

低 噪 声 电 动 机

〔英〕S. J. 扬 著

吕砚山 李诵雪 陈逢阳 译

内 容 简 介

本书是对著者多年来所进行的专题研究的科学总结,对电动机产生各种噪声的原因进行了系统的分析,给出了许多新的实验结果,并提出了降低这些噪声的有力措施。

本书可供高等院校有关专业的师生和从事电机工程技术的科技人员参考。

S. J. Yang

LOW-NOISE ELECTRICAL MOTORS

Clarendon Press. Oxford, 1981

低 噪 声 电 动 机

[英] S. J. 扬 著

吕砚山 李诵雪 陈逢阳 译

责任编辑 范铁夫 杨家福

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1985年8月第 一 版 开本:787×1092 1/32

1985年8月第一次印刷 印张:3 3/4

印数:0001—8,500 字数:81,000

统一书号:15031·664

本社书号:4394·15—5

定价: 0.90 元

目 录

译者的话

序

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 对低噪声电动机的需求	2
1.3 本书的目的和内容	4
第二章 电动机噪声的测量	5
2.1 声压级	5
2.2 平均声压级和电动机噪声的测量	5
2.3 声功率级	8
2.4 以 A 计权的声级和声功率级	9
2.5 电动机噪声测量结果的精确度	13
第三章 磁激发力	17
3.1 引言	17
3.2 磁导波与磁动势波	17
3.3 电磁力波	22
3.4 在两极电机中单极磁通波的作用	29
3.5 谐波电压/电流的效应	34
第四章 定子的机械状况	41
4.1 定子径向振动形式	41
4.2 定子的固有频率	43
4.3 阻尼特性和定子偏斜	50
第五章 磁力引起的声辐射	56
5.1 引言	56

5.2	电机周围的声压	56
5.3	质点速度	60
5.4	声功率的计算	68
第六章	磁噪声的控制	71
6.1	增大气隙	71
6.2	降低脉动噪声	73
6.3	斜槽	76
6.4	定子绕组中的并联支路	77
6.5	降低电机表面的动态振动	83
6.6	降低声辐射效率	85
第七章	抑制机械噪声	89
7.1	电动机轴承噪声的特性	89
7.2	电动机轴承噪声的降低	92
7.3	电刷-换向器噪声的特性	94
7.4	电刷-换向器噪声的降低	96
7.5	转子不平衡噪声的特性	98
7.6	转子不平衡噪声的降低	98
第八章	控制空气动力噪声	102
8.1	控制由固定肋条引起的噪声	102
8.2	抑制风道汽笛噪声和采用封闭罩	103
8.3	空气入口和出口的噪声控制	106
8.4	冷却风扇噪声的控制	106

第一章 绪 论

1.1 引 言

在英国标准协会编制的《声学术语汇编》(1955)中,噪声被定义为接受者所不希望有的声音。

噪声能干扰谈话和影响我们的思考能力,使人们难以入眠,使人感到疲劳。长时间的强噪声会损坏听力,并使人十分痛苦、甚至晕倒或神经失常。虽然人们作了很大努力,试图估计噪声对人在生理上和心理上的影响,但是关于这些方面的知识我们了解得还不充分,不过已经提出了一些十分令人满意的方法,用以确定稳态噪声的影响。

每个人的生活,在一定程度上,是与使用各种机器密切相关的。机器既能帮助我们自然资源中获取更多有用的东西,又能使人们的生活更舒适、工作更有效率,但是,它们常常产生令人厌恶的噪声。因此,我们的周围环境就变得愈来愈嘈杂了。为了保证人们有一个适当的生活环境和工作环境,各国都制订了一些法规来限制噪声污染。例如美国劳动标准局1969年5月在Walsh-Healey条例中加了一条有关工业噪声暴露的安全法规。该法规中所允许的噪声暴露列于表1.1。

在英国,卫生和安全工作条律(1974)给予工人权利,他们有权采取措施来保证他们在工作时的卫生和安全。在八小时内,持续的噪声级不得超过90 dBA。污染控制条律(1974)给了地方当局更广泛的权力,用以限制那一地区的噪声危害。为了限制这种危害,其他许多国家也都制订了类似的法律。

