0254-6124/2008/28(6)-584-08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Chen Jinxin, Wang Yu. Study on actuators of magnetic suspension platform under microgravity environment in space. *Chin. J. Space Sci.*, 2008, **28**(6): 584∼591

空间微重力磁悬浮平台激励器研究

陈进新[1,2,3] 王 宇[3]

[1](中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

[2](中国科学院研究生院)

[3](中国科学院光电研究院)

摘 要 为满足空间实验室的科学实验载荷对微重力环境水平的要求，需要保证空间微重力实验载荷平台的振动隔离性能，即需要平台激励器能在控制系统的作用下适时地产生抑制平台扰动的激励力. 本文提出了平台激励器的初步指标，从磁悬浮基本原理出发设计出多种结构形式，在此结构基础上完成有限元磁路仿真和激励器的线圈设计，并对各种结构形式进行比较，根据比较结果总结出各结构形式的优缺点，为激励器的具体设计提供了依据.

关键词 磁悬浮平台；磁悬浮激励器；结构形式；有限元仿真；线圈设计

中图法分类号 V 414

Study on Actuators of Magnetic Suspension Platform Under Microgravity Environment in Space

CHEN Jinxin[1,2,3] WANG Yu[3]

[1](*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

[2](*Graduate University of Chinese Academy of Sciences*)

[3](*Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences*)

Abstract To fulfill the microgravity level of scientific experiment payloads in space lab, vibration isolation performance of platform with experiment payloads is required. And the actuator of platform under control needs to produce active force timely to restrain the vibration of platform. This paper firstly presents the elementary parameters of actuator. Various structural forms are designed, based on the theory of magnetic suspension. Finite element simulations about magnetic circuit and coil design of the actuator are given based on various forms. To provide basis for the detailed design of actuator, the strong points and shortcomings of each form are concluded through comparisons. The parameters for comparisons mainly involve the mass, the air gap, the maximum force, the current density, the supply power, and the bandwidth of the actuator. The result of comparisons shows that each form is available due to different working conditions and system demands.

Key words Magnetic suspension platform, Magnetic actuator, Structural form, Finite element simulation, Coil design

2008-03-10 收到原稿， 2008-04-28 收到修定稿

1 引言

磁悬浮平台是一种广泛应用于微电子制造、精密定位、微细加工等领域的微机电装置. 它是机、电、磁、热和控制技术的综合 [1]~[5], 应用于空间微重力领域时, 其作用多为隔振, 即为平台上的物体提供要求的微重力振动环境. 国外的空间隔振系统大多是以应用磁悬浮原理的激励器为基础的磁悬浮平台 [6]~[9].

本文提出了应用微重力环境平台激励器的初步指标, 从磁悬浮基本原理出发设计了多种结构形式, 在此结构基础上完成有限元磁路仿真和激励器的线圈设计, 并对各种结构形式进行比较. 比较结果表明, 不同结构形式各有优缺点, 需要从系统角度根据平台的要求来确定具体的设计.

2 激励器初步指标的确定

激励器初步指标确定如下.

(1) 行程

根据国外相关文献, 初步设计时将磁悬浮平台定子与浮子间隙选定为 ±6 mm, 由此得到激励器行程为 ±6 mm.

(2) 最大力

设平台承载质量 (平台上物体与平台浮子质量之和) 为 50 kg, xyz 三方向加速度控制范围为 ±20 mg, 则单方向最大力为

$$F_{\max} = 50\,\mathrm{kg} \times 20\,\mathrm{mg} = 10\,\mathrm{N}. \tag{1}$$

设单方向上至少保证有 2 个激励器, 则单个激励器上要分担的最大力为 5 N, 给予 20% 裕度, 得到单个激励器需提供的最大力为 6 N.

(3) 电流密度

电流密度是线圈设计的关键参数, 其大小对设计方案和费用能耗有很大影响. 在相同条件下, 选择较大的电流密度可以缩小线圈体积, 但电源费用高; 选择较小的电流密度可以减少电源费用, 但线圈体积大; 另外它还受冷却方式的制约.

