



“九五”国家级
重点教材

内燃机原理

—● 刘永长 主编

● 华中科技大学出版社



普通高等教育“九五”国家级重点教材

内燃机原理

刘永长 主编

华中科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

内燃机原理/刘永长 主编

武汉:华中科技大学出版社, 2001年6月

ISBN 7-5609-2425-5

I. 内…

II. 刘…

III. 内燃机-高等学校-教材

IV. TK40

内燃机原理

刘永长 主编

责任编辑:叶见欣

封面设计:刘 卉

责任校对:蔡晓璐

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社 武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:华中科技大学出版社照排室

印 刷 湖北省京山德新印刷有限公司

开本:787×1092 1/16

印张:21.75

字数:500 000

版次:2001年6月第1版

印次:2004年6月第2次印刷

定价:26.80元

ISBN 7-5609-2425-5/TK·41

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内 容 简 介

本书是普通高等教育“九五”国家级重点教材。考虑到当前专业调整和专业面拓宽,以及21世纪将面对的教学改革和科技发展的新形势,教材内容应力求做到与教学改革相适应,与现代科学技术发展相适应。

本书全面讲述了内燃机的工作原理及其热力学过程,分别介绍了内燃机的发展与展望,讨论了内燃机循环、工作指标与性能分析、工质形成与燃烧、燃料与燃料供给、换气过程、增压技术、排放与控制、工作过程的数值计算以及特性及其分析等。既保证了基本理论、基本内容、基本方法的教学需要,又反映了新技术、新进展、新经验的时代特色。力求博采众长,有所创新。

本书主要作为热能与动力工程专业本科生“内燃机原理”课程的教材,也可作为相近专业的本科生和研究生的教学参考书。对从事内燃机研究的工程技术人员也有参考价值。

前 言

本书是普通高等教育“九五”国家级重点教材,并被列入全国船舶动力类“九五”教材选题规划,经船舶动力教材委员会评选后推荐出版。

根据船舶动力教材委员会制定的“内燃机原理”教学基本要求,考虑到当前专业调整和专业面的拓宽,以及 21 世纪将面对的教学改革和科技发展的新形势,组织编写了这本《内燃机原理》。本书在编者 1990 年编写出版的《内燃机原理》的基础上,根据近 10 年来内燃机技术的新进展,我们所面临的能源与环境形势,以及 21 世纪我国高等教育体制和教学改革形势发展的需要,对原书内容和编写体系作了重大调整,更新、充实了新的内容,特别是加强了有关汽油机、燃油喷射的电子控制以及排放与控制等方面的内容,希望本书能写出新意,富有时代感。

考虑到教学要求和教材特点,在编写中,既注意了更新内容,拓宽专业面,反映国内外最新的技术进展和技术成就;又注意到:少而精,重点突出,保持教材特点,着重基本理论、基本内容、基本方法的叙述。做到概念清晰,文笔流畅,深入浅出,便于自学。

本书由刘永长教授主编,并具体编写了第一、二、三、八、九诸章。参加编写的还有(以章次为序):张煜盛教授(第四章)、张宗杰教授(第五章)、黄荣华教授(第六章)、朱梅林教授(第七章)和王元庆高级工程师(第十章)。

武汉理工大学高孝洪教授、徐尔强教授和海军工程大学唐开元教授对本书进行了审阅,并提出了许多宝贵的意见;全国船舶动力教材委员会卓斌、马强、陈特奎、姚寿广教授,周俊杰、胡国梁、王永生、张维竞副教授等对本书的立项、评议和推荐做了大量工作,并一直关注和支持本书的编写和出版。在此,向他们表示衷心的感谢。

限于编者水平,错误在所难免,敬请批评指正。

编 者

2000 年 1 月

主要符号

p_0	环境压力
p	气缸内工质压力
p_s	进气压力
p_a	进气终点气体压力
p_c	压缩终点气体压力
p_z	最大燃烧压力
p_b	膨胀终点工质压力
p_r	排气门后工质压力
p_T	排气涡轮前工质压力
p_k	增压压力
p_i	平均指示压力
p_e	平均有效压力
p_m	平均机械损失压力
p_{mf}	平均摩擦损失压力
p_p	平均泵气损失压力
p_d	扫气口刚打开时气缸内工质压力
p_{cr}	气缸内工质临界压力
T	温度
T_0	环境温度
T_s	进气系统气体温度
T_a	进气终点气体温度
T_c	压缩终点气体温度
T_z	最高燃烧温度
T_b	膨胀终点工质温度
T_r	排气门后工质温度
T_T	排气涡轮前工质温度
T_k	增压空气温度
V	容积
V_0	工质的容积流量
V_s	气缸工作容积
V_a	压缩始点气缸容积
V_c	压缩终点气缸容积
V_z	燃烧终点气缸容积
V_b	膨胀终点气缸容积
V_d	扫气口刚打开时气缸容积

