

# 动力机械 工作过程及其测试技术研究

Investigation of Power Machinery:  
Its Working Processes and Measurement Techniques

李德桃教授论文选集

Selected Papers of Professor Li Detao

■ 李德桃等 著

江苏大学出版社

动力机械工作过程及其测试技术研究

Investigation of Power Machinery: Its Working Processes and Measurement Techniques

# 李德桃教授论文选集

Selected Papers of Professor Li Detao

李德桃等 著

江苏大学出版社

### 图书在版编目(CIP)数据

动力机械工作过程及其测试技术研究:李德桃教授论文选集 / 李德桃等著. — 镇江: 江苏大学出版社, 2008. 11  
ISBN 978-7-81130-029-1

I. 动… II. 李… III. 动力机械—文集 IV. TK05-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 169332 号

### 动力机械工作过程及其测试技术研究:李德桃教授论文选集

---

著 者/李德桃等

责任编辑/汪再非 徐云峰

出版发行/江苏大学出版社

地 址/江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编: 212003)

电 话/0511-84446464

排 版/镇江文苑制版印刷有限责任公司

印 刷/丹阳市教育印刷厂

经 销/江苏省新华书店

开 本/787 mm×1 092 mm 1/16

印 张/38.75

字 数/1 100 千字

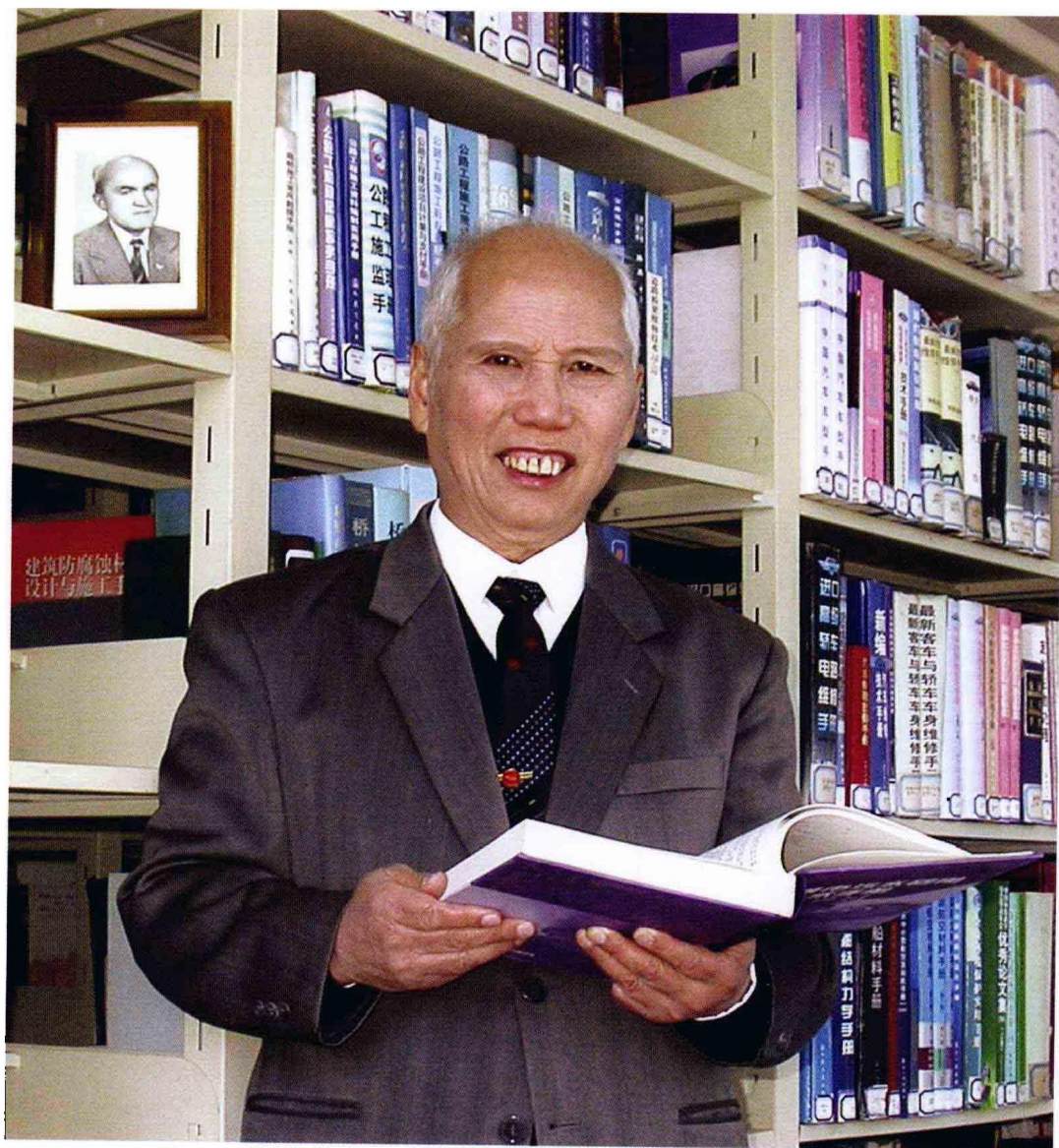
版 次/2008 年 11 月第 1 版 2008 年 11 月第 1 次印刷

书 号/ISBN 978-7-81130-029-1

定 价/120.00 元

---

本书如有印装错误请与本社发行部联系调换



李德桃 教授  
Professor Li Detao

# 序

李德桃教授是我国著名的动力机械专家,他从20世纪50年代中期开始动力机械的研究和教学生涯。作为老一辈内燃机权威专家戴桂蕊教授的助手,李德桃教授参与了当时的重大项目内燃机水泵的研究和我国第一个排灌机械专业的筹建。20世纪60年代,他主持涡流室式柴油机的设计和开发,研制成功的185型柴油机性能达到国际同类机型的水平。70年代初,他瞄准涡流室式柴油机燃烧过程及燃烧系统这一研究方向,经过多年的理论探索和实验验证,发明了低油耗、低污染、低爆压的柴油机涡流燃烧室,提高了国产柴油机的转速和功率并降低了油耗,使当时的涡流室式柴油机有了国际竞争力;国家资助他出版的3部专著堪称该领域的奠基之作。