

汽车发动机现代设计

徐兀 编著

东风汽车工程研究院专家组 主审



人民交通出版社

QICHE FADONGJI XIANDAI SHEJI

汽车发动机现代设计

徐 兀 编著

东风汽车工程研究院专家组 主审



人民交通出版社

内 容 简 介

本书以现代结构和现代设计分析法为主,较全面地阐述了汽车发动机设计,特别充实了轿车发动机设计,并介绍了国内汽车发动机设计科研前沿状况和专家经验。全书共16章,内容丰富、系统、新颖,可供本专业大学高年级学生、研究生和工程技术人员使用,也可供其它内燃机工作者参考。

DW79/13

汽车发动机现代设计

徐 兀 编著

东风汽车工程研究院专家组 主审

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街10号)

各地新华书店经销

三河有色曙光印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:27 字数:690千

1995年8月 第1版

1995年8月 第1版 第1次印刷

印数:0001—4500册 定价:42.00元

ISBN 7-114-02076-7

U·01403

实践的是结
可贵的奉献

东风汽车公司

马耀

一九九四年九月八日。

前 言

我国汽车工业已有 40 年历史,掌握了复杂的汽车生产技术,形成了主供国内市场的汽车制造业。在新形势下,我们必须提高开发现代产品的能力,参与国际竞争!

应当充分估计两种潜力,其一是我国理工院校拓宽了基础理论教育,普及了计算机应用技术;其二是我国科技人员中蕴藏着丰厚的知识财富。如果对高校专业课作革新,并加强教育中的实践环节,传播汽车研究、开发、生产和使用中累积的知识与经验,作为今后实践的指导,那么,将有利造就适应现代潮流的新型技术开发队伍。

技术不断进步是现代大工业的特征,而汽车工业的表现尤为突出,它在广泛领域吸收新科技成就。在激烈的竞争面前,技术进步是否快过对手是一个企业生死攸关的问题。

我转入教育岗位后,在前学部委员孟少农撰写《汽车设计方法论》的影响下,便在内燃机设计课中渗入现代设计法,并从国内的工程实践中吸取养料来教学。东风汽车公司专家对此一直给予热忱帮助,后经审稿专家座谈讨论将编写方向调整为:使大学生养成处理实际工程问题的能力,能较快地适应工厂技术开发工作;有助于工程技术人员充分利用工厂装备的现代设计试验分析手段,消化吸收引进技术、提高产品首次设计成功的可靠率和缩短产品开发周期。

为争取达此目的,特请几位教授作了学术指导。这种“开门写书”方式凝聚了人才需求和人才培育双方学者的智慧和经验。我们在取材上考虑了以下几点:

1. 为了提高产品开发能力和市场竞争力,重视总结经验、交流国内科技进步,针对差距、重点和难点精选内容。讲求运用基础理论,结合汽车的使用特点和性能要求设计发动机。
2. 为了发挥工厂人才智能和现代技术装备优势,推行技术预测、优化设计、CAE/CAD·D、有限元法、动态设计、相似设计、可靠性设计、价值工程等现代设计分析法。对仍有重要作用的传统设计法进行提炼,做到“少而精”。
3. 依据教育“面向现代化、面向世界、面向未来”的培养目标,把学生引向本专业的前沿阵地。少数知识层次高些的内容(标记*部分),留待就业后结合工程实践再提高。
4. 轿车发动机的设计难度大、要求高,且是原有教科书的欠缺,着重给予充实。介绍符合国情的国外现代技术,以助消化吸收引进技术。
5. 设计技术工作是手段,是为经济目的服务的,其最终目的是为社会提供经济效益。为此引导树立成本观念、市场观念和竞争意识,并归纳降低生产成本和使用成本的方法。
6. 某些复杂问题的处理,限于篇幅只能引述理论依据和工程方法,并在参考文献中指明相关文献,以便读者检索。

中国汽车工程学会发动机分会主任程宏教授就综合性、理论性强的部分书稿所提原则性意见,对全书定稿起了重要指导作用。武汉工学院院长徐尔强教授审核了全书的知识结构,并对第一、第十三章作了修正。华中理工大学崔心存教授在审阅试教教材中,对把握教改方向作了指导。清华大学陆际清教授在出版中指导处理学术问题,为保证成书质量作出了宝贵贡献。

