

上海汽车工业教育基金会资助项目

车用内燃机仿真

Simulation of Vehicular Engine

陈明 丁宁 张小矛◎著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

上海汽车工业教育基金会资助项目

Simulation of Vehicular Engine
车用内燃机仿真

陈 明 丁 宁 张小矛 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书是上海汽车工业教育基金会资助项目。本书是作者根据多年车用内燃机产品研发实践所著,并在参阅大量有关文献的基础上,对内燃机仿真技术进行系统的阐述。本书共分八章,包括:绪论、空气流动和燃烧模拟、发动机性能分析、气门机构分析、回转和旋转系统分析、本体结构强度和疲劳分析、排气系统分析和冷却系统分析。

本书的编写目的是为动力总成 CAE 工程师提供一本内燃机仿真技术的专业书籍,同时本书也可供发动机设计工程师、产品颁布工程师和项目管理人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

车用内燃机仿真/陈明,丁宁,张小矛著. —北京:
人民交通出版社股份有限公司,2016.5
ISBN 978-7-114-12882-0

I. ①车… II. ①陈…②丁…③张… III. ①汽车—
内燃机—系统仿真 IV. ①U464

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 051072 号

书 名: 车用内燃机仿真

著 作 者: 陈 明 丁 宁 张小矛

责任编辑: 刘 洋

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 10.5

字 数: 240 千

版 次: 2016 年 5 月 第 1 版

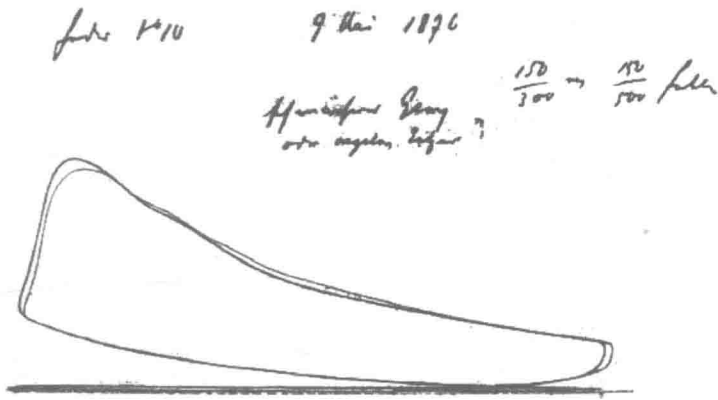
印 次: 2016 年 5 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-12882-0

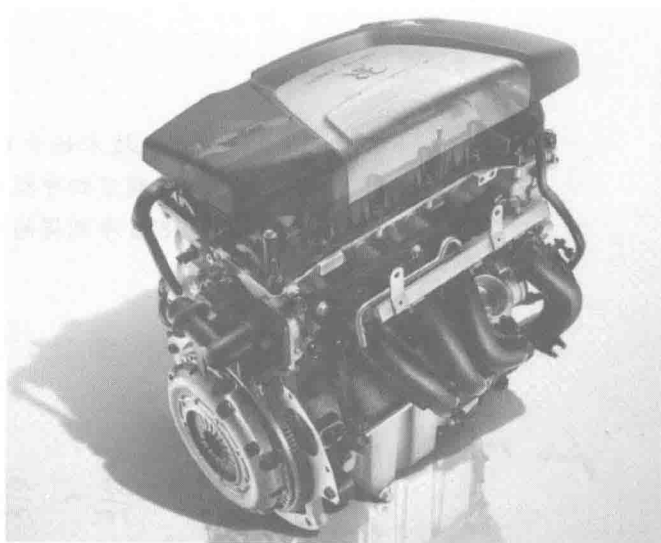
定 价: 30.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

