

8. Импульс вращения и его поток

Здесь рассматривается особый вид движения: вращательное движение. Тебе станет ясно, что вращательное движение часто встречается на практике и играет важную роль.

Сначала мы сделаем интересное открытие: описание вращательного движения очень похоже на описание прямолинейного движения. Отметим, что существует *аналогия* между соответствующими разделами механики. Благодаря этой аналогии мы можем облегчить нашу работу.

8.1 Импульс вращения и угловая скорость

На валу двигателя смонтировано колесо, двигатель включен, колесо равномерно вращается, рис. 8.1. Что значит «равномерно»? Ты возможно скажешь, что это движение с постоянной скоростью. Однако, с какой же конкретно скоростью? Точка В на ободе колеса вращается быстро, точка А, расположенная ближе к оси, вращается медленнее. Это значит, что нет одной скорости. Следовательно, нам необходимо ввести какой-то параметр для измерения скорости вращения.

Таким параметром является угол, на который перемещается радиус за одну секунду, рис. 8.2. Отношение величины этого угла к времени, которое необходимо для перемещения на этот угол, называют *угловой скоростью*:

Угловая скорость = угол/время

Угол измеряется в различных единицах. Ты, наверно, знаком с угловым градусом. В данном случае в качестве единицы более удобно принять полный оборот - 360° . Таким образом, мы можем измерять угловую скорость в «оборотах в секунду».

(Рис. 8.1. Точка В на колесе движется быстрее точки А)

(Рис. 8.2. Угловая скорость равна отношению угла к времени перемещения.)

(Рис. 8.3. Вращающееся колесо имеет совершенно определенное количество импульса вращения.)

Рассмотрим свободно вращающееся колесо на хорошо смазанном подшипнике. Например, колесо перевернутого велосипеда, рис. 8.3. Оно вращается с определенной скоростью, то есть колесо совершает определенное число оборотов в секунду. Мы можем определить величину угловой скорости с помощью секундомера. Таким образом, мы описали вращательное движение колеса.

Угловая скорость вращательного движения представляет собой тоже, что и обычная скорость прямолинейного движения. Однако, для описания прямолинейного движения мы вводили и дополнительную величину: импульс. Импульс является мерой «маха», который имеет тело.

Точно также можно сказать и о вращающемся колесе. Оно имеет «мах»: то, что проявляется, если колесо приводится в движение, и снова исчезает, если колесо останавливается. Этот вид «маха» называется *импульсом вращения*.

Импульс вращения и обычный импульс не одинаковы. Если бы колесо на рис. 8.4а, имело обычный импульс, оно должно было двигаться, как показано на рис. 8.4б.

(Рис. 8.4. (а) Колесо имеет импульс вращения. (б) Колесо имеет обычный импульс.)

Мы будем исследовать свойства импульса вращения. От чего он зависит? Как он ведет себя в различных процессах?

Два одинаковых колеса вращаются с различными угловыми скоростями, рис. 8.5. В каком из этих двух колес содержится больший импульс вращения? Разумеется, в более быстром.

Тело содержит тем больший импульс вращения, чем выше его угловая скорость.

Два колеса на рис. 8.6 имеют одинаковую форму, но сделаны из разных материалов - одно легкое, другое тяжелое. Оба колеса имеют одинаковую скорость вращения. Какое из них содержит больший импульс вращения? Конечно, более тяжелое.

Тело содержит тем больший импульс вращения, чем больше его масса.

Два тела могут иметь одинаковые массы и одинаковые скорости вращения, однако могут содержать различные значения импульса вращения. Мы увидим ниже, от чего это зависит, когда больше узнаем об импульсе вращения.

Рассмотрим еще один простой эксперимент, рис. 8.7. Мы испытываем два колеса. Опора одного из них жестко прикреплена к столу, а опора другого может перемещаться. Оба колеса могут быть приведены в соединение с помощью сцепления скольжения. Следовательно, одно колесо может вести за собой другое.

(Рис. 8.5. Колеса движутся с различными скоростями. Какое колесо имеет больший импульс вращения?)

