



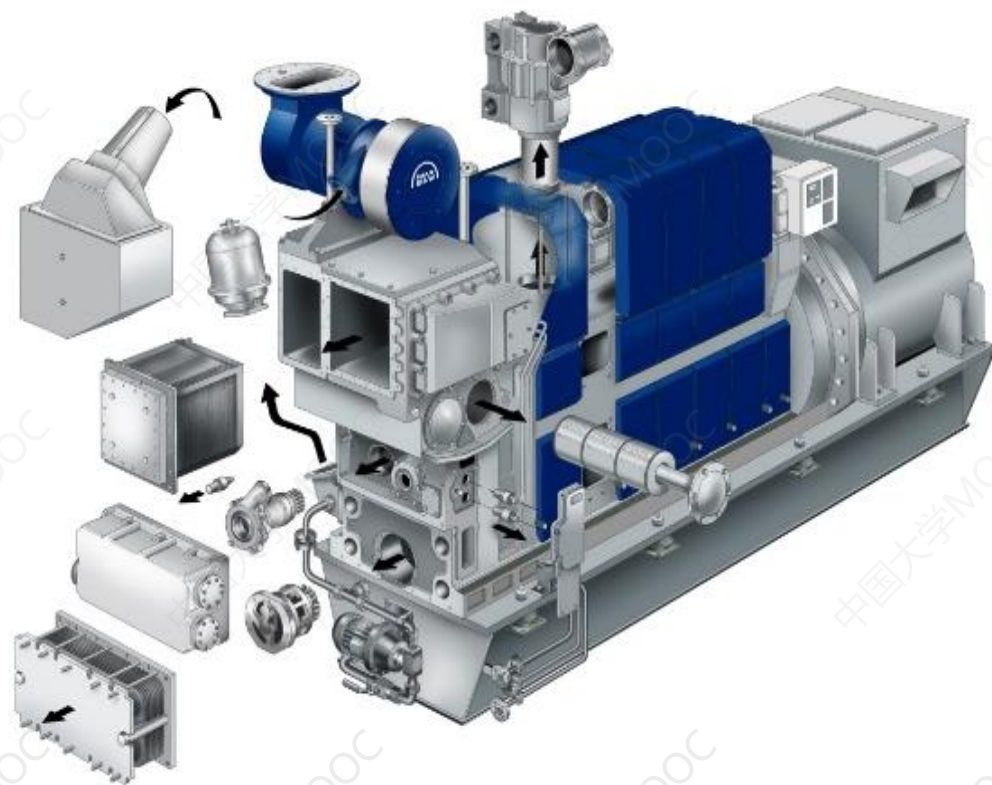
大连海事大学
DALIAN MARITIME UNIVERSITY

船舶电控发动机
数字课程

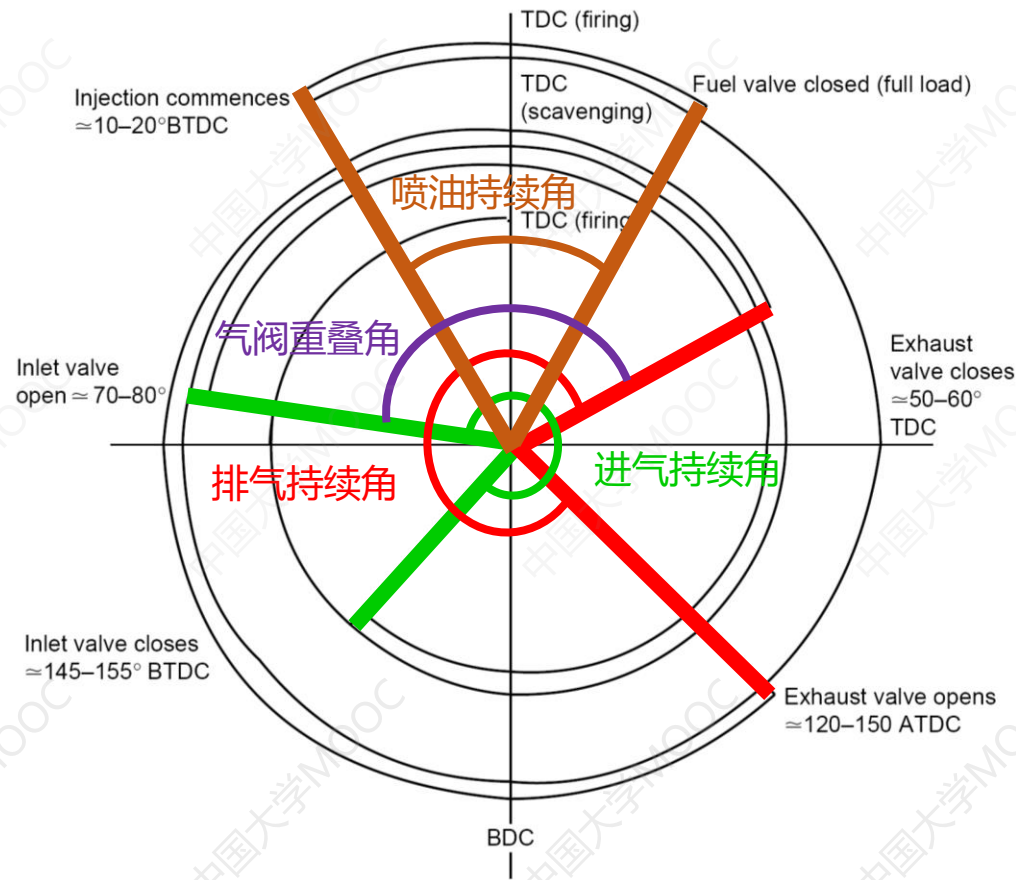
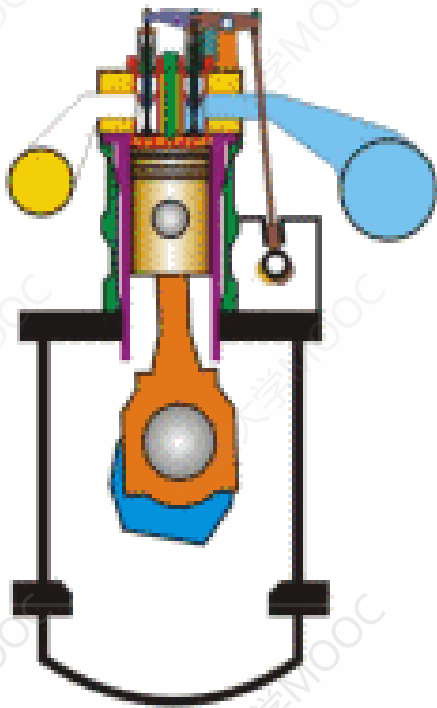
#2 筒形活塞式柴油机

Acknowledgements: The technical contents of this presentation are mainly from the websites and training files of Wärtsilä, Daihatsu and MAN Energy Solutions. Many thanks to them.
Contact us: dmumde@163.com

- 结构与部件
- 润滑与冷却
- 燃油喷射系统
- 换气与增压
- 起动与调速



• 筒形活塞式柴油机



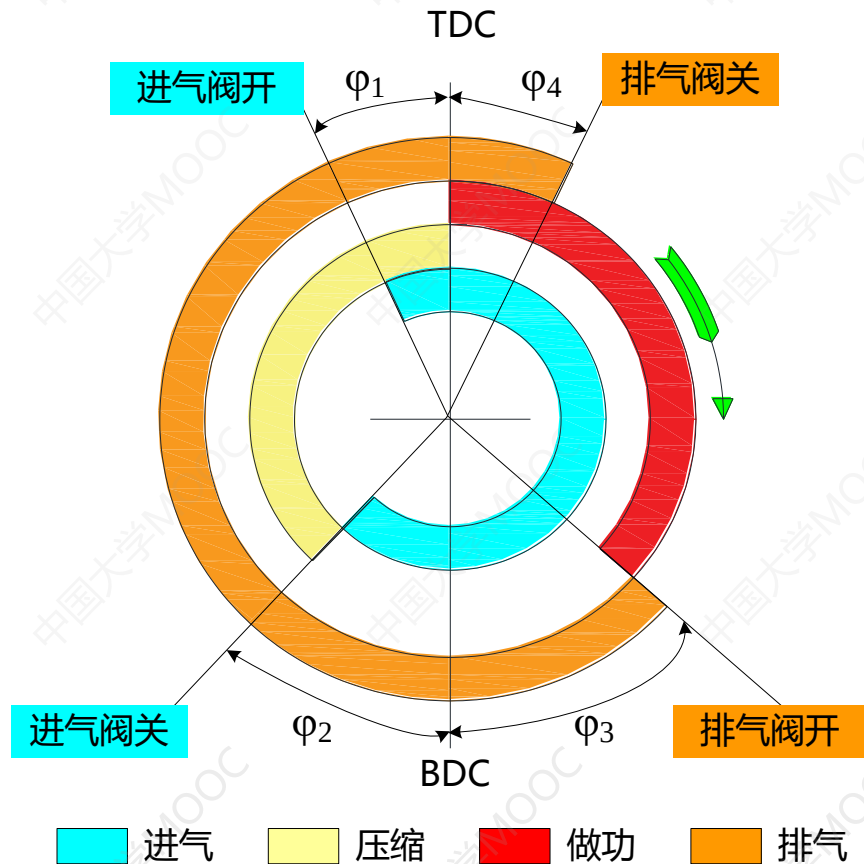
※ 换气过程

• 基本术语

- 进气提前角 φ_1
- 进气滞后角 φ_2
- 排气提前角 φ_3
- 排气滞后角 φ_4
- 气阀重叠角($\varphi_1 + \varphi_4$)

• 换气过程

- 自由排气阶段
- 强制排气阶段
- 进气阶段
- 气阀重叠和燃烧室扫气



- 评价指标

- 残余废气系数 $\gamma_r = G_r/G_0$

- 充量系数(充气效率) $\varphi_c = G_0/G_s$ (充量系数小于1)

- 扫气效率 $\eta_s = G_0/G_a$

- 扫气系数 $\varphi_s = G_k/G_0$

- 给气比(扫气过量空气系数) $\beta = G_k/G_s$

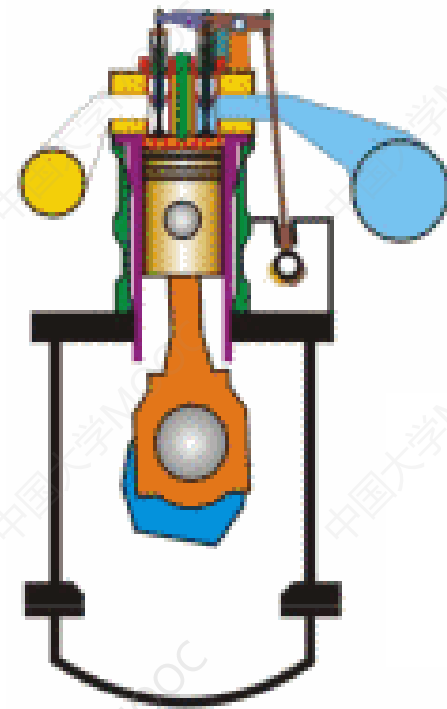
- G_0 -充入气缸的新鲜空气量

- G_r -缸内残存的废气量

- G_s -理论充气量

- G_a -气缸内全部气体量

- G_k -通过扫气口的全部扫气空气量



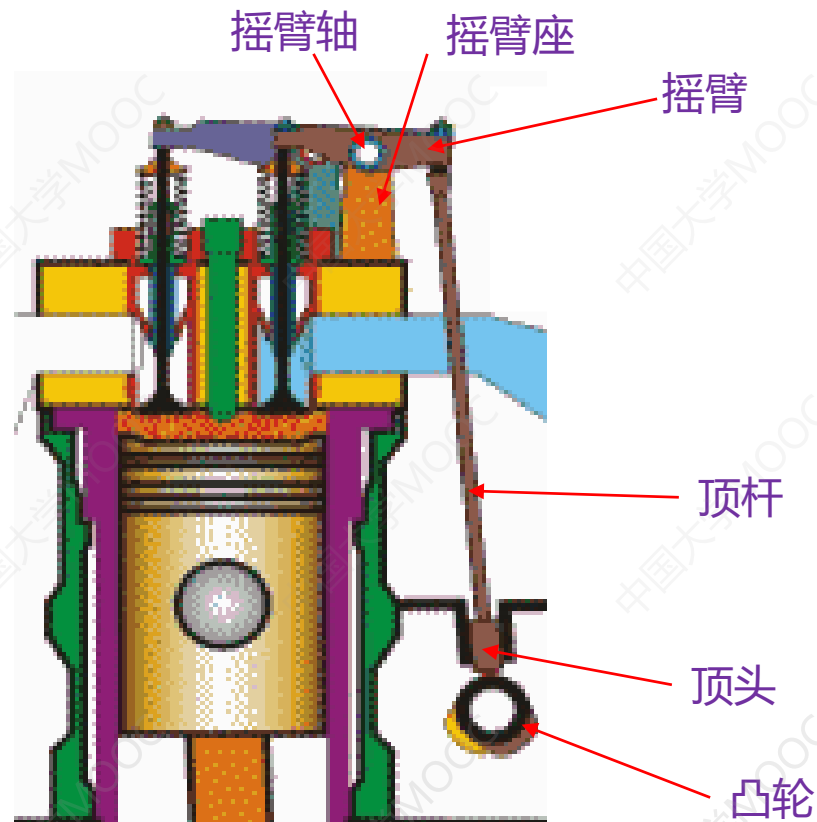
※ 换气机构

• 换气机构

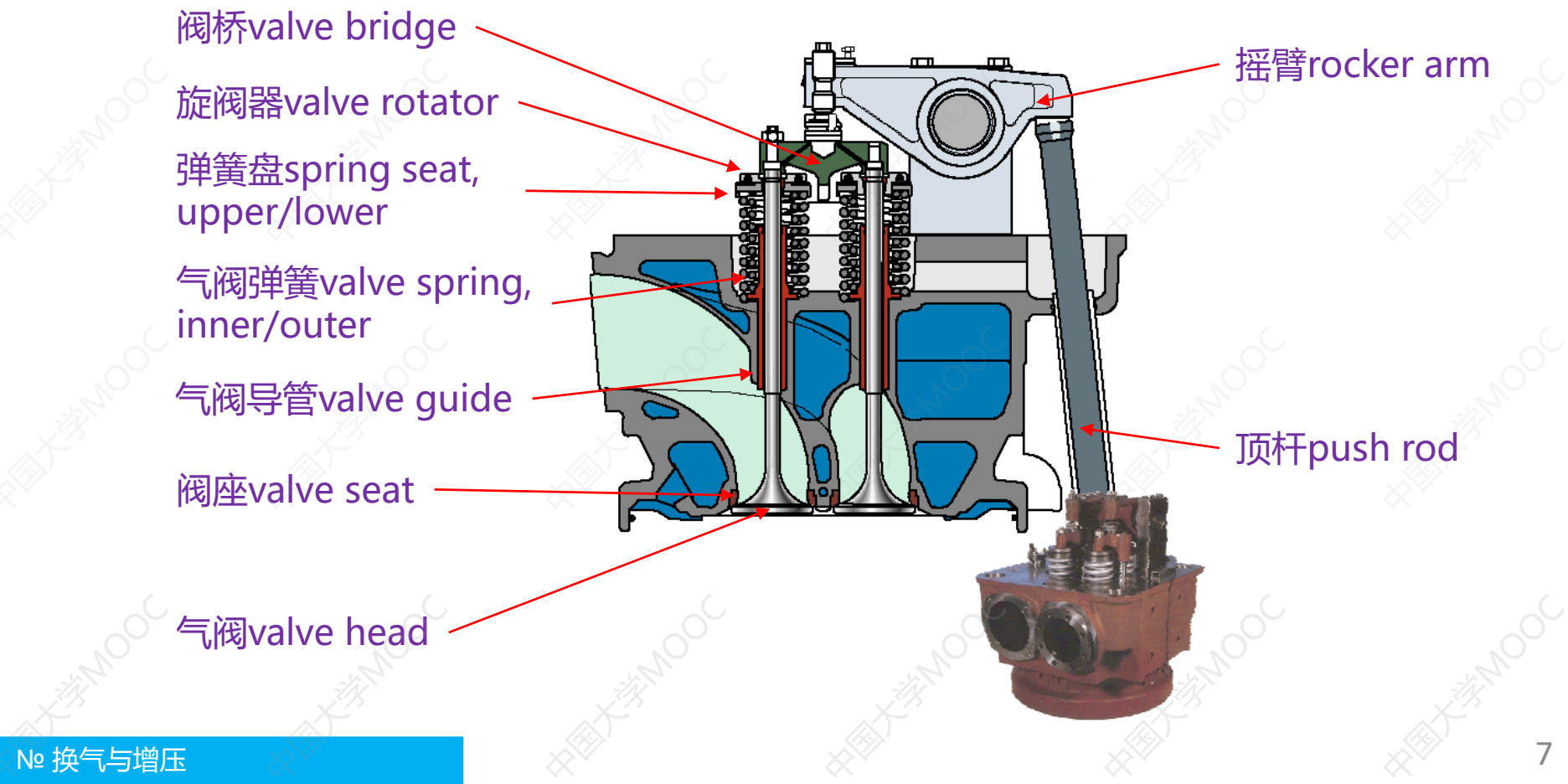
- 保证柴油机按规定的顺序和时刻完成进排气过程的机构
- 确保柴油机工作过程连续和完善

