

Съвременни подходи и тенденции при компютърното симулиране на двигателите с вътрешно горене

Симеон Илиев

Contemporary Approaches and Tendencies by Computer Simulation of Internal Combustion Engines: *The purpose of this paper is to present an overview of Computational Fluid Dynamics (CFD) and ICE simulation applications to ICE research. The development of internal combustion engines (ICE) is difficult and 3D CFD is a way to support its design. It requires models able to describe the all processes in engines. CFD based numerical simulations have recently made it possible to study the development of such engine flows in great details. However, they offer little guidance for modifying the ports and chamber geometry controlling the flow to meet the desired performance.*

Key words: ICE, Engine simulation, CFD, Model, LES, FVM, CAD (Computer-aided design).

ВЪВЕДЕНИЕ

Развитието на компютърната техника и нарастването на нейната изчислителна мощ, особено през последното десетилетие, позволява изследването на сложни обекти и явления за сравнително кратко време. Решението на уравненията на динамиката на флуидите с помощта на компютри е по-лесно и по-ефективно. Тази област от механиката на флуидите е известна като CFD (Computational Fluid Dynamics – Изчислителна динамика на флуидите). Тясно предимство е високата точност на изчислените резултати и възможността за симулиране на условия, максимално близки до реалните. Основните им недостатъци са, че изискват високи изчислителни мощности и подготовката за числения експеримент все още не е напълно автоматична.

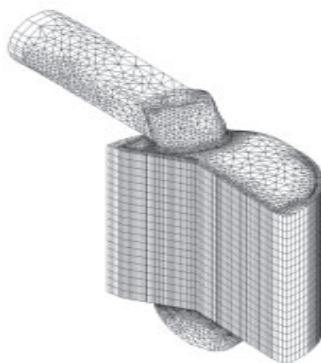
Всички най-широко използвани кодове за симулация на двигатели с вътрешно горене използват методологията на крайните обеми finite-volume methodology (FVM), така че тази статия ще се фокусира върху този метод. Съществуват и други алтернативи на този метод които не са намерили толкова широко приложение [1, 2].

ИЗЛОЖЕНИЕ

Методологията на крайните обеми (FVM) е една от най-подходящите техники за дискретизация, използвани в CFD. Тя е базирана на основата на формирането на контролни обеми използвани при аналитичната динамика на флуидите. Първата стъпка в FVM е да се раздели областта на изчисление (computational domain) на контролните обеми (известни още като клетки или елементи). Дискретизираната (разделената) област се нарича решетка или мрежа (mesh). Следващата стъпка е разписване на основните уравнения за всяка една област, като се свеждат до система от алгебрични уравнения за областта на дискретизация. Получените уравнения се наричат дискретизационни уравнения (discretized equation). По този начин, дискретизационното уравнение изразява принципа за запазване за променливата вътре в контролния обем.

В последно време едно от ключовите подобрения на FVM е възможността да се направят много по-гъвкави мрежи (относно структурата), а това води и до по-добри възможности обработка на геометрията. Първата стъпка в тази посока е направена с въвеждането на шестостенни елементи в структурата на мрежата. Тези елементи са използвани в кодовете IFP KIVA-MB [3], KIVA-III и FIRE1 [4], което улеснява приспособяването на пълнителите колектори, цилиндровата глава и канала в буталото. Друго още по-голямо подобрение е постигнато в кодът Speed [5], който позволява използването на общи шестостенни неструктурирани мрежи. На фиг. 1 е показана неструктурирана хибридна мрежа получена при симулиране на бензинов двигател с директно впръскване с код Star-CD. Тя се състои от тетраедри и триъгълни призми с цел да улесни приспособяването на геометрията, движението

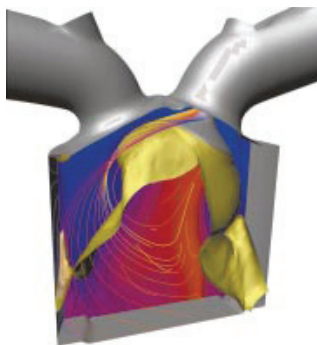
на мрежата, добавяне и премахване на допълнителни слоеве. Подвижният интерфейс се прави с цел да може да се симулира движението на клапаните и да се приспособят различни форми на челото на буталото.



