吉利三缸机NVH开发与应用

Geely I3 Engine NVH Development and Application

- 吉利汽车研究院整车工程中心　　滕晓雷
  吉利汽车动力研究院　　邓晓龙

- 2019.10.23

总结 Agenda

1. 三缸发动机的优势和吉利三缸发动机战略
   (I3 Engine Advantage and Geely Development Strategy)
2. 三缸发动机激励特性及NVH挑战
   (I3 Engine Excitation and NVH Challenges)
3. 吉利三缸发动机NVH开发策略
   (Geely I3 Engine NVH Development Strategy)
4. 吉利三缸发动机NVH开发案例分享
   (Geely I3 Engine NVH Development Examples)
5. 吉利三缸发动机NVH目前的水平 (Geely I3 Engine NVH Status)
6. 结论 (Conclusions)

1. 三缸机优势和吉利三缸机战略

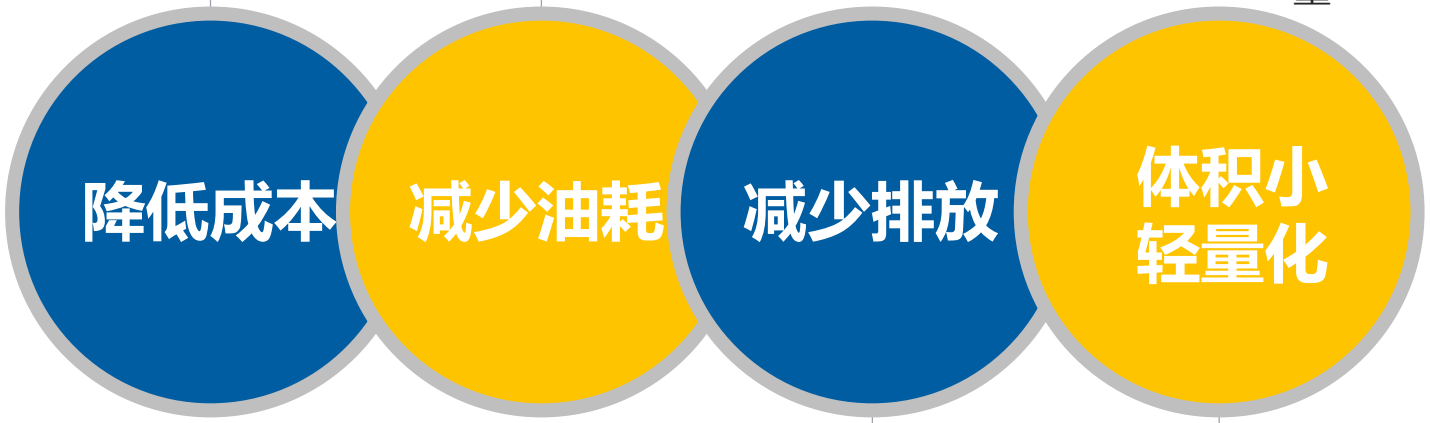
三缸发动机的优势

机构少

相对四缸机减少一个气缸及相应的点火、喷油、润滑系统

摩擦力小

相对四缸机减少一套摩擦副
减少配套供油、供气、点火等能量



政策导向

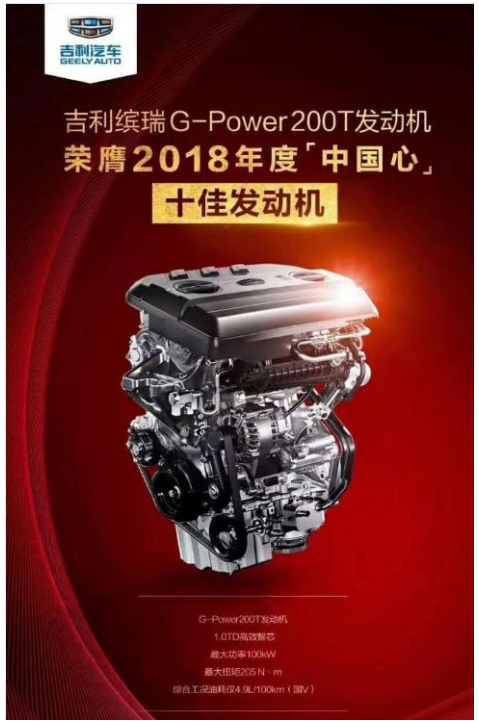
国家法规对汽车排放日益严苛，三缸机搭配混动系统成为市场趋势。

减重降本

相对体积小，容易搭载混动系统
相对质量轻，有利于轻量化

- 采用1.5L排量+增压：改善油耗的前提下，保证发动机的动力性
- 采用新一代平衡轴技术+离心摆双质量飞轮：降低发动机的激励源，有效的改善抖动和敲击
- 优化三缸机的控制与标定：降低发动机的激励源，改善加速轰鸣和振动

1. 吉利三缸机战略：1.0L



- 额定功率：100kW@6000rpm
- 最大扭矩：205Nm@2000-3000rpm
- 低速扭矩：180Nm@1500rpm

- 缸内直喷系统， 中置喷油器， 凸轮驱动式高压油泵（200bar）
- 排气歧管集成式铝合金缸盖
- 双顶置凸轮轴，一档球轴承，双连续可变VVT，4 气门，滚子摇臂（RFF）+液压挺柱（HLA）
- 薄壁铸造缸体，8mm曲轴偏置
- 分体式冷却系统
- 电磁式两级可变排量机油泵
- 齿驱式平衡轴系统，集成机油泵
- 小惯量增压器，提高响应速度
- 兼容BSG

GEELY

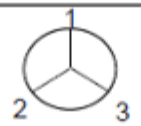
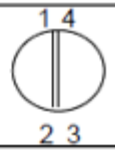
1. 吉利三缸机战略：1.5L

- 额定功率：132kW@5500rpm
- 最大扭矩：260Nm@1500-4000rpm
- 低速扭矩：140Nm@1000rpm

- 缸内直喷系统， 静音高压油泵，自减振喷油器
- 超静音皮带
- 非正圆VVT
- 静音减振曲轴皮带轮
- 减振平衡轴系统
- 钟摆式双质量飞轮
- OAD+静音发电机
- 传统，BSG（P0），& PHEV （P2.5）

