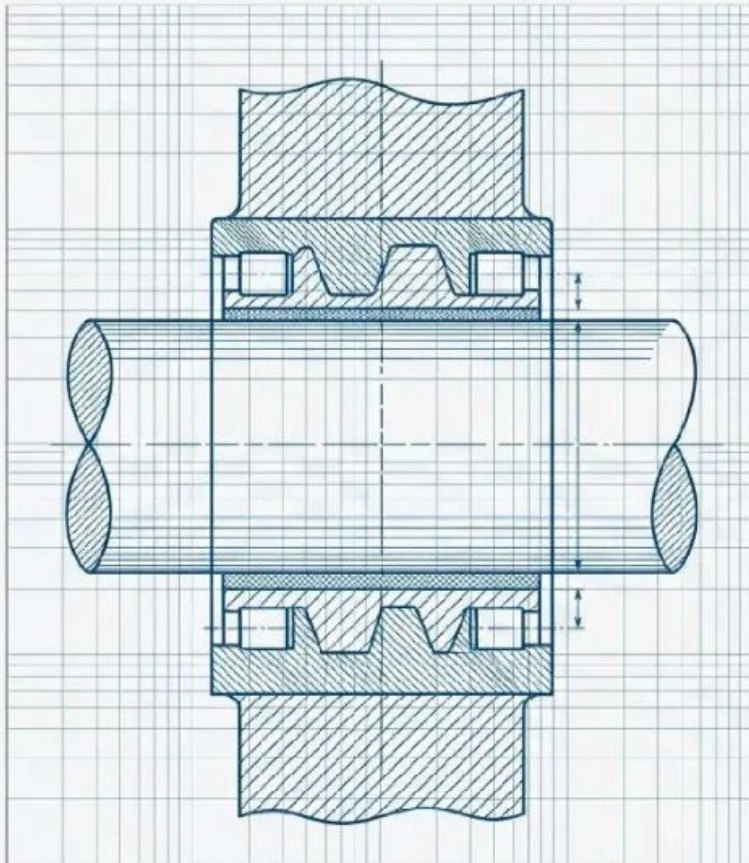


# 滑动轴承润滑工程计算实例

轴瓦设计与选型方案

---



# B公司 DM-i 混动发 动机：滑动轴承润 滑粘度精细化计算与 选型方案



[Source: Viscosity\_Thermal\_Iteration; NASA Report; BYD Technical Docs]

# 输入挑战：混动工况对传统润滑体系的冲击

## 输入挑战：混动工况 (PHEV) 对传统润滑体系的冲击



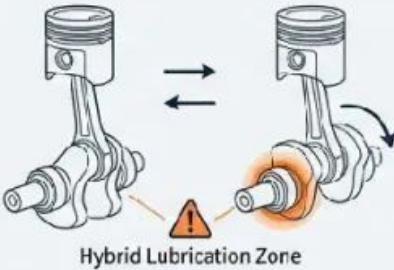
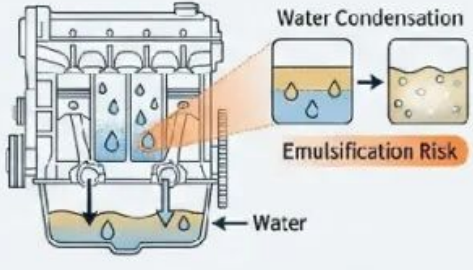
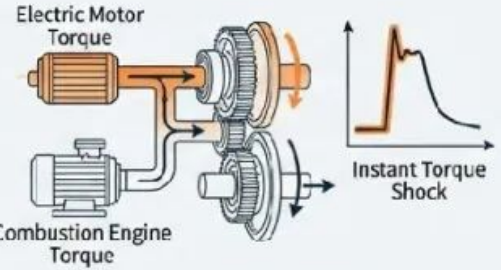


 <p><b>频繁启停</b> (Frequent Start/Stop)</p>	 <p><b>低温短途</b> (Cold Start/Short Trips)</p>	 <p><b>瞬时高载</b> (Instant Load Switching)</p>
<p>相比传统燃油车，DM-i 发动机需在 EV/HEV 模式间频繁切换，导致轴承频繁经历“0 rpm → 怠速”的混合润滑区，磨损风险剧增。</p>	<p>发动机往往在未达最佳工况温度 (&lt;math&gt;&lt;80^{\circ}\text{C}&lt;/math&gt;) 下运行，增加了水汽凝结与机油乳化的风险 (乳化稳定性要求高于标准 2.5 倍)。</p>	<p>模式切换时，轴承需承受电机与发动机扭矩耦合带来的瞬时冲击载荷。</p>
 <p>Hybrid Lubrication Zone</p>	 <p>Water Condensation Emulsification Risk Water</p>	 <p>Electric Motor Torque Combustion Engine Torque Instant Torque Shock</p>
 <p>Hybrid Planetary Gear Set</p>		
<p>[Source: BYD launched PHEV engine oil report; User Manual]</p>		

