

让巨兽安静下来

一台大功率特种车的噪声藏在哪，又怎么被一个一个摁下去

费曼式写法 · 由多个 AI 代理撰写与互相审校

导读

一台大功率特种车的噪声藏在哪，又怎么被一个一个摁下去

先别找消声器

一台大功率特种车停在你面前——可能是矿区的自卸车、消防车、钻机车，也可能是履带式的工程机械。它启动的那一刻，你会本能地后退半步。太吵了。

接下来最常见的动作是：找一个更好的消声器。

这本书想说的第一件事是，这个动作八成是白干的。因为在你还没弄清楚「现在最吵的到底是谁」之前，任何一个部件上的努力，都可能被另一个源完全盖住——你花大钱把排气降了 6 分贝，整车的读数纹丝不动，因为真正在响的是那台全速转的冷却风扇。

大白话

大白话：降噪不是「哪儿吵堵哪儿」，是先排队，再动手。排错队，钱和时间一起打水漂。

而要排队，你得先接受一件反直觉的事：**噪声不能按算术加减**。两台各 85 分贝的机器一起开，不是 170，也不是 90，是 88。一台 85 分贝的旁边放一台 75 分贝的，总数是 85.4——那台 75 分贝的，几乎等于不存在。

降噪工程师真正的第一件工具，不是消声器，是一把对数尺。

这本书按一条线往下走：先看懂分贝这把尺子怎么读（第一章），再给整台车的噪声画一张地图（第二章），然后学会怎么把元凶指认出来（第三章）。第四章解释为什么低频那么难对付——它是后面所有方案反复撞上的那堵墙。第五章到第八章是四条正面战线：从源头少出声、让声波在管子里自己打架、把它捂住、把振动的路切断。第九章和第十章去收拾那些容易被忽略、却常常最难听的配角：风扇、液压、齿轮、轮胎和履带。第十一章讲主动降噪能干什么、不能干什么。最后一章看电动化——它拿掉了最大的那个噪声源，却让另一批声音第一次露了出来。

读完你能回答的那个问题是：**这台巨兽的噪声藏在哪，为什么藏在那儿，以及每一分安静要付出什么代价去换。**

第一章 · 你听到的到底是什么

先从一个让所有新人栽跟头的问题开始：两台一模一样的机器，单独运行时各是 85 分贝，一起开，是多少分贝？

直觉说 170。稍微谨慎一点的说 90。正确答案是 **88**。

如果你觉得这个答案很怪，那说明分贝这把尺子和你想的不是一回事。这一章就把这把尺子看清楚——它是后面十一章所有工程判断的地基。

声音是压力的波动，而人耳的量程大得离谱

声音的物理本体很朴素：空气被推来推去，某处压力比大气压高一点点，紧接着又低一点，这个起伏传出去，就是声波。衡量它的物理量叫声压——大白话就是：声波让空气压力偏离静止值的那一点点大小，单位是帕斯卡（Pa）。

麻烦在于人耳的量程。刚好能听见的声音，声压大约是 **0.00002 Pa**（20 微帕）；耳朵开始疼的声音，大约是 **20 Pa**。两头一比，**一百万倍**。

用一把从 0.00002 到 20 的直尺去记工程数据，是一场灾难：整个工作区间挤在尺子最左端看不见的一小截里。所以声学从一开始就换了个记法——取对数。

分贝：把一百万倍压进 0 到 120

把听阈那个 0.00002 Pa 定为基准 p_0 ，任何声压 p 都用它和基准的比值取对数来表达，这就是声压级：

$L = 20 \times \log_{10}(p / p_0)$ ，单位分贝（dB）。

代进去看：听阈是 0 dB，正常谈话约 60 dB，繁忙街道约 80 dB，痛阈 120 dB。一百万倍的量程被压成了 0 到 120 这么一段人能记住的数。

大白话

大白话：分贝不是「有多少声音」，是「比刚能听见大多少倍」，而且这个倍数是用对数记的。所以它天生不能直接相加。

系数为什么是 20 而不是 10？因为声波携带的**能量**正比于声压的平方。如果换成用能量（声强、声功率）来记，公式里的系数就是 10。同一个物理事实，两种写法，这是分贝世界里最常见的混淆点。

三个必须背下来的数

把上面那条公式用熟，会掉出三个在现场天天用的数字。

+6 dB = 声压翻倍。因为 $20 \times \log_{10}(2) \approx 6.02$ 。

+3 dB = 能量翻倍。因为 $10 \times \log_{10}(2) \approx 3.01$ 。两个功率相同、互不相干的声源叠在一起，能量加倍，声级就 +3 dB。这就是开头那道题的答案：85 + 85 → 88。

+10 dB ≈ 主观响一倍。这一条不是数学推出来的，是心理声学的实验结果：要让人觉得「响了一倍」，声能大约得涨十倍。

把最后两条并排放，整个降噪行业的经济学就浮出来了：

- 你把一个声源的能量干掉**一半**，只换来 **3 dB**——听起来几乎没变化。
- 你要让人觉得「安静了一半」，得降 **10 dB**——意味着要把能量干掉 **90%**。

大白话

大白话：降 3 分贝，是工程上一场硬仗，用户却说「没感觉」；降 10 分贝，用户说「安静多了」，而你需要打赢三四场这样的硬仗。

这解释了一个常见的委屈：项目组辛苦半年降了 3 dB，老板说「我怎么听不出来」。老板没错，工程师也没错，错的是拿主观感受去验收一个能量指标。

最重要的一条：小的那个几乎白干

现在做第二道题。一台 85 dB 的机器，旁边一台 75 dB 的，总声级是多少？

把两者的能量还原回去再相加，再取对数，得到 **85.4 dB**。那台 75 dB 的贡献了 0.4 dB。

如果你花了整整一个季度，把那台 75 dB 的降到了 65 dB——干掉了它 90% 的能量——总声级变成 85.04 dB。**你的成果在总数上是 0.04 分贝。**

这就是全书最重要的一条工程直觉，后面每一章都会回到它：

总声级由最大的那个源主宰。在它被摺下去之前，收拾其它任何源都近乎无效。

反过来说也成立：当你把最大的源降下来之后，原来那个「不值一提」的第二名，会立刻变成新的第一名，而且往往比你预期的更难对付。降噪不是一条平缓的下坡路，是一级一级的台阶，每上一级都要重新排一次队。

还有一把尺子：A 计权

最后补上一个几乎所有实测数据都带着的后缀：**dB(A)**。

人耳不是一个诚实的测量仪器——它对 1000 到 5000 Hz 的中高频最敏感，对 100 Hz 以下的低频迟钝得多。同样是 80 dB 的纯音，1000 Hz 吵得人受不了，50 Hz 只让你觉得胸口有点闷。

A 计权就是照着人耳这条不诚实的曲线，给不同频率打不同的折扣再求和：低频大幅扣分，中高频基本不扣。所以现场读到的 dB(A) 是一个「人听着有多难受」的数，不是「空气里有多少声能」的数。

这个折扣会带来一个陷阱：一台车低频轰鸣极重，A 计权读数却不算高——数据合格，人却觉得难受，因为低频是靠震胸口和让驾驶室嗡嗡响来折磨人的，而 A 计权把它扣掉了。**所以正规的评价从来不止一个总值，而是一张频谱。**后面第四章会告诉你，为什么被 A 计权扣掉分数的那段低频，恰恰是工程上最贵的一段。

这一章留下的问题

既然总声级由最大的源主宰，那么在一台大功率特种车上，最大的源到底是谁？

答案不唯一——它随工况变。怠速时的第一名，和全负荷爬坡时的第一名，往往根本不是同一个部件。所以下一章要做的第一件事，是把这台巨兽身上所有会响的东西，一个不落地摆出来，画成一张地图。

第二章 · 给噪声画一张地图

第一章的结论是：总声级由最大的源主宰。那就必须先知道，一台大功率特种车身上，到底有多少个源在响。

答案是：比大多数人想的多，而且它们的排名会随工况整个洗牌。

八个候选人

把一台典型的大功率特种车拆开，会发响的东西可以归成八类。

一、燃烧噪声。柴油机缸内每一次燃烧，都是一次压力的猛涨。这个猛涨通过缸盖、机体传到外表面，再辐射成声音。它是宽带的，能量集中在 500 到 3000 Hz，是发动机在中高负荷下最主要的嗓门。第五章专门收拾它。

二、机械噪声。活塞在上止点换向时拍打缸壁（业内叫敲缸）、气门落座、正时齿轮啮合、喷油泵柱塞。这些是一连串的敲击，同样宽带，在冷机和低负荷时比例更高。

三、进气与排气噪声。每次气门开启都是一个压力脉冲，一系列脉冲就是一列声波，基频等于发动机的点火频率。它是**低频、强脉动**的，也是不加消声器时全车最响的东西——原始排气噪声可以到 110 dB 以上。第六章讲怎么在管子里对付它。

四、冷却风扇。叶片切空气产生宽带湍流噪声，同时因为每片叶子周期性地扫过同一个位置，会叠加一个很尖的纯音。它的特殊之处是：**风扇转速跟着水温走，不跟着车速走**——所以怠速暖机时它可能是全车第一名。

五、液压系统。特种车的工作装置几乎全靠液压。柱塞泵每转一圈，每个柱塞都完成一次吸排，输出压力不是平的，而是带着一串规律的脉动。这串脉动激励管路和阀块振动，发出尖锐的啸叫。