2．三缸机激励特征和NVH挑战

三缸机和四缸机激振力比较

	三缸	四缸
曲轴布置形式		
点火间隔	240°	180°
发动机激励主阶次	1.5阶	2阶
1阶不平衡力	无	无
1阶不平衡力矩	$\sqrt{3} \times L \times M_0 \times r \times \omega^2$	无
2阶不平衡力	无	$4 \times \lambda \times M_0 \times r \times \omega^2$
2阶不平衡力矩	$\sqrt{3} \times L \times \lambda \times M_0 \times r \times \omega^2$	无
扭矩&转速波动	$1.35 \times a$	a

Note：L：缸心距；M_0：往复质量；r：曲柄半径；ω：角加速度；λ：曲连比；a：四缸机扭矩&转速波动

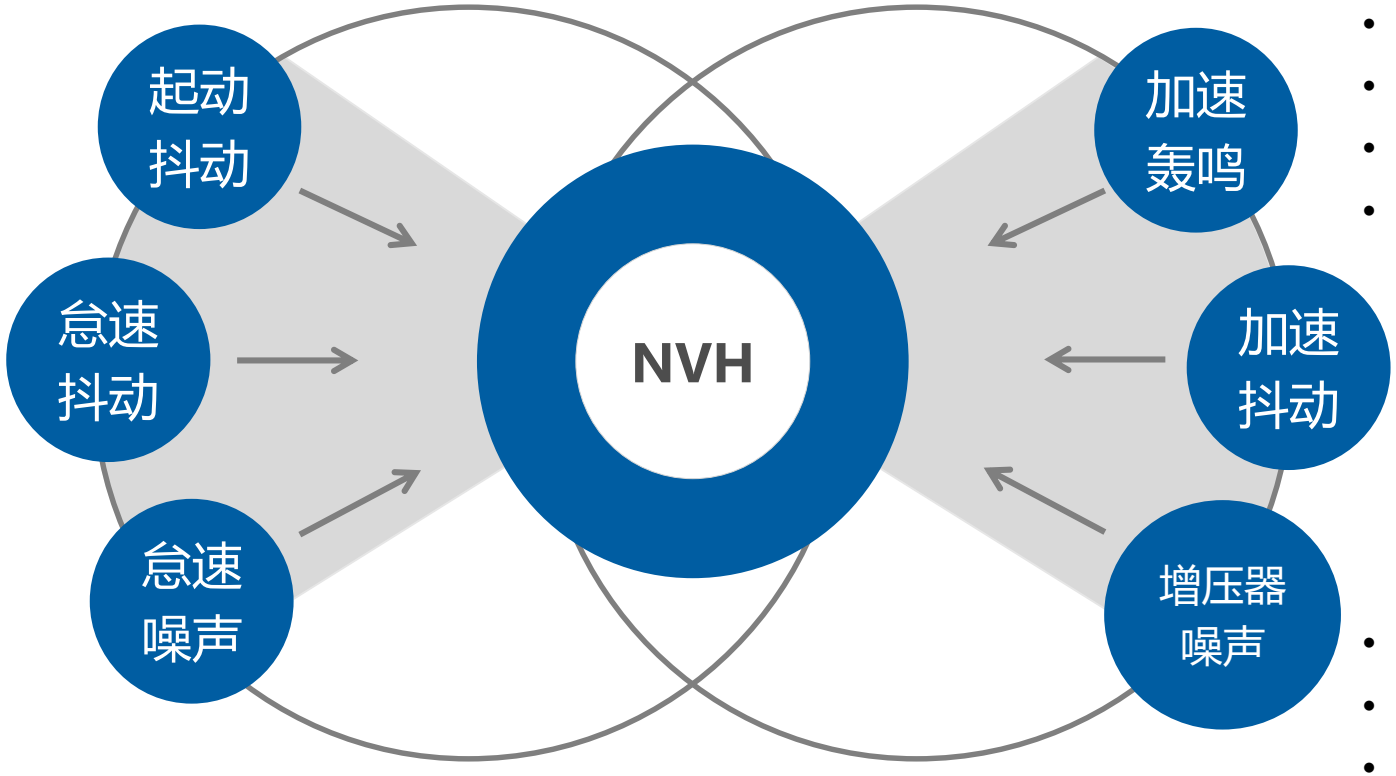
- 三缸发动机激励特征
  - 主阶次为1.5阶，相同转速下：
    - 频率较四缸机低
    - 激励扭矩较四缸机大 (35%)
  - 燃烧激励较四缸机大
  - 三缸机存在一阶不平衡力矩
- 三缸机NVH挑战
  - 动总悬置刚度可选范围更窄
  - 启动抖动和怠速振动更难于平衡
    - 通常需要加平衡轴来解决怠速一阶振动
  - 由于架构车身多数是为四缸机开发，匹配三缸机时，加速轰鸣和加速振动现象更明显
  - 由于曲轴扭振引起的结构敲击声较四缸机恶化。

