

电机的噪声和振动

〔苏〕 И. Г. 舒波夫 著

沈官秋 主译

机械工业出版社

本书从电磁、空气动力和机械等方面分析了电机产生噪声和振动的原因，并从这些方面讨论了降低电机噪声和振动的各种措施。书中重点介绍了异步电机、同步电机和直流电机的电磁噪声；对电机的转子振动也作了较详细的分析；举例说明了电机噪声和振动的计算方法；还介绍了噪声和振动的测量方法和设备。并在书前简要叙述了声学 and 振动的基本知识和计算方法。

本书可供从事电机设计制造、试验研究和运行维修的工程技术人员阅读；并可作为高等院校和中专学校电机类专业的教学参考书。

本书第一至第六章和附录部分由沈官秋同志翻译；第八和十一两章由俞茂宏同志翻译；第九和十两章由丁梵林同志翻译；王明德同志承担了本书的校阅和第七、十二两章的翻译。

ШУМ И ВИБРАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

И. Г. ШУБОВ

《Энергия》 ленинградское отделение 1974

* * *

电机的噪声和振动

[苏] И. Г. 舒波夫 著

沈官秋 主译

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经销

*

开本 787×1092¹/₃₂·印张 7⁵/₈·字数 166 千字

1980年10月北京第一版·1980年10月北京第一次印刷

印数 0,001—9,800·定价 0.79元

*

统一书号：15033·4732

目 录

第一章 声学的某些知识	1
§ 1-1 振动和声音	1
§ 1-2 噪声和振动的测量单位	2
§ 1-3 噪声的辐射	6
§ 1-4 噪声的传播	8
§ 1-5 噪声对人体的有害影响	9
第二章 电机的噪声源和振动源	11
§ 2-1 噪声和振动源的简述	11
§ 2-2 噪声和振动源的区别	14
§ 2-3 某些结论	15
第三章 振动和辐射噪声的计算	17
§ 3-1 振动的计算方法	17
§ 3-2 单质点的振动系统	18
§ 3-3 双质点的振动系统	22
§ 3-4 振动吸收的计算	26
§ 3-5 电磁力引起的定子振动	28
§ 3-6 电机机壳磁噪声的辐射	33
第四章 异步电机的磁噪声	37
§ 4-1 基本方程式	37
§ 4-2 定子和转子绕组的磁动势	37
§ 4-3 气隙磁导	39
§ 4-4 气隙磁场	40
§ 4-5 磁场产生的径向力	43
§ 4-6 工作状态对磁噪声响度级的影响	54

IV

§ 4-7	鼠笼转子槽数的选择	56
§ 4-8	斜槽对振动和噪声的影响	63
§ 4-9	气隙偏心对磁噪声的影响	71
§ 4-10	钢的饱和	75
§ 4-11	具有几个并联支路的绕组中电流分配 不平衡的影响	76
第五章	同步电机的磁噪声	80
§ 5-1	一般知识	80
§ 5-2	两倍电网频率的振动	80
§ 5-3	定子和转子磁场高次谐波产生的振动	90
§ 5-4	高频感应发电机的磁噪声	96
§ 5-5	同步电机噪声和振动的测量结果	97
第六章	直流电机的磁噪声	101
§ 6-1	几个假定	101
§ 6-2	电枢直槽和磁极下均匀气隙	101
§ 6-3	定子轭的固有振动	107
§ 6-4	电枢直槽和磁极下偏心气隙	111
§ 6-5	电枢斜槽和磁极下均匀气隙	112
§ 6-6	负载对磁噪声的影响	114
§ 6-7	某些工艺偏差的影响	115
第七章	空气动力噪声	117
§ 7-1	概述	117
§ 7-2	空气动力噪声的形成	117
§ 7-3	风扇的噪声	118
§ 7-4	转子旋转引起的噪声	123
§ 7-5	噪声消声器的应用	126
§ 7-6	各种不同结构电机的空气动力噪声	129
第八章	转子振动	134
§ 8-1	具有一个集中质量的轴的振动	134