设平台采用内水冷却方式, 则电流密度的取值范围 [11] 为 1~10 A/mm^2, 实际计算中取电流密度为 5~8 A/mm^2.

(4) 电流变化频率 (3 dB 带宽)

一般电流变化频率比待控最高频率高一个量级. 设隔振频段为 0.01~10 Hz, 则电流变化频率为 100 Hz. 为保证隔振效果, 所取电流变化频率需大于 100 Hz.

3 激励器结构形式

3.1 基本原理

磁悬浮激励器一般有两种基本原理: 电磁力原理和洛伦茨力原理. 电磁力原理是指由变化的电流产生可控磁场, 该磁场对置于其中的导磁材料产生作用力, 如图 1(a) 所示. 一般而言, 气隙间隙 x 小于 1 mm, 当设 N 匝线圈通电电流为 I 时作用力为 $F = \dfrac{B^2 S}{2\mu_0}$, 其中磁通密度 $B = \dfrac{NI\mu_0}{2x}$ (忽略磁漏). 该原理的显著缺点是系统具有明显的非线性, 电流不能控制受力方向, 气隙间隙一般都较小. 洛伦茨力原理是指由永磁体 (或电磁铁) 产生稳定磁场, 该磁场对置于其中的通电导线产生作用力, 如图 1(b) 所示. 当设产生的稳定磁通密度为 B、通电导线有效长度为 L、通电导线电流为 I 时, 作用力为 $F = BIL$. 该原理的显著缺点是当多个激励器组成多自由度平台时, 多磁路间存在叠加耦合的相互影响.

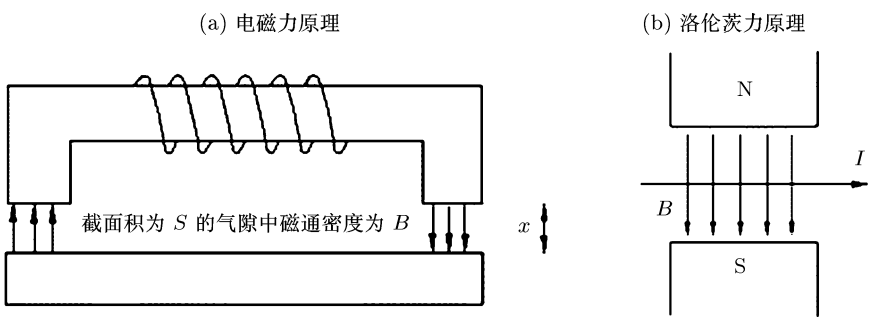

图 1 磁悬浮激励器典型模型

Fig.1 Typical models of magnetic actuator

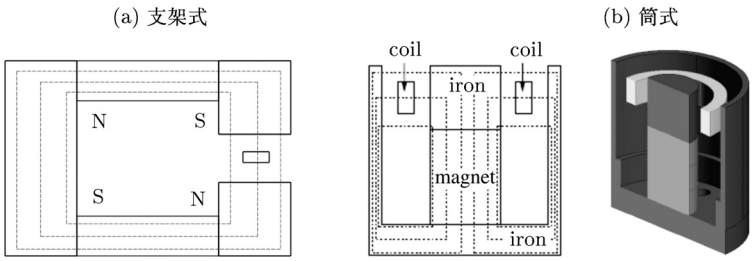

图 2 激励器初步结构

Fig.2 Initial structural forms of actuator

由以上分析可知, 电磁力原理的条件是难以达到的, 尤其其间隙不能满足 ±6 mm 行程要求, 所以激励器选用洛伦茨力原理, 且稳定磁场由永磁体产生 (不引入电磁铁需要的额外功耗). 在洛伦茨力原理上提出如图 2(a) 和 2(b) 所示的两种结构.