3．吉利三缸机NVH开发策略

- 标定优化点火能量
- 悬置优化
- 加大起动电机功率

- 合理的模态分布
- 提高悬置解耦率
- 加平衡轴
- damper式安全气囊（方向盘）

- 前围声包优化
- 提高悬置支架动刚度
- 加damper降低NTF
- 优化碳罐系统
- 双质量飞轮降低扭振



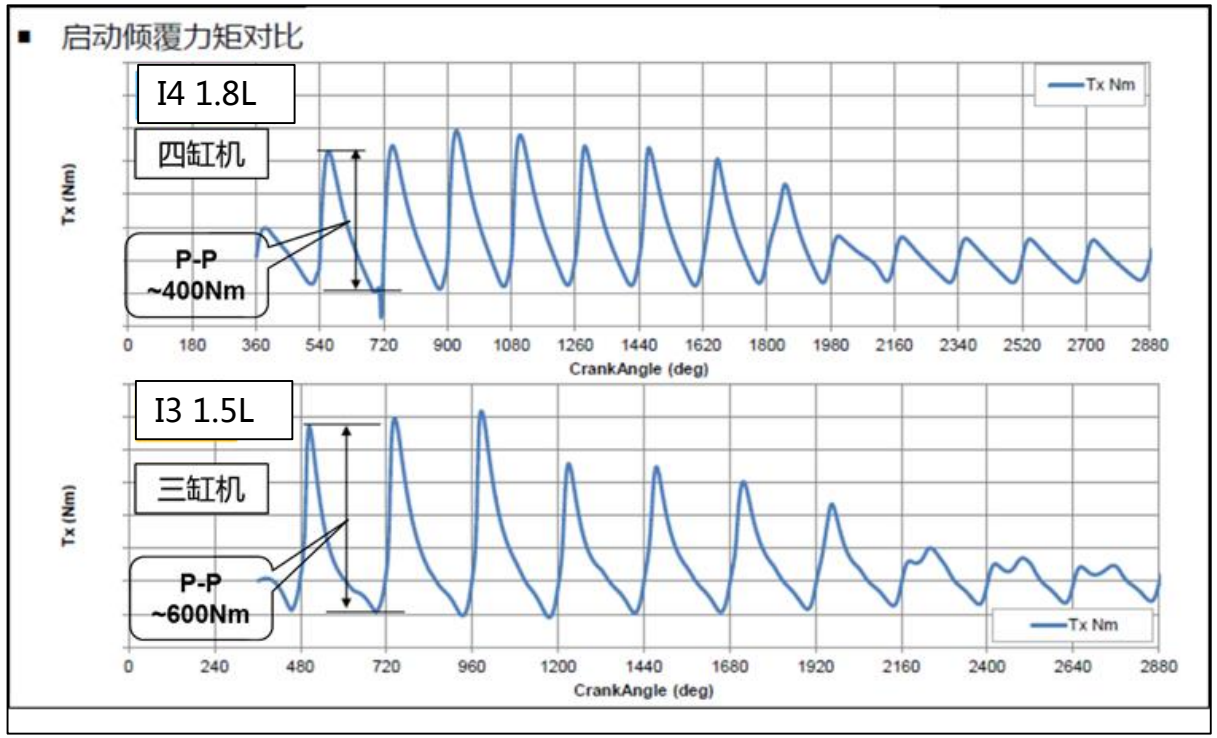
- 标定优化降低激振力
- 提高顶棚横梁模态和刚度
- 提高前围横梁模态和刚度
- 进气和排气优化（加大容积）