80年代初他就关注和开展了内燃机排放有害成分的研究,并在90年代初与史绍熙院士(现已故)一起为建立我国内燃机排放法规 and 解决汽车污染问题提出重要建议;90年代中期和无锡油泵油嘴研究所开展柴油机电控共轨喷油系统的产学研合作,在数值模拟和实验研究方面处于国内先进水平;90年代末在国内率先开展了微动力机电系统的研究,时至今日,该领域已成为动力机械的一个研究热点。

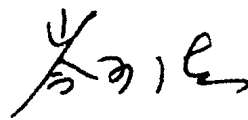
据我所知,李教授一直在非常艰苦的工作条件下开展科学研究,但他50年如一日地将全部精力投入到科研和教学中,并获得了卓越的成绩;退休后仍为科研团队提供力所能及的帮助,令人敬佩。

这本论文选集是从他及其科研团队发表的200余篇论文中选录的,凝结着李教授一生的心血。我推荐它出版,不仅能使有关的科技人员学习和借鉴他的学术思想和研究成果,而且能使读者领略他的钻研和创新精神。

值李德桃教授论文选集出版之际,作为他的老朋友,谨表衷心的祝贺。我相信,本书的出版对我国动力机械和工程热物理的研究与发展将起到积极的促进作用。

中国工程院院士,浙江大学教授、博士生导师

国务院学位委员会动力工程与工程热物理评议组召集人



2008年3月6日

# 序 二

江苏大学出版社今年推出第一本精装版学术专集——《动力机械工作过程及其测试技术研究：李德桃教授论文选集》，这是一件很有意义的工作。

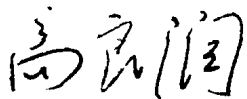
作为科教战线上的一位老兵，看到我们下一代学者获得丰硕的劳动成果，看到改革开放带来的欣欣向荣的繁荣景象，内心感到由衷的喜悦和欣慰。

学校建立之初，我就与德桃相识，他是我的老朋友、已故原镇江农业机械学院副院长戴桂蕊教授的得意门生。他爱国敬业，严谨治学，善于创新，甘为人梯。几十年来，他的工作和生活条件都很差，但他数十年如一日将全部精力投入到科研与教学中，取得了包括国家发明奖在内的 10 多项国家和省部级奖项，发表了 200 余篇学术论文，培养了约 50 名硕士生、博士生、高级访问学者。他是一位实事求是、努力做学问的人，是一位勇攀科学高峰的学术带头人，是一位德才兼备的科技专家，是为内燃机与工程热物理事业作出重要贡献的著名专家。

我希望，也深信，随着改革开放事业的进一步发展，一定会一代一代地出现更多的优秀科技人才和优秀科技成果。我校出版园地亦必更加满园春色。

中国农业机械学科奠基人之一

我国首批博士生导师、原镇江农业机械学院副院长



2008 年 3 月 26 日

# 序 三

早在 2004 年,当国内外久负盛名的内燃机专家李德桃教授迎来 70 喜寿之际,我和亦曾受到李教授培养和指导多年、现在国立新加坡大学机械系任教的杨文明博士酝酿过编辑出版一本汇李教授几十年如一日教书、育人、研究于一体的文集。光阴似箭,提笔之际,不觉又过了 3 个多春秋。

