



# 中国一汽无锡油泵油嘴研究所

Wuxi Fuel Injection Equipment Research Institute, FAW, China

## 共轨柴油机在环仿真研究

一汽无锡油泵油嘴研究所 夏兴兰

2015年11月23日



## 目录：

- 1 共轨柴油机在环仿真
- 2 共轨柴油机模型在环仿真
- 3 共轨柴油机软件在环仿真
- 4 共轨柴油机硬件在环仿真
- 5 结论

本文仅供学习交流，未经允许，谢绝转载和其他用途。



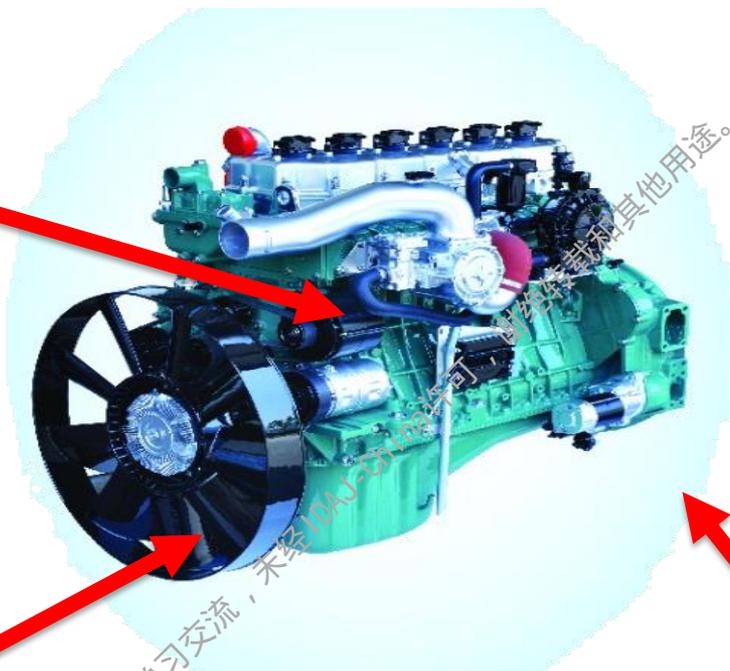
## 无锡油泵油嘴研究所的主要业务

### 共轨系统开发

共轨系统（喷油器、供油泵、共轨管）设计、试验、加工

### 发动机节能减排关键技术

增压器VGT, VVA  
后处理SCR、DPF  
新燃烧RCCI



### 电子控制技术

ECU软硬件、  
测试试验技术、  
智能制造信息技术

### 精密加工与 智能制造技术

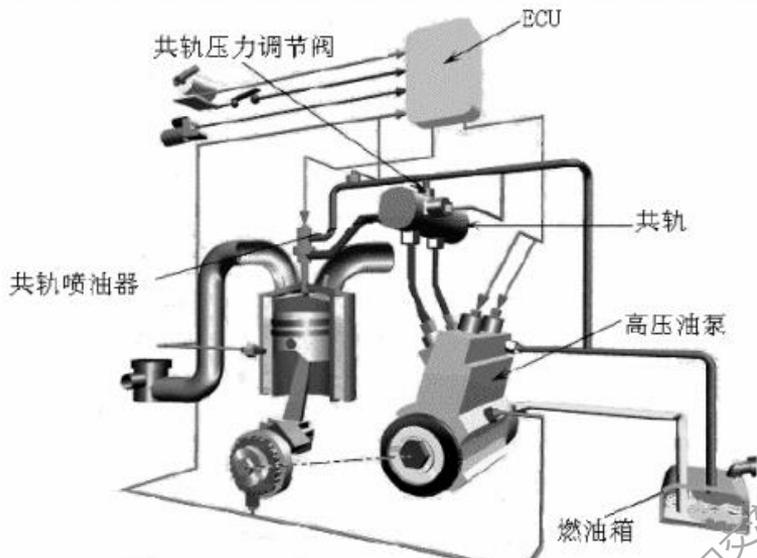
共轨系统（喷油器、供油泵、共轨管）加工

# 1 共轨柴油机在环仿真

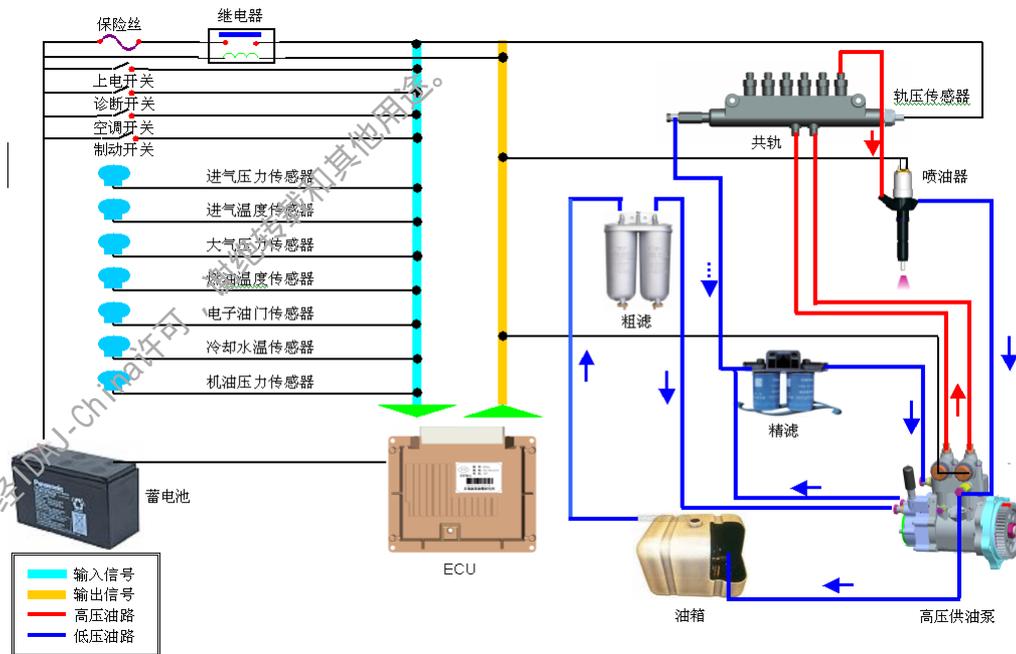


中国一汽无锡油泵油嘴研究所  
WFIERI, FAW, CHINA

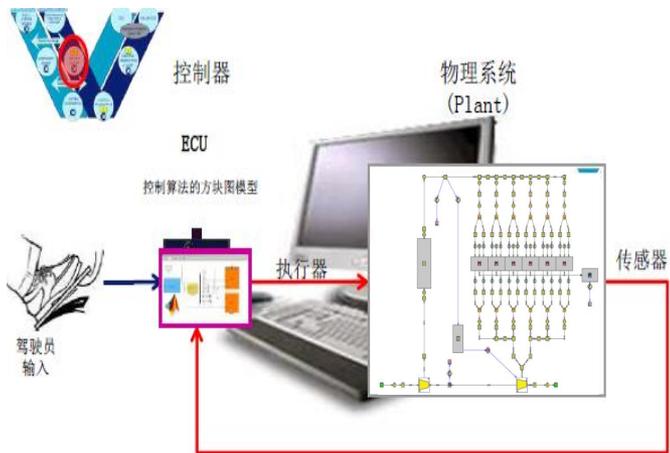
## 共轨柴油机系统



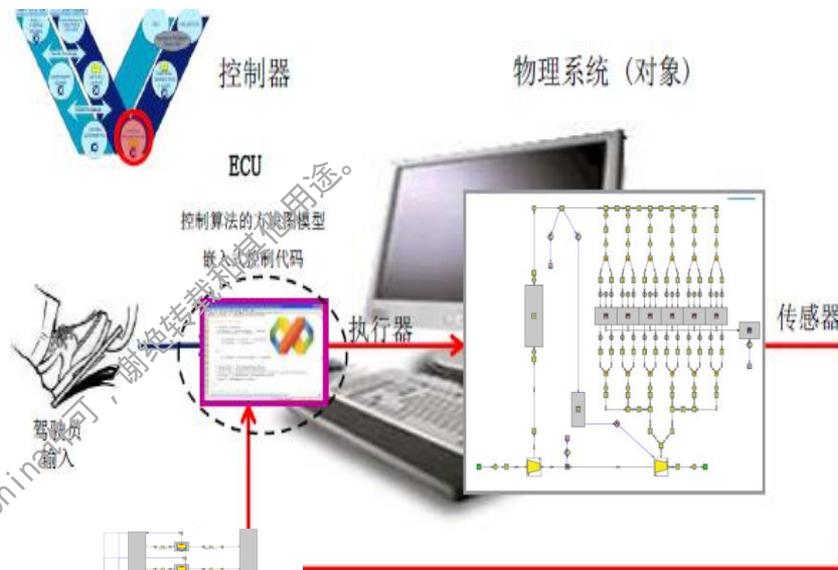
共轨柴油机



共轨供油系统



### 模型在环 MIL

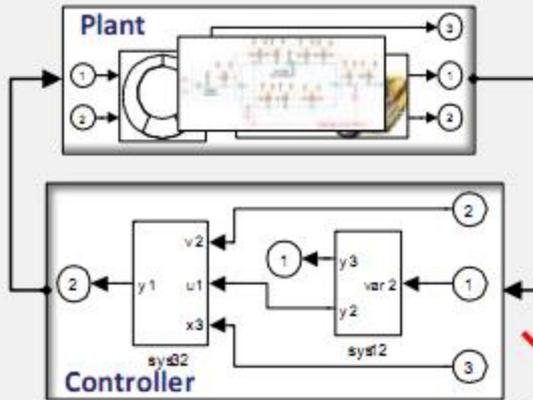


### 软件在环SIL

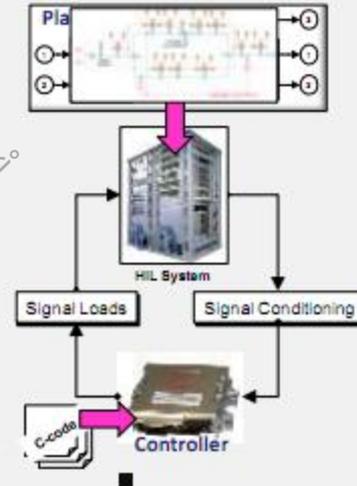


### 硬件在环 HIL

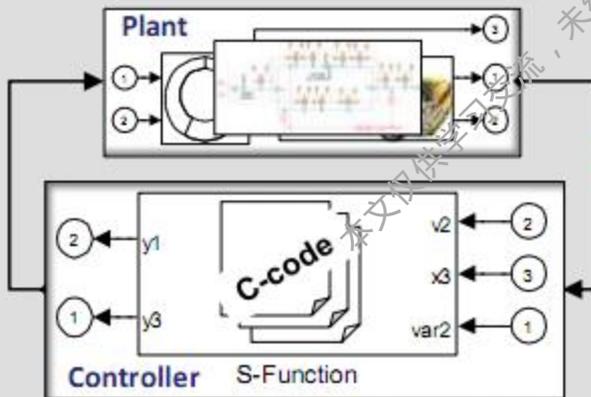
