

УДК 658.52.011.56:629.7.002.2

СПОСОБЫ РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ ТОПОЛОГИИ И МАРШРУТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ В АГРЕГАТНО-СБОРОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

© 2012 Ф. В. Гречников, С. Ф. Тлустенко

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Исследованы теоретико-множественные и логические уровни моделирования механических связей между собираемыми элементами конструкции летательного аппарата согласно схеме пространственной взаимосвязи сборочных единиц конструкции изделия при заданных начальных и граничных условиях. Описание характера и траектории движения элемента изделия при сборке представляется на количественном уровне матрицами состояний согласно общему графу сборки изделия. Траектории перемещений описываются методами аналитической геометрии и матриц перемещений, а также операторами, описывающими движение как векторную величину.

Оператор, преобразование, логический уровень, контур, структура, взаимодействие, базы.

Создание единой системы автоматизированного проектирования технологической подготовки производства предлагается рассматривать как интегрированную структуру, состоящую из системы автоматизированного конструирования (САПР-КАСК), автоматизированной системы технологической подготовки производства (АСТПП), системы автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР-ТП), технологичности конструкции (САПР-ТК), технологического оборудования и оснастки (САПР-ТО), размерно-геометрической увязки (САПР-Пл) и программирования для оборудования с ЧПУ (САПР-Пр) и других подсистем, соответствующих специфике создания изделия и технологической подготовки его производства. Это позволяет выделить в каждом конкретном случае доминирующие критерии, определяющие качество и технико-экономическую эффективность производства (летательного аппарата) на базе единой информационной модели изделия, и правильно провести распараллеливание проектных работ между участниками интегрированной системы его создания и запуска в производство.

В настоящее время работы по обеспечению технологичности и расчёту точности сборочных цепей выполняются на этапах конструкторско-технологических разработок изделия с использованием эвристических методов. Это объясняется в

ряде случаев сложностью формализации выполняемых процедур и их математического описания и необходимостью многофакторного анализа разнородных конструктивных, технологических и экономических параметров для большой номенклатуры деталей, узлов, агрегатов и изделия в целом. Теоретические и практические вопросы создания САПР-ТК-ТП наименее исследованы во всём комплексе САПР. Поэтому их разработка, способы построения, включающие автоматизированное вычисление и оценку показателей технологичности и точности на всех этапах создания ЛА, являются одной из важных проблем.

Для анализа пространственной взаимосвязи элементов конструкции в направлениях различных осей координат и представления модели сборочного пространства в виде графа сопряжения этих элементов можно разложить на субграфы, рёбра которых соответствуют сопряжениям, порождающим механические связи, и сопряжения в направлении заданных осей координат. Любому конкретному контуру сопряжения a_i с b_i соответствует определённый вид уравнения $A=F(i,j)$, что позволяет классифицировать сопряжения элементов конструкции в зависимости от характера пространственной взаимосвязи. Если уравнение возможных перемещений сопряжённых тел содержит только поступательные возможные перемещения, то

класс подвижности будет поступательным, если только вращательные, то класс подвижности будет вращательным, а если уравнение содержит и поступательные и вращательные перемещения, то класс подвижности будет составным [1]. Если уравнение возможных перемещений сопряжённых элементов может быть записано в виде совокупности возможных перемещений, связанных только дизъюнкцией, то такое уравнение будет относиться к дизъюнктивному классу подвижности вида $ai \vee bi$. Наибольшая часть сопряжений элементов планера ЛА друг с другом и с элементами сборочной оснастки относится к дизъюнктивным классам подвижности.

Технологический процесс сборки элементов конструкции планера ЛА связан, в основном, с получением геометрических функциональных контуров. В процессе сборки конструктивного контура F^* его звенья образуют связанную систему тел, в которой точность положения любого звена и, следовательно, точность положения его поверхностей, входящих в функциональный контур $F1$, зависит от других звеньев. Эта зависимость является размерной связью звеньев контура F^* . Принципиальное значение имеет то, что размерные связи между самими элементами изделия являются конструктивными, а между элементами изделия, технологической оснастки, инструмента и оборудования — технологическими.

При таком подходе количественная и качественная оценка проектов сборочных процессов, в том числе на уровне размерных связей и размерных цепей, может быть достаточно детально описана графом размеров, вершинами которого являются поверхности, линии и точки, соединяемые размерами в виде дуг графа. Простая размерная цепь соответствует простому циклу в графе размеров. Связанная размерная цепь соответствует такому графу структуры с увязкой размеров, который содержит не менее двух простых циклов. Каждому простому циклу можно поставить в соответствие алгебраическое уравнение простой размерной цепи, а число таких уравнений при сложной структуре

размерных связей равно числу простых циклов в графе представления размеров.

