

利用磁多极子模型分析空间实验室内部磁场

易 忠 孟立飞

(中国空间技术研究院总装与环境工程部)

摘 要 利用等效磁多极子模型,对磁力矩器在空间实验室(TG-1)内部产生的磁场进行逐点计算,并提供相关磁场分布图。计算结果表明,在空间实验室内部存在磁场较大的区域,飞行产品应该注意强磁场防护。

关键词 空间实验室 磁场 磁力矩器

中图分类号 V448.22+1 **文献标识码** A **文章编号** 1674-5825(2009)03-0005-05

1 引 言

在轨航天器的内部磁场主要是由航天器所携带的磁力矩器引起的。为保证系统各设备正常工作的电磁环境和航天员长期在轨工作生活的安全,需对磁力矩器工作期间产生的磁场进行计算,以便对其他各电子设备的电磁兼容设计、总体布局以及对航天员驻留航天器期间受到的电磁影响分析提供参考。

2 空间实验室磁力矩器的布局

磁力矩器的基本结构为在柱型坡莫合金上绕制一定数量的漆包线,通过控制绕线的电流,控制其磁矩的大小。每个磁力矩器输出最大磁矩为 2000Am^2 ,剩磁矩小于 3%。每个磁力矩器最大外形尺寸为 $\phi 35\text{mm}\times 1500\text{mm}$ 。

空间实验室的磁力矩器布局先后考虑了两种方案:

方案 1:

三轴的磁力矩器分别沿整体坐标系 X、Y、Z 方向安装:

Z 方向磁力矩器的几何中心在整体坐标系下的坐标(4449.5,-1655.5,0);

X 方向磁力矩器的几何中心在整体坐标系下的坐标(5086,-1308.5,-1308.5);

Y 方向磁力矩器的几何中心在整体坐标系下的坐标(4449.5,0,1655.5)。

方案 2:

三轴的磁力矩器分别沿整体坐标系 X、Y、Z 方向安装:

Z TGK431 的几何中心在整体坐标系下的坐标(1200,-2000,2000);

X TGK432 的几何中心在整体坐标系下的坐标(1950,-900,0);

Y TGK433 的几何中心在整体坐标系下的坐标(1950,0,-900)。

具体布局见图 1。

3 磁场计算方法

目前,计算磁力矩器产生磁场的方法主要有两种。

方法一:利用理论公式,将产生的磁场分为螺线管的感应场和柱型坡莫合金感应场两部分,利用电流和磁场关系的公式,对两部分感应场求和^[1]。

即: $B = B_{\text{螺线管}} + B_{\text{感应场}}$

其中^[2],

$$B_{\text{螺线管}} = \mu_0 \cdot \frac{1}{2(R_2 - R_1)} \cdot L \cdot \left[\ln \left(\frac{R_2 + \sqrt{R_2^2 + \left(x + \frac{L}{2}\right)^2}}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + \left(x + \frac{L}{2}\right)^2}} \right) - \ln \left(\frac{R_2 + \sqrt{R_2^2 + \left(x - \frac{L}{2}\right)^2}}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + \left(x - \frac{L}{2}\right)^2}} \right) \right] \quad (1)$$