(Рис. 8.6. Колеса имеют одинаковую форму, но различные массы. Какое из колес имеет больший импульс вращения? (алюминий, железо))

(Рис.8.7. Когда колеса сцепляются друг с другом, импульс вращения начинает «перетекать» с правого колеса на левое.)

Сначала колеса разъединены. Одно из них приводится во вращение, а другое остается в покое. Затем колеса с помощью сцепления приводятся в соприкосновение друг с другом. Что произойдет?

Вращающееся колесо замедляется, а покоящееся колесо, начинает вращаться. Через некоторое время после того, как оба колеса пришли в соприкосновение, их угловые скорости уравниваются.

Это было наблюдение. Как это объяснить? Что происходит с импульсом вращения?

Величина импульса вращения вращающегося колеса снизилась, а покоящегося колеса увеличилась. То есть, произошла передача импульса вращения от одного колеса к другому.

Импульс вращения может передаваться от одного тела к другому.

Импульс вращения, содержащийся в начале эксперимента только в одном колесе, распределился равномерно на оба колеса.

Импульс вращения может распределяться между телами.

Вернемся еще раз к жестко соединенному со своей осью колесу. Ось опирается на хорошо смазанные подшипники. Колесо приводится во вращение, то есть ему сообщается импульс вращения. Человек берет за вращающуюся ось рукой и «тормозит» колесо, рис.8.8. Через некоторое время колесо останавливается. Куда исчез импульс вращения?

(Рис. 8.8. Импульс вращения стекает в землю.)

Эта ситуация аналогична известному тебе торможению прямолинейно движущегося автомобиля. У автомобиля при торможении импульс стекает в землю, у вращающегося колеса при торможении импульс вращения также стекает в землю.

Торможение вращающегося колеса произошло бы и без вмешательства человека. В этом случае импульс вращения также стек бы в землю из-за трения в подшипниках, однако в этом случае процесс торможения происходил бы значительно медленнее.

Ты видишь, что подшипники колеса должны хорошо фиксировать ось колеса, одновременно не давая возможности импульсу вращения стекать в землю.

Если подшипники колеса плохо смазаны, то колесо само быстро остановится, так как импульс вращения быстро стечет в землю.

Вернемся к эксперименту с двумя колесами, рис. 8.7. Мы приводим жестко закрепленное на столе колесо во вращение. Затем, приводим незакрепленное колесо во вращение, но в противоположном направлении. При этом мы создаем для обоих колес одинаковое число оборотов в секунду.

Теперь с помощью сцепления скольжения соединяем эти колеса. Каким в этом случае будет конечное состояние обоих колес? Оба колеса останавливаются. Каким же будет объяснение? Ведь до этого импульсы вращения существовали. Куда же они делись?

(Рис. 8.9. Правило правой руки.)

Каждое колесо имело в начале отличную от нуля величину импульса вращения. Если величина импульса вращения одного колеса равна по величине импульсу вращения другого колеса, но противоположна по знаку, то и суммарная величина импульсов вращения колес уже в начале процесса равна нулю. Из этого следует:

Импульс вращения может быть как положительным, так и отрицательным.

Какое из этих двух значений взять в качестве положительного, а какое в качестве отрицательного может быть установлено произвольно. Как точно установить знак импульса вращения? Такую возможность предоставляет нам очень простое *правило правой руки*, рис. 8.9:

Необходимо взяться за вращающуюся ось правой рукой так, чтобы согнутые пальцы показывали направление вращения. Если большой палец правой руки укажет на положительное направление оси x , то импульс вращения будет положительным, если на отрицательное, то импульс вращения будет отрицательным.

Задание

Подыщи к представленным выше в этом разделе напечатанным жирным шрифтом предложениям соответствующие напечатанные жирным шрифтом предложения раздела 3.2 этой книги, которые относятся к прямолинейному движению. Собери эти предложения в одну таблицу друг против друга.

8.2 Накачка импульса вращения

Импульс вращения самостоятельно стекает с вращающегося колеса на землю через далеко не идеальные подшипники. Для ввода импульса вращения в колесо необходимо усилие. Самостоятельно колесо никогда не придет во вращение.

Поэтому для вращения колеса необходимо сообщить ему импульс вращения, то есть привести его во вращение рукой или подключить к нему двигатель, рис. 8.10.

