

气动发动机的试验研究*

左承基¹ 钱叶剑¹ 安 达¹ 欧阳明高² 杨福源²

(1. 合肥工业大学机械与汽车工程学院 合肥 230009;

2. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室 北京 100084)

摘要: 为优化气动发动机的设计, 提高气动发动机的工作性能, 在一台由 R175 柴油机改装的二冲程气动发动机上进行详细的台架试验研究, 并提出两个评价气动发动机性能的新指标——比质量流量和总能量效率。采用变压器机油、冷冻油和特制机油等三种不同的润滑油进行气动发动机的润滑油试验, 试验结果表明润滑油对气动发动机的经济性和动力性影响很大。针对水套中无水、注入常温水 and 开水等三种不同换热条件进行气动发动机的换热试验, 试验结果表明加强换热条件对气动发动机的经济性和动力性帮助有限, 但多级利用压缩空气可以提高气动发动机的总能量效率。利用三种不同进气提前角的进气凸轮, 进行三种不同配气相位的速度特性和负荷特性试验。试验表明: 气动发动机在低速阶段拥有较好的经济性和动力性, 进气提前角为 10 °CA 时, 气动发动机性能最好。

关键词: 气动发动机 试验研究 比质量流量 总能量效率

中图分类号: TH138

0 前言

气动发动机(压缩空气发动机)是利用高压压缩气体在气缸内膨胀推动活塞做功对外输出动力。与传统的发动机相比, 气动发动机具有三个明显的优势。第一, 气动发动机的做功原理比较简单, 只通过单纯的气体膨胀做功来达到功率输出的目的, 因此气动发动机的结构可以更紧凑、更简单, 质量可以更轻。因为运行过程中不存在高温燃烧现象和大幅度的热力工况变化, 故有利于延长发动机主要零部件的使用寿命。第二, 气动发动机工作介质具有低温特性, 车辆使用气动发动机可方便地实现汽车的低温空调功能, 而不需要额外消耗能量。第三, 气动发动机不消耗化石燃料, 没有任何污染物排放, 压缩空气可以利用水力、风力和太阳能等可再生绿色能源作为制备能源。因此气动发动机可以使汽车真正成为零排放的清洁汽车, 有利于缓解日益严重的城市空气污染和石油资源匮乏的压力。

1991 年法国工程师 NEGRE 提出了气动发动机的概念, 由于只用压缩空气为做功介质, 对大气环境没有污染, 所以立即受到了人们的关注。受此启发, 1997 年美国华盛顿大学的 KNOWLEN 等^[1-2]研制出一台以液氮为动力的低温气动原型汽车。1998 年法国 MDI 公司推出第一辆气动发动机汽车样车, 2000 年年底, 在南非约翰内斯堡市场上推出气动汽车产品, 该产品可以与天然气实现混合动力

驱动。但在气动发动机的工作特性方面, 一直未见深入的研究报道。相比国外, 国内气动汽车的研究严重滞后, 目前还处于起步阶段^[3-7], 左承基等^[8]的研究工作始于 2003 年, 并成功将一台单缸柴油机改装成气动发动机。为优化气动发动机设计, 提高气动发动机的工作性能, 深入了解气动发动机的工作特性, 在该气动发动机上进行了详细的试验研究。

1 试验装置和方法

试验用二冲程气动发动机是在一台单缸柴油机(R175)上改装的, 具体的改装和设计方法参见文献[8]。试验仪器主要有: 启东测功设备厂的销钉式水力测功机(D110)和测量进气温度和排气温度的热电偶。

为优化气动发动机的设计, 提高气动发动机的工作效率, 研究润滑油、换热条件和配气相位对气动发动机性能的影响。试验时气瓶中压缩空气压力为 2.5 MPa, 测试了各转速(700、800、900、1 000、1 100 r/min 及最高空转转速)下气动发动机的性能。

为更好了解气动发动机中压缩空气能量的使用效果, 引入比质量流量和总能量效率两个概念。

比质量流量为压缩空气的质量流量与发动机输出功率的比值, 质量流量的计算方法如下: 计时起点与终点分别记录压缩空气气瓶的压力, 假定气瓶中的气体温度就是环境温度, 则依照理想气体状态方程可以求得气瓶的质量变化量, 再除以相应时间就得到压缩空气的质量流量。