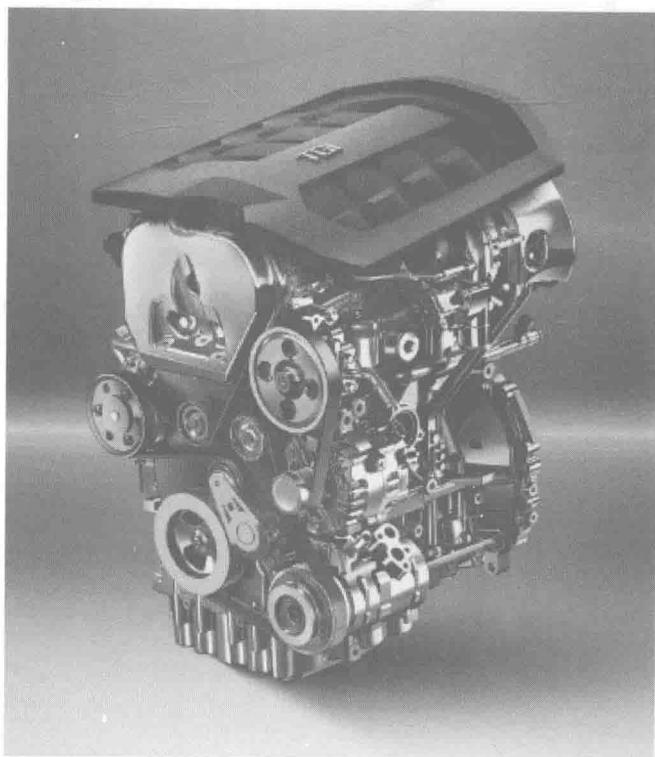
内燃机技术始于 1876 年
N. A. Otto 发明了四冲程内燃机
下图是 1876 年测得的示功图



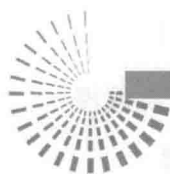
汽车发动机技术始于 1886 年
Gottlieb Daimler, Wilhelm Maybach/Karl Benz 发明了汽车



上汽集团 NSE 1.5T 汽油发动机



上汽集团 MGE 系列汽油发动机



序

Xu

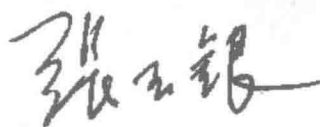
近年来,随着我国车辆保有量的增加,引起的环境污染问题和地球温室气体排放问题备受关注,越来越严格的油耗标准和排放法规(如国六、京六)将被采用,以促使动力总成产品技术不断升级,产品更新换代加速。为了应对快速变化的市场环境,国际主流汽车公司相继提出实施虚拟产品开发策略,通过科学计算驱动设计,提高设计质量和设计效率,并在开发早期进行多方案有效验证,缩短新技术开发周期。从国内的情况来看,一些整机厂将设计和分析任务委托给国外技术咨询公司,导致企业在核心技术上受制于人。为了增强技术竞争力,国内整机厂非常有必要通过数字化产品开发技术,优化性能、改善燃油经济性和降低排放,更快地把有竞争力的产品推向市场。目前,CAE 技术在汽车动力总成产品研发中的广泛应用带来了对相关专业人员的需求。它要求分析工程师掌握理论知识,提高计算置信度,减少计算时间,并增加计算项覆盖范围。因此,迫切需要反映该领域最新理论与应用的专著。

本书作者是陈明博士、丁宁博士和张小矛博士。陈明博士毕业于德国亚琛大学,就职于上汽集团技术中心,主管动力总成 CAE 技术工作。丁宁博士长期在上汽集团技术中心从事发动机缸内流体仿真计算研究。张小矛博士在上汽集团技术中心长期从事发动机整机性能开发和 CAE 技术研发等工作。他们身经百战,积累了丰富的理论知识和实践经验,在上海汽车工业教育基金会的大力赞助和支持下,撰写了这本专业著作,这是一本关于内燃机仿真方面的优秀图书,它能为从事发动机和汽车专业的科技工作者提供大量信息和现代化仿真技术。

本书系统阐述了内燃机仿真技术的理论、方法和应用,特别是较详细地介绍了发动机的设计流程以及数值模拟的用途,如何建立喷雾、蒸发、混合、点火、燃烧等模型,如何提高模拟准确性等。此外,本书还提供了发动机性能、发动机气门机构、曲轴-连杆-活塞、缸体-缸盖结构、排气系统、冷却系统的分析方法。

该书内容新颖、丰富,反映了该领域的最新成就,它的出版将推动国内汽车工业 CAE 分析能力的提升,对培养专门人才具有重要意义。

上海交通大学机械与动力工程学院汽车工程研究院教授

A handwritten signature in black ink, appearing to read '张云彬' (Zhang Yubin), with a long horizontal stroke extending to the right.

