



微波铁氧体器件 HFSS 设计原理 (上册)

蒋仁培 宋淑平 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

微波铁氧体器件 HFSS 设计原理

(上册)

蒋仁培 宋淑平 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书将全新的穿越方程和高频电磁场结构仿真软件(HFSS)相结合,对各类微波铁氧体器件进行了仿真设计。列举了各种结构的环行器、隔离器的设计范例,探索了获得高性能、高稳定性和高可靠性的设计途径,对其非互易性应用穿越方程进行了深入探讨;对各类变场器件如移相器、开关进行了仿真设计,应用穿越方程对其非互易相移、开关相移(或差相移)和磁化相移进行计算,提供了有效设计数据;对幅/相可控类器件如变极化器和全极化器介绍了多种实施方案,给出了仿真设计结果,理论上对法拉第旋转和变极化机制进行了探讨,用穿越方程计算了双模器件的变极化系数。在设计层面上具有一定的创新性;从旋磁理论层面上,给出了各类器件各种形式的三维电磁场穿越方程,弥补了经典旋磁器件理论中超越方程的局限性。

本书适合从事微波铁氧体器件设计的科研人员阅读,也可供电磁场理论、雷达技术等相关领域的研究者参考。

图书在版编目(CIP)数据

微波铁氧体器件 HFSS 设计原理. 上册/蒋仁培,宋淑平著. —北京:科学出版社, 2015.11

ISBN 978-7-03-046225-1

I. ①微… II. ①蒋… ②宋… III. ①微波铁氧体器件—设计
IV. ①TN61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 264619 号

责任编辑:余 丁 赵艳春 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:徐晓晨 / 封面设计:迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 11 月第 一 版 开本:720×1 000 B5

2015 年 12 月第二次印刷 印张:24

字数:466 000

定价:108.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

微波铁氧体技术及其应用,从1960年初起步至今已有半个世纪历程,经历了初级阶段—发展阶段—成熟阶段。微波铁氧体的经典理论是以旋磁材料的电磁场理论为基础的,一般通过解复杂的超越方程获得非互易性传输特性,其数理基础较深奥。而HFSS方法则是直接通过计算机求解,避免了复杂的数理问题,但导致了对设计原理理解不深。本书为弥补这点不足,提出了新的设计理念,通过穿越方程(积分方程)求解,它是场-路统一的理论,通过它与HFSS计算方法相结合,很容易获得各种形式的微波铁氧体器件的非互易特性解,解决了过于依赖HFSS软件求解而忽略了微波铁氧体器件的基本工作机制和基本工作原理的难题,推动了多种铁氧体器件如各种Y形结环行器、变场调控器件和双模铁氧体器件的发展,提高了器件的高功率、小型化、低损耗、低互调、宽频带、高温度稳定性、超(高/低)频和快速调控等性能。

本书是在上述新的设计原理和理论、新的设计手段和方法的基础上写成的。全书分为上下两册,共三篇。

第一篇 基本理论。第1章和第2章,论述了微波铁氧体材料的旋磁性——张量磁导率的基本原理。电磁波在充有旋磁介质的波导中传播,在时空域中穿越了铁氧体并引发了微波场和旋磁性的相互作用,产生了各种传输效应和非互易性能,推导出了与其相关的穿越方程,并推广其应用于环行器、隔离器等各类恒场器件和开关、移相器和变极化器等各类变场器件的设计和计算中。通过仿真设计定量地获得了器件的性能,其结果和用穿越方程积分计算结果相辅相成。

第二篇 微波铁氧体恒场器件。从第3章到第7章设计和分析了各类铁氧体恒场器件包括各种Y形结构,如集中元件型、波导型、带线型和微带型结构的Y形环行器;高功率环行器和小型化环行器、隔离器等,应用仿真设计、电磁场理论和网络分析相结合的方法进行深入研究。

