

# 关于发动机循环变动 Kantor 模型的讨论

纪常伟

(北京工业大学 环境与能源工程学院, 北京 100022)

摘要: 为了对 Kantor 模型进行改进, 提出了一个修正的 Kantor 模型. 研究表明, 在 Kantor 模型中忽略的定容放热过程和可变残余废气质量分数可以在很大程度上减小循环变动, 然而在 Kantor 模型中未考虑的来自上一个循环的未燃燃油则明显使下一个循环的循环变动加剧, 三者相互作用导致循环变动减弱甚至消失, 在合理的参数范围内, 没有循环变动出现, 只有选取不合理的模型参数, 循环变动方出现. 即使是 Kantor 模型, 循环变动也只出现在相当极端的模型参数的情况下.

关键词: 循环变动; Kantor 模型; 建模; 火花点火发动机

中图分类号: TK 41

文献标识码: A

文章编号: 0254-0037(2005)03-0303-05

缸内残余废气温度的波动导致火花点火发动机的循环变动在高、低残余废气温度之间跳跃<sup>[1]</sup>. 作者重新考察 Kantor 模型, 目的在于对循环变动的影响给出定量的估价以用于发动机控制. 对 Kantor 模型引入以下 3 个修正: A) 在 Kantor 模型中, 缸内残余废气质量分数被当成定值, 而作者则把缸内残余废气的体积分数看成定值, 体积分数不变比质量分数不变更符合内燃机的实际情况; B) 在 Kantor 模型中, 残余废气温度被定义为在膨胀过程结束时的燃气温度, 这是不合理的, 因为这相当于假定燃气等温膨胀到环境压力而没有相应的温度下降. 排气必须有定容放热过程使排气温度下降; C) 在 Kantor 模型中, 没有考虑来自上一个循环的未燃燃油的影响, 但根据 Kantor 建议的计算燃烧曲轴转角的公式, 当经过上止点后的燃烧曲轴转角比  $\pi$  大时, 必定有一部分未燃燃油存在于残余废气中, 导致本循环的燃烧效率降低和下一个循环的当量比增加. Daily<sup>[2]</sup>和 Wagner 等<sup>[3]</sup>在推广 Kantor 模型时没有考虑到这些修正. Daily 考察了 Kantor 模型中的某些模型参数如活化能、点火角等对循环变动的影响, 但未考察其他重要的发动机工况及模型参数如当量比、进气压力、进气温度等对循环变动的影响. 作者用排气温度和指示平均有效压力的变化来表征循环变动, 将详细介绍 Kantor 模型和修正的 Kantor 模型, 然后采用合理的和不合理的模型参数范围得出 Kantor 模型和修正的 Kantor 模型的数值仿真结果并进行讨论.

## 1 建模

### 1.1 Kantor 模型<sup>[1]</sup>

1) 定压进气过程(从上止点到下止点)

第  $j$  个循环进气终了时的缸内温度  $T_c^j = [r_0 T_5^{j-1} + (1 - r_0) T_i] (\lambda / \sigma + 1 - \lambda)$

其中:  $r_0$  为 Kantor 模型的恒值残余废气质量分数;  $T_5^{j-1}$  为第  $j-1$  个循环的残余废气温度(K);  $T_i$  为进气温度(K);  $\lambda$  为发动机压缩比的倒数;  $\sigma$  为进气压力与大气压力的比值.

2) 绝热压缩过程(从下止点到燃烧开始时刻)

第  $j$  个循环点火时的缸内温度  $T_s^j = T_c^j (\lambda + 1 - \lambda \sin^2(\beta \theta_s / 2))^{\gamma-1}$  (K)

其中:  $\beta = \pi / 180$ ;  $\theta_s$  为点火角( $^\circ$ ).

第  $j$  个循环上止点后的燃烧曲轴转角  $\theta^j = \beta \theta_s + \Delta \theta$  (rad).

第  $j$  个循环从点火开始到燃烧结束的曲轴转角  $\Delta\theta^j = K(T_s^j)^{-2/3}(T_m^j)^{1/3}\exp(E_a/(3R_u T_m^j))$  (rad).

第  $j$  个循环的平均火焰温度  $T_m^j = T_s^j + \epsilon(1-r_0)\Delta T_0$  (K).

