



·高功率微波技术·

## 一种新型低电感磁绝缘传输线的冷腔特性\*

刘 燕<sup>1</sup>, 刘腊群<sup>1</sup>, 周良骥<sup>2</sup>, 蒋吉昊<sup>2</sup>, 刘大刚<sup>1</sup>, 王辉辉<sup>1</sup>, 王启昂<sup>1</sup>

(1. 电子科技大学 电子科学与工程学院, 成都 610054; 2. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 研究了一种新型低电感花瓣形磁绝缘传输线的冷腔特性。该传输线构型的横向剖面的真空部分由 12 个类似花瓣形状的周期组成, 而每个周期又由平行板和同轴圆弧两种基本传输线构型组成。该构型的整体轮廓有效增加了电极面积, 使得传输线的电感大大降低, 从而实现使用单层磁绝缘传输线即可获得较低的阻抗, 规避了多层汇流结构带来的复杂的 PHC 结构和磁零位区损失问题。首先, 分别计算出两种基本构型单元的电磁场分布、电感、电容和阻抗; 而后, 再整体计算分析出花瓣形磁绝缘传输线的电磁特性参数; 同时, 还通过数值模拟来分析该传输线的冷腔特性, 获得了该传输线的阻抗值及电磁场分布, 并将数值模拟结果与理论计算值进行了对比分析, 结果验证了理论计算方法的正确性。

**关键词:** 花瓣形; 低电感; 磁绝缘传输线; 冷腔特性; 数值模拟

中图分类号: TM89

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210494

## Cold cavity characteristics of a new type of low-inductance magnetically insulated transmission line

Liu Yan<sup>1</sup>, Liu Laqun<sup>1</sup>, Zhou Liangji<sup>2</sup>, Jiang Jihao<sup>2</sup>, Liu Dagang<sup>1</sup>, Wang Huihui<sup>1</sup>, Wang Qi'ang<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;

2. Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The vacuum part of the transverse section of this configuration is composed of 12 petal-like periods, and each period is composed of two basic transmission line configurations: parallel plates and coaxial arcs. The overall outline of this configuration effectively increases the electrode area, which greatly reduces the inductance of the transmission line, so that a lower impedance can be obtained by using a single-layer magnetically insulated transmission line, which avoids the complex PHC structure and the loss of the magnetic null region caused by the multi-layer bus structure. The electromagnetic field distribution, inductance, capacitance, and impedance of the two basic configuration units are calculated separately, and then the electromagnetic characteristic parameters of the petal-shaped magnetic insulated transmission line are calculated and analyzed as a whole. At the same time, the cold cavity characteristics of the transmission line are analyzed through numerical simulation, the impedance value and electromagnetic field distribution of the transmission line are obtained, and the numerical simulation results are compared with the theoretical calculation values for verification and analysis.

**Key words:** petal shape, low inductance, magnetically insulated transmission line, cold cavity characteristics, numerical simulation

由脉冲功率驱动装置驱动其负载区轴对称分布的电流产生电磁力, 压缩该区域的等离子体形成细柱, 并在轴线上产生碰撞的物理过程, 称为电磁内爆<sup>[1-2]</sup>。电磁内爆通常用来进行高能物理实验研究和武器物理的研究<sup>[3-4]</sup>。同时, 由于超高功率的快速 Z 箍缩过程形成的高温高压, 可能达到聚变点火的条件, 因此, 也掀起了其在民用聚变能源开发领域的研究热潮<sup>[5]</sup>。近年来, Z 箍缩等离子体内爆技术成为了国内外研究的热点。在 Z 箍缩脉冲功率装置中, 传输线传递的是 MV, TW 量级的高功率脉冲<sup>[6]</sup>, 而靶区的尺寸却只有 mm 量级。因此, 在功率汇聚区和靶区

\* 收稿日期: 2021-11-17; 修订日期: 2022-03-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(12075051, 11775045, 11905026)

