УДК 621.798.3

Расчетно-оптимизационная подсистема проектирования манипулятора с пространственно-планетарной роликовой головкой

Лазуткина Н.А.

Современные машины представляют собой сложные машинные агрегаты, оптимальное проектирование которых возможно лишь путем создания автоматизированных систем принятия решений, основанных на методах исследования пространства параметров и критериев качества и предполагающих взаимодействие конструкторов, экспертов и лиц, принимающих окончательное решение. Создание и внедрение методов оптимизации параметров и многовариантного проектирования решает научно-техническую проблему коренного повышения технического уровня манипулятора. Разработанная расчетно-оптимизационная подсистема проектирования осуществляется последовательно в два этапа: 1 – параметрическая оптимизация конструктивных, кинематических, энергетических и режимных параметров, обеспечивающих наиболее высокую производительность исполнительного органа манипулятора при минимальных энергозатратах; 2 – оптимизация параметров динамической модели приводов исполнительного органа, обеспечивающих повышение надежности и долговечности и улучшения технико-экономических показателей эксплуатации. Эта подсистема проектирования предполагает принципиальное изменение существующей технологии проектирования, переход к новой технологии проектирования, осуществляемой методами многокритериальной оптимизации совокупности параметров объекта и многовариантного решения задачи конструирования.

Ключевые слова: расчётно-оптимизационная подсистема, проектирование, повышение технического уровня, конструирование манипулятора.

Calculation and optimization design subsystem of the manipulator with the spatial-planetary roller head

Lazutkina N.A.

Modern machines are complex machine units. Their optimal design is possible only through the creation of automated decision-making systems. Creation and implementation of methods for optimizing the parameters of a multivariate design and solve scientific and technical problems of indigenous improve the technical level of the manipulator. The developed calculation and optimization design subsystem is performed in series of two stages: 1 - parametric optimization of structural, kinematic, energy and operating parameters that provide the highest performance of the operating agent of the manipulator with minimum energy consumption; 2 - optimization of parameters of the dynamic model of the actuator of the operating agent, providing increased reliability and durability as well as improving technical and economic performance. This design subsystem involves a fundamental change in the existing design technology as well as the transition to a new technology design performed by methods of multi-criteria optimization of a set of object parameters and multiple solutions to design tasks

Keywords: calculation and optimization design subsystem, designing, raising the technical level, the manipulator design.

Введение

Основные технические решения при разработке конструкции машин принимаются главным образом на эвристическом уровне с учетом опыта создания и внедрения подобных машин в производство. Сам процесс конструирования можно разделить на два этапа: 1 – декомпозиция конструкции на отдельные узлы и механизмы, которые разрабатываются ведущими и старшими конструкторами; 2 – агрегирование (синтез) конструкции машины в целом, которое осуществляется главным конструктором проекта. Однако по мере усложнения требований к конструкции машины появляется необходимость использования знаний и сведений смежных отраслей наук и учета множества факторов, порой противоречащих друг другу, что не всегда под силу конструктору. В результате такой практики конструирования на опытные испытания поступают машины, основные конструктивные решения которых являются недостаточно обоснованными, поэтому конструкцию машины приходится дорабатывать и производить иногда серьезную корректировку проекта машины. Преодоление указанных трудностей возможно на путях создания и внедрения в практику конструирования системы автоматизированного проектирования, т.е. путем существенного изменения технологии создания новой техники.

Цель исследования – создание расчетно-оптимизационной подсистемы проектирования манипулятора с пространственно-планетарной роликовой головкой.

Повышение технического уровня основных видов оборудования

Повышение технического уровня основных видов оборудования (как и всех рабочих машин) должно решаться на стадии проектирования, когда возможно учесть большое число противоречивых требований, что приводит по существу к оптимальному проектированию. Современные машины представляют собой сложные машинные агрегаты, оптимальное проектирование которых возможно лишь путем создания автоматизированных систем принятия решений, основанных на методах исследования пространства параметров и критериев качества и предполагающих взаимодействие конструкторов, экспертов и лиц, принимающих окончательное решение. Создание и внедрение методов оптимизации параметров и многовариантного проектирования решает научно-техническую проблему коренного повышения технического уровня манипулятора.

