角动量理论在现代技术中的应用

王志刚　　张立换　　徐建军

在研究物体运动时,人们经常可以遇到质点或质点系绕某一定点或轴线运动的情况。例如太阳系中行星绕太阳的公转、月球绕地球的运转、物体绕某一定轴的转动等,在这类运动中,运动物体速度的大小和方向都在不断变化,因而其动量也在不断变化。在行星绕日运动中,行星受指向太阳的向心力作用,其运动满足角动量守恒。我们很难用动量和动量守恒定律揭示这类运动的规律,但是引入角动量和角动量守恒定律后,则可较为简单地描述这类运动。

角动量可从另一侧面反映物体运动的规律。事实上,角动量不但能描述宏观物体的运动,而且在近代物理理论中,角动量对于表征状态也必不可少。角动量守恒定律在经典物理学、运动生物学、航空航天技术等领域中的应用非常广泛。角动量在 20 世纪已成为继动量和能量之外的力学中的重要概念之一。

角动量的概念及其守恒定律

角动量的定义和刚体的角动量　在空间任取一点 O 作为坐标原点,建立坐标系 $O-XYZ$(如图 1),设质点 A 的质量为 m、速度为 v、矢径为 $\boldsymbol{r}$。质点 A 的矢径 $\boldsymbol{r}$ 与质点动量 $\boldsymbol{p}=m\mathrm{v}$ 的矢积,称为质点 A 相对于 O 点的角动量,这里用 $\boldsymbol{L}$ 表示,于是 $\boldsymbol{L}=\boldsymbol{r}\times\boldsymbol{p}=\boldsymbol{r}\times m\mathrm{v}$。设 $\boldsymbol{r}$ 和 v 之间夹角为 α,则角动量大小为 $\boldsymbol{L}=\boldsymbol{r}m\mathrm{v}\sin\alpha$。角动量是与参考点有关的矢量,所选的参考点不同,角动量一般也不相同。

刚体可以看作由许多"质点"组成,且质点间距离保持不变的"不变质点系"。其角动量为各质点的角动量的矢量和,即 $\boldsymbol{L}=\sum_i \boldsymbol{r}_i\times m\mathrm{v}_i$。若刚体绕某一轴(设为 Z 轴)转动,则刚体对 Z 轴的角动量 $\boldsymbol{L}_Z=I_Z\,\omega_Z$。其中 $I_Z=\sum_i m_i\boldsymbol{r}_i^2$ 为刚体对 Z 轴的转动惯量,它是对一定轴转动惯性的量度,ω_Z 为刚体绕 Z 轴转动的角速度。

角动量定理和守恒定律　转动物体在外力矩作用下将改变其角动量。角动量的时间变化率与它所受的外力矩相等,这就是角动量定理。公式表示为 $\mathrm{d}\boldsymbol{L}/\mathrm{d}t=\boldsymbol{M}$,其中 $\boldsymbol{M}$ 为物体所受的外力矩。和角动量一样,力矩也是与参考点有关的矢量,它是位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 与力 $\boldsymbol{F}$ 矢量的矢积,公式表示为 $\boldsymbol{M}=\boldsymbol{r}\times\boldsymbol{F}$。

从角动量定理出发,我们很容易得到角动量守恒定律:如果物体在运动过程中受到的外力相对于固定点的力矩为零,则物体对该点的角动量守恒可简单表示为:若 $\boldsymbol{M}=0$,则 $\boldsymbol{L}=$ 守恒量。例如在只有向心力作用的系统,如行星绕日运动、电子相对于原子核的运动,都满足角动量守恒。

应该指出,角动量守恒定律的正确性远远超出经典力学的领域,是物理学的普遍规律。

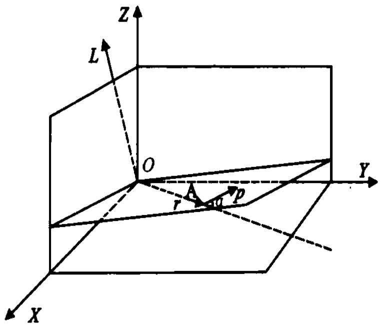

图 1

对称性的项。这样的项在电子的裸质量不存在(从而量子电动力学的拉氏量具有手征对称性)的情况下将被手征对称性所禁止,不可能出现在任何微扰修正中。因此 $\delta m\propto m$ 这一结果的出现是很自然的。

