# 第六章 2 向心力

## 问题？

游乐场里有各种有趣的游戏项目。空中飞椅因其刺激性而深受很多年轻人的喜爱。飞椅与人一起做匀速圆周运动的过程中，受到了哪些力？所受合力的方向有什么特点？





## 向心力

做圆周运动的物体，其运动状态在不断变化，说明物体一定受到了力的作用。那么迫使物体做圆周运动的力的方向有何特点呢？

### 思考与讨论

一个小球在细线的牵引下，绕光滑桌面上的图钉做匀速圆周运动（图 6.2–1）。用剪刀将细线剪断，观察小球的运动。你认为使小球做圆周运动的力指向何方？

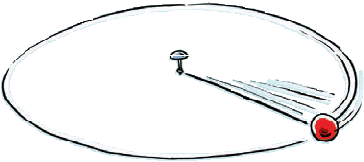


图 6.2–1 研究小球所受合力的方向

忽略小球运动时受到的阻力，在桌面上做匀速圆周运动的小球所受的合力为细线的拉力，拉力即为使小球做圆周运动的力，根据拉力的特点可以知道拉力的方向指向圆心。

大量实例都表明：做匀速圆周运动的物体所受的合力总指向圆心。这个指向圆心的力就叫作**向心力**（centripetal force）。

对于做匀速圆周运动的物体，物体的速度大小不发生改变，因此，所受合力只改变速度的方向。

应该强调的是，向心力并不是像重力、弹力、摩擦力那样作为具有某种性质的力来命名的。它是由某个力或者几个力的合力提供的，是根据力的作用效果命名的。例如，地球绕太阳的运动可近似看作匀速圆周运动，太阳对地球的引力提供向心力；在本节的“问题”所说的空中飞椅项目中，飞椅与人一起做圆周运动的向心力*F*n则是由绳子斜向上方的拉力 *F* 和所受重力 *G* 的合力提供的（图 6.2–2）。

*F*

*G*

*F*n

图 6.2–2 飞椅与人受到的力

## 向心力的大小

在物理学中，认识物理量时可以先定性了解，然后再探究不同物理量之间的定量关系。因此，我们也先通过实验感受向心力大小与圆周运动的一些运动学量之间的定性关系，再通过实验，进一步探究向心力的大小与这些量的定量关系。

### 做一做

**感受向心力**

如图 6.2–3 所示，在绳子的一端拴一个小沙袋（或其他小物体），另一端握在手中。将手举过头顶，使沙袋在水平面内做圆周运动。此时，沙袋所受的向心力近似等于手通过绳对沙袋的拉力。换用不同质量的沙袋，并改变沙袋转动的速度和绳的长度，感受向心力的变化。

*r*

图 6.2–3 感受向心力

因为沙袋还受到重力的作用，手所提供的拉力不完全是向心力。但这个实验对于体会向心力的大小与哪些量有关，还是很有意义的。通过上面的实验可以发现，做圆周运动的物体所受向心力的大小与哪些因素有关系？我们还可以利用向心力演示器对此进行更深入的定量研究。

### 实验

**探究向心力大小的表达式**

向心力演示器如图 6.2–4 所示。匀速转动手柄 1，可以使变速塔轮 2 和 3 以及长槽 4 和短槽 5 随之匀速转动，槽内的小球也随着做匀速圆周运动。使小球做匀速圆周运动的向心力由横臂 6 的挡板对小球的压力提供。球对挡板的反作用力，通过横臂的杠杆作用使弹簧测力套筒 7 下降，从而露出标尺 8。根据标尺 8 上露出的红白相间等分标记，可以粗略计算出两个球所受向心力的比值。



6

1

7

8

3

5

4

2

图 6.2–4 向心力演示器

用上面介绍的器材研究向心力大小与物体的质量、速度和轨道半径的关系时，怎样才能在改变某个物理量时保持其他物理量不变？

精确的实验表明，向心力的大小可以表示为

*F*n = *mω*2*r*

或者

*F*n = *m*

## 变速圆周运动和一般曲线运动的受力特点

仔细观察运动员掷链球时的动作，结合手握绳子使沙袋加速转动的体会，可以发现：我们使沙袋加速转动时，绳子牵引沙袋的方向并不与沙袋运动的方向垂直。也就是说，沙袋加速时，它所受的力并不严格指向运动轨迹的圆心。