Фиг. 1. Неструктурирана хибридна мрежа получена при симулиране на бензинов двигател с директно впръскване [6, 8].

В последните години се наблюдава увеличаване на хардуерната мощ на съвременните компютри и намаляване на цената им, което от своя страна води до намаляване на времето за симулация и до по-голямо приложение на моделите за симулиране. Също така поради по-добрите хардуерни възможности, новите кодове имат възможност и за визуализация на много от процесите протичащи в двигателя.

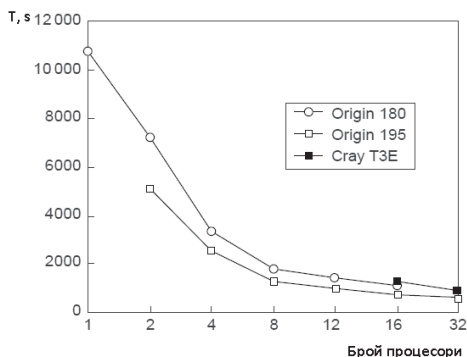
На фиг. 2 е показана визуализация на геометрията на двигател Mercedes-Benz M11 (бензинов, четиритактов с четири клапана на цилиндър) и движението на флуида в цилиндърите на двигателя.



Фиг. 2. Визуализация на движението на флуида в цилиндъра на двигател Mercedes-Benz M11 [7].

От графиката на фиг. 3 може да се види как времето за пресмятане на фиксирана симулация варира в зависимост от броя на процесорите и илюстрира значително намаляване на времето за пресмятане, което може да бъде постигнато при подходящо конфигуриране на компютърната система. На практика това означава, че с помощта на достатъчно процесори дадената симулация може да

бъде завършена в рамките на един или два дни. Това заедно с някои други подобрения дава възможност симулацията на двигателя да се побере в рамките на цикъла на проектиране.



Фиг. 3. Зависимост на времето необходимо за симулиране на двигател Mercedes-Benz M11 от броя на процесорите.

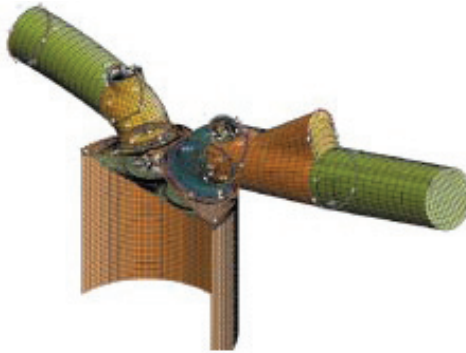
През последните пет, шест години започна производството на многоядрени процесори, като броя на ядрата достигна до осем за серийно произведените чипове. Процесори, съставени от 2 или повече ядра увеличават производителността на системата, намаляват консумацията на електричество и работят по-ефективно с множество задачи (multiple processing). Двухядрен процесор може да се сравни с два разделени процесора, инсталирани на един компютър, но понеже ядрата на двухядрения процесор са инсталирани на едно гнездо (socket), връзката между тях е значително по-бърза. На теория, един двухядрен процесор е 2 пъти по-бърз от едноядрен, но на практика се оказва, че увеличението на мощността е 50% повече от това на едноядрените процесори.

Друга пречка възпрепятства използването на CFD в проектирането на ДВГ е процеса на генериране на мрежите. В миналото това е било трудоемка задача, която е отнемала много време, тъй като наличните техники за генериране на мрежите са се извършвали ръчно и са изисквали значителен опит и усилия за справяне със сложните форми и движещи се части в горивната камера, пълнителната и изпускателна система.

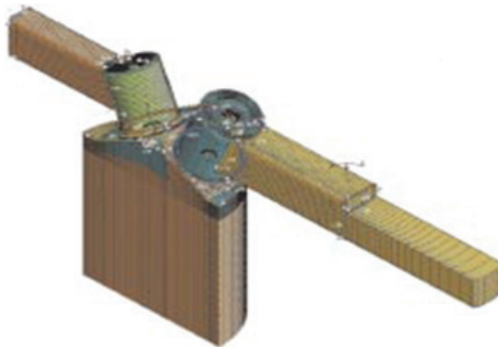
Последно разработените автоматизирани техники за генериране на мрежи са били развити благодарение на по-голямата гъвкавост при генерирането на мрежите, което драстично съкращава технологичното време. Една такава автоматизирана техника е била използвана за генериране на мрежата показана на фиг.1 [8]. Тя работи на два етапа: първият етап включва създаване на мрежа на пълнителните и изпускателни канали, цилиндровата глава и буталото (мрежата е генерирана автоматично), вторият етап включва автоматично генериране на мрежа на обема на цилиндъра.