2015 年冬 于上海闵行



前 言

Qianyan

环保法规的升级和节能减排的强制要求,推动着内燃机技术的持续改进和创新,这要求我们从理论上对内燃机运行过程中出现的各种物理现象和化学过程有一个系统而全面的准确理解。为了大幅度地降低发动机比油耗,提高动力性、可靠性和耐久性,改善 NVH 性能,满足减重和降低成本的目标,以试验验证为主导的传统开发方式在优化产品方面存在诸多局限性。为了在短时间内开发出高品质的发动机,以计算机仿真方法为导向的设计正在成为主流的产品开发方式。通过仿真技术的应用,在产品开发的早期有可能确定产品的品质特征,降低产品开发风险。仿真工具与创新的产品验证方法相结合,将促进达到更高的产品成熟度,使得汽车整车厂获得竞争优势。

随着计算机技术的发展,数学模型和算法的不断完善,内燃机仿真的置信度已经有了大幅度的提升。然而,分析工程师也面临诸多挑战。现代内燃机技术已经达到了一个十分复杂而精细的水平,设计有逼近理论极限或材料允许极限的趋势。这对 CAE 工程师的专业能力提出了更高的要求,它要求分析工程师进一步学习理论知识,全面掌握仿真技术,并不断积累工程经验。

本书是上海汽车工业教育基金会资助项目。本书作者根据多年车用内燃机产品研发实践所著,并在参阅大量有关文献的基础上,对内燃机仿真技术进行系统的阐述。本书共分八章,分别从缸内三维流体分析、发动机一维性能分析、发动机结构强度分析和发动机多体动力学分析等几个方面介绍了计算机仿真的方法和原理。

本书编写的目的是为动力总成 CAE 工程师提供一本内燃机仿真技术的专业书籍,并希望它对发动机设计工程师、产品颁布工程师和项目管理人员也有所裨益。在编写过程中,本书力求突出基础理论知识和物理模型的描述,同时也尽量贴合实际应用。

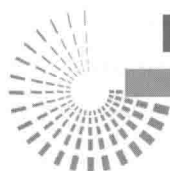
本书由德国亚琛大学博士、上海汽车集团股份有限公司技术中心动力总成

CAE 专家、同济大学汽车学院兼职教授陈明博士,上海汽车集团股份有限公司技术中心动力总成 CAE 科高级工程师丁宁博士,上海汽车集团股份有限公司技术中心动力总成 CAE 科高级工程师、流体分析经理张小矛博士共同著作完成。本书在编写过程中得到了上海汽车集团股份有限公司技术中心副主任龚伟国、动力总成分析试验部总监徐政博士等领导的大力支持和帮助。初稿完成后,由上海交通大学张玉银教授、同济大学倪计民教授分别进行了审核和修改,对提高本书的质量做出了宝贵的贡献。

由于作者水平有限,疏漏之处在所难免,恳望读者指正。

作者

2015 年 12 月



目 录

Mulu

第1章 绪论	1
1.1 内燃机仿真技术发展概述	1
1.2 仿真在产品开发中的作用	1
1.3 高性能计算机基本概念和企业仿真平台	4
1.4 概念设计分析内容概述	6
1.5 详细设计分析内容概述	8
1.6 数值模拟与试验验证	12
1.7 不确定性和可靠性分析	13
1.8 模型再用	17
1.9 工作方式	18
本章参考文献	19
第2章 空气流动和燃烧模拟	21
2.1 进气道流动分析	21
2.2 进气歧管流动分析	22
2.3 缸内气流和油气混合	24
2.4 缸内燃烧分析	42
2.5 点火	62
2.6 有害物质的生成	68
本章参考文献	69
第3章 发动机性能分析	73
3.1 典型的理论加热循环	73
3.2 理想发动机工作循环	75
3.3 实际发动机工作过程的效率和能量损失	77
3.4 一维整机性能仿真	79
本章参考文献	96

