



# 工程机械内燃机载荷谱再现技术

Load Spectrum Reconstruction Technique for the Internal  
Combustion Engine of Construction Machinery



# 非道路内燃机发展现状

# 市场

- 到2031年，全球**非道路用内燃机**市场将增长**7%**。

## Global Off-Highway Engine Market to Grow 7% Through 2031

A new report from Fact.MR forecasts increased demand for off-highway engines will coincide with growth in infrastructure projects.

March 8, 2021 | By Sara Jensen Source Fact.MR

- 非道路内燃机市场**格局**

## 向上国产替代，向下加速整合

内燃机市场集中度高，外资和国产各有千秋：**国产**主要集中在**叉车**、**农机**等领域，而**外资**垄断**挖掘机**、**工业动力**等领域。

向上：**挖掘机和工业动力**由**外资**主导，**国产**有望突破

向下：**非道路四阶段排放标准**推出，**行业**有望**加速整合**

- 内燃机是工业领域的**核心动力源**，在未来较长一段时间内仍然将发挥**不可替代**的重要作用。

# 法规

- **工程机械**用和**农业机械**用**多缸柴油机**，其车辆生产厂大多也生产销售车用发动机，区域规模不突出，无特点，特别**面对新的排放法规实施**，**面临技术升级的挑战**。

	外资	国产
挖掘机	洋马、久保田、五十铃、康明斯、小松、卡特彼勒、斗山	几乎没有
装载机	康明斯	潍柴市占率高于60%，锡柴、上柴
叉车	洋马、五十铃、三菱、铂金斯	新柴、全柴、潍柴、玉柴、锡柴
推土机	卡特彼勒、康明斯	上柴
压路机	卡特彼勒、康明斯、道依茨	上柴、玉柴、潍柴
平地机	康明斯、卡特彼勒	上柴
起重机	康明斯、道依茨、奔驰、沃尔沃	潍柴、上柴
拖拉机		一拖、莱动、玉柴、全柴、常柴
收获机		玉柴、全柴、常柴
工业动力	康明斯	潍柴、玉柴

中华人民共和国国家环境保护标准

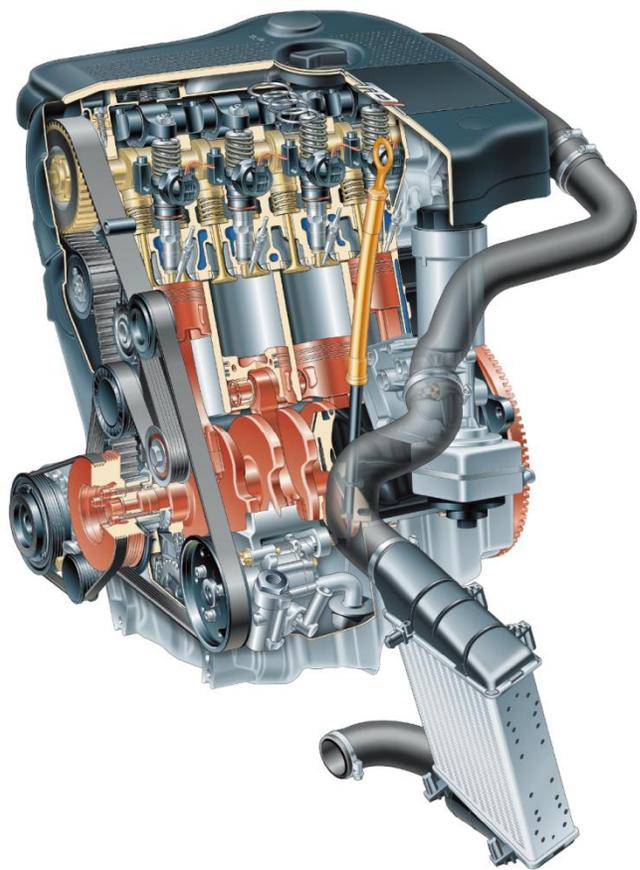
HJ 1014—2020

非道路柴油移动机械污染物排放  
控制技术要求

Emissions control technical requirements of non-road  
diesel mobile machinery

# 可靠性

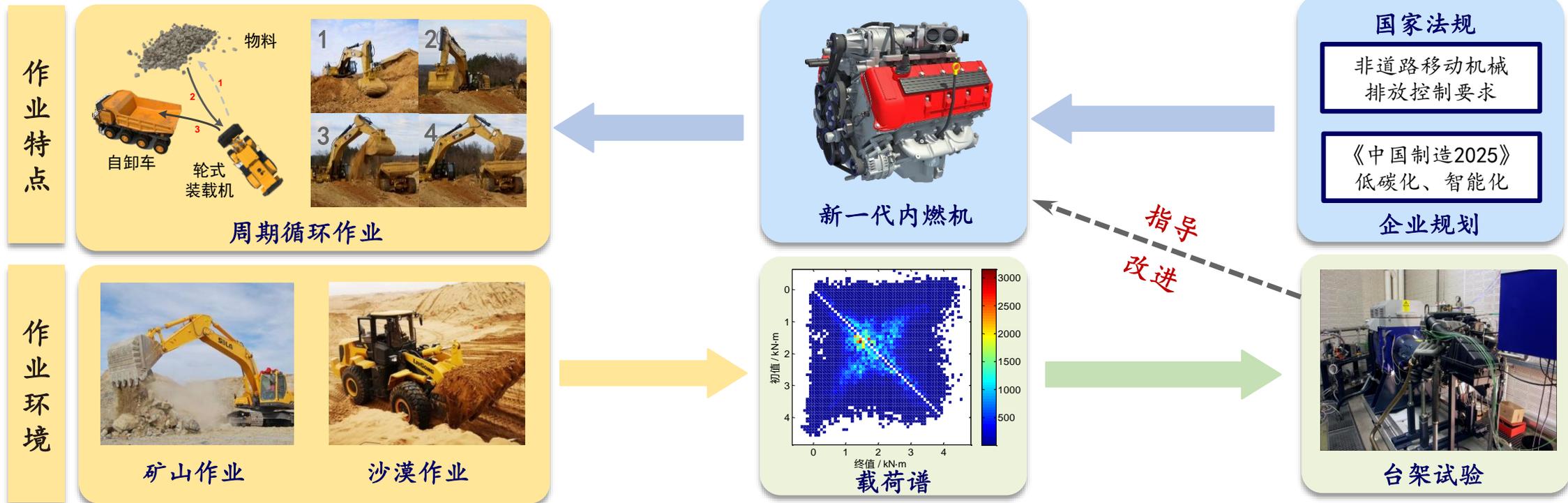
- 内燃机的可靠性不仅影响配套装备的性能和使用寿命，还关系内燃机工业以及相关产业的可持续、高质量发展。



参考《汽车是怎么跑的》

编制/再现内燃机**整机载荷谱**，进行**台架试验**，确定失效部件，改进相关结构，  
**提升**整机**可靠性**和**耐久性**。

# 内燃机载荷谱再现的意义

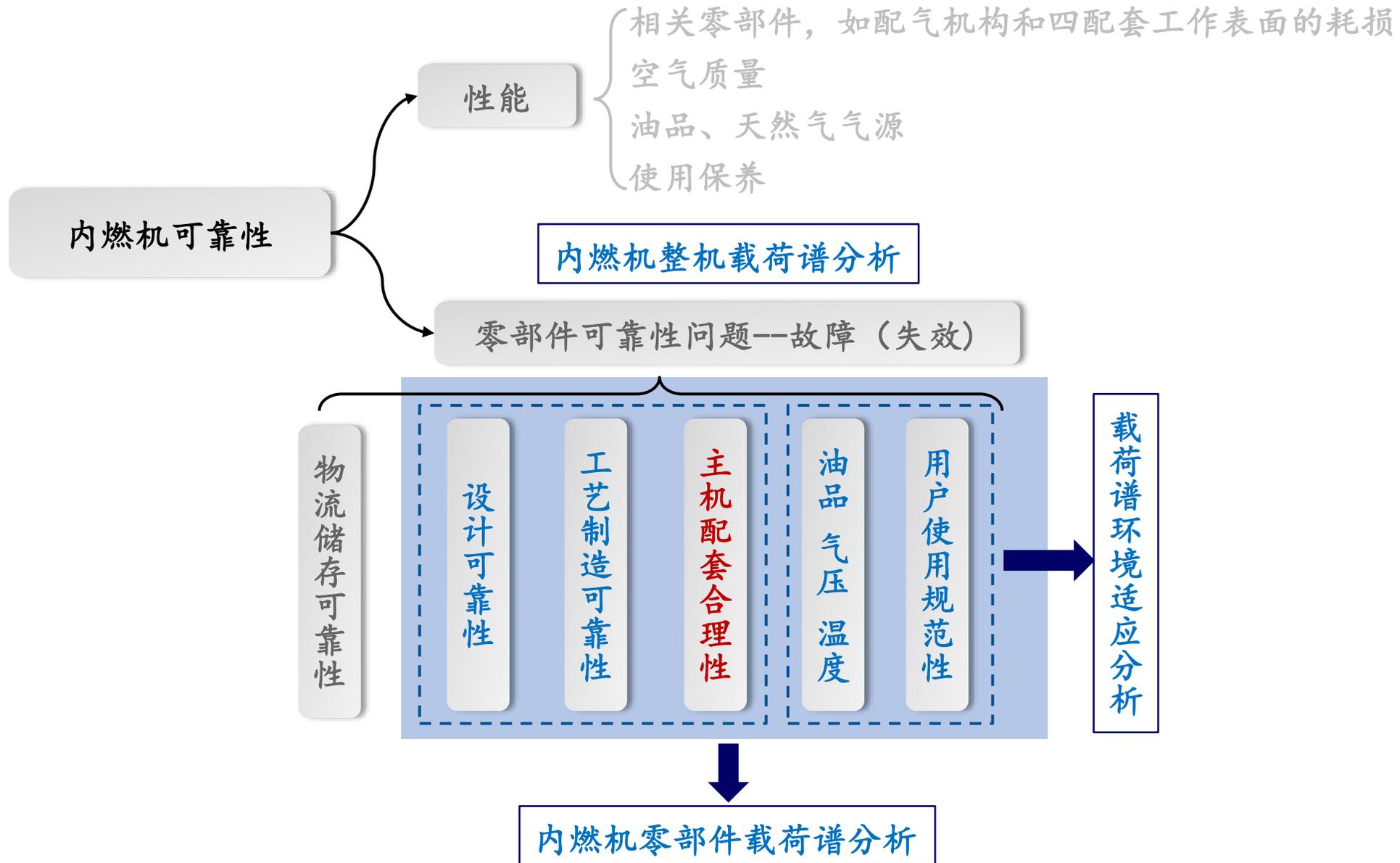


- 作业环境差，空气脏
- 作业环境对内燃机的**载荷冲击大**
- 用户使用**难以规范**，内燃机常出现超速超负荷

内燃机**载荷谱编制与再现**及**环境适应机制研究**，

提高工程机械内燃机恶劣地形的**环境适应性**，**改进**工程机械内燃机有重大意义！





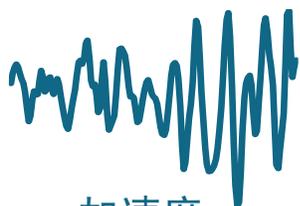
什么是载荷谱？

# 载荷谱反映了载荷的**统计规律**，说明了载荷最基本的**特征**

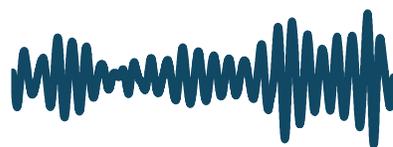
随机载荷**似乎杂乱无章**，但具有统计分布规律，用数理统计方法把随机载荷表示成具有统计特性的图形、表格、数字等称为载荷谱。



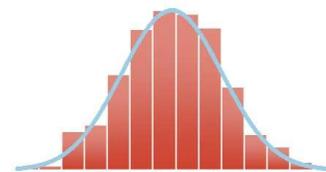
应变  
Strain



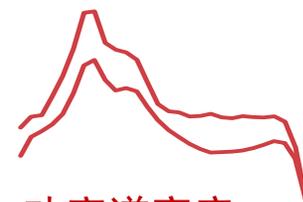
加速度  
Acceleration



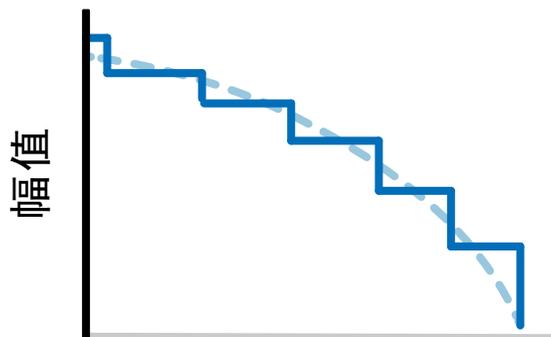
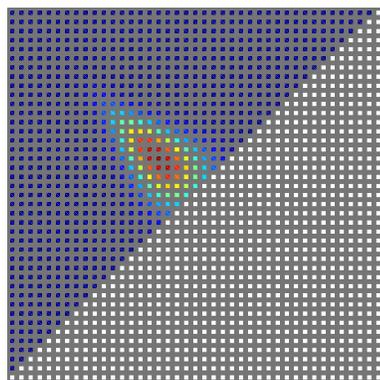
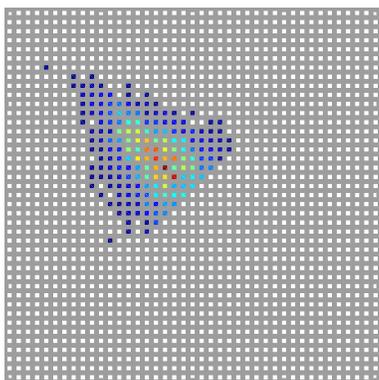
位移  
Displacement



