



装备科技译著出版基金

涡扇发动机 先进控制

Advanced Control of
Turbofan Engines

【美】Hanz Richter 著 覃道亮 王曦 译



Springer



国防工业出版社
National Defense Industry Press

014002650

V235.13
07



装备科技译著出版基金

涡扇发动机先进控制

Advanced Control of Turbofan Engines

[美] Hanz Richter 著

覃道亮 王曦 译



V235.13
07

国防工业出版社

· 北京 ·



北航

C1688143

著作权合同登记 图字:军-2012-238 号

图书在版编目(CIP)数据

涡扇发动机先进控制 / (美)理查特(Richter, H.) 著;
覃道亮, 王曦译. —北京:国防工业出版社, 2013. 8
书名原文: Advanced control of turbofan engines
ISBN 978-7-118-08758-1

I. ①涡... II. ①理... ②覃... ③王... III. ①透
平风扇发动机-控制系统-研究 IV. ①V235.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 126218 号

Translation from English language edition:
Advanced Control of Turbofan Engines
by Hanz Richter Copyright © 2012 Springer New York
Springer New York is a part of Springer Science + Business Media
All Rights Reserved
版权所有, 侵权必究。

※

国防工业出版社出版

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷责任有限公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 15 $\frac{3}{4}$ 字数 297 千字
2013 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 78.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777
发行传真: (010) 88540755

发行邮购: (010) 88540776
发行业务: (010) 88540717

译 者 序

发动机是飞机的“心脏”，要让发动机合理有效地工作，离不开先进的控制技术。发动机控制系统在飞机发动机研制过程中占有重要的地位，它往往标志着航空发动机整体技术的发展水平。在过去的 60 多年里，航空发动机控制技术得到了显著的进步，已由简单开环机械液压系统发展到复杂闭环机械液压系统，再到目前的全权限数字电子控制器技术。从国外的总体发展趋势来看，未来的航空发动机控制势必会呈现出智能化、网络化、自主化的特点，现代先进控制理论方法将会在未来航空发动机上得到更为广泛的应用。

汉茨·理查特(Hanz Richter)教授的专著《涡扇发动机先进控制》“Advanced Control of Turbofan Engines”(施普林格(Springer)出版)介绍了民用涡扇发动机的工作性能要求，该著作不仅细致分析了工业标准控制方法，而且还重点介绍了自适应控制、滑模控制和模型预测控制方法在航空发动机上的前沿应用研究。通过利用 NASA 发布的民用模块化航空推进系统仿真(Commercial Modular Aero-Propulsion System Simulation, CMAPSS)软件，作者演示了这些前沿方法潜在的工程应用前景。

本书适合具有基本控制系统知识的航空或机械工程师、对燃气轮机陌生的控制工程师以及机械、电子或航空工程专业的一年级研究生。对于从事技术决策的管理人员，也可从本书中获得益处。本书的特点体现在：①时间新(2012 年出版)；②内容新(经典、现代、前沿理论均有涉及)；③软件新(采用由 NASA 发布的 CMAPSS 软件进行方法评测，受到国际领域内专家的一致认可)。另外，原书中有部分非法定计量单位，本书在翻译过程中为尊重原著未对此进行修改，并加注了页末注，写出了其与法定计量单位的换算关系，方便读者阅读和理解。

本书的翻译和出版，获得了中国航空工业集团公司科技委彭友梅研究员及中国航空工业集团公司发展研究中心胡松岩研究员的关心和支持，并得到了国防工业出版社“装备科技图书翻译基金”和“凡舟青年科研基金”(20110405)的资助，这些基金帮助促进了本书的顺利出版。

翻译期间得到过李旭、何皑、刘月、赵威力、付小磊、石竟成、王华威等人的热心帮助，得到了国防工业出版社领导和编辑的支持。在此一并表示感谢。

由于译者水平有限，虽然几经易稿，但是书中疏漏和不足之处仍在所难免，敬请读者批评和指正。

纪念我的父亲

前 言

燃气轮机(尤其是广泛安装在民用飞机上的涡扇发动机)必须通过反馈控制的方式进行工作。广义上讲,控制系统的目的是为了实现良好的推力响应能力,并将重要的发动机输出维持在安全限制之内。设计能满足这种目标的控制器是一项具有挑战的工作,即使是考虑分析具有已知参数的线性模型时,情况也是如此。燃气轮机动力学是非线性的,并会出现不确定的参数变化,这给前述问题增加了多重复杂性。