第4章 气门机构分析 97

4.1 配气机构运动学分析 100

4.2 配气机构动力学分析 108

本章参考文献 111

第5章 回转和旋转系统分析 112

5.1 曲轴分析 112

5.2 连杆强度分析 126

5.3 活塞和活塞销分析 128

本章参考文献 130

第6章 本体结构强度和疲劳分析 131

6.1 热分析 131

6.2 缸盖结构分析 133

6.3 机体结构分析 134

6.4 密封分析 136

本章参考文献 139

第7章 排气系统分析 140

7.1 排气系统 CFD 分析 140

7.2 排气系统耐久性分析 143

本章参考文献 149

第8章 冷却系统分析 151

8.1 冷却系统回路 151

8.2 冷却系统分析与评估 155

本章参考文献 157

第1章 绪 论

1.1 内燃机仿真技术发展概述

早期对发动机物理过程的模拟始于子模型的开发,比如传热模型的研究^[1-1, 1-2]。20世纪60年代,完整发动机循环模型的计算机程序开始出现,其中包括 Benson, Woods^[1-3]及 Borman^[1-4]开发的程序。因为早期的计算模型比较简单,应用范围比较狭窄,主要局限于研究机构的科研人员使用。在这些研究机构之外,模拟结果往往没有真正被接受。实际上,在很长时间内,发动机设计和开发的工具仍然是试验,技术方案决定基本上依据试验数据。从20世纪80年代以来,预测发动机性能的计算机程序演变为十分详细的内涵综合的计算机软件,比较著名的软件包括 PROMO^[1-5]、Ricardo公司的 WAVE、Gamma Technologies公司的 GT-Power 和 AVL 的 Boost。这些软件逐渐被动力总成产品开发工程人员认可为有用的预测工具。目前软件预测能力已经达到了相当高的水平,可以用于发动机设计开发之中。

发动机试验与计算模拟的互补关系已经被许多工程师认同。一般的想法是建立一个准确的与试验数据匹配的发动机的基线模型,然后进行参数研究,获得最优的设计或性能。20世纪70年代,有限元软件 MARC、ANSYS 和 ABAQUS 在美国作为商业软件进入市场。

1985年,美国 Los Alamos 实验室的 Amsden^[1-6]公布了可用于内燃机缸内流动和燃烧分析的三维 CFD 程序 KIVA,1988年推出 KIVA-II。1993年,Amsden 推出 KIVA-3 程序^[1-7]。许多研究人员在 KIVA 软件上开展了发动机缸内流动、燃油喷射、燃烧过程等一系列子模型的研究工作。在发动机领域,获得较多应用的 CFD 商用软件包括 FIRE、STAR-CD、VECTICS 和 CONVERGE。

计算机辅助工程(Computer-aided engineering, CAE)指的是在工程任务中采用计算机软件,用于模拟、验证和优化产品。工程人员希望采用 CAE 工具为产品的设计决策提供重要的输入信息。目前,汽车工业大量地使用 CAE 工具。CAE 工具的预测能力已经发展到相当成熟的阶段,许多设计验证可通过计算机模拟完成。另外,现代内燃机技术已经达到了十分复杂的程度,设计有逼近理论极限或材料允许极限的趋势,它对仿真置信度提出了更高的要求。通过多学科联合仿真对系统集成优化,是未来的趋势之一。联合仿真把各个分系统相互连接起来,实现整个系统的最优化。

1.2 仿真在产品开发中的作用

一个动力总成新产品在推向市场之前,一般需历时4~5年的开发过程。项目带动的活动涉及产品前期研发、项目可行性研究、工程开发和制造工程等。图1-1给出动力总成产品

(发动机、变速器)开发过程示意图。项目从启动到结束,在时间的坐标下,整个活动聚焦范围就像是一个喇叭筒的形状,前宽后窄。在早期的产品战略研究阶段,要有各个方面的信息输入,包括顾客需求、市场竞争、设计理念、技术趋势、燃油价格、法规趋势和经济环境等。概念构思阶段允许容纳多方案和各种想法参与论证,激发创意的产生,得出符合品牌及整车需求的正确决策。立项之后,产品开发团队进行详细的设计、样机制造和试验开发。为了提高产品竞争力,创新小组推动先进技术措施的采纳;生产制造小组和质量保证小组的参加使得产品设计充分考虑可制造性和可靠性。