### Model-In-the-Loop (MIL)



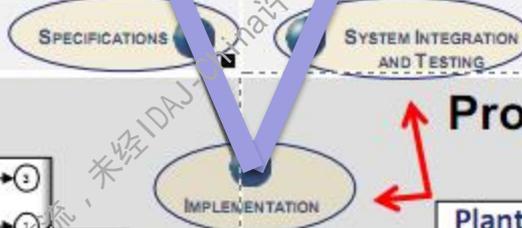
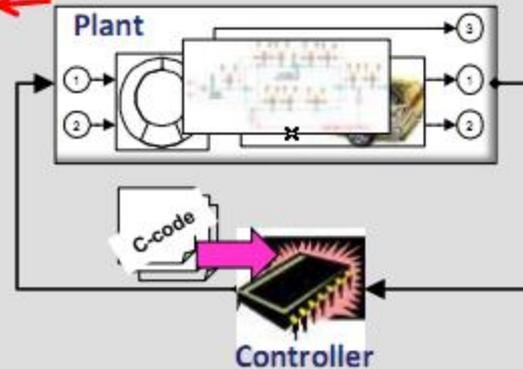
### Hardware-In-the-Loop (HIL)



### Software-In-the-Loop (SIL)



### Processor-In-the-Loop (PIL)



# 在环仿真的功能



	模型在环	软件在环	过程在环	硬件在环
功能验证	✓	✓	✓	✓
代码验证		✓	✓	✓
编译验证			✓	✓
实时功能验证				✓
计算速度/ 内存功能验证				✓
I/O接口验证			✓	✓
精度验证	✓	✓	✓	✓

本文仅供学习交流，未经IDAJ-China许可，谢绝转载和其他用途。



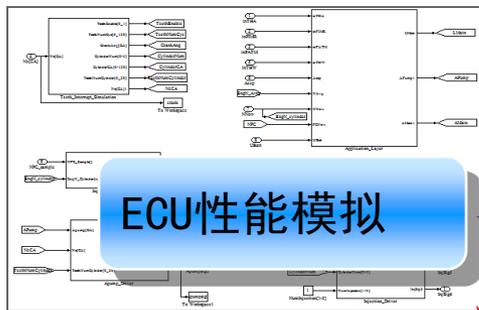
## 2. 共轨柴油机模型在环 (MIL) 仿真

### 2.1 共轨柴油机模型在环概述

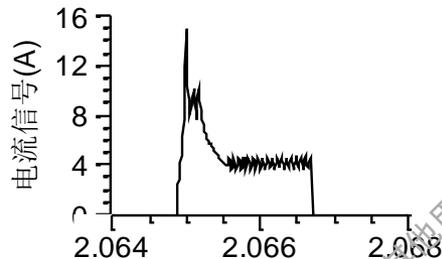
将共轨系统、控制系统和发动机性能相耦合的联合仿真平台，研究共轨系统参数的变化、控制参数变化对喷油特性和发动机特性的影响。



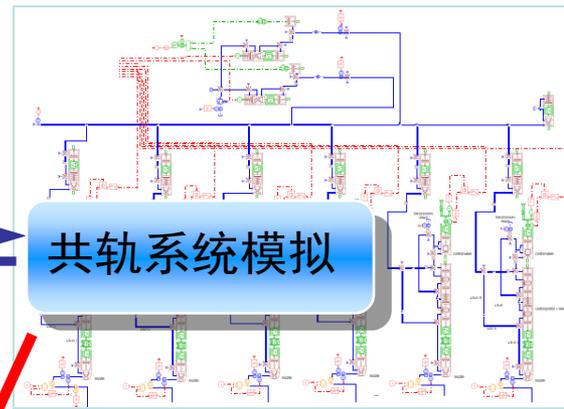
供油系统、发动机性能和控制系统三者之间的关系



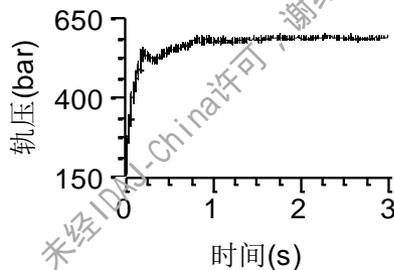
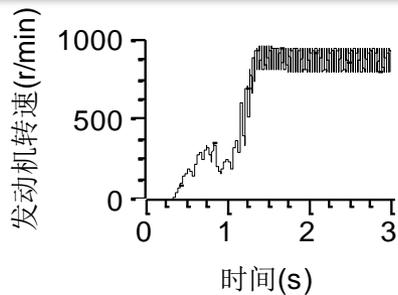
ECU性能模拟



泵油角、喷油器电磁阀开启时刻、喷油脉宽



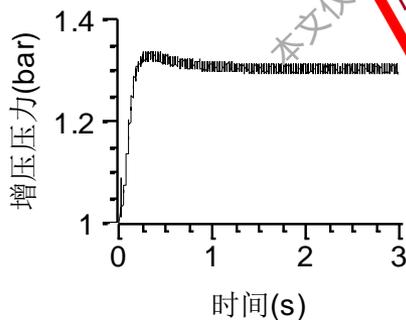
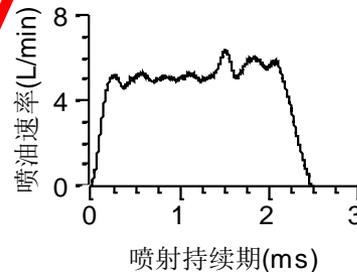
共轨系统模拟