§ 8-2	转子的临界转速计算	136
§ 8-3	影响临界转速的各种因素	145
§ 8-4	次临界转速	150
§ 8-5	转子平衡	153
§ 8-6	热不平衡	163
§ 8-7	转子轴颈椭圆度产生的振动	166
§ 8-8	不平衡引起的电机振动	167
§ 8-9	轴线的对中	168
§ 8-10	扭转振动	170
第九章	滚动轴承引起的振动	174
§ 9-1	概述	174
§ 9-2	对结构和生产提出的要求	176
§ 9-3	滚动轴承的振动源	181
第十章	电刷装置的噪声	185
§ 10-1	电刷噪声的原因	185
§ 10-2	滑动接触的噪声	185
第十一章	电机的隔振	188
§ 11-1	隔振效果	188
§ 11-2	电机减震后的自由振动频率	190
§ 11-3	串联的双级减震器装置	196
§ 11-4	减震器的结构和选择	199
第十二章	电机噪声的测量	202
§ 12-1	测量的条件和方法	202
§ 12-2	测量设备	206
§ 12-3	被试电机的安装和工作状态	207
§ 12-4	测量的进行方法和数据的处理	208
附录	210
1	最常遇的声音和噪声的平均响度级	210

V

2	用分贝表示的振动级和声压级与用绝对单位表示的 这些数值之间的关系	211
3	简单振动系统谐振频率 f_0 和弹簧静力变形 δ 的 关系	214
4	空气或水中平面波和球形波的声强 I 和声压 P 之间 的关系	215
5	空气或水中平面波和球形波的振动速度 \dot{y} 和声压 P 之间的关系	216
6	圆盘的谐振频率 f_0 与其厚度 h 和直径 d 之间的 关系	217
7	矩形板的 f_0/β 与板厚 h 和最大线长度 a 之间的 关系	218
8	函数 $\frac{p}{v} \frac{k_{wv}}{k_{w1}}$ 的值	220
9	函数 $\Phi(\xi) = \xi - \frac{\sin 2\pi\xi}{2\pi}$	229
10	轴的圆截面单位长度重量 q 与惯性矩 J	231
11	某些材料和结构的隔声平均值 (实验数据)	233
12	AKCC-M 型减震器的静力刚度和动力刚度	233
13	AKCC-И 型减震器的静力刚度和动力刚度	234
14	书中测量单位和 СИ 制单位的转换表	234
参考文献		235

第一章 声学的某些知识

§ 1-1 振动和声音

任何机械振动系统都是声波源。

声音在频率 16 赫兹至 16000 赫兹范围内,并有足够的强度时能被人的耳朵所感觉。人们的听觉对频率的绝对增加具有不同的反应能力,而对频率的相对变化具有同样的反应能力。

任何频率增加一倍时,总是引起声调提高八度音的感觉。例如,频率由 50 赫兹增加到 100 赫兹或由 100 赫兹增加到 2000 赫兹时,听觉所感觉到声音高度的变化一样,都是增加一个八度音。人们对于声音的听觉可达到的范围约等于十个八度音[⊖]。

声的波长 λ 和频率 f 之间有如下的关系:

$$\lambda = c/f \quad (1-1)$$

式中 c ——声速,在空气中声速为 340 米/秒,在钢中声速为 5000 米/秒,在水中声速为 1450 米/秒。

图 1-1 所示为在空气、钢和水三种介质中不同频率时声的波长。

传播着的声波可以用声强来描述。正弦波的声强为:

$$I = p^2 / (2\rho c) \text{ 瓦/厘米}^2 \quad (1-2)$$

式中 p ——交变声压的幅值 (达因/厘米²)。

ρc 值称为介质的声阻系数。例如,在温度 20°C 时,空气

⊖ 或称十个倍频程

介质中声阻系数为 $41 \text{ 克/厘米}^2 \cdot \text{秒}^{\ominus}$ ，钢介质中声阻系数为 $4.8 \times 10^6 \text{ 克/厘米}^2 \cdot \text{秒}$ ，水介质中声阻系数为 $1.5 \times 10^5 \text{ 克/厘米}^2 \cdot \text{秒}$ 。每一种频率的声音应该具有足够的强度时才能够听得到。按照费勒切尔(Флетчер)和曼松(Мансон)的意见，在图 1-2 中最下面的一根曲线相当于所有频率时听觉的阈限；频率在 1000 赫兹时，要有声音的感觉所需最小声压为 2×10^{-4} 达因/厘米²；最上面的一根曲线相当于产生痛觉的声强，其声压大约等于 200 达因/厘米²。图中上下曲线之间所包括的面积称为听觉区域。