图1 混动工况 (PHEV) 对传统润滑体系的冲击

# 仿真边界定义：热力学与运动学参数输入

Precision Engineering Journal

## 仿真边界定义：热力学与运动学参数输入



Input Parameters	
参数 (Parameter)	数值 / 定义
温度范围 (Temperature)	冷启动 -10°C (极端) 至 110°C (热平衡)
转速范围 (Speed)	800 rpm (怠速) 至 4000 rpm (高负荷)
润滑介质 (Lubricant)	B公司定制 0W-20 (超低粘度)
轴承类型 (Bearing)	短轴承 approximat ( $L/D \leq 1$ )

INPUT PARAMETERS (Green Cells)	
轴颈直径 D [mm]	[Value]
轴承长度 L [mm]	[Value]
半径间隙 C [mm]	[Value]
转速 N [rpm]	[Value]
载荷 W [N]	[Value]
进油温度 $T_{in}$ [°C]	[Value]
油品 v40, v100 [cSt]	[Value]

[Source: Viscosity\_Thermal\_Iteration; BYD User Manual; Excel Calculator]

图2 热力学与运动学参数输入

# 理论核心 I : ASTM D341 粘温衰减模型

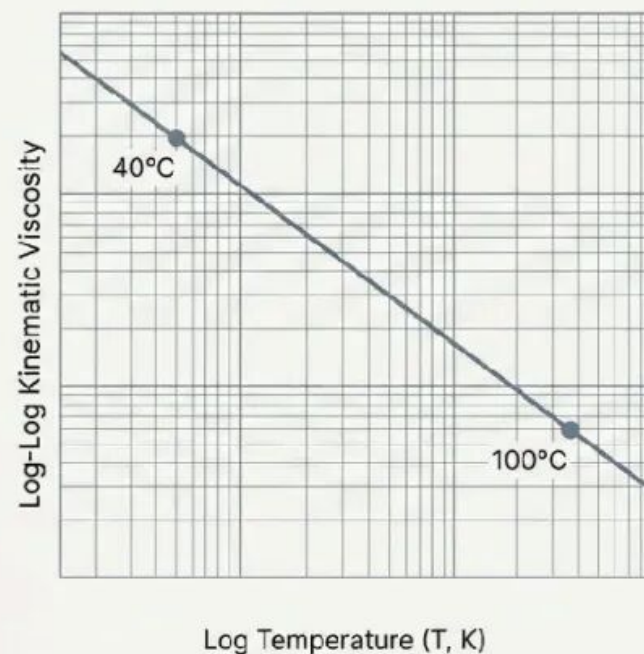
## 理论核心 I: ASTM D341 粘温衰减模型

液压油/润滑油的运动粘度随温度呈双对数下降关系。需通过 V40 和 V100 两个参考点拟合全温域曲线。

$$\log(\log(v + 0.7)) = A - B \log(T)$$

$v$  = 运动粘度 (cSt)

$T$  = 绝对温度 (K)



[Source: ASTM D341 Standard; Viscosity\_Thermal\_Itera

图3 ASTM D341 粘温衰减模型

## 理论核心 II：雷诺方程与短轴承近似解 (Ocvirk)

Precision Engineering Journal

### 理论核心 II：雷诺方程与短轴承近似解 (Ocvirk)

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{h^3}{\mu} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 6U \cdot \frac{\partial h}{\partial x}$$

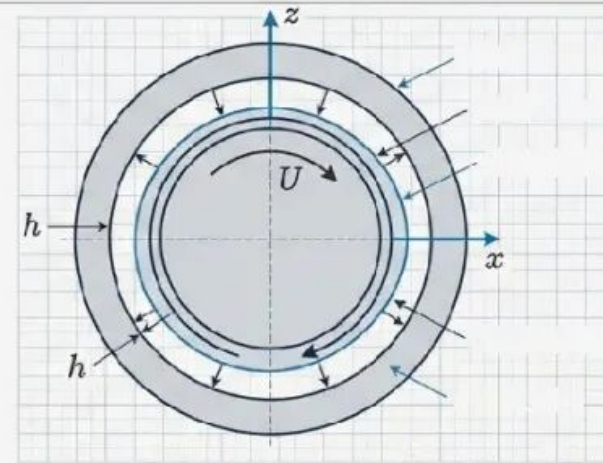
针对  $L/D \leq 1$  的曲轴轴承，忽略周向压力梯度 ( $\partial P/\partial x$ ) 以简化计算量。

