



丛 书

波导元件机械公差手册

机械电子工业部第十四研究所

波导元件机械公差手册

W. B. W. 艾莉森

周冠杰等译

林守远等校

机械电子工业部第十四研究所

内 容 提 要

本手册原由英国国防部编印,1987年由美国 Artech House 公司正式出版。手册共有十章,分别为①绪论②波导口径公差③扭转、弯曲和拐角④膜片、感性棒、容性棒、调谐窗和 $\lambda/4$ 变换器⑤锥形变换⑥定向耦合器⑦混合接头耦合器⑧终端⑨双工器⑩波导——同轴线过渡。手册中给出大量图表、曲线,查阅较方便。本手册可供广大微波科研工作者和设计人员使用。

*A Handbook for the Mechanical
Tolerrancing of Waveguide Components*

W.B.W. Alison

British Crown Copyright 1972

Reprinted by Artech House, Inc. 1987

波导元件机械公差手册

译 者 周冠杰 等

校 者 林守远 等

责任编辑 吕康平

*

南京科技印刷厂 印 刷

开本: 850×1186 1/32 1990年1月

内部书号: SSS—001

前 言

本手册全面地汇集了国家工业技术部长期委托我们所做工作的成果，这些工作都是旨在改进无源微波元件的性能。

这些元件的性能是属于电气方面的问题，其中包括由于吸收和反射所引起的损耗；或者从输入端到输出端能量分配与设计值间的任何偏差。而电性能参量与元件的机械尺寸密切相关，因此，同样的元件，其性能的复现性取决于元件的机械公差。有些公差比其它公差更为关键，为了在最需要的地方考虑机械加工的影响，必须寻求简便有效的方法去正确分配这些公差。

对一般使用者，所需结果以曲线形式表示即可，诚然，为了以最有效的方式来展示这些结果，所做的某些努力已反应在绘制这些曲线的方法中。在每章中列出了所用的公式，并作解释。在每章的末尾，均给出了简短的文献目录。

除了本书的主体部分外，在第一章内也收入了足够多的基本图表，使能自成体系。我们充分意识到对某些使用者来说，这可能有些重复。之所以要收入这些资料，是因即使遗漏某一个数据，为了查找和重新得到它也将会影响工作。对于即使有其它资料来源的使用者来说，收集在一卷内的这些表，在使用时查阅也较快。

该书是在大雅茅斯 (Great Yarmouth) 由 R. C.R. D.C 微波元件和微波工程技术委员会倡议，与国防部 (P. E) 签订合同，并与谢菲尔德 (Sheffield) 大学的电子和电气工程系密切合作下完成的。技术指导由在大莫尔文 (Great Malvern) 的皇家雷达研究院以及此项计划的顾问谢菲尔德大学 F. A. Benson 教授担当。

W. B. W. Alison,
Telecommunication Instrument Limited,
67 North Quay, Great Yarmouth,
Norfolk, England.

YAC 67/65

中 译 本 前 言

本手册原由英国国防部于1972年印发，仅印100份。1987年授权美国Artech House公司重新印刷出版。本手册是继1951年出版N. Marcuvitz编的“波导手册”之后又一本较系统的波导手册。本手册基本包括了最常用的基础波导元件。正如手册名称所强调的，在给出数学公式的基础上，特别着重于分析波导元件的各种尺寸公差对其电性能的影响。手册中给出大量精心编辑的图表、曲线，查阅比较方便。手册中译本的出版，将为我国设计高性能低成本的基础波导元件提供有价值的资料，将对改进我国微波元件（尤其是微波无源元件）的性能作出一定贡献。

手册第一章由周冠杰译段兴田校，第二、三章由周冠杰译赖德涛校，第四章由段兴田译王典成校，第五、七章由王典成译黄经校，第六、九章由黄经译周冠杰校，第八章由蔡体敏译黄经校，第十章由赖德涛译周冠杰校，全手册由林守远总校。

手册原文目录较简单，大都只编到章和节，为了查阅方便，中译本的目录扩大到小节。中译本有不当之处，希望读者不吝指正。

林守远于南京

一九八九年十月

符 号 汇 编

机械变量

a	矩形波导的内部谐振宽度
A	波导外部宽度
b	波导内部高度
B	波导外部高度
c	结构或元件尺寸
d	} 结构或元件尺寸, 通常指直径或深度
D	
F	参考平面
h	结构尺寸, 通常指高度
l	} 长度
L	
P	参考平面
r	} 半径
R	
t	厚度
T	参考平面
w	宽度
x	} 距离或长度
y	
z	
θ	} 波导、平面等之间的角度
ϕ	