选用综合性能较优的钕铁硼磁体 N38H (其指标为: 剩磁 $B_{\mathrm{r}} = 1.26\,\mathrm{T}$, 矫顽力 $H_{\mathrm{cb}} = 955\,000\,\mathrm{A/m}$, 最大磁能积 $(BH)_{\max} = 302\,000\,\mathrm{J/m^3}$). 取磁轭饱和时的磁通密度为 1.8 T, 则磁通路中磁动势相等, 有

$$B_{\mathrm{i}} = \frac{A_{\mathrm{m}}}{A_{\mathrm{i}}} B_{\mathrm{m}} \leqslant 1.8\,\mathrm{T}. \tag{2}$$

其中, B_{i} 为磁轭的磁通密度, B_{m} 为永磁体的磁通密度, A_{i} 为磁轭的截面积, A_{m} 为永磁体的截面积.

代入钕铁硼磁体的剩磁 (能取的最大磁通密度), 得到

$$\frac{A_{\mathrm{m}}}{A_{\mathrm{i}}} \leqslant 1.43. \tag{3}$$

式 (3) 即为未饱和磁通路尺寸的设计依据.

3.2 支架式结构

支架式激励器又可继续分为两种, 即 A1—— 线圈处于永磁体产生的近似匀强磁场的结构形式, A2—— 线圈超出永磁体范围的结构形式. 图 3 分别给出了 A1 各种可能结构形式下的磁场分布, 图 3 中永磁体部分已经标出, 虚线矩形框为通电导线, 其余实体为磁轭. 磁场分析结果是由有限元仿真出来的. 从图 3 可以看出, 图 3(a), (e) 所示结构形式有明显的缺点, 其外漏磁场偏大, 需要屏蔽措施, 质量偏大, 图 3(e) 的体积偏大; 图 3(b), (c), (d) 所示结构形式也有明显的缺点, xy 向耦合较大, 控制难度增加, 质量偏大, 图 3(d) 的体积偏大.

图 4 所示为激励器 A2 的工作原理, 其由两小

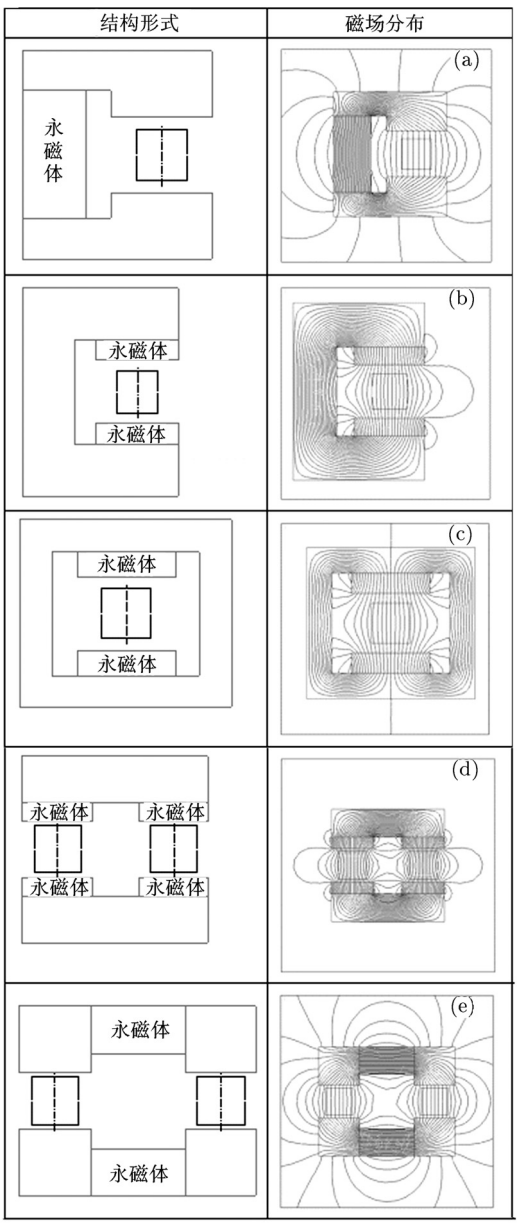

图 3 激励器 A1 的结构形式及磁场分布

Fig.3 Structural forms, magnetic distributions and distinct shortcomings of actuator A1

圆柱永磁体产生磁场，U 形铁提供磁通路，绕线方法如图 5 所示．这样绕线的优点是，圆弧导线在磁场中受力的合力始终为零，只产生一个值很小的可以忽略不计的力矩，即耦合度降低．直导线在磁场中受力的方向一致，所有导线部分在磁场中受力的合力即为直导线受力的合力．另外，因永磁体较小激励器 A2 还具有外漏磁场较小和体积较小、质量较轻的优点．

用有限元仿真出的结果如图 6 所示．由图 6 可知，直导线处的磁通密度平均为 0.134 T.

