

影响DB—3型记录笔头参数的因素分析

陆积顺

(广东省地震局)

摘要

本文从工作原理入手，逐步论述了DB—3型记录笔头各种参数的含义，影响笔头参数的诸种因素以及参数之间的关系等实用问题。

一、引言

DSL—3型三分向流动地震仪所用DB—3型笔头(以下简称笔头)出厂时都是密封的，不允许拆卸，所以一些台站的同志对其内部结构、原理不甚了解。本文就是要使台站同志对笔头有一个本质的了解。这对于仪器的使用保养、记录曲线的分析利用都有益处。对于生产工人来说，只有知道了各参数的内在联系，才能一步步有目的的调试出各项参数均达到指标的合格笔头。

DB—3型记录笔头是一种将电信号转换为笔绘可见记录的电—机转换机构，俗称笔马达。我们所使用的DJ系列地震仪马达也是一种电—机转换机构，但两者的性能要求是有一定的差别的。为了通过大家熟知的马达来了解笔头，表1从运动方式和供电频率两个方面说明两者的异同点。

表1 DB—3笔头部分性能要求比较表
DJ系列马达

Table 1 Comparison of performance need between DB-3 type writing point and DJ type motors

	电源频率 信号	运动方式及相应机构
DJ系列马达	电源频率单一	要求定向转动，安装定向机构。
DB—3型笔头	信号频率宽	以平衡位置为中心的机械振动，安装回零弹簧。
对笔头相应性能要求	为了较好地记录到一定范围震中距内的地震波，通频带要求1—25Hz。	选用一定弹性模量的回零弹簧，须兼顾灵敏度，通频带等性能要求。

与DSL—1A型单分向流动地震仪原所用笔头(DB—1型)相比，DB—3型笔头因其

结构上的不同（前者为动圈式，后者为动铁式）具有灵敏度高、线性度好、频谱宽、回零好等优点。

二、工作原理

请看图1，图中 A_1 、 A_2 所示的是两块硬磁性材料（俗称磁钢），充磁后形成恒定磁场，N、S极分布如图所示。图中 B_1 、 B_2 所示是软磁性材料，由铁镍合金片冲叠而成，在上面绕有一定线径、匝数的线圈（组成定子），两线圈并联后引出两条接线。当地震仪放大器末级输出端在某一瞬间信号如图箭头所示方向输入时，根据右手定测，信号电流所产生的磁场磁极 N' 、 S' 如图所示分布。恒定磁场和信号磁场叠加的结果在J和K处减弱，在P和Q处增强，此时笔芯C（转子）主要在PQ方向磁场的作用下由零位（虚线所示）沿反时针方向旋转，如图所示。