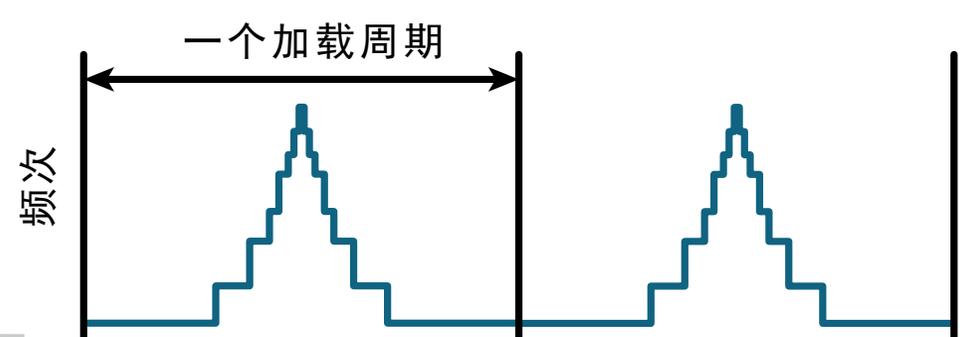
分布曲线  
Distribution



功率谱密度  
Power Density Spectrum



对数累积次数





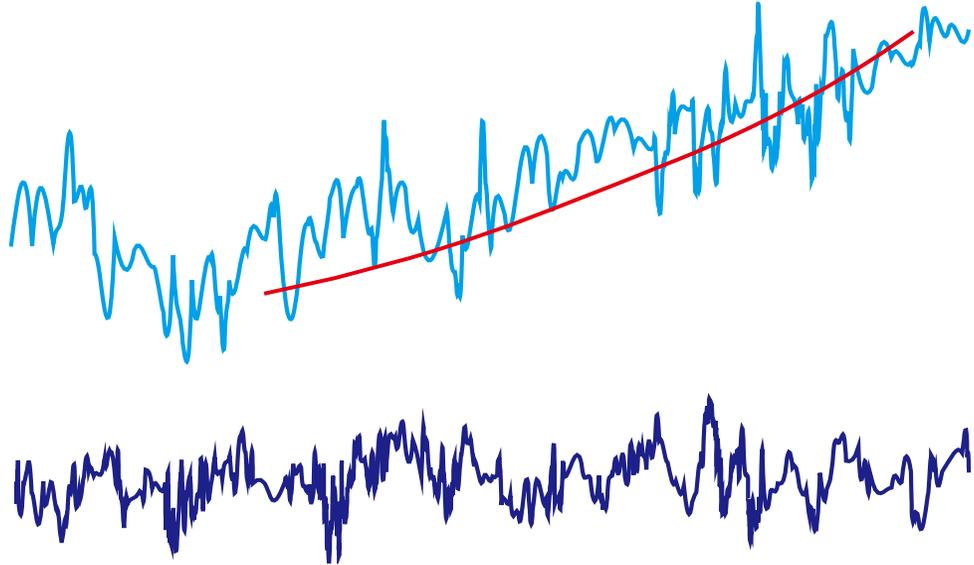
# 载荷谱如何编制？

——“三步走”，预处理，统计计数，外推与编制

# 1. 数据预处理

## 去除趋势项

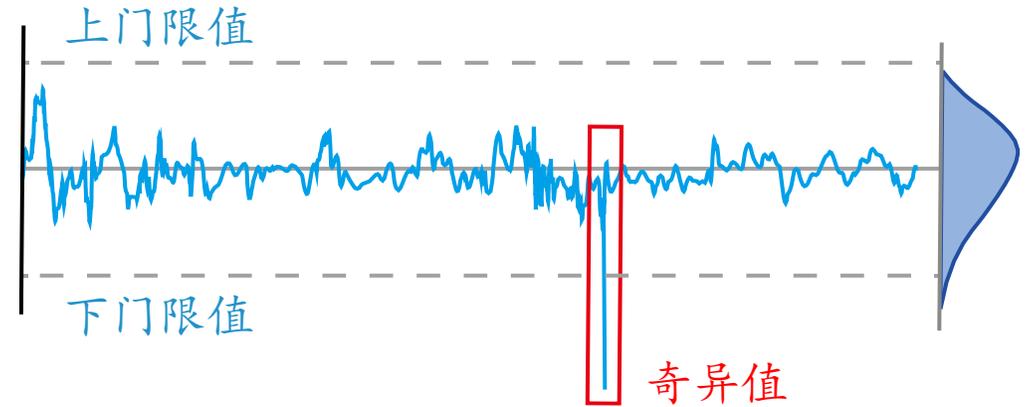
随机信号中存在的线性项或缓慢变化的、周期大于记录长度的非线性成分。



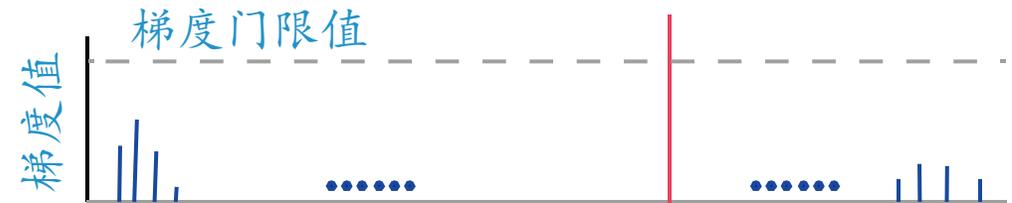
- ◆ 工程中常用方法      最小二乘法

## 剔除奇异值

### ◆ 幅值门限法



### ◆ 梯度门限法

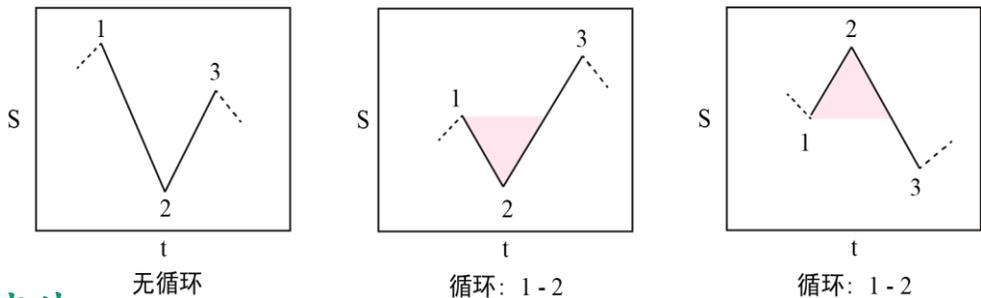
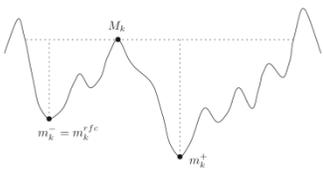


### ◆ 箱线图等

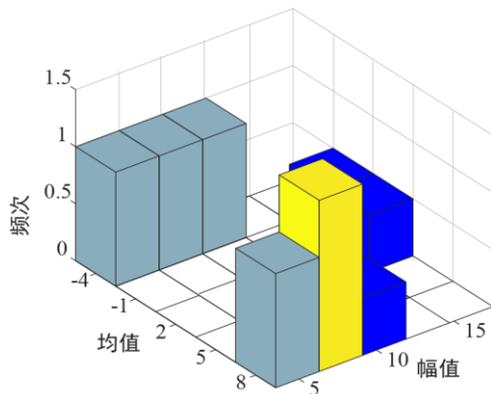
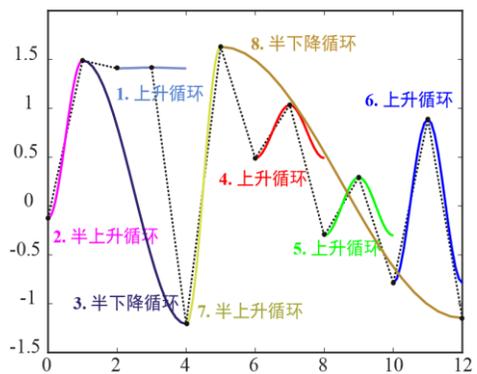
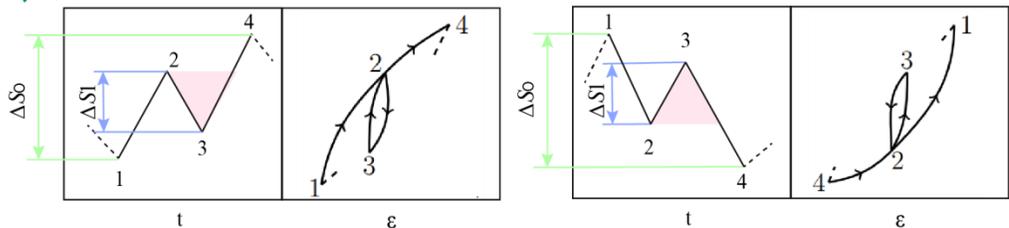
# 2. 统计计数

## 雨流计数法

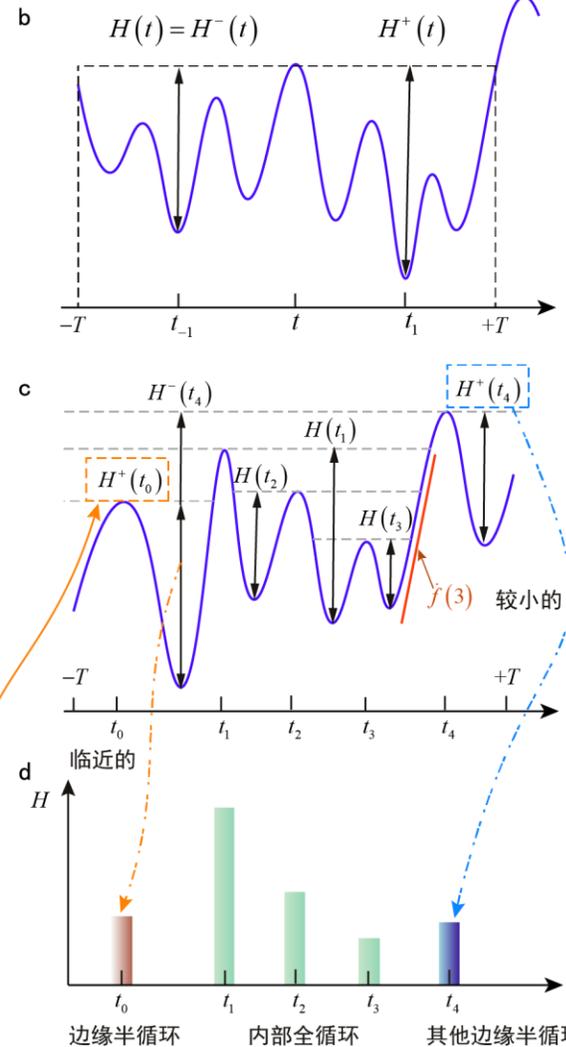
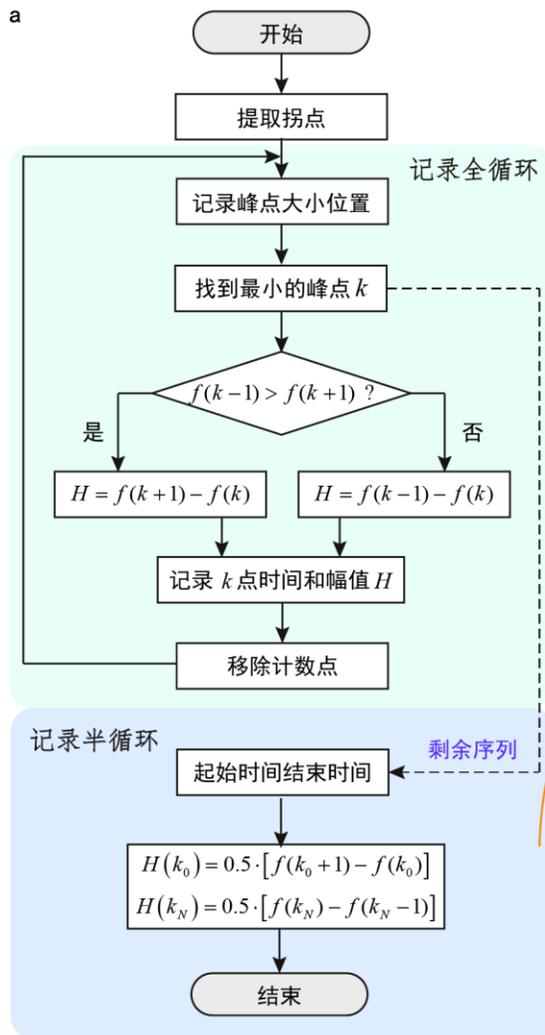
### 3点法



