

等效导纳模型分析航天器 VHF/UHF 频段屏蔽效能

张玉廷^{1,2}, 李冉^{1,2}, 高文军^{1,2}, 吕争¹, 张华^{1,2}

(1. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094; 2. 北京市电磁兼容与天线测试工程技术研究中心, 北京 100094)

摘要: 针对 VHF/UHF 频段航天器舱体屏蔽处理难度大的问题, 提出一种基于等效导纳模型的屏蔽效能分析方法。该方法将屏蔽舱体孔缝等效为波导结构, 基于变分法原理建立水平电容和垂直电感模型, 对参数失配和舱体厚度影响进行导纳匹配和孔缝宽度参数修正。采用传输线理论建立屏蔽效能分析数学模型。算例对比表明算法具有较高的分析精度, 可有效分析孔缝不位于舱体中心位置和孔缝长度非波长整数倍时的屏蔽效能, 并可准确预测舱体的谐振效应。将其应用到航天器舱体屏蔽效能分析中, 对比结果表明算法可有效满足工程应用要求。

关键词: 屏蔽效能; 等效导纳; 传输线理论; 航天器; VHF/UHF 频段

中图分类号: TN97

文献标识码: A

文章编号: 1000-1328(2016)11-1392-06

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2016.11.015

Analysis of Spacecraft VHF/UHF Shielding Effectiveness Based on Equivalent Admittance Model

ZHANG Yu-ting^{1,2}, LI Ran^{1,2}, GAO Wen-jun^{1,2}, LV Zheng¹, ZHANG Hua^{1,2}

(1. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;

2. Beijing Engineering Research Center of EMC and Antenna Test Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: A shielding effectiveness analysis method based on the equivalent admittance model is proposed to overcome the difficulty of dealing with VHF/UHF shielding of spacecraft. The aperture is treated as a waveguide. The horizontal capacitive model and vertical inductive model are derived from the variation method. The parameter matching admittances and width correction method are also researched. The shielding effectiveness math model is researched based on the transmission line theory. It proves the accuracy of the method and usefulness in dealing with the aperture with arbitrary position and length-wavelength ratio, and it can analyze the resonant effect. The method has been used in analyzing the shielding effectiveness of a telecommunication cavity, and the result comparisons have demonstrated the effectiveness of the approach proposed.

Key words: Shielding effectiveness; Equivalent admittance; Transmission line theory; Spacecraft; VHF/UHF frequency band

0 引言

屏蔽设计是航天器舱体电磁兼容性设计和设备机壳屏蔽设计的一项关键内容。从工程实践来看, 高频段的屏蔽设计相对容易实现, 但 VHF/UHF 频段的屏蔽一直是航天器屏蔽设计的难点和重点。尤其是对于在该频段有接收载荷的高灵敏度的微波载荷卫星, 屏蔽效能的好坏在一定程度上会影响载荷

的正常工作, 甚至成为航天器系统级的一项风险。传统的工作方式是在航天器系统和设备的电磁兼容性测试阶段, 基于测试数据采用相应的措施提高屏蔽效能。但这种后期处理的方式所带来的航天器电磁兼容性设计的费效比是很高的, 因此更需要前期的分析对屏蔽效能进行有效评估以指导舱体和壳体的设计。文献[1]提出壳体屏蔽设计的多项原则, 但未给出定量性的分析和设计方法, 而工程应用中

恰需要能够对屏蔽效能进行精确而又方便的设计和评估的算法。

对屏蔽效能的计算已有多种电磁数值计算方法,如时域有效差分法^[2]、传输线矩阵法和有限元法等。但这些方法对工程设计人员而言过于复杂无法满足工程设计要求。文献[3]所采用的基于 ProE 的三维屏蔽分析方法主要针对的是空间环境粒子辐射,与电磁场分析不同,其对模型的简化和分析过程不考虑孔缝这类细节结构,不适用于航天器电磁场相关的分析。对屏蔽效能计算的一种有效的改进是 Robinson 等^[4]提出的等效电路方法,该方法将屏蔽效能的分析由“场”的分析转换为“路”的分析,大大降低了分析难度,后期的多种分析方法都是在此基础上开展的^[5-6]。但 Robinson 等^[4]提出的算法要求孔缝必须位于屏蔽壳体某个面的中心位置,对此文献[7-8]进行了算法改进,对孔缝位于任意位置的机壳屏蔽效能进行分析。进一步地,文献[9]提出了针对斜入射电磁场的分析方法,文献[10-11]对多面型结构壳体的屏蔽效能进行分析。上述算法的主要问题是当孔缝的尺寸是波长的整数倍时会失效。对航天器这类所处宽频段电磁环境中的系统而言,屏蔽效能的分析需要避免该算法失效的问题。