东风汽车公司科学技术委员会杨立贵主任、老科技工作者协会王达勋理事长、湖北汽车工业学院科研处长姚自申对本书的编写给予了鼓励和支持。在东风汽车工程研究院闵佟院长主

持下,由研究员、高级工程师张日骞、陈潞闻、樊惠卿、饶如麟、张惠康、刘裕昭、裘崇伟、徐家炽、唐述斌、白羽、赵国平、张奠忠、杨正江、陈振峰等同志组成的专家组主审了全书。

汽车学院吴振威、李名石副教授经常关心和支持编审工作,罗永革同志推行数值计算法,编制和调试通过了附录中的五项计算程序。

作者在此谨向所有指导和帮助完成本书编审工作过的领导和同志们表示衷心的感谢!最后希望读者在应用中发展现代设计分析法。

徐 兀

1994 年 9 月 1 日

目 录

第一章 总论	1
第一节 发动机总体设计	1
一、主要设计指标和设计要求	1
二、发动机方案设计 (概念设计)	6
三、发动机布置设计	8
第二节 发动机主要参数的选择	9
一、平均有效压力	9
二、活塞平均速度	10
第三节 典型发动机的结构分析	12
一、CA6102 型汽油机	12
二、EQ6100-1 型汽油机	13
三、天津华利 (大发) 微型车汽油机	15
四、多气门汽油机	17
五、斯太尔 WD615 系列柴油机	19
六、B 系列柴油机	20
第四节 活塞式发动机的发展	25
一、废气涡轮增压	25
二、发动机的电子控制	28
第五节 现代设计的基本方法	39
一、技术预测法	40
二、优化设计法	40
三、CAE/CAD · D	41
四、有限元法	42
五、边界元法	42
六、可靠性设计法	43
七、动态设计法	43
八、相似设计法	43
九、价值工程方法	43
第二章 曲柄连杆机构受力分析	45
第一节 曲柄连杆机构运动学	45
一、中心曲柄连杆机构	45
二、偏心曲柄连杆机构	47
第二节 曲柄连杆机构上的作用力	49
一、气体压力	49

二、惯性力	50
三、作用在曲柄连杆机构上的力	51
四、发动机的扭矩	52
五、曲轴轴颈和轴承的负荷	53
第三章 发动机的平衡	56
第一节 概述	56
第二节 平衡分析方法	57
一、单列式发动机的平衡分析	57
二、V 形发动机的平衡分析	59
第三节 曲轴轴系平衡块的布置	61
一、单缸机平衡	61
二、三拐曲轴	62
三、四拐曲轴	63
四、单列五缸机平衡	63
五、六拐曲轴	64
第四节 辅助平衡机构的设计	66
一、L-4 发动机双轴机构	66
二、L-3 发动机单轴机构	68
三、L-2 单曲拐发动机的平衡	69
第四章 曲轴系统扭转振动控制	72
第一节 曲轴扭振系统的简化	72
第二节 自由振动计算 CAE	74
一、三质量系统自由振动	74
二、多质量系统自由振动	76
三、霍尔咨法	77
第三节 发动机的阻尼	79
第四节 激振力矩	80
一、简谐分析的数值算法 (CAE)	81
二、V 形发动机力矩谐量的合成	83
第五节 强迫振动计算	84
一、主谐量和主共振及临界转速	84
二、传递矩阵法强迫振动计算 CAE	86
第六节 扭振减振器设计	90
一、扭振减振器理论	90
二、最佳扭振阻尼	92
三、橡胶的非线性性能及其试验方法	94
四、硅油减振器设计	95
五、减振器的可靠性和耐久性	97
六、双减振器固有频率的确定	97
第五章 发动机悬置设计	99

