

基于 GT-POWER软件的发动机配气相位优化设计

Optimization of Engine Valve Timing Based on GT-POWER

朱振夏, 孙柏刚, 李刚, 欧阳煦
(北京理工大学发动机实验室)

摘要: 在 GT-POWER 仿真软件平台下, 建立了发动机配气相位优化仿真分析模型。利用 Optimizer 模块, 开展了进气系统参数对发动机性能影响的敏感度分析和影响规律研究。计算出不同工况下最优的配气正时角, 简要分析优化配气相位对发动机动力性和经济性影响的机理。使用配气相位优化后, 在发动机转速 2000r/min-3500r/min 范围内特性扭矩平均提高了 8%, 同时经济性得到改善。

关键词: 可变气门正时技术; 配气相位优化; GT-POWER; Optimizer

Abstract Based on GT-Power, the model of engine valve timing is established. Through the Optimizer module of GT-Power, the effects of some parameters, mainly for intake system, on the engine performance are researched. The optimal valve timing under various engine operating conditions is obtained and also the mechanism about the influence of valve timing on the power and economic performance of engine is briefly discussed. The results show that the torque has been enhanced by an average of 8% in the range of 2000r/min-3500r/min and the fuel economy has been improved as well.

Key word: WT; Optimaization of valve timing; GT-POWER; Optimizer

1 前言

内燃机的换气过程是内燃机工作循环周而复始不断进行的保证, 内燃机性能很大程度依赖其换气过程。为提高动力性和经济性, 需要研究减少进排气流动损失和提高充量系数的措施和方法, 以及如何为燃烧提供一个合适的缸内气体流场, 并保证多缸机各缸均匀性。因此对发动机换气效率的研究一直是内燃机行业一个非常重要的课题。近年来, 随着科学技术的发展, 尤其是计算机应用的普及, 人们对发动机进、排气系统方面的研究也在不断深入, 并涌现出了许多的新技术。其中可变配气相位技术 (WT) 是改善发动机性能的一种有效途径, 已成为发动机行业新的发展方向之一。

配气相位就是进、排气门的实际开闭时刻, 通常用对应的上下止点曲轴转角来表示。配气相位对于换气品质、泵气损失、充气系数、扭矩外特性、怠速稳定性及有害排放控制等方面都有很大影响。其中进气相位, 尤其是进气门关闭角对发动机性能影响最大。比较理想的配气机构应当满足以下要求:

(1) 低速时, 采用较小的气门叠开角和较小的气门升程, 防止缸内新鲜充量向进气系统倒流, 以增加扭矩, 提高燃油经济性;

(2) 高速时, 应具有最大的气门升程和进气门迟闭角, 最大限度地减小流动阻力, 充分利用过后充气, 提高充气系数, 以满足动力性要求;

(3) 能够对进气门从开启到关闭的持续期进行调整, 以实现最佳的进气正时。

传统的配气机构只能提供单一的配气正时, 而发动机各转速下的最佳配气正时是随发动机转速、负荷变化而有所不同的, 单一的配气正时必然会牺牲发动机某些转速的性能。采用 WT 技术, 可在很大程度上弥补传统配气正时机构的不足, 能为发动机各个工况点提供最佳的配气正时, 从而改善发动机的性能。因此研究分析配气正时对发动机性能的影响, 无论是在理论上还是在实践中都很有必要。在 WT 技术

中应用较为成熟的是叶片式凸轮轴相位器技术，此结构可以改变凸轮轴相对于曲轴的转角。而在设计 VT 机构之前，必须先明确不同工况下对配气正时的需求。本文利用 GT-POWER 软件建立了 4 缸汽油机模型，并使用 Opt imizer 模块对配气正时参数进行优化，最终得到不同工况下最优的配气相位值。

2 仿真分析

2.1 仿真模型的建立

GT-POWER 软件通过采用模块化结构的方式建立内燃机工作过程的计算模型。内燃机的元件(如进排气管、进排气道、进排气门、喷油器、气缸、曲柄连杆机构等)模块用方形框图表示，而元件之间用圆形图框的连接件相连接。内燃机的所有结构参数和运行参数在相应的元件模块和连接件中进行定义。连接件可以有具体的物理意义(如气门连接件和喷油器连接件等)，也可以只具有象征意义(如内燃机与气缸间的连接件及管道之间的连接件等)。