实际轨压

发动机转速、  
增压压力

喷油规律



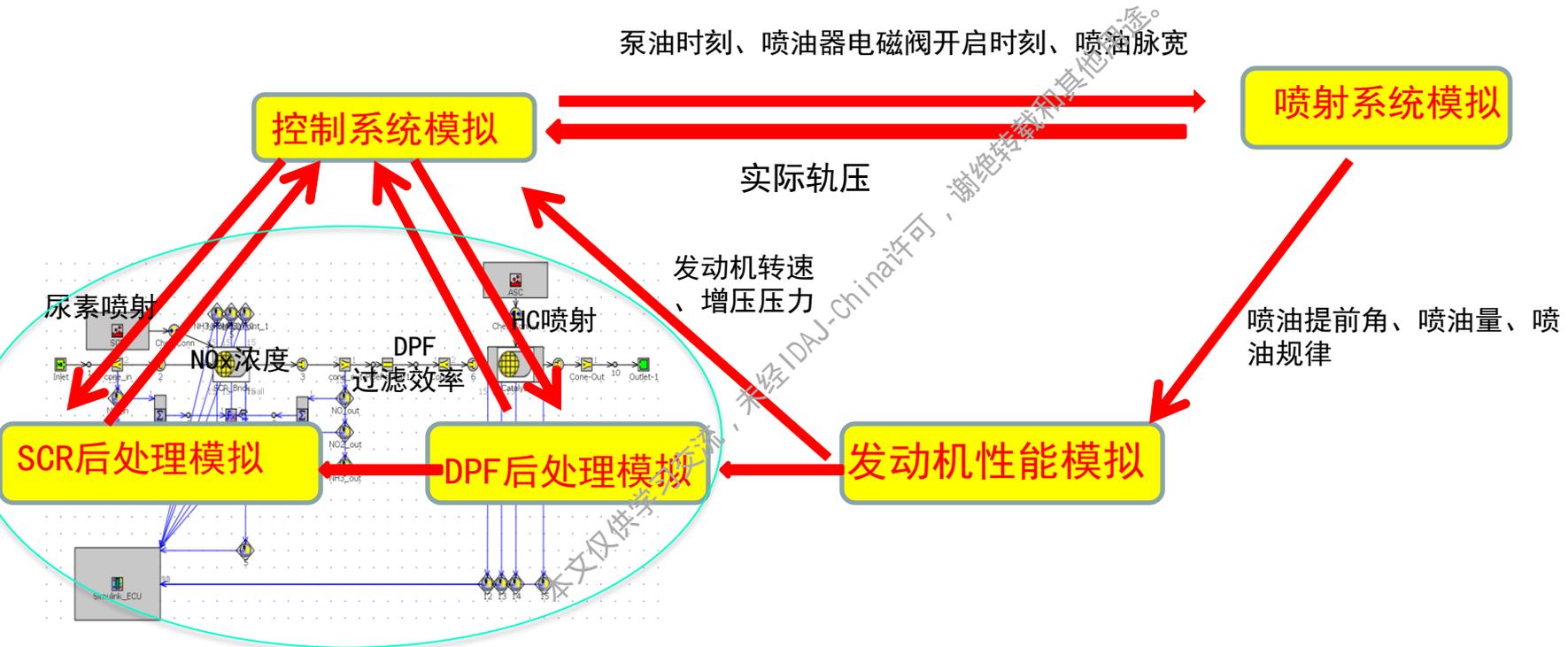
发动机性能模拟

共轨系统、ECU和发动机性能的协同仿真



## 模型在环 (MIL) 模型的扩展

将共轨系统、控制系统和发动机性能的耦合模型扩展到后处理系统（包括后处理器、HC喷射、尿素喷射）

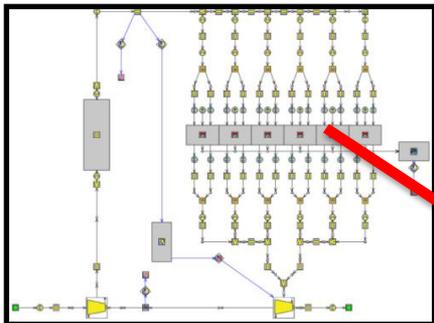


共轨柴油机、燃油喷射、控制系统和后处理的耦合仿真



## 2.2 共轨柴油机模型在环的应用

研究共轨系统参数和制造误差对喷油特性和发动机性能的影响



发动机模型

### 共轨系统

#### 结构参数

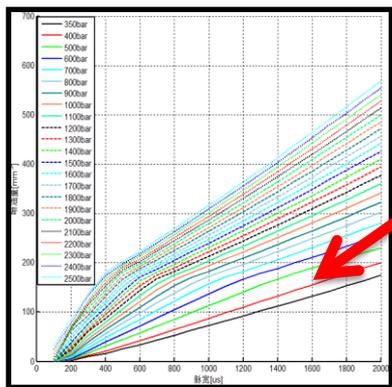
- 电磁阀升程
- 进/出油量孔直径
- 喷孔直径
- 油嘴密封面直径
- 控制活塞直径
- .....

#### 制造装配误差

- 电磁阀气隙
- 孔板流量
- 油嘴流量
- 针阀弹簧预紧力
- 油嘴紧冒预紧力
- .....

ID	Parameter category and explanation	BAE parameter name and unit	BAE value	ID	parameter name and unit
89	ENGINE_SPEED [rpm]	ENGINE_SPEED [rpm]	1500.00000	89	Engine speed [rpm]
90	ENGINE_LOAD [Nm]	ENGINE_LOAD [Nm]	360.00000	90	Engine brake torque [Nm]
71	INJECTION_PRESS [bar]	INJECTION_PRESS [bar]	201.98634	71	Injection pressure [bar]
72	INJECTION_DURATION [ms]	INJECTION_DURATION [ms]	27.48577	72	Injection duration [ms]
73	INJECTION_QUALITY [mm]	INJECTION_QUALITY [mm]	30.34734	73	Injection spray SMD of compression end
74	INJECTION_QUALITY [mm]	INJECTION_QUALITY [mm]	20.18464	74	Injection spray SMD of fuel line end [mm]
75	INJECTION_QUALITY [mm]	INJECTION_QUALITY [mm]	20.18464	75	Injection spray SMD of fuel line end [mm]
76	INJECTION_QUALITY [mm]	INJECTION_QUALITY [mm]	20.18464	76	Injection spray SMD of fuel line end [mm]
77	INJECTION_QUALITY [mm]	INJECTION_QUALITY [mm]	20.18464	77	Injection spray SMD of fuel line end [mm]
78	INJECTION_QUALITY [mm]	INJECTION_QUALITY [mm]	20.18464	78	Injection spray SMD of fuel line end [mm]
79	INJECTION_QUALITY [mm]	INJECTION_QUALITY [mm]	20.18464	79	Injection spray SMD of fuel line end [mm]
80	INJECTION_QUALITY [mm]	INJECTION_QUALITY [mm]	20.18464	80	Injection spray SMD of fuel line end [mm]
81	INJECTION_QUALITY [mm]	INJECTION_QUALITY [mm]	20.18464	81	Injection spray SMD of fuel line end [mm]
82	INJECTION_QUALITY [mm]	INJECTION_QUALITY [mm]	20.18464	82	Injection spray SMD of fuel line end [mm]
83	INJECTION_QUALITY [mm]	INJECTION_QUALITY [mm]	20.18464	83	Injection spray SMD of fuel line end [mm]
84	INJECTION_QUALITY [mm]	INJECTION_QUALITY [mm]	20.18464	84	Injection spray SMD of fuel line end [mm]
85	INJECTION_QUALITY [mm]	INJECTION_QUALITY [mm]	20.18464	85	Injection spray SMD of fuel line end [mm]
86	INJECTION_QUALITY [mm]	INJECTION_QUALITY [mm]	20.18464	86	Injection spray SMD of fuel line end [mm]
87	INJECTION_QUALITY [mm]	INJECTION_QUALITY [mm]	20.18464	87	Injection spray SMD of fuel line end [mm]

ECU模型



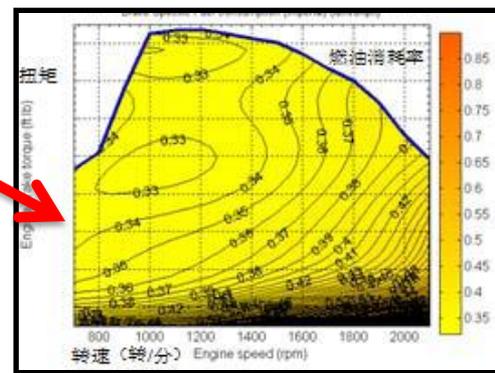
喷油器油量MAP

#### 喷油特性

- 小油量工况喷油量
- 标定点喷油量
- 扭矩点喷油量
- 喷油量方差
- .....

#### 发动机性能

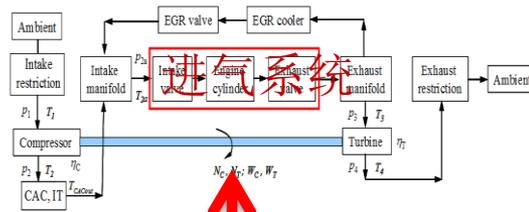
- 功率
- 扭矩
- 油耗
- 排放
- .....