第一节 发动机的隔振	99
一、振源	99
二、振动特性和运转平稳性	99
第二节 发动机悬置设计与计算	101
一、悬置系统的固有频率和主振型计算 CAE	103
二、动力总成的强迫振动	108
第三节 悬置件的设计	109
第六章 噪声控制技术	112
第一节 噪声基础知识	112
第二节 内燃机噪声及其控制	114
一、进气噪声	114
二、排气噪声	116
三、风扇噪声	118
四、燃烧噪声	120
五、活塞敲击噪声	121
六、正时齿轮噪声	121
七、配气机构噪声	121
八、控制结构振动辐射噪声的措施	122
第七章 曲轴设计	126
第一节 曲轴的工作条件和设计要求	126
第二节 曲轴主要尺寸的确定和结构细节设计	126
第三节 曲轴强度计算连续梁法 CAE	131
第四节 有限元法在曲轴设计中的应用	133
一、曲轴的三维应力分析	134
二、轴颈圆角形状最佳化	135
三、弯曲振动模态分析	138
第五节 曲轴的实验应力分析和疲劳强度试验	140
一、三维光弹性应力分析	140
二、疲劳强度试验	141
第八章 连杆组设计	143
第一节 连杆的结构设计	143
第二节 连杆有限元分析	146
第三节 连杆螺栓设计	150
一、连杆螺栓的工作负荷和预紧力	150
二、螺栓疲劳强度和防松性能的提高	152
第九章 轴瓦设计	155
第一节 轴瓦的工作特点与要求	155
第二节 轴瓦结构设计与应力计算	156
第三节 轴心轨迹计算 CAE	162
一、计算的基本原理与方法	162

二、轨迹图的应用	165
第四节 主要失效形式及对策	166
第十章 活塞组设计	169
第一节 活塞的设计	169
一、活塞头部的设计	170
二、活塞裙部的设计	173
第二节 活塞销和活塞销座	175
第三节 活塞有限元分析	176
一、基本解题思路	177
二、活塞传热基本概念和传热系数*	179
三、活塞温度场计算	182
第四节 活塞的评价	184
一、活塞轻量化	184
二、活塞动作的模拟计算*	184
第五节 活塞环结构和参数选择	187
一、结构型式和参数选择	187
二、活塞环的配组	190
三、活塞环的计算	191
四、活塞环拉缸的防止	193
五、活塞环组摩擦损失的降低	194
第十一章 机体和气缸盖	198
第一节 机体设计综述	198
第二节 冷却水流的组织	200
第三节 机体变形和振动噪声控制	204
第四节 气缸和气缸套的设计	207
一、干缸套	207
二、湿缸套	208
三、气缸寿命的提高	209
四、湿缸套穴蚀的防止	211
第五节 气缸盖设计	212
一、燃气面热区的布置	213
二、螺栓布置及设计	213
三、一些设计实例	215
第六节 机体的实验分析	216
一、静刚度测量	216
二、静应力测量	216
三、激光全息摄影法分析机体振动	217
第七节 机体的有限元分析	218
一、机体的应力分析	218
二、机体振动模态和声发射特性的预测*	220

第十二章 配气机构	224
第一节 总布置设计	224
一、气门通过能力.....	224
二、配气机构型式选择与布置.....	226
第二节 配气机构运动学	229
一、下置凸轮轴配气机构运动学.....	230
二、顶置凸轮轴配气机构运动学.....	231
第三节 凸轮型线设计	237
一、缓冲段设计.....	238
二、工作段设计.....	240
第四节 配气机构动力学	244
一、下置凸轮轴配气机构动力学.....	245
二、顶置凸轮轴配气机构动力学.....	251
三、配气机构振动控制.....	256
四、动态设计法.....	257
第五节 凸轮轴与气门驱动件	262
一、凸轮轴与从动件接触应力和弹流体动力润滑计算.....	262
二、液力间隙自动调节器.....	271
三、推杆和摇臂.....	272
第六节 气门组件的设计	274
一、气门设计.....	274
二、气门座与气门导管.....	277
三、气门弹簧参数选择与优化设计.....	278
第七节 配气机构计算 CAE	283
第十三章 气流的组织	285
第一节 混合气分配均匀性的提高	285
一、化油器式汽油机的混合气均匀分配.....	285
二、汽油喷射式汽油机的混合气均匀分配.....	288
第二节 气道、管道 CAE/CAD/CAM	290
一、气道 CAD/CAM	290
二、管道配置 CAD/CAM	295
三、气道设计与燃烧室形状优化*	296
第三节 进排气管系的优化组合	297
一、多缸机进排气管系的优选.....	298
二、排气脉冲转换器的应用.....	300
第四节 可变进排气系统	303
一、可变配气相位 (VVT)	303
二、可变进气管长度.....	304
三、可变进气通路.....	305
第五节 空气滤清	305

