УДК 658.512:621.452

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СБОРКИ ПО КРИТЕРИЯМ ТОЧНОСТИ

©2011 Ф. В. Гречников, С. Ф. Тлустенко

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

Исследование сборочных операций на некотором множестве допустимых вариантов исполнения в статье проводится в виде постановки задачи выбора оптимальной модели и структуры технологической системы сборки агрегата с обеспечением точности сборки и установлением допустимых схем компоновок технологических переходов.

Размерные связи, сборка агрегата, математическая модель, операторы, пространство сборки, компоненты, точность.

Одним из эффективных способов повышения качества сборочных операций при техническом обосновании размерных связей является теоретическое обоснование пространственной взаимосвязи элементов сборочной единицы. Размерная связь между ними характеризуется параметрами геометрических контуров формы и положения, определяющими взаимное расположение в пространстве как отдельных контуров, так и самих элементов сборочной единицы. Для развития информационной базы системы автоматизированного проектирования размерных цепей предлагается расширить понятие исходной схемы в виде графа связанных размерных цепей, где граф размеров содержит не менее двух простых циклов. Каждому простому циклу, включающему в себя замыкающее звено размерной цепи, соответствует алгебраическое уравнение простой размерной цепи, а число уравнений при сложной структуре размерных связей равно числу простых циклов в графе размеров. В этом случае при фиксированном размере замыкающего звена размерной цепи остальные звенья образуют инварианты связанных размеров простых циклов в виде ребер графа $c_{i1},\ldots,j_n \Leftrightarrow 1$. Таким образом устанавливается органическая взаимосвязь между графом размеров и графом сопряжений элементов сборочной единицы. Граф размеров может быть истолкован как результат развертки графа сопряжений до уровня геометрических контуров, образующих элементы изделия, и наоборот, граф сопряжений может быть истолкован как свертка графа размеров. Образуется множество, состоящее из множества A элементов изделия и множеств $F(a_i)$ геометрических контуров этого изделия, соединяемых размерами

$$A=\left(A,F\left(a_1\right),F\left(a_2\right),\ldots,F\left(a_n\right)\right).$$

Затем строится блочная булева матрица (1):

$$[A\times A]=$$

$$\begin{array}{cc}
\begin{matrix} A & F(a_1) & \ldots & F(a_n) \end{matrix} & \\
\begin{bmatrix}
[A\times A] & [A\times F(a_1)] & \ldots & F(a_n) \\
[F(a_1)\times A] & [F(a_1)\times F(a_1)] & \ldots & [F(a_1)\times F(a_n)] \\
\ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\
[F(a_n)\times A] & [F(a_n)\times F(a_1)] & \ldots & [F(a_n)\times F(a_n)]
\end{bmatrix} & \begin{matrix} A \\ F(a_1) \\ \ldots \\ F(a_n) \end{matrix}
\end{array}, \tag{1}$$

блоки которой имеют следующее содержание: $[A \times A]$ - матрица, соответствующая графу сопряжения $G = (A,C)$; $[A\times F(a_i)]$ - матрица, описывающая расчленение a_i на геометрические контуры $F(a_i)$; $[F(a_i) \times A]$ - матрица, описывающая вхождение геометрических контуров $F(a_i)$ в A; $[F(a_i) \times F(a_i)]$ - матрица, соответствующая графу собственных размеров a_i; $[F(a_i) \times F(a_j)]$ - матрица, соответствующая графу размерных связей контуров элементов a_i с контурами a_j, эта матрица характеризует несобственные размеры сопряжений a_i с a_j. В физическом смысле размеры сопряжений являются зазорами (или натягами) между сопрягаемыми поверхностями различных элементов. Очевидно, если величина зазора $|l_{(i)j}|\neq 0$, то

$$D_{i(j)}^{\alpha}=1,\ d_{i(j)}^{\alpha}=\left|l_{(i)j}\right|. \tag{2}$$

В графе размеров неизвестными являются несобственные размеры сопряжений и замыкающее звено размерной цепи.

При расчете сборочных размерных цепей могут решаться прямая и обратная задачи. При решении прямой задачи определяют номинальные размеры, допуски, коэффициенты середин полей допусков и предельные отклонения всех составляющих размерную цепь звеньев, исходя из установленных требований к замыкающему звену размерной цепи. При решении обратной задачи, исходя из значений номинальных размеров допусков, координат их середин, предельных отклонений составляющих звеньев, определяют те же характеристики замыкающего звена либо, при необходимости определить погрешность замыкающего звена, определяют поле рассеяния, координату его середины или границы отклонений замыкающего звена на основании аналогичных данных для составляющих звеньев.