第三篇 微波铁氧体变场器件。从第8章到第15章论述了各类铁氧体移相器的工作原理和设计方法,包括非互易移相器和互易移相器、圆极化移相器和多极化移相器、双模移相器和旋转场移相器、微带慢波结构移相器和表面模移相器等的设计和仿真性能及应用;并利用变磁化积分方程、耦合模积分方程,计算了各类移相器的相移;探讨了对铁氧体器件的幅相同时控制可设计成铁氧体变极化器。论及各种变场器件在雷达技术中的应用。

本书在撰写过程中,中国电子科技集团公司第十四研究所所长助理蒋微波给予了极大的关心和支持;国睿科技股份有限公司副总经理朱兆麒审阅了初稿,提出了许多修改意见;中国电子科技集团公司第十四研究所处长赵玉洁做了大量的组织协调工作;

南京广顺电子研究所所长王广顺、南京丰诚电子器件有限公司总经理张玮、北京飞行泰达微波器件有限责任公司总经理张强、北京泰格科技发展中心总经理曾献伟，及同事董胜奎、徐茂忠、范兵、黄宏伟、胡岚、罗会安、岳峰、杨秋莉、姬晓靓、杨彬、唐正龙、曾浩等参与了有关的专题讨论；李叶莉、贾元奎、唐楠、余林、蒋岳、刘雪梅、岳诚、王干等做了大量的编辑工作。在此一并表示诚挚的感谢。

限于作者知识水平有限，书中难免有不妥之处，敬请读者批评指正。

作 者

2015年6月

目 录

前言

第一篇 基本理论

第 1 章 旋磁性	3
1.1 磁矩进动方程	3
1.1.1 张量磁导率	4
1.1.2 任意磁化方向的张量磁导率	5
1.2 阻尼进动	5
1.3 铁磁共振频率	7
1.4 形状各向异性对张量磁导率的影响	9
1.5 张量磁导率的归一化表示式	9
1.5.1 张量磁导率 μ 、 κ 的磁谱曲线	10
1.5.2 有效磁导率 μ_e 、比磁导率 κ/μ 的磁谱曲线	11
1.5.3 有效磁导率 μ_e 的高场磁谱曲线和低场磁谱曲线	12
1.5.4 κ/μ 的高、低场磁谱曲线	12
1.5.5 正负圆极化磁导率 μ_{\pm} 磁谱曲线	13
1.5.6 薄片 μ_x 、 μ_y 磁谱曲线	13
1.6 本征态磁导率	14
1.7 去磁态磁导率	16
1.7.1 反平行畴理论	16
1.7.2 去磁态磁导率的统计理论	18
1.7.3 自然共振损耗	20
1.8 部分磁化状态与零场损耗	21
1.9 非线性效应	25
1.9.1 自旋波	25
1.9.2 一致进动的散射机制	27
1.9.3 第一类非线性效应	27
1.9.4 第二类非线性效应——倍频、混频、三阶互调	31
1.10 微波铁氧体材料选用	35
1.10.1 石榴石材料	36

1.10.2	尖晶石材料	39
1.10.3	材料应用的综合知识	41
1.11	微波铁氧体材料参数测试	42
1.11.1	γ 、 $4\pi M_s$ 和 ΔH 的测试	42
1.11.2	高场有效线宽 ΔH_e 的测试	49
1.11.3	低场有效线宽 ΔH_{eff} 测试	55
1.11.4	本征线宽 ΔH_0 测试	57
1.11.5	铁磁共振线宽 ΔH 的常规测试	58
1.11.6	毫米波段铁磁共振线宽 ΔH 测试	63
1.11.7	自旋波线宽 ΔH_K 的测试	66
1.11.8	介电常数的测定	69
1.11.9	铁氧体和吸收材料参数测试	72
第 2 章	电磁波在旋磁介质中传播	76
2.1	电磁波在无限旋磁介质中传播	76
2.1.1	法拉第旋转效应	76
2.1.2	双折射效应	77
2.2	电磁波在充有铁氧体波导中的传播	78
2.2.1	微扰理论	78
2.2.2	穿越方程	81
2.2.3	互易性和非互易性	82
2.2.4	本节小结	101
2.3	电磁波在双模铁氧体波导中传播	104
2.3.1	铁氧体双模波导中的基本效应	104
2.3.2	双模波导中的耦合模和本征模传播	105
2.3.3	简并耦合波方程解及极化传输矩阵	108
2.3.4	非简并耦合波方程解及极化传输矩阵	112
2.3.5	广义微扰理论	119
2.3.6	双模铁氧体波导非互易相移	123
2.3.7	双模互易移相器原理	124
2.3.8	旋转场移相器	128
2.3.9	圆极化移相器	131
2.3.10	移相器小结	132
2.4	电磁波在非互易结中的传播	133
2.4.1	Y 形环行器的非互易性方程	133
2.4.2	对称结 Y 形环行器的散射矩阵理论	138