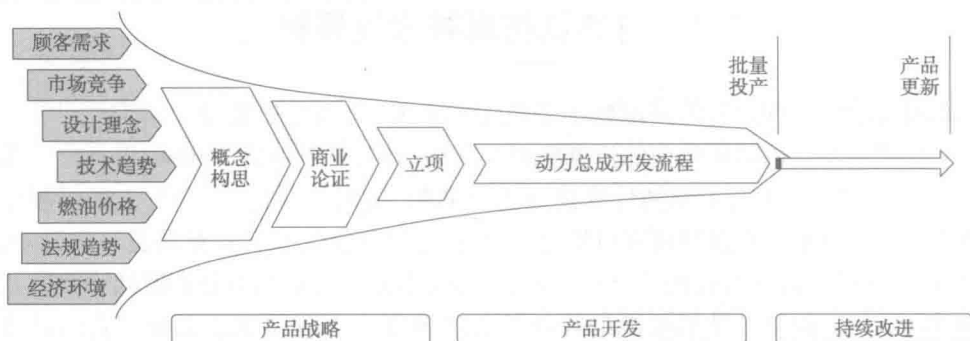


图 1-1 动力总成产品(发动机、变速器)开发过程示意图

发动机开发是一种有风险的产品创造活动。前期的设计水平和工作质量对产品开发具有决定的意义,它影响产品开发效率、周期时间、成本和技术效果。实际项目开发中或多或少会出现一些试验验证发现的产品失效或性能不令人满意的结果。在开发后期,产品更改往往难以实现,因为它可能影响产品投产的时间。为了保证产品成功,工程师们得到的一个经验是尽早地获得关于产品的知识,并在概念设计和详细设计上多下功夫。以知识为基础的、经过反复推敲的方案选择和精细设计为产品的成功奠定坚实的基础。相反,如果概念设计进行得不充分,其结果可能是欲速不达,导致后期更改频繁,并增加开发成本。

CAE 工作是产品设计的一个关键环节,它不仅提供虚拟验证,更重要的是其参与设计的优化探索过程。CAE 分析是设计评审和项目递交的不可缺少的内容。为了缩短总的开发时间和提高可靠性,要求在发动机开发的各个设计阶段系统地开展分析工作,以挖掘设计潜力(包括性能、质量、NVH、摩擦损失、鲁棒性、成本等)。发动机开发过程的计算分析工作与设计工作一般并行进行,分析结果必须及时反馈到设计中,以便优化部件设计方案和系统匹配。

发动机开发一般到批量生产需经过平均三轮的不同阶段的样机制造和试验验证。设计变动的发生集中在早期开发阶段,在项目的结束期零件的更改和开发将产生高昂的费用。虚拟仿真在初始开发阶段表现为主动而有效果,在后期表现为被动反应,其效率大为下降。图 1-2 表示 CAE 工作负荷前移的概念。

通过采用先进的分析手段,可使样机开发阶段的设计质量和水平显著提升。理想的情况可省去一档开发阶段,比如 Mule 样机阶段。减少样机制造的阶段数目可减少总的开发时间。因为虚拟样机经过优化设计步骤,以及设计时间窗口得到拓宽,产品的成熟度反而增加,尽管第一个实物样机的建造在实际上有点推后。

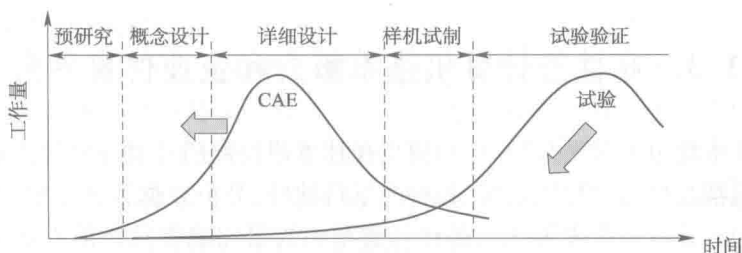


图 1-2 CAE 工作负荷前移概念的示意图

一个新设计概念的评估和新系统的设计,不能仅仅在零部件级别进行优化,还需要在子系统和整车级别上得到总体评估。图 1-3 表示产品开发的目標、设计、系统分解、集成和验证的系统工程概念图。在零部件层次,有零部件设计、零部件开发和零部件验证。同样在系统层次也有相应的开发过程,即系统设计、系统开发和系统验证。显然,不能撇开系统,孤立地开发某个零件。应该在高层次上(比如品牌和整车性能发挥上)考虑发动机和整车的各自系统设计需求。一般说来,零部件服从系统功能;局部服从整体。

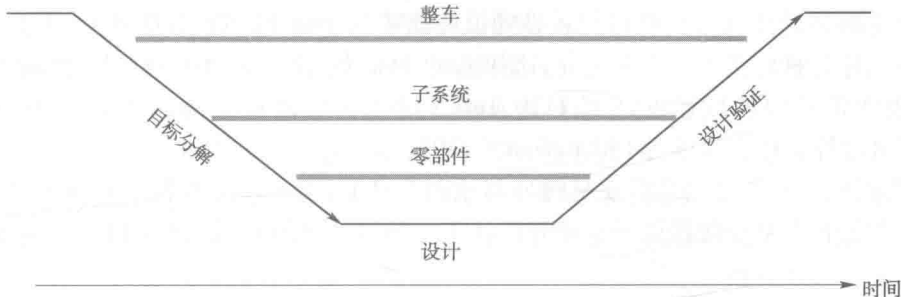


图 1-3 产品开发的目標、设计和验证的系统工程(分解和集成)