根据已有汽油机的一些主要结构参数，将汽油机简化成由进气系统、排气系统、燃烧系统(气缸)、喷油系统以及环境边界及相应连接管路等模型组成的计算模型。表 1 中所列出的是模型建立所需要输入的部分参数。

表 1 发动机模型部分输入参数

缸径 D (mm)	86
冲程 S (mm)	86
连杆长度 L (mm)	145
进气歧管长度 (mm)	600
排气歧管长度 (mm)	400
压缩比	9.5
进气门直径 (mm)	30(2个)
排气门直径 (mm)	37
进气气门间隙 (mm)	0.2
排气门间隙 (mm)	0.3

把对应的参数输入到各模块，将各模块和部件连接起来，就得到本文研究所用的汽油机仿真模型，如**错误！未找到引用源。**所示，在此基础上研究配气相位对发动机性能的影响，并进行配气相位的优化。对此发动机模型进行外特性计算，得到外特性扭矩如**错误！未找到引用源。**和外特性油耗**错误！未找到引用源。**所示。从**错误！未找到引用源。**可知发动机转速在 2000r/min~3000r/min 范围内，燃油消耗率较低(约为 265g/kW·h)，符合汽油机外特性油耗的特点。

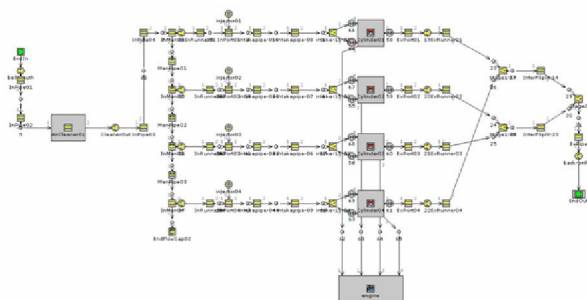


图1 GT-POWER软件平台下的汽油机模型

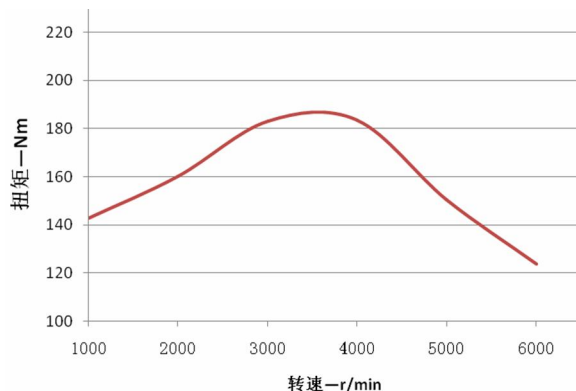


图 2 原机模型外特性扭矩

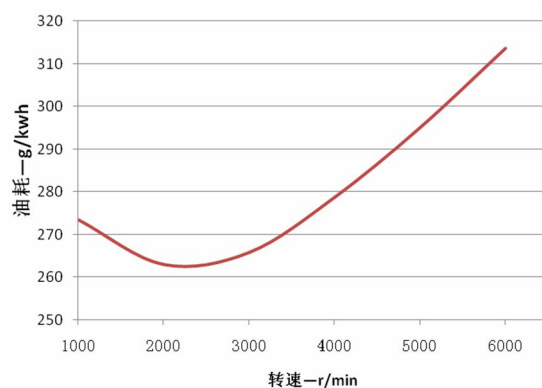


图 3 原机模型外特性油耗

2.2 参数敏感度分析

本文所研究的进气系统参数优化就是通过参数的调整，实现进气结构、配气相位与发动机运行工况之间的合理匹配，充分利用压力波动和惯性效应，避免或减少进气回流，达到提高充量系数、增加进气量、减少泵气损失的目的，并最终改善发动机的动力性和经济性。考虑到发动机进气系统设计参数和目前应用的 WT 技术，就进气管长度、气门直径和配气相位这三个参数对发动机性能影响的进行了敏感度分析。

首先，利用 GT-POWER 中的多参数优化功能，计算了在某转速固定空燃比下，配气相位（ 57° CA- 77° CA）、进气管长度（300mm-500mm）、进气门直径（25mm-35mm）这三个参数对发动机功率的影响因子。从图 1 可知，相比较气门直径而言，配气相位和进气管长度对发动机性能影响更大。