考虑到航天器系统和设备壳体多为矩形结构,本文研究了一种基于组合导纳矩阵模型的矩形机壳开矩形孔时的屏蔽效能分析方法,该方法可对孔缝处于任意位置的壳体屏蔽效能进行分析,并可避免孔缝尺寸与波长存在整数倍关系时的算法失效问题。

1 屏蔽效能分析模型

对于机壳屏蔽效能的分析,采用如图 1 所示的结构模型,并建立图示的坐标系。壳体尺寸为 $a \times b \times d$,厚度为 t ,孔缝尺寸为 $l \times w$,测量点 M ,坐标为 (m_x, m_y, m_z) 。

对于图 1 所示的屏蔽机壳结构,其电路模型如图 2 所示^[4]。 V_0 表示入射电磁场等效的源电压, Z_0 为自由空间特征阻抗, Z_a 为孔缝等效阻抗。

2 基于等效导纳的屏蔽效能算法

2.1 等效导纳模型

屏蔽壳体的孔缝可以看作一个波导结构,当电

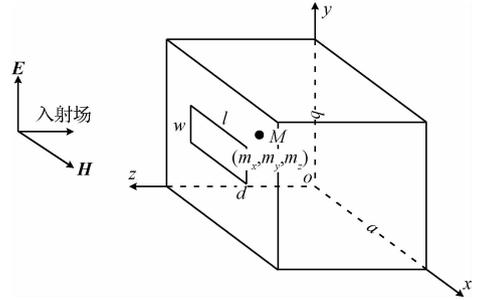


图 1 屏蔽壳体结构

Fig. 1 Shielding enclosure structure

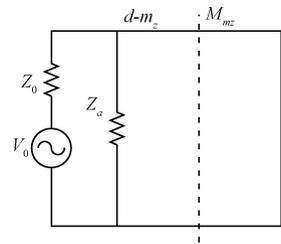


图 2 等效电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit model

磁波穿过该结构时,由于结构的不连续性,理论上电磁波可用基模和无限多的高次模来计算。当用离散电路模型来等效高次模时,必然存在数值稳定性问题。本文采用准静态假设,即假设基模包含了主要传输能量。

参考文献[12-14],对于图 1 所示的等效波导结构,从电路储能角度视角,可等效为横向电容和纵向电感,如图 3 所示。

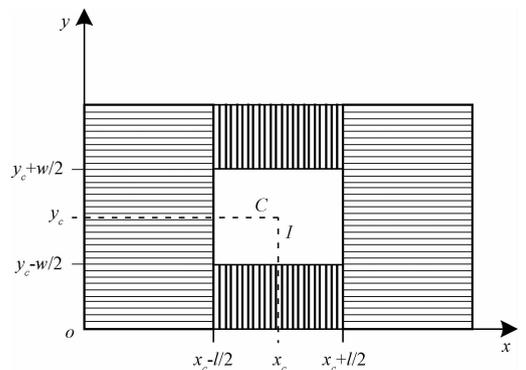


图 3 孔缝等效电容和电感

Fig. 3 Equivalent capacitive and inductive of the aperture

对于矩形波导,TE₁₀模是波导的基模。由变分法可得^[14]:

$$Y = \frac{j4b}{\lambda_c} \left[-\ln\alpha + \frac{2\beta^2\Delta_1}{(1+\alpha^2\Delta_1)} + \frac{2(1-\alpha^2-2\beta^2)^2\Delta_2}{(1+2\alpha^2\Delta_2)} \right] Y_e \quad (1)$$

