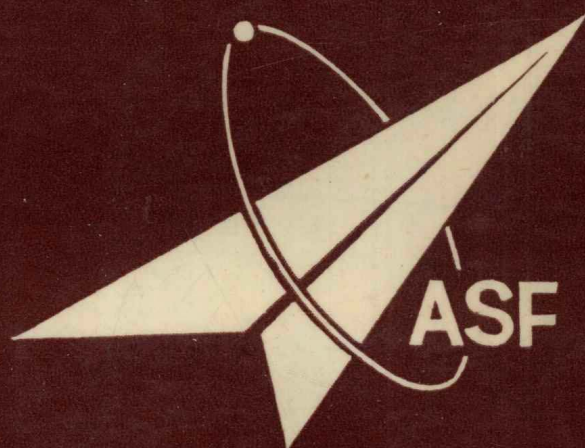


航空科学基金论文集

(4)



航空科学基金办公室 编

航空工业出版社

航空科学基金论文集

(4)

航空科学基金办公室 编

航空工业出版社

1 9 9 3

(京)新登字 161 号

内 容 提 要

本分集收集了自 1986 年至 1989 年度航空科学基金资助项目部分研究论文,经同行专家评审后选编而成。内容包括机载机电设备技术,试验、测试与计量校准技术和软件科学及其他交叉科学等三个专业类别。前一部分为论文全文登载,大多是尚未公开发表过;后一部分为论文摘要,已在其它刊物发表过的论文,并在其后注明了登载刊物的名称和期号。

全书约 55.1 万字,包括有各种图表、公式和实验数据,图文并茂。对从事航空科学基金研究工作的人员,可作为相互学习和交流资料;对从事其它研究阶段任务的技术部门和人员,亦是很有实用价值的参考借鉴资料。

航空科学基金论文集 (4) 航空科学基金办公室 编

航空工业出版社出版发行
(北京市安定门外小关东里 14 号)
— 邮政编码: 100029 —
北京地质印刷厂印刷

1993 年 3 月第 1 版	1993 年 3 月第 1 次印刷
开本: 787×1092 毫米 1/16	印张: 22.25
印数: 1—1500	字数: 551 千字

ISBN 7-80046-463-6/V · 111

定价: 22.00 元

勇于探索 攀手登
航空科技高峰

祝贺航空科研基金论文
集出版

何文治
一九九二年春



加强基础研究
提高航空科技水平
祝贺航空科学基金论文集出版
顾诵芬

序 言

航空科学基金是原航空工业部于 1985 年 11 月开始设立的。它是科研体制的一种改革,将以前预研经费按行政系统拨款的制度改为一部分由个人申请,自由竞争,择优支持的方法。此外,实施航空基金制也是航空科研发展的需要。虽然航空科研经费中有一定比例用于预先研究,但由于研制的产品型号多,预先研究主要集中于直接服务于型号研制的应用研究方面,因此,基础研究和应用基础研究得不到重视和支持。长此下去,必然会影响航空产品的技术先进性,也严重影响我国航空科研进一步的发展。所以,航空科学基金制的实施是提高我国航空科技发展潜力的一个重要措施。

航空科学基金设立理事会,是基金的领导和决策机构。理事会下设航空科学基金办公室,负责日常工作。航空科学基金每年申请一次,由申请人通过基层单位自由申请。申请项目先由同行专家进行评审,在此基础上,由理事会最后审查批准。

在 1986 年至 1990 年这五年期间,航空科学基金批准支持的项目共计 788 项,总的支持经费为 2190 万元。

基金项目的研究期限为 2~3 年,从 1988 年开始出成果。在 1988 年至 1990 年这三年期间,航空科学基金的资助项目在国际学术会议上发表论文 189 篇,在国际学术刊物上发表 125 篇;在国内学术会议上发表论文 475 篇,在国内学术刊物上发表 507 篇,此外还有出版专著的 9 项。研究成果已鉴定的有 46 项,已推广的 4 项,获得专利的 7 项,获得部级和其它科技进步奖的有 13 项。大多数成果在科学和技术上起到开拓的作用,不少达到了国际先进水平。

航空科学基金制虽然实施的时间不长,但已经显示出明显的作用:

- 1 深化了科研体制的改革。它打破了按行政系统拨款的老办法,在科研资金的分配中引入了竞争体制,激发了科技人员的进取精神,提高了经费的使用效率。

- 2 推动了基础研究和应用基础研究的发展。实施基金制以后,基本上扭转了这两类研究的萎缩趋势,使基础研究、应用基础研究和应用研究这三类研究得到协调发展。航空科学基金已经出了一批高水平的

成果,为提高我国航空科学和技术的水平作出了贡献。

3 促进了人材的培养。在这五年里,参加基金项目研究的共计有3843人,其中有许多是学科带头人。重要的是基金项目负责人里,中、青年(55岁以下)占总人数的68.2%。参加基金研究的在读研究生达1440人。可见基金对培养人材,特别是中青年人材的重要作用。

4 提高院校的科研水平。85%的航空科学基金项目集中在各航空高等院校。有了基金的支持就能够提高院校的科研水平和跟踪世界先进科技的发展,促进教学和科研的结合,发挥院校在航空科研中的带头作用。

为了展示这几年基金研究的成果,并希望达到成果交流和推广应用的目的,我们编辑出版了首批《航空科学基金论文集》。它包括了这几年航空科学基金项目的部分论文。我们希望通过论文集的出版,可以使更多的人能深入了解基金研究的成果,从而使这些成果有机会向应用方面转化,并且使今后的基金研究在此基础上向更深更高的方向发展。

从现在起,每年都将完成近200项的基金研究项目。我们打算今后继续出版基金论文集,为展示基金研究成果和将它们推向应用,不断地创造条件。

航空科学基金制还很年青,需要大家的关心和重视。希望各级领导能更多地支持和指导航空基金的工作,参加基金项目的同志应努力将研究提高到更高的水平。希望从事应用研究和产品研制的同志能更多地了解基金研究成果,将它们推向应用。使航空科学基金在提高我国航空科学技术水平方面作出更大的贡献。

方宝瑞

目 录

H. 机载机电设备技术 论文及论文摘要

地磁传感器电磁场的有限元计算与计算机辅助优化设计	丁 振 等	(3)
三轴捷联磁航向系统罗差分析与补偿	庄继东 等	(11)
飞机电气系统总线智能接口及其内部软件研究	李玉忍 等	(18)
管路与非稳定内流的耦合振动研究	张毓铨 等	(23)
多功能微带天线	王宝发 等	(30)
X 波段低 RCS 一维单脉冲阵列天线	吕善伟 等	(43)
集成化多普勒频率跟踪	朱惠英	(53)
电液一体化作动器的电驱动系统	朱耀忠 等	(67)
新型电液一体化机载作动系统	孙明迪 等	(72)
“人·座舱·热环境”系统的数学模型	袁修干 等	(78)
航空电气负载管理中心的智能终端	陈鸿茂 等	(92)
脉冲 CO ₂ 激光发射电源	唐建富	(107)
8095 控制的交流伺服电动机	严仰光 等	(113)
永磁交流伺服电动机系统分析	朱震莲 等	(113)
步进电动机齿层数据库及其应用	蒋忠玮 等	(114)
复合激磁磁系统三维有限元分析及其对场—路模型的修正	蒋忠玮 等	(114)
飞机发电机控制器的研究	胡克江 等	(115)
飞机电气负载管理中心的的研究	胡克江 等	(116)
飞机电气系统多路传输总线接口通讯软件	蒋志扬 等	(116)
氟利昂的热力性质方程式 (SI 制)	陈德雄 等	(117)
氨的热力性质方程式 (SI 制)	陈德雄 等	(118)
蒸气压缩式制冷循环参数计算及 分析计算机辅助设计	陈德雄 等	(118)
液冷式个体热调节的二维体温调节数学模型	袁修干 等	(119)
液冷服热力性能实验研究	徐小江 等	(119)
人体分层媒质内的微波聚焦场	王宝发 等	(120)

