

全国高等农业院校教材

拖拉机汽车学

第三册 拖拉机汽车发动机原理

(第二版)

华中农业大学 主编

农业出版社

全国高等农业院校教材

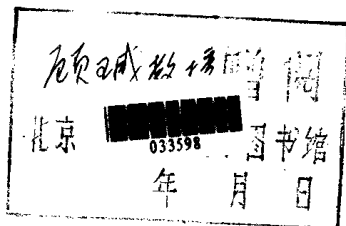
拖拉机汽车学

第三册 拖拉机汽车发动机原理

(第二版)

华中农业大学 主编

ND14/24



农业出版社

(京)新登字060号

全国高等农业院校教材
拖拉机汽车学
第三册 拖拉机汽车发动机原理
(第二版)

华中农业大学 主编

责任编辑 彭明喜

农业出版社出版 (北京市朝阳区农展馆北路2号)
新华书店北京发行所发行 农业出版社印刷厂印刷

787×1092mm16开本 18.625印张 385千字
1991年5月第1版 1993年5月第2版北京第1次印刷
印数 1—7,400册 定价 4.85元
ISBN 7-109-02117-3/TH·102



第二版修订说明

本书是根据1981年7月农业出版社出版的全国高等农业院校试用教材《拖拉机汽车学》修订的。修订中遵照农牧渔业部教育司关于修订教材,要按照“打好基础、精选内容、逐步更新、以利教学”的指示精神,在广泛收集全国各高等农业院校对原教材意见的基础上,本着精益求精、保证质量、控制篇幅、吸收国内、外先进技术的原则,将原教材由五个分册修订为《拖拉机汽车构造》(第一册、第二册)、《拖拉机汽车发动机原理》(第三册)、《拖拉机汽车理论》(第四册)四个分册。对原教材的第五册《实验实习》作了分册到各有关章节去的处理,并在各分册每章后面增加了复习思考题。在编写中,适当减少了构造部分的篇幅,更新了内容;充实了发动机原理和拖拉机理论;增编了汽车理论的有关章节。

《拖拉机汽车学》是农业工程类专业的主干课程之一。其目的是使学生掌握拖拉机汽车的结构原理,内燃机、拖拉机和汽车的基本理论与性能试验的一般方法。为学习《农业机械管理学》、《农业机械维修工程学》、《农业机械化经营管理学》等课程和解决生产实际问题,开展科学研究打下基础。

本书是按农牧渔业部教育司颁发的《拖拉机汽车学》教学大纲编写的,主要供农业工程类专业本科学生使用,也可供从事农机工程的同志和有关中等专业学校的学生参考。

遵照国务院1984年2月27日发布的《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》,本书计量单位采用了国家法定计量单位。有些转引图表和资料虽然沿用原著的单位制,但在附录中列出了两种单位对照表,以利读者换算。

本书在修订过程中,得到了全国各高等农业院校从事《拖拉机汽车学》教学的有关教师 and 北京农业工程大学陈济勳、张圣虎、周一鸣等有关同志的大力支持和帮助。在此,一并表示衷心的感谢。

限于修订者的水平,书中难免出现缺点和不足之处,欢迎使用本书的师生和广大读者指正。

编 者

1988年3月

第二版修订者

- 主 编 王能裕 (华中农业大学)
冯联杰 (华中农业大学)
- 副主编 邵耀坚 (华南农业大学)
王德亭 (东北农学院)
张泽先 (华中农业大学)
- 编 者 顾 斌 (北京农业工程大学)
徐正杰 (甘肃农业大学)
- 审 稿 王能裕 (华中农业大学)
冯联杰 (华中农业大学)

第一版说明

《拖拉机汽车学》是全国高等农业院校农业机械化专业试用教材，全书分发动机构造和电气设备、底盘构造、发动机原理、拖拉机理论、实验实习等五册，由华中农学院王能裕、冯联杰，华南农学院邵耀坚，东北农学院王德亭、戴天裘五同志主持编写。

第一册《发动机构造和电气设备》由华中农学院冯联杰、王能裕主笔，参加编写者有浙江农业大学奚文斌，西南农学院张朗轩、肖同明，山东农业机械化学院董增前、胡维信，吉林农业大学吴忠臣等。