其中: Y 为所求的等效导纳, Y_e 为电场导纳, λ_c 为波导波长, 并且有:

$$\begin{cases} Y_e = Y_0 \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2} \\ \lambda_c = \lambda [1 - (\lambda/2a)^2]^{-\frac{1}{2}} \\ \alpha = \sin(\pi y_c/b) \sin(\pi w/2b) \\ \beta = \cos(\pi y_c/b) \cos(\pi w/2b) \\ \Delta_n = [1 - (2b/n\lambda_c)^2]^{-\frac{1}{2}} - 1, n = 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (2)$$

式中: Y_0 为自由空间特征导纳, λ 为波长, a 和 b 为图 1 所示的屏蔽机壳长度和高度, w 为图 1 所示孔缝宽度, y_c 为图 2 所示坐标。

式(1)的中括号内的后两项相当于高次模。由于假设 TE_{10} 模是仅有的传输电磁波, 则水平电容导纳和垂直电感导纳为:

$$\begin{cases} Y_C = \frac{j4\gamma_{10}b}{2\pi\omega\mu_0} \ln \left[\csc\left(\frac{\pi y_c}{b}\right) \csc\left(\frac{\pi w}{2b}\right) \right] \\ Y_I = -\frac{j}{a\mu_0 f} \left\{ \frac{\tan^2\left[\frac{\pi(a-l)}{2a}\right]}{1 + \csc^2\left[\frac{\pi(a-l)}{2a}\right]} \right\} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\gamma_{10} = \sqrt{\mu_0\epsilon_0\omega^2 - (\pi/a)^2}$, m 和 n 表示模数, Z_0 为自由空间波阻抗, c 为光速, μ_0 为自由空间磁导率, ϵ_0 为自由空间介电常数, ω 为角频率。

由于式(3)采用了准静态假设, 则对于航天器设备和系统通常的孔缝尺寸而言, 式(3)主要适用于 1GHz 以下频段的屏蔽效能分析。该频段恰是航天器屏蔽分析设计的重点和难点, 故式(3)可适用于航天器 VHF/UHF 频段屏蔽效能的分析。

由式(3)可知, 电容导纳与壳体参数 a 和 b 有关, 电感导纳与壳体参数 a 有关。进一步将电容导纳参数与壳体参数 a 解耦, 即采用孔缝长度 l 代替壳体参数 a , $\gamma_{10} = \sqrt{\mu_0\epsilon_0\omega^2 - (\pi/l)^2}$ 。

由于这种解耦关系的存在导致电容导纳参数变化, 在图 3 所示的等效导纳结构中引入两个等效附加导纳: 自身参数失配导纳 Y_{Cl} 和与电感参数失配导纳 Y_n , 由于失配参数相同, 则:

$$Y_{Cl} = Y_n = -\frac{j}{2a\mu_0 f} \left[\csc^2\left(\frac{\pi x_c}{a}\right) \csc^2\left(\frac{\pi l}{2a}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

则图 3 可进一步将孔缝等效为图 4 所示的等效电路结构。

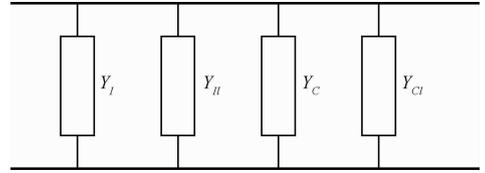


图 4 孔缝等效导纳电路

Fig. 4 Equivalent admittance circuit of the aperture

2.2 屏蔽效能计算

如图 2 所示的电路, 采用传输线理论, 在孔缝处的电压和源阻抗为:

$$\begin{cases} V_1 = V_0 \frac{Z_a}{Z_0} \\ Z_1 = \frac{Z_0 Z_a}{Z_0 + Z_a} \end{cases} \quad (5)$$

在孔缝后端电压和阻抗为:

$$\begin{cases} V_2 = \frac{V_1}{\cos k_c(d - m_z) + j(Z_1/Z_C) \sin k_c(d - m_z)} \\ Z_2 = \frac{Z_1 + jZ_C \tan k_c(d - m_z)}{1 + j(Z_1/Z_C) \tan k_c(d - m_z)} \end{cases} \quad (6)$$