来稿日期:2008-08-07

作者简介:易忠(1968,08—),男,硕士,研究员,主要从事卫星磁性控制研究及磁试验设备研制工作。

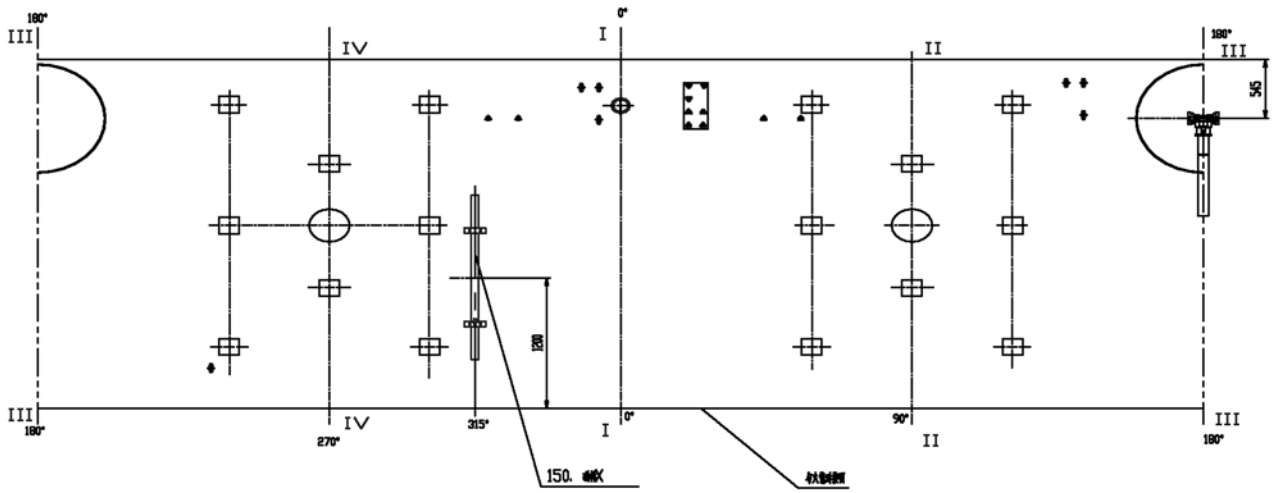


图 1 三轴磁力矩器布局图

式中, n 为螺线管匝数, I 为螺线管上的电流, R_1 为螺线管内半径, R_2 为螺线管外半径, L 为螺线管长度。对于柱型坡莫合金棒体, 其磁化的宏观效果相当

于在棒的侧面出现环形磁化电流, 该磁化电流的分布类似于均匀密绕的螺线管, 因此其周围的磁场为:

$$B_{\text{感应场 } r} = K \cdot \mu_0 \cdot M_0 \cdot \left\{ \frac{x + \frac{L}{2} \cos\theta}{\left(\sqrt{R^2 + x^2 + xL\cos\theta + \frac{L^2}{4}}\right)^3} - \frac{x - \frac{L}{2} \cos\theta}{\left(\sqrt{R^2 + x^2 - xL\cos\theta + \frac{L^2}{4}}\right)^3} \right\}$$

$$= K \cdot \mu_0 \cdot \frac{M}{\pi R^2 L} \cdot \left\{ \frac{x + \frac{L}{2} \cos\theta}{\left(\sqrt{R^2 + x^2 + xL\cos\theta + \frac{L^2}{4}}\right)^3} - \frac{x - \frac{L}{2} \cos\theta}{\left(\sqrt{R^2 + x^2 - xL\cos\theta + \frac{L^2}{4}}\right)^3} \right\} \quad (2)$$

$$B_{\text{感应场 } t} = K \cdot \mu_0 \cdot M_0 \cdot \left\{ \frac{\frac{1}{2} \sin\theta}{\left(\sqrt{R^2 + x^2 + xL\cos\theta + \frac{L^2}{4}}\right)^3} - \frac{\frac{1}{2} \sin\theta}{\left(\sqrt{R^2 + x^2 - xL\cos\theta + \frac{L^2}{4}}\right)^3} \right\}$$

$$= K \cdot \mu_0 \cdot \frac{M}{\pi R^2 L} \cdot \left\{ \frac{\frac{1}{2} \sin\theta}{\left(\sqrt{R^2 + x^2 + xL\cos\theta + \frac{L^2}{4}}\right)^3} - \frac{\frac{1}{2} \sin\theta}{\left(\sqrt{R^2 + x^2 - xL\cos\theta + \frac{L^2}{4}}\right)^3} \right\} \quad (3)$$

式中, x 为距棒体中心的距离, M_0 为磁化率, R 为棒体半径, L 为棒体长度, M 为感应磁场磁矩, K 为磁力矩器系数 (其由绕线均匀度及棒体材料均匀性决定, 一般由实际测量得到)。经实际测量, 其 K 值为 0.59。不同的磁力矩器, 其 K 值略有不同, 根据测试一般在 0.55~0.6 之间变化。

用电流-磁场关系理论公式计算的优点是物理过程清晰, 计算简单方便, 缺点是不能完全反映真实情况, 误差偏大。这是因为产生磁场的实际情况同磁力矩器的规格、绕线方法等因素密切相关, 这些因素

无法完全通过理论公式反映出来。

方法二: 利用实验测量的数据, 建立等效的磁多极子模型, 对整个空间的磁场进行计算^[3]。这种方法的核心思想就是用多个不同位置、不同大小的偶极子来模拟磁多极子 (主要是磁四极子) 所产生的磁场。水平方向, 在 X 轴和 Y 轴上分别用一对大小相等, 方向相反的偶极子来模拟多极子场, 位置任意; 垂直方向用两对大小相等, 方向相反的偶极子来模拟垂直方向的多极子场。换句话讲, 就是用八个偶极子 (四对) 和三个中心偶极子来仿真其周围磁场。这