2.4.3 S 波段带线 Y 形环行器的场积分分析	140
2.4.4 X 波段四端波导差相移环行器的场积分分析	142
2.5 传播理论公式总结	143

第二篇 微波铁氧体恒场器件

第 3 章 Y 形结环行器的非互易网络理论	147
3.1 散射矩阵与阻抗矩阵	147
3.1.1 阻抗矩阵与导纳矩阵	147
3.1.2 本征值问题	148
3.1.3 Y 形对称结的 Z 矩阵和 Y 矩阵的对角化矩阵 Z_n 和 Y_n	148
3.1.4 对称三端结环行器的本征值	149
3.2 非互易结的耦合电路方程	151
3.2.1 非互易结的本征值	152
3.2.2 4 种非互易电路的本征值	153
3.2.3 非互易结的环行条件	154
3.2.4 集总元件环行器的结构设计及其输入阻抗	159
3.3 窄带集总参数环行器的设计	159
3.3.1 360~390MHz 窄带环行器	160
3.3.2 600~660MHz 窄带环行器	160
3.3.3 900~990MHz 窄带环行器	162
3.4 宽带集总参数环行器的设计	163
3.5 集总参数环行器的编网结构	164
3.5.1 265~295MHz 集总参数环行器	165
3.5.2 62.5~66.5MHz 集总参数环行器	166
3.5.3 420~620MHz 集总参数环行器	170
3.5.4 宽带匹配过程	172
3.6 结电抗集总参数环行器	172
3.6.1 $(L_0//C_0)$ 型环行器	174
3.6.2 $(L_0//C_0-C_j)$ 结电容型环行器	176
3.6.3 $(L_0//C_0-X_s)$ 型环行器	177
3.6.4 $(L_0//C_0-X_s//C_j)$ 型环行器	177
3.6.5 集总参数环行器结构	180
3.7 集总参数环行器小结	181
第 4 章 波导 Y 形结环行器	183
4.1 三毫米环行器的设计	183