- 优化起动离合器锁止转速
- 降低方向盘支撑系统刚度

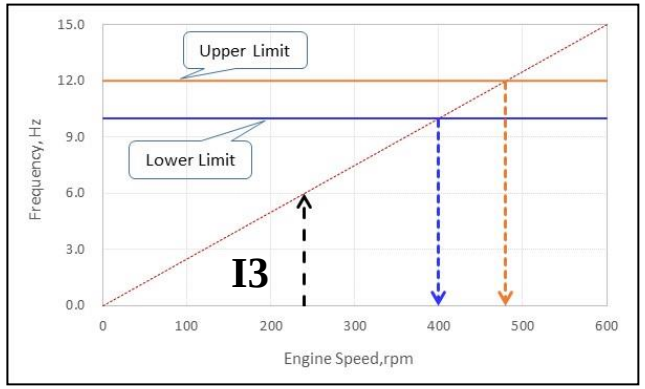
- 增加 whoose 槽
- 优化泄压阀
- 进气系统宽频消声器

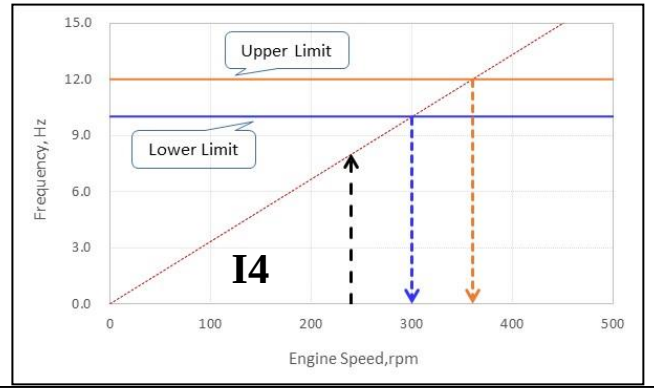
4. 吉利三缸机NVH开发案例分享：启动抖动

三缸机和四缸机启动力矩对比



三缸机和四缸机启动力矩对比



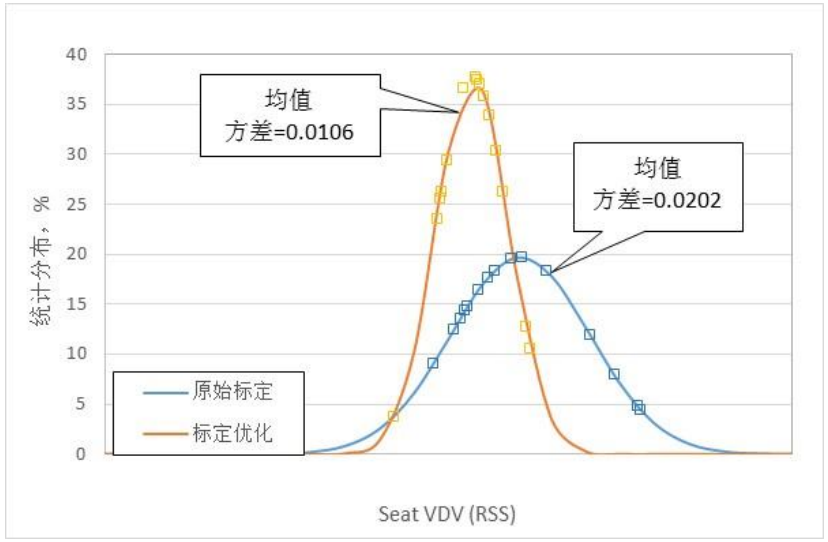


- 启动过程中，三缸发动机激励扭矩较四缸机大近30%.
- 对策：优化标定策略降低启动过程发动机激励

- 相同转速下，三缸机点火时激励频率离动总刚体模态更远，通过共振转速时间更长
- 对策：使用大功率启动机提升启动转速，优化悬置刚度改变动总刚体模态

GEELY

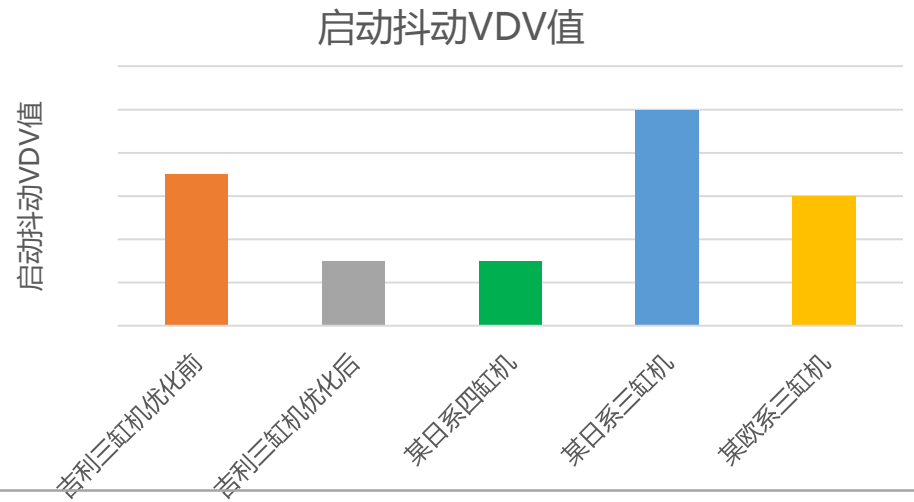
4. 吉利三缸机NVH开发案例分享：启动抖动



问题：某三缸机搭载整车发现启动过程抖动较大且一致性很差

