

增压柴油机进气系统流动特性仿真研究

Simulation of Flow Characteristics of Intake System for Turbocharged Diesel Engine

刘杨 王伟涛 李国岫

(北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京 100044)

摘要：本文应用GT-POWER软件建立了BF4M1015RC柴油机的进气系统仿真计算模型，分析了该柴油机进气管的气体流动特性。在此基础上，研究了进气管路结构形式和主要结构参数对进气系统流动特性的影响，模拟结果为柴油机进气管路的优化设计提供了依据。

关键词：增压柴油机 进气系统 GT-Power 仿真

Abstract : In this paper, the intake system simulation model of BF4M1015RC diesel is established with GT-Power, flow characteristics of intake system is analyzed. On the basis of model, the influence of structural forms and main structural parameters of intake pipes on the intake system performance are investigated .And the simulation result can provide theoretic guidance for optimal designs of intake system of diesel engine.

Key words: Turbocharged diesel engine; Intake system; GT-power; Simulation

1 前言

柴油机进气系统的结构和流动性能的优劣将直接影响柴油机的动力性、经济性和排放特性。而且，柴油机所能发出的功率，归根结底是受吸入的空气量，空气和燃料的混合比例的影响，持续保持输出高额功率的关键之一是在换气过程中提高充量系数并降低进气系统的流动阻力。设计和匹配最佳的柴油机进气系统，可以在柴油机一定的转速范围内增加充气量，提高功率，改善扭矩特性，降低油耗率和烟度。因此，研究并改进进气系统的性能及结构无论是在理论上还是在实践中都很有必要。

柴油机进气系统流动的研究，主要是通过试验和仿真及模拟计算两种方式。而柴油机仿真技术经过几十年的发展，已经成熟并应用于全球各大汽车厂家和科研单位。通过仿真可以对设计对象进行理论分析与性能预估，从而减少试验量，加快研究开发进度。近年来柴油机工作过程仿真已经成为内燃机研究开发工作的一个重要手段和环节。

本文主要以 1015 四缸柴油机为目标样机，利用 GT-Power 软件建立了该柴油机进气系统仿真计算模型，对标定工况下 ($n=2100\text{r/min}$) 进气管路流动特性进行了模拟。同时分析了进气管路结构形式和结构参数对进气流动特性的影响，从而为柴油机进气管路的改进设计和参数优化提供相应的依据。

2 增压柴油机进气系统流动模型的建立

根据BF4M1015RC柴油机(采用机械控制直列泵)的一些主要结构参数,将柴油机简化成由进气系统、排气系统、燃烧系统(气缸)、喷油系统、增压系统、中冷器以及环境边界及相应连接管路等模型组成的计算模型,所建立的增压柴油机计算模型如图1所示:

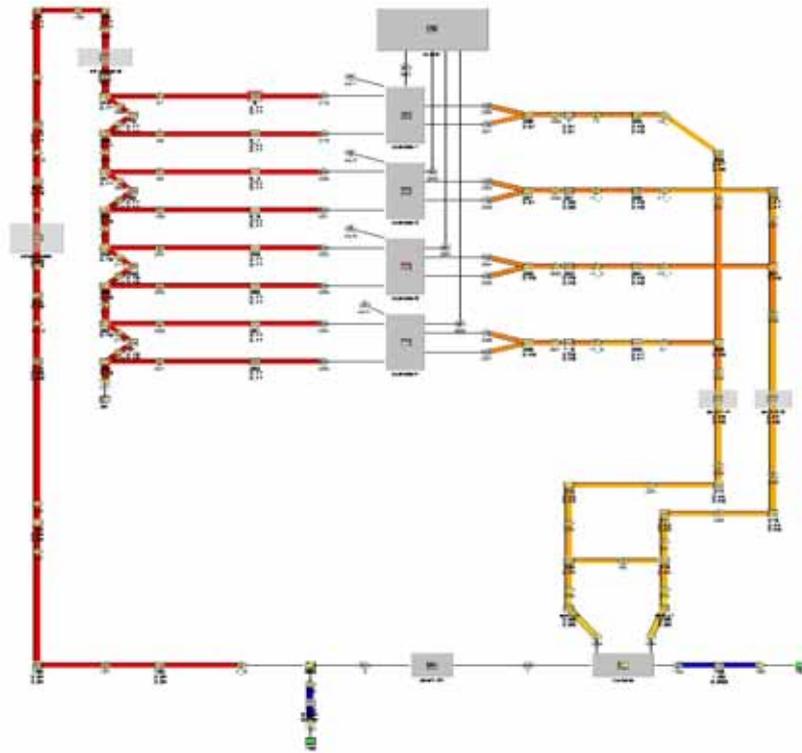


图 1 BF4M1015RC 柴油机工作过程仿真模型

进、排气系统主要包括进气容积腔、进气总管、进气歧管、排气歧管、排气总管等模块,可以根据七〇 研究提供的BFM1015系列柴油机进排气管的三视图来确定其所其结构参数。在模拟过程中,由于进排气管道的轴向尺寸相对其径向大得多,管道内轴向流动效应大于径向流动效应,将进排气管路简化成一维的模型。研究进气系统流动时采用一维非定常流进行分析,这样既保证了计算的精度,同时又可以节省大量的时间。

3 增压柴油机进气管流动特性仿真分析

运用 GT-POWER 针对该增压柴油机的标定工况($n=2100\text{r}/\text{min}$)进行进气管路流动特性的模拟。在四冲程柴油机的进气管中,由于进气门的周期性启闭和活塞的往复运动,进气管内的气体实际上呈现间歇性流动。因此,在进气管内存在强烈的气体压力波动现象。这种进气管内的气体压力波动,直接作用于进气过程,对柴油机性能具有重要影响。

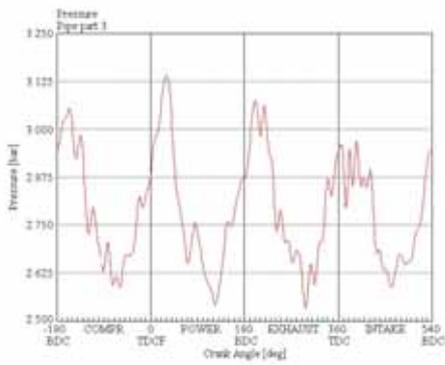


图 2 进气歧管压力曲线

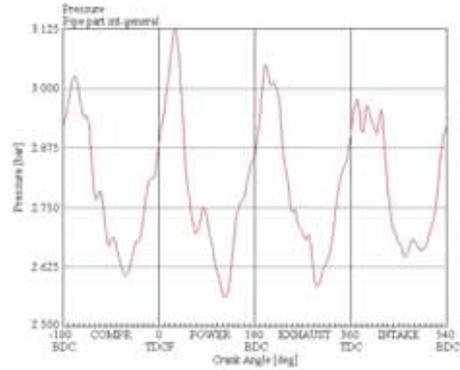


图 3 进气总管压力曲线

图 2 和图 3 分别为进气歧管和进气总管的压力波动情况。进气歧管和总管的压力波形和波峰都基本一样，管内压力呈周期性的变化。但在进排气重叠期间，进气歧管的压力波动要比进气总管的压力波动剧烈，这主要是由于进气歧管压力测点离进气门比较近，进气门启闭运动对进气歧管内的压力有较大的影响。