至此我们看到,试图把质量完全归因于电磁相互作用的想法在量子场论中彻底破灭了。电磁质量即使在像电子这样质量最小(从某种意义上讲也最为纯粹)的带电粒子的质量中也只占一个不大的比例,在其他粒子(尤其是那些不带电荷的基本粒子)中就更甭提了。

很显然,质量的主要来源必须到别处去寻找。

作者简介

卢昌海,1971 年出生于浙江杭州,1994 年于上海复旦大学物理系本科毕业,后赴纽约哥伦比亚大学从事理论物理学习及研究,2000 年获物理学博士学位。现旅居纽约。个人主页:http://www.changhai.org/。

回转仪的进动和陀螺效应

刚体绕某一固定点的转动称为刚体的定点转动，刚体定点转动可以看成绕瞬时轴的转动。瞬时轴的位置随时间变化。

回转仪的进动　回转仪的进动是一类特殊的刚体定点转动。回转仪又叫"陀螺"，是指绕对称轴作高速旋转的刚体，且轴上有一点固定不动。一般陀螺的质量分布对中心为旋转对称分布，使陀螺以很高的转速绕其自转轴旋转。将轴的尖端竖立在桌面上，陀螺会继续转动。但稍加倾斜自转轴就与铅垂线保持一定角度，陀螺将在自转的同时又以稳定的角速度绕铅垂线旋转，这种运动叫做进动。

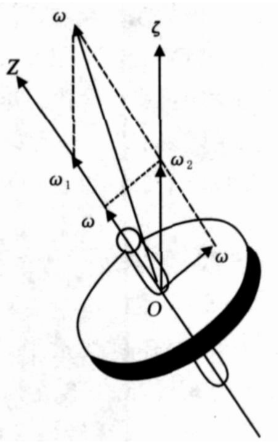

图 2

对于高速旋转的陀螺，即使有重力作用也不会倒下，而是做进动。我们从陀螺的规则进动来分析这个问题。如图 2，设对称陀螺以不变角速度 ω_1 绕其自转轴 OZ 转动，同时自转轴 OZ 又以不变的角速度 ω_2 绕 $O\zeta$ 轴转动，$O\zeta$ 轴与自转轴 OZ 之间夹角为θ、θ保持不变，我们把这种运动叫做陀螺的规则进动，$O\zeta$ 轴称为进动轴。陀螺做规则进动时，它的瞬时角速度为 $\omega=\omega_1+\omega_2$。设 I_p 和 I_e 分别为陀螺对自转轴的转动惯量和过质心且垂直于自转轴之轴的中心转动惯量。并将 ω_2 分解为沿 OZ 轴和垂直于 OZ 轴的两个分量，即有 $\omega_2=\omega'+\omega''$、$\omega'=\omega_2\cos\theta\cdot\omega_1/\omega_1$。此时，陀螺的角动量为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{L} &= I_p(\omega_1+\omega')+I_e\omega'' \\ &= I_p(\omega_1+\omega')+I_e(\omega_2-\omega') \\ &= I_p[\omega_1+\omega_2\cos\theta\cdot\omega_1/\omega_1]+I_e[\omega_2-\omega_2\cos\theta\cdot\omega_1/\omega_1] \\ &= [I_p+(I_p-I_e)\omega_2\cos\theta/\omega_1]\,\omega_1+I_e\omega_2 \qquad (1)\end{aligned}$$

$\boldsymbol{L}$ 的方向如图 3 所示。

由赖柴定理：刚体对于定点 O 的角动量 $\boldsymbol{L}$ 的矢端速度 $\boldsymbol{u}$，等于作用在刚体上的外力对于同一点的外力矩 $\boldsymbol{M}$，即 $\boldsymbol{M}=\boldsymbol{u}$，角动量 $\boldsymbol{L}$ 的矢端速度 $\boldsymbol{u}$ 为矢量 $\boldsymbol{L}$ 的端点沿此矢量的矢端曲线运动的速度。于是 $\boldsymbol{u}=\omega_1\times\boldsymbol{L}$，因此

