УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ ЦАГИ

Том XIII 1982 № 1

УДК 629.7.015.4

СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ РАСЧЕТНЫХ СХЕМ СИЛОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В. Н. Семенов

Предложен экономичный способ автономного формирования топологической схемы силовой конструкции на базе регулярных генерационных сеток со специальными свойствами узлов.

Рассмотрены алгоритмы развертывания регулярной метрической информации на основе „опорных точек" и с использованием симметричного отображения. Показана эффективность применения соответствующих программ.

1. **Формальные топологические схемы.** Существующие способы и устройства ввода информации в ЭВМ, как правило, достаточно эффективны для ограниченных разделов исходных данных, обладающих определенными свойствами. В связи с этим система описания силовых конструкций [1], формирующая в конечно-элементной идеализации исходные данные для программы оптимизации силовых конструкций „ПОИСК" ориентирована на сочетание различных способов формирования информации. Основными среди них являются:

— форматная запись таблиц исходных данных в специально разработанные бланки, используемые при пробивке перфокарт и как отчетный документ,

— ввод метрической информации с интерактивных планшетов,

— хранение общих для многих задач разделов данных в программе,

— автоматическая генерация функционально зависимых данных,

— ввод корректирующих данных оператором DATA в режиме редактирования,

— определение проектных параметров в ходе оптимизации конструкции