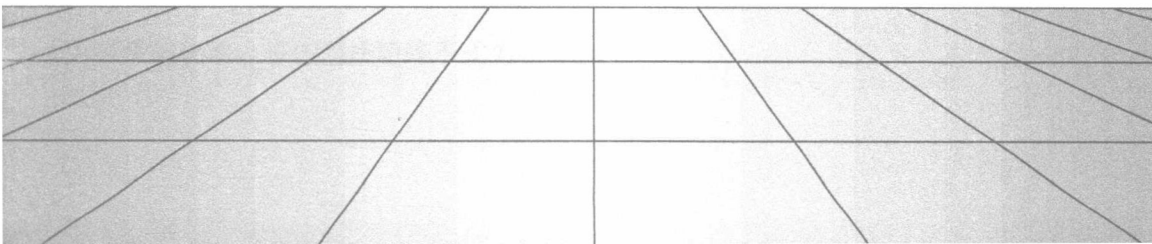
4.1.1	Y 形结毫米波环行器概要	183
4.1.2	环行器的相对带宽 2δ 和 Q_L	183
4.1.3	三毫米 Y 形结环行器的设计	187
4.1.4	耐功率问题	187
4.2	宽带波导 Y 形环行器	189
4.2.1	Ku 波段波导宽带 Y 形环行器	189
4.2.2	X 波段波导宽带 Y 形环行器	189
4.2.3	Ka 波段波导宽带 Y 形环行器	191
4.3	开关环行器	192
4.3.1	X 波段单层结开关环行器	192
4.3.2	X 波段双层结开关环行器	194
4.3.3	S 波段多层结开关环行器	197
4.4	915MHz 大功率 Y 形波导结环行器	200
4.5	高性能 Y 形波导结环行器	202
4.5.1	C 波段 Y 形波导结环行器	202
4.5.2	X 波段 Y 形波导结环行器	205
4.6	多层结构 Y 形波导结环行器	206
4.6.1	C 波段 3 层结构 Y 形波导环行器	206
4.6.2	S 波段双层结构 Y 形波导环行器	208
4.7	E 面波导结 Y 形环行器	211
4.8	脊梁波导 Y 形环行器	212
第 5 章	带线环行器和微带环行器	215
5.1	低场带线环行器	215
5.1.1	X 波段双 Y 结微型环行器结构	215
5.1.2	Y 形 S 波段带线小型化环行器	216
5.1.3	低场带线环行器的二次谐波抑制	219
5.2	宽带带线环行器	220
5.3	倍频程带线环行器	223
5.3.1	S 波段倍频程带线环行器	224
5.3.2	L 波段倍频程带线环行器	225
5.3.3	X-Ku 波段倍频程带线环行器	229
5.3.4	L-S 波段倍频程带线环行器	229
5.3.5	倍频程带线环行器小型化设计	232
5.3.6	S-C 波段倍频程带线环行器的小型化设计	236
5.4	超宽带环行器设计	237

5.4.1	PLS 超宽带环行器	238
5.4.2	SC 超宽带环行器	241
5.4.3	CXKu 超宽带环行器	243
5.4.4	8~18GHz 超宽带小型化环行器	244
5.5	高场带线环行器	247
5.5.1	S 波段小型化环行器	247
5.5.2	L、P 波段小型化环行器	249
5.5.3	米波波段小型化带线环行器	252
5.5.4	米波段宽带带线环行器	254
5.5.5	高场宽带带线环行器	257
5.5.6	225~450MHz 高场倍频程环行器	262
5.5.7	高场带线环行器的二次谐波抑制	265
5.5.8	高场双结带线环形器	266
5.6	高场环行器的温度稳定性	267
5.7	扁平结构的环行器	269
5.7.1	P-L 波段扁平结构的环行器	269
5.7.2	L-S 波段扁平结构环行器	271
5.8	环行器中的三阶互调	272
5.8.1	900MHz 带线环行器	273
5.8.2	1800MHz 带线环行器	274
5.8.3	3G 带线环行器	276
5.8.4	环行器三阶互调的测量	277
5.9	集成块结构共振隔离器	278
5.10	微带环行器/隔离器	280
5.10.1	12~21GHz 宽频带微带环行器	280
5.10.2	Ku、K、Ka 波段宽带微带环行器	281
5.10.3	微带隔离器	288
5.10.4	宽带微带隔离器	288
5.11	低温带线环行器	289
5.12	边导模隔离器	291
5.12.1	浮位式边导模隔离器	292
5.12.2	零位式边导模隔离器	292
5.12.3	边导模隔离器中场分布	293
5.12.4	SCX 边导模隔离器	295
5.12.5	LS 边导模隔离器	297
5.12.6	五频段边导模隔离器	299