样卫星的偶极矩并不发生变化, 而其周围磁场可以得到较为精确的仿真, 如图 2。

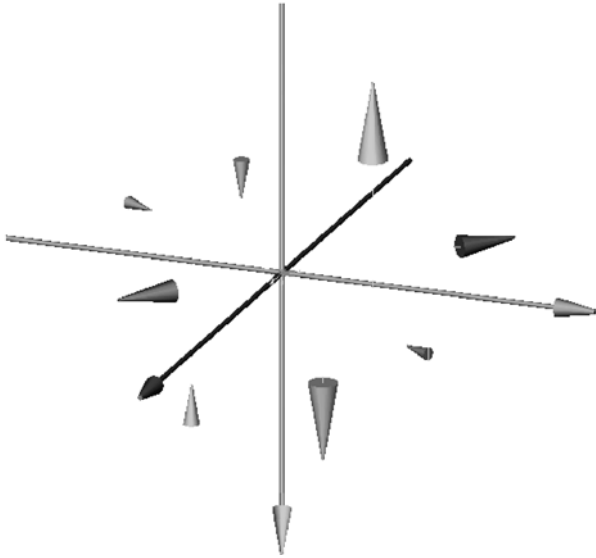


图 2 卫星周围磁场的等效磁多极子模型

这种方法以实验数据为基础, 可以真实的模拟出航天器内部整个空间的磁场值, 误差较小。

$$B_x = -\frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \left\{ \frac{m_{x0}}{r_0^3} - \frac{3x}{r_0^5} [m_{x0}x + m_{y0}y + m_{z0}z] \right\} - \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{i=3}^4 \left\{ \frac{m_{xi}}{r_i^3} - \frac{3(x-x_i)}{r_i^5} [m_{xi}(x-x_i)] \right\},$$

$$B_y = -\frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \left\{ \frac{m_{y0}}{r_0^3} - \frac{3y}{r_0^5} [m_{x0}x + m_{y0}y + m_{z0}z] \right\} - \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{i=7}^8 \left\{ \frac{m_{yi}}{r_i^3} - \frac{3(y-y_i)}{r_i^5} [m_{yi}(y-y_i)] \right\},$$

$$B_z = -\frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \left\{ \frac{m_{z0}}{r_0^3} - \frac{3z}{r_0^5} [m_{x0}x + m_{y0}y + m_{z0}z] \right\} - \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{i=1,2,5,6} \left\{ \frac{m_{zi}}{r_i^3} - \frac{3z}{r_i^5} [m_{zi}z] \right\}$$

其中

$$r_0 = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (\text{代表中心偶极子}) \quad (6)$$

$$r_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + y^2 + z^2} \quad (i=1,2,3,4) \quad (7)$$

$$r_j = \sqrt{x^2 + (y-y_j)^2 + z^2} \quad (j=1,2,3,4) \quad (8)$$

在实际计算中, 将 B_x, B_y 合成一个水平分量 $B_{//}$ 来进行计算, 也就是说实际计算中将磁场分成两部分:

$$B_{//} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}, \quad B_{\perp} = B_z \quad (9)$$

图 3 是利用磁多极子模型对某型号卫星内部磁场的计算结果和测量结果的比较, 可以看出, 误差小于 5%。

5 计算结果

对空间实验室内部磁场进行计算, 取磁力矩器轴向两端各延伸 1.5m, 径向外延 1m (包含外延至舱内的部分) 的范围, 每个磁力矩器周围取点数不少于 100 点。

4 磁场计算仿真模型

本文采用了第二种方法, 利用磁多极子模型进行计算。

由于测量点与偶极子之间的距离与偶极子尺度相比很大, 因此对于磁矩方向沿 z 轴上的四个偏心偶极子, 我们只考虑其产生磁场的垂直分量, 即 B_z 分量; 对于磁矩方向沿 x 轴上的两个偏心偶极子, 只考虑其产生磁场的垂直分量, 即 B_x 分量; 对于磁矩方向沿 y 轴上的两个偏心偶极子, 只考虑其产生磁场的垂直分量, 即 B_y 分量^[4]。

在 x 轴上的 x 向偏心偶极子在空间一点 (x, y, z) 所产生的磁场为^[5]:

$$B_{xi} = -\frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \left\{ \frac{m_{xi}}{r_i^3} - \frac{3(x-x_i)}{r_i^5} [m_{xi}(x-x_i)] \right\} \quad (4)$$