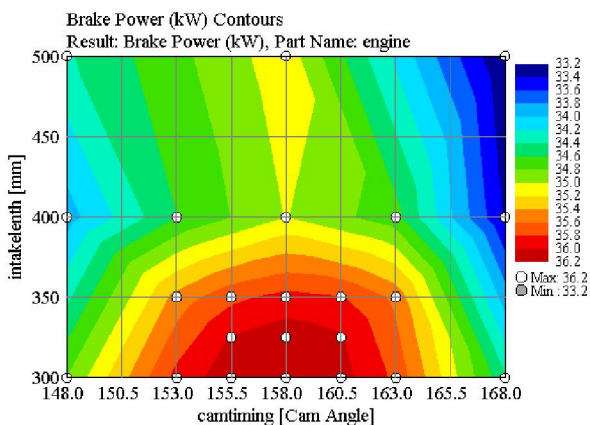
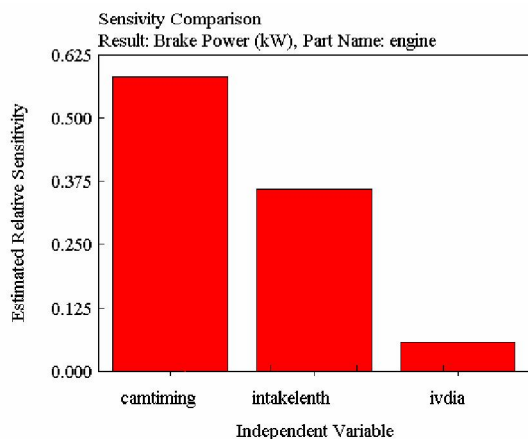


图 1 进气系统参数对发动机功率的影响因子 图 2 进气管长度和配气正时对发动机功率的联合影响

接着继续利用 GT-POWER 中的优化模块，对配气相位和进气管长度这两个参数对发动机功率的联合影响情况进行了分析，结果如图 2 所示。

从图 2 中进气管长度和配气正时对功率的联合影响情况看，进气管长度和发动机功率的基本上是线性关系，而且对于配气相位的优选没有显著影响。通过仿真计算，在全转速范围内对进气管长度进行了考察，兼顾发动机在高低转速的性能而选择的进气管长度为 400mm。

在四个配气相位参数中，IVC（进气门晚关角）对发动机性能影响最大，是参数优化计算的主要研究对象。本文中，在不改变凸轮型线及气门升程的条件下，调整凸轮轴相对曲轴的转角，实现进气门相位的平移，达到 WT 的效果。在软件中可以通过改变参数 Cam timing（配气正时角）来调整进气门晚关角。

2.3 参数优化方法

为了便于进行对比分析，保证发动机的空燃比为 13，通过进气相位的优化，实现提高充气效率，增加进气量和每循环供油量。以发动机 2000r/min100%负荷的工况点为例，介绍调整优化模型参数的思路 and 主要步骤：

(1) 对原机的进气状态进行分析。

为分析在进气门关闭时空气在进气管和气缸之间的流动情况，将压缩行程中基于曲轴转角的进气管内压力和缸内压力进行对比，如图 3所示。原机的进气门晚关角为 65° CA(IVC= 115° CA)，从图 3上可以看出，在气门关闭时气缸内压力已经远超过进气管内的压力，新鲜空气很难再进入气缸。

