

乘用车整车开发中的空调系统设计和 CAE 技术应用

Design of air conditioning system of passenger vehicle and application of CAE simulation technology

王伟民 孙西峰 陈皓
(东风汽车公司技术中心 430056)

摘要: 在乘用车整车的空调系统开发过程中,随着先进的 CAD/CAE/CAM 等数字化设计技术大量引入使空调系统的设计流程出现了重大变革。特别是乘用车空调系统各个领域的 CAE 技术正在不断进化,改变了传统的经验设计方法,对提高设计质量、缩短开发周期和降低开发成本具有重要意义。本文对乘用车空调系统的设计流程以及各个不同的设计阶段中的 CAE 技术的要点进行了分析,提出了加快乘用车空调系统的设计技术进步的对策。

关键词: 乘用车 空调系统 设计流程 CAE 计算流体力学

Abstract: In the recent development of air conditioning system of passenger vehicle, design process has had important changes with introduction of advanced digital design technologies included CAD/CAE/CAM. In particular, CAE technologies of air conditioning system of passenger vehicle are constantly evolving, and changing the traditional experience design methods. It is of great importance to improve design quality, shorten development cycles and decrease development costs. In this paper, design process of passenger vehicle air conditioning system and the main points of CAE technologies in various different design phases are described, and countermeasures of speeding up technical improvement of air conditioning system design have been put forward.

Key words: Passenger vehicle, Air conditioning system, CAE, CFD

1. 引言

乘用车汽车空调系统具有制冷、取暖、除霜、除雾、空气过滤和湿度控制等功能,现代空调系统由制冷系统、温水供暖系统、通风和空气净化装置及控制系统组成,它的功能多样性和组成复杂性给空调系统设计带来了很大的难度。

乘用车的乘员舱空间狭窄,车身热工性能和密封性能较差,热湿负荷大,气流分布不均匀,要求空调系统具有良好的降温和升温性能。乘用车本身结构非常紧凑,可以提供按照空调系统的空间极为有限,不仅对空调系统的外形体积和质量要求较高,而且对其性能和选型要求也比较高。另外,空调系统一般由系统供应商按照整车厂的要求来开发和提供,因此建立完善的乘用车空调系统设计、同步开发流程和广泛应用 CAE 性能预测等先进设计技术十分重要。

2. 乘用车空调系统的设计流程^{[1],[2]}

乘用车空调系统的设计分为概念设计、详细设计、样件试制和试验验证等几个阶段。

2.1 概念设计

空调系统概念设计可定义为：与整车开发同步进行的，按设计的控制节点分段提出与之匹配空调系统的方案设想，将虚拟的方案设想通过必要的控制手段和方法变为假定的现实结果，提前模拟出未来实车状态下空调系统的效果。

在概念设计阶段、首先根据整车定位确定整车温度舒适性指标，包括冬季的升温指标和夏季的降温指标，并初步定义车身围护结构的参数。在上述基础上进行额定状态下的热负荷计算，计算的结果可以作为空调系统在额定工况下的制冷量和制热量的要求，由此可以计算出空调系统在不同工况下的风量要求。

根据制冷量可以进行压缩机、冷凝器和 HVAC 总成在额定工况下的匹配计算，得出压缩机、冷凝器和 HVAC 性能要求，根据制热量要求明确对发动机冷却系的要求。

在概念设计阶段，可以把更多的问题在设计前期以模拟计算的方式解决，以缩短设计试验周期、降低开发成本。空调系统概念设计作为适应现代汽车空调开发的比较实用和科学的方法，它的特点是：提高了工作效率，缩短了人为错误几率，确保了系统的性能匹配。

汽车空调系统的概念设计应该与整车开发同步进行，应遵循的原则：注重体现的是规范化、系统化、标准化、通用化、轻量化和模块化的设计原则。

2.2 详细设计

在详细设计阶段，根据确定的压缩机、冷凝器和 HVAC 的性能要求和整车的布置状况，进行压缩机、冷凝器和 HVAC 总成的具体设计，并逐步明确风道、出风口等周边零部件的状态，期间应对性能指标的达成进行 CAE 仿真分析和多工况下的校核，并确定可以进入样件试制阶段的产品状态。