3.3 筒式结构

筒式激励器有 B1, B2 和 B3 三种不同的结构形式 (见图 7~9)．永磁体部分用斜线标出，通电导线缠绕在平台浮子上，其余实体为磁轭．对这三种结构形式分别进行有限元仿真，得到图 10~12 仿真结果，由图 10 所示的 B1 仿真结果可知，间隙可近似为匀强磁场；径向磁通密度可取为 0.077 T, 轴向磁通密度至少比径向磁通密度少一个量级；线圈移动时，整体磁通密度不变 (因为线圈所切割的磁力线总根数不变), 整体受力大小也不变，但会产生一个附加力矩；线圈半径远小于线圈圆心到平台质心的距离，故附加力矩对平台影响较小，可视为平台的一个外界干扰．同理可知，B2 的磁通密度平均为 0.226 T, B3 的磁通密度平均为 0.2 T.

4 激励器的线圈设计

以激励器 B1 为例进行线圈设计．

在图 7 中设线圈内径 $r_2 = 18\,\mathrm{mm}$, 外径 $r_1 = 23\,\mathrm{mm}$, 高 $h = 18\,\mathrm{mm}$, 宽 $w = 5\,\mathrm{mm}$. 则线圈体积

$$V = h\pi(r_1^2 - r_2^2) = 11.592 \times 10^{-6}\,\mathrm{m}^3. \tag{4}$$

最大电流密度

$$\frac{I_{\max}}{A} = \frac{F_{\max}}{BV} = 6.7\,\mathrm{A/mm}^2. \tag{5}$$

每匝线圈均长

$$L_{\mathrm{m}} = 2\pi(r_1 + r_2)/2 = 128.8\,\mathrm{mm}. \tag{6}$$

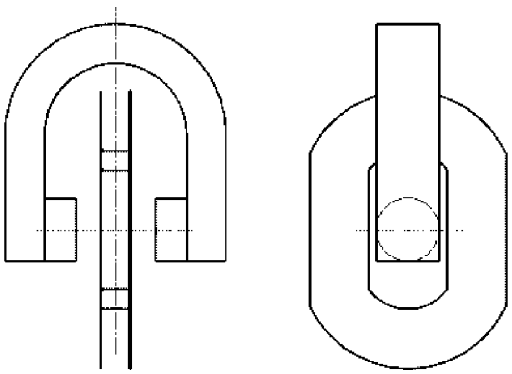

图 4 激励器 A2

Fig.4 Actuator A2

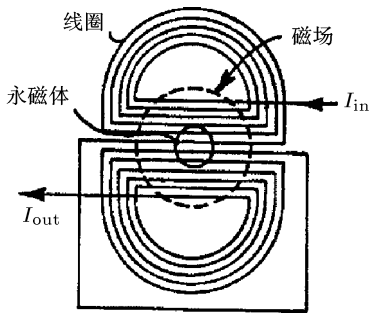

图 5 激励器 A2 的绕线方法

Fig.5 Winding method of actuator A2

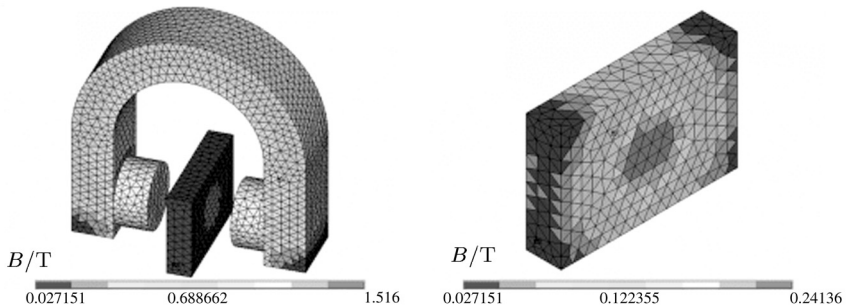

图 6 激励器 A2 的仿真结果

Fig.6 Simulation results of actuator A2