方案：调整启动过程标定策略

效果：启动过程抖动幅值降低10%左右，且启动过程抖动的一致性大幅改善（方差降低50%）



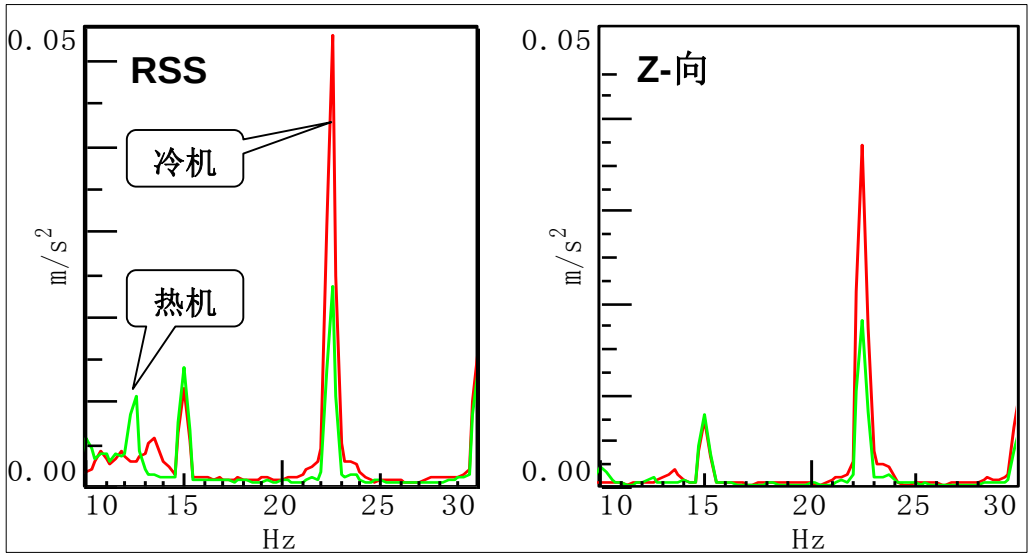
问题：某三缸机搭载整车发现启动过程抖动较大，与日系四缸机相比有较大差距

方案：优化动力总成悬置刚度及布置

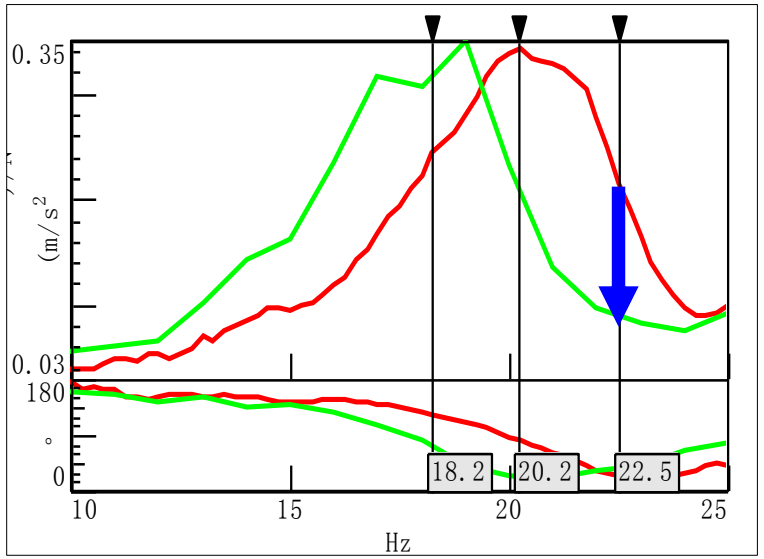
效果：启动过程抖动幅值降低57%左右，与日系四缸机处于相同水平

4. 吉利三缸机NVH开发案例分享：怠速振动

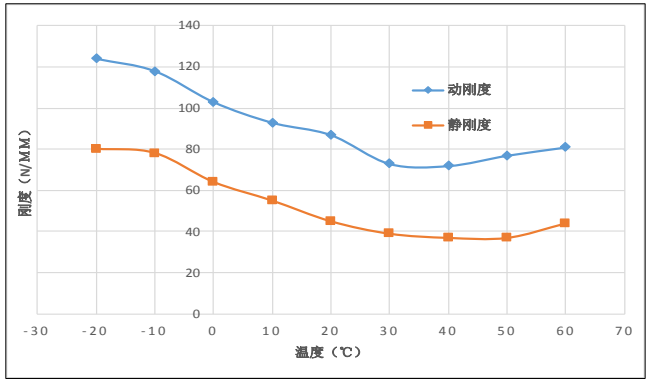
怠速座椅振动：冷机 vs 热机



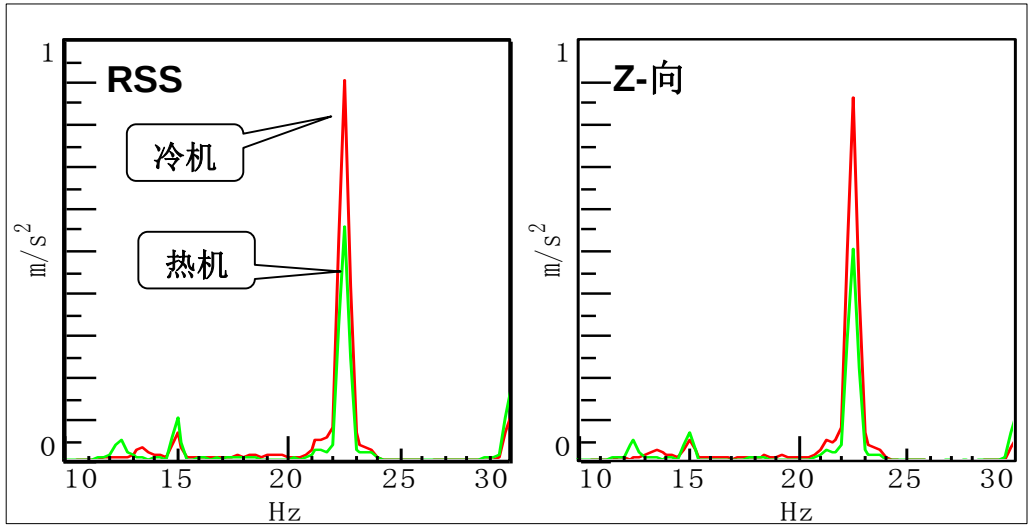
冷却模块模态：冷机 vs 热机



冷却模块隔振垫刚度 vs 温度

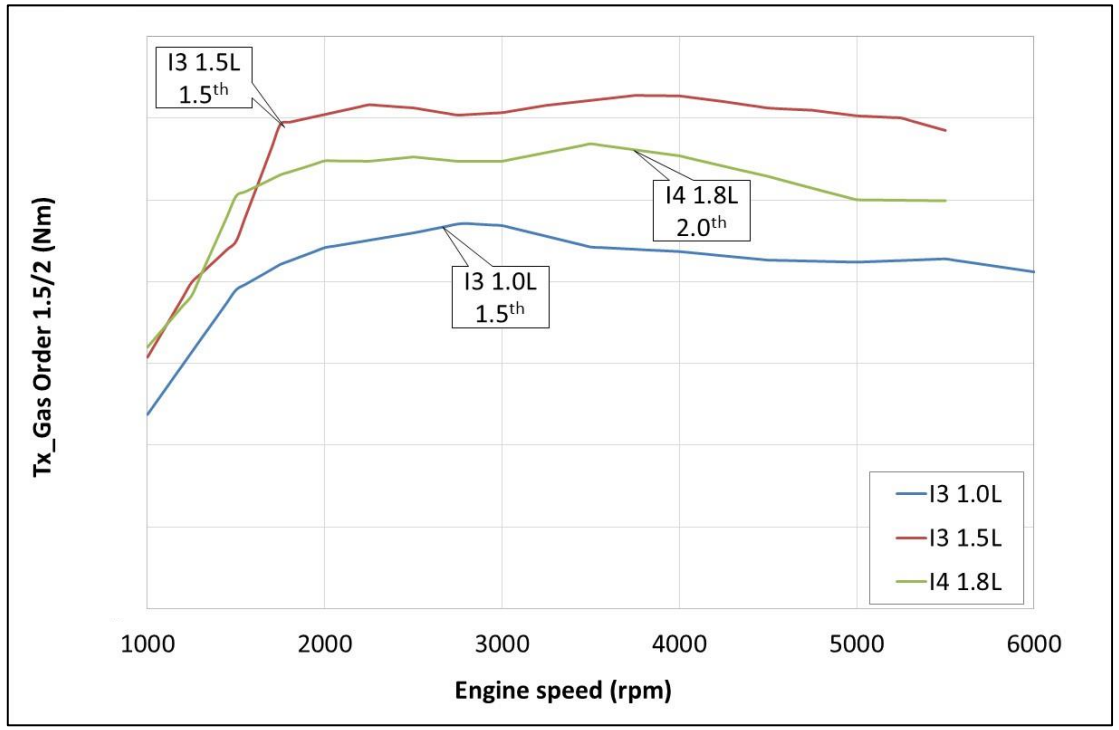


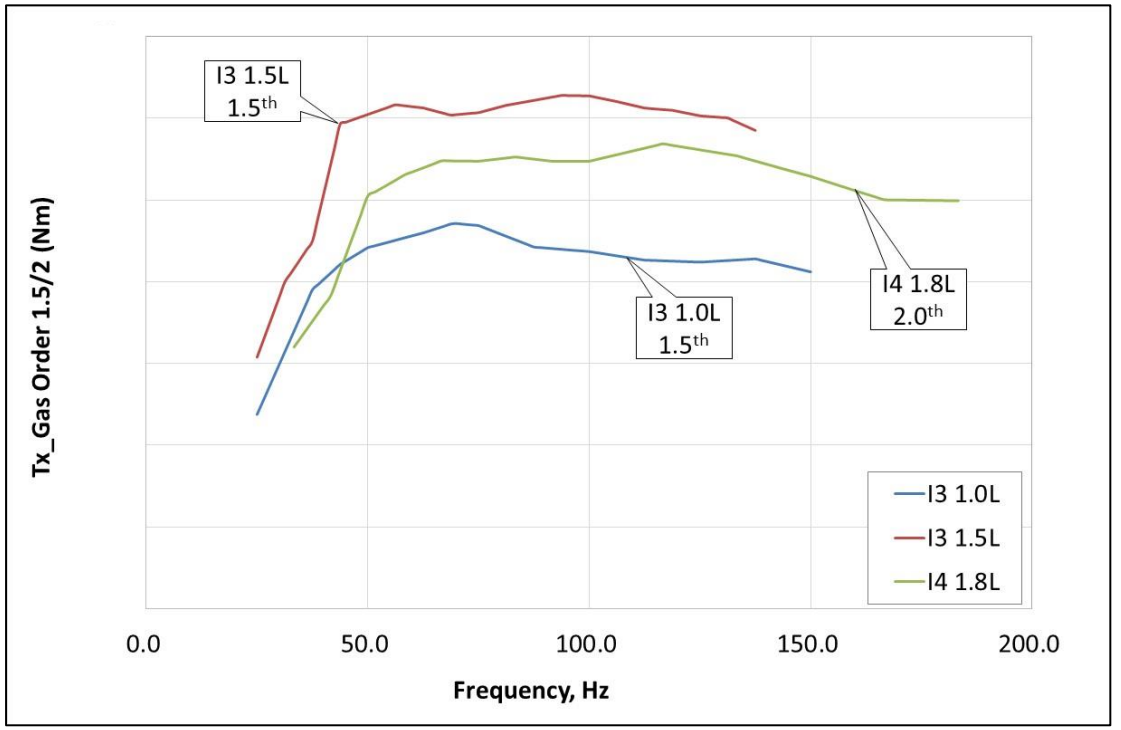