第 6 章	高功率环行器	306
6.1	高功率四端波导差相移环行器	306
6.1.1	差相移环行器的基本原理	307
6.1.2	L 波导差相移环行器	307
6.1.3	L 波段高功率四端波导差相移环行器	312
6.1.4	L 波段高功率环行器耐功率估算	314
6.1.5	X 波段四端波导差相移环行器	316
6.2	四端波导变极化环行器	319
6.2.1	非互易圆极化器(T_{NCP})	319
6.2.2	互易圆极化器	322
6.2.3	正交模耦合器	324
6.2.4	变极化环行器的结构仿真	324
6.3	两端口双模环行器(2P2M 型环行器)	326
6.4	双层结构大功率 Y 形波导结环行器	328
6.5	高功率带线环行器	331
6.6	低频、大功率、宽频带、小损耗、高温稳定性 Y 形带线环行器 综合设计	334
6.6.1	低频小损耗环行器机理	334
6.6.2	功耗和散热结构	339
6.6.3	温度稳定性与温度补偿原理	340
6.7	脉冲大功率环行器设计与探讨	342
6.7.1	概论	342
6.7.2	Y 形结脉冲大功率波导环行器	344
6.7.3	差相移型脉冲大功率波导环行器	346
6.7.4	分析和讨论	347
第 7 章	Y 形结环行器的小型化设计	348
7.1	毫米波 Y 形结波导环行器	348
7.1.1	W 波段 Y 形结环行器	348
7.1.2	Ka 波段 Y 形结环行器	350
7.2	K 波段带线环行器小型化设计	351
7.3	Ku 和 X 波段微带环行器	353
7.3.1	Ku 波段微带环行器	353
7.3.2	X 波段微带环行器	354
7.4	C 波段和 S 波段带线环行器	355
7.4.1	C 波段低场带线环行器	355

7.4.2 S 波段高场带线环形器	356
7.5 L 波段小型化带线环形器设计	357
7.5.1 L 波段高端频率的设计	357
7.5.2 L 波段低端频率的设计	358
7.6 集总参数环形器	359
7.6.1 P 波段集总参数环形器	359
7.6.2 UHF 集总参数环形器	361
7.7 P 波段小型化带线环形器	362
7.8 小型化环形器设计综合分析	363
总结	365
参考文献	369

第一篇 基本理论



第1章 旋磁性

1.1 磁矩进动方程

饱和磁化铁氧体在高频磁场 h 的作用下，磁矩 M 围绕磁化场 H_0 (平行 z 轴) 做进动。铁氧体的磁矩主要来源于电子的自旋磁矩，所以用单电子进动模型(图 1.1)来描述铁氧体磁矩进动是比较恰当的。只要铁氧体中自旋电子群保持了一致进动状态就可以把它看作单个磁矩的进动，其进动方程为

$$\frac{dM}{dt} = -\gamma(M \times H) + T_D \quad (1.1)$$

式中，磁化强度 M 和磁场强度 H 包含了直流成分 M_0 和 H_0 及高频成分 m 和 h ，即 $M = M_0 i_z + m_{xy} e^{j\omega t}$ ， $H = H_0 i_z + h_{xy} e^{j\omega t}$ ， ω 为高频磁场(角)频率， γ 为旋磁比(电子自旋磁矩和角动量之比值)， $\gamma = ge / (2mc) =$

$2.21 \times 10^5 / (\text{sA/m})$ (SI 制)，其中 e/m 为电子电荷与电子净质量比值， c 为光速 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ， g 为 Lande 因子，对于单个电子自旋， $g=2$ ，对于轨道磁矩， $g=1$ 。在铁氧体材料中，测出 $g \approx 2$ ，故铁氧体材料的磁性基本上来源于电子自旋磁矩； $\gamma = 2.8 \times 10^6 / \text{s} \cdot \text{Oe} = 17.6 \times 10^6 \text{ rad/s} \cdot \text{Oe}$ (CGS 制)。式(1.1)的左端视为磁矩随时间的变化，则右端 $(M \times H)$ 视为力矩作用，它的方向正是进动轨迹的切向。如果没有阻尼项 ($T_D = 0$)，把 M 、 H 量代入进动方程(1.1)后求得

$$\begin{aligned} m_x &= \chi h_x - j\kappa h_y \\ m_y &= j\kappa h_x + \chi h_y \\ m_z &= 0 \end{aligned} \quad (1.2)$$