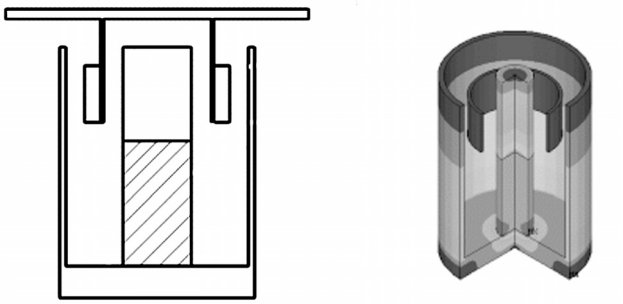

图 7 激励器 B1

Fig.7 Actuator B1

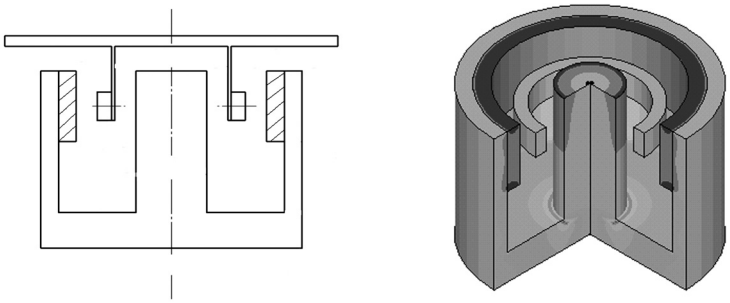

图 8 激励器 B2

Fig.8 Actuator B2

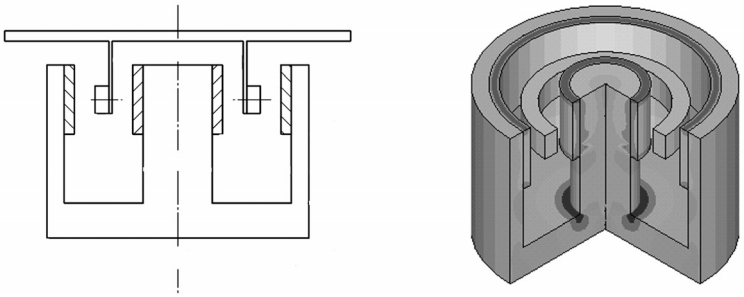

图 9 激励器 B3

Fig.9 Actuator B3

设铜填充系数 $K_{\mathrm{u}}=0.6$, 取铜密度 $\rho_{\mathrm{c}}=8.930\ \mathrm{g/cm^3}$. 则线圈总质量

$$m_{\mathrm{c}}=\rho_{\mathrm{c}}(whK_{\mathrm{u}}L_{\mathrm{m}})=62.1\,\mathrm{g}. \tag{7}$$

取铜线半径

$$r_{\mathrm{w}}=0.28\,\mathrm{mm}. \tag{8}$$

线圈圈数

$$n=\frac{whK_{\mathrm{u}}}{A_{\mathrm{w}}}=\frac{whK_{\mathrm{u}}}{\pi r_{\mathrm{w}}^2}=220. \tag{9}$$

取铜的电阻率 $\rho_{\mathrm{r}}=2\times10^{-8}\Omega\cdot\mathrm{m}$, 则线圈电阻

$$R_{\mathrm{c}}=\rho_{\mathrm{r}}\frac{l_{\mathrm{w}}}{A_{\mathrm{w}}}=\rho_{\mathrm{r}}\frac{nL_{\mathrm{m}}}{\pi r_{\mathrm{w}}^2}=2.3\,\Omega. \tag{10}$$

线圈通电电流

$$I_{\mathrm{c}}=\frac{I}{A}\times\frac{A_{\mathrm{w}}}{K_{\mathrm{u}}}\leqslant\frac{I_{\max}}{A}\times\frac{A_{\mathrm{w}}}{K_{\mathrm{u}}}=2.75\,\mathrm{A}. \tag{11}$$