### 4点法



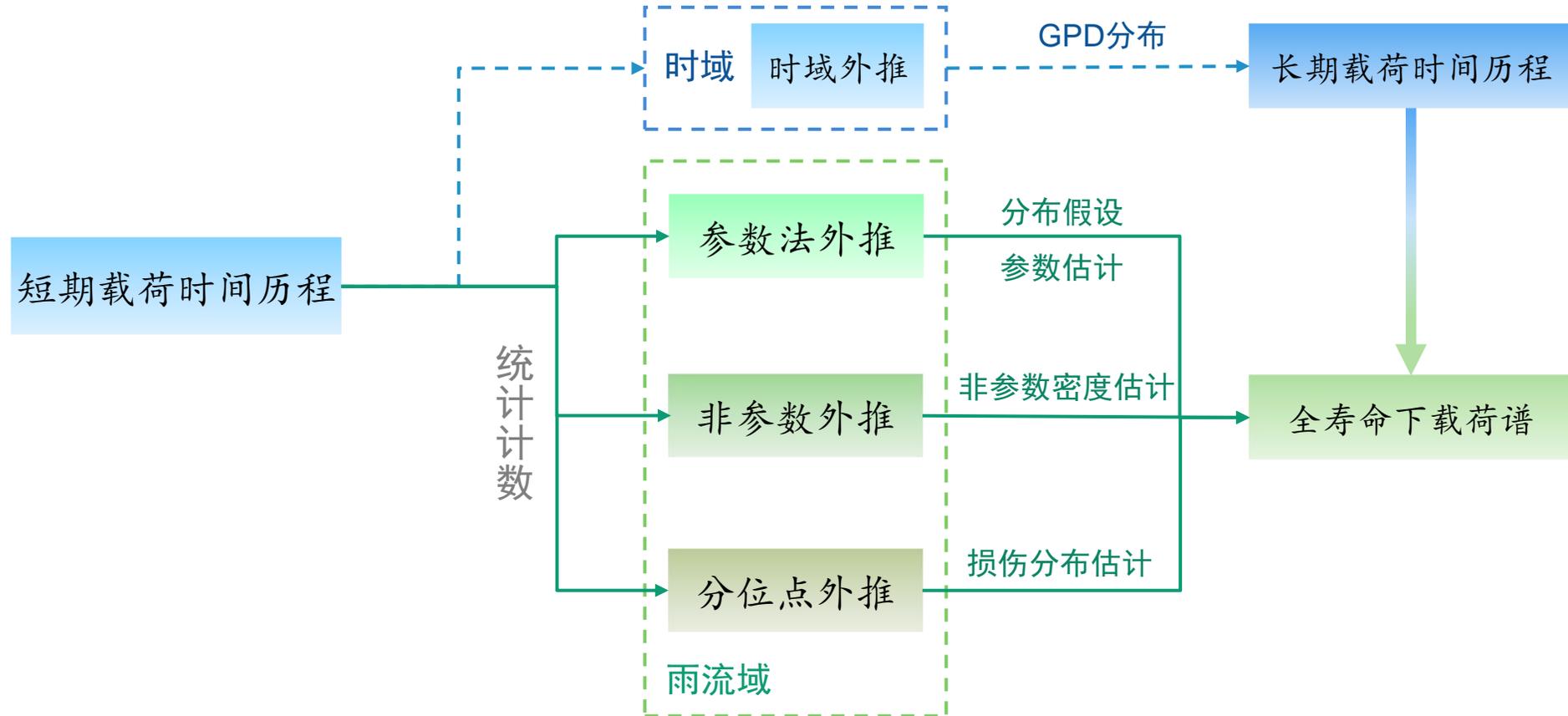
## Top-up-level计数法 (载荷按时序排列)



