

Terfenol 棒径向开缝数目的计算

贺西平 李 斌 孙进才

(西北工业大学航海工程学院 西安 710072)

1997 年 3 月 24 日收到

摘要 为减小涡流损耗, 提高工作效率, 文献 [8] 提出了一种既经济又有效的对 Terfenol 棒进行切割的新方法。本文给出了一种简便的计算方法, 用以计算满足极限工作频率要求的切割份数, 并附以算例, 与实际相符合。

关键词 Terfenol 棒, 涡流损耗, 极限工作频率

Calculation of the number of radial slots cut into the rare-earth magnetostrictive Terfenol bar

He Xiping Libin Sun Jincai

(College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract To control the eddy current loss so as to enhance efficiency, an economic and effective method for slotting a Terfenol rod was pointed out in literature [8]. We put forward a simple method to calculate the number of slots needed to meet the demands on the resonance frequency. An illustrating example offers results consistent with the discussion given in [8].

Key words Terfenol bar, Eddy current losses, Limit working frequency

1 问题的提出

自从稀土超磁致伸缩材料发现以来^[1,2], 由于其具有磁致伸缩系数大、能量密度高、声速低等卓越的特性, 在机器人、减震器、海洋断层探测等都有着积极的应用^[3-5], 尤其给低频水声换能器的设计带来了生机。与压电陶瓷不同的是, 稀土超磁致伸缩材料既导电又导磁, 所以, 在具体设计时, 不得不考虑它的极限工作频率—即趋肤深度与其最大的线度(指与交变电场相垂直的方向)相等时所对应的交变电场的频率, 以减小涡流损耗。有涡流损耗时, 非应用声学

磁性物质对应的极限工作频率的计算公式是:^[6]

$$f_c = \frac{1}{\pi \delta_s^2 \mu \mu_0 \sigma} \quad (1)$$

式中 δ_s 为趋肤深度, μ_0 为真空导磁率, μ 、 σ 分别为 Terfenol 棒的导磁系数和电导率。式中表明, 对某一非磁性物质, 其线度越大, 则所对应的极限工作频率越低。对某一半径为 δ_s 的 Terfenol 棒, 由上式可求它的极限工作频率。

实际工作中, Terfenol 棒的工作尺寸往往大于其极限工作频率所允许的尺寸。在这种状

态下, 将因涡流致热而降低驱动效率。解决这个问题 的办法是将材料沿平行于棒轴方向进行分片切割, 再用绝缘胶将片与片粘结起来。经这样处理的 Terfenol 棒, 极限工作频率可达十几甚至几十 kHz^[7]。稀土超磁致伸缩材料研制出来的都呈棒状形式, 且目前这种材料售价要比压电陶瓷贵 100 倍。如果分片切割, 一则因有较多的切缝, 将浪费部分原材料; 二则粘结后, 又要再加工磨成棒状, 还得损耗部分原材料, 三则这样进行加工的费用也是可与原材料的价格相比的。且不论在切割过程中, 因材料硬且脆, 有破碎的危险。文献 [8] 中提出了一种切割的办法。如图 1 所示。对半径为 R 的 Terfenol 棒, 中间留有半径为 r 的一实体, 余下部分沿径向均匀分切 n 道缝, 并将绝缘胶加压灌注入这些切缝中。这样既有效地避免了涡流损耗, 又最大程度地节省了材料和费用, 是一种有效而又经济的办法。那么, 怎样计算开缝切割后棒的极限工作频率呢? 文献 [8] 采用电磁有限元软件 Maxwell 来进行估算^[9]。我们认为这样计算量太大, 又不方便。本文提出一种简便计算方法, 并附以算例。

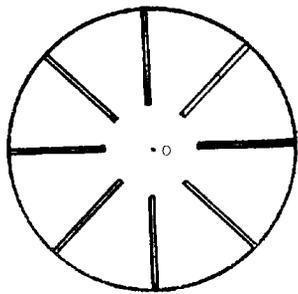


图 1 沿径向均匀切割 n 等份的 Terfenol 棒

2 计算方法

处于工作状态的 Terfenol 棒, 一般是在其轴向方向受有外加偏磁场, 这就决定了涡流轨迹是以轴为圆心的同心涡流圆。设以上述方法将 Terfenol 棒开缝切割成 n 等份, 取其中一份来分析, 图 2 为与轴相垂直方向 Terfenol 棒被

切割后的剖面图。AB, CD 为相邻两切缝。现考虑中间余留的以 O 为圆心的圆 (实际上是一实心圆柱体) 和由 AB, BC, CD, DA 围成的几何形体中的内接圆 (以 O' 为圆心, $O'E$ 为半径, 实际上是另一实心圆柱体), 以这两个圆半径较大者作为 δ_s , 代入上式 (1), 计算切割后棒的极限工作频率。

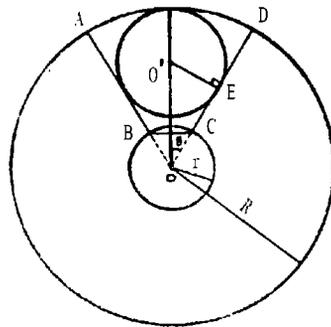


图 2 计算切割后 Terfenol 棒的极限工作频率

设 Terfenol 棒本身的半径为 R , 因是均匀开缝切割, 故:

$$\Theta = \frac{360^\circ}{2n} \quad (2)$$

在直角三角形 $OO'E$ 中,

$$\sin \Theta = \frac{O'E}{O'O} = \frac{R'}{R - R'} \quad (3)$$

从以上两式, 可算出 R' 。

若 $R > r$, 则令 $\delta_s = R'$

若 $R < r$, 则令 $\delta_s = r$ 。代入 (1) 式, 可求得切割后材料所对应的极限工作频率 f 。实际工作频率应低于极限工作频率。用上述方法, 亦可计算出满足一定的工作频率时, 棒所应开缝切割的最小数目 n 。

