ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СИЛОВОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ РОБОТА НА ОСНОВЕ МАГНИТНОЙ СИЛЫ

RESEARCH OF POWER FEEDBACK TECHNOLOGY OF A ROBOT BASED ON MAGNETIC FORCE

Гао Тяньцы, магистрант, МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Gao Tiantsy, Master's degree student, MSTU named after M.V. N.E.Bauman, Moscow, Russian Federation

Аннотация

Взаимодействие человека и компьютера - важная область информатики, которая в основном изучает естественное и эффективное взаимодействие людей и машин. С развитием технологии виртуальной реальности у людей все больше и больше требований к подлинности виртуального опыта, и они постепенно теряют способность соответствовать единой форме видения с обратной связью. Человек начал стремиться к многомерному мультисенсорному интерактивному опыту. Обратная связь развития тактильных ощущений предназначена для улучшения восприятия виртуальной реальности. Ключом к этому является технология обратной связи по усилию, которая также стала одним из важных направлений развития технологии виртуальной реальности. В соответствии с требованиями к оборудованию с обратной связью по усилию в технологии виртуальной реальности, в этой статье предлагается новая технология бесконтактного естественного взаимодействия человека с компьютером и система с функцией обратной связи по усилию.

Основное исследование заключается в том, что, когда магнитная сила используется в качестве усилия обратной связи, электромагниты и перчатки для магнитной индукции используются как устройства для создания и измерения силы. Распределение магнитного поля электромагнита и сила магнитной индукционной перчатки анализируются и рассчитываются с помощью электромагнитной теории и метода анализа конечных элементов. Используйте алгоритм трехмерного отслеживания движения платформы, чтобы вычислить направление усилия обратной связи. Наконец, реализована бесконтактная обратная связь по усилию робота, основанном на магнитной силе.

Annotation

Human-computer interaction is an important area of computer science, which mainly studies the natural and efficient interaction of humans and machines. With the development of virtual reality technology, people have more and more requirements for the authenticity of virtual experiences, and they are gradually unable to comply with a unified form of feedback vision. They began to strive for a multidimensional multisensory interactive experience. Developing Tactile Sensations Feedback is designed to improve the perception of virtual reality. Key to this is force feedback technology, which has also become an important direction in the development of virtual reality technology. In accordance with the requirements for force feedback equipment in virtual reality technology, this article proposes a new technology for contactless natural human-computer interaction and a system with a force feedback function.

The main research is that when magnetic force is used as a feedback force, electromagnets and magnetic induction gloves are used as devices for generating and measuring force. The distribution of the magnetic field of the electromagnet and the strength of the magnetic induction glove are analyzed and calculated using electromagnetic theory and finite element analysis. Use the 3D motion tracking algorithm of the platform to calculate the direction of the feedback force. Finally, a non-contact robot force feedback based on magnetic force has been implemented.

Ключевые слова: Технология обратной связи по усилию; Естественное взаимодействие человека с компьютером; Бесконтактность; Распознавание жестов; Восприятие силы.
Keywords: Force feedback , Natural human-computer interaction; Contactlessness; Recognition of gestures; Perception of strength.

В этой статье мы хотим изучить систему бесконтактного взаимодействия человека с компьютером, которая использует бесконтактное трехмерное управление жестами в управлении роботом и может выбирать контактную силу или бесконтактную силу в силовой обратной связи. Контактная сила относится к силе, которую ощущение силы должно передавать людям через твердое тело, в то время как бесконтактная сила - это сила, которую можно почувствовать, не касаясь объекта. Бесконтактная силовая обратная связь может преодолеть традиционное силовое тактильное ощущение. Она более захватывающая и телеприсутствующая, чем контактная силовая обратная связь при идентификации и манипулировании виртуальными объектами. Исходя из этого, в данной статье также используется бесконтактная сила в качестве носителя усилия обратной связи при выборе усилия обратной связи. Методы, которые могут производить ощущение силы без контакта: тепло, ветер, аэродинамическая сила, магнетизм, гравитация и так далее. Принимая во внимание два требования: управляемость и стабильность системы, сложность и стоимость производства и другие факторы, в конечном итоге магнитная сила была выбрана в качестве носителя силы обратной связи.

Принцип системы обратной связи по электромагнитной силе. Принцип системы обратной связи по электромагнитной силе заключается в том, что проводник с током и магнитная среда в магнитном поле подвергаются воздействию электромагнитной силы, вызывая движение. Основываясь на принципе, что катушка под напряжением генерирует магнитное поле, в системе обратной связи по электромагнитной силе требуется плавный вектор

магнитного поля, чтобы воздействовать на небольшой магнит на приводном стержне для создания электромагнитной силы [1]. В блоке электромагнитного привода конструкция катушки напрямую влияет на генерацию магнитного поля в пространстве. Применяется метод обратной конструкции метода целевого поля, и контроллер широтно-импульсной модуляции (ШИМ: широтно-импульсная модуляция) Чип используется для управления током, действующим на катушку.