六、传动系。变速箱、分动箱、驱动桥里的齿轮，啮合时会产生周期性的激励，听感是一种「呜——」的纯音，随车速连续变调。

七、行走系。轮胎花纹拍打路面并挤压空气，或者履带板一块一块砸在地上、销齿一次一次啮合。这是速度一上来就压倒一切的源，第十章细讲。

八、结构辐射。这一类最容易被漏掉：上面七类里的振动传到覆盖件、油箱壁、驾驶室地板这些大面积薄板上，板子跟着振，就变成了一个个喇叭。**声音是从板上发出来的，源头却在别处**——你堵住板子没用，得切断振动传过去的那条路。第八章讲这件事。

大白话

大白话：前七类是「东西自己在响」，第八类是「东西被别人晃得在响」。搞混这两者，是降噪现场最常见的误诊。

排名会洗牌

把八个候选人列出来还不够，因为「谁最吵」不是一个固定答案。同一台车，三种工况，三张完全不同的排行榜。

怠速暖机。发动机没使劲，燃烧和排气都温和；但水温上来后风扇全速运转，液压泵也在待命压力下空转。此时的第一名常常是**风扇**，第二名是**液压**。这个工况在工地上占的时间比想象中长得多——车往往一停就是半小时，人却还在旁边。

全负荷作业。发动机拉到额定转速和扭矩，燃烧噪声和排气噪声同时冲到最高，把风扇和液压完全盖住。此时的第一名是**排气**（如果消声器不够），第二名是**发动机本体**。

行走转场。车速起来，轮胎或履带的噪声以极快的速度上升——它大致随速度的三次方增长，速度翻一倍，噪声涨约 9 到 10 dB。到某个速度以上，**行走系**会反超发动机成为第一名。

这就带出一条很实用的判断：**如果一台车在各个工况下的第一名都不是同一个部件，那么任何单一的降噪措施都不可能让所有工况一起达标。**目标必须按工况分别定，措施也得按工况分别配。

还要问两个「哪里」

光有工况还不够。同一台车、同一个工况，测点不同，结论也会翻。

位置。司机耳边关心的是驾驶室内噪声——主导它的往往是结构传声和密封漏声；厂界或者旁观者关心的是外部辐射噪声——主导它的是排气口、风扇出风口和机体表面。这两个指标

可以背道而驰：**把驾驶室封死会让室内变安静，却让外部一点没变。**

频段。第一章说过，A 计权会把低频扣分。一台车总值 78 dB(A) 达标，但如果这 78 里有一根 120 Hz 的尖峰，人坐在里面半小时会头疼——因为人对**纯音**（能量集中在极窄频率上的声音）的忍耐度远低于同样能量的宽带噪声。这个特性有个专门的指标叫音调突出度——大白话就是：这个声音里有没有一根特别刺耳的「哨子音」冒出来。

大白话

大白话：「这台车多吵」不是一个可以回答的问题。可以回答的问题长这样——「在急速工况、司机右耳位置、200 Hz 以下的频段，它有多吵」。

地图画完了，然后呢

现在你手里有一张八个候选人的名单，知道排名随工况和位置变化。但名单终究只是名单——面对一台真实的、正在轰鸣的车，你怎么知道**此刻**响得最凶的是哪一个？

靠听吗？人耳判定方向的能力在低频段几乎为零，而低频恰恰是这台车最重的部分。靠经验猜吗？第一章已经算过猜错的代价：赌错了对象，干掉它 90% 的能量，总数只动 0.04 分贝。

所以下一章的主题只有一句话：**不测就改，等于蒙着眼睛修表。**

第三章 · 先抓元凶，再谈降噪

上一章留下的问题是：面对一台正在轰鸣的车，怎么知道此刻响得最凶的是谁？

这一章讲四件工具，以及它们各自能回答什么、不能回答什么。先说一个坏消息：**最常用的那个数，恰恰是最不能用来找元凶的。**

声压级告诉你「多吵」，不告诉你「谁在吵」

声级计测的是**某一点**的声压起伏。它是一个标量——只有大小，没有方向。你把它举在车头，读到 92 dB，这个数里混着排气、风扇、燃烧、地面反射，还有隔壁那台车。它无法拆开。

更麻烦的是它对环境极其敏感。同一台车，在开阔场地和在有围墙的车间里测，能差好几个分贝——因为墙面把声音反射回来，叠加到了测点上。所以标准化的整车噪声测试对场地有严苛要求（半消声室，或者足够开阔且地面吸声特性受控的室外场地），就是为了让这个数可比。

大白话

大白话：声压级是一个「体温计」——能告诉你病人在发烧，不能告诉你哪儿感染了。

工具一：声强法——给声音标上方向

要找源，需要一个带方向的量。声强就是这样一个量——大白话：单位面积上流过的声功率，它有方向，指向声音跑的方向。

测法是用两个隔开一小段距离的传声器，比较它们之间的相位差，就能算出声能是从哪边流向哪边。用这样一个探头贴着发动机表面一格一格扫过去，能画出一张「哪块表面往外送能量、送了多少」的图。

它的杀手锏在于：**声强法能自动扣掉「路过」的声音**。从旁边传来、又从另一侧穿出去的声波，进多少出多少，净流量为零。所以哪怕在有背景噪声的车间里，它也能把「这块油底壳

自己辐射了多少」单独量出来。这是声压级做不到的。

代价是慢——一格一格扫，一台发动机测下来要几个小时，而且要求声场稳定，工况不能飘。

工具二：阶次分析——让频率自报家门

这是旋转机械降噪里最锋利的一把刀，而它的原理简单得近乎狡猾：**机器上每一个转动的部件，都会在频谱上留下一个和转速严格成比例的印记。**

把频率除以转速，得到的倍数就叫阶次——大白话：这个声音在轴转一圈的时间里响了几次。

于是每个部件都有了自己的号码牌：

- 四冲程六缸机每转两圈点火六次，点火阶次是 **3**；四缸机是 **2**。
- 一个 9 片叶子的冷却风扇，叶片通过频率（每秒钟有多少片叶子扫过同一个位置）就是 9 阶。
- 一个 9 柱塞的液压泵，压力脉动是 9 阶。
- 一对齿数 41 的齿轮，啮合频率是 41 阶。

做法是让发动机从怠速缓慢升到最高转速，同时录声音和转速。频谱上那些随转速斜着爬升的直线，每一条的斜率就是它的阶次。**算一下斜率，就知道是哪个零件在叫。**

大白话

大白话：所有转动的东西都在用自己的节拍数数，你只要数出它一圈响几下，就知道它是谁。

这个方法有个漂亮的副作用：它能把「宽带的一片」和「窄带的一根」分开。前者通常是燃烧和湍流，后者一定是某个转动件——而人耳对后者敏感得多。

工具三：声学照相机——直接拍一张热力图

把几十上百个传声器排成一个阵列对着车，各个传声器收到同一个声音的时间会有微小的先后差。用这个时间差反推声音是从空间哪一点发出来的，再把结果画成一张彩色云图叠在车

的照片上——这就是波束成形，俗称声学照相机。

它的优点是直观和快：一次采集，几分钟出图，红的地方就是热点，能当场给不做声学的同事看。

它的局限必须记住：**分辨率受波长限制**。阵列越小、频率越低，分辨的能力越差。到 200 Hz 以下，一张两米见方的阵列拍出来往往是一大团红，只能告诉你「车头这一片」，指不到具体零件。而低频恰恰是最难的那一段（下一章会讲清楚为什么）。所以声学照相机是**中高频的利器、低频的摆设**。

工具四：最笨也最可靠的——拆件法

所有精密方法之外，还有一个土办法始终有效：**一个一个地把源关掉，看总数掉多少**。

把风扇皮带卸掉（短时间运行），总声级掉了 4 dB，说明风扇是重要贡献者；把排气接一根长管引到远处，总数掉了 1 dB，说明排气已经不是瓶颈。反过来，用厚重的隔声罩把某个部件严实地包起来，总数纹丝不动——那它就是清白的。

这个方法慢、笨、有时不安全，但它测的是**真实的贡献量**，不受任何模型假设影响。在结论有争议的时候，它是最后的裁判。

一条铁律和一个顺序

把四件工具串起来，现场的标准动作是这样的：

1. 先用声级计和频谱确认「有多吵、吵在哪个频段」，并按工况分别记录；
2. 用阶次分析把窄带的纯音一根一根认出来，归到具体零件；
3. 用声学照相机或声强法定位宽带部分的空间热点；
4. 对排名前二三位的嫌疑人，用拆件法做最终确认；
5. **只对确认过的第一名动手**。

这个顺序看起来啰嗦，但对照第一章的算术就知道它有多划算：跳过测量直接改设计，赌对了省下两周，赌错了浪费一个季度，而且浪费得毫无察觉——因为总声级根本不会动，你甚至不知道自己错了。

不测就改，等于蒙着眼睛修表：你能听见自己在拧螺丝，但不知道拧的是不是那一颗。

现在假设你已经指认出了元凶，比如那是一段 120 Hz 的低频轰鸣。接下来该动手了——但你很快会撞上一堵墙。下一章讲这堵墙为什么这么硬。

第四章 · 低频是硬骨头

假设第三章的测量已经指认出元凶：一段 100 Hz 上下的低频轰鸣。你拿一块隔声板挡上去，结果几乎没有变化。换更厚的板，还是没变化。

这不是材料买错了，是物理不答应。这一章讲清楚这堵墙由什么砌成——它是后面每一条技术路线都要反复撞上的同一堵墙。

先算一个长度

声波在空气里跑，速度大约 **340 米每秒**。一个周期跑过的距离就是波长——大白话：这个声波「一个整波」有多长。公式简单到不用记：波长 = $340 \div \text{频率}$ 。