电气变量

b	归一化电纳
B	电纳
c	真空中的光速
c_m	介质中的光速
C	耦合系数
D	定向性
f	频率
g	归一化电导
G	电导
I	隔离
k	自由空间传播因子
k'	波导传播因子
M	磁极化率
P	功率
P	电极化率
r	归一化电阻
R	电阻
T	传输系数
V	电压
x	归一化电抗
X	电抗
y	归一化导纳
Y	导纳
z	归一化阻抗
Z	阻抗
δ	集肤深度
ϵ	相对介电常数
ϵ_0	真空中介电常数 = $1/36\pi$ 纳法拉/米
λ	自由空间波长

- λ_c 截止波长
- λ_g 导内波长
- μ 相对导磁率
- μ_0 真空中磁导率 = $4\pi \times 10^{-7}$ 亨利/米
- ρ 反射系数
- ρ' 反射系数的实部
- ρ'' 反射系数的虚部
- σ 电压驻波比 (VSWR)
- σ 导电率
- ω 角频率 (= $2\pi f$)

以上符号中有些可以加角注以区分相似变量

例如: b_c = 电容电纳

b_L = 电感电纳

b' = 波导高度

目 录

第一章 绪 论

1.1	引言	(1)
1.2	波段间比例换算	(1)
1.3	跨波段的可变性	(2)
1.4	曲线图的应用	(2)
1.5	公差的推导	(3)
1.6	同时存在各种误差	(4)
1.7	波导基本数据	(4)
1.7.1	频率—波长关系	(4)
1.7.2	频率波段名称	(5)
1.7.3	波导模	(11)
1.7.4	标准矩形波导	(11)
1.7.5	波导额定功率	(11)
1.7.6	自由空间和波导波长	(18)
1.7.7	传输线参数(图表索引)	(21)
1.7.8	椭圆积分函数表	(40)
1.7.9	集肤效应(也可见1.8节)	(57)
1.8	表面损耗和表面粗糙度	(60)
1.8.1	一般条件	(60)
1.8.2	具体实验及结果	(60)
1.8.3	进一步的因素	(64)

参考文献

文献目录

第二章 波导口径公差

2.1	E面尺寸的误差	(83)
-----	---------	--------

2.2	H面尺寸的误差	(87)
2.3	波导口径在连接处的旋转	(91)
2.4	波导变形后误差的影响	(91)

参考文献

第三章 扭转、弯曲和拐角

3.1	扭转	(102)
3.1.1	均匀扭转	(102)
3.1.2	阶梯扭	(110)
3.2	拐角和弯曲	(115)
3.2.1	E 面斜角连接	(115)
3.2.2	H面斜角连接	(118)
3.2.3	多段拐角	(121)
3.2.4	固定半径的 E面弯曲	(124)
3.2.5	固定半径的 H面弯曲	(132)
3.2.6	其它匹配技术	(139)
3.3	结论	(142)

参考文献

第四章 膜片、感性棒、容性棒、调谐

窗和四分之一波长变换器

4.1	膜片和感性棒	(144)
4.2	容性棒	(165)
4.3	调谐窗	(189)
4.3.1	有限厚度的障碍物	(190)
4.3.2	调谐窗的电纳	(195)
4.3.3	公差影响的计算	(202)
4.4	四分之一波长变换器	(202)
4.4.1	尺寸误差的影响	(202)

4.4.2	公式摘要	(204)
4.4.3	误差曲线	(205)
4.5	多节四分之一波长变换器	(212)
4.5.1	理论设计基础	(212)
4.5.2	节阻抗误差影响	(218)
4.5.3	节长度误差的影响	(219)
4.5.4	结论	(222)

参考文献

第五章 锥形变换

5.1	E 面锥形变换	(224)
5.2	H 面锥形变换	(229)
5.3	混合锥形变换	(239)
5.4	匹配技术	(241)

参考文献

第六章 定向耦合器

6.1	单孔公共壁定向耦合器	(242)
6.1.1	贝塞孔耦合器	(242)
6.1.2	圆孔十字形波导定向耦合器	(253)
6.1.3	十字槽定向耦合器	(254)
6.1.4	宽壁长槽耦合器	(264)
6.2	双孔耦合器	(265)
6.2.1	双十字槽耦合器	(265)
6.2.2	窄壁双圆孔耦合器	(272)
6.2.3	窄壁双缝耦合器	(279)
6.3	多元件耦合器	(283)
6.3.1	n 个等孔耦合器	(286)
6.3.2	n 孔二项式耦合器	(286)
6.3.3	n 孔切比雪夫耦合器	(287)

6.3.4	结论	(289)
6.4	分支波导耦合器	(290)
6.4.1	E面T形接头	(294)
6.4.2	耦合器特性的计算	(294)
6.4.3	公差的影响	(297)
6.5	同时存在各种误差的影响	(303)

参考文献

第七章 混合接头耦合器

7.1	混合接头环	(307)
7.2	分支波导混合接头	(319)
7.3	缝隙耦合混合接头	(319)
7.3.1	短缝隙混合接头	(319)
7.3.2	Transvaar 混合接头	(325)
7.4	同时存在各种误差的影响	(339)