联系方式: 刘 燕, 15803808946@163.com。

通信作者: 刘腊群, liulq@uestc.edu.cn。

的电场强度将远大于所有介质的击穿场强,导致阴阳极间填充任何介质都将被击穿。所以这些区域通常采用真空传输,利用传输电流产生的磁场将阴极发射的电子偏转,使其返回阴极表面,形成磁绝缘,从而实现功率流的传输<sup>[7-9]</sup>。目前,典型Z箍缩装置(如:美国的Z和ZR装置,我国中国工程物理研究院流体物理研究所最新的脉冲功率装置)均采用四层圆盘锥形磁绝缘传输线(MITL)作为功率汇聚部件<sup>[10-11]</sup>。该构型采用多层传输的方式,能有效降低传输线的电感,从而有利于脉冲功率的传输。但由于四层圆盘锥形MITL的中心汇流区采用了“柱-孔”结构来实现各层之间功率的汇聚,使得该区域的内部结构变得复杂,破坏了电磁场的对称性及均匀性。大量的实验和数值模拟研究表明,“柱-孔”结构所在区域等离子体的形成及扩散,是造成四层圆盘锥形MITL电流损失的主要因素,随着传输电流的增大,电流损失将急剧增加,甚至使脉冲功率无法传输到达负载区<sup>[12-15]</sup>。因此,在未来设计更高功率的Z箍缩装置时,需对多层圆盘锥形MITL的汇流区进行优化或采用其它新的传输线构型实现多路脉冲功率的汇流。本文对一种新型的低电感花瓣形磁绝缘传输线<sup>[16]</sup>的冷腔特性进行了研究,该构型通过将传输线的横截面设计为形似花瓣轮廓的曲折造型来获得相比于圆形横截面更低的电感。通过理论分析及数值模拟,获取了该构型中电磁场的分布及其电感、电容、阻抗等参数。

## 1 模型结构参数

新型的低电感磁绝缘传输线的横截面构型如图1所示。图中内侧花瓣形曲线为阴极轮廓,外侧花瓣形曲线为阳极轮廓,由图1可以看出该传输线由12个类似花瓣构型的周期并联而成。根据其周期性,可取出其中一个花瓣周期来进行具体分析,单个花瓣周期结构如图2所示。而单个周期结构又是由一个平行板段和两个圆弧段(大圆弧段、小圆弧段)组成。其中,平行板段的宽度 $W=722.2\text{ mm}$ ,大圆弧段的弧度 $\theta_1=3.17\text{ rad}$ ,内半径 $r_1=162.1\text{ mm}$ ,小圆弧段的弧度 $\theta_2=2.79\text{ rad}$ ,内半径 $r_2=66.6\text{ mm}$ ,整个传输线的阴阳极间隙均为 $d=20\text{ mm}$ 。若以图1中花瓣形的中心为原点构建极坐标系,则大圆弧段圆心 $O_1$ 和小圆弧段圆心 $O_2$ 的坐标值分别为 $(1318.0\text{ mm}, 0\text{ rad})$ , $(586.6\text{ mm}, 0.2618\text{ rad})$ 。由于花瓣形MITL的构型比较复杂,在计算其电路特征参数和分析真空状态下的电磁场分布时没有直接的公式进行理论分析,为此,本文将花瓣形MITL的平行板段和大小圆弧段单独进行分析,并且分别将圆弧段和平行板段等同于有确定公式的同轴形和平行板构型MITL来对花瓣形进行理论分析及数值模拟研究。