Таким образом, в собираемой системе A из условно твёрдых тел множество L^* дуг графа размеров $L = (L^*, L^*)$ состоит из подмножества собственных размеров элементов $ai \in A$, соединяющих поверхности, линии и точки этих элементов, и подмножества размеров сопряжений, соединяющих сопрягаемые поверхности разных элементов $mi \in M$. В физическом смысле размеры сопряжений являются представлением конструктивных полей допусков на размеры, где основным геометрическим показателем по степени качества выполнения сборки функционального контура является его точность. В соответствии с этим принимаем, что точность контура $F(\Delta t)$ обеспечена, если для каждого параметра множества M этого контура выполнено условие:

$$F(\Delta t) \leq [F(\Delta t)].$$

Наряду с другими факторами, на погрешности параметра m влияют деформации элемента конструкции под действием нагрузок, неизбежных при сборке. Величина поля рассеяния деформационных погрешностей зависит от абсолютной жёсткости элемента конструкции и от величины и характера приложения нагрузок [1]. Однако для оценки влияния деформационных погрешностей на качество сборки важна не столько абсолютная величина, сколько её соотношение с полем допуска, которое составляет часть поля допуска (Δt), предназначенную для покрытия деформационных погрешностей. Поэтому одним из важнейших свойств реального элемента конструкции является его относительная жёсткость при сборке по параметру $G(h)$, характеризующая коэффициентом относительной жёсткости.

Элемент конструкции будет относительно жёстким по параметру при $G(h) < 1$. При сборке изделия из элементов малой жёсткости необходимо создавать строго определённое силовое поле для обеспечения точности формы геометрических контуров. Такие условия могут быть созданы путём базирования и фиксации элементов малой жёсткости на

достаточно жёсткие элементы изделия или в специальном сборочном приспособлении.

Для каждого агрегата, поступающего на сборку, известен технологический процесс, включающий сведения о времени и состоянии технологического маршрута в заданной точке. Координаты точек на плоскости известны. Обозначим через $R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{ij})$ - множество точек технологического маршрута i -ого узла, где каждая точка $r_{ij} = r_{ij}(x_1, x_2, x_3, t)$

соответствует расчетной точке; x_1, x_2 - координаты точки технологического маршрута в горизонтальной плоскости;

x_3 - координата в вертикальной плоскости данной точки i -ого агрегата; t - время обработки расчетной точки. Участком заданной траектории сборки агрегата

является отрезок между точками r_{ij} и r_{ij+1} . Далее для упрощения изложения будем называть его участком технологического маршрута узла. Положение i -ого узла в пространстве E в k -й момент времени характеризуется точкой $f_{ik}(x_{1k}, x_{2k}, x_{3k}, t_k)$, образованной парой: $S_0 = \langle S_{0ex}, S_{0вых} \rangle$ такой, чтобы обеспечивалось однозначное

установление соответствия между S_{0ex} и некоторой точкой f_{ex} технологического пространства с координатами $f_{ex} = (\min(x_1), \min(x_2), \min(x_3))$ и между $S_{0вых}$

и $f_{вых} = (\max(x_1), \max(x_2), \max(x_3))$, где $\min(\dots)$, $\max(\dots)$ - соответственно наименьшее и наибольшее из значений координат точек данного участка сборки в пространстве E .

Любой точке $f_{ik}(x_{1k}, x_{2k}, x_{3k}, t_k)$ однозначно соответствует некоторая точка s в опорном базисе событий в экземпляре $M^{(Q)}$ (в разных его интерпретациях). С учётом сделанных допущений о характере технологического маршрута представлением сборки i -ого узла R_i является последовательность мультивекторов

$$S(A_i) = (S^{\alpha\beta\nu(p)} | (p) \in (P_i)) \Leftrightarrow R_i, \quad (1)$$

в которой выход предыдущего мультивектора совпадает с входом

последующего, $((P_i) \subset (P))$ - множество индексов, выделенных для мультивекторов сборки i -го узла. Для каждого мультивектора такой последовательности должно выполняться условие:

$$S^{\alpha\beta\nu(p)} \Leftrightarrow r_{ij} \in R_i, \quad (2)$$

в силу которого $S^{\alpha\beta\nu(p)}$ есть мультивектор пары событий входа на участок заданной траектории сборки и выхода с него. Тогда из аксиомы о физической интерпретации

