

# 大气隙直线型电磁感应器中漏磁系数计算

顾 琅 (中国科学院力学研究所)

将异步电机的定子剖开后平直展开, 就得到一直线型的电磁感应器。其三相绕组通以三相电流, 产生一个沿着感应器运动的行波磁场, 这是我们通常称之为直线电机的感应器。一般谈及的直线电机, 不管此感应器是作为固定边还是运动边, 另一边总是固体的金属导电板或线圈。我们这里讨论的直线式电磁感应器的作用对象是液态金属, 如输送液态金属的电磁流槽、直线型平面电磁泵, 线型电磁搅拌器等。它的特点是由于液态金属总有管道或者流槽, 且一般温度较高, 须有隔热层 (保温层), 致使其气隙相当大。若液态金属本身为非铁磁物质

( $\mu = \mu_0$ ), 其上方也无铁心, 则相当于半空间。这类感应器铁心两断面处的线圈无论是半边甩在铁心外面, 还是嵌在铁心槽内, 都与中间部分的线圈磁路不同, 一般由于铁心断面的出现增加了总的漏抗值。所以, 在计算感应器总漏抗时, 须分别考虑。

## 一、漏磁系数 $K_e$ 在电磁感应器设计中的作用

漏磁系数  $K_e$  是这样定义的, 即

$$K_e = U / E$$

其中  $U$  是感应器电压;  $E$  是感应电势。

## 四、结 束 语

### 1. 本系统特点

系统采用分布式微机控制系统, 把单板机 DJS-054 作为下位机, 对 165 个测温点进行检测、显示、打印, 并且与上位机 DJS-054 II 微机系统联机使用, 从而减轻了上位机的工作量; 并且能进行自动、手动的切换, 下位机能独立作为温度巡检仪工作。如此, 对主机 (上位机) 的要求降低, 从而使系统的成本降低。

### 2. 本系统主要有如下功能

(1) 监视和控制功能: 有筒仓温度的监视与控制、料位的监视与控制、粮食称重与计重控制、进仓出仓翻仓时各类闸阀门的启停实时控制、各类机电设备的启停实时控制、过程参数的实时采集与监视、过程控制的模拟显示功能。

(2) 管理功能: 在 CRT 上定时显示操作过程的工艺流程、过程参数的修改、定时打印各类报表、在 CRT 上或模拟屏上显示各种故障的报警信息及打印。

(3) 其它功能: 人机对话功能, 可以用 CRT 键盘打入各种操作命令, 可以在 CRT 上显示有关参数。数据通讯功能与报警功能。

### 3. 本系统具有较高可靠性

由于系统设置了微机自控、操作台集中远控、现场应急手控三种控制方式, 并且三者可以由切换开关很方便地变换, 保证了系统运行与控制的可靠性。又由于对系统的主要机电设备, 也是原系统中最易产生故障的设备譬如提升机、输送机等都设置了完善的故障报警系统 (譬如电动机的缺相断相报警电路), 可避免设备损坏事故, 从而提高了系统的可靠性。

### 4. 提高了经济效益

(1) 由于系统采用微机自控, 加快了运粮船舶的周转率, 提高了送粮船的舱位利用率, 提高了装卸速度, 使粮库的储运生产率提高了 10%。

(2) 由于系统能及时显示、打印筒仓的温度、湿度及储粮数, 从而能有效地防止因筒仓温度过高、湿度过高使粮食霉烂变质引起的大量浪费。并且能够通过筒仓的各参数, 可以合理制定进仓、出仓、翻仓的管理方案。

(3) 由于系统设置完善的报警及自动保护处理, 既提高了设备的可靠性及利用率, 又确保了安全生产。本系统经合理改造后, 使粮库的噪声最大值由原来的 98dB 下降为 84dB, 改善了劳动条件, 提高了企业的管理水平。