L_0	燃烧 1kg 燃料所需理论空气量(kmol)
L'_0	燃烧 1kg 燃料所需理论空气量(kg)
L	燃烧 1kg 燃料所需实际空气量(kmol)
L'	燃烧 1kg 燃料所需实际空气量(kg)
n_M	燃烧 1kg 燃料的燃烧产物的物质的量
M_u	马赫数
M_e	扭矩
Z	动作系数
n_r	残余燃气的物质的量
H_u	燃料的低热值
H_h	燃料的高热值
α	过量空气系数
α_Σ	总过量空气系数
γ	残余燃气系数
n	内燃机转速;多变指数
n_1	压缩多变指数
n_2	膨胀多变指数
n_{Tk}	涡轮增压器转速
n_p	喷油泵凸轮轴转速
N_e	有效功率
N_i	指示功率
N_m	机械损失功率
N_{mf}	摩擦损失功率
N_p	泵气损失功率
N_k	压气机或扫气泵功率
N_T	涡轮功率
N_{au}	辅助机械损失功率
φ	曲轴转角
φ_s	扫气系数
φ_b	相应于大气条件下的扫气过量空气系数
φ_k	相应于增压条件下的扫气过量空气系数
φ_i	滞燃角
ψ	涡轮工作叶片速度系数
ψ_s	二冲程内燃机的冲程失效系数
η_i	循环热效率
η_v	充气系数
η_e	有效效率
η_i	指示效率
η_m	机械效率

η_g	循环相对效率
η_T	涡轮实际效率
η_k	压气机实际效率
η_{Tk}	涡轮增压器实际效率
η_{Ts}	涡轮的等熵(绝热)效率
η_{ks}	压气机的等熵(绝热)效率
η_E	能量传递效率
ξ	热利用系数
λ_q	放热系数
λ	燃烧过程压力升高比
ρ	前膨胀比;工质密度;反动度
ρ_s	进气密度
δ	后膨胀比
ϵ	压缩比
ϵ'	有效压缩比
ω	角速度
π_k	增压器的增压比
τ_i	滞燃时间
m	工质质量
m_{cyc}	循环供油量
m_{cyl}	每缸每循环供油量
g_i	指示油耗率
g_e	有效油耗率
m_l	空气质量
m_f	燃料质量
m_k	经过压气机的空气质量
m_T	经过涡轮的燃气质量
c_m	工质平均比热容,活塞平均速度
c_p	工质的比定压热容
c_v	工质的比定容热容
k	比热容比(等熵指数)
U	工质的总内能
u	比内能(每 kg 工质的内能);圆周速度
W_i	指示功
W_e	有效功
W_m	机械损失功
W_T	涡轮的实际膨胀功
W_{Ts}	涡轮的等熵膨胀功
W_k	压气机的实际压缩功

W_{ks}	压气机的等熵压缩功
c	气流绝对速度
w	气流相对速度
I	工质的总焓
i	工质的比焓(每 kg 工质的焓); 气缸数
a	音速
Q	热量
Q_t	燃油在气缸中发出的总热量
Q_w	冷却水带走的热量
Q_r	排气带走的热量
Q_s	余项损失的热量
E	能量; 弹性模数
d	直径
D	气缸直径
S	活塞行程; 熵
F	面积
F_p	活塞面积
F_T	涡轮当量面积
F_N	涡轮喷嘴通流面积
F_R	涡轮工作叶片通流面积
f	频率
t	时间
θ	供油提前角
θ_s	喷油提前角
μ_s	扫气流量系数
μ_0	初排气阶段流量系数
μ_B	强制排气流量系数

目 录

第一章 绪论	(1)
1-1 20 世纪的内燃机	(1)
1-2 内燃机面临能源与环境的严峻挑战	(4)
1-3 内燃机当前的发展水平	(10)
1-4 面向 21 世纪的内燃机	(17)
第二章 内燃机的工作循环	(21)
2-1 内燃机理想循环	(21)
2-2 涡轮增压内燃机理想循环	(23)
2-3 内燃机理想循环热效率	(24)
2-4 内燃机实际循环	(27)
2-5 内燃机工作循环举例	(34)
思考题	(36)
第三章 内燃机的工作指标与性能分析	(37)
3-1 内燃机的工作指标	(37)
3-2 内燃机的指示参数	(40)
3-3 内燃机的机械损失及机械效率	(45)
3-4 内燃机的有效参数	(50)
3-5 内燃机的强化指标与强化分析	(52)
3-6 内燃机的热平衡	(60)
附录 内燃机的热计算	(62)
思考题	(73)
第四章 内燃机的燃烧	(74)
4-1 内燃机燃烧热化学	(74)
4-2 内燃机缸内的空气运动	(77)
4-3 点燃式内燃机的燃烧	(88)
4-4 点燃式内燃机的燃烧室	(102)
4-5 压燃式内燃机的燃烧	(108)
4-6 压燃式内燃机的燃烧室	(121)
思考题	(130)
第五章 内燃机的燃料与燃料供给	(132)
5-1 内燃机燃料	(132)
5-2 柴油机的燃油喷射系统	(137)
5-3 柴油机电控喷油系统	(150)
5-4 汽油机的燃油供给系统	(157)
5-5 电控汽油喷射系统	(163)