图 6.2–5 表示做圆周运动的沙袋正在加速转动的情况。*O* 是沙袋运动轨迹的圆心，*F* 是绳对沙袋的拉力。根据 *F* 产生的效果，可以把 *F* 分解为两个相互垂直的分力：跟圆周相切的分力 *F*t 和指向圆心的分力 *F*n。*F*t 与沙袋运动的速度同向，使得沙袋的速度越来越大；*F*n 指向圆心，提供沙袋做圆周运动所需的向心力，改变沙袋速度的方向。

*O*

*F*t

*F*

*F*n

图 6.2–5 做变速圆周运动的沙袋所受的力

### 思考与讨论

当物体做圆周运动的线速度逐渐减小时，物体所受合力的方向与速度方向的夹角是大于 90° 还是小于 90° 呢？

运动轨迹既不是直线也不是圆周的曲线运动，可以称为一般的曲线运动。尽管这时曲线各个位置的弯曲程度不一样，但在研究时，可以把这条曲线分割为许多很短的小段，质点在每小段的运动都可以看作圆周运动的一部分（图 6.2–6）。这样，在分析质点经过曲线上某位置的运动时，就可以采用圆周运动的分析方法来处理了。

图 6.2–6 一般曲线运动的研究方法

*v*

*v*

## 练习与应用

1．地球质量为 6.0×1024 kg，地球与太阳的距离为 1.5×1011 m。地球绕太阳的运动可以看作匀速圆周运动。太阳对地球的引力是多少？

2．把一个小球放在玻璃漏斗中，晃动漏斗，可以使小球在短时间内沿光滑的漏斗壁在某一水平面内做匀速圆周运动（图 6.2–7）。小球的向心力是由什么力提供的？

图 6.2–7

3．如图 6.2–8 所示，一个圆盘在水平面内匀速转动，角速度是 4 rad/s。盘面上距圆盘中心 0.10 m 的位置有一个质量为 0.10 kg 的小物体在随圆盘一起做匀速圆周运动。

图 6.2–8

（1）求小物体所受向心力的大小。

（2）关于小物体所受的向心力，甲、乙两人有不同意见：甲认为该向心力等于圆盘对小物体的静摩擦力，指向圆心；乙认为小物体有向前运动的趋势，静摩擦力方向和相对运动趋势方向相反，即向后，而不是和运动方向垂直，因此向心力不可能由静摩擦力提供。你的意见是什么？说明理由。

4．如图 6.2–9 所示，细绳的一端固定于 *O* 点，另一端系一个小球，在 *O* 点的正下方钉一个钉子 *A*，小球从一定高度摆下。经验告诉我们，当细绳与钉子相碰时，钉子的位置越靠近小球，绳就越容易断。请解释这一现象。

A

*O*

图 6.2–9

5．一辆汽车在水平公路上转弯，沿曲线由 *M* 向 *N* 行驶，速度逐渐减小。图 6.2–10 甲、乙、丙、丁分别画出了汽车转弯时所受合力 *F* 的四种方向，你认为哪种是正确的？为什么？

*F*

*M*

*N*

乙

*F*

*M*

*N*

*M*

*N*

丙

丁

*F*

*M*

*N*

*F*

甲

图 6.2–10

# 第 2 节 向心力 教学建议

## 1．教学目标

（1）知道向心力是根据力的效果命名的，会分析向心力的来源。

（2）感受影响向心力大小的因素，通过实验探究它们之间的关系。

（3）掌握向心力的表达式，能够计算简单情境中的向心力。

（4）知道变速圆周运动和一般曲线运动的分析方法。

## 2．教材分析与教学建议

本节的编排遵循从特殊到一般、从定性到定量的科学探究过程。本节内容可以看作牛顿运动定律在曲线运动中的应用，进一步深化了运动和相互作用观念。在教学过程中要加强新旧知识的对比与联系，帮助学生再次体会力是改变运动状态的原因，促进对知识的同化，完善知识结构。

本节教学的重点与难点是建立与理解向心力的概念，以及对向心力来源的分析。本章后面的学习都将围绕向心力的概念展开，它也是分析天体的圆周运动、带电粒子在磁场中的运动的知识基础。

学生第一次接触变力作用下的曲线运动，这是一个新的情境，教学中应注意控制难度，可以把这一节拆分成两课时。第一课时侧重在感性体验的基础上建立向心力的概念，并完成对向心力公式的探究。第二课时侧重分析匀速圆周运动向心力的来源并进行定量的计算，要提供一些典型案例作为支撑。