- 5000 Hz（尖锐的啸叫）：波长 **6.8 厘米**。
- 1000 Hz（人声中段）：波长 **34 厘米**。
- 100 Hz（低沉的轰鸣）：波长 **3.4 米**。
- 50 Hz（胸口发闷的那种）：波长 **6.8 米**。

把这几个数和车比一比：一台特种车的发动机舱盖，撑死一两米见方。对 5000 Hz 来说，这块盖板有三十个波长那么大，是一堵结结实实的墙；对 50 Hz 来说，这块盖板还不到一个波长的三分之一——**在这个波看来，那块板只是水里的一根筷子**。

大白话

大白话：能不能挡住一个波，取决于挡板和波长比起来够不够大。高频的波很短，随便一块板都是大墙；低频的波好几米长，整台车都算小东西。

波长小于障碍物时，声波被挡住、被反射；波长远大于障碍物时，声波直接绕射——大白话：像水绕过石头一样从边上包过去，跟没挡一样。这就是你在楼下听邻居放音乐，只听得见「咚咚咚」的低音、听不清人声的原因：高频被墙挡住了，低频绕过来了。

质量定律：每翻一倍，只赚 6 分贝

就算不谈绕射，单看一块板能挡住多少透射过来的声音，低频也吃亏。

对一块均匀的单层板，隔声量近似遵循质量定律——大白话：板越重、频率越高，隔得越多，而且是这样一个换算关系：

面密度每翻一倍，隔声量 +6 dB；频率每翻一倍，隔声量 +6 dB。

后半句就是判决书。假设某块板在 1000 Hz 能隔 30 dB，那么每往下降一个倍频程就掉 6 dB：500 Hz 是 24，250 Hz 是 18，125 Hz 只剩 12 dB。同一块板，对高频是堵墙，对低频是块纱窗。

那前半句能不能救场？能，但很贵。要在 125 Hz 把 12 dB 提到 30 dB，需要 +18 dB，也就是面密度翻三倍——**重量变成 8 倍**。一块 5 公斤的盖板变成 40 公斤。对一台要控制整备质量、还要考虑吊装和维修开盖的特种车来说，这个方案在会议室里活不过五分钟。

吸声材料在低频也帮不上忙

那换个思路，不挡了，用吸声棉把它吃掉？

多孔吸声材料（海绵、玻璃棉、聚酯纤维）的原理是让空气在无数细孔里来回摩擦，把声能变成热。关键在于：**材料要放在空气质点振动速度最大的地方才有效**。而在一个刚性壁面前，速度最大的位置在离壁面四分之一波长处。

算一下就绝望了。要有效吸收 100 Hz，材料厚度需要接近 **0.85 米**（3.4 米的四分之一）。要吸 50 Hz，需要 1.7 米。而发动机舱里能给你的空间，通常是 20 到 50 毫米。

所以现实是：**常规厚度的吸声棉，对 500 Hz 以上很有效，对 200 Hz 以下基本是装饰。**

（工程上有一些取巧办法——微穿孔板、共振吸声结构、在材料背后留空腔——本质都是用共振换厚度，能把有效频率往下压一些，但也只能压一些，并且带宽变窄。）

低频还特别会「借道」

再加一条：低频波长长、能量强，特别容易把整块结构一起晃起来。板子被晃动之后自己变成声源，声音从板的另一面重新发出来——第二章说的第八类源，结构辐射。

这意味着在低频段，「捂」这个动作常常是自相矛盾的：你把一个隔声罩扣上去，罩子本身被里面的低频激励得开始共振，然后它以自己的固有频率往外辐射。**某些频率上，加了罩子比不加还响。**这是一个真实存在、且在报告里很难解释的现象。

那低频到底怎么办

把上面四条并排看，结论是清楚的：**在低频段，「挡」「吸」「捂」三条路都被物理堵死了。**剩下的只有两条：

第一，从源头让它少产生。既然生出来就治不了，那就别让它生出来那么多。柴油机燃烧的压力上升率、排气脉冲的强度、风扇的转速、履带的啮合冲击——全都可以在源头改小。这是第五章的主题，也是最贵、最难、但唯一治本的一条。

第二，在管道里对付它。低频在开阔空间里到处绕，但如果它被关在一根管子里（进气道、排气管、风道），情况完全不同：管子的直径远小于波长，声波只能沿管轴一维传播，不能绕路。**一维的声场，是用几何和共振精确设计的。**膨胀腔、共振器、干涉管全都在这个前提下工作。这是第六章的主题。

大白话

大白话：低频在旷野里是抓不住的泥鳅，但只要它被逼进一根水管里，你就能在管子上做手脚收拾它。

顺带解释了一个现象：为什么车上的降噪方案，效果最显著的几乎都装在管路上（消声器、进气消音箱、风道），而贴在表面的那些吸声棉，改善的多是中高频的「毛刺感」，对那声轰鸣无能为力。

一条给项目定目标时的忠告

知道这堵墙的位置之后，最实用的一个用法是**定目标的时候就别把不可能的事写进去。**

「整机噪声降低 10 dB(A)」这种目标，如果拆开来看，能量的大头在 200 Hz 以下，那基本等于要求推翻动力总成方案。而如果频谱显示 A 计权的贡献主要来自 1000 到 3000 Hz 的一根齿轮啸叫，那么 10 dB 可能只需要一次齿形修形加一层隔声垫。

同样的数字，难度可以差二十倍，差别全在频谱上。这也是为什么第三章要求先测再改——测出来的不只是「谁最吵」，还有「这仗好不好打」。

下一章开始走第一条路：回到源头，让柴油机少出声。

第五章 · 从源头少出声：驯服燃烧

上一章的结论是：低频治不了，只能不让它生出来。这一章回到最源头——柴油机为什么天生比汽油机吵，以及工程上能在哪几个环节把它摁下去。

先纠正一个几乎人人都有的误解：**发动机的噪声，跟缸内压力的最高值关系不大**。真正决定它响不响的，是压力涨得有多急。

元凶是斜率，不是高度

想象你用手掌压一个气球。慢慢压下去，没有声音；一巴掌拍下去，「砰」。两次的最大压力可以一样，声音天差地别。区别在于**压力变化的速率**。

缸内也是同一回事。衡量它的量叫压力升高率——大白话：曲轴每转一度，缸内压力涨了多少（单位是 bar 每度曲轴转角）。这个斜率越陡，激励里的高频成分越丰富，机体被敲得越响。

大白话

大白话：不是「压得多重」在响，是「压得多快」在响。同样的峰值压力，涨得慢就是推，涨得快就是砸。

这个斜率高，激励的频谱就宽——它同时敲响了机体上所有能响的模式，所以燃烧噪声听起来是「哒哒哒」的宽带敲击，不是某一个音。

柴油机为什么天生吵

汽油机是点燃：火花塞点火，火焰面从一点慢慢烧过去，压力是被推上去的。

柴油机是压燃，过程完全不同。喷油之后，燃油不会立刻着——它得先雾化、蒸发、和空气混合、升到着火温度。这段等待叫滞燃期，通常只有零点几毫秒到一两毫秒。麻烦就出在这段等待上：**在燃油等着点火的时候，喷油嘴还在继续喷**。

于是等到终于着火的那一刻，缸里已经积攒了一大团混合好的可燃气，它们几乎在同一瞬间一起烧掉。这一下叫预混燃烧峰——大白话：不是烧，是炸了一小下。压力升高率的尖峰就在这里，柴油机特有的那种「哒哒」敲击声，源头也在这里。

所以整条治理思路可以浓缩成一句：**想办法让滞燃期里攒下的油少一点。**

预喷：先点一根引信

最有效、也是现代柴油机标配的一招，叫预喷射——大白话：在主喷之前，先喷一小口油（通常只占总量的百分之几）。

这一小口油先着起来，把缸内温度和压力垫高了。等主喷的油进来时，环境已经热了，滞燃期大幅缩短，主喷的油几乎是**边喷边烧**（工程上叫扩散燃烧），而不是攒一堆再一起炸。压力曲线从一个陡峭的尖角，变成一条平缓的上坡。

效果有多大？在高压共轨系统上，合理的预喷策略通常能把燃烧噪声降 **3 到 5 dB**，主观上是柴油机从「拖拉机」变成「有点粗的发动机」这个量级的改变。这也是为什么老式机械泵柴油机和现代共轨柴油机，隔着几十米就能听出来。

再往下还有更细的操作：把一次预喷拆成两次、在主喷之后补一次后喷（主要为了后处理，也顺带影响噪声）、按转速负荷给每个工况标定不同的喷射正时。共轨系统真正的价值不在压力多高，而在于它让「**什么时候喷、喷几次、每次喷多少**」变成了软件里的一张表——燃烧噪声第一次成了可以标定的量。

另外两个源头旋钮

喷油正时。提前喷，燃烧发生在活塞还在往上走的时候，压力升高率高、噪声大，但热效率高、油耗低；推迟喷，噪声小、排温高、油耗略差。这是一个纯粹的取舍——**降噪、油耗、氮氧化物排放三者互相拉扯，任何一个标定点都是三方妥协的产物。**降噪工程师提的每一个要求，在标定工程师那里都要用油耗或者排放去换。

