

# LMS航空发动机仿真技术 机电液一体化解决方案

## Mechanic-Electronic-Hydraulic Integration Solution of LMS for Aeroengine Simulation

LMS 北京技术有限公司 张钊



张钊

毕业于清华大学汽车工程系, 现任 LMS 北京技术有限公司一维仿真产品技术经理。在流体控制、热力过程、动力传动等专业方向具有扎实的知识背景, 发表过发动机热管理、整车能量管理、HIL 系统集成建模等专业文章多篇; 在担任 LMS 公司一维产品技术经理期间, 参与过多项重大专业课题, 包括航空制动系统、航天伺服系统、车辆节能减排、直喷发动机 HIL 应用等。

LMS Imagine.Lab AMESim 为用户提供了一个完整的一维仿真平台对多领域智能系统进行建模和分析, 并预测其多学科专业耦合性能。而

LMS Imagine.Lab AMESim 航空发动机装置解决方案为燃油系统(计量单元、泵、喷嘴、起动机及换热器等)及其控制系统、滑油系统的设计和产业化提供支持, 同样也用于发动机控制系统的设计和优化。该方案帮助工程师设计用于航空发动机的满足市场特定重力加速度要求以及增压供油燃油系统, 并进行燃油系统的热负荷分析以提高燃油系统的可靠性。

且是市场上集成基于模型的系统建模的这一先进开发技术最成熟的商业平台。现已广泛应用于全球领先的航空、航天、汽车、重工、工程机械等先进制造业。

LMS Imagine.Lab AMESim 航空发动机装置解决方案为燃油系统(计量单元、泵、喷嘴、起动机及换热器等)及其控制系统、滑油系统的设计和产业化提供支持, 同样也用于发动机控制系统的设计和优化。该方案帮助工程师设计用于航空发动机的满足市场特定重力加速度要求以及增压供油燃油系统, 并进行燃油系统的热负荷分析以提高燃油系统的可靠性。

LMS Imagine.Lab AMESim 航空发动机装置解决方案基于 LMS Imagine.Lab AMESim 多领域系统仿真的方法以及专用的热及液压方面的应用库。这些库中包含各种可配置的元件(计量活门、调压活门等), 通过这些元件的相互连接可以构建描述发动机装置液压系统特性的模型, 为发动机装置设计的工程师提供控制和配置航空发动机相关的元件和系统外部设计的能力。

基于对各种显著特征几何形状元件的试验结果, 这些详细的模型可以适合任何新的几何形状和功能要求的元件。应用库和物理元件之间的直接耦合和对应使得在项目进

行的任何阶段可以方便地对燃油系统的单个元件或者整个集成的系统进行特性分析。

标准和专用元件的航空流体数据库完全基于试验结果以确保航空发动机设计所要求模型必要的精确性和可靠性。LMS Imagine.Lab AMESim 航空发动机装置解决方案最终帮助用户在减少设计时间、减少物理试验测试次数及相关风险的同时提高产品设计的质量。

### LMS Imagine.Lab AMESim 的功能特点

该航空发动机装置解决方案具有如下功能特点：

- 高级的热液压元件模型；
- 不同建模层次的换热器模型；
- 不同工况下的压力 / 流量 / 温度分布计算；
- 完整系统中直接的压力和温度耦合；
- 高级的分析工具(线性分析、设计探索)；
- 标准和专用元件的流体数据库。

LMS Imagine.Lab AMESim 航空发动机装置解决方案的主要益处如下：

- (1) 可以精确地预言在瞬态压力和温度变化条件下燃油系统的动态特性。
- (2) 从元件到包含控制策略的完整系统的多尺度评估。
- (3) 通过快速的 CPU 计算大量赢得宝贵的开发时间。

### LMS Imagine.Lab AMESim 航空发动机装置解决方案的应用

#### 1 航空发动机控制系统

航空发动机控制系统为机械液压控制系统。其主要是通过控制航空发动机燃油流量为主来实现对发

动机工作状态的控制,因此,又被称为燃油调节系统。其中含有大量的机械液压元件,一般包括油泵、测量元件、液压放大器(滑阀、喷嘴挡板阀)液压执行元件(液压缸、液压马达)及液压动力元件。这些燃油调

