

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.03.007

# 柴油机运动机构多学科协同优化设计\*

李磊<sup>1,2</sup> 张建润<sup>1</sup> 陈琳<sup>2</sup>

(1. 东南大学机械工程学院, 南京 211189; 2. 江苏科技大学机械工程学院, 镇江 212003)

**摘要:** 研究多学科耦合作用下的结构快速设计优化技术, 提出将多学科设计方法应用于柴油机结构设计, 实现了柴油机运动机构综合性能优化。建立曲轴-连杆-活塞结构三维参数化模型, 以结构轻量化为设计目标, 结构静强度、振动性能和热性能等为约束, 基于多学科协同优化设计思想建立设计优化模型, 完成了柴油机运动机构的多学科性能综合优化并取得了良好的优化结果。

**关键词:** 柴油机 运动机构 多学科优化 协同优化

**中图分类号:** TH112; TK422 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)03-0033-05

## Multidisciplinary Collaborative Design Optimization of Diesel Engine Motion Mechanism

Li Lei<sup>1,2</sup> Zhang Jianrun<sup>1</sup> Chen Lin<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

2. College of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

**Abstract:** Multidisciplinary coupling rapid design and optimization of mechanical structure was researched, and multidisciplinary design optimization of diesel engine motion mechanism was proposed. The comprehensive performance of lightweight, thermal, vibration and kinematic were considered in optimizing the diesel engine motion mechanism. Aimed of lightweight, 3-D parametric model of crankshaft-connecting rod-piston were founded, and the performances of lightweight, vibration, thermal and kinematic was set as constraint. Based the theory of collaborative optimization, multidisciplinary design optimization of the diesel engine motion mechanism performed good results.

**Key words:** Diesel engine Motion mechanism Multidisciplinary optimization Collaborative optimization

### 引言

复杂产品设计要求考虑多个学科的综合性能, 由于学科间的耦合, 子学科之间的性能往往存在相互冲突, 因此, 传统的串行优化设计模式已经不能满足产品设计要求<sup>[1]</sup>。多学科设计优化 (Multidisciplinary design optimization, MDO) 通过协调各个学科之间的矛盾和冲突, 利用各子学科间的协同作用获取系统整体最优解, 在航空航天、汽车、船舶等领域得到了广泛应用<sup>[2-4]</sup>。柴油机作为传统

的动力装置, 目前国内的设计水平相对落后, 难以实现综合性能的最优化, 有必要引入多学科设计方法提高其设计优化水平。

多学科协同优化方法由于组织形式符合现代工业的设计分工并具有较强的可靠性而得到广泛应用<sup>[5-9]</sup>。

本文将多学科设计优化方法应用于柴油机运动机构优化设计, 建立柴油机曲轴-连杆-活塞三维参数化模型, 运用仿真分析方法实现各子系统静力学、动力学及热学等学科分析, 并基于 ISIGHT 构建系统

收稿日期: 2012-02-07 修回日期: 2012-03-04

\* 国防基础科研计划资助项目 (A3820110003) 和国防预研基金资助项目 (11J1.1.2)

作者简介: 李磊, 博士生, 江苏科技大学讲师, 主要从事产品设计及优化研究, E-mail: lilei0064@sina.com

通讯作者: 张建润, 教授, 博士生导师, 主要从事机械产品振动、噪声及其优化设计理论和应用研究, E-mail: zhangjr@seu.edu.cn

多学科协同设计优化平台,实现柴油机结构综合性能的优化。

## 1 柴油机运动机构优化设计学科分解

曲轴-连杆-活塞是柴油机的关键运动部件,决定了柴油机的整体性能。传统的设计方式主要依靠设计人员的经验,设计周期长;同时,由于单学科的设计方法忽略了学科之间的耦合关系,往往不能实现系统整体性能的最优化。曲轴-连杆-活塞设计涉及到结构轻量化、强度、刚度、振动模式、热以及运动学性能等,是典型的多学科设计优化问题。优化设计过程中,基于多学科思想进行学科分解,将系统分解为相对独立的3个子部件(系统),各部件分别完成各自涉及学科的分析,学科性能的耦合通过子部件(系统)间设计参数进行传递,并在整体系统中实现总体性能的协调(图1)。