其中 $i=3,4$ 。同理, 可以得到其它偏心偶极子产生的磁场。进而可以得到一个部件在点 (x, y, z) 所产生的总磁场为,

5.1 磁力矩器布局方案 1 的结果:

图 4 为方案 1 中航天器内部 $X=80\text{cm}$ 平面的磁场分布图, 从图中可以看出, 在这个平面, 磁场值主要受 X 方向磁力矩器的影响, 在 X 方向磁力矩器的头部位置磁场值较大, 最大值不超过 0.1Gs 。

图 5 为方案 1 中航天器内部 $X=450\text{cm}$ 平面的磁场分布图, 这个平面为 Y 方向磁力矩器和 Z 方向磁力矩器的安装平面。从图中我们可以清楚的看到, 在 Y 方向磁力矩器和 Z 方向磁力矩器的头部位置附近的磁场明显的大于其它位置的磁场, 另一个磁场较大的位置则是 Z 方向磁力矩器的中心轴的位置。在磁力矩器的头部位置, 最大磁感应强度可以达到 500Gs 左右, 远大于航天器内其它区域。

5.2 磁力矩器布局方案 2 的结果:

图 6 为方案 2 中航天器内部 $X=80\text{cm}$ 平面的磁场分布图, 可以看出, 在磁力矩器布局方案改变了之

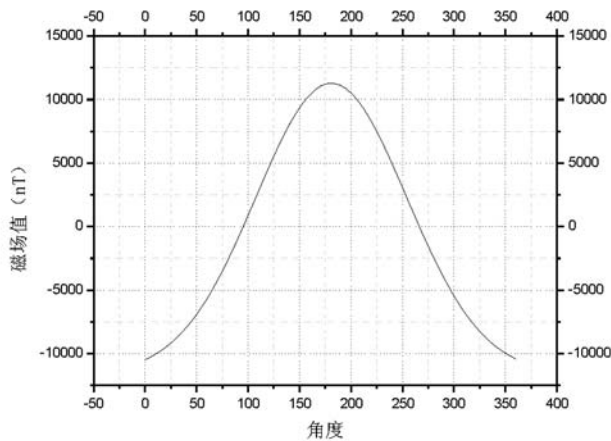
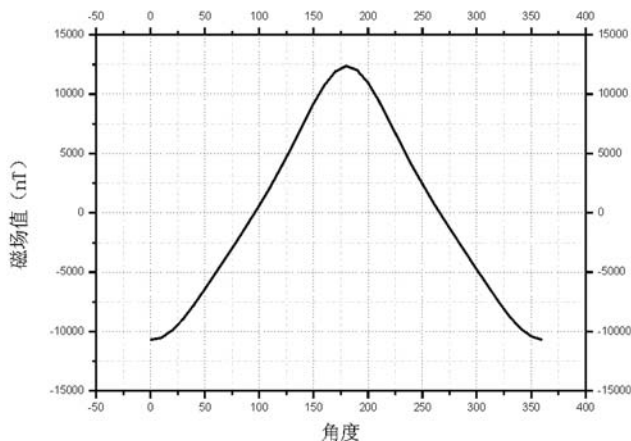


图 3 某型号 400Am² 磁力矩器周围磁场分布曲线测量值(左)和计算值(右)

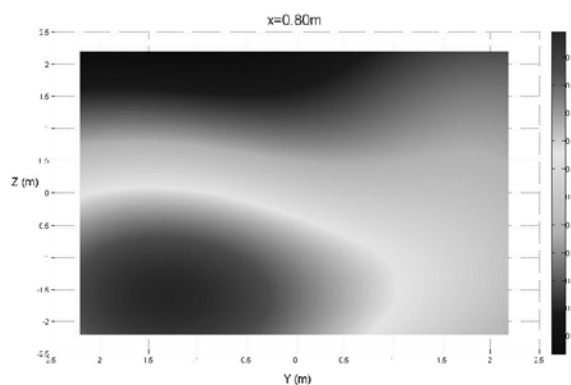
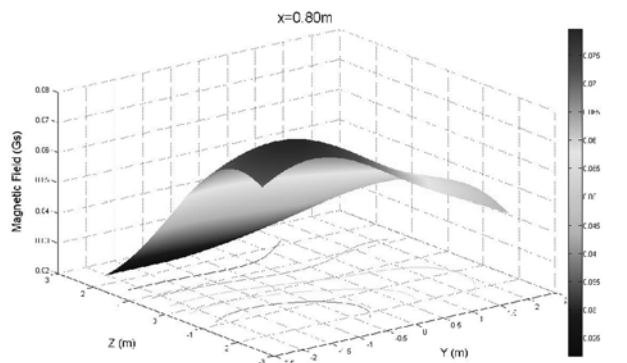