### （1）向心力

教材先从力与运动关系的角度说明做匀速圆周运动的物体一定受力，再结合具体实例进行受力分析，进而归纳出做匀速圆周运动的物体所受合力指向圆心这个一般规律，并把这个力命名为向心力，最后以“问题”中的空中飞椅为例分析了实际问题中的向心力的来源。

**教学片段**

**向心力的来源及其命名**

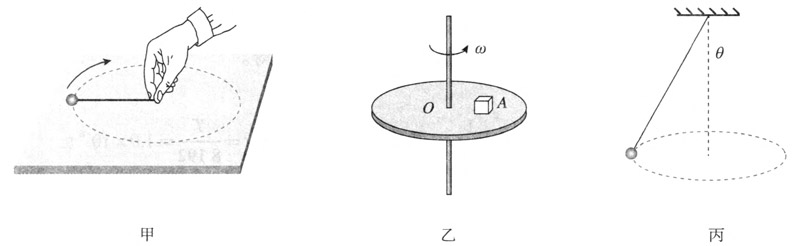


图 6–3

问题 1．如图 6–3 甲所示，小球在细绳的牵引下在光滑的水平桌面上做匀速圆周运动。如果绳子断了，小球还能做圆周运动吗？为什么？

问题 2．在运动过程中，竖直方向的重力与支持力是什么关系？绳子给小球的作用为在整个运动过程中有什么特点？

问题 3．如图 6–3 乙所示，物块在水平圆盘上随圆盘做匀速圆周运动。如果圆盘光滑，物块还能做圆周运动吗？什么力对物块做圆周运动起了作用？

问题 4．图 6–3 乙中的物块与图 6–3 甲中的小球运动情况相同吗？它们的受力是否也应该相似？你想到了什么？

问题 5．如图 6–3 丙所示，小球在细绳的牵引下在空中做匀速圆周运动。小球运动轨迹的圆心在哪？

问题 6．图 6–3 丙中的小球与图 6–3 甲中的小球和图 6–3 乙中的物块运动情况相同吗？它们的受力是否也应该相似？你想到了什么？

问题 7．图 6–3 丙中的小球是否真的受到一个指向圆心的力？从力的合成角度看，这个力是什么？从力的分解角度看，这个力又是什么？

问题 8．向心力是否一定是一个真实力？向心力是否可以是几个力的合力或某个力的分力？

图 6–3 甲中的小球所受的向心力方向可根据绳子受力特点确定（沿绳方向）。对图 6–3 乙中的物块，可先从运动角度确定它的运动与图 6–3 甲中小球的运动相同，再根据力与运动关系，判断其受力应该也相似。对图 6–3 丙中的案例，分析思路与前面相同，但需要结合力的合成与分解知识，得到合力或分力均可提供向心力的结论。

对这三个案例的总结与概括，已经可以让学生认识向心力的特点和本质。向心力可以是弹力、摩擦力、引力中的任一个力、也可以是某几个力的合力或者某一个力的分力，它是一个效果力。在分析具体实例时应该先作受力分析，从中“找”出什么力提供了向心力，而不应凭空“画”出向心力。

### （2）向心力的大小

在定量研究之前，教材安排了“感受向心力”的沙袋实验，让学生通过体验获得直接的感性认识。研究拉力（近似为向心力）与半径的关系时，要保持转速（角速度）一定，可以用喊口令的方法控制转动的快慢。研究拉力与转速（角速度）的关系时，慢慢增大或减小转速就可以体验到拉力的变化。这个实验需要比较大的空间，很难在课堂上让学生完成，建议课前让学生找开阔的地方体验。

通过“感受向心力”这个活动，让学生体验影响向心力的因素，为接下来进行的“探究向心力大小与半径、角速度、质量的关系”实验设计提供了方向。

**教学片段**

**向心力的定量研究**



6

1

7

8

3

5

4

2

图 6–4

问题 1．在如图 6–4 所示的向心力演示仪中，向心力的大小怎样测量？

问题 2．如何改变物体的质量？如何设定轨道半径？

问题 3．如何控制或测定物体的角速度？

问题 4．你安排的实验步骤是怎样的？

问题 5．得到了怎样的实验结果？根据已有知识，你还能写出怎样的表达式？

小球做圆周运动的向心力由横臂的挡板对小球的压力提供。小球对挡板的反作用力，通过横臂的杠杆作用使弹簧测力套筒下降，从而露出标尺，标尺上露出的红白相间等分格子就可以显示出两个小球所受向心力的比值。通过控制变量法，分别研究向心力 *F* 和质量 *m*、转动半径 *r* 以及角速度 *ω* 之间的关系。先让 *r* 和 *ω* 不变，用大小相同的铝球和铁球，研究向心力与质量之间的关系。再让 *m* 和 *r* 不变，将皮带套在不同的转动轮上，研究向心力和角速度之间的关系。最后让 *m* 和 *ω* 不变，将铁球放在不同的位置，研究向心力和半径之间的关系。