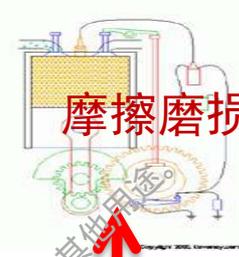
发动机万有特性



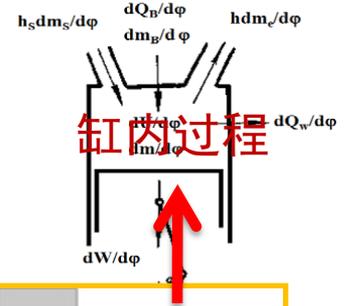
研究进气系统、缸内过程、摩擦磨损、功率油耗、排放、后处理等一系列子系统对发动机性能的影响。



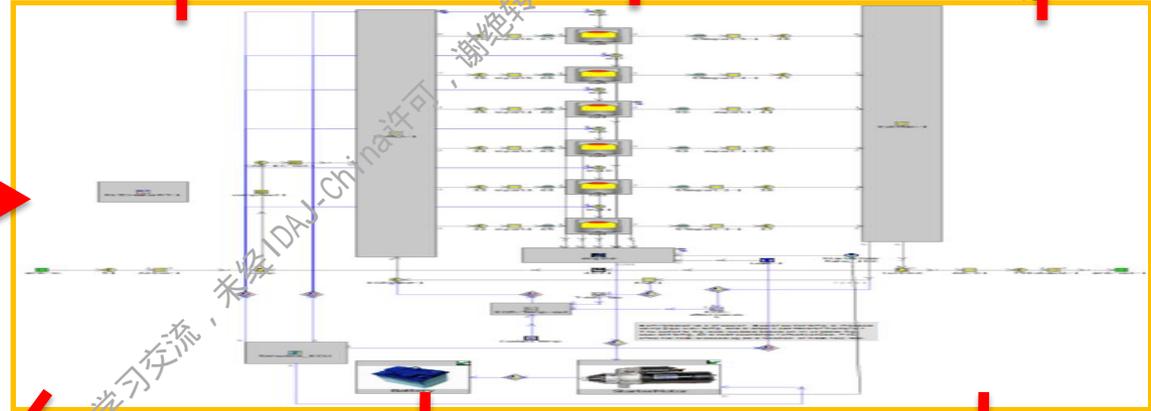
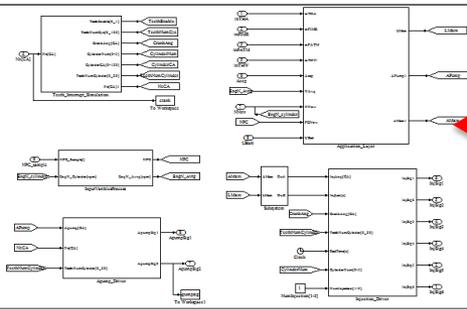
进气系统



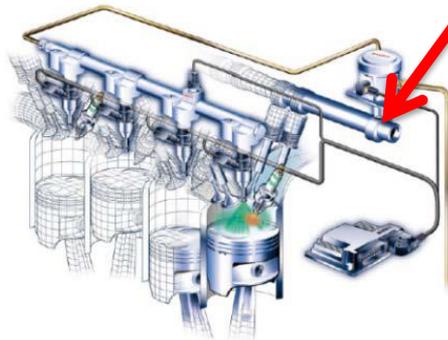
摩擦磨损



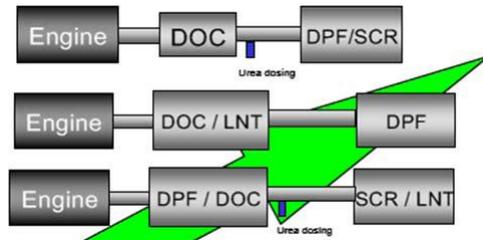
缸内过程



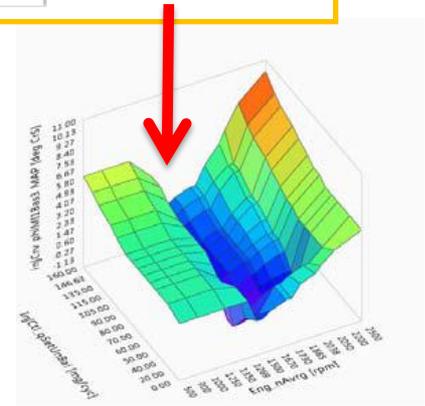
本文仅供学习交流，未经授权，禁止转载和商用。



发动机排放



发动机后处理

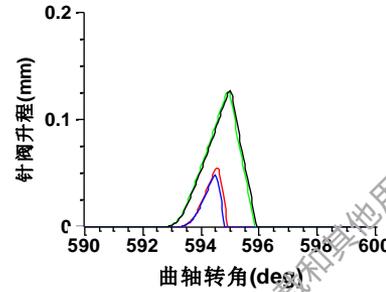
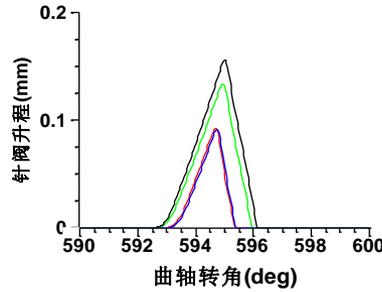
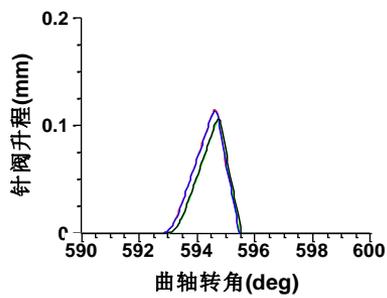


功率、油耗

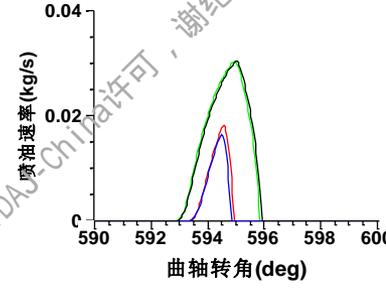
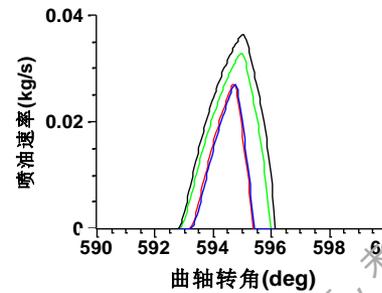
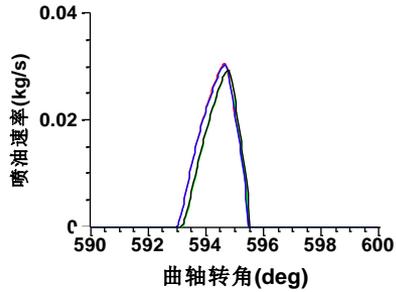


## 2.3 在环仿真计算结果

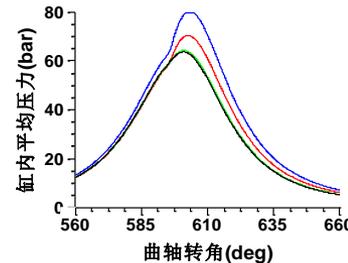
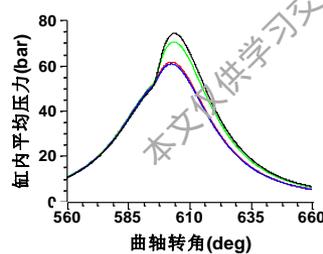
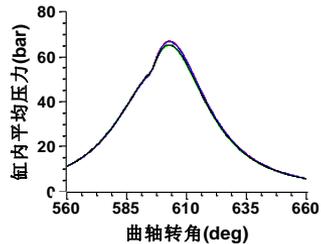
### 电磁阀升程对喷油特性和发动机性能的影响



针阀升程



喷油规律



气缸压力

a) 电磁阀升程0.07mm,

b) 电磁阀升程0.10mm

c) 电磁阀升程0.12mm

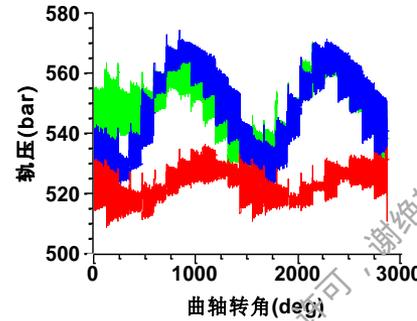
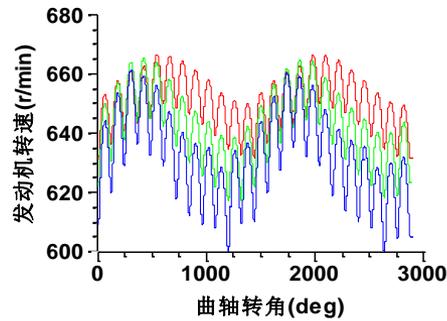
— cycle 1    — cycle 2    — cycle 3    — cycle 4

怠速工况，电磁阀升程生产的影响

在怠速工况点，电磁阀升程增加，使得针阀升程、喷油规律、气缸压力在各循环中的波动增加。

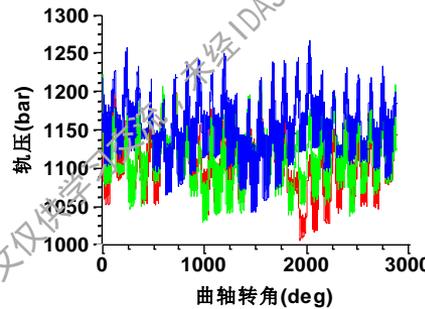
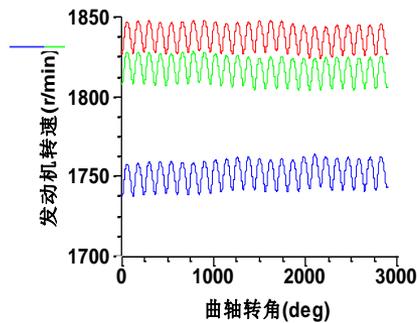


