

动态约束离心力对系统的推进作用研究

孙璐¹, 陈志刚², 张拥军², 孙长利², 李百仓², 宋平²

¹中共荥阳市委社治委, 河南 荥阳

²荥阳市水利局, 河南 荥阳

收稿日期: 2022年2月25日; 录用日期: 2022年3月24日; 发布日期: 2022年3月31日

摘要

动态约束离心力对系统推进作用的研究是根据系统的圆周运动中所产生的动量的改变量, 确定真实的向心力冲量作用的存在, 根据牛顿第三定律, 肯定做圆周运动的物体必然对其施以向心力作用的物体以离心力的反作用, 动态约束离心力对系统产生周期性直线运动的推进作用, 并对其推进作用力和运动速度的特征、系统的周期性位移做了分析, 对改进其推进效能的问题做了进一步的讨论, 有助于加深动态约束离心力对系统的推进作用的认识, 有益于拓展离心力推进技术的应用空间, 可用于航天器的姿态控制、轨道转移以及水利工程的水下探测等推进动力技术。

关键词

惯性系, 动态约束离心力, 周期位移, 平均离心力, 同时性

Research on Propelling Effect of Dynamically Constrained Centrifugal Force on System

Lu Sun¹, Zhigang Chen², Yongjun Zhang², Changli Sun², Baicang Li², Ping Song²

¹The Social Governance Committee of the CPC Xinyang Municipal Committee, Xinyang Henan

²Xinyang Water Conservancy Bureau, Xinyang Henan

Received: Feb. 25th, 2022; accepted: Mar. 24th, 2022; published: Mar. 31st, 2022

Abstract

The study of dynamic constrained centrifugal force on system propulsion is to determine the existence of real centripetal force impulse action according to the change of momentum generated in

the circular motion of the system. According to Newton's third law, it is certain that objects in circular motion must react with centrifugal force on objects acting on centripetal force. The dynamic constrained centrifugal force promotes the periodic linear motion of the system, and the characteristics of propulsion force, velocity and periodic displacement of the system are analyzed. It is helpful to deepen the understanding of the propulsion effect of dynamic constrained centrifugal force on the system, and to expand the application space of centrifugal force propulsion technology, which can be used for spacecraft attitude control, orbit transfer and underwater exploration of hydraulic engineering propulsion technology.

Keywords

Inertial System, Dynamically Restrained Centrifugal Force, Periodic Displacement, Average Centrifugal Force, Simultaneity

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着航天技术的迅速发展,空间任务对航天器推进系统的需求愈加多样化[1],呈现出以火箭燃料推进为主力军的多样化的推进技术。在电推进方面出现了霍尔推进、等离子推进、电场推进、电磁推进等新型推进技术,尽管当前这些所有小功率的电推进技术,都有着推力小的缺点,以至于无法在大气层内使用,仍然需要用化学火箭推出大气层,然后需要长时间加速才能达到所需的速度。所有大功率电推进技术,都面临着电从哪里来的问题。太阳能电池板能提供 kW 级别的电能,借助太空太阳能丰富的优势,通过光电转换等技术,使用这样级别的电能,并随着新的推进动力技术的发展,使电推进技术与火箭推进技术互为补充,在一定程度上有望实现对有限载荷的空间发射,以更好地满足空间发射任务多样化的需求[1]。

注意到离心力推进研究的报道,如国防科技要闻 2021-11-11 发表了一篇关于美国初创公司利用巨型离心机成功完成太空发射试验的文章[2],提到 11 月 10 日,美国航天发射初创公司 SpinLaunch,在新墨西哥州的美国太空港成功利用亚轨道加速器原型机成功发射了一枚无动力“抛射体”(projectile)。此次试验是“螺旋发射”概念的首次发射测试,“抛射体”仅被推进到数万英尺的高度。“螺旋发射”概念基于真空密封的离心机,该离心机以数倍声速旋转无动力“抛射体”,然后在“不到一毫秒”的时间内将其抛入高层大气,最终进入轨道。SpinLaunch 公司希望颠覆传统火箭发射方式,将航天器送入太空[2]。

研究离心力用于推进技术的问题,这里有必要对圆周运动的向心力和离心力进行再回顾。

已有文献对惯性离心力以及向心力与离心力的作用关系有明确的表述:惯性离心力(inertial centrifugal force)是随转动坐标系一起转动的物体受到的力,它作用于随动系一起转动的物体上,它不是物体间的相互作用产生的,也不是产生的反作用力,是物体的惯性在非惯性系的反映;离心力(inertial force)是牛顿力,是作用于给曲线运动提供向心力的周围物体上的力,或者说离心力是作用于转动坐标系上的力,它是向心力的反作用力[3]。