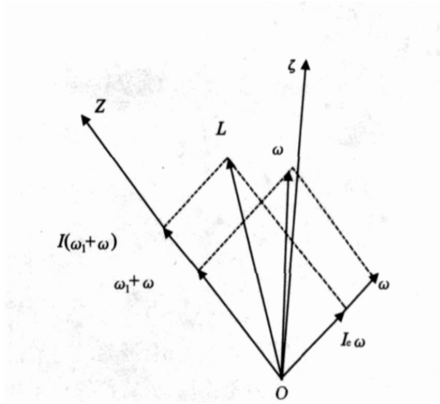

图 3

$$\begin{aligned}\boldsymbol{M} &= \omega_2\times\boldsymbol{L} \\ &= \omega_2\times[I_p+(I_p-I_e)\omega_2\cos\theta/\omega_1]\,\omega_1+\omega_2\times I_e\omega_2 \\ &= [I_p+(I_p-I_e)\omega_2\cos\theta/\omega_1]\,\omega_2\times\omega_1 \qquad (2)\end{aligned}$$

对于高速旋转的陀螺，由于 $\omega_1\gg\omega_2$，因此式(2)中方括号内第二项可以忽略不计，陀螺所受的外力矩可以近似表示为 $\boldsymbol{M}=I_p\omega_2\times\omega_1$。大小为 $M=I_p\omega_1\omega_2\sin\theta$，方向垂直于 ω_1 和 ω_2 组成的平面，即为水平方向。由角动量定理 $\mathrm{d}\boldsymbol{L}/\mathrm{d}t=\boldsymbol{M}$，$\boldsymbol{M}$ 的方向和 $\mathrm{d}\boldsymbol{L}$ 的方向相同，角动量的增量 $\mathrm{d}\boldsymbol{L}$ 也为水平方向，因此，自转轴会水平偏转，陀螺不会倒下来。

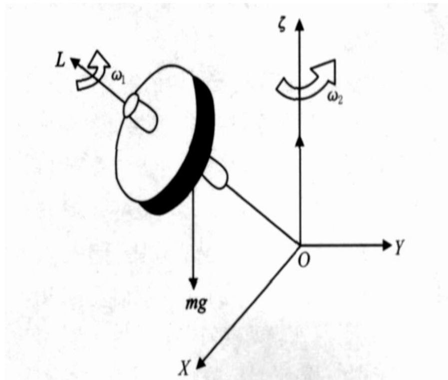

图 4

另外，单从角动量定理出发，我们也可做出粗略分析：受重力作用的高速运转的陀螺（如图 4），由于 $\omega_1\gg\omega_2$，可忽略进动部分的角动量，而近似认为陀螺的自转角动量为其总角动量。在 $\mathrm{d}t$ 时间内，陀螺自转角动量 $\boldsymbol{L}$ 增量为 $\mathrm{d}\boldsymbol{L}=\boldsymbol{M}\mathrm{d}t$，由于 $\boldsymbol{M}=\boldsymbol{r}\times m\boldsymbol{g}$，由右手定则可知，方向为水平且垂直于 $\boldsymbol{L}$ 的方向，顺着 $\boldsymbol{L}$ 方向看，为指向 $\boldsymbol{L}$ 左侧，$\mathrm{d}\boldsymbol{L}$ 方向与 $\boldsymbol{M}$ 方向相同，可知其角动量增量也为水平方向，自转轴的方向就不会向下倾斜，而是要水平偏转。

陀螺效应　陀螺受到外力矩作用时，就会产生陀螺效应。如图 5 所示，杠杆既可绕垂直轴转动也可绕水平轴转动，杆的一端安装可高速转动的对称轮子，其转轴与杠杆在同一直线上，杆的另一端安装可移动的重物，以调节杠杆的平衡。平衡时整个回

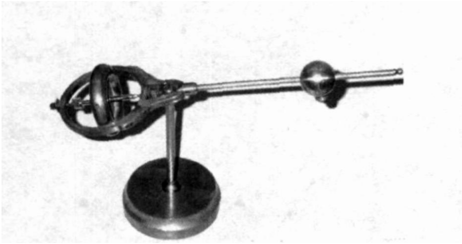

图 5

转仪的质心位于支点。若杠杆不平衡,质心将偏离支点,回转仪将受到重力矩作用,若开始时轮子是高速旋转的,由于受到重力矩作用,回转仪的角动量将改变,整个回转仪将在水平面内徐徐回转,这一效应就是回转效应。如果杠杆的水平轴不能转动,则外力矩 $\boldsymbol{M}$ 就会作用在支架上,支架提供一个力矩与外力矩 $\boldsymbol{M}$ 相平衡。在工程上,支架、轴承等提供的力矩叫做惯性力矩(陀螺力矩),由陀螺力矩引起的效应称为陀螺效应。陀螺力矩和陀螺效应不仅在陀螺装置中非常重要。而且在一般具有高速旋转部件的机械中也很重要。只要高速旋转部件的自转轴发生进动,即在空间改变方向时,就会产生陀螺力矩,出现陀螺效应。