## 电磁阀升程对转速和轨压的影响



怠速工况

在怠速工况，电磁阀升程增加，转速和轨压波动增加，使得发动机振动增加；



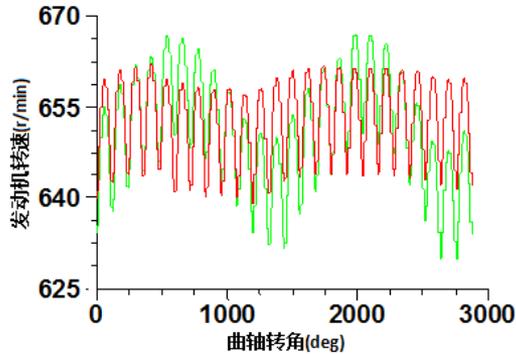
最大扭矩工况

在最大扭矩工况，电磁阀升程增加，轨压略有下降，转速下降，使得发动机功率下降。

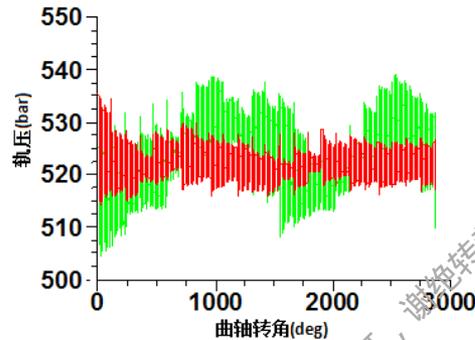
— 电磁阀升程0.07mm    — 电磁阀升程0.10mm    — 电磁阀升程0.12mm



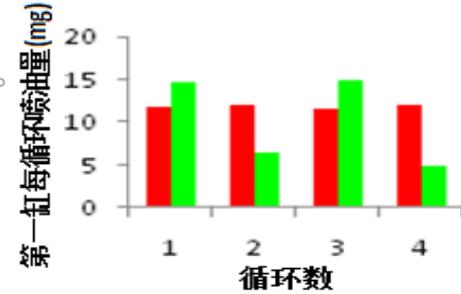
## 控制策略对发动机性能的影响示例——逐缸平衡的影响



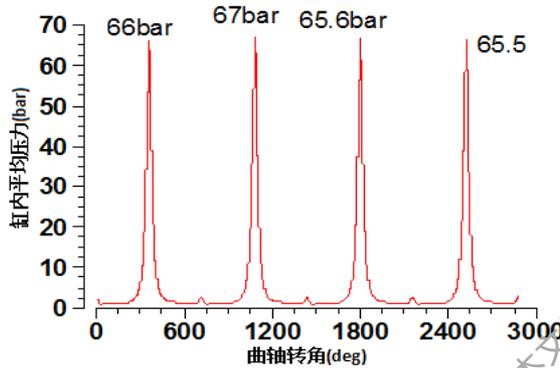
a) 转速



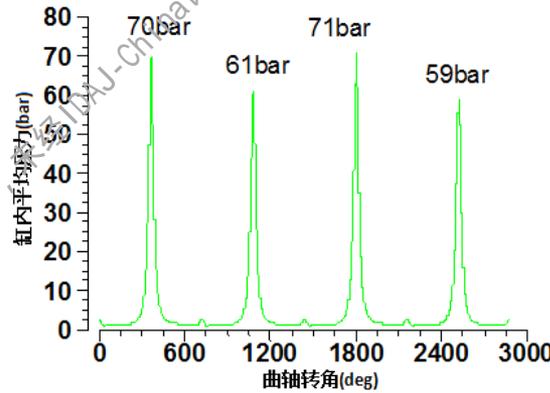
b) 轨压



c) 每循环喷油量



e) 有逐缸平衡时缸压

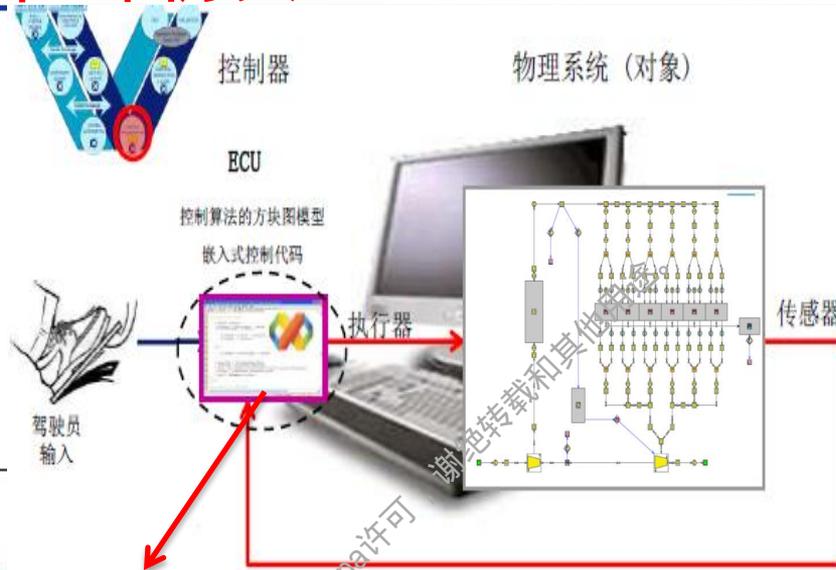


b) 无逐缸平衡时缸压

— 有逐缸平衡  
— 无逐缸平衡

无逐缸平衡：转速  $643 \pm 23$  r/min, 轨压  $524 \pm 17$  bar, 喷油量  $9 \pm 5.2$  mg, 缸压  $65 \pm 6$  bar  
有逐缸平衡：转速  $651 \pm 11$  r/min, 轨压  $525 \pm 10$  bar, 喷油量  $10.9 \pm 0.7$  mg, 缸压  $66.3 \pm 0.7$  bar

# 3 共轨柴油机电软件在环仿真



```

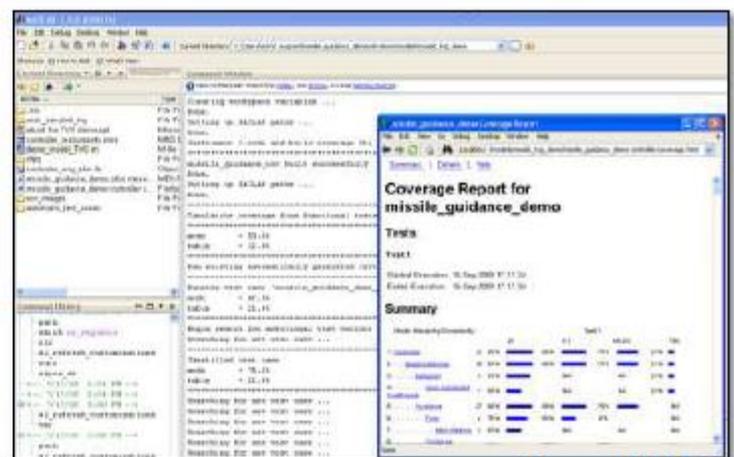
/* Reset estimator */
->F if(reset == TRUE)
{
    /* Initialize estimator at m
    range_accumulator = range;
}

TF if(acquire == TRUE)
{
    /* If acquired target, always pass through the ran
    estimated_range = range;

    /* Estimated velocity */
    estimated_velocity = wn_hom * (range - range_accu

    /* Update the integrator */
    range_accumulator += estimated_velocity * SAMPLE_

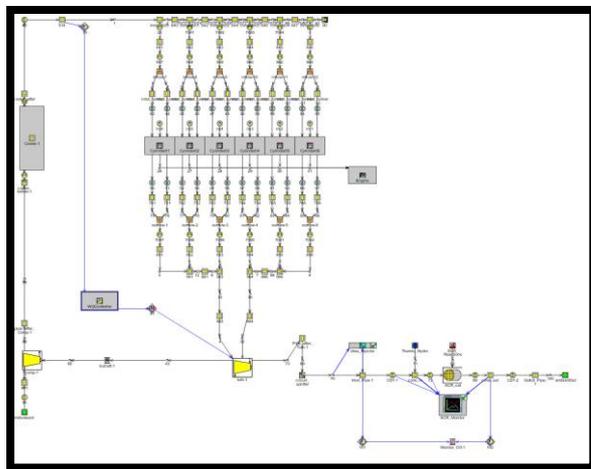
    /* Closing velocity is the rate of closing differ
    and target, -1. */
    estimated_closing_velocity = -estimated_velocity;
}
TF else
{
    /* No acquired target, so set estimated values to
    estimated_closing_velocity = 0;
    estimated_range = 0;
}
    
```