总能量效率是用来描述气动发动机能量转移系统的传递效果。气动发动机系统的能量转移流程如

* 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室开放基金资助项目 (KF2005-005)。20060427 收到初稿, 20061212 收到修改稿

图 1 所示。首先由电能制备储能介质(高压气体),然后将储能介质减压、作为做功介质引入气动发动机,最后由气动发动机对外做功。因此整个能量转移系统的总能量效率可以表示为

$$\eta_e = \frac{W_o}{W_i} = \frac{W_1}{W_2}$$

式中 W_o ——输出能量

W_i ——输入能量

W_1 ——气动发动机输出功

W_2 ——制备储能介质功耗

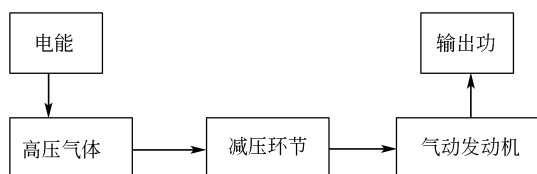


图 1 气动发动机的能量系统转移流程图

制备储能介质工耗 W_2 计算方法如下

$$W_2 = P_1 t$$

式中 P_1 ——空气压缩机轴功率

t ——充气时间

2 试验结果及分析

2.1 润滑油试验

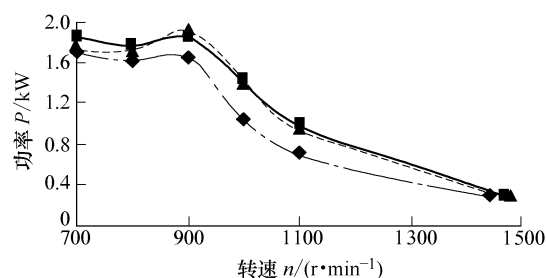
气动发动机以压缩空气为做功介质,没有高温燃烧阶段,因此缸内温度较低,工作于高温条件下的柴油机润滑油已不再适用。为寻找适合气动发动机的润滑油,试验中分别选用变压器机油、冷冻油和特制机油作为气动发动机的润滑油,三种润滑油的粘度性质见下表。

表 三种润滑油的粘度

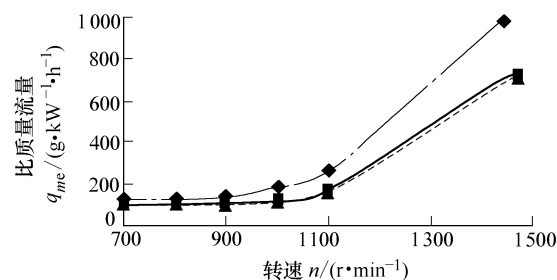
项目	变压器机油	冷冻油	特制机油
标准	GB 2536-1990	ZBE34003-1986	SAE J300-1995
牌号	25#	15#	5W
运动粘度(40 °C) $\nu/(\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	< 13	13.5~16.5	—
运动粘度(100 °C) $\nu/(\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	—	—	> 3.8

图 2 显示了气动发动机使用不同润滑油时性能对比情况。由图 2 可见,在供气压力与转速相同条件下,气动发动机使用冷冻油作润滑油,其输出功率和总能量效率要高于使用变压器机油,但比质量流量则低于使用变压器机油。与特制机油相比,两者在输出功率、比质量流量和总能量效率方面大致相当。这可能与三种润滑油的低温性质有关。虽然常温下变压器机油的粘度小,但是气动发动机的工

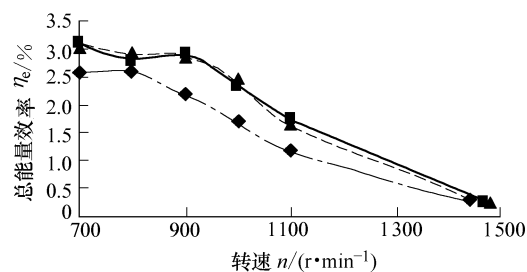
作温度低,使变压器机油的粘度变大,加上变压器机油的主要用途是绝缘和散热,使气动发动机的摩擦损失增加。而冷冻油和特制机油分别使用在制冷压缩机和冷温需要特殊润滑要求的发动机上,两种润滑油的低温工作性能较好,所以在使用冷冻油和特制机油作润滑油时,气动发动机的摩擦损失较小,发动机的输出功率和总能量效率相应增加,而比质量流量有所减少。