Влияние размеров сопряжений на замыкающее звено размерной цепи зависит от структуры графа сопряжений и, как следствие, от структуры сборочной размерной цепи. Если граф сопряжений - линейный, а размерная цепь - простая, то размеры сопряжений не влияют на замыкающее звено размерной цепи, поскольку при соединении элементов конструкции зазоры в местах сопряжения становятся равными нулю. В этом случае расчет сборочной размерной цепи осуществляется известными методами. Так, плоские размерные цепи рассчитываются по ГОСТ 16320—80. Номинальный размер замыкающего звена размерной цепи вычисляют по формуле

$$L_\Delta = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_i L_i, \tag{3}$$

где L_i - номинальный размер i-го звена; ξ_i - передаточное отношение i-го звена размерной цепи.

В частности, для линейных размерных цепей с параллельными звеньями ξ_i =1 для увеличивающих и ξ_i =-1 для уменьшающих составляющих звеньев.

Допуск на величину замыкающего звена δ_Δ вычисляют по формулам:

- при расчете по методу максимума-минимума

$$\delta_\Delta = \sum_{i=1}^{m-1} |\xi_i| \delta_i, \tag{4}$$

где δ_i - допуск на величину i-го звена;

- при расчете по вероятностному методу

$$\delta_\Delta = t_\Delta \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \lambda_i^2 \delta_i^2}. \tag{5}$$

Коэффициент риска t_Δ выбирают из таблиц значений функции Лапласа $\Phi(t)$ в зависимости от принятого риска P; так, при нормальном законе распределения и P= 0,27 % t_Δ =3; коэффициент λ_i^2 при нормальном законе распределения равен 1/9.

Поле рассеяния замыкающего звена ω_Δ вычисляют по формулам:

- при расчете по методу максимума-минимума

$$\omega_\Delta = \sum_{i=1}^{m-1} |\xi_i| \omega_i, \tag{6}$$

где ω_i- поле рассеяния i-го звена;

- при вероятностном методе расчета

$$\omega_\Delta = t_\Delta \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \xi_i^2 \lambda_i^2 \omega_i^2}. \tag{7}$$

Если граф сопряжений - нелинейный, а размерная цепь - связанная, то при соединении элементов конструкции некоторые зазоры станут равными нулю, а другие могут сохраниться или превратиться в натяги. В этом случае размеры сопряжений будут влиять на замыкающее звено размерной цепи, и тогда число неизвестных величин, включая замыкающее звено размерной цепи, будет больше числа уравнений, соответствующих простым циклам и графу размеров. Размерные связи не могут быть определены обычными методами решения размерных цепей, и решение осуществляется на основе анализа пространственной взаимосвязи элементов связанной системы тел. Отклонение реальной поверхности (линии, точки) тела от номинального положения представляют как поступательное перемещение в соответствующем направлении. Граничная поверхность (линия, точка) тела, за которой свободное пространство простирается в положительном направлении, называется увеличивающим элементом этого тела. Погрешности рассчитываем следующим образом. Пусть тела a_i, a_j сопряжены по нескольким поверхностям $F_{i'}$-$F_{j'}$, $F_{i''}$-$F_{j''}$ и допуски на отклонения сопрягаемых поверхностей от номинального значения заданы в виде наибольших и наименьших допустимых, отклонений $\delta_{i*}^{+\alpha}, \delta_{i*}^{-\alpha}, \delta_{j*}^{+\alpha}, \delta_{j*}^{-\alpha}, i* = i', i'', ..., j* = i', j''...$

Размеры сопряжений вида $l_{i*(j*)}$ являются зазорами между сопрягаемыми поверхностями a_i, a_j, зависимость между зазорами определяется по формуле (6). Поскольку тела a_i, a_j сопряжены, наименьший зазор между ними равен нулю:

$$D_{i*(j*)}^{\alpha} = 0, d_{i*(j*)}^{\alpha} = \left| l_{i(j)} \right|_{\min} = 0. \quad (8)$$

Если $i*=i', i'', ...$ - индексы увеличивающих, а $j*=j', j'', ...$ (9) - индексы уменьшающих элементов тел a_i, a_j, то при выполнении условия (10) наибольшее отклонение j-го элемента тела a_j относительно i-го элемента тела a_i можно вычислить по формуле

$$\delta_{i(j)}^{+\alpha} = \left(\delta_{i*}^{+\alpha} + \delta_{j*}^{-\alpha} \right)_{\max}, \quad (10)$$