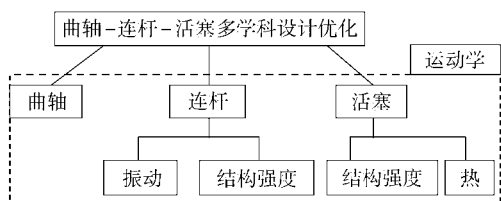


图1 柴油机运动机构多学科优化学科分解框图

Fig.1 Decomposition of diesel engine for MDO

## 2 曲轴-连杆-活塞系统多学科分析

研究对象为某小型农用柴油机,功率4.85 kW,缸径×行程:75 mm×80 mm,额定转速3 000 r/min。基于三维建模软件 Solidworks 完成曲轴-连杆-活塞结构参数化建模(图2),曲轴-连杆-活塞系统在柴油机运行过程中处于不断运动中,其性能应当满足包括动力学性能在内的多方面性能要求。采用 ADAMS 软件完成结构运动学分析及载荷条件的识别,运用 ANSYS 完成活塞振动模态及热分析,同时实现连杆结构强度及刚度分析。

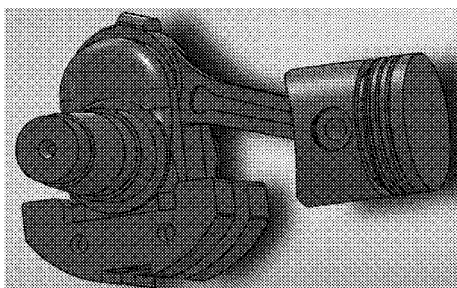


图2 曲轴-连杆-活塞参数化模型

Fig.2 Parametric model of crankshaft-connecting rod-piston system

### 2.1 曲轴-连杆-活塞系统动力学仿真

曲轴-连杆-活塞是柴油机重要的传力机构,掌

握其运动和受力情况是解决柴油机平衡、振动和总体设计的基础,也是对其主要零部件进行强度、刚度、磨损分析的依据。基于 ADAMS 对系统进行运动学和动力学仿真,获得连杆小头、活塞和曲轴工作时所受到的最大载荷,将其作为连杆活塞和曲轴强度、刚度分析的载荷边界条件。基于三维建模软件 Solidworks 完成曲轴连杆活塞工作机构建模,导入 ADAMS 建立各部件的约束关系,其仿真模型如图3所示。

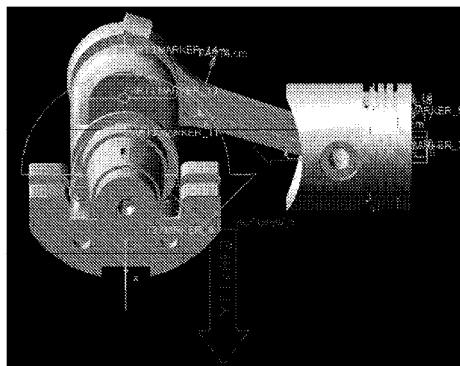


图3 曲轴-连杆-活塞运动学分析模型

Fig.3 Analysis model of crankshaft-connecting rod-piston system

经分析,当曲轴转速为3 000 r/min时,最大燃气爆发力为27 779.5 N。连杆小头受力曲线如图4,在活塞到达上止点,即最大燃气爆发力时,连杆小头所受的最大压力为25 475 N。在进气冲程开始的上止点附近,连杆小头所受的最大拉力为2 304 N,承受的应力是周期性变化的,一般情况下,应选择连杆承受最大拉力和最大压力两种情况进行强度分析。