节系统专用的液压元部件结构形式多种多样,功能种类繁多。

由于集中了大量的非标专用的液压元器件,这类液压元器件的建模和仿真分析可以直接采用 LMS Imagine.Lab AMESim 的液压方面的

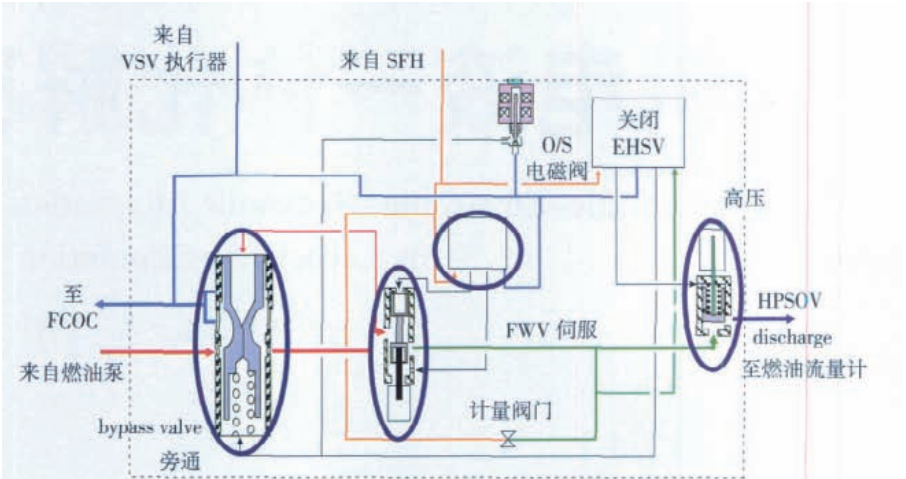


图1 某燃油系统计量单元FMU系统结构

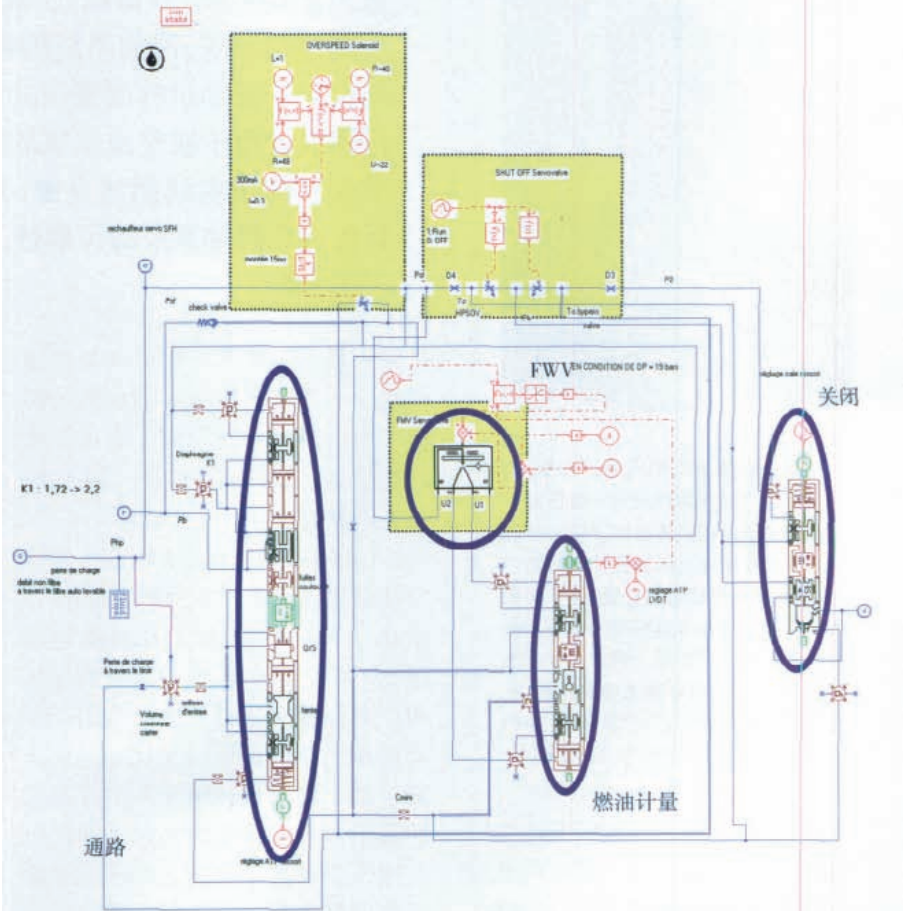


图2 某燃油系统计量单元FMU在AMESim建立的模型

元件设计库,包括液压元件设计库和热液压元件设计库。

图1、图2为通过AMESim热液压元件设计库构建的燃油系统中的几个专用阀的仿真模型,包括旁通阀(Bypass Valve)、高压关闭阀(Shut off Valve)、计量阀(Fuel Metering Valve)等。图3为某燃油系统计量单元FMU仿真结果和测量结果的对比曲线。

通过将LMS Imagine.Lab AMESim中热液压库相关的模型和上述通过热液压元件设计库建立的专用阀的仿真模型相连接建立了某型航空发动机燃油系统的完整热模型。该模型中除了上述的各种专用阀模型之外,还包括齿轮泵模型、油箱模型、软管模型、热交换器模型、电磁阀模型、控制部分模型等。

## 2 航空发动机滑油系统模型

通过LMS Imagine.Lab AMESim的液压库、液阻库和热液压库可以方便地建立航空发动机滑油系统模型。如图4所示为某型燃气发动机滑油系统的模型。通过模型,可以进行下述各种分析:

- 压力/流动分布;
