

微电机专业会议

会议录

家用电器用电机技术交流会

1982年10月



电子工业部微电机专业科技情报网

南 京

用电器用电机技术交流会论文目录

一 一般问题

1. 计算机在家用电机设计中的应用 - - - - - 1-1
2. 有限元法在鼠笼式异步电机中的应用
——饱和涡流场的分析和起动电流的计算 - - - - - 1-8
3. 微电机噪声的控制 - - - - - 1-9
4. 小电机的噪声问题 - - - - - 1-15
5. 两相交流电机的统一理论 - - - - - 1-25

二 单相交流电动机

6. 用合成电流法来分析各式单相异步电机 - - - - - 2-1
7. 单相电机的正交磁场理论和力矩 - - - - - 2-11
8. 罩极电动机的一些设计特征 - - - - - 2-18
9. 罩极电动机的计算机辅助分析程序 - - - - - 2-24
10. 关于罩极电动机性能的改进 - - - - - 2-31
11. 整马力单相电容式电机辅助绕组的设计和电容器的选择 - - - - - 2-39
12. 冲片已定的单相异步电动机的优化 - - - - - 2-48
13. 单相电容电动机旋转磁场的观测 - - - - - 2-53
14. I形接法副相抽头调速电容电动机性能计算 - - - - - 2-57
15. 用合成电流法来分析抽头调速电容电机 - - - - - 2-66

三 风扇电机

16. 略谈我国电风扇生产问题 - - - - - 3-1
17. 小型风机发展概况 - - - - - 3-6
18. 家用吊扇发展动态 - - - - - 3-12
19. 关于改进电扇电机性能的几点体会 - - - - - 3-19
20. 节能风扇电机的设计 - - - - - 3-25
21. 双花牌400毫米电扇性能改进措施 - - - - - 3-47
22. 降低电容式电机的输入功率与改进调速方法 - - - - - 3-50
23. 电容式电扇电动机节能的研究 - - - - - 3-55
24. 降低电风扇输入功率的方法 - - - - - 3-61
25. 电扇电抗器调速改抽头调速简易计算 - - - - - 3-70
26. 风扇电机转子结构工艺分析 - - - - - 3-76
27. 浅谈改善台扇潮态绝缘性能 - - - - - 3-80
28. 松下400毫米电扇电机分析 - - - - - 3-82

四 洗衣机电机

29. 洗衣机用电机主要尺寸的确定 - - - - - 4-1

30.	洗衣机电机的特点及设计探讨	4-4
31.	关于洗衣机电机设计的若干问题	4-10
32.	洗衣机电机的绕组分析	4-17
33.	对洗衣机电机绕组设计的几点看法	4-22
34.	洗衣机电机设计过程中的几点体会	4-34
35.	洗衣机负载特性实验——兼论洗衣机电机转矩指标的确定	4-46
36.	洗衣机电机空载线电流不对称故障分析	4-46
37.	单相电容运转洗衣机电机的温升试验	4-50
38.	浅谈降低洗衣机电机磁噪声	4-52
39.	洗衣机电机前后盖采用拉伸薄钢板设计的新方案	4-57
40.	洗衣机电机用磁材的选择及加工方法试验	4-58
41.	决定洗衣机电机工作电容的新方法——起动阻抗区域法	4-64
42.	洗衣机电机钢板端盖冷冲成形工艺的几个关键问题	4-73
五 电声设备用电机		
43.	试谈录音机电机	5-1
44.	录音机电机转速的稳定	5-8
45.	对某型盒式磁带录音机用直流永磁稳速电动机主要用料及电机结构特点分析	5-14
46.	录相机主导马达设计特点	5-17
47.	直传式电唱电机——永磁式电磁减速同步电动机	5-24
48.	双速直传式电唱电机——33 $\frac{1}{2}$ 转/分和45转/分(或78转/分)永磁式电磁减速同步电机	5-31
49.	盒式录音机电机稳速电路原理(一)	5-35
六 其它用途电动机		
50.	电动自行车及电动自行车用电机	6-1
51.	环形永磁体电动机的定位转矩	6-6
52.	无刷直流电动机使用的灵活性	6-17
53.	永磁直流电动机的交流整流供电	6-23
54.	小型铁氧体电动机的简易设计	6-32
55.	轴向激磁电磁减速式低速同步电动机辅相绕组设计问题	6-38
56.	新型磁阻电动机磁路分析和电磁计算	6-59
57.	介绍一种非均匀气隙的单相永磁同步电动机	6-72
58.	影响小功率单相串激电动机运行性能的几个因素	6-78
59.	钟表用步进电动机的动特性计算	6-91
60.	玩具电机的市场动态及高效生产	6-102
61.	玩具电机转子片级进模	6-116