Markov计数, 范围-对计数, 穿级计数, 峰值计数等。

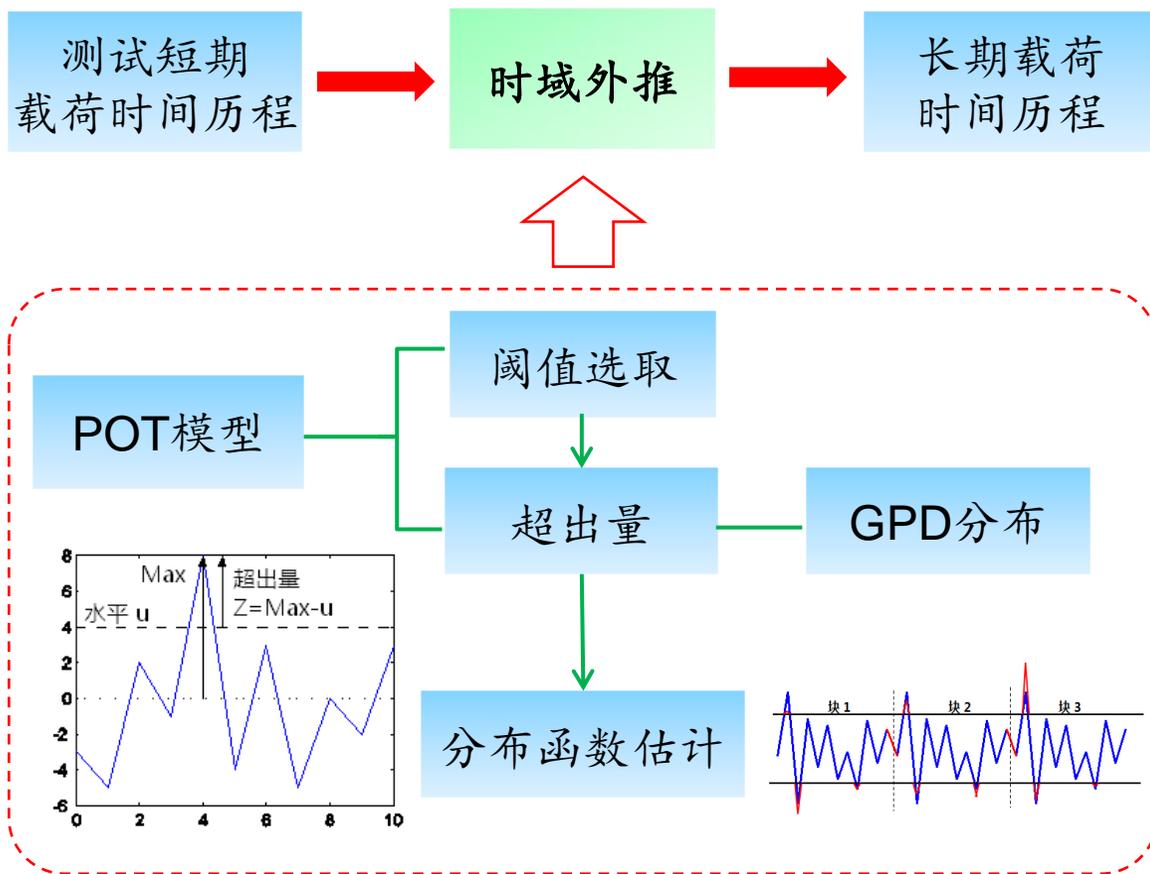
### 3. 载荷外推与编制

突破人力、成本等限制，通过将测试得到的短期载荷时间历程外推得到全寿命载荷谱，用于疲劳寿命分析与预测。



统计外推下的各种外推方法

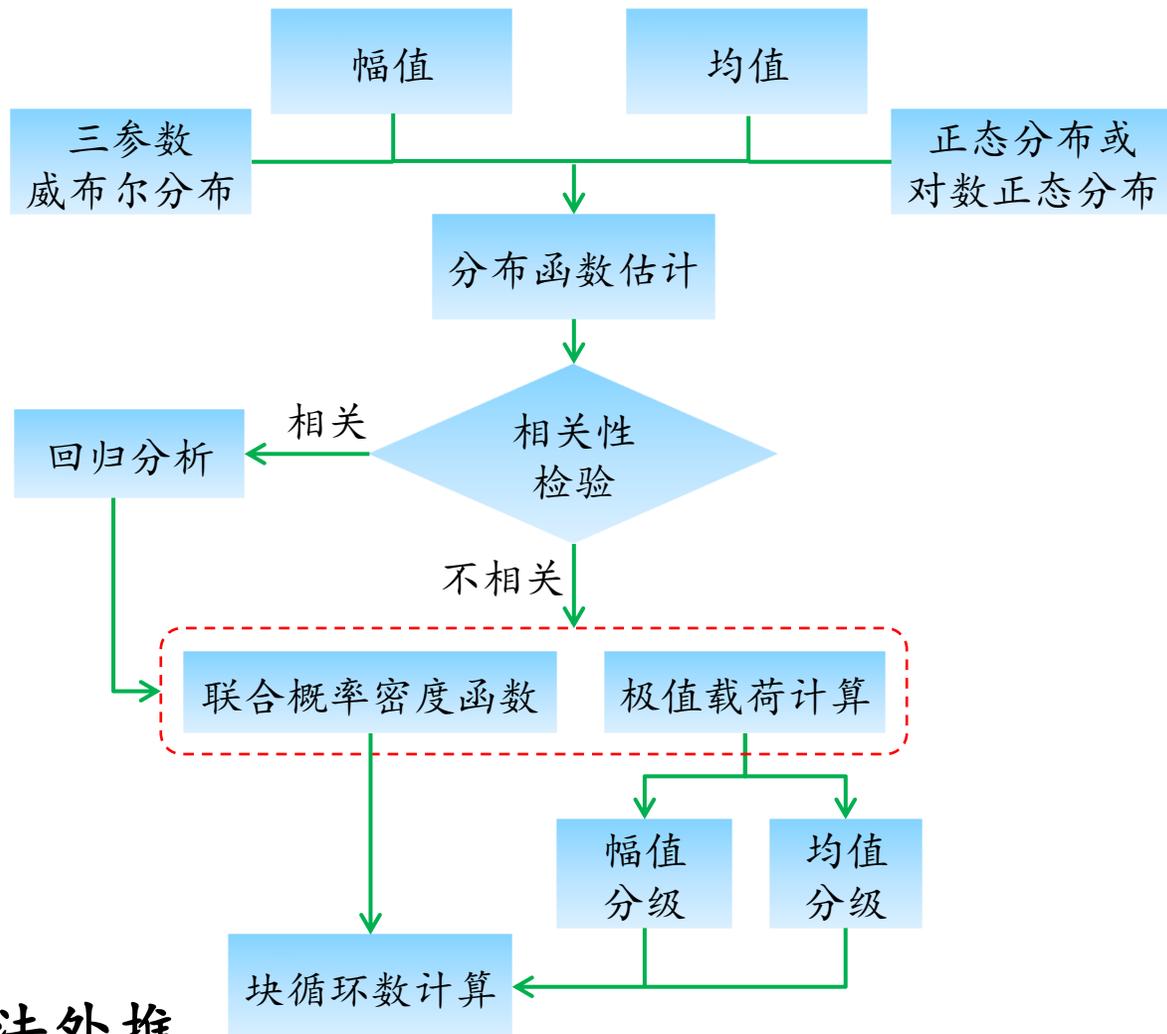
## ① 时域外推



### 时域外推

- 直接产生时域载荷历程
- 阈值的选取影响大

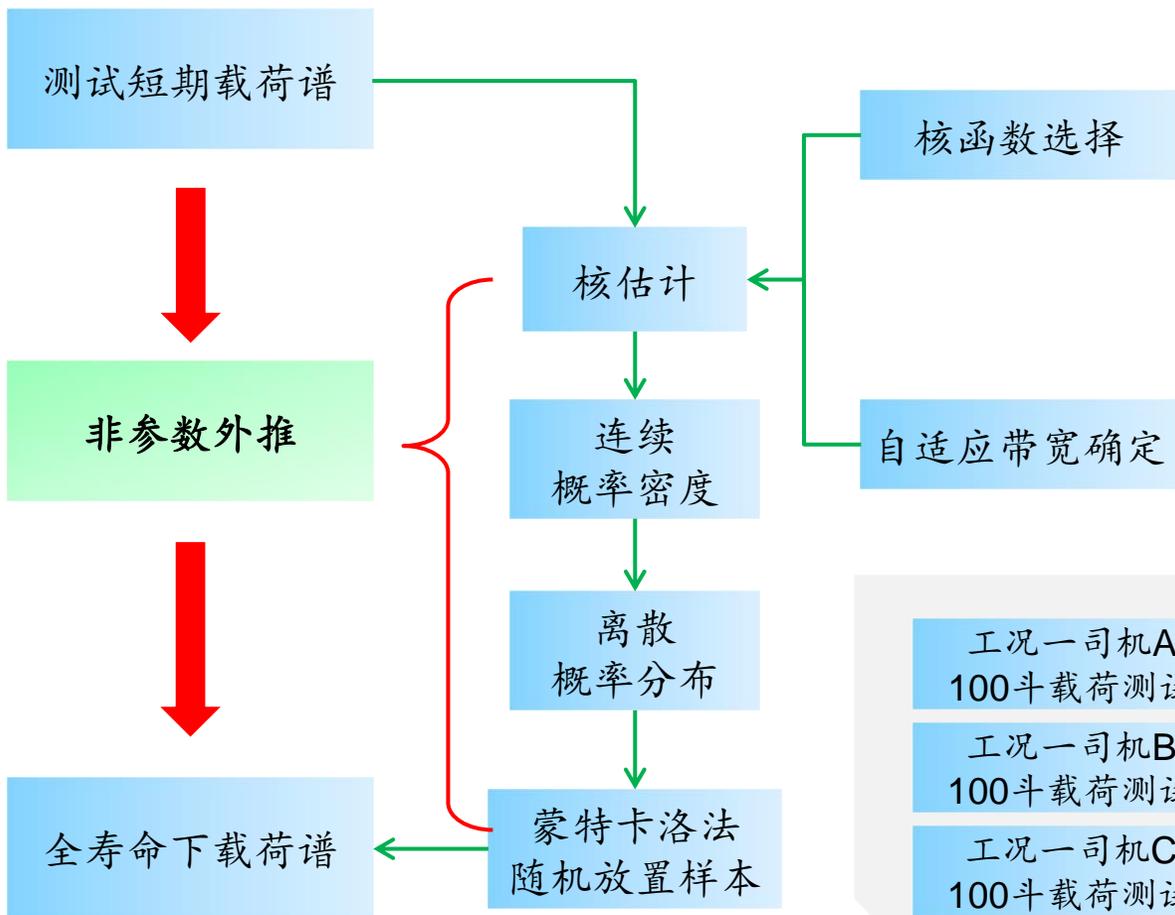
## ② 参数法外推



### 参数法外推

- 可以得到载荷的分布函数
- 参数估计方法选择主观性强

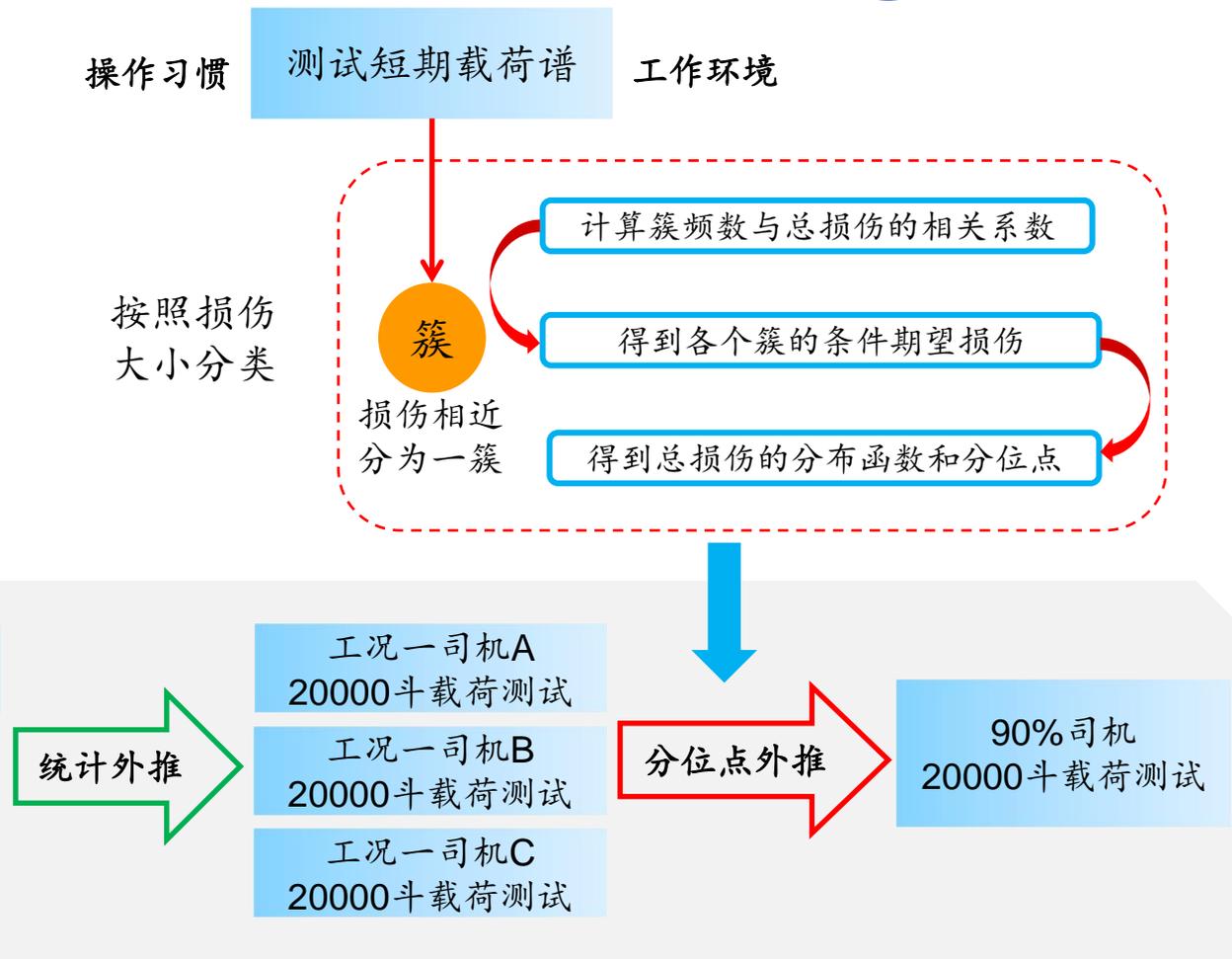
### ③ 非参数法外推



#### ■ 非参数外推

- 实现对任意形状的雨流矩阵的有效估计
- 需求样本量大，带宽的选取影响大

### ④ 分位点外推



#### ■ 分位点外推

- 综合考虑不同工况的载荷差异
- 与其它外推方法联合使用

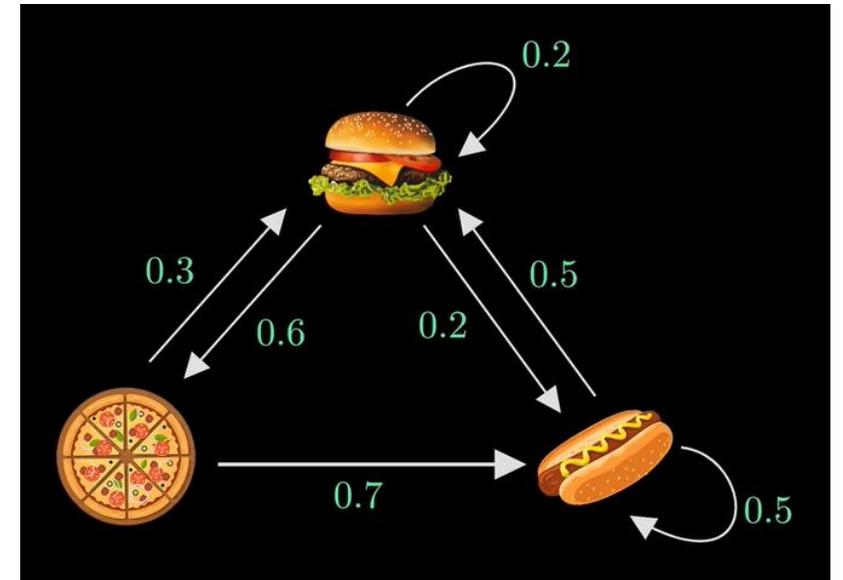
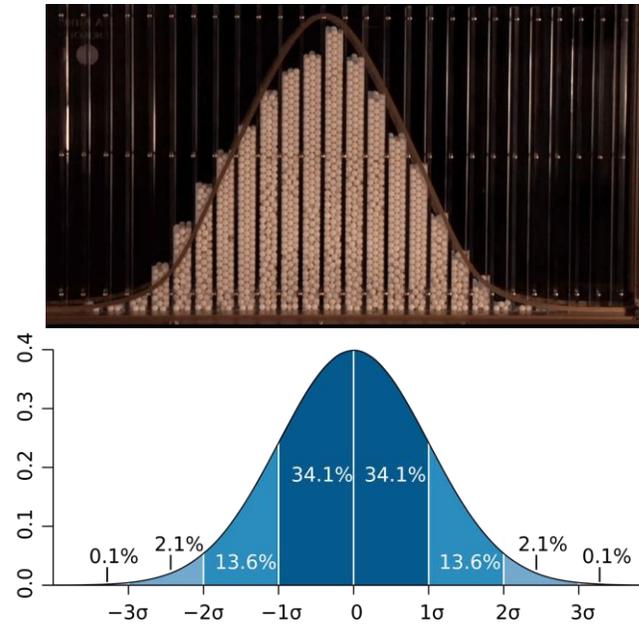
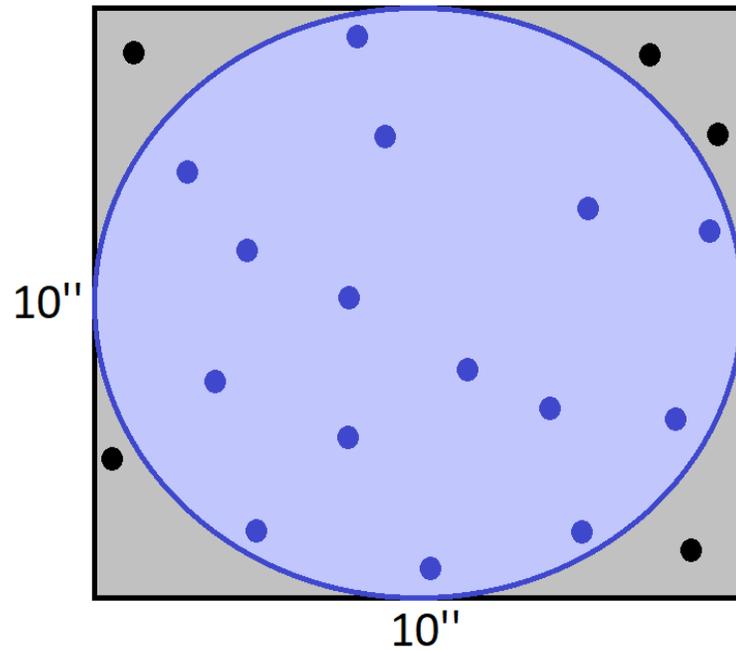
载荷如何再现？

# 载荷再现

耐久性试验所需的加载载荷，由实测载荷编制程序载荷谱作为加载谱（载荷谱编制）  
 通过模拟、重构出与原始载荷具有相同统计特性的随机载荷进行随机加载（载荷再现）

## 马尔可夫链蒙特卡洛法（Markov Chain Monte Carlo, MCMC）

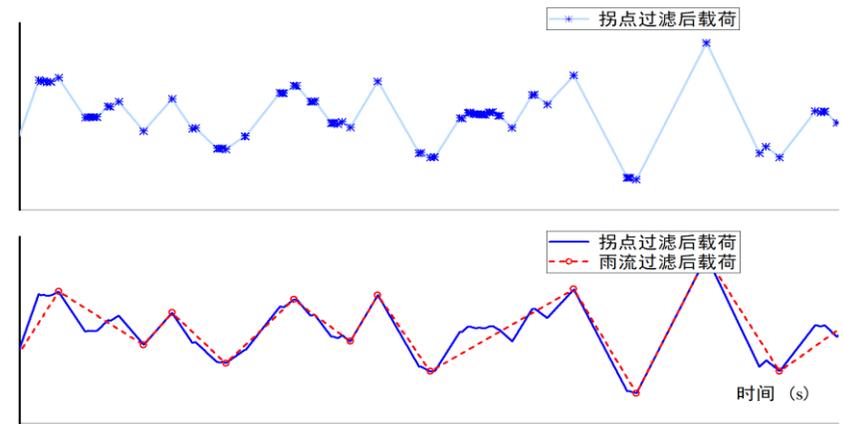
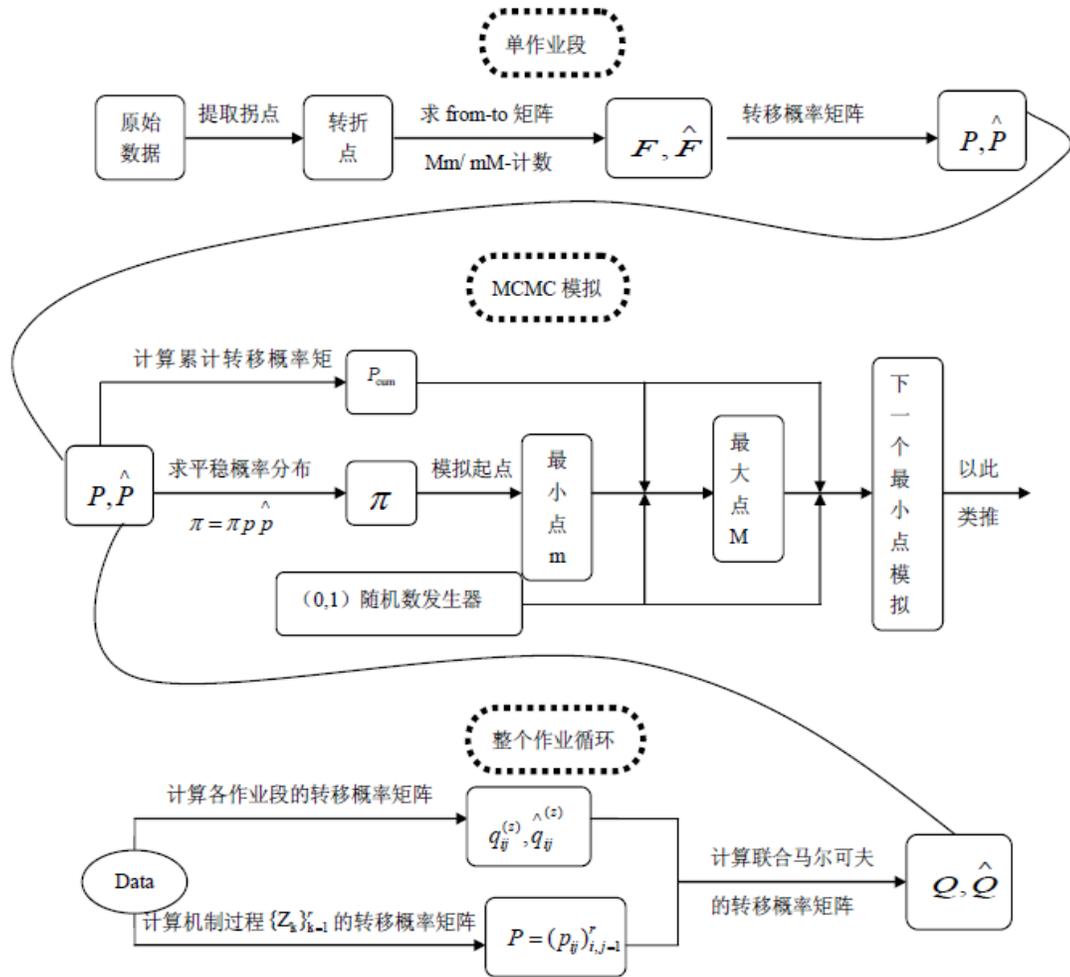
MCMC方法是以马尔可夫为概率模型的蒙特卡洛法，通过概率空间中的随机采样来估计目标参数的后验分布



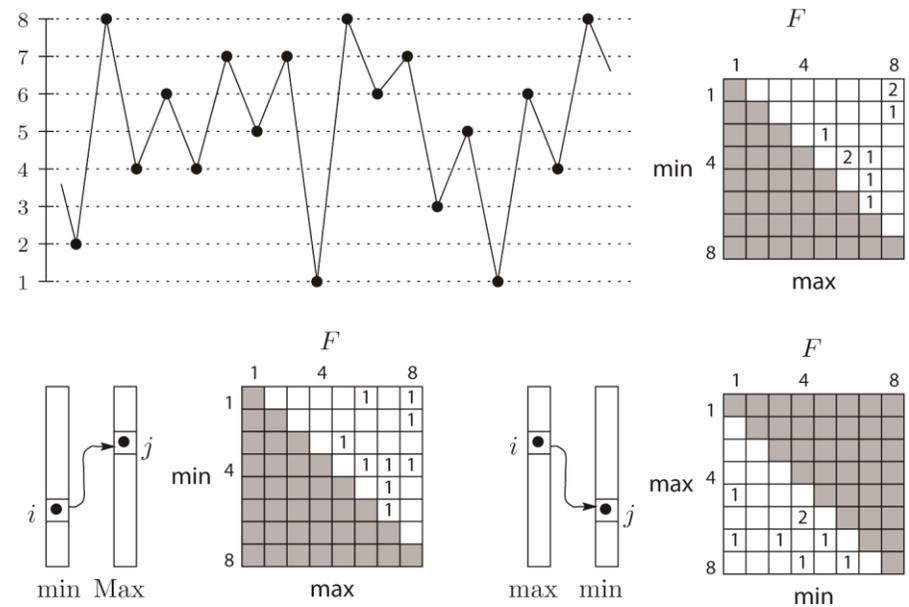
<https://www.youtube.com/watch?v=i3AkTO9HLXo>