废气再循环。把一部分废气引回进气，稀释了氧、降低了燃烧速度和温度——主要目的是压氮氧化物，副作用之一是压力升高率下降，噪声跟着小一点。但它会让燃烧变慢、碳烟上升，同样是要还的。

还有一半：机械噪声

把燃烧治住之后，露出来的是发动机的另一半嗓门——一连串的机械敲击。

活塞敲缸。活塞在缸里不是严丝合缝的，有间隙。每次到达上止点，活塞受力方向翻转，会从缸壁的一侧「倒」向另一侧，「啪」地拍一下。这是发动机机械噪声里最大的一项。经典解法是活塞销偏置——大白话：把活塞销的中心从正中间挪开一两毫米，让翻转不是一次性发生，而是被拉长成一个渐进的过程，拍击就变成了靠。冷机时间隙大，所以冷启动的柴油机总是格外响，暖起来就好一些。

配气机构。气门落座是一次金属撞击，凸轮型线的加速度段设计得越激进，冲击越大。液压挺柱、优化的凸轮型线都是为此。

正时齿轮与高压油泵。齿轮啮合是周期性激励，会在频谱上留下一根很尖的纯音（第三章的阶次分析一眼就能认出来）。柴油机常把正时齿轮放在飞轮端而不是前端，就有减小辐射面积的考虑。

这条路的代价，和它为什么仍然值得

源头治理是全书最贵的一条路：它要动喷射系统、要重新标定、要改活塞和凸轮，牵一发动全身，还要拿油耗和排放去换。相比之下，第七章的「加一层隔声棉」听起来轻松得多。

但它有一个别的方案都没有的性质：**源头少出来的那几分贝，在所有工况、所有位置、所有频段上都成立，而且不占空间、不加重量、不妨碍散热和维修。**后面几章的每一个方案都要付出体积、重量、背压或者散热的代价，只有这一条不用。

没生出来的声音，是唯一不需要被治理的声音。

不过源头治理有它治不到的地方。燃烧和机械噪声是从发动机**外表面**辐射出去的，还有一大股能量根本不走外表面——它顺着排气管跑掉了，而且是低频、强脉动的那一股。下一章去管子里堵它。

第六章 · 消声器：让声波自己打架

第四章说过：低频在开阔空间里到处绕，抓不住；但只要它被逼进一根管子，游戏规则就变了。

管子的直径远小于低频的波长，声波在里面只能沿着管轴一维地跑，不能绕路、不能走捷径。**一维的声场是可以几何算准的**。消声器就是这个前提下的产物——它不是一团吸音棉，是一件按波长设计的声学器件。

先看清对手：排气噪声是一列脉冲

每次排气门打开的瞬间，缸内还有好几个大气压的高压废气，「噗」地冲进排气管。一台六缸机每转两圈开六次门，于是排气管里跑的是一列均匀的压力脉冲。

一列周期性的脉冲，在频谱上就是一个**基频加上一串谐波**。基频等于点火频率：转速 2000 转、六缸机，基频约 100 Hz。这正好落在第四章说的那段最难对付的低频里。

不加消声器时，排气口的噪声可以到 110 dB 以上，比发动机本体高十几分贝。**所以在特种车上，消声器不是「让它更安静一点」的选装件，是让整台车能出厂的必需品。**

路线一：抗性消声——让声波自己打架

抗性消声的思路很反直觉：不吸收能量，而是把声波原路反射回去，不让它跑出管口。大白话就是——在管子里造几处「路面突变」，声波撞上去就得掉头。

膨胀腔。最简单的一种：细管突然接进一个粗腔，再接回细管。声波在截面突变处会被部分反射，管子越粗、突变越剧烈，反射越多。

它有一个必须知道的坑：**膨胀腔的消声效果是周期性的**。当腔长恰好等于半波长的整数倍时，进去的波和反射回来的波同相叠加，腔体形同虚设，这些频率叫通过频率——大白话：这几个音，它完全挡不住。所以实际的消声器从来不是一个大腔，而是几个不同长度的腔串联，用一个腔的强项去补另一个腔的通过频率。你把这个消声器锯开，看到里面一堆隔板和长短不一的插入管，就是在做这件事。

亥姆霍兹共振器。一个带细颈的空腔挂在主管上，相当于「一个弹簧配一个质量」：腔里的空气是弹簧，颈里的那一小柱空气是质量。它有自己的固有频率，在这个频率上，颈里的空气会剧烈地来回振荡，把声能困住并耗掉。

它的特点是**专杀一个频率、效果极猛、带宽极窄**。所以它专门用来对付那种已经被阶次分析揪出来的、明确的低频轰鸣。吹一个空啤酒瓶发出的那个「呜」，就是它的固有频率。

四分之一波长管（干涉管）。在主管上接一根一端封闭的支管，长度取目标波长的四分之一。声波进支管、到底、反射回来，来回走了半个波长，正好和主管里的波反相，相消。同样是窄带利器，常见于进气道上对付某一根特别刺耳的进气啸叫。

大白话

大白话：抗性消声是几何游戏。你要先知道要杀哪个频率，再按那个频率的波长去定尺寸——所以它必须建立在第三章的测量之上，量错了尺寸就白做。

路线二：阻性消声——把声能变成热

阻性消声就朴素多了：管壁做成穿孔的，外面裹一层吸声材料（玻璃纤维或者钢丝棉），声波穿过孔进入材料，在无数细缝里摩擦生热，能量就没了。

它的特性和抗性正好互补：**频带宽、对中高频非常有效、对低频几乎无效**（还是第四章那条：低频要吃掉它，材料厚度得按波长算）。而且它的消声量随管道长度增加，不像抗性那样有周期性的漏洞。

代价是耐久：高温、高速的废气会把吸声材料一点点吹散、烧结、被机油和碳烟糊死。用了几年的阻性消声器往往悄悄失效，而外观完全看不出来。

所以现实中的整车排气消声器几乎都是**混合式**：前段用抗性结构打低频的基频和前几阶谐波，后段用阻性结构把中高频的一片抹平。整体插入损失做到 25 到 35 dB 是常规水平。

逃不掉的代价：背压

到这里为止听起来都很好——直到有人问：那把消声器做得更大更复杂，是不是就更安静？

是，但会撞上另一面墙：背压——大白话：废气往外挤的时候，消声器给它的阻力。

背压高了，发动机排气冲程要多费力气把废气推出去（这部分损失叫泵气损失），同时缸内残留废气增多、进气量下降。后果是一串的：**功率下降、油耗上升、排气温度升高**，对涡轮增压器还会影响涡轮前压力、拖累响应，严重时热负荷超标伤零件。

所以消声器设计从来不是「做到最安静」，而是一道有约束的最优化题：

在整车给定的背压预算和安装空间之内，把插入损失做到最大。

这个预算通常由发动机厂给死（比如额定工况下不超过某个 kPa）。降噪工程师能动的，是在预算之内怎么分配——哪几个频率用抗性精确点杀，剩下的用阻性抹平，以及在有限的容积里怎么排布腔室。这也是为什么两台外观差不多大的消声器，性能可以差十分贝：差别全在里面那几块隔板的位置上。

别忘了另外两根管子

排气之外，同样的道理适用于另外两处，而它们经常被漏掉：

进气。进气也是脉冲，也是低频，只是幅值小一些。空滤器壳体本身就是一个大膨胀腔，很多整车会在进气道上再挂一个亥姆霍兹共振器专治某根阶次。它便宜、不占什么空间、也不产生背压问题（进气阻力的代价另算）。

冷却风道。这是特种车上最容易被忽视的一条声通道。第七章会讲到：把发动机舱封起来降噪，就必须给冷却空气留进出口，而**敞开的风口等于给声音开了一扇门**。解法完全是消声器的思路——把风道做成带拐弯的迷宫，内壁贴吸声材料，让空气过得去、声音过不来。

下一章就去处理这个矛盾：捂得越严越安静，可发动机会越热。

第七章 · 捂住它：隔声与吸声

源头治过了，管子也堵上了，剩下的声音还是从发动机的外表面、油泵、管路上直接辐射出来。最后的办法是最朴素的一个：**拿东西把它包起来。**

这一章讲包起来该怎么包，以及一个所有做过发动机舱封装的人都吃过的亏：**封得越严越安静，发动机也越热。**这两件事在同一块钣金上打架。

先分清两个被天天混用的词

「隔声」和「吸声」不是一回事，用错了材料就白花钱。

隔声——大白话：不让声音穿过去。靠的是**重、密、不透气**。钢板、铅板、重质橡胶都是隔声材料。它管的是「外面听不听得见里面」。

吸声——大白话：不让声音在里面来回反射、越攒越响。靠的是**轻、松、多孔**。海绵、玻璃棉、聚酯纤维都是吸声材料。它管的是「里面有多混响」。

大白话

大白话：隔声像一堵墙，吸声像一块海绵。拿海绵当墙用，声音直接穿过去；拿墙当海绵用，声音在里面反射得更凶。

一个合格的隔声罩必须两样都有，而且顺序不能反：**内侧贴吸声材料**（吃掉罩内的混响，否则罩里声压升高，透出去的也跟着涨），**外侧是致密的隔声层**（挡住透射）。把这个顺序装反，是新手最常见的错误之一。

提高隔声量的三招，和它们各自的天花板

第一招：加重。第四章的质量定律——面密度翻一倍，隔声量 +6 dB。简单、有效、但代价是重量，而且回报是对数的：从 5 公斤加到 10 公斤赚 6 dB，再想赚 6 dB 就得加到 20 公斤。

