

# 双渐变螺旋线慢波结构参数分析及优化\*

唐康淞<sup>1,2</sup>, 赵刚<sup>1,2</sup>, 李实<sup>1</sup>, 阴和俊<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 电子学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 双渐变螺旋线慢波结构是空间行波管中使用最广的慢波结构之一。利用 Christine 大信号程序对该慢波结构各部分长度和螺距对行波管效率以及增益的影响进行了分析。结果显示:增益和电子效率与慢波结构长度成正比,且输入端的长度对增益影响最大;电子效率对相速增加段的螺距的变化最为敏感。根据分析结果,通过增加输入端长度,加大相速增加段的螺距,同时减小相速减小段的螺距进行优化。优化后,电子效率由 35.4% 提高至 36.8%,增益由 54.6 dB 增加至 56.2 dB。

**关键词:** 高功率微波; 螺旋线行波管; 双渐变螺旋线慢波结构; 大信号理论; 结构优化

**中图分类号:** TN124 **文献标志码:** A

螺旋线行波管常作为末级功率放大器用于航天系统中,以满足卫星的高功率转换效率要求<sup>[1]</sup>。双渐变螺旋线慢波结构<sup>[2-4]</sup>是最方便有效的技术手段,采用该技术,CEERI 公司的 C 波段 60 W 空间行波管其效率大于 55%<sup>[5]</sup>,Thales 公司的 Ku 波段 180 W 空间行波管效率大于 68%<sup>[6]</sup>,Ka 波段 210 W 空间行波管的效率大于 63%<sup>[7]</sup>。

全面分析各个参数对行波管性能的影响对实际制管具有现实指导的意义。在行波管实际研制中,掌握了慢波结构的各项参数对行波管性能的影响规律,则可以有针对性地对行波管结构进行调整,从而减小工作量。前人讨论了慢波结构夹持杆参数对行波管性能的影响<sup>[8-10]</sup>。本文基于 Christine 大信号理论,重点研究了双渐变螺旋线慢波结构中各段的长度以及螺距对行波管电子效率以及增益的影响。在此基础上,对行波管的慢波结构进行了初步优化。

## 1 行波管大信号理论

本文采用了的 1 维 Christine 大信号模型进行数值仿真,其基本方程组表达如下<sup>[11-12]</sup>

$$\begin{cases} \left[ \frac{d}{dz} + \alpha_n(z) \right] a_n(z) = \frac{2\pi i}{I_A} I e_2^*(n, z) \langle e^{-i\psi_n} \rangle \\ d\psi_n/dz = \omega_n(1/v_{z0} - 1/v_z) \\ \left\{ \frac{dy}{dz} = \operatorname{Re} \left\{ 2i \sum_n a_n(z) e_2(n, z) e^{i\psi_n} - \frac{8iI}{I_A(r_{bo}^2 - r_{bi}^2)} \sum_{n'} \frac{cR'_{n'}}{\omega_{n'}} e^{i\psi_{n'}} \langle e^{-i\psi_{n'}} \rangle \right\} \right. \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $a_n(z)$  为归一化场振幅;  $\alpha_n(z)$  为单位长度的衰减量;  $I_A = 1.7 \times 10^4$  A;  $e_2(n, z) = (\langle \hat{z} \cdot \mathbf{e}_n \rangle_{\text{beam}} / A_{\text{eff},n}^{1/2}) \times \exp[i \int_0^z (k_{zn}(z') - \omega_n/v_{z0}) dz']$ ,  $k_{zn}$  是第  $n$  次谐波的纵向传播常数,  $e_n(x)$  是场的第  $n$  次归一化谐波;  $\psi_n$  为电子相位;  $\gamma$  为相对论因子;  $v_{z0}$  为电荷圆环的初始轴向速度,角括号  $\langle \rangle$  表示对一个时间周期内进入互作用区的所有电荷圆环的相应物理量求平均;  $n$  为场的谐波次数;  $n'$  为交流空间电荷场的谐波次数;  $r_{bi}$  和  $r_{bo}$  分别表示电子注内外半径。给定初始条件后,对式(1)的数值求解通常采用空间步长积分方法,从互作用输入端开始逐步求解,直到输出端,迭代时采用四阶龙格库塔法。