第二册《拖拉机汽车底盘构造》由东北农学院王德亭、戴天裘主笔，编著者有西北农学院黄振声、左士伦，北京农业机械化学院孙衍庆，陈汝廷，华中农学院王能裕等。

第三册《发动机原理》由北京农业机械化学院顾斌主笔，编著者有西北农学院任凤鸣同志。

第四册《拖拉机理论》由华南农学院邵耀坚主笔，参加编写者有东北农学院王德亭、戴天裘。

第五册《实验实习》由甘肃农业大学徐正杰同志主笔，编著者有甘肃农业大学唐盖治、胡振兴，广西农学院王予宾，内蒙古农牧学院张峰奇等同志。

本书主要符号

p_0 大气压力	p_s 进气系统压力
p_a 进气终点压力	p_c 压缩终点压力
p_b 最高爆发压力 (最大燃烧压力)	p_h 膨胀终点压力
p_r 排气终点压力, 油管剩余压力	p_T 废气涡轮前压力
p_n 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 气缸内气体压力	T 气缸内气体温度
T_s 进气系统温度	T_a 进气终点温度
T_c 压缩终点温度	T_b 最高燃烧温度
T_h 膨胀终点温度	T_r 排气终点温度
V_0 气缸总容积 (L)	V_c 压缩终点气缸容积 (cm^3)
V_s 气缸工作容积 (L)	L_0 1 kg 燃料完全燃烧理论上所需空气的 kg 数
L_0' 1 kg 燃料完全燃烧理论上所需空气的 kmol 数	M_1 新鲜充量 kmol 数
M_s 残余废气 kmol 数	M_2 燃烧产物 kmol 数
H_u 燃料低热值 (MJ/kg)	Q 循环放热量 (MJ)
α 过量空气系数	γ 曲柄半径, 残余废气系数
φ_s 扫气系数	n_1 平均压缩多变指数
n_2 平均膨胀多变指数	λ_p 压力升高比
ρ_s 进气管内的空气密度	ρ 初期膨胀比
δ 后期膨胀比	μ 分子变化系数, 扭矩储备率
ε 热量利用系数	$\frac{\Delta p}{\Delta \varphi}$ 平均压力升高率 ($\frac{\text{MPa}}{^\circ\text{CA}}$)
Δg 循环供油量	h 喷油泵供油杆行程
x 喷嘴针阀升程	η_t 理论循环热效率
η_n 相对效率	η_v 充量系数
η_i 指示效率	η_m 机械效率
η_e 有效效率	η_{ads} 压气机绝热效率
N_s 增压器消耗功率	N_i 指示功率
N_m 机械损失功率	

N_{eb} 标定功率 (额定功率)	N_e 有效功率
M_e 扭矩	N_i 升功率
M_e 阻力矩	M_{eb} 标定工况时的扭矩 (额定扭矩)
m 阻力矩变化的角频率	δ_e 阻力矩不均匀度
v_c 阻力矩可能增长系数	T 阻力矩变化周期
G_{fo} 空转耗油量	G_f 小时耗油量
g_e 有效耗油率	g_i 指示耗油率
D 气缸直径	d 进气管直径
S 活塞行程	L 进气管长度
i 气缸数	C_m 活塞平均速度 (m/s)
τ_i 着火延迟期 (按时间秒数计)	τ 冲程数
φ 曲轴转角; 增压度; 转速不稳定度	φ_i 着火延迟期 (按曲轴转角度数计)
θ 供油提前角或点火提前角	π_e 增压比
ω 曲轴角速度	ϵ 压缩比
n_e 标定转速 (额定转速)	n 曲轴转速 (r/min)
k 比热比; 绝热指数; 扭矩适应性系数	n_0 空转转速
ϕ 转速波动率	a 转速适应性系数; 声速
δ_2 稳定调速率	δ_1 瞬时调速率
n_h 涡流转速; 压气机转速	Ω 涡流比