第二招：做成双层。两层板中间夹一层空气或者软材料，效果远好于同等重量的单层板——因为它变成了「质量-弹簧-质量」的系统，在共振频率以上，隔声量随频率上升得比单层快得多。

但双层壁自带一个陷阱：这个系统有自己的**共振频率**，在那个频率上两层板一起同相摆动，隔声量不但不涨，反而**掉到比单层还低**。所以设计时必须把这个共振频率压到关心频段以下（通常做法是加大间距、或者中间填软而重的材料）。选错了，你会得到一个在某个特定频率上「专门放行」的罩子。

第三招：加阻尼。钣金件自己有一堆固有模态，被激励到就会像鼓面一样振，然后往外辐射。贴一层**阻尼材料**——大白话：一种又软又粘、会把振动变成热的材料（沥青基或高分子阻尼板）——能把这些模态的振幅压下去。它加的重量不多，但对「板子自己在响」这一类问题效果立竿见影。判断要不要贴很简单：用手敲一下，「咚——」余音很长的地方就该贴。

2026 年的材料架：别只问「哪种最新」

材料进步很快，但它没有推翻上面的三招。最新的东西，真正有用的地方，是把**同样的质量、厚度和耐温预算**用得更准。做发动机舱，材料可以按五类来选。

约束阻尼层——大白话：把一层黏弹材料夹在钣金和薄金属箔之间，板子一弯，它就被剪切、发热、吃掉振动。现在常用的是丁基橡胶、丙烯酸或高分子复合阻尼片，耐温版本能进发动机舱。它不是越贴满越好，通常优先贴在大平板、罩壳、检修盖这些「敲起来会响」的位置，覆盖 25% 到 60% 的面积就能吃掉主要模态；边角、加强筋附近贴满，收益反而小。

重质隔声毡——大白话：一张柔软但很重的墙。传统是铅板，现在工程上更多用填充矿物粉的 EPDM、EVA 或 TPO 隔声毡，也就是常说的 mass loaded vinyl 一类材料。它适合放在相对冷的外侧、驾驶室地板、隔火墙、侧围和罩壳外层，用面密度换隔声量。发动机舱高温区不要把它直接贴在热源旁边，必须看长期耐温、阻燃、耐油和烟毒要求。

气凝胶毡——大白话：很多纳米级小孔组成的轻薄隔热毯。它的强项首先是隔热，其次才是声学：把热挡住以后，外层的重质隔声毡、胶粘剂和密封条才不容易老化。特种车里它常用在排气近旁、涡轮附近、隔火墙热斑和电池/电控热敏区域。别把气凝胶当万能吸声棉，它薄、硬、贵，单独拿来降低频轰鸣并不划算；它更像是给声学包加了一层耐热护城河。

耐高温多孔吸声层——大白话：让空气在很多小孔里来回挤，靠摩擦把声能变成热。发动机舱现在常见的选择是疏水三聚氰胺泡沫、玻璃纤维针刺毡、玄武岩纤维毡、陶瓷纤维毯，外面再覆一层玻纤布、穿孔铝箔或不锈钢丝网，防油、防水、防吹蚀。聚氨酯海绵便宜，但耐高温和阻燃常常不够，离热源近的地方不要赌。

微穿孔板——大白话：不用棉的一块「带许多极小孔的薄板」。孔径通常小到毫米以下，后面留一段空腔，空气在小孔里振动摩擦，形成可调的吸声器。它的好处是耐高温、耐油污、好清洗；坏处是必须按目标频段设计孔径、孔距、板厚和背腔深度。近年的声学超材料、膜式共振器、3D 打印晶格，本质上也在做这件事：用更薄的结构去瞄准低频。对量产车来说，它们可以作为风道、罩壳内衬或低频陷波盒的局部模块；别指望一张「超材料贴片」解决全车噪声。

大白话

大白话：新材料不是魔法。重的负责挡，软黏的负责止振，松多孔的负责吸，高温轻薄的负责保命，带小孔和空腔的结构负责点杀难缠频段。

一套能落地的发动机舱声学包

如果让我从零给一台大功率特种车做方案，我不会先下采购单，而是按这个顺序走。

1. **先量频谱和热图**。怠速、额定转速、最大扭矩、低速大负荷、风扇全速各测一次；同时测排气管、涡轮、缸盖、隔火墙、罩壳内表面温度。材料选型必须同时回答两个问题：要压的是 125 Hz、250 Hz，还是 1000 Hz 以上？这块板长期是 80 摄氏度、120 摄氏度，还是会被排气热辐射烤到更高？
2. **罩壳外板先止振**。大面积薄板贴约束阻尼层，优先贴中间区域和容易鼓动的位置；检修盖、铰链旁、锁扣旁要额外处理，因为它们既会振，又最容易漏声。
3. **热源旁先隔热，再谈隔声**。排气、涡轮、后处理附近先用金属隔热罩、气凝胶毡或陶瓷/玄武岩纤维层把热辐射降下来。外层材料能活下来，声学性能才有意义。
4. **冷区用「吸声层 + 重质隔声层」复合包**。内侧 25 到 50 毫米疏水三聚氰胺泡沫、玻纤或玄武岩纤维毡，外侧 3 到 8 kg/m² 的重质隔声毡，中间尽量留空气层。吸声层面向噪声源，重质层放外侧；顺序反了，效果会明显变差。

5. **风道用可清洗吸声结构。**进出风迷宫的直通视线要打断，内壁不用裸露软棉，优先用穿孔铝板或不锈钢网保护的纤维毡；油污重、冲洗频繁的位置，可以改用微穿孔板加背腔。想压某个风扇叶片通过频率，就给这一段风道做定制背腔，而不是盲目加厚棉。
6. **所有开口都做成「软密封 + 迷宫」。**线束、油管、液压管穿舱用耐油耐温橡胶套和压板；维修口用连续密封条和足够的压紧力；排水孔、散热缝、手柄缝不要直通，做折线路径，内壁贴吸声材料。
7. **最后称重、复测、拆检。**降噪不是只看刚装完那一天。跑热循环、淋水、油雾、振动以后再测一次，再拆开看吸声层有没有塌陷、进水、掉粉、被风吹蚀。特种车的声学包，耐久比实验室吸声系数更重要。

好方案不是「用了最新材料」，而是每一层材料都知道自己在杀哪条声路。

整章最重要的一句：密封决定一切

如果这一章只能记一件事，那就是这件：**隔声罩的性能由它的漏洞决定，不由它的板决定。**

这不是修辞。一块能隔 40 dB 的板，只要开一个占总面积 **1%** 的孔，整体隔声量就掉到 20 dB 左右——一半的性能，被一个百分之一的洞吃掉了。开 0.1% 的孔，也就掉到 30 dB。

原因不难理解：隔声量 40 dB 意味着透过板的声能只剩万分之一，而孔洞是原样放行。当孔的面积占到万分之一以上时，从孔里出来的能量就已经和穿透整块板的能量相当了。**再往后，你加多厚的板都没用，因为总量由那个洞决定。**

所以现场做发动机舱封装，真正花时间的从来不是选材料，而是：线束过孔怎么封、油管穿舱怎么封、维修口盖的压条有没有压实、罩子和车架之间那条几毫米的缝怎么处理、地板上排水孔要不要做成迷宫。**一台车最后那 3 dB，通常就卡在某一处没人管的过孔上。**

做隔声，选材料花一天，找漏洞花一个月。

那个绕不开的矛盾：越安静越热

发动机是一台巨大的热源，它靠冷却空气把热带走。封装的本质是把这台热源关进一个盒子——**而声音走的路和空气走的路，是同一条路。**

把风口收小，噪声降了，进风量不够，水温上升、机油温度上升，重则动力受限甚至报警停机。特种车尤其严重：它常常在低速、大负荷、高环境温度下长时间作业，本来散热就是紧的。

解法不是在「安静」和「凉快」之间选一个，而是**把空气和声音分开对待**——让空气顺利通过，让声音在同一条通道里被消耗掉。具体手段全部来自第六章：

- **把风道做成拐弯的。**声音走直线，拐两个弯就撞在贴了吸声材料的壁上；空气拐弯只损失一点点压降。
- **风道内壁贴吸声材料**，做成一段阻性消声道，长度换消声量。
- **把进出风口挪到远离人或远离厂界的方向**，用指向性换分贝——这一招不花钱，效果常常有 3 到 5 dB。
- **用更大的风扇、更低的转速**送同样的风量。风扇噪声对转速极其敏感（第九章细讲），这是同时改善噪声和散热的少数「双赢」手段之一。

大白话

大白话：不要试图把声音堵在盒子里，那样发动机会热死。要做的是让声音在出去的那条走廊上被磨掉。

还有一个封不住的东西

做完这一切，罩子严丝合缝、内衬吸声、风道迷宫——测下来还是有一段低频顽固地留着。

因为它根本不是从空气里传出来的。发动机的振动通过悬置、通过排气吊耳、通过每一根油管和线束，直接传进了车架，再传到驾驶室地板和大块覆盖件上，让它们变成新的声源。**这条路完全绕过了你的罩子。**

这就是第二章说的第八类源：结构辐射。下一章去切断它。

第八章·切断路：振动隔离

有一种噪声，你把耳朵贴在发动机上听不到多少，把发动机整个包起来也不见小，但坐进驾驶室，它是那里最难受的东西。

它走的不是空气，是钢铁。

两条路：空气传声与结构传声

声音从源头到耳朵，有两条完全独立的路。

空气传声——大白话：源头把空气推响了，声波在空气里跑到你耳朵。前面七章讲的全是这条路。

结构传声——大白话：源头把它连着的钢铁晃动了，振动沿着结构一路传过去，传到某块大面板上，面板振动又把空气推响。**你听到的声音，是从面板上发出来的，源头却在十米以外。**

