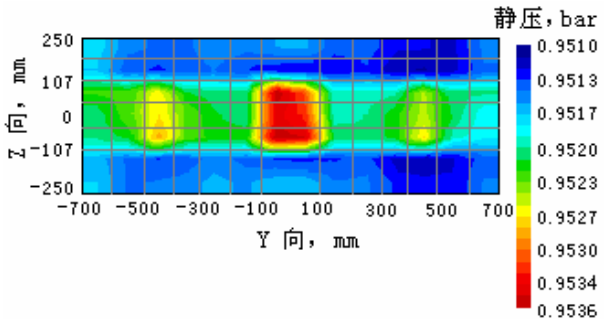

图 12 冷却空气系统风扇入口处的压力云图

力云图，压力云图也反映了三个相同特性的风扇并联后，由于位置不同，其运行特性并不完全相同。

5 结论

本文采用不同版本的 GT-Suite 软件包的不同模块建立了动力装置各子系统的仿真模型，并利用基于 HLA/RTI 技术的多领域协同仿真方法实现了动力装置加速过程的动态协同仿真，重点研究了动力装置动态过程中的功率流与热流之间的参数影响规律，得到如下结论：

（1）计算结果充分体现了动力装置能量传递过程中的动态特征，验证了动力装置动态协同仿真系统的有效性和重要性。

（2）由于充分考虑了车辆加速过程中风扇等辅助部件消耗的功率，使得整个加速过程动力装置的动态特性更加真实准确。

（3）在传动装置机油换热器设计时，要充分考虑由于液力变矩器闭锁带来的传动散热量的较大变化，选择合理的设计工况点，并通过可调功能减小冷却系统的体积和功耗。

6 参考文献

[1] E. Loibner, J. Krammer. Integrated 1-D Tools for Modeling Vehicle Thermal Management System[C]. SAE paper 2004-01-3406,2004.

[2] W.Puntigam, K. Schierl, J.Hager. Thermal Management Simulations by Coupling of Different Software Packages to a Comprehensive System[C]. SAE paper 2005-01-2061,2005.

[3]D. N. Assanis, A. Atreya, C. Borgnakke, W. Bryzik. Development of a modular, transient, multi-cylinder diesel engine simulation for system performance and vibration studies[C]. In Proceedings of ASME-ICE Spring Technical Conference, volume 28-1, Fort Collins, CO, April 1997.

[4]Zachary J.Rubin, Scott A.Munns. The Development of Vehicular Powertrain System Modeling Methodologies: Philosophy and Implementation[C].SAE 971089.

[5]Thomas Morel, Rifat Keribar. ‘Virtual Engine/Powertrain/Vehicle’ Simulation Tool Solves Complex Interacting System Issues[R]. SAE paper 2003-01-0372,2003.

[6]James F. Sinnamon. Co-Simulation Analysis of Transient Response and Control for Engines with Variable Valvetrains.SAE Paper 2007-01-1283,2007.

[7]韩恺,赵长禄,张付军.装甲车辆冷却风道的一维 CFD 仿真[J].车辆与动力技术,2010(1):46-50.

[8]韩恺, 赵长禄,朱秀娟,高思远.动力装置冷却系统分布式仿真的研究与实现[J].汽车工程,2009,31(10): 952－956.