求解工作方程组后得到电磁场归一化复振幅  $a_n(z)$ , 输出功率为

$$P = P_{\text{flux},2} \sum_n |a_n(z)|^2 \quad (2)$$

其中,  $P_{\text{flux},2} = 1.386 2 \times 10^9$  W。

增益的定义为

$$G = 10 \lg(P/P_{\text{in}}) \quad (3)$$

\* 收稿日期: 2008-05-22; 修订日期: 2008-07-28

作者简介: 唐康淞(1981—), 男, 博士生, 从事空间行波管研究; tangkangsong@yahoo.com.cn。

其中,  $P_{in}$  为输入信号的功率。

电子效率是行波管有效输出功率与电子注功率  $P_e$  的百分比

$$\eta_e = P/P_e \times 100\% \tag{4}$$

### 2 数值仿真结果及分析

图 1 为空间行波管双渐变螺旋线结构的示意图, 该慢波结构由输入段  $L_0$  (长度为  $l_0$ , 螺距  $p_0$ )、相速增加段  $L_1$  (长度为  $l_1$ , 螺距  $p_1$ )、相速降低段  $L_2$  (长度为  $l_2$ , 螺距  $p_2$ ) 以及为了减小阻抗变化导致的反射而引入得渐变段  $L_3$  (长度为  $l_3$ ) 构成。影响双渐变螺旋线慢波结构性能的参数主要有: (1)  $l_0, l_1$  以及  $l_3$ ; (2) 螺距  $p_1$  和  $p_2$ 。因此, 我们将着重分析这几个参数变化对行波管的电子效率以及增益的影响。本文采用的方法简单直观, 在一支成熟管型的基础上, 微调待考察参数的大小, 分析大信号程序的数值仿真结果, 确定该参数对行波管电子效率及增益的影响情况。

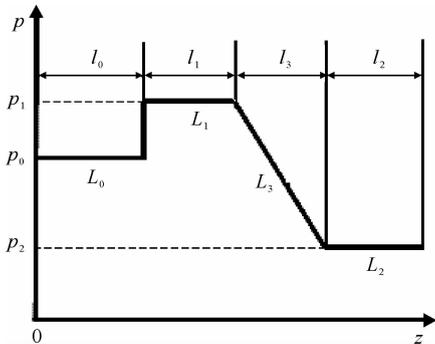


Fig. 1 Schematic diagram of the double-taper helix structure, where  $p$  is pitch and  $z$  is the length of helix

首先考察了长度变化(其它参数均不改变)对行波管的电子效率以及增益的影响。如图 2 所示, 其中图(a), (b)及(c)为增益的变化情况, 图(d), (e)及(f)为电子效率的变化情况。由图可以发现当  $l_0$  的长度分别为  $l_0 + 10$  mm,  $l_0$  以及  $l_0 - 10$  mm 时, 其小信号增益分别为 51.6, 53.9 以及 56.4 dB;  $l_1$  变化时, 增益分别为 52.1, 53.9 和 55.7 dB;  $l_3$  变化时小信号增益分别为 52.6, 53.9 和 54.8 dB。由此可知: 采用双渐变螺旋线慢波结构时, 慢波结构各部分的长度越长增益越大; 对于双渐变慢波结构来说, 越靠近信号输入端的部件其长度对增益的影响越大, 长度变化相同时增益变化幅度分别达 2.3, 1.8 和 1.3 dB。比较图 2(d), (e)和(f)可得: 随着双渐变慢波结构各部分的长度增加, 电子效率提高, 且电子效率对  $l_0$  的变化最为敏感,  $l_0$  变化时饱和电子效率变化幅度远远大于其它部分长度发生变化时的情况; 增加输入段  $l_0$  的长度以及相速增加段  $l_1$  的长度会导致饱和点前移, 即输入功率较低的时候达到最大输出功率。