62. 电冰箱空调器用压缩机电机的特殊要求 - - - - -	6-120
63. 小型制冷机配套电机的质量分析点滴 - - - - -	6-124
64. 影响磁电机点火因素的探讨 - - - - -	6-127
65. 电影机械收片装置用软特性交流电动机 - - - - -	6-132
七 工艺、材料、测试及其它	
66. 国内外研制铸铝鼠笼转子检测装置的概况 - - - - -	7-1
67. 高压脉冲充磁 - - - - -	7-10
68. 环氧树脂成型工艺比较 - - - - -	7-21
69. E-39-D 高纯度浇注专用环氧树脂的应用 - - - - -	7-25
70. 粉末涂料在家用电器中的应用 - - - - -	7-29
71. 普通电解电容做交流电机分相电容的探讨 - - - - -	7-33
72. 定转子片冲模的设计与制造 - - - - -	7-36
73. 铁基含油轴承的寿命试验 - - - - -	7-48

一、一般问题

1. 计算机在家用电机设计中的应用

浙江大学陈永校

一、概述

随着生产的发展和人民生活水平的提高,家用电器也迅速发展起来。我校几年来对家用电动机作了研究,在利用电子计算机进行电磁计算方面,取得一些经验。

电子计算机运算速度快,具有逻辑功能,使计算电动机电磁方案的时间大为缩短,因此可进行多方案比较和选优,使设计出来的电动机既符合技术性能指标,又能节约原材料和制造工时。

我校针对不同的计算机及不同的要求,编制了好几套计算程序。对于DJS 131和DJS 154机,编制了BASIC程序。BASIC语言的主要特点是小巧灵活,简单易懂,使用方便,此外它具有会话性,即计算机与使用者构成交流双方,彼此提出问题和回答问题。在操作时可以根据具体情况,随机应变。我们编了下列程序:

1. 洗衣机电机设计程序。因主副绕组相同,程序比较简单。

2. 电扇电机设计程序。其中又分二种情况,一种是在设计好主相后,计算两相对称运行时额定工作点,为设计副相作准备。然后再输入另一条纸带,用另一套程序专门设计副相并计算电容电动机运行性能。它的优点是比较灵活,机器占内存少。另一种是把二段程序连起来,纸带一次输入。在设计多种规格时,用这个程序可节省反复送纸带的时间。

3. 单相电动机设计程序。它包括电阻起动和电容起动的分相电动机,也包括电容运转电动机。使用时可根据需要采用逻辑开关。

对杭州汽轮机厂的大型电子计算机(西德西门子7.738型)我们编制了FORTRAN程序。

FORTRAN语言是国际上广泛采用的一种适用于科学计算的程序语言。它有很严格的规则,掌握比较费时,但计算起来速度快。由于它的子程序是独立的,在编译时相互装配。这样,根据工作需要可以通过增编子程序的方法把程序扩充和完善。由于运算速度快,就更有条件编制自动化程度较高的程序以便让电子计算机能根据设计者给定的控制数据和技术条件的要求,自动地选择全部结构参数,并进行选优。

我们采用的电磁设计公式基本上按我校编的教材。(1981年8月在常州举办的单相异步电动机学习班用)。

用电子计算机计算的电动机,在制造后经过试验,证明设计值与试验值相当接近。

二、程序框图介绍(以FORTRAN电容电动机程序为例)

首先输入定、转子冲片数据和开关表。开关表是一个数组,它区分及给出的数据有:定、转子槽形(平底或圆底);硅钢片牌号;转子槽是否闭口;打印

方式是简化还是详细；其中第14个元素 $ISW(14) = 0$ 时，表示设计洗衣机电机，主副相相同， $ISW(14) = 1$ 表示程序自动设计副相， $ISW(14) > 1$ 表示匝数比要通过循环改变； $ISW(17)$ 的值表示改变电容的次数。

在确定了改变匝数比和电容的次数后，要输入匝数比数组及电容值数组。它们用于设计副绕组及计算电容运转特性的循环。

在计算槽满率之后要令 $KES = 0$ 及 $J = 1$ 。因为程序规定只有当 $KES = 1$ 时，才表示电压系数计算正确，可以计算副绕组。电压系数先取假设值 $FE1'$ 及 $FE2'$ ，计算好两相运行特性后可得到实际的 $FE1$ 及 $FE2$ ，令

$$\Delta FE1 = |FE1 - FE1'|$$

$$\Delta FE2 = |FE2 - FE2'|$$

如果它们都小于1%就算合格，可令 $KES = 1$ 。如果其中有一个大于1%，就不合格应取新的假定值

$$FE1'' = \frac{1}{3} (FE1' + 2FE1)$$

$$FE2'' = \frac{1}{3} (FE2' + 2FE2)$$

重新计算。为了避免收敛太慢时浪费机器运行时间，我们规定这样的重复计算以50次为限。第一次就是 $J = 1$ 。

在计算好主相的电阻和电抗后，经过开关 $ISW(14)$ ，如果 $ISW(14) = 0$ ，表示计算洗衣机电机，因主、副相相同，令匝比 = 1，随即计算电容运转的工作特性，求出此时额定工作点对应的电压系数 $F10$ 及 $F20$ 。再去判别 KES 是否等于1及 $\Delta FE1$ 及 $\Delta FE2$ 是否小于1%。