(Рис. 8.10. (а) Человек работает в качестве насоса для накачки импульса вращения. (б) Двигатель работает в качестве насоса для накачки импульса вращения. (двигатель))

В обоих случаях реализуется *накачка импульса вращения*. В первом случае работает человек, а во втором - двигатель.

(Рис. 8.11. (а) Только колесо имеет импульс вращения. (б) От колеса импульс вращения стекает на человека и на стул.)

Откуда насос, накачивающий импульс вращения, берет этот импульс? Импульс вращения также, как и обычный импульс, поступает из земли. Следующий опыт ясно это показывает.

В этом эксперименте используется вращающийся стул и большое колесо с хорошо смазанным подшипником, чтобы оно могло свободно вращаться на своей оси. Человек держит колесо так, чтобы ось колеса располагалась перпендикулярно относительно земли, и начинает его вращать. Затем, экспериментатор садится на стул, рис. 8.11, и затормаживает колесо до его остановки. Теперь можно заметить, что сам человек вместе со стулом начинает вращаться. Это объясняется так: при

торможении импульс вращения с колеса стекает на человека и на стул, но не дальше. Импульс вращения не может стечь на землю, так как вращающийся стул посредством подшипника изолирован от земли.

Если во время торможения колеса человек упадет на пол, то импульс вращения прямо стечет на землю.

Теперь рассмотрим другой вариант эксперимента. Человек сидит на способном вращаться стуле и держит в руках колесо, рис. 8.12. Сначала стул и колесо находятся в покое. Затем колесо приводится человеком во вращение. Что произойдет? В начале вращения стул также начинает вращаться вместе с человеком, но в противоположном направлении.

(Рис. 8.12. (а) Колесо, человек и стул при отсутствии импульса вращения. (б) Импульс вращения от человека и стула закачивается в колесо.)

(Рис. 8.13. К заданию.)

Ясно, что человек передает со стула и от себя импульс вращения в колесо, при этом человек и стул приобретают отрицательный импульс вращения.

Если человек при загрузке колеса опять упадет на землю, стул не будет вращаться. На этот раз импульс вращения в колесо должен был бы закачиваться непосредственно из земли.

Задание

Человек на рис. 8.13 держит в каждой руке по одному вращающемуся колесу, оси которых направлены вертикально вверх. Колеса идентичны. Их угловые скорости одинаковы, а направления вращения противоположны. В то время как человек сидит на способном вращаться стуле, он одновременно

тормозит оба колеса. Что произойдет? Что произойдет при торможении, если перед этим оба колеса вращались в одном направлении?

8.3 Маховики

Вращающееся колесо содержит импульс вращения и является его накопителем. Некоторые колеса служат исключительно для накопления импульса вращения. Такие колеса называются *маховиками*.

Для чего используются маховики? Паровые машины и двигатели внутреннего сгорания (автомобильные двигатели) накачивают импульс вращения не постоянно, а толчками (прерывисто). Автомобильный двигатель производит в секунду около 50 подкачек импульса вращения. Между этими подкачками существуют короткие временные интервалы, в течении которых автомобильный двигатель не осуществляет «подкачку». Для того чтобы преодолевать эти мертвые промежутки времени и не дать остановиться автомобильному двигателю, используется маховик. Во время работы двигателя часть импульса вращения поступает в маховик, а во время мертвого промежутка часть импульса вращения отдается обратно валу двигателя. Благодаря маховику на валу автомобильного двигателя обеспечивается более или менее постоянный поток импульса вращения.

Как «снабдить» маховик возможно большим импульсом вращения? Мы уже видели, что тело содержит тем больший импульс вращения, чем оно быстрее вращается и чем оно тяжелее. Следовательно, маховик должен быстро вращаться и иметь большую массу.

Рассмотрим простой, но грубый способ сравнения величин импульса вращения. Исследуемое колесо устанавливается на

ось, которая сидит на хорошо смазанных подшипниках, рис. 8.14. Мы зажимаем ось большим и указательным пальцами изо всех сил. До остановки исследуемого колеса проходит определенное время. Чем больший импульс вращения содержит колесо, тем больше времени пройдет до исчезновения импульса вращения.