马尔可夫链蒙特卡罗法构建一个马尔可夫链，使其平稳分布就是要进行抽样的分布

基于该马尔可夫链进行随机游走，产生样本的序列后，使用该平稳分布的样本进行近似的数值计算



### 拐点过滤与雨流过滤



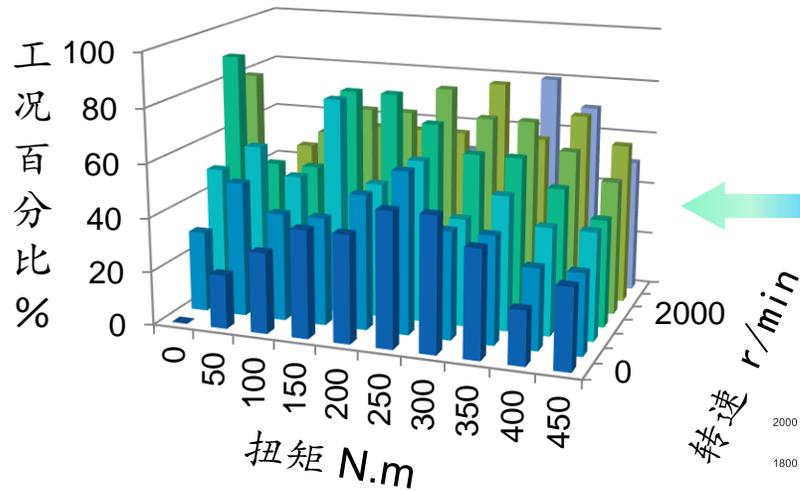
### Markov计数

- MCMC方法将载荷看作是一个离散时间马尔可夫链的平稳转移概率，仅保留相邻转折点（载荷极值）的相关性。
- 通过MCMC模拟出与原始载荷具有相同统计特性的载荷历程。
- 采用所模拟载荷对于试验加载和减少测试均有重要作用。

内燃机载荷如何再现？

级数	扭矩	转速	时间
1	50	750	T <sub>1</sub>
2	150	750	T <sub>2</sub>
3	250	1250	T <sub>3</sub>
4	250	1750	T <sub>4</sub>

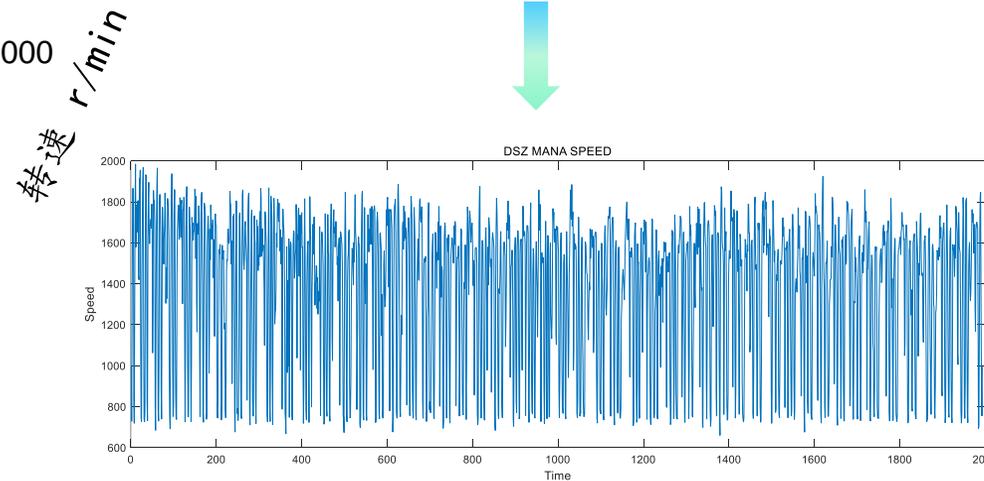
级数	扭矩	转速	时间
1	50	恒定 转速	T <sub>1</sub>
2	110		T <sub>2</sub>
3	170		T <sub>3</sub>
4	230		T <sub>4</sub>
5	290		T <sub>5</sub>
6	340		T <sub>6</sub>
7	380		T <sub>7</sub>
8	400		T <sub>8</sub>



转速-扭矩-工况占比三维图

转速-扭矩-时间多级谱

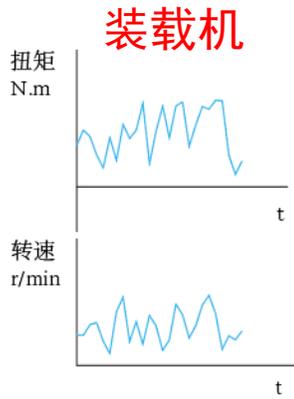
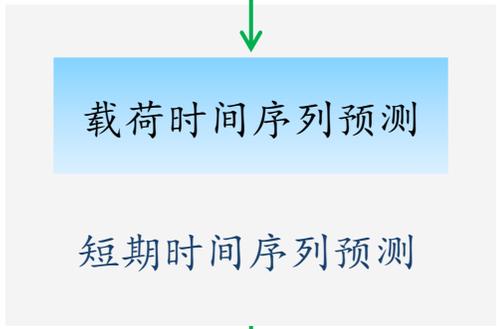
内燃机载荷谱表现形式



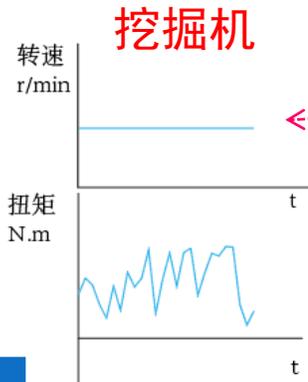
载荷随机时间序列谱

转速、扭矩八级谱

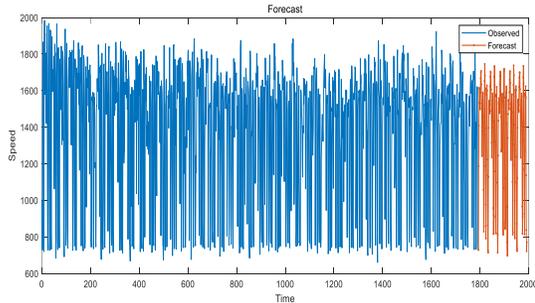
# 内燃机扭矩、转速载荷再现 (以装载机和挖掘机为例)



级数	扭矩	转速	时间
1	50	750	T <sub>1</sub>
2	150	750	T <sub>2</sub>
3	250	1250	T <sub>3</sub>
4	250	1750	T <sub>4</sub>



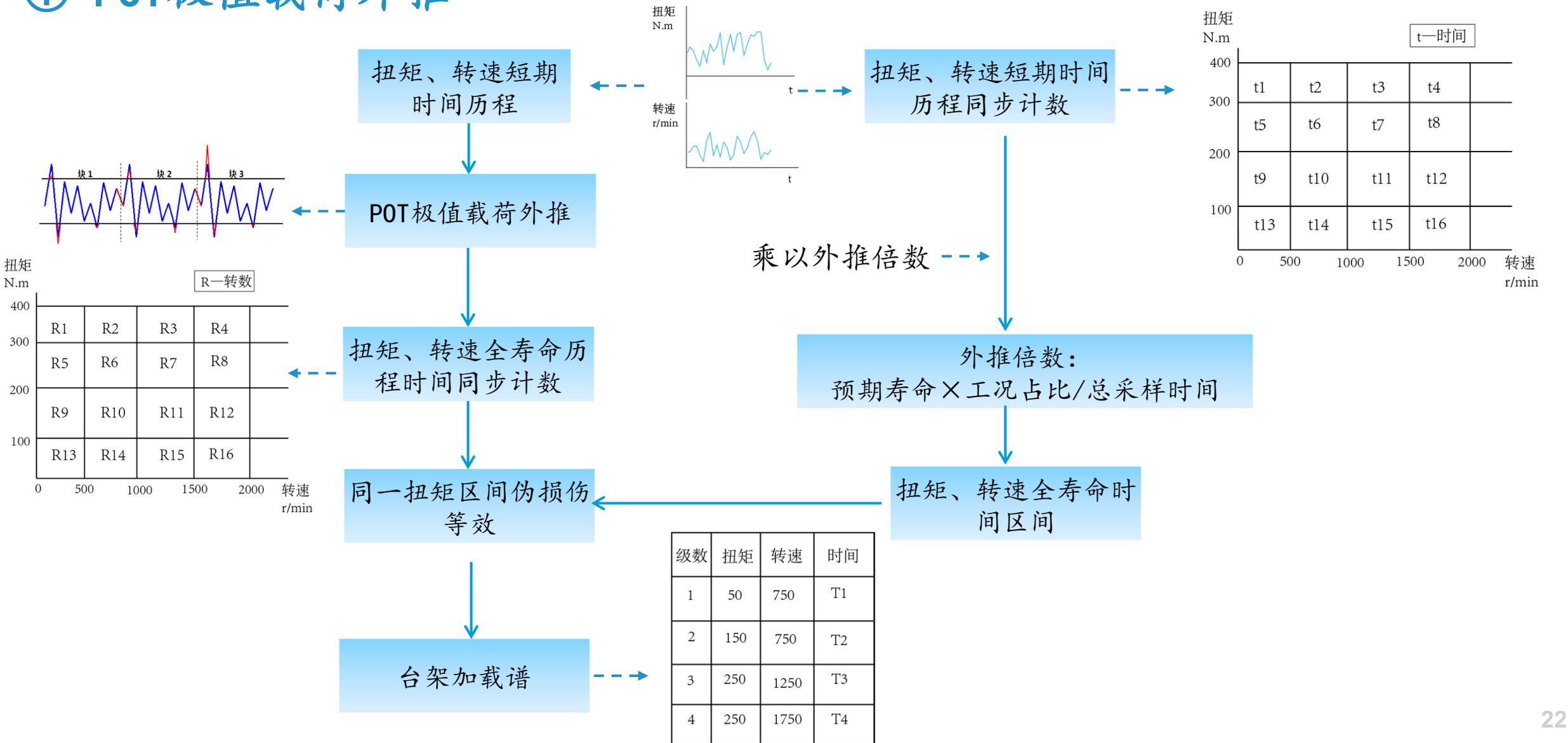
级数	扭矩	转速	时间
1	50	恒定 转速	T <sub>1</sub>
2	110		T <sub>2</sub>
3	170		T <sub>3</sub>
4	230		T <sub>4</sub>
5	290		T <sub>5</sub>
6	340		T <sub>6</sub>
7	380		T <sub>7</sub>
8	400		T <sub>8</sub>



# 内燃机扭矩、压力载荷再现 (装载机)

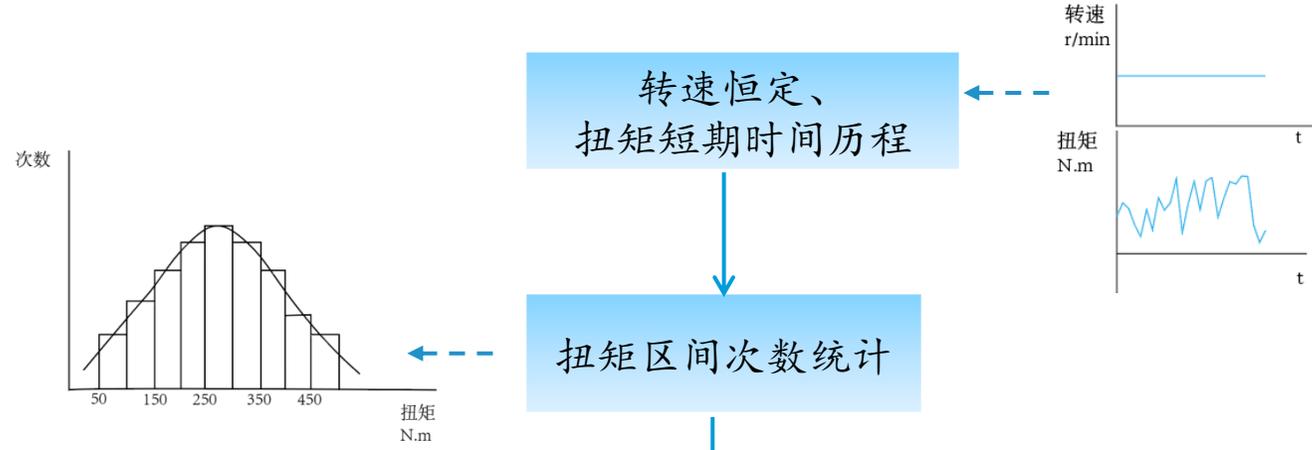
## ① POT极值载荷外推

## ② 比例外推



# 内燃机扭矩、压力载荷再现（挖掘机）

## ③ 参数法外推

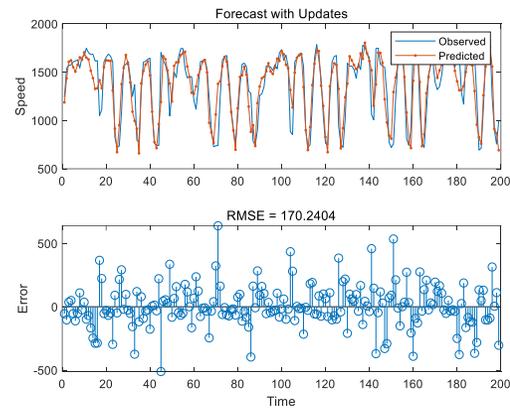
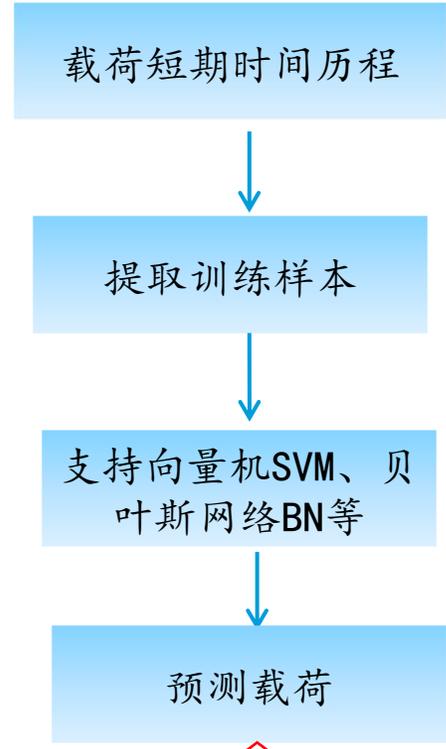