如果 $ISW(14) \neq 0$ ，就是要设计副绕组，为此要先计算两相对称运行特性，求出额定工作点对应的电压系数 $FE1$ 及 $FE2$ 。这两相对称运行是虚拟的，实际上并不存在。因此，这样计算出来的 $FE1$ 及 $FE2$ 和实际的电容运行特性会有一定误差。好在我们设计电容电动机时总是力求使电机能在圆形旋转磁场下工作，即通过适当地选择主、副绕组匝数比和电容值，使工作情况与对称两相工作时相同。因此 $FE1$ 及 $FE2$ 的误差不大。

为了要弄清电压系数是否合格，就要把 J 值打印出来，如果 $J < 50$ ，表示合格， $J = 50$ 表示不合格。

打印 J 值后对每次循环取出对应的匝数比设计副绕组，又对每一个电容器值循环取出对应的电容值及等效电容电阻，计算电容运转特性，并打印计算结果。

全部循环完毕，程序终止。

三 数学处理

原始计算程序中有不少图表。其中部分是根据复杂的计算公式画出，便于手工计算时查阅，另一部分是实验曲线。用电子计算机计算时，可以把曲线和表格分点输入。再用插值法计算，但占的单元较多，因此应尽可能把这些图表化成公式，以便于计算。

1. 波幅系数 F_s 和齿饱和系数 F_t 的关系

$$F_s = 1.9641 - 0.39332F_t \quad F_t < 1.33 \quad (1)$$

$$F_s = 1.8158 - 0.28182F_t \quad 1.33 < F_t < 1.44 \quad (2)$$

$$F_s = 1.6843 - 0.19048F_t \quad F_t > 1.44 \quad (3)$$

2. 轭部长度的修正系数

$$\xi = 0.63662 \quad B \leq 5000 \quad (4)$$

$$\xi = 0.58359 + (2408.4 - 0.26957B)B \times 10^{-8} \quad (5)$$

$$5000 < B < 12000$$

$$\xi = 1.7655 - (15201 - 0.38082B)B \times 10^{-8} \quad (6)$$

$$B > 12000$$

3. 漆包线与电容器规格化

在自动设计副绕组时，漆包线和电容量不可能正好是符合规格，为此需要规格化。在程序中设计一个子程序 STD(X, Y1, Y2, N)，可以用来选取漆包线和电容器，并得到漆包线的绝缘后外径及电容器等效电阻。其求法如下：

首先定义4个数组：CST(19), RCS(19), DST(46) 和 DOST(46) 它们分别表示19个电容器电容值和对应的电容器等效电阻。46个漆包线直径和对应的绝缘后直径。各值均自小到大按次序排列。其次把这四个数组用 DATA 语句输入。在调用这子程序时，把要求的电容或裸直径初值和 x 虚实结合，如果求电容器的值，则 N 用 19，如果求漆包线，N 用 46，这样 Y1 就代表电容量或裸直径的标准值，Y2 就代表电容等效电阻或绝缘后导线直径。子程序的编写原则是，如果 $N > 20$ ，则找导线直径，否则找电容。通过循环语句找出与初值 x 最接近的 Y1 值，记录这 Y1 值对应的循环变量 I 值，从而求出电容器电容为：

$$Y1 = CST(I) \quad (7)$$

$$\text{等效电阻为: } Y2 = RCS(I) \quad (8)$$

同理求出漆包线的裸直径及绝缘后外径为

$$Y1 = DST(I) \quad (9)$$

$$Y2 = DOST(I) \quad (10)$$

4. 磁化曲线

把 D21, D22, D23 三种硅钢片的单位安匝对应于磁密值从 5000~18000 高

斯，每500高斯一点，逐点输入。当磁密 $B < 5000$ 时，采用下式

$$H = B * ALP(ISTYP, 1) \quad (11)$$

式中，ALP为 3×3 的数组，ISTYP表示硅钢片牌号对应于上述牌号的数字。ALP的值为 3.42×10^{-4} ， 3.3×10^{-4} ， 3.16×10^{-4} ，0.0845，0.0845，0.0845，1383，1391，1399（按FORTRAN语言规定数组元素存放时先“列”后“行”）。

当磁密 $B > 18000$ 高斯时，采用下式

$$H = B * ALP(ISTYP, 2) - ALP(ISTYP, 3) \quad (12)$$

当磁密在5000~18000高斯之间时，采用二次插值法。其原理如下：对应于28个磁密值，有28个H值相对应，（一般B和H各有n个值）

$$B_0, B_1, B_2, \dots, B_{i-1}, B_i, B_{i+1}, \dots, B_n$$

$$H_0, H_1, H_2, \dots, H_{i-1}, H_i, H_{i+1}, \dots, H_n$$

插值公式为：

$$H = \frac{(B-B_1)(B-B_{i+1})}{(B_{i-1}-B_1)(B_{i-1}-B_{i+1})} H_{i-1} + \frac{(B-B_{i+1})(B-B_{i-1})}{(B_1-B_{i-1})(B_1-B_{i+1})} H_i + \frac{(B-B_{i-1})(B-B_1)}{(B_{i+1}-B_1)(B_{i+1}-B_{i-1})} H_{i+1} \quad (13)$$