然而,在役民用飞机所装配的推进控制系统最终是基于经典单输入单输出线性补偿回路的。为了满足更快、更强、更可靠的发动机装配需求,在控制系统开发过程中逐步增加了多种特性。传统上,通过引入增益调度来处理可测量数据源的参数变化,如高度和马赫数,而发动机安全限制则是通过超驰控制策略进行解决的。这两种特点让经典反馈补偿方法依旧保持在核心位置上。

标准的发动机控制系统已经使用了几十年,目前没有什么重大的概念变化。与此同时,众多新的控制理论(很多在工业应用中获得了验证)相继被提出并得到了发展。许多控制系统研究专注于参数变化性、非线性和系统变量约束的主题。这些研究主题是最具挑战的控制问题的主要特征,并且在燃气轮机研究中一定会遇到。

存在于大量现有先进控制技术和常用专有控制间的巨大鸿沟可以解释为后者足以满足目前的技术需求。然而,最近在飞机控制方面的研究则要求在给定一组关键变量的允许极限下,最大程度地发挥发动机性能。特别是在一些紧急机动飞行中,快速的推力响应是非常重要的。正如本书中所述,经典反馈控制作为一种理论框架已不再适合先进的推进控制理念。

编写本书有两个主要目的:第一,将先进控制应用到燃气轮机这一高度相关的领域,在介绍复杂概念之前,需要先回顾标准发动机控制技术并对其进行精确的描述;第二,采用准确的控制系统框架来介绍标准发动机控制方法。因此,本书包含了发动机工作原理与动态模型之类的介绍性主题,接着是经典反馈补偿问题,最后以高级研究主题来结束本书。

读者对象

本书适用于两类读者:一类是具有控制系统基本知识的航空或机械工程师;另一类是对燃气轮机知之甚少或不知的控制工程师(典型的电气工程师可能属于此

类)。当然,任何介于这两者之间的其他工程师也将从本书中获得益处,因为它包含了燃气轮机系统的详细信息,并且介绍了先进控制的主题。

书中内容便于一年级机械、电子和航空工程的研究生理解。本书假设读者熟悉经典控制概念,例如,稳定性、根轨迹设计、频率响应以及基本极点配置设计的概念。为了能够领会数值算例并理解仿真结果,要求读者熟悉 Matlab/Simulink。

本书包含了许多采用 NASA CMAPSS 软件包的非线性发动机仿真,其中,CM-PASS 软件包面向美国境内公众开放。对于寻求重现书中非线性发动机仿真的读者,必须要有此软件包。而对于未采用 CMAPSS 软件的读者,附录中包含了 90000 磅^①和 40000 磅推力级的发动机线性化状态空间模型矩阵。这些数据对于许多控制设计的计算是有用的,甚至可用于生成带参数变化的定制化仿真。

虽然本书没有在每章之后提供相应的习题,但它是以教科书的方式来进行编写的。正因如此,本书也可以用作飞机发动机控制专业研究生课程的基础或参考材料。对于重点在基本概念的课程,可以选用第 1~3 章,第 5 章和第 7 章进行教学;对于重点在学术研究的课程,可以选用第 1 章、第 2 章,第 6~9 章进行教学。

本书纲要

第 1 章引言:在假设读者了解热力学变量的条件下,回顾了解释燃气轮机工作过程的热力学原理;介绍了真实发动机部件、发动机工作过程及关键的定量性能度量指标;讨论了安全性和工作限制,包括喘振与失速现象的数学描述。

第 2 章发动机模型和仿真工具:简要回顾了发动机动态特性,目的是提取用作设计基础的线性化模型;介绍了由 NASA 格林研究中心开发的民用模块化航空推进系统仿真(Commercial Modular Aeropropulsion System Simulation, CMAPSS)软件包。

第 3 章传统发动机控制方法:回顾了经典单输入单输出设计技术(根轨迹和频域回路成形),并将其应用到风扇转速控制问题中,这里将燃油流量用作控制输入。同时还介绍了一种模型匹配设计方法,并作为工具用在了 CMAPSS 中。仿真算例说明了采用固定线性补偿器的不足之处。