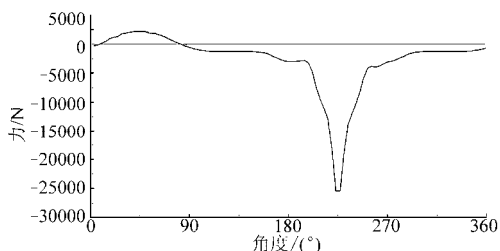


图4 连杆小头受力曲线

Fig.4 Force curve of small head of the connecting rod

### 2.2 连杆仿真分析

柴油机工作时,连杆作复杂的平面运动。连杆小头与活塞相连,沿气缸中心线作往复直线运动;连杆大头与曲柄销相连,绕曲轴回转中心转动。连杆结构静强度和动刚度对柴油机性能影响较大。为了实现连杆结构优化,对其做强度及模态分析。连杆小端孔内表面的压力为 $p = F_{2\max} / A_2$ ,其中 $F_{2\max}$ 为连杆在额定工作时的最大压力, $A_2$ 为连杆小端内孔圆柱面表面积的一半。连杆大端半圆柱面添加全约束,其静刚度分析结果如图5,模态频率如表1。

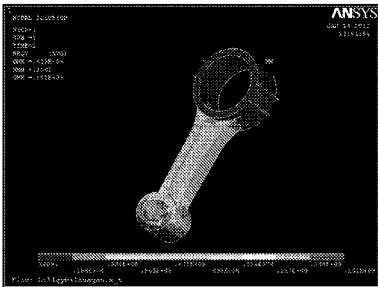


图 5 连杆结构静强度分析结果

Fig. 5 Strength analysis result of connecting rod

表 1 连杆结构模态分析结果

Tab. 1 Modal analysis result of connecting rod

阶数	模态频率/Hz	模态振型
1	393	弯曲
2	617	扭转
3	1 322	复合运动

### 2.3 活塞仿真分析

活塞在柴油机运动过程中受气缸压力及燃烧室温度影响,应具有较强的强度和热性能。采用 ANSYS 软件建立活塞的参数化仿真模型,通过对活塞的强度和稳态温度分析获得活塞的最大应力和最高温度值,作为连杆活塞优化的约束条件。

为了减少计算量,采用活塞的 1/4 模型进行强度分析,活塞顶面和顶岸侧面压力为  $p_A = F_{1max}/A$ , 其中  $F_{1max}$  为活塞额定工作时最大燃气爆发力,  $A$  为活塞顶面的表面积; 活塞第一环槽的上下顶面和侧面的压力为  $p_B = 0.75F/A$ ; 活塞第二环槽的上下顶面和侧面的压力为  $p_C = 0.25F/A$ 。对 1/4 的活塞模型的侧面添加对称约束, 活塞销孔添加全约束, 结果如图 6 所示。

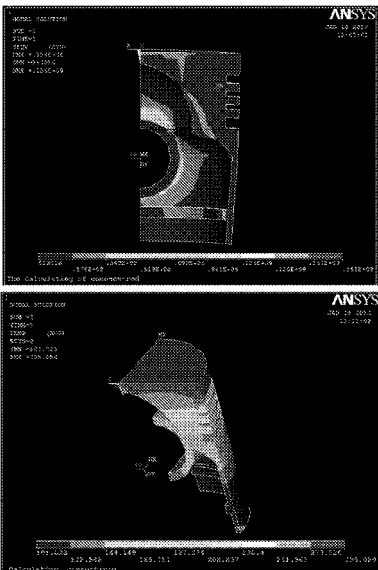


图 6 活塞强度分析及热分析结果

Fig. 6 Strength and thermal analysis of piston

## 3 多学科设计优化

### 3.1 优化变量选择

优化变量的选择主要考虑结构设计目标及约束,同时,过多的设计变量会带来仿真分析和优化迭代过程的复杂性。为此,应合理选择变量及其数量。这里,选取优化设计变量如表 2 所示。

表 2 优化变量及其约束

Tab. 2 Variable parameters and constraint selection for optimization

变量	初始值	约束范围
连杆大端宽度 $a$	27	(25, 29)
连杆大端宽度 $b$	21.6	(18, 22)
连杆大端宽度 $c$	15	(13, 17)
连杆大端宽度 $d$	8	(6, 10)
连杆大端宽度 $e$	10	(8, 12)
连杆大端过渡圆弧半径 $f$	60	(55, 65)
连杆凹槽小端圆弧半径 $g$	5	(3, 7)
连杆凹槽大端圆弧中心距 $h$	7	(5, 9)
连杆凹槽小端圆心和小端圆心距 $i$	26	(24, 28)
活塞顶岸高度 $j$	8	(6, 10)
活塞环槽深度 $k$	5	(3, 7)