В ходе решения поставленных оптимизационных задач разработаны следующие методы многокритериальной оптимизации основных параметров манипулятора и его привода:

- метод выбора оптимального диаметра (высоты) исполнительного органа манипулятора по обобщающему экономическому критерию;
- метод многокритериальной оптимизации параметров исполнительного органа по четырем критериям качества, определяющих конструкцию и кинематику манипулятора с пространственно – планетарной роликовой головкой;
- метод оптимизации структуры планетарных редукторов и привода исполнительного органа по двум критериям качества;
- метод упрощения (эквивалентирования) математической модели привода;
- метод определения собственных частот привода исполнительного органа;
- метод многокритериальной оптимизации динамических параметров привода исполнительного органа по трем критериям качества.

Рассмотрим, как конкретно решены поставленные задачи исследований.

Выбор оптимального значения диаметра (высоты) исполнительного органа манипулятора производится путем минимизации издержек производства с учетом экономических требований. Для выбора оптимального диаметра исполнительного органа принят численный метод решения, основанный на информационно-статистической теории минимизации многоэкстремальных функций.

Выбор оптимальной совокупности параметров манипулятора производится путем решения многокритериальной задачи, обеспечивающей достижение наиболее высокой заданной производительности при минимальных энергозатратах.

Методика поиска оптимальной совокупности параметров имеет простой алгоритм, позволяющий конструктору правильно поставить математическую задачу и в дальнейшем неоднократно осуществлять анализ полученных результатов. Такой диалоговый алгоритм состоит из четырех этапов: 1 – составление таблиц испытаний (выполняется с помощью разработанной программы); 2 – выбор критериальных ограничений (производится конструктором при рассмотрении таблиц испытаний); 3 – проверка не пустоты множества допустимых точек в пространстве независимых параметров (выполняется с помощью разработанной программы); 4 – выбор конструктором оптимальных параметров при рассмотрении множества выданных прграммой эффективных значений параметров по всем критериям качества.

Оптимизация структуры планетарного редуктора и привода исполнительного органа манипулятора

Оптимизация структуры планетарного редуктора и привода исполнительного органа предполагает, прежде всего, определение общего передаточного отношения и числа ступеней механической передачи, в т.ч. передаточных отношений планетарных передач, которые могут быть осуществлены двумя последовательно соединенными планетарными механизмами типа 2К-Н. Поскольку планетарный механизм состоит из четырех звеньев (входного, выходного, вспомогательного, неподвижного), то для двух планетарных механизмов, пользуясь методами комбинаторики, можно построить набор структур редукторов, количество которых равно 27. Для оптимизации планетарных редукторов производится, прежде всего, отбор редукторов, удовлетворяющих допустимым передаточным отношениям в каждой ступени. Вводим вспомогательное число i_m и в зависимости от того, какое из звеньев является водилом, имеем три типа расчетных формул для определения значений вспомогательных чисел. Устанавливаем ограничения передаточным отношениям в каждой ступени $i^{(m)}$, $m = 1{,}2$ и вспомогательным числом i_m:

Расчетная формула	$i_m, m.1{,}2$
I $i_m = i^{(m)}$	$[-a;-b];[-1/b;-1/a]$
II $i_m = 1 - i^{(m)}$	$[1+b;1+a];[1+1/a;1+1/b]$
III $i_m = 1_{1-i^{(m)}}$	$[1/1+b;1+1/a]$; $\left[-1/1+\dfrac{1}{b};-1/1+\dfrac{1}{a}\right]$

$$-a \le i^{(m)} - \frac{1}{b} \le i^{(m)} \le -\frac{1}{a}; a > 1; b > 1;$$

По этим данным строим план передаточных отношений, из которого определяем передаточные отношения в каждой ступени редуктора. Оказалось, что для заданных ограничений $a = 8, b = 2$ и $i = \pm(20 - 40)$ пригодными являются II схем редукторов из общего количества 27.

Далее производится отбор структурных схем редукторов из условия размещения в пространстве, для чего был использован известный метод комбинаторных схем. Этот метод позволяет полностью формализовать задачу и, следовательно, решить ее на ЭВМ. Была разработана программа отбора кинематических схем. Кроме того, разработана программа к.п.д. планетарных редукторов.

После завершения всех формализуемых процедур каждая кинематическая схема редуктора подвергается экспертной оценке: вычисляются суммы ранга по каждому критерию и суммы рангов по каждой схеме редуктора. После окончательного выбора планетарного редуктора разработана кинематическая схема привода манипулятора.