目 录

本书主要符号

结论	1
一、内燃机工作的基本特征	1
二、内燃机技术的发展	1
第一章 内燃机的实际循环与工作性能	5
第一节 内燃机的理论循环	5
第二节 内燃机的实际循环	8
一、燃料—空气循环的概念	8
二、压缩过程	9
三、膨胀过程	10
四、内燃机实际循环的各种损失	11
第三节 内燃机的工作性能及其主要影响因素	13
一、循环指示指标与内燃机有效指标	13
二、内燃机的机械损失	15
三、内燃机动力性与经济性的主要影响因素	17
四、内燃机的可靠性与耐久性	20
五、内燃机的环境保护性能	21
第四节 内燃机的热平衡	22
例题	26
作业思考题	28
参考文献	29
第二章 内燃机的进排气过程	30
第一节 进排气过程中气缸内和管道内的气体流动与压力变化	30
一、非稳定流动与压力波动的概念	31
二、排气过程的压力变化	32
三、进气过程的压力变化	33
四、多缸机上各缸气体流动的互相影响	34
五、进排气门处和气道内的气体流动	35
第二节 进排气过程的评定参数	37
第三节 结构因素和运用因素对进排气过程的影响	39
第四节 进排气动力效应的利用	45
一、惯性效应的利用	46
二、波动效应的利用	47
第五节 进排气消声原理	49

一、柴油机噪声概述	49
二、声学基础	49
三、噪声允许标准	52
四、进气噪声的消声	53
五、排气噪声的消声	54
作业思考题	56
参考文献	56
第三章 气缸内的燃烧与内燃机燃料	57
第一节 概述	57
第二节 内燃机气缸内的燃料着火	57
一、链式——热着火	57
二、碳氢燃料（烃）的着火	60
第三节 内燃机气缸内的燃烧	63
一、容积式燃烧	63
二、预混燃烧	63
三、扩散燃烧	66
第四节 燃料的燃烧热化学	67
第五节 内燃机燃用多种燃料的可能性	73
一、各种煤气燃料	74
二、醇类和植物油燃料	76
三、乳化燃料	79
四、煤基燃料 氢燃料	81
第六节 内燃机的废气、排烟及其控制	83
一、概述	83
二、排放污染物生成的机理与主要影响因素	84
三、排放污染物的控制与净化	91
作业思考题	97
参考文献	98
第四章 柴油机的混合气形成与燃烧过程	99
第一节 柴油机的燃烧过程	100
第二节 燃油的喷射	103
一、燃油的喷射过程	103
二、影响喷射过程的几个因素	105
三、几种不正常的喷射现象	106
四、结构因素和运用因素的影响	107
第三节 柴油机的混合气形成与燃烧室	108
一、混合气形成方式	108
二、直接喷射式燃烧室	109
三、分开式燃烧室	115
四、各种混合气形成方式与燃烧室的比较	121
第四节 影响柴油机燃烧过程的几个因素	122
第五节 燃烧噪声	123

作业思考题	128
参考文献	129
第五章 汽油机的燃烧过程	130
第一节 汽油机燃烧过程的基本情况	133
一、正常燃烧	139
二、不规则燃烧	132
第二节 异常燃烧	133
一、爆震燃烧	133
二、表面点火	135
第三节 影响汽油机燃烧过程的几个因素	136
第四节 汽油机燃烧与混合气形成的发展	141
作业思考题	144
参考文献	144
第六章 内燃机的工况与特性	145
第一节 概述	145
第二节 调整特性	148
一、柴油机的燃料调整特性	143
二、拖拉机汽车发动机燃料调整的依据	149
第三节 负荷特性	160
一、柴油机的负荷特性	151
二、汽油机的负荷特性	151
第四节 速度特性	152
一、柴油机的速度特性	153
二、汽油机的速度特性	156
第五节 万有特性	157
第六节 螺旋桨推进特性	139
第七节 拖拉机发动机的调速特性	160
一、调速特性曲线的分析	160
二、调速特性上发动机性能的分析	161
第八节 内燃机在农业作业条件下的工作特点	167
作业思考题	172
参考文献	172
第七章 内燃机的增压	173
第一节 概述	173
第二节 柴油机的机械增压	174
一、旋盘叶片式压气机	174
二、罗茨式压气机	175
三、螺杆式压气机	176
第三节 柴油机的废气涡轮增压	177
一、废气能量的利用	177
二、离心式压气机	178
三、涡轮机	181