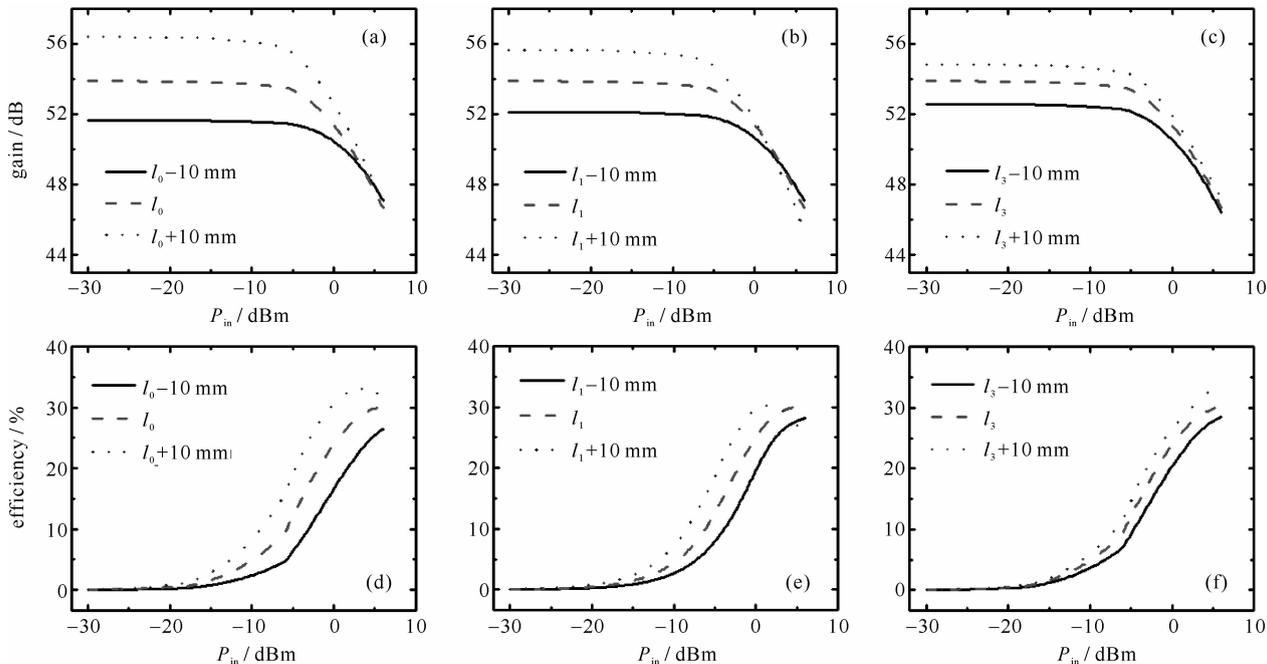


Fig. 2 Gain and electron efficiency of TWT vs the length of helix

图 2 行波管增益及电子效率随长度改变的情况

图 3 显示了双渐变跳变结构各部分的螺距发生小幅变化时行波管的电子效率以及增益的变化情况。图 3 (a)和图 3(c)分别为螺距  $p_1$  变化  $\pm 1\%$  时增益和电子效率随输入功率的变化图。结果表明: 当  $p_1$  增大  $1\%$  后,

增益变大,电子效率提高,反之,增益变小,电子效率均减小;且增大  $p_1$  导致的行波管增益和电子效率的变化幅度远小于减小  $p_1$  时的情况,如小信号增益变化幅度分别为 1.2 和 3.5 dB。 $p_2$  变化对行波管电性能的影响如图 3(b)和 3(d)所示。此时,螺距的变化对行波管增益基本没有影响,但是电子效率随着螺距的增加而减小。综上所述,可知  $p_1$  对行波管的增益和电子效率都有非常大的影响,因此在实际设计中  $p_1$  的选择最为关键。