冷却模块振动：冷机 vs 热机



- **问题：冷机怠速时，座椅振动（点火频率）过大（22.5Hz@900rpm），充分热机后，怠速振动降到满足要求。**
- **问题的根本原因在于冷却模块隔振垫的刚度设计不合理：**
  - 在冷机状态下，冷却模块的刚体模态在21-22Hz（实测值）
  - 充分热机后，冷却模块的刚体模态降到20Hz以下（实测值）
- **对于三缸和四缸机，合理的冷却模块刚体模态应该在20Hz以下（冷热机状态），以避免此模态被发动机的点火频率激起。**

4. 吉利三缸机NVH开发案例分享：加速轰鸣

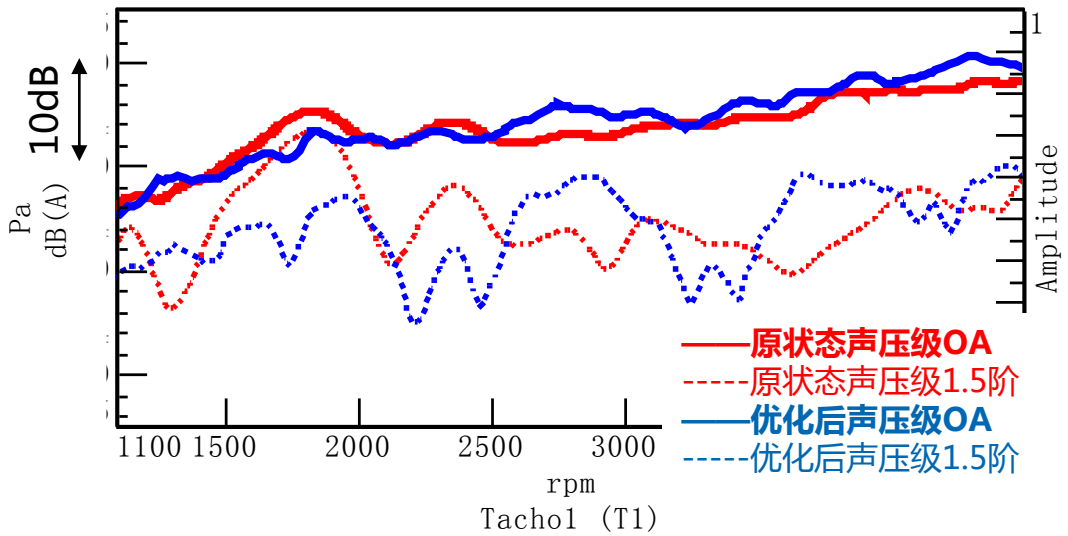




- 三缸机的点火频率激振力频率低且幅值大
  - 对策：问题工况优化标定策略适当降低发动机激励
- 整车结构通常按四缸机开发，与三缸机不匹配导致系统响应过大
  - 对策：优化车身结构，降低车身响应（NTF）
- 三缸机排气激励大，整车排气容积不匹配导致排气轰鸣
  - 对策：根据实际需求优化及加大排气容积