参考文献[4], 275~276 页表述,在光滑水平面内以匀速 v 做圆周运动的质量为 m 的小球,圆周半径为 R ,小球所受绳子的拉力 F 即为其向心力。由于小球的惯性,小球将给予绳子一个反作用力 F' ,即小+

球的离心力,二者等值反向[4]。

由此可见,质点受力改变运动状态时,由于质点的惯性,质点将给予施力物体一个反作用力,这个反作用力称为惯性力。质点惯性力的大小等于质点的质量与加速度的乘积,方向与质点加速度方向相反[4]。

值得指出的是,质点的惯性力是质点对改变其运动状态的一种反抗,它并不作用于质点上,而是作用在使质点改变运动状态的施力体上。如上例中,惯性力作用在绳子上[4]。

特别地,跟静止状态物体一样,对做匀速直线运动的惯性状态的物体,当受到垂直其运动方向力(如向心力)的作用时,为反抗使其运动状态的改变,它对施力物体必然有反作用的惯性力(如离心力)的存在。也就是说,向心力与离心力是作用与反作用关系,它们是分别作用于2个不同物体的2个力,等大反向,不能平衡,不能抵消[5][6][7],而不是别的什么关系,必须确立这样的正确认识。认为“只有向心力没有离心力,离心力是不存在的,只是虚拟力”等,这种只有对受力物体(如受向心力作用的做圆周运动物体)的作用,没有受力物体对施力物体以反作用(如所谓离心力是不存在)的观点是违背牛顿定律的,是错误的。本课题——动态约束离心力对系统的推进作用研究,正是建立在向心力与离心力的作用与反作用关系的正确的基础力学理论观点上的,正是利用离心力对向心力的反作用性质,并对其进行有效的动态约束,使其产生对系统的推进作用。向心力与离心力的作用与反作用关系是本课题研究的理论法宝,不是这个理论的支持,所从事该课题的研究将是伪命题。

关于离心力驱动技术的研究是渐进式的,参考文献的电磁驱动式无工质牵引器:201721222213.4 [P][8],采用小角度电磁力作用,使用2台轴对称的分轴发动机结构设置,达到受控制离心力对整个装置系统的驱动效能。其不足是电磁力作用时间短,做功的电磁能利用率低,由于采用分轴设置,其占用空间大,重量大,制作成本高等。针对以上问题参考文献[9][10][11]中,对大角度受约束离心力对系统的冲击性作用做了进一步研究,较为深入地认识到受约束离心力对系统作用的性质特征。从直观和便于理解的角度考虑,本文仍以分轴的结构设置模型进行分析。

这里主要针对2维条件下的动态约束离心力对系统的推进作用的问题进行探讨,以便于以后对其3维的推进动力课题的研究创造条件。文中的实验及其数据都是在平常条件下取得的,且主要以获得对原理的定性实验验证为目的,作者对其真实性负全责。

文中第4部分多偏重于定性的理论探讨,走了理论先行的路子,有关相对应的实验研究将在今后给予补充。

2. 动态约束圆周运动系统的动量变化特征

2.1. 动态约束圆周运动系统的动量变化分析

如图1,光滑平面放置平板I系统,在其初始位置建立正交坐标(惯性)系,平板I(质量为 $M-2m$)上承装着以y轴对称设置的2个质量均为 m 的球 C_1, C_2 ,二者分别绕平板I上的固定轴 O, O' 做圆周运动,转动半径同为 R (刚性不计质量),平板装置全系统的质量 $M(=km)$ 。系统不计摩擦。

如图2,鉴于球 C_1, C_2 是以y轴对称,为便于研究,分析以球 C_1 为例(C_2 类同,讨论略),分2种情况讨论:

情况1是球 C_1 从x轴A点出发,沿平行于y轴方向,以匀速 v ,经 $0 \rightarrow t$ 即 Δt 到达B点,位移 $s = \mathbf{AB} = v\Delta t$ 。其动量变化