Система обратной связи по электромагнитной силе в основном состоит из источника питания, приводной электромагнитной катушки и рабочего стержня с небольшим магнитом, закрепленным на конце. Когда катушка находится под напряжением, приводная катушка будет генерировать определенную напряженность магнитного поля в свободном пространстве. Когда небольшой магнит на рабочем стержне входит в свободное пространство, закон Максвелла говорит нам, что небольшой магнит на рабочем стержне начинает подвергаться воздействию, приложенного к нему магнитного поля. Сила, то есть электромагнитная сила, действует на небольшой магнит на приводном стержне. Когда положение рабочего стержня зафиксировано, небольшой магнит на приводном стержне будет получать стабильную электромагнитную силу, что также называется непрерывным приложением силы. Изменение величины тока в катушке изменит распределение магнитного поля в пространстве, что, в свою очередь, изменит электромагнитную силу, действующую на небольшой магнит на управляющем стержне.

В электромагнитной катушке, когда ток постоянен, положение небольшого магнита на приводном стержне в рабочем пространстве другое, и принимаемая сила обратной связи также отличается. Поскольку магнитное поле, создаваемое катушкой возбуждения, увеличивается по мере увеличения расстояния от ее поверхности, амплитуда ослабления напряженности магнитного поля резко возрастает, и напряженность магнитного поля в разных положениях также различается. Сила, действующая на небольшой магнит рядом с катушкой, значительно больше, чем вдали от катушки. Создание модели, основанной на

принципе обратной связи по электромагнитной силе, имеет следующие преимущества: управление током в электромагнитной катушке для непосредственного управления изменением электромагнитной силы на приводном стержне; отсутствие механической связи и трения во всей системе, при этом электромагнитная сила контролируется более точно; в системе нет косвенной передачи силы, и она имеет лучшую прочность и надежность; рабочий объект имеет большое рабочее пространство.

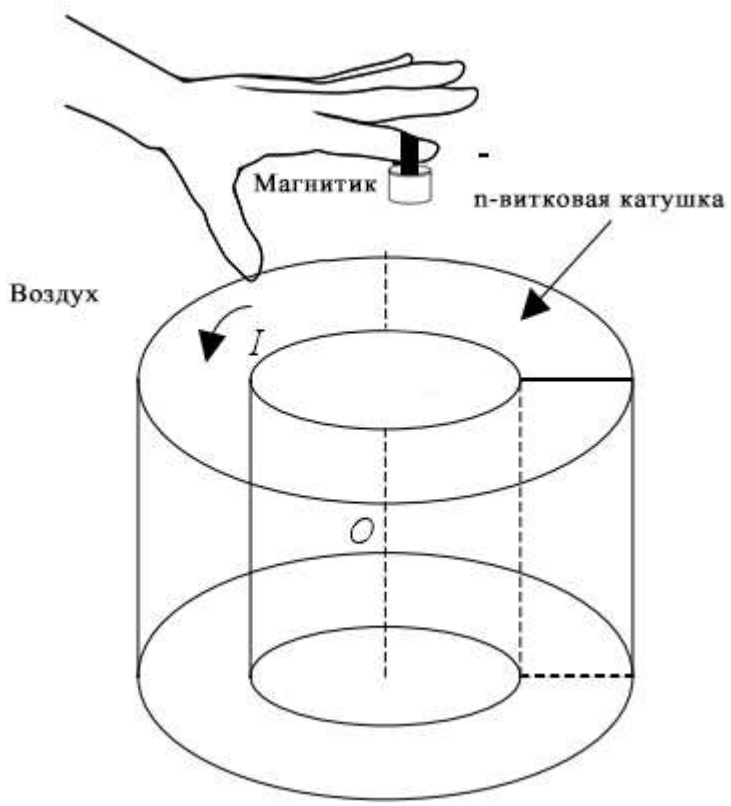

Рис. 1. Трехмерная принципиальная схема электромагнитной катушки

На рис. 1. показаны воздушное поле, катушка и небольшой магнит соответственно. В целом электромагнитная катушка представляет собой соленоид с плотной намоткой. В остальных случаях, без учета количества витков и изоляции, плотность тока на участке катушки распределяется равномерно, а полный ток, проходящий через эту часть, представляет собой однооборотный ток. ***I*** и произведение числа поворотов ***n***. При расчете ток в катушке должен максимально соответствовать току в реальной работе.