对于压缩机，需要考虑的内容有压缩机的结构形式和排量调节方式，并根据整车的车速-发动机转速关系选择合适的压缩机排量和传动比，在此基础上要服从发动机轮系的设计并设计合适的安装固定方式。其间需要仿真计算压缩机的扭矩与制冷能力、安装固定点强度、振动形式，需要建立大量的压缩机基础数据库。

对于冷凝器，需要考虑的内容有冷凝器的结构形式、换热量与散热面积的关系、风

阻、出风温度对散热器和冷却风扇的影响，制冷剂的压力损失与制冷剂流量的关系等，对冷凝器的仿真分析应建立在大量基础数据库的基础上。

HVAC 总成是空调系统的核心部分，其设计工作量最大，可以分为气流设计、制冷性能设计、制热性能设计、机械结构设计、电器控制设计等几个大的方面，每个方面都需要进行 CAE 仿真分析，工作量最大的应该是在各种通风模式下的气流设计，要考虑到风量分配、温度控制特性和噪音等多方面的要求。对于密封性要求目前还很难用 CAE 仿真的方法进行模拟，更多是依靠经验进行设计。制冷性能的仿真需要建立大量的数据库，并通过反复的试验充实数据库。

对于自动空调控制系统的设计我们还没有积累相关的经验，但可以确定的是好的控制系统是建立在比较精确的整车热负荷计算和空调性能计算的基础上，通过标定工作逐步修正整车热负荷模型和空调性能模型，最终通过各种执行器的动作实现两者的动态匹配。

2.3 样件试制

样件试制的目的是将之前的设计结果实际化，为随后进行的试验验证提供物理样件。通常样件试制的费用要比量产品的成本高许多倍，为尽量节约试制费用，应根据将要进行的试验验证项目合理确定试制样件的数量，并选择合适的试制方法。但无论采用何种试制方法，应确保性能与安装配合尺寸的代表性。

2.4 试验验证

在试验验证阶段，应针对设计阶段确定的目标进行各种性能的试验验证，对不符合项进行分析并与前期的 CAE 仿真分析结果进行对比，修正仿真模型和改进产品设计直至符合要求。

试验验证可以分为零部件、总成、系统和整车四个级别，应按照从零部件到整车的顺序依次展开，只有零部件的性能合格了才能保证总成的性能，总成的性能合格了，系统性能才能保证，最后整车的舒适性才能够保证。反之，整车温度舒适性未达标并不意味着空调系统一定未达到要求，可能是整车热负荷或者空调系统的能源输入部分存在问题。空调系统性能未达标可能也只是其中的一个总成未达标，其余的总成是合格的。

因此对于试验中的问题需要仔细分析，找到根本原因，并针对这些原因修正产品设计状态和 CAE 仿真模型。只有经过大量的试验积累足够的数据库，才能逐步提高 CAE 仿

真计算的精确度，达到提高设计效率的目的。

3. 空调系统概念设计中的 CAE 技术

3.1 空调热负荷的计算

汽车空调热负荷是确定空调系统与整车匹配的重要依据。汽车热负荷的计算方法有图表法、热稳定计算法和非稳定计算法。通常采用热稳定计算法，它的缺点是手工计算工作量大，计算参数不易获得，但是此计算方法容易实现，而且计算精度较高，这是进行匹配设计时经常采用的方法。如果采用经验设计甚至放弃计算，完全依赖后期的试验验证结果来证明系统设计是否合理，就会使得设计人员完全处于一种被动的期待状态中，使得开发时间很长。