五、涡轮增压器的结构	182
第四节 柴油机的涡轮增压系统	183
一、恒压增压系统	185
二、脉冲增压系统	187
三、恒压系统与脉冲系统的比较与选择	189
第五节 涡轮增压器与柴油机的匹配	190
一、涡轮增压器主要参数的确定	191
二、涡轮增压器与柴油机的匹配	195
第六节 汽油机的增压	198
一、涡轮增压器的布置方案	199
二、汽油机增压技术要点	206
第七节 高原地区增压问题	202
一、高原条件对内燃机工作性能的影响	204
二、柴油机改装设计应考虑采取的结构措施	235
作业思考题	206
参考文献	208
第八章 内燃机测试技术	208
第一节 仪器仪表与测量	208
一、仪器仪表的组成和分类	208
二、评定仪器仪表质量的主要指标	209
三、仪器仪表的动态特性	210
第二节 功率的测量	211
一、测功器	211
二、扭矩仪	220
三、曲轴转速的测量	221
第三节 燃油消耗量的测量	223
一、容积法	223
二、质量法	224
第四节 温度和压力的测量	225
一、温度的测量	226
二、压力的测量	227
第五节 空气流量的测量	229
一、节流式流量计	229
二、旋进型旋涡流量计	231
第六节 排气的测量	232
一、烟度的测量	232
二、排气成分分析	234
第七节 振动的测量	235
一、振动的测量仪器	235
二、振动的测定方法	237
第八节 噪声的测量	237

一、精密声级计	237
二、内燃机噪声的测量	239
第九节 内燃机试验台和试验装置	242
一、内燃机试验台	242
二、燃油供给系统	244
三、冷却水供给系统	244
四、试验室的排水通风与废气的排出	244
作业思考题	245
参考文献	245
第九章 内燃机试验	246
第一节 内燃机的性能试验	246
一、试验程序与方法	246
二、安全技术	248
三、内燃机机械效率的测定	248
四、柴油机供油提前角调整特性试验	250
五、汽油机速度特性试验	250
六、调速性能试验	251
七、万有特性试验	253
八、铭牌功率工作稳定性试验	253
九、热冲击试验	253
十、机油消耗量测定	254
十一、耐久性和可靠性试验	255
第二节 非标准大气状态下内燃机功率和耗油率的修正	257
一、标准大气状态	257
二、柴油机有效功率和耗油率的修正	257
三、汽油机有效功率和耗油率的修正	263
第三节 试验误差与数据处理	263
一、产生误差的原因及其消除	263
二、偶然误差	264
三、误差的计算	265
四、试验数据的处理	271
作业思考题	273
参考文献	273
第十章 农用内燃机综合评价与发展	274
第一节 内燃机的综合比较指标	274
第二节 农用内燃机展望	277
一、内燃机的节能	277
二、控制排气污染、振动和噪声	279
第三节 结束语——农用条件下内燃机性能的合理发挥	280
作业思考题	282
附录 常用单位换算关系	283

绪 论

一、内燃机工作的基本特征

内燃机是现代拖拉机汽车采用的主要发动机型式。在内燃机气缸里，燃料燃烧放出热能并产生高温高压气体（工质）膨胀而做机械功。膨胀后的废气要向低温热源放热，气缸里的工质必须恢复到初始状态才能进行下一个工作循环。所以，内燃机必须更换工质。这种工作方式属于开式循环。

内燃机又是一种容积式发动机，利用气缸内工质膨胀产生的压力依靠往复式活塞做功，其工作过程是间歇的，工作速度受到一定限制。但也因此，内燃机接触燃气各部件的温度远远低于循环最高温度，因而有利于内燃机热效率的提高。

所以，内燃机是一种工质开式循环并以间歇方式工作的发动机。

根据上述这些本质特点，内燃机具有热效率高、功率范围宽广、单位功率的结构质量和尺寸较小等适合于拖拉机汽车发动机需要的优点。但是，内燃机对燃料要求高、排放的废气中有一定的有害成分（臭味和碳烟微粒）、工作时产生噪声等已成为内燃机进一步发展中有待解决的主要问题。