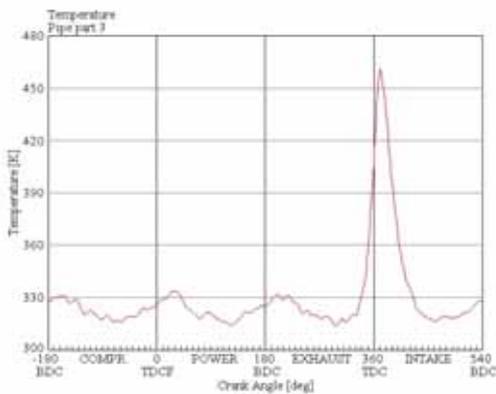


图 4 进气歧管温度曲线

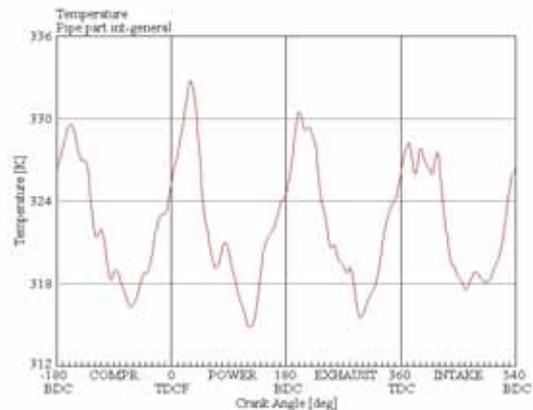


图 5 进气总管温度曲线

图 4 和图 5 分别为进气歧管和进气总管的温度曲线。如图所示：进气总管内气体的温度基本呈周期性的变化，波动的范围在 15K 左右，与进气歧管内气体的温度相比，变化的振幅较大。但进气歧管内气体的温度在进排气门叠开时，温度突然升高，涨幅高达 100 多 K，这是因为燃烧室扫气过程中，高温的废气和进气歧管内的气体发生了热传递。而到纯进气阶段，温度又恢复到原来的进气温度。

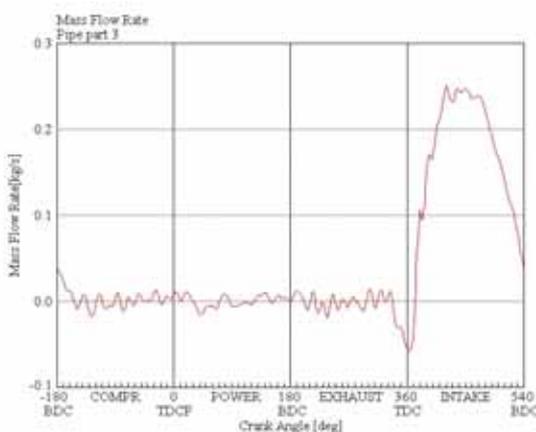


图 6 进气歧管质量流量曲线

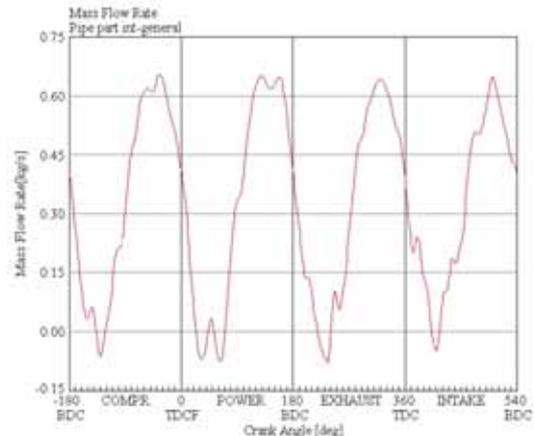


图 7 进气总管质量流量曲线

发动机进气管内空气质量流量的大小,影响着各缸的充气效率。图 6 和图 7 分别为进气歧管和进气总管的空气质量流量曲线,可以看到,进气总管内气体的质量流量呈周期性的变化,在进气压力波的作用下,有时还出现气体倒流的现象。而进气歧管内气体的质量流量在压缩、膨胀做功和排气阶段基本为 0,进气门开启后,流量迅速增加,随着气门升程达到最大位置后,流量又开始减小,直到进气门关闭,管内的空气质量流量下降为 0。

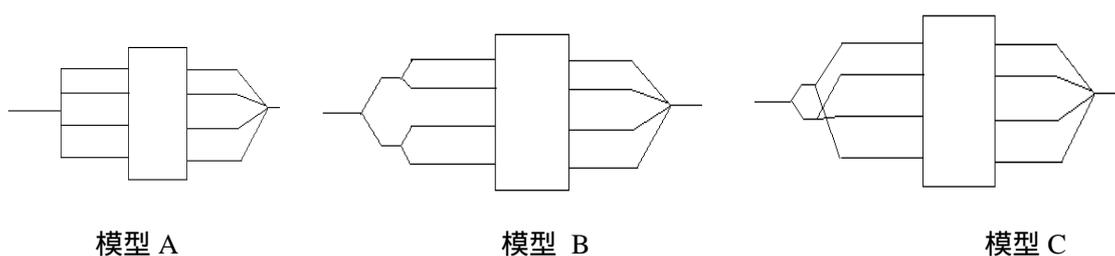
4 进气系统结构形式对进气管内气体流动特性的影响研究

柴油机进气系统的结构形式在一定程度上决定了气体的进气流动状态,从而影响着柴油机混合气的形成质量及燃烧品质。借助进气过程中的气流运动,是提高空气利用率、改善燃烧的有效途径。这不仅严重影响柴油机的动力性、经济性指标,而且也明显影响其排放、噪声及工作柔和性。下面将通过改变进气管路的布置形式,来研究进气系统结构形式对气体流动特性的影响。