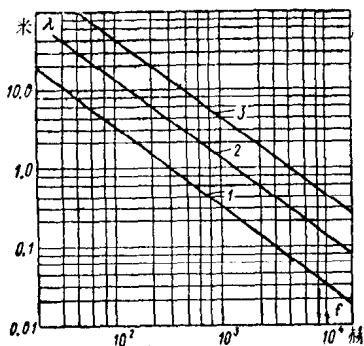


图 1-1

1—空气中声的波长 2—水中声的
波长 3—钢中声的波长

类似等响度的听觉阈限曲线，也可画出由比较实验所得的其他等响度曲线。由图 1-2 可见，人的耳朵对低声调的敏感不如对高声调来得敏感。

韦伯-费希纳(Вебер-Фехнер)定律是绘制响度级 L 标度的基础，根据该定律人的耳朵对响度级的感觉与声强 I 的对数成正比。

§ 1-2 噪声和振动的测量单位

声音响度级的单位是昉。通常用如下方式确定响度级的标度，即在频率 1000 赫兹时阈限声压 2×10^{-4} 达因/厘米² 或阈限声强 10^{-16} 瓦/厘米² 被认为是声音的基准响度级，则

[⊖] 原文用克力/厘米²·秒——译者注。

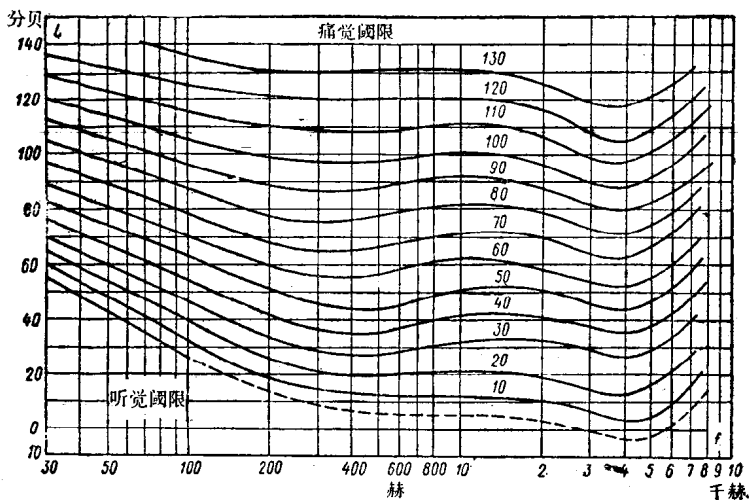


图1-2 等响度曲线 (根据费勒彻和曼松的意见)

$$L = 20 \lg \frac{p}{2 \times 10^{-4}} = 10 \lg \frac{I}{10^{-16}} \text{ 昉} \quad (1-3)$$

为了确定任何声音的响度级，都把它与频率 1000 赫兹的声音响度级作比较。图 1-2 所示为等响度曲线，曲线之间的间距为 10 昉。附录 1 中为各种噪声源的响度级。由图 1-2 可见，当响度级在 60 昉以上时，其等响度曲线差不多是平行的，若几个声源的声压等于 p_1 、 p_2 、 p_3 ……，而相应的声强等于 I_1 、 I_2 、 I_3 ……，这时几个声源的噪声响度级可以按下列公式求得：

$$L = 10 \lg \frac{p_1^2 + p_2^2 + p_3^2}{2 \times 10^{-4}} \text{ 昉} \quad (1-4)$$

或

$$L = 10 \lg \frac{I_1 + I_2 + I_3}{10^{-16}} \text{ 昉} \quad (1-5)$$

图 1-3 所示为一般情况下响度级相加的结果。

假如两个响度级相加，则总是响度级较大的一个声源被特别注意，在两声源响度相同的条件下，它们的总响度级增加3分。几个响度级相加可逐个地进行。

在测量噪声的实践中是利用分贝作为客观的测量单位，而不考虑听觉的感受性。分贝标度也是在比较两个被测声压级或功率级的基础上作出的。只是在频率1000赫兹时，用分贝和分贝进行的测量才是吻合的；在其他频率时，对噪声响度级相同（单位为分贝）的两个噪声源，听觉的感受是不同的。