笔芯通过两个轴承定位，笔芯底部与一螺旋形弹簧的上端联结，弹簧下端间接与壳体固定，笔杆安装在笔芯顶端，如图2所示。

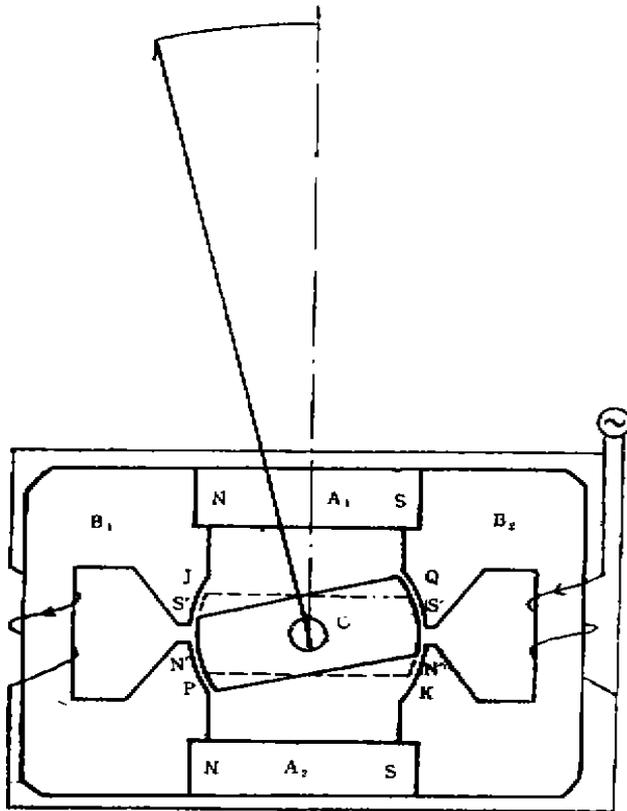


图1 DB-3型笔头结构示意图（俯视）
Fig. 1 Sketch of the structure of DB-3 writing point

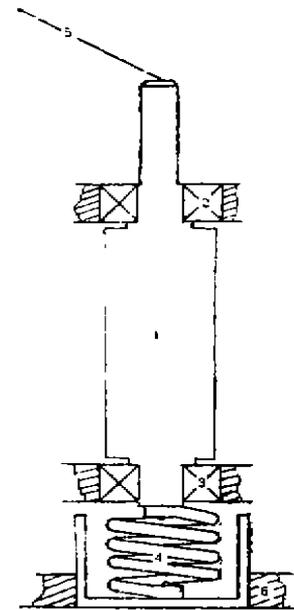


图2 笔芯联接示意图
Fig. 2 Sketch of refill joint
1. 笔芯（转子）； 4. 螺旋形弹簧；
2. 轴承1； 5. 笔杆；
3. 轴承2； 6. 壳体；

当合成磁场所产生的磁力矩使笔芯沿上述反时针方向旋转时，弹性力矩（方向与磁力矩相反）增大，当两者平衡时，笔芯顶部带动记录笔在滚筒上划出一段弧线，此时笔头将瞬间电信号转换为笔绘可见记录。所以说笔头是一种电—机转换机构。

三、影响笔头参数的因素分析

1. 磁性材料对笔头参数的影响

图1中笔头磁钢 A_1 、 A_2 应选用具有较高矫顽磁力的磁性材料。磁钢的矫顽磁力越大，充磁后剩磁感应强度越稳定，从而保证了笔头性能的稳定性。

定子和转子来用软磁性材料，为了尽可能减少磁损，要求导磁系数 μ 大，剩磁与矫顽磁力小。对于一般的电器而言磁损小可以提高电—机转换效率，节约能量，对笔头则不仅如此，且磁损小高频损耗也小，意味着频率特性好、频带宽，较大范围内不同周期的地震波都可以较好地记录下来。

由于笔头是在大小不同的信号电流作用下应用，为了提高小信号时电压灵敏度（以下简称灵敏度，定义为单位信号电压所产生的摆幅大小，可表示为 A/U ，单位为毫米/伏）要求所选用材料的起始导磁率要高。

我们知道笔头转动时要受到多种阻力，诸如空气阻力，笔尖与记录纸之间的滑动摩擦，轴承内部的滚动摩擦，导磁体内部的磁损等，当信号电压很小时所产生的磁转矩尚不是以克服各种静摩擦力，或磁转矩虽能克服静摩擦力但灵敏度很低。与起始导磁率低材料相比，起始导磁率高的材料在通过等量小信号电流时，线圈磁体内部产生较高的磁感应强度，对笔芯产生较大的磁转矩，改善了笔头的低端（小信号）灵敏度。笔头往往由于低端灵敏度低而达不到线性度要求。所以采用起始导磁率高的材料，笔头容易达到线性度要求。

我们还应该看到，即使采用起始导磁率较高的材料，在信号电压很小时，其灵敏度还是很低，还是难以达到线性度要求，所以生产厂家一般要求摆幅达到 ± 3 毫米时的电压灵敏度参与线性度误差计算。