• 组成

- 气阀机构
- 气阀传动机构
- 凸轮轴和凸轮轴传动机构



※ 换气机构，气阀机构



- 工作条件

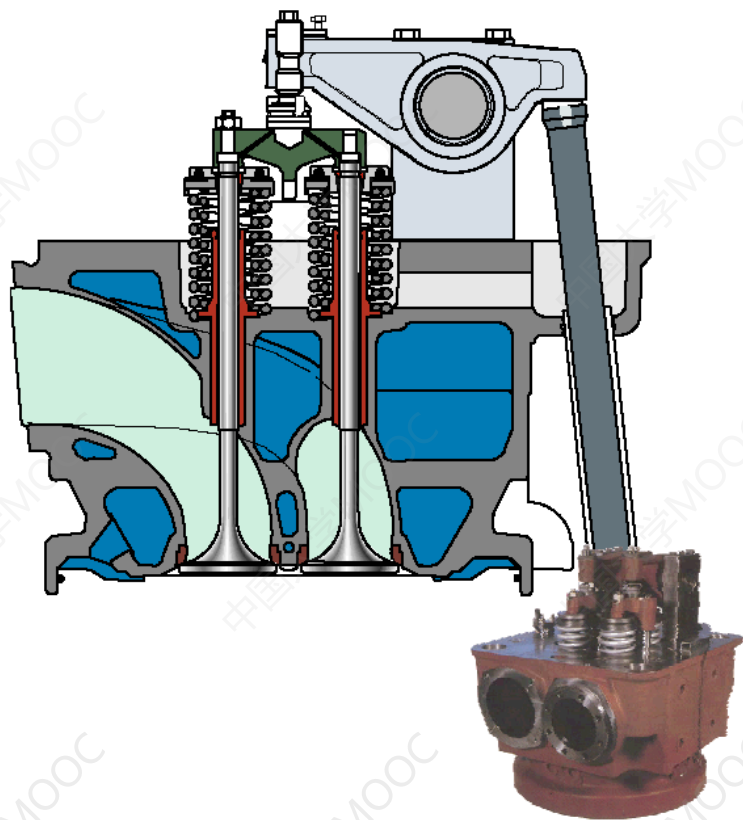
- 高温、高压、撞击、磨损、腐蚀
- 排气阀盘 $650^{\circ}\text{C}\sim 800^{\circ}\text{C}$ ，阀杆 $150^{\circ}\text{C}\sim 250^{\circ}\text{C}$
- 进气阀盘 $450^{\circ}\text{C}\sim 500^{\circ}\text{C}$ ，阀杆 $100^{\circ}\text{C}\sim 120^{\circ}\text{C}$

- 材料

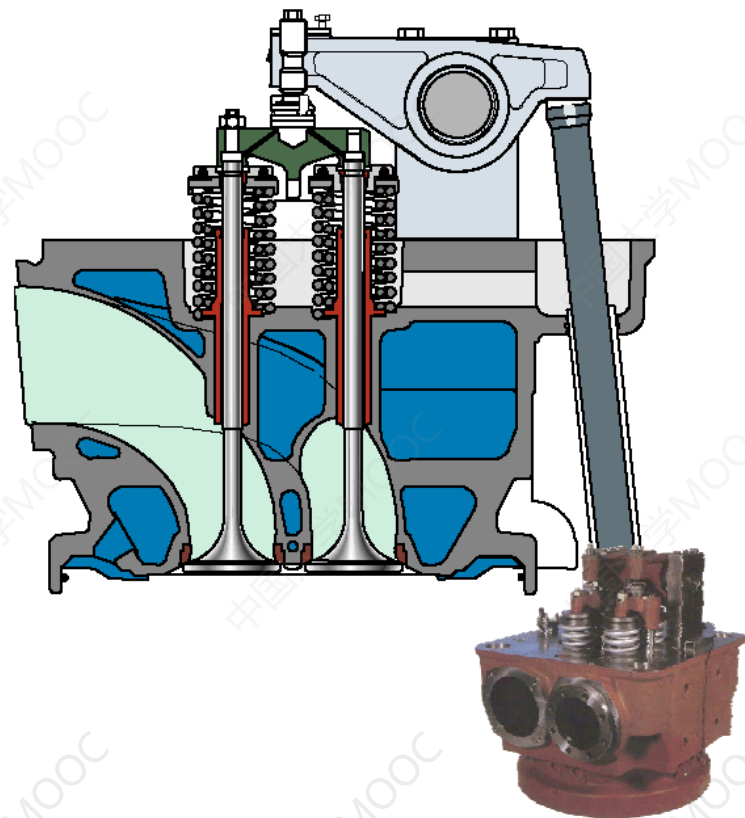
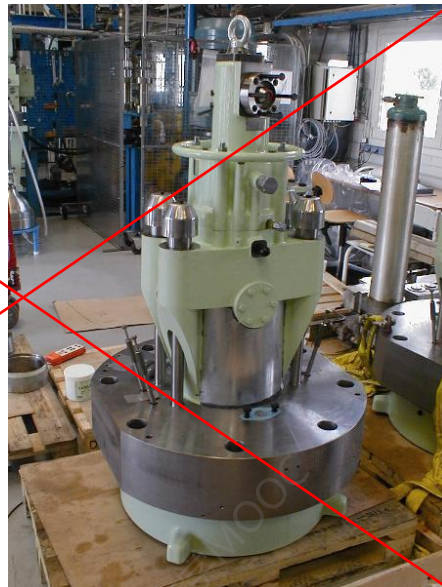
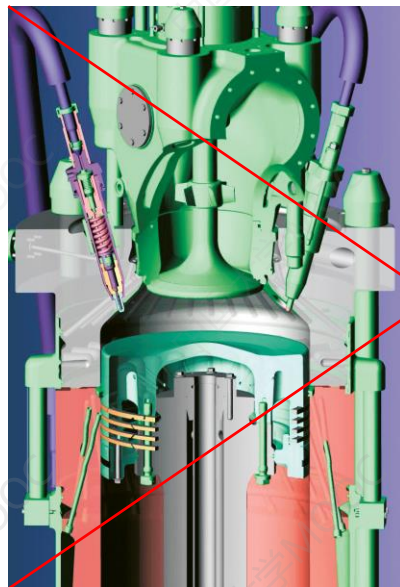
- 耐热合金钢，堆焊钴基硬质合金(stellite)

- 工艺

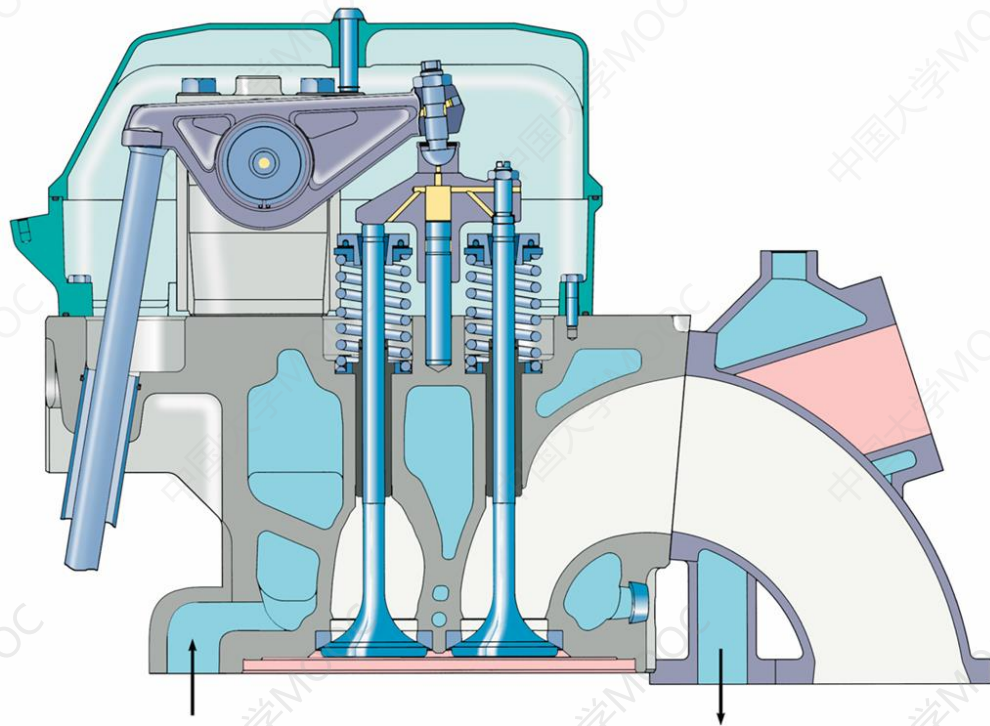
- 阀杆：氮化、镀铬、滚压、抛光
- 阀座：钻孔水冷
- 开空气槽-2S



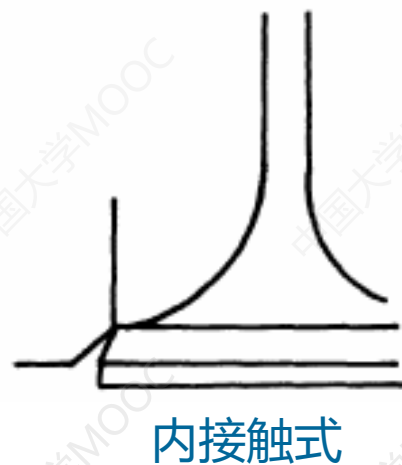
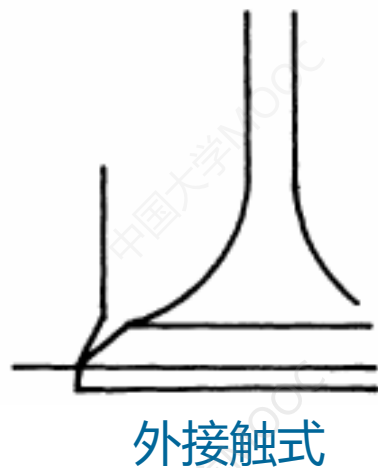
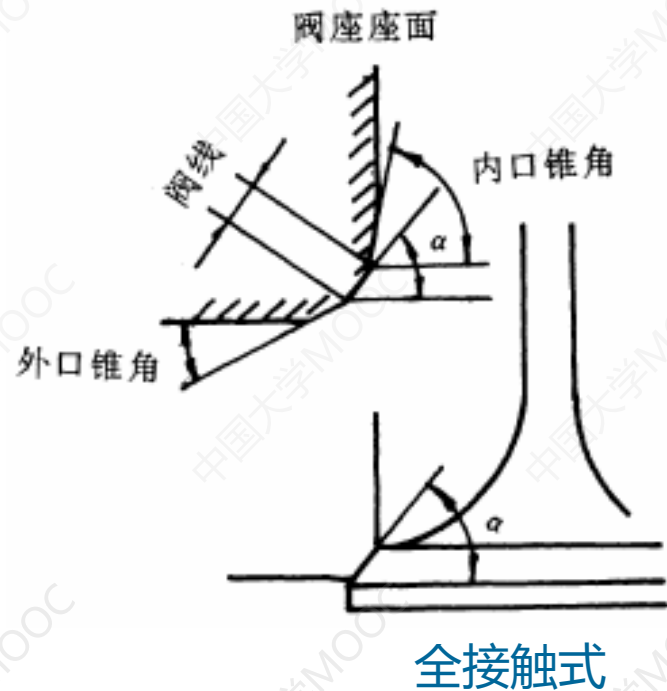
- 气阀机构的类型
 - 不带阀壳
 - 带阀壳



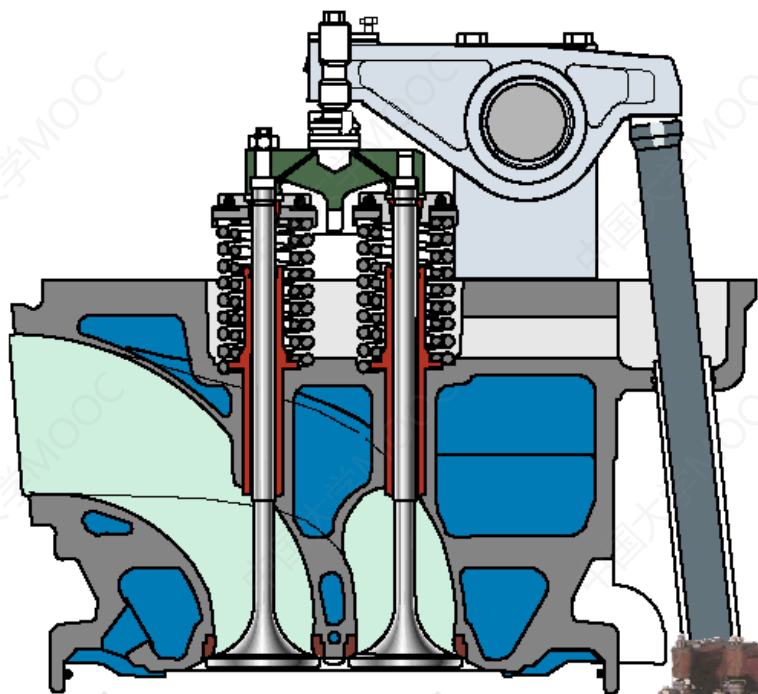
• 气阀 & 阀座



- 气阀的阀面与阀座的配合：阀面锥角 α 通常为 30° 或 45°



- 气阀导管valve guide
 - 承受摇臂侧推力
 - 承担气阀25%的散热
 - 间隙过小，气阀的动作迟滞甚至咬死
 - 间隙过大，则散热不良，横向振动和漏气加剧
 - 导管和阀杆之间的润滑条件较差，导管很容易磨损