Магнитное поле, создаваемое полой цилиндрической катушкой рассчитывается аналитически. Полая цилиндрическая катушка создается путем наматывания одного витка провода рядом с ещё одним витком, поэтому каждый виток катушки имеет форму спирали, а плотность тока катушки неравномерно распределена за счет изоляционного слоя вне проводов [2]. При анализе электромагнитного поля, если учесть все вышеперечисленные факторы, расчет будет очень сложным. Таким образом, полая цилиндрическая катушка моделируется при следующих допущениях: количество витков катушки представляет собой коаксиальную тороидальную петлю, распределенную вдоль оси магнитопровода; все провода плотно заполняют все пространство, занимаемое катушкой; ток катушки равномерно распределён по поверхности раздела.

На основе сделанных выше предположений модель катушки на рис. 1 создана для моделирования распределения магнитного поля, создаваемого вокруг полой катушки после того, как на нее подано напряжение, и для расчета напряженности магнитного поля в свободном пространстве. Сначала выводится векторный потенциал кругового тока в любой точке пространства. Исходя из векторного потенциала, найдите уравнение, которому удовлетворяет магнитная линия индукции. Используем $\boldsymbol{B}=\nabla\times\boldsymbol{A}$, чтобы найти интенсивность магнитной индукции в любой точке пространства космоса.

Известно, что центр цилиндрической катушки с током - ***O***, радиус - ***R***, сила тока - ***I***, а высота цилиндрической катушки - ***H***. Как показано на рисунке 2, взята цилиндрическая система координат, центр круга ***O*** - это левая точка, а ось ***Z*** перпендикулярна плоскости, в которой расположена круглая катушка. Выражение магнитного векторного потенциала ***A***:

$$A=\frac{\mu_0 I\sqrt{Z^2+(\mathrm{R}+\rho)^2}}{2\pi\rho}\left[\frac{Z^2+R^2+\rho^2}{\sqrt{Z^2+(\mathrm{R}+\rho)^2}}K(k)-E(k)\right] \quad (1)$$

В формуле ***K (k)*** и ***E (k)*** - это первый и второй типы эллиптических интегралов соответственно, которые расширяются до:

$$K(\mathrm{k}) = \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2}\sum_{n=1}^{\infty}\left[\frac{(2n-1)!!}{(2n)!!}\right]^2 k^{2n} \tag{2}$$

$$E(\mathrm{k}) = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2}\sum_{n=1}^{\infty}\left[\frac{(2\mathrm{n}-1)!!}{(2n)!!}\right]^2 \frac{k^{2n}}{2n-1} \tag{3}$$

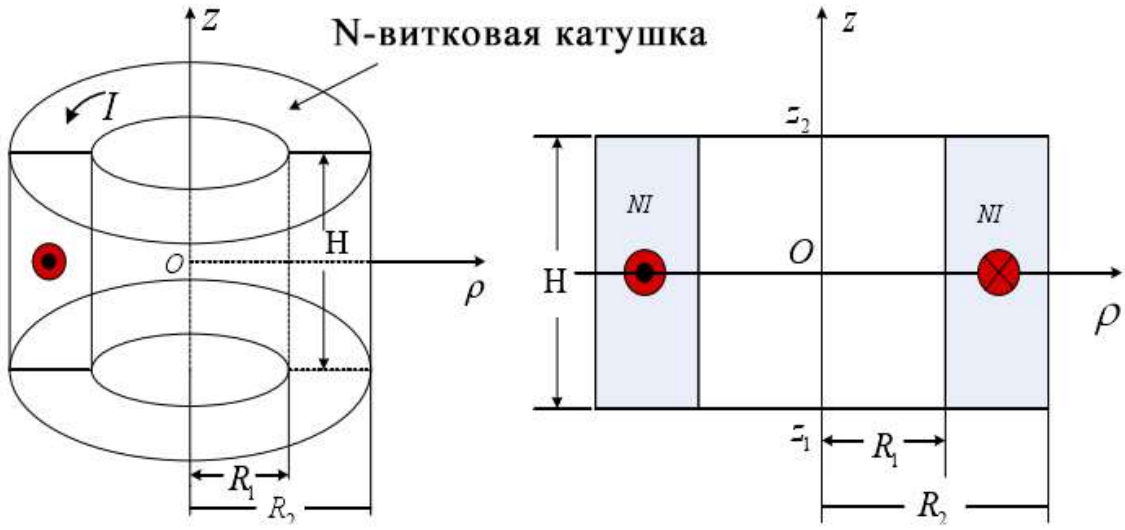

Рис. 2. Цилиндрическая модель змеевика

Внутренний и внешний радиус токоведущей катушки R_1, R_2, высоту H, очевидно, что распределение магнитного поля имеет осевую симметрию. Рассматривая N -витковую катушку с током I как комбинацию бесконечного множества тороидальных катушек, несущих ток dI ($=JdS$), интенсивность магнитной индукции B_p магнитного поля цилиндрической катушки с током в любой точке P состоит из двух компонентов - плотность:

$$J = \frac{NI}{(R_2 - R_1)H} \tag{4}$$

$\boldsymbol{P_\rho}$ и $\boldsymbol{z_p}$ - координаты точки поля в направлениях $\boldsymbol{\rho}$ и $\boldsymbol{z}$. $\boldsymbol{\rho}$ и $\boldsymbol{z}$ - координаты области источника в направлениях $\boldsymbol{\rho}$ и $\boldsymbol{z}$, как показано на рис. 2.

$$B_{P_\rho} = \int_{z1}^{=2} \int_{R1}^{R2} \frac{\mu_0 J}{2\pi} \frac{z_P - z}{\rho_P \sqrt{\left[(\rho + \rho_P)^2 + (z_P - z)^2\right]}} \left[\frac{\rho^2 + \rho_P^2 + (z_P - z)^2}{(\rho + \rho_P)^2 + (z_P - z)^2} E - K\right] d\rho dz \quad (5)$$

$$B_{P_z} = \int_{z=1}^{=2} \int_{R1}^{R2} \frac{\mu_0 J}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{\left[(\rho + \rho_P)^2 + (z_P - z)^2\right]}} \left[\frac{\rho^2 - \rho_P^2 - (z_P - z)^2}{(\rho + \rho_P)^2 + (z_P - z)^2} E + K\right] d\rho dz \quad (6)$$

Электромагнитная сила небольшого магнита в свободном пространстве. В формуле $\boldsymbol{G}$ - это плавная функция, связанная с напряженностью магнитного поля $\boldsymbol{H}$ постоянного магнита на приводном стержне, направлением магнитного поля постоянного магнита $\vec{\boldsymbol{r}}$, вектором расстояния $\vec{\boldsymbol{p}}$ между постоянным магнитом и центральной осью электромагнитной катушки [3-4] $\boldsymbol{B(I)}$ - интенсивность магнитной индукции, создаваемой электромагнитной катушкой в свободном пространстве.

Анализ моделирования. ***Ansoft Maxwell*** - это мощная, точная и простая в использовании программа для анализа методом конечных элементов электромагнитного поля. Он включает в себя модули анализа электрического поля, статического магнитного поля, поля вихревых токов, переходного поля и температурного поля, которые можно использовать для определения характеристик статических, установившихся, переходных, нормальных рабочих условий и состояний неисправности электромагнитных устройств. Его модуль анализа электромагнитного поля может использоваться для анализа распределения силовых линий магнитного поля, плотности магнитного потока

и электромагнитной силы. Эта функция может использоваться для проектирования и моделирования электромагнитной катушки.

Общие шаги по использованию программного обеспечения конечных элементов Ansoft Maxwell для решения проблем:

1. Задайте тип решения для анализа электромагнитного поля;
2. Создайте модель электромагнитного поля, включая электромагнитные катушки и небольшие магниты;
3. Распределите материалы и определите атрибуты для каждой физической области;
4. Разделите сетку и установите маленькие магниты;
5. Приложите нагрузку, приложите нагрузку к электромагнитной катушке;
6. Решающий анализ;
7. Постобработка данных анализа.

Выбор параметров модели и допущения. Размер катушки, количество витков и ток в катушке имеют большое влияние на электромагнитную силу небольшого магнита. Магнитное поле в пространстве в основном создается электромагнитной катушкой. Катушка, количество витков и ток вместе влияют на пространство. Магнитное поле - при анализе влияния этих факторов на генерацию магнитного поля, сначала определите некоторые факторы и проанализируйте связь другого фактора с генерацией магнитного поля. Вся среда моделирования разделена на две части: одна - это электромагнитная катушка, генерирующая магнитное поле, а другая - небольшой магнит небольшого размера. Согласно предыдущему теоретическому анализу создана модель системы обратной связи по электромагнитной силе. Геометрические размеры катушки следующие: осевая длина H = 60 мм, внешний радиус катушки R2 = 30 мм, внутренний радиус катушки R1 = 13 мм, количество витков N = 4000, материал - медная проволока. Размер небольшого магнита следующий: радиус r = 5 мм, вал. Высота по вертикали h = 10 мм, материал - постоянный магнит Nd Fe52.