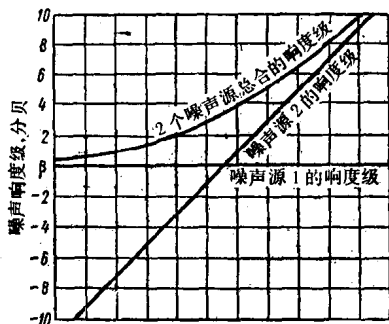


图1-3 响度级相加

在其他频率时，对噪声响度级相同（单位为分贝）的两个噪声源，听觉的感受是不同的。

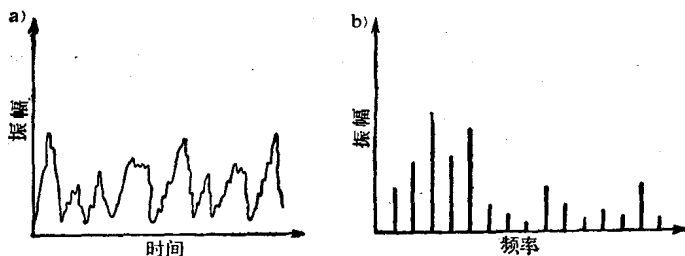


图 1-4

a) 复杂声音的波形图 b) 复杂声音的频谱图

在实际中，大多数情况下都必须与复杂的声音打交道，而复杂的声音乃是许多不同强度和频率的简单振动的混集体。图1-4 a所示为复杂声音的波形图；图1-4 b所示为其频谱图。在声学中通常用频谱图纪录振动的过程。

例 1 在电机车间中装有噪声响度级分别为 85 分贝、85 分贝和 82 分贝的三部电机，求电机车间中噪声总的响度级。

解答：两个 85 分贝的声源相加，按图 1-3 可求得修正值 3 分贝，即两者总的响度级为 88 分贝，88 分贝和 82 分贝之和的修正值为 1 分贝，因此电机车间中噪声总的响度级为 89 分贝。

用频谱图将各个单独分量相加的方法来确定复杂声音总的响度级，其结果与上述例题所得相近。

在频率为 f (赫兹) 时，振动的压强 p (达因/厘米²) 和振动表面的振动速度 \dot{y} (厘米/秒) 之间的关系如下：

$$p = \rho c \dot{y} \quad (1-6)$$

由公式 (1-2) 可知声强为

$$I = \frac{1}{2} \rho \dot{y}^2 \times 10^{-7} \text{瓦/厘米}^2 \quad (1-7)$$

这里振动速度 \dot{y} 采用有效值，即正弦振动的最大振幅为 $\sqrt{2} \dot{y}$ 。

由于零度级时的振动压强为 2×10^{-4} 达因/厘米²，则根据公式 (1-6) 可得相应零度级时的振动速度等于 5×10^{-6} 厘米/秒。用类似的方法可以确定位移 y 和加速度 \ddot{y} 的阈值。当按位移、速度或加速度研究振动时，其强度类似公式 (1-3) 采用相对单位来评定，即用分贝标度。

角频率为 ω 的振动点，其谐振位移 y 、速度 \dot{y} 和加速度 \ddot{y} 的幅值之间有如下的关系：

$$\left. \begin{array}{l} \text{对速度} \quad \dot{y} = \omega y \\ \text{对加速度} \quad \ddot{y} = \omega^2 y \end{array} \right\} \quad (1-8)$$

在测量声振动的振动位移级和加速度级时，普遍这样的选择其零度级，即频率为 1000 赫兹时，速度、加速度和位移

用分贝标度的振动级的数值相同。这时声振动的位移 y 和加速度 \dot{y} 的有效值与速度的零度级相符，应相应地等于：

$$\dot{y}_0 = \omega \dot{y} = 2\pi \times 1000 \times 5 \times 10^{-8} = 3 \times 10^{-2} \text{ 厘米/秒}^2$$

$$y_0 = \frac{\dot{y}}{\omega} = \frac{5 \times 10^{-8}}{2\pi \times 1000} = 8 \times 10^{-10} \text{ 厘米}$$