5-6 气体燃料内燃机的燃料供给	(167)
· 思考题	(171)
第六章 内燃机的换气过程	(172)
6-1 四冲程内燃机的换气过程	(172)
6-2 提高充气系数的措施	(179)
6-3 二冲程内燃机的换气过程及其品质评定	(188)
6-4 内燃机的排气可用能与缸盖气道稳流试验	(196)
思考题	(204)
第七章 内燃机增压	(205)
7-1 增压技术和增压方式	(205)
7-2 涡轮增压系统	(210)
7-3 高压比、超高压比涡轮增压系统	(217)
7-4 涡轮增压器与内燃机的配合	(220)
7-5 车用发动机增压	(235)
7-6 特殊工况下发动机的涡轮增压	(242)
思考题	(246)
第八章 内燃机的排放与控制	(247)
8-1 内燃机排放与环境污染	(247)
8-2 内燃机中的有害气相排放物	(252)
8-3 内燃机的颗粒物排放	(257)
8-4 光化学反应	(261)
8-5 内燃机的排气净化	(263)
思考题	(276)
第九章 内燃机工作过程数值计算	(277)
9-1 内燃机的工质及热力系统的划分	(277)
9-2 内燃机气缸内的热力过程	(279)
9-3 内燃机进排气系统内的热力过程	(287)
9-4 内燃机缸内过程计算的边界条件	(289)
9-5 内燃机与涡轮增压器的匹配计算	(301)
思考题	(310)
第十章 内燃机的运行特性	(311)
10-1 内燃机的运行工况和调节	(311)
10-2 内燃机的基本运行特性	(315)
10-3 内燃机的实用运行特性	(324)
10-4 内燃机功率及燃油消耗率的修正	(328)
思考题	(333)
参考文献	(334)

第一章 绪 论

1-1 20 世纪的内燃机

1784 年英国发明家 J·瓦特(J. Watte)发明了蒸汽机。这是一个划时代的重大发明,给当时所有机械提供了一个作用无比的动力,它可以驱动轮船,牵引火车以及带动各种机器,使整个社会都运转起来了,由此拉开了产业革命的序幕。从 18 世纪 80 年代开始,进入了蒸汽机时代,这是人类社会一个新时代的开始。

欧洲中世纪是个黑暗的封建时代。13 世纪至 15 世纪,我国的造纸、火药、罗盘针和印刷术陆续传到欧洲,中国的四大发明给欧洲社会带来了黎明,不仅对欧洲的科学、文化、经济,而且对整个社会变革都带来了巨大的影响。马克思说:“火药、罗盘针、印刷术,这是预兆资产阶级社会到来的三项伟大发明”。所以欧洲人在谈到他们近代社会的发展时,都要提到希腊的光荣、罗马的伟大和中国的四大发明。欧洲中世纪几百年的黑暗时代,经受了近代科学、技术、文化难产的阵痛后,终于开始了伟大的文艺复兴运动。先以意大利,后以德国为中心的欧洲大陆很快开始了科技、文化的复兴,在经济上取得世界领先地位。英国是个小国,产业革命前,它在科学、技术和经济上都落后于欧洲大陆,正是由于产业革命才使英国迅速发展起来,在经济上超过以德国、意大利为代表的欧洲大陆,成为世界经济中心。所以,蒸汽机是这场伟大革命最强大的推动力。至 1830 年,英国完成了产业革命,它的煤产量从 500 万 t 增加到 3000 万 t,铁的产量由 1 万 t 增加到 130 万 t,钢铁、机械、无机化工产品产量达到世界总产量的 50% 以上,造船业居世界第一位,贸易额相当于欧洲(包括俄国)和美国的总和,实现了国家的工业化,取得了当时经济上的世界领先地位。使英国成为“世界工厂”,成为近代社会第一批工业化国家和世界强国。