8510615

• 1 •

表 1.1 允许的噪声暴露

每天最长时间 (h)	声级 (dBA)
8.0	90
6.0	92
4.0	95
3.0	97
2.0	100
1.5	102
1.0	105
0.5	110
0.25 或更短	115 最大

因而,低噪声机器的需求日益增长,其中也包括对低噪声电动机的需求。

1.2 对低噪声电动机的需求

目前,工程师们需要更多的有关电动机噪声问题的资料 and 知识。首先,这是由于越来越多的电动机进入了办公室和家庭,而这些地方又特别需要安静。其次,特别是由于竞争,现代设计越来越趋向于采用每单位输出功率的重量更轻的机器,因而也就增加了电动机的电、磁负荷。这就导致需要相对薄的机座、较高的磁通密度,因而出现磁饱和并需要加强冷却。所有这些都导致出现严重的噪声和振动问题。Sutton (1968) 指出,对中型的电动机存在一种持续的使噪声增强的趋向。在一个固定点,由同一家工厂生产的用途完全相同的三台 30 kW 的全封闭风冷式电动机所产生的以 500 Hz 为中心的最大倍频带声压级,从 1957 年的 71 dB 增加到 1967 年的 87 dB。如果设计阶段有更多的噪声方面的知识可以利用,那么,设计过程中的“声学价值”是可以减少的。

表 1.2 电机噪声的国际标准和一些国家的国家标准

国家	标准代号	标准名称
澳大利亚	AS 1081-1975	运行中的电机发出的空气噪声的测量
保加利亚	BDS 6011-66	运行中的电机发出的噪声的测量
捷克斯洛伐克	CSN 350000	电机发出的噪声的测量
	CSN 350019	电机专门测试方法, III, 噪声测量
	CSN 361005	国产电动机驱动的机器的噪声测量
法 国	NFS 31-001 1960	测定电动旋转设备噪声试验规范
	TGL 50-29034	运转电机噪声测量规范
德意志民主 共和国	DIN 45632	机械噪声测量试行标准, 电气部分
德意志联邦 共和国		
匈 牙 利	LGSZ 40.0650-69	运行中电机声压级的确定
印 度	IS: 6098-1971	运行中的电机所发出的空气噪声的 测量方法
日 本	JEM 1020-1965	感应式电动机的测试, 4.2 部分 ——噪声测量
波 兰	PN-72	运行中的电机
	E-04257	噪声的声学参数的确定
罗马尼亚	STAS 7301-65	运行中的电机所发出的噪声的测量
英 国	BS 4999:	运行中电机的一般要求, 51 部分
	51 部分: 1973	——噪声级
美 国	IEEE Std 85-1973	运行中电机的空气噪声测量的测试 程序
苏 联	GOST 11929- 66	运行中的电机和变压器所发出的噪 声的测量
IEC ¹⁾	IEC 34-9 (1972)	运行中的电机, 9 部分——噪声的限 制
ISO ²⁾	R 1680—1970	运行中的电机发出的空气噪声的测 试规范

1) IEC——国际电工学会。

2) ISO——国际标准化组织。

为了适应不断增加的电动机安静运行的要求, 许多国家都已制定了有关电机(即电动机和发电机)噪声测量和/或噪声限制的国家标准。表 1.2 列出了一些国家标准和国际标准。

1.3 本书的目的和内容

本书的目的是介绍电动机产生噪声的基本原理，并提供能减少电动机所发出的噪声的方法以及经验资料。

第二章简要介绍了在电动机噪声测量中所使用的基本学术语和噪声测量的基本方法。

电动机的电磁噪声，主要是由于在气隙中磁通密度波所产生的径向力造成的。这些径向力使电动机振动，并向周围发出噪声。为了认识磁噪声产生的机理，需要研究：(a) 径向力的特性，(b) 电动机结构的机械性能，以及 (c) 噪声辐射的特性。这些内容将分别在第三、四、五章中讨论。