本系统经过半年多的运行, 表明系统的硬件及软件都达到指标要求, 并且已通过正式鉴定。

此系数的大小反映了漏感抗相对主磁路感抗的比值大小。从图1向量图中可知:

$$K_e = \sqrt{r^2 + (x_s + x_m)^2} / x_m$$

式中:  $r$  是感应器绕组的相电阻;  $x_s$  是漏感抗;  $x_m$  是主感抗。

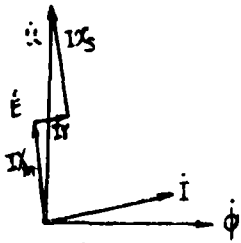


图 1

因电阻相对很小, 可将以上公式简化为:

$$K_e \approx (x_s + x_m) / x_m$$

在设计线型电磁感应器时, 可根据所需要的工作磁通求所需要的工作电压, 也可以在给定电压条件下, 反过来求实际工作磁通。公式为:

$$u = 4.44 f \omega \Phi K_w K_e$$

式中:  $f$  为电源频率;  $\omega$  是每相绕组匝数;  $\Phi$  是实际工作磁通即主磁通;  $K_w$  是绕组系数。在设计感应器时需正确地根据线圈的几何尺寸及感应器结构来估算  $K_e$  值, 如果估算得偏小, 就会使感应器在给定电压下, 电流偏小, 不能提供设计所要求的工作磁场, 从而不能在液态金属中产生足够的电磁力。反之, 当  $K_e$  值估算偏大时, 会导致在给定电压下线圈电流过载。

## 二、计算方法

总的原则是将铁心两断面处线圈漏抗单独考虑, 然后与非铁心断面处的线圈漏抗迭加, 得到一相的总漏抗, 再算出  $K_e$  值。我们按两种不同的结构分别说明如下:

1. 铁心两断面处的线圈边甩在感应器铁心外面的情况 (见图2)。例如在每极每相绕组的槽数为

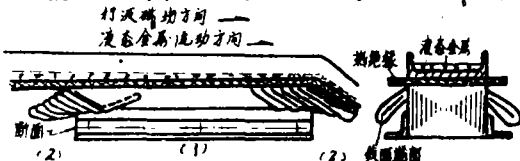


图2 (1) 嵌在铁心槽内的线圈

(2) 甩在铁心断面外的线圈边

2 时, 铁心各断面侧将有 6 个线圈边甩在外面, 由于对称, 可将铁心两断面处甩在外面的线圈边合成为一个完整的线圈来考虑。它们的磁路不经过铁心, 是空心线圈, 所产生的磁通均为漏磁通。单独计算这些线圈的自感, 互感, 然后再与嵌在铁心槽内的线圈漏感抗迭加。计算这类空心线圈的自感、互感采用分段法, 即在计算回路的电感时把回路分成形式相当简单的各段 (如直线段), 分别计算出各段的电感, 然后迭加得到回路的总电感。当分段法用于仅由直线段组成的回路时, 计算大大简化。所以, 我们将这些空心线圈简化成矩形线圈。其线圈宽度不变, 端部长度等于原线圈端部 (见图3), 即此矩形线圈的横段长  $a$  等于原线圈宽度; 其竖段长度为  $b$ ;  $l_0$  是铁心宽度尺寸。

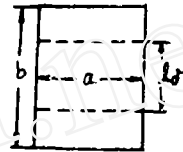


图 3

首先看一相的矩形线圈, 导线半径为  $r_0$ 。当  $a \gg r_0$ ,  $b \gg r_0$  时 (一般总是这种情况):

对于横段二直线段来说, 其长度为  $a$ , 轴线间距离为  $b$ , 此两直线段的自、互感为:

$$L_a = \frac{\mu_0 a}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{2a}{r_0} \right) - 1 \right]$$

$$M_a = \frac{\mu_0 a}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{b}{a+d} \right) + \frac{d-b}{a} \right]$$

式中  $d = (a^2 + b^2)^{1/2}$

对于竖段两直线段, 其长度为  $b$ , 轴线间距离为  $a$ , 其自、互感为:

$$L_b = \frac{\mu_0 b}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{2b}{r_0} \right) - 1 \right]$$

$$M_b = \frac{\mu_0 b}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{a}{b+d} \right) + \frac{d-a}{b} \right]$$