李教授出生于湖南省茶陵县一个贫苦的农家。4 岁丧父,童年和少年是由祖母和母亲含辛茹苦抚养大的。小学毕业后,以优异成绩考取了中学。由于家庭经济拮据,曾屡次几近辍学。为了照顾祖母和母亲,1952 年他就近考取了湖南大学。院系调整后,又以优异的成绩毕业于吉林工业大学并留校任教,为早年留英归来的我国著名内燃机专家戴桂蕊教授所赏识,亲点他作为科研助手,并让他协助戴教授筹办了我国第一个排灌机械专业。1963 年整个专业南迁至镇江农业机械学院,即现今的江苏大学。幼年生活的艰辛,练就了他坚毅、勤劳、多思、敬业的性格。良师戴教授的言传身教,培养了他严谨和奋发的精神。

客观地说,在中国像李教授这一代的科学家是极不幸的。在他们最年富力强、成果迭出的年代,遭遇了史无前例的文化大革命。十年动乱,人妖颠倒,摧残了多少优秀的科技人才。然而,即便在这样恶劣的环境中,李教授仍然坚持钻研业务。20 世纪 60 年代他与上海内燃机研究所等单位成功研制了 185 型柴油机。70 年代在常州柴油机厂主持涡流燃烧室的研究,首次把国产小型柴油机的转速提高到 3 000 r/min,油耗达到国际水平。1978 年,春暖花开,当人们迎来中国科学的又一个春天的时候,他已获得许多既有广泛应用价值又达到国内领先水平的成果,一跃成为当时国内内燃机行业中出类拔萃的年轻专家之一。1979 年经国家选拔,派往罗马尼亚深造,并于 1982 年获得罗马尼亚蒂米什瓦拉工业大学工学博士。他的人品和论文水平,受到导师贝林单教授和评审委员会的高度评价。学校还特地向中国驻罗使馆对他进行了表扬。

从罗马尼亚回国后,李教授毫不懈怠,在当时的江苏工学院筹建了

工程热物理研究室并主持工作。从那以后的 20 多年里,李教授在极其艰难的条件下,把他全部的智慧、经验和精力倾注在研究室的成长和发展中。年复一年,科研开发成果累累,教书育人桃李芬芳,从而奠定了他在国内外内燃机和工程热物理界的学术地位。李教授的突出成果可以归纳为以下三大研究方向:

(1) 研究涡流室式柴油机燃烧过程和燃烧系统。李教授主持并完成了 5 个国家自然科学基金项目。首次提出了以热力学和经验模型组成的复合计算模型,发展和完善了计算方法和程序,完成了涡流室式柴油机从零维、准维到多维模型的模拟计算。在实验研究中,精确地测量出涡流燃烧室的示功图和压差图,提出了 M 过程在涡流燃烧室中合理应用的条件、方法和限度,为改善其燃烧过程提供了科学依据。这一系列全面深入的研究工作,为该领域奠定了理论、计算和分析的基础。

(2) 研究柴油机冷起动过程。李教授建立了柴油机冷起动过程四个阶段的模型和热力参数,揭示了起动孔的作用机理,为改善冷起动过程,增加冷起动的可靠性奠定了理论基础,并成功地将涡流室式柴油机最低起动温度降低了  $5\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,由此减轻了操作人员的劳动强度,打开了若干制造企业的产品销路。该研究被列为国家自然科学基金委的重要成果之一。

(3) 发展内燃机测温、测速、测压和测流量技术。早在 20 世纪 70 年代,李教授就与上海工业自动化仪表研究所合作,主持了漩涡流量计的研究,该成果获江苏省科学大会奖。在 20 世纪 80—90 年代,主持研究非稳态压力和温度的数据记录和处理系统,并设计开发了柴油机涡流室内激光测速的光学系统,利用高速纹影技术拍摄涡流室内的喷油和燃烧过程。首次将激光莫尔偏折技术应用于涡流室内气流温度场的测试。

要想在工程热物理和内燃机工程学术领域中脱颖而出,需要有丰富扎实的数理功底和坚韧不拔的钻研精神。而要成为该领域中一流的代表人物,还需要有独具一格的眼光和魅力四射的组织才能。作为一代学术精英,李教授无疑在这两方面是出类拔萃的。