GEELY

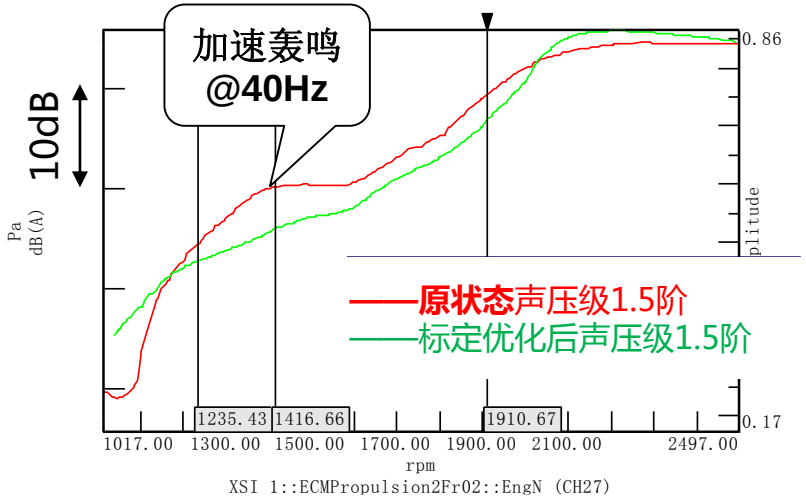
4. 吉利三缸机NVH开发案例分享：加速轰鸣



问题：某三缸机搭载整车发现加速过程中1500-2000rpm之间1.5阶轰鸣严重

方案：优化加强整车上车身，横梁，下车身等结构部件

效果：加速1500-2000rpm之间驾驶员右耳1.5阶噪声降低6dB，OA降低约2dB左右



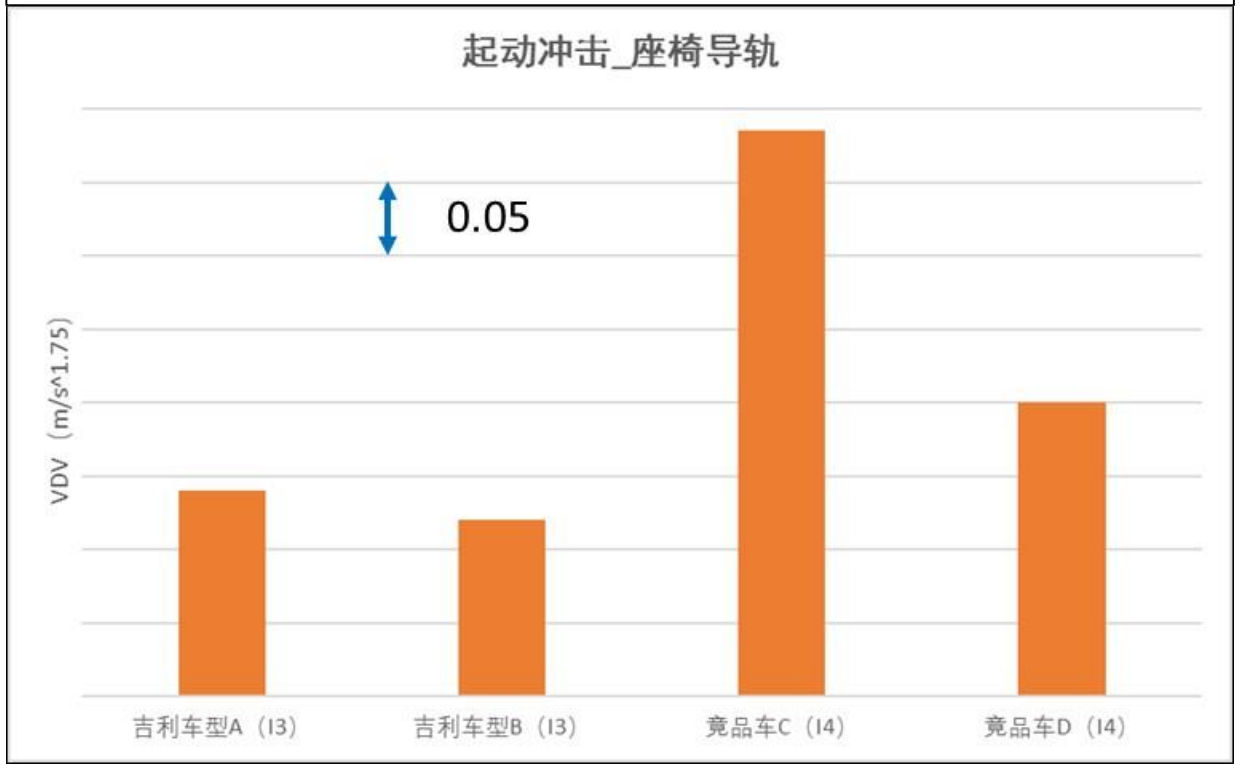
问题：某三缸机搭载整车发现加速过程中1300-1600rpm之间1.5阶轰鸣严重

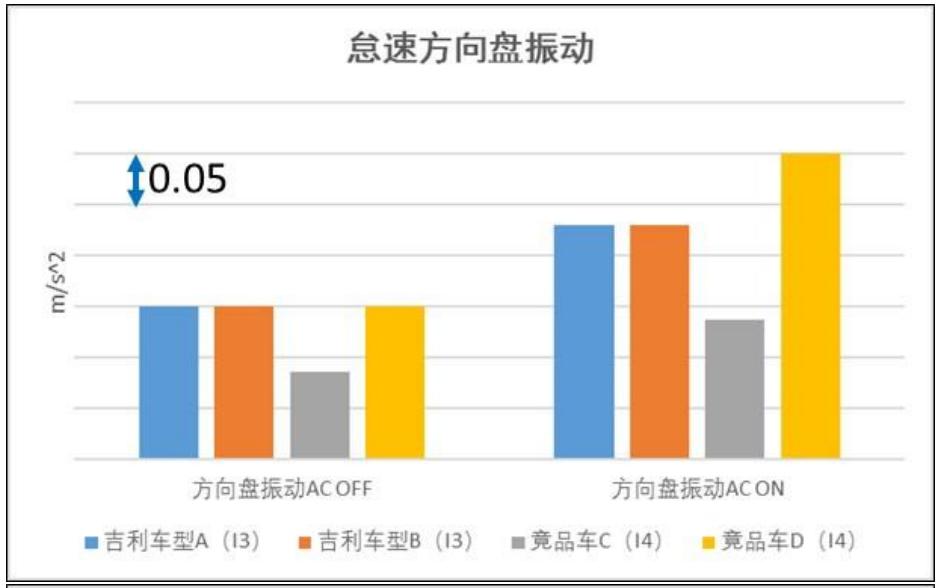
方案：优化整车标定策略，降低发动机激励

效果：加速1300-1600rpm之间驾驶员右耳1.5阶噪声降低5dB左右

5. 吉利三缸机NVH水平

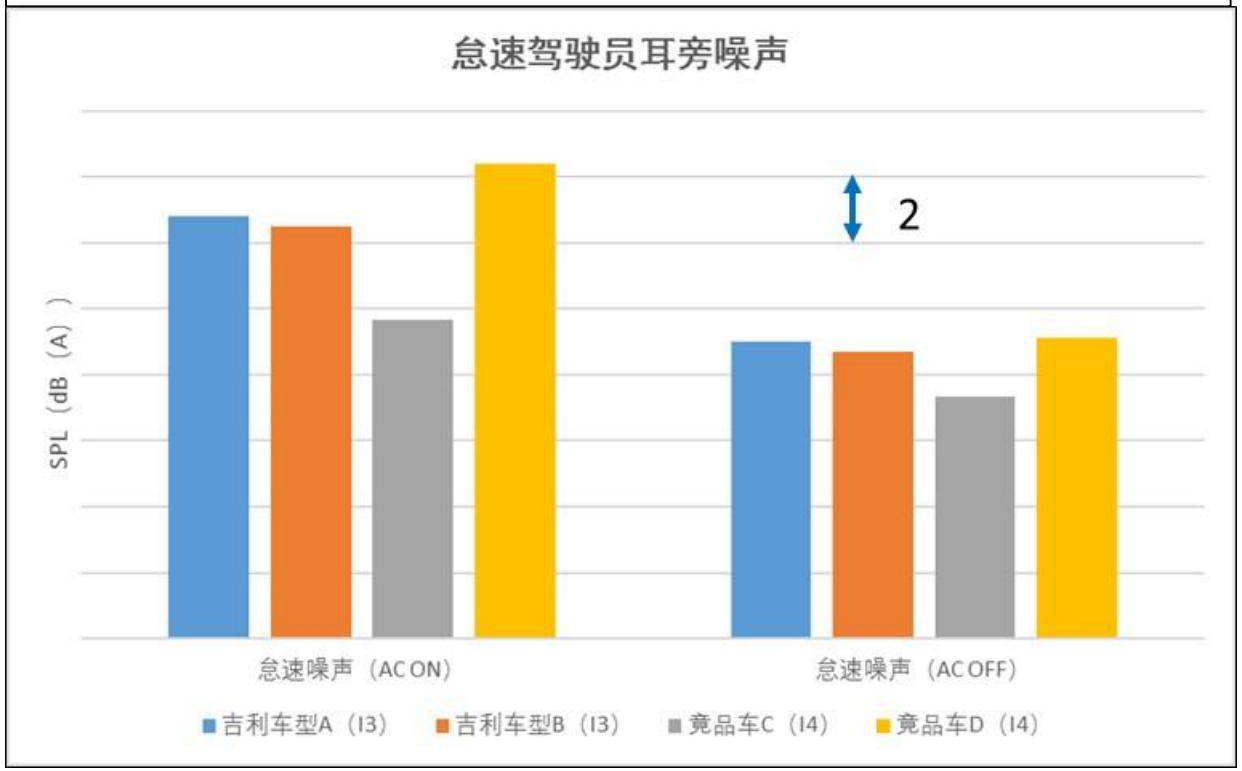
- 吉利车型A、B均为两款不同价位的三缸机车型；
- 竟品车型C、D为两款销量好的不同价位四缸机车型；
- 吉利车型起动冲击有明显优势；
- 吉利车型怠速方向盘、座椅振动均具有一定优势。