从整车的角度,在项目的前期进行系统级别的虚拟分析具有重大意义。比如,应该在发动机项目的前期开展整车级别的冷却系统性能分析工作,以评估机油冷却器、EGR 冷却器、散热器等部件的匹配情况,预测整个冷却回路的压力、流量和冷却液温度,为水泵设计提供数据。又如,对于排气歧管的布局和设计,不仅要通过一维整机性能分析软件评估它对发动机本身性能的影响,也要采用三维 CFD 软件进行发动机舱的热管理分析。通过考察排气歧管外表面散热对发动机外围部件或周围整车部件的表面温度的影响,全面评估排气歧管的设计方案和隔热罩的设计。

详细的三维流体力学分析或和三维有限元力学分析,主要用于零部件层次或子系统的设计分析,而系统模拟主要采用一维或零维计算方法,并辅以经验或假定数据。提高系统级分析的准确度正是目前动力总成 CAE 技术发展的一个重点方向。系统的一维分析与其中单个部件的三维分析的耦合可以改善分析的准确度。

系统模拟的目的可以是概念设计的评估、技术潜能的评估、标杆分析比较等。设计目标(比如燃油经济性、污染物排放水平、动力性能和可驾驶性)需要通过一个探索的过程从初始设定直至完善。系统模型为系统设计提供概念性研究、部件设计和功能方面的数据。重视系统集成方面的模拟,可以避免仅仅进行局部性的优化,而忽略了对系统优化潜力的挖掘。

在各个设计阶段,通过一定的评价指标对虚拟分析的结果进行评估。此外,应该把新项目的计算结果与数据库中的类似机型的分析结果进行比较。

1.3 高性能计算机基本概念和企业仿真平台

为了保持技术竞争力,许多汽车公司很重视技术研发部门计算分析能力的建设和维持。企业仿真平台包括高性能计算机系统、各种多学科软件、分析数据管理系统、材料库、知识库和分析标准流程。分析工作需要大量的计算资源。为了完成多批量的大规模计算,要求计算机运算速度快,储存空间大,访存速度与网络传输速度快。显然,一个企业的仿真平台的硬件配置将直接影响 CAE 工程师团队的能力发挥和工作效率。一个典型的发动机有限元计算采用 32G 或 64G 的随机存取存储器(RAM)和 8~16 核中央处理器(CPU)。一个典型的 Intel Xeon 5600 系列中央处理器的内核频率可以达到 2.93GHz。

一台计算机的理论最大计算速度,等于处理器核数乘以单核的理论计算速度,后者等于处理器核主频乘以一个时钟周期执行的浮点运算次数。提高计算机理论最大计算速度的一个有效方法是增加处理器核数。每秒浮点运算次数(FLOPS)是一个评估计算机执行效能的指标。一个典型的高性能计算机的运算峰值性能达到 Tera FLOPS 的量级(1 Tera = 10^{12})。超级计算机的每秒浮点运算次数更高,比如 Cray Inc. 为美国 Los Alamos 国家实验室建造的 Cielo 超级计算机的运算速度达到 1110 Tera FLOPS。安装在上海超级计算中心的曙光 5000A 超级计算机运算速度为 180.6 Tera FLOPS。

在实际计算中,许多信息需要从缓冲器或内存获取,并通过互联网从其他节点中获得,计算机处理器核在某个阶段处于空闲等待状态。所以,实际浮点性能与 FLOPS 的理论峰值有差别。

实际浮点性能是一个应用程序的浮点运算总次数和程序执行时间之比。计算效率等于实际浮点性能除以理论最大计算速度。计算效率不仅与计算机硬件相关,也与应用软件的性能相关。一个应用程序为了与计算机系统匹配,提高计算效率,需要采用先进的算法和并行计算技术。