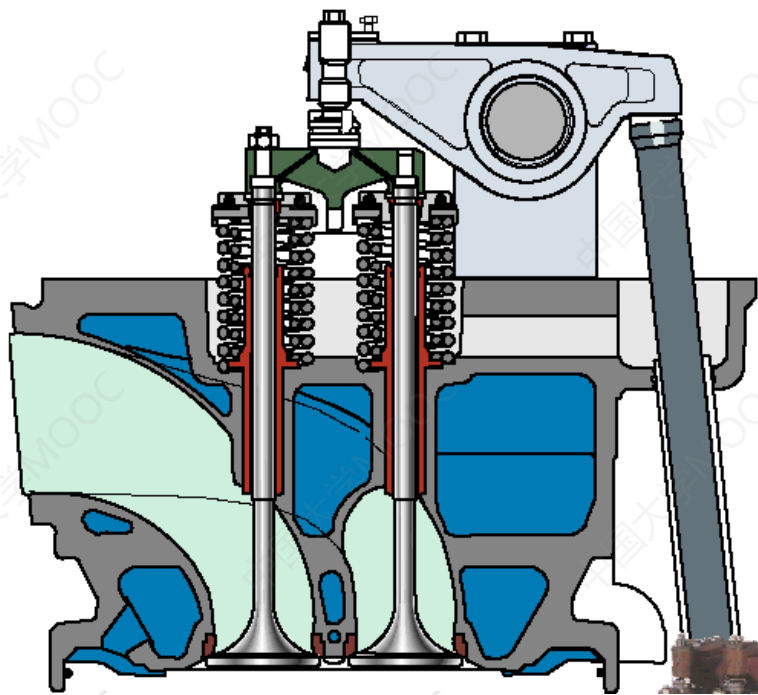


- 气阀弹簧valve spring

- 机械弹簧---4S柴油机进排气阀

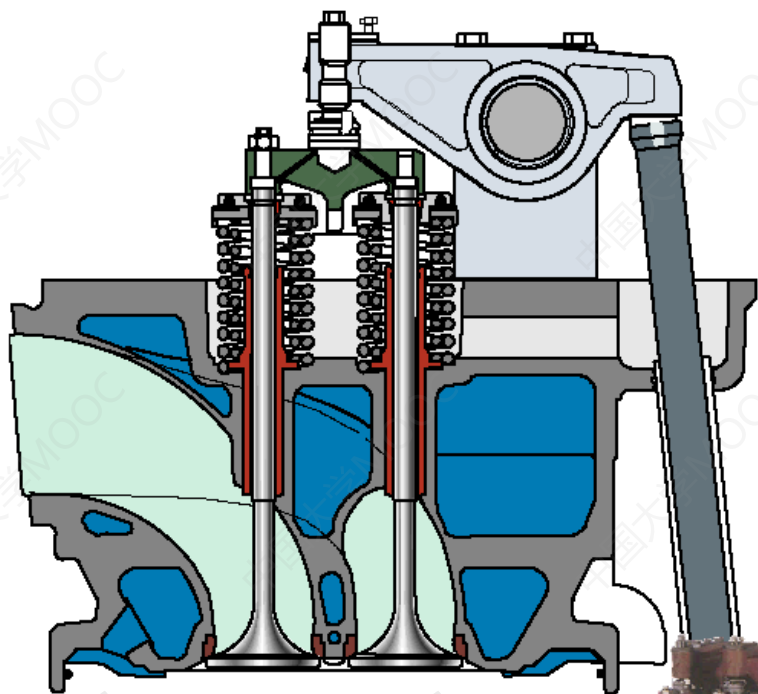
- 内、外两根，旋向相反
- 弹簧较小，疲劳强度高，工作可靠性提高
- 自振频率不同，互相干扰，可以减振
- 可以防止一根弹簧断裂后卡进另一根弹簧
- 可减少阀开关时由于弹簧的扭转作用而发生的自动研磨

- 空气弹簧---直流扫气2S柴油机排气阀



- 旋阀器valve rotator

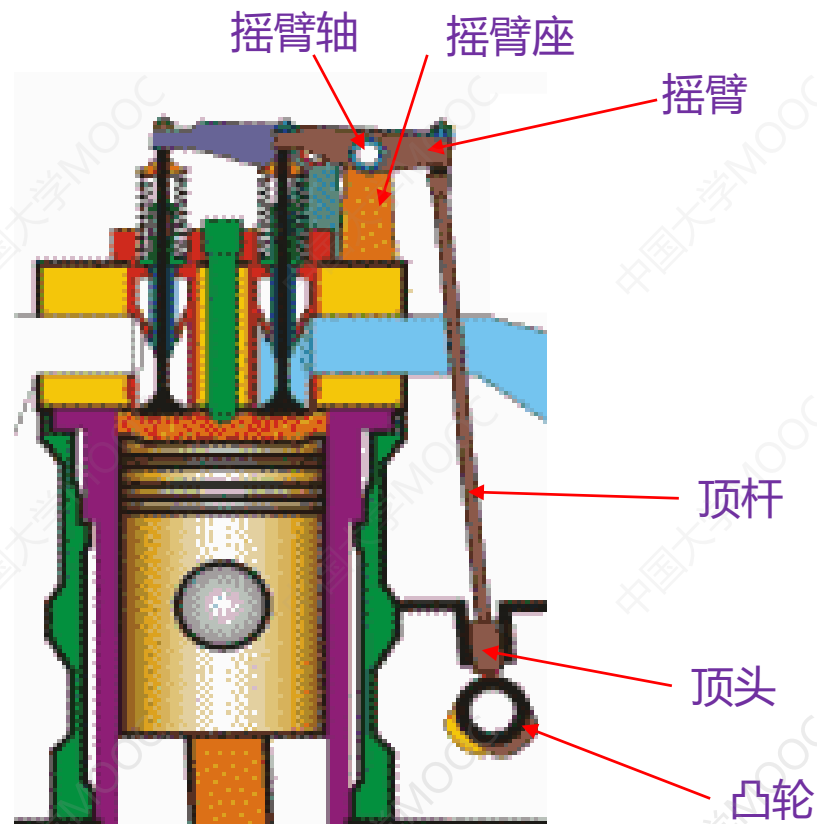
- 使排气阀在开关过程中慢慢转动
- 减少阀面与阀座上的积炭，使磨损减小，贴合严密
- 可以使阀盘均匀地接受热量和散热，以改善阀盘的热应力状态
- 消除阀杆与导管之间的积炭，防止卡住



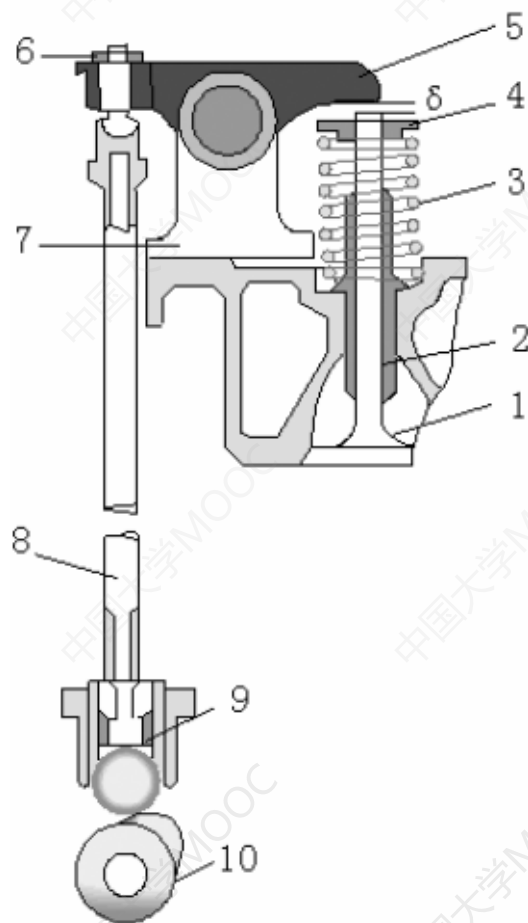
• 机械式气阀传动机构-4S

- 滚轮
- 顶头
- 顶杆
- 调节螺栓
- 摇臂
- 摇臂轴
- 摇臂支座等

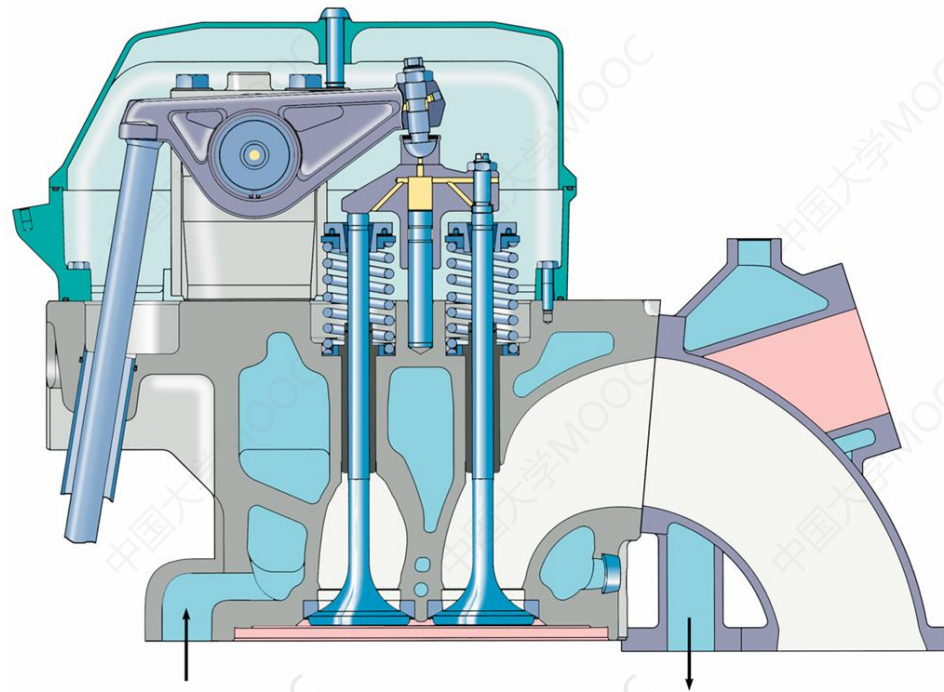
• 液压式气阀传动机构-2S



- 气阀间隙 δ
 - 柴油机在冷态下
 - 凸轮在基圆上
 - 阀杆顶部与摇臂端部之间的间隙
- 热胀间隙!!
 - 气阀间隙过小?
 - 气阀间隙过大?
- 通常, 30-80 μm
- 大型机间隙 > 小型机间隙
- 排气阀间隙 > 进气阀间隙



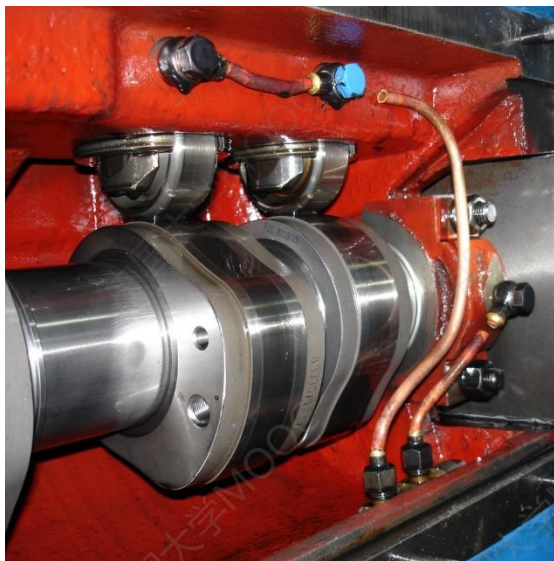
- 气阀间隙---双气阀



※ 换气机构，凸轮轴及其传动机构

• 凸轮轴

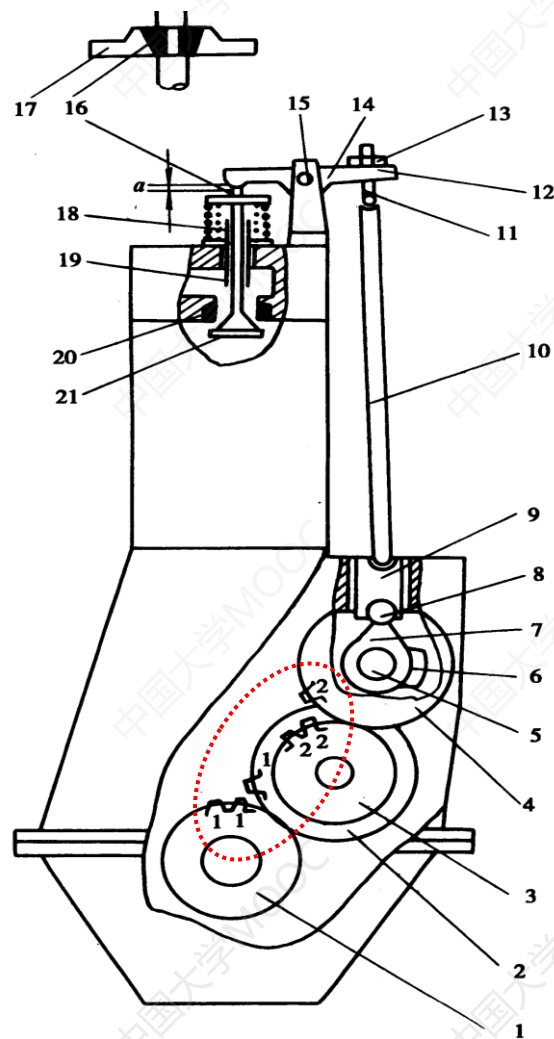
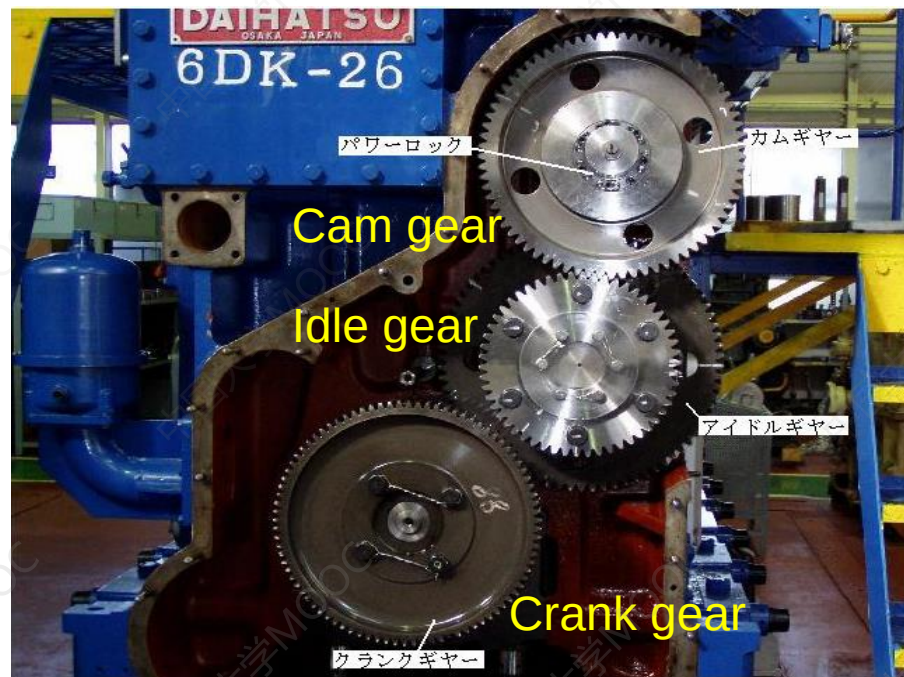
- 控制柴油机中需要定时的设备(喷油泵、进气阀、排气阀、空气分配器), 使它们按照一定的工作顺序准确地工作
- 凸轮轴的结构有整体式和装配式两大类



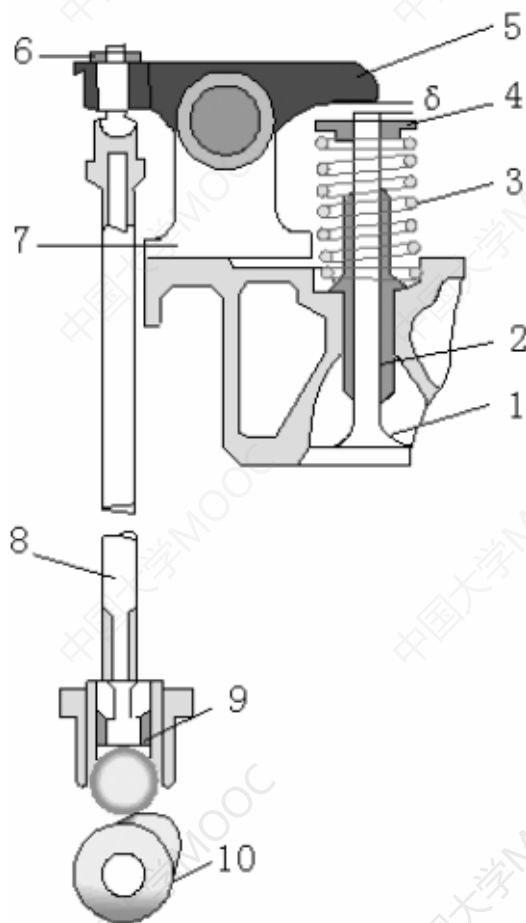
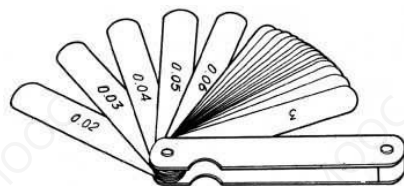
※ 换气机构，凸轮轴及其传动机构