为了减少磁噪声，可以采取各种措施，如降低励磁力，减少电动机的振动程度，以及改变辐射特性。以上各种方法将在第六章中叙述。

机械噪声即由轴承、电刷-换向器及转子不平衡引起的电动机噪声的特性，将和减少噪声的措施一起放在第七章讨论。

随着电动机冷却要求的不断增加，由空气动力引起的电动机噪声有时成为噪声的主要部分，特别是对于大型电动机。抑制电动机的空气动力噪声的各种实用方法将在第八章中介绍。

参 考 文 献

- British Standards Institution (1955). *Glossary of acoustic terms*. BS 661.
Control of Pollution Act (1974). HMSO, London.
Health and Safety at Work Act (1974). HMSO, London.
SUTTON, P. (1968). Design of a noise specification for process plant.
J. Sound Vib., 8, 33—43.

第二章 电动机噪声的测量

在这一章里,我们将引入一些基本的声学术语,在详细说明电动机噪声的发生和电动机噪声测量的基本方法时,将用到这些术语。

2.1 声 压 级

为了描述声音的强弱,而使用声压级这一声学名词早已成为惯例。用分贝(dB)为单位的声压级的定义为

$$L_p = 10 \log_{10} \frac{p^2}{p_{\text{ref}}^2} \quad (2.1)$$

式中 p 为噪声场中一给定点上声压的均方根值 (N/m^2), 而 p_{ref} 为基准声压,其值为 $2 \times 10^{-5} \text{N/m}^2$ 。数值为 $2 \times 10^{-5} \text{N/m}^2$ 的基准声压 p_{ref} , 接近于频率为 1000 Hz 时一般人能听见的最低声压均方根值。

2.2 平均声压级和电动机噪声的测量

电动机周围的声压级不仅随离电动机的距离而变化,而且还随测量点的位置不同而变化 (Ellison, Moore 及 Yang, 1969) (见图 2.1)。所以,在电动机周围任何一个单一位置上所测得的声压级值,对于描述该电动机噪声辐射是没有意义的。必须在围绕该电动机的一个假想面上的许多点测量出声压级值,并算出其平均声压级。然后,我们就能通过引用围绕

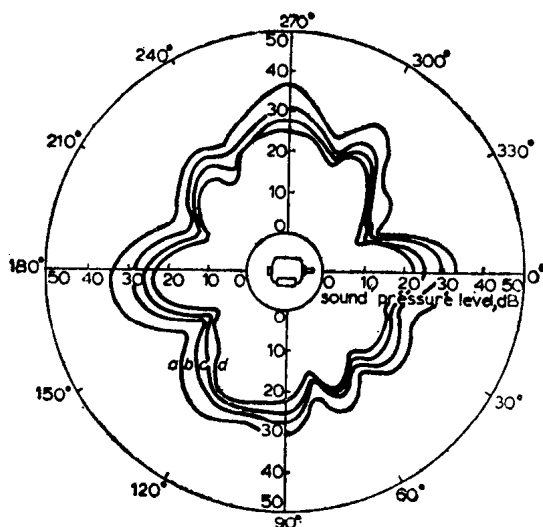


图 2.1 一台电动机发出的纯音（正弦波音），其声压级沿四条同心环状路径的变化情况（Ellison 等，1969）

该电动机的被测面上的平均声压级来描述这个电动机的噪声辐射情况。以分贝为单位的平均声压级，被定义为

$$\bar{L}_p = 10 \log_{10} \frac{p_{av}^2}{p_{ref}^2} \quad (2.2)$$

式中， p_{av} 为测量面上的平均声压，而 p_{ref} 与前述相同。

根据 (2.1) 和 (2.2) 式，以分贝为单位的平均声压级可以表示为

$$\bar{L}_p = 10 \log_{10} \left\{ \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \text{anti log}_{10} \frac{L_{p,i}}{10} \right) \right\} \quad (2.3)$$