矩形线圈周长是  $2(a+b)$ , 相应于通过此线圈内部磁通的内电感为:

$$L_{内} = \frac{\mu_0}{4\pi} (a+b)$$

属于一相线圈的自感为:

$$L_{自} = 2L_a + 2M_a + 2L_b + 2M_b + L_{内}$$

$$= \frac{\mu_0}{\pi} \left[ a \times \ln \left( \frac{2ab}{r_0(a+d)} \right) + b \times \ln \left( \frac{2ab}{r_0(b+d)} \right) - 2(a+b-d) + \frac{a+b}{4} \right]$$

设线圈属于一相的串联匝数为  $W$ ;

$$x_{\text{H}} = 2\pi f \cdot W^2 \cdot K_w^2 \cdot \frac{\mu_0}{\pi} \cdot L_{\text{H}}$$

属于另两相的线圈对此相线圈的互感 (均指空心线圈): 因无铁心相隔, 线圈边紧挨着, 磁链面积为  $1/3$ , 又  $i_{\text{H}} + i_{\text{C}} = -i_{\text{A}}$ , 所以:  $x_{\text{H}} = \frac{1}{3} x_{\text{H}0}$ 。

由甩在铁心两断面外的线圈边所合成的空心线圈一相感抗是:  $x_{s2} = x_{\text{H}} + x_{\text{H}0}$ 。

嵌在铁心槽内的线圈部分的漏感抗  $x_{s1}$  的计算类同一般电机情况:

(1) 槽漏磁导 这类感应器中要求的单位长度上磁势安匝数高, 一般均采用开口槽, 其槽漏磁导计算同电机设计公式:  $\lambda_c = \frac{h_1}{3b_n} + \frac{h_4}{b_n}$  (见图 4)。如为短距则乘上短距系数。

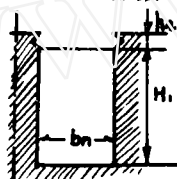


图 4

(2) 线圈端部漏磁导 类同一般电机中公式。双层绕组:

$$\lambda_d = 0.34 [l_d - 0.64\tau] \frac{q}{l_\delta} K_w^2$$

式中:  $l_d$  是端接部分长度;  $\tau$  是极距;

$l_\delta$  是铁心宽度即有效线圈长度。

(3) 齿端气隙漏磁导 按大气隙计算。

$$\lambda_g = \frac{+ \times \delta / b_n}{5 + 4\delta / b_n}$$

式中:  $\delta$  是计算气隙;  $b_n$  是槽宽。对于单面磁场结构, 即输送的液态金属上方无铁心, 气隙取到液态金属层上。

总漏磁导  $\lambda = \lambda_c + \lambda_d + \lambda_g$

铁心中线总漏抗为:

$$x_{s1} = 0.158 \frac{f}{100} \times \left( \frac{W}{100} \right)^2 \times \frac{l_\delta}{pq} \times \lambda, (\Omega)$$

式中:  $p$  为极对数;  $q$  为每极每相槽数。

主磁路感抗计算

对于单面磁场结构 (即上方无铁心), 可视为半空间, 所以在一个极下的磁势:

$$F_a = \frac{1}{\mu_0} \int_0^\infty B d\delta = \frac{1}{\mu_0} \int_0^\infty B_0 e^{-a\delta} d\delta = \frac{\tau}{\mu_0 \pi} B_0 \approx 0.255 B_0 \tau \times 10^6$$

式中:  $B_0$  是感应器表面的磁密值 (韦伯/米<sup>2</sup>),  $\tau$  是极距 (米)。

此磁势由感应器三相绕组产生:

$$F_a = 1.35 W K_w \cdot I / p \quad \text{其中 } p \text{ 是极对数。}$$

主感抗  $x_m = E / I$

$$E = \sqrt{2} \pi f W K_w \Phi_0$$

$$\Phi_0 = \frac{2}{\pi} \tau \cdot B_0 \cdot l_\delta$$

将以上关系代入到主感抗表达式中得到:

$$x_m = 2\pi f \cdot \frac{2 \cdot 3}{\pi^2} \cdot (W K_w)^2 \cdot l_\delta / (0.255 \times p \times 10^6)$$