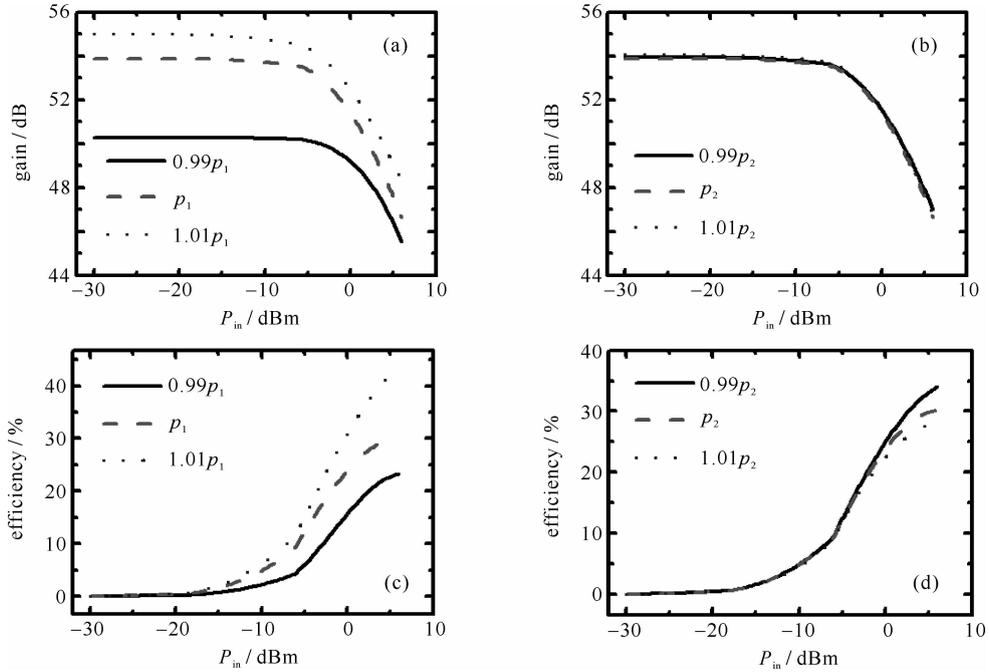


Fig. 3 Gain and electron efficiency of TWT vs pitch

图 3 行波管增益及电子效率能随螺距改变的情况

### 3 慢波结构参数优化

前面的仿真给出了双渐变螺旋线慢波结构各参数变化对行波管电子效率和增益影响的一般规律。根据所得的结论,本文对某型行波管的螺旋线慢波结构进行了进一步的优化,目的是在不改变慢波结构总长的前提下,通过调整各部分的长度以及螺距大小以提高管子的电子效率和增益。图 4 给出了优化前后的慢波结构形状,图中纵坐标为对输入端螺距  $p_0$  归一化之后的螺距,横坐标为慢波结构的长度。从图中可以发现,优化后结构的输入端长度增加,相速增加段的螺距变大同时相速减小段的螺距变小。表 1 列出了优化前后的数值仿真结果。

表 1 慢波结构优化前后行波管电子效率及增益比较

Table 1 Comparison of electron efficiency and gain of the TWT before and after optimization

	efficiency/%	gain/dB
before optimization	35.4	54.6
after optimization	36.8	56.2

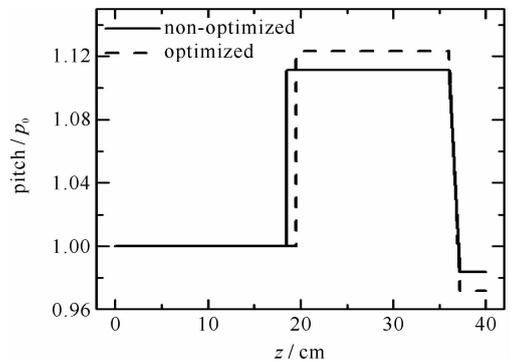


Fig. 4 Schematic diagram of the double-taper helix structure before and after optimization

图 4 优化前后慢波结构示意图

### 4 结 论

本文利用 Christine 大信号理论考察了双渐变螺旋线慢波结构中长度以及螺距变化对行波管整管电性能的影响。结果显示:双渐变螺旋线慢波结构的各段长度对小信号增益影响非常明显,小信号增益基本与螺旋线长度成正比,且越靠近信号输入端的组成部分的长度影响越大;双渐变螺旋线慢波结构的各段长度与电子效率成正比,且输入段影响最大;行波管增益和电子效率均与相速增加段的螺距  $p_1$  成正比,且  $p_1$  对行波管增益及电子效率的影响最大。根据所得结论,本文对行波管的慢波结构进行了进一步的优化调整,优化后,电子效率

由 35.4% 提高到 36.8%, 同时增益由 54.6 dB 增加到 56.2 dB。

致 谢 本研究中, 中国科学院电子学研究所空间行波管发展中心刘濮鲲研究员和苏小保研究员给予了指导和建议, 在此表示衷心感谢!