3.2 制冷量及系统匹配计算

汽车空调热负荷计算并不是计算的最终目的，计算热负荷的目的是为了找到空调系统与整车热舒适温度的平衡点（如图 1）。

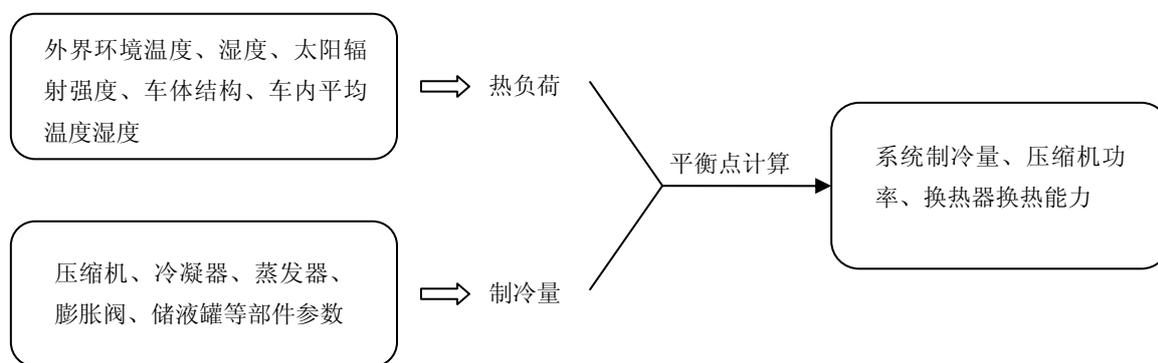


图 1 乘员舱热负荷与空调制冷量计算的平衡点

3.3 供暖能力计算

空调系统供暖能力的好坏也是评价冬天的空调性能的一项重要指标，在制热过程中，可以使用 CAE 手段进行暖风放热量的计算，换热能力的计算，出口空气温度的计算等等，通过计算还可以确定是否要在制热过程中加入辅助热源（如图 2）。

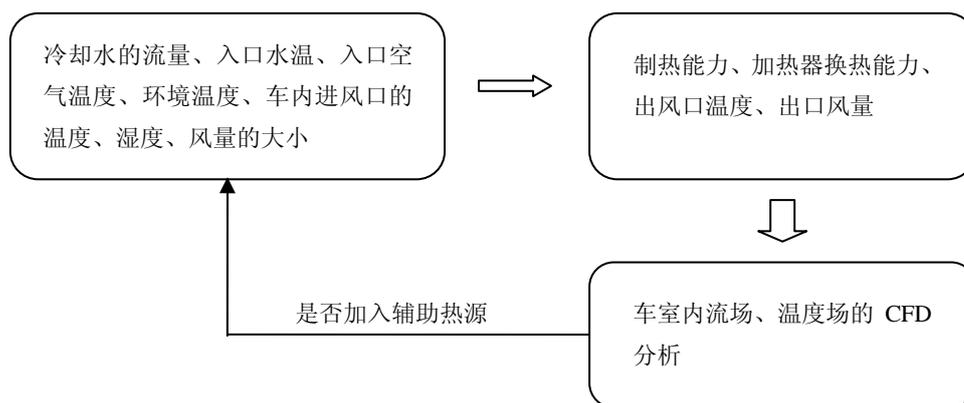


图2 制热能力计算

3.4 乘员舱内降温和升温特性预测

空调系统的制冷量、出风口的风速温度以及乘员舱热负荷三者共同作用，决定了乘员舱内的降温特性。空调制冷量和乘员舱热负荷之间的平衡点确定了乘员舱内可以降到的温度点，平衡点温度的获取可以利用简易计算得到，得出的平衡点温度可以作为计算降温曲线的边界条件，利用专用的仿真软件和 STAR-CCM+等流体软件计算得到乘员舱的降温特性，同样的方法可以计算出乘员舱的升温特性。

4. 空调系统详细设计中的 CAE 技术

4.1 概念设计中的 CAE 课题的深化

因为在概念设计阶段，有些参数尺寸没有准确地确定下来，因此概念设计阶段中的 CAE 分析结果只能作为初步设计的支撑材料。随着详细设计的不断深入，大部分参数尺寸如果能准确地确定下来，则需要更新概念设计阶段的 CAE 模型和分析结果。

4.2 空调系统的风量分配和压损分析

吹面模式下，四个出风口的风量分配比例直接影响到乘员舱的均匀的降温性能和舒适性，在空调风管设计之初使用 CAE 手段对各个出风口的风量分配进行计算将会大大降低后期调试的时间和费用。

对于某空调系统，通过几轮的优化设计计算（如图 3、图 4），可以看到吹面模式下四个出风口的风量分配比例已经比优化前改进了很多接近平均分配。系统的压力损失（如图 5）也比优化前有大幅度的下降。

