

# 宇航员失重问题的再探讨

卜春彦

(吉林大学物理学院 吉林 长春 130023)

(收稿日期:2016-05-07)

**摘要:**介绍了完全失重与微重力的概念,重新剖析了宇航员失重的真正原因.

**关键词:**宇航员 微重力 完全失重 精确度 大气层

## 1 宇航员失重问题的分析

完全失重即物体的视重为零,例如自由下落(平抛运动、斜抛运动等)的物体重力提供了物体向下的加速度,以该物体为参照系是处于完全失重状态,以地面为参照系重力是地球引力与地球自转离心力的合力,重力为  $mg$ . 人造地球卫星、宇宙飞船、空间站、航天飞机等航天器进入轨道后,如果只从万有引力的角度出发,就是广义相对论所讲的局域惯性系,物体在航天器中就好像没有万有引力一样,不需要支持物提供支持力就可以相对航天器静止,即处于失重状态.

为了讨论宇航员失重问题,我们写出牛顿第二定律

$$f = ma \quad (1)$$

这里  $m$  为宇航员的质量,  $f$  为宇航员所受地球之万有引力,  $a$  为宇航员在地心坐标系加速度矢量. 于是,我们有

$$f = -\frac{GMm}{r^3}r \quad (2)$$

$$a = \frac{f}{m} = -\frac{GM}{r^3}r \quad (3)$$

由于宇宙飞船在地心坐标系有加速度  $a$ , 于是宇宙飞船里便有惯性力场存在, 其惯性力场强度为  $-a$ , 则

$$-a = \frac{GM}{r^3}r \quad (4)$$

宇航员在宇宙飞船里即受万有引力作用又受惯性力  $f'$  作用

$$f' = -ma = \frac{GMm}{r^3}r \quad (5)$$

$f + f' = 0$ , 即  $f - ma = 0$ . 即宇航员所受合力为

零, 即宇航员失重了. 在宇宙飞船里用弹簧测力计无论如何也测量不出人和物的重量了, 弹簧测力计无法使用了. 宇航员失重并不是失去了地球的引力, 而是由于宇航员随宇宙飞船一起绕地心运动产生的惯性力抵消了地球对他的引力, 这就是失重的本质所在.

根据牛顿第二定律, 航天器在椭圆轨道上运动到任何一点的加速度由公式  $G\frac{Mm}{R^2} = ma$  求解, 式中  $R$  为地心到航天器的距离(下同), 即椭圆的一个焦点到航天器的距离. 航天器在圆轨道上做匀速圆周运动时, 万有引力全部用来提供向心力, 这时航天器的加速度就是向心加速度, 而在椭圆轨道上运动的航天器, 万有引力并非始终全部用来提供向心力, 向心加速度将不再等于航天器在轨道上运动的加速度. 航天器在轨道上某点运动的向心力为  $F_n = m\frac{v^2}{r}$ , 式中  $r$  是该点所在椭圆轨道的曲率半径, 向心加速度  $a_n = \frac{F_n}{m}$ , 在远地点航天器受到地球的万有引力  $F_G = G\frac{Mm}{R^2}$ . 航天器此时运动所需要的向心力  $F_n = m\frac{v^2}{r}$ ,  $r \neq R$  (在近地点和远地点  $r = \frac{b^2}{a}$ ),  $F_G = F_n$  [3], 航天器此时的加速度等于向心加速度, 即  $a = a_n$ , 航天器之后在万有引力作用下向地球靠近做向心运动, 万有引力产生两个作用效果, 一方面提供沿轨道切向的切向力, 对航天器做正功, 使航天器速率越来越大, 另一方面提供向心力, 不断改变航天器的运动方向, 万有引力产生的切向加速度  $a_t$  和法向加速度即向心加速度  $a_n$  之间的关系, 如图 1 所示. 到达近地点时,  $F_G = F_n$ ,  $a = a_n$ , 航天器之后远离地球做

离心运动,万有引力同样产生两个作用效果,一方面提供沿轨道切向的切向力,对航天器做负功,使航天器速率越来越小,另一方面提供向心力,不断改变航天器的运动方向,直到远地点,周而复始.只有近地点和远地点两个位置, $F_G = F_n, a = a_n$ ,其他位置 $a \neq a_n$ ,但此时以航天器为参照系也是完全失重,因为此时有一个切向惯性力和一个法向惯性力,它们的合力与万有引力恰好抵消.