得系数  $K_e = (x_{s1} + x_{s2} + x_m) / x_m$

举例: 一输送锡的电磁流槽感应器有关数据为:

槽深  $h_1 = 59$  毫米; 槽口高度  $h_4 = 4$  毫米; 槽宽  $b_n = 21$  毫米; 短距系数为  $1$  端接部分的长度  $l_d = 288$  毫米; 线圈有效部分长度即铁心宽度  $l_\delta = 105$  毫米; 极距  $\tau = 174$  毫米; 每极每相槽数  $q = 2$ 。

(1) 计算值 槽漏磁导  $\lambda_c = 1.027$ ; 端部漏磁导  $\lambda_d = 1.068$ ; 计算气隙  $\delta = 30$  mm, 齿端漏磁  $\lambda_g = 0.665$ 。总漏磁导  $\lambda = \lambda_c + \lambda_d + \lambda_g = 2.76$

每个线圈的串联匝数为 36 匝; 极对数  $p = 3$ ; 绕组系数  $K_w = 0.966$ , 所以嵌在铁心槽内部分的单相绕组漏抗为:

$$x_{s1} = 15.8 \times \frac{f}{100} \times \left( \frac{W}{100} \right)^2 \times \frac{l_\delta}{pq} \cdot \lambda = 7.12 (\Omega)$$

式中  $l_\delta$  以米为单位。

甩在铁心两侧断面外的线圈边总共组成 6 个线圈每相两个, 它们转换矩形线圈的尺寸为:  $a = 174$  毫米;  $b = 219$  毫米;  $r_0 = 1.65$  毫米代入前面所述的公式中得到  $L_{\text{H}} = 1.668 \mu_0 / \pi$ ;  $x_{\text{H}} = 2\pi f \cdot W'^2 \cdot K_w^2 \cdot L_{\text{H}} = 1.014 (\Omega)$ ; 其中  $W' = 72$  匝, 所以  $x_{\text{H}} = 0.338 (\Omega)$ ;

这些线圈造成的漏感抗  $x_{s2} = 1.352 (\Omega)$ ;

总的漏感抗  $x_s = x_{s1} + x_{s2} = 8.47 \text{ } (\Omega)$

$$\text{主磁通感抗 } x_m = 2\pi f \cdot \frac{2 \times 3}{\pi^2} (WK_w)^2 l_\delta /$$

$$(0.255\mu \times 10^6) = 4.57 \text{ } (\Omega)$$

漏抗系数估算值  $K_e = (x_s + x_m) / x_m = 2.85$

(2) 实际测量值 用宽度为一个极距, 长度等于铁心宽度  $l_\delta$  的单匝矩形线圈测量感应电势, 从毫伏计读数  $e_{cp} = 162.7$  毫伏。供给三相绕组的三相电压平均值  $u = 215$  伏, 则实测的  $K_e$  系数

$$K_e = u / (e_{cp} \cdot W \cdot K_w) = 2.71$$

这里的  $W$  应为总匝数即  $72 + 432 = 504$  匝。由于甩在外面的线圈结构上总是尽量压紧, 有所变形, 实际的宽度小于极距  $\tau$ , 所以估算值略偏大。

2. 铁心两断面处线圈仍放在铁心内的情况 (见图 5)。相当于在铁心两断面侧各延伸一段铁心, 其槽内是单层线圈边。但整个感应器长度将比前种情况增加。

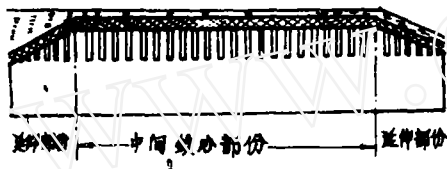


图 5

在这种结构下, 没有甩在铁心外面的线圈边, 从磁路上看延伸部分铁心槽内的线圈边所构成的线圈与中间铁心部分的类同, 都包括主磁通, 槽漏磁, 端部及齿端漏磁。这里我们以一个输送液态铝的电磁流槽为例 (水冷):

