

电磁弹射微重力科学实验装置

控制方法研究

李雨蔓^{1, 2} 董文博^{1, 2, 3} 王喆^{1, 3} 张永康^{1, 3} 张建泉^{1, 2, 3} 吕从民^{1, 2, 3}

1(中国科学院空间应用工程与技术中心 北京 100094)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(中国科学院太空应用重点实验室 北京 100094)

摘要 新型电磁弹射式微重力装置采用直线电机带动实验舱进行垂直抛物线运动来模拟微重力环境。与传统落塔相比，通过弹射方式能大大延长装置提供的微重力时间，但直线电机驱动也为保证实验舱内的高微重力水平带来新的挑战。为了确保电机驱动下的实验舱环境能够满足微重力科学的实验要求，本文对电磁弹射落塔的多组电机分段拖动系统进行模型分析并提出分段控制方案，对影响微重力水平的电机协同问题和内外舱配合问题设计了位移-跟踪控制算法，最终实现了外舱低扰动和内舱高微重力的指标。目前实际系统已经建成并投入应用，采用了论文的电机系统控制方法，可以实现4s左右的高微重力水平控制，对于微重力科学实验装置的研究提供支撑作用。

关键词 微重力科学、直线电机、位移跟踪、分段控制、微重力落塔

中图分类号 航天研究试验及实验室 V524

Control Strategy for Microgravity Science Electromagnetic Experimental Facility

Yuman Li^{1, 2} Wenbo Dong^{1, 2, 3} Zhe Wang^{1, 3} Yongkang Zhang^{1, 3} Jianquan Zhang^{1, 2, 3} Congmin Lv^{1, 2, 3}

1 (Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences)

2 (University of Chinese Academy of Sciences)

3 (Space Manufacturing Technology Key Laboratory, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

The new electromagnetic catapult microgravity device employs linear motors to

* 基金项目：载人航天工程—空间应用系统（412021000031）；中科院科研仪器研制项目（YJKYYQ20180017）；中国科学院青年创新促进会；

投稿日期：2024/1/31

E-mail: liyuman16@csu.ac.cn, wbdong@csu.ac.cn

drive the experimental module in vertical motion, simulating a microgravity environment. In comparison to traditional drop tower methods, utilizing a catapult for parabolic motion significantly extends the duration microgravity time. However, the linear motor's drive introduces new challenges in ensuring a high level of microgravity quality. To meet the experimental requirements of microgravity science, this paper conducts a model analysis of the segmented dragging system of the electromagnetic catapult drop tower. It proposes a segmented control scheme and designs a displacement-tracking control algorithm for addressing motor coordination issues affecting microgravity levels and the coordination between inner capsule and outer capsule. This ultimately achieves prevention of disturbance from outer capsule to the inner capsule. The practical system has been constructed and put into operation, employing the motor control method outlined in the paper, enabling microgravity time around 4 seconds. This research provides crucial support for the development of microgravity experimental devices.

Keywords Microgravity Science, Linear Motors, Displacement Tracking, Segmented Control, Microgravity Drop Tower

1. 引言

微重力科学是空间科学的重要研究方向，长时的微重力实验需要在空间站和科学卫星上完成[1]，而短时的实验可以利用成本更低的地基微重力设施如落塔、落管、失重飞机、探空火箭等更便捷的进行。地面微重力实验既可以作为对空间项目进行前期验证和对比，也可以用于能够在短时间内进行的微重力科学研究。在常用的地基微重力设备中，失重飞机可以达到 20s 以上微重力时间[2]，但对飞机和飞行员要求都非常高[3]，且微重力水平较低；落塔/落管是最便捷经济的方案，但微重力时间较短，且设施建造成本很高[4]。国际上正在运行的微重力落塔/深井设施有德国的 ZARM 落塔[5]、美国 NASA 的 Zero-g 深井[6]、日本的 MGLAB 深井[7]、中科院力学所微重力落塔[8]、印度落塔[9]、澳大利亚落塔[10] 以及清华大学微重力燃烧落塔[11]等。传统落塔的主要问题是微重力时间较短[12]且过载较大：回收冲击加速度可以达到 30g 以上，每次实验准备工作耗时较长，通常每天只能进行 2-4 次实验。

新一代的电磁弹射式落塔提出利用直线电机带动实验舱上抛和下落实现微重力环境的方式[12]，其加速方式和飞机电磁弹射的方式类似[13]。这种电磁装置的优点很多：①微重力时间长：相同高度的落塔可以实现双倍微重力时间。②过载可控：电磁力控制全程可控，在加速段可以将过载控制到 3g~5g，甚至达到可载人的量级；传统落塔采用被动的缓冲阻尼材料，过载可以达到 50g。中国科学院力学所微重力落塔（NMLC）在回收过程中采用了馈能电机+钢索阻拦，结合橡皮筋组编制网带进行缓冲，将过载降低至 13g 左右，是传统落塔中的过载较优水平，而电磁弹射式落塔则可以相对容易地将过载控制在 10g 以下。③具备变重力能力：在自由段还可模拟各类低重力条件，例如月球重力和火星重力，能够为更多实验用途提供条件。④可重复实验：电机带动上抛的方式方便进行多次重复实验，提高了实验效率[12][14-16]。除电磁弹射方式外，实现上抛还有化学能、机械能、液压的方式，如德国 ZARM 研制的液压上抛装置使得从原来的 4.74 秒延长到 9.48 秒；但各类上抛方式中只有直线电机可以实现全程控制，并且过载最小，效率最高，安全性也更好。目前电磁落塔的研究主要在德国和中国开展：德国汉诺威大学正在建设爱因斯坦电