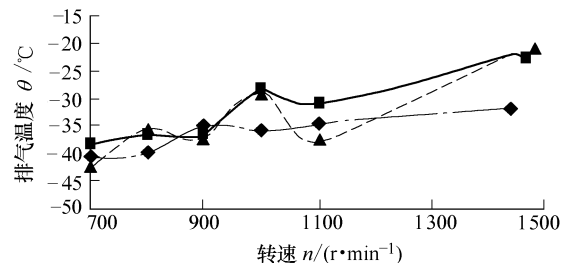
(a) 输出功率变化曲线



(b) 比质量流量变化曲线



(c) 总能量效率变化曲线



(d) 排气温度变化曲线

图 2 气动发动机使用不同润滑油时性能对比

—◆— 变压器油 —■— 冷冻油 —▲— 特制机油

2.2 换热条件影响

由于工作介质具有低温的特点,气动发动机已经不再需要使用冷却系统。但是气动发动机工作时

缸内仍然存在热量交换，而且是以周边环境为高温热源进行吸热。因此为了解不同的换热条件对气动发动机性能的影响，针对气动发动机的水套中无水、注入常温水及开水的三种情况，分别测试了各种工况下气动发动机的输出功率、比质量流量、总能量效率及终了排气温度。试验时气动发动机的润滑油为冷冻油，不同换热条件下气动发动机的性能对比情况如图3所示。由图3可见，气动发动机水套注入开水时，其输出功率要比水套注入常温水和水套中无水时有一定的提升，而水套注入常温水和水套无水的气动发动机，输出功率变化不大。三种换热条件下气动发动机的比质量流量变化不大，但以水套中注入开水时气动发动机的终了排气温度最高，常温水次之，无水时最低。所以加强换热对单缸气

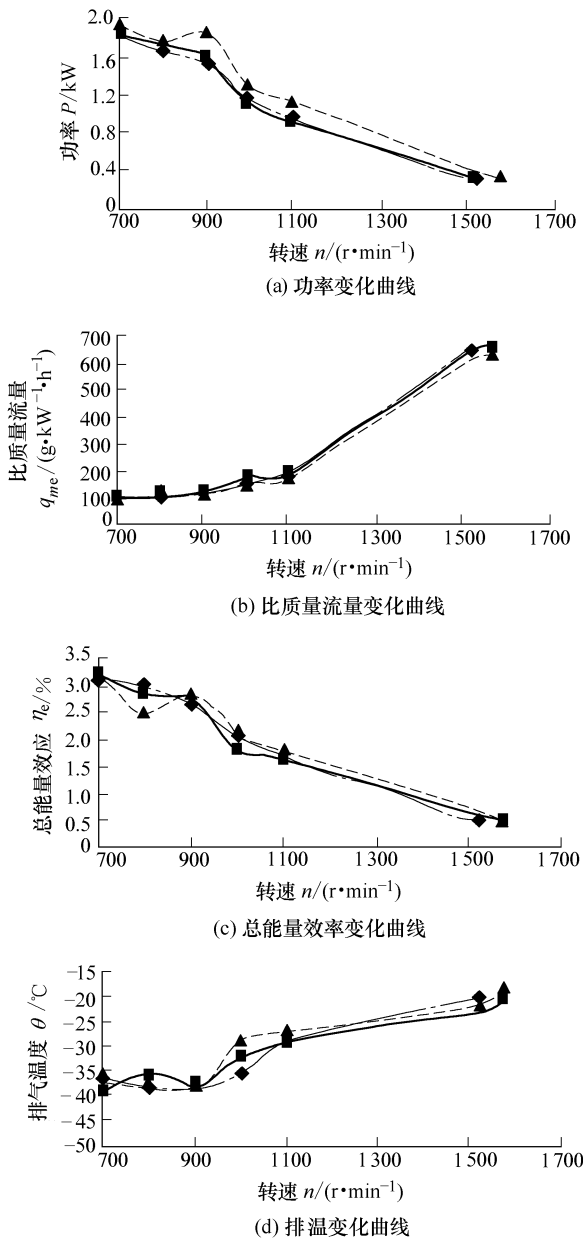


图3 不同换热条件下气动发动机的性能对比

—◆— 无水 —■— 常温水 —▲— 开水

动发动机的动力性和经济性有一定的影响，但作用不大。而终了排气温度的提高意味着排气的可用能增加，可通过串联气缸多级利用压缩空气来提高气动发动机的总能量效率。

2.3 不同配气相位影响

试验过程中气动发动机分别安装三种不同进气提前角的进气凸轮，以了解配气相位对气动发动机性能的影响。图4、5中0、5、10分别代表进气提前角为0°CA、5°CA、10°CA。各项试验选用的润滑油为冷冻油，水套无水。

