

复杂形状波导结构强制装配影响研究

耿盛韦 黄佳雷 翁艺航 刘 瑞 钱志鹏

(上海航天电子技术研究所, 上海 201109)



摘要: 波导装配过程中, 由于自身形状复杂及被连接结构多级装配累积误差, 过程中将产生内应力, 对其力学和电磁学性能产生影响。根据力学原理, 建立强制装配过程的简化分析方法; 然后选用某型产品波导, 通过上述分析方法评估了其结构性能, 并将结果与有限元法对比, 验证简化计算模型的合理性。最后结合计算结果与结构参数, 分析波导强制装配可行性, 结果可以为波导结构强度和使用可靠性评估提供合理依据。

关键词: 波导; 强制装配; 力学模型; 有限元

中图分类号: TN814 文献标识码: A

Research on the Influence of Forced Assembly for Complex Waveguide

Geng Shengwei Huang Jialei Weng Yihang Liu Rui Qian Zhipeng

(Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109)

Abstract: Due to complexity of waveguide and accumulative error in assembly, residual stress occurs in waveguide and spoils mechanical and electromagnetic property. First of all, the simplified analyzing model of forced assembly was established according to mechanical theory. Then, a waveguide in products was analyzed by the model, and results were compared with finite element method to confirm this model. Finally, feasibility of forced assembly was assessed considering calculation results and structural parameters. Results can provide a reasonable assessment to strength and reliability for waveguide.

Key words: waveguide; forced assembly; mechanical model; finite element method

1 引言

波导组件是用空心金属或空腔等制成的用于微波电路传递电磁波的基本功能部件, 属于高精度微波器件^[1], 在电磁学各领域均有使用。波导由波导管和法兰组成, 设计时一般先根据需要连接的两部分结构电磁接口, 确定波导管截面和法兰形式, 然后通过波导管将两头接口处法兰连接。

作为新一代极轨气象卫星携带的微波有效载荷, 由于运载发射包络限制和卫星高精度姿轨控要求, 微波载荷内部结构布局紧凑, 为满足复杂结构布局要求并充分利用内部紧凑空间, 波导的空间形状也更为复

杂, 如图 1 所示。

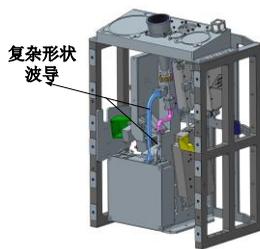


图 1 复杂形状的波导结构

空间波导结构形状复杂, 加工过程中精度控制难度大, 波导需连接多级结构, 各级结构自身的加工误差及结构间装配误差, 最终导致波导两头法兰端面位

作者简介: 耿盛韦 (1992), 硕士, 飞行器设计专业; 研究方向: 载荷系统结构设计与力学仿真。

收稿日期: 2021-07-15

置与被安装位置不符。若强制装配将导致波导受力，且界面形状也将发生改变，影响结构的强度与电磁学性能。波导连接结构原理示意图如图 2 所示。



图 2 波导连接结构原理示意图

针对复杂波导结构及装配的研究，彭威^[2]讨论了雷达馈源网络波导在弯曲加工中诸多问题，通过分析波导弯曲成型过程中应力应变情况，优化了成型工艺；许锦康等^[3]针对某型机载波导设计过程中开裂故障，分析失效机理，并结合有限元模型和环境试验验证分析，发现波导振动过程中法兰根部极易形成应力集中和高应变；廖研等^[4]建立波导类零件的加工变形模型，推导出铣削台阶时的挠度理论解析公式，并将实际结果与理论计算对比；范强等^[5]用高阶动力学模型表征波导结构不连续点的动力学特性，并基于波导不连续点处的反射系数与其动力学模型参数间的解析关系，迭代识别出不连续点参数，从而实现复杂不连续点准确建模。王现冲^[6]为减少误差在装配过程中带来的不确定性，分析了容差设计与设计、工艺、制造、装配等精密机械研制过程中的联系，总结出装配过程中调整及修配的计算方法。