(Рис. 8.14. Чем больше времени проходит до остановки вращающегося тела, тем больший импульс вращения это тело содержит.)

Теперь мы сравним в каждом случае два вращающихся тела.

1. Тела имеют совершенно одинаковую конструкцию. Одно тело вращается быстро, другое вращается медленно. Ясно, что время для остановки быстрого тела больше, чем для медленного, так как быстрое тело содержит больший импульс вращения по сравнению с медленным.

2. Тела вращаются с одинаковой скоростью, но имеют различные массы. Торможение тяжелого тела длится дольше, чем торможение легкого, так как тяжелое тело имеет больший импульс вращения по сравнению с легким.

3. Теперь мы сравним два тела, которые ни по массе, ни по угловой скорости не различаются. Единственное отличие этих тел состоит в том, что части массы одного тела расположены дальше от оси вращения по сравнению с частями другого тела, рис. 8.15. Результат ясен. Тело, масса которого расположена дальше от оси вращения, тормозится дольше другого. Значит, тело, масса которого располагается дальше от оси вращения, обладает большим импульсом вращения.

(Рис. 8.15. Тело, масса которого находится дальше от оси вращения, содержит больший импульс вращения.)

(Рис. 8.16. Маховик. Спицы поддерживают тяжелое кольцо.)

Теперь мы нашли еще одну новую зависимость:

Тело содержит тем больший импульс вращения, чем дальше от оси вращения сосредоточена его масса.

Мы нашли правило, которое должно соблюдаться при изготовлении маховиков: масса должна располагаться по возможности дальше от оси вращения. Маховик с большой способностью к сохранению импульса вращения является большим тяжелым кольцом, которое тонкими спицами крепится к ступице колеса, рис. 8.16.

Задания

1. Колеса имеют различные функции. Накопление импульса вращения является только одной из них. Для чего еще используются колеса? Назови другие возможные цели применения колес.

2. Назови примеры применения маховиков.

3. Нельзя накопить в маховике сколь угодно большую величину импульса вращения тем, что вращать его все быстрее и быстрее. Почему нет?

8.4 Проводники импульса вращения

Рис. 8.17 показывает, как можно нагрузить маховик импульсом вращения. Импульс вращения поставляется двигателем из земли. Следовательно, импульс вращения течет по валу к маховику. Мы

убеждаемся в том, что валы служат для передачи импульса вращения, то есть валы являются проводниками импульсов вращения.

(Рис. 8.17. Импульс вращения через вал поступает от двигателя к маховику.)

(Рис. 8.18. Соединение между двигателем и маховиком может прерываться с помощью сцепления.)

Каким свойством должны обладать валы для того, чтобы они могли надежно передавать импульс вращения? Из какого материала они должны быть изготовлены? Единственным условием для этого является прочность материала вала. Любой твердый стержень может быть использован в качестве проводника для передачи импульса вращения.

Твердые материалы проводят импульс вращения.

Рассмотрим несколько устройств, которые имеют дело с передачей импульса вращения.

Подшипник служит для того, чтобы надежно удерживать вал, не позволяя при этом импульсу вращения стекать в землю.

Подшипники служат для того, чтобы изолировать импульс вращения от земли.

На рис. 8.18 представлено сцепление. С помощью рычага можно прерывать связь между двигателем и маховиком.

С помощью сцепления можно прерывать передачу импульса вращения.

Каждый автомобиль имеет сцепление, которое находится между двигателем и коробкой скоростей, рис. 8.19. При нажатии на педаль сцепления (самая

левая в автомобиле) происходит «расцепление» двигателя, что прерывает соединение между двигателем и коробкой скоростей.

(Рис. 8.19 Часть привода автомобиля. (двигатель, коробка скоростей, задние колеса, сцепление, карданный вал.))

Прежде чем «запустить» двигатель, необходимо обязательно отсоединить двигатель от коробки скоростей, то есть изменить передаточное отношение редуктора коробки скоростей. Если во время запуска двигателя не произвести расцепление, то мощный поток импульса вращения, который потечет от двигателя к колесам, может разрушить коробку скоростей.