$h$  (膜厚)

$\mu$  (动力粘度)

$P$  (油膜压力)

$U$  (轴颈线速度)



[Source: Precision Engineering Handbook; Viscosity\_Thermal\_Iteration.pdf]

图4 雷诺方程与短轴承近似解

## 核心解算 I：修正索末菲数 ( $\sigma$ ) 的构建

Precision Engineering Journal

### 核心解算 I：修正索末菲数 ( $\sigma$ ) 的构建

$$\sigma = \mu \frac{\Omega L D}{4W} \cdot \left(\frac{R}{C}\right)^2$$

$\Omega$ : 轴颈角速度       $L$ : 轴承长度       $D$ : 轴颈直径  
 $R$ : 轴颈半径  
 $C$ : 半径间隙  
 $\mu$ : 动力粘度 [Pa·s]       $W$ : 轴承载荷

高  $\sigma$  (High Sommerfeld)  $\rightarrow$  高速/轻载  $\rightarrow$  轴颈居中 ( $\varepsilon \rightarrow 0$ )  $\rightarrow$  安全 (Safe)

低  $\sigma$  (Low Sommerfeld)  $\rightarrow$  低速/重载  $\rightarrow$  轴颈贴壁 ( $\varepsilon \rightarrow 1$ )  $\rightarrow$  风险 (Risk)

[Source: San Andres Notes; Viscosity\_Thermal\_Iteration.pdf]

图5 修正索末菲数 ( $\sigma$ ) 的构建

## 核心解算 II：偏心率 ( $\epsilon$ ) 与最小油膜厚度 ( $h_{\min}$ )

Precision Engineering Journal

### 核心解算 II：偏心率 ( $\epsilon$ ) 与最小油膜厚度 ( $h_{\min}$ )

#### Key Formulas and Logic

1.  $\sigma \rightarrow \epsilon$ : 通过 Ocvirk 解析解或查表法确定偏心率。
2.  $h_{\min} = C(1 - \epsilon)$
3.  $\tan \varphi = \frac{\pi\sqrt{1-\epsilon^2}}{4\epsilon}$

[Source: Viscosity\_Thermal\_Iteration.pdf]

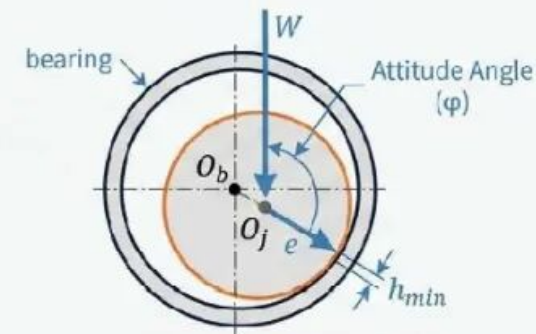
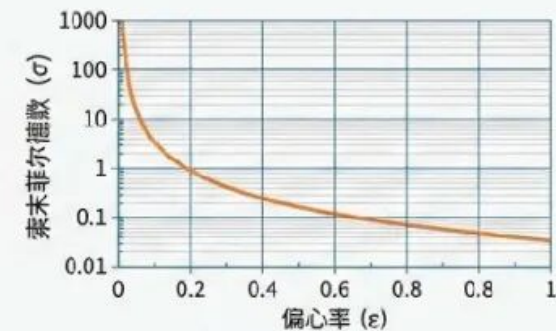
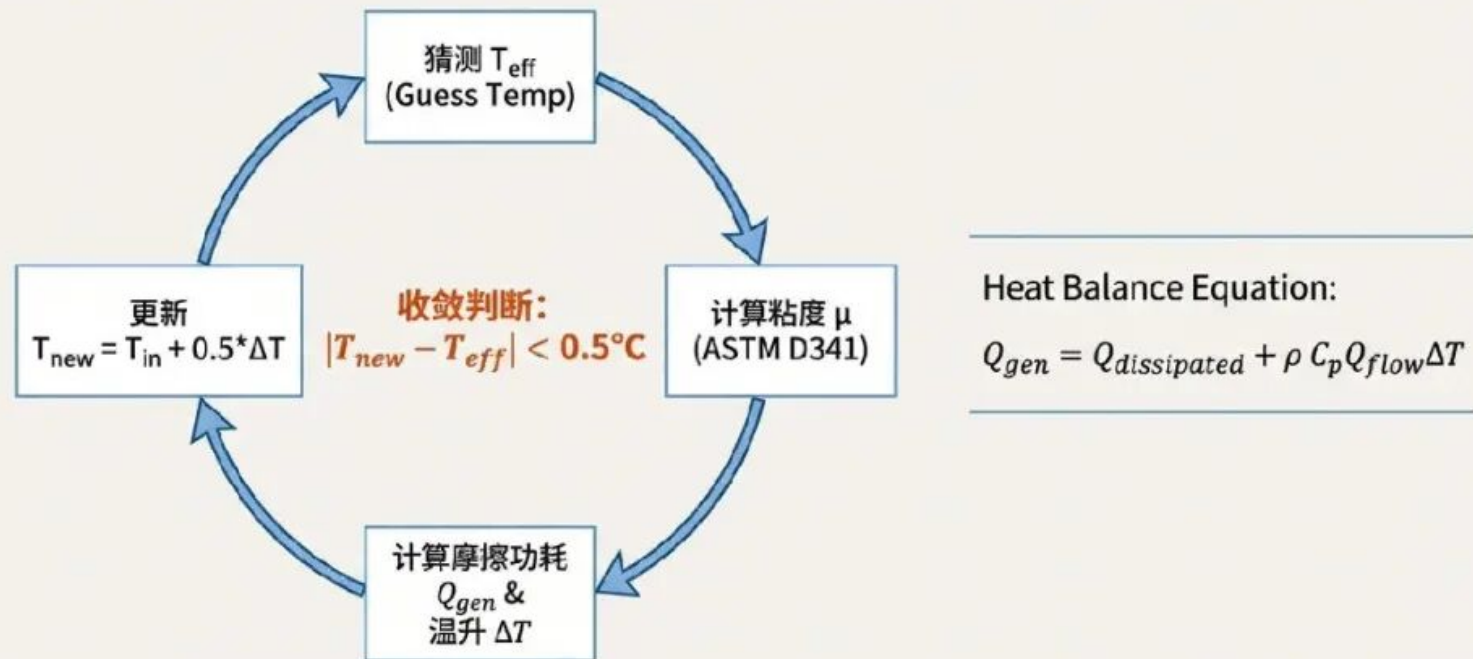