其他模式的风量分配和压力损失也可以采用同样的方法进行预测。

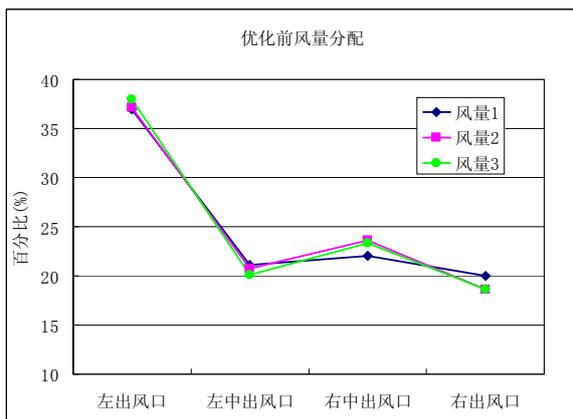


图3 优化前 CAE 计算结果

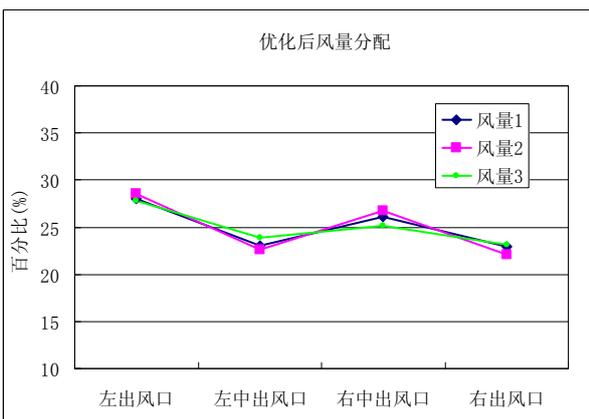


图4 优化后 CAE 计算结果

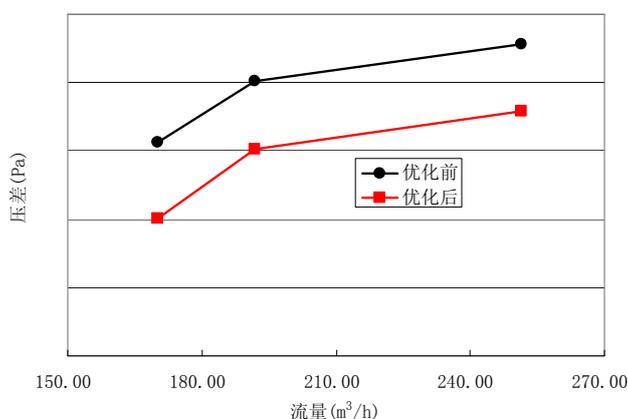


图5 优化前后的系统压差计算结果

4.3 HVAC 的温度控制特性的计算^[3]

HVAC 的温度控制特性也可以采用计算流体力学软件（STAR-CD, STAR-CCM+）进行预测。图 6 是文献[3]中温度控制特性（各出口温度与风门开度的关系）的实验和仿真计算结果的比较，它说明了 CFD 计算能比较好地预测温度控制特性。

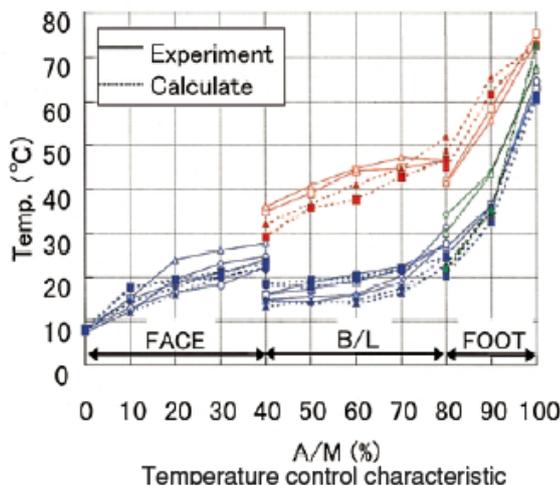


图6 文献[3]中 HVAC 温度控制特性的实验与仿真分析结果比较

此计算一般由空调系统供应商实施，温度控制特性的准确预测能大大优化 HVAC 产品的性能，加快产品开发的进度。

4.4 除霜除雾的计算

随着人们对乘用车舒适性、可靠性、安全性的要求越来越高，除霜除雾问题逐渐引起人们的重视。汽车挡风玻璃的除霜除雾性能是影响乘用车重要安全性能指标之一，是国家标准（GB11556—94）规定强制检测的一项指标。