梯装置[14-16]，该装置希望以后用于 3D 打印、冷原子物理等方面的微重力实验，其基本指标为 4 秒、5g 过载、500kg 载荷，和 $10^{-6}g$ 量级微重力水平；中科院空间应用中心从 2017 年开始研究电磁弹射微重力技术，首次利用 3 米的电机验证了短时电磁弹射原型装置 MEFEL 的功能 [17]，目前已经基本建成 45 米 4 秒微重力时间的电磁弹射微重力装置指标与爱因斯坦电梯相当[18-19]。

直线电机的控制系统在微重力装置的应用场景与电磁弹射场景有所不同，电磁弹射只需要考虑发射推力和出口速度[20-22]，而微重力落塔则对直线电机有更高的速度跟踪及位置跟踪性能要求。前期研究已经对电磁弹射微重力实验装置在运动过程中产生的电机、结构、气动力等引起的振动和噪声对实验舱微重力水平的影响进行分析[17-19]。我们发现多段电机在驱动控制中会带来外舱干扰，影响微重力水平；此外，双排电机的协同和内外舱的跟踪也可能影响微重力水平。因此，如何采用更好的控制方法实现微重力落塔的实验舱的运动跟踪，同时保证更好的微重力水平，是控制系统需要解决的核心问题。

2. 电磁弹射微重力装置控制系统

1.1 系统组成概述

电磁弹射微重力实验装置系统的电机布局和驱动器连接关系如图 1 所示。在双层支撑结构内部铺设双排直线电机定子和三排导轨，动子安装在实验舱外侧由定子驱动进行垂直运动，舱外的三排导轨用于确保运行方向正位。电机的自由微重力段 20m，加速段约 10m，载荷重量 500kg，电机出力最大 25kN。实验舱通过双排电机驱动，采用多变频器分段供电，方式以节约能耗，各段定子长度为 $L_0=1.709m$ ，动子板长度 $L=2.5m$ ，因此每段定子最多同时与三段动子耦合，即电机分段切换可以等效为三段电机之间的切换。