其中:  $\epsilon$  为平均系数;  $\Delta T_0$  为 Kantor 模型不考虑残余废气条件下的燃烧温度上升值(K);  $K$  为动力学常数;  $R_u$  为通用气体常数(8.314 J/mol·K);  $E_a$  为活化能(J/mol).

3) 定容燃烧过程(在燃烧角  $\theta^j$  处开始)

第  $j$  个循环开始燃烧时的缸内温度  $T_1^j = T_c^j(\lambda + (1-\lambda)\sin^2(\theta^j/2))^{\gamma-1}$  (K).

第  $j$  个循环燃烧结束时的缸内温度  $T_2^j = T_1^j + (1-r_0)\Delta T_0$  (K).

4) 绝热膨胀过程(从  $\theta^j$  到下止点)

第  $j$  个循环膨胀终了时的缸内温度  $T_3^j = T_2^j(\lambda + (1-\lambda)\sin^2(\theta^j/2))^{\gamma-1}$  (K).

5) 定压排气过程(从下止点到上止点)

第  $j$  个循环在排气终了时的缸内残余废气温度  $T_5^j = T_3^j$  (K).

## 1.2 修正的 Kantor 模型

基于原始的 Kantor 模型,修正的 Kantor 模型包括 6 个步骤,但增加了 A、B、C 3 个合理并重要的修正.

1) 定压进气过程(从上止点到下止点)

第  $j$  个循环的可变残余废气质量分数  $r^j = T_1^j[T_1^j + \epsilon(1/\lambda - 1)T_5^{j-1}] + R_0$

其中  $R_0$  为 EGR 质量分数.

$$T_c^j = [r^j T_5^{j-1} + (1-r^j)T_1^j](\lambda/\sigma + 1 - \lambda)$$

2) 绝热压缩过程(从下止点到燃烧开始时刻)

$$T_s^j = T_c^j[\lambda + (1-\lambda)\sin^2(\beta\theta_s/2)]^{\gamma-1}$$

$$T_1^j = T_c^j[\lambda + (1-\lambda)\sin^2(\theta^j/2)]^{\gamma-1}$$

3) 定容燃烧过程(在燃烧角  $\theta^j$  处开始)

$$T_2^j = T_1^j + (1-r^j)\Delta T^j$$

其中  $\Delta T^j$  为修正的 Kantor 模型在不考虑残余废气条件下的燃烧温度上升值(K).

如果  $\theta^j > \pi$ , 第  $j$  个循环的燃烧效率<sup>[4]</sup>  $\eta^j = (\pi - \beta\theta_s)/\Delta\theta^j$  且  $\theta^j = \pi$ , 否则  $\eta^j = 1$ , 其中  $\theta^j = \beta\theta_s + \Delta\theta^j$ .

$$\Delta T^j = H_u[\epsilon_1(1 + \alpha/\phi^j)],$$

其中:  $H_u$  为燃油的低热值(J/g);  $\epsilon_1$  为定容比热(J/g·K);  $\alpha$  为化学当量比(14.7);  $\phi^j$  为第  $j$  个循环的实际当量比.

$$T_m^j = T_s^j + \epsilon(1-r^j)\Delta T^j$$

$$\Delta\theta^j = K(T_s^j)^{-2/3}(T_m^j)^{1/3}\exp[E_a/(3R_u T_m^j)]$$

$$\phi^j = \phi_1[1 + F(1 - \eta^{j-1})]$$

其中:  $\eta^0 = 1$ ,  $\phi_1$  为名义当量比,  $F$  为前一个循环停留在气缸中的未燃混合气质量分数.

4) 绝热膨胀过程(从  $\theta^j$  到下止点)

$$T_3^j = T_2^j[\lambda + (1-\lambda)\sin^2(\theta^j/2)]^{\gamma-1}$$

5) 绝热定容放热过程

第  $j$  个循环在定容放热过程结束后的缸内废气温度  $T_4^j = T_3^j(p_4^j/p_3^j)^{\gamma-1}$  (K)

其中:  $p_3^j$  为第  $j$  个循环膨胀终了时的缸内压力(MPa);  $p_4^j$  为第  $j$  个循环在定容放热过程结束后的缸内废气压力(MPa).