4.1 不同进气管路流动模型的建立

该增压柴油机原型采用的是顺序进气,空气由进气总管流向进气歧管 1 - 2 - 3 - 4,这种进气方式不可避免地会造成缸内进气的不均匀性,进气总管离支管 1 较近,空气质量流量会较其他支管略大些。为了解决这个问题,并进一步改进柴油机的进气性能,在原机的基础上,建立了三种不同的进气系统模型。模型之间只在进气管路的布置上有所不同,其他参数(如配气定时、燃烧模型等)都一样。通过运用 GT-POWER 在标定工况($n=2100\text{r}/\text{min}$)下进行仿真,分析不同的进气管路布置形式对气体流动特性的影响情况。

下图为三种进气管路结构形式简图。A 模型是由中间向歧管内进气,空气通过进气总管后分两路,分别进入 1-2 歧管和 3-4 歧管。而 B 和 C 模型采用的是分组进气的形式。B 模型将 1-2 缸并为一组,3-4 缸并为另一组,分两组来进气,C 模型则是把 1-4 缸归为一组,2-3 归为另一组。



4.2 进气歧管出口流量及均匀性比较分析

各缸进气的不均匀性直接影响着各缸空气与燃油的混合,从而影响燃烧过程的组织,使各缸的燃烧过程产生差异。因此,各缸进气的不均匀性是内燃机工作者十分关心的课题。本文针对不同进气管路流动模型,计算出了进气管各分支管出口流量,在此基础上,研究各缸进气的不均匀性,为改善发动机各缸进气均匀性,提高发动机工作性能提供了有效手段。

每个进气歧管的平均进气质量流量为 $\bar{m} = 0.25 \sum m_i$ ，进气均匀性指数为 $\delta = S / \bar{m}$ ，其中 m_i 为第 i 个支管的质量流量，标准差 $S = \sqrt{\sum (m_i - \bar{m})^2 / 3}$ 。各进气管路模型的进气歧管出口质量流量，见表1：

表 1 各进气歧管出口质量流量

| 管号 case | m_1 (g/s) | m_2 (g/s) | m_3 (g/s) | m_4 (g/s) | \bar{m} (g/s) | S (g/s) | δ |
|------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|--------------|----------|
| 原机 | 82.382 | 82.0671 | 81.5078 | 81.5256 | 81.87063 | 0.4284 | 0.005234 |
| A | 82.1124 | 81.9715 | 81.8394 | 81.9165 | 81.95995 | 0.1152 | 0.001405 |
| B | 81.8409 | 81.7136 | 81.6280 | 81.6867 | 81.7173 | 0.0898 | 0.001099 |
| C | 81.7257 | 81.6058 | 801.5311 | 81.5859 | 81.61213 | 0.0820 | 0.001005 |

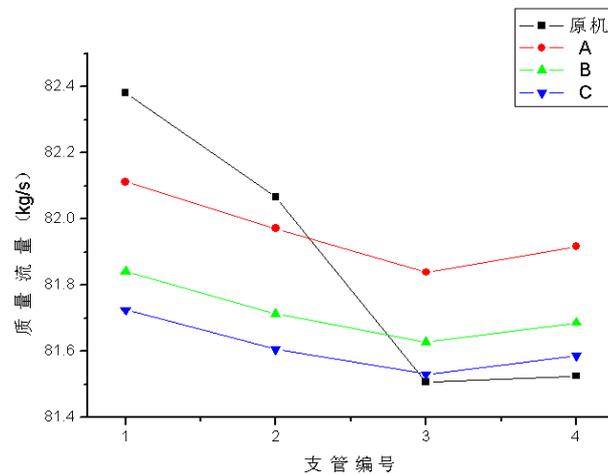


图 8 进气管各支管质量流量比较

平均质量流量 \bar{m} 越大表示进气管的进气量越大， δ 越小则表示进气管进气均匀性越好。由图 8 可以看出，改进后的进气流动模型 A、B、C 的进气歧管出口质量流量与原机差不多，只有极小的减少或增加，但各缸的进气均匀性有了明显的改善。就进气均匀性来说，模型 C 的 δ 值最小，表示进气管的进气均匀性最好。和原机相比，各缸的进气均匀性能提高了 4 倍以上。