### 参考文献:

- [1] 廖复疆. 真空电子技术——信息装备的心脏[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. (Liao F J. Vacuum electronic technology—the heart of information equipment. Beijing: National Defence Industry Press, 1999)
- [2] Srivastava V, Cater R G, Ravinder B, et al. Design of helix slow-wave structures for high efficiency TWTs[J]. *IEEE Trans on Electron Devices*, 2000, **47**(6):2438-2443.
- [3] Abe D K, Levush B, Antonsen T M Jr, et al. Design of a linear C-band helix TWT for digital communications experiments using the Christine suite of large-signal codes[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 2002, **30**(3):1053-1062.
- [4] Tsutaki K, Yuasa Y, Morizumi Y. Numerical analysis and design for high-performance helix traveling-wave tubes[J]. *IEEE Trans on Electron Devices*, 1985, **32**:1842-1849.
- [5] Srivastava V, Ravinder B, Ghosh T K, et al. Design of a high efficiency C-band 60 W space TWT[C]//International Conference on Microwave and Millimeterwave Technology Proceedings. 1998:767-770.
- [6] Thaler Y, Andre F. 180 W Ku band TWT for space applications[C]//International Vacuum Electronics Conference. 2005:43-44.
- [7] Andre F, Beilevaive F. High power Ka-band traveling waves tubes for satellite communication[C]//International Vacuum Electronics Conference. 2005:47-48.
- [8] 朱兆军, 贾宝富, 罗正祥. 螺旋慢波电路参数变化对行波管性能的影响[J]. 真空科学与技术学报, 2006, **26**(1):23-27. (Zhu Z J, Jia B F, Luo Z X. Variations in helical slow-wave circuit parameters and travelingwave tube characteristics. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 2006, **26**(1):23-27)
- [9] 朱兆军, 贾宝富, 罗正祥. 螺旋线行波管电子效率改善的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(5):815-819. (Zhu Z J, Jia B F, Luo Z X. Efficiency enhancement simulation of helix traveling-wave tube. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(5):815-819)
- [10] D'Agostino S, Emma F, Paoloni C. Sensitivity analysis of TWT's small signal gain based on the effect of rod shape and dimensions[J]. *IEEE Trans on Electron Devices*, 2000, **47**(7):1457-1432.
- [11] 肖刘, 苏小保, 刘濮鲲. 基于行波管螺旋导电面模型的空间电荷场研究[J]. 物理学报, 2006, **55**(10):5150-5156. (Xiao L, Su X B, Liu P K. Study of space charge field based on sheath helix model of TWTs. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(10):5150-5156)
- [12] 高鹏, 杨中海, 李斌, 等. 螺旋线行波管 1 维多频非线性理论与模拟[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(3):459-462. (Gao P, Yang Z H, Li B, et al. One-dimensional multifrequency non-linear model and simulation of helix traveling wave tubes. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(3):459-462)

## Analysis and optimization of parameters of double-taper helical slow-wave structure

TANG Kang-song<sup>1,2</sup>, ZHAO Gang<sup>1,2</sup>, LI Shi<sup>1</sup>, YIN He-jun<sup>1</sup>

(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 2652, Beijing 100190, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The double taper helix slow wave structure is one of the most widely used slow wave structures in space TWT. The effects of parameters such as length and pitch of double-taper helix slow wave structure on the electron efficiency and gain of TWT are investigated using the Christine large signal code. The result shows that the gain and the electron efficiency of TWT are in direct proportion to the length of each part of the slow wave structure, and the length of the signal input section has largest influence on the gain; the electron efficiency of the TWT is most sensitive to the pitch of the section where the phase velocity increases. Furthermore, the slow wave structure is optimized preliminarily by simultaneously increasing the length of the signal input section, reducing the pitch of the phase velocity decreasing section and increasing the pitch of the phase velocity increasing section. After the optimization the electric efficiency goes up from 35.4% to 36.8%, and the gain goes up from 54.6 dB to 56.2 dB.

**Key words:** High power microwave; Helix traveling-wave tube; Double-taper helical slow-wave structure; Large signal theory; Structure optimization