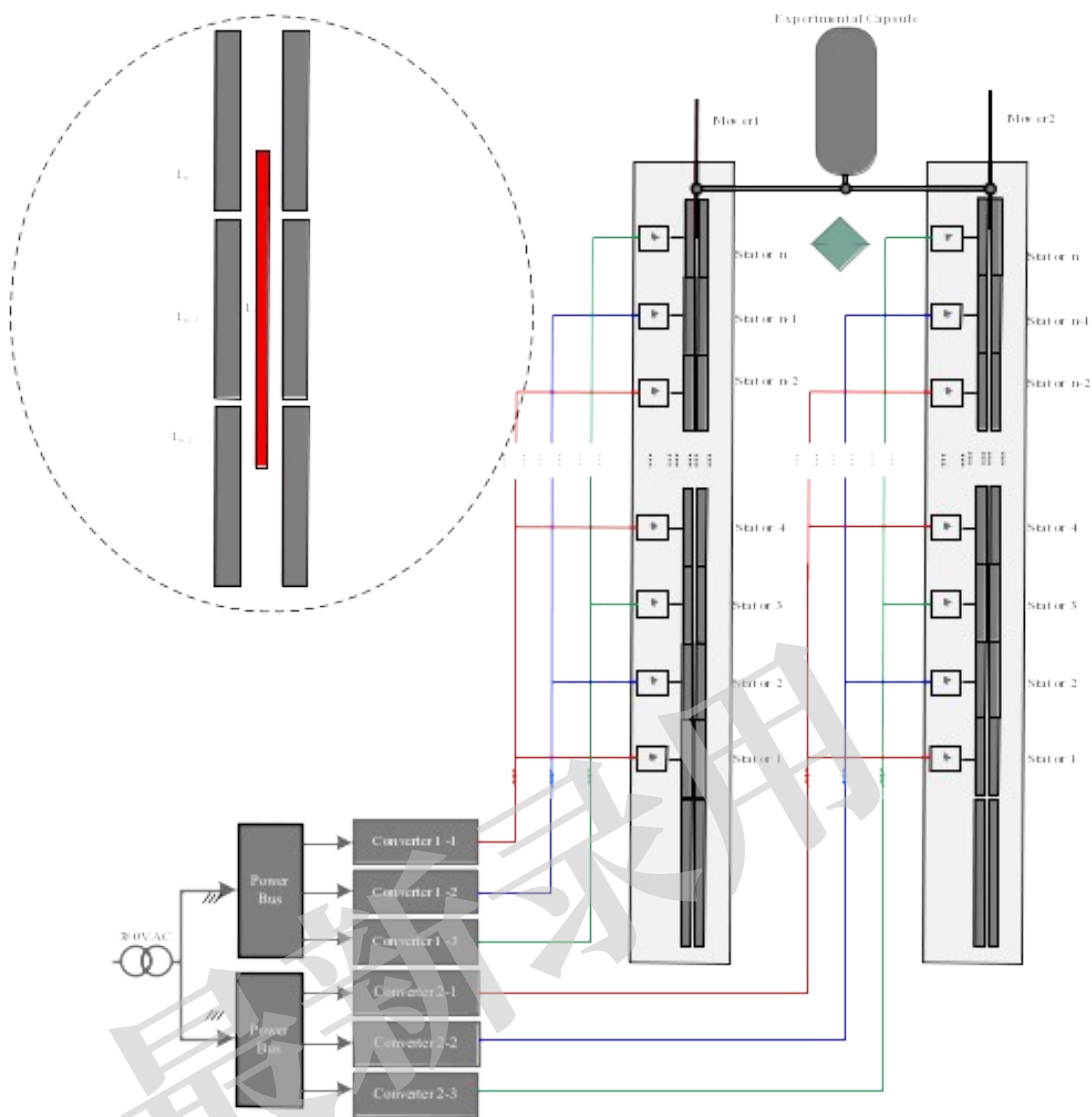


图 1 微重力装置系统图

Figure 1 Diagram of Microgravity Facility System

1.2 系统控制要求

为了保证电磁弹射微重力装置的控制水平达到微重力实验对于环境的要求，控制系统有以下目标：

① 电机分段控制

电磁弹射微重力装置的定子线圈铺设在塔内，为节约能耗和提高系统控制精度需要对电机进行分段控制。分段直线电机由多段定子同时驱动一个动子，在运行过程中动子位置不断变化，各段电机定子由多台变频器进行控制，每段定子的耦合程度也在时刻变化，因此分段控制方案与传统控制方式有所不同，需对分段控制方案进行设计。

② 双排驱动协同

微重力装置采用两组电机同时工作以支撑实验舱上下运动时不会产生大的质心偏移从而保持实验舱的平衡，运行过程中双排电机在运行过程中需保持速度始终一致，因此需对

双排电机协同控制方案进行设计。

③ 实验舱内外舱跟随

实验舱进行双舱设计以保证实现更高水平的微重力环境。外舱在电机运动控制的过程中始终受到机械振动和空气噪声的影响，其扰动无法完全消除，在微重力阶段进行内舱释放能够隔绝外舱收到的干扰力。释放后的内外舱不存在物理连接，因此需要对内外舱的跟随控制方案进行设计。

3. 微重力水平控制方法

针对上一章提出的系统控制目标，本文分别研究了电机分段控制策略的设计，双排电机位移-跟踪方法以及内外舱位移-跟踪方法。

2.1 电机分段控制方法

电磁弹射微重力实验装置中的直线电机采用长定子感应式直线电机，其定子绕组铺设在落塔内侧塔壁，动子安装在实验舱外侧，通过在定子线圈中的交流电产生行波磁场，与电磁感应下的动子板产生电磁力，从而推动实验舱进行上抛和下落的运动。

电机模型：多段电机的动力学与控制系统模型如下：

$$\begin{bmatrix} U_{sn} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & \alpha_n R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sn} \\ I_{rn} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{sn} \\ \psi_{rn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{sn} \\ \psi_{rn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & \alpha_n L_{sr} \\ \alpha_n L_{rs} & \alpha_n L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sn} \\ I_{rn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$F = \sum_{n=1}^3 F_n = \frac{3\pi n_p}{4\tau} \sum_{n=1}^3 \psi_{rn} \times I_{sn} \quad (3)$$

$$m \frac{dv}{dt} = F - f \quad (4)$$

其中 U_{sn} 是第 n 电机定子电压； I_{sn} 、 I_{rn} 、 ψ_{sn} 、 ψ_{rn} 为 n 段电机的定子电流、转子电流、定子磁链和转子磁链； R_s 、 R_r 为定子电阻和转子电阻； L_{ss} 、 L_{rr} 是定子漏自感和动子漏自感； L_{sr} 、 L_{rs} 是定子和动子的互感； n_p 为极对数， τ 为极距。 F_n 为第 n 节电机的推力， α_n 为第 n 节电机的耦合系数。 F 为覆盖动子的相邻三段电机推力之和， f 为空气阻力等干扰力。

控制方法：电机控制常用转子磁链定向矢量控制方法（FOC），其控制原理是将三相交流正弦电流的交流信号通过坐标变换转换成直流量 i_d 和 i_q 进行控制，其中 q 轴参考值 i_q^i 间接来自速度参考值 $i_q^i = f(v^i)$ ， d 轴参考值 i_d^i 间接来自磁链参考值 $i_d^i = f(\psi_r^i)$ 。其电流环控制器模型可以表示为：

$$u_{dn} = K_{pd}(i_{dn} - i_{dn}^i) + K_{id} \int (i_{dn} - i_{dn}^i) dt \quad (5)$$

$$u_{qn} = K_{pq}(i_{qn} - i_{qn}^i) + K_{iq} \int (i_{qn} - i_{qn}^i) dt \quad (6)$$

其中 u_{dn} 为第 n 段电机 d 轴电压值， u_{qn} 为第 n 段电机 q 轴电压值， K_{pd} 和 K_{id} 为 d 轴电流环的比例系数和积分系数， K_{pq} 和 K_{iq} 为 q 轴电流环的比例系数和积分系数， i_{dn} 和 i_{dn}^i 为第 n 段电机 d 轴电流实测值和参考值， i_{qn} 和 i_{qn}^i 为第 n 段电机 q 轴电流实测值和参考值。

改进策略：分段电机控制模型与经典模型的区别在于分段控制中各段电机对应的动子磁链随耦合系数动态变化，而经典模型中的动子磁链是固定值。对于本文三段式感应直线电机分段控制系统，各段电机的动子磁链参考值与总动子磁链参考值的关系为：

$$\psi_{rn}^i = \alpha_n \psi_r^i \quad (7)$$

其中 ψ_r^i 为动子磁链参考值， ψ_{rn}^i 为第 n 段电机动子磁链的参考值，

对于整个分段电机控制系统的控制目标而言，其最终目的是使各段电机的动子磁链之和等于动子磁链参考值 ψ_r^i ，各段电机磁链参考值可根据其他段电机的磁链值进行动态调整，对于本文研究的三台变频器控制的分段电机系统，式（7）可优化为：

$$\begin{cases} \psi_{r1}^i = \psi_r^i - \psi_{r2} - \psi_{r3} \\ \psi_{r2}^i = \psi_r^i - \psi_{r1} - \psi_{r3} \\ \psi_{r3}^i = \psi_r^i - \psi_{r1} - \psi_{r2} \end{cases} \quad (8)$$