6) 定压排气过程(从下止点到上止点)

$$T_5^j = T_4^j$$

## 2 结果和讨论

使用回归图只是为了恢复 Kantor 的结果,而主要使用统计平均值和标准差图(简称统计误差图)来表

征发动机的循环变动,该图是一种误差棒图,使用某参数(例如指示平均有效压力  $p_i$  或残余废气温度  $T_5$ ) 的统计均值和标准差作为其纵坐标而另一个参数(例如  $\phi$  或  $\theta_s$  等)为其横坐标. 如果误差棒收敛于一个圆圈,则表明在该工况下无循环变动;如果误差棒存在则表明该工况下有循环变动发生,上、下误差棒之间的距离越长,循环变动越严重. 使用 Kantor 所用的模型参数值(见表 1),图 1 给出了原始 Kantor 模型的结果和 Kantor 模型分别采用修正 A、B、C 的结果以及 Kantor 模型同时使用修正 A、B、C 的结果. 在没有采用修正 A、B、C 时,模型(Kantor + A + B + C)的结果与 Kantor 模型的结果完全一致<sup>[1]</sup>,这说明我们的分析是合理的. 图 1 也表明修正的模型产生的没有循环变动的结果与 Kantor 模型的结果完全不同. 显而易见,定容过程在抑制循环变动方面起到关键作用,尽管 Kantor 模型使用的模型参数值非常不合理.

表 1 Kantor 模型和修正的 Kantor 模型使用的基本参数值

Tab.1 Parameters in Kantor model and modified Kantor model

模 型	参 数
Kantor 模型	$r_0 = 0.2, \Delta T_0 = 2\,000, \theta_s = -80^\circ$
修正的 Kantor 模型	$H_u = 43\,960, \alpha = 14.7, \theta_s = -80^\circ, \phi_0 = 1, F = 0.1$
Kantor 模型和修正的 Kantor 模型	$E_a = 187\,740, \gamma = 1.4, \lambda = 1/12, e = 0.5, K = 0.1, T_i = 300, c_V = 1.4$

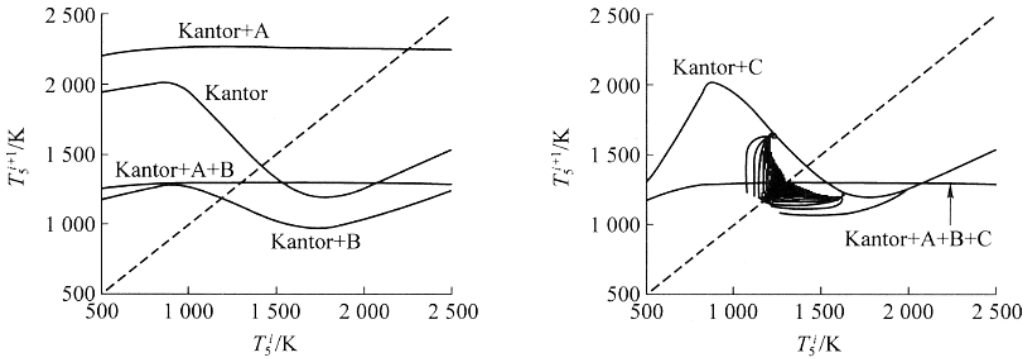


图 1 使用 Kantor 模型 + 修正项(A、B、C)的残余废气温度回归图

Fig. 1 Return map of residual gas temperature using Kantor model + correction(A, B, C)

图 2 给出了使用表 1 中 Kantor 模型参数的结果, 容易发现只是在  $\theta_s = -80^\circ$  时, 才出现循环变动.