### （3）变速圆周运动和一般曲线运动的受力特点

这部分内容可以让学生在更一般、更广阔的背景下认识圆周运动和曲线运动。将向心力的知识从匀速圆周运动推广到变速圆周运动和一般曲线运动，从力的分解角度了解圆周运动速度大小与方向改变的原因，从极限的角度了解一般曲线运动的研究方法。建议教师在教学时把握好难度，学生能够了解物体受到的力的法向分力和切向分力的作用就可以了，不要求掌握这些概念，不要求定量研究。

**教学片段**

**变速圆周运动和一般曲线运动中的受力分析**

问题 1．链球运动员在掷出链球之前的加速过程如图 6–5 所示，能近似看作圆周运动吗？还是匀速圆周运动吗？

问题 2．做圆周运动需要什么方向的力？速度变大需要什么方向的力？你能画出相应的图示吗？



图 6–5

*O*

*F*t

*F*

*F*n

图 6–6

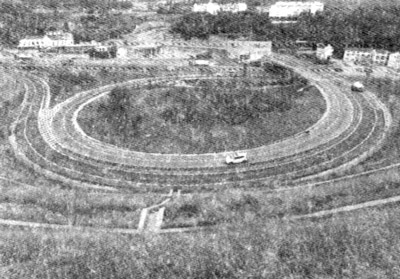


图 6–7

图 6–8

*v*

*v*

问题 3．图 6–6 中的 *F*n、*F*τ 来源于哪里？绳子与速度方向还垂直吗？

问题 4．如图 6–7 所示，汽车在水平弯曲的道路上行驶时，能近似看作圆周运动吗？它的运动是匀速圆周运动吗？

问题 5．你能大致分析汽车的受力情况吗？

问题 6．汽车在图 6–7 所示的道路上行驶，如果从速度计读出了汽车运动的速度，为了计算汽车的向心力，还需要知道什么物理量？

问题 7．向心加速度与向心力公式是否只适用于匀速圆周运动？试结合图 6–8 进行说明。

图 6–5 和图 6–7 呈现的都是真实的问题，这类问题的处理首先要引导学生通过受力、运动分析确定模型。如果直接确定模型有困难，还需要综合运用等效、转化、微元等方法。

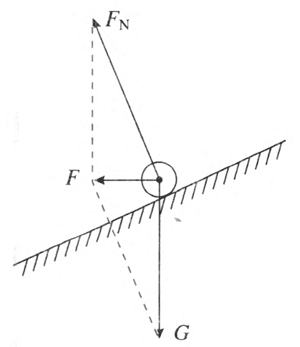
## 3．“练习与应用”参考答案与提示

本节共 5 道习题，涵盖了向心力在生活中应用的各个层面，通过本节练习，让学生能综合应用所学向心力知识解决实际匀速圆周运动问题。第 1 题应用向心力公式计算引力。第 2 题和第 3 题研究向心力来源不同的情形下，尝试用已有的物理知识解释水平面内的圆周运动问题。第 4 题通过分析变速圆周运动中最低点的绳子拉力突变问题，发现规律，用向心力公式分析绳子拉力并对现象进行解释，培养学生的科学探究意识。第 5 题通过定性分析汽车转弯时的合力方向，获得结论并作出解释，培养科学思维。

1．3.6×1022 N

提示：由于地球在太阳的引力作用下做匀速圆周运动，地球公转周期为 *T* = 365×24×3 600 s = 3.15×107 s。设引力为 *F*，则 *F* = *mω*2*r* = *mr* = 6.0×1024××1.5×1011 N = 3.6×1022 N。

知道将地球绕太阳的运动简化为匀速圆周运动模型，理解地球绕太阳做匀速圆周运动的向心力来源于太阳对地球的引力，在解答时应注意挖掘题目中的隐含条件（地球公转周期）。本题可以为下一章的学习埋下伏笔。