Модель и симуляция. После выбора параметров модели создайте 3D-модель Maxwell в программе анализа конечных элементов Ansoft. В соответствии с характеристиками фактического распределения магнитного поля, область воздушного пространства разумно ограничена и составляет примерно 3-5 раз больше площади области катушки. Магнитное поле, создаваемое катушкой, в основном распределяется: Граничное условие магнитного поля охватывает эту область, так что все магнитное поле распределено в этой области. После моделирования и анализа модели электромагнитной катушки с помощью программного обеспечения конечных элементов результаты моделирования показаны на рис.3. Стрелки показывают направление силовых линий магнитного поля, которые распределены градиентом вокруг модели, а напряженность магнитного поля обозначена цветом..

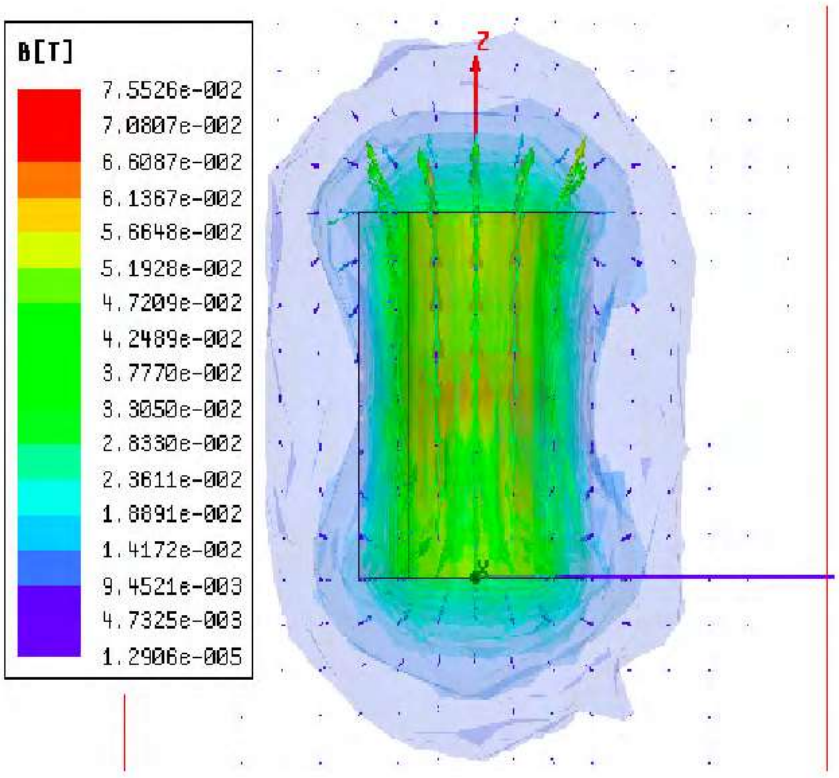

Рис. 3. Результаты моделирования Ansoft

Конструкция блока управления. Блок управления используется для управления нормальной работой электромагнитной катушки и в основном состоит из модуля управления, модуля управления затвором, модуля ***H***-моста, модуля обнаружения тока и измерения напряженности магнитного поля. В модуле управления используется микроконтроллер ***ARM Cortex SAM3U4E*** [5]. Принцип работы системы находится под управлением встроенной системы с ***SAM3U4E*** в качестве ядра, он выводит ШИМ-сигнал для управления модулем управления затвором ***IR2106***, а ***IR2106*** преобразует входной сигнал. Уровень 3,3 В Это выход с уровнем 15 В, который управляет концом ***GS*** (затвор-исток) модуля H-Bridge, чтобы заставить его работать во включенном и выключенном состоянии. Наконец, мост ***H*** управляет включением и отключением катушки. Изменение рабочего цикла сигнала ШИМ изменяет эффективное значение тока. Если коэффициент заполнения сигнала ШИМ увеличивается, значение эффективного тока увеличивается, поэтому сила между катушкой и постоянным магнитом увеличивается. Напротив, уменьшите силу [6-7].

Модуль обнаружения тока состоит из резистора выборки ***R050*** и микросхемы определения тока ***IR2175***. Резистор выборки ***R050*** соединен последовательно с катушкой. Ток выборки преобразуется в сигнал частоты 130 кГц микросхемой выборки тока ***IR2175***. ***SAM3U4E*** обнаруживает скважность этого сигнала и может вычислить его текущее значение. Модуль измерения напряженности магнитного поля состоит из линейного датчика Холла ***UGN3503*** и схемы преобразования уровня. Линейный датчик Холла ***UGN3503*** преобразует напряженность магнитного поля в сигнал напряжения, а схема преобразования уровня преобразует выходное напряжение 0 ~ 5 В ***UGN3503.*** в 0 ~ 3,3 В**.** Измерение ***AD*** выполняется ***SAM3U4E***. Результирующий ток действует на электромагнитную катушку, так что небольшой магнит на приводном стержне взаимодействует с магнитным полем, создаваемым электромагнитной катушкой. Блок-схема аппаратной схемы представлена на рисунке 4.