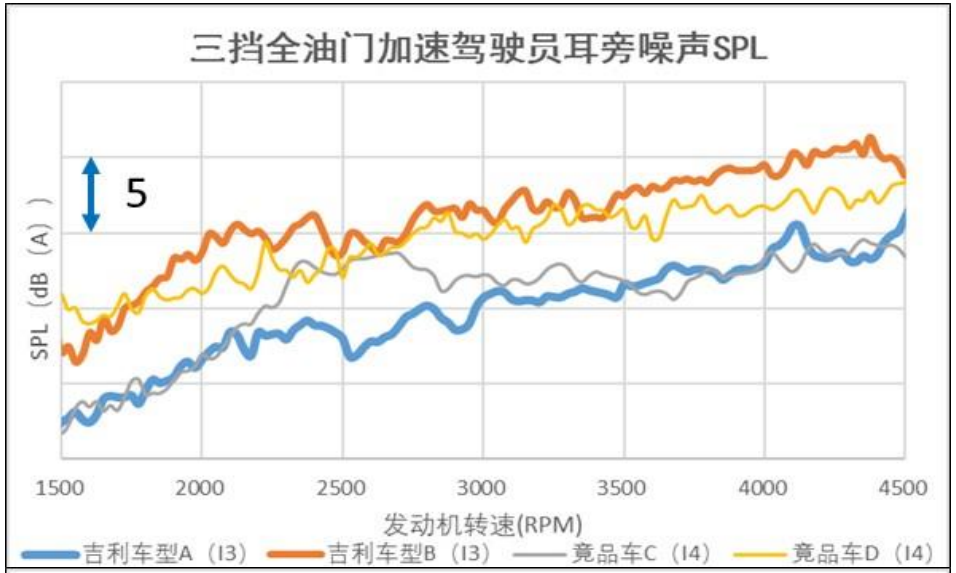


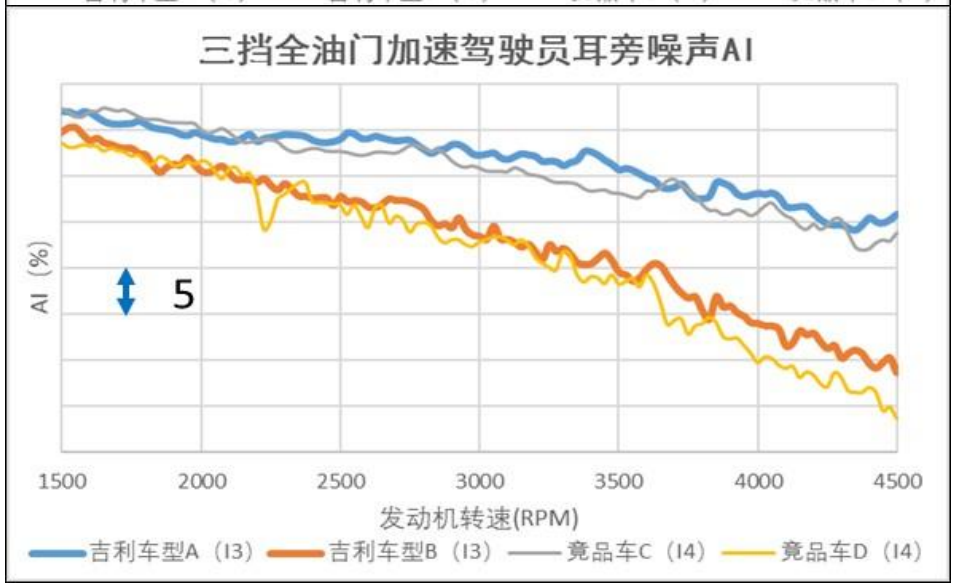


5. 吉利三缸机NVH水平

- 吉利车型A、B均为两款不同价位的三缸机车型；
- 竟品车型C、D为两款销量好的不同价位四缸机车型；
- 吉利车型怠速噪声与市场四缸机水平基本相当；
- 吉利车型加速噪声、AI根据车型市场定位各有优劣。







6. 结论

- 通过对搭载三缸机车型系统优化，目前吉利三缸机NVH水平已经达到四缸机的NVH水平，有些指标已经优于四缸机
- 三缸机激励源的优化
  - 优化标定来降低启动过程中发动机的激振力来解决启动抖动问题
  - 优化标定来缩短熄火时间来解决熄火敲击和杂音问题
  - 优化标定来降低加速过程中的主阶次激振力来降低和解决加速抖动和加速轰鸣问题
  - 优化曲轴系统降低发动机扭振激振力来降低和解决加速敲击噪音问题
  - 增加平衡轴来解决怠速抖动和加速低频振动问题
- 三缸机搭载车型系统优化
  - 进气和排气系统优化解决加速轰鸣
  - 悬置刚度优化降低和解决加速敲击
  - 车身结构优化降低和解决加速轰鸣

GEELY
吉利控股集团

THANKS