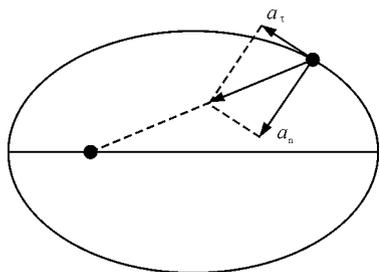


图1

如果不考虑非保守力因素的话航天器的运行轨道为椭圆轨道,文献[2]按照圆形轨道计算也存在误差, $r \neq R$ .

通过上面的分析可以得出文献[2]和文献[1]中出现的误差是精确度等原因造成的计算误差,失重是等效原理的结果.文献[2]比文献[1]取宇宙飞船离地面的高度还低,但是得出数值比文献[1]还低也说明了这一点,两篇文章采用的地球半径、地球质量都不相同.所以文献[2]中的香港凤溪小学生说“希望未来能到太空体验失重状态下的感受”是完全正确的(因为非保守力作用的影响非常小,几乎无法测量),把这句话改为“希望未来能到太空体验微重力状态下的感受”是不对的.

北京电视台播音员说“摩根还给孩子们聊起了航天飞机在脱离地球引力那一瞬间给她带来的感受”,应该改为“摩根还给孩子们聊起了航天飞机在入轨那一瞬间给她带来的感受”,因为一入轨即处于失重状态了.

## 2 航天器里的微重力问题

严格地说,微重力是指低到有效重力水平为地球表面重力的百万分之一,才算是微重力.在地球表面或低空营造微重力环境,方法有多种(例如落塔法、悬吊法、水浮法、抛物飞行法等),以现在微重力实验室里的落塔为例,当落塔的下降加速度 $a = g$ ,

就完全失重;如 $a$ 略小于 $g$ ,就属于正向微重力;如 $a$ 略大于 $g$ ,就属于反向微重力.目前对微重力有许多广义的理解,常把微重力理解为微小重力或低重力,有时衡量标准也稍稍放松一点,例如落塔实验中,有效重力水平达到地面重力的 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 量级的微重力环境,就算是微重力状态了.根据干扰力的来源和性质的不同,可将微重力加速度环境分为3类:

- (1) 准稳态加速度(幅度一般不超过 $10^{-5} g_n$ 量级),
- (2) 瞬态加速度(幅度通常可以到达 $10^{-5} g_n$ 量级),
- (3) 振动加速度(幅度一般在 $10^{-6} \sim 10^{-3} g_n$ 量级)范围.

如果只考虑万有引力,以航天器为参照系应该处于完全失重状态,可是文献[1,2]却由此得出宇航员处于微重力的状态.文献[1]得出宇航员在远地点(距离地面350 km)重力大约是地面重力的3.88%,在近地点(距离地面200 km)的重力大约是地面重力的4.05%,文献[2]在中间取了一个数值343 km得出宇航员的重力大约是地面重力的0.026%,显然不是处于微重力状态,计算是错误的,与实际也不符,事实上航天器在太空的重力环境未及地球上重力的百万分之一到十万分之一,是典型的微重力环境.以文献[2]为例如果仅仅考虑万有引力的话,在近地点和远地点如果不考虑其他因素惯性力始终恰好抵消万有引力,该文得出的微小差别是因为所用数据本身的精度达不到使最后结果有1 N的精度,地球半径取6 400 km(文献[1]取6 370 km),只精确到100 km,该航天器的轨道高度343 km精确到1 km,轨道半径6 743 km,43 km是无意义的数字.以地面为参照系地球表面的重力是地球引力与地球自转离心力的合力,如果以航天器为参照系这样计算就错了.