蒸汽机作为工业社会的第一个原动机,从 18 世纪末期至 20 世纪中期历时近二百年,对科技进步和社会发展起到了极其重要的作用,功不可没。以蒸汽机问世为标志的产业革命给资本主义带来辉煌,所以马克思说:“资产阶级在它不到一百年的阶级统治当中,所创造的生产力比过去一切世纪创造的生产力还要多、还要大。”

根据德国人 N·A·奥托(N. A. Otto)和 R·狄赛尔(R. Diesel)提出的内燃机循环,于 1876 年和 1897 年分别推出了汽油机和柴油机,为现代内燃机的发展奠定了基础,这是继蒸汽机之后发动机发展的又一个里程碑。内燃机出现于 19 世纪,发展、应用于 20 世纪,对 20 世纪的发展起了重要的作用。虽然在 20 世纪的前 50 年,蒸汽机和内燃机在很多领域内出现并行存在的局面,特别是在机车和船舶上,两种发动机相比较而存在,相竞争而发展。但随着内燃机技术的不断进步,产品性能的不断改进,如改进结构,采用新技术、新材料、新工艺,提高产品的经济性和动力性,降低比尺度、比质量,增加寿命和可靠性,以及启动迅速、操纵灵活、维修方便等等,使内燃机表现出无可比拟的优点,成为蒸汽机强劲的对手。由于内燃机优于蒸汽机,于是逐渐在各个领域里取代了蒸汽机,因此,从 20 世纪 40 年代初开始全面进入内燃机时代。可以说 20 世纪是内燃机的世纪。

20 世纪成就辉煌,在这个世纪中,人类物质、文化生活绚丽多彩,科学、技术成就目不暇

接,科学发现、科技发明数不胜数。20世纪社会的发展和进步是全方位、多层面的。交通是国民经济的命脉,从某种意义上来说,交通的现代化对20世纪的发展起了至关重要的作用。如果说没有汽车、火车、飞机、轮船,没有发达的交通运输,没有通畅的物资流通,没有广泛的文化、科技交流,那么20世纪的发展是不可思议的。20世纪之所以有别于过去的世纪,能取得超越以往任一世纪的伟大成就,使物质文明和精神文明达到现在这样一个高度,交通发达、交通工具的现代化是其中诸多因素中的重要因素,可以说交通是推动20世纪时代列车前进的原动力。

汽车是使用内燃机最早的交通工具,早在1886年德国人G·本茨(G. Benz)就发明了世界上第一辆内燃机汽车。但汽车作为产品,汽车工业作为一个产业,带动其他产业和工业门类,并促进整个国民经济发展,那还是在20世纪,所以汽车被列入20世纪的重大科技发明。第二次世界大战后,美国、日本等发达国家都是从汽车工业的发展来带动经济复苏乃至创造经济奇迹的,特别是20世纪40年代以后出现的经济腾飞,带动了整个世界经济的繁荣。汽车是现代物质文明的重要标志,汽车工业是国民经济的支柱产业,规模宏大,发展极快。目前,全世界汽车年产量已超过5000万辆,保有量已达9亿辆,每年以3%的增长率递增,进入21世纪,保有量可望超过10亿辆;我国目前汽车保有量已超过1000万辆,到21世纪初将达2000万辆。在日本,汽车制造业的产值约占全国制造业产值的12%,电气、机器制造业的产值约为15.5%,可见汽车工业的重要性。汽车产量之大,社会保有量之多,充分说明汽车工业的规模以及在国民经济中举足轻重的地位。内燃机是汽车的“心脏”,汽车与内燃机相互依存,共同发展,汽车性能的好坏、汽车工业的兴衰,与内燃机的发展息息相关。20世纪一百年来,汽车产品的巨大进步,首先缘于内燃机工业强劲发展的推动,同时又促进了内燃机自身的发展。没有内燃机的发展就没有汽车的发展,这就是汽车发展历史的结论。汽车发展至今,内燃机仍是现代汽车的最佳原动机。出于能源和环保的需要,尽管现在有电动汽车、太阳能汽车、混合动力汽车、天然气汽车等各种动力源汽车的研制与开发,但受技术、成本、实用性等多方面因素的制约,至21世纪中叶,内燃机在汽车动力中的主导地位不会有大的改变。