式中， χ 和 $j\kappa$ 分别看作磁化率和耦合磁化率，式(1.2)可简化为

$$m = \chi h \quad (1.3)$$

χ 为张量磁化率，可以写成矩阵形式为

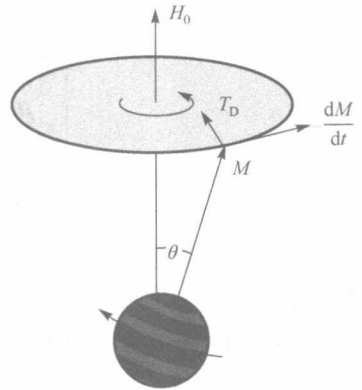


图 1.1 磁矩进动模型

$$\chi = \begin{bmatrix} \chi & -j\kappa & 0 \\ j\kappa & \chi & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

1.1.1 张量磁导率

在电动力学问题中, b 和 h 是两个磁学物理量, 其相互关系在 SI 单位制中表示为 $b = \mu_0 \mu h$, $\mu = I + \chi$, μ 称为张量磁导率, 表示为

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu & -j\kappa & 0 \\ j\kappa & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

张量磁导率 μ 的对角分量 μ 和非对角分量 κ 分别为

$$\mu = 1 + \frac{\omega_m \omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2}, \quad \kappa = \frac{\omega_m \omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (1.6)$$

式中, $\omega_0 = \gamma H_0$, $\omega_m = \gamma M_0$, ω 为工作频率。当 $\omega_0 \rightarrow \omega$ 时, 无耗条件下, $\mu \rightarrow \infty$ 、 $\kappa \rightarrow \infty$, 表示发生铁磁共振, 铁磁共振频率 $\omega_0 = \omega$ 。

张量磁导率充分展示了磁化铁氧体在高频场作用下呈现旋磁性, 这是旋磁材料的基本微波特性, 它有 4 个方面引人注意: ① x 方向的磁场 h_x 感应出 y 方向的 $b_y = j\kappa$; 同样, y 方向的磁场 h_y 感应出 x 方向的 $b_x = -j\kappa$; $\pm j$ 表示相位之间有 $\pm 90^\circ$ 的差异, 所以 b 为椭圆极化矢量, 这是磁矩进动现象导致的; ② 张量磁导率是反对称张量, 即 $\mu_{xy} = -\mu_{yx}$, 这是导致微波在铁氧体介质中传播具有非互易性和各向异性散射的基本所在; ③ 分量 μ 和 κ 具有磁控可调性, 这是磁控微波铁氧体器件的重要特性; ④ 微波铁氧体的铁磁共振性质, 当 $\omega_0 = \omega$, 即进动频率和电磁场频率 ω 相等时, 产生铁磁共振, μ 和 κ 的虚部出现峰值, 象征有耗材料出现铁磁共振损耗(图 1.2 和图 1.3), 可以用于设计铁氧体磁共振隔离器。