在x轴:

$$\Delta p_x = 0.$$

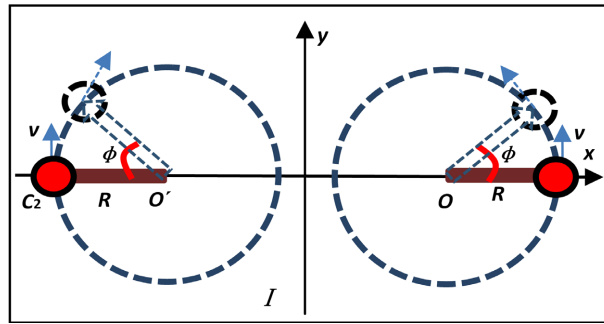


Figure 1. Circular motion with dynamic constraints
图 1. 动态约束圆周运动系统

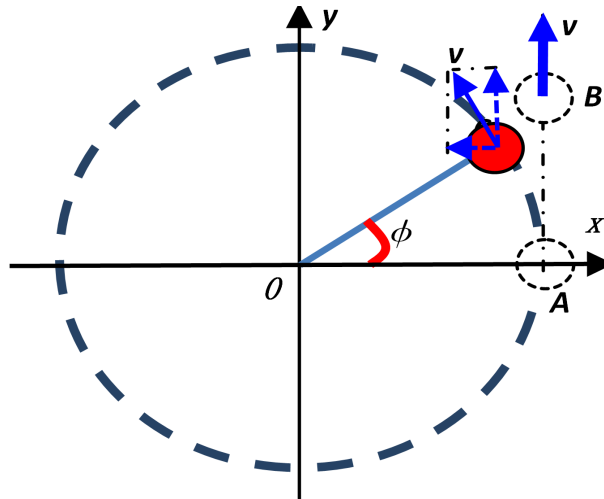


Figure 2. Momentum analysis of circular motion
图 2. 圆周运动动量分析

在 y 轴:

$$\Delta p_y = mv_{y(B)} - mv_{y(A)} = mv - mv = 0.$$

即球 C_1 以速度 v 做匀速直线运动, 其动量改变量为 0, 没有外力的冲量作用。

情况 2 是球 C_1 从 x 轴 A 点出发, 以 O 为转动中心, R 为半径, 以匀速 v 逆时针做圆周运动, 经 $0 \rightarrow t$ 即 Δt (对应的转动角度为 ϕ , 图中以 $0 < \phi < 90^\circ$ 为例) 到达 P 点, 位移 $s = v\Delta t = R\phi$, 其动量变化

在 x 轴:

$$\Delta p_x = mv \sin \phi - 0 = mv \sin \phi,$$

在 y 轴:

$$\Delta p_y = mv \cos \phi - mv = -2mv \sin^2 \frac{\phi}{2}.$$

由此可看出, 球 C_1 以线速度 v 逆时针做匀速圆周运动, 无论是在 x 轴方向, 还是在 y 轴方向, 其动量着实存在改变量, 这与情况 1 比较, 就自然得知期间球 C_1 在 x 轴方向以及在 y 轴方向都受到冲量的作用, 实际上是受到了向心力的作用所产生的动量改变, 由

$$F_x = m \frac{v^2}{R} \cos \phi, F_y = m \frac{v^2}{R} \sin \phi, t = \frac{R\phi}{v}, dt = \frac{R}{v} d\phi.$$

C_1 在 x 轴上受到的向心力冲量:

$$\bar{F}_x \Delta t = \int_0^t F_x dt = \int_0^\phi m \frac{v^2}{R} \cos \phi \frac{R}{v} d\phi = mv \sin \phi = \Delta p_x,$$

C_1 在 y 轴上受到的向心力冲量:

$$\bar{F}_y \Delta t = \int_0^t F_y dt = \int_0^\phi m \frac{v^2}{R} \sin \phi \frac{R}{v} d\phi = -2mv \sin^2 \frac{\phi}{2} = \Delta p_y.$$

这即为, 向心力的作用引起球 C_1 在 x 轴以及 y 轴方向上动量的改变。

根据牛顿第三定律, 在 x 轴方向上对 C_1 施以向心力冲量作用的物体, 必然受到 C_1 沿 x 轴方向的向心力的反作用。同样地, 在 y 轴方向上对 C_1 施以向心力冲量作用的物体, 必然受到 C_1 沿 y 轴方向的向心力的反作用, 即向心力与离心力是作用与反作用关系[3] [4] [5] [6] [7], 只受力的作用, 对施力物体不产生反作用的物体是不存在的, 牛顿第三定律与参考系的选择无关, 这是因为物体间的相互作用是客观存在的, 不因参考系的不同而使物体间相互作用的性质发生变化。受 C_1 离心力作用的物体就是平板 I 。