### 3.2 基于协同优化算法 (CO) 的优化过程设计

协同优化算法 (CO)<sup>[10]</sup> 是由 Kroo 等在一致性约束优化算法基础上提出的一种多级优化算法。如图 7 所示<sup>[10]</sup>, CO 是一种双级层次的 MDO 方法, 顶层为系统级优化器, 对多学科变量进行优化, 以满足学科间约束的兼容性, 同时最小化系统目标。每一个子系统优化器在子空间设计变量子集与子空间分析的计算结果间以最小均方差方法进行优化。在满足子空间约束的同时, 求系统级设计变量。在子空间优化过程中, 系统级设计变量作为固定值来考虑。该算法消除了复杂的系统分析, 各个子系统能并行地进行分析和优化, 具有较强的收敛性和可靠性。

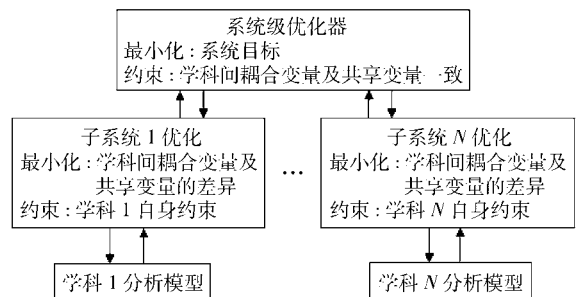


图 7 协同优化算法原理图

Fig. 7 Theory of collaborative optimization

本文基于多学科设计优化软件 ISIGHT 建立的曲轴-连杆-活塞协同优化设计模型如图 8 所示, 该系统以连杆-活塞总质量最小为系统级设计目标, 活

塞及连杆作为子系统设计,以连杆强度、连杆模态、活塞热应力等为设计约束,同时考虑曲轴-连杆-活塞机构的运动学和动力学特性。

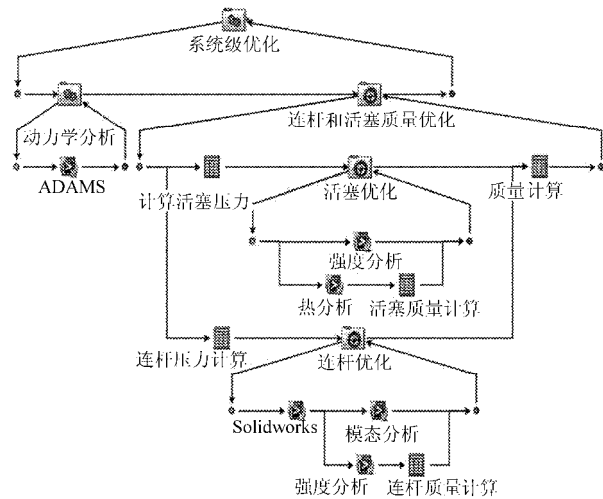


图8 曲轴-连杆-活塞结构多学科协同优化设计模型

Fig.8 Collaborative optimization model of crankshaft-connecting rod-piston

系统级设计目标:系统总质量  $f = f_1 + f_2$ , 其中  $f_1$  和  $f_2$  分别为连杆和活塞质量。且  $f_1 = g_1(a, b, c, d, e, f, g, h, i)$ ,  $f_2 = g_2(j, k)$ 。

子系统级设计目标及约束:活塞的最大应力应小于许用应力:  $\sigma_{1\max} \leq 2.6 \times 10^8$  Pa; 活塞工作时的最大温度应小于许用温度:  $T_{\max} \leq 310$  °C; 连杆最大应力应小于许用应力:  $\sigma_{2\max} \leq 3 \times 10^8$  Pa; 连杆工作时最大位移:  $S_{\max} \leq 1 \times 10^{-4}$  m; 连杆一阶频率:  $f_{1c} \geq 300$  Hz。