下面重新分析一下宇航员处于微重力的原因,大气层的高度过去认为厚约800 km,现在发现在远离地球16 000 km的高空,还存在着气体的痕迹.其实宇宙飞船在距离地面200~400 km的高度运动,没有完全脱离大气层,还受到空气阻力等因素的影响.此外太阳光压、太阳的电磁辐射、太阳宇宙线、太阳风、行星际磁场、银河宇宙线、微流星体、重力梯度效应以及轨道机动、姿态控制、设备的运转和动

作、宇航员的活动等因素,使得宇宙飞船不是完全在万有引力作用下自由运动,所以根据万有引力计算的轨道和宇宙飞船实际运行的轨道就有微小差别,这才是宇航员处于微重力状态的真正原因.由于这些非保守力由于相互抵消,它们的合力对于航天器轨道的影响极小,现有的仪器几乎无法测量,所以微重力的测量只能大致估计一个区域.我国发射的第一颗人造卫星,其近地点高度  $h_1 = 439 \text{ km}$ ,远地点高度  $h_2 = 2384 \text{ km}$ ,也没有完全脱离大气层,人造卫星也是处于微重力环境.万有引力与向心力的差等于重力是对于地面系而言的,以航天器为参照系不成立.

若不考虑空气阻力等非保守力因素,航天器里的人就完全失重,例如当航天器返回时轨迹为抛物线此时以航天器为参照系也是完全失重.假定地球绕太阳运动仅仅考虑万有引力的因素,在地球上我们就失去了太阳对我们的引力,我们只受地球的引

力.由于航天器里的微重力是由于非保守力引起的,大部分都相互抵消,剩余的微重力方向是不断变化的,实验中我们几乎无法观察,而按照文献[1,2]的方法理解微重力的方向指向地心,那么航天器里的物体会沿着这个方向运动.

当航天器处于变轨(或轨道修正、航天器自转运动)状态,部分推进器处于工作状态,除了轨道加速度外还有变轨加速度,此时航天器里的物体也有重力,因为此时航天器并非只受到保守力——万有引力的作用.

### 参考文献

- 1 张艺芳,李慧玲.宇航员失重问题讨论.物理通报,2013(06):114~115
- 2 蒋华,周智良.太空实验引出对“引力 重力 失重”问题的探讨.物理通报,2014(07):115~117
- 3 叶玉琴.论行星运动时其万有引力与向心力之间的关系.物理通报,2011(11):105~108

## 会议消息

# 物理教学改革学术讨论会在保定成功举行

本刊编辑部

由河北省物理学会与河北大学联合主办,物理通报杂志社承办的物理教学改革学术讨论会,2016年7月23~24日,在河北大学成功举行.

参加会议的有来自全国各地物理教学领域的专家、学者60余人.河北大学副校长申世刚教授代表河北大学致开幕词,热烈欢迎来自全国各地的物理教学领域的专家、学者欢聚文化古城保定,衷心祝愿大会圆满成功.物理通报杂志社社长、物理通报编委会常务副主编杨志平教授主持了会议.

此次会议的宗旨是:以创新精神推动我国物理教学改革向纵深发展,讨论交流近10年来物理教学改革的经验、体会、问题及建议等.

在全体大会上,中国教育学会物理专业委员会秘书长、北京师范大学物理教学课程论博士生导师李春密教授,首都师范大学物理教学课程论博士生导师邢红军教授,北京教育科学院研究员特级教师陶昌宏,昆明市五华区基础教育研究中心主任、特级教师赵坚分别就我国物理教学改革的时代背景及其方向、主要课题作了高水平的专题性的学术报告,受到参会代表的广泛称赞.

会议共收到学术论文50余篇,其内容包括10年来物理教学改革反思及新一轮物理教学改革有关建议,我国中学物理教学热点研究与启示,现代科学技术在物理教学中的应用,大学创新能力及大学物理实验建设的实践研究,基于网络环境实验评价体系的改革,高考命题的趋势与动向、新高考背景下物理多元开放网络的课程建设等.其中36篇在大会及分组会上作了学术报告并交流讨论.所收到的论文,经评审后将择优陆续在《物理通报》上发表.