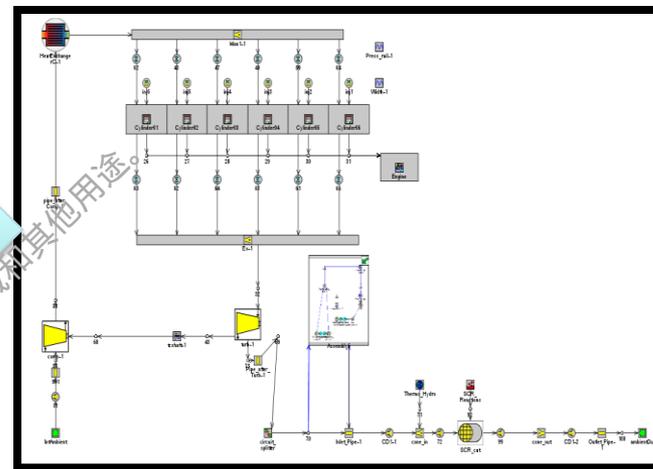


# 4 共轨柴油机硬件在环仿真

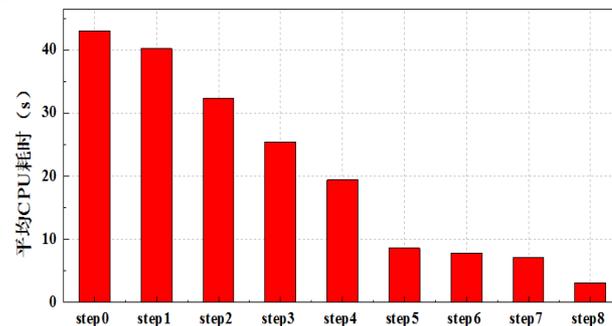
## 4.1 柴油机实时仿真模型



柴油机模型简化



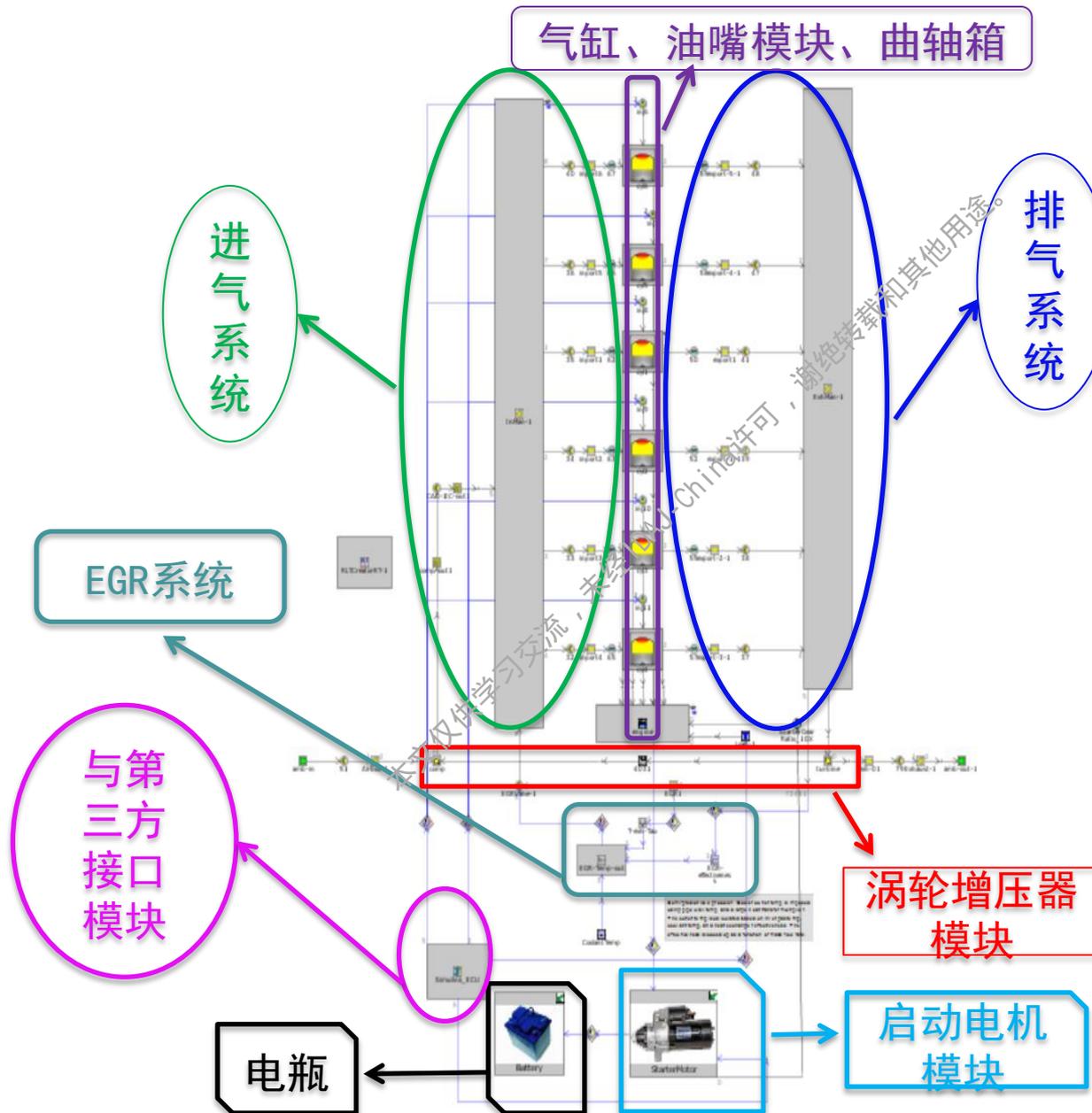
模型	平均CPU耗时	CPU耗时百分比	进气量平均误差	功率平均误差	比油耗平均误差	排温误差 (K)
step0	43.0	100%	0.00%	1.39%	1.41%	15.0
step1	40.2	93%	0.20%	1.39%	1.41%	16.2
step2	32.3	75%	0.26%	1.40%	1.42%	15.7
step3	25.4	59%	0.50%	1.42%	1.44%	18.2
step4	19.4	45%	0.97%	1.55%	1.56%	17.8
step5	8.6	20%	0.98%	1.56%	1.57%	17.6
step6	7.8	18%	0.96%	1.54%	1.55%	14.4
step7	7.1	16%	1.29%	1.77%	1.80%	18.2
step8	3.11	7%	0.50%	1.39%	1.41%	15.0



通过8步简化，简化后模型的平均计算耗时降低了85~93%，发动机进气量、功率、比油耗、排温变化很小。



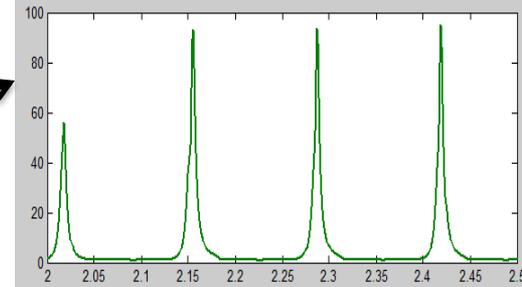
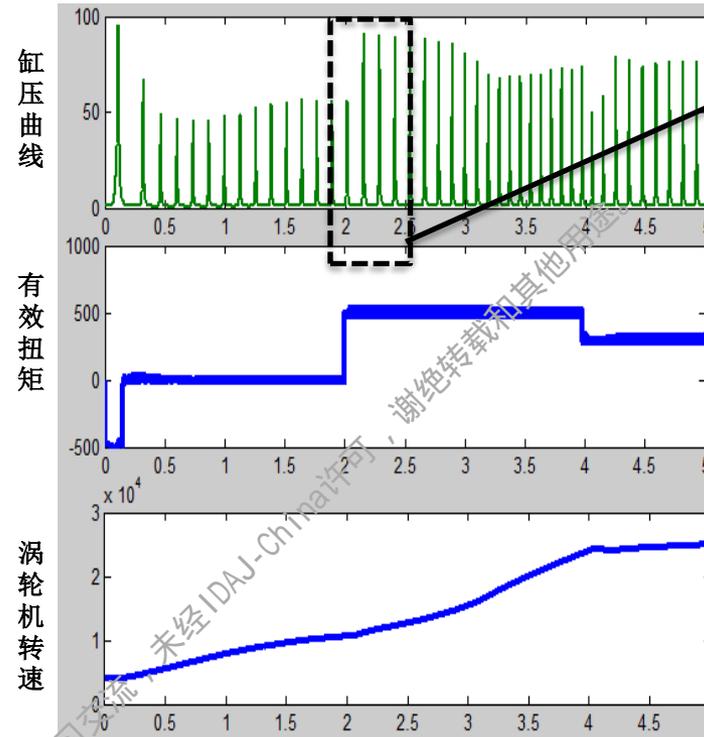
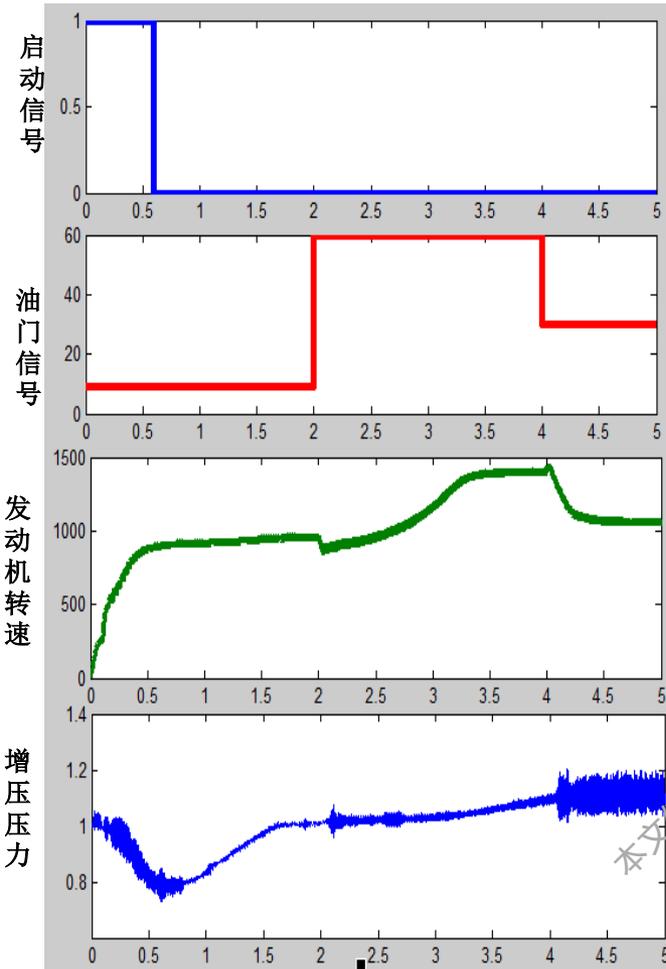
## 4.2 柴油机实时模型在HIL系统上的测试