其中， ψ_{r1} 、 ψ_{r2} 和 ψ_{r3} 分别为三台变频器对应动子磁链参考值，

ψ_{r1} 、 ψ_{r2} 和 ψ_{r3} 分别为三台变频器对应电机动子磁链的实测值。根据上述分析，分段控制系统如图2所示：

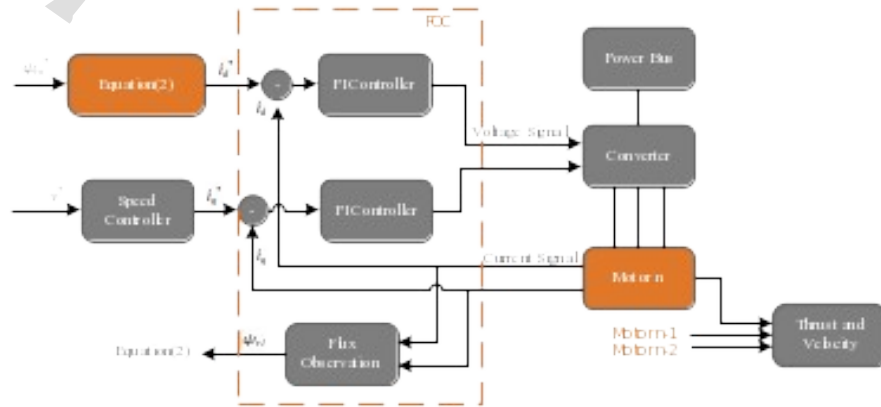


图 2 电机分段控制系统
Figure 2 Motor Segmented Control System

2.2 电机位移跟踪协同控制

微重力实验的环境要求尽可能避免实验舱受到除重力以外的其他力的影响，而电磁弹射微重力装置的双排电机由各自的变频器进行驱动，在实际控制中推力差无法被完全消除，

可能导致实验舱的倾斜甚至振动，影响微重力水平。为解决双排电机协同问题，本文提出位移跟踪控制算法，使用位移差作为反馈量设计控制系统使被控对象处于同步运动的状态，从而实现双排电机协同控制。

装置中实验舱通过柔性铰接的横梁与两台电机连接，如图 3 所示，共同推进实验舱上下运动。实验舱只有一个耦合杆与推进装置连接，而自身的姿态由三排导轨限制，所以当两个电机的两个动子推力不同步时不影响舱的偏转，但会产生对实验舱的扰动力。[19]

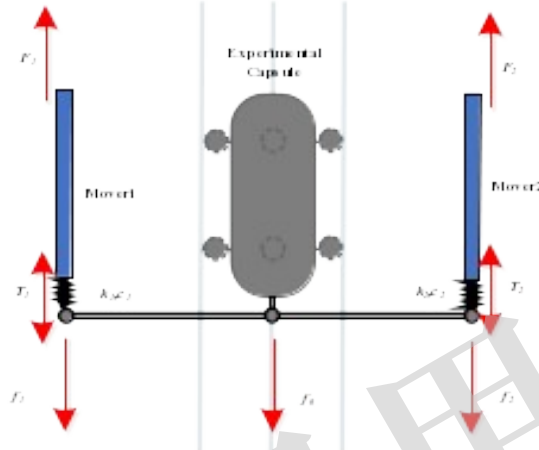


图 3 双排电机推进实验舱示意图

Figure 3 Schematic Diagram of Dual Motors Driving Experimental Capsule

只考虑纵向力可以得到如下关系：

$$\begin{cases} m_1 a_1(t) = F_1(t) - T_1(t) - f_1(t) - m_1 g_0 \\ m_2 a_2(t) = F_2(t) - T_2(t) - f_2(t) - m_2 g_0 \\ m_0 a_0(t) = T_1(t) + T_2(t) - f_0 - m_0 g_0 \\ T_1(t) = (x_1(t) - x_0(t))k_1 + (\dot{x}_1(t) - \dot{x}_0(t))c_1 \\ T_2(t) = (x_2(t) - x_0(t))k_2 + (\dot{x}_2(t) - \dot{x}_0(t))c_2 \end{cases} \quad (9)$$

其中 $f_1(t), f_2(t), f_0(t)$ 分别为三个舱的阻力，阻力有空气阻力和摩擦阻力。 $F_1(t), F_2(t)$ 为电机推力， $T_1(t), T_2(t)$ 分别为两个铰链软连接之间的相互拉力，其刚度和阻尼分别为 k_1, c_1, k_2, c_2 ， $T(t) = T_1(t) + T_2(t)$ ，动子 1 动子 2 和实验舱的加速度分别为 $a_1(t), a_2(t), a_0(t)$ 。

两排电机的电磁推力分别采用 PI 控制，其控制器模型表示为：

$$F_1(t) = K_{pF} e_{v1}(t) + K_{iF} \int e_{v1}(t) dt, e_{v1}(t) = \dot{v}_1(t) - v_1(t) \quad (10)$$

$$F_2(t) = K_{pF} e_{v2}(t) + K_{iF} \int e_{v2}(t) dt, e_{v2}(t) = \dot{v}_2(t) - v_2(t) \quad (11)$$