在世界各国中,铁路是主要的交通干线,特别是内陆国家,铁路承担着最大的运输量。机车使用蒸汽机,长达一个半世纪以上,直至20世纪50年代才最终为内燃机所取代。内燃机用于机车动力始于20世纪初,1909年瑞士的苏尔寿(Sulzer)公司已开始制造内燃机车,当时碰到的技术难点是如何将内燃机的驱动力传到机车的车轮上,其间的传动装置是个关键,加之早期内燃机车在相同额定功率下的体积和质量并不优于蒸汽机车,以及燃料价格、生产成本等因素,使内燃机车未能很快发展。从蒸汽机车到内燃机车的实际转变,出现在20世纪30年代中期至50年代末期这30年中。1925年,美国ALCO、GE和IR公司共同研制的新泽西中央铁路的1000号(60t,223.5kW)箱形司机室电传动内燃机车,是首台商业运营成功的内燃机车,现已存于巴尔的摩和俄亥俄铁路博物馆内。20世纪30年代是内燃机车发展速度最快的时期,内燃机车的质量和体积已开始缩小,传动装置的负载、柴油机的经济性 with 功率输出已能相互协调,以及迅猛发展的经济,使蒸汽机车被内燃机车所取代。1939年,当16缸567型柴油机(745.7kW)装入EMC公司FT型电传动内燃机车上时,给北美巨大的蒸汽机车车队以致命一击,从此机车制造业发生了巨大的变化。第二次世界大战期间,军事装备的生产暂时延缓了内燃机车的发展,但在战后,美国、前苏联等发达国家投入巨资全面开展机车内燃机化的研制工作,至20世纪50年代中期,内燃机车已占统治地位。如果说20世纪30年代内燃机车作为一种新型交通工具登上了历史舞台,标志着内燃机车时代的开始,那么20世纪90年代将作为内燃机车技术进步最快的时期而载入史册。美国MK公司用一台3728.5kW的Caterpillar柴油

机装入 MK5000C 型内燃机车,代表了当前内燃机车发展的新水平。机车内燃机的微机控制、电子制动装置、自诊断系统,以及流线型车身、舒适性司机室和其他许多新技术的采用等,使现代内燃机车成为陆上运输车辆中技术较复杂,现代化程度最高的一种交通工具,在现代交通运输中发挥着重要的作用。

内河及海上运输是交通运输的重要组成部分,尤其是海洋国家,海运是国家兴衰的生命线。我国有数千公里的海岸线,几千个岛屿和辽阔的海域,是一个海洋大国;内陆有长江、黄河、黑龙江、珠江等四大水系和鄱阳湖、洞庭湖、太湖等大型内陆湖泊;在南方诸省,小型江河、湖泊、港汉纵横交错,构成外运内联的水上运输网络,因此,海运和内河运输也是我国交通运输的重要组成部分,船舶是水上交通的重要交通工具。如机车一样,轮船也是最早使用蒸汽机的交通工具之一。但随着内燃机技术的不断发展及其产品性能的不断提高,船舶柴油机逐渐取代了蒸汽机。就世界范围而言,20 世纪 40 年代以后,新建的商船已再没有蒸汽机船了。

二冲程柴油机是船用发动机的传统机型,1905 年苏尔寿公司选用了二冲程循环方式,这是一个具有决定意义的进步,它大大地提高了功率输出,并简化了内燃机的结构。首台二冲程柴油机(4 缸,66kW)于 1906 年在米兰世界博览会上展出,这也是第一台可逆转的二冲程船用柴油机。1910 年开始采用气口扫气技术,创立了简化的无气门柴油机设计概念,第一批气口扫气二冲程船用柴油机的单缸功率为 280kW,1910 年装于意大利 Romagna 号船上。1912 年 8 月,第一艘装用 2 台二冲程柴油机(缸径 470mm,总功率 1250kW)的远洋货轮 Monte Renedo 号下水,定期航行于汉堡—苏得(Hamburg—Sud)之间,这是一个里程碑;同月,苏尔寿公司开始缸径 1000mm 二冲程单缸试验机 IS100 的试验工作,由此进入了大型二冲程船用柴油机的建造时期。1924 年,世界上第一艘由柴油机推进的大型客轮 Aoragi 号投入运营,该轮总登记吨位为 1.749 万 t,装了 4 台 Sulzer 6ST70 二冲程 6 缸柴油机,转速为 127r/min 时的总输出功率为 9558.8kW。这是一个重大突破,有助于消释当时有关柴油机推进装置不能用于大型船舶的偏见。由于柴油机热效率最高、比油耗最低、功率覆盖面大、转速范围宽、启动迅速、运行安全、维修方便、使用寿命长,所以柴油机作为主机和辅机在现代船舶中已居于统治地位,内河及沿海船舶全部以柴油机作为主机和辅机;在远洋船舶中,柴油机不仅油耗最低,而且能燃用价格低廉的劣质油,与蒸汽轮机相比,在经济性和燃料费用上也具有优势,所以柴油机作为主机的比例与年俱增。特别是大型低速超长行程二冲程柴油机的出现,使比油耗进一步降低,达到 150g/(kW·h)左右的新水平,循环热效率可高达 50%以上,这是当前热机中所能达到的新高,在万吨级船舶主机选用上具有更大的竞争力。输出功率为 6.6 万 kW 的 Sulzer12RTA96C 船用柴油机是目前世界上功率最大的柴油机,最近已装入 6674TED 号集装箱货运船投入使用。10 万 t 级以上的大型或超大型船舶,如超级油轮,即使在主机的选用上多用蒸汽轮机,也常以柴油机作为应急动力或辅机。根据过去的统计资料,以柴油机作为主机的船舶占世界年造船总量的 98%左右,可见内燃机是现代船舶最主要的动力装置。