### 3.3 结果分析

连杆活塞总质量优化系统、子系统活塞优化和子系统连杆优化选择 NLPQL 算法。在连杆优化子系统第 131 次, 活塞优化子系统第 34 次迭代时得到系统最优解(如图 9)。优化前连杆活塞系统总质量为 1.016 kg, 优化后的连杆活塞系统为 0.949 kg, 减少了 6.58%。其中  $a = 26.3$  mm,  $b = 20.3$  mm,  $c = 13$  mm,  $d = 6$  mm,  $e = 10$  mm,  $f = 59.9$  mm,  $g = 6.3$  mm,  $h = 7.1$  mm,  $i = 26$  mm,  $j = 6$  mm,  $k = 7$  mm。

如表 3 所示, 目标函数在优化迭代后实现了最优化, 约束函数满足约束条件。柴油机运动机构在完成多学科设计优化的过程中, 由于多个学科性能之间的冲突和耦合, 质量学科的设计目标必然影响

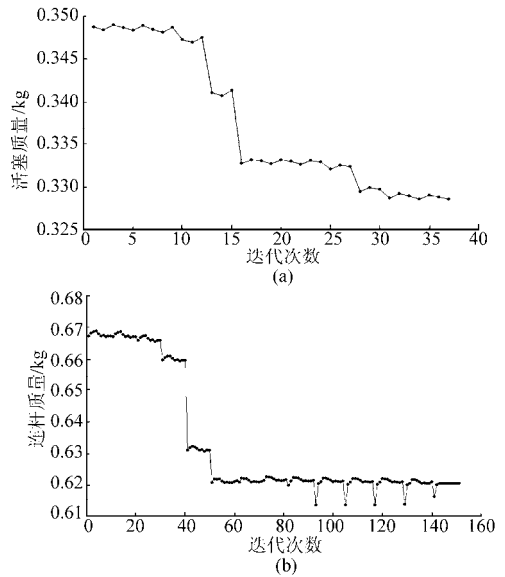


图9 优化目标迭代结果

Fig.9 Iterative process of optimization objectives  
(a) 活塞系统 (b) 连杆系统

了其他学科的设计性能(如连杆应力和固有频率), 多学科设计优化通过充分协调学科间的耦合和矛盾, 在满足实际工况约束的前提下, 获取最优的综合性能。

表3 约束函数及目标优化结果

Tab.3 Comparison results of constraint and objective functions

变量	活塞最大应力/Pa	活塞最大工作温度/°C	连杆最大应力/Pa	连杆一阶频率/Hz	系统质量/kg
原设计值	$1.55 \times 10^8$	295	$1.51 \times 10^8$	393	1.016
优化值	$1.31 \times 10^8$	300	$2.10 \times 10^8$	300	0.949

## 4 结论

(1) 在参数化模型的基础上, 实现了柴油机运动部件的刚度、振动、热以及动力学分析。

(2) 运用多学科协同优化算法对柴油机运动机构进行了多学科综合性能优化设计, 实现了柴油机结构设计的学科耦合和协调, 获取最优的系统综合性能, 为其结构设计提供了技术支撑。

(3) 基于仿真分析的优化设计过程方便集成各种商用软件, 实现了大型复杂结构的快速设计优化, 为柴油机等复杂结构设计奠定了基础。

## 参考文献

- 1 Wang Dapeng. Multidisciplinary design optimization with collaboration and domain decomposition; application to aircraft design [D]. Canada; Univ. of Manitoba, 2005.
- 2 王威, 范文慧, 肖田元. 复杂产品多学科协同设计优化建模方法[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(11): 2524~2527.  
Wang Wei, Fan Wenhui, Xiao Tianyuan. Multidisciplinary collaborative design optimization modeling method of complex product [J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(11): 2524~2527. (in Chinese)
- 3 陈亮, 张邵平, 王伟. 产品多学科协同设计中基于语义推理的动态协调方法[J]. 农业机械学报, 2011, 42(5): 208~213.