- 1、该模型是根据发动机结构参数建立的物理模型；
- 2、喷嘴模块具有多次喷射能力；
- 3、能进行后处理计算；



## 4. 2柴油机实时模型在HIL系统上的测试

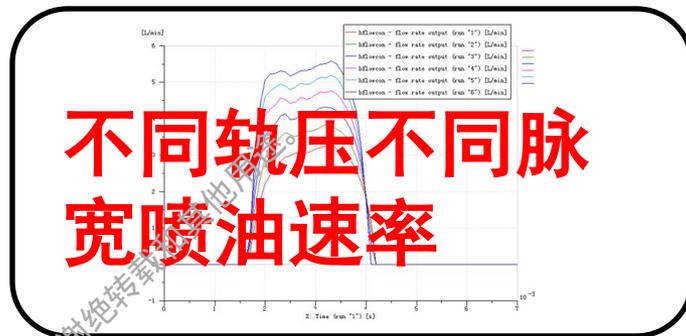
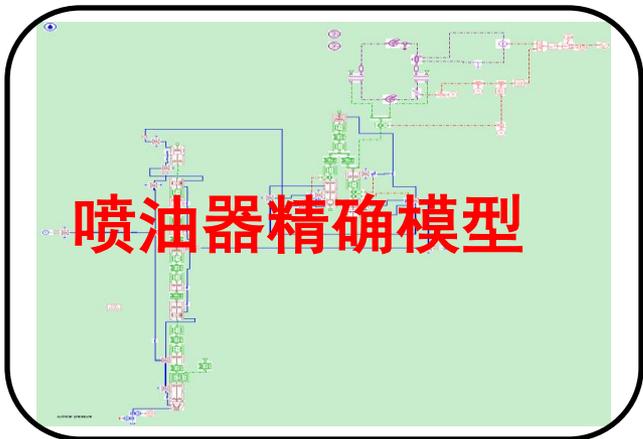


- 发动机启动：给发动机一个0.5s的启动信号，发动机启动后进入怠速状态；
- 发动机运行2s添加一个600N.m的负载，油门60%，转速增加，然后稳定到一个转速；
- 发动机在4s时，减小负载到300N.m，油门开度降低到50%，然后稳定到一个转速。

通过测试：发动机的实时性能满足HIL系统的需求；



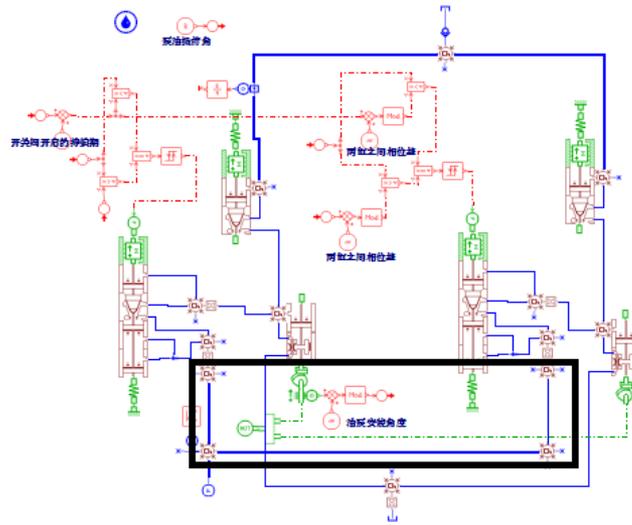
### 4.3 喷油器实时模型



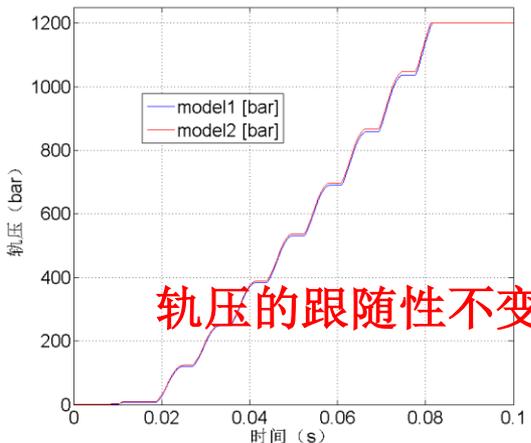
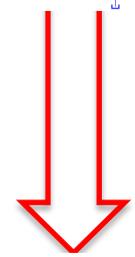
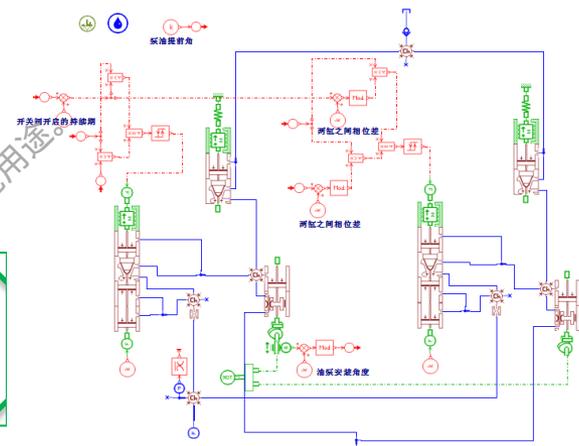
本文仅供学习交流，未经IDAJ-China许可，谢绝转载



# 4.4 高压泵实时模型

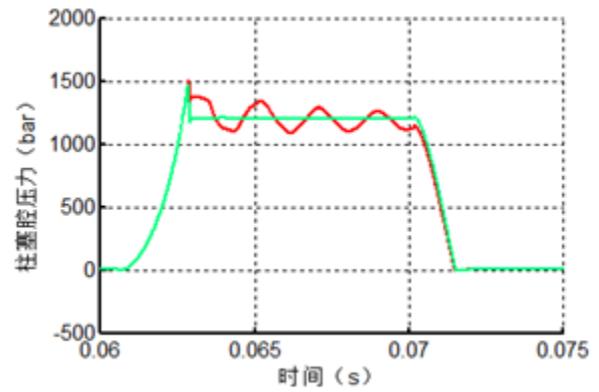
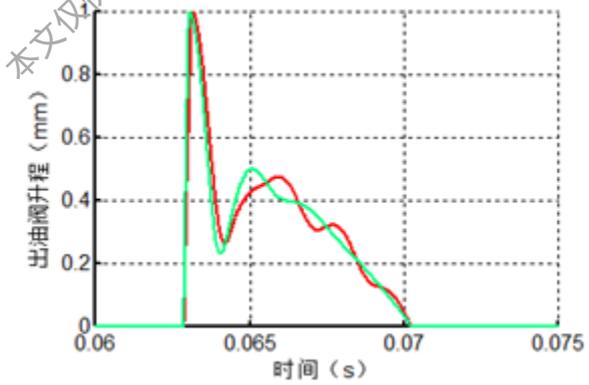