二、内燃机技术的发展

任何一种科学技术的发展都决定于社会生产的需要，而技术发展的程度则是各有关方面科学技术知识累积的结果。内燃机技术的发展也是这样。

（一）内燃机的早期发展 18世纪初出现了可实用的蒸汽机，在1776年瓦特（Watt）改进蒸汽机后，蒸汽机得到了广泛应用。但是当时蒸汽机工作气压和转速低，效率低于10%，设配投资大，不便移动，运用维护不方便，客观上要求提高发动机的效率、功率和提供适应交通运输用的新型动力。

内燃机的发明开始于煤气内燃机的出现。当时欧洲的一些城市有照明煤气供应，这为燃气内燃机首先出现提供了一定的客观条件。1678年，法国人浩特佛勒（Hautefeuille）首先提出了创制煤气内燃机的思想萌芽。以后，在欧洲较发达的英国、法国、德国、意大利，又陆续提出了活塞气缸结构、等压燃烧原理、煤气压缩及电点火等技术原理。经过180年的缓慢发展，直到1860年，法国人里诺（Lenoir）才制成了0.5~3马力的（二冲程）蒸汽机式煤气内燃机100台并开始实用。但这是一种没有压缩过程的煤气内燃机，热效率只有4.2%左右。所以和蒸汽机相比，虽然创造了一种新型的内燃机动力，但还并不优于蒸汽机，因而须要继续研究以提高其热效率。

1862年,法国人鲍·德·罗沙(Beau De Rochas)提出四冲程等容燃烧原理。1876年,德国人奥托(Otto)实现了先压缩可燃混合气和等容燃烧的四冲程煤气机,它展出在1878年巴黎世界博览会上,其热效率达15%左右,这就使内燃机比蒸汽机占了压倒优势。

当时在俄国,照明煤气较少,石油资源较多,液体燃料在应用上也比较方便。1879年,柯斯托维奇(Костович)在彼得堡组织液体燃料发动机的设计。1883年,德国人达依姆勒(Daimler)开始制造四冲程汽油机,转速800r/min。1885年,德国人本茨(Benz)改进了汽油机,并应用在汽车等车辆上,从此开始了汽油机的广泛应用。但是直到第一次大战期间(20世纪20年代初),汽油机的压缩比仍然很低,只有4~4.5:1,当时已明确提出汽油机的爆震问题限制了汽油机性能的提高。

因此,当时的煤气机、汽油机还不能满足工业发展的要求,而需要创制效率更高的发动机。德、英这样一些石油资源不丰富的国家也迫切要求有使用低质液体燃料的内燃机。

在加大压缩比以提高发动机热效率的探索中,特别须要防止早燃。1885—1900年期间,英国人将空气与燃料(从煤及某些重油中提炼出的柴油)分开压缩(采用的仍是低压压缩比),将燃油喷入被压缩的热空气中,在气缸内部使燃油和空气混合,再依靠外部热源或烧球点燃,发明了早期的烧球式发动机或半柴油机。这种发动机由于只能采用低压压缩比,压缩压力只有20大气压左右,所以热效率牺牲很大,结构上也有很多缺点。

在此同时,1893~1897年,德国人笛塞尔(Diesel)在研究中曾致力于不提高压缩程度而反复试验,结果失败了。后来他转入理论研究,提出等温燃烧循环,采用高压压缩比以提高热效率,采用燃料的压缩点火方式。在试制发动机时,他起初企图用煤粉作燃料,不用冷却水套,想使全部热量都做功。后来在试验中他改正了认识,在用液体燃料和有水套的情况下获得成功,实际热效率达30.4~31.6%。但是,他实际成功的是接近于等压燃烧的原理,而不是他自己理论研究得出的等温燃烧循环。

1898年,俄国人特林克利尔(Тринклер)明确提出了混合循环的燃烧原理,并于1904年制成了第一台按混合循环工作的、用压缩空气喷油的12马力压燃机。1907年,法国人萨巴台(Cabata)取得了使发动机按混合循环工作的一种用压缩空气雾化燃油的喷油器专利。直到1925年,随着机械工业的发展,才达到了目前通过液压直接喷射燃油的喷油器型式,使柴油机基本形成了今天的面貌。