关键在于确定i的值。

当 $B_0 < B < B_1$ 时， $i = 1$

这时，H取决于 H_0 ， H_1 ， H_2 这三点

当 $B > B_{n-2}$ 时， $i = n-1$

这时，H取决于 H_{n-2} ， H_{n-1} ， H_n 这三点

当 $B_1 < B < B_{n-2}$ 时

取决于 $(B-B_{i-1})$ 和 (B_1-B) 的大小，

当 $B-B_{i-1} < B_1-B$

则i应取 $i-1$ 的值，否则i取当前值i。

5. 槽漏磁导计算

槽漏磁导是槽口漏磁导和槽部漏磁导两部分组成

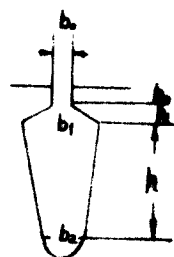
$$\lambda = \beta \lambda_L + \frac{3+B}{4} \lambda_L$$

04

式中： β ——短距系数

设 $A = \frac{b_1}{b_2}$,

$$B = \frac{h}{b_2}$$



平底槽

$$\lambda_u = \frac{B}{(1+A)^2} \frac{1}{(1-A)^2} (A^3 - 2A - \frac{3+A^4}{4})$$

05

当 $(1-A) < 0.1$ 时

$$\lambda_u \approx \frac{B}{(1+A)^2} \left(\frac{4}{3} + \frac{(1-A)^2}{5} \right)$$

(15a)

圆底槽

$$\lambda_u = \frac{1}{\left(\frac{\pi}{4} + (A+1)B\right)^2} \left\{ \frac{\pi}{384} (2\pi^2 - 3) + \frac{3+A}{4} B^2 + \frac{\pi}{4} B^2 + \frac{B}{(A+1)} \left(\left(\frac{\pi}{4} - \frac{B}{A-1}\right)^2 - 2A + \frac{B^2}{2} \left(\frac{A-3}{A-1}\right) + \frac{\pi}{2} B \right) \right\}$$

06

当 $(1-A) < 0.1$ 时

$$\lambda_u \approx \frac{1}{\left(\frac{\pi}{4} + (A+1)B\right)^2} \left(\frac{\pi}{384} (2\pi^2 - 3) + \frac{4}{3} B^2 + \frac{\pi B^2}{6} (4-A) + \frac{\pi^2 B}{32} (3-A) \right)$$

(16a)

λ_L 按一般设计手册公式计算

6. 二相对称额定运行计算

额定运行是指输出功率正好等于额定值的情形。由于各种参数都已确定，因此任意给出一个转差率，必有一定的输出转矩及输出功率相对应。通常当额定转差率代入公式，而输出功率未必正好是额定值。为此需要求出定、转子电流与输出功率的关系式。当输出功率决定后，定、转子电流也随之决定，从而可以求出电压系数。

假设电磁功率中扣除副边铝耗之后，即为机械功 P_{Ω} 。

$$P_Q = P_s + P_{fw} + P_s \quad (17)$$

式中: P_s —— 输出功率

P_{fw} —— 机械损耗

P_s —— 什散损耗

从异步电机等效电路可以求出定子电流

$$\dot{I}_1 = \dot{U} / (Z_1 + \frac{Z_m Z_2'}{Z_m + Z_2'}) \quad (18)$$

$$Z_1 = R_1 + j X_1 \quad (19)$$

$$Z_2' = \frac{R_2'}{s} + j X_2' \quad (20)$$

$$X_1 \approx X_2' \quad (21)$$

$$P_Q = \frac{1-s}{s} m I_2'^2 R_2' \quad (22)$$

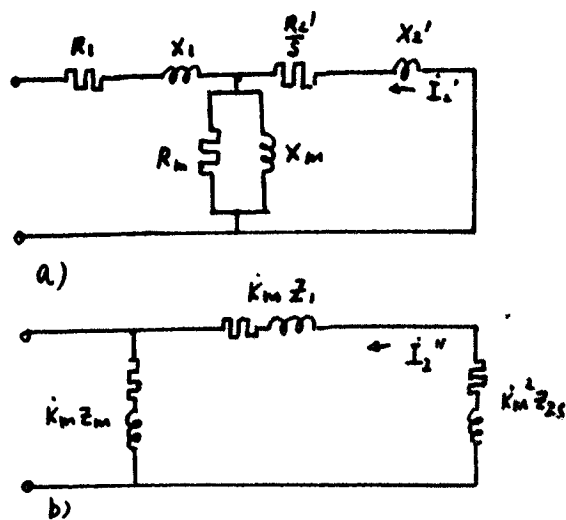


图2 异步电机等效电路

$m = 2$ 相数

$$\dot{\frac{Z_1 + Z_m}{Z_m}} = \dot{K}_m \quad (23)$$

把 P_Q 式中的 s 值代入求电流的式子, 可得

$$I_2'' = \sqrt{(U_N^2 - \sqrt{u_N^4 - 2RP_Q U_N^2 - (XP_Q)^2}) / (X^2 + R^2)} / 2 \quad (24)$$