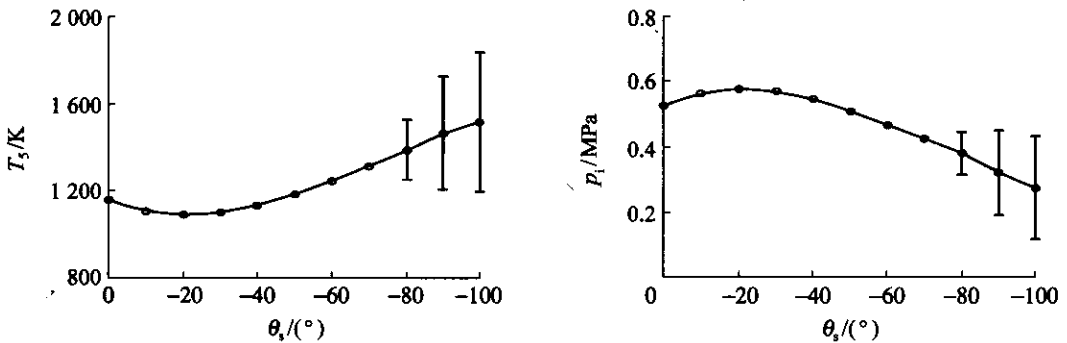


图 2 Kantor 模型的点火角对循环变动的影响

Fig. 2 Effect of spark angle on CV using Kantor model

为了找出模型参数变化对循环变动的影响,图3和图4给出了使用修正的 Kantor 模型和表1中合理的模型参数的  $T_5$  和  $p_i$  相对于  $\theta_s$  和  $\phi$  的采用统计误差图的预测结果,很显然,  $T_5$  和  $p_i$  均没有发生循环变动. 同理可得  $p_i$  和  $T_5$  相对于进气压力、动力学常数、平均系数、活化能、进气温度、EGR 率、压缩比及比热的类似预测结果,亦无循环变动发生,受篇幅所限,未给出这些结果图.

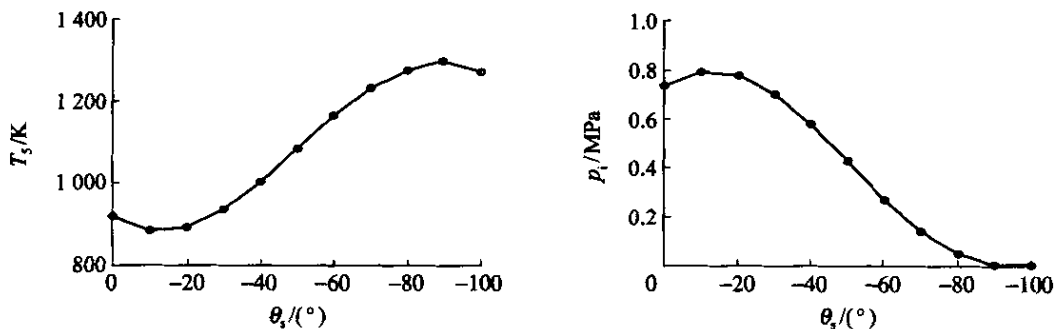


图3 修正的 Kantor 模型的点火角对循环变动的影响  
Fig.3 Effect of spark angle on CV using the modified Kantor model

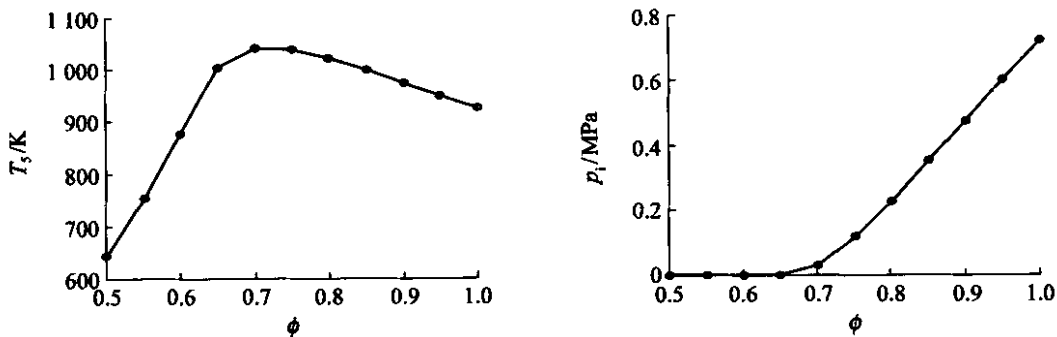


图4 修正的 Kantor 模型的当量比对循环变动的影响  
Fig.4 Effect of equivalence ratio on CV using the modified Kantor model

在合理的模型参数范围内,使用 Kantor 和修正的 Kantor 模型均无循环变动出现. 对于 Kantor 模型,循环变动也只出现在不合理的大点火角(  $-80^\circ$  )和高的残余废气质量分数( 0.2 )的情况下. 然而令人感兴趣的是,是否可以通过选取极为不合理的模型参数值得修正的 Kantor 模型也能产生循环变动. 为此,根据修正的 Kantor 模型,选取  $\phi = 0.1$ ,  $\sigma = 0.1$ ,  $R_0 = 0.8$  得到  $T_5$  和  $p_i$  相对于  $\theta_s$  的统计误差图. 图5表明循环变动出现,但产生了极不合理的  $T_5$  和  $p_i$ .