为了减少计算完成的实际时间,并行计算技术采用多个处理器共同完成一个计算任务。并行计算机系统包含一些计算节点,以及节点之间的通信与协调机制。一个计算域的网格被分为多块网格,每个部分交给不同的处理器同时计算。数据需要在这些网格边界互相交换。信息传输的速度取决于带宽和延迟。带宽是单位时间传递的字节数。延迟是每次信息传递启动需要的时间。随着处理器数量的增加,计算加速比低于线性加速。并行效率的下降是因为通信、同步和处理器负载不平衡导致的。

一台典型的并行处理器包括多个处理单元、多个储存器模块、一个控制器、一个互联网络、一台输入、输出处理机。并行计算机有以下几种系统结构类型^[1-8]:

(1) 分布式储存器的 SIMD 处理机。SIMD(Single Instruction stream Multiple Data stream)指的是单指令流多数据流。含有多个同样结构的处理单元,各有自己的本地储存器。数据在当地储存器分布。所有处理单元在控制单元的統一控制下执行同一个指令,但是每个处理单元处理的数据不同。通过屏蔽逻辑决定任何一个处理单元在给定的指令周期是否执行指令。

(2) 共享式存储器(Shared memory parallel)处理机。在这个集中设置储存器的结构中,多个并行储存器通过互联网络与各处理单元连接。多个同样结构的处理单元在阵列控制部

件的指挥下,实现并行操作。

(3)对称多处理器 SMP(Symmetrical Multi-Processing)。SMP 是指在一个计算机上汇集了一组处理器,各处理器之间共享内存子系统以及总线结构。在一个 SMP 系统,多个 CPU 通过交叉开关与主存相连。工作负荷可均匀地分配到可用处理器上。常见的多处理机系统采用对称多处理架构。因为系统总线的带宽是有限的,所以处理器的数目受限。

(4)并行向量处理器。并行向量处理器通过向量处理和多个向量处理器并行处理提高处理能力。它使用定制的高宽带网络把向量处理器与共享存储器模块连接。

(5)集群计算机。集群架构的高性能计算系统是目前高性能计算架构的主流。集群系统是把一组高性能计算机工作站连接,并实现并行处理的分布式系统。一个集群指的是连接起来的多个节点,它们可以是在一起的,也可以是分散的。通过网络连接的节点是一个或多个处理器系统,有内存、I/O 设备和操作系统。对用户和程序来说,集群是一个单一的系统。占用大量的 CPU、内存以及存储空间的求解过程可以在高性能 HPC 集群上完成。有效使用计算机集群要求分布内存并行执行能力和软件的并行扩展能力。

一个 CAE 工程师分析工作的前、后处理一般在客户端工作站进行,而求解计算一般在高性能计算机系统上完成。远程访问通过登录服务器来完成。计算任务提交由作业控制软件管理。客户提交任务脚本到群集系统上,目的地队列由客户在递交任务时定义。

汽车行业企业的 CAE 系统一般涉及动力总成和整车多学科计算,需要满足多种应用软件并行的要求。不同软件对计算机系统的需求是有差异的。比如,NASTRAN 计算对内存和 I/O 的要求很高,而 CFD 类的应用对 CPU 速度及网络连接有较高的要求。因此一个高性能计算机系统应该合理平衡 CPU 速度、内存容量与带宽、存储容量与带宽及网络连接等各个方面的要求,避免某个环节出现性能瓶颈。

企业 CAE 系统遇到的问题,不仅是如何应对不断增加的计算能力的需求,还有数据存储方面的挑战。数据存储有 DAS、NAS 和 SAN 三种不同的方式。在 DAS (Direct Attached Storage)直接附加存储方式中,外部存储设备直接挂载在服务器内部总线上,数据存储设备是整个应用服务器结构的一部分。NAS (Network Attached Storage)数据存储方式通过网络技术连接存储设备和应用服务器。该数据存储是作为独立网络节点而存在于网络之中,它可由所有的网络用户共享。SAN (Storage Area Network)存储方式通过光纤通道技术连接存储设备和应用服务器,具有很好的传输速率和扩展性能,存储性能有显著提高。