базисов событий в любой момент времени t_k путём линейных преобразований можно определить координаты точки s формального представления агрегата во всех интерпретациях опорного базиса, что соответствует уравнениям движения узла по

участку от r_{ij} к r_{ij+1} :

$$x_{1k} = r_{ij} + dtW \sin K; \quad (3)$$

$$x_{2k} = r_{ij} + dtW \cos K; \quad (4)$$

$$x_{3k} = r_{ij} + dtV_y, \quad (5)$$

где W, V_y, K - параметры движения агрегата - путевая скорость, вертикальная скорость, путевой угол участка технологического маршрута. Соответственно:

$$dt = t_k - t(r_{ij}), dt \Leftrightarrow \rho(S^{-(t)(p)}, S^{\alpha(t)(0)}). \quad (6)$$

Представим участок мультивектора $S^{\alpha\beta\nu(0)}$, причём

$$\rho(S^{\alpha(1)(\nu)(0)}, S^{\alpha(2)(\nu)(0)}) = 1 \Leftrightarrow_E \rho^{(\nu)}$$

Если известны координаты местоположения агрегата как точки $S^{\alpha(t)(0)}$ в опорном базисе, то можно определить координаты вектора $X = (x_1, x_2)^T$ - координаты точки f_{ik} в производственном пространстве:

$$X = dX + BX_M, \text{ где } dX = (dx_1, dx_2)^T$$

- вектор приращений по осям координат участка маршрута; B - матрица перехода из частной системы координат участка технологического маршрута в систему координат технологической зоны, определяемая следующим образом:

$$B = \begin{pmatrix} \sin(K) & \cos(180^\circ - K) \\ -\cos(180^\circ - K) & \sin(K) \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$X_M = (\lambda_2^{(v)} \rho^{(v)} | (v) \in \{x, y\}^T, \quad (8)$$

где λ_1, λ_2 - координаты точки s в опорном базисе: $\lambda_2 = 1 - \lambda_1$ и $\lambda_1 + \lambda_2 \geq 1$.

Такой подход позволяет использовать инвариантные способы расчёта параметров технологических цепей и их топологию, разработку оптимальных программ функционирования технологических процессов и представления в локальном базисе j -го участка маршрута i -го узла установки отдельной детали как мультивектора событий или множества мультивекторов в пределах конфигурации.

Преимуществом введённой х-интерпретации протяжённости технологического маршрута является исключение дополнительных преобразований при расчёте параметров движения объекта, т.е. вектор скорости W всегда направлен вдоль опорного базиса независимо от значений линейных и угловых перемещений сопрягаемых базисных точек с учётом нормативных интервалов между объектами сборки.

Таким образом, поля погрешностей каждого размера образуются путём суммирования погрешностей всех общих и индивидуальных для каждого размера этапов.

Поля погрешностей общих для обоих размеров этапов не влияют на точность увязки обоих размеров между собой.

Из приведённых выше уравнений можно найти условия, при которых точность увязки размеров A и B выше точности каждого из этих размеров:

$$\delta AB \leq \delta A, \text{ если } \sum_{k=1}^r \delta k \leq \sum_{i=1}^p \delta i. \quad (9)$$

$$\delta AB \leq \delta B, \text{ если } \sum_{j=1}^q \delta k \leq \sum_{i=1}^p \delta j. \quad (10)$$

Таким образом, для того, чтобы обеспечить высокую точность увязки размеров, необходимо все этапы, дающие большие погрешности в каждой из индивидуальных ветвей, перенести в общие для обоих размеров этапы. В этом случае погрешность увязки будет меньше погрешности каждого из размеров.

Воспроизведение размеров сопровождается выбором схем базирования поверхностей, образующих заданную форму изделия. Операции переноса формы и размеров строятся по расчётным значениям жёсткости элементов сборок. Основное достоинство рассмотренного принципа состоит в том, что он позволяет обеспечить взаимозаменяемость изделий малой жёсткости, сложной формы и больших габаритных размеров [1]. Именно принцип связанного образования форм и размеров является теоретической основой плазово-шаблонного метода увязки заготовительной и сборочной оснасток, применяющегося в самолетостроении.