Выбор оптимальной совокупности динамических параметров привода исполнительного органа производится путем многокритериальной задачи, обеспечивающей повышение надежности и долговечности и улучшения эксплуатационных показателей. Выбор параметров привода обеспечивается оптимизацией параметров динамической и математической модели привода исполнительного органа, что в свою очередь требует решения ряда оптимизационных задач. К ним относятся: построение эквивалентной реальному объекту динамической модели привода и ее упрощение (эквиваентирование); вывод собственных частот привода за рабочий интервал возмущений нагрузок и, следовательно, необходимо умение определять собственные частоты; разнесение собственных частот и регулярных кинематических и зубцовых частот привода и, следовательно, необходимо умение управлять собственными частотами; снижение дисперсии нагрузок за счет целенаправленного выбора параметров динамической модели и, следовательно, необходимо умение изменять динамические свойства математической модели привода.

Построение и упрощение динамической модели привода

Построение динамической модели привода осуществляется по кинематической схеме и рабочим чертежам после схематизации привода, которая приводит к динамическим моделям повышенной сложности, математическое описание которых производится с помощью системы дифференциальных уравнений с высоким суммарным порядком. Интегрирование таких систем является трудной задачей даже при использовании современных вычислительных средств, поэтому без надлежащих упрощений исходной математической модели невозможно проводить ее исследование.

В инженерной практике упрощение моделей осуществляется на эвристическом уровне на стадии составления диаммческой модели, и поэтому задача упрощения оказывается многозначной, поскольку это зависит от субъективных факторов, квалификации составителя. Разработан метод упрощения математической модели привода, использующий метод малого параметра при старших производных, предложенный акад. А.Н. Тихоновым. Этот метод позволяет математически строго по исходной модели построить упрощенную модель, адекватную реальной схеме в диапазоне рабочих частот. Суть разработанного метода упрощения состоит в следующем.

Математическую модель привода можно представить в общем виде системой дифференциальных уравнений:

$$J_1\varphi_1^{/} = f_1\left(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_1^{/}, \varphi_2^{/}\right)$$

$$\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots$$

$$J_x\varphi_x^{//} = f_\kappa\left(t, \varphi_{\kappa-1}, \varphi_\kappa, \varphi_{\kappa+1}, \varphi_{\kappa-1}^{/}, \varphi_\kappa^{/}, \varphi_{\kappa+1}^{/}, M_c\right)$$

$$\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots$$

$$J_n\varphi_n^{//} = f_n\left(t, \varphi_{n-1,}\varphi_{n,}\varphi_{n+1,}\varphi_{n-1}^{/}, \varphi_n^{/}, \varphi_{n+1}^{/}, M_c\right)$$

где J_κ – постоянные параметры, φ_κ – переменные параметры, t - время $\left(\varphi_\kappa = \varphi_\kappa(t)\right), M_c$ – внешнее сопротивление. Введя в системе фазовые координаты $\varphi_\kappa^{/} = \psi_{\kappa,} \kappa = \overline{2, n}$, переводим ее в систему дифференциальных уравнений первого порядка. Постоянные $J_\kappa\left(\kappa = \overline{2, n}\right)$, а также модули коэффициентов правых частей являются величинами разного порядка. Пусть некоторые из них имеют одинаковый порядок и являются малыми по сравнению с остальными. Этот множитель обозначим μ, которого будем называть малым параметром, запишем:

$J_{pj} = \mu N_{pj}, P_j = 1, \ell;$ остальные $J_{qi}, q_i = 1, m$.

Сгруппируем уравнения с этими множителями и разделим обе части уравнений, имеющих перед производными множителями N_{pi} и J_{qi}, на эти множители. Введя соответствующие обозначения, эту систему уравнений можно записать в виде:

$$\left.\begin{aligned} \overset{/}{X} &= f_1\left(t, x, y, M_c\right) \\ \mu \overset{/}{y} &= F_1\left(t, x, y, M_c\right) \end{aligned}\right]$$

с начальными условиями $x(0,\mu)=x^0, y(0,\mu)=y^0$, т.е. система уравнений является сингулярно-возмущенной, поскольку $\mu \neq 0$, где $0 \prec \mu \le \mu^*; \mu^*$ называется первым бифурка ционным значением μ.