第十四章 密封技术	309
第一节 燃烧室的密封	309
一、气缸垫	309
二、活塞环	314
三、阀座的密封性	317
第二节 其它	318
一、曲轴密封——油封	318
二、气门导管机油控制	318
三、水泵密封——机械密封	320
第十五章 润滑系与冷却系	321
第一节 润滑系主要部件设计	321
一、主要部件结构选择	321
二、几项指标选择	324
第二节 主要摩擦副的摩擦学	324
一、凸轮——从动件	325
二、活塞环——气缸	326
三、轴颈——轴瓦	329
第三节 润滑油的选择	332
第四节 冷却系的设计要求	333
第五节 散热器设计	336
一、散热器的结构设计	336
二、散热器的计算CAE	337
第六节 节能风扇	342
一、硅油离合式风扇	342
二、电动风扇	345
三、翼型断面风扇设计	345
第十六章 零件材料和强度	351
第一节 材料	351
一、钢材	351
二、铸铁	352
三、轻合金	356
四、活塞环材料	357
五、粉末冶金	357
六、轴瓦材料	358
七、塑料、陶瓷和复合材料	360
第二节 金属表面强化	360
一、表面变形强化	361
二、表面化学强化	362
三、表面感应淬火	363
四、激光热处理	363

五、表面镀渗处理.....	364
第三节 零件强度.....	365
一、若干概念性问题.....	365
二、疲劳强度计算预备知识.....	368
第四节 可靠性设计.....	370
一、可靠性函数和常用概率分布.....	370
二、随机设计变量的分布参数.....	372
三、应力——强度干涉与可靠度计算.....	376
四、给定寿命下的零件疲劳强度分布.....	377
五、安全系数与可靠度的关系.....	378
六、静强度可靠性设计.....	378
七、疲劳强度可靠性设计.....	379
八、复杂零件的疲劳强度概率设计.....	381
附录 五项计算程序 (FORTRAN77)	384
参考文献.....	416

第一章 总 论

第一节 发动机总体设计

基于以往有关内燃机设计的著作甚多,且有新书出版,知识有更新,经典内容无须再述,所以本书不求面面俱到。它根据专业的需要对学科的基本理论、基本概念作些纵深发展,其侧重点置于:现代结构,现代设计分析法,反映当代科学成就,交流国内科技进步,归纳可资借鉴的经验,并从提高经济效益和面向世界竞争需要出发引述一些经济学知识。

在发动机总体设计上略述以下几点。

一、主要设计指标和设计要求

在技术竞争和市场竞争中对发动机的评价重点是:

结构空间 外形尺寸小,体积功率(P_e/V , kW/m³)大,升体积(V/V_h , m³/L)小。

总质量 总质量 G 、比质量(G/P_e , kg/kW)、升质量(G/V_h , kg/L)均小。

功率 有效功率 P_e 满足所装汽车适宜的最高车速要求,升功率(P_e/V_h , kW/L)大。

环境保护 废气排放和噪声达到法规要求,并适应强化趋势。

生产成本 生产能耗小,材料费用降低,结构设计适于组织经济批量生产。

使用成本 可靠性、耐久性好,使用油耗低,保养费少,提高汽车的有效利用程度。

以上重点序列适于轿车,对载货车则以可靠性和使用油耗为最重要,其次是排放。

下面结合我国实际就其中几项有关提高产品经济效益和市场竞争力的问题,稍作展开讨论。

1. 排放和噪声控制

环境保护包括有害废气和烟雾、颗粒、气味、噪声等的限制。随着我国经济建设的发展,人民生活水平逐步提高,对生活质量的要求也将提高;外向型产品必须满足销售地区的法规要求。这些是促进我们改善发动机环保质量的有利因素。