式中

$$R = R_e (\dot{K}_m (Z_1 + \dot{K}_m Z_2)) \approx K_m (R_1 + K_m R_2')$$

$$\begin{aligned} X &= I_m (\dot{K}_m (Z_1 + \dot{K}_m Z_2)) \approx K_m (X_1 + K_m X_2') \\ &= K_m (1 + K_m) X_1 \end{aligned} \quad (25)$$

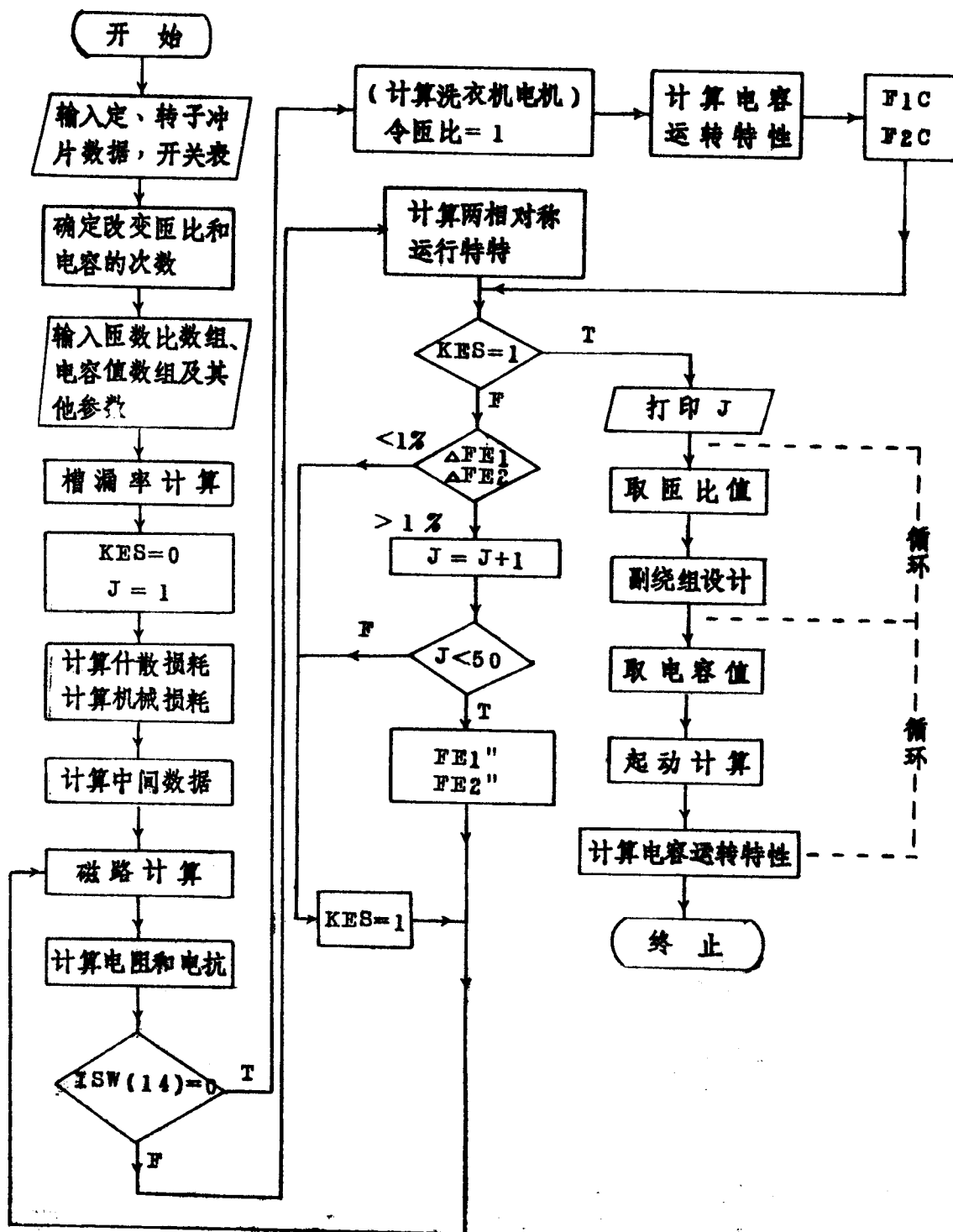
$$\dot{I}_2' = \dot{K}_m \dot{I}_2'' \quad (26)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2'' + \dot{I}_{00} \quad (27)$$

式中 $\dot{I}_{00}$ 为理想空载电流。

考虑到 $\dot{I}_{00}$ 及 $\dot{I}_2''$ 的相位关系, 可以求出 I_1 的有功分量和无功分量, 从而按通常公式求出电压系数 KEI 及 $KE2$ 。

图1 电容电动机计算FORTRAN 框图



参 考 资 料

- (1) Theory and Design of small induction motors
C.G.Veinott 1959
- (2) 单相异步电动机 1981.8 四机部微电机情报网印
- (3) РАСЧЕТ АСИНХРОННЫХ МИКРОДВИГАТЕЛЕЙ
ОДНОФАЗНОГО И ТРЕХФАЗНОГО ТОКА
И.М. ЛОПУХИНА И
Г.С. СОМИКИНА 1961