第 4 章鲁棒状态反馈发动机控制:回顾了线性多变量控制理论,并介绍了描述对象变化性的多胞系统模型。本章还给出了多种多输入多输出状态反馈综合方法,例如, LQR、 H_2 、 H_∞ 以及带有区域极点配置约束的混合目标优化方法。对于单输入单输出系统,给出了一种简化的 H_∞ 补偿器综合方法。同时,包含了 Matlab 代码以及采用 CMAPSS 非线性发动机模型的仿真。

第 5 章增益调度与自适应:介绍了增益调度和线性参数变化技术,并将其用于

^① 磅为非法定计量单位,1 磅 = 4.44822N。——译者注

处理飞行包线内对象变化性问题;还介绍了自适应控制的概念,并给出一种基本的模型参考自适应设计方法;最后,提供了基于 CMAPSS 发动机非线性模型的 Matlab 仿真代码。

第 6 章**涡扇发动机滑模控制**:介绍了滑模控制的概念,并详细地阐述了滑模控制鲁棒性性质和常用的调试方法;给出了多输入多输出情形的滑模调节器和设计点跟踪器,以及一种简化的单输入单输出设计方法;最后,提供了采用 CMAPSS 的发动机线性和非线性仿真。

第 7 章**采用线性调节器的发动机限制管理**:介绍了标准发动机控制系统中采用的低选—高选限制管理技术,旨在把关键变量维持在可允许的界限内。通过使用正不变性概念,彻底分析了这种限制管理技术,并在仿真过程中,示例说明低选—高选方法的不足之处。同时,本章还简单介绍了一种加速限制方法。

第 8 章**采用滑模的发动机限制管理**:介绍了一种将发动机关键变量限制在允许范围内的方法,该方法克服了标准低选—高选限制管理方法的不足;给出了滑模调节器与高选或低选选择器逻辑关联的准则,以及一种 H_2/H_∞ 滑模系数综合方法;采用 CMAPSS 非线性发动机模型进行了仿真实验。

第 9 章**采用模型预测控制的发动机限制管理**:介绍了模型预测控制概念以及基于线性状态空间模型的基本预测公式。首先,采用适合引入到 Matlab 二次规划求解器的紧凑矩阵公式来表述约束优化问题。然后,将模型预测控制应用到发动机控制问题中,并处理输入和输出的限制问题。本章也讨论了计算复杂度及其降低方法,包括了基于 CMAPSS 非线性发动机模型的 Matlab 代码和仿真算例。

未包含的主题

在这些最为相关的主题中,未进行讨论的问题有:①通过系统辨识的发动机建模;②基于观测器的控制;③发动机健康估计;④鲁棒输出反馈综合(除 4.9 节的简化方法之外)。

注意:燃气轮机控制代表着一类少有(却幸运)的情况,这里状态变量是可实时测量得到的。这就解释了为何故意遗漏②和④主题。至于①和③主题,它们实在是太大,任意一项就可独立成书。同时,从面向控制的要求出发,这些主题还是可以安全地忽略掉。对这些主题感兴趣的读者,本书中包含了相应的参考文献。

致 谢

我希望向位于克利夫兰市的 NASA 格林研究中心控制与动力学分部的 Jonathan S. Litt 和 Sanjay Garg 表达我个人最诚挚的谢意,感谢他们对我研究连续的支持和无价的指导。

特别感谢我那喜乐的妻子^① Francisca,对我本人的足够耐心和适应,另外,在我完成本书的过程中给她带来很多干扰,在此对她的包容表示感谢。同时感谢我的三个女儿,Micaela、Emilia 和 Martina,是她们让我安装 Linux 操作系统并独占家中的计算机长达 18 个月之久。