Увязка на основе принципа независимого образования размеров и форм изделий не содержит общих этапов переноса каждого из размеров. В этом случае перенос размеров A и B осуществляется независимо друг от друга при разном в общем случае числе индивидуальных этапов ($m \neq n$) и при расчёте полей погрешностей увязки размеров A и B . При изготовлении сопрягаемых деталей с размерами A и B действует одна и та же группа технологических факторов из p членов, а расчетные формулы преобразуются к виду:

$$A = A_n + V_A = A_n + \sum_{i=1}^{n-p} \zeta_i V_i^A + \sum_{i=1}^p \zeta_i V_i^{AB},$$

$$B = B_n + V_B = B_n + \sum_{i=1}^{m-p} \zeta_i V_i^B + \sum_{i=1}^p \zeta_i V_i^{AB},$$

где V_i^{AB} - погрешности, формируемые под действием общих p факторов.

После преобразований зазор между сопрягаемыми поверхностями будет равен

$$V_{AB} = A_n - B_n + \sum_{i=1}^{m-p} \zeta_i V_i^A - \sum_{i=1}^p \zeta_i V_i^B.$$

С использованием теории верхней оценки можно определить поле рассеяния погрешности увязки размеров A и B по формуле:

$$\Delta_{AB} = V_{\max}^{AB} - V_{\min}^{AB} + \sum_{i=1}^{n-p} \zeta_i \Delta_i^A - \sum_{i=1}^{m-p} \zeta_i \Delta_i^B.$$

Тогда $\delta j, \delta k$ - поле погрешностей j -го и k -го этапов переноса размеров A и B .

Для увязки геометрических параметров составных частей летательных аппаратов применяются принципиально различные виды первоисточников увязки:

- чертёж, при применении которого увязка геометрических параметров обеспечивается на основе стандартной системы допусков и посадок. Этот первоисточник увязки применяется при увязке геометрических параметров жёстких составных частей летательных аппаратов, образованных элементами простой геометрической формы;

- плаз, при применении которого увязка геометрических параметров производится на основе графических построений на плоскости. К этому первоисточнику увязки относятся также шаблоны контрольно-контурные (ШКК) и отпечатки контрольные (ОК), выполняющие функции конструктивных плазов;

- эталон, при применении которого увязка геометрических параметров обеспечивается на основе контактного копирования поверхности эталона или его отдельных частей;

- программа, при применении которой увязка геометрических параметров обеспечивается на основе расчёта математической модели поверхности и создания системы кодов для управления оборудованием с ЧПУ.

К первоисточникам увязки не относятся программы, записанные с плазов или эталонов. В этих случаях программы выполняют роль средств увязки, а первоисточниками увязки являются плазы или эталоны.

Декомпозиция позволила представить такую систему в виде иерархической структуры и изучить связи между элементами конструкции изделия и элементами технологического процесса. Проведённые исследования позволили установить наиболее целесообразные уровни абстрагирования сложной системы для каждой стадии проектирования изделия. При исследовании такой сложной системы, которой является САПР-ТК, были проанализированы следующие уровни абстрактного описания: символический (лингвистический); теоретико-множественный; абстрактно-алгебраический;

топологический; логико-математический, теоретико-информационный; динамический; эвристический. Проведённый анализ показал, что наиболее общим описанием и исходным понятием в теории систем является представление сложной системы САПР-ТК в теоретико-множественных терминах. На этом уровне абстрагирования сложная система определяется как отношение на языке теории множеств, в терминах её свойств и взаимосвязей между ними.

Всю совокупность характеристик изделий, принадлежащих к одной группе, можно обобщить в виде матриц наблюдения:

$$\mathbf{X}_{(N \times M)} = \begin{pmatrix} x_{11} & & x_{1M} \\ & x_{ij} & \\ x_{N1} & & x_{NM} \end{pmatrix} \cdot \mathbf{Y}_{(N \times 1)} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_i \\ y_N \end{pmatrix} \quad (11)$$

где $X(N \times M)$ — матрица значений конструктивно-технологических факторов выделенной группы; $Y(N \times 1)$ — вектор значений одного из показателей