Рис. 4. Блок-схема аппаратной части блока управления

Анализ результатов. Используйте программное обеспечение для анализа конечных элементов Ansoft Maxwell 3D для выполнения расчетов и анализа модели методом конечных элементов, чтобы получить электромагнитную силу небольшого магнита в электромагнитном поле.

Связь между электромагнитной силой и положением. Используйте трехмерное координатное позиционирование в пространстве, чтобы определить положение небольшого магнита. Начиная с положения над поверхностью катушки, измерьте электромагнитную силу, воспринимаемую небольшим магнитом, с шагом 5 мм и сравните результаты с результатами моделирования. , как показано в таблице 1. На рис.5. показана взаимосвязь между электромагнитной силой системы управления и положением небольшого магнита при токе 2,1 А. Две кривые на рисунке представляют собой данные об электромагнитной силе, полученные двумя разными способами: соответственно, представляют значение моделирования Ansoft и фактическое значение экспериментального измерения. Общая тенденция двух кривых была одинаковой. Поскольку моделирование рассматривает идеальную замкнутую среду без утечки магнитного потока, но она не может быть полностью закрыта во время фактического измерения, измеренное значение будет немного меньше, чем моделируемое значение. Максимальная относительная ошибка между экспериментальным значением и смоделированным значением составляет 6,31%, а минимальная - всего 0,28%.

Таблица 1 График результатов моделирования и экспериментальных результатов электромагнитной силы и положения

Depth /mm	Результаты симуляции magF/N	Результаты экспериментов magF /N	Абсолютная ошибка /N	Относительная ошибка /%)
62	0.922603	0.92	0.002603	0.28
67	0.640703	0.63	0.010703	1.67
72	0.407424	0.39	0.017424	4.28
77	0.245493	0.23	0.015493	6.31
82	0.160006	0.15	0.010006	6.25
87	0.114092	0.12	-0.00591	5.18
92	0.080713	0.08	0.000713	0.88
97	0.057161	0.06	-0.00284	4.97
102	0.042459	0.04	0.002459	5.79
107	0.040822	0.04	0.000822	2.01

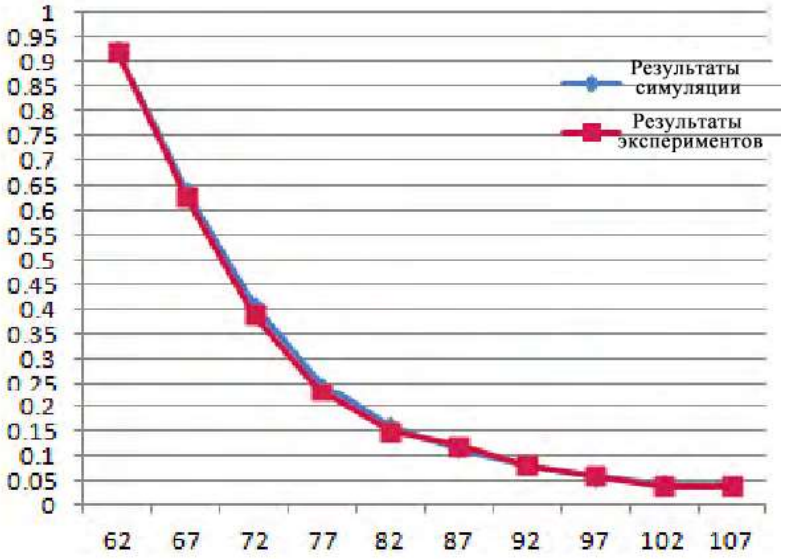

Рис. 4. График результатов моделирования и экспериментальных результатов электромагнитной силы и положения

Связь между электромагнитной силой и током в катушке. Экспериментальные результаты этой группы включают соотношение между электромагнитной силой небольшого магнита и током катушки на 62 мм и 72 мм на центральной оси поверхности электромагнитной катушки моделирования и экспериментальных малых магнитов, и записывают результаты в таблицу.

Количество витков катушки в таблице $\boldsymbol{N}$ = 1041, шаг однооборотной катушки - 0,2А.

Маленький магнит находится в позиции 62 мм, и результаты моделирования и экспериментов электромагнитной силы и тока в катушке показаны в таблице 2.