这条路有三个让人吃亏的特性：

- **衰减极小。**声音在空气里传播会随距离迅速衰减，在钢结构里几乎不衰减——钢里的声速约 5000 米每秒，能量能跑很远。
- **低频占优。**结构传声的主力恰恰是第四章说的那段最难对付的低频。
- **看不见路径。**它可以从悬置走，也可以从排气管吊耳、液压硬管、线束卡箍、甚至一根没人注意的支撑杆走。**只要有一条硬连接没断，前面所有努力都可能被它一条路带穿。**

大白话

大白话：空气传声像有人在隔壁大喊，结构传声像有人在敲你家的承重墙——墙不响，但整个屋子都在响。

隔振的原理：一句话，也是一个陷阱

切断结构传声的办法是在源和车架之间放一块软的东西——橡胶悬置。原理听起来天经地义：垫软点，就传得少。

但真实的规律比这句话严格得多，而且带着一个致命的前提。

发动机加上悬置，构成一个「质量配弹簧」的系统，它有自己的固有频率——大白话：你把它按一下松手，它自己会以这个频率上下弹。用 f_0 表示。真正的规律是：

只有当激励频率高于 $\sqrt{2} \times f_0$ 时，隔振才开始起作用；低于这个值，悬置不但不隔振，反而**放大**振动。在 f_0 附近，是共振，放大得最厉害。

这条规律解释了一个常被误解的现象：**有人抱怨「换了软悬置反而更抖了」，他没说错**。如果软到让 f_0 抬进了工作频段，或者路面激励恰好落在 f_0 上，那就是一台放大器。

于是软硬之间只剩一条窄缝

按上面的规律， f_0 越低越好——越低，能被隔离的频率范围越宽。降低 f_0 的办法是把悬置做软。

但软有软的代价，而且是硬约束：

- **位移变大**。发动机在扭矩冲击、急加速、过坑时会大幅晃动，可能撞到周边的管路、风扇护罩、车架。
- **耐久变差**。橡胶大变形反复受载，寿命下降。
- **操控与姿态**。动力总成晃得太厉害，会影响操纵手感和相连管路的疲劳。

所以工程上取一个折中：**把动力总成悬置系统的固有频率放在 8 到 12 Hz 这个区间**。为什么是这里？因为它要低于最低的工作激励——怠速时的点火频率。一台六缸机怠速 700 转，点火频率是 $700 \div 60 \times 3 \approx 35 \text{ Hz}$ ，是 12 Hz 的三倍左右，正好落在隔振有效区里；同时 8 Hz 又高到不至于让发动机晃得没边。**这条窄缝，就是所有悬置设计的落点**。

顺带说一句：整车上的悬置从来不是一个孤立的弹簧，它是六个自由度上的一整套刚度分配。把发动机的几个模态（尤其绕曲轴轴线的扭转模态）解耦开，让它们互不激励，是悬置

布置真正的技术含量所在。

液压悬置：想同时要两件相反的东西

纯橡胶悬置有一个无解的矛盾：**低频要大阻尼（压住发动机的大幅晃动），高频要小刚度（把振动隔干净）**。橡胶的阻尼和刚度是绑在一起的，给不出这种「分频段变脸」的特性。

液压悬置就是为这个矛盾造的：橡胶主簧里做两个液室，中间用一条细长的惯性通道连起来。低频大振幅时，液体被迫在细通道里来回流动，产生很大的阻尼，晃动被压住；高频小振幅时，液体来不及在通道里流动，通道相当于「堵死」，此时靠一片解耦膜提供柔软的通路，动刚度保持很低，振动被隔掉。

大白话

大白话：低频时它是一个减震器，高频时它是一块软橡胶——靠液体流不流得动来自动切换。

被忽略的那些「旁路」

悬置做得再好，只要还有一条硬连接，效果就会被短路。真实项目里最常见的几条旁路：

- **排气管吊耳**。排气系统一头连着发动机，一头挂在车架上。如果吊耳太硬，它就是一条完美的振动高速公路。解法是用橡胶吊耳，并在发动机和排气管之间加一段**波纹管**（金属软管）做柔性连接。
- **液压硬管**。特种车上液压管又粗又硬，从泵直接接到阀块和车架，是最容易被漏掉的一条路。解法是在靠近泵的位置换一段高压软管，并把管卡换成带橡胶衬套的。
- **线束和拉索**。看起来软，但成束扎紧、卡箍拧死之后传振效果不差。
- **散热器和风扇护罩**。它们常常一半固定在发动机上、一半固定在车架上——等于自己做了一条桥。

诊断这些旁路的办法很朴素，就是第三章的拆件法的变体：**逐条松开、临时换软、看驾驶室内的那根低频峰掉不掉**。

最后一步：让被晃到的板子少响

假设振动终究还是传到了地板和覆盖件上，最后一道防线是让这些板子**振动时少辐射**：

一是**加阻尼**（第七章讲过），压低共振峰；二是**改模态**——用加强筋、压筋、改变板的曲率，把板的固有频率挪出激励频率范围，或者把大平板打断成几块小板（小板辐射效率低、固有频率高）。这也是为什么汽车地板和覆盖件上总是布满看似随意的压筋——它们既是刚度，也是声学。

到这里，四条正面战线（源头、管道、封装、隔振）就讲完了。剩下的是一批总声级不高、却特别招人烦的配角——它们的共同点是：**都在发一根很尖的纯音**。

第九章 · 配角也会抢戏：风扇、液压与齿轮

前面八章处理的都是大块头。这一章讲三个小零件：一把风扇、一个液压泵、一对齿轮。

它们在总声级里往往排不进前两名，却经常是用户投诉里排第一的那个声音。原因只有一个词：**纯音**。

为什么一根尖音比一片轰鸣更招人恨

第二章提过音调突出度——大白话：一堆噪声里有没有一根特别清晰的「哨子音」冒出头。人耳对这种能量集中在极窄频率上的声音异常敏感：同样的能量，摊成一片宽带的「沙沙」几乎无感，攒成一根 2000 Hz 的尖音就让人坐立不安。

这三个零件恰好都在发这种声音，而且原因相同：**它们都在做严格周期性的重复动作**。叶片一片一片扫过、柱塞一个一个吸排、齿一颗一颗啮合——周期性动作在频谱上必然是一根线，不是一片。

大白话

大白话：凡是「一圈重复 N 次」的东西，都会在频谱上留下一根尖峰，而人耳专挑这种尖峰下嘴。

好消息是：第三章的阶次分析对付它们几乎是白给——数出它一圈响几下，就知道是谁。

冷却风扇：怠速时的头号嫌疑人

风扇噪声有两部分。一部分是宽带的湍流噪声，叶片扰动空气、边界层分离、叶尖涡，听起来是「呼——」。另一部分是纯音，来自叶片通过频率——大白话：每秒钟有多少片叶子扫过同一个位置。

算法很直接：叶片数 $\times$ 转速 $\div$ 60。一个 9 叶风扇在 2400 转下，就是 $9 \times 2400 \div 60 = 360$ Hz，加上它的整数倍谐波。

风扇最关键的一个性质是它对转速极其敏感：**风扇噪声大致随转速的五次方增长**。换算成分贝就是转速每翻一倍，噪声上升约 15 dB；反过来，把转速降低 20%，就能换来大约 **5 dB** 的下降。

这条规律直接给出了风扇降噪的第一手段：**用更大的风扇、更低的转速，送同样的风量**。这是第七章说过的、少数同时改善噪声和散热的双赢方案。其余手段：

- **不等距叶片**。把叶片按不均匀的角度排布，周期性被打破，那根尖锐的纯音被摊成一小片宽带——总能量没怎么变，主观烦扰度明显下降。这是纯粹的「化整为零」。
- **控制叶尖间隙与护风罩**。叶尖和护风罩之间的间隙过大，气流会从高压侧泄漏回低压侧，形成强烈的叶尖涡，既吵又降低风量。
- **避免叶片和前方障碍物的距离过近**。散热器、支架、水管在叶片前面留下的尾流，会周期性地打在叶片上，直接加强纯音。这是布置问题，图纸阶段几乎免费，做完样车再改就贵了。
- **按需驱动**。用电控硅油离合器或者电动风扇，让转速跟着水温走，而不是跟着发动机转速走。特种车怠速作业时间长，这一条对实际听感的改善往往比任何降噪材料都大。

为什么风扇常在怠速时称王？因为此刻发动机没使劲，燃烧和排气都温和，而水温已经上来、风扇在全速转。**第一章的算术在这里生效：这个工况下它是那个「最大的源」，不动它，别的都白干。**

液压系统：一串按柱塞数报数的脉动

特种车的工作装置几乎全靠液压，而液压噪声的源头是泵。

轴向柱塞泵靠若干个柱塞轮流吸油、排油。每个柱塞排出的流量不是恒定的，合成之后输出流量带着一串规律的起伏，叫流量脉动。流量脉动遇到管路的阻力，就变成**压力脉动**。频率同样一算就有： $\text{柱塞数} \times \text{转速} \div 60$ 。一个 9 柱塞泵在 1800 转下是 270 Hz。