级数	扭矩N.m	转速r/min	时间
1	50	恒定 转速	t1
2	110		t2
3	170		t3
4	230		t4
5	290		t5
6	340		t6
7	380		t7
8	400		t8

八级台架加载谱

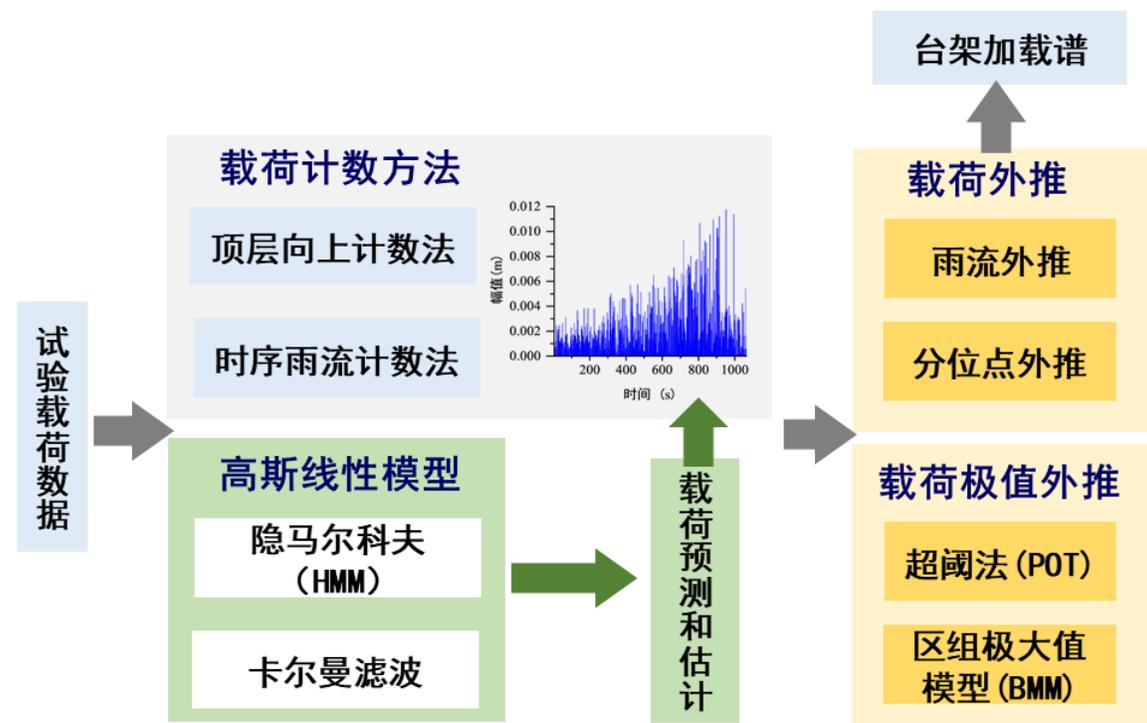
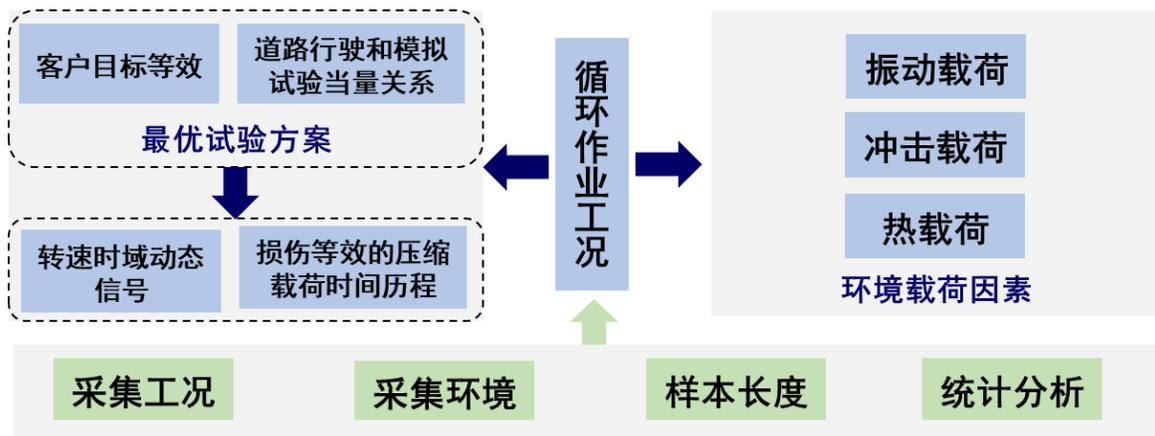
- 扩展后的累计频次N:  
预期寿命 × 工况占比 / 采样间隔时间
- 不等间隔分级: Conver 系数

## ④ 载荷时间序列预测

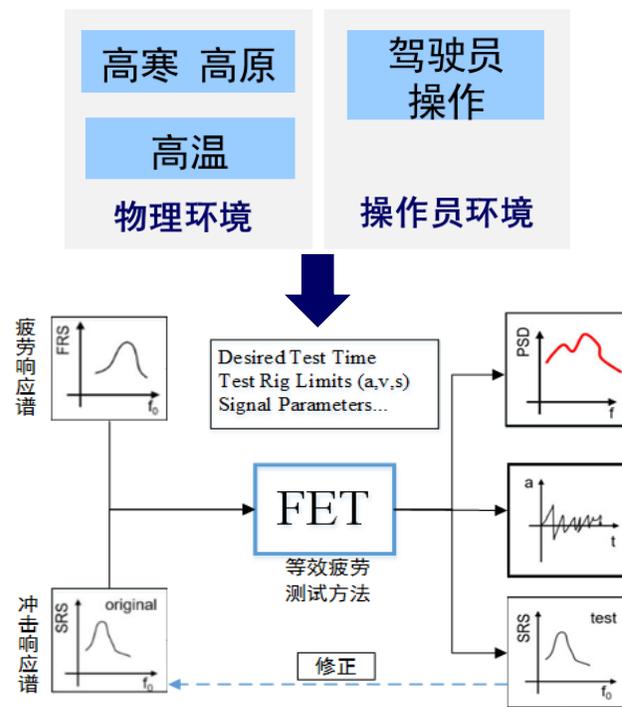
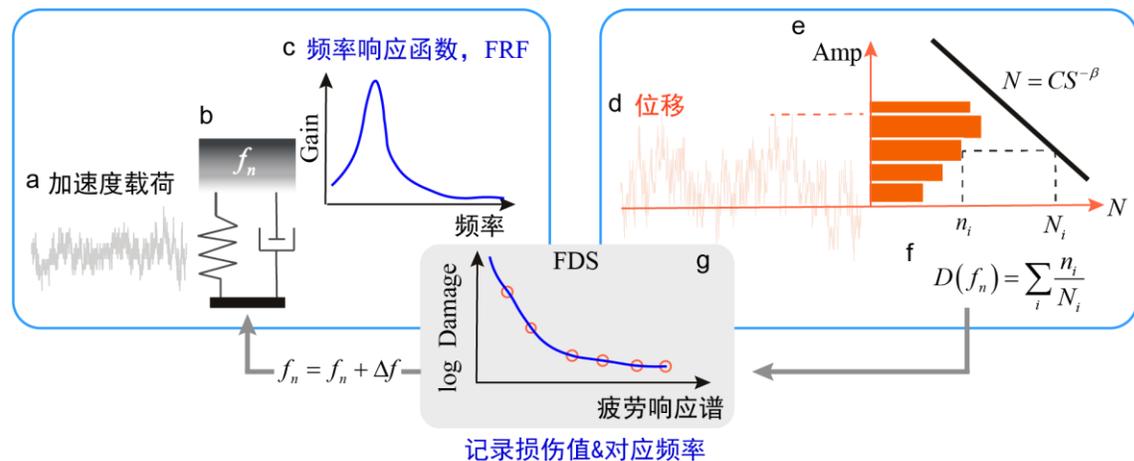