3 算例

这里列举文献 [8] 中的例子:

Terfenol 棒直径 $\Phi = 25.4\text{mm}$, 要求工作谐振频率为 1300Hz 。切缝长 $AB = 9.5\text{mm}$, $r = 3.2\text{mm}$ 。切缝宽 0.25mm (实际计算时, 其宽度很小, 可忽略)。材料的导磁率 $\mu = 4.5$, 电导

率 $\sigma=1.7\times 10^6$ mho/m。

当沿径向开缝均匀切割成 8 等份时, 由 (2) 式, $\Theta=360^\circ/2n=22.5^\circ$, 再由 (3) 式, 求得 $R'=3.52$ mm。

因为 $R'>r$, 令 $\delta_s=R'$, 代入 (1) 式, 求得

$$f = \frac{1}{\pi \delta_s^2 \mu \mu_0 \sigma} = 2.675 \text{kHz}$$

当沿径向开缝均匀切割成 6 等份时, 同理, $\Theta=30^\circ$, $\Rightarrow R'=4.23$ mm, 令 $\delta_s=R'$, $\Rightarrow f \approx 1.85$ Khz。

当沿径向开缝均匀切割成 4 等份时, $\Theta=45^\circ$, $\Rightarrow R'=5.26$ mm, 令 $\delta_s=R'$, $\Rightarrow f \approx 1.198$ kHz

文献 [8] 中最后以内径为 27mm, 外径为 38mm, 长为 5mm 的小螺线管 (以 2AWG 的铜线绕制而成), 置于该 Terfenol 棒的中部, 在偏磁场为零时, 测得其电感值与如此开缝切割数目之间关系的曲线。测量表明: 频率为 1kHz 时, 切割成 4 等份以上, 则电感值不再随切割份数的增多而变化; 而切割成 4 等份以下, 所测得的电感值随着切割数目的增大而增加。在满足工作谐振频率 1.3kHz 的前提下, 切割成 6 等份即可。也就是说, 在满足工作谐振率 1.3kHz 的前提下, 切割成 6 等份即可。这与上面的计算相符。如对直径为 25mm 的 Terfenol 棒不加切割时, 其最高工作频率约为 200Hz。

参 考 文 献

- 1 Clark A E, Belson H S .
Am.Inst.Phys.Cong.Proc.10,part1(1973), 749.
- 2 Clark A E. Ferromagnetic material, Edited
by E.P.Wohlfarth,Amsterdam New York: North-
Holland Publishing Company,vol.1, 1980, 5-31.
- 3 Fahlander M, Richardson M. New material
for conversion of electric energy to
mechanical motion,the 10th International
workshop on Rare-Earth Magnets and their
applications,Japan,1989, 289-302.
- 4 Nakano I, Tsuchiya T, Amitani Y, et al.
Giant magnetostrictive acoustic transducer
and its application to acoustic monitoring
of oceans,The International Symposium on Giant
Magnetostrictive Materials and Applications,
Japan.,1992, 77-82.
- 5 Greelaw W C, Hodges F P. Sonar transducer
design incorporates rare earth alloy,Defense
Systems Review,November,1984, 50-55.
- 6 赵凯华, 陈熙谋. 电磁学 (下册). 北京: 人民教育出版社,
1978 年, 17.
- 7 List Prices for Etrema Terfenol - D,ETREMA
PRODUCTS,INC.,1991, 4.
- 8 Purcell C J. Terfenol driver for the Barrel-Stave
Projector,Transducers for sonics and ultrasonics,
ed.by M.D.McCollum,B.F.Hamonic,B.F.Hamonic,
O.B.Wilson,Technomoc publishing co.Inc.,
Lancaster,PA, 1993, 161-169.
- 9 Ansoft Corporation,Four Station Square,
Commerce Court Bldg.,Suite 660,Pittsburgh,
PA15219,1991.Maxwell 2D Low Frequency Software.



(上接第 29 页)

弱成分。生理声信号的频率动态范围大, 位于高频的信号成分常常极其微弱, 给生理声信号的研究带来很大的困难。传统的分析方法如短时傅里叶变换和 AR 谱振, 其时频分辨率存在着不可调和的矛盾, 往往采取折中的方案。本方法可以同时提取生理声信号的低频大能量信号和极其微弱的高频信号, 为进一步认识生理信号的成分和信息结构提供了一种新的途径。

参 考 文 献

- 1 Charles K. C. An introduction to Wavelets. New
York, Academic Press, Inc. 1992.
- 2 Wickerhauser M V. Lecture on Wavelet Packet Al-
gorithms. Preprint ,August 15, 1991.
- 3 Coifman R R, Wickhauser M V.
IEEE Trans. on IT, 1991,**38**(2): 713-718
- 4 Mallat S, Zhong S. *IEEE Trans. on Pattern Analysis
and Machine Intelligence*,
1992,**14**: 710-732.
- 5 Mallat S. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Ma-
chine Intelligence*,
1989,**11**(7): 674-693.