综合考虑，四缸机采用分组进气虽然进气均匀性是最好的，但不利于进气管路设计的紧凑性，在结构布置上带来了困难，而改进后的进气流动模型 A 进气均匀性也得到了很大的提高，且平均质量流量是最大的，所以模型 A 更适合于该增压柴油机。

5 进气管路主要结构参数对进气管内气体流动特性的影响研究

GT-POWER 软件适用于模拟发动机工作过程,分析发动机性能。它是以一维流体力学为基础,充分考虑燃料的多种热力学性质,用有限体积法进行数值计算的软件,并且能处理一些结构因素(如分歧、合流、弯曲等部分)对流动的影响。利用 GT-POWER 软件模拟 1015 型增压柴油机的工作过程,以柴油机各缸充气效率为考核目标,分析进气管结构参数对气体流动特性的影响。

5.1 目标参数的选择

进气管对充气效率的主要影响因素有进气口方向、进气口截面积、进气腔容积、进气歧管截面积、进气歧管长度等。其中进气歧管长度影响进气动态效应,进气腔容积影响谐振效应。进气腔内的压力环境相对稳定,可以消除各缸进气干扰,为进气动态效应提供良好条件,同时也可以改善各缸进气均匀性。因此,选择进气管长度和进气腔容积作为目标参数来研究其在标定工况下对进气充气效率的影响。

5.2 进气歧管长度对充气效率的影响

分别在不同的进气歧管管径下,分析进气歧管管长变化对充气效率 ϕ_c 的影响。

- 1、进气歧管管径 D=30mm ;
- 2、进气歧管管径 D=40mm ;
- 3、进气歧管管径 D=50mm ;
- 4、进气歧管管径 D=60mm ;

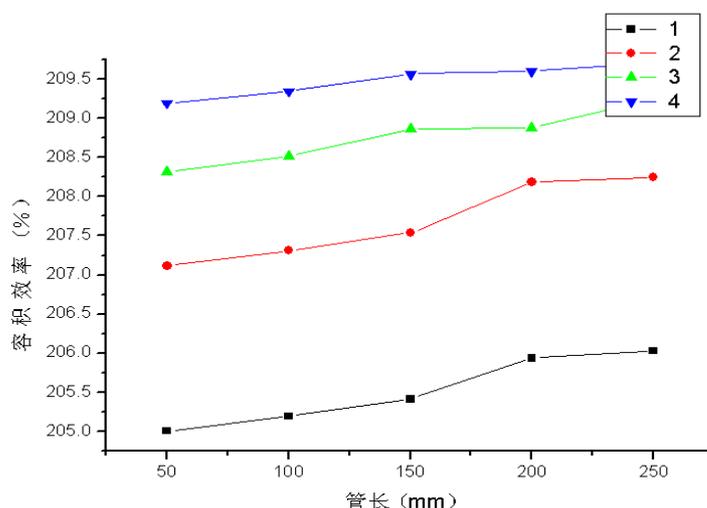


图 9 进气歧管长度对充气效率的影响

进气歧管长度是影响动力效应的一个主要参数。图 9 为其他参数不变,在不同的进气歧管管径下,只改变进气歧管长度时充气效率的计算结果。由图可知,从进气歧管管径 D=30mm ~ 60mm,充气效率随进气管长的变化趋势基本是一致的,随着管长的增加充气效率也是增加的,且管径越大,相同管长下的充气效率越大。

选择合适的歧管长度来增加充量的实质就是利用其惯性效应来提高充气效率。这主要是因为，多缸机进气歧管并不是简单地从外界吸入稳定气流。在进气过程中，由于活塞地吸入作用，在进气门入口处产生负压波，此负压波经气道、歧管、总管传至总管开口端再反射回来，所以，进气门入口处地压力波形态取决于整个进气系统中复杂地气流波动，是由进气管中气体的反射波和来自各缸的负压波在此处叠加而成的。当进气门关闭之前，若各波合成效果为正压波时，则有利于后继进气，提高 ϕ_c ；若为负压波，则降低 ϕ_c 。这也就是说，合成波的相位应与配气相位的关闭时刻配合，而合成波相位主要取决于歧管长度，配气相位的关闭时刻则与转速有关。