假如 L_y 是频率为 f 赫兹的速度级，那么其加速度级 $L_{\dot{y}}$ 和位移级 L_y 是

$$L_{\dot{y}} = L_y + 20 \lg \frac{f}{1000}$$

$$L_y = L_{\dot{y}} - 20 \lg \frac{f}{1000} \quad (1-9)$$

例 2 当频率为 200 赫兹和 2000 赫兹时，用分贝测得的声振动的速度级和加速度级之间的差值是多少？

解答：为了求得加速度级，应估计谐振速度级所加的修正值，按公式 (1-9) 可求修正值为

$$L_{\dot{y}} - L_y = 20 \lg \frac{f}{1000}$$

对于 200 赫兹频率

$$L_{\dot{y}} - L_y = 20 \lg 0.2 = -14 \text{ 分贝}$$

对于 2000 赫兹频率

$$L_{\dot{y}} - L_y = 20 \lg 2 = 6 \text{ 分贝}$$

§ 1-3 噪声的辐射

当研究电机产生的噪声时，通常碰到两种噪声，它们之间的差别在于产生的性质不同。

1. 电机机壳表面的振动以及机壳与基础之间联接零件的振动所产生的噪声。

2. 由于使电机内部通风的空气运动所产生的噪声。

通常在封闭式电机中大多是第一种形式的噪声。水冷却电机和封闭自通风冷却电机属于封闭式电机。在这种情况下声的形成不仅与机壳振动的强度有关，而且与声源大小和辐射波长之间的关系有关，以及与辐射表面的波节线分布情况有关。如果波长大于噪声源的尺寸，那么随着辐射体尺寸的增加，辐射的声强也增大。因此在小尺寸电机的情况下，辐射高声频的条件比辐射低声频的条件为佳。

假使波长小于机壳尺寸，那么辐射的声强与频率的关系不大。例如，大型汽轮发电机能良好地辐射低频和高频声波。

振动表面各点的振动幅值和相位都相同时，这种振动表面是零阶辐射器。振动的球是一个理想的零阶辐射器。具有振动波节和波幅的表面是一个高阶辐射器。电机机壳既属于零阶辐射振动源，也属于高阶辐射振动源。在振幅相等时高阶辐射器辐射的能量比零阶辐射器辐射的能量小。这是由于具有不同振动相位的两个相邻部分的表面上产生的声压，能够减弱离机壳某一距离点上的声音。辐射波的波长比电机的尺寸愈大，这种声能的消弱表现得愈明显。因此在封闭式电机中，其他条件相同时，高阶振动产生的声强比零阶和低阶振动产生的声强小。

除电机振动表面辐射的噪声外，还有电机联接的金属结构发出的噪声，首先是金属底座和焊接结构的噪声属于此类。

可借助于装在振动电机底座下面的减震器（缓冲器）来减弱上述元件产生的噪声。

第二种形式的噪声主要发生在开路循环通风的电机中，此种噪声取决于风扇和转子旋转引起的空气湍流运动。在第

七章中较为详细地介绍了这种噪声。

§ 1-4 噪声的传播

在开阔的空气中声波由声源均匀地向各方传播。假使声源与波长比起来很小，那么距离声源 r 处的声压减小为 $\frac{1}{r}$ ，而声强减小为 $\frac{1}{r^2}$ 。若已知距离声源 1 米处的声强，则从原来的声强级中减去数值 $10\lg \frac{1}{r^2}$ 或 $20\lg \frac{1}{r}$ 之后就可求得距离声源 r 处的声强。因而，当离声源的距离加倍时，它的级减小 6 分贝。这个规律对不超过 1000 赫兹的频率有效。假使声的传播在各个方向不一样，那么声的传播与方向有关。当电机尺寸比波长小时方向性的特点就表现出来，因此在大型电机中高频声波的方向性特点表现得特别明显。

在封闭的工作室中，除距离影响声强的减小外，墙壁、天花板、地板和室中的设备也对声强的减小产生影响。在工作室的范围内声响损失越大，声强的减小越明显。反射声的频率特性和声强既与表面的吸收性质有关，也与工作室的尺寸有关。因此在工作室中，墙壁和天花板涂以吸声材料是降低噪声的最有效的方法之一。工作室内部的隔声条件与波长对隔板长度大小之比有关，隔板越长，波长越短效果越好。隔板表面的尺寸至少应大于波长的两倍；此外，隔板一边的声源和另一边操作的地方离隔板的距离都应当不小于一个波的波长。假使声波入射到两个媒质的边界上，那么声的一部分被另一种媒质吸收，一部分被反射，吸收声强与入射声强之比称为吸收系数；反射声强与入射声强之比称为反射系数。在中等频率时固体的吸收系数最大可达到 3%。