线圈最大热耗

$$Q=I_{\mathrm{c}}^2R_{\mathrm{c}}=17.4\,\mathrm{W}. \tag{12}$$

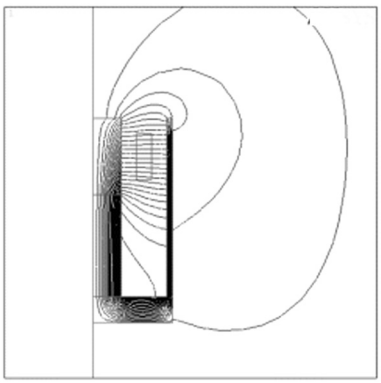

图 10 激励器 B1 的仿真结果
Fig.10 Simulation results of actuator B1

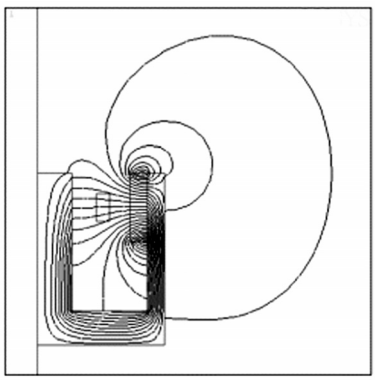

图 11 激励器 B2 的仿真结果
Fig.11 Simulation results of actuator B2

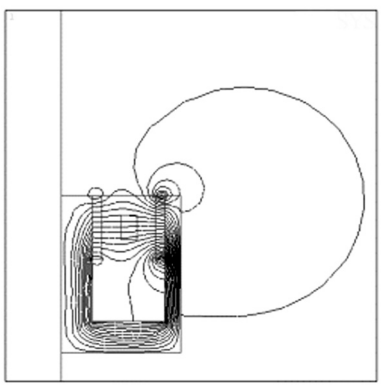

图 12 激励器 B3 的仿真结果
Fig.12 Simulation results of actuator B3

通过电流 I 后线圈内产生磁通密度

$$B = \frac{\mu_0 \mu_r nI}{K_f h}. \tag{13}$$

式中 μ_r 为线圈内部的相对磁导率， K_f 为线圈磁场的漏磁系数. 线圈内部有导磁材料存在，故 $\mu_r > 1$; 另外，线圈不可能做到无漏磁，所以 $K_f > 1$. 初步计算时忽略导磁材料和漏磁的影响，取 $\mu_r = 1$, $K_f = 1$.

通过电流 I 后线圈内产生磁通

$$\psi = n\frac{\mu_0 nI}{h}\pi r_2^2. \tag{14}$$

线圈自感系数

$$L = \frac{\psi}{I} = 3.44\,\mathrm{mH}. \tag{15}$$

时间常数

$$\tau = \frac{L}{R_c} = 1.5\,\mathrm{ms}. \tag{16}$$

3 dB 带宽

$$f_{3db} = \frac{1}{2\pi\tau} = 107\,\mathrm{Hz}. \tag{17}$$

由以上计算过程可知，线圈的最大电流密度、最大热耗和 3 dB 带宽只与线圈的整体尺寸相关; 在整体尺寸确定的情况下，线圈圈数、线圈电阻、最大电流和自感系数是所选铜线半径的函数. 对激励器 B2 和 B3, 它们与铜线半径的具体关系如图 13 和图 14 所示.

按以上的计算方式，将激励器 A2 的线圈等效为两个圆线圈串联，同样可以得到激励器 A2 的线圈参数.

5 激励器各形式的比较

表 1 为激励器 A2, B1, B2 和 B3 的相互比较. 各参数是在满足行程为 ±6 mm 和最大力为 6 N 的前提下，以电流密度 ($5 \sim 8\,\mathrm{A/mm^2}$) 和 3 dB 带宽 ($> 100\,\mathrm{Hz}$) 为设计目标得出的. 由表 1 可知，磁极相向 (如 A2 和 B3) 产生的磁通密度较大，同时漏磁也较大; 激励器 B2 和 B3 相比较， B2 有优势, B2 永磁体体积较多因而磁通密度较大， B2 线圈量较小因而最大热耗较小; 激励器 B1, B2 和 B3 相比较， B1 漏磁优势明显; 激励器 A2 质量优势明显, 激励器 B2 功耗优势明显; 7 cm 处漏磁一般比相应的线圈处磁通密度小两个量级，因而可以把多个激励器之间的磁场叠加耦合影响忽略.