当前我国汽车有害排放物的控制状况是:载货车控制怠速排放(GB3842—83 规定,CO $\leq$ 5%,HC $\leq$ 2500ppm);轻型车开始实施模拟工况循环控制(GB11641—89 轻型汽车排气污染物排放标准);柴油车控制烟度(GB3843—83 柴油车自由加速烟度排放标准 $\leq R_b 5.0$ 波许单位,GB3844—83 汽车柴油机全负荷烟度排放标准 $\leq R_b 4.0$ 波许单位);与美国、日本和欧共体等的汽车排放法规相比,存在较大差距,而且微粒排放还无限制规定。可喜的是,我国学术界对排气净化的基础研究很活跃;大型企业和研究院所也建立了较完善的测试分析手段;研究微粒排放控制的论文和内燃机排气净化的专著都有出版。这些是我们赖以改善发动机排放的物质技术基础,预示着排放限制标准可以逐步严格起来。

在自主开发产品上力求机内净化,在合资经营汽车生产中发展机外辅助装置控制技术,将会推动我国汽车排放水平大改观。

我国汽车加速噪声限制标准 (GB1495—79 机动车辆噪声限值标准) 与国外同类法规相比, 差距更大, 有的车种的噪声能量甚至大 1.5~2 倍; 中小功率柴油机噪声限值 GBn259—86 的规定也偏高; 有些产品的实际噪声水平比标准限值为小。这就需要抓紧修订标准, 以推动技术进步。

国内以主导厂和研究院所为代表的噪声测试分析设施、仪器设备、以及研究队伍已经相当强大, 噪声控制研究水平已达相当高度, 一些工厂也开展了噪声测试。但是, 存在一种现象: 噪声控制工程师尽管分析噪声成因头头是道, 提出的降噪措施言之有理有据, 就是设计和生产既成事实, 难以改变。这反映出需要在产品设计中开展“振动、噪声控制设计”, 把它纳入设计程序, 加强设计试验人员的协作, 从结构选型、参数选择、噪声预测上展开噪声控制设计。考虑到此, 所以本书增加了这方面的内容。而要推动这项工作, 首先必须按实际情况分车种和销售市场提高法规要求。

2. 生产成本的降低

生产成本是影响经济效益的最重要因素, 成本是销售价格的下限, 售价低于成本时, 企业亏损不能长期生存。因此在设计新产品时, 必须瞄准一定的目标成本, 并在工作中力求不超出。这一条件给产品设计规定了大方向。

一般地说, 产品越复杂, 其生产成本越高。从价值观点来说, 能达到目标技术条件 (即设计目标) 的最简单结构设计就是最佳设计。为了控制生产成本, 在设计中可以采取以下方法和措施:

(1) 运用价值工程对零件的功能进行技术、经济分析, 合理分配成本, 选择最优方案。

(2) 用结构分析、力学分析和实验分析相结合的方法, 力求结构设计可靠、轻巧。

(3) 选用低能耗、价廉的标准材料, 减少品种数; 采用低能耗、高生产率工艺。

(4) 产品设计系列化、通用化和标准化, 为发展新品种、合理组织生产、提高产品质量和劳动生产率、赋予企业应变能力提供条件。

(5) 将几种功能不同而有联系的零件设计组合成一体, 减少零件个数和加工表面数。

应当指出, 过分的设计和不足的设计同样是错误的。不足的设计造成产品故障或失效, 使用中暴露出来尚可补救。而过分的设计不出毛病, 掩盖下来, 长期高消耗、高成本, 成为包袱, 这种危害比不足设计更大, 是设计者必须充分重视的。

还要指出, 长期沿袭下来忽视成本的弱点, 亟需克服, 否则不能适应竞争环境。只有树立起牢固的成本观念, 才会去谋求降低成本。

3. 使用成本的降低

产品的社会效益表现在其使用价值上是性能好、可靠性高、省油、寿命长、维护费少。使用价值高, 可销路大开, 给企业和社会增高经济效益。这也就是产品设计要争取达到的目标。用户特别重视使用成本, 设计者应为用户着想, 在设计构思中和设计方法上同时追求降低产品的初始购置费和正常维持运行的费用。