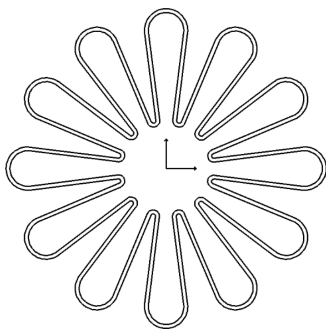


Fig. 1 New low-inductance MITL cross-sectional configuration

图1 新型低电感MITL横截面构型

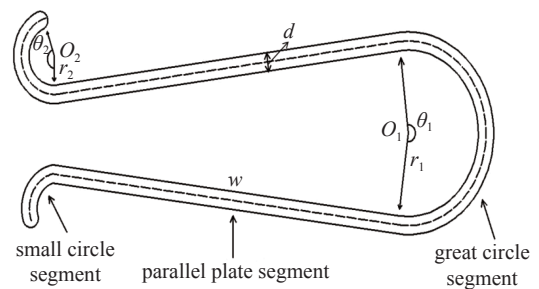


Fig. 2 Periodic structure diagram of a single petal

图2 单个花瓣周期结构图

## 2 理论计算

### 2.1 花瓣形MITL的电磁场分布

花瓣形的平行板段近似平行板构型,其平行板段的电磁场强度计算公式分别为

$$E_1 = V_a/d \quad (1)$$

$$B_1 = 0.5\mu_0 I_1/W \quad (2)$$

式中:  $V_a$ 是MITL的电压,  $I_1$ 是花瓣形平行板段的电流,  $\mu_0$ 是真空磁导率。

花瓣形的圆弧段近似同轴形构型,其圆弧段的电磁场计算公式分别为

$$E_2 = V_a/r \ln(r_{out}/r_{in}) \quad (3)$$

$$B_2 = \mu_0 I_2/\theta r \quad (4)$$

式中:  $r_{out}$ 和 $r_{in}$ 分别是圆弧段的外半径和内半径;  $I_2$ 是对应圆弧段的电流。

## 2.2 花瓣形 MITL 的电容、电感、阻抗计算

花瓣形的平行板段近似平行板构型,其平行板段的电容、电感、阻抗计算公式分别为

$$C_1 = 2W\varepsilon_0/d \quad (5)$$

$$L_1 = \mu_0 d/2W \quad (6)$$

$$Z_1 = d\sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}/2W \quad (7)$$

式中:  $\varepsilon_0$  是真空介电常数。

花瓣形的圆弧段近似同轴形构型,其圆弧段的电容、电感、阻抗计算公式分别为

$$C_2 = \theta\varepsilon_0/\ln(r_{out}/r_{in}) \quad (8)$$

$$L_2 = \mu_0 \ln(r_{out}/r_{in})/\theta \quad (9)$$

$$Z_2 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0} \ln(r_{out}/r_{in})/\theta \quad (10)$$

一个花瓣形周期的总电容是其小圆弧、平行板段和大圆弧三部分电容的并联,而整个磁绝缘传输线的电容由 12 个花瓣形周期并联,通过以上公式计算可以得出为 11.8 nF。MITL 的理论电感和阻抗值与电容计算类似,具体结果分别为 0.86 nH, 0.261  $\Omega$ 。

## 3 三维模拟

本文采用 CHIPIC 软件对这种新型的低电感磁绝缘传输线进行模拟研究。由于该传输线在角向由 12 个对称的周期构成,因此模拟时可采用周期对称边界<sup>[17]</sup>,而且单个花瓣构型也具有对称性,所以取其中一个花瓣形周期的一半进行建模,其三维建模的剖面图如图 3 所示。图 3 中的红色标记是 MITL 结构上加观测点和观测线的分布位置,便于具体的分析 MITL 的电磁场分布及计算电路特征参数。模拟所得的脉冲电压及电流在 10 ns 后达到稳定值,此时电压为 10.0 MV,电流为 1.55 MA,由此计算可得一个花瓣形模拟的阻抗为 3.226  $\Omega$ ,整个 MITL 是由 12 个花瓣形并联而成,则模拟的总阻抗为 0.269  $\Omega$ 。这与前面理论计算推导出的 MITL 总阻抗为 0.261  $\Omega$  对比误差很小,比较吻合。从而验证了本文提出的分段式的方法来计算花瓣形 MITL 阻抗的正确性。

模拟所加的花瓣形电压  $V_a=10$  MV,代入前面推导的理论电场分布的公式,就可以得到观测点处的理论电场强度值。已知花瓣形电压  $V_a$  和各段的理论阻抗,可计算出平行板、大小圆弧段理论电流分别为  $I_1=1.90$  MA,  $I_2=0.75$  MA,  $I_3=0.27$  MA。再将各段理论电流分别代入推导的理论磁场分布的公式,就可以得到观测点处的理论磁场强度值。图 4、图 5 分别表示的是图 3 中不同观测位置阴阳极间隙中心点的电场和磁场的模拟与理论对比分布图,表 1、表 2 分别是观测点电场、磁场的具体模拟与理论值的对比。从表 1 和表 2 可看出,在观测点处电磁场分