李教授对科研发展趋势和方向的把握,有着极强的敏感度和前瞻力。早在 20 世纪 80 年代初,当人们正热衷于降低内燃机油耗,改善经济性能的时候,李教授就开始了柴油机排气有害成分的研究,并致力于呼吁内燃机排放法规的建立。他取得了降低涡流室式柴油机  $\text{NO}_x$  排放 20% 的研究成果,首创“低油耗、低公害、低爆压柴油机涡流燃烧室”。这比后来英国提出的所谓“优化涡流燃烧室”早了 6 年。1994 年他参与美

国德州大学奥斯汀分校负责制定天然气排放法规的研究,并公布了与法规有关的若干新的测试结果,这在当时美国州立排放法规中是极具前瞻性的。此后不久,他又与史绍熙院士联名发表文章,呼吁我国重视汽车排放问题,并提出了许多解决此问题的合理化建议。在把地球环境保护列为世纪重大课题的今天,我们无不感叹李教授深邃的战略眼光。

进入 20 世纪 90 年代中期,微机电系统的研究和开发正逐渐成为欧美等许多发达国家的热点课题。1999 年李教授应邀到新加坡国立大学作学术交流。在一系列的学术讨论中,他对我们科研小组刚刚展开的微流动和传热的课题提出了许多建设性的建议,并鼎力支持和倡导对微动力系统的探索。翌年,他在国家自然科学基金主办的“燃烧学科发展学术讨论会”上提出了开展微型燃烧器的可行性研究的设想,并在《世界科技研究与发展》期刊上撰文介绍微动力机电系统和微发动机的研究进展。2002 年,他的“微型发动机燃烧过程和燃烧室的基础研究”课题得到国家自然科学基金资助。由于当时国家自然科学基金是首次资助这种高度创新但风险巨大的项目,只承诺了一年的经费。然而,数年后,当李教授迈入古稀之年,把科研的接力棒交给一线的年轻人时,他欣喜地看到微动力的研究和开发已在国内许多大学和研究所如火如荼地展开。

综观李教授的科研历程,他从国内生产需要出发,在全面系统地总结国内外有关研究成果的基础上逐步深入,从理论到实践,由创新到提高,相辅相成,相得益彰,并不断把研究成果转化为生产力,直至达到了国际先进水平。

作为动力机械及工程热物理学科的带头人,李教授治学严谨,为人师表,以他独特的魅力,吸引了许多优秀的学生和学者。20 多年来,他的科研团队,人才济济,成果斐然。他的学生有的获得了“史绍熙科技教育基金奖”,江苏省优秀博士论文;有的成了“拔尖人才培养工程”培养对象;有的则已成为国际知名的中青年专家。他倡导的“跨学科、跨单位、跨地区、跨国家”的研究团队,更是汇四海英才,集八方智慧。多年来,这个研究团队,在交换信息、共享资源和互相合作等方面独树一帜,颇具特色。

在几十年的教学和科研岁月中,李教授共出版了 4 部专著,发表论文 200 多篇,培养了近 50 名硕士生、博士生和高访学者。他先后应邀赴美、日、欧和东南亚等许多国家和地区的知名大学和研究所进行讲学和学术交流,成果蜚声海外。李教授赢得了许多重要的奖项,其中有国家

发明奖,多项省、部级科技进步奖,全国机械科学大会奖、省科学大会奖。他还被评为江苏省优秀博士生导师、江苏大学杰出研究生导师。在学术界,他在国家自然科学基金委、中国汽车工程学会等机构兼任职务,同时担任过许多主要的专业刊物如《内燃机学报》、《内燃机工程》和《燃烧科学与技术》的编委。他作为第六、七届全国人民代表大会代表,为改善地方的生活环境和教育提出了许多积极的建议。

熟悉李教授的人都知道他生活简朴,淡泊名利。他曾经多次婉谢了担任江苏省镇江市副市长或市政协副主席等职,他认为自己的专长是教学和科研,而教学和科研需要全身心的投入。他常以“岂为图报方言善,非盼功名才读书”自勉,而对学术界的一些钻营投机,急功近利,甚至于整人害人的风气则深恶痛绝。

不管是当年动乱岁月那艰苦奋斗的日日夜夜,还是被授予享受政府特殊津贴的专家的那一刻,让李教授宽慰的是他那同甘共苦的幸福家庭。师母相夫教子,堪称贤妻良母。李教授和师母有两个女儿和三个孙女。大女儿一家近在镇江,周末假日经常回家团聚。小女儿一家远居美国德州达拉斯,但时常邀请退休之后的李教授夫妇越洋小住。2007年初夏,小女儿一家四口偕李教授夫妇游览加州。当我和李教授的学生兼好友、旅居美国多年的钱冀平先生前去洛杉矶机场向他们道别的时候,两个可爱的孙女正依偎在李教授的身旁,刹那间,我的脑海里浮现起李教授作的“七十岁有感”一诗中意味深长的诗句“科技献身情未了,忠良笃信效先贤”。李教授一生为科技献身,即便退休后身在海外,每次我们和李教授促膝详谈或电话联系,他还总是离不开科研和他的“四跨”团队。对于这样一位笃信忠良的良师,我坚信上帝一定是慷慨地施与了他的圣明。