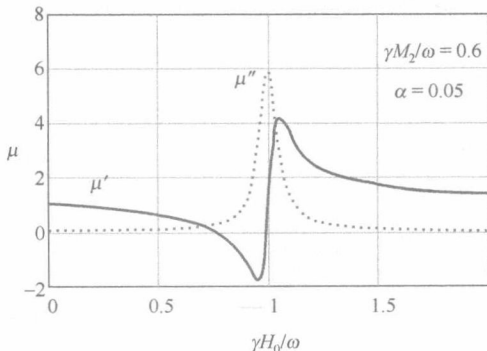


图 1.2 μ' 、 μ'' - $\gamma H_0 / \omega$

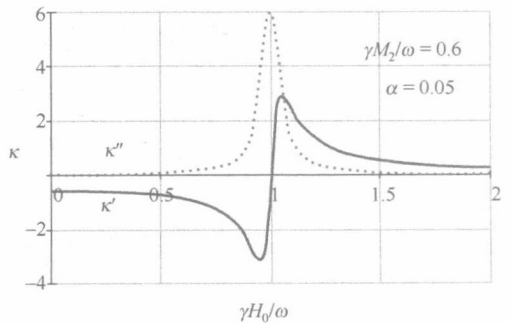


图 1.3 κ' 、 κ'' - $\gamma H_0 / \omega$

从 μ 和 κ 及磁化场 ω_0/ω 曲线可以见到 3 个工作区：①低场区，当 $\omega_0 \ll \omega$ ，即磁化场远离共振场 ($\omega_0/\omega=1$) 时， μ' 和 κ' 随磁化变化平坦， μ'' 和 κ'' 不大，表示材料损耗小；②共振区，当 $\omega_0/\omega \approx 1$ 时， μ'' 、 κ'' 可现峰值， α 为阻尼系数，在 1.2 节中将有描述，这里设置 $\alpha=0.05$ ，属于偏大的情况，目的是把铁磁共振曲线宽度拉宽；③高场区，当 $\sigma=\gamma H_0/\omega=\omega_0/\omega > 1.2$ 时， σ 越大，材料损耗越小，可以认为 $\sigma > 1.5$ 时，材料足够饱和磁化，进入低损耗，器件的损耗可以与低场工作区损耗相比拟，甚至更小。

1.1.2 任意磁化方向的张量磁导率

上述讨论的张量磁导率的基本形式是外加磁化场 H_0 平行 z 方向的形式，如式(1.6)，在任意方向，磁化也是微波铁氧体器件中常有的问题。设 H_0 对坐标轴 x 、 y 、 z 的夹角分别是 α 、 β 、 γ ，其张量形式简化为

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu & -j\kappa \cos \gamma & -j\kappa \cos \beta \\ j\kappa \cos \gamma & \mu & -j\kappa \cos \alpha \\ j\kappa \cos \beta & j\kappa \cos \alpha & 1 \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

当 H_0 平行 z 轴时， $\cos \gamma=1$ ， $\cos \beta=\cos \alpha=0$ ， μ 取式(1.6)所示形式的均匀磁化情况。当 H_0 平行 x 轴时， $\cos \alpha=1$ ， $\cos \beta=\cos \gamma=0$ ，张量磁导率 μ 变为

$$\mu = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \mu & -j\kappa \\ 0 & j\kappa & \mu \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

当 H_0 平行 y 轴时， $\cos \beta=1$ ， $\cos \alpha=\cos \gamma=0$ ，张量磁导率 μ 变为

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu & 0 & -j\kappa \\ 0 & 1 & 0 \\ j\kappa & 0 & \mu \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

对任意方向磁化，且是不均匀磁化，其中 $\alpha=\alpha(x,y,z)$ ， $\beta=\beta(x,y,z)$ ， $\gamma=\gamma(x,y,z)$ ，即磁化方向随坐标而变。在低场饱和态情况，即 $\mu \approx 1$ ，这时张量磁导率 μ 写成坐标分布形式为

$$\mu(x,y,z) = \begin{bmatrix} 1 & -j\kappa \cos \gamma & -j\kappa \cos \beta \\ j\kappa \cos \gamma & 1 & -j\kappa \cos \alpha \\ j\kappa \cos \beta & j\kappa \cos \alpha & 1 \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

1.2 阻 尼 进 动

式(1.1)仅描述其无耗情况，实际上，没有外场 h 的持续作用时，自由进动变成阻尼进动，进动角 θ 随时间不断减少。在有阻尼力矩 T_D (图 1.1) 的情况下，式(1.1)中加进阻尼力矩项 T_D ：