(Рис. 8.20. (а) Импульс вращения течет слева направо. (б) Импульс вращения течет справа налево. (импульс вращения))

Рассмотрим протекание импульса вращения через вал. Есть ли для вала различие, идет по нему поток импульса вращения или нет? Существует ли различие между тем, что этот поток движется слева направо или наоборот справа налево?

На вал это не влияет, по крайней мере на прочный вал. Попробуем использовать в качестве вала что-нибудь гибкое и эластичное, например, пластмассовую линейку, рис. 8.20а. Как среагирует линейка, если по ней пройдет поток импульса вращения? Линейка будет закручиваться, так как она находится под воздействием определенного вида напряжения, называемого *крутящим напряжением*. Твердый предмет при прохождении по нему потока импульса вращения также испытывает на себе воздействие крутящего импульса. Но на твердый предмет это скручивающее напряжение не оказывает влияния.

Направление скручивания зависит от направления движения импульса вращения. На рис. 8.20а колесо нагружено положительным импульсом вращения, то есть по линейке импульс вращения движется слева направо.

На рис.8.20b в колесо входит также положительный импульс вращения. Здесь он приходит справа, то есть импульс вращения движется справа налево. В чем различие между этими двумя линейками?

Края обеих линеек образуют спираль. Существуют два вида спиралей: правые и левые, рис. 8.21. Правая спираль выглядит как штопор или как обычная правосторонняя резьба. Левая спираль выполнена по принципу так называемой левосторонней резьбы или как зеркальное изображение обычного штопора.

(Рис. 8.21. (а) Правая спираль. (б) Левая спираль. (с) Штопор и его изображение в зеркале.)

Вернемся теперь к потокам импульса вращения. На рис. 8.20а импульс вращения движется слева направо. Здесь линейка закручивается как левая резьба. На рис. 8.20b импульс вращения движется справа налево. Здесь линейка закручивается как правая резьба.

Поток импульса вращения движется направо: закручивание образует левую резьбу;

Поток импульса вращения движется налево: закручивание образует правую резьбу.

Задания

1. Опиши эксперимент, с помощью которого можно исследовать, проводит ли вода импульс вращения.

2. Опиши эксперимент, с помощью которого можно доказать, что магнитные поля проводят импульс вращения.

3. Воздух почти не проводит импульс вращения. Опиши эксперимент или назови прибор, по которому можно видеть, что воздух все же проводит импульс вращения.

4. Валы являются проводниками импульса вращения. В автомобиле находится большое число различных валов. Они имеют в соответствии со своими функциями различные наименования. Назови различные валы в автомобиле. Для чего они используются?

5. Почему некоторые валы толстые, а некоторые тонкие?

8.5 Кругооборот импульса вращения

На рис. 8.22 представлена упрощенная конструкция кофемолки. Обычная кофемолка более компактна, однако работает по принципу, показанному на этом рисунке.

(Рис. 8.22. Кофемолка. Импульс вращения движется по замкнутому кругу. (электрический двигатель, мельница, импульс вращения))

Мельница приводится в действие электрическим двигателем, который закачивает импульс вращения через вал в мельницу. Увеличивается ли вследствие этого импульс вращения мельницы? Нет, так как мельница в этом случае вращалась бы все с большей и большей скоростью, а этого не происходит.

Где же тогда остается импульс вращения? Он должен, следовательно, и вытекать из мельницы. Это и не удивительно, так как между

вращающейся внутренней частью мельницы и ее неподвижной внешней частью существует сильное трение: плохо смазанный подшипник, то есть подшипник, через который импульс вращения легко стекает.

Таким образом, мы видим перед собой замкнутый поток импульса вращения. Двигатель качает импульс вращения из корпуса машины через вал в мельницу. Оттуда импульс вращения переходит в корпус кофемолки и далее течет обратно по корпусу в двигатель.

Само собой разумеется необходимо, чтобы двигатель и мельница были прочно прикреплены к корпусу.

Аналогичный процесс реализуется между турбиной и генератором на электростанции, рис. 8.23.