1901 年,世界上第一架动力飞机试飞,密封型机身,有起落架轮,除驾驶员外还可坐乘客。1903 年,美国赖特兄弟试飞以汽油机作为动力的飞机取得成功,这是人类第一次实现上天飞行的梦想,开创了现代航空之先河,具有伟大的历史意义,最近被美国《时代》周刊列入 20 世纪文化、科技领域重大事件之一载人史册。飞机也被列入 20 世纪的重大科技发明。由此开始,内燃机作为军用、民用飞机的动力长达半个世纪以上。1933 年世界上第一条正规航线开通。在第二次世界大战中,由于战争需要的驱动,内燃机作为航空发动机得到了快速的发展,技术水平达到其发展的颠峰期,纳粹德国的容克式飞机,是第二次世界大战时先进机型的代表,航空内

燃机技术已达到一个很高的水平,战后航空内燃机才逐渐为燃气轮机所取代。即使是现在,农用飞机、体育竞技用飞机,仍有采用内燃机作为动力的。内燃机对 20 世纪航空事业的发展发挥过重大的作用。

此外,内燃机还广泛应用于工业、农业、电力、国防等各个领域,是当今用量最大、用途最广、无一与之匹敌的最重要的热动力机械,在国民经济、国防建设和人们生活中发挥着重要的作用。

现代高性能车用柴油机的循环热效率已达 40% 以上,超长行程二冲程船用柴油机的循环热效率甚至可高达 50% 以上(比油耗 $150\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$),车用汽油机的有效热效率也可达 33% 左右,与其他热机相比是热效率最高的动力机械。正因为这一优势,所以使内燃机的应用在所有热机中一直居于领先地位,过去和现在,内燃机都是应用最为广泛的动力机械。此外,由于功率覆盖面大,转速范围宽,单机功率从小于 1kW 的汽油机到 $6.6\times 10^4\text{kW}$ 的船用柴油机,功率档次比较齐全;从转速只有 $70\text{r}/\text{min}$ 的 Sulzer RTA68 低速船用柴油机,到 $9000\text{r}/\text{min}$ 的波尔舍 V8—3000 高速赛车汽油机,车用柴油机的转速也可高达 $5000\text{r}/\text{min}$ (高尔夫轿车柴油机),能满足各种配套机具的需要。功率覆盖面如此之大,转速范围如此之宽,也没有任何一种热机可以与之相媲美,所以内燃机的用量极大,有一个高数额的社会保有量,配套面广,应用于国民经济和国防建设(陆、海、空军的动力装备)的各个领域。从农业机械、汽车、摩托、赛车、工程机械、机车、战车、电站、舰艇和民用船舶,乃至飞机都广泛采用内燃机,特别是在水陆交通运输和农用动力中占有压倒优势。内燃机之所以能得到如此广泛的应用,并在百年间经久不衰,是因为内燃机除了具有热效率高、经济性好、功率覆盖面大、转速范围宽的优点之外,还具有制造工艺要求并不十分高难,可在一般加工精度的设备上制造;使用的材料比较一般,多为普通铸铁、铸铝和碳素钢;能适应不同配套机具的需要,且不受使用环境和场所的严格限制;具有较长的使用寿命,操作、维修技术比较简单,价格相对比较低廉,能为不同层次的用户所承受;在柴油机上如果略加改造,还可使用多种燃料和劣质燃料,能为用户带来更大的方便和经济上的好处等一系列为其他热机所不及的优点。

内燃机作为一种科技产品历时百年,经久不衰,现在还充满发展活力,无可替代地迈入新的 100 年,这既是内燃机技术不断发展、完善的结果,也是内燃机满足社会需要、表现出自身价值的结果。它为 20 世纪的发展、为人类社会的进步作出了巨大的贡献!内燃机被誉为 20 世纪的重大科技成就之一应是言不为过的。