是啊!我们衷心地为李教授祝福,祝愿他身体健康,阖家欢乐。

加州州立工业大学终身教授



2007年12月于洛杉矶

# 目 录

## Contents

|          |     |
|----------|-----|
| 序一 ..... | I   |
| 序二 ..... | II  |
| 序三 ..... | III |

### I. 涡流室式柴油机的燃烧过程和燃烧系统

|                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. 涡流燃烧室高速适应性的研究 .....                                                                                         | 2   |
| 2. 关于 M 过程在涡流燃烧室上的应用 .....                                                                                     | 15  |
| 3. Study of air movement in a separate swirl chamber by means of a<br>bidimensional dynamic liquid model ..... | 24  |
| 4. 频谱分析在研究柴油机燃烧过程时的应用 .....                                                                                    | 35  |
| 5. Studies on improving the economy of swirl chamber diesel at partial load<br>and reducing the emission ..... | 44  |
| 6. 涡流室式柴油机放热率理论模型的探讨 .....                                                                                     | 54  |
| 7. A study on accurate calculating method of rates of heat release in swirl<br>chamber diesel engines .....    | 61  |
| 8. 涡流室式柴油机在不同条件下的放热特性和性能的对比分析 .....                                                                            | 70  |
| 9. 涡流室式柴油机在冷起动条件下非稳态燃烧过程的研究 .....                                                                              | 78  |
| 10. Determination of heat transfer coefficient in the swirl-chamber diesel<br>cylinder .....                   | 90  |
| 11. ZS4S1 喷油嘴在无旋流场中喷注贯穿的研究 .....                                                                               | 100 |
| 12. 吊钟型涡流室内喷油和燃烧过程的研究 .....                                                                                    | 106 |
| 13. 用激光全息术研究轴针式喷油嘴的早期喷雾特性 .....                                                                                | 112 |

|                                                                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 14. 涡流室式柴油机镶块材料的研究 .....                                                                                                                                              | 117 |
| 15. The experimental and computational investigation of the flow in the<br>diesel swirl chamber .....                                                                 | 120 |
| 16. 运用韦柏函数分析发动机燃烧过程时若干问题的探讨 .....                                                                                                                                     | 129 |
| 17. 用 LDA 研究柴油机涡流室内空气运动规律 .....                                                                                                                                       | 136 |
| 18. 涡流室式柴油机非稳态燃烧过程的不稳定性分析 .....                                                                                                                                       | 141 |
| 19. 涡流室式柴油机非稳态燃烧过程理论模型和放热分析 .....                                                                                                                                     | 146 |
| 20. An investigation on measuring temperature distribution in the swirl<br>chamber of a diesel engine during compression stroke by laser-moire<br>deflectometry ..... | 152 |
| 21. Quasi-dimensional coherent flamelet model in an IDI diesel engine .....                                                                                           | 159 |
| 22. 柴油机涡流室新的结构设计 .....                                                                                                                                                | 170 |
| 23. 涡流室式柴油机燃油喷雾过程的三维可视化研究 .....                                                                                                                                       | 176 |
| 24. 柴油机涡流室内空气流动特性的 LDA 测试及数学模型 .....                                                                                                                                  | 181 |
| 25. 涡流室式柴油机空气运动的三维数值模拟 .....                                                                                                                                          | 190 |
| 26. 柴油机涡流室内湍流分布特性的研究 .....                                                                                                                                            | 197 |
| 27. 用 LDA 研究柴油机涡流室内空气运动 .....                                                                                                                                         | 202 |
| 28. 涡流室式柴油机相关火焰微元燃烧模型的三维数值模拟 .....                                                                                                                                    | 209 |
| 29. Temperature measurement in the swirl chamber of an IDI engine using<br>Moire deflectometry .....                                                                  | 216 |
| 30. Numerical simulation of oil droplet breakup and spray impingement in<br>a swirl chamber diesel engine .....                                                       | 227 |
| 31. 涡流室式柴油机燃油蒸发过程的三维数值模拟 .....                                                                                                                                        | 237 |
| 32. 涡流室式柴油机燃油与空气混合过程的三维数值计算和试验验证 .....                                                                                                                                | 245 |
| 33. 改善涡流室式柴油机燃烧室结构降低排放研究 .....                                                                                                                                        | 251 |
| 34. 改善涡流室式柴油机供油系统和利用废气再循环降低排放的研究 .....                                                                                                                                | 259 |
| 35. 利用混合破碎模型对涡流室内喷雾过程的三维数值模拟 .....                                                                                                                                    | 265 |
| 36. LDA measurement and 3-D modeling of air-motion in swirl chamber of<br>diesel engines .....                                                                        | 272 |
| 37. 十六烷值改进剂对涡流室式柴油机排放特性的影响 .....                                                                                                                                      | 285 |