Друг метод описан в [9] и илюстриран на фиг.4, 5 и 6 използва понятието „родови шаблони“ (generic templates). Тези шаблони са създадени за различни типове двигатели наречени семейства.

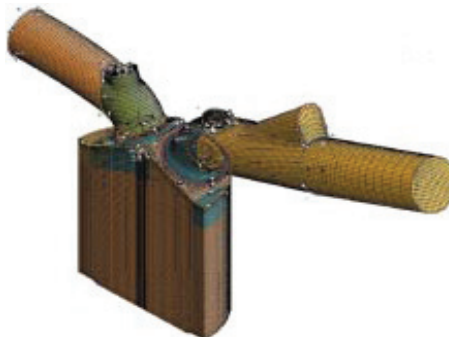
Удобствата на шаблоните са, че те позволяват да бъдат преобразувани за специфичен двигател от семейството. На фиг. 4, 5 и 6 е показано как един родов шаблон може да бъде проектиран в CAD повърхност. Целта на тази операция е постигането на мрежа отговаряща на геометрията на реалния двигател.



Фиг. 4. Генериране на мрежа на базата на CAD модел на двигател Mercedes-Benz M11.



Фиг. 5. Генериране на мрежа на базата на шаблон на двигател Mercedes-Benz M11.



Фиг. 6. Генериране на финалната мрежа след проектиране на шаблона върху CAD повърхността.

При по-старите модели големия брой данни генерирани от 3D симулацията са създавали проблем поради необходимостта от тяхното съхранение и обработка. Днес този проблем е решен чрез използването на различни средства за визуализация, които помагат по-лесно да бъдат обработени получените резултати. На фиг. 2 е показана една от формите за визуализация [9] включваща анимация на процесите в цилиндъра на двигателя.

Моделирането на процесите на впръскване на горивото са съществена част от симулирането на двигателите. Тези процеси винаги са били от голямо значение за дизеловите двигатели, а напоследък с увеличаване на производството и на бензинови двигатели с директно впръскване се отделя голямо внимание на процесите на впръскване и разработването на нови модели описващи развитието на тези процеси. От анализа на различни изследвания [10, 11] е установено, че съществуват модели с различни нива от възможности описващи почти всички процеси на впръскване (поне за дизеловите двигатели), които включват:

- симулиране на горивоподаването от различни горивонагнетателни помпи,
- симулиране на горивният поток в дюзата включително и кавитацията [10, 12, 13],
- симулиране на разпръскването [10, 14 - 16],
- симулиране на движението на струята и нейното изпарение [11, 17]
- симулиране на попадането на горивото по стените на цилиндъра [18, 19],
- симулиране на образуването на горивен филм по стените на цилиндъра и неговото изпарение [20-22]

За да се получат удовлетворителни прогнози близки до действителността особено при нови модели двигатели е необходимо в изчислителните модели да бъде въведена информация получена на експериментална основа. Това несъмнено се дължи отчасти на слабостите в някои от стимулационните компоненти с кавитация и разпръскване. Това важи за всички видове дюзи, най-вече за тези използвани при бензиновите двигатели (с директно впръскване и впръскване пред пълнителния клапан). Причината затова е, че тези модели не са толкова добре усъвършенствани както при дизеловите двигатели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базата на направения анализ е основателно да се твърди, че CFD симулирането на двигателите с вътрешно горене е на такъв етап от развитието си, водейки до икономия на много средства и време при проектирането на нови двигатели. Това основно се дължи на многото подобрения относно намаляване на времето за изчисление и увеличаване на точността на получените резултати. Скоростта и точността също е подобрена и поради наличието на новото поколение компютри обзаведени със съвременни средства за визуализиране на резултатите. Напоследък много производители на CAD софтуер вграждат в своите системи за проектиране модули базирани на CFD симулирането.