- 短时间预测精度高

# 工程机械内燃机载荷再现—时域再现

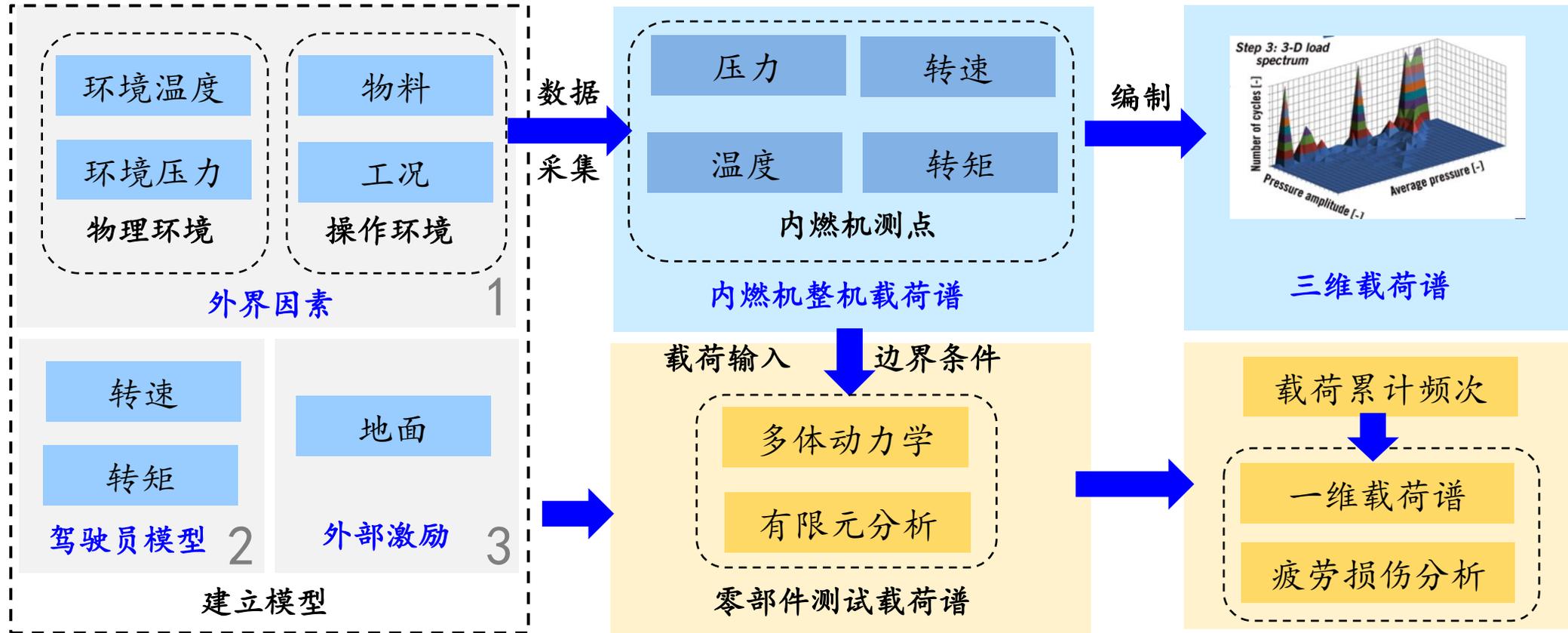


# 不同环境载荷评估与再现



通过冲击响应谱(SRS)和疲劳损伤谱(FDS)描述负载状况, 利用疲劳等效测试原理, 推导基于损伤等效的测试谱和功率谱密度谱, 从而评估和再现不同环境载荷谱。

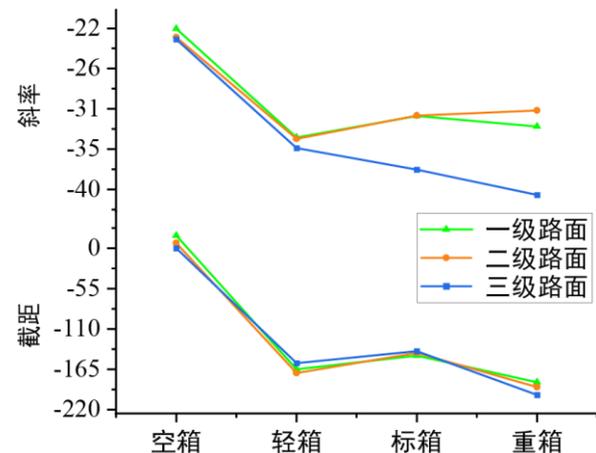
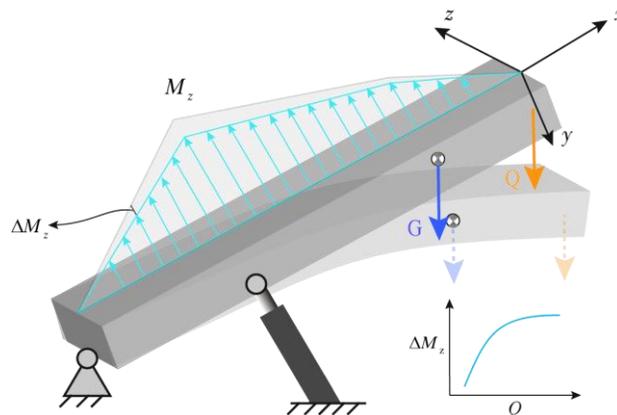
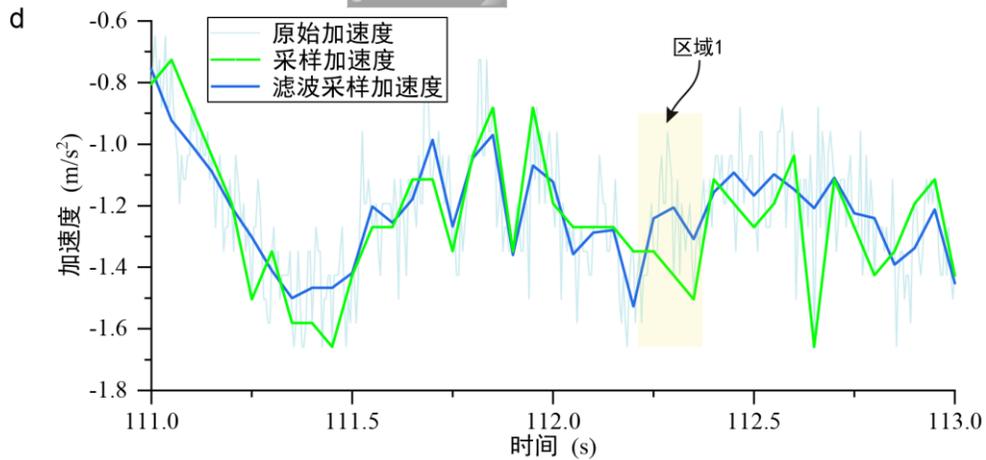
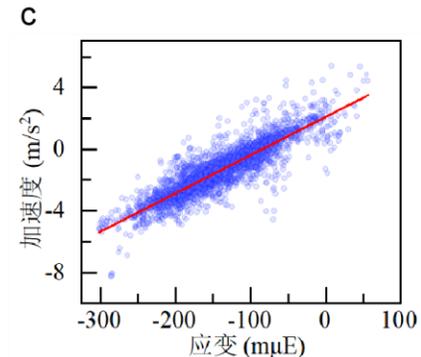
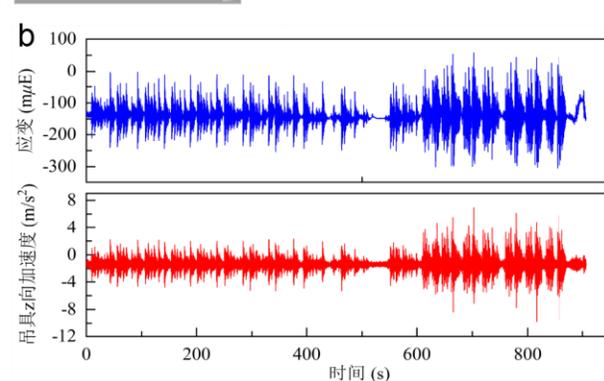
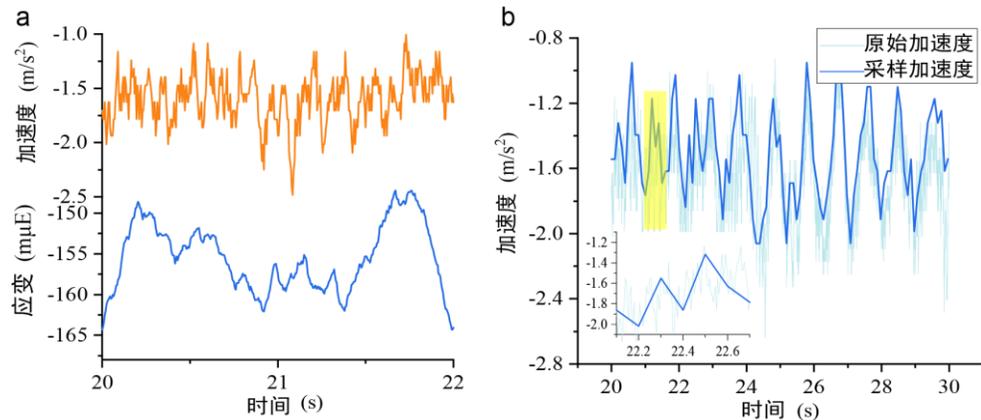
# 工程机械内燃机载荷再现——仿真与试验结合



仿真与试验结合的工程机械内燃机载荷谱编制与再现，  
实现工程机械内燃机整机载荷谱到零部件载荷的映射。

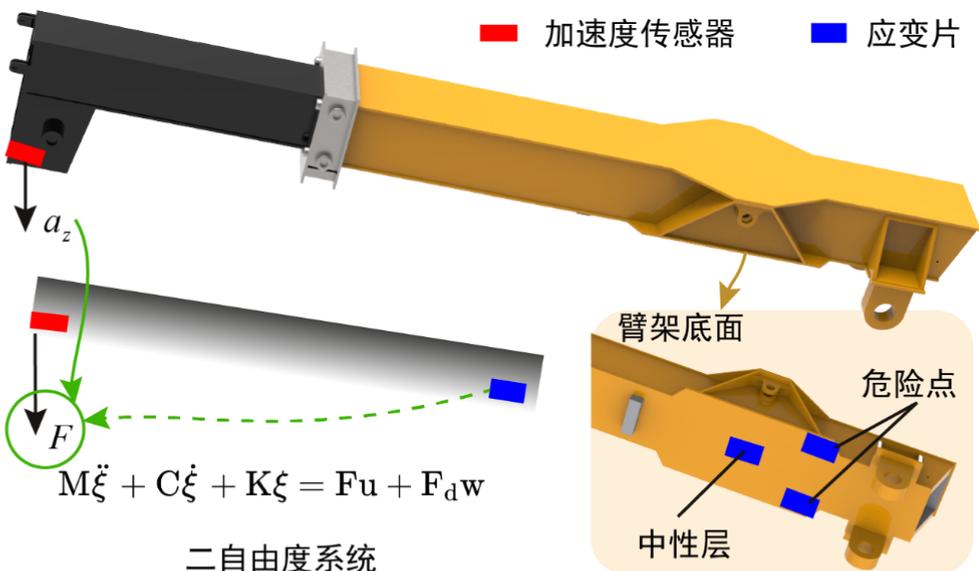
# 载荷谱再现的相关研究工作

# 臂架结构加速度再现应力载荷



# 基于扩展卡尔曼滤波的力载荷再现

建立二自由度系统状态方程



更利于分析的状态方程

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{G}\mathbf{w} \quad \tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{v}$$

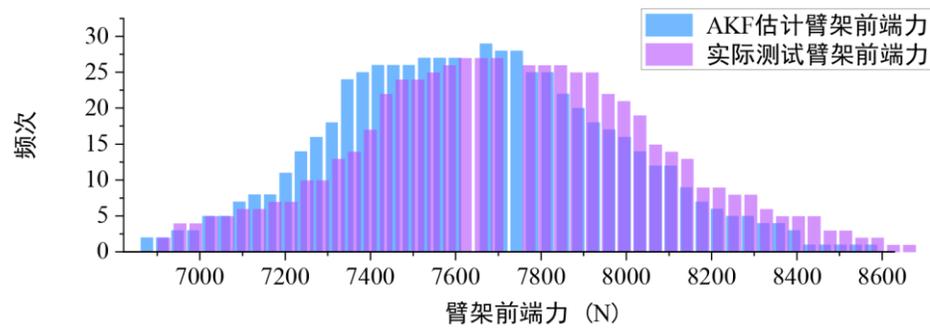
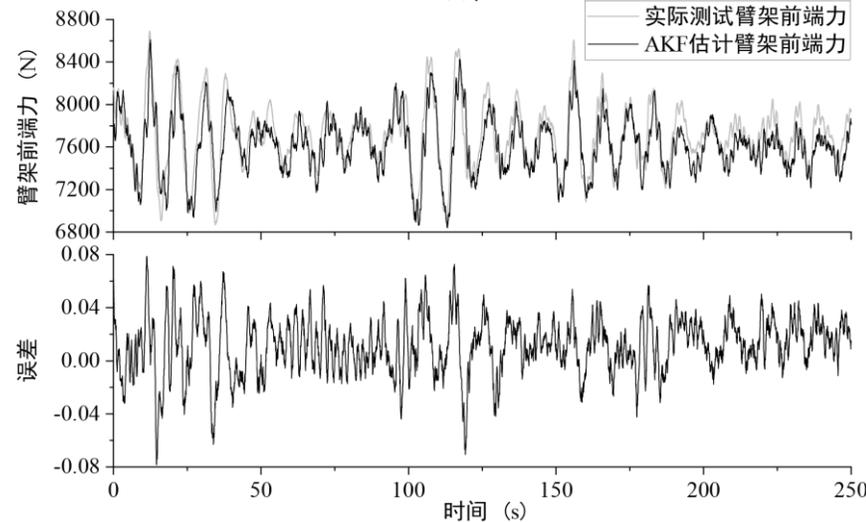
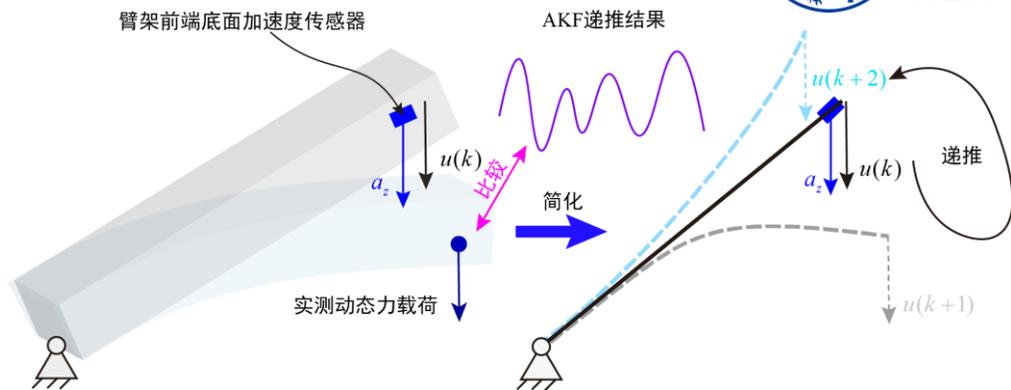
$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{F} \end{bmatrix} \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{F}_d \end{bmatrix}$$

离散化状态方程

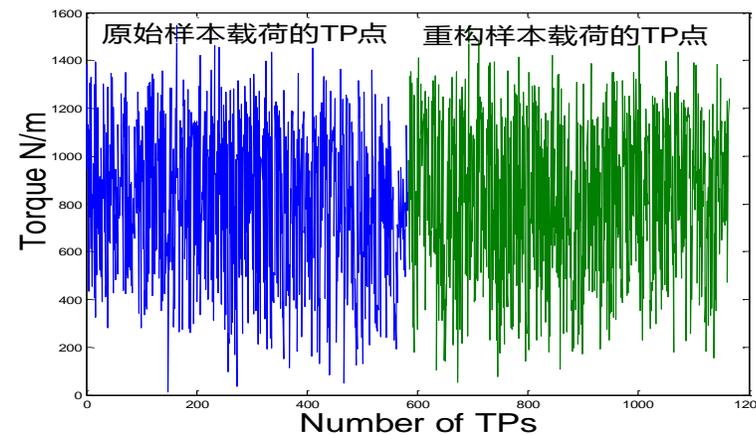
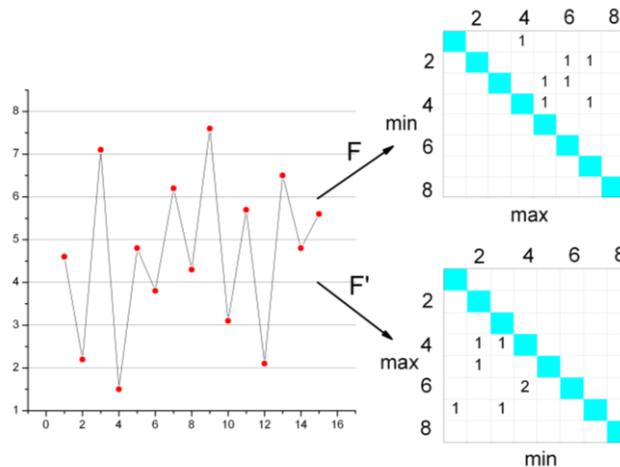
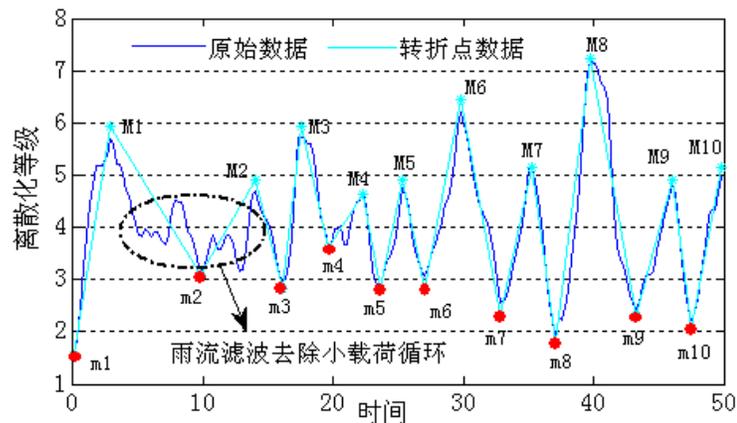
$$\mathbf{x}_{k+1} = \Phi\mathbf{x}_k + \Gamma\mathbf{u}_k + \Upsilon\mathbf{w}_k$$

$$\tilde{\mathbf{y}}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k$$

$$\Phi = e^{\mathbf{A}\Delta t} \quad \Gamma = \left[ \int_0^{\Delta t} e^{\mathbf{A}t} dt \right] \mathbf{B} \quad \Upsilon = \left[ \int_0^{\Delta t} e^{\mathbf{A}t} dt \right] \mathbf{G}$$