## II. 柴油机冷启动的基础研究和改善措施

|                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. Investigation on ignition and combustion at starting in a swirl chamber<br>diesel engine with a starting throat ..... | 292 |
| 2. 涡流室式柴油机冷启动过程的若干特征 .....                                                                                               | 303 |

|                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3. 涡流室式柴油机起动孔作用机理的进一步探索 .....                                                                          | 308 |
| 4. 柴油机冷起动时热力参数计算模型的建立与应用 .....                                                                         | 311 |
| 5. 涡流室式柴油机冷起动过程燃烧室瞬态壁温测量与分析 .....                                                                      | 317 |
| 6. An analysis of the unsteady combustion in swirl chamber diesel engine<br>in cold-starting .....     | 323 |
| 7. 带有不同形式起动孔的涡流室式柴油机冷起动全过程的研究 .....                                                                    | 331 |
| 8. Transient combustion process of an IDI diesel engine with dual-throat<br>jet at cold-starting ..... | 338 |
| 9. 改善 483Q 柴油机起动可靠性的研究 .....                                                                           | 347 |
| 10. 非直喷式柴油机低温起动时非稳态燃烧过程分析 .....                                                                        | 352 |
| 11. 涡流室式柴油机冷起动时的准维燃烧模拟计算 .....                                                                         | 357 |
| 12. Combustion simulation of IDI engine at cold-starting .....                                         | 363 |

### Ⅲ. 柴油机共轨喷油系统的研究

|                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. Investigation on new type of hydraulically intensified common-rail injection<br>system ..... | 370 |
| 2. 增压式共轨喷射系统的模拟计算和试验分析 .....                                                                    | 378 |
| 3. 蓄压式电控喷油器燃油喷射过程的模拟计算分析 .....                                                                  | 385 |
| 4. 柴油机共轨系统中多分支共轨的三维模拟计算和分析 .....                                                                | 392 |
| 5. 滑阀参数对蓄压式电控喷油器喷射过程影响的计算分析 .....                                                               | 399 |
| 6. 柴油机中压共轨式喷油系统的模拟计算与分析 .....                                                                   | 404 |
| 7. 柴油机高压共轨喷油系统内的瞬变流动研究 .....                                                                    | 411 |
| 8. 喷油嘴喷孔内部空穴两相流动数值模拟分析 .....                                                                    | 417 |
| 9. 垂直多孔喷嘴内部空穴两相流动的三维数值模拟分析 .....                                                                | 424 |
| 10. 柴油机喷嘴结构优化的数值模拟分析 .....                                                                      | 433 |
| 11. 垂直多孔喷嘴内部流动空穴现象数值模拟分析 .....                                                                  | 441 |
| 12. 高压共轨式柴油机多次喷射的数值模拟 .....                                                                     | 449 |

### Ⅳ. 微型动力机电系统的研究

|                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. 微动力机电系统和微发动机的研究进展 .....                                                                  | 456 |
| 2. 微型发动机燃烧室的模拟研究 .....                                                                      | 461 |
| 3. Microscale combustion research for application micro-thermophotovoltaic<br>systems ..... | 466 |
| 4. 微型发动机的燃烧模型和数值模拟 .....                                                                    | 477 |
| 5. 开发微型发动机燃烧器遇到的问题和解决途径 .....                                                               | 481 |

|                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6. 微型火焰管中燃烧的研究 .....                                                                                  | 486 |
| 7. 微热光电系统燃烧的若干影响因素的试验研究 .....                                                                         | 490 |
| 8. 微热光电系统燃烧器的研究 .....                                                                                 | 495 |
| 9. 微热光电系统原型的设计制造和测试 .....                                                                             | 499 |
| 10. 微热光电系统中柱型燃烧室的试验 .....                                                                             | 505 |
| 11. Effects of major parameters on micro-combustion for thermophotovoltaic<br>energy conversion ..... | 510 |