在空调概念设计阶段，展开除霜除雾的研究是非常必要的。通过运用 CFD 方法可以分析前挡风玻璃、侧窗及乘员舱内复杂流场的流动特征，并提取任意截面上的风速、压力、湍流动能等参数；通过瞬态模拟，还可以获得随时间变化的除霜除雾仿真效果。相关数据对指导乘用车 HVAC 系统设计与改进，替代或部分替代实车试验是很有价值的。为了提高前挡风玻璃的除霜除雾效果，要求暖风最大限度地覆盖挡风玻璃表面以增加换热面积，进而提高风窗玻璃表面喷射气流的强化传热效果，避免挡风玻璃内表面温度比车室内空气的露点温度低而发生结雾现象。在喷射气流吹在整挡风玻璃和侧窗玻璃的内表面，气流速度损失最小，并且保证大部分气流不会从玻璃上脱落；气流也必须具有足够的动量，可以继续吹到挡风玻璃的上边缘；并减少挡风玻璃和仪表盘夹角边缘的空气回流或死区。

4.5 空调气动噪声的计算

乘用车开发水平的不断提高，降低乘员舱的气动噪声、提高乘员的舒适性，改善对环境的影响，是开发新型乘用车面临的重要课题。乘员舱的车内噪声级已成为重要的舒适性评价指标。其中，空调系统的气动噪声在车内噪声中占有很大的比例，气动噪声与空调风道的布置及结构等有关，风道尺寸、流动方向的突变、局部尖角、或圆角等局部结构特征对其影响都很大。所以在空调系统开发的前期，对空调引起的噪声做一个概念设计就显得尤为重要了。

风道、风机是重要的气动噪声源，降低 HVAC 总成内的风速、空气流道的变截面处理、流道中障碍物的处理、导风板的设计等对降低空调总成的气动噪声有着重要影响。在计算分析气动噪声的前提下，提出降低气动噪声的措施是关键。

计算空调气动噪声的一般流程是先对空调 HVAC 以及风管使用大涡模拟手段进行流场分析，得出流场内的压力脉动值，然后将流场的压力脉动值导入到声学软件中求解压

力脉动引起的声的传播。

4.6 乘员舱热舒适性的计算

乘员舱的舒适性在很大程度上已经不仅仅取决于乘员舱内的温度、湿度，它还与很多因素有关，比如太阳辐射强度，乘员舱内饰隔热吸热性能，车玻璃的透射率，空调风量的大小等等因素有关，所以必须综合考虑这些因素才能对乘员舱的热舒适性做出正确的评价。目前的 CFD 软件就以对以上的因素进行综合的计算分析，给出较为客观的热舒适性值。

5. 结论

乘用车空调系统设计需要整车厂和空调系统供应商很好地相互协作，为了加快乘用车整车空调系统设计和 CAE 分析的技术进步，我们有以下体会。

- 1) 乘用车空调系统设计应该更集中于空调系统和整车的匹配，更好地实现整车热舒适性的指标，譬如稳态的平均温度以及瞬态的升温和降温特性。
- 2) 整车厂和空调供应商应该很好地紧密地协作，发挥各自的技术优势，在开发规划、概念设计、详细设计、样件试制和试验验证等阶段做好各项工作。
- 3) 要充分发挥 CAE 技术在空调系统匹配和各总成零部件设计中的性能预测优化作用，降低开发成本，缩短开发时间。

6. 参考文献

- [1] カーエアコン研究会編，渡辺敏監修，カーエアコン（第2版），株式会社山海堂，2003年3月。
- [2] 汽车空调实用技术，阙雄才、陈江平主编，机械工业出版社，2003年3月。
- [3] 北田、浅野、神原，カーエアコン基本性能シミュレータの開発，Denso Technical Review Vol.5 No.2。