参考文献

第八章 终 端

8.1	短路活塞	(344)
8.1.1	单节扼流槽	(344)
8.1.2	双节扼流槽	(346)
8.1.3	多节扼流槽	(350)
8.2	波导负载	(350)
8.2.1	电阻薄膜负载	(352)
8.2.2	整块有耗材料的负载	(356)
8.2.3	结论	(368)

参考文献

第九章 双 工 器

9.1	E面T形接头 TR 管连接	(369)
-----	---------------	---------

- 9.2 H 面T形接头 TR 管连接..... (370)
- 9.3 三分贝混合接头平衡型双工器 (376)

参考文献

第十章 波导—同轴线过渡

- 10.1 电抗调谐过渡 (381)
- 10.1.1 简单过渡 (382)
- 10.1.2 同轴短截线调谐过渡 (431)
- 10.1.3 棒和柱(横棒)波导—同轴过渡 (435)
- 10.1.4 门扭过渡 (453)
- 10.2 电阻匹配过渡 (454)
- 10.2.1 简单电阻匹配过渡 (458)
- 10.2.2 从简单电阻型引出的过渡 (461)
- 10.3 模式匹配过渡 (462)
- 10.4 其它过渡 (463)

参考文献

第一章 绪 论

1. 1 引 言

无源微波元件的性能是以最小的损耗将能量由从输入端到输出端传输的能力来评价的。当功率被吸收或反射回输入端或转移到不该去的端口，或以上情况的任意一种组合时，性能就下降。另外，在工作频段内，要求这些损耗应该最小。

上述性能完全是由载流表面的机械尺寸和电气特性所控制。理想情况下，如果所有波导内表面的尺寸位置和导电率能做得十分完好，那么原设计必有非常严格的制造要求，但是由于在实际工艺过程中都具有微小的变化和误差，关键是防止过多的超差，否则将完全不可能实现或使成本昂贵。

由于电压、电流、电场的复杂分布，通常的分析方法是不可能的，这就必须借助于适当的微波理论和与该理论有关的数学来指明敏感的尺寸及其灵敏的程度。

使用合适的公式，有可能将尺寸公差与性能的影响联系起来。本手册就是以用工程图表的形式建立起这样计算的结果。

对熟悉波导计算的人们来说，本手册的主要部分是自明的。对那些不常用微波数据的读者，下面对逻辑推理的提示是有帮助的。

1. 2 波段间比例换算

如果所有三维尺寸及所有有关的波长可用相同的系数来换算，假如表面电阻为零，当然波导元件是能够线性换算。具有一定电阻的金属表面，存在着一个场，此场依赖于电流对表面的渗透，相应于波长平方根的比例修正，从计算得的集肤深度值（第58,59页），可知对所有的实际问题，波长和波长平方根间的差别完全可以忽略。因此计算一种波导尺寸后可用于计算所有波导尺寸（通过适当的换算）。因此可以概括地列出数据表，经过

适当的比例系数换算后，能够用到具体的元件尺寸上。此处波长符号 λ 可作为一个基本的，而从技术上来说是不太重要的波段间线性比例因子。

1.3 跨波段的可变性

一旦选择好波导尺寸，给定固定的谐振宽壁尺寸“ a ”后，改变波长 λ 可改变波导内或者元件内的电场结构，通常是平滑变化但不对称和非线性方式。给出了机械结构完全用电性能来表示的一族或一组与波长相对应的电场结构图。虽然一组完整的图形将可以上下换算，然而是很复杂的，因为要用一个单一的简单的波长比，全面地从波导尺寸到波导尺寸，从元件尺寸到元件尺寸进行比例换算。这样描述两种作用的符号 λ ，在某种意义上讲是概念模糊的。需用无量纲的 a/λ 的变量来代替，因为这样，这些场结构的电和机械结果，每当需要时总是能够绘出来，因为 a/λ 与每个可能的电场结构间存在简单的一一对应关系。为了避免太靠近截止波长 λ_c 或在另一方向上进入过模区，习惯上让 a/λ 范围在0.6和0.9之间。在标准波导内给出经认可的规定值 a/λ 是 $0.75 \pm 20\%$ ，具有足够的尺寸给出重迭范围。也应该注意到 a/λ_c 是 a/λ 的单调函数（见第20页），因此也可以用作绘图的基本数据。确实四个变量 a/λ ， a/λ_c ， λ/a ， λ_c/a 中的任何一个都可用作绘图的基本数据。唯一的差别是换算比例的不同部分相对的延伸和压缩，以及在转换和逆转换中可能不方便。同样，对给定的波导，窄边尺寸“ b ”与宽边尺寸“ a ”亦有一固定的比例（ a/b 从2.00到3.00变化，见第14页），因此 b/λ ， b/λ_c ， λ/b 和 λ_c/b 是另外一组无量纲的标准因子。