а зазоры между сопрягаемыми поверхностями - по формуле

$$\left| l_{i'(j')} \right| = \left(\delta_{i*}^{+\alpha} + \delta_{j*}^{-\alpha} \right)_{\max} - \left(\delta_{i'}^{+\alpha} + \delta_{j'}^{-\alpha} \right). \quad (11)$$

Наименьшее отклонение вычисляют по формуле

$$\delta_{i(j)}^{-\alpha} = \left(\delta_{i*}^{-\alpha} + \delta_{j*}^{+\alpha} \right)_{\min}; \quad (12)$$

зазоры между сопрягаемыми поверхностями при этом определяют по формуле

$$\left| l_{i'(j')} \right| = \left(\delta_{i'}^{-\alpha} + \delta_{j'}^{+\alpha} \right) - \left(\delta_{i*}^{-\alpha} + \delta_{j*}^{+\alpha} \right)_{\min}. \quad (13)$$

При сложной структуре размерных связей между элементами F_i, F_j тел a_i, a_j в графе размеров может существовать несколько цепей. В соответствии с уравнением (13) предельные отклонения $\delta_{i(j)}^{+\alpha}$ и $\delta_{i(j)}^{-\alpha}$ по каждой J-й простой цепи определяют по формулам

$$\left(\delta_{i(j)}^{+\alpha} \right)_J = \sum_{i*}^{m} \delta_{i*}^{+\alpha} + \sum_{j*}^{k} \delta_{j*}^{-\alpha}; \quad (14)$$

$$\left(\delta_{i(j)}^{-\alpha} \right)_J = \sum_{i*}^{m} \delta_{i*}^{-\alpha} + \sum_{j*}^{k} \delta_{j*}^{+\alpha}. \quad (15)$$

Здесь $i^*=i_1, i_2, ..., i_m$ и $j^*=j_1, j_2, ..., j_k$ - вершины J-й цепи, причем $i*$ - индексы увеличивающих, а $j*$ - уменьшающих элементов, независимо от того, каким телам принадлежат эти элементы.

Если в графе размеров между вершинами a_i и a_j существует несколько простых цепей, то в соответствии с уравнениями (8), (9) и (11):

$$\delta_{i(j)}^{+\alpha} = \left(\delta_{i(j)}^{+\alpha} \right)_{J\max}; \quad (16)$$

$$\delta_{i(j)}^{-\alpha} = \left(\delta_{i(j)}^{-\alpha} \right)_{J\min}. \quad (17)$$

Связанную сборочную размерную цепь, в которой число неизвестных звеньев превышает число входящих простых цепей, рассчитывают поэтапно. Каждый этап соответствует установке очередного элемента a_i собираемого изделия; все ранее установленные элементы обозначаются единым символом a_j. В этом случае число неизвестных в размерной цепи равно числу зазоров между сопрягаемыми поверхностями a_i и a_j плюс неизвестная погрешность замыкающего звена. Поскольку минимальный зазор при сопряжении a_i и a_j равен нулю, то число неизвестных уменьшается на единицу и общее число неизвестных оказывается равным числу алгебраических уравнений размерной цепи, что позволяет поэтапно вычислить все размеры, вплоть до замыкающего звена размерной цепи, и однозначно задавать размерные связи элементов конструкции агрегата.

В свою очередь, такой процесс характеризуется определенными состояниями, которые связываются посредством различных операторов. Тогда этот процесс может быть формализован в виде графа, в котором состояния $s_1, s_2, s_3 ... s_{10} ... s_N$ связаны операторами $F_1, F_2, F_3 ... F_N$. Оператор F_1 означает переход из состояния s_1 в s_2 в результате действия оператора F_1.

Такой подход позволяет автоматизировать действия по вычислению последовательности операторов преобразования, так как эти операторы отображают преобразования исходного состояния узлов в последующее состояние. Результаты применения таких операторов можно подставлять на место переменной состояния, аналогично подстановке простой переменной. Например, $P(x_1, F(s))$ вместо $P(x,m)$. Уточним теоретические аспекты представлений и преобразований сборочных пространств.