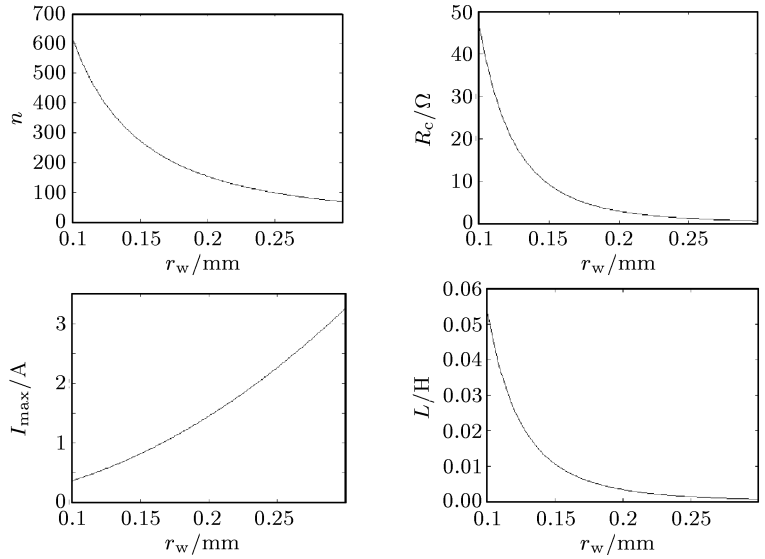

图 13 激励器 B2 的线圈圈数、电阻、最大电流和自感系数与铜线半径的关系

Fig.13 Relationships between radius of brass wire and loop number, resistance, maximum current, inductance of actuator B2

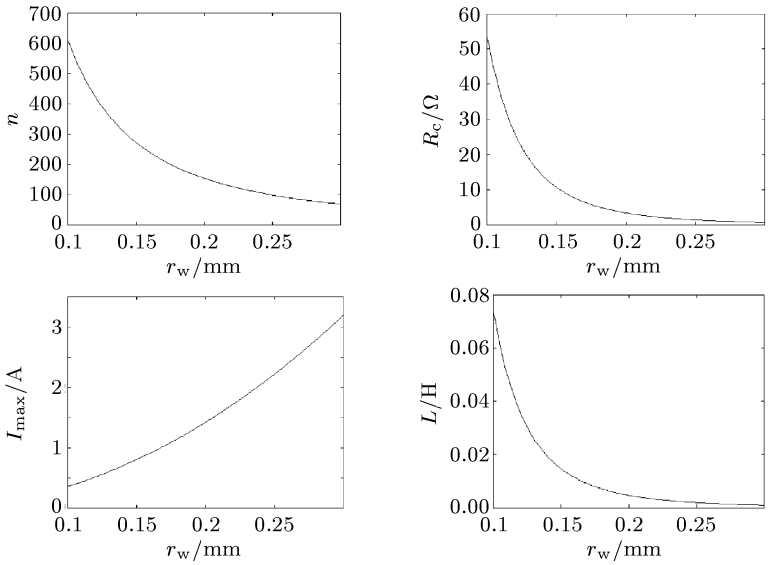

图 14 激励器 B3 的线圈圈数、电阻、最大电流和自感系数与铜线半径的关系

Fig.14 Relationships between radius of brass wire and loop number, resistance, maximum current, inductance of actuator B3

6 结论

(1) 激励器的指标由空间微重力磁悬浮隔振平台的指标来确定.

(2) 较大行程的磁悬浮激励器应采用洛伦茨力原理.

(3) 激励器 A1 种类多样, 但普遍质量偏大, 而且有的还增加了控制难度.

(4) 激励器 A2 最显著的特点是质量轻, 但是热耗比较大.

(5) 激励器 B2 和 B3 最显著的特点是热耗小, 但质量重.