Сингулярная система при $\mu = 0$ и известном значении M_c (в частности может быть $M_c = 0$) превращается в другую систему

$$\left.\begin{aligned} \overset{/}{\mathrm{X}} &= f(t,x,ó) \\ F(t,x,ó) &= 0 \end{aligned}\right\}$$

которую обычно называют порождающей или вырожденной системой. Решив систему алгебраических уравнений $F(t,x,y)=0$, находим значения x и y и, подставив их в первое уравнение $\overset{/}{x} = f(t,x,y)$, находим вырожденную систему уравнений. Решение этой вырожденной системы будет давать правильные результаты при условии, если $\mu \le \mu^*$.

Определение собственных частот привода. Исходная система уравнений привода манипулятора приводится к однородной системе путем замены $\overset{/}{\varphi}_1 = \psi_1; \varphi_\kappa = \psi_\kappa \left(\kappa = \overline{2,n}\right)$. Эта система уравнений матрично-векторной форме имеет вид: $\overset{/}{\psi} = A\psi$, где A – матрица коэффициентов системы, ψ – вектор фазовых координат. Путем подстановки $\psi = \kappa e^{\lambda t}$ получаем уравнение:

$$(A - \lambda E)\kappa = 0$$

где E – единичная матрица. Определитель матрицы уравнения равен:

$$\det(A-\lambda E) = (-1)^m\left(\lambda^m + C_1\lambda^{m-1} + \ldots + C_m\right) =$$
$$= (-1)^m(\lambda-\lambda_1)^{m1}(\lambda-\lambda_2)^{m2}\ldots(\lambda-\lambda_m)m = 0;$$
$$\sum_{i=1}^{m} m_1 = m,$$

и он представляет характеристическое уравнение, корни которого являются собственными значениями матрицы A. Таким образом, задача определения собственных частот привода сводится к задаче определения собственных значений матрицы коэффициентов однородной системы дифференциальных уравнений привода.

Вычисление собственных значений матрицы является одной из сложных задач линейной алгебры. Вследствие плохой обусловленности матриц коэффициентов уравнений, невозможно непосредственно применить методы линейной алгебры и поэтому в работе был использован прием, приводящий к улучшению итерационного процесса отыскания собственных значений. Суть этого приема заключается в предварительном приведении матрицы коэффициентов к квазиверхнетреугольной матрице (форме Хессенберга), т.е. к такой матрице, все элементы которой, начиная со второй, ниже главной, диагонали равны нулю. Такое приведение основывается на известной теореме: для произвольной матрицы A существует такая матрица H, что $HAH^T = B$ является квазитреугольной матрицей. Производится построение последовательности матриц A, каждая из которых получается из предыдущей с помощью матрицы вращения T_{ij}, т.е. такой ортогональной матрицы, у которой на пересечении строк и столбцов с номерами i и j стоит подматрица вида

$\begin{bmatrix} C & -S \\ S & C \end{bmatrix}$. Тогда получаем $A = T_{ij} A T_{ij}^T$.

Для отыскания собственных значений матриц, приведенных к форме Хессенберга, используется QR - алгоритм, т.е. такой итерационный метод, в котором строится последовательность ортогонально-подобных матриц $A_K, \kappa = 1,2.....$ Алгоритм устроен следующим образом. Вначале вычисляются ортогональные матрицы Q_κ и верхнетреугольные матрицы R_κ, затем производится построение последовательности матриц $A_\kappa = Q_\kappa R_\kappa$ (т.е. разложение матрицы $A_{к-1}$) и эти матрицы перемножаются в обратном порядке $A_к = R_к Q_к$. При этом матрица $A_{к-1}$ ортогонально подобна матрице $A_к$. При достаточно большом числе итерации «К» матрица становится близка к верхнетреугольной матрице с двумя квадратными диагональными клетками r-го и $(n-r)$ порядков, т.е. к матрице вида $\begin{bmatrix} \alpha_{r,\tau}\alpha_{r,n-r} \\ 0\alpha_{n-r,n-\tau} \end{bmatrix}$

где $\alpha_{r,\tau}$ и $\alpha_{n-r,n-\tau}$ – квадратные матрицы порядков r и $n-r$, собственные числа которых есть собственные значения матрицы А. В разработанной нами программе определение собственных значений матриц ведется с простой и двойной точностью, когда точности отличаются между собой на один порядок.

Рассмотренный итерационный процесс отыскания собственных значений матрицы обладает плохой сходимостью, особенно при наличии близких по модулю собственных значений. Поэтому в целях ускорения итерационного процесса используется прием, основанный на использовании дополнительных сдвигов матриц $Q_к$ и $R_к$. Применение на практике этого метода сдвига показало, что среднее число итерации на каждое собственное значение, как правило, не превышает пяти, и этот процесс является устойчивым.