最后,感谢机械工程系主席 William Atherton 教授,是他减免了我一学期的教学工作量,使我能够集中精力完成本书手稿。

俄亥俄州克利夫兰

克利夫兰州立大学

机械工程系汉茨·理查特

^① 喜乐的妻子是生活的乐趣——Goethe。

目 录

第 1 章	引言	1
1.1	工作原理	1
1.1.1	焦耳—布雷顿循环	2
1.2	外涵涡扇发动机	3
1.2.1	真实发动机的性能与效率	5
1.3	工作限制和部件特性图	7
1.3.1	压气机和风扇特性图	7
1.3.2	涡轮特性图	11
1.3.3	R-线与失速裕度	11
1.3.4	燃烧不稳定性与熄火	12
1.3.5	结构与热力限制	13
1.3.6	发动机整体工作限制	13
1.4	总参数和换算参数	13
1.5	小结	15
第 2 章	发动机模型和仿真工具	16
2.1	双转子动力学	16
2.1.1	基于循环平台数据的模型构建	17
2.1.2	基于系统辨识的模型	19
2.1.3	发动机老化和退化建模	19
2.2	民用模块化航空推进系统仿真	20
2.2.1	CMAPSS 主要特点	20
2.2.2	算例	24
第 3 章	发动机经典控制方法	29
3.1	通过 EPR 或风扇转速进行设计点控制	29

3.1.1	积分控制	30
3.1.2	采用根轨迹的补偿器设计	30
3.1.3	频域补偿:手工回路成形	32
3.1.4	Edmund 模型匹配方法	33
3.1.5	比较性算例	33
3.2	固定线性补偿器设计的不足之处	36
3.2.1	飞行包线内的参数变化	36
3.2.2	发动机限制	38
第4章	发动机鲁棒状态反馈控制	42
4.1	多变量系统理论概述	42
4.1.1	算例	43
4.1.2	奇异值	44
4.1.3	线性系统无穷范数	44
4.1.4	线性系统2-范数	45
4.2	鲁棒状态反馈综合	45
4.2.1	系统不确定性多胞描述	46
4.2.2	标称稳定性和鲁棒稳定性	47
4.2.3	多胞系统的二次稳定性	48
4.3	性能度量	49
4.4	LQR 状态反馈综合	50
4.4.1	带有区域特征值约束的 LQR	50
4.4.2	经济性 LQR 问题和性能限制	51
4.4.3	LQR 鲁棒性性质	51
4.4.4	多胞型系统	51
4.5	H_2 状态反馈综合	52
4.5.1	最优 H_2 综合	52
4.5.2	多胞系统	53
4.6	H_∞ 状态反馈综合	53
4.6.1	多胞系统	54
4.7	带有区域极点配置的 H_2/H_∞ 反馈综合	54
4.7.1	状态反馈设计点调节和输入积分	55

4.8	算例:CMAPSS-40k	58
4.8.1	40k 级发动机的一种多胞描述	58
4.8.2	缩放增广对象的可稳定性	58
4.8.3	固定增益 LQR 设计	59
4.8.4	CMAPSS-40k 中的固定增益 LQR	60
4.8.5	H_2/H_∞ 固定增益综合:多胞对象模型	62
4.9	简化的 H_∞ 风扇转速控制	70
4.9.1	混合灵敏度 H_∞ 设计	70
4.9.2	频率加权	71
4.9.3	算例:混合 H_∞ 综合——CMAPSS-40k	72
4.10	小结	75
第 5 章	增益调度和自适应	76
5.1	鲁棒性、调度及自适应	76
5.1.1	输入调度	77
5.2	标准燃气轮机增益调度控制	77
5.3	线性参数变化方法	79
5.3.1	从多胞顶点获取 LPV 分解	80
5.3.2	一种简单的 LPV 风扇转速 PI 控制方法	81
5.3.3	其他 LPV 方法	85
5.4	自适应控制综述	85
5.4.1	相对阶为 1 的 MRAC	87
5.4.2	算例:CMAPSS-1	88
第 6 章	涡扇发动机滑模控制	93
6.1	研究动机的例子:火箭弹推进器开关控制	94
6.1.1	引入不确定性和干扰	97
6.2	多变量滑模控制调节器	100
6.2.1	匹配型不确定性	100
6.2.2	控制规律的开发设计	101
6.2.3	降阶的动态特性和滑模系数的选取	102
6.2.4	Utkin 和 Young 的 LQ 方法	105