其中 K_{pF} 和 K_{iF} 为协同控制的比例系数和积分系数， $\dot{v}_1(t)$ 和 $\dot{v}_2(t)$ 分别为两台电机的速度参考值， $v_1(t)$ 和 $v_2(t)$ 分别为两台电机的速度观测值。两台电机各自的控制器根据 $e_{v1}(t)$ 和 $e_{v2}(t)$ 分别进行 FOC 控制。电机协同方式包括主从控制、交叉控制和虚拟主轴控制等多种方法。采用主从控制时，一台电机的速度参考值是另一台电机的实测值即 $\dot{v}_2=\dot{v}_1$ 。而采用交叉解耦的方式，在考虑速度环交叉耦合的同时也可以兼顾双排电机的位置偏差，此时：

$$e_{v1}(t) = \dot{v}_1(t) - v_1(t) + \lambda_1(v_1(t) - v_2(t)) \quad (12)$$

$$e_{v2}(t) = \dot{v}_2(t) - v_2(t) + \lambda_2(v_1(t) - v_2(t)) \quad (13)$$

其中， λ_1 、 λ_2 为交叉耦合系数，且 $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ 。需要说明协同控制会带来两个闭环之间的耦合，其稳定性和系统动力学模型有关，其中参数 $[k_1, k_2, c_1, c_2]$ 决定了两个铰链的连接，通过仿真可以看出，刚度太大时协同会更好，但 T1 和 T2 的冲击也会更大；刚度小时系统具有一定的柔性， $T_{\square_1}$ 和 T_2 振动更小。协同耦合系统控制框图如图 4 所示：

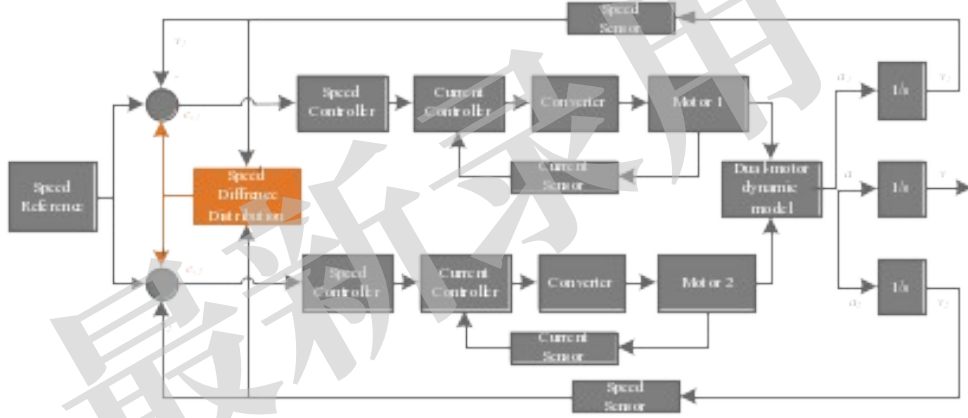


图 4 基于交叉耦合的协同控制方法
Figure 4 Cross-Coupling-Based Cooperative Control Method

2.3 实验舱位移跟踪控制

微重力落塔的实验舱通常设计为内外双舱结构，并在双舱之间抽低压，以保证外舱受到的环境干扰力不被传递到内舱，使得内舱具备更理想的微重力水平。本装置的实验舱在微重力阶段进行内舱和外舱的分离，分离之后内外舱不再具有物理连接，从而隔绝了外舱受到轮轨振动、气动噪声、电气噪声等影响。外舱保持在电机控制下运动，需要双舱在运动微重力阶段始终不接触以保证内舱具备理想的微重力环境。为此，本文提出如图 5 所示的外舱跟踪内舱控制方案，电机控制只需要外舱的位移跟踪内舱，不需要进行精确速度控制，保障内舱不与外舱相撞即可。

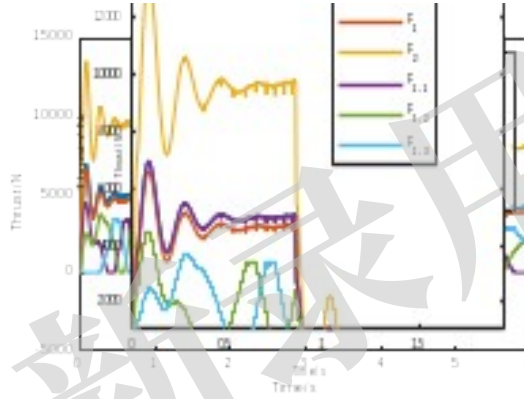
则此时的速度环控制器模型修正为:

$$v(t) = K_{pv} \left(v(t) - K_{pp} (p(t) - p^i(t)) \right) + K_{iv} \int \left(v(t) - K_{pp} (p(t) - p^i(t)) \right) dt \quad (16)$$