简化后计算时间从243.7s  
降低到39.7s；状态参数  
从37个变化到15个



轨压的跟随性不变

1200bar轨压对比

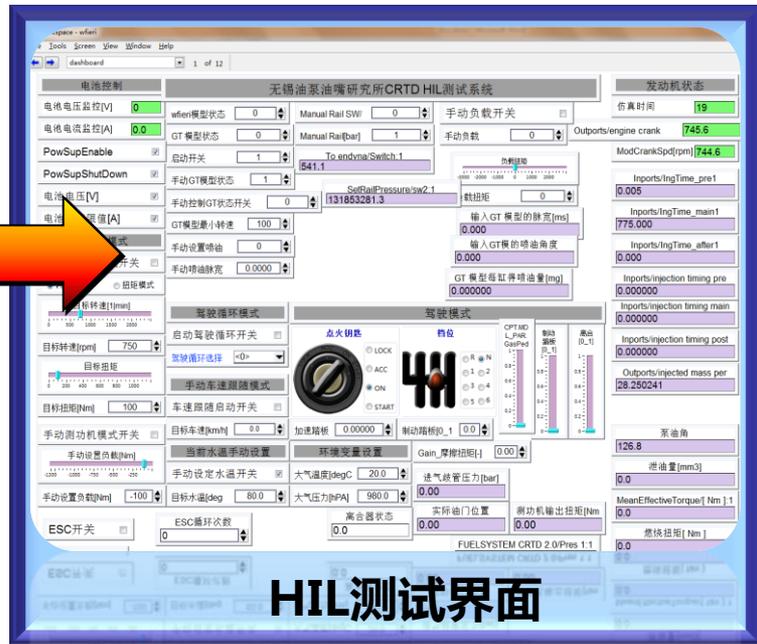
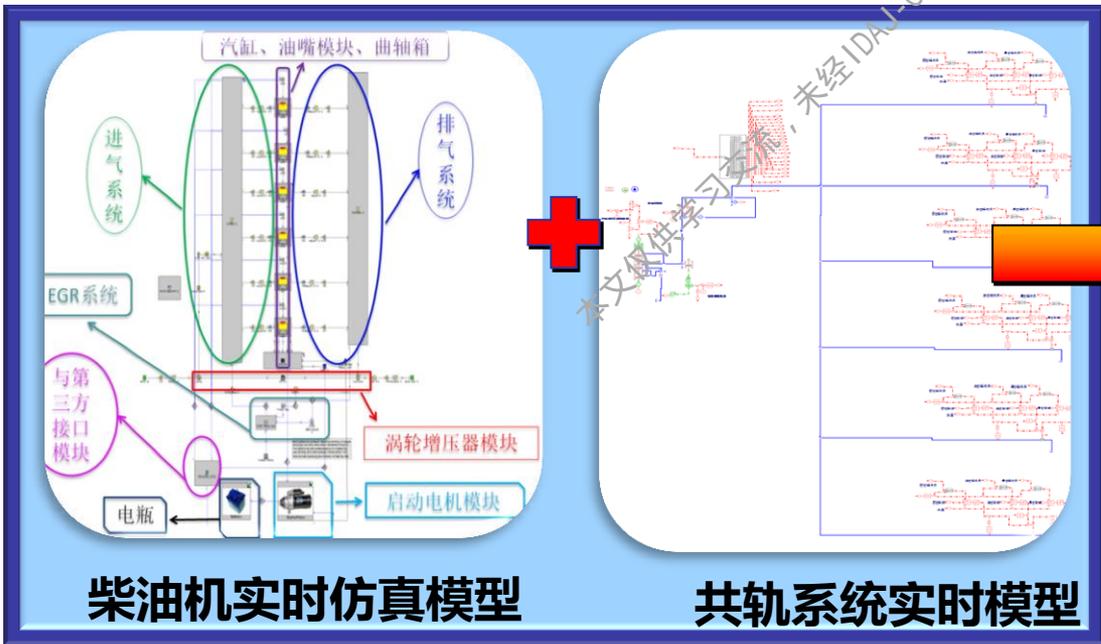


本文仅供学习交流，未经IDAJ-China.com网站许可，不得用于其他用途



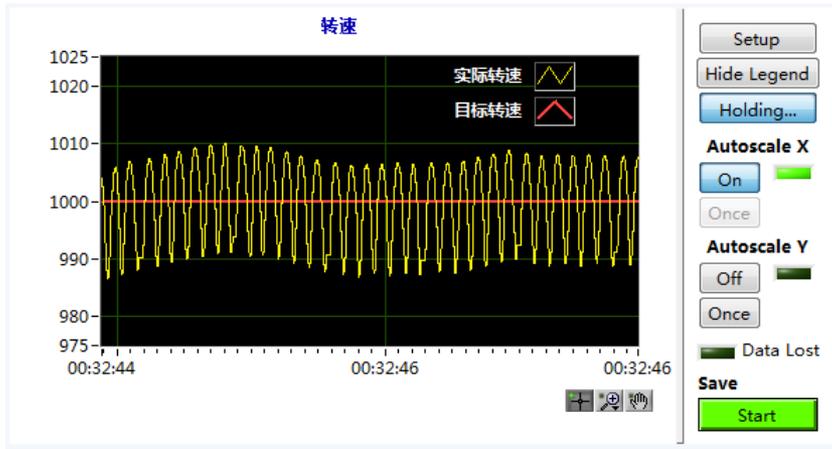
## 4.5 共轨柴油机系统实时仿真

喷油器数学模型的建模，开发实时喷油器模型元件库；  
 高压泵实时模型的建模，建立高压泵实时物理模型；  
 发动机高频实时物理模型、燃油系统模型和ECU在HIL系统上的  
 耦合测试。

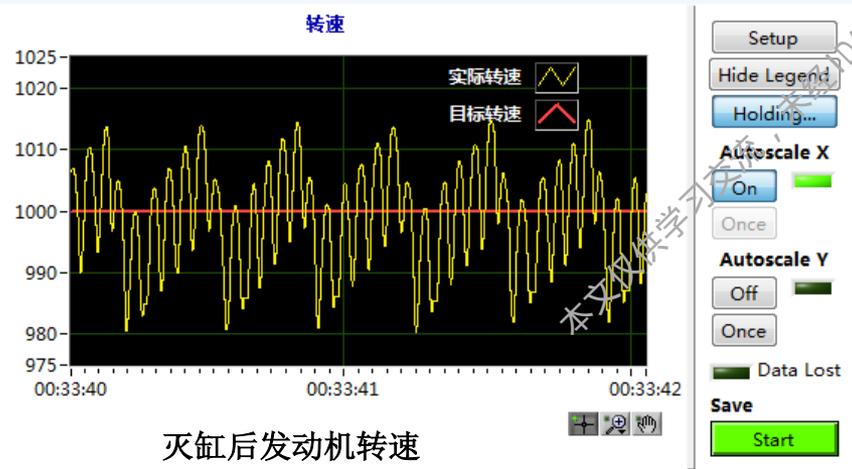




# 共轨柴油机实时模型在HIL系统上的测试



灭缸前发动机转速



灭缸后发动机转速

轨压700bar, 目标1000r/min, 在测功机定转速模式下正常运转时, 忽然灭掉一缸, 发动机转速的变化

发动机模型可以很好的反应一个工作循环内 (720度曲轴转角) 各缸喷油量的变化对发动机性能的影响

- 1) 从模型在环到硬件在环使用相同的仿真模型，可以对控制系统进行验证；
- 2) 共轨柴油机硬件在环系统中，柴油机和共轨泵可以建立全物理模型，喷油器只能建数学模型；
- 3) 使用详细的共轨系统模型在环仿真模型可以对共轨系统从设计到制造的各个环节进行仿真分析；
- 4) DI-PULSE燃烧模型不仅可以详细描述发动机的燃烧过程，而且还能满足HIL系统对计算时间的要求。



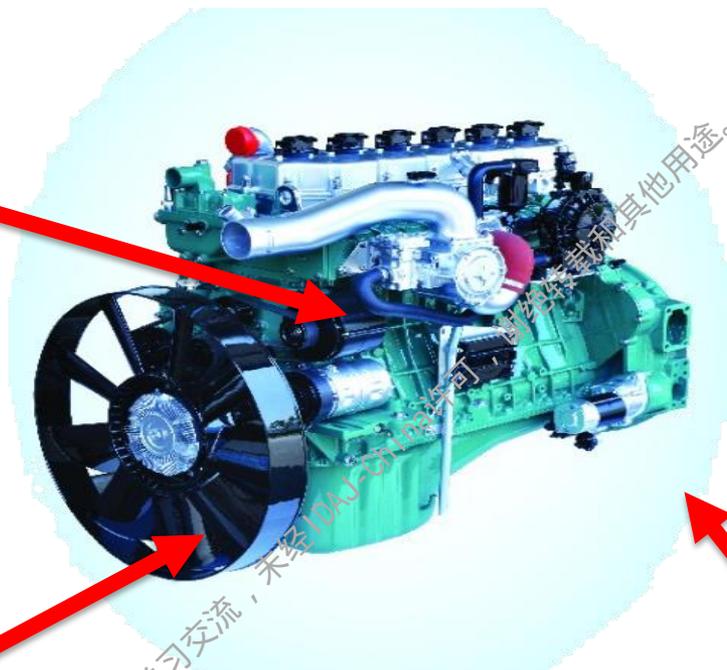
## 共轨柴油机

### 共轨系统开发

共轨系统（喷油器、供油泵、共轨管）设计、试验、加工

### 发动机节能减排关键技术

增压器VGT, VVA  
后处理SCR、DPF  
新燃烧RCCI



### 电子控制技术

ECU软硬件、  
测试试验技术、  
智能制造信息技术

### 精密加工与 智能制造技术

共轨系统（喷油器、供油泵、共轨管）加工

本文仅供学习交流，未经允许不得用于其他用途。



谢谢！

本文仅供学习交流，未经IDAE-China许可，谢绝转载和其他用途。