虽然强制装配会给电性能与力学性能都带来不利影响，但实际生产中无法完全避免，且对强制装配造成的影响缺乏原理性的定量分析；常规分析方法多数都是建立有限元模型定量计算，但有限元模型局限性较大，针对不同形式波导需重新建立模型，分析周期相对比较长，不适用于初始设计阶段分析要求；因此，基于基本力学原理定量，简化波导强制装配过程，推导最大许用强制装配量的计算公式，分析强制装配对力学性能和电磁学性能影响，依据分析结果评估波导加工精度指标合理性。

2 力学模型简化

波导强制装配过程为：先用螺钉将波导一端面法兰与结构连接，然后根据波导另一端法兰结构接口的偏移量，将波导强行弯曲一段距离，直至法兰与结构接口一致，最后上紧连接螺栓，实现波导结构两端法兰全部连接。

为定量计算以上过程在波导内产生的应力截面变形，忽略波导两头法兰的局部变形，将波导简化成材料力学理论中的悬臂梁模型^[7]，将以上过程可以等效为悬臂梁顶端受集中力弯曲，如图 3 所示。

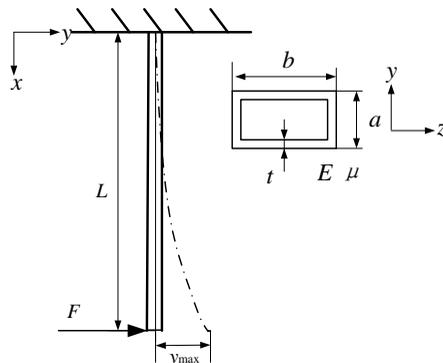


图 3 悬臂梁受集中力弯曲

图中悬臂梁长 L ，截面形状为矩形方管，长度 a ，厚度 b ，截面的弯曲方向惯性积为 I ，材料的杨氏模量为 E ，泊松比 μ ，梁长度方向为 x 方向，弯曲方向为 y 方向，坐标原点位于梁单元根部约束处，梁自由端受到集中力 F ，位移 y ，转角为 α ，弯矩为 M 。

根据梁弯曲应力理论，最大弯矩出现在梁固支根部。

$$M_{\max} = F \cdot L \quad (1)$$

此处对应的最大弯曲应力为：

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max} y_{\max}}{I_z} \quad (2)$$

结合波导截面几何参数：

$$\sigma_{\max} = \frac{FLa}{2I_z} \quad (3)$$

同理，最大应变为：

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\sigma_{\max}}{E} = \frac{FLa}{2EI_z} \quad (4)$$

a 为波导截面在强制位移方向是尺寸，最大应力和最大位移均发生在悬臂梁的固支根部位置。

根据弯曲变形理论，梁截面弯矩与梁形状的关系如式 (5)：

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad (5)$$

对式(5)进行一次积分，得到梁位移的一阶导数：

$$EI \frac{dy}{dx} = \int M(x) dx + C \quad (6)$$

由于梁弯曲属于小变形，根据无穷小理论，位移一阶导数可以等效于转角。再一次积分：

$$EIy = \iint [M(x) dx] dx + Cx + D \quad (7)$$

其中, C、D 为积分常数, 可根据边界条件求解。根据图 3 所示, 梁任意长度位置截面弯矩方程为:

$$M(x) = F(x-L) \quad (8)$$

将弯矩方程与式 (6)、式 (7), 根据悬臂梁约束端位移转角均为 0 边界条件, 求得转角和位移方程分别为:

$$\alpha = -\frac{Fx}{6EI}(6L-3x) \quad (9)$$

$$y = \frac{Fx^2}{6EI}(3L-x) \quad (10)$$

对应的最大转角和最大位移分别为:

$$\alpha_{\max} = \frac{FL^2}{2EI} \quad (11)$$

$$y_{\max} = \frac{FL^3}{3EI} \quad (12)$$

3 力学约束条件

根据结构强度校核准则, 波导强制装配产生的装配应力 σ 需小于极限载荷 $[\sigma]$ 除安全系数 n , 极限载荷波导材料确定。

$$\sigma < \frac{[\sigma]}{n} \quad (13)$$

波导在强制装配后产生强制装配应力后, 使用环境下还会产生使用载荷, 设计载荷一般为使用载荷 1.5 倍, 说明结构在极限工作载荷状态下, 一般还有 1/3 强度余量, 综合考虑, 在评估波导装配过程中强制装配应力时, 安全系数 n 取 4。

将式 (3) 与式 (12) 合并带入式 (13), 得到波导强制装配过程中, 最大位移的力学约束条件为:

$$y_{\max} \leq \frac{2L^2[\sigma]}{3Ean} \quad (14)$$

通过上式可以看出, 长度更长、材料强度更大、弹性模量更小、波导截面尺寸更小的波导, 基于力学约束下允许产生的强制装配量越大。

4 电磁学约束条件

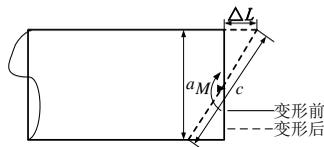


图 4 波导截面弯曲变形

波导受力产生弯曲后, 波导局部的截面形状发生

了改变, 影响电磁学性能, 因此, 对电磁学性能的影响可以等效于截面尺寸参数变化相对允许变形量的偏差; 波导产生弯曲变形后, 在弯矩为 M 的某一截面上, 截面尺寸参数 a 变为 c , 如图 4 所示。

设波导截面参数允许最大的变化量为 δ , 则电磁学约束条件可以表述为:

$$c - a \leq \delta \quad (15)$$

图中 ΔL 为弯矩 M 作用下产生的变形量, 根据应变定义, 其表示如下:

$$\Delta L = \varepsilon L \quad (16)$$

结合图中几何关系, 变形后长度 c 可表示为:

$$c = \sqrt{a^2 + 4\varepsilon^2 L^2} \quad (17)$$

将上式带入式 (15), 经过整理, 电磁学约束可表达成以下形式:

$$\varepsilon \leq \frac{\sqrt{\delta^2 + 2a\delta}}{2L} \quad (18)$$

最大应力处对应最大应变, 均发生在悬臂梁固支根部位置。

将式 (4) 与式 (12), 共同带入式 (18), 最终得到电磁学约束下最大位移表述为:

$$y_{\max} \leq \frac{L\sqrt{\delta^2 + 2a\delta}}{3a} \quad (19)$$

波导截面参数允许最大的变化量 δ , 可参考相关的设计标准^[8]。

根据式 (19) 可以看出, 长度更长、截面允许变形量更大、截面尺寸更小的波导, 基于电磁学约束下允许产生的强制装配量越大。

5 分析流程

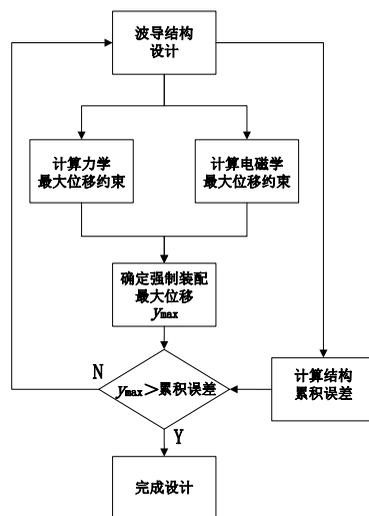


图 5 波导结构设计分析流程

依据上一节推导出波导强制装配力学和电磁学约束条件，波导设计过程中分析迭代流程为：完成波导设计后，根据波导的结构参数，分别计算力学和电磁学约束，确定强制装配允许的最大位移，同时分析结构累积误差，比较波导最大位移与结构累积误差，如果累积误差小于最大位移，说明波导结构设计合理，可完成设计，否则需优化波导结构并迭代，流程见图 5。