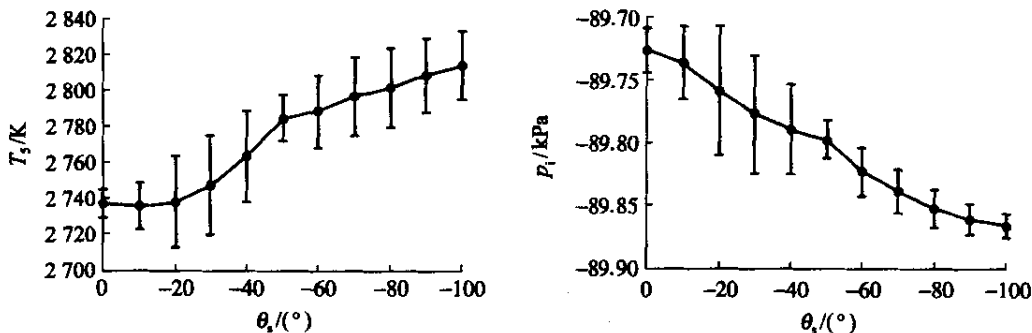


图5 在  $\phi = 0.1$ ,  $\sigma = 0.1$ ,  $R_0 = 0.8$  时,修正的 Kantor 模型的点火角对循环变动的影响  
Fig.5 Effect of spark angle on CV using the modified Kantor model at  $\phi = 0.1$ ,  $\sigma = 0.1$ ,  $R_0 = 0.8$

### 3 结论

- 1) 把可变残余废气质量分数、定容放热过程和未燃燃油分数加入 Kantor 模型是合理的.
- 2) 对于 Kantor 模型和修正的 Kantor 模型, 在合理的模型参数范围内都没有循环变动发生.
- 3) 对于 Kantor 模型和修正的 Kantor 模型, 循环变动只出现在极端不合理的模型参数条件下.
- 4) 内燃机中存在着循环变动, 但在正常的发动机运行工况下, Kantor 模型和修正的 Kantor 模型均不能预测出循环变动, 这意味着像 Kantor 这样的简单热力学模型无法表征发动机循环变动, 因为这些模型对复杂且动态的燃烧过程做了过大的简化.

#### 参考文献 :

- [ 1 ] KANTOR J C. Dynamical instability of spark ignited engines[ J ]. Science , 1984 , 224 : 1233-1235.
- [ 2 ] DAILY J W. Cycle to cycle variations : A chaotic process ?[ J ]. Combustion Sci and Tech , 1988 57 : 149-162.
- [ 3 ] WAGNER R M , DAW C S , THOMAS J F. Controlling chaos in spark-ignition engines[ Z ]. The Central and Eastern States Joint Technical Meeting of the Combustion Institute , New Orleans , 1993.
- [ 4 ] DAW C S , FINNEY C E A , GREEN J R. A simple model for cyclic variations in a spark ignition engine[ J ]. SAE 962086 , 1996.

## Discussion on Kantor Model for Cyclic Variation in Spark-ignition Engines

Ji Chang-wei

( College of Environmental and Energy Engineering , Beijing University of Technology , Beijing 100022 , China )

**Abstract :** Kantor proposed a spark ignition engine model to predict engine cyclic variation in terms of some assumptions. In this paper a modified Kantor model is proposed . We show that exhaust blowdown process and variable exhaust residual gas mass fraction , neglected in the Kantor model , significantly reduce cyclic variability. However , prior-cycle unburned fuel not considered in the Kantor model apparently aggravates cyclic variability of next cycle. These three factors interact each other and result in abatement and even disappearance of cyclic variation. No significant cyclic variability is predicted for realistic ranges of these parameters. Only for extremely unrealistic ranges of model parameters cyclic variation reluctantly shows up. Moreover , even using the Kantor model , cyclic variability is predicted only for rather extreme , somewhat contrived choices of the model parameters .

**Key words :** cyclic variation ; kantor model ; modeling ; spark-ignition engine