式中 $L_{p,i}$ 为第 i 个测量点上的声压， n 是测量点的总数。

从一台指定的电动机得到的平均声压级取决于测量面的形状和配置。对于小型电动机，最方便的测量面可以取一个

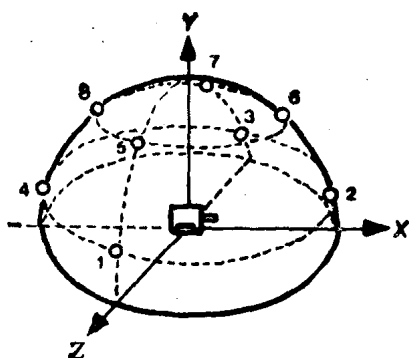


图 2.2 围绕小型电动机的假想半球面上八个测量点的分布
示例, $r =$ 半球的半径 $= 1 \text{ m}$

点的位置	$X \text{ (m)}$	$Y \text{ (m)}$	$Z \text{ (m)}$
1	0	0.25	0.97
2	0.97	0.25	0
3	0	0.25	-0.97
4	-0.97	0.25	0
5	0	0.78	0.63
6	0.63	0.78	0
7	0	0.78	-0.63
8	-0.63	0.78	0

半径为 1 m 或 0.5 m 的半球面, 所有的测量点应该均匀地分布在整個半球面上(见图 2.2)。对于中型和大型电动机, 测量面可以取离电动机表面 1 m 处的几个关键点上。图 2.3 所指出的是一个大型电动机测量点的实例。

在自由的声音场中(即在无回声的房子里, 声音的反射可以忽略), 从围绕一小型电动机而其半径为 0.5 m 的半球面上所获得的平均声压级, 比从围绕同一电动机半径为 1 m 的半球面上所获得的平均声压级大 6 dB 。所以, 平均声压级的值与测量面的形状和配置一起引用是极为重要的。当我们想要

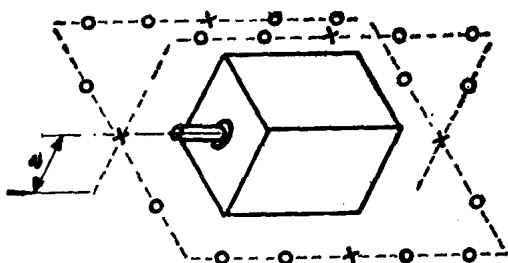


图 2.3 大型电动机噪声测量点的分布示例(见 BS 4999 1973)

- h 为轴高;
 $\times$ 为关键测量点(离电动机表面 1 m);
 $\circ$ 为其他测量点

比较两台电动机的噪声辐射情况时,我们应当将在同一个测量面上所得的平均声压级值进行比较。为了避免既需引用平均声压级,又需要引用测量面的形状和配置,我们可以应用另一个声学名词,即声功率级。

2.3 声 功 率 级

以 dB 为单位的声功率级被定义为

$$L_w = 10 \log_{10} \frac{P}{P_{ref}} \quad (2.4)$$

式中 P 为由声源发出的以瓦 (W) 为单位的声功率,而 P_{ref} 为以瓦为单位的基准声功率,其值等于 10^{-12} W。

声功率级 L_w 和在一个给定测量面 S 上的平均声压级 $\bar{L}_p$ 之间的关系由下式 (Ellison 等, 1969) 给出:

$$L_w = \bar{L}_p + 10 \log_{10} S \quad (2.5)$$

式中 S 为测量面的总面积 (m^2), $\bar{L}_p$ 为由式 (2.3) 确定的平均声压级。

必须强调指出,在自由声音场中,对于在给定条件下运行的某一电动机,不管其测量面的配置如何,其声功率级总是一个唯一的值。上面已经讲到,从半径为 0.5 m 的半球面所得到的平均声压级比从半径为 1 m 的半球面所得到的平均声压级大 6 dB。然而 $10 \log_{10} S$ 的数值在 0.5 m 表面时比半径为 1 m 表面时小 6 dB,根据式 (2.5),从两个不同的测量面所得到的声功率级却是相同的。所以,我们可以在不考虑测量面的形状和配置的情况下,直接比较两台电动机的声功率级。

2.4 以 A 计权的声级和声功率级

人的耳朵能听到频率为 20 Hz 至 20 kHz 的声波,但人耳听觉的敏感性是随频率和声压级而变化的。图 2.4 说明一组年龄从 18 岁至 25 岁的正常人耳朵听觉敏感性的试验结果。图 2.4 所示的曲线称为“等响度线”,因为“正常”人把在一条等响度线上具有各种声压级值的纯音(正弦波音)认为具有相