平板 I 在 x 轴上受到 C_1 离心力 ($-F'_x$) 的冲量:

$$\begin{aligned} -\int_0^t F'_x dt &= -\int_0^t -m \frac{v^2}{R} \cos \phi \frac{R}{v} d\phi = mv \sin \phi, \\ -\int_0^t F'_x dt &= \int_0^t F_x dt. \end{aligned}$$

由于球 C_1, C_2 是以 y 轴对称设置, 即二者成对称的转动状态, 平板 I 在 x 轴上受到它们的离心力等大反向, 互为动态约束力, 整个平板 I 系统在 x 轴方向上受到的动态合力为 0, 即全系统在 x 轴方向上符合动态平衡

$$\sum F_x = F_{x(C_1)} + F_{x(C_2)} = 0$$

平板 I 在 y 轴上受到 C_1 的离心力冲量:

$$\begin{aligned} -\int_0^t F'_y dt &= -\bar{F}'_y \Delta t = -\int_0^\phi -m \frac{v^2}{R} \sin \phi \frac{R}{v} d\phi = -2mv \sin^2 \frac{\phi}{2}, \\ -\int_0^t F'_y dt &= \int_0^t F_y dt. \end{aligned}$$

还可以看出, C_2 对平板 I 在 y 轴上的离心力冲量与 C_1 的等大同向, 平板 I 在 y 轴上受到来自 C_1, C_2 等大同向离心力的合力作用。在 y 轴上 C_1, C_2 受到平板 I 的向心力冲量, 数值上等于平板 I 受到 C_1, C_2 的离心力冲量

$$-2\int_0^t F'_y dt = 2\int_0^t F_y dt$$

平板 I 系统初始为静止状态, 即 $v_{y0(t)} = 0$, 经 Δt (即 $0 \rightarrow t$) 末速为 $v_{y(t)}$, 由动量守恒

$$\begin{aligned} Mv_{y(t)} - Mv_{y0(t)} &= Mv_{y(t)} - 0 = -2 \times 2mv \sin^2 \frac{\phi}{2}, \\ Mv_{y(t)} &= -4mv \sin^2 \frac{\phi}{2}, v_{y(t)} = -\frac{4mv}{M} \sin^2 \frac{\phi}{2} = -\frac{4v}{k} \sin^2 \frac{\phi}{2}. \end{aligned}$$

由此可知, 系统获得的运动速度与其质量比 k 成反比[8] [9]。

$$-2\int_0^t F'_y dt = -2\bar{F}'_y \Delta t = -2\bar{F}'_y \frac{R\phi}{v} = -4mv \sin^2 \frac{\phi}{2}.$$

$$2\bar{F}'_y = \frac{4mv^2}{R\phi} \sin^2 \frac{\phi}{2}.$$

2.2. 平板系统 I 初始静止状态与做圆周运动的 C_1, C_2 以匀速 v 转动至 $\phi = 0$ 同时(即 $v_{y_0(t)} = 0$), 在 $0 \rightarrow \pi$ 区间, 沿 y 轴系统 I 的平均离心力、周期位移、平均速度

$$\text{在 } 0 \rightarrow \pi \text{ 区间: } 2\bar{F}'_y = \frac{4mv^2}{R\phi} \sin^2 \frac{\phi}{2} = \frac{4mv^2}{\pi R}.$$

$$\text{在 } \pi \rightarrow 2\pi \text{ 区间力等大, 沿 } y \text{ 轴负方向: } 2\bar{F}'_y = -\frac{4mv^2}{\pi R}.$$

如 $2m = 2 \times 25 \text{ kg}$, $R = 1$, $v = 10 \times 2\pi R$,

$$2\bar{F}'_y \approx 20T.$$

系统 I 初始为静止状态(即 $v_{y_0(t)} = 0$), 在 $0 \rightarrow 2\pi$ 区间, C_1, C_2 以匀速 v 转动, 沿 y 轴正向的合离心力对系统 I 做的功 W 及其周期位移 λ (即 C_1, C_2 在 $0 \rightarrow 2\pi$ 区间以匀速 v 转动, 所对应的系统 I 受其合离心力作用产生运动的位移称周期位移, 表示为 λ).