1) 降低使用油耗

影响汽车使用油耗的设计因素包括车重、滚动阻力、传动系的匹配、风阻和发动机的燃料经济性。发动机设计师不仅要致力于降低发动机的油耗, 而且要关心发动机与汽车的最佳匹配, 即要与车型设计师合作合理匹配汽车底盘参数和发动机参数。新产品设计应当注意到: “八五”计划重点建设连接我国大、中城市的 12 条 2~2.5 万 km 的国道主干线高速公路和一、二级汽车专用公路; “人、车、骡马混流”的局面可望显著改善, 经济车速容许有较大提高。

在油耗水平上,汽车注重使用油耗的评价。美、日和欧共体早在1973年石油危机后就制定了汽车油耗法规,尔后各类汽车规定每升燃油行驶的里程数逐步提高,而且有油耗超过限值对汽车生产厂的罚款规定。我国也制定了载货汽车燃料消耗量限值(JB3809-84),例如总质量9~12t的货车1990年的油耗限值为:2.66~2.5L/(100t·km)。

发动机外特性上的最低油耗率($g_{\min}$)小,不一定使用油耗低。使用油耗需用发动机的万有特性(图1-1)来评价。汽车发动机经常是在部分负荷工作,只有设计上追求常用的部分负荷经济性好,才能达到降低使用油耗的目的。

文献[4]在研究内燃机与汽车传动系的经济匹配中,提出了“汽车万有特性”的概念,兼顾汽车经济性和生产率从该特性求“实用车速”;从发动机与汽车的经济匹配出发,对传动系参数的选择提出了新概念和新要求。

对发动机、底盘、道路三者的合理匹配作出妥善处理,可以显著提高汽车的燃料经济性。图1-2是根据下列关系式,作坐标变换绘出的CA15K载货车不同装载的万有特性。

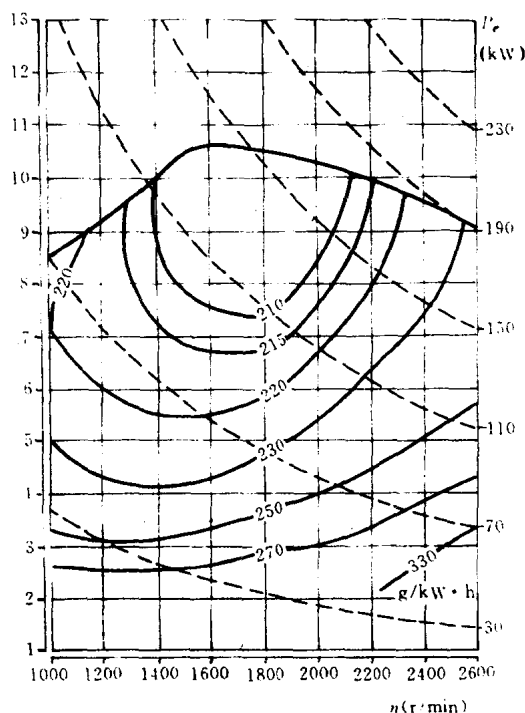


图1-1 某增压柴油机的万有特性

$$g_{100} = \frac{ZV_{h0}i_0p_0g_e}{4524r} \quad (\text{kg}/100\text{km}) \quad (1-1)$$

$$\left. \begin{aligned} P_k &= 7.96 \frac{p_e ZV_{h0}i_0\eta}{r} \quad (\text{N}) \\ P_k &= W \sin \alpha + W f \cos \alpha + \frac{C_D A}{21.15} v_a^2 \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

式中 i_0 ——主传动比;

i_k ——变速器传动比;

g_e ——发动机油耗率, kg/(kW·h);

g_{100} ——汽车油耗, kg/(100km);

r ——轮胎有效半径, m;

η ——传动系效率;

W ——汽车总重, N;

P_k ——汽车牵引力, N;

p_e ——平均有效压力;

f ——汽车滚动阻力系数;

α ——道路坡度, (°);