式中:

$$\begin{cases} Z_C = \frac{Z_0}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}} \\ k_c = k_0 \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2} \end{cases} \quad (7)$$

k_0 为自由空间波数。

在监测点 M 的电压和阻抗为:

$$\begin{cases} V_m = V_2 \frac{Z_2}{Z_2 + Z_m} \\ Z_m = jZ_C \tan k_c m_z \end{cases} \quad (8)$$

基于式(5)~(8)可得屏蔽效能为:

$$S = 20 \lg \left(\frac{V_0}{2V_m} \right) \quad (9)$$

其中孔缝等效阻抗为:

$$Z_a = \frac{1}{Y_I + Y_n + Y_C + Y_{Cl}} \quad (11)$$

2.3 屏蔽壳体厚度修正

上述分析都是假设屏蔽壳体的厚度是无限薄的, 但实际屏蔽壳体存在一定的厚度且会影响屏蔽效能。针对本文研究的入射电磁波状态设置, 壳体的厚度对屏蔽效能的影响体现为需要对孔缝的宽度

进行修正,等效孔缝宽度为^[4]:

$$w_c = \begin{cases} w - \frac{5t}{4\pi} \left(1 + \ln \frac{4\pi w}{t} \right), & \frac{w}{d} \leq \frac{1}{2\pi} \\ w - \frac{5t}{4\pi} \left(1 + \ln \frac{2d}{t} \right), & \frac{w}{d} > \frac{1}{2\pi} \end{cases} \quad (12)$$

在对屏蔽效能的分析过程中,采用修正后的参

数 w_c 代替实际参数 w 。

3 仿真校验

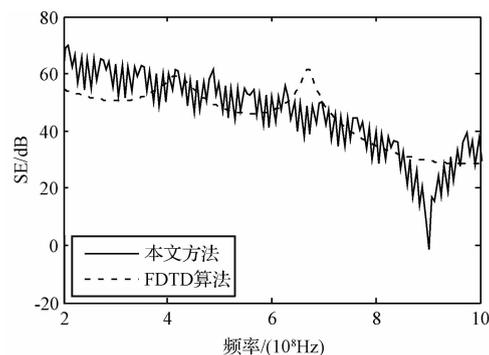
为对算法进行校验,采用两组航天器设备机壳外形数据进行算法仿真,其中机壳厚度假设为 5 mm,数据如表 1 所示。

表 1 算法仿真参数

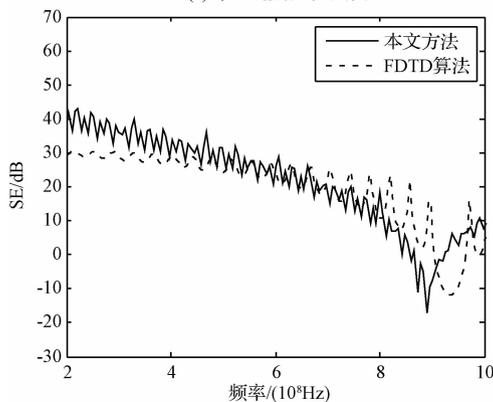
Table 1 Simulation parameters of the algorithm

参数	a/mm	b/mm	d/mm	w/mm	l/mm	t/mm	x_c	y_c	m_x	m_y	m_z
第 1 组数值	300	200	200	5	25	5	150	100	150	100	100
第 2 组数值	300	150	200	10	100	5	200	25	150	75	100

针对表 1 中的两组数据,采用本文算法进行屏蔽效能分析,同时采用商用软件中的时域有限差分 (Finite-difference time-domain, FDTD) 法作为对比分析算法。仿真分析结果如图 5 所示,仿真频段为 200 MHz ~ 1 GHz。



(a) 第 1 组数据对比结果



(b) 第 2 组数据对比结果

图 5 算法仿真结果对比

Fig. 5 Comparisons of the simulation results

从仿真结果可以看出,本文算法和 FDTD 算法的分析结果趋势基本一致。本文算法分析出机壳屏蔽效能存在谐振现象,但 FDTD 算法对谐振现象的预示性不够,仅在孔缝不在屏蔽壳体表面中间位置