6.2.5	滑模控制调节器算例:CMAPSS-40k	106
6.3	滑模控制输出设计点跟踪	110
6.3.1	算例:线性化 CMAPSS-40k 模型	111
6.4	简化的单输入单输出积分滑模控制设计	113
6.4.1	算例:CMAPSS-1	115
第 7 章	采用线性调节器的发动机限制管理	118
7.1	低选—高选限制管理逻辑	119
7.1.1	默认索引假设:低选和高选算子	120
7.1.2	采用动态补偿器的低选—高选限制管理的静态特性	121
7.1.3	算例:CMAPSS-1	124
7.2	集合不变性的基本概念	125
7.2.1	区间的正不变性	126
7.2.2	线性系统的椭球不变集	126
7.2.3	半空间的不变性	127
7.2.4	椭球工作集	127
7.3	采用积分状态反馈控制器的低选—高选限制管理	129
7.3.1	固定调节器下的闭环特性	130
7.3.2	相对固定索引的闭环特性	130
7.3.3	采用状态反馈的低选—高选限制管理的静态特性	131
7.3.4	算例:CMAPSS-1 线性化模型	134
7.3.5	过渡态限制保护分析	138
7.4	算例:CMAPSS-1 线性化模型	142
7.5	另外一种最小交互性设计: H_{∞} 方法	142
7.5.1	算例:CMAPSS-1	143
7.5.2	算例:椭球不变集——CMAPSS-1 线性化模型	144
7.6	加速和减速限制	146
7.6.1	“N-Dot”控制和加速调度	147
第 8 章	采用滑模的发动机限制管理	148
8.1	系统描述、假设以及控制目标	149
8.1.1	控制目标	150
8.1.2	滑模控制律	151

8.2	固定调节器下的特性	151
8.2.1	确定稳态调节器的索引	152
8.3	稳定性特性总结	153
8.3.1	稳定性:低选或高选切换	154
8.3.2	稳定性:低选—高选切换	154
8.4	不变性性质:限制保护	154
8.4.1	低选切换下的不变性	154
8.4.2	高选切换下的不变性	155
8.4.3	低选—高选切换下的不变性	155
8.5	其他考虑	155
8.5.1	受限输出一致性	156
8.6	设计过程	156
8.6.1	多目标控制:混合 H_2/H_∞ 反馈增益综合	157
8.7	设计算例	158
8.7.1	线性化仿真研究	158
8.7.2	CMAPSS 实现: T_{48} 的上限	163
8.7.3	带有多个限制调节器的 CMAPSS 实现	165
8.8	小结	168
第 9 章	采用模型预测控制的发动机限制管理	170
9.1	数字控制系统和等价的零阶保持模型	171
9.2	最优滚动时域控制	174
9.3	预测方程	176
9.4	增量式模型预测控制表述:非约束情形	177
9.4.1	算例	179
9.5	增量式模型预测控制表述:约束情形	181
9.6	算例:在地面慢车条件下的线性化 CMAPSS-40k 对象	183
9.7	算例:非线性 CMAPSS-40k 发动机仿真	185
9.8	处理计算代价问题	188
9.8.1	显式的模型预测控制实现	189
9.8.2	多路复用控制	190
后记		192

附录 A 风扇转速的时间最优控制 193

 A.1 时间最优调节器..... 193

 A.2 算例..... 195

 A.3 最短时间的设计点跟踪器..... 195

 A.4 算例:设计点跟踪 197

附录 B 典型线性模型矩阵列表:90k 级发动机 198

附录 C 典型线性模型矩阵列表:40k 级发动机 202

附录 D 线性化模型预测控制仿真的 Matlab 代码 207

术语表 211

参考文献 213

索引 219

第1章 引言

摘 要

本章在假定读者了解热力学变量的条件下,回顾了燃气轮机工作过程的热力学原理;介绍了真实的发动机部件、发动机工作过程及关键的定量性能度量指标;讨论了安全性和工作限制,包括喘振与失速现象的数学描述。

本章介绍了燃气轮机,主要以定性方式描述其工作原理和约束。对于熟悉这些主题的航空工程师和读者,可以完全略过或快速浏览本章,并直接从数学建模一章开始阅读。

燃气轮机是目前所建造的最为复杂的机器之一,这不仅是因为其构造复杂,也因为其所展示的动态特性和工作所需的工程技术十分复杂。由于其较高的燃油效率、额定功率和可靠性,燃气轮机被应用于各种交通运输系统中,包括飞机、直升机、船舶、军用坦克(如 M1 Abrams)。在世界的许多城市,地面电站在用电高峰时仍依赖于燃气轮机。