На рисунке 7 показано, что маленький магнит расположен на высоте 62 мм, которая является центром поверхности электромагнитной катушки. Связь между электромагнитной силой, воспринимаемой маленьким магнитом, и током в катушке. Две кривые на рисунке представляют собой данные об электромагнитной силе, полученные двумя разными способами: они представляют результаты моделирования Ansoft и экспериментальные результаты соответственно. Общая тенденция двух кривых одинакова. Когда ток равен 0, хотя в катушке нет тока, он будет индуцироваться небольшим магнитом для создания индуцированного тока. Согласно закону Ленца, катушка будет производить воздействие электромагнитных сил на маленький магнит, поэтому если ток At в моделировании равен 0, маленький магнит все равно будет получать определенное количество электромагнитной силы. Маленький магнит находится в позиции 72 мм, а результаты моделирования и экспериментальных результатов электромагнитной силы и тока в катушке показаны в таблице 3.

На рисунке 8 показано соотношение между электромагнитной силой системы управления и током в катушке, когда маленький магнит расположен на расстоянии 72 мм.

Таблица 2 График результатов моделирования и экспериментальных результатов электромагнитной силы и тока

Current /A	Результаты симуляции magF/N	Результаты экспериментов magF /N	Абсолютная ошибка /N	Относительная ошибка /%)
0	0.000519	0	-	-
208.2	0.065641	0.08	-0.004359	6.64
416.4	0.144957	0.14	0.00496	3.42
624.6	0.225217	0.23	0.01522	6.76
832.8	0.308221	0.31	0.00822	2.67
1041	0.385606	0.40	0.00561	1.46
1249.2	0.508250	0.51	0.01825	3.60
1457.4	0.586878	0.60	-0.013122	2.24
1665.6	0.684263	0.69	-0.005737	0.84
1873.8	0.759890	0.77	-0.01011	1.33
2082	0.860302	0.85	0.0103	1.20

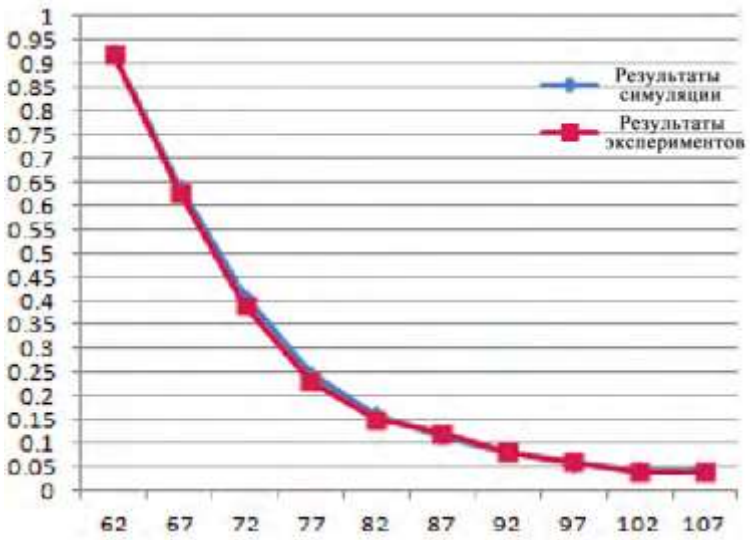

Рис. 5. График результатов моделирования и экспериментальных результатов электромагнитной силы и положения

Из результатов анализа видно, что электромагнитная сила, воспринимаемая маленьким магнитом в свободном пространстве, линейна с током в электромагнитной катушке. И когда электромагнитная катушка взаимодействует с маленьким магнитом, когда ток стабилен, маленький магнит находится в стабильном положении, и электромагнитная катушка будет обеспечивать небольшой магнит непрерывно контролируемой электромагнитной силой. Чтобы получить величину и направление требуемой

электромагнитной силы, распределение и намотка электромагнитных катушек могут зависеть от конкретной системы применения.