时谐振现象才逐步表现出来。从文献[6-9]的分析结果来看,屏蔽壳体的谐振现象是必然存在的,因此,本文算法相对 FDTD 算法对谐振现象的预示方面可信性更高。

从图 5 的对比可以看出,孔缝增大后,会显著影响壳体的屏蔽效能,孔缝越大,屏蔽效能越小。另一方面,表 1 的两组算例中,第 2 组算例相对第 1 组算例,孔缝长度增大的比例更大,表征在电路模型上,其横向等效电容增大,进一步表征为谐振频率下移。同时由图 5 可知,对于与孔缝长度存在整数倍关系的频率点,屏蔽效能计算结果不为 0,与文献[4]对比证明本文算法可以克服孔缝长度为波长整数倍时算法失效的问题。

4 卫星星体屏蔽度试验校验

某卫星舱体尺寸为 2360 mm × 2000 mm × 3800 mm,舱体厚度为 22 mm,在舱体上有一尺寸为 650 mm × 3 mm 的孔缝。舱体内存在晶振频率为 10 MHz 的设备。通过电磁兼容性 (Electromagnetic compatibility, EMC) 试验发现,在该舱孔缝位置存在电磁泄漏,有七个频点与 10 MHz 晶振谐波有关。通过对比单机 EMC 试验数据和舱体 EMC 试验数据得到舱体的屏蔽效能,与采用本文方法进行分析得到的屏蔽效能对比如图 6 所示。

从图 6 可以看出,测试结果和分析结果最大误差为 9.8 dB。误差产生的主要原因是对于复杂电磁环境的系统级屏蔽度分析除受舱体自身屏蔽度和孔缝的泄露影响外,舱内其它设备的反射影响也不可忽略。参考国际标准[15-16],对于系统级 EMC 分析,安全裕量最严为 12 dB,本文算法分析得到的屏蔽度误差在安全裕量要求范围内,并且屏蔽效能

与测试结果的趋势基本一致。同时对比 FDTD 算法分析结果发现,对于大物理尺寸小孔缝结构 VHF/UHF 频段屏蔽效能的分析,FDTD 算法分析结果误差较大,同时结果偏理想。因此,本文算法分析精度可以满足卫星系统级 EMC 工程应用需求。

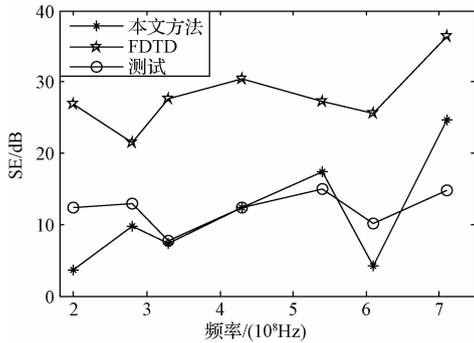


图6 分析测试结果对比

Fig. 6 Comparison between analysis results and test results

5 结论

本文研究了基于等效导纳的航天器 VHF/UHF 频段带矩形孔缝舱体屏蔽效能分析方法。通过将孔缝等效为波导结构,建立其等效导纳模型,通过传输线理论得到屏蔽效能分析数学模型。仿真对比结果表明,所建立的模型对屏蔽效能的分析有较高的精度,并能准确预测屏蔽壳体的谐振效应。且当孔缝不位于壳体中心位置和孔缝长度等于波长的整数倍时,算法仍有效。通过对一航天器舱体的屏蔽效能对比分析发现,算法可对航天器 VHF/UHF 频段的屏蔽效能进行有效的预测,满足工程应用需求。本文算法分析模型相对简单有效,对于评估航天器在该频段的屏蔽效能具有一定的工程意义。

参 考 文 献

[1] 王志强,陈启忠,顾幸生. 某航天系统控制器的电磁兼容设计[J]. 宇航学报,2009,30(3):1159-1163. [Wang Zhi-qiang, Chen Qi-zhong, Gu Xing-sheng. Electromagnetic compatibility design for controller in space system[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(3): 1159-1163.]