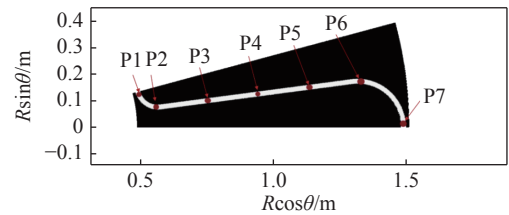


Fig. 3 Half-petal cycle 3D model section view

图 3 半个花瓣周期三维模型剖面图

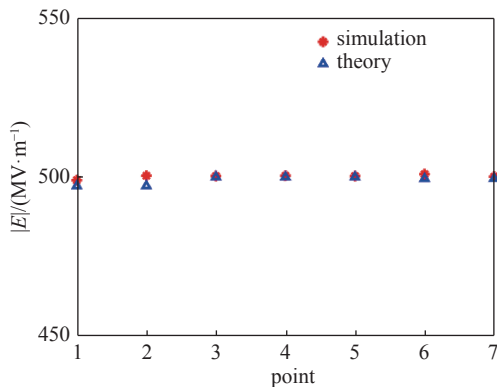


Fig. 4 Simulation and theoretical value of electric field distribution at different observation points of petal-shaped

图 4 花瓣形不同观测点处电场分布的模拟和理论值

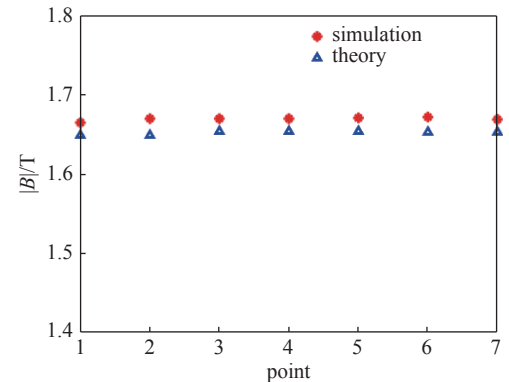


Fig. 5 Simulation and theoretical values of magnetic field distribution at different observation points of petal-shaped

图 5 花瓣形不同观测点处磁场分布的模拟和理论值

表 1 理论计算与 Chhipic 模拟的点的电场分布对比

Table 1 Comparison of electric field distribution between theoretical calculation and Chhipic simulation point

	point	theoretical calculation/(MV·m <sup>-1</sup> )	chhipic simulation/(MV·m <sup>-1</sup> )	relative error/%
small circle segment	P1	497.2	499.0	0.3
	P2	497.2	500.4	0.6
parallel plate segment	P3	500.0	500.3	0.1
	P4	500.0	500.4	0.1
	P5	500.0	500.3	0.1
great circle segment	P6	499.5	500.9	0.3
	P7	499.5	500.9	0.1

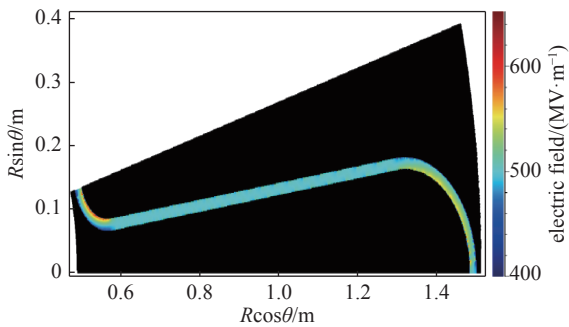
表 2 理论计算与 Chhipic 模拟的点的磁场分布对比

Table 2 Comparison of magnetic field distribution between theoretical calculation and Chhipic simulation point

		theoretical calculation/T	chhipic simulation/T	relative error/%
small circle segment	P1	1.648	1.664	1.0
	P2	1.648	1.669	1.3
	P3	1.653	1.669	1.0
parallel plate segment	P4	1.653	1.669	1.0
	P5	1.653	1.670	1.0
great circle segment	P6	1.652	1.671	1.2
	P7	1.652	1.668	1.0