本文已多处提到线性度一词，对其含义又有必要作简要说明。仪器出厂时给的电压灵敏度 A/U 是电压灵敏度标称值，是实测的电压灵敏度的高、低值的算术平均值。

假定某一瞬间笔头实测的电压灵敏度为 A'/U' 且我们知道仪器的标称灵敏度为 A/U ，那么我们定义比值：

$$\frac{A'/U' - A/U}{A/U} \quad (1)$$

为笔头的线性度，同时规定线性度限差应 $\leq \pm 2\%$ 。

2. 充磁强度对笔头参数的影响

(1) 充磁强度对灵敏度的影响

充磁强度对灵敏度的影响表现为充磁强度越高笔头的灵敏度越高。因为笔头的磁转矩是由磁钢所产生的恒定磁场和交变信号磁场叠加作用所产生的，充磁强度越高，恒定磁场越强，磁力矩越大，因而在信号电压相同的条件下充磁强度越高笔头的摆幅越大。

(2) 充磁强度对笔头阻尼的影响

充磁强度越高，笔头阻尼越大。阻尼与笔头（包括笔杆）在运动过程中所受到的各种阻力有关。

笔尖在一个周期内在记录纸上所摆动的距离可表示为 $4A$ ， A 为摆幅，如果信号频率为 f 那么笔尖的平均速度 \bar{v} 可表示为：

$$\bar{v} = 4Af \quad (2)$$

从上一小节得知，充磁强度越高，其灵敏度 A/U 越大。现在假定信号电压 U 相同，那么充磁强度越高，笔头的摆幅 A 越大。

为了便于比较，我们可以假定信号电压、频率都相同，那么灵敏度高的笔头由于摆幅 A 大其平均速度 \bar{v} 也大（参见式（2））。又阻尼是速度的正比函数，即速度越高阻尼越大。所以充磁强度高的笔头阻尼也大。

（3）充磁强度对笔头通频带的影响

充磁强度对频带的影响表现为充磁强度提高后笔头的频带变窄。

对同一个笔头先后两次充磁，假定第二次充磁比第一次高，分别测得两次不同充磁强度的幅频特性曲线如图 3 所示：

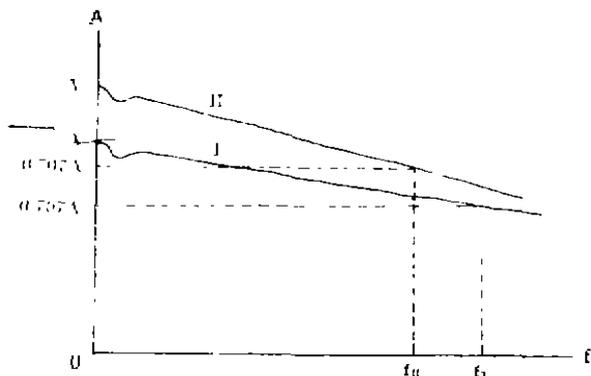


图 3 同一笔头两次不同充磁强度的幅频特性曲线（充磁强度 II 高于 I）

Fig. 3 Amplitude frequency characteristics of two different vadose magnetic strength at the same writing point

小节（1）得出的结论，曲线 II 由于充磁强度高于曲线 I，所以曲线 II 的灵敏度高于曲线 I），在同一高频信号作用下摆动时，比灵敏度低的笔头如曲线 I，无论摩擦损耗还是波动损耗都要大。

又笔头所具有的能量与摆幅大小有关，笔头转动时所具有的能量可表示为（参见后面（6）式）：

$$W = \frac{1}{2} KQ^2 \quad (6)$$

从图 4 可以看出

$$\sin Q = \frac{A}{L}$$

的幅频特性曲线如图 3 所示：
曲线 I 的频带上限为 f_1 ，在 f_1 处曲线 II 的摆幅已小于 $0.707A_2$ ，这就是下面要讨论的充磁强度对频带的影响问题。

笔头在信号电压作用下振动时，通常能量减少的方式有两种：一种是摩擦阻力的存在，使振动系统的能量逐渐转化为热运动的能量；另一种是由于振动系统引起邻近质点的振动，使系统的能量逐渐向四周辐射出去，转化为波动的能量。