双层绕组结构;  $q = 2$ ; 极距  $\tau = 0.306$  米, 每相总匝数  $W = 36$  匝; 短距系数为 1; 铁心宽度即线圈有效区长度  $l_\delta = 0.25$  米; 槽深  $h_1 = 30$  毫米; 槽宽  $b_n = 37$  毫米; 绕组系数  $K_w = 0.966$ ;

(1) 首先讨论不包括铁心延伸部分的线圈边, 漏磁导公式同前。

$$\lambda_c = \left[ \frac{h_1}{3b_n} + \frac{h_2}{b_n} \right] \cdot 1 = 0.378$$

$$\lambda_g = 0.792 \text{ 计算气隙 } \delta = 80 \text{ 毫米}$$

$$\lambda_d = 0.34 [l_d - 0.64\tau] \cdot \frac{q}{l_\delta} \cdot K_w^2 = 1.056$$

$$\Sigma \lambda = \lambda_c + \lambda_d + \lambda_g = 2.226$$

这里的端部长度  $l_d \approx 2\tau$  (因是铜管线圈, 端部较长)。这部分的总匝数  $W_1 = 32$  匝;  $p_1 = 8$ ; 其漏抗值估计为  $x_{s1} = 15.8 \times \frac{f}{100} \times \left( \frac{W_1}{100} \right)^2 \times \frac{l_\delta}{p_1 q} \cdot \Sigma \lambda = 0.0281 \text{ } (\Omega)$ 。

(2) 讨论延伸铁心部分槽内的线圈边。将两侧的合在一起, 构成线圈, 相当于一单层绕组。其极对数  $p_2 = 1$ , 其平均槽深  $h_1 = \frac{2}{3} h_2 = 20$  毫米,  $W_2 = 4$  匝, 其他同上, 分别得到:

$$\lambda_c = 0.288, \quad \lambda_g = 0.792$$

$$\lambda_d = 0.47 \times (l_d - 0.64\tau) \frac{q}{l_\delta} \cdot K_w^2 = 1.46$$

$$x_{s2} = 0.004$$

(3) 主感抗 这里的线圈总匝数应为  $W = 36$ , 相应  $p = 8.5$ 。

$$x_m = 2\pi f \cdot \frac{2 \times 3}{\pi^2} \cdot (WK_w)^2 \times l_\delta / (0.255 \times \mu \times 10^6) = 0.0266 \text{ } (\Omega)$$

最后得到估算的漏抗系数  $K_e = 2.21$

实际测量值  $K_e = 2.3$

这种结构情况下, 计算值与实际测量值更为接近。我们曾按此原则计算过线性感应器前后两套三相绕组结构的定量输送流槽, 所估算的  $K_e$  系数也与实测值十分吻合。

## 《国外机械加工技术》1986年征订启事

《国外机械加工技术》原名《机床译丛》, 介绍世界各主要工业国家有关机械专业的主要论著, 选题新颖, 注重应用, 辟有工艺、设计、综述、市场、简讯、技术讲座等栏目, 可开阔眼界, 启迪思路, 洞察时代, 扬长避短, 更新知识, 提高素养。本刊为双月刊, 公开发刊, 每期64页, 定价0.85元, 全年六期, 共5.1元。本刊不经邮局发行, 定款可经过银行信汇; 北京机床研究所, 开户银行: 工商银行北京安定门分理处, 帐号: 4001008, 或邮汇: 北京安内方家胡同19号本刊编辑部发行组。汇款时请务必写清楚订户单位、收件地址、姓名, 并注明订阅《国外机械加工技术》期刊。订款收据将随刊夹发。