- 温度瞬变;
- 工作循环;
- 冷起动;
- 不同种类油物性的影响等。

## LMS Imagine.Lab AMESim 提高航空航天发动机建模效率

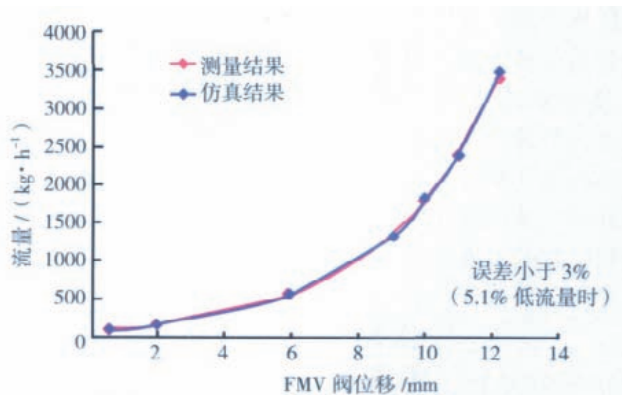


图3 为某燃油系统计量单元FMU仿真结果和测量结果对比曲线

在现代的燃油调节系统中,越来越多地采用电子控制器,例如全权限数字电子控制(FADEC)。在FADEC控制中,其核心就是发动机电子控制系统ECU。对于此类发动机燃调系统,除了面临传统的机械液压元件及系统设计的技术难点,电子控制系统的设计开发也是关键问题。在传统的设计流程中,负责物理系统详细设计的工程师和负责控制系统设计的工程师之间通常缺乏一个有效的连接。在硬件物理成形之前如何来验证控制系统?答案就是建立一个物理系统的实时仿真并将控制系统的硬件和软件集成到该仿真中来。

LMS Imagine.Lab AMESim实时仿真解决方案解决了所缺乏的连接问题,它提供了一个将高可靠性的物理系统模型直接转换成经验证的实时仿真模型的独一无二的功能。从而可以实现两方面的功能。一方面在设计控制对象的同时进行控制器的设计。这样做可以在设计的早期就进行控制器的集成,更好地考虑控制器和控制对象之间的相互影响,优化整个航空刹车控制系统。另一方面采用快速控制器成形的方法。即可以在被控制对象物理样机试制出来之前,在虚拟的控制对象模型基础上,进行控制器的设计、测试和标定。从而从整体上缩短开发周期和降低成本。

控制器的快速成形包括3个阶段:

(1)在功能设计阶段,通过结合控制器和被控对象的模型来验证控制器的功能。此时需要用到控制器的模型和被控对象的离线模型。

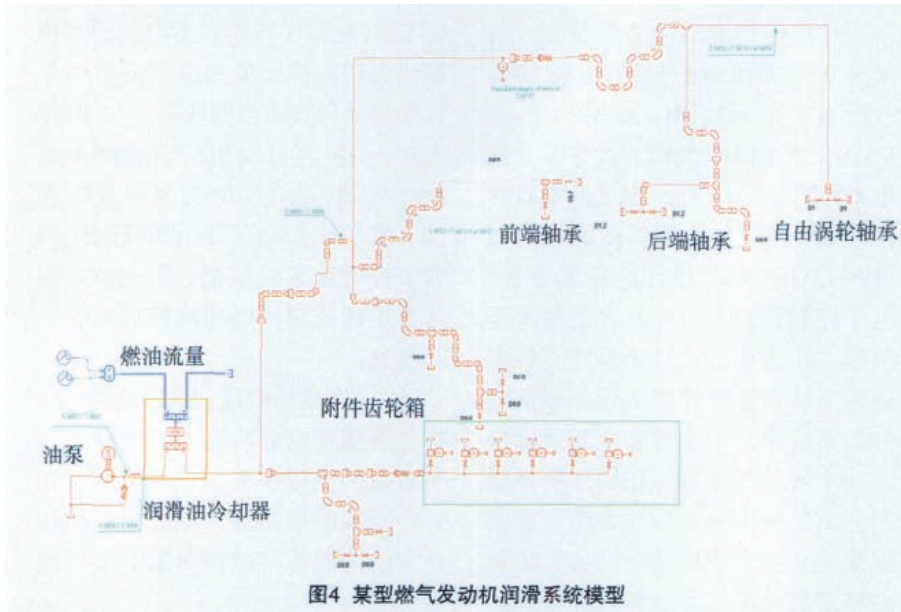
(2)在植入阶

段,通过软件在环仿真将控制器的控制代码和被控对象的虚拟模型结合起来测试和验证控制代码。有两种方法:一种在计算机仿真软件中进行;另一种是在实时仿真平台中进行。前一种方法需要用到控制代码和被控对象离线模型;后一种方法需要用到控制代码和被控对象的实时模型。

(3)在成形阶段,通过硬件在环将已经物理成形的真实控制器和被控对象的虚拟模型结合起来测试和标定真实的控制器。此时需要用到真实的控制器和被控对象的实时模型。

归纳起来说,要实现上述3个阶段的控制器快速成形,需要用到:控制器模型和控制代码、被控对象的离线模型和实时模型、连接真实控制器和被控对象实时模型的实时仿真平台。众所周知, MATLAB/Simulink非常适合进行控制器的建模,甚至可以生成控制代码;但是在MATLAB/Simulink中非常难建立被控对象的离线模型,特别是对于航空发动机燃调系统来说,被控对象涉及到机械、液压、电动等多学科专业的内容,这正是LMS Imagine.Lab AMESim航空发动机装置解决方案的特长。对于被控对象的实时模型,传统的做法是需要专业的编程人员在实时仿真平台上通过编程来重新建立实时模型,过程非常复杂繁琐。也就是说需要重复进行两种模型的构建:即离线模型和实时模型。正是为了解决整个问题,LMS Imagine.Lab AMESim提供了实施代码生成功能,即一旦通过LMS Imagine.Lab AMESim航空发动机装置建立起被控对象的离线模型,可以利用LMS Imagine.Lab AMESim的实时代码生成功能,生成指定实时仿真平台所需要的实时模型,从而避免了重复建模的工作,大大提高了建模效率。

LMS Imagine.Lab AMESim实时



仿真功能的特点:

- 从高可靠性模型到实时 HIL 仿真简单有效的方法。
- 通过物理系统的实时模型来测试成形或者硬件控制器。
- 在同一个平台上从高可靠性的仿真模型开发经验证的实时模型。
- 高效的模型简化工具。
- 支持多种实时仿真平台: xPC Target, dSPACE, RT-Lab, ADI ...。
- 通过采用显性定步长积分算法来评估数值稳定性和精确性。
- 采用 Mathworks RTW 技术来产生实时代码。
- 使得在开发周期中尽可能早的阶段实现集成。
- 降低项目延迟和成本增加的风险。

### LMS Imagine.Lab AMESim 引气系统解决方案

LMS Imagine.Lab AMESim 引气系统解决方案帮助工程师优化发动机引气系统,包括引气系统管理、实效分析、发动机和引气系统的匹配、飞行作业时的引气消耗等。