I. 试验、测试与计量校准技术 论文及论文摘要部分

静态焦散线仪及其光路分析	党进宝	(123)
--------------------	-----	-------

镜面移植法及其在现代光测力学中的初步应用	党进宝 等	(129)
裂尖区域应力状态的研究	党进宝	(134)
利用白光频谱滤波法检测金属构件塑性区扩展及塑性变形	徐绪笃	(139)
附加位移法在散斑位移测量中的应用	赵建林 等	(143)
光纤 pH 值测试系统的研究	吕俊芳	(146)
CCPD 光电自准直测角系统	常庆之 等	(149)
发动机进口流场动态压力畸变数据采集系统性能分析与实验研究	王宗源 等	(158)
一个用于发动机动态畸变实时处理的并行计算机采集系统	李永锡 等	(170)
一种飞行轨迹重构的多级解耦 UD 分解信息滤波及平滑方法	张友民 等	(182)
信息平方根滤波—平滑方法及其在飞行数据相容性检验中的应用	张友民	(188)
飞行轨迹重构的一种二阶滤波方法	张洪才 等	(195)
声表面波 (SAW) 传感器温度补偿方法的研究	陈 明 等	(200)
测试复合材料剪切性能的带 45°切槽圆盘试件	迟之范	(207)
多目标包络间隙的数学模型	李金章	(213)
包络模型化微机处理	陶育文	(219)
瞬态空气等离子体场的全息技术研究	丁汉泉	(225)
风洞外挂物投放异向同步合成实验技术	程仁全 等	(225)
飞机机械故障诊断专家系统	郑叔芳	(226)
声表面波 (SAW) 传感器的理论研究	陈 明 等	(227)
用激光多卜勒风速仪 (LDA) 研究畸变模拟器的三元速度场	林其勋 等	(228)
一种实时飞行轨迹重构方法	张友民 等	(228)
碳纤维的强度与韦珀分布的差异及其影响	迟之范	(229)
单向复合材料的平面应力状态实验及强度分析	马新政 等	(229)
基体材料强度的实验研究	马新政	(230)

J. 软科学及其他交叉科学 论文及论文摘要部分

马尔科夫转移概率矩阵一种实用求解方法及证明	倪建刚 等	(235)
DEA 法在评价企业技术进步经济效益中的应用	潘杰义 等	(242)
SD-Markov 复合模型在远东机械制造公司人才规划中的应用	倪建刚 等	(248)
企业的动力机制与约束机制研究	陈良猷 等	(254)
企业应变能力的量化研究	陈良猷 等	(265)
高新技术的技术水平及其效益的量化研究	陈良猷 等	(280)
基金项目评价、管理决策系统	魏挹湘	(294)
制造工程计划管理的专家仿真系统	冯允成 等	(303)
MIS 集成开发环境的设计与实现	王 强 等	(312)
鸟撞击叶片时载荷因素的数值模拟分析	尹 晶 等	(318)
有扩散不稳定性的四阶反应—扩散系统的空间周期结构	陆启韶	(325)

研究非线性稳定性的能量—卡斯米尔函数法	陆启韶 等	(325)
液压管道脉动流问题的适定性与激波	成如翼 等	(326)
两自由度耦合 Van der pol 振子的拟主振动解	刘炼生 等	(327)
一种用于非线性振动系统的模态分析方法	刘炼生 等	(328)
离散事件系统的 Petri 网图仿真	黄圣国	(329)
计算机构造 Liapunov 函数的设想与做法	支希哲 等	(329)
构造 Liapunov 函数的变动差值法	支希哲 等	(330)
离散时间系统 ляпунов 函数的构造与稳定性判定	支希哲	(331)
模糊信息环境下的综合评判	郭育红 等	(321)
投资专家决策支持系统的研究与实现	侯崇明 等	(332)
模糊可靠性的概念和方法探讨	李连杰	(333)
刚体动力学的凯里—克莱因参数方法	肖尚彬	(334)
多体系统动力学与空间技术	肖尚彬	(335)
多柔体开链系统运动分析的四元数方法	李军强	(335)
柔性机械手动力学研究	李军强	(336)
树形多刚体系统通路矢量矩阵的一种算法	蒲致祥	(337)
一种决策支持系统及其在人才信息系统中的应用	夏国平 等	(338)
叶片鸟撞击的理论和实验研究	高德平 等	(338)
柔性机械手系统的动力学方程	蔡泰信 等	(339)
柔性机械手变形的描述	石少卿 等	(339)
柔性机械手运动学研究	石少卿 等	(340)
编后记	陈 勇	(341)

H. 机载机电设备技术

论文及论文摘要部分

地磁传感器电磁场的有限元计算与计算机辅助优化设计*

西北工业大学 丁 振 刘昌旭 刘盛武

摘 要

本文提出了一种地磁传感器优化设计的方法,探讨了一种以有限元素法为基础的场域分析技术,并给出了计算机辅助优化设计过程及其结果,最后比较了理论计算值与实验值,给出了几点重要结论。