2．小球在漏斗壁上的受力如图 6–9 所示。小球所受重力 *G*、漏斗壁对小球的支持力 *F*N 的合力提供了小球做圆周运动的向心力。

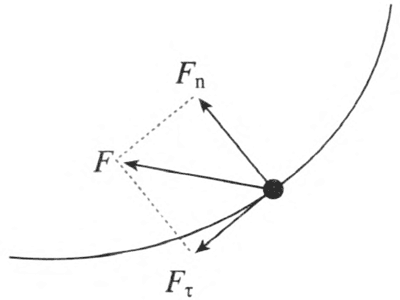
提示：求解本题时，要知道向心力的来源，明确向心力是做圆周运动的物体指向圆心方向的合力，理解向心力是一种效果力。此类模型可用于解决火车转弯、飞机转弯、绳拉小球做圆周运动等问题。

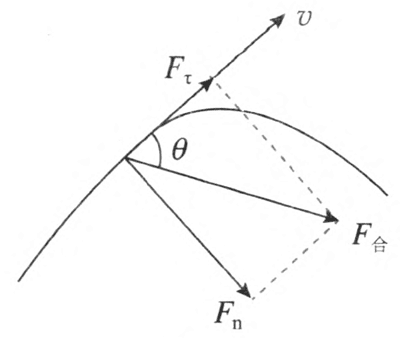
3．（1）0.16 N；（2）甲的意见是正确的。静摩擦力的方向与物体相对接触面运动的趋势相反，假设在匀速转动过程中，圆盘突然变得光滑，小物体因为惯性将会沿切线方向飞出。从相对运动的视角来看，小物体有相对圆盘沿半径方向向外运动的趋势，故静摩擦力的方向指向圆心。

提示：练习用向心力公式 *F* = *mω*2*r* 求小物体所受向心力的大小，用假设法推理分析向心力的来源。此类模型可用于解决汽车在水平路面上转弯以及洗衣机匀速转动等问题。

4．设小球的质量为 *m*，钉子 A 与小球的距离为 *r*。小球从一定高度摆下，虽然每次钉子的位置不同，但是由于每次释放的高度相同，小球在竖直线以左的运动规律完全相同，故小球通过最低点的速度相同，设为 *v*。小球通过最低点时做半径为 *r* 的圆周运动，绳子的拉力 *F*T 和重力 *mg* 的合力提供了向心力，即 *F*T − *mg* = *m*，由此得 *F*T = *mg* + *m*。在 *m*、*v* 一定的情况下，*r* 越小，*F*T 越大，即绳子承受的拉力越大，绳子越容易断。

提示：练习用 *F*向 = 求细绳的拉力，加深对向心力的理解，培养学生将物理知识应用于生活和生产实践的意识。理想绳是高中阶段常见的研究模型，细绳的形变量极小，形变量发生变化几乎不需要时间，故认为细绳的拉力可以发生突变。本题中绳系小球摆动，绳碰到钉子的瞬间，圆周运动半径变化，但速度大小不变，故拉力发生突变。

5．丙图正确。汽车在行驶中速度越来越小，所以汽车在轨迹的切线方向做减速运动，切线方向所受合力方向如图 6–10 中的 *F*τ 所示。同时汽车做曲线运动，必有向心加速度，向心力如图 6–10 中的 *F*n 所示。汽车所受合外力 *F* 为 *F*τ、*F*n 的合力，如图中的 *F* 所示。丙图正确。

提示：以汽车减速运动为背景，让学生学会分析做一般曲线运动的物体的受力情况。物体做曲线运动的条件是合外力的方向与速度的方向不在一条直线上。如图 6–11 所示，设 *F*合 与速度 *v* 的夹角为 *θ*，根据牛顿第二定律和力的独立作用原理可知，切向合外力 *F*τ 只产生切向加速度 *a*τ，法向合外力 *F*n 只产生法向加速度 *a*n，则 *F*τ = *F*合cos*θ* = *ma*τ，*F*n = *F*合sin*θ* = *ma*n。

在 0° < *θ* < 90° 时，*a*τ 和 *v* 同向，物体做加速曲线运动。在 90° < *θ* < 180° 时，*a*τ 和 *v* 反向，物体做减速曲绒运动，切向合外力 *F*τ 的作用就是改变线速度 *v* 的大小的原因，切向加速度 *a*τ 的大小只反映线速度 *v* 大小变化的快慢。法向合外力 *F*n 的作用是改变线速度 *v* 的方向的原因，法向加速度 *a*n 的大小反映线速度 *v* 方向变化的快慢。