2.3.1 配气相位对负荷特性的影响

图4显示了不同配气相位对气动发动机负荷特性(700 r/min)影响的试验结果。由图4a可知，在气动发动机的输出功率一定时，改变进气提前角对气动发动机的比质量流量影响不大。从图4b可知，当气动发动机的进气提前角为10°CA时，气动发动机总能量效率最高，其次为0°CA，进气提前角为5°CA时总能量效率最低。另外，从图4c可以看出，气

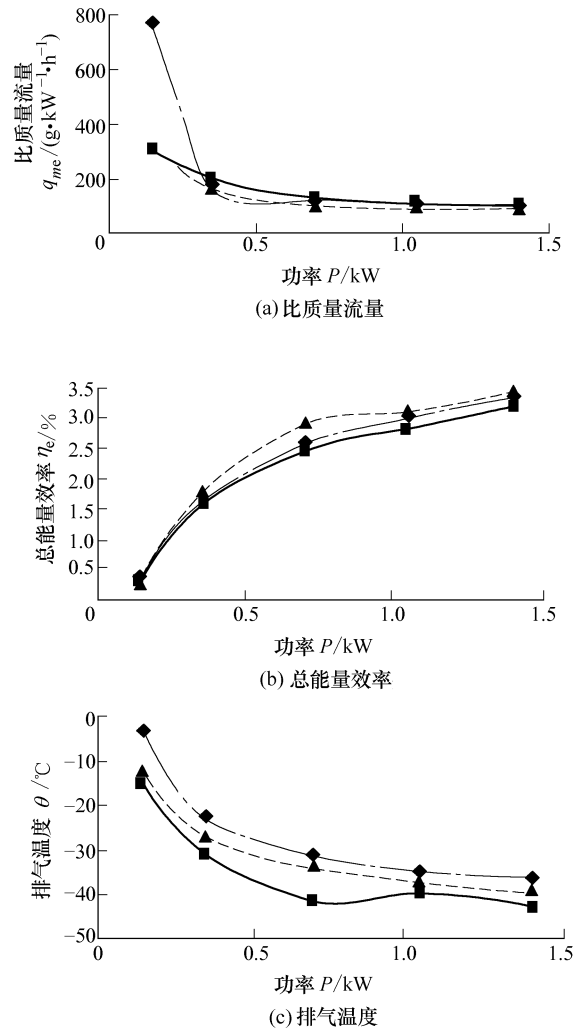


图4 配气相位对气动发动机负荷特性的影响

—◆— 0 —■— 5 —▲— 10

动发动机的进气提前角为 0°CA 时终了排气温度最高, 10°CA 次之, 5°CA 的最低。从整个试验结果来看, 在 700 r/min 时, 随着气动发动机输出功率的增加, 总能量效率随之提高, 终了排气温度随之下降, 但气动发动机输出功率的增加并没有使得比质量流量发生明显变化。

2.3.2 配气相位对速度特性的影响

图 5 是不同配气相位对气动发动机速度特性影响的试验结果。从图 5a 可以看出, 在各种配气相位下, 随着转速的增加, 气动发动机的输出功率逐渐降低, 而比质量流量及终了排气温度则逐渐增加,