在直流或低频时，笔头阻尼主要表现为摩擦损耗，在高频时笔头阻尼除摩擦损耗外尚有波动损耗，特别是灵敏度高的笔头如图 3 曲线 II（根据

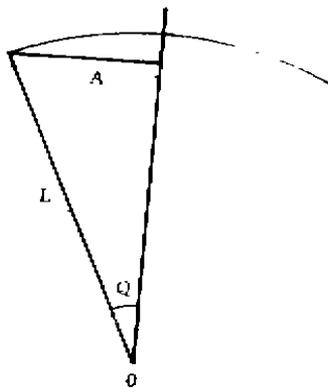


图4 笔杆长度L、转角Q、摆幅A
关系图

Fig. 4 Relations between the
length of pen(L), corner (Q)
and pendular amplitude (A)

$$Q = \arcsin \frac{A}{L}$$

式(6)又可表示为

$$W = \frac{1}{2} K \left(\arcsin \frac{A}{L} \right)^2 \quad (3)$$

式中K表示弹簧的弹性模量,用弹簧转动单位角度时的弹性力矩的大小表示,即 $K = M/Q$ 。

式3对于某个确定的笔头(联有笔杆)而言,K、L是常量,仅A是变量,所以在摆动时当受到阻尼而损耗能量时,是以减少摆幅A的形式表现出来。灵敏度高的笔头,由于摆动过程中其阻尼随频率增高而增大得更快些,所以摆幅下降得更快些。

综上所述,充磁强度提高以后笔头的灵敏度提高了,从而使微小的地震信号转化为一个明显的笔绘记录,如有地震发生,图纸上可以得到一个明显的初动记录,有利于震相分析,这固然是一个优点,但我们也应该看到,充磁强度提高以后笔头的频带变窄了。所以我们应该把这两个问题兼顾起来考虑。

(4) 充磁强度对笔头线性度的影响

笔头在设计时为了使摆幅A与信号电压U之间建立线性关系,通常把笔芯加工成一定尺寸的台阶,但笔头在调试时,是通过改变充磁强度来达到线性度要求的。究其原因,首先是由于充磁强度是一个很灵敏但在生产中尚未实现自动控制的参数。由于充磁时间由人工掌握,且充磁强度不能由特斯拉机或高斯机直接测得,只能间接根据笔头阻尼和线性度值超差的具体情况来改变充磁强度的大小,一旦阻尼和线性度值达到要求,我们即认为充磁强度达到要求,由此可见改变充磁强度仅仅是一种调试手段。

其次,由于生产工艺的分散性,如弹簧长度的微小差异造成弹性横率的等不同,也需要微量调整充磁强度来达到阻尼、线性度等参数要求,不能拘泥于充磁强度的设计值。

3. 弹簧强度对笔头参数的影响

(1) 弹簧强度对笔头灵敏度的影响

弹簧强度增大(或减少),笔头的灵敏度下降(或提高)。

弹簧强度常用弹性模量K表示

$$K = M/Q \quad (4)$$

式中Q表示弹簧以其几何轴为转轴旋转的角度,用弧度表示,M表示弹簧旋转Q角时所需的弹性力矩,上式又可表示为:

$$M = -KQ \quad (5)$$

式中负号表示弹性力矩方向始终指向平衡位置,对式(5)积分得:

$$W = \int_0^Q -KdQ$$

$$= -\frac{1}{2}KQ^2$$

(6)

(6)式表示弹簧在外力矩作用下转动Q角时外力所作功的大小。 $-\frac{1}{2}KQ^2$ 也表示弹簧旋转Q角时所具有的弹性位能。所以外力矩对弹簧所作的功等于弹簧的弹性位能。

从(6)式即可看出弹簧强度对笔头灵敏度的影响。假定磁力矩对弹簧所作的功为一定值,那么弹簧弹性模量K大的笔头旋转角度小,相应灵敏度也小,反之亦然。

(2) 弹簧强度对笔头频率特性的影响

弹簧强度大的笔头频率特性好。

通过上小节分析知道,弹簧强度小的笔头灵敏度较高,又从本文2(3)小节得知灵敏度高的笔头其阻尼随频率增高而增大的速率快,因为摆幅减小的速率也快,所以频率特性较差。相反弹簧强度大的笔头频率特性较好。