在 $0 \rightarrow \pi$ 区间, 离心力对系统 I 做的功:

$$\begin{aligned} W &= \int_0^{\frac{\lambda}{2}} (2F'_y) dy = (2\bar{F}'_y) \left(\frac{\lambda}{2} \right) = \frac{1}{2} M v_{y(t)}^2 - \frac{1}{2} M v_{y_0(t)}^2 \\ &= \frac{M}{2} \left(-\frac{4mv}{M} \sin^2 \frac{\pi}{2} \right)^2 + 0 = \frac{8m^2 v^2}{M}. \end{aligned}$$

又

$$2\bar{F}'_y = \frac{4mv^2}{\pi R}.$$

在 $0 \rightarrow 2\pi$ 区间, 系统 I 的周期位移:

$$\begin{aligned} \frac{\lambda}{2} &= \frac{1}{2\bar{F}'_y} \frac{8m^2 v^2}{M} = \frac{\pi R}{4mv^2} \frac{8m^2 v^2}{M} = \frac{2\pi R m}{M}, \\ \lambda &= \frac{4\pi R}{k}. \end{aligned}$$

周期位移与系统的质量比 k 和转动半径 R 有关, 跟 C_1, C_2 的转动速度无关, 只要系统的结构设计确定, 其周期位移就是确定值。

在 $0 \rightarrow 2\pi$ 区间, 系统 I 的平均速度 $\bar{v}_{y(t)}$:

$$\begin{aligned} \bar{v}_{y(t)} &= \frac{\lambda}{T} = \frac{\frac{4\pi R}{k}}{\frac{2\pi R}{v}} = \frac{2v}{k}. \\ \bar{v}_{y(t)} &= \frac{2v}{k}. \end{aligned}$$

如 $k = 2$, 系统 I 的平均速度 $\bar{v}_{y(t)}$ 要达到飞机起飞速度 300 km/h , 即不到 100 m/s , 若 $R = 1 \text{ m}$, 自由状态下 C_1, C_2 转速达 16 rps (960 rpm) 就可以;

系统 I 的平均速度 $\bar{v}_{y(t)}$ 要达到 8 km/s , 若 $R = 2 \text{ m}$, 自由状态下 C_1, C_2 转速达 637 rps ($38,200 \text{ rpm}$) 超高转速方可。

3. 动态约束离心力对系统的推进作用特征

3.1. 系统初始静止状态与动态约束的做圆周运动球 C_1, C_2 以匀速 v 转动至 $\phi = 0$ 同时, 离心力对系统的推力和运动速度特征[9]

如图 3, 系统初始静止状态(即 $v_{y_0(t)} = 0$)与 C_1, C_2 以匀速 v 转动至 $\phi = 0$ 同时, 根据

$$F_y = m \frac{v^2}{R} \sin \phi, v_{y(t)} = 4 \frac{m}{M} v \sin^2 \frac{\phi}{2},$$

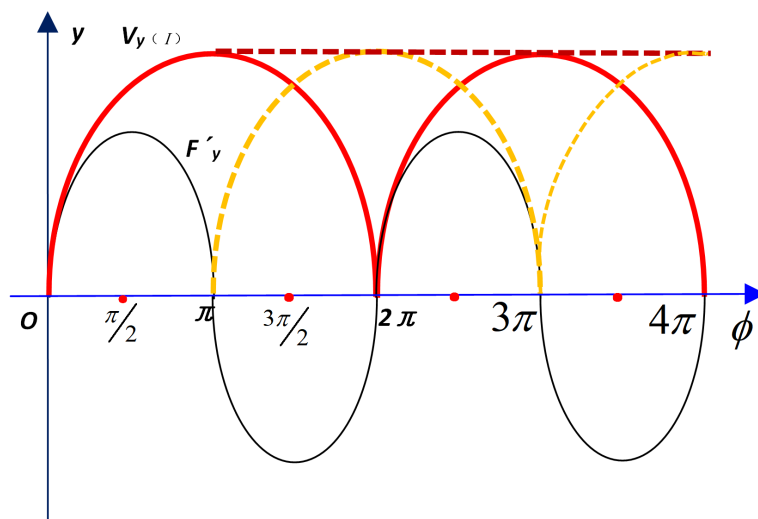


Figure 3. Dynamically restrain centrifugal force and system speed
图 3. 动态约束离心力及系统的运动速度

如图 3 中实线所示, 当系统初始静止状态(即 $v_{y_0(t)} = 0$)与动态约束的做圆周运动球 C_1, C_2 以匀速 v 转动至 $\phi = 0$ 同时, C_1, C_2 在 y 轴方向对系统 I 的合离心力 $2F'_y$ 呈正弦函数的特征; 相对应的系统 I 在合离心力的作用下, 沿 y 轴正方向呈 $\sin^2 \frac{\phi}{2}$ 函数的周期性直线运动特征[10]。