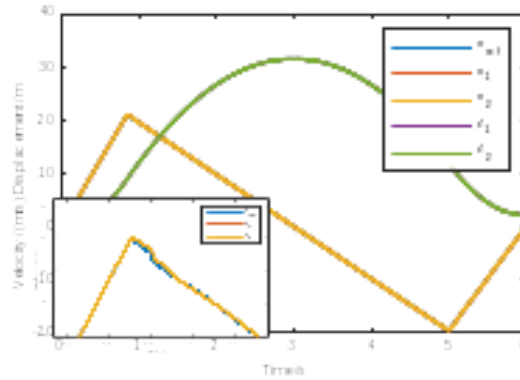
4. 仿真和实验结果

3.1 仿真结果与分析

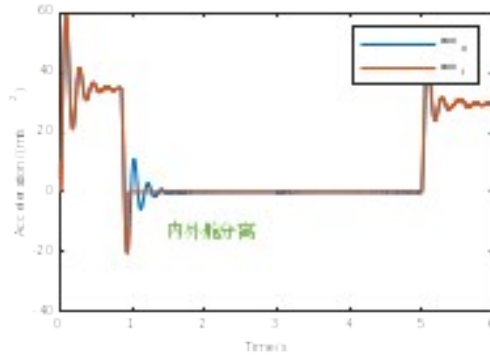
根据前文提出的控制系统进行 Simulink 仿真, 其中电机模型根据磁链方程利用 S-function 模块搭建, 仿真采用的电机模型定子电阻为 0.0385Ω , 转子电阻为 0.01763Ω , 定子漏感 $7.8093e^{-2}$ mH, 转子漏感 $9.0628e^{-2}$ mH, 激磁电感 1.3344 mH。定子长度 1.709 m, 转子板长度 2.5 m, 载荷质量 500 kg。电磁弹射微重力落塔运行主要分为三个阶段: 弹射阶段, 微重力阶段和回收制动阶段, 对系统运动过程进行仿真, 得到推力、速度、电压和电流结果如图 7 所示:



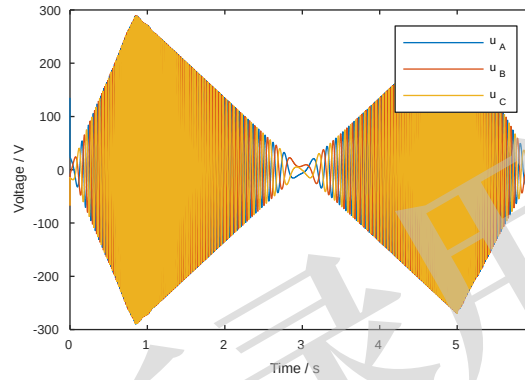
a.分段推力



b.速度和位移



c. 加速度



d. 电压

图 7 分段电机的实际仿真曲线 (a.推力 b.速度和位移 c.加速度 d.电压)

Figure 7 Simulation Curves of Segmented Motor (a. Thrust b. Velocity and Displacement c. Acceleration d. Voltage)

图 7(a)推力曲线中 F_1 和 F_2 分别为双排电机各自的出力， F 为合力， F_{1-1} 、 F_{1-2} 和 F_{1-3} 为单排电机的三台变频器对应的出力。从推力曲线可以看出电机运行过程分为发射阶段、微重力阶段和回收阶段。采用本文提出的磁链跟踪方法进行分段控制，发射阶段推力的毛刺由分段切换产生，在微重力阶段由于电机出力较小，推力分段波动并不明显。

图 7(b)中速度位移曲线中的 v_1 、 v_2 和 d_1 、 d_2 分别对应双排电机的速度和位移。双排电机的速度和位移几乎重合，经过放大后可以看出速度曲线局部微小区别和切换过程中速度的变化。通过推力曲线可以看出，双排电机的推力 F_1 和 F_2 存在推力差，采用本文提出的双排电机协同控制方案后，速度和位移曲线中双排电机的速度和位移均趋于一致，实现了电机协同的效果。此外，在进入微重力阶段后内外舱处于向上运动的状态，此时进行内外舱的释放并采取内外舱位移-跟踪控制策略，外舱速度有所下降从而保持与内外舱的相对位移。

图 7(c)中加速度曲线体现的是实验舱惯性坐标系下的外舱和内舱加速度，在实现内外舱分离后，仿真条件下的内舱环境可以达到理想微重力水平，如红线所示。

图 7(d)通过电压曲线可以看出，在弹射阶段随着速度增加，电压的幅值和频率均逐渐升高，进入微重力阶段后电压幅值和频率逐渐降低，在实验舱上抛至最高点时由于实验舱的速度逐渐将为 0，电压频率降至非常低，此时控制系统的精度受到影响，会产生难以避免的外舱加速度误差，同时说明采取内外舱分离后的位移-跟踪方法是必要的。

以上仿真结果说明了论文描述的电机分段控制、双排电机协同控制、内外舱跟踪控制的效果。同时可以看出，采取本研究的控制方法后，电磁弹射微重力实验装置在弹射阶段采取分段控制后会产生推力波动，但对微重力阶段几乎没有影响，能够达到较高水平的微重力环境。

3.2 实际测试结果与对比

(1) 实际测试环境描述

电磁弹射微重力装置测试环境图 8 所示。装置分为直线电机系统、驱动变流系统、中央控制系统、分段供电补偿模块、储能变换系统、线缆网、测速定位装置、动子板和实验舱。结构上有实验舱、导向系统及锁止机构、安全缓冲机构、转运机构和辅助工装等[18-19]。

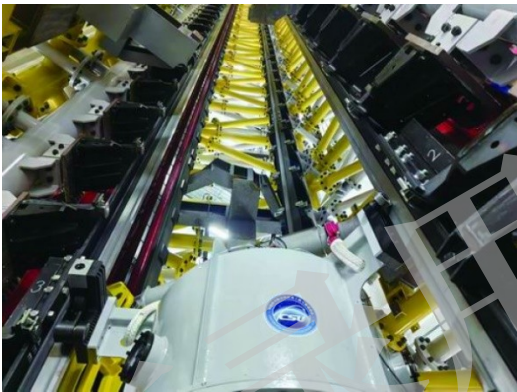
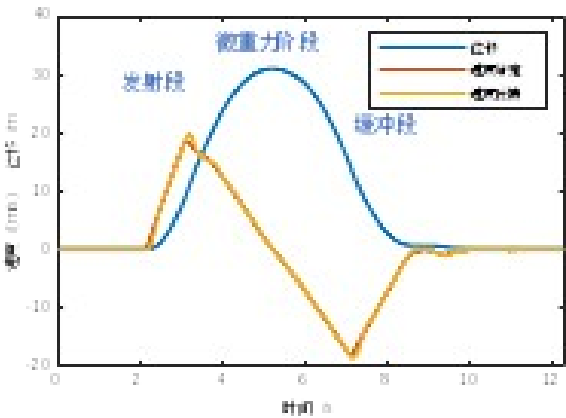