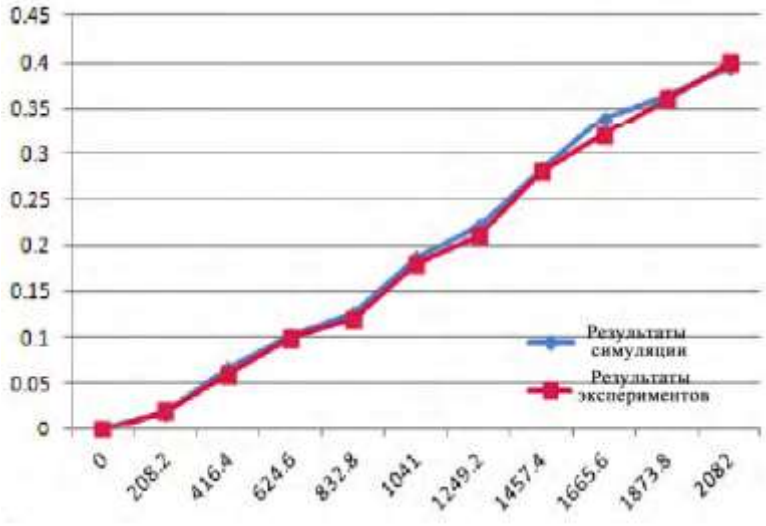

Рис.6. График результатов моделирования и экспериментальных результатов электромагнитной силы и тока

Вывод. В данной статье используется метод численного расчета электромагнитного поля, устанавливается модель тактильной обратной связи электромагнитной силы и используется программа моделирования конечных элементов Ansoft для моделирования и анализа параметров системы обратной связи по электромагнитной силе. Делается вывод, что при фиксированных параметрах конструкции небольшой магнит будет подвергаться воздействию электромагнитной силы в магнитном поле. Зависимость между силой и его положением, а также соотношение между электромагнитной силой, воспринимаемой маленьким магнитом, и током в катушке. Благодаря анализу и реализации схемы, контроллер PWM в ARM Cortex MCU используется для управления током, воздействующим на катушку, и, соответственно, измеряется соотношение между электромагнитной силой и положением, а также соотношение между электромагнитной силой и током. Сравните результаты эксперимента с результатами моделирования, чтобы убедиться в его правильности. Результаты экспериментов показывают, что в пределах допустимого диапазона ошибок виртуальной хирургии эксперимент может

очень хорошо проверить правильность результатов моделирования и доказать, что метод контроля магнитной левитации возможен. Этот метод может быть применен к любому случаю, когда катушки возбуждения можно комбинировать вместе. И конструкция этого метода также может быть расширена до влияния магнитного поля, создаваемого множеством электромагнитных катушек в свободном пространстве на небольшом магните, чтобы имитировать динамический процесс виртуального хирургического инструмента, воспринимающего силу обратной связи виртуальной ткани в виртуальной хирургии.

Литература

1. Лю Гоцян. Ансофт, Инженерный анализ методом конечных элементов электромагнитного поля [M]. Пекин: Издательство электронной промышленности, 2005.
2. Ван Чжисюань, Ван Минь, Гао Шисянг. Распределение и моделирование значений пространственной напряженности магнитного поля вблизи находящихся под напряжением круглых катушек [Дж.]. Компьютерная инженерия и дизайн, 2007, 2 (28): 706-709.
3. Hu J. Magnetic haptic feedback systems and methods for virtual reality environments: U.S. Patent Application 11/141,828 [P]. 2005-6-1.
4. Hu J, Chang C, Tardella N, et al. Effectiveness of haptic feedback in open surgery simulation and training systems[J]. Studies in Health Technology and Informatics (S0926-9630), 2005, 119: 213.
5. Ли Нин. Разработка и применение процессора SAM3 на основе MDK [M]. Пекин: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2010.
6. Шидаошэн. Конструкция схемы управления маленьким серводвигателем переменного тока [M]. Пекин: Science Press, 2013.
7. Цуй Ли, Е Сяньмин. Разработка интеллектуальной системы управления бесщеточным двигателем постоянного тока на основе однокристального компьютера AVR [J.]. Приборная технология и датчик, 2009, 11: 34-36.

Literature

1. Liu Guoqiang Ansoft, Engineering analysis by the method of finite elements of the electromagnetic field [M]. Beijing: Electronics Industry Publishing House, 2005.
2. Wang Zhixuan, Wang Min, Gao Shixiang. Distribution and modeling of the spatial magnetic field strength values in the vicinity of energized circular coils [J.]. Computer Engineering and Design, 2007, 2 (28): 706-709.
3. Hu J. Magnetic haptic feedback systems and methods for virtualreality environments: U.S. Patent Application 11 / 141.828 [P]. 2005-6-1.
4. Hu J, Chang C, Tardella N, et al. Effectiveness of haptic feedback in open surgery simulation and training systems [J]. Studies in Health Technology and Informatics (S0926-9630), 2005, 119: 213.
5. Lee Ning Development and application of SAM3 processor based on MDK [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2010.
6. Shidaoshen. Small AC servo motor control circuit design [M]. Beijing: Science Press, 2013.
7. Cui Li, Ye Xianming Development of an intelligent control system for a brushless DC motor based on a single-chip computer AVR [J.]. Instrument Technology and Gauge, 2009, 11: 34-36.