图6 偏心率与最小油膜厚度

# 热平衡迭代：粘度-温度-功耗的耦合计算

## 关键工程逻辑：粘度-温度-摩擦功耗的热平衡迭代



[Source: Viscosity\_Thermal\_Iteration.pdf; Precision Engineering Handbook]

图7 热平衡迭代：粘度-温度-功耗的耦合计算

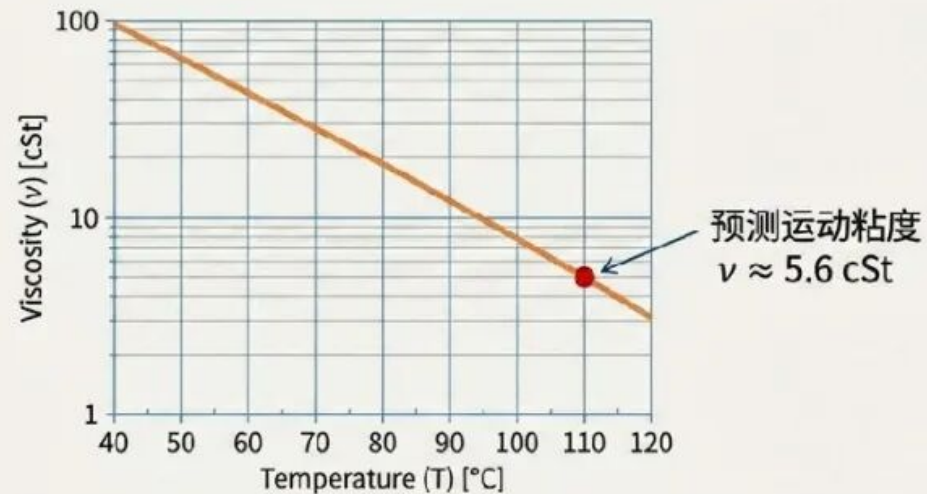
# 工程验证 I：油膜厚度 vs 表面粗糙度

Precision Engineering Journal

## 案例分析：DM-i 110°C 极限工况下的粘度推演

### Scenario Data Box

- 工况：高速巡航 + 电池馈电 (HEV Mode)
- 油温 (Oil Temp): 110°C
- 转速 (Speed): 3000 rpm
- 载荷 (Load): 20 kN



结果：高温导致粘度显著下降，修正索末菲数 ( $\sigma$ ) 降低，轴承承载能力受压。

[Source: Mobil Product Data logic; Viscosity Calculation]