Table 1. The impact and linear motion experiments of the dynamic restraint centrifugal force on the system
表 1. 动态约束离心力对系统的冲击作用及直线运动实验

系统重	偏心轮重	偏心轮 ϕ	偏心距	转速 rpm	摩擦力	行程	时间	直流电机
3.8 kg	2*0.18 kg	60 mm	15 mm	883	14.7 N	0.9 m	14''	12 V*10 A



Figure 4. Linear motion experiment of a dynamically constrained centrifugal force system
图 4. 动态约束离心力对系统的直线运动实验

说明：表 1 (图 4) 实验是在有摩擦 ($f = 14.7 \text{ N}$) 水平地面上完成的，采用同轴设置的 2 个动态约束水平转动的偏心轮(每个的质量 $m = 0.18 \text{ kg}$ ，偏心距 15 mm)，直流电源(12 V, 10 A)为直流电机供电，电机和偏心轮转速为 883 rpm，整个系统在 14 秒内，无传动水平移动 0.9 米，验证文中 3.1 原理。

3.2. 当系统初始静止状态与做圆周运动球 C_1, C_2 以匀速 v 转动至 $\phi = \frac{\pi}{2}$ 同时，离心力对系统的作用特征[9]

系统初始静止状态(即 $v_{y_0}(t) = 0$)与动态约束的做圆周运动球 C_1, C_2 以匀速 v 转动至 $\phi = \frac{\pi}{2}$ 同时，系统 I 在此合离心力的作用下，沿 y 轴做简谐振动。对这个问题在此不做详述。

Table 2. Shock and simple harmonic vibration experiments of dynamically constrained centrifugal force on the system

表 2. 动态约束离心力对系统的冲击作用及简谐振动实验

系统全重	偏心轮重	偏心轮直径	偏心距	转速 rpm	振幅	直流电机
4.16 kg	2*0.36 kg	60 mm	15 mm	183	0.07 m	12V*10A

说明：如表 2 所示，此实验是在有摩擦 ($f = 16 \text{ N}$) 水平地面上完成的，采用同轴设置的 2 个动态约束水平转动的偏心轮(每个的质量 $m = 0.36 \text{ kg}$ ，偏心距 15 mm)，直流电源(12 V, 10 A)为直流电机供电，电机和偏心轮转速为 183 rpm，整个系统做周期性往复运动，振幅为 0.07 米，验证文中 3.2 原理。

3.3. 当系统 I 的初始静止状态与 C_1, C_2 的 $\phi = 0$ 同时，球 C_1, C_2 在前、后半周分别做高、低速转动，其合离心力对系统 I 的推进作用特征[8] [9] [11]

前文分别对匀速转动条件下的动态约束离心力对系统的周期性直线运动和简谐振动做了表述，尽管理论和实验达到了一致性，但在实际中，做到对系统的这两种初始状态及运动方向的准确掌控，其要求条件是较复杂的。大量的实验结果表明，在控制系统运动方向上，采用前后半周不同转速的设计方法是更为简便和容易做到的。

如图 1，使用电机动力，系统在 C_1, C_2 转动的切线方向的作用力，使其作加(减)速的转动，这样的作用力对圆周运动全系统沿 y 轴合成的平动作用效果为 0，有关变速圆周运动的力学分析可参考文献[10]，这里不做详述。

切向力在 $0 \rightarrow \pi$ 区间的作用使 C_1, C_2 作高速圆周运动，向心力大，即向心力沿 y 轴分量的平均值大； $\pi \rightarrow 2\pi$ 区间使 C_1, C_2 作低速圆周运动，向心力小，即向心力沿 y 轴分量的平均值小。由于前、后 2 个半周向心力沿 y 轴分量做的功所经位移等值，即二者向心力的 y 轴分量对作圆周运动的球 C_1, C_2 在 $0 \rightarrow \pi$ 、 $\pi \rightarrow 2\pi$ 区间所做功数值不等，根据向心力和离心力是作用和反作用的关系，系统没有外力，且当整个系统 I 的质量 M 等于转动球 C_1, C_2 质量的 2 倍时(见下文 4.1)，存在向心力沿 y 轴的分量对球 C_1, C_2 所做功与动态约束离心力沿 y 轴的分量对整个圆周运动系统 I 所做功相等，可使整个圆周运动系统 I 前半周所获得的向前做功的数值大于其后半周所获得向后做功的数值，则整个圆周运动系统在动态约束离心力的作用下沿 y 轴正向运动，这就较好的做到了对系统运动方向的有效控制。