Для этого определим порядок исчисления количества и последовательности операторов преобразования в требуемом системно-функциональном пространстве сборки в виде

$$R = (P_i, F_j, S_k, \alpha_m, A_n). \quad (18)$$

Установим логико-математическую взаимовязь множества предикатов P, множества операторов F, множества состояний S, системы аксиом α и множества объектов сборки A. Детальное содержание каждого отдельного символа в (2) принимаем из условия. что отображения F_z, $\overline{1,z}$, являются линейными (гомоморфизмами) для всех x, y, ε, R^n. Также применение линейного оператора F_k к вектору $\overline{x}$ дает образ $\overline{y} = \overline{F}(\overline{x})$ вектора $\overline{x}$, то есть отображение линейного пространства R^n в аналогичное R^m. Можно доказать, что каждому оператору $\overline{F}$ в некотором базисе пространства R^n соответствует матрица $\overline{F}$ оператора $\overline{F}$ в базисе $\{\overline{e_k}\}$, формула пересчета $\overline{y} = \overline{F}(\overline{x}) = \overline{x}$. Предикаты обладают тем свойством, что, приписав значения переменным *x,y,...* из соответствующих областей определения, мы получаем в вариантах соединений однозначные логические высказывания. При этом выражения могут быть только истинными во всех формализмах исчисления предикатов первого порядка. Операторы переводят состояния в состояния, а аксиомы α представляют систему аксиом специального вида. Аксиомы преобразования сборочно-монтажного пространства – это не произвольные, правильно построенные формулы исчисления предикатов, а формулы одного из двух типов. Один тип аксиом таков:

$$P_R(x, S_1) \cdot (P(x_1, S_1) = S_2) \Rightarrow Q(x, S_2), \qquad (19)$$

где $P,Q \in P$, $F \in F$, $S_1,S_2 \in S$.

Эти аксиомы могут быть записаны в более общей форме. Однако можно считать, что эти аксиомы имеют следующий смысл: для того чтобы применить оператор F в ситуации S_1, прежде всего необходимо, чтобы выполнялось условие P, т.е. это начальное требование для применимости оператора F. Теперь, после применения оператора F, полученное состояние характеризуется предикатом Q. Под буквами P и Q в приведенных записях мы будем иметь в виду, что эти символы обозначают подмножество множества предикатов P. Так например, начальное условие P может быть длинной конъюнкцией предикатов $P = P_1, P_2... P_n$, которая полностью характеризует все условия применения оператора F в ситуации S_1. Таким образом, P - это своего рода начальные условия, а Q - конечные условия по отношению к оператору F. В общем виде, т.е. независящими от конкретного состояния S_1, аксиомы могут быть записаны следующим образом:

$$\forall S\{P(x,S) \Rightarrow Q(x, F(x,S))\}, \qquad (20)$$

где мы воспользовались подстановкой $F(x,S)$ вместо S_2, тем самым исключив обозначения двух конкретных состояний. В этом выражении S соответствует начальному состоянию S_1, а $F(x,S)$ – конечному состоянию S_2.

Для определенности процесса преобразований необходимо точно описать начальную ситуацию для того, чтобы можно было применять те или иные аксиомы. Для описания начальной ситуации используются схемы аксиом вида

$$D(x, S_H), \qquad (21)$$

где $D \in P$, $S_H \in S$, $x \in A$.

В этом случае S_H – конкретное начальное состояние, x – элемент множества узлов, A- константа, имеющая существенное отношение к начальной ситуации. Для начальной ситуации предикат P не обязательно будет двухместным предикатом. В общем случае он может быть произвольным n-местным предикатом с любым числом аргументов. Таким образом, каждому конкретному условию соответствует целый ряд получаемых соединений узлов – констант, в свою очередь D может представлять собой последовательность конъюнкций такого рода предикатов. В формальной записи решается вопрос о существовании конечного состояния S, для которого выполняется условие $S(x, S_k) \rightarrow \sum_{i=1}^{k} S_i$, или

$$(\exists S_k)\{S(x, S_k)\}. \qquad (22)$$

Расчет последовательности реализации операторов преобразования проводим в соответствии с указаниями конструкторской документации и руководящих технических материалов на выполнение сборочных операций:

$$S_k = F_1 (x, F_2 (x, \dots , F_{n-1} (x, F_n (x, S_H)) \dots)) =$$
$$=F_1 \cdot F_2 \dots F_n (x, S_H). \qquad (23)$$

Последовательность функциональных знаков F_1, F_2,... должна пониматься как суперпозиция операторов, которые последовательно применяются к начальному состоянию и переводят его в конечное. Такая последовательность представляется базовым графом, отражающим начальное состояние S_H и цель – конечное состояние S_k, когда сборка завершена. Такой результат показывает, что проект реализуется положительно и существует путь, ведущий из начального состояния в конечное:

$$(\forall x, y, s, r_1, r_2, r) \{ (x_1, r_1, s) \Rightarrow (x_1, y, r_2, r_1, s)) \}. \quad (24)$$

Тогда, если проект технологической системы реален, то имеется множество оптимальных операторов, например, $F_1, F_2, F_3 \ldots F_N$, которые переводят начальное состояние объекта в конечное по проектной оптимальной схеме.