## V. 其他相关研究

|                                                |     |
|------------------------------------------------|-----|
| 1. 旋进型旋涡流量计内流体运动规律的研究 .....                    | 522 |
| 2. 汽油机高压压缩比快速稀燃系统及其爆震控制 .....                  | 531 |
| 3. 关于建立和完善我国汽车排放法规若干问题的探讨和建议 .....             | 537 |
| 4. 有机硝酸酯类柴油十六烷值改进剂的研究 .....                    | 545 |
| 5. 着火促进剂作用机理的数值研究 .....                        | 551 |
| 6. 柴油喷雾着火过程的化学动力学模拟 .....                      | 556 |
| 7. 利用实测放热规律研究十六烷值改进剂对柴油机着火特性和燃烧过程的<br>影响 ..... | 562 |
| 8. 6110 型柴油机机体组件的有限元分析 .....                   | 567 |
| 9. 锅炉给水泵控制系统仿真研究 .....                         | 576 |
| 10. 电厂锅炉燃烧系统的模糊免疫 PID 控制 .....                 | 580 |
| 11. 利用改进型 DRNN 神经网络控制锅炉的负压和风量 .....            | 584 |

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 附录 A 未选入的学术论文题录 ..... | 590 |
|-----------------------|-----|

|                  |     |
|------------------|-----|
| 附录 B 著译作目录 ..... | 596 |
|------------------|-----|

## 附录 C 人文情怀

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 1. 百炼成钢 .....                | 597 |
| 2. 桃李不言,下自成蹊 .....           | 598 |
| 3. 在李老师科研团队中的一些感受 .....      | 600 |
| 4. 忆师随笔 .....                | 602 |
| 5. 感念师恩 .....                | 604 |
| 6. 恩师倡导的“四跨”合作研究和人才培养 .....  | 606 |
| 7. 短期的接触 长期的记忆 .....         | 607 |
| 8. 回忆在工程热物理研究室学习和工作的日子 ..... | 608 |

|           |     |
|-----------|-----|
| 编后记 ..... | 610 |
|-----------|-----|

# I. 涡流室式柴油机的 燃烧过程和燃烧系统

The Combustion Process and Combustion  
System of Swirl Chamber Diesel Engine

# 涡流燃烧室高速适应性的研究<sup>①</sup>

李德桃

**[摘要]** 本文是对涡流燃烧室的结构设计进行大量的、系统全面的试验研究的一个总结。探讨了涡流燃烧室的改进方向,报道了所获得的新型涡流燃烧室的结构设计,提出了涡流燃烧室的一些新概念设计。

众所周知,涡流室式燃烧室,与直接喷射式相比,它的制造工艺简单,对喷油系统要求不高,排出的有害气体  $\text{NO}_x$  较少,工作柔和;与预燃室式燃烧室相比,它有较强的平均有效压力和较低的油耗。因此,它在工农业生产和交通运输中获得广泛的应用。我国自行研制出了一些性能较好的涡流室式燃烧室<sup>[1]</sup>。

但是,当前我国广泛使用的涡流燃烧室,是在小型农用动力( $n=1\,500\sim 2\,000\text{ r/min}$ )上试验得出的<sup>[2]</sup>。为了适应柴油机向高速强化、多种用途和提高经济性的方向发展,要求对涡流燃烧室进一步加以研究和改进。特别对于柴油机转速提高到  $3\,000\text{ r/min}$  以上时,涡流燃烧室的适应性如何,在我国是一项必须探索的迫切问题。

## 1 改进方向和试验方法

涡流燃烧室应该沿着什么方向改进呢?我们认为,首先必须认真总结和分析国内外涡流燃烧室的实践经验,特别有必要先分析一下油膜式混合气形成和燃烧过程(M过程)应用于这种燃烧室所取得的成绩和存在的问题,然后结合涡流燃烧室的特点,探讨它适应高速化的有利条件和克服有关困难的基本途径。在此基础上,提出改进方向和具体措施。

大家知道,M过程应用于涡流燃烧室的可能性和现实性,不同研究者都曾根据各自的高速摄影照片作了明确的说明<sup>[3-5]</sup>。性能良好的常柴Ⅰ号和常柴Ⅱ号,也可以看成M过程应用于这种燃烧室的具体例证。实践业已表明,M过程应用于涡流燃烧室的结果,使它获得了良好的混合气形成和燃烧,从而使涡流室式柴油机具有较好的扭矩特性,降低了敲击声,提高了经济性。但是,也带来一些明显的缺陷:一个是冷起动机性能差;另一个是在燃烧后期缺乏有效的涡流,致使完全燃烧延迟,不利于热效率的提高。常柴Ⅰ号和常柴Ⅱ号涡流燃烧室在克服上