布模拟和理论值基本一致。

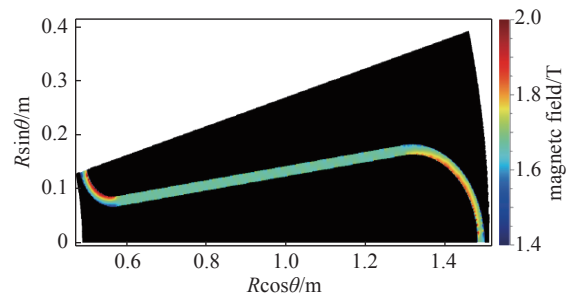
图 6、图 7 分别是模拟得到的花瓣形传输线中的电场和磁场等位图,从图可以看出,在圆弧段,电磁场分布随半径增大而变小,在平行板段电磁场基本呈均匀分布,而在圆弧段与平行板段衔接处则存在着一个明显的场分布由非均匀向均匀过渡的区域。图 8、图 9 分别是在图 3 中对应的观测位置处,构建的垂直于阴极的观测线上的电场和磁场的空间分布,其中横坐标值为线上的点到阴极表面的距离。可看出在位于平板中心处的 P4 位置上阴阳极间隙中的电磁场趋于均匀分布与平行板传输线一致。P1 和 P7 所在位置分别对应于小圆弧和大圆弧段的中心处,它们的电磁场分布与同轴圆柱形传输线一致。而 P2 和 P4 位于圆弧段和平行板段衔接处,其电磁场分布也介于同轴圆柱传输线向平行板传输线过渡之间。



observation time: 50 ns, observation surface:  
(0.490 m, 0 m, 0.500 m) (1.510 m, 0.261 8 m, 0.500 m)

Fig. 6 Isometric map of petal-shaped electric field

图 6 花瓣形电场等位图



observation time: 50 ns, observation surface:  
(0.490 m, 0 m, 0.500 m) (1.510 m, 0.261 8 m, 0.500 m)

Fig. 7 Isometric map of petal-shaped magnetic field

图 7 花瓣形磁场等位图

## 4 结 论

本文提出了先分别计算两种基本构型单元的电磁场分布、电感、电容、阻抗,再将它们做并联计算的方法来获取新型花瓣形 MITL 在真空状态下的理论计算的电磁场分布及电路特征参数,并在 CHIPIC 软件上进行数值模

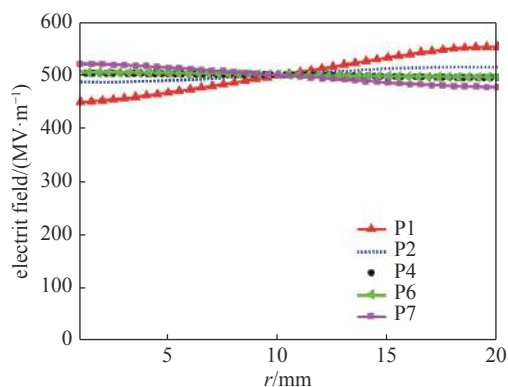


Fig. 8 Spatial variation of electric field from petal-shaped cathode to anode

图 8 花瓣形阴极到阳极的电场空间变化图

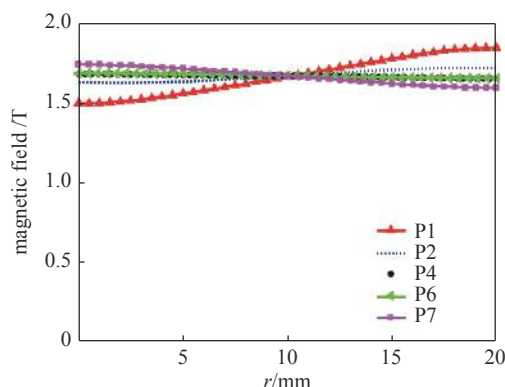


Fig. 9 Spatial variation of the magnetic field from petal-shaped cathode to the anode