1-2 内燃机面临能源与环境的严峻挑战

一、能源与环境是经济发展的制约因素

在 21 世纪来临之际,人们在展望未来世纪时,既充满无限美好的憧憬,又面临许多不容回避的严峻挑战,其中资源、环境、生态即是这些挑战中的重要方面。现在能源问题已是世界瞩目的问题,能源前景不容乐观,能源危机将日益深化;环境污染日趋恶化,已引起人们的严重关注和不安,能源与环境已成为 21 世纪制约经济发展的重要因素。有关专家在预测 21 世纪前 10 年世界经济发展和能源与环境状况时指出:促进经济增长、提高生活水平、保证能源供应是各国努力的方向;在实现经济目标的同时,保持洁净环境将是各国面临的一大挑战。

常规能源以矿物能源为主,至 2020 年,全球能源的 82% 仍将来自矿物燃料,主要是煤炭、

石油和天然气。能源资源贮量有限,而能源消耗量却逐年增加,资源耗竭的危险正逐日逼近,这种危机感已成为人们的共识。在我国,能源问题也已提到议事日程。从绝对数量看,我国矿物能源贮量还比较丰富,但如按能源人均占有量计算,则只相当于世界人均占有量的 1/2;人均石油可开采贮量仅为世界平均值的 1/10。由于我国现有的生产水平和生活水平还比较低下,人均一次能源的消耗量大大低于主要工业化国家,只相当于日本的 21.9%,德国的 14%,美国的 7.36%。可以预料,随着我国“四化”建设的发展,人民物质生活水平的日益提高,能源消耗量将会大幅度地增加,能源供求之间的矛盾也会愈来愈尖锐,因此,解决能源问题也是我们的燃眉之急。虽然煤炭是第一基本能源,但石油对全球现代经济生活的影响比其他任何形式的基本能源都要大,在未来的 10~20 年间,石油仍将是全球最主要的能源之一。

在旧中国,我国是个贫油的国家,石油工业几乎为零。新中国建国 50 年来,我国石油工业创造了奇迹,原油产量已居世界第 5 位。到 2000 年,东部油田原油年产量将稳定在 1.2 亿 t 左右,西部油田年产原油 3000 万 t 左右,海上原油年产 1600 万 t,加上我国参与海外国际合作项目可获得 1200 万 t 左右份额油,总计年产原油近 1.8 亿 t 左右。到 2010 年,预计西部油田年产原油将达到 5000 万 t 左右,海上原油年产量将达到 2000~2400 万 t,加上海外份额油,我国原油年产量将达 2.2 亿 t 左右。尽管如此,随着我国国民经济的迅速发展,石油生产的增长速度还难以满足经济发展的需要。1993 年,我国已由石油出口国变成了石油净进口国。据专家预计,到 2000 年,我国石油需求的缺口将达 4000 万 t,到 2010 年需求缺口将达到 9000 万 t 左右,这已引起国际石油界极大的关注。石油供需矛盾突出是我国石油工业在 21 世纪面临的巨大挑战。因此,我国采取“稳定东部、开发西部、油气并举、立足国内、开拓国际”的发展战略。在立足自身的基础上,解决石油供需矛盾,在发展石油的同时,大力开发天然气,在 21 世纪建立起自己的石油安全体系。任重道远,这就是我国在 21 世纪所面对的能源形势。

根据现在能源消耗量的走势,有关专家预计到 2010 年,世界能源消耗量每年将以 1.6% 的速率递增,其中经合组织成员国年增长率为 1.4%,欧亚大陆为 1.3%,其他欠发达国家为 2.7%。总之,欧亚大陆和发达国家的能源消耗增长速度仅为其余欠发达国家的一半。那时,最大的能源消耗国将是美国、俄罗斯和中国。我国的能源年消耗量将呈上升趋势,平均增长速度是世界能源消耗增长率的 2 倍,是世界上能源消耗增长最快的国家。能源消耗量的持续增长与能源生产和能源资源的耗竭是一个极大的矛盾,随着时日的推移,这种矛盾将愈来愈尖锐。经济发展水平是决定能源消耗增长的主要因素。到 2010 年,世界经济年平均增长率可达 2.7%,其中经合组织成员国的增长率为 2.4%,欧亚大陆为 2.3% 左右,其他国家为 4.2% 左右。我国是全球经济发展最快的国家。因此,“全球能源规划”所依据的两个基本思路是:其一,未来的经济增长;其二,未来经济活动的“能源强度”。总之,经济发展要适应能源状况,即能源要为经济发展提供所谓“安全能源”保障。这就是能源与经济发展的制约关系。

环境问题是当代人类面临的四大社会问题(粮食、人口、环境、能源)之一。20 世纪 80 年代以来,环境污染已到愈来愈严重的程度,严重地制约了经济的发展,危及到人类自身生存的空间,危害当代,祸及子孙,是一个亟待解决的大问题,已引起世界各国政府和公众的严重关注,保护和治理环境已成为当今社会的共识,环保意识逐渐深入人心。