(Рис. 8.23. Турбина и генератор одной электростанции. Поток импульса вращения движется по замкнутому контуру. (Пар, высокая температура, высокое давление, импульс вращения, электрический ток, паровая турбина, генератор, пар, низкая температура))

На рис. 8.24а показано, как человек сверлит отверстие в доске. Импульс вращения втекает из земли через человека и через сверлильную машину к доске, а затем через тиски стекает обратно в землю.

(Рис. 8.24. (а) Кругооборот потока импульса вращения замкнут. (б) Кругооборот потока импульса вращения разомкнут.)

На рис. 8.24b показано, что происходит в том случае, когда кругооборот потока импульса разомкнут. Доска вынута из тисков. Теперь импульс вращения больше не может никуда стекать. Двигатель вращается, однако он больше ничего не закачивает. Доска, конечно, вращается, но скорость вращения не

увеличивается, то есть никакого нового импульса вращения к доске не приходит.

Задания

1. Откуда берется импульс вращения у вентилятора?
2. Некто точит карандаш. По какому пути течет импульс вращения?

8.6 Импульс вращения как носитель энергии

Понаблюдаем еще раз за кофемолкой, но под другим углом зрения. Мы составим энергетический баланс. Двигатель получает энергию, а затем передает эту энергию дальше на мельницу. Каким образом происходит перенос энергии? На вход двигателя поступает электрический ток, являющийся в этом случае переносчиком энергии.

Что происходит дальше, тебе уже должно быть известно. С выхода двигателя на вход мельницы энергия доставляется импульсом вращения. То есть на этом пути импульс вращения является носителем энергии, рис. 8.25.

Импульс вращения является носителем энергии.

Другими словами в электрическом двигателе происходит перезагрузка энергии от одного носителя энергии (электрический ток) на другой носитель энергии (импульс вращения). Импульс вращения доставляет энергию от двигателя к мельнице. В мельнице энергия отбирается от импульса вращения, а импульс вращения течет обратно через корпус в двигатель. На рис. 8.26 представлена диаграмма потока гидроэлектростанции.

(Рис. 8.25. Энергия доставляется от двигателя к мельнице импульсом вращения, являющегося носителем энергии. (энергия, электрический ток, энергия, импульс вращения))

(Рис. 8.26. Диаграмма потока гидроэлектростанции. (энергия, вода, водяная турбина, энергия, импульс вращения, генератор, энергия, электрический ток))

Наконец, мы произведем еще один баланс импульса вращения и энергии для маховика. На рис. 8.27 представлен маховик, который загружен импульсом вращения: двигатель закачивает импульс вращения из земли через вал в маховик.

Мы знаем теперь, что через вращающийся вал течет не только импульс вращения, но и энергия. Куда идет эта энергия? Так как маховик никакого выхода для энергии не имеет, эта энергия должна накапливаться в маховике. Следовательно, маховик является накопителем не только импульса вращения, но и одновременно накопителем энергии.

С помощью вращающегося маховика, а также с помощью маховика, который до этого был загружен импульсом вращения и энергией, можно осуществить привод какого-либо механизма, например, динамомшины, рис. 8.28.

(Рис. 8.27. Маховик загружен импульсом вращения и энергией. (энергия, электрический ток, электрический двигатель, энергия, импульс вращения, маховик))

(Рис. 8.28. Маховик, который приводит в действие динамомашину. (маховик, энергия, импульс вращения, динамомшина, энергия, электрический ток))

Тебе, конечно, известна игрушечная автомашина, которая приводится в движение с помощью маховика. Такую автомашину необходимо сначала быстро и с большой силой раскрутить об пол. При этом мы загружаем маховик автомашины импульсом вращения и энергией. Благодаря энергии маховика автомашина может самостоятельно без нашего участия проехать определенное расстояние.

Задания

1. Начерти диаграмму потоков водяной турбины, ветряка, водяного насоса и вентилятора.
2. Назови источники энергии, которые отдают свою энергию посредством импульсов вращения, являющихся переносчиками этой энергии. Что они напоминают?
3. Назови приемники энергии, которые получают энергию посредством импульсов вращения, являющихся переносчиками этой энергии.
4. Что напоминают устройства, которые получают от человека энергию с помощью импульса вращения, являющегося переносчиком этой энергии?