图 1-4 给出一个典型的采用集群架构的 CAE 系统结构。

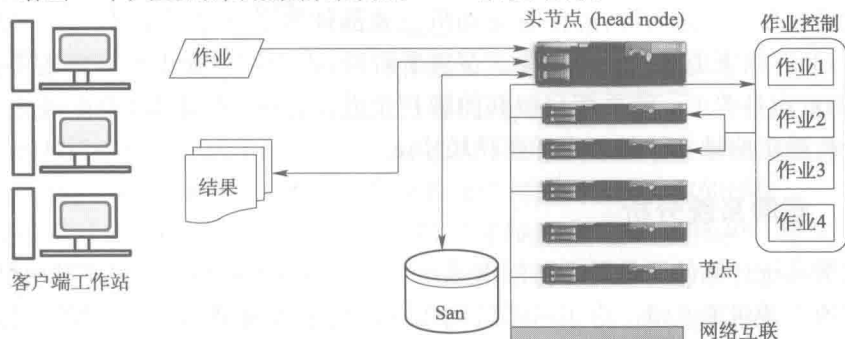


图 1-4 一个采用集群架构的 CAE 系统结构

1.4 概念设计分析内容概述

发动机硬件设计可以归纳为三部分,即上端设计(Top-End),下端设计(Bottom-End)和前端设计。总结起来,上述硬件的概念设计包含以下内容:

(1) 确定发动机开发目标:全负荷的低速转矩和最大功率、部分负荷燃烧稳定性、燃油经济性、排放达标水平、耐久性指标、NVH 性能、质量和成本等。

(2) 确定基本发动机数据:燃料种类、二冲程/四冲程、自然吸气/增压型、冷却方式(空气冷却/液体冷却)、额定功率、额定转速、发动机尺寸(汽缸直径、行程、工作容积和汽缸数)、汽缸排列(直列、V 型和水平对置)。

(3) 发动机的基本数据通过几个主要参数联系起来,它们是有有效平均压力、活塞平均速度、行程/缸径比。这些参数的选取必须经过仔细的考虑。

(4) 设计燃烧室形状,确定进气门、排气门大小,确定进气门、排气门夹角,确定气道特性。

(5) 设计上端部件:缸盖、气门机构、进气系统、排气系统和气阀罩盖等。

(6) 设计下端部件:曲轴箱、裙架、曲轴、连杆、活塞、轴承盖、油底壳、平衡轴模块。

(7) 设计前端部件:正时驱动系统,附件驱动系统,前端罩盖等。

新发动机的设计可以从里向外,由粗到细地建立 CAD 模型。概念设计的决策往往以相对简单的数学模型为依据,随后完善之,进行优化设计。上端设计与下端设计可平行地开展。

缸盖的设计要考虑燃油喷射器位置。根据气门夹角、压缩比和火花塞等空间布置来确定气门位置、进气道和排气道的几何形状以及缸盖螺栓位置和布局。汽缸盖设计给出燃烧室形状、水套几何形状和上底板。气门机构设计确定挺柱或摇臂零件的尺寸和位置、气门弹簧几何尺寸,并得到凸轮轴位置和凸轮轴承位置。进一步细化设计涉及供油孔、回油道、进气系统、排气系统、涡轮增压器、燃油系统、机油分流系统、气阀罩盖、缸垫和点火系统。

在下端设计中,确定曲轴的几何尺寸、前端、后端、油孔、平衡重大小等;确定连杆长度和形状等设计特征;确定活塞的压缩高度,考察平衡重的运动间隙;确定曲轴空间。设计汽缸套的下部连接,确定机体高度。根据轴承宽度、轴颈直径等确定曲轴主要的尺寸大小。曲轴箱设计涉及曲轴箱顶的形状、缸盖螺栓连接、水套、缸套和曲轴轴承盖。设计要考虑裙架、平衡轴集成、变速器凸缘和起动机系统。进一步细化设计包括润滑油回路、机油泵、冷却水回路、水泵、曲轴箱通风、机油分离、油底壳和发动机悬置连接。

在发动机开发的概念阶段,应该对发动机主要部件和系统进行 CAE 分析,以评估性能目标能否达到,并探索更好的设计方案。在这个阶段,因为往往得不到详细的零件 CAD 模型,该阶段的重点是若干一维系统分析和曲轴初步设计分析,比如以减低摩擦为目标,通过轴承载荷分析确定曲轴主轴颈和连杆直径尺寸。

1.4.1 润滑系统分析

一维润滑系统计算的目的是进行润滑系统概念设计,确定油泵尺寸和发动机内部的油压和各部件消耗的机油流量。为了从系统的角度对发动机润滑系统进行设计,保证润滑系统有一个安全可靠的功能,并指导润滑系统的零部件开发,有必要建立润滑系统的一维流动