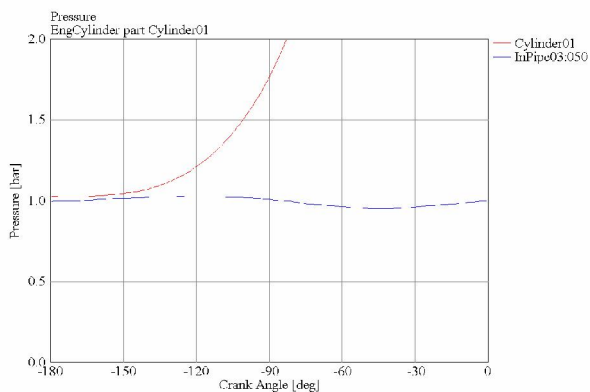


图 3 原机进气管压力和缸压曲线

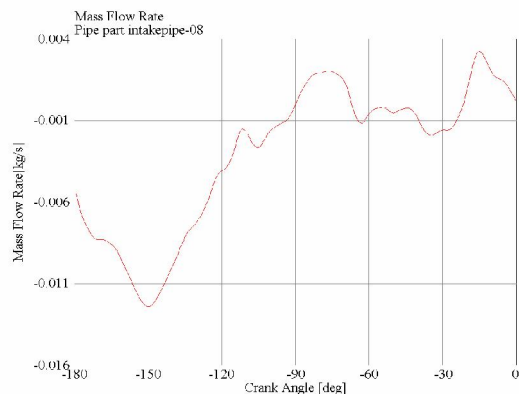


图 4 原机进气管中气体流量

图 4中表示的是进气管中气体流量。由空气流量的正负关系（方向）来看，原发动机进气门晚关角（IVC）选得过大，有较多的进气回流。因原机的配气正时是高速匹配型，发动机高转速时气体流速较大，可以适当晚关进气门，以提高充量系数，但是对于中低转速则需要较早关闭进气门。

(2) 优化配气正时参数。

基于以上分析，为了获取更优的性能需要适当提早进气门关闭的角度。为了获得最优的进气门关闭角度，对配气正时角(Camt iming)参数进行离散化计算。如图 5所示，在进行多个 case的运算处理之后，可以找到最佳的配气相位角。



图 5 多 case计算后处理结果

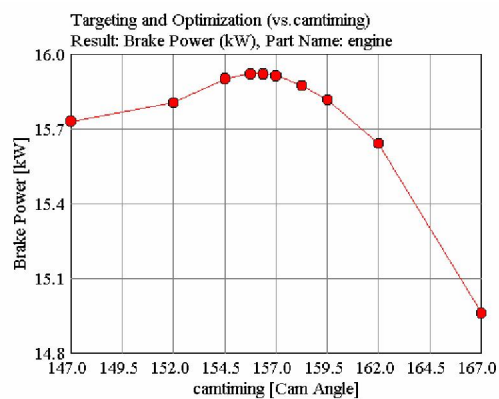


图 6 Opt imizer模块计算最佳配气相位

GT-POWER 软件集成了参数优化计算的 Optimizer 模块，可以代替大量的手动 case 运算和寻优：以 Cam timing 为自变量，功率最大为目标函数，进行离散仿真计算。可以得到如所示的结果。

经过优化计算后，将进气门晚关角改变为 51° CA (Cam timing=157 $^{\circ}$ CA) 时，与原机相比功率得到了提高。

第三步，验证优化效果。

通过对 Cam timing 的调节，使进气门提早关闭，减少了进气回流，提高充气效率，进而增加进气量和循环供油量，提高了汽油机的功率输出。从图 7 中可以看出，在 Cam timing=157 CA 时，发动机进气量达到最大值。

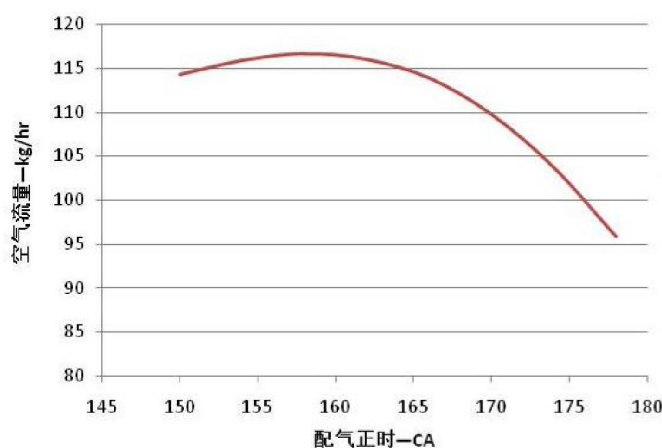


图 7 2000r/min 不同配气正时角对应的空气流量

在发动机外特性上各转速点上采用以上的进气参数优化方法，就可获得全转速范围内的最优配气相位。

在本文中，分别对 1000r/min, 2000r/min, 3000r/min, 4000r/min, 5000r/min, 6000r/min 进行 VVT 相位优化，得到各转速下最优的配气正时见表 2。从表 2 中可以看出，最佳的进气门晚关角随转速的增加而加大。随着发动机转速的提高，进气流速加快，而相同曲轴转角范围对应的时间减少。为了更充分的利用进气惯性效应，所以在发动机转速的提高后进气门需要推迟关闭。