前 言

现代科学技术的进展,充分显示了电磁场理论在无线电工程及电气工程应用中的重要地位,尤其 60 年代以来,现代计算机技术的飞速发展,对电磁场理论的工程应用产生了具有决定意义的推动作用。许多用解析方法很难解决的复杂的电磁场问题,可以借助计算机获得很高精度的离散解,这在过去是不敢想象的。

有限元素法是根据变分原理和离散化求取近似解的方法。这种方法在网络剖分上很灵活,所以在工程上得到广泛应用。有限元素法最初应用于力学计算,60 年代中期引入电机电磁场领域,以后又逐步应用到变压器及其它电气元件电磁场的计算。有限元素法比传统的简化磁路分析法的计算精度高,约可提高到 $\pm 5\%$,由此可见其应用价值。

本文研究的地磁传感器,是一种敏感地磁场进而测量磁航向的装置。从原理上说,它是一种利用交、直流磁场同时作用下其铁芯具有间断饱和特性的原理而制成的磁通门传感器,其特点是灵敏度高、工作可靠及动态性能好,因此获得了广泛应用。地磁传感器的分析与设计,通常采用经典的数学分析法或简化磁路计算法,计算结果与实际值有较大差异。本文用有限元素法计算地磁传感器的电磁场参数,并针对激磁电流做了优化设计,大大提高了计算精度。

地磁传感器的工作原理

在地磁场内水平放置的细长软铁棒(图 1),受地磁水平分量的作用,被磁化而具有一定大小的磁感应强度 B_s ,其方向与软铁棒的中心线方向一致,磁感应强度的大小与地磁水平分量的强度及软铁棒的磁导率 μ 成正比,还与地磁水平分量和软铁棒轴线之间夹角的余弦成正

* 本文在 IEEE IECON'89 年会发表并由会议录出版

比, 即:

$$B_c = \mu H \cos \psi \quad (1)$$

地磁水平分量在软铁棒中产生的磁通 φ_c 是磁感应强度与软铁棒截面积 S 的乘积:

$$\varphi_c = S \mu H \cos \psi \quad (2)$$

软铁棒的截面积 S 是不变的, 如果地磁场水平分量 H 和软铁棒的磁导率 μ 为已知, 则 φ_c 与 ψ 有关。所以测量 φ_c , 即可获得软铁棒的中心线与地磁水平分量之间的夹角。如果将软铁棒装在某一载体上, 使其与载体纵轴平行, 就可测量载体的磁航向角 ψ 。

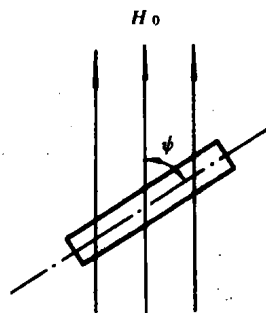


图1 地磁场中的软铁棒

地磁传感器工作的物理基础是利用软磁材料的磁化特性 (图2)。在二根平行安置的铁芯上绕有激磁线圈及测量线圈 (图3), 激磁线圈接交流电。于是由交流电形成的交变电磁场将

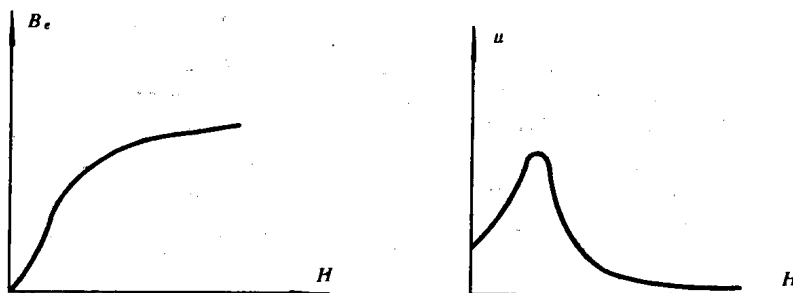


图2 软磁材料磁化特性

使铁芯反复磁化, 从而周期地改变磁导率 μ 。如果适当选择铁芯横截面积和激磁线圈匝数, 使铁芯内磁感应强度在激磁电流峰值时达到饱和, 则每当激磁电流变化一周时, 铁芯内磁感应强度将饱和两次, 磁导率也相应变化二周, 故铁芯的磁导率的变化频率是激磁电流频率的二倍。当铁芯磁导率不断变化时, 测量线圈的两端将感应出倍频的感应电势, 而二根铁芯中由激磁电流所产生的基频的交变磁通对测量线圈的作用则正好抵消。因此有以下计算公式:

$$E = -W_2 S H \frac{d\mu}{dt} \quad (3)$$

由于用单相地磁感应元件不便于直接测量磁航向, 实际应用的是三相地磁感应元件, 它由三个单向地磁感应元件组成 (图4)。

三相感应电势与磁航向角的关系是:

$$e_1 = E_m \sin 2\omega t \cos \psi;$$

$$e_1 = E_m \sin 2\omega t \cos(\psi + 120^\circ)$$

$$e_1 = E_m \sin 2\omega t \cos(\psi + 240^\circ)$$

(4)

$$e_1 : e_1 : e_1 = \cos \psi : \cos(\psi + 120^\circ) : \cos(\psi + 240^\circ)$$

(5)

由此可见, 在每一航向上, 三相感应电势之间有一定的比例关系, 也就是说, e_1 、 e_1 、 e_1 三者的比例决定了磁航向角 ψ 的大小。

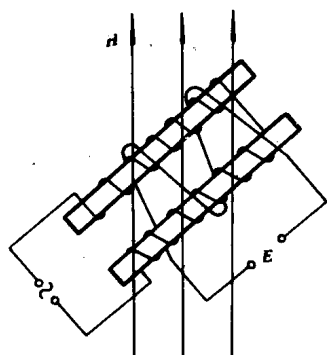


图3 单相磁敏感元件

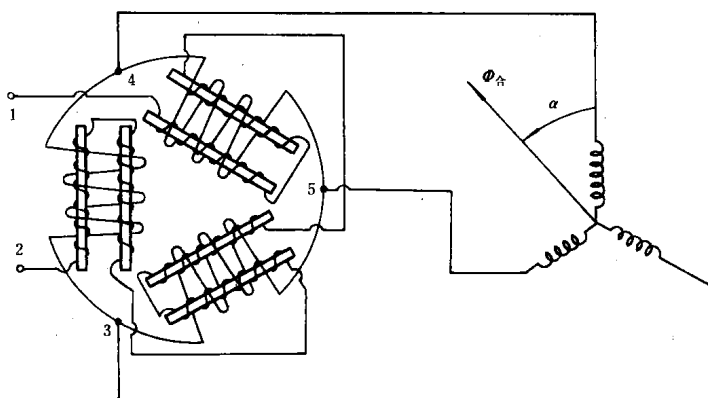


图4 三相地磁感应元件

电磁参数的有限元计算

本文研究的地磁传感器，是我国自行设计生产的用于飞机磁航向测量的装置。其敏感部分由二片相互平行迭放的正六边形铍莫合金铁芯及激磁线圈、测量线圈组成，合金片厚度为0.2mm，宽度5mm，正六边形外圆直径为24mm。在铁芯片的六条直边上，绕有激磁线圈，每边50匝，顺序串接。在激磁线圈上面均匀绕有测量线圈，每边500匝，对边串联反接，三相测量线圈星形连接（图5）。由于采用闭合磁路，漏磁大大减少，灵敏度很高。

在建立数学模型之前，先作几点假设：

1. 假设激磁线圈直接密绕在合金片上，形成了一层很薄的面电流；
2. 不考虑涡流及磁滞影响；
3. 铁芯材料各向同性；
4. 激磁电流幅值稳定，电流频率为400Hz。