1.4 曲线图的应用

上述设想导致一种合理的紧凑的方法，给出已经计算出来公差数据。

人们越来越感到从图形而不是从表格来进行工作更为方便，

- λ_c 为截止波长，对 H_{10} 模为 $2a$ 。
- λ_g 为相应自由空间波长 λ 的导内波长，见符号汇编。

尽可能保持建立一定的比例换算，努力将数据压缩到图的形式。一族具有二个坐标的曲线图，只适用于三个变量。第四个变量要求一系列的图，且在不可避免的地方才采用（见第十章）。在使用归一化参数 a/λ 或它的单调变量 a/λ_0 ， λ_0/b 等的其中之一，近似于这些变量中之一的线性函数场合下，有可能用此因子来除从而确定一个新的变量以及重新绘制图形。既有效地减少了变量的数目同时又避免了波段内不同位置上有不同的图形。例如：对于电容性电纳 b_c ，我们用 b/λ_0 来除，并对于 $b_c \lambda_0/b$ 重新绘图（第四章4.1e节图表“对称容性膜片的电纳”）。对电感性电纳 b_L ，我们用 λ_0/a 来除，并对于 ab_L/λ_0 重新绘图（第四章4.1e节图表“对称感性膜片的电纳”）。如果有一个较小的但不可忽略的留下的变量，我们可相对于最适合的标准因子 a/λ 等绘出一小族曲线去适应它，（4.2b节图表“容性棒电纳”）。为了恢复到所需的 b_c 或 b_L ，需要分别用 b/λ_0 或 λ_0/a 返回去乘，从所提供的表和波导宽高比中得出。

1. 5 公差的推导

最好的方法是研究元件的等效电路及与工作波长和元件物理尺寸有关参数的公式。通常需要查找出版的文献资料。并进行各种分析检查以确保不包括不合理的条件存在（例如 $b/\lambda_0 = 0$ ）以及通过所获得的实验数据去验证公式的正确性。通常通过忽略高阶项的方法既能简化电路又能简化公式。这种方法是不严格的，但其结果是可接受的。这是由于所给公差值的有效位数是由计算结果舍入后而得到。如果不使用这种方法，而采用严格的数学过程进行，数据或许可占有目前容量的十倍。

举例：取6.22节中简单的双孔耦合器，耦合方程式可写成：

$$C = -20 \log_{10} \left(\frac{6a^3b}{\pi d^3 \lambda_0} \right) - 31.9 \frac{t}{d} \sqrt{1 - (1.71d/\lambda)^2} \quad (1)$$

去掉二次项可得：

$$\delta C \approx 26.06 \frac{\delta d}{d} \quad (2)$$

取 $d = 0.3''$, $t = 0.05''$, $a = 0.9''$, $b = 0.4''$, $\lambda_s = 1.83''$ 和 $\lambda = 1.28''$ 。

假定在孔径的公差造成的耦合误差是 $\pm 0.5dB$, 从式(2)中可得:

$$\delta d = \frac{0.5 \times 0.3}{26.06} = 0.0058''$$

通过舍去“ d ”的公差是 $0.005''$ 。完成 C 和 $C + \delta C$ 的完整计算, 取 $d = 0.300''$ 和 $0.305''$ 。

$$C = -25.91 \text{ dB 和 } C + \delta C = -25.41 \text{ dB}$$

$$\text{因此 } \delta C = -0.5 \text{ dB}$$

这与结果碰巧精确一致, 从式(2)中, $\delta d = 0.005''$ 时所计算得的 δC 值是 0.43 dB 。

1.6 同时存在各种误差

在略去相互影响的条件下可以确定同时存在的误差的影响。失配的影响在大多数情况下是用反射系数值绘图来表示, 其结果用简单的叠加来取得, 但需注意分开实部和虚部。当用电压驻波比给出失配结果时, 最坏情况是各项单独的结果相乘。

定向耦合器或混合接头的耦合系数误差可以相加。方向性的影响必须根据6.5节或7.4节进行计算。

1.7 波导基本数据

1.7.1 频率—波长关系

电磁波以速度 c_m 在介质传播时, 波长和频率给出如下关系:

$$\lambda = c_m / f$$

对于标准实验室条件¹ (温度 20°C , 湿度 65% , 和压力 750 mmHg)。得出在空气中的速度 c_m 为 299693.6 公里/秒。温度、湿度和大气压力的极限范围, 分别为 $15-35^\circ\text{C}$, $45-75\%$ 和 $600-800 \text{ mmHg}$; 速度² 是在 299662.9 到 299717.7 公里/秒范围内。

因此, 对于用在一般实验条件下, 在空气中由频率计算波长可准确到四位有效数字。