表 2 不同转速下最优配气正时

转速 [r/min]	Cam timing [CA]	IVC [CA]	EVO [CA]	IVO [CA]	EVC [CA]	进气门晚关角 [CA]
1000	155.75	-135	134	338	376	45
2000	158.875	-129	134	345	376	51
3000	160.25	-126	134	347	376	54
4000	163.875	-119	134	355	376	61
5000	169.5	-108	134	366	376	72
6000	175.125	-96	134	377	376	84

将表 2 中优化后的配气参数输入到仿真模型，进一步计算得到发动机各性能指标，并与原机的性能进行对比，如图 8~ 图 11 所示。

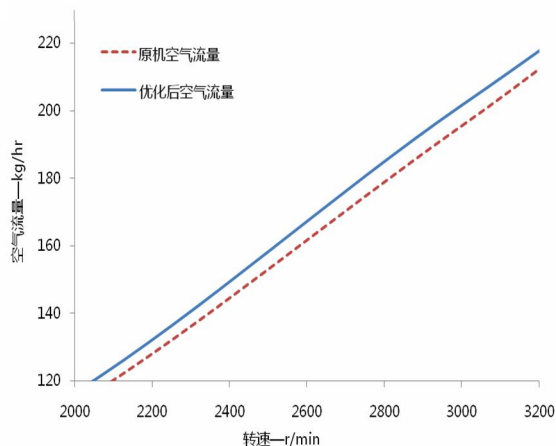
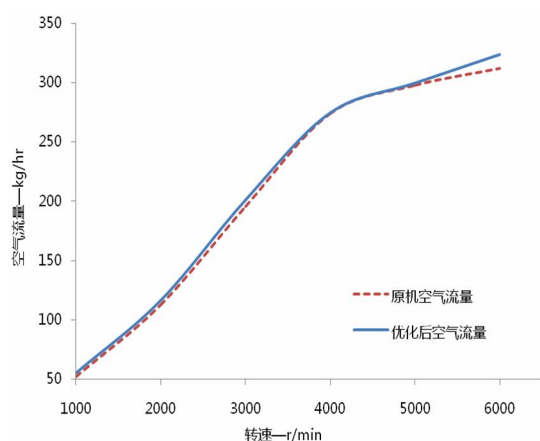


图 8 优化前后空气流量对比 (全转速范围) 图 9 优化前后外特性空气流量对比 (2000r/min-3200r/min)

如图 8 和 图 9 所示, 经过配气相位优化以后, 充分利用进气惯性并减少了空气回流, 提高了充气效率, 使得空气流量在外特性全转速范围内都有所提高。

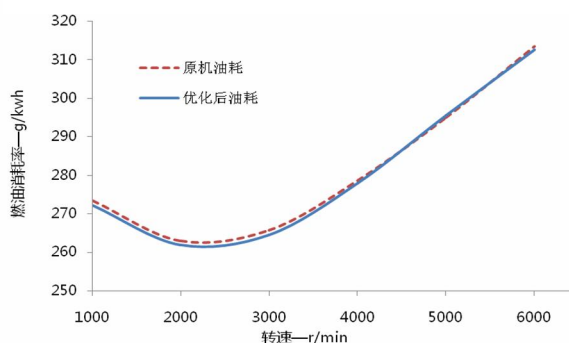
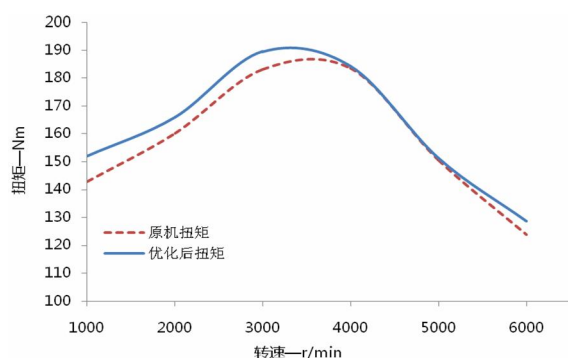