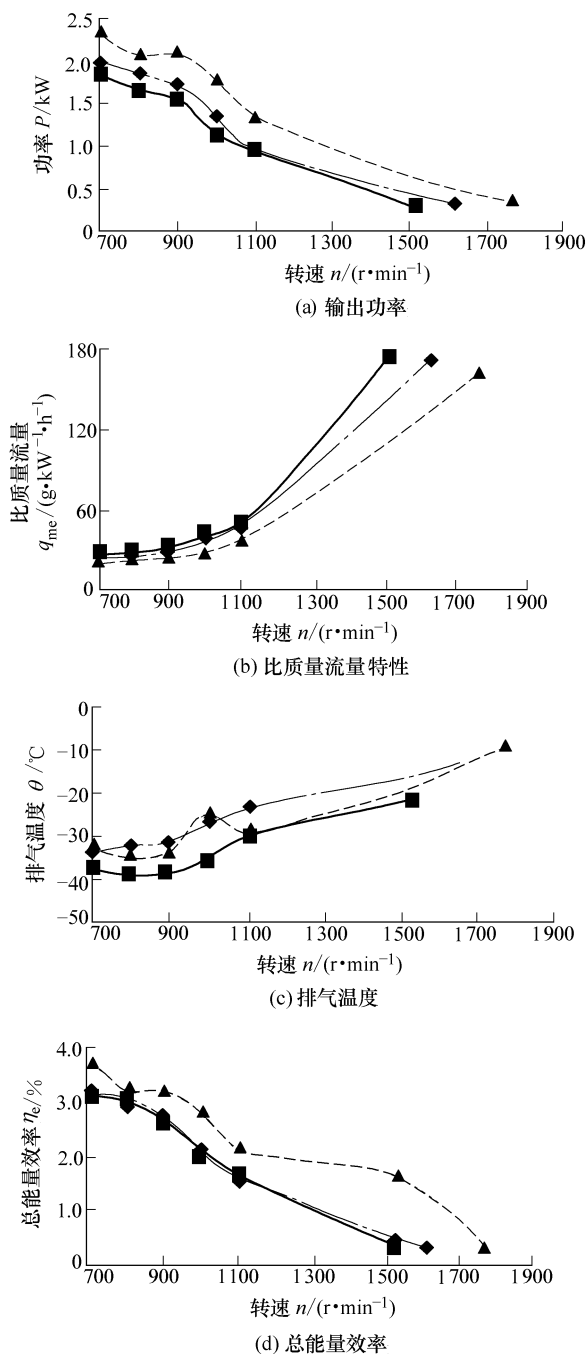


图 5 配气相位对气动发动机速度特性的影响

—◆— 0° —■— 5° -▲- 10°

也就是说, 气动发动机在低速阶段拥有较好的动力性和经济性。这可能是因为低速时气动发动机有相对较多的进气时间, 进气效果好。从图 5c 可以看出, 在转速一定时, 进气提前角为 0°CA 的气动发动机终了排气温度要高于进气提前角为 5°CA 和 10°CA 时终了排气温度, 三者中以进气提前角为 5°CA 时气动发动机的终了排气温度最低。从图 5 还可以看出, 在相同转速下, 进气提前角为 10°CA 时气动发动机的输出功率和总能量效率最高, 0°CA 时其次, 5°CA 时最低。而在比质量流量方面, 情况则相反。因此当气动发动机的进气提前角为 10°CA 时, 其动力性和经济性最好, 0°CA 次之, 5°CA 则最差。

3 结论

(1) 润滑油对气动发动机的工作性能影响很大, 选用冷冻油或特制机油作气动发动机的润滑油可以获得较好的经济性和动力性。

(2) 换热条件对气动发动机经济性和动力性的影响不大, 可以通过串联气缸多级利用压缩空气来提高气动发动机的总能量效率。

(3) 气动发动机在低速阶段具有较好的经济性和动力性; 当进气提前角为 10°CA 时, 气动发动机的输出功率和总能量效率最高, 而比质量流量最低。

参 考 文 献

- [1] KNOWLEN C, WILLIAMS J, MATTICK A T, et al. Quasi-isothermal expansion engines for liquid nitrogen automotive propulsion[G]//SAE Paper 972649, 1997.
- [2] KNOWLEN C, MATTICK A T, BRUCKNER A P, et al. High efficiency energy conversion systems for liquid nitrogen automobile[G]//SAE Paper 981898, 1998.
- [3] 俞小莉, 元广杰, 沈瑜铭, 等. 气动汽车发动机工作循环的理论分析[J]. 机械工程学报, 2002, 38(9): 118-122.
- [4] 贾光政, 王宣银, 陈鹰, 等. 气动汽车能量控制系统研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2003, 37(11): 715-718.
- [5] 刘昊, 陈鹰, 陶国良. 压缩空气动力发动机工作过程建模及特性研究[J]. 自然科学进展, 2004, 14(3): 319-324.
- [6] 刘昊, 陈鹰, 陶国良. 压缩空气动力发动机配气机构的研究[J]. 中国机械工程, 2004, 15(18): 1368-1371.
- [7] 虞健, 左曙光, 靳晓雄. 压缩空气动力汽车研究[J]. 汽车科技, 2004, 5: 8-11.
- [8] 安达, 谈建, 左承基. 压缩空气发动机设计及初步实验[J]. 合肥工业大学学报, 2005, 38(9): 118-122.