图 9 花瓣形阴极到阳极的磁场空间变化图

拟。然后将理论计算与模拟结果进行对比,验证了理论计算方法的正确性。并为后续花瓣形 MITL 的磁绝缘性能的分析提供了基础。

### 参考文献:

- [1] Turchi P J, Baker W L. Generation of high-energy plasmas by electromagnetic implosion[J]. *Journal of Applied Physics*, 1973, 44(11): 4936-4945.
- [2] 赵小明. 磁化靶聚变等离子体电磁内爆压缩模拟研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2019: 5-7. (Zhao Xiaoming. Simulation on the compression of magnetized target fusion plasma by imploding solid liner[D]. Beijing: China Academy of Engineering Physics, 2019: 5-7)
- [3] Matsuka W, Lee H. Determining the temperature and density distributions from a Z-pinch radiation source[C]//11th IEEE International Pulsed Power Conference. 1997: 826-831.
- [4] 肖德龙, 戴自换, 孙顺凯, 等. Z箍缩动态黑腔驱动靶丸内爆动力学[J]. *物理学报*, 2018, 67: 025203. (Xiao Delong, Dai Zihuan, Sun Shunkai, et al. Numerical studies on dynamics of Z-pinch dynamic hohlraum driven target implosion[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67: 025203)
- [5] Asay J R, Hall C A, Knudson M D. Recent advances in high-pressure equation-of-state capabilities[R]. SAND2000-0849C, 2000.
- [6] 宋盛义. 圆盘锥磁绝缘传输系统电磁性能及结构力学理论计算[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2004: 7-10. (Song Shengyi. Calculation of electromagnetic performance and structural mechanics of the circular-conic magnetically insulated transmission line[D]. Beijing: China Academy of Engineering Physics, 2004: 7-10)
- [7] Spielman R B, Deeney C, Chandler G A, et al. PBFA Z: a 60-TW/5-MJ Z-pinch driver[J]. *AIP Conference Proceedings*, 1997, 409(1): 101-118.
- [8] Zhang Pengfei, Hu Yang, Yang Hailiang, et al. Experimental study on magnetically insulated transmission line electrode surface evolution process under MA/cm current density[J]. *Physics of Plasmas*, 2016, 23: 0133105.
- [9] Zou Wenkang, Wei Bing, Liu Laqun, et al. Coaxial-conical transition in magnetically insulated transmission line[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2018, 46(6): 1913-1920.
- [10] 邹文康, 郭帆, 王贵林, 等. 聚龙一号装置磁绝缘传输线的电流损失特性[J]. *高电压技术*, 2015, 41(6): 1844-1851. (Zou Wenkang, Guo Fan, Wang Guilin, et al. Current loss properties of the magnetically insulated transmission line in the PTS facility[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(6): 1844-1851)
- [11] 毛重阳, 薛创, 肖德龙, 等. “聚龙一号”4层绝缘堆和真空区电路模拟方法[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 025004. (Mao Chongyang, Xue Chuang, Xiao Delong, et al. Simulation method of quadruple-level circuit model for stack and vacuum section of Julong-I facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 025004)
- [12] Leopold J G, Navon I. Instabilities in the electron flow along magnetically insulated transmission lines[C]//2013 Abstracts IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS). 2013: 1.
- [13] Leopold J G, Gad R, Navon I. The flow dynamics along non-uniform self magnetically insulated transmission lines[C]//2011 IEEE Pulsed Power Conference. 2011: 856-860.
- [14] Madrid E A, Rose D V, Welch D R, et al. Steady-state modeling of current loss in a post-hole convolute driven by high power magnetically insulated transmission lines[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2013, 16: 120401.
- [15] 赵海龙, 董焯, 周海京, 等. 脉冲功率装置汇流区由电子发射导致的电流损失机制[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 015009. (Zhao Hailong, Dong Ye, Zhou Haijing, et al. Preliminary evaluation of current loss mechanism caused by electron emission at current convergence region on pulsed power facilities[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 015009)
- [16] 周良骥, 邓建军, 蒋吉昊, 等. 一种磁绝缘汇集电流结构: 202020285042.5[P]. 2020-09-01. (Zhou Liangji, Deng Jianjun, Jiang Jihao, et al. Magnetic insulation current collection structure: 202020285042.5[P]. 2020-09-01)
- [17] 戴巍, 朱旭智, 刘腊群, 等. “聚龙一号”装置四层圆盘锥磁绝缘传输线的三维粒子模拟研究[J]. *现代电子技术*, 2015, 38(3): 144-148. (Dai Wei, Zhu Xuzhi, Liu Laqun, et al. Study on 3-D particle simulation of four-level coaxial circular-cone magnetically-insulated transmission line for “JuLong-1” [J]. *Modern Electronics Technique*, 2015, 38(3): 144-148)