2 有限元法在鼠笼式异步电机中的应用 ——饱和涡流场的分析和起动电流的计算

上海市电机技术研究所产品室 濮存德

摘要：本文介绍应用有限元法求解异步电机参数的特点是：采用复数向量磁位求解包括涡流区的电机横截面电磁场分布；考虑了铁磁材料的饱和效应，并处理了由于磁场饱和导致磁场强度波形畸变的影响；问题归结为求解一组复数非线性代数方程，编制了复数 LDL^T 分解法程序求解该方程组，获得满意的收敛解；以两个规格的异步电动机为例，计算了起动、空载电流及堵转特性等，数值解与实测值基本一致。

本文曾发表于《电机技术》1981年第2期·第16页~23页。

3. 微电机噪声的控制

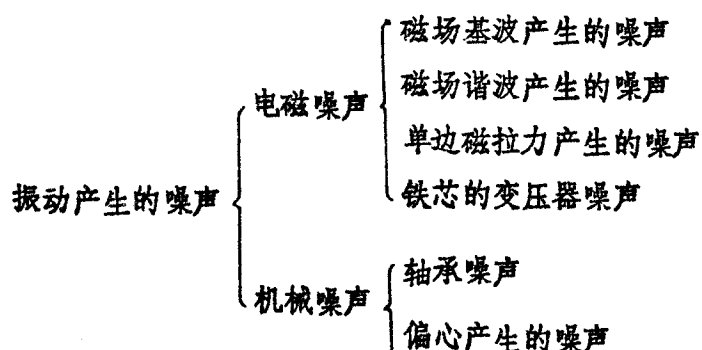
合肥工业大学 黄礼文

一、微电机噪声的影响及其噪声源

噪声是人们不需要的声音，讨厌的声音。环境噪声超过一定限度，会引起耳聋、神经衰弱和心血管病等疾病，对人的健康危害很大。这种强噪声的影响是积累的，可能由暂时性疾病发展成永久性疾病。现代工业化大生产使环境噪声成为公害。电机是现代工业最重要的一种动力机械，也是一种重要的噪声源。在发电厂和大型轧钢厂内大型电机产生的噪声有时高达110-130db(A)，使工作人员难以忍受。因此，环境保护和劳动保护方面对减小噪声提出了迫切要求。我国国家劳动总局和卫生部颁布了“工业噪声卫生标准”，已从80年试行。微电机的噪声虽不那么严重，但微电机数量大，与人们的生活密切相关。微电机的噪声会破坏人们宁静舒适的生活环境和工作环境。象家用电器中的微电机，如洗衣机电机、电风扇电机等，如果噪声大，就会使人讨厌，使该产品丧失竞争能力。目前有的洗衣机电机噪声大，在一楼使用在三楼还能听到它的声音。这种引起“四邻不安”的产品，如不降低噪声，将有可能引起邻里纠纷和社会问题。

控制这种噪声，要从控制微电机的噪声源着手。噪声产生的根源有二种：一是振动（如锣声），二是湍流（如汽笛声、开水灶放气的声音、喷气式飞机的声音，风扇声等）。振动产生声音必须有三个条件：一、发声体（如锣等），二、作用在发声体上的力（如锣锤敲锣的冲击力），三、传声介质（空气、液体、固体等）。因此，控制发声体的发声特性及其所受的力是控制噪声源的根本措施之一。微电机的噪声源也是振动和湍流。湍流产生的噪声主要由风扇的发声特性和转速决定。风扇的发声特性及其控制是涉及声学领域的课题。这里主要介绍异步电机振动产生的噪声的控制。

在异步电机中振动产生的噪声成分如下：



异步电机振动产生的噪声成分

三 电磁噪声

国内外许多作者的研究成果表明，对电磁噪声的研究已经达到比较成熟的地步。由于各种电机差别很大，结构和几何尺寸各不相同，特别是近年来微电机在理论、结构和工艺等方面发展很快，在电磁噪声的研究方面，并不是所有问题都解决了。许多研究资料表明，电磁噪声是电机噪声的重要成份。许多微电机的实践表明，在一些噪声高的微电机中电磁噪声是电机噪声的主要成份。分析电磁噪声，要从分析电机里的各种电磁力入手。作用在微电机气隙内单位面积上的径向电磁力由马克斯维尔公式决定：

$$P_a = \frac{B_\delta^2(\alpha, t)}{2\mu_0} \quad \text{牛/米}^2 \quad (1)$$

式中 α —— 表示气隙中某点空间位置的角度

t —— 时间，秒

P_a —— 气隙某点单位面积上的径向电磁力，

$$P_a = P_a(\alpha, t)$$

$B_\delta(\alpha, t)$ —— 气隙中 α 处径向磁密波的瞬时值，韦/米

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ 欧} \cdot \text{秒/米}$$

公式(1)表明，如果求出了气隙中径向磁密波 $B_\delta(\alpha, t)$ ，即能求出单位面积上的径向电磁力 $P_a(\alpha, t)$ 的分布规律。假如进一步求出了微电机的发声特性，则微电机噪声的声功率和其他参数也不难求出。所以，控制 $P_a(\alpha, t)$ 是控制微电机噪声的重要措施。