(6) 激励器 B1 质量和热耗居中, 综合性能比较好.

表 1 激励器 A2, B1, B2 和 B3 的相互比较

Table 1 Comparisons of actuator A2, B1, B2 and B3

		激励器 A2	激励器 B1	激励器 B2	激励器 B3
外包络 /mm		$56 \times 87 \times 50$	$\phi 62 \times 80$	$\phi 74 \times 50$	$\phi 76 \times 50$
质量	磁铁 + 铁 /kg	0.2	0.64	0.91	0.92
	线圈 /g	112.5	62.1	20.5	23.7
平均磁通密度 /T		0.134	0.077	0.226	0.2
电流密度 /(A·mm^{-2})		6.1	6.7	6.9	6.78
最大热耗 /W		25.6	17.4	6.15	6.78
3 dB 带宽 /Hz		178	107	138.8	116
7 cm 处漏磁 /T		0.154×10^{-3}	0.7×10^{-3}	1.9×10^{-3}	1.8×10^{-3}

总之，不同形式的激励器各有优缺点，需要从系统角度提出平台的质量和热耗要求来确定具体的设计.

参考文献

[1] Song Wenrong, Yu Guofei, Sun Baoyu *et al.* Research on the structure design of a precision stage based on magnetic levitation technology and used in microelectron manufacturing field. *Opt. Prec. Eng.*, 2002, **6**(3):271∼275. in Chinese (宋文荣, 于国飞, 孙宝玉等. 微电子制造领域的磁悬浮精密平台的结构设计研究. 光学精密工程, 2002, **6**(3):271∼275)

[2] Sun Yibiao, Guo Qingding. Fuzzy self-learning cross coupling compensation control for gantry-moving type milling machining center. *J. Shenyang Univ. Tech.*, 2004, **26**(1):47∼50. in Chinese (孙宜标, 郭庆鼎. 龙门加工中心的模糊自学习交叉耦合补偿控制. 沈阳工业大学学报, 2004, **26**(1):47∼50)

[3] Wu Yingfei, Zhou Zhaoying. Ultra precision positioning stage. *Micro-fabric. Tech.*, 2002, **6**(2):41∼47. in Chinese (吴鹰飞, 周兆英. 超精密定位工作台. 精细加工, 2002, **6**(2):41∼47)

[4] Tang Guangpu, Guo Qingding. Research on synchrodrive control technology for dual motors based on adaptive control. *J. Shenyang Univ. Tech.*, 2002, **24**(6):470∼472. in Chinese (唐光谱, 郭庆鼎. 自适应双电机同步传动控制技术的研究. 沈阳工业大学学报, 2002, **24**(6):470∼472)

[5] Liu Dejun, Guo Qingding, Weng Xiuhua. Thrust control of linear motor driving magnetic suspension platform based on inverse control. *J. Shenyang Univ. Tech.*, 2005, **27**(2):183∼186. in Chinese (刘德君, 郭庆鼎, 翁秀华. 基于逆控制的直线电机驱动磁悬浮平台推力系统. 沈阳工业大学学报, 2005, **27**(2):183∼186)

[6] Jackson M, Kim Y, Whorton M. Design and Analysis of the G-Limit Baseline Vibration Isolation Control System. 2002, AIAA2002-5019

[7] Donald L E *et al.* Non-contacting Isolated Stabilized Microgravity Platform System. United States Patent, 5638303. 1997-06-10

[8] Donald L E . Collocated Sensor Actuator. United States Patent, 5740082. 1998-03-14

[9] Donald L E *et al.* Umbilical And Followed Assembly Utilized In Microgravity Platform System. United States Patent, 5844815. 1998-12-01

[10] Mark Whorton. Fundamentals of microgravity vibration isolation. 6th Annual PIMS Microgravity Environment Interpretation Tutorial (MEIT), Washington: NASA Glenn Reserch Center, 2003

[11] Li Quanfeng. Numerical Calculations of Electromagnetic Field and electromagnet design. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. 169∼170. in Chinese (李泉凤. 电磁场数值计算与电磁铁设计. 北京：清华大学出版社, 2002. 169∼170)