Оптимизация параметров динамической модели манипулятора. Исходная система дифференциальных уравнений привода представлена в векторной форме уравнениями с начальными условиями. Для ее решения, наряду с упрощением математической модели и определением собственных частот привода, необходимо выбрать критерии оптимизации. Для решения поставленной оптимизационной задачи разработаны три критерия качества: динамический, весовой и спектральный. Собственные частоты динамической системы выбраны в качестве спектрального критерия, переведенного применительно к данной задаче в разряд ограничений, т.е. корни характеристического уравнения

$$\det\left[\begin{pmatrix} \overline{OE} \\ AB \end{pmatrix} - \mu M\right] = 0$$

должны иметь мнимые части, не принадлежащие заданному интервалу $\mu_i \,\overline{\varepsilon}\left[\underline{\mu}, \overline{\mu}\right]$.

Значения динамического и спектрального критериев зависят от возмущающего воздействия M_c. Для исследования и определенности принимаем возмущающую силу, имеющую вид δ - функции Дирака, причем при численном анализе она представляется в виде прямоугольного импульса с основанием, равным шагу дискретизации, и площадью, равной единице. В пользу выбора δ - функции как входного воздействия при исследовании математической модели выступают результаты анализа осциллографических записей, а также графиков спектральной плотности нагрузок.

Для численного решения поставленной многокритериальной задачи оптимизации используется метод приближенного построения множества Парето на основе направленного перебора параметров с привлечением равномерно распределенных $\Lambda\Pi_\tau$ - последовательностей. Алгоритм решения задачи состоит из следующих этапов: I – производится построение псевдослучайного вектора и вычисление рабочей реализации в пространстве управляющих параметров; 2 – вычисление для выбранных рабочих реализаций собственных значений матрицы коэффициентов и проверка выполнения ограничения по частотам привода; 3 – расчет динамической характеристики привода с правой частью в виде δ - функции и нахождение численного значения критерия динамичности; 4 – вычисление значения другого критерия – массы элементов привода; 5 – логическая проверка полученных значений критериев принадлежности множеству Парето, причем эф-фективное в смысле Парето множество совокупности параметров привода представляет собой суженное множество альтернатив; 6 – просмотр данных конструктором и окончательный выбор совокупности параметров по неформализуемым факторам.

Заключение

Таким образом, разработанная расчетно-оптимизационная подсистема проектирования осуществляется последовательно в два этапа: 1 – параметрическая оптимизация конструктивных, кинематических, энергетических и режимных параметров, обеспечивающих наиболее высокую производительность исполнительного органа манипулятора при минимальных энергозатратах; 2 – оптимизация параметров динамической модели приводов исполнительного органа, обеспечивающих повышение надежности и долговечности и улучшения технико-экономических показателей эксплуатации. Эта подсистема проектирования предполагает принципиальное изменение существующей технологии проектирования, переход к новой технологии проектирования, осуществляемой методами многокритериальной оптимизации совокупности параметров объекта и многовариантного решения задачи конструирования. Данная расчетно - оптимизационная подсистема проектирования представляет собой новый метод научных исследований и конструирования.

Литература

1. *Лазуткина Н.А.* Управление переносным движением манипулятора с пространственно планетарной роликовой головкой для изготовления упаковки с различным профилем поперечного сечения // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. URL: www.science-education.ru/119-15247 [дата обращения: 01.12.2014].

References

1. *Lazutkina N. A.* Upravlenie perenosnym dvizheniem manipuljatora s prostranstvenno planetarnoj rolikovoj golovkoj dlja izgotovlenija upakovki s razlichnym profilem poperechnogo sechenija [The portable motion control of the manipulator with the spatial planetary roller head for the manufacture of packages with different cross-sectional profile] // Modern problems of science and education. 2014. № 5. URL: www.science-education.ru/119-15247

Статья поступила в редакцию 21 ноября 2014 г.

Лазуткина Наталья Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техносферная безопасность» Муромского института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Муром, Россия. E-mail: lazutkina1963@mail.ru

Lazutkina Natalia Aleksandrovna – Ph.D., Murom Institute of Vladimir State University, Murom, Russia. E-mail: lazutkina1963@mail.ru