LMS Imagine.Lab AMESim 发动机引气系统解决方案有助于设计包含在以发动机引气为起源的各种系

统,以发动机压气机引气为气源的典型系统包括:

- 机翼和发动机进气部件的除冰系统;
- 环境控制系统和座舱增压控制系统;
- 燃油油箱增压系统、液压油箱增压系统;
- 气动作动系统(推力反向器等)。

该方案可以方便处理高复杂系统并考虑动态条件下(温度和压力变化条件下)的多种参数(温度、湿度、压力及压比的变化)。有助于航空工程师设计高效的、重量轻体积小以及能耗得到优化的产品。

LMS Imagine.Lab AMESim 发动机引气系统解决方案基于 LMS Imagine.Lab AMESim 多领域系统仿真的方法以及专用的热及气动方面的应用库。这些库中包含各种可配置的元件(减压活门、换热器、涡轮机、压气机等),通过这些元件的相互连接可以构建描述发动机引气系统特性的模型,为发动机引气系统设计的工程师提供控制和配置航空发动机引气系统相关的元件和系统外部设计的能力。

基于 LMS Imagine.Lab AMESim 基本元素的理念, LMS

Imagine.Lab AMESim 发动机引气系统解决方案提供了对引气系统中各种专用气动活门建模的气动元件设计库。该库是一个难以置信的强大的和独一无二的工具,包含了任何气动系统的基本结构单元模块,可以对各种结构形式的气动活门进行详细的动态建模。该库通过采用结构单元的细分来处理气动阀门的多样性,使得工程师可以用最少的图标和单元模块来构建最多的工程系统模型。通过该库,在气动元件的设计过程中可以节省数月的时间并大量地减少物理成形的次数。

### LMS Imagine.Lab AMESim 发动机引气系统解决方案的功能特点

LMS Imagine.Lab AMESim 发动机引气系统解决方案的功能特点如下:

- 气动和热气动应用库包含各种气动部件:各种气阀、涡轮/压缩机、换热器和作动器;
- 理想、半理想和实际气体均可处理;
- 不同建模层次的换热器;
- 气动元件建模的基本元素理念;
- 和控制系统模型(Simulink)的无缝接口;
- 试验规划/优化/鲁棒性分析。

### LMS Imagine.Lab AMESim 发动机引气系统解决方案的主要益处

LMS Imagine.Lab AMESim 发动机引气系统解决方案的主要益处如下:

- 精确计算多种参数(温度、质量流量、湿度、压力及气体成分的变化);
- 完整系统能耗的全局优化;

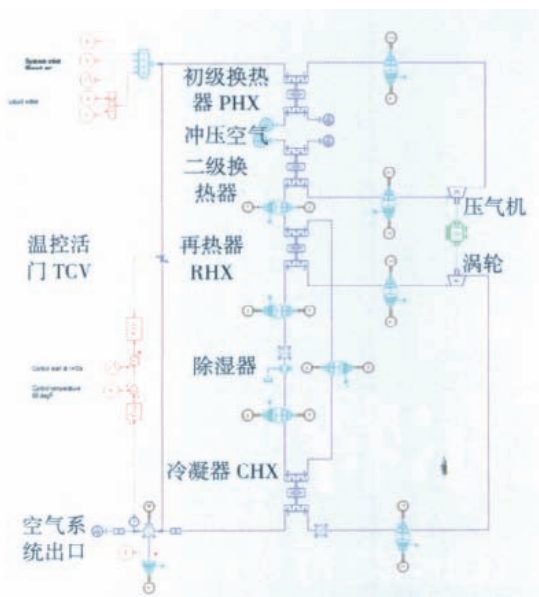


图5 某型商用飞机空气循环系统模型

- 发动机和引气系统的匹配;
- 控制策略系统开发。

## LMS Imagine.Lab AMESim 发动机引气系统解决方案的应用

### 1 引气系统部件建模

通过 LMS Imagine.Lab AMESim 的气动元件设计库建立引气系统中的调压和关断活门。主要用于控制从发动机引出的高压气体，是引气系统的核心部件。通过该模型可以分析压力控制系统的工作特性，减少地面和飞行的测试次数。