图 10 优化前后外特性扭矩对比

图 11 优化前后外特性油耗对比

一方面, 为获取更好的扭矩特性, 我们保持了原机空燃比 ($A/F=13$) 不变, 通过优化 WT 配气相位增加进气流量就相应的增加了循环供油量, 如图 8 所示, 从而提高了发动机的动力性能。由图 10 的计算结果可以看出, 经过配气相位优化后, 发动机外特性扭矩提高平均 8 左右, 在 3500r/min 转速以下扭矩的提高更为明显, 与原机的高速匹配型配气相位有关。

另一方面, 从理论分析可知, 不考虑缸内过程变化 (空燃比不变) 的前提下, WT 对经济性的主要贡献在于提高了发动机充量系数, 减少了泵气损失, 从而提高了发动机的有效效率。从图 11 中可以看出, 在 2000r/min 油耗为 261g/kW·h, 3000r/min 油耗为 264g/kW·h, 说明进行配气相位优化后, 在扭矩增大的同时油耗也有所降低, 在 4000r/min 转速以下发动机油耗降低约 3g/kW·h。

表 3 2000r/min 不同配气相位对应各功率损失

配气正时 [CA]	空气流量 [kg/hr]	有效功率 [kW]	泵气损失 [W]	机械损失 [kW]
150	114.3	34	-0.34	-3.8

154	115.8	34.5	-0.33	-3.8
158	116.6	34.8	-0.33	-3.8
162	116	34.6	-0.33	-3.8
166	113.8	33.8	-0.37	-3.7
170	109.7	32.5	-0.41	-3.7
174	103.7	30.4	-0.5	-3.6

以 2000r/min 为例，对比不同配气正时对应的发动机有效功率、泵气损失功率、机械损失功率。从表 3 可以看出，当 $\text{Cam timing}=158^\circ \text{CA}$ （进气晚关角为 54°CA ）时，泵气损失最小，机械损失稍大。与 $\text{Cam timing}=174^\circ \text{CA}$ 相比， $\text{Cam timing}=158^\circ \text{CA}$ 时有效功率增加 4.4kW（16%），这是因为泵气损失最小，而机械损失的增加幅度不大。由此可知配气相位优化后，泵气损失功率减少，发动机效率提高，比油耗降低。

3 结论

本次研究主要开展了以下工作：

- （1）利用 GT-POWER 仿真软件，建立 4 缸汽油机配气相位优化仿真分析模型。
- （2）在发动机仿真模型上开展了进气系统参数对发动机性能影响的敏感度分析计算。
- （3）在以上基础上研究了 Cam timing （配气正时角）参数对发动机性能的影响规律。
- （4）进行配气相位参数的优化计算，得出不同工况下最优的配气正时角，建立其与性能的对应关系，并简要分析了 VT 系统配气位对发动机动力性和经济性的影响机理。

本论文中所进行的仿真计算结论如下：

- （1）在转速 2000r/min~3500r/min 区间，采用 VT 系统并优化配气相位后，发动机扭矩平均提高 8%，在低速工况效果更为明显。
- （2）不考虑缸内过程变化的前提下，经过配气相位优化后，泵气损失减小，提高了发动机效率，降低了燃油消耗率。
- （3）仿真计算结果表明可变配气正时系统可以改善发动机进气过程，从而影响发动机的各种性能参数，提升发动机动力性和经济性。
- （4）利用 GT-POWER 软件对发动机建模设计，可以方便的对配气相位进行优化设计，缩短开发周期。

参考文献

- [1] 周龙保. 内燃机学 [M]. 北京：机械工业出版社，2005.1
- [2] 麻友良. 配气相位可变技术的现状与发展 [J]. 公路交通科技，2002, (04)
- [3] 苏岩, 李理光, 肖敏, 曾朝阳. 可变配气相位对发动机性能的影响 [J]. 汽车技术，2000, (10)
- [4] 王立彪, 何邦全, 谢辉, 赵华. 发动机可变气门技术的研究进展 [J]. 汽车技术，2005, (12)
- [5] 孙玉亮. 可变配气系统对汽油机动力性及燃油经济性能影响的研究 [D]. 天津：天津大学，2008
- [6] 柯亚仕, 蒋德明. 可变气门定时研究回顾及展望 [J]. 车用发动机，1996(1)
- [7] 韩爱民, 蔺鑫峰, 孙柏刚, 刘萍, 汪家兴. 基于 GT-POWER 的 BN6V87QE 汽油机性能优化仿真 [J]. 北京工业大学学报，2007, (06)