• 凸轮轴传动机构

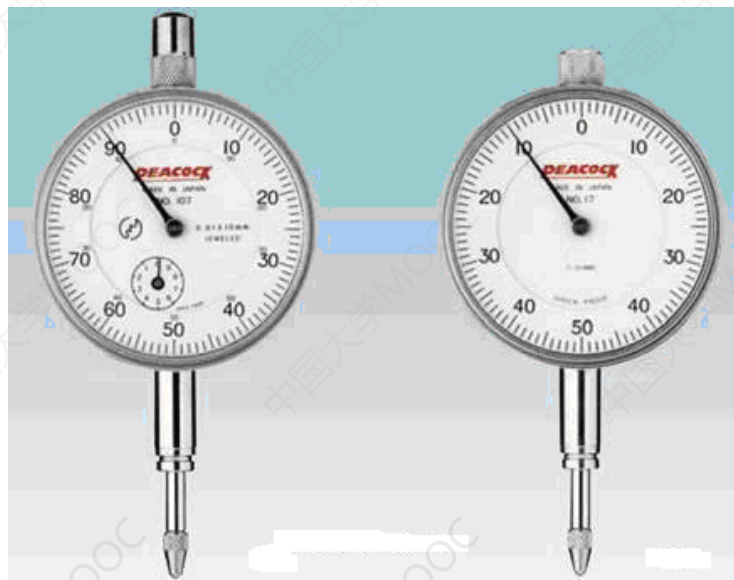
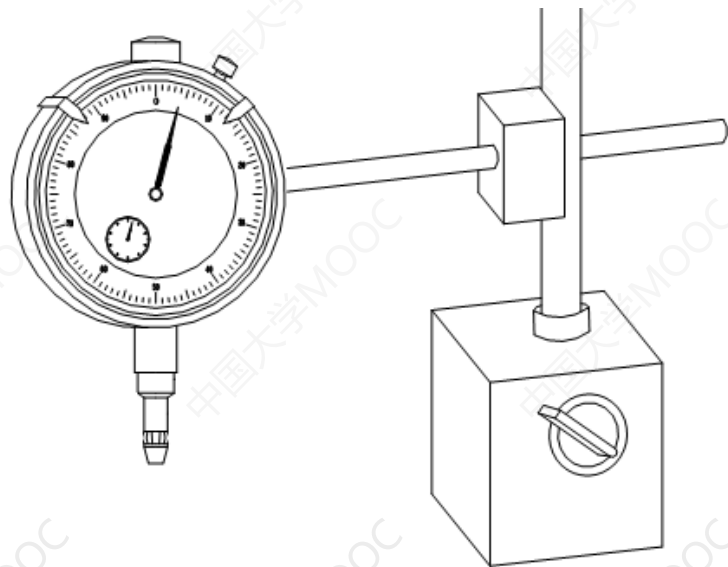
○重要: 齿轮啮合位置!!



The image contains two technical diagrams of a diesel engine's fuel injection system. The left diagram is a cross-sectional view of the cylinder head and valves, showing the fuel injection pump assembly. The right diagram is a detailed view of the fuel injection pump assembly, showing the fuel injection pump body (1), fuel injection pump plunger (2), fuel injection pump needle (3), fuel injection pump needle valve (4), fuel injection pump needle valve seat (5), fuel injection pump needle valve spring (6), fuel injection pump needle valve spring retainer (7), fuel injection pump needle valve spring retainer pin (8), fuel injection pump needle valve spring retainer pin (9), and fuel injection pump needle valve spring retainer pin (10).

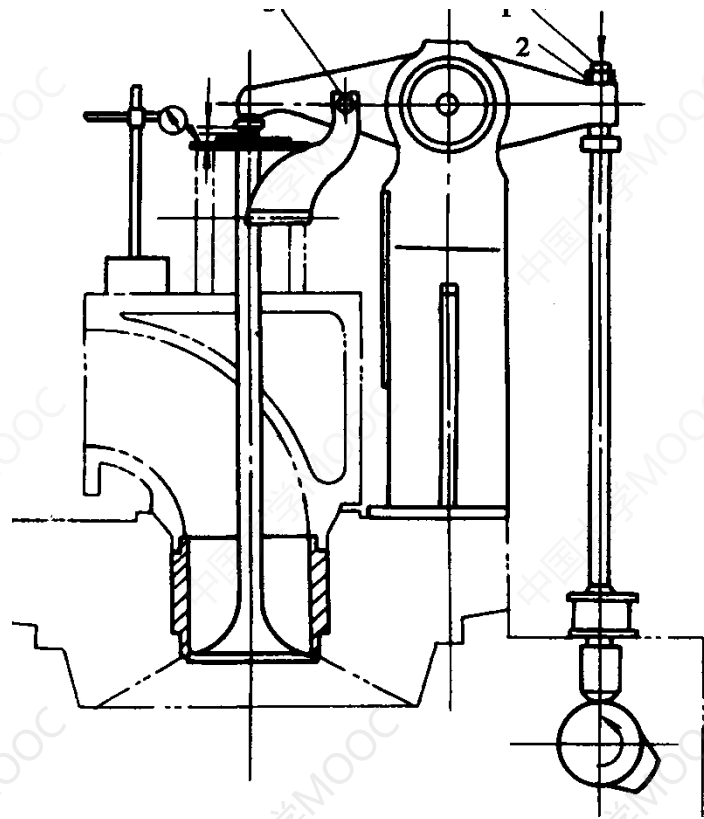
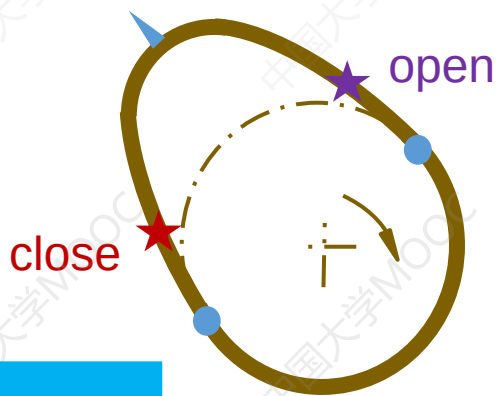


- 气阀定时的检查与调整
 - 千分表+磁性表座

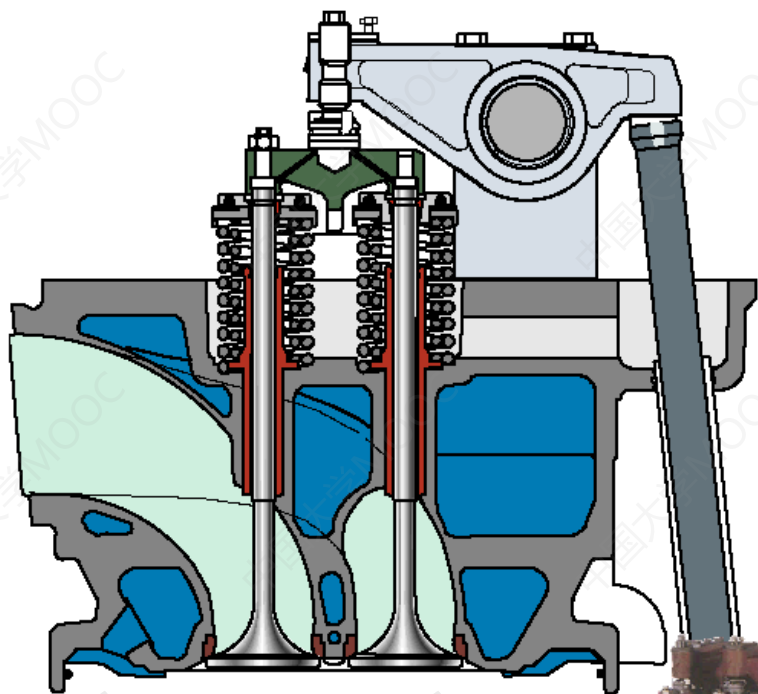


• 气阀定时的检查与调整

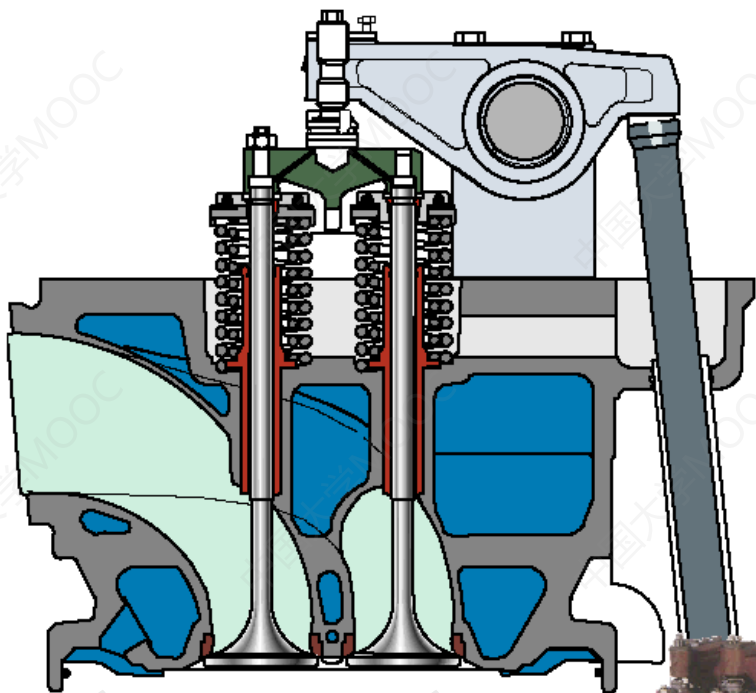
- 气阀间隙调整好后, 盘车至凸轮基圆, 在气缸盖上放千分表架, 将千分表的触头压在气阀弹簧盘上(较大的预压缩量!!)
- 缓慢盘车, 千分表指针刚刚移动/回到原位时刻就是气阀开/关的时刻
- 飞轮上相应角度就是气阀定时角度



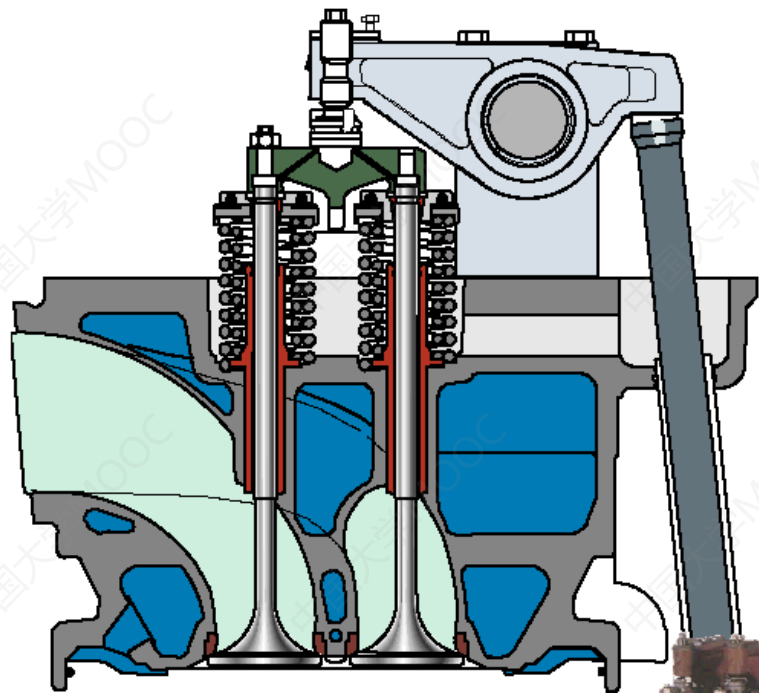
- 阀面与阀座的磨损和腐蚀
 - 阀面和阀座密封面上有伤痕和麻点
 - 阀面与阀座的烧损
 - 阀座扭曲、偏移、倾斜和失圆



- 阀杆卡紧
 - 间隙过小
 - 间隙过大滑油结焦
 - 中心线不正
- 阀杆和阀头断裂
 - 频繁撞击引起金属疲劳
- 气阀弹簧断裂
 - 气阀弹簧断裂多是因为振动造成的
- ❖ 阀壳产生裂纹
 - 阀壳裂纹通常是由于安装时将固定螺栓拧得太紧造成

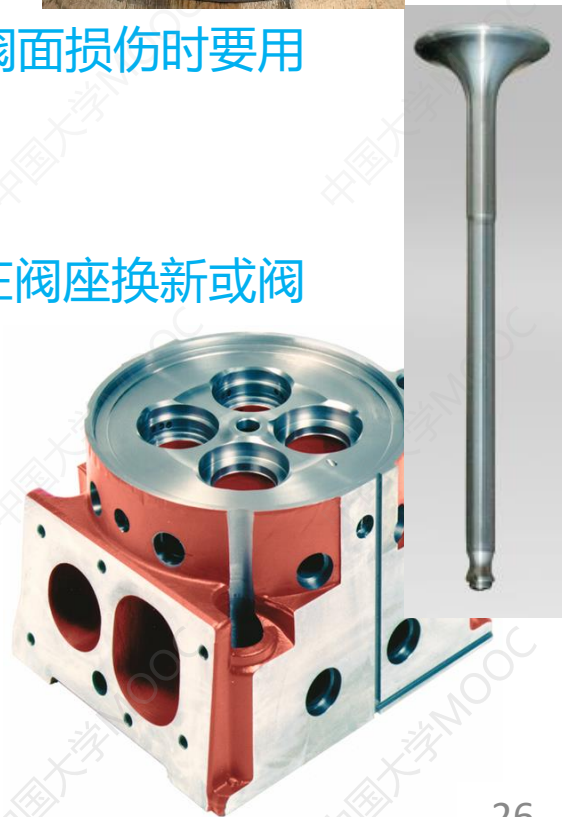


• 气阀和阀座的拆卸

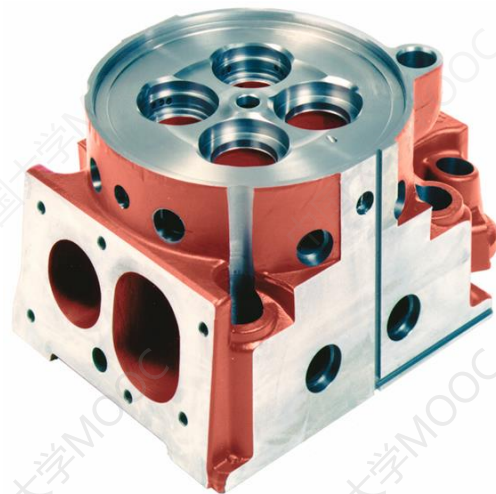


• 气阀和阀座的研磨

- 小型柴油机气阀阀座损伤时，要用专用铰刀修整，阀面损伤时要用专用磨床研磨，然后再用细研磨砂对研(> 45 min)
- 研磨后阀面上应研出暗色连续等宽度阀线
- 中、大型柴油机阀座和气阀配有专用研磨工具，在阀座换新或阀座损伤时，要用专用工具研磨阀座
- 无法修复、磨损过大的气阀应换新



- 气阀和阀座研磨效果的检查
 - 红油法
 - 铅笔划线法
 - 煤油渗漏法



※ 增压Supercharging

- $P_e \propto D^2 \cdot S \cdot i \cdot n \cdot m \cdot p_e$
- 提高柴油机有效功率的途径
 - 改变柴油机结构参数*i*、*D*、*S*
 - 提高柴油机的转速*n*和每转工作循环数*m*
 - 提高平均有效压力*p_e*

- 增压

- ❖ 就是用提高气缸进气压力的方法，使进入气缸的空气密度增加，从而可以增加喷入气缸的燃油量，以提高柴油机的平均有效压力 p_e ，并最终提高柴油机的功率 P_e
- 机械增压---即增压器直接由柴油机驱动
- 废气涡轮增压---即利用柴油机排出的废气吹动涡轮机，由涡轮机带动增压器
- 复合增压---既采用涡轮增压，又采用机械增压