图8 工程验证 I：油膜厚度 vs 表面粗糙度

## 工程验证 II：PV值与轴承承载能力

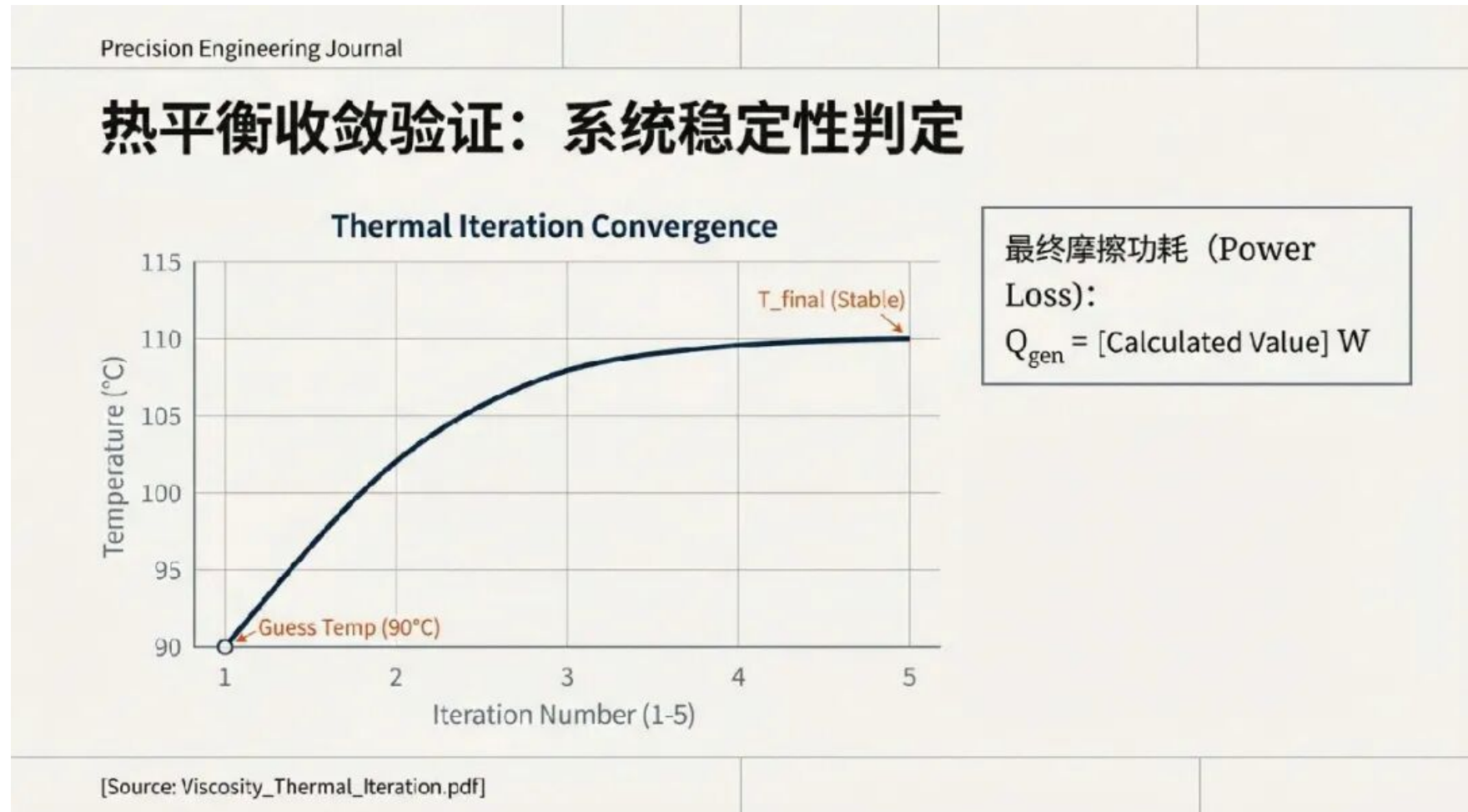


图9 工程验证 II：PV值与轴承承载能力

## 工程验证 III：热平衡温度与粘度保持率



图10 工程验证 III：热平衡温度与粘度保持率

# 选型方案对比：0W-20 vs 5W-30

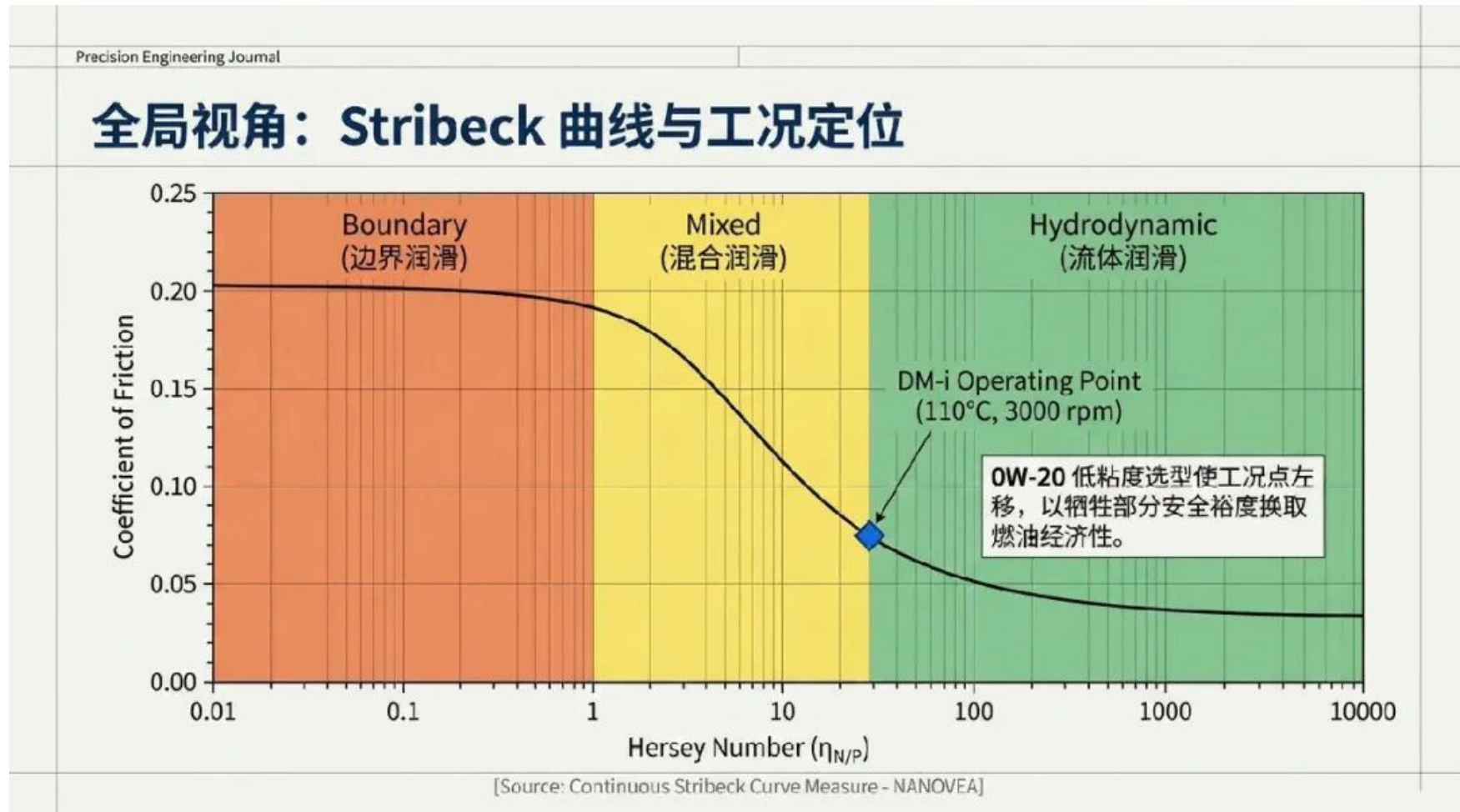