---

① 李德桃教授于20世纪60—70年代(时处“文革”中),在常州柴油机厂主持涡流燃烧室的研究,仅试验就耗时近3年,人工划线加工了不同结构设计的缸头30多个,活塞20多个,镶块数以千计。加工量之大,工作之艰辛,生活之艰苦,实属罕见。项目结束后,写成的技术总结报告《常柴涡流燃烧室的发展研究》,载于1974年第1期的《常柴技术简报》。当时全国80多家涡流室式柴油机厂都向龙头企业常柴厂索取这份简报,并用于本企业产品的改进。此后,当时国内唯一的内燃机杂志,邀李教授在上述报告的基础上,写成此文,研究成果全部奉献给社会。

述缺点方面取得了一定效果,但是,面临高速强化等要求,人们自然会提出这样的问题:应用M过程的涡流燃烧室能否适应高速化?实现高速化的同时能否获得较好的经济性?对此我们试作如下的分析。

(1) 按照茅瑞尔(Meurer J S)关于混合气形成力学的最新观点<sup>[6]</sup>,M过程的主要特性是对蒸发和混合起决定性作用的混合气形成手段——油粒和空气的相对速度,在燃烧过程中始终都保持较高的值。这就给燃料的蒸发和混合气形成创造了极有利的条件。拿这个观点来解释涡流室内的混合气形成和燃烧过程,我们还可以进一步地推断:在相同的油粒速度下,同任何其他类型的燃烧室相比,具有强烈空气涡流的涡流室有着更高的油粒-空气相对速度。这是涡流室应用M过程的一个特点,也是它易于实现高速化的一个优点。

关于涡流的特性,现在还没有一个一致的说法。但是,不论是“半自由涡”也好,是自由涡同其他形式的涡相结合也好,各种形状的涡流室,都较其他类型的燃烧室有着更高的涡流强度这一点,是没有疑问的。彗星V号涡流室具有平底,虽然涡流有所衰减,仍能适应高速化(5 000 r/min)就是明证<sup>[7]\*</sup>。

顺便指出,至今人们还沿用30年代提出的所谓涡流比(空气涡流转数与发动机转数之比)来反映涡流强度对工作过程的影响。我们认为,随着M过程应用于涡流燃烧室,随着人们对混合气形成和燃烧过程的理解加深,有必要探讨新的特性参数来综合反映涡流强度和油注运动对工作过程的实际影响。

(2) 如何有效地利用主燃室的空气,将涡流室喷出的火焰再次燃烧,早就是人们注意的一个问题。彗星III号的双涡型凹坑和常柴II号的铲击型凹坑,都是在这个方面探索的结果<sup>[1,8]</sup>。长尾不二夫和奥尔科克(Alcock J F)等人曾用高速摄影来显示双涡型凹坑的燃烧情况,说明它对性能有重大影响<sup>[3,9]</sup>。随着发动机向高速强化发展,可以预计到主燃室的形状对性能的影响会增加。因为如前所述,M过程应用于涡流室的缺陷之一,即燃烧后期由于涡流室内缺乏有效的涡流,致使完全燃烧延迟;这就意味着加强主燃室的空间混合,促进喷出火焰的迅速燃烧,对弥补这个缺陷有着重要的意义。从反应动力学的观点看,主燃室中的燃烧速度在很大程度上取决于火焰与氧气通过相互扩散而混合的速度。这个速度,显然同主燃室的结构形式关系甚大。

关于主燃室的结构形式,铲击型主燃室给我们的启发是:双涡型主燃室的框框是可以打破的,采用铲击型凹坑,使火焰由两侧向整个活塞顶面铺围过来,可获得同双涡型一样良好(或更好)的性能。然而这种主燃室在单缸机上的试验情况表明,虽然发动机转速也能达到3 000 r/min,但油耗和排温都比较高(参看文献[1]图9)。正如本文的下一部分所指出,这是由于在该主燃室中,气流能量损失较大和空间混合速度不够高所致。如果我们从这两方面着眼进一步改进这种主燃室,则对提高涡流燃烧室的高速适应性和经济性是很有利的。实践证明,设计合理的主燃室形状,确实是缩短燃烧过程总时间,获得高的循环效率,弥补M过程应用于涡流燃烧室所造成的缺陷的有效途径之一;也是涡流燃烧室适应高速化时可以而且必须利用的另一有利因素。

(3) 关于涡流燃烧室的混合气形成和燃烧过程的方式,大体说来,在涡流室中是复合式;在主燃室中是空间式。然而这两种方式以什么比例配合才能确保实现高速化时获得高的经济性,则值得研究。这里涉及到两个问题:一个是涡流室中油膜式和空间式两部分燃料量的比

\* 文献[7]还报道,M型燃烧室用在较大的发动机上,其转速也已达3 000 r/min。