本书重点介绍涡扇发动机的控制系统。涡扇发动机是一种优化设计的燃气轮机,主要面向民用空中交通运输。在工作原理和控制方法方面,涡扇发动机类似于其他类型的燃气轮机。对于使用本书作为飞机发动机控制主要参考源的初级读者,当查看其他种类的燃气轮机资料时,将会感到得心应手。

1.1 工 作 原 理

从燃气轮机中提取有用功有三种方式:

(1) 动量交换:航空燃气轮机提供的大多数有用功源自尾喷口高速喷出的燃气。反作用推力正比于空气流量以及喷出的燃气相对于发动机的速度。

(2) 负载与发动机转轴的直接机械连接:飞机发动机中,泵和发电机之类的附件是以这种方式获取动力的;地面用于发电的燃气轮机是通过旋转轴连接到发电机来供给动力的;船用发动机以机械的方式向螺旋桨提供动力。

(3) 流体传送(引气):从飞机发动机的压气机中抽取的高压热空气有多种用途,例如,除冰系统、气动动作器以及座舱环境控制。

1.1.1 焦耳—布雷顿循环

燃气轮机是焦耳—布雷顿热力循环的近似实际实现,这种循环使得燃油燃烧的热能可以高效地转化为机械能。由于工质的能量随着压力和温度的增大而增加,因此使用了机械压缩(减小体积)和通过燃烧的加热方式。然后,允许工质膨胀和冷却,并返回至初始状态。在膨胀阶段,通过强制气流冲击可转动涡轮叶片面或以如上所述的动量交换方式来提取机械功。图 1.1 中的压力—体积图显示了理想的焦耳—布雷顿循环。从 1 到 2 工质被压缩,不存在与周围环境的热交换或摩擦生热,这种理想的过程称为等熵压缩;在 2 和 3 之间以等压的方式加热;将气流从 1 带至 3 所需的能量等于 $Q_{in} + W_{in}$,即燃油产生的热能和压缩气流所需的机械功之和;整个机械能 W_{out} 通过 3 和 4 之间的等熵膨胀的方式提取出来。图 1.1 中的点划线表示部分 W_{out} 用于驱动压气机,这是所有燃气轮机在设计上的一种固有特性。因此,在计算效率时,只有 Q_{in} 才认为是能量“投资”。循环以气流的等压冷却来完成,通过气流向周围边界的传热 Q_{out} 实现冷却。在理想焦耳—布雷顿循环中,这种热能表示损失的能量。通过将净有用功除以能量“投资”,得到理想循环的效率为

$$\eta_i = \frac{W_{out} - W_{in}}{Q_{in}} \quad (1.1)$$

若工质是比热容比为 $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ 的理想气体,则理想焦耳—布雷顿循环的效率可以表示为循环压比的函数^[1]:

$$\eta_i = 1 - \frac{1}{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad (1.2)$$

比值 $\frac{P_2}{P_1}$ 在发动机建模、控制以及监测三个关键方面扮演着重要角色,称为发动机压比(EPR),类似于活塞发动机中的压缩比。注意:较高的理想循环效率对应较大的 EPR 值。安装在大型民用飞机上的发动机,如通用电气 GE90,其 EPR 值可超过 40。为了实现热力循环的基本过程,在燃气轮机中装配了若干部件:

(1) 涡轮压气机,或简称为压气机:在旋转叶盘上安装了一系列叶片,其功能是使空气流进发动机,在这个过程中空气的体积减小、压力升高。工质动量的改变需要扭矩,使气流沿叶片的弯曲表面运动。驱动压气机所需的功来源于发动机本身(图 1.1 中虚线),是通过用一根转轴连接压气机和涡轮实现的。这样,压气机和涡轮便以相同的角速度旋转。燃气轮机可以有一个或多个压气机,并通过单独的轴与对应的涡轮连接。

(2) 燃烧室:一种容腔,在这里燃油加入到压缩后的空气中,并产生燃烧。因燃烧而加入到燃气中的能量主要由燃油热值和燃油喷射速率决定。燃油喷射速率