图 4 X=80cm 平面磁场分布图(右图为 z 方向俯视图,下同)

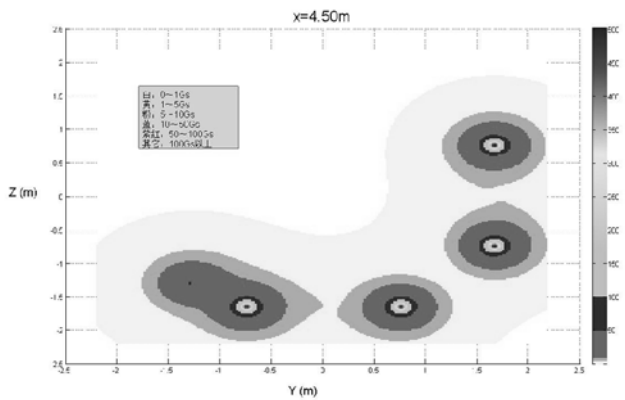
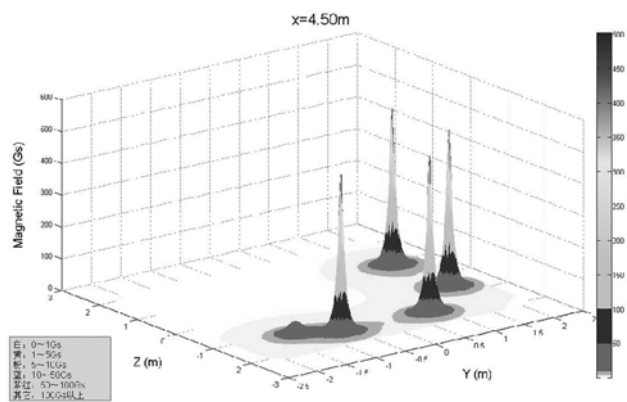


图 5 X=450cm 平面磁场分布图

后,航天器内部磁场分布也发生了很大的变化。在 X 方向磁力矩器的安装轴位置磁场较大,另一个磁场较大的位置是 Z 方向磁力矩器的一个头部位置,另一个头部位置超出了计算边界,没有在图中显示。

图 7 为方案 2 中航天器内部 X=200cm 平面的磁场分布图,这个平面为 Y 方向磁力矩器的安装平面。因此,图中两个磁场较大的区域都是受 Y 方向磁力矩器产生的磁场影响,最大的位置出现在 Y 方向磁力矩器的两端的头部位置,最大值达到 500Gs 左右。