这串脉动干两件坏事：让管路和阀块振动（结构传声，第八章那条路），以及在管口和阀内形成尖锐的啸叫。

对付它的手段：

- **脉动衰减器或蓄能器**。在泵出口附近挂一个带气囊的腔——本质上就是第六章的亥姆霍兹共振器搬到液压里，专门吸掉某个频段的压力脉动。位置很讲究：**必须靠近泵**，装远了，脉动

已经把中间那段管子激励起来了。

- **管路布置。**避免长直硬管（容易形成驻波）、避免管长恰好等于半波长的整数倍、用带橡胶衬的管卡、在泵出口接一段高压软管。
- **泵本身。**配流盘上的减振槽（让柱塞在高低压之间过渡时压力平缓上升，而不是突变）是泵厂的核心工艺之一——道理和第五章的「压力升高率」一模一样，只是介质从气变成了油。
- **降低系统压力和待机流量。**负载敏感系统在待机时把泵摆到接近零排量，噪声随之大降。

齿轮：把「不圆」磨掉

齿轮噪声那种「呜——」的连续变调声，来源是传递误差——大白话：主动轮匀速转，从动轮却做不到完全匀速，每啮合一个齿就有一点点忽快忽慢。这一点点周期性的不匀，就是激励。

频率是啮合频率：齿数 × 转速 ÷ 60，加上它的谐波。

传递误差的来源有两类。一类是**制造误差**（齿形偏差、齿距误差、跳动），靠提高加工精度和磨齿来压。另一类更本质：**齿在受载后会弹性变形**，导致啮入啮出时产生冲击——精度再高也躲不掉。

解法是齿形修形——大白话：故意把齿的形状磨得不那么标准，在齿顶和齿根削掉一点点（微米级），让下一对齿在进入啮合时是「渐渐接手」而不是「突然撞上」。**做法是**把一个理论上完美的形状故意做歪，来抵消受载后的变形。这也是齿轮降噪里最反直觉、也最有效的一招。

其余手段：加大重合度（同时有更多对齿在啮合，载荷分摊得更平顺）、用斜齿代替直齿（啮合是渐进的斜线接触，不是整条齿线同时撞上）、控制箱体刚度和轴承支撑（激励再小，箱体一共振也白搭）。

一条共同的经验

这三个配角有一条共同的规律，值得单独记下来：

纯音问题几乎总是能通过「打破周期性」或者「让接触变渐进」来改善，而不是靠加材料去捂。

不等距叶片、配流盘减振槽、齿形修形、活塞销偏置（第五章）——它们做的是同一件事：**把一次突变，摊成一个过程。**

下一章去处理另一批完全捂不住的声音：车一跑起来，从轮胎和履带底下涌上来的那一片轰鸣。

第十章 · 滚动的轰鸣：轮胎与履带

前面九章的所有手段，都建立在一个默默的前提上：噪声源装在车上，你能包它、能隔它、能改它。

这一章的源不一样。它发生在车和地面接触的那一小块地方，露天、移动、无法封装，而且随着速度上升会以极快的速度反超所有人。

先看它涨得有多快

轮胎和履带噪声大致随速度的三次方增长——换算成分贝，**速度每翻一倍，噪声上升约 9 到 10 dB**。

对照第一章的算术：10 dB 就是主观上「响一倍」。所以一台车从 20 公里每小时提到 40，行走噪声就翻一倍响；再提到 80，又翻一倍。而发动机噪声随转速的增长要温和得多。

两条曲线一定会交叉。交叉点之后，**你在发动机上做的所有工作都不再影响总声级**——第一章那条铁律换了个方向咬人。对乘用车来说这个交叉点大约在 50 到 60 公里每小时；对轮式特种车，因为发动机本来就吵，交叉点更高，但它一定存在。

大白话

大白话：低速时是发动机在响，高速时是地面在响。做降噪之前先确认，这台车主要在哪一边工作。

轮胎的三种响法

一、花纹块拍打。花纹块接触地面的瞬间是一次撞击，离开地面时又是一次弹开。一圈有多少个花纹块，一秒钟就发生多少次这样的敲击——又是一个严格周期性的动作，又是一根纯音（第九章的老问题）。**解法同样是打破周期性：把花纹块做成不等距排列**，尖峰被摊成宽带。这是所有现代轮胎花纹看起来「乱」的原因之一，不是美工随手画的。

二、泵气效应。花纹沟槽在接地时被压扁，槽里的空气被挤出去；离开地面时槽张开，空气又被吸进来。**一进一出就是一个小气泵，一圈几十个花纹块就是几十个小气泵在高速工作。**这是中高频「嘶——」声的主要来源。横向沟槽（越野花纹的大块）泵气最厉害，纵向沟槽好一些——但横向花纹恰恰是泥地抓地力的来源。

三、胎体振动。整条轮胎是一个环形的弹性体，被路面激励后会以自己的模态振动，并把振动传进悬架和车身（第八章那条结构路），在车内表现为低频的「隆隆」。

三者加起来的结论有点残酷：**轮胎噪声和抓地力、耐磨性、滚阻是一组互相打架的指标。**越野花纹越吵，是它作为越野花纹的代价，不是设计缺陷。

履带：把「撞击」写在原理里

履带车更极端。它的噪声机理里，撞击不是副作用，是工作方式本身。

销齿啮合冲击。驱动轮的齿一颗一颗咬进履带的销，每一次咬合都是一次金属对金属的撞击。频率是： $\text{齿数} \times \text{驱动轮转速} \div 60$ ——又一根可以用阶次分析直接认出来的纯音。

履带板落地。履带绕过驱动轮后，一块一块拍在地面上。每块板落地都是一次冲击，冲击频率由车速和履带节距决定。

多边形效应。履带绕在有限齿数的驱动轮上，走的不是圆，是一个多边形。这让履带的线速度在一圈里周期性地忽快忽慢，产生规律的张力波动和纵向振动——和齿轮的传递误差（第九章）是同一类问题。

能做的事不多，但都很有效：

- **换橡胶履带或加装橡胶履带块。**把金属对金属的撞击换成有阻尼的弹性接触，效果可以到 **10 dB 以上**——这是履带降噪里唯一一个「量级」级别的手段。代价是承载能力和耐久。
- **销齿之间加弹性衬套，**让啮合从撞击变成渐进接触（还是「把一次突变摊成一个过程」那条经验）。
- **增加驱动轮齿数，**减小多边形效应。
- **调整履带张紧度。**太松，履带甩打；太紧，啮合冲击加剧、磨损增大。这是一个有最优值的参数，而且在维护中最容易被忽略。

为什么这一章的手段都在源头

你会注意到，这一章从头到尾没有出现「隔声罩」「吸声棉」这些词。

原因是行走噪声的辐射位置在车底和车轮附近，紧贴地面、四面敞开、还要允许悬架大行程运动。**任何试图把它包起来的结构，都会挡住悬架、挂到石头、糊满泥。**特种车的作业环境让「封装」这条路从一开始就不成立。

还剩两件事可以做，都不在轮子上：

一是**挡它进驾驶室**——地板加阻尼、轮罩内衬吸声材料、把地板上的每一个过孔封死（第七章那条「1% 的洞吃掉一半性能」在这里同样成立，而地板恰恰是过孔最多的地方）。这不降低车外噪声，但显著改善司机的一天。

二是**降速**。三次方规律反过来用：转场时慢 20%，行走噪声降约 3 dB。这不是技术方案，是使用方案，但在厂界噪声超标的项目里，它常常是唯一能立刻生效的那一条。

有些噪声不是被治好的，是被绕开的。承认这一点，比再糊一层吸声棉诚实。

说到这里，被动手段的边界基本划完了。下一章看看那条听起来最像魔法的路：用声音去消灭声音。

第十一章 · 以毒攻毒：主动降噪

前面十章的所有手段都在做减法：少产生、少传递、少辐射。这一章讲一条完全不同的路——再造一个声音，用它去抵消原来的声音。

它听起来像魔法，在你耳机里也确实每天都在工作。但把同一件事搬到一台特种车上，难度会陡增几个数量级。这一章讲清楚它在哪儿好用、在哪儿不好用，以及为什么。

原理简单得不像话

声波是压力的起伏。如果在同一时刻、同一地点，再制造一个大小相等、**相位正好相反**的压力起伏，两者叠加，压力恢复平静——这就是相消干涉。大白话：一个波往上推的时候，另一个波正好往下拉，抵消掉。

主动降噪系统就三个部件：一个传声器听原噪声，一套算法算出该发什么反相声，一个扬声器发出去。再加一个「误差传声器」放在要安静的位置，听残余噪声，反过来告诉算法「还差多少」，不断修正。

大白话

大白话：它不是把声音挡住或吃掉，是在你耳朵那个位置，凑出一个「零」。

为什么耳机里容易

降噪耳机是主动降噪最成功的产品，原因有三条，每一条都值得记住——因为它们正好是车上做不到的三条：

一、空间极小。耳罩内的空腔只有几厘米，而它要对付的低频（100 Hz）波长是 3.4 米。**整个空腔远小于一个波长，意味着腔内各处的声压几乎完全同相位。**凑一个零，就等于全腔都是零。

二、误差点固定。误差传声器就在耳道口，和要保护的耳朵之间距离几乎不变。

三、次级声源就在旁边。扬声器和误差点距离极短，声音传过去只要零点几毫秒，算法有充足的时间余量。

为什么旷野里难

把这三条反过来，就是车外主动降噪的困境。

一、一个零只是一个点。在开阔空间里，你在 A 点凑出了安静，B 点的相位关系完全不同——**那里可能不但没安静，反而因为多了一个声源而更响。**主动降噪在开阔空间里从不「消灭」能量，它只是重新分配了能量的空间分布：挖一个坑，土堆在旁边。