6 实例分析

选取某型波导，结构形式、长度尺寸和截面形状参数如图 6 所示，波导两侧法兰形状尺寸为 19.1mm×19.1mm，厚度为 3mm。装配过程中，先将图中所示初始固定端法兰安装，然后根据结构的空位置关系，对强制装配端法兰施加强制位移完成装配。

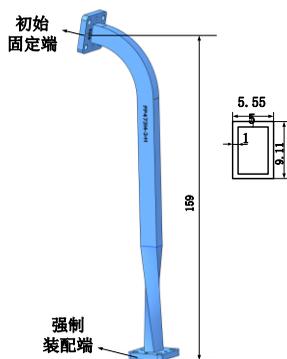


图 6 某型波导结构参数

根据参数和材料参数，使用式 (14)、式 (18) 计算最大位移，将计算结果分别带入有限元模型，验算最大位移下对应的最大应力和最大转角，以此验算理论推导的正确性。波导材料为黄铜，弹性模量 E 为 114GPa，屈服强度 160MPa，波导长度 L 为 159，截面弯曲方向尺寸 a 为 9.11mm，带入式 (13)、式 (14)，求得最大位移为 0.649mm，最大应力为 40MPa；根据技术要求^[7]中截面尺寸公差要求， δ 取 0.02mm，带入式 (18)、式 (19)，最大位移为 3.51mm，最大应变为 1.899×10^{-3} mm；取两者交集，该波导强制装配过程中允许的最大位移为 0.649mm。

使用商用有限元软件 NX-8.5^[9]建立波导结构的有限元模型对以上计算结果合理性复核，有限元模型如图 7 所示，两端法兰采用正六面体单元，中间波导管采用 1mm 厚度的四边形壳单元，将法兰初始固定端设置为固定约束，在法兰强制装配端设置强制位移。



图 7 波导有限元模型

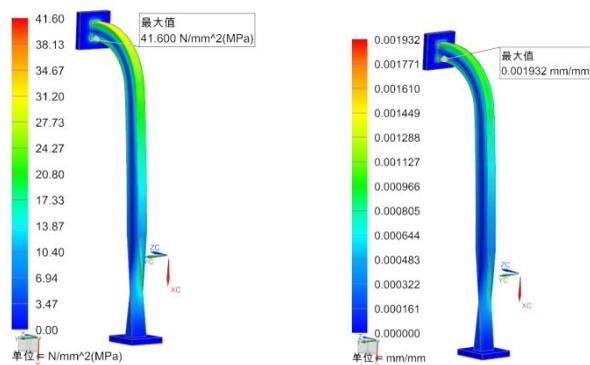


图 8 有限元计算结果

分别带入学约束下和电磁学约束下最大位移，计算结构中对应的最大应力和应变，计算结果见图 8。

有限元计算结果中，最大力学约束时最大应力为 41.6MPa，与简化方式的计算结果误差为 3.8%，最大电磁学约束时最大应变为 1.932×10^{-3} mm，与简化方式的计算误差为 1.7%，均小于 10%工程允许的误差估算范围。

根据电磁学约束下最大应变计算结果，依据应力应变关系得出此时对应的最大应力为 215.4MPa，该应力值依据超过波导材料铜的需用应力 160MPa，此时波导依据发生结构断裂，无法达到最大电磁学约束。由此发现波导结构的力学约束远比电磁学约束严苛。

基于设计要求对上述单节波导进行安装累积误差分析：根据波导安法兰安装孔加工精度控制要求，考虑到安装孔位置误差 0.1mm，孔径最大偏差 0.085mm，单级波导长度误差 0.05mm，因此波导两端法兰安装孔间最大累积误差为 0.42mm，小于强制装配允许的波导最大位移 0.649mm，因此该波导的设计符合实际使用和装配要求。

(下转第 78 页)