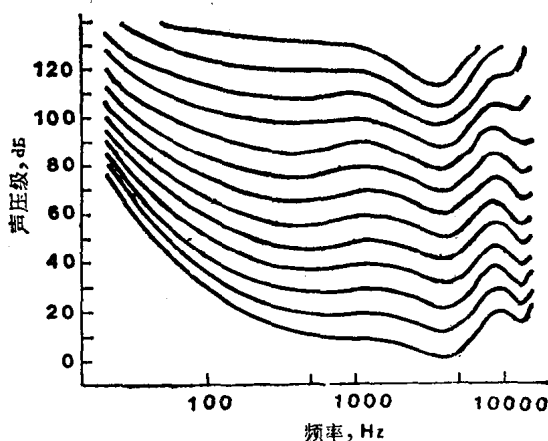


图 2.4 纯音(正弦波音)等响度曲线(听者是年龄为 18 岁至 25 岁的正常人)

等响度。例如，声压级为 20 dB，频率为 1000 Hz 的纯音（正弦波音）被“正常”人认为与在同一条等响度线上声压级为 36 dB，频率为 100 Hz 的纯音（正弦波音）具有同样响度。换言之，对低频的声音，人的听觉减弱，并且人的听觉对不同的频率具有不同的计权。为了模拟人们听觉的频率响应，国际上已把一些频率的计权标准化。最普通和最为人们所熟悉的计权是 A 计权、B 计权和 C 计权三种，它们的频率响应如图 2.5 所示。所有工业用噪声测量表都具有 A 计权，这是用得最

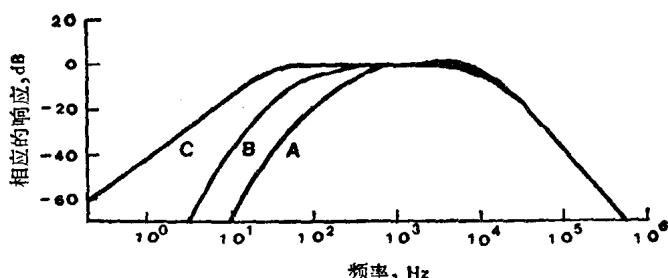


图 2.5 A、B 及 C 计权的频率响应
A 为 A 计权； B 为 B 计权； C 为 C 计权；

广泛的计权。电动机噪声通常是由各种频率的噪声成分构成的。当我们用噪声计测量电动机噪声时，不同频率的声压级首先被 A 计权网络计权，它们的频率响应在允许的误差范围之内，如图 2.6 所示（IEC 1961），然后把它们结合起来产生一个 A 计权总声压级的读数。这个总声压级被定义为 A 计权的声级，有时也称它为被 A 计权的声级。其单位是 dBA 或 dB(A)。

不同频率的许多噪声成分的集合由下式给出：

$$p_{\text{tot}} = \left(\sum_{k=1}^m p_k^2 \right)^{1/2} \quad (2.6)$$

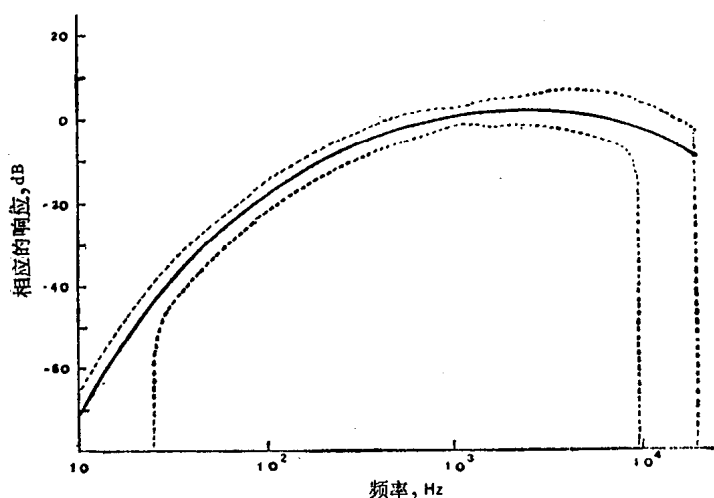


图 2.6 声级计所允许的 A 计权误差(见 IEC 1961)