要在一个有体积的区域里都安静，需要的次级声源数量随着区域尺寸和频率上升而急剧增加。工程上的经验是：**能做出的「安静区」半径大约是十分之一波长量级。**对 100 Hz 来说是三十几厘米——刚好够护住一个人的头，护不住一台车周围的旷野。

二、误差点会动。司机的头一直在动。头移开安静区，效果立刻消失，甚至变差。

三、时间不够。算法必须在噪声到达误差点之前算完并发声。频率越高、距离越短，留给运算的时间越少。这也是主动降噪**天然只能对付低频**的根本原因之一——恰好和被动手段互补（第四章：被动手段治不了低频）。

真正好用的三个场景

把限制条件反过来读，就知道它该用在哪儿：**空间受限、声场简单、频率低、误差点固定。**

一、管道。这是主动降噪最理想的战场。管子直径远小于波长时，声波只能沿管轴一维传播——**一维意味着只有一个方向要对付，一个扬声器就能封住整个截面。**排气管、进气道、冷却风道的主动降噪都属于这一类，工程上成熟且有效，对 200 Hz 以下能做到 10 到 20 dB。它的额外好处是：不产生任何背压（对比第六章消声器的核心代价），也不占体积。

二、驾驶室内。封闭的小空间、乘员位置大致固定、要对付的又是被动手段最无能为力的低频轰鸣——条件全都对上了。做法是用车载音响当次级声源，把发动机转速信号（或者车身上的加速度信号）当参考，专门压制某几个阶次的轰鸣，或者压制路面激励带来的低频路噪。这在乘用车上已经量产多年。

三、单一顽固的纯音。如果第三章的测量指出问题是一根明确的、随转速变化的低频阶次，那么主动降噪对付它效率极高——因为参考信号（转速）是现成且精确的，算法只需要盯住一根线。

几个必须知道的工程现实

- **它需要一个好的参考信号。**用转速信号做参考（前馈）比用传声器听（反馈）稳定得多，因为转速不受背景噪声污染。这也是为什么发动机阶次的主动控制远比宽带路噪好做。
- **次级通路会变。**从扬声器到误差传声器之间的传递特性（业内叫次级通路）会随温度、乘员数量、车窗开合而变化，算法必须在线辨识并跟随，否则会失稳。**失稳的主动降噪不是没效果，是啸叫。**这是它在安全性上最需要小心的地方，实际系统都带有强制关断的保护逻辑。
- **它降的是分贝，不是危害。**对听力保护而言，主动降噪只在耳朵那个点有效；作业人员在车周围走动时不受保护。厂界噪声、职业健康这些指标，最终还得靠被动手段。

一句定位

主动降噪是低频的补丁，不是被动手段的替代品。它的正确用法，是在被动手段已经做到极限之后，去啃剩下的那几根低频尖峰。

顺序不能反：如果源头没治、密封没做、隔振没断，就上主动降噪，等于让算法去追一个还在不断变化的、能量巨大的目标——它会一直工作在饱和状态，效果差且不稳定。

到这里，十一章讲完了一台柴油特种车上所有的战线。最后一章要问一个当下所有人都在问的问题：如果把发动机整个换掉呢？

第十二章 · 换一种动力，换一种安静

把柴油机整个拿掉，换成电机和电池。第一章说过总声级由最大的源主宰——现在最大的那个源没了，整台车应该一下子安静下来。

它确实安静了。但很多第一次开电动特种车的人会给出一个奇怪的反馈：「**是小声了，但更难听了。**」

这句话不矛盾，它恰好是这本书所有原理的一次总复习。

掩蔽：被拿掉的不只是噪声，还有一床被子

柴油机的噪声是宽带的，能量摊在很宽的频率上。它响的时候，顺便干了一件没人注意的好事：**把别的声音盖住了。**

这个现象叫掩蔽效应——大白话：一个响的声音会让人听不见旁边一个小声音，尤其当两者频率接近时。这就是为什么在嘈杂的车间里，你听不见自己手表的滴答。

柴油机在的时候，减速器的齿轮啸叫、液压泵的脉动、冷却风扇的纯音，全都躺在这床宽带的被子底下。发动机一走，被子掀了。**那些声音的绝对大小一分没变，但它们第一次被听见了**——而且是最刺耳的形式：安静背景里的一根纯音（第九章讲过人耳对这个有多敏感）。

大白话

大白话：总声级降了 10 分贝，主观烦扰度却可能没降，甚至更烦。因为吵的东西少了，但难听的东西露出来了。

这是电动化 NVH 的第一课，也是最反直觉的一课：**你必须重新处理一批原来根本不在清单上的源。**

新的头号嫌疑人：电机啸叫

电机不烧油，但它有自己的噪声机理，而且不止一种。

电磁力波。电机的定子和转子之间隔着气隙，磁场在气隙里产生径向的吸力。这个力不是均匀的，而是沿圆周分布成一个个「波」，并且随时间高速旋转。这个力波作用在定子铁芯上，让它像一面鼓一样发生周期性的椭圆化变形，变形再辐射成声音。

它的频率由极对数、槽数、转速共同决定，是一根（往往是好几根）随转速连续爬升的**高频纯音**——听起来就是电动车特有的那种「咦——」的啸叫。它的麻烦在于：频率高（常在 1000 到 5000 Hz），正好落在**人耳最敏感、A 计权基本不打折**的那一段（第一章）。

开关频率。控制器用脉宽调制驱动电机，开关动作会在电流里叠加高频分量，进而在噪声里叠加一根开关频率及其边带的尖音。对策之一是把开关频率提到 15 kHz 以上（人耳听不见），或者用随机开关频率把那根尖音摊成宽带——**又是第九章那条经验：打破周期性。**

减速器。电机转速高（上万转），必须减速，齿轮啮合频率随之很高。第九章讲的传递误差、齿形修形，在这里比在柴油车上重要得多——因为没有被子盖了。

剩下的旧问题一个没走

值得注意的是，前面十一章的内容并没有作废，其中一大半在电动车上原样成立，有些甚至更重要：

- **冷却风扇和水泵**还在，而且因为电池和电控也需要热管理，可能更多了。在电动车安静的背景上，风扇成为第一噪声源是常态（第九章）。
- **液压系统**在特种车上照样存在，工作装置还得靠它。
- **轮胎和履带**一点没变，而且因为发动机噪声消失，它们的**交叉点大幅前移**——第十章那条曲线，现在从很低的速度开始就是主角了。
- **结构传声**更突出。电机的激励频率高、幅值小，但传播路径完全相同；而且电动车往往取消了大质量的发动机块，车架的模态分布整个变了，原来不共振的地方现在共振。
- **整车重量增加**（电池），悬架和轮胎载荷上升，路噪随之上升。

所以电动化不是「NVH 问题的终结」，是**一次彻底的洗牌**：旧的第一名退场，第二到第八名全部往前挪一位，同时新增了一批高频纯音选手。

于是目标必须换一种写法

这一章、也是这本书真正的落点在这里。

如果一个项目的噪声目标只写一句「整机噪声不超过 X dB(A)」，在柴油车上还勉强能用（因为最大的源明确，打它就对了）；在电动车上则彻底失效——**你可以完全达标，同时被用户投诉得体无完肤。**

专业的做法叫目标分解——大白话：把一个整车级的模糊要求，一层一层拆成每个零件供应商能验收的具体数字。它至少要拆四个维度：

- **按工况：**怠速/待机、全负荷作业、行走转场、加速、冷却风扇全速……每个工况一套指标（第二章：排名会洗牌）。
- **按位置：**司机右耳、车外一米、厂界七米……室内和车外可以背道而驰（第二章）。
- **按频段：**不只给总值，给频谱包络线。低频归低频算，中高频归中高频算（第四章：同样的分贝，难度差二十倍）。
- **按特性：**除了分贝，还要给音调突出度、粗糙度、波动度这些心理声学指标的上限——专治「声不大但难听」（第九章、本章）。

拆完之后，每一条才能变成给某个供应商的具体要求：电机在 3000 转时某阶次的声压不超过多少、减速器的传递误差不超过多少微米、风扇在额定风量下的声功率不超过多少。**只有拆到这一层，噪声才从一个抱怨变成一个可以被设计、被验收、被追责的工程量。**

回到第一章

十二章走完，可以把整本书压成三句话。

第一，先排队。总声级由最大的源主宰，动手之前必须知道此刻的第一名是谁——而且它随工况、位置、频段变化。不测就改，等于蒙眼修表。

第二，认清物理的边界。低频波长几米，挡不住、吸不掉、捂不住。承认这一点，才会把力气放对地方：源头少产生，或者把它逼进管子里收拾。

第三，每一分安静都要用别的东西去换。换背压、换重量、换体积、换散热、换油耗、换成本、换维修性。这本书里没有一个方案是免费的。降噪工程师真正的工作，不是「把噪声降下来」，而是**在一堆互相打架的约束里，找出那个代价最小的换法。**

安静是设计出来的，不是捂出来的。捂只是最后一步，而且是效率最低的那一步。

回头看第一章那道题——两台 85 分贝的机器一起开是 88 分贝。当时它只是一个反直觉的算术。现在你应该能看出，它其实是整个行业的成本结构：**能量是对数记账的，所以进步永远比努力慢；也正因为如此，把力气用在正确的那个源上，才是这门手艺里唯一真正的技巧。**

让巨兽安静下来