технологичности данной группы; $i = \overline{1, N}$; $j = \overline{1, M}$ — элементы множества; N — количество изделий в данной группе; M — количество определяющих факторов [2]. Преобразование значений X и Y осуществляется параметрической функцией $\varphi(B, X)$ с вектором неизвестных параметров B . Математической моделью процесса преобразования $X \rightarrow Y$ называем зависимость вида $Y = \varphi(B, X)$, где B — оценка неизвестного вектора B . В соответствии $X \rightarrow Y$ не выявлены внутренние связи, а только известны значения входа X и выхода Y . В этом случае наиболее удобной математической моделью является уравнение множественной регрессии, представленной в виде: $Y = XB + E$. Неслучайность переменных X_{ij} в модели понимается в том смысле, что при многократном воспроизведении (гипотетическом) одной и той же совокупности характеристик i -го изделия ($x_{i1}^q, x_{i2}^q, \dots, x_{ik}^q$; $q = \overline{1, k}$) ряд случайных значений (y_i^1, \dots, y_i^k) есть результат действия только случайных значений регрессионной ошибки

($e(1), \dots, e(k)$), где k — количество воспроизведений.

Структура регрессионной модели задаётся или в аддитивной форме:

$$y = v_0 + \sum_j^M v_j x_j + \sum_{jq}^M v_{jq} x_j x_q = \varphi(B, X),$$

или в мультипликативной форме:

$$y = B_0 + \prod_i^M x_i^{b_i}. \quad (12)$$

При построении регрессионных зависимостей на базе исходной информации было обеспечено выполнение следующих требований:

- между независимыми факторами и показателями технологичности должна быть причинно-следственная связь;

- независимые факторы не должны находиться между собой в функциональной или близкой к ней связи;

- при отборе статистических данных необходимо обеспечить независимость результатов наблюдений по исследуемым изделиям.

Следует обратить внимание на то, что аддитивная и мультипликативная формы не всегда отвечают реальным технологическим условиям. При больших отклонениях факторов от их среднего значения аддитивная функция может дать отрицательное значение показателя технологичности. Мультипликативная

форма может принять нулевое значение показателя при нулевом значении какого-либо из факторов. Основную сложность при создании рабочего информационного массива составляет разработка принципов классификации деталей и сборочных единиц изделий применительно к задаче отработки технологичности.

Таким образом, для построения информационной базы САПР-ТК потребовалась предварительная разработка трёх классификаторов: конструкторского, технологического и технико-экономического по соответствующим определяющим признакам, и их дальнейший синтез в единый взаимосвязанный параметрический классификатор. На его основе разработана форма представления данных, отвечающая требованиям обеспечения и оценки технологичности.

Библиографический список

1. Общие правила обеспечения технологичности конструкции изделия. ГОСТ 14.201—83.
2. Отработка конструкции деталей на технологичность методами математического моделирования производства / Под ред. В. В. Павлова. — М.: ВНИИНАШ, 1982.

METHODS OF CALCULATING THE PARAMETERS OF THE TOPOLOGY AND ROUTES FOR MANUFACTURING OPERATIONS IN THE AGGREGATE-ASSEMBLU PRODUCTION

© 2012 F. V. Grechnikov, S. F. Tlustenko

Samara State Aerospace University
named after academician S.P. Korolyov (National Research University)

The features of geometric dimension of linking the elements of assembly of compounds based on a unified information model of the product. It is shown that when establishing tolerances for each of the links dimensional chain of fundamental importance that the ratio between actual design and technological constraints dimensional element of the assembly determines the level of residual stresses in the product design, resulting in the assembly process, and should be considered in computer-aided design technology processes.

Uncertainty, functional circuit, the tolerance, precision, dimension chain, the reference basis.

Информация об авторах

Гречников Федор Васильевич, член-корреспондент РАН, профессор, заведующий кафедрой обработки металлов давлением, Самарский государственный аэрокосмический

университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: gretch@ssau.ru. Область научных интересов: металлофизика, материаловедение и технология управления формированием физико-механических свойств в конструкционных материалах.

Тлустенко Станислав Федотович, кандидат технических наук, доцент кафедры обработки металлов давлением, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: titan250@mail.ru. Область научных интересов: исследование взаимосвязи механических свойств материалов с составом, процессов литья и обработки металлов давлением.

Grechnikov Fedor Vasilievich, Corresponding member of RAS, Doctor of Engineering, Professor, Head of Metal Forming Department, Samara State Aerospace University (National Research University). E-mail: gretch@ssau.ru. Area of research: physic of metals, science of materials and technology of management of formation of physicomechanical properties in constructional materials.

Tlustenko Stanislav Fedotovich, Candidate of Technical Science, Associate Professor, Samara State Aerospace University (National Research University). E-mail: titan250@mail.ru. Area of research: the research of interdependence of mechanical properties of materials on the composition, casting processes and metal forming.