大气污染是环境污染最重要的一个方面,也是控制与治理较为困难的一面,主要表现在大气质量、温室效应、酸雨和臭氧层破坏等。城市人烟稠密,大气污染尤为严重,在城市大气污染中,内燃机的有害物排放量约占 60% 以上,因此,内燃机排放是城市大气环境的主要污染源。我国城市大气污染十分严重,1998 年世界卫生组织公布的一项报告表明,全球空气污染严重

的城市依次为:太原、米兰、北京、乌鲁木齐、墨西哥城、兰州、重庆、济南、石家庄、德黑兰。在这 10 个污染严重的城市中,我国占了 7 个,北京位列第 3。1999 年我国公布了空气污染最严重的 10 个城市,除上述 7 个外,依次是青岛、广州、沈阳。1998 年在全国 322 个环境状况统计的城市中,89 个城市空气质量达到国家二级标准,占 27.6%,93 个城市空气质量处于国家三级标准,占 28.9%,140 个城市空气质量超过国家三级标准,占 43.5%,属于严重污染型城市。根据世界卫生组织对大气质量的分级标准,322 个城市全部为污染型城市,严重污染的城市所占的比例很高,我国城市大气污染已到了十分严重的程度,应引起高度重视。特别是首都北京,作为国际特大城市,环境质量不尽人意,在参加世界范围大气质量监督计划的 50 个城市中,北京的大气质量属最差的 10 个城市之列;1998 年 1 月,国家环保局公布了对全国 18 个主要城市大气污染的调查报告,北京名列榜首。在城市大气污染中,北京市特别严重。

随着机动车保有量的迅速增加和城市化进程的加快,我国城市的大气污染类型正由煤烟型向混合型 and 机动车排放型转化。机动车排放已经成为城市大气污染的一个主要来源。机动车排放的污染物不仅直接危害环境,影响人体健康,而且还会诱发光化学反应,产生一系列二次污染物,对人体健康和城市生态产生极大的危害。

近几年的暖冬和酷夏,以及北方反常的夏季高温,使人们确实感受到“温室效应”带来大热在即的威胁。环境科学家们普遍认为,地球气温正在不断上升,21 世纪将是一个大热的世纪。尽管地球经历了不少忽冷忽热的时期,但这次它将比以往任何一次热得更快更厉害。

地球大气层对太阳的短波辐射是“透明”的,但在经由地面散射后形成的长波辐射又是“不透明”的,热量被大气层和地面这两个聚热面吸收,并在其间完成热交换,这种温室效应,使全球平均气温能够保持在 288K 左右。正是由于这种自然“温室效应”孕育了地球生命,几百万年前,地球上出现了最早的生命形态。但是,由于人类长期某些不合理的活动,造成了气候的某种变化,温室效应即是其中之一,改变了地球生态环境,又危及了地球生命,所以温室效应又具有严重的负面作用。如果大气中造成温室效应的温室气体和微粒浓度增加,那么温室效应就会加剧,使整个地球变成一个真正的“烘箱”,这已引起全球的普遍关注。1997 年 12 月在日本京都国际会议上,关于控制全球变暖问题达成《京都议定书》,要求主要工业大国在 2008—2012 年间,将温室气体排放水平比 1990 年降低(6~8)%,并让发展中国家共同加入此项议定书。预计到 2025 年,发展中国家排放的温室气体总量将超过发达国家。

1996 年,世界石油消费量达到历史最高水平。石油在燃烧之后会使大气中的二氧化碳含量增加,而这种气体对温室效应的分担率达 90%,是造成温室效应最重要的温室气体。甲烷和二氧化氮是另外两种不利于散热的气体,在大气中的含量也在增长。

从 20 世纪 70 年代起,地球的气温确实在升高,海平面平均每年上升 2cm,这主要是海洋受热膨胀和两极冰层解冻造成的。若海平面上升 1m,则将影响到沿海地区 2/3 左右人口的生活。如照此下去,21 世纪人类将生活在气温比今天高出 3.5K 的环境里,这对人类的生存条件会带来极大的影响。因为这个温度值只是个平均数,所以在某个地区或某个季节,上升的温度可能会高得多,这将会带来灾难性的后果。这种环境还将助长疟疾、登革热、黄热病和其他疾病的蔓延。

臭氧层的破坏、酸雨的形成也是环境恶化的重要方面,这都与内燃机的排放有密切关系。

据有关报告表明,1995 年我国环境污染所造成的经济损失达 1875 亿元,占当年 GDP(国内生产总值)的 3.27%。其中大气污染造成的经济损失占总损失的 16.1%,悬浮颗粒物导致人体健康损失的费用,估计约 171 亿元。为扭转目前这种环境恶化的局面,我国到 2003 年,将投