实际上经常出现这样的情况：全封闭电机（如水冷却电机）由于机座上有小孔（如轴伸或轴密封处的小孔）会有很高的噪声级，这说明声波容易通过小孔。在这种情况下，机座隔声的减小程度 ΔL 可以按下式计算：

$$\Delta L = 10 \lg \left[1 + \frac{kf}{F} \times 10^{L/10} \right] \text{分贝} \quad (1-10)$$

式中 L ——电机机座的隔声能力（分贝）；

F ——机座表面积；

f ——孔的面积；

k ——系数，圆形孔和正方形孔等于 1，长与宽的比等于 1000 的长形细孔达到 10。

此公式对横截面很大的孔不适用。

例 3 在水冷却电机的机座中供馈电线用的矩形孔面积为 0.02 米²，当 $k = 3$ 和机座隔声能力 $L = 30$ 分贝时，由于孔的原因机座隔声降低为：

$$\Delta L = 10 \lg \left[1 + \frac{3 \times 0.02}{10} 10^{30/10} \right] = 8.5 \text{分贝}$$

因此把电机机座上的孔密封起来，能很显著地降低封闭式电机的噪声。

§ 1-5 噪声对人体的有害影响

噪声对人的作用有两种影响：

1. 对整个神经系统有坏的影响；
2. 损坏听觉器官。

大量的观察说明，在较高的噪声响度级的情况下工作，特别是休息，会引起血压增高和容易激动的性格，整个身体上的感觉恶化，劳动能力特别是脑力劳动能力降低。美国的

标准 Z 24-X 2 从丧失听觉的观点来说明噪声长期作用的危险程度如下:

——在频率 300~600 赫兹区间, 80 分贝响度级的噪声若每天连续作用 8 小时, 实际上不会引起对 1000~2000 赫兹言语频率范围内的听觉丧失;

——在频率 300~600 赫兹区间, 88 至 95 分贝的噪声响度级经过 30 年会引起对 1000 赫兹的听觉丧失 8 至 13 分贝, 对 2000 赫兹的听觉丧失 13.5 至 19 分贝;

——在频率 1200~2400 赫兹区间, 73 分贝的噪声响度级经过 7 年会引起对 4000 赫兹的听觉丧失 5 分贝, 而 83 至 88 分贝的响度级经过 30 年会引起对 4000 赫兹的听觉丧失 27 至 33 分贝。

目前苏联在工作室和工作场所采用的允许噪声响度级如下:

强度的程度	正常的	较高的	高的	最高的
噪声引起的响度级 (分):				
低频	<70	71~80	81~110	>116
中频	<65	66~75	76~105	>105 [⊖]
高频	<55	55~65	66~100	>100 [⊖]

⊖ 原书漏>——译者注。

第二章 电机的噪声源和振动源

§ 2-1 噪声和振动源的简述

1. 电磁力：电磁力作用在定子和转子之间的气隙中，其力波在气隙中是旋转的或是脉动的，力的大小与电磁负荷、电机有效部分的某些结构和计算参数有关。由电磁力产生的振动大小与作为振荡系统的定子特性有很大的关系。大多数类型的电机磁振动都在 100~4000 赫兹频率范围内。

在设计任务中通常需要选择电机的计算和结构参数，以保证最大程度的削弱电磁力和传给电机机座的振动。

2. 滚动轴承：滚动轴承产生的噪声和振动的强度与下面的因素有关：

——和轴承本身的制造质量有关：这儿所指的制造质量是：轴承在电机以外的专门试验装置上旋转时，能保证轴承外圈的振动最小；

——和轴承配合面的加工精度有关，也和固定轴承位置的轴承盖相对电机机座的锁紧面加工精度有关，这些配合面的加工工序应保证各轴承部件最大的同心度，以及当轴承装在轴上时滚动槽的几何形状不畸变；

——和轴承盖的振动声响性质有关，轴承盖的结构形式不良时，能强烈地辐射轴承产生的噪声。

3. 空气动力学的力：这个噪声源的强度与从空气动力学和声学的观点对电机的风扇和通风道的设计好坏有关。这儿所指的也是合理选择冷却空气流经的风道中各个元件的结