图11 选型方案对比：0W-20 vs 5W-30

# 关键设计参数汇总

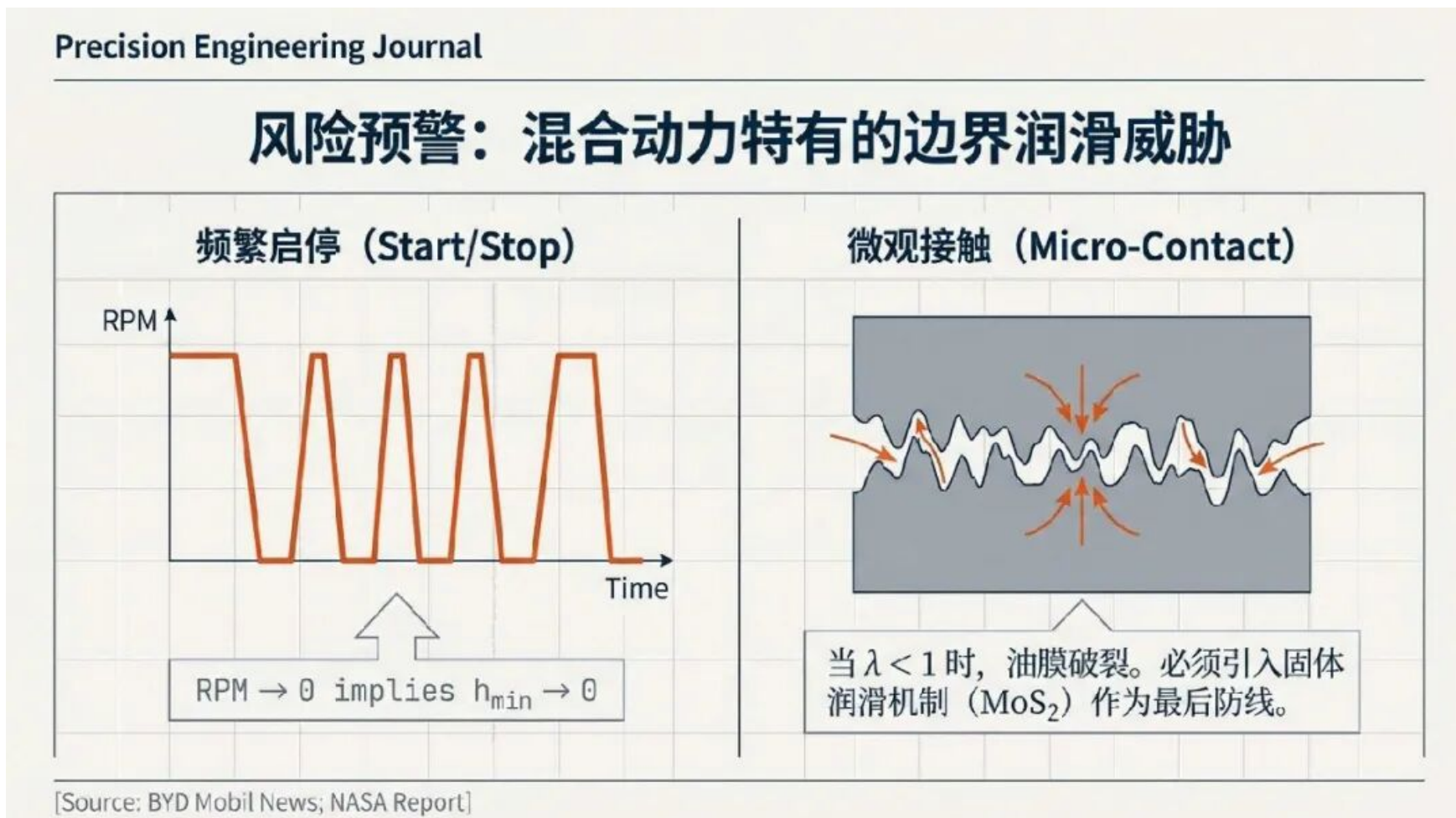
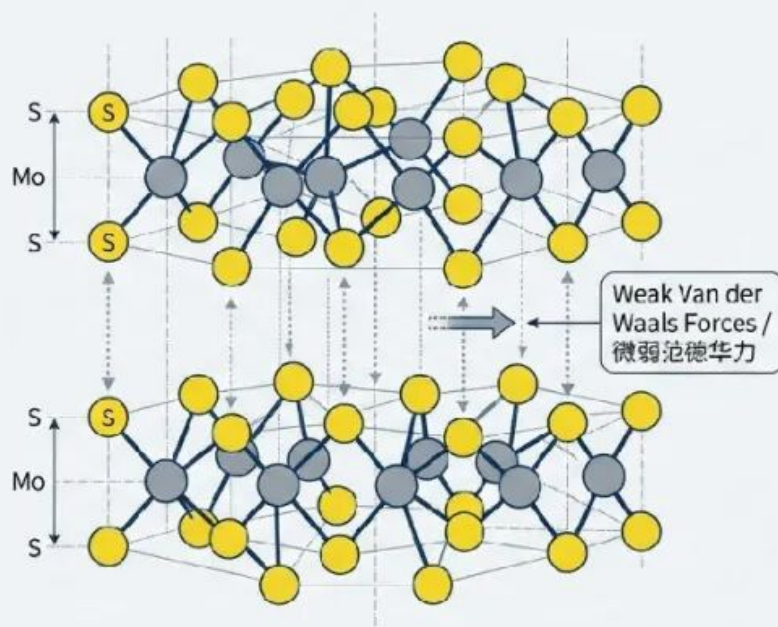


图12 关键设计参数汇总

# 设计建议与风险提示

Precision Engineering Journal

## 系统优化 I：二硫化钼 (MoS<sub>2</sub>) 的晶体物理机制



- **六方晶系结构 (Hexagonal Structure) :** 硫原子层间的范德华力级，层位于r方层间度力的基础度。
- **低剪切力原理:** 硫原子层间的范德华力极弱，受力易发生层间滑移 (**Basal Plane Shearing**) 。
- **扑克牌效应 (Deck of Cards Analogy) :** 即使油膜失效，层状结构也能提供 **<0.02 的极低摩擦系数**。

[Source: NASA Coating Research; Mahale et al.]