角动量理论在现代技术中的重要应用

由角动量定理和守恒定律,及由此推证的回转仪的进动和陀螺效应在现代技术中都有重要的应用。

角动量守恒定律的应用 我们先从一个简单的例子入手,在太空的宇航员悬立在飞船座舱内的空中时,在不触按舱壁的情况下如果想向左转,则可用右脚顺时针画圈,而当两臂伸直向后划圈时,身体又会向前转。这正是因为宇航员没有受到外力矩作用,角动量守恒。

再以直升机为例,一般直升机由机身、主螺旋桨和抗扭螺旋桨组成。那么为什么直升机必须在机尾处安装抗扭螺旋桨呢?我们把直升机的主螺旋桨和机身视为一个物体系,并从物体系对转动轴线的角动量守恒来解释:发动机未开动时,直升机静止于地面,系统对主螺旋桨转轴的角动量为零。然后主螺旋桨开始转动,系统的角动量增加,这时外力矩由轮子与地面的摩擦力提供,满足角动量定理。主螺旋桨加速转动的力矩对系统来讲是内力矩,它与作用在机身的内力矩总合为零,因此合内力矩对系统的角动量没有影响。而作用于机身的内力矩又与地面的摩擦力矩相平衡,而使机身处于平衡。当主螺旋桨的角速度不断增加,一旦机身离地,摩擦力矩将突然消失,忽略空气对主螺旋桨转动的阻力矩,此时外力矩则为零,故系统角动量应保持不变,若主螺旋桨的角速度继续增加,则机身会反方向转动,以抵消由于主螺旋桨继续加速而增加的角动量,使系统总角动量保持不变。机尾安装的小螺旋桨可产生一个附加力矩与机身所受内力矩平衡,从而消除机身的转动。

陀螺仪进动的应用 自古以来,人们通过陀螺现象早已熟知高速旋转物体的定向性。常平架陀螺仪如图 6 所示,外环可绕垂直轴自由转动,内环可绕水平轴自由转动,回转仪安装在内环中,其转轴与内环转轴相垂直,三轴交于一点,并与陀螺仪的质心重合。它可使回转仪的转轴在空间取任意方向,由于三转轴都通过质心,所以回转仪不受重力矩作用,因此回转仪高速旋转时,角动量保持不变,不论支架转到什么方位,回转仪的转轴始终保持不变。常平架陀螺仪具有转轴方向不变的特点,称为指示型陀螺,可以作为指示器。如指示地理子午线和铅垂线方向,测定飞机的姿态角、舰船的摇摆角,制造控制飞机和舰船的自动器等。

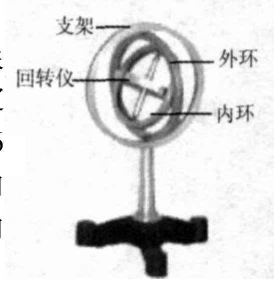

图 6

动力型陀螺的陀螺元件常被用作稳定器,或用于稳定载体上的某种装置,还可用于惯性导航、惯性平台等。以射出的子弹为例,子弹在空中将受空气阻力的作用,设空气阻力的合力为 $\boldsymbol{F}$,其方向与子弹质心的速度方向相反,一般并不作用在子弹的质心上,因此将使弹头绕质心发生翻转,影响命中率,为避免发生这种现象,就在枪膛内壁上刻出螺旋线,称为来复线。借助子弹的高温变软,使子弹嵌入膛内的来复线向前推进而高速旋转,由于自转,空气阻力对质心的力矩不能使子弹翻转,而只是使弹头绕飞行方向进动,使弹头与飞行方向不致有过大偏离。

近年来,陀螺仪的应用越来越广,除了航空、航天、航海、潜水艇与火箭导航外,还大量应用于坦克与火炮的稳定、工作平台与测量仪器的稳定等方面。

陀螺效应对稳定性的影响 近代舰船与飞机都拥有大量的转动部件。以轮船为例,当轮船航行时,它会绕船身纵轴摆动(侧滚)或绕横轴摆动(纵倾)或绕铅直转弯。转动部件在轮船上安装时,转轴的位置或是沿船身的纵轴或是横轴或是沿铅锤轴。轮船