Используя запись (23), получим: $S_k = F_1, F_2, F_3 \ldots F_N (S_H)$. На рис. 1 показана схема такого алгоритма.

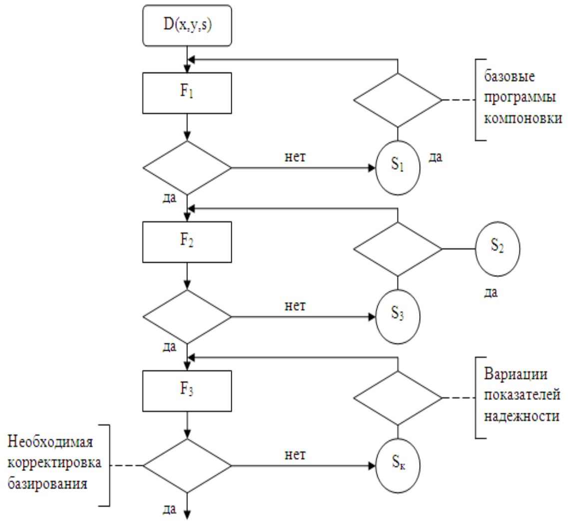

Рис. 1. Алгоритм реализации вероятностной модели процесса сборки на входах фиксированной длины как дискретной ограниченной случайной величины

Эффективность решения логических задач в исчислении последовательности операторов преобразования достаточно высокая. Для того чтобы эту эффективность сравнять с эффективностью выполнения операций при заданной точности, необходимо иметь управляющее устройство на самом высоком уровне, которое устанавливало бы правильное соответствие между планированием и исполнением операций. В дальнейшем этот вывод может быть положен в основу развития интеллектуальной системы проектирования процессов сборки узлов и агрегатов летательных аппаратов.

Библиографический список

1. Калачанов, В.Д. Формирование и оптимизация ресурсного обеспечения программ авиастроительного производства [Текст] / В.Д. Калачанов, Е.В. Джимай // Авиакосмическая техника и технология.- 2005. -№ 4. – С. 44-49.

2. Проектирование самолетов [Текст] / С.М. Егер, В.Ф. Мишин, Н.К. Лисийцев [и др.]; под ред. С.М. Егера - М.: Логос, 2005. – 648 с.

3. Чумадин, А.С. Основы технологии производства летательных аппаратов [Текст] / А.С. Чумадин, В.И. Ершов, В.А. Барвинок. - М.: Наука и технологии, 2005. - 912 с.

DESIGN BUILD PROCESS FOR THE ACCURACY OF ELIGIBILITY

© 2011 F. V. Grechnikov, S. F. Tlustenko

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

Research of assembly operations on some set of admissible variants of execution in article is investigated in the form of statement of a problem of a choice of optimum model and structure технологичекой systems of assemblage of the unit with an establishment of admissible parameters of transformations of technological transitions.

Assembly of the unit, the mathematical model, operators, space assembly components.

Информация об авторах

Гречников Федор Васильевич, член-корреспондент Российской академии наук, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой обработки металлов давлением, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) -267-46-01. Область научных интересов: исследование механических свойств материалов в зависимости от состава, процессов литья и обработки давлением.

Тлустенко Станислав Федотович, кандидат технических наук, доцент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 267-46-01, 8-927-731-58-12. E-mail: titan250@mail.ru. Область научных интересов: исследование механических свойств материалов в зависимости от состава, процессов литья и обработки давлением.

Grechnikov Feodor Vasilevich, the member correspondent of the Russian Academy of Sciences; the doctor of technical sciences, the professor, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) -267-46-01. the research of interdependence of mechanical properties of materials on the composition, casting processes and metal forming.

Tlustenko Stanislav Fedotovich, Candidate of Technical Science, Associate Professor, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: 8-927-731-58-12. 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.