从内燃机的早期发展可以看出,内燃机的工作是比较复杂的多种原理的综合。在1862年先从原理上提出,于1876年才最后制成汽油机。柴油机的发明也是在理论指导下才试验成功的。内燃机的这一早期发展历程启示我们,正确理解内燃机的原理对于认识内燃机工作性能非常重要。更早出现的蒸汽机的发明过程则首先是工艺方面的成就,然后同科学原理相结合而改善和发展。内燃机的发明过程则和蒸汽机不同。

(二) 内燃机技术的发展 从内燃机诞生到现在一个多世纪的发展历史可以明显看

出：内燃机工作原理的几次重大技术突破大大推动了内燃机技术的发展，即：1862年，循环原理提出，随后制成的煤气内燃机热效率达到15%左右；1897年，提高压缩比，发明柴油机，热效率接近30%；1935年，由于工作过程的改善，柴油机最高工作转速达到1400r/min，使功率大大提高；30年代末，增压技术用于内燃机，使气缸工作压力可以达到100~140kgf/cm²，内燃机热效率达到36%，功率可以提高50~100%。

汽油机在1885年制成时，转速为500~800r/min，压缩比为3:1，质量功率比为200kg/马力，以后汽油机在汽车工业的推动下迅速发展（40年代以前由于航空工业的需要，也得到很大发展）。在本世纪20年代以前，为适应交通运输需要，以提高功率和降低质量功率比为主，主要措施是提高转速、增多缸数和改进相应的附件装置。转速提高到1000~1500r/min，并解决相应的点火、起动、化油和冷却等技术问题，出现了4缸、8缸的直列式和V型机，乃至12、16缸的V型机，使质量功率比迅速降到本世纪初的4~6kg/马力，这就使汽油机可以实用于飞机上。后来，由于风冷星型机的设计，质量功率比又降到1.5~1kg/马力。20年代，汽油机主要解决了汽油机爆震问题，英国吕卡多（Ricardo）改进了燃烧室设计，美国通用汽车公司采用了四乙铅汽油，使压缩比可以提高到8:1，汽油辛烷值也大大提高，由于压缩比的提高，使热效率得到提高，耗油率显著下降。20年代以后，机械式增压器开始应用于航空用汽油机。30年代末以后，废气涡轮增压器应用于军用飞机，显著提高了发动机的热效率和功率，降低了质量功率比。战后增压技术转用于民用重型载货汽车，开辟了内燃机技术发展的一个新途径。在农业上，汽油机可以用来取代人、畜力从事固定作业，到1910年以后促成了拖拉机的成批生产，开辟了田间作业机械化的时代。目前，汽油机在农业田间作业机械化上，特别适合于作为小型、轻型的驱动动力，如喷雾喷粉机、插秧机、割草机等用的发动机。

柴油机在1897年制成时，功率为5.6马力，转速为180r/min，压缩比为16:1，气缸工作压力为35atm，热效率达24~26%，质量功率比30kg/马力。本世纪初，柴油机首先用于航运船舶上。20年代，由于采用多缸、机动喷油泵和改进喷油系统，热效率提高到40~42%，质量功率比降至6kg/马力以下，因而为柴油机驱动载货汽车和机车提供了条件。以后由于柴油机生产上的标准化、改善工作过程、采用增压技术等，使柴油机质量功率比大大下降，气缸工作压力和发动机工作转速大大提高，使柴油机的应用范围愈来愈广。尤其在五六十年代世界上大量开采石油以后，使许多领域发动机的柴油化得到加速。从70年代资本主义世界的石油危机爆发以后，柴油机已成为大型舰船、载货汽车、拖拉机、工程机械和军用车辆的主要动力。大功率柴油机采用涡轮增压技术，成为目前柴油机技术发展的突出特点。在农用领域里，大中型和手扶式拖拉机及中小功率农用内燃动力，绝大部分是柴油机。柴油机90年来的发展，使热效率提高近80%，质量功率比降低到最初的几分之一，空气利用率达90%。

二次大战后40多年的历史中，内燃机技术得到了极大的发展。70年代以来，由于能源形势和环保要求，对内燃机性能提出了更高的要求。微电子技术、电子计算机技术及各门

技术科学的深入发展，为内燃机技术的继续发展提供了有利的条件，这使内燃机技术的发展既面临严峻的形势，又呈现出多方面的可能性。内燃机技术上新的突破有待于工作原理上新的重大变革，这是可以预期的。