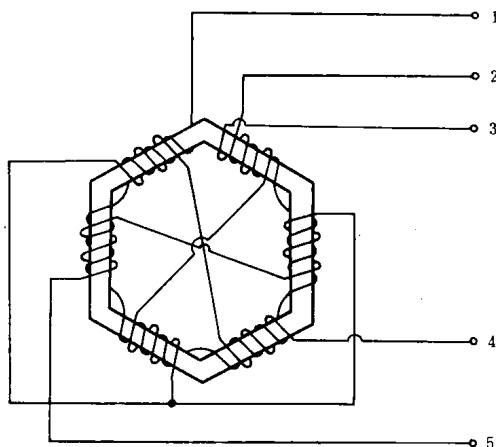


图5 地磁传感器结构简图

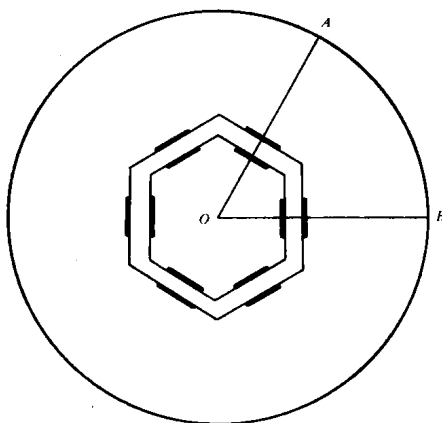


图6 二维求解域

根据传感器的结构特点，其水平切面处处相同，因此为了简化计算，可以建立二维模型，同时考虑到传感器的对称及局部对称特性，也为了便于建立合适的边界条件，我们可以用 $\overline{OA}$ ，

$\widehat{OB}$ 及 $\widehat{AB}$ 围成的区域作为求解域。

选择矢量磁位作为求解函数，得下列数学模型：

$$\begin{cases} \Omega: \frac{\partial}{\partial x} \left(r \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(r \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -JZ \\ S_1: A_z = A_{z_0} \\ S_2: \frac{\partial A_z}{\partial n} = -H_t/r \end{cases} \quad (6)$$

边界条件为：

1. OA , OB 为二次齐次边界，计算时可不予考虑。
2. 单元边上的面电流作为交界条件处理。
3. $\widehat{AB}$ 是与磁力线平行的第一类边界，因此取 $A_z=0$ 。

用有限元素法计算电磁参数时，首先寻找一个与式 (6) 等价的条件变分，并令该条件变分取极小值，该条件变分是：

$$\begin{cases} W_{(A_z)} = \iint_{\Omega} \left(\int_0^B r B dB \right) dx dy - \iint_{\Omega} J_z A_z dx dy + \int_{\delta_2} H_t A_z d\delta = \min \\ S_1: A_z = A_{z_0} \end{cases} \quad (7)$$