- Chen Liang, Zhang Shaoping, Wang Wei. Dynamic coordination principle and method of multidisciplinary collaborative product design based on semantics reasoning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5): 208 ~ 213. (in Chinese)
- 4 虞跨海, 王金生, 杨茜, 等. 基于近似的涡轮冷却叶片外形多学科设计优化[J]. 机械工程学报, 2011, 47(10): 106 ~ 112. Yu Kuahai, Wang Jinsheng, Yang Xi, et al. Multidisciplinary design optimization of cooling turbine blade profiles based on surrogate model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(10): 106 ~ 112. (in Chinese)
- 5 李磊, 李元生, 敖良波, 等. 船用大功率柴油机涡轮增压器多学科设计优化[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 136.
- 6 王平, 郑松林, 吴光强. 基于协同优化和多目标遗传算法的车身结构多学科优化设计[J]. 机械工程学报, 2011, 47(2): 102 ~ 108. Wang Ping, Zheng Songlin, Wu Guangqiang. Multidisciplinary design optimization of vehicle body structure based on collaborative optimization and multi-objective genetic algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(2): 102 ~ 108. (in Chinese)
- 7 苏瑞意, 桂良进, 吴章斌, 等. 大客车车身骨架多学科协同优化设计[J]. 机械工程学报, 2010, 46(18): 128 ~ 133. Su Ruiyi, Gui Liangjin, Wu Zhangbin, et al. Multidisciplinary design and collaborative optimization for bus body[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(18): 128 ~ 133. (in Chinese)
- 8 李冬琴, 王丽铮, 孔令海. 基于协调机制的多学科设计优化框架研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2011, 35(3): 562 ~ 566. Li Dongqin, Wang Lizheng, Kong Linghai. Study on the framework of multidisciplinary design optimization based on collaboration mechanism[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2011, 35(3): 562 ~ 566. (in Chinese)
- 9 宋保维, 杜伟, 高智勇, 等. 基于协同优化的鱼雷多学科设计优化[J]. 鱼雷技术, 2009, 17(6): 7 ~ 11. Song Baowei, Du Wei, Gao Zhiyong, et al. Multidisciplinary design optimization of torpedo general design based on collaborative optimization[J]. Torpedo Technology, 2009, 17(6): 7 ~ 11. (in Chinese)
- 10 Kroo I, Maning V. Collaborative optimization: status and directions[M]. Stanford: AIAA, 2000.

(上接第5页)

- 4 杨振中. 氢燃料内燃机燃烧与优化控制[D]. 杭州: 浙江大学, 2001. Yang Zhenzhong. Hydrogen fueled internal engine combustion and optimize control[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001. (in Chinese)
- 5 Lee J T, Kim Y Y, Lee C W, et al. An investigation of a cause of backfire and its control dueto crevice volumes in a hydrogen fueled engine[C]//Proceedings ASME Spring Technical Conference, 2000 - ICE - 284, San Antonio, USA, 2000.
- 6 Kondo T, Iio S, Hiruma M. A study on the mechanism of backfire in external mixture formation hydrogen engines-about backfire occurred by the cause of the spark plug[C]. SAE Paper 971704, 1997.
- 7 Swain M R, Schade G J, Swain M N. Design and testing of a dedicated hydrogen fueled engine[C]. SAE Paper 961077, 1996.
- 8 Lee S J, Yi H S, Kim E S. Combustion characteristics of intake port injection type hydrogen fueled engine[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1995, 20(4): 317 ~ 322.
- 9 Verhelst S. A study of the combustion in hydrogen fuelled internal combustion engines[D]. Gent, Belgium: Ghent University, 2005.
- 10 Kahraman E, Ozcanh S C, Ozerdem B. An experimental study on performance and emission characteristics of a hydrogen fuelled spark ignition engine[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(12): 2 066 ~ 2 072.
- 11 Liu Xinghua, Liu Fushui, Zhou Lei, et al. Backfire prediction in a manifold injection hydrogen internal combustion engine [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(14): 3 847 ~ 3 855.
- 12 Hong Munan, Zhang Jianyong, Li Xihao. Effect of injection timing on backfire of port injection hydrogen engine[C]. SAE Paper 2008 - 01 - 1788, 2008.
- 13 Sebastian Verhelst, Roger Sierens. A critical review of experimental research on hydrogen fueled SI engine[C]. SAE Paper 2006 - 01 - 0430, 2006.
- 14 Drell L, Belles F E. Survey of hydrogen combustion properties [C] // Tech. Rep. 1383. National Advisory Committee for Aeronautics, 1958.