建筑节能——浅析隔热原理研究及应用

康细洋

我国的建筑节能工作已从寒冷、炎热地区推进到冬冷夏热地区, 品种众多的保温隔热材料不断问世并用于节能建筑, 因此有关文献众多。但在建筑工程上, 有关建筑材料隔热特性研究的大量文献中, 仅罗列出一系列特性参数, 例如材料的物理力学性能(空心率、导热系数、强度参数等)以及它们与时间、温度等因素的关系, 而且只是从实验或经验的方面阐述材料的隔热等特性。本文将从热力学原理出发, 分析隔热材料的特性, 以供从事建筑、材料等行业的工作人员参考, 同时, 对提高全民节能意识也具有积极作用。

一、传热原理回顾与深化

热量传递问题与自然界和生产、生活中的许多现象和过程都有紧密相关, 有时还起着关键作用。在建筑工程中, 削弱或强化热量传递过程能够有效地节约能源。热量传递有三种基本方式: 热传导、对流和热辐射, 下面就简单介绍这三种方式。

热传导　热传导, 又称导热, 即物体各部分之间不发生相对位移, 由分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动产生的热量传递。例如用火焰加热铁棒, 未与火焰直接接触的部分通过导热温度升高。

气体、液体、导电固体和非导电固体的导热微观机理不同。气体导热是气体分子(温度高于0K)永不停息地无规则热运动时相互碰撞的结果。气体的温度越高, 其分子运动的动能就越大, 理想气体分子的平均动能与温度的关系为

$$(1/2)\,mv^2=(2/3)\,kT\,, \qquad (1)$$

其中 k 为玻尔兹曼常数。不同能量水平的分子相互碰撞, 高能量分子失去一部分能量, 低能量分子将得到一部分能量, 从而实现热量的传递。导电固体中存在大量的自由电子, 它们类似气体分子在晶格之间运动, 故自由电子的运动在导电固体导热中起主导作用。非导电固体的导热由晶格结构的振动(弹性波), 即原子、分子在其平衡位置附近振动实现。而对于液体的导热机理, 观点还不一致。一种观点认为定性上类似气体, 另一种观点认为液体的导热机理类似非导电固体, 主要靠弹性波的作用。

大量实践经验表明, 单位时间通过给定截面积所传递的热量, 与垂直于该截面方向上的温度梯度成正比, 这就是导热基本定律, 又称为傅立叶定律, 其数学表达式为

$$q=-\lambda\partial t/\partial x\,, \qquad (2)$$

负号表示热量传递方向与温度升高方向相反, λ称为导热系数。在建筑工程中, 导热系数是很重要的选择参数, 根据傅立叶定律可知, 导热系数越大, 热量传递的障碍越小, 热量传递越迅速, 反之亦然。

利用傅立叶定律求解导热热量是在温度分布已

做侧滚、纵倾或转弯时, 迫使安装在船上的转动部件发生进动, 产生陀螺力矩。其引起的附加压力可能导致转动轴弯曲或轴承遭到破坏。因此, 在工程设计中必须考虑陀螺效应。

对轮船或飞机之类具有大量转动部件的物体, 转动部件的位置调节得不好, 就会受到重力矩作用, 重力矩与陀螺力矩相平衡, 陀螺力矩作用在轴承上, 又会通过轴承传到轮船或飞机上, 影响轮船或飞机的稳定性。由于轮船本身具有较大的稳定性, 而且其重量要比转动部件大得多, 因而陀螺力矩对轮船稳定性的影响可忽略不计。但对飞行器来说, 由于其转动部件(螺旋桨、压气机等)的重量占全部重量的较大比例, 陀螺力矩将对其稳定性产生很大影响, 使其不能沿既定路径飞行, 甚至损坏飞行器。

对高速旋转物体的运动, 我们只从角动量理论出发作了简单分析, 忽略了地球自转、载体速度、冲击和摩擦等影响因素。对陀螺装置在现代技术中的应用, 也只举了几个典型实例。事实上, 工程技术中的陀螺装置更为复杂, 精度要求也很高, 理论更为复杂, 这里不再阐述。

(王志刚, 河北唐山师范学院物理系　063000; 张立换, 北京师范大学物理系　100875; 徐建军, 上海市复旦大学物理系　200433)