6 结 论

(1) 使用等效多极子模型可以比较准确地计算出航天器内部的磁场分布,同实验测量值比较,误差小于 10%。

(2) 不同的磁力矩器安装方式在航天器内部产生的磁场分布也不同,如果航天器内部有磁敏感部件,可以通过改变磁力矩器安装方式的方法使磁敏感部件避开磁性较大的区域。

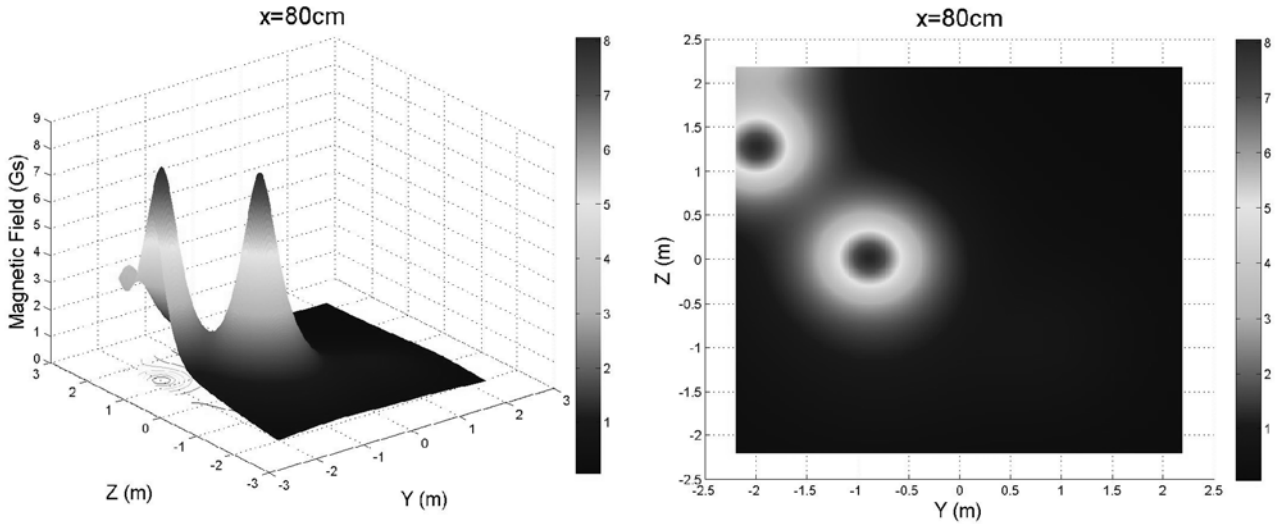


图 6 X=80cm 平面磁场分布图

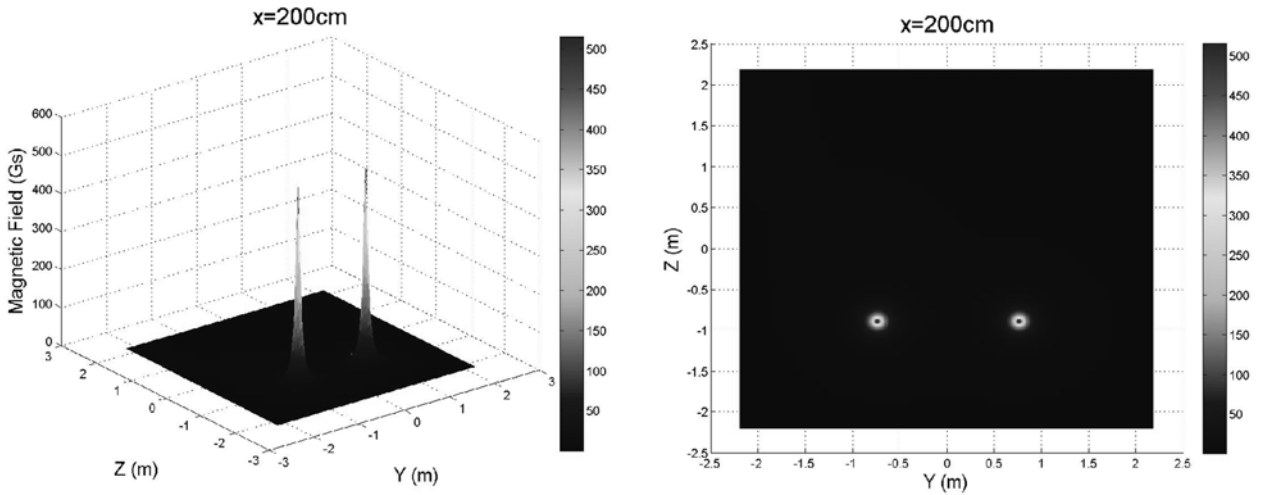


图 7 X=200cm 平面磁场分布图

(3) 从计算结果可以看出, TG-1 内部存在磁场过大的区域。如果在这些区域放置了磁敏感部件, 则必须进行强磁场防护。◇

参 考 文 献

[1] 易忠. 某型号卫星内部磁场分析计算. 航天器环境工程, 2005, Vol.

22, No.6, 318-321
 [2] 赵凯华, 陈熙谋. 电磁学. 高等教育出版社, 1985 年
 [3] 易忠. 卫星磁性仿真模型建立. 航天器环境工程, 2004, Vol.21, No. 2, 8-16
 [4] 秦林祥, 杨泰敏. 计算方法. 兵器工业出版社, 1992
 [5] 戴振铎, 鲁述. 电磁理论中的并矢格林函数. 1995

The Analysis of Magnetic field in SpaceLab with magnetic multi-polar model

Yi Zhong Meng Lifei

(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, China)

Abstract: In this paper, the magnetic distribution of satellite SpaceLab with magnetic multi-polar model are analyzed and calculated and the magnetic field distribution map is provided. The conclusion is there is high-magnetic field region in SpaceLab and magnetic protection should be considered.

Key words: SpaceLab, magnetic multi-polar, magnetic torquer