简单地说，系统的初始状态很重要，当系统 I 处于不同的初始状态时，系统就呈现出不同的运动形态。

说明：如表 3 所示，此实验是在有摩擦 ($f = 3.4 \text{ N}$) 水平地面上完成的，采用同轴设置的 2 个动态约束的水平转动的偏心轮(每个的质量 $m = 0.33 \text{ kg}$ ，直径 42 mm ，偏心距 11 mm)，交流电源(220 V, 2 A)给电机供电，整个系统在 3 秒内，无传动水平移动 0.5 米，验证文中 3.3 原理。

Table 3. Experiments on the propulsion effect of the dynamic restraint centrifugal force on the system at different speeds in the front and rear half cycles**表 3.** 前后半周不同转速动态约束离心力对系统的推进作用实验

系统全重	偏心轮重	偏心轮直径	行程	时间	交流电机	偏心距
1.8 kg	2*0.33 kg	42 mm	0.5 m	3''	220 V*2 A	11 mm

4. 动态约束离心力对系统的推进动力问题的几点思考

4.1. 系统推进效能的最佳条件

从做功以及动能的角度, 分析做圆周运动球 C_1, C_2 的向心力沿 y 轴分量对其所做的功, 在什么条件下与动态约束离心力的 y 轴分量对全系统所做的功数值相等。

如图 2, 在 $0 \rightarrow \pi$ 区间, C_1, C_2 的向心力沿 y 轴分量所做的功(已知 $dy = ds \cos \phi$)

$$W_{y(C)} = 2W_{y(C_1)} = 2 \left[2 \int_0^R F_{y(C_1)} dy \right] = 4 \int_0^{\frac{\pi}{2}} m \frac{v^2}{R} \sin \phi ds \cos \phi = 4mv^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \phi d \sin \phi = 2mv^2.$$

系统初始状态同文 3.1, 在 $0 \rightarrow \pi$ 区间, 动态约束离心力的 y 轴分量对全系统做的功及动能。

根据前文

$$v_{y(t)} = -\frac{4mv}{M} \sin^2 \frac{\phi}{2}.$$

$$\int_0^{\pi} F_{y(t)} dy = \frac{1}{2} M v_{y(t)}^2 - \frac{1}{2} M v_{y_0(t)}^2 = \frac{8m^2 v^2}{M}.$$

令

$$W_{y(C)} = \int_0^{\pi} F_{y(t)} dy,$$

$$2mv^2 = \frac{8m^2 v^2}{M},$$

$$M = 4m = 2(m_{C_1} + m_{C_2}).$$

当系统 I 总质量 M 为做圆周运动球 C_1, C_2 质量的 2 倍时, C_1, C_2 的向心力沿 y 轴分量所做的功与动态约束离心力的 y 轴分量对全系统所做的功数值相等[9]。

4.2. 控制动态约束离心力推进过程中系统的振动, 提高工作的稳定性

平板 I 系统初始为静止状态, 即 $v_{y_0(t)} = 0$, 经 Δt (即 $0 \rightarrow t$) 末速

$$v_{y(t)} = -\frac{4mv}{M} \sin^2 \frac{\phi}{2}.$$

图 3 中的波形显示, 系统 I 的运动过程其振动是比较强烈的, 这将影响系统各个部件的工作稳定性, 如何减小系统的振动提高其稳定性就成为亟待解决的问题, 否则将影响系统正常的工作和寿命。如在以上 1 组推进发动机的基础上再增加 1 组推进发动机, 且工作时使后者落后前者相位 π 角度:

$$v_{y(t)} = -\frac{4mv}{M} \sin^2 \frac{\phi}{2} + \left(-\frac{4mv}{M} \sin^2 \frac{\pi + \phi}{2} \right) = -\frac{4mv}{M} = -\frac{4v}{k}.$$

如图 3 虚线所示, 系统出现匀速运动的特征, 可减轻系统振动, 提高各部件的稳定性。也可讨论通过增加 N 组推进动力装置间工作的协调性, 改善推进动力输出效能的问题。