- 中冷

- 降低空气温度，提高空气密度
- 降低柴油机的循环平均温度

※ 增压Supercharging

- 增压比 π_b : $\pi_b = p_k / p_o$
 - ❖ p_k -增压压力; p_o -环境大气压力或增压器进口压力
 - 低增压 $p_k \leq 0.15\text{MPa}$
 - 中增压 $p_k = 0.15 \sim 0.25\text{MPa}$
 - 高增压 $p_k = 0.25 \sim 0.35\text{MPa}$
 - 超高增压 $p_k > 0.35\text{MPa}$
- 现代船用低速柴油机的增压压力在0.3MPa上下

- 废气能量分析

- ❖ 柴油机排出的废气所含的热量约占燃油燃烧放出热量的30%以上，而排气的可用能又占排气总能量的约60%

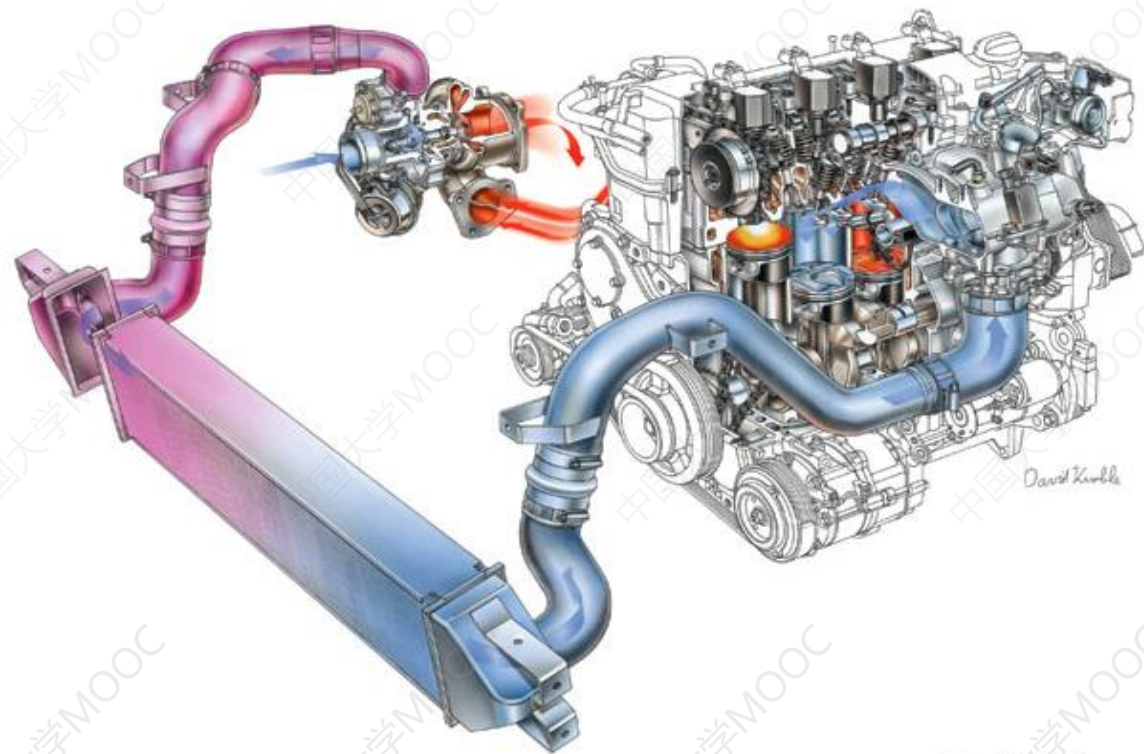
- 脉冲能 E_1

- 定压能 E_2

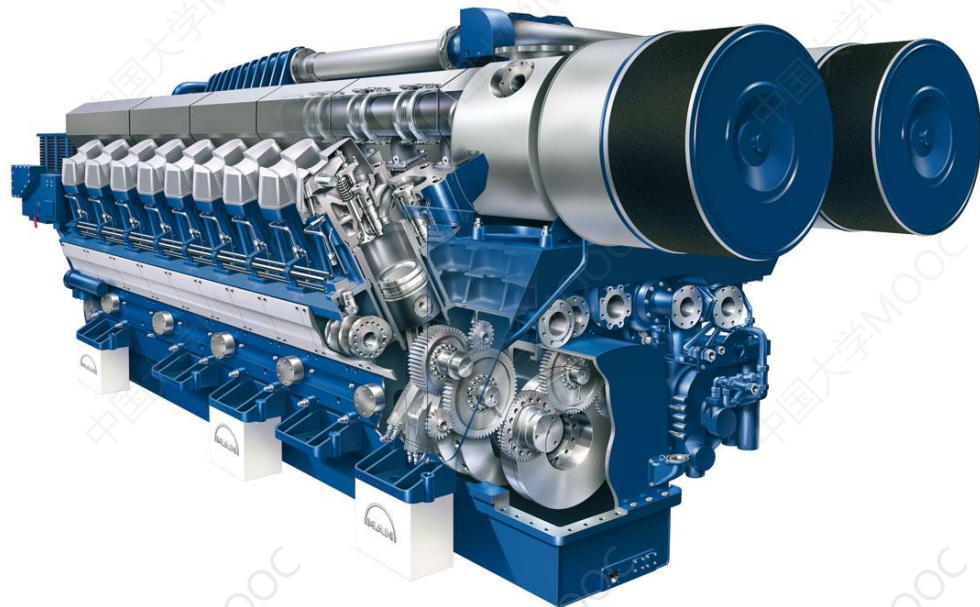
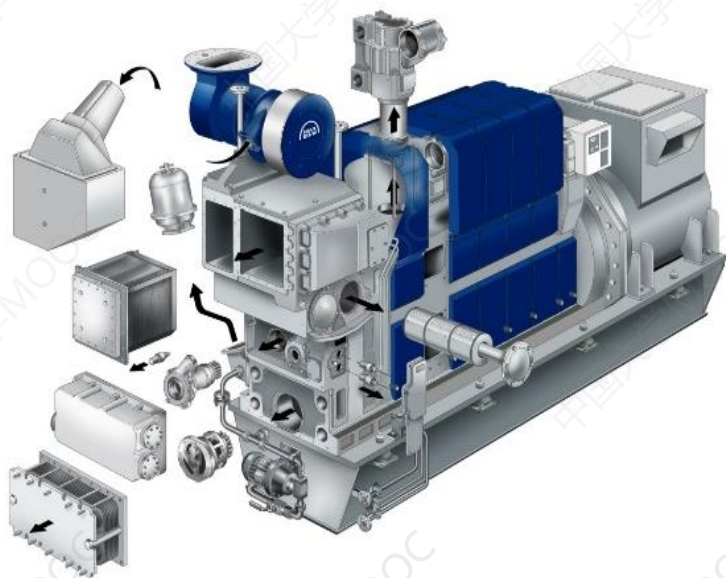
- 随着增压压力 p_k 增加， E_2 所占的比重越大

※ 废气涡轮增压Turbocharging

- 废气涡轮增压&中冷

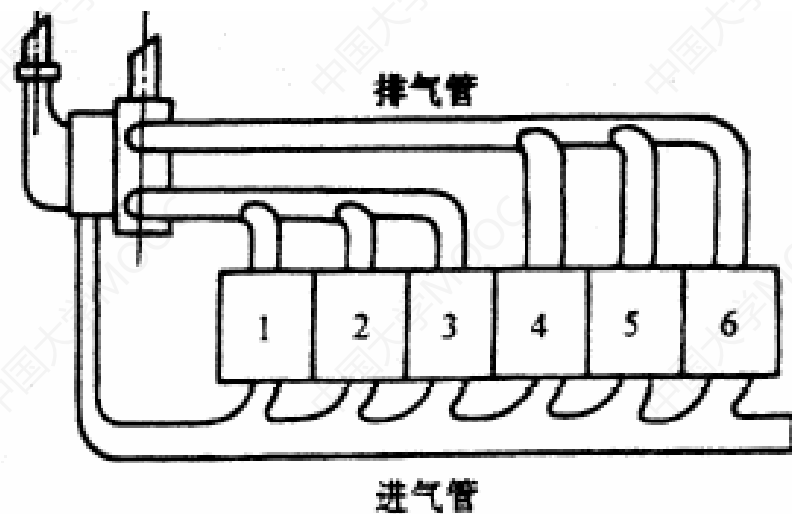
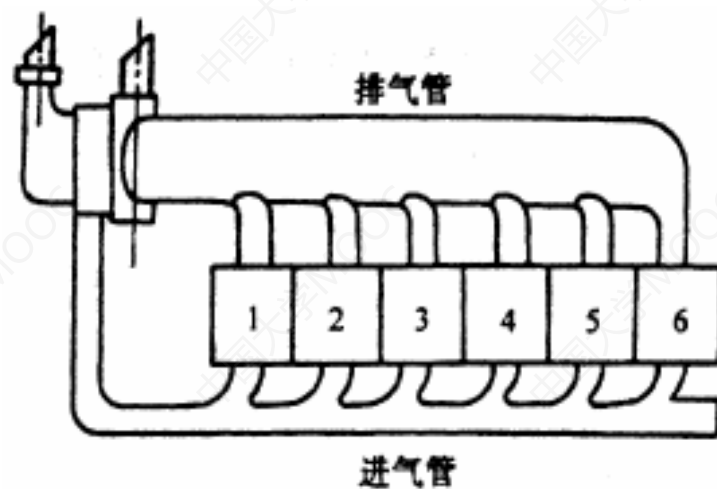


- 废气涡轮增压&中冷



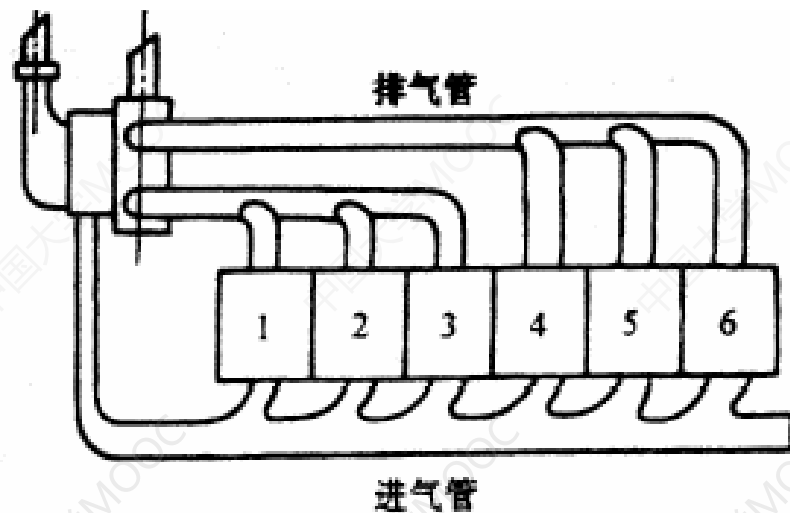
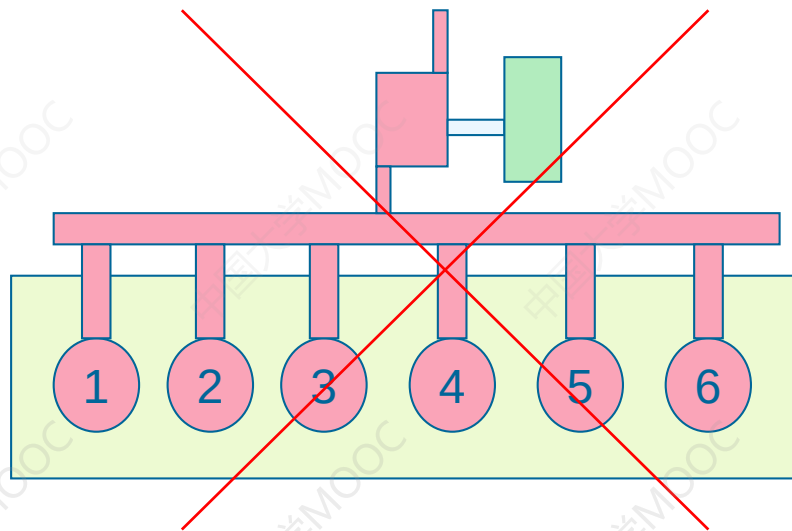
- 柴油机的废气涡轮增压系统中，根据对废气能量利用方式的不同，可分为两种基本形式
 - ~~一定压涡轮增压: 2-S~~
 - 脉冲涡轮增压: 4S
- 其它增压形式: 4-S
 - 脉冲转换增压
 - 多脉冲增压
 - 模件式脉冲转换增压

• 定压涡轮增压 vs. 脉冲涡轮增压



• 脉冲涡轮增压

- 为避免各缸排气、扫气的互相干扰, 排气管必须分组!!
- e.g., 1-5-3-6-2-4, 互相干扰: 2-S?; 4-S?



- 脉冲涡轮增压

- 为避免各缸排气、扫气的互相干扰, 排气管必须分组!!

- 2-S柴油机

- 同组最多允许气缸数: $i=360/120=3$

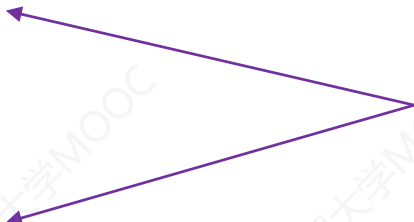
- 采用多台增压器方案

- 4-S柴油机

- 同组最多允许气缸数: $i=720/240=3$

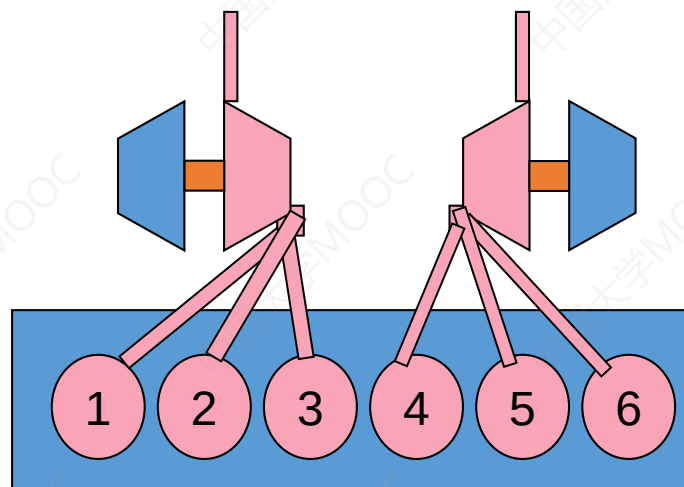
- 采用一台增压器、多进口布置方案

换气持续角!!

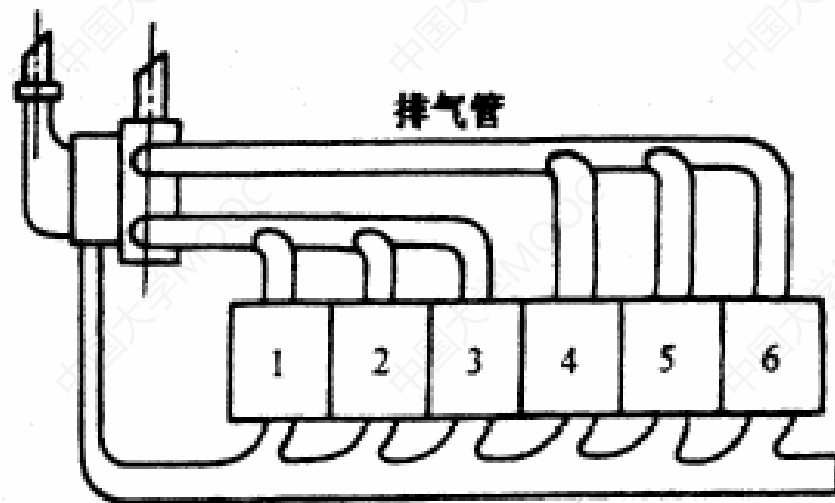


- 脉冲涡轮增压, 2-S vs. 4-S

- 为避免各缸排气、扫气的互相干扰, 排气管必须分组!!