5.3 进气腔容积对充气效率的影响

只改变进气腔容积，其他参数不变，研究它对充气效率 ϕ_c 的影响。

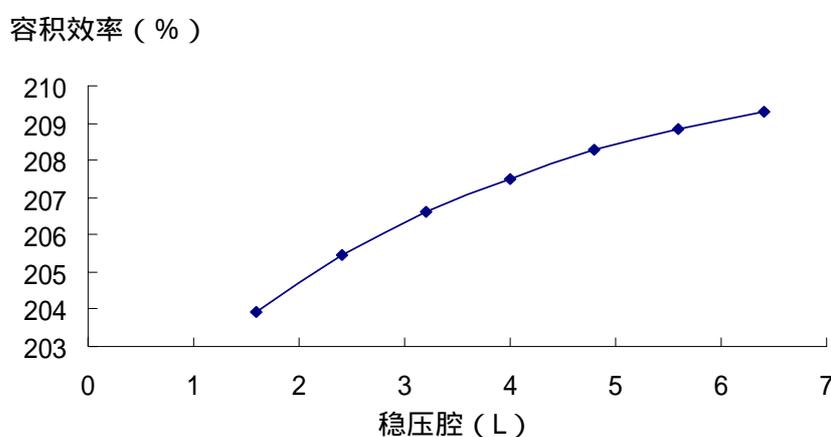


图 10 进气腔容积对充气效率的影响

进气腔是各入射波和反射波的必经之路，是多缸机进气系统利用谐振增压时的一个重要组成部分。进气腔容积与进气管合理匹配，在谐振转速，能够使进气压力波形成谐振波形，因此，进气腔容积对压力波形态及谐振强度都有直接影响。

如图 10 所示，随着进气腔容积增大，充气效率有所提高。这是由于进气腔容积的增大使得压力波在进气歧管和进气腔交界处的反射加强，进气门关闭前的压缩波波峰增大，从而提高充气效率。但是，进气腔容积不能过大，过大的话压力波动很小，就成为一个稳压箱了，发动机也就很难产生谐振。

另外应该注意，进气腔容积的增大会给发动机的布置带来困难，并且会使发动机的瞬态响应变差。

6 结论

(1) 利用 GT-Power 软件建立了 1015 四缸柴油机仿真模型，通过模拟得出了进气管内气体的流动特性曲线图。

(2) 通过模拟不同结构形式的进气系统,给出适合于该柴油机的进气系统结构形式,该结构可使各缸进气均匀性得到很大的改善。

(3) 分别改变进气歧管长度和进气腔容积研究其对充气效率的影响,发现增大进气管长度和进气腔容积对该柴油机的进气均有利,为进气管路的优化设计提供了必要的依据。

7 参考文献

- [1] 黄豪中.利用谐振进气系统改善车用柴油机性能的研究[D].广西大学硕士学位论文,2002.5.1
- [2] 方适应.车用汽油机进排气系统流动特性研究[D].上海交通大学硕士学位论文,2000.1.1
- [3] 赵勇.气波增压柴油机进气系统的优化设计和性能研究[D].北京工业大学硕士学位论文,2004.5.1
- [4] 韩同群,马祥宁.应用 CFD/CAD 技术对柴油机进气管进行优化设计[J].内燃机学报,2006.2(1)
- [5] 吴锋,胡金龙.电喷汽油机进气管空气动态模型的仿真与试验研究.内燃机工程,2006(3)
- [6] 杨寿藏,陈云彪,现代先进发动机技术-进排气系统(一).柴油机设计与制造,2001(1)
- [7] M.F. Harrison, P.T. Stanev.Measuring wave dynamics in IC engine intake systems. Journal of Sound and Vibration 269 (2004) 389-408
- [8] M.A. Ceviz, Intake plenum volume and its influence on the engine performance, cyclic variability and emissions.Energy Conversion and Management 2006
- [9] 余兀.进气系统阻力对柴油机性能影响的试验研究.柴油机设计与制造,2006(1)
- [10] 周龙保.内燃机学[M].北京:机械工业出版社,2003