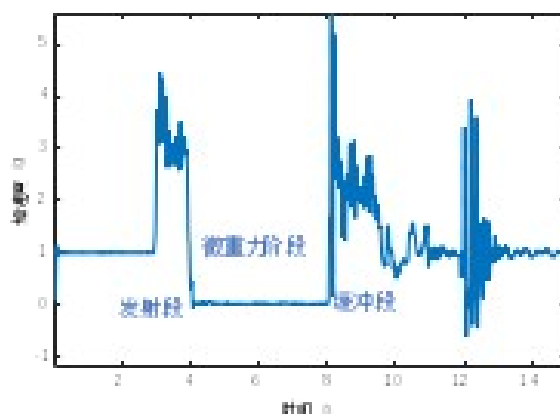
图 8 实际测试环境描述
Figure 8 Description of Actual Testing Environment

(2) 实际测试结果及讨论

控制算法在实际的系统中调试完成后进行了实验测试，实现了分段控制，双排电机协同控制以及内外舱跟踪控制。目前实现的指标为过载约 3g，微重力时间约 4s，达到了预期指标。其速度位移曲线和加速度曲线如图 9 所示：



a.速度和位移曲线



b.加速度曲线

图 9 运行曲线(a.速度和位移曲线 b.加速度曲线)

Figure 9 Description of Typical Operating Curves (a. Speed and position curve b. Acceleration curve)

以上实际测试结果与仿真的趋势基本一致，区别在于：仿真环境中的推力波动仅来自分段控制带来的推力波动，而在实际测试环境中推力波动包括机械振动、噪声等多重因素；仿真环境中双排电机不协同程度优于实际测试环境，内外舱分离后内舱也没有干扰力，然而在实际测试中内舱受到脐带线缆、释放速度、空气阻力等各种因素，无法被完全消除，因此并未达到最优状态。

通过图 9(b)和图 10 的加速度曲线可以看出，本文研究的控制系统能够实现 4 秒左右的微重力时间，加速度过载 $6g$ 以内。在多种微重力评估方法中[23]，本文采取功率谱密度（PSD）对内外舱的加速度信号分析，结果如图 11 所示。可以看出外舱加速度水平大于 $10mg/\sqrt{Hz}$ 量级内舱加速度水平达到了 $10\mu g/\sqrt{Hz}$ 量级，采用内外舱分离和位移-跟踪控制策略能够有效提升内舱的微重力水平。

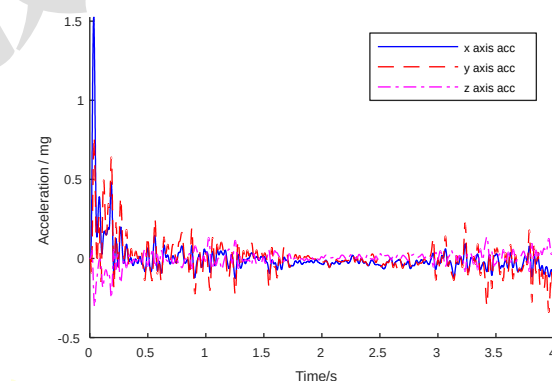


图 10 微重力水平时域分析

Figure 10 Microgravity Quality Time Domain Analysis

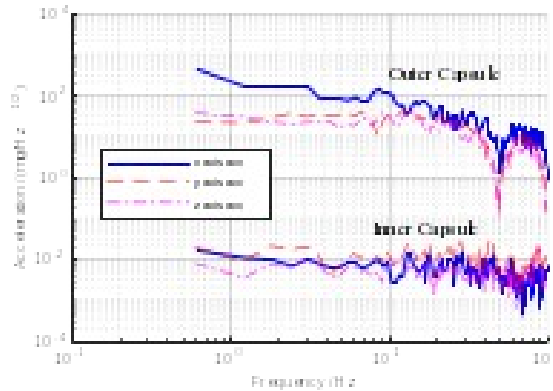


图 11 微重力水平频谱分析

Figure 11 Microgravity Quality Spectrum Analysis

需要说明的是，该结果为单次运行的微重力水平结果，该装置仍处于调试阶段，未来仍有通过提升控制手段改善指标的空间，装置的微重力水平需要多次重复实验进行综合评估，将在后续发布。该实验结果仅说明本文提出的控制方法的有效性，不作为评价该实验装置微重力水平的结论。

5. 结论

本文对新型的电磁弹射微重力装置，提出并实现了用于微重力模拟的直线电机的系统控制方案。在此基础上，针对本系统的特殊应用，对传统方法进行了优化，创新提出了几个策略：在电机分段控制方面提出磁链跟踪的电流参考给定方法；双排电机的协同控制方面采用交叉耦合位移-跟踪方法；针对实验舱双舱结构设计了外舱位移-跟踪方式。通过计算机仿真可以验证本文提出的控制方法的有效性，并说明了控制系统产生噪声的原因。目前，电磁弹射微重力实验装置已初步建成，实测数据表明，通过以上控制方法，内舱的微重力水平可以达到 $10\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级，微重力时间达到 4s 左右，过载不超过 6g，并且具备重复实验的能力，是目前国内微重力时间最长的地基微重力装置，希望能够对未来空间科学起到支撑作用。