EXPERIMENTAL STUDY ON AIR-POWERED ENGINE

ZUO Chengji¹ QIAN Yejian¹ AN Da¹
OUYANG Minggao² YANG Fuyuan²

(1. School of Machinery and Automobile Engineering,
Hefei University of Technology, Hefei 230009;
2. State Key Laboratory of Automotive Safety and
Energy, Tsinghua University, Beijing 100084)

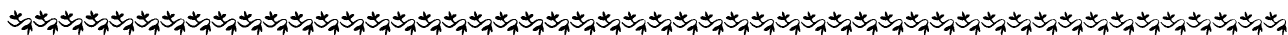
Abstract: To optimize the design of air-powered engine and enhance its performance, an extensive experimental study on engine performance of a two-stroke air-powered engine that is modified from R175 diesel engine is carried out. Two evaluating indicators are newly defined to evaluate the performance of the air-powered engine, namely specific mass flow and total energy efficiency. The lubricating experiment is carried out, three different lubricating oils, i.e. transformer oil, refrigerating oil and special oil are used. The experimental results show that

the lubricating oil significantly influences the performance of the air-powered engine. When the water jacket is no water, or filled with room temperature water and hot water, the air-powered engine performance is studied. The experimental results show that the effect of heat exchange on engine performance is small and the multi-utilization of compressed air is helpful to enhance the total energy efficiency. To investigate the influence of valve timing on air-powered engine performance, three different inlet camshafts are used. The results of load characteristics and speed characteristics show that optimal performance is obtained when the inlet valve opening timing is 10° CA before TDC. Under the condition of low engine speeds, the power performance and economy characteristic of air-powered engine are better.

Key words: Air-powered engine Experimental study
Specific mass flow Total energy efficiency

作者简介: 左承基, 男, 1955年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。
主要研究方向为代用燃料发动机。

E-mail: chengjizuo@163.com



高水平工艺制造精品, 现代化工艺打造强国——

《机械加工工艺手册》(第2版)隆重推出

制造技术是一个永恒的主题, 是设想、概念、科学技术物化的基础和手段, 是国家经济与国防实力的体现, 是国家工业化的支柱产业和关键。工艺技术是制造技术的重要组成部分, 提高工艺技术水平是机电产品提高质量、增强国际市场竞争力的有力措施, 工艺技术水平是制约我国制造业企业迅速发展的因素之一。由机械工业出版社组织, 集合了来自高等院校、科研院所和企业的院士、教授、高工等 120 多位行业专家, 历经三年时间共同编写的《机械加工工艺手册》(第2版)于 2007 年 3 月正式出版发行。

《机械加工工艺手册》(第2版)汇集了我国多年来工艺工作的成就和经验, 在保留了手册第1版特点的基础上, 应用十五年来经验和技术的积累, 以明确的工艺主线体系、先进翔实的内容结构、突出的实践应用层面和最新的国家、行业标准, 体现了国内外工艺发展的最新水平, 全面反映了现代制造的现状和发展。

第2版《机械加工工艺手册》具有以下6点突出特色:

工艺主线体系明确	实践应用层面突出	内容新颖先进翔实
结构全面充实扩展	作者学识丰富专深	标准符合国家最新

实用性、先进性、系统性——作为机械工业出版社在工艺类图书领域的又一全新力作, 《机械加工工艺手册》(第2版)凭借其散发出的优秀特质, 将成为机械制造全行业在工艺方面的主要参考手册之一。

锁定读者:

- 机械制造全行业的大、中、小各类企业、工厂的机械加工工艺人员。
- 科研院所的机械类工程技术人员。
- 工科院校机械类专业师生。

全套手册共3卷:

第一卷: 工艺基础卷 ISBN 7-111-20602-9 定价: 110.00 元

第二卷: 加工技术卷 ISBN 7-111-20564-2 定价: 198.00 元

第三卷: 系统技术卷 ISBN 7-111-20323-2 定价: 108.00 元

三卷总定价: 416.00 元

机械工业出版社图书全国各地新华书店有售 本社购书热线: 010-68326294、010-88379639 网上订购: www.golden-book.com