上述结论可以在幅频特性图5得到验证。不同的弹簧强度,笔头的幅频特性曲线形态有所不同。总的趋势是:弹簧强度越大的笔头,其幅频特性曲线越平缓,其波动部分(一个较大的波谷)越远离频宽上限 $25H_z$ 。

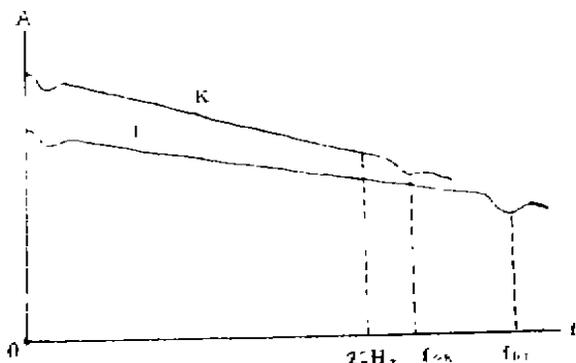


图5 弹簧强度对幅频特性曲线的影响(曲线K所示笔头所用弹簧强度较高,曲线J所示笔头所用弹簧强度较低)

Fig. 5 Influence of spring strength on amplitude frequency characteristics

从笔头本身的物理特性—自振频率也可以解释图5中波谷出现位置的变化趋势。从(7)式可以看出笔头的自振频率 $f_{自}$ 是弹簧弹性模量K的正比函数:

$$f_{自} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{J}} \quad (7)$$

在幅频特性曲线的测试中我们发现,波谷出现的位置频率(设为 $f_{谷}$)与自振频率 $f_{自}$ 的变化趋势是一致的,即自振频率 $f_{自}$ 增大的 $f_{谷}$ 也增大。这一发现对于改进设计很有指导意义。

波谷处往往由于摆幅太小而达不到频宽要求,此时可采用提高自振频率的方式使 $f_{谷}$ 远大于 $25H_z$ 。DB—3笔头的 $f_{谷}$ 可达30多 H_z 。

4. 笔杆对笔头参数的影响

笔杆和笔头虽然生产时分为两部分,但在参数测试和整机使用时联为一体,所以笔杆的各种参数如结构、形状、重要、强度等对笔头参数有直接影响。

(1) 笔杆对灵敏度的影响

本仪器笔杆采用桁架结构,大大减少了笔杆转动时的空气阻力,从而提高了笔头的灵敏度。即使高频时阻力要增大,但也因此而少增加一些,从而提高了高频摆幅,改善了笔头的幅频特性。在其它情况下增大笔头的灵敏度,如提高充磁强度或降低弹簧强度会使笔头的通

频带变窄，而减少空气阻力的方法却可以同时提高灵敏度和通频带。另外，阻力小的笔头在小信号时的电压灵敏度也容易达到线性度限差要求。

(2) 笔杆对笔头频率特性的影响

通过前面的讨论，我们知道笔头的自振频率高，通频带指标就容易达到，笔头的自振频率为：

$$f_{\text{自}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{J}} \quad (7)$$

式中K是弹簧的弹性模量，J是笔芯和笔杆的转动惯量

$$J = \sum mr^2 \quad (8)$$

式中m和r分别是转动部分各质点的质量和离开转轴的距离。从公式(8)得知为了提高自振频率，转动部分的转动惯量要尽可能小。所以制造笔杆时应采用具有一定强度的轻质材料，在保证强度的条件下结构尽量简单，同时尽可能使笔杆的重量靠近转轴。

参 考 文 献

- (1) 中国科学院地球物理研究所，地震仪器概论，科学出版社，1975，9。
- (2) (美)D. 埃尔韦尔等，应用物理学，上海科学技术文献出版社，1980。
- (3) 李荫远等，铁氧体物理学，科学出版社，1978。
- (4) 赵凯华等，电磁学，人民教育出版社，1978。

ANALYSIS OF THE INFLUENCE ON DB-3 TYPE WRITING POINT PARAMETER

Lu Jishun

(Seismological Bureau of Guangdong Province)

Abstract

Starting with the working fundamentals, this paper discusses the meaning of DB-3 type recording point parameters, factors of influence and applied problems about their relations.