参考文献

- [1] ZHAO Jianfu, WANG Shuangfeng, LIU Qiang, et al. Retrospect and perspective on microgravity science in China[J]. Journal of Space Science, 2021, 41(1): 34-45 (赵建福, 王双峰, 刘强, 等. 中国微重力科学研究回顾与展望[J]. 空间科学学报, 2021, 41(1): 34-45)
- [2] DE LOMBARD R. Microgravity environment of ground-based facilities and non-orbital flight platforms[M]. NASA Glenn Research Center, 2002.
- [3] PLETZER V, ROUQUETTE S, FRIEDRICH U, et al. European parabolic flight campaigns with Airbus ZERO-G: Looking back at the A300 and looking forward to the A310[J]. Advances in Space Research, 2015, 56(5): 1003-1013
- [4] KUFNER E, BLUM J, CALLENS N, et al. ESA's drop tower utilisation activities 2000 to 2011[J]. Microgravity Science and Technology, 2011, 23(4): 409-425
- [5] SELIG H, DITTUS H, LÄMMERZAHN C. Drop tower microgravity improvement towards the Nano-g level for the MICROSCOPE payload tests[J]. Microgravity Science and Technology, 2010, 22(4): 539-549
- [6] ADMINISTRATION N A S. Zero gravity research facility user's guide. Lewis Field Cleveland, Glenn Research Center: 0-17[M]. 2018
- [7] ASANO S, TOKUO T. Introduction of MGLAB drop experiment facilities[J]. Space Forum, 2000, 6(1/2/3/4): 411-416

- [8] WEI Minggang, WAN Shixin, YAO Kangzhuang, et al. Drop tower and microgravity experiment research of the national microgravity laboratory[J]. Manned Spaceflight, 2007(4): 1-3 (韦明罡, 万士昕, 姚康庄, 等. 国家微重力实验室落塔及微重力实验研究[J]. 载人航天, 2007(4): 1-3)
- [9] NIKHIL V V, NAIR A, NIKETH P, et al. The 2.5 s microgravity drop tower at national centre for combustion research and development (NCCRD), Indian institute of technology madras[J]. Microgravity Science and Technology, 2018, 30(5): 663-673
- [10] STEINBERG T. Reduced gravity testing and research capabilities at new 2.0 second drop tower[J]. Journal of Achievements of Materials and Manufacturing Engineering, 2008, 31(2).
- [11] LUO L, ZHOU H Y, SUN Y H, et al. Tsinghua university Freefall facility (TUFF): A 2.2 second drop tunnel for microgravity research[J]. Microgravity Science and Technology, 2021, 33(2): 26
- [12] KÖNEMANN T, KACZMARCZIK U, GIERSE A, et al. Concept for a next-generation drop tower system[J]. Advances in Space Research, 2015, 55(6): 1728-1733
- [13] LU J Y, MA W M. Research on end effect of linear induction machine for high-speed industrial transportation[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(1): 116-120
- [14] LOTZ C, WESSARGES Y, HERMSDORF J, et al. Novel active driven drop tower facility for microgravity experiments investigating production technologies on the example of substrate-free additive manufacturing[J]. Advances in Space Research, 2018, 61(8): 1967-1974
- [15] LOTZ C, FROBÖSE T, WANNER A, et al. Einstein-elevator: a new facility for research from μg to 5 g[J]. Gravitational and Space Research, 2017, 5(2): 11-27
- [16] LOTZ C, REIN M, OVERMEYER L. Steps for a reduction of vibrations of the roller guide in the Einstein-elevator[C]//Symposium Automated Systems and Technologies AST2015. St. Petersburg, 2015
- [17] LI Y M, DONG W B, ZHANG S C, et al. A prototype of microgravity facility equipped with linear motors and design of motion plan[C]//70th International Astronautical Congress. Washington, 2009: 1-7.
- [18] ZHANG J Q, DONG W B, WANG Z, et al. Development of a new microgravity experiment facility with electromagnetic launch[J]. Microgravity Science and Technology, 2021, 33(6): 68
- [19] ZHANG Jianquan, DONG Wenbo, ZHANG Yongkang, et al. Simulation and analysis for the microgravity experiment facility by electromagnetic launch[J]. Mechanics in Engineering, 2022, 44(6): 1381-1393 (张建泉, 董文博, 张永康, 等. 电磁弹射微重力装置的仿真分析[J]. 力学与实践, 2022, 44(6): 1381-1393)
- [20] MA Weiming, LU Junyong. Research progress and challenges of electromagnetic launch technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(15): 3943-3959 (马伟明, 鲁军勇. 电磁发射技术的研究现状与挑战[J]. 电工技术学报, 2023, 38(15): 3943-3959)
- [21] MU Shujun, CHAI Jianyun, SUN Xudong, et al. Analysis and restrain of mutual inductance asymmetry in the sectionally powered AC linear motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 81-88 (牟树君, 柴建云, 孙旭东, 等. 分段供电交流直线电机三相互感不对称分析及抑制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 81-88)
- [22] XU Fei, LI Zixin, KONG Ganlin, et al. Research on the mathematical model of variable-length segmented linear induction motor[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2024: 1-13. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.psee.230731> (徐飞, 李子欣, 孔甘霖, 等. 变长分段直线感应电机数学建模研究[J/OL]. 中国电机工程学报, 2024: 1-13. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.psee.230731>)
- [23] DONG W B, DUAN W X, LIU W, et al. Microgravity disturbance analysis on Chinese space laboratory[J]. npj Microgravity, 2019, 5: 18