4.3. 系统的质心守恒问题

质心运动守恒定理适用的前提条件是“作用于质点系的外力主矢量恒等于零”或“作用于质点系的所有外力在某轴上的投影的代数和恒等于零”。特别要指出的是，当质点系的外力主矢量不等于零或质点系的所有外力在某轴上的投影的代数和不等不等于零时，质心运动守恒定理将不再适用。因为力是物体运动状态产生改变的决定因素。图 2 中，向心力只作用于做圆周运动的物体，使其维持在系统内转动，做圆周运动的物体是不能逃离圆周运动系统的(即做圆周运动物体与系统是同一关系，且向心力对平板 I 不发生作用)。为做圆周运动施以向心力作用的物体(如平板 I)受到的是离心力的作用，只有当该物体在离心力的作用下产生运动时，离心力将从转动中心轴沿转动半径方向传递作用于转动物体 C_1, C_2 。实验发现，图 1 中整个系统初始位置的质心位于坐标原点，2 个动态约束转动的球 C_1, C_2 ，同时从平行于 x 轴位置出发，向着 y 轴正方向转动至大小为 ϕ 角的位置，此时整个系统的质心存在沿 y 轴正方向前移的趋势，根据质心运动守恒定理，为了维持系统的质心位置不变，整个圆周运动系统将发生沿 y 轴负方向运动。但实验的结果正好与之相反，即整个圆周运动系统实际是在动态约束离心力的作用下，产生沿 y 轴正方向的运动，这就证实了质心运动守恒定理此时已不再适用，这为通过对离心力进行有效约束，使系统产生单一方向周期性直线运动的研究指出了方向[9] [10]。

5. 结论

动态约束离心力对系统的推进动力研究，着手于圆周运动物体动量的改变量，从而确定向心力冲量作用的存在，进一步肯定圆周运动物体系统的向心力与离心力的作用与反作用关系。结合动态约束离心力在单一方向对系统的作用特征，在系统特定的初始状态下，实现动态约束离心力对系统的周期性直线运动的推进作用，并对系统推进过程中的运动速度、周期性位移特征做了分析，还对改进其推进效能做了初步的思考。利用太空太阳能发电等技术，结合动态约束离心力对系统的推进方法，实现有限载荷的太空发射，以及对航天器实现运行姿态控制、轨道转移以及水利工程的水下探测等应用提供了新的推进动力的支持，为提高动态约束离心力推进技术的认识，更加广泛拓展其应用空间指明了方向，并有必要做进一步的研究。

致 谢

作者真诚感谢论文所引用的各位学者的专著，感谢解放军陆军工程大学驻石家庄校区王莹导师、海军航空兵大学曹延杰老师、北京机械设备研究所刘辉老师、武汉大学张亚东老师、中船重工 713 研究所吴立周老师等给予研究提供及时有益的启发帮助和素材！感谢给予的精神上的鼓励！

参考文献

- [1] 于达仁, 乔磊, 蒋文嘉, 刘辉. 中国电推进技术发展及展望[J]. 推进技术, 2020, 41(1): 1-11.
- [2] 聂永喜. 美国初创公司利用巨型离心机成功完成太空发射实验[Z/OL]. 国防科技要闻. <https://mp.weixin.qq.com/s/cPTmZYWWfwLruFu7KNE3Bg>, 2021-11-11.
- [3] 周衍柏. 理论力学教程[M]. 第三版. 北京: 高等教育出版社, 2009: 86-87.
- [4] 谢传峰, 王琪. 理论力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012: 275-277.
- [5] 任芳盛. 离心运动与离心力[J]. 物理教学, 1983(2): 42.
- [6] 黑明伟, 张佳羽, 任正菊, 等. 离心力对轴对称弯道河槽张力作用的研究[J]. 应用物理, 2019, 9(11): 455-461. <https://doi.org/10.12677/APP.2019.911056>
- [7] 李泽华. 人造卫星运行中的向心力和离心力问题[J]. 物理通报, 1962(3): 132-136.
- [8] 孙璐. 电磁驱动式无工质牵引器[P]. 中国专利, 201721222213.4. 2017-09-22.

-
- [9] 孙璐, 张佳羽, 孙长利, 等. 镜像对称圆周运动系统的周期性作用研究[J]. 高师理科学刊, 2020, 40(6): 45-50.
 - [10] 孙璐, 等. 内力用于系统的无工质自主推进方法研究[C]//中国电工技术学会电磁发射技术专业委员会. 全国第八届电磁发射技术研讨会论文集: 2017 年卷, 郑州, 2017: 198-204.
 - [11] 孙璐, 孙长利. 受约束离心驱动无工质推力器[P]. 中国专利, 202122623770.X. 2022-01-28.