图13 设计建议与风险提示

# 结论与展望

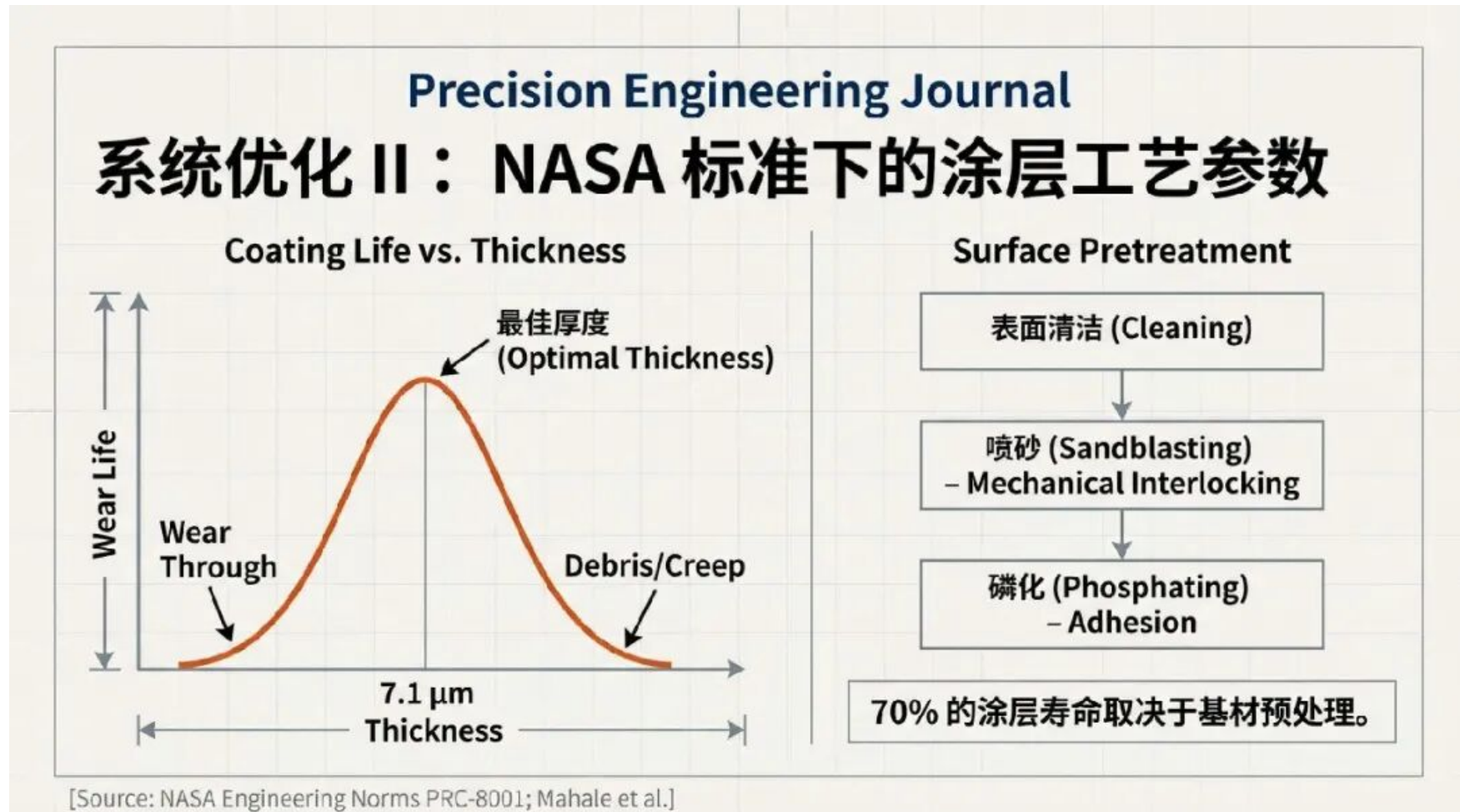


图14 结论与展望

# 参考资料与致谢

Precision Engineering Journal

润滑毛工

## 总结与建议：低粘度 + 固体涂层的双重防线

**High Efficiency**  
0W-20  
稳态流体润滑 ( $\lambda > 3$ )

**High Safety**  
MoS2  
启停边界润滑 (Backup)

BALANCE

最终方案：精确计算的 0W-20 低粘度机油 + NASA 标准 7.1 $\mu$ m MoS2 涂层 = DM-i 系统的高效与可靠。

[Synthesized Strategy for B Company DM-i Powertrain] in Steel Gray JetBrains Mono

图15 参考资料与致谢