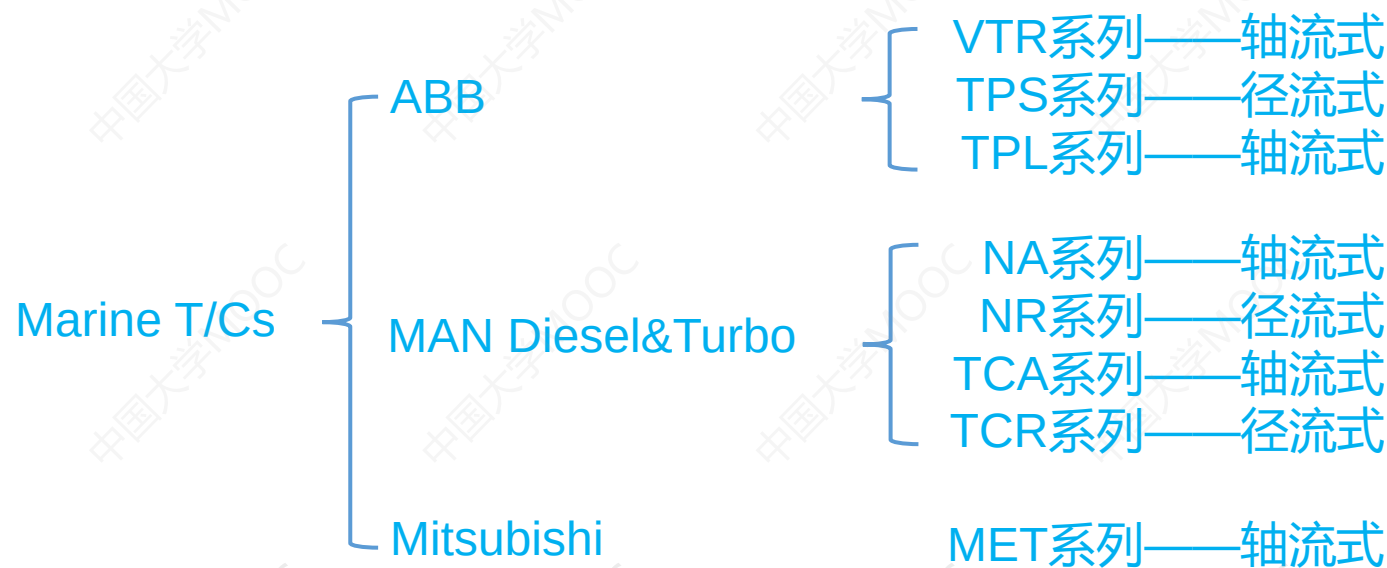
2-S机



进气管
4-S机

- 两种增压方式的比较
 - 废气能量的利用, 定压涡轮增压 < 脉冲涡轮增压
 - 涡轮的工作性能, 定压涡轮增压 > 脉冲涡轮增压
 - 增压系统的布置, 定压涡轮增压 > 脉冲涡轮增压
 - 维护管理的要求, 定压涡轮增压 < 脉冲涡轮增压
 - 柴油机加速及低负荷性能, 定压涡轮增压 < 脉冲涡轮增压
- 4-S筒形活塞式柴油机: 脉冲涡轮增压

- 船用增压器的主要品牌



※ 废气涡轮增压器Turbocharger

- 基本构成:

- 涡轮机---Turbine

- 轴流式涡轮机
- 径流式涡轮机

- 压气机---Compressor

- 离心式压气机

- 转子+轴承

- 滑动轴承

- 大、中型船用柴油机均采用轴流式涡轮增压器

- 中、小型船用柴油机均采用径流式涡轮增压器

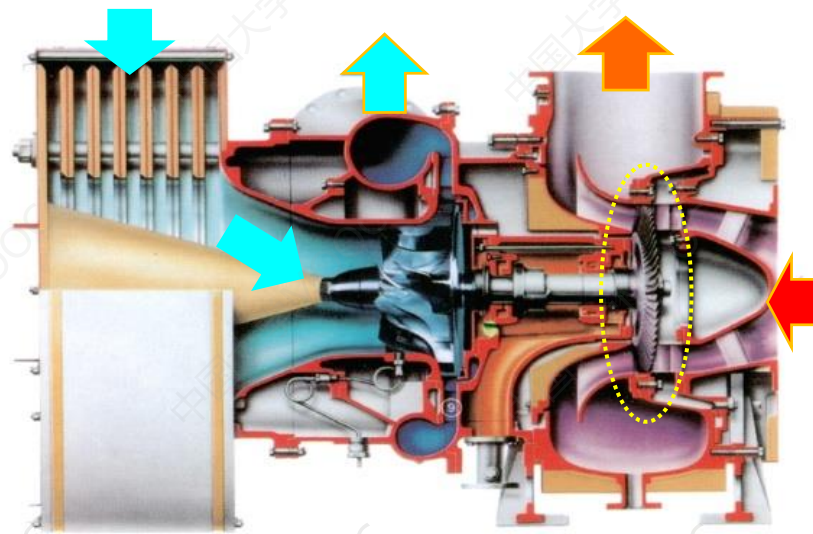


轴流式



径流式

• 轴流式 vs. 径流式废气涡轮增压器

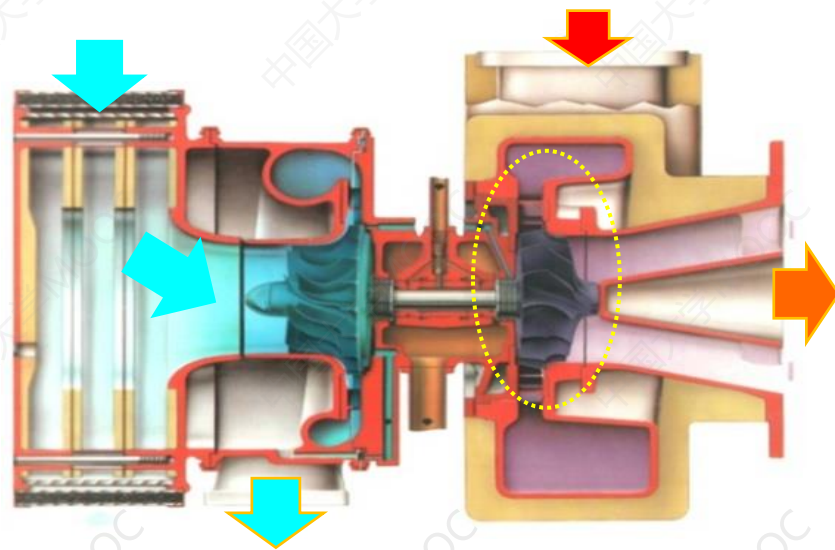


离心式压气机
(centrifugal compressor)

轴流式涡轮机
(axial turbine)

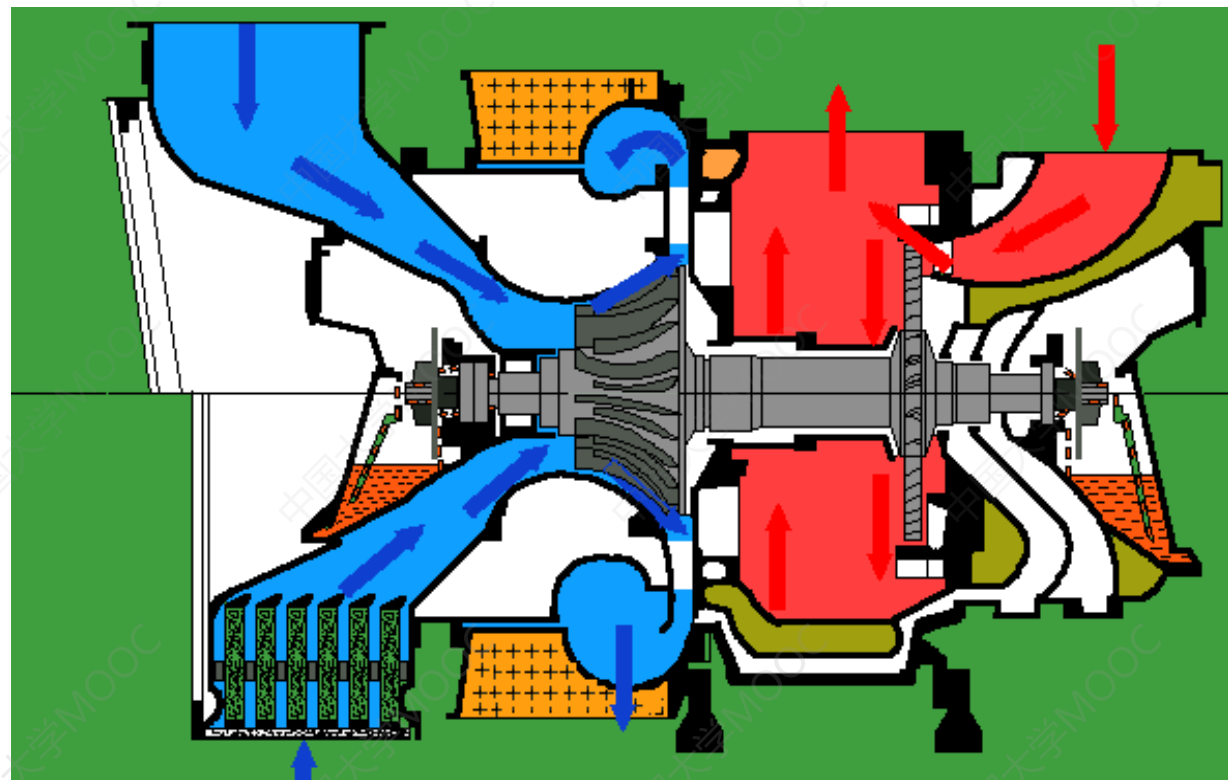
离心式压气机
(centrifugal compressor)

径流式涡轮机
(radial turbine)

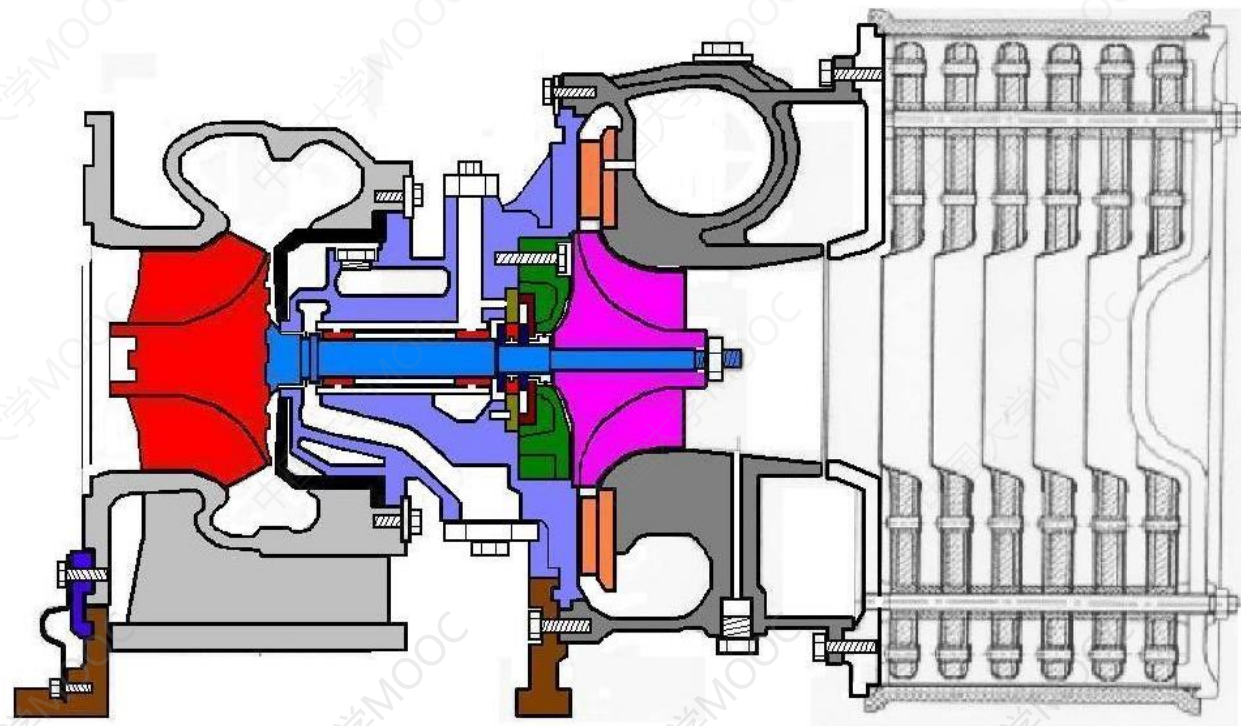


※ 废气涡轮增压器Turbocharger

• 轴流式废气涡轮增压器

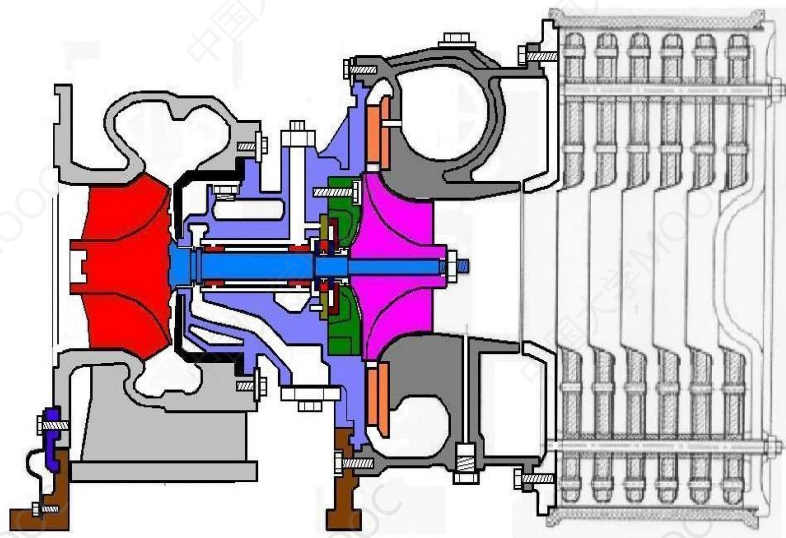


• 径流式废气涡轮增压器

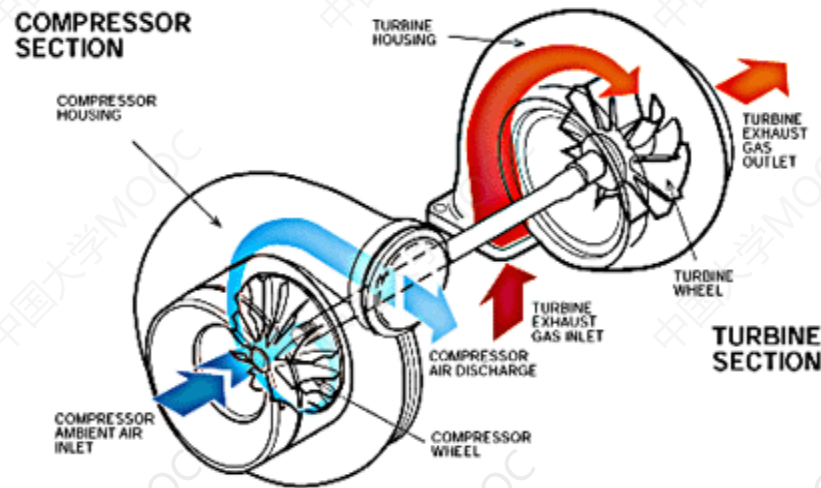


※ 废气涡轮增压器Turbocharger

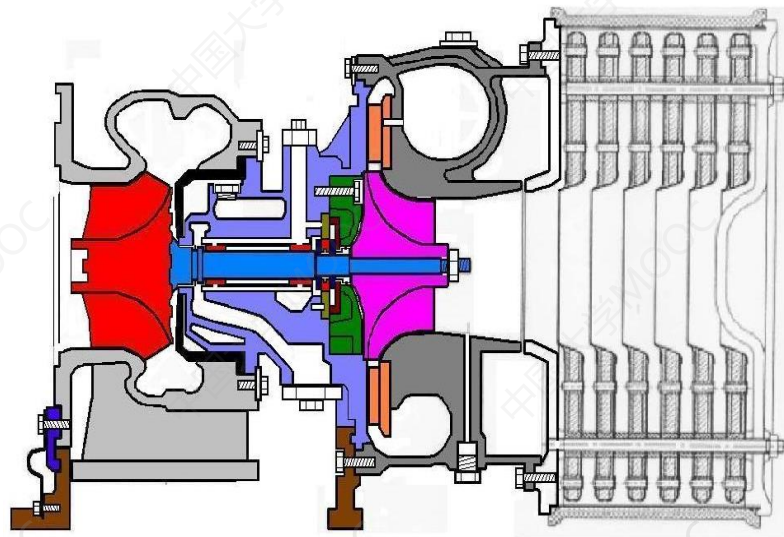
- 压气机组成：进气消音器、进气箱、压气机叶轮、扩压器、排气箱
- 涡轮机组成：涡轮进气箱、喷嘴环、工作叶轮、隔热墙、排气箱