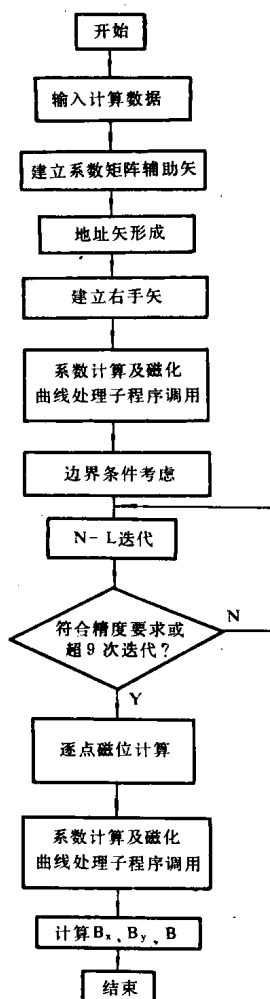


图7 电磁参数计算流程图

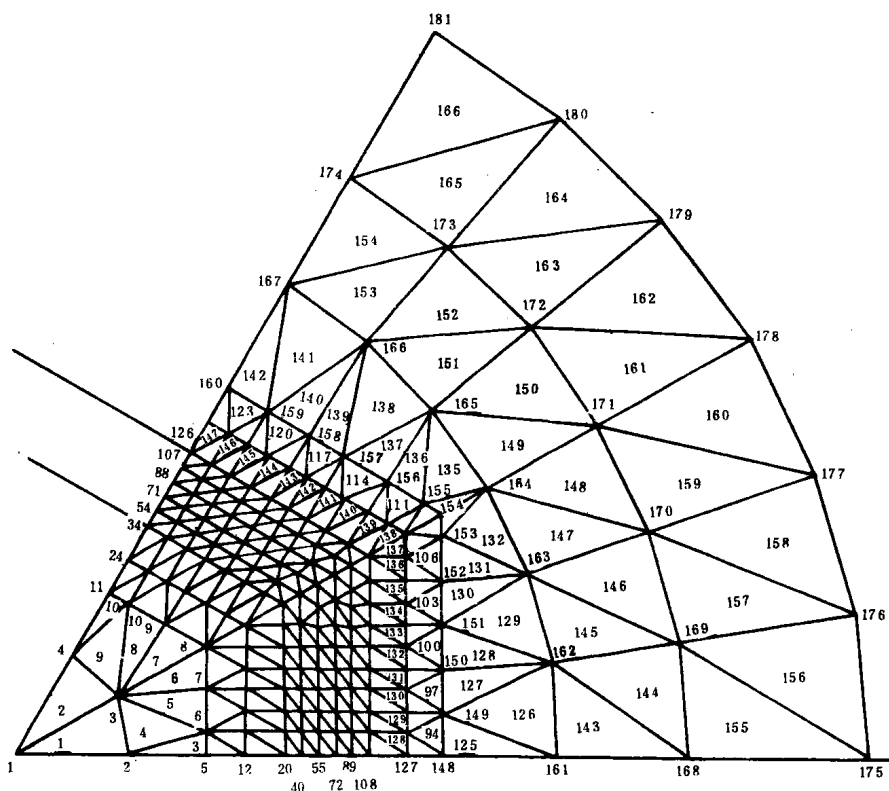


图8 单元剖分图

式中,

$$B = \sqrt{\left(\frac{\partial A_z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial A_z}{\partial y}\right)^2} \quad (8)$$

然后利用剖分与插值的方法求各节点的 A_z , 最后按照式 (8) 计算各单元磁感应强度 B 。

实现以上计算的二维有限元程序用 FORTRAN 语言编制, 它适用媒质系数(磁导率 μ 或磁阻率 r) 随磁场而变化的情况,。区域剖分采用三角形单元。非线性方程组的求解使用了牛顿—拉斐森迭代法, 其每一次迭代, 采用变带宽—压缩存贮系数矩阵的高斯消元法。磁化曲线的处理采用线性插值法。

改变激磁电流的大小, 可得不同的计算结果:

表 1 不同电流下的电磁参数

I (mA)	60	70	80	90	110	130	160	190	220
B (Gau)	4166	4860	5554	6248	6379	6510	6707	6904	7100
H (A/om)	0.0697	0.0789	0.0916	0.1095	0.116	0.1252	0.1556	0.236	0.3506

注: 表中 B 及 H 是铁芯单元的平均值

退 磁 分 析

地球周围存在着磁场, 地磁敏感元件所感测的就是其水平分量 H_0 。然而对于铁芯而言, 因分子电流产生退磁影响, 使得铁芯内磁场强度 h 与外界磁场强度不等。为了计算 h , 必须知道 H_0 与 h 之间的函数关系, 这是和铁芯材料磁化曲线有显著区别的。它不仅与材料的磁特性有关, 而且与铁芯的几何形状及尺寸有关。铁芯内的磁场强度 h 与外磁场 H_0 的关系可以表示成下式:

$$h = H_0 - NJ \quad (9)$$

当采用实用单位制时——有理化米公斤秒安培制时:

$$J = \frac{B}{\mu_0} - h = h (\mu_r - 1) \quad (10)$$

$$\text{显然: } h = \frac{H_0}{1 + N (\mu_r - 1)} \quad (11)$$

对于具有椭球形状的铁芯, 其在均匀磁场中有均匀一致的磁化强度, 可以较精确地对去磁系数 N 进行理论计算。对于其它形状的铁芯, 磁感量的大小及去磁系数将沿铁芯长度及深度方向变化, 我们只好取其平均值, 按文献 [1] 的方法:

$$N = \frac{4S}{\pi (l^2 - \frac{c}{3} l_a^2)} \cdot \left(\ln \frac{Kl}{a+b} - 1 \right) \quad (12)$$

$$\text{这里: } K = 4 - 0.732 \left(1 - e^{-5.5 \frac{a}{b}} \right); \quad (13)$$

$$a = 5\text{mm}$$

$$b = 0.4\text{mm}$$

$$c = 0.75$$

以上 a 、 b 为铁芯横向尺寸。对于矩形截面的铁芯而言, a 、 b 分别为铁芯的厚度及宽度, 对

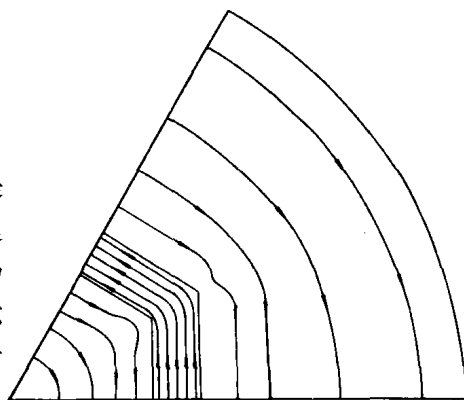


图 9 磁场分布图