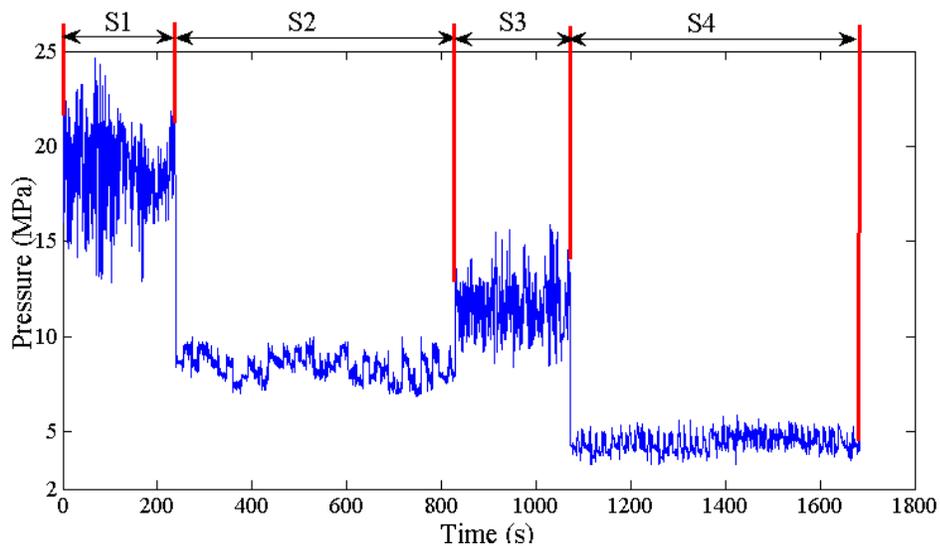
# 装载机扭矩与压力载荷模拟、再现



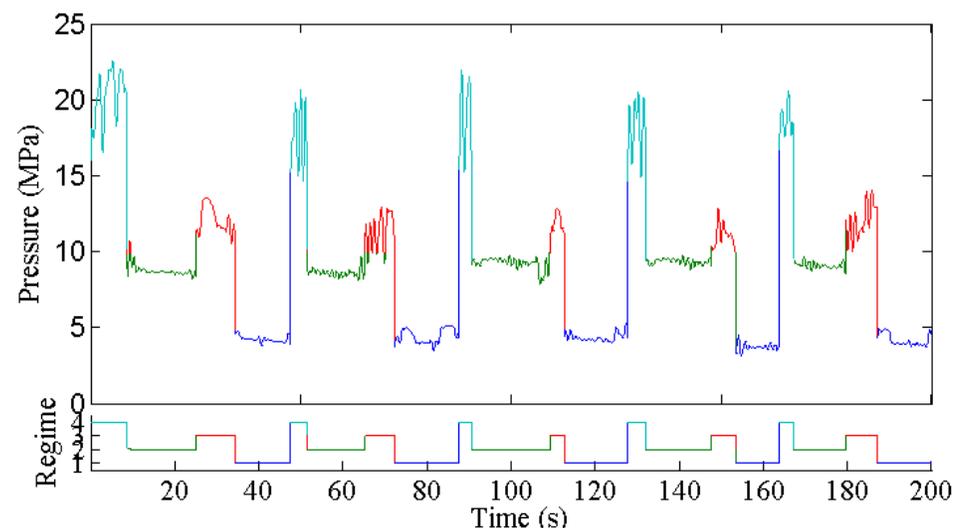
转折点的提取和小载荷循环的滤除

马尔可夫矩阵的提取过程

单个作业段MCMC载荷重构对比图



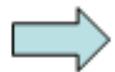
分段提取载荷，段与段之间有明显的转折



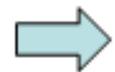
基于HMM的非平稳转折载荷模型

# 传动齿轮元件的载荷谱模拟和全局优化设计

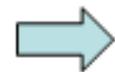
控制策略



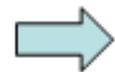
动力学分析



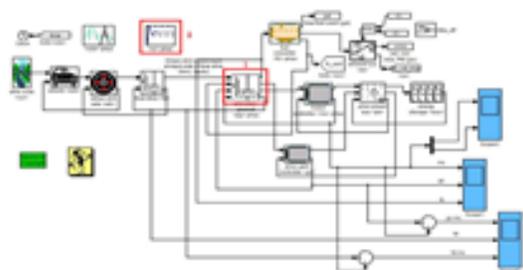
多场耦合分析



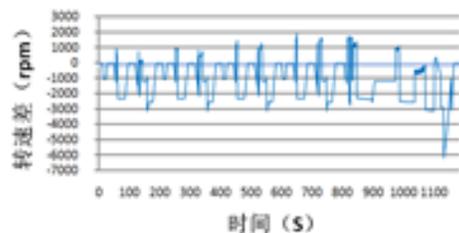
失效机理



全局优化

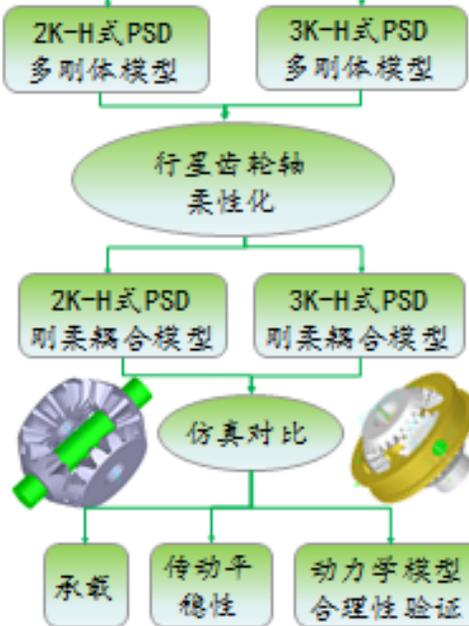


Advisor仿真模型

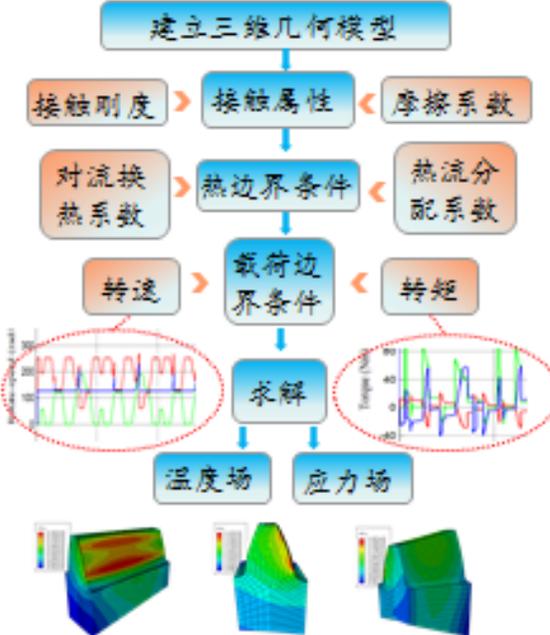


— 发电机(齿轮1)与电动机(齿轮3)转速差 (rpm)

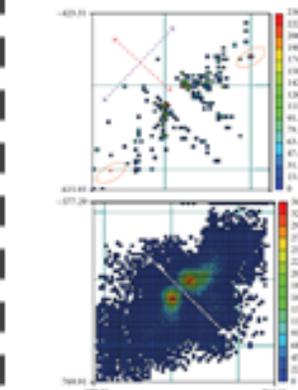
两半轴齿轮转速差



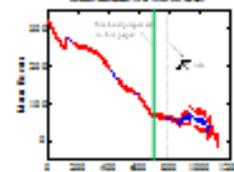
PSD动态特性分析流程



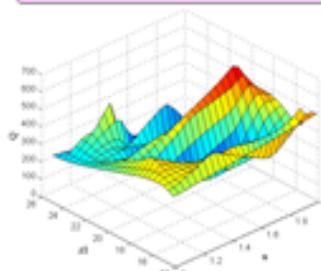
PSD齿轮热-结构耦合分析



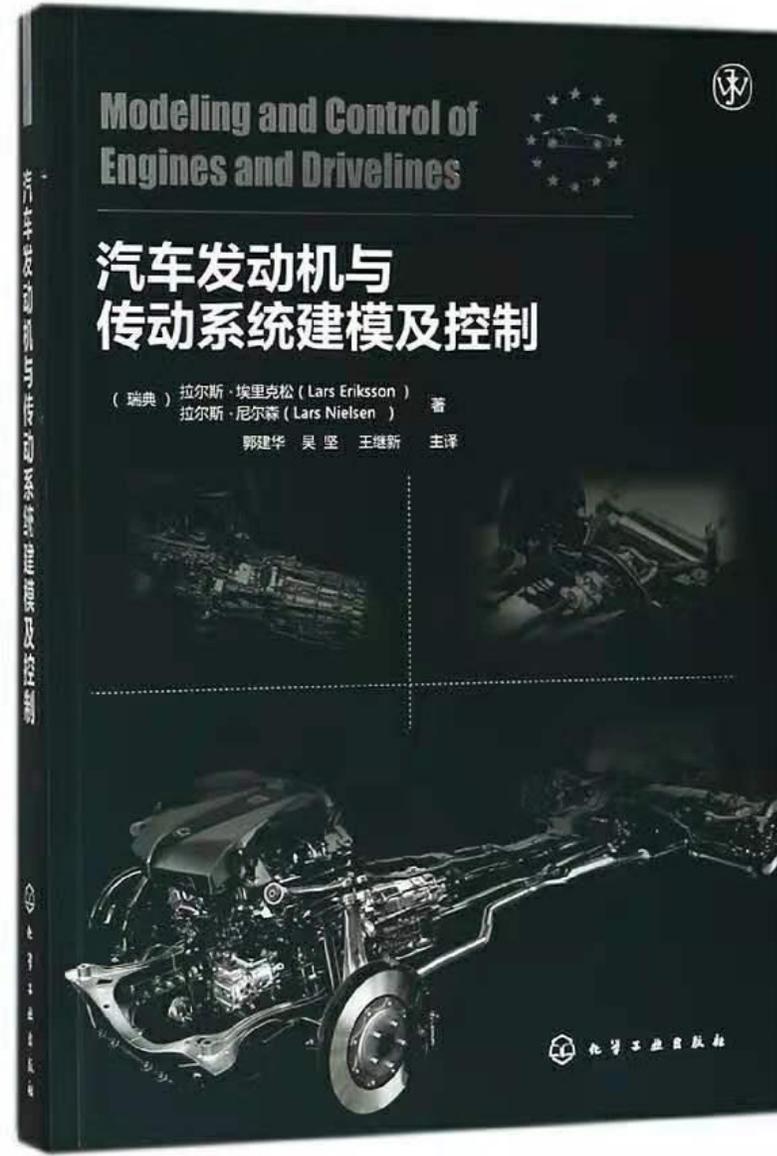
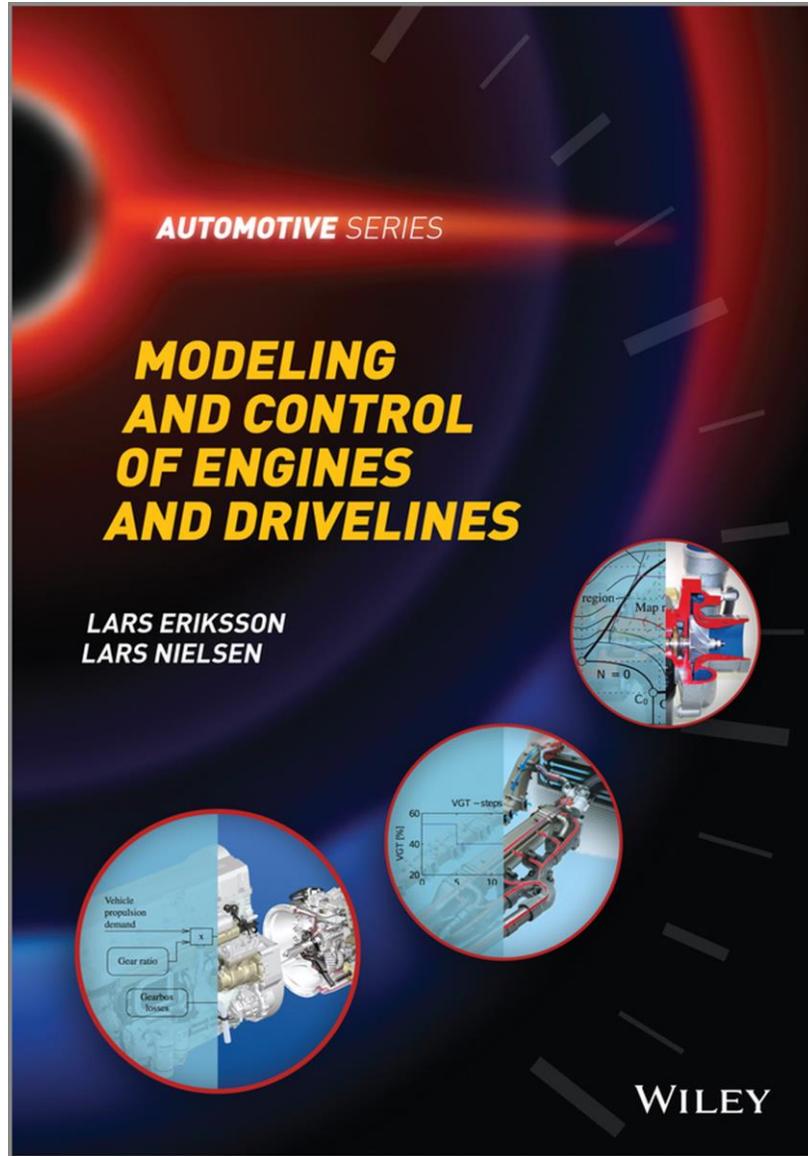
外推前后载荷对比



阈值确定新方法



PSD代理模型



# 敬请各位专家学者批评指正!