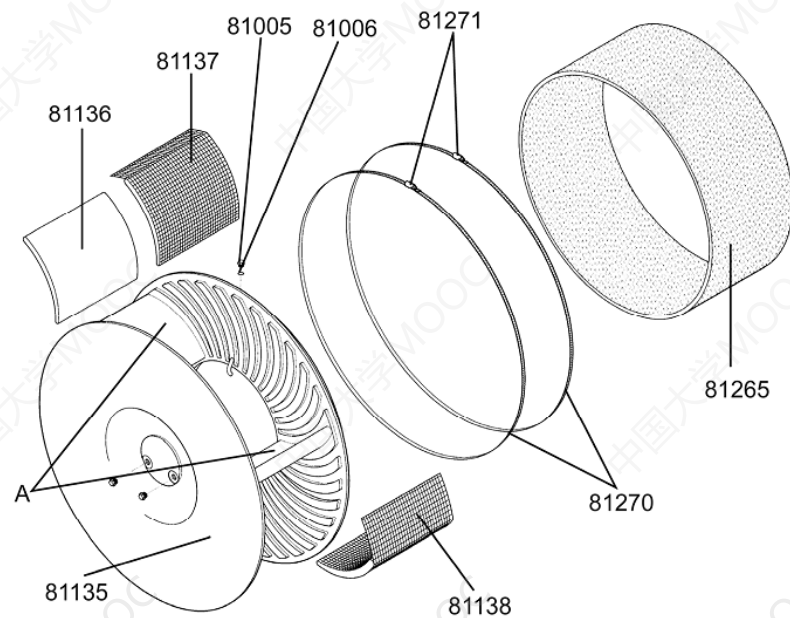
径流式废气涡轮增压器



• 压气机组成：进气消音器

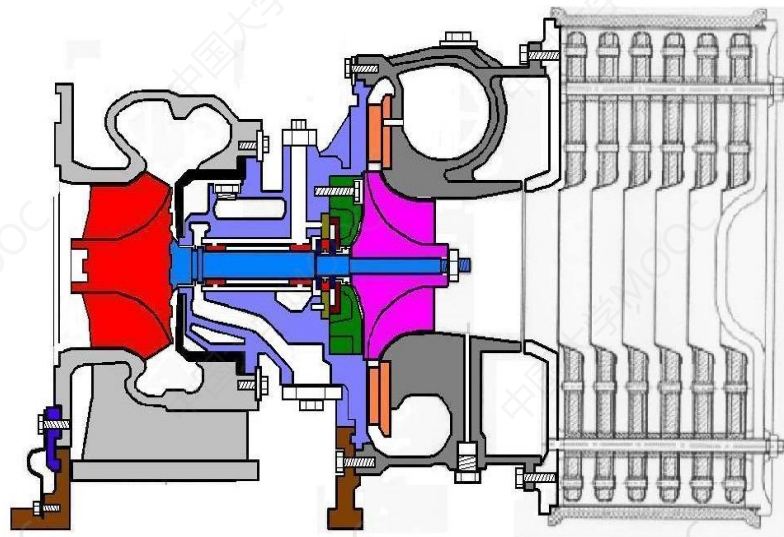


径流式废气涡轮增压器



※ 废气涡轮增压器Turbocharger

- 压气机组成：压气机叶轮

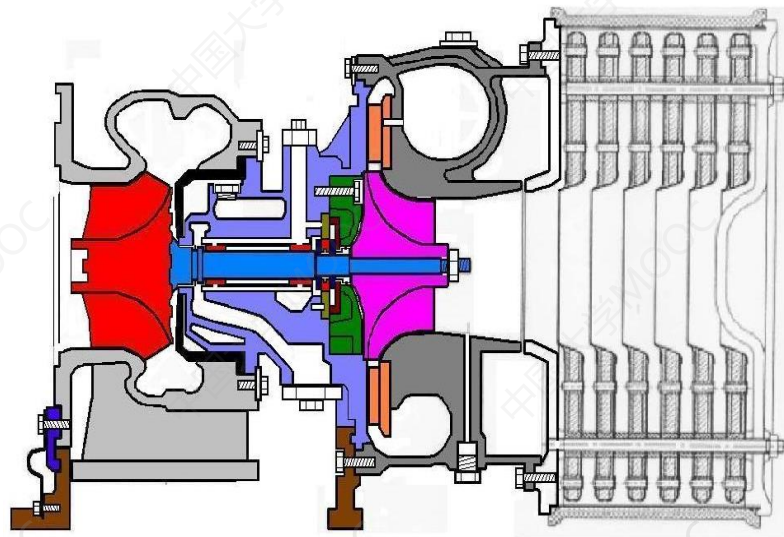


径流式废气涡轮增压器



※ 废气涡轮增压器Turbocharger

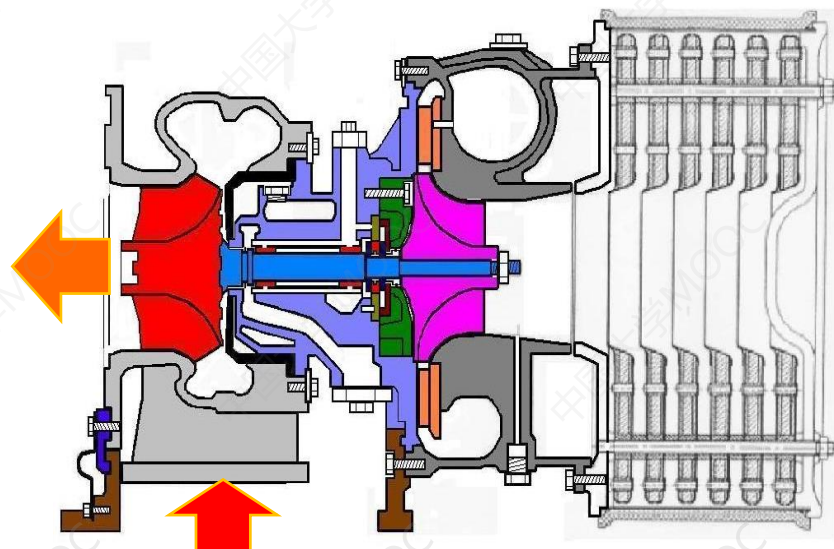
- 压气机组成：扩压器



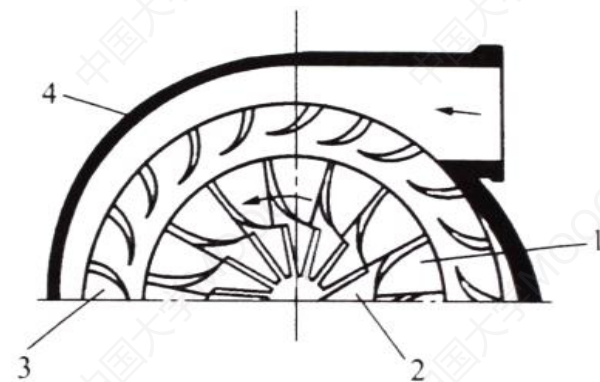
径流式废气涡轮增压器



- 涡轮机组成：喷嘴环



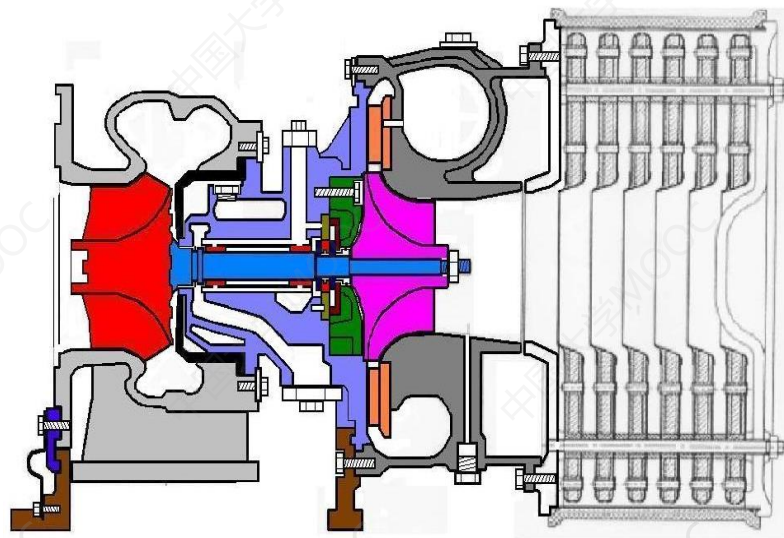
径流式废气涡轮增压器



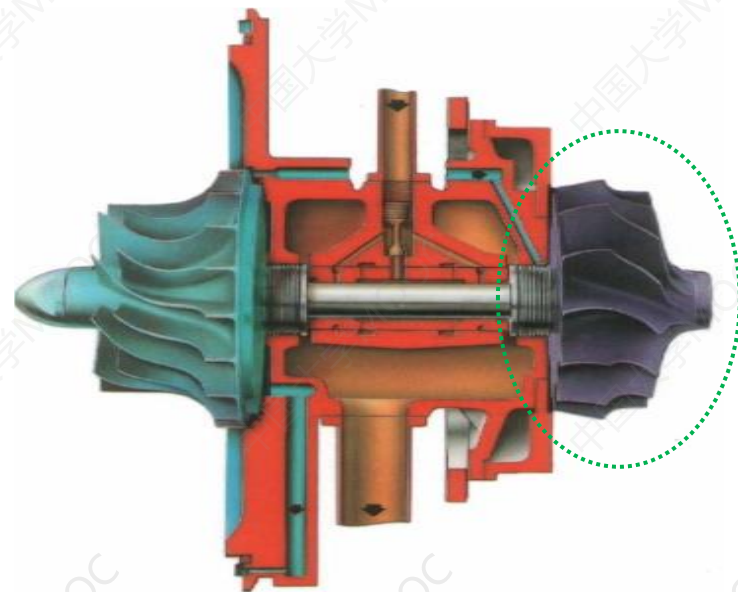
- 1-工作叶轮
- 2-叶片
- 3-喷嘴环
- 4-进气箱

※ 废气涡轮增压器Turbocharger

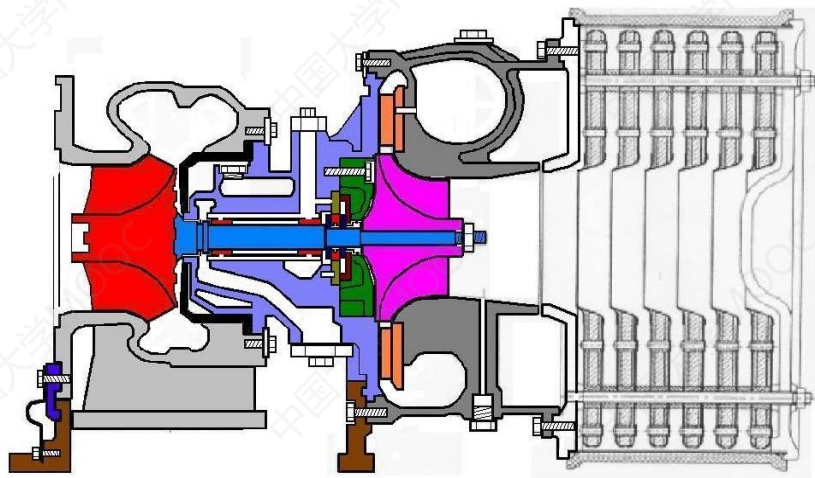
- 压气机组成：涡轮机叶轮



径流式废气涡轮增压器

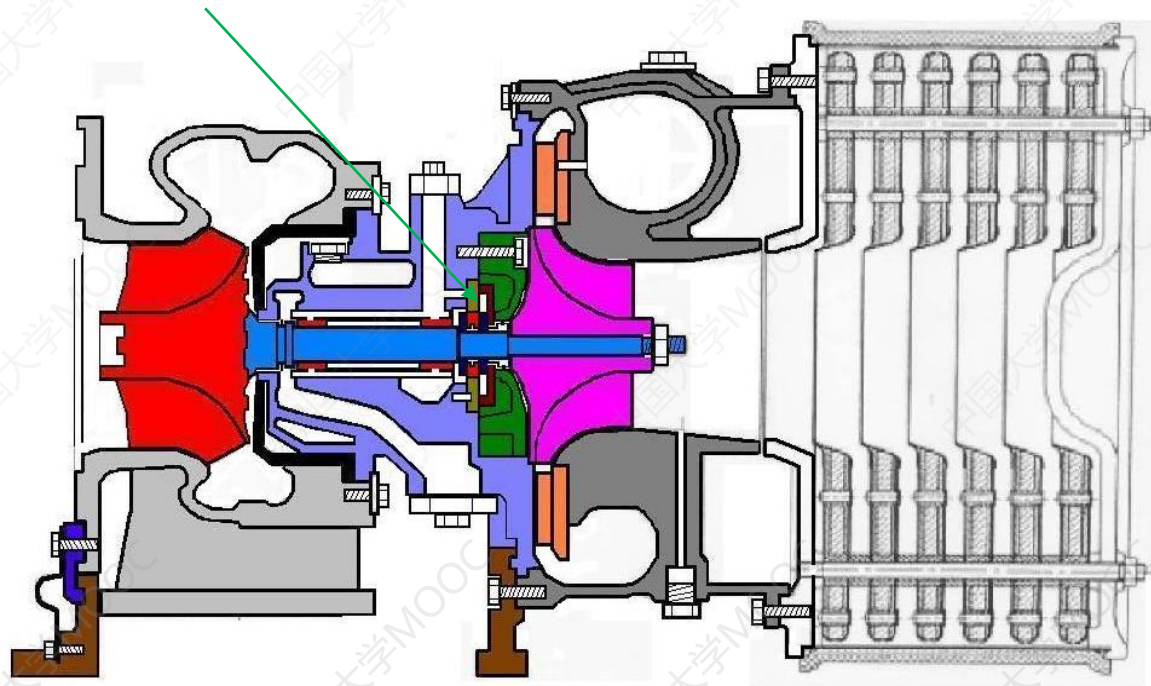


- 转子支承方式：滑动/滚动轴承, 内支承/外支承
 - 增压器结构简单
 - 转子的重量轻、刚性好、对中性好
 - 工作叶轮的可接近性好，清洗容易
 - 可直接使用曲轴箱油进行润滑
 - 轴承对转子的不平衡敏感性低
 - 振动噪音小
 - 工作寿命长
 - 现代新型增压器趋向于采用滑动轴承