异步电动机的气隙磁密等于气隙磁势与气隙比磁导的乘积，在忽略铁芯磁压降时， $B_\delta(\alpha, t)$ 的表达式可写成以下形式：

$$B_\delta(\alpha, t) = F(\alpha, t) \Lambda(\alpha, t) \quad (2)$$

式中 $F(\alpha, t)$ —— 电机合成磁势

$\Lambda(\alpha, t)$ —— 电机气隙比磁导

将 $F(\alpha, t)$ 和 $\Lambda(\alpha, t)$ 用傅立叶级数表示，然后将(2)式代入(1)式后，即可求得 $P_a(\alpha, t)$ 的表达式。经过适当的数学变换， $P_a(\alpha, t)$ 为一个气隙行波的表达式， $P_a(\alpha, t)$ 在习惯上叫力波或电磁力波，其形式如下：

$$P_a(\alpha, t) = \sum_{r=0}^{r=\infty} A_r \cos(r\alpha - \Omega_r t) \quad (3)$$

式中 r —— 电磁力波的阶数， $r = 0, 1, 2, 3, \dots$

Ω_r —— r 阶电磁力波的角频率

A_r —— r 阶电磁力波的幅值

公式(3)表明：异步电机气隙的电磁力波仍可用傅立叶级数表达；每一阶电磁力波的转动角速度为 $\Omega r / r$ ；对气隙中某一点每一阶电磁力波变化的频率为 $\Omega r / 2\pi$ ；作用在某一点的径向电磁力为各阶电磁力波在该点的代数和。

各阶次电磁力波对电机的作用如图(2)。

图(1)各阶次电磁力波作用示意图

图(1)表明：0阶次电磁力波对电机的作用，类似一个圆柱容器内部压力大小变化而使容器径向胀、缩；1阶电磁力波的作用为一沿气隙转动的单边磁拉力波；其他各阶次电磁力波的极数均为 $2r$ 。

各阶次电磁力波 ($r > 0$) 在一个力波极距范围内产生的径向电磁力总和 F_r 等于：

$$F_r = \frac{D_1 L}{r} P_{ar} \quad \text{牛} \quad (4)$$

式中 D_1, L ——定子内径和长度，米

$$P_{ar} = \frac{(\Sigma B)^2}{2 \mu_0} \quad \text{牛/米}^2$$

B ——产生 r 阶次电磁力波的气隙磁密，韦
 r 阶次电磁力波的频率 f_r 为：

$$\begin{cases} f_r = k \frac{Z_s}{P} (1-S) & (5) \\ f_r = k \frac{Z_s}{P} (1-S) \pm 2 & (6) \end{cases}$$

式中 Z_s ——转子齿数

P ——电机极对数

S ——电机的转差率

k ——系数， $k = 1, 2, 3, 4, \dots$

公式(4)-(6)表明：在各力波极距范围内径向电磁力的总和随着力波阶次增加而减小；其频率随电机转差率的变化而变化。有些异步电动机和高速异步电动机在启动过程中发生较大的振动和啸叫声，就是由于在一定的转速时某阶次电磁力波的频率与电机定子或转子的固有振动频率接近或相等形成的。

各阶次电磁力波的影响如图(3)所示。

图(2)表明：低阶次电磁力波的极数 $2r$ 少，极矩大（即力臂长）且幅值较大，引起的振动和噪声较大；高阶次电磁力波的极数 $2r$ 多，极矩小（即力臂短），且幅值

较小，引起的振动和噪声也小。当电磁力波变化的频率接近或等于电机定子或转子的固有振动频率时，则会产生较大的振动和噪声。因此，要特别注意低阶次（ $r = 0, 1, 2, 3, 4$ ，等）电磁力波的作用，如果尺寸较大，则较高的阶次也要注意。

理论分析证明：产生低阶次电磁力波的槽配合数为：

$$\begin{cases} |Z_1 - Z_2| = r & (7) \\ |Z_1 - Z_2| = 2P + r & (8) \end{cases}$$

式中 Z_1 —— 定子槽数

公式(7)，(8)表明：等槽配合或近槽配合将产生较大的电磁力波；定转子槽数差接近或等于电机极数时，也会产生较大的电磁力波。这是设计低噪声电机应当避开的条件。

通过控制电磁力波来减小异步电机振动和噪声的主要措施是：1. 降低气隙磁密，2. 磁路不饱和，3. 适当选择定转子槽数和槽配合，4. 转子斜槽，5. 工艺上用粘结剂粘结定子冲片，6. 恰当设计定子绕组以减少谐波，7. 适当增大气隙长度，8. 减少偏心及磁不平衡。