式中 p_k 为第 k 个噪声成分的声压均方根值, m 为主要噪声成分。

以 A 计权的声级可表示为

$$\begin{aligned}
 L_A &= 10 \log_{10} \frac{p_{\text{tot}, A}^2}{p_{\text{ref}}^2} \\
 &= 10 \log_{10} \sum_{k=1}^m 10^{(L_{p, k, A}/10)} \quad (2.7)
 \end{aligned}$$

上式中的 $p_{\text{tot}, A}$ 是 A 计权的总声压, 而 $L_{p, k, A}$ 为第 k 个噪声成分的 A 计权声压级。

A 计权的声级被认为是最方便的噪声等级, 所以在许多国家的标准和国际标准中, 它被用来说明电动机噪声的发生情况。BS 4999(1973) 用 A 计权的声功率级说明运行中电机的噪声的上限。

以 A 计权的声功率级用下式表示:

表 2.1 倍频带的中心频率和频带宽度

倍频带 中心频率 (Hz)	频 带 宽 度	
	下限截止频率 (Hz)	上限截止频率 (Hz)
31.5	22	44
63	44	88
125	88	177
250	177	355
500	355	710
1000	710	1420
2000	1420	2840
4000	2840	5680
8000	5680	11360

$$L_{w \cdot A} = \bar{L}_A + 10 \log_{10} S \quad (2.8)$$

式中 S 为噪声测量面的总面积 (m^2), $\bar{L}_A$ 为 A 计权的平均声级, 可以由下面的式子来确定:

$$\bar{L}_A = 10 \log_{10} \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{anti log}_{10} \frac{L_{A,i}}{10} \right\} \quad (2.9)$$

式中 $L_{A,i}$ 是在第 i 个测量点所得到的 A 计权声级, n 为测量点的总数。

虽然用 A 计权的声级和声功率级在描述噪声时是非常方便的量, 然而, 它们却不能提供详细的噪声特性。除了能测出以 A 计权的声级的噪声表以外, 工业上可供使用的有许多其他类型的噪声测量表能测量不连续标准化频带的声压级或窄频带声压级。窄频带声压级实际上是单一频率的声压级, 它们在噪声源鉴别中是非常有用的。最普通的不连续频带是倍频带, 表 2.1 列出了它们的中心频率和频带宽度。从倍频带噪声测量装置上读出的读数叫做倍频带声压级。中心频率为

31.5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 和 8000 Hz 的倍频带平均声压级或倍频带声功率级被用于描述电动机的噪声辐射情况。

2.5 电动机噪声测量结果的精确度

必须着重指出，只有在满足下列条件时，分别由式 (2.3) 和 (2.9) 确定的以 A 计权的平均声压级和平均声级才是精确的噪声测量结果。这些条件是：

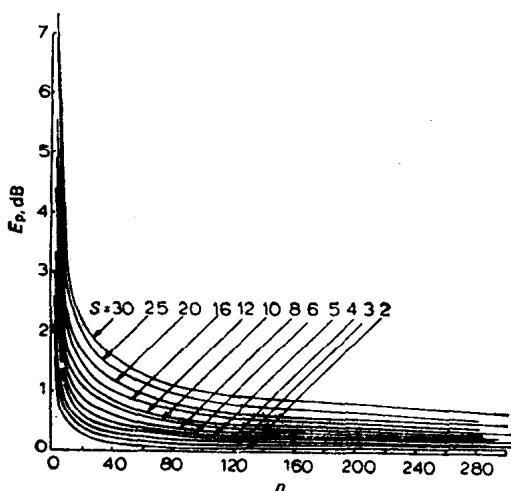


图 2.7 平均声压级的误差随测量点数目及声压级范围的变化情况 (Ellison 等, 1969)

n 为测量点数目； S 为声压级范围，即对于 n 个测量点，最高声压级与最低声压级之差； E_p 为真实平均声压级为 n 个测量点的平均声压级

- (a) 噪声测量是在自由场中即在无回声的房间内进行的；
- (b) 噪声测量设备经过正确校正；以及