[2] 何鸣,刘光斌,胡延安,等. 孔缝对导弹电子设备机箱电磁屏蔽效能的影响[J]. 宇航学报,2006,27(2):262-267. [He Ming, Liu Guang-bin, Hu Yan-an, et al. Influence of apertures in the electronic equipment of missile on electromagnetic shielding effectiveness [J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(2): 262-267.]

[3] 蔡明辉,韩建伟. 基于 ProE 的航天器三维屏蔽与辐射剂量评估方法研究[J]. 宇航学报,2012,33(6):830-835. [Cai

Ming-hui, Han Jian-wei. Method for evaluating shielding thicknesses and radiation dose inside spacecraft based on ProE [J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(6): 830-835.]

[4] Robinson M P, Benson T M, Christopoulos C, et al. Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures [J]. IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, 1998, 40(3): 240-248.

[5] Thomas D W P, Denton A C, Konefal T, et al. Model of the electromagnetic fields inside a cuboidal enclosure populated with conducting planes or printed circuit boards [J]. IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, 2001, 43(2): 161-169.

[6] 焦重庆,齐磊. 平面波照射下开孔矩形腔体的电磁耦合与屏蔽效能研究[J]. 物理学报,2014,61(13):134104-1-134104-6. [Jiao Chong-qing, Qi Lei. Electromagnetic coupling and shielding effectiveness of apertured rectangular cavity under plane wave illumination [J]. Acta Phys. Sin., 2014, 61(13): 134104-1-134104-6.]

[7] 张亚普,达新宇,谢铁成. 偏心孔缝箱体屏蔽效能电磁拓扑分析方法[J]. 电波科学学报,2014,29(5):994-1002. [Zhang Ya-pu, Da Xin-yu, Xie Tie-cheng. Electromagnetic topology algorithm of shielding effectiveness analysis of a metallic enclosure with off-centre apertures [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2014, 29(5): 994-1002.]

[8] Liu E B, Du P A, Nie B L. An extended analytical formulation for fast prediction of shielding effectiveness of an enclosure at different observation points with an off-axis aperture [J]. IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, 2014, 56(3): 589-598.

[9] 罗静雯,杜平安,任丹,等. 一种基于 BLT 方程的孔缝箱体屏蔽效能计算方法[J]. 物理学报,2015,64(1):010701-1-010701-8. [Luo Jing-wen, Du Ping-an, Ren Dan, et al. A BLT equation-based approach for calculating the shielding effectiveness of enclosures with apertures [J]. Acta Phys. Sin., 2015, 64(1): 010701-1-010701-8.]

[10] 范杰清,郝建红,柴培华. 基于扩展传输线法的异型腔电场屏蔽效能[J]. 电工技术学报,2014,29(5):228-238. [Fan Jie-qing, Hao Jian-hong, Qi Pei-hua. Electric field shielding effectiveness of heterotypic enclosures based on adjusted transmission line method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(5): 228-238.]

[11] Shim J, Kam D G, Kwon J H, et al. Circuitual modeling and measurement of shielding effectiveness against oblique incident plane wave on apertures in multiple sides of rectangular enclosure [J]. IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, 2010, 52(3): 566-577.

[12] Nie B L, Du P A. An efficient and reliable circuit model for the shielding effectiveness prediction of an enclosure with an aperture [J]. IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, 2015, 57(3): 357-364.

[13] 张肇仪,周乐柱,吴德明,等译. 微波工程(第三版)[M]. 北京:电子工业出版社,2010.

- [14] Macfarlane G G. Quasi-stationary field theory and its application to diaphragms and junctions in transmission lines and wave guides [J]. J. Inst. Electr. Eng. , 1946, 93: 703 - 719.
- [15] AIAA S - 121 - 2009, Electromagnetic compatibility requirements for space equipment and systems[S].
- [16] MIL-STD - 464C - 2010, Electromagnetic environment effects requirements for systems[S].

作者简介:

张玉廷(1984 -),男,博士,工程师,主要从事航天器电磁兼容性设计等方面的研究。

通信地址:北京 5142 信箱 367 分箱(100094)

电话:(010)68745079

E-mail: zhang_sch@163. com

(编辑:牛苗苗)