C_D ——空气阻力系数;

A ——汽车迎风面积, m²;

v_a ——汽车车速, km/h;
 Z ——气缸数;
 V_h ——单缸活塞排量, L。

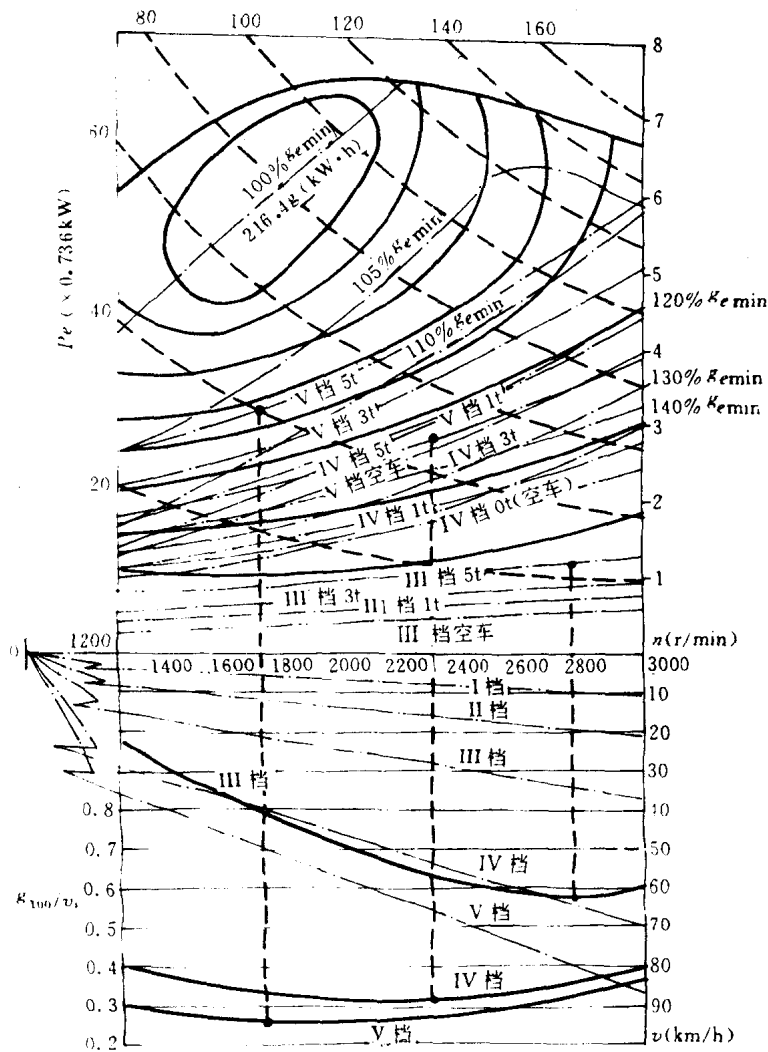


图 1-2 载质量不同时 CA15K 汽车的万有特性

把发动机的万有特性和汽车的行驶阻力特性联系起来, 将牵引力 P_k 和车速 v_a 转化为发动机平均有效压力 p_e 和转速 n , 并图示便能得出汽车的万有特性。

图中 $100\%g_{emin}$ 曲线是在发动机各种功率 P_e 下的最经济油耗线; $110\%g_{emin}$ 曲线是比最经济油耗曲线超耗 10% 的曲线, 该曲线以上区域一般被称为经济工作范围。当汽车用常用排挡在一般平道上行驶时, 最好使发动机在此范围内工作。图中 V 档 3t 和 V 档空车的负载曲线都远离了 $110\%g_{emin}$ 所限定的经济工作范围, 在费油区工作。这类汽车实载率低和空驶造成浪费燃油的情况就是汽车没有得到有效利用, 从而使用成本高。

令人忧虑的是, 我国汽车产品构成中中型载货汽油车的比例大; 交通运输中专业营运不发达, 分散运输的实载率低, 空驶率高。这两种情况使部分负荷燃料经济性差的汽油货车大量浪费着短缺的汽油。考虑到此, 作者近几年对东风汽油车进行了变排量节油技术的探索性