В бъдеще заедно с развитието на компютърната техника, методите за визуализация на резултатите и подобренията в кодовете за симулиране може да се очаква CFD симулирането да стане още по достъпно и лесно за работа.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Sainsaulieu, L., Buchou, C., Maries, C. Validation of a Fine Element Approach (N3S) for Engine Applications. These Proceedings, 1999.

[2] Halliday, J. Simulation of Engine Internal Flows using Digital Physics. These Proceedings, 1999.

- [3] Torres, A., Henriot, S. Modeling the Effects of EGR Inhomogeneities Induced by Intake Systems in a Four-Valve Engine, SAE, No. 961959, 1996.
- [4] Zhu, Y.X., Savonen, C., Johnson, N., Amsden, A. Three-Dimensional Computations of the Scavenging Process in an Opposed-Piston Engine, SAE, No. 941899, 1994.
- [5] Adamson, B., Gosman, A.D., Marooney, C.J., Nasser, B., Theodoropoulos, T. A New Unstructured-Mesh Method for Flow Prediction in Internal Combustion Engines, Proc. Comodia'90, Japan, 1990.
- [6] Thierry B. Multi-Dimensional Simulation of Engine Internal Flows. Oil & Gas Science and Technology, Vol. 54, No. 2, 1999.
- [7] Grosman A. State of the Art of Multi-Dimensional Modelling of Engine Reacting Flows. Oil & Gas Science and Technology, Vol. 54, No. 2, pp. 149-150, 1999.
- [8] Jones, P. Rapid Meshing Methodology for Internal Combustion Engines, Computational Dynamics Ltd., 1999.
- [9] Jasak, H., Luo, J.Y., Kaludercic, B., Gosman, A.D., Echtele, H., Liang, Z., Wirbeleit, F., Wierse, M., Rips, S., Werner, A., Fernstr.m, G., Karlsson, A. Rapid CFD Simulation of Internal Combustion Engines. SAE No.1999-01-1185, 1999.
- [10] Reitz, R. Developments in Spray Modeling in Diesel and Direct Injection Gasoline Engines. These Proceedings, 1999.
- [11] Gosman, A.D., and Clerides, D. Diesel Spray Modeling: a Review. Proc. ILASS-Europe Annual Meeting, Florence, 1997.
- [12] Schmidt, D.P., Rutland, C.J., Corradini, M.L. A Numerical Study of Cavitating Flow Through Various Nozzle Shapes. SAE, No. 971597, 1997.
- [13] Von Dirke, M. Simulation of Cavitating Flow in Diesel Injectors. These Proceedings, 1999.
- [14] Huh, K.Y., and Gosman, A.D. A Phenomenological Model of Diesel Spray Atomisation. Proc. Int. Conf. on Multiphase Flows, Tsukuba, 1991.
- [15] Arcoumanis, C., Gavaises, M., Nouri, J.M., Abdul-Wahab, E., Horrocks, R.W. Analysis of the Flow in the Nozzle of a Vertical Multi-Hole Diesel Engine Injector. SAE, No. 980811, 1998.
- [16] Naitoh, N. Cyto-Fluid Dynamic Theory of Atomisation Processes. These Proceedings, 1999.
- [17] Reitz, R.D. Modeling Atomisation Processes in High-Pressure Vaporising Sprays. Atomisation and Spray Technology, 3, 1987.
- [18] Bai, C., and Gosman, A.D. Development of Methodology for Spray Impingement Simulation. SAE, No. 950283, 1995.
- [19] Nagaoka, M., Kawazoe, H., Nomura, N. Modeling Fuel Spray Impingement on a Hot Wall for Gasoline Engines. SAE, No. 9405254, 1994.
- [20] Bai, C., and Gosman, A.D. Mathematical Modeling of Wall Films Formed by Impinging Sprays. SAE, No. 960626, 1996.
- [21] Stanton, D.W., Rutland, C.J. Modeling Fuel Film Formation and Wall Interaction in Diesel Engines. SAE, No. 960628, 1996.
- [22] Habchi, C., Foucart, H., Baritaud, T. Influence of Wall Temperature on Mixture Preparation in DI Gasoline Engines. These Proceedings, 1999.

За контакти:

Гл. ас. д-р Симеон Илиев, Катедра "Двигатели и транспортна техника", Русенски университет "Ангел Кънчев", тел.: 082-888 331, e-mail: spi@uni-ruse.bg

Докладът е рецензиран.