三 机械噪声

在机械力产生的噪声中，偏心冲击力产生的噪声可通过提高同心度和转子动平衡的办法解决，轴承噪声通常成为主要成份。在微电机常用的滚珠轴承和粉末冶金轴承中，前者由于滚珠和夹持器在内外圈之间滚动、互相撞击和摩擦，产生的噪声常常比后者大。减少滚珠轴承噪声的主要措施是：1. 采用低噪声滚珠轴承，如Z系列电工专用轴承（该轴承标准中有噪声指标）。2. 在〔FV〕值许可时尽量选用较小的轴承。3. 轴承安装尺寸要有较高的精度。4. 防止轴承轴向窜动，如加波形弹簧片等。5. 选用纯净的锂基或合成油基润滑脂，保持适当的充填量，防止过热。7. 轴承清洗要干净无尘（如用超声波清洗）。8. 轴承室，工具和装配间都要干净无尘。9. 装配工艺要合理，严防敲击。

如果要求电机噪声小于40db(A)（在距离30cm处测量），通常采用低噪声粉末冶金含油轴承，它的特点是：金属粉末颗粒小并含有减摩材料，含油孔隙弥散均匀，有适当的强度和含油率，能最大限度形成油膜并减少启动时的摩擦死点。据报导，北京微电机厂采用北京粉末冶金厂的铁-铜-石墨低噪声含油轴承，制造D₀D_T50-4型异步电机（50瓦，1320转/分），噪声指标可达到<30db(A)（在30cm处测量），合肥工业大学采用成都电机厂的DCu ϕ 10 $\times$ ϕ 10 $\times$ 10型轴承，研制的55T25GD型磁滞电机（7瓦，1500转/分）噪声达到24.5db(A)（在10cm处测量），该机含油轴承噪声最大也不会超过24.5db(A)。

减少粉末冶金含油轴承噪声的主要措施是：1. 采用低噪声含油轴承，如成都电机厂的DCu型、Fe型等。2. 在〔FV〕值满足要求的条件下尽量选用较小的轴承。3. 超声波清洗。4. 真空浸油。5. 润滑油的运动粘度要适中，挥发性小。如特14#精密

仪表油，运动粘度（50℃）为22.5-28.5厘沲，高低温精密仪表油为36厘沲均有采用。6.提高轴承室的加工精度并与轴承外圆有合适的公差配合。7.按低噪声要求设计轴承间隙的大小。取轴承间隙比值（ $\frac{C}{D}$ ）=0.001-0.002（式中C——单面轴承间隙，D——轴径）。8.提高轴径的硬度，圆度和表面光洁度。9.轴承室有储油机构和减振机构。10.轴承表面光洁度要高，出厂时应达到要求，非不得已不再加工。11.工艺要恰当，如工装合理，轴承安装正确，防止敲击和碰伤等。12.零件、工具和装配环境要清洁无尘。经验证明：对采用粉末冶金轴承的微电机，在电磁设计和结构设计合理的情况下，轴承噪声往往起决定性影响，而轴承噪声还要依赖工艺质量。

四 发声特性

各种电磁力和机械力作用于电机这个发声体产生电磁噪声和机械噪声。控制作用是控制噪声的一方面；控制发声特性则是另一方面。电磁力作用于定子产生噪声，与敲击圆柱形铁桶而发声是相似的。如果端盖的发声特性较好，定子上的电磁力和轴承上的力都会引起端盖产生较大的振动和噪声。文献资料证明：当电机内这些作用力的频率与电机零部件共振频率相同时，便会产生共振，产生较大的噪声。德国H. 约尔丹用中小型异步电机做过一个著名的实验。他设计了六台4极异步电机，功率为5, 10, 15, 30, 100, 200KW，定转子槽数都是36和30，气隙磁密和线负荷都相同。实验表明：虽然电机的电磁力波相同，但电机在5, 10, 100和200千瓦时噪声较小，在15千瓦时噪声较大，在30千瓦时噪声最大。这一方面表明对大小不同的电机没有一个都适用的槽配合；另一方面，分析共振特性后证明，对15千瓦和30千瓦电机，零部件的共振频率与电磁力波中某些较强力波的频率接近，而其余4台则相距较远，即说明零部件共振频率不仅与结构和材料有关，还与几何尺寸的大小有关。

目前对电机零部件发声特性的研究还处在初级阶段，还不能在设计时进行准确的控制，但已得到一些有益的经验。例如，增加端盖厚度和刚性能有效抑制轴承噪声，降低铁芯轭部磁密增加铁芯轭部厚度对降低电磁噪声有明显效果，在一些微电机中象洗衣机电机，电冰箱电机，把定子铁芯做成方形并粘结成一个整体，都使发声特性降低。研究电机零部件发声特性的文献表明：只有采用较复杂的物理模型和数学模型，才有可能得到较好的结果。随着电子计算机的应用，可以预料，电机发声特性的准确计算和控制问题，也是可能解决的。

五 结论

微电机噪声的控制是涉及电机电磁设计，结构、工艺和发声特性的综合问题。噪声指标的高低特别对家用电器电机的销路，成本和价格有较大的影响，需要慎重地确定。微电机噪声的计算与电磁计算、机械计算和温升计算一样已成为微电机设计不可缺少的组成部分。微电机的噪声，只要真正认真对待，并不是不能解决的问题。