### 2 引气系统建模

通过 LMS Imagine.Lab AMESim 的气动库和元件设计库建立引气系统模型。通过该模型可以进行控制策略分析。

### 3 翼前沿除冰系统建模

通过 LMS Imagine.Lab AMESim 的热气动库可以方便建立各种除冰系统模型，例如发动机引气的气动除冰系统、发动机驱动泵气动除冰系统和热空气防冰系统模型。

## 4 环境控制系统——空气循环系统

通过 LMS Imagine.Lab AMESim 的混合气体库、湿空气库可以方便地对环控的空气循环系统进行建模。图 5 为某型商用飞机的空气循环系统。

发动机引气通过一级换热器，再经过水分后进入到压缩机中，压缩机出口的气体进入到二级换热器中被强迫空气再次冷却，经过水分后进入再热换热器。在再热换热器中与透平进口气体进行换热。换热后的气体经冷凝器和水分离后，进入再热换热器加热，再进入透平。透平出口的气体先进入冷凝器，作为冷凝器的冷却气体，换热后再与发动机引气混合后，送入机舱。

通过一个 PID 控制的温度控制阀来调节送入机舱的空气温度。该模型仿真的目的就是寻找合适的 PID 控制参数。

环控系统具有很强的非线性(如图 6)，因此 PID 参数的选取对于温度控制的稳定性至关重要。其中绿线为温度设定值，红线表示混风阀出口的温度。仿真共分为三步，0~15s 系统稳定，15s~30s 水蒸汽被引入；

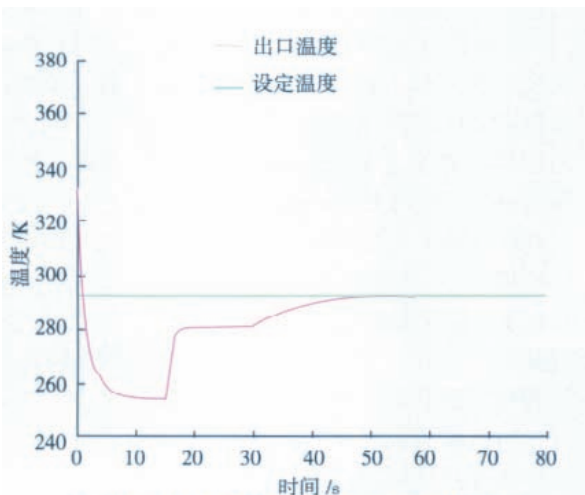


图6 环控系统温度控制设定值与仿真值对比曲线

在 30s 时 PID 控制器被激活，进行温度控制。最后出口温度稳定在了温度设定值上。

总之，LMS Imagine.Lab AMESim 模型中的元件通过代表系统中的液压、气动、电和机械性能的解析模型来描述。在 LMS Imagine.Lab AMESim 里，用户使用整套的经过验证的应用库来建立系统的仿真模型，这些应用库是由来自不同的物理领域的预先定义好的元件所组成。该软件可以建立基于物理原理的系统模型而无需完整的三维几何描述。这种方法使得 LMS Imagine.Lab AMESim 可以远在给出详细的 CAD 几何图形前模拟智能系统性能。LMS Imagine.Lab AMESim 以其丰富精确的元件库、强大的功能、多学科，使传统的机械性能开发与控制系统的联合开发成为可能，是市场上集成基于模型的系统建模的这一先进开发技术最成熟的商业平台。

## 结束语

历经 30 年的发展，LMS 国际公司现已发展成为全球航空航天、汽车、船舶、家电、工程机械、能源和其他先进制造业工程创新的合作伙伴。LMS 提供一维和三维多性能系统仿真平台、试验平台、工程咨询服务相结合的独特解决方案，被全球制造业广泛应用于系统动力学、声音品质、舒适性、耐久性、安全性、能量管理、燃油经济性和排放、流体系统、机电系统仿真等关键性能的开发和研究。LMS 已成为行业中第一个，也是唯一一个能够提供全面和独特的测试和机电系统仿真解决方案的供应商。LMS 公司的解决方案支持从概念设计到详细设计优化和物理样机验证等产品开发的各个阶段。其独特的平台战略，可以整合研发过程中必需的测试和机电一体化系统仿真技术，使制造企业获得最大的战略竞争优势。

(责编 晓立)