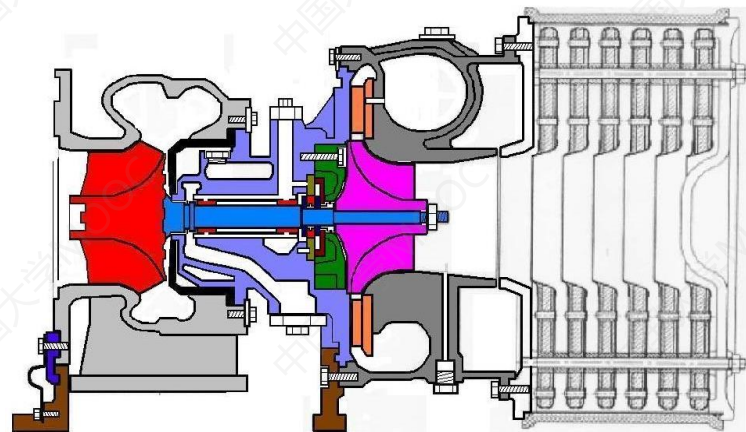
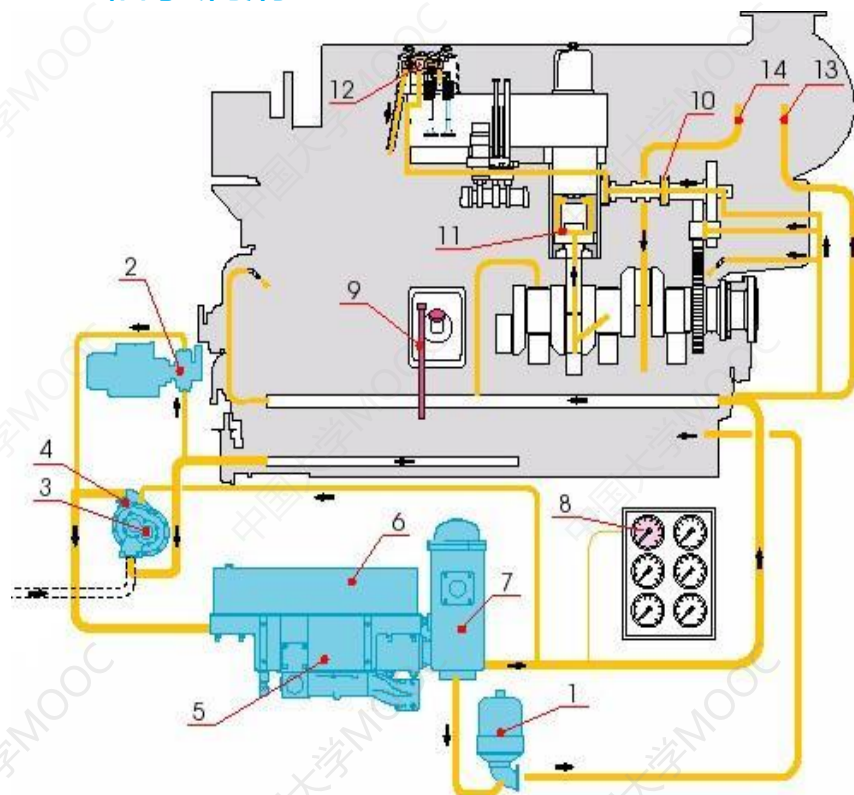
- 止推轴承

- 设在压气机端承受转子径向和轴向负荷，并起着转子轴向定位作用



※ 废气涡轮增压器Turbocharger

• 轴承润滑



2-Prelubricating oil pump 电动滑油泵

3-Lubrication oil pump 机带滑油泵

6-Lubrication oil cooler 滑油冷却器

7- Lubrication oil filter 自清滤器

10-Camshaft bearings 凸轮轴轴承

11-Gudgeon pins 活塞销

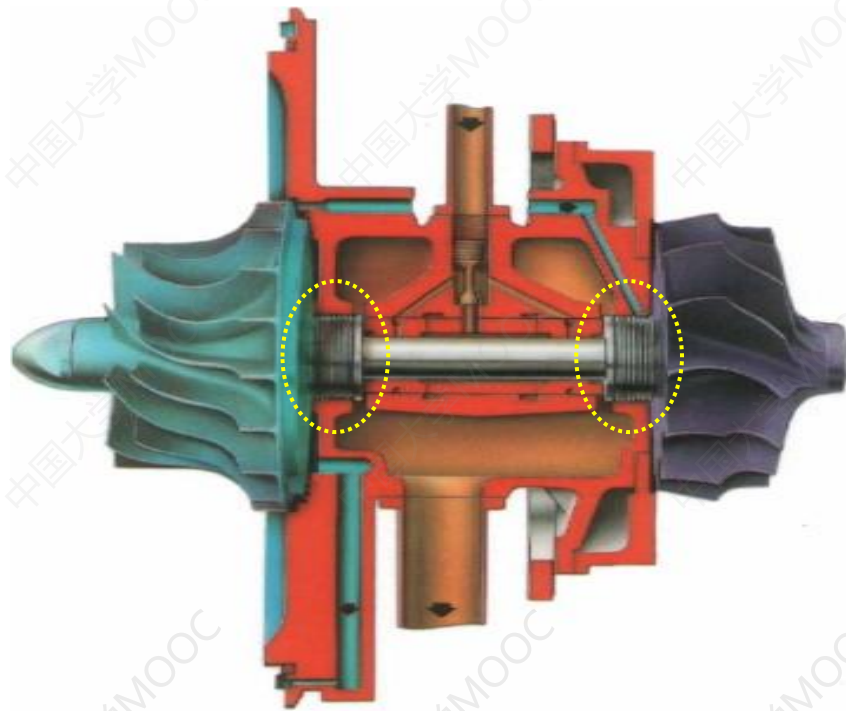
12-Rocker arm bearings 摇臂轴承

13-Lubrication oil pipe to T/C 至增压器

14-Lubrication oil pipe from T/C 增压器回

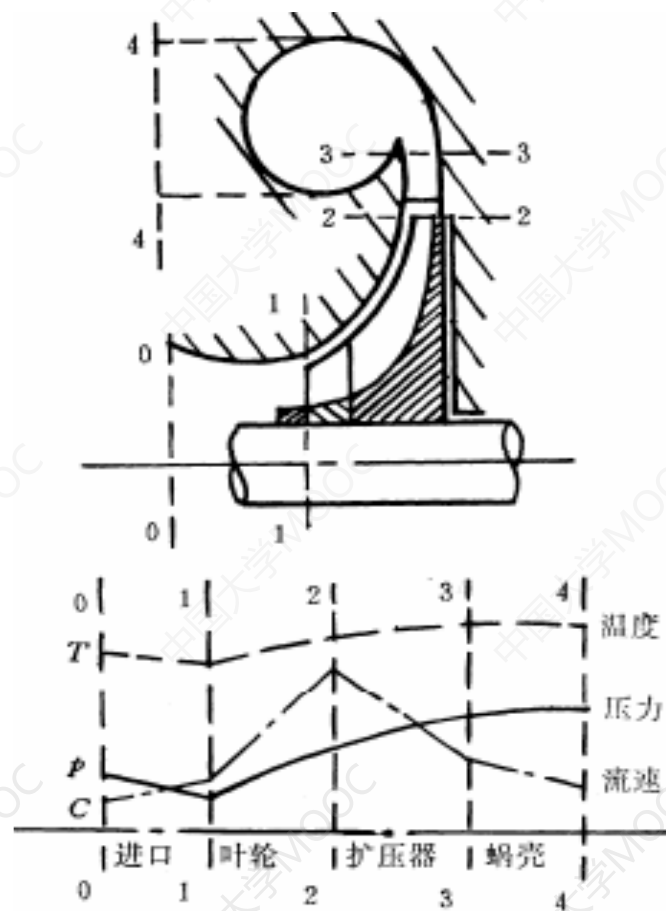
• 气封与油封

- 压气机和涡轮机的叶轮都装有气封和油封，防止燃气、空气和滑油漏泄
- 气封一般采用迷宫式密封，气体经过迷宫式密封多次节流，压力下降，因此流过的气体很少
- 在涡轮机侧，还要通过空气管引入增压空气提高密封效果，一方面防止燃气漏入轴承，另一方面也阻止滑油进入涡轮



• 压气机工作原理

- 在叶轮内
 - 机械能转变为气流的动能和压力能
- 在扩压器内
 - 动能转变为压力能
- 在排气蜗壳内
 - 动能进一步转变为压力能



• 涡轮机工作原理

- 在喷嘴环内
 - 压力能转变为速度能
- 在叶轮内
 - 压力能&速度能转变为机械能

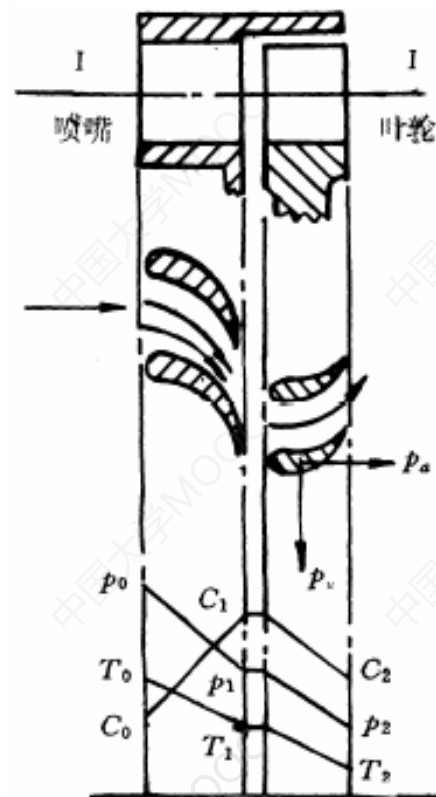
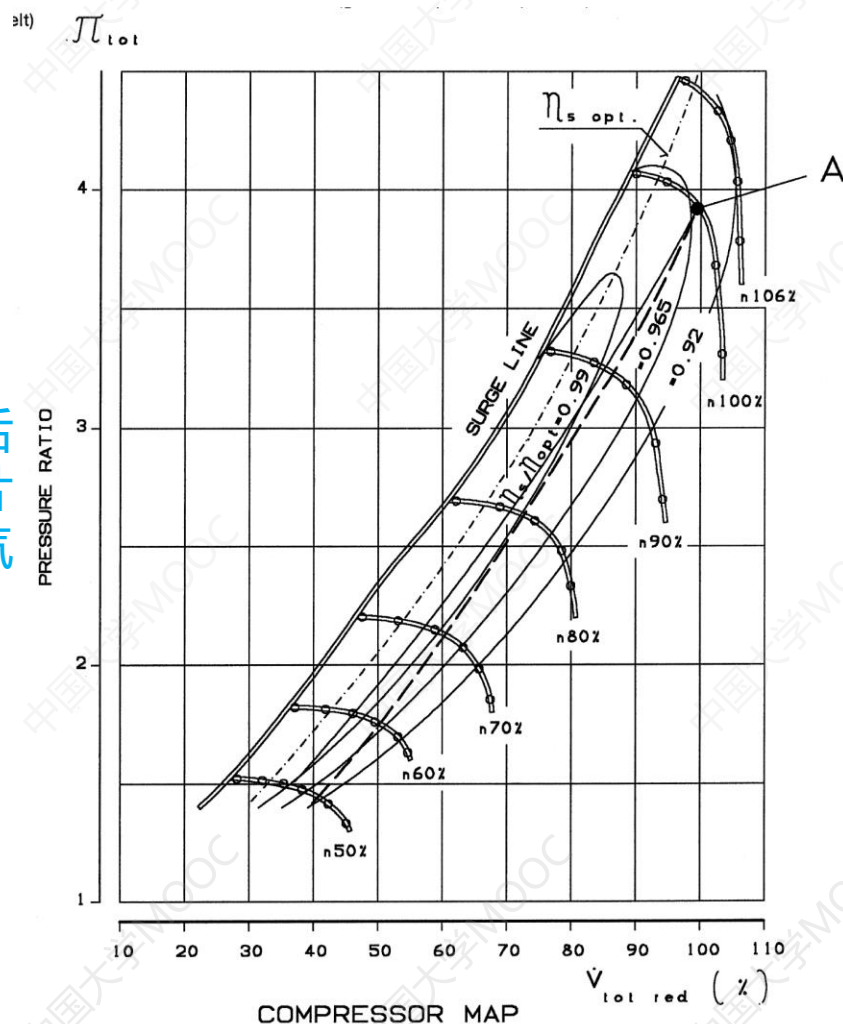
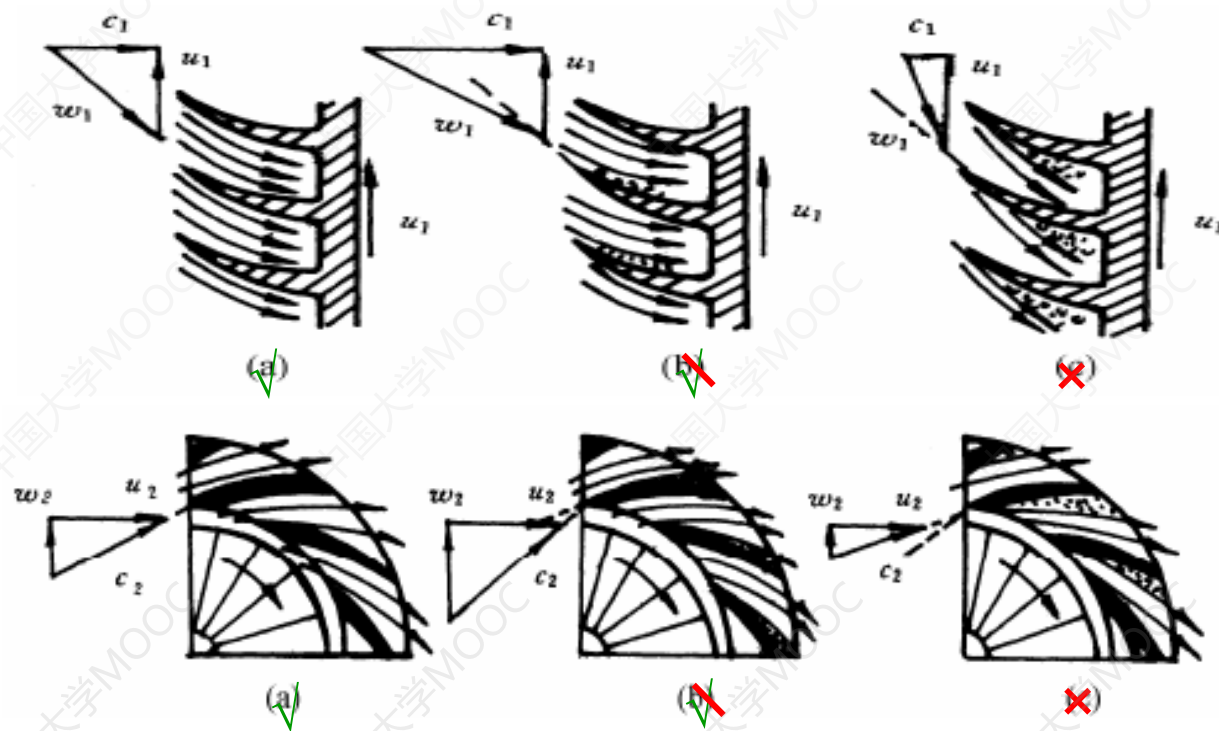


示意图-轴流式涡轮机

- 压气机特性Compressor map
- 压气机喘振Compressor surging
 - 当压气机的流量减小到一定值后偏离设计工况，造成气流从叶片脉动，并有气体倒流，引起压气发出异常声响的现象
 - Surge line



- 压气机喘振机理：空气在工作叶轮&扩压器前缘的流动



- 轴承烧损

- 现象：n下降，油温度升高，pk降低，声音异常
- 原因：油压低、油量不足或断油,滑油过脏或混入金属屑等
- 处理：停车；更换轴承；停增压器运转

- 增压器强烈振动

- 涡轮叶片上有结炭和附着燃烧产物
- 涡轮叶片折断
- 压气机叶轮损坏
- 转子与固定件碰擦
- 轴承减振弹簧片损坏等

- 增压压力下降
 - 通流部分脏，废气能量不足，压气机故障
 - 按时清洗增压器
- 增压压力升高
 - 常见的是柴油机负荷过大或喷油系统故障使燃烧不良、后燃严重，导致废气能量增加，涡轮转速升高
 - 排气阀漏气、开启过早
- 轴承箱中滑油很快变黑和漏失
 - 排气漏入轴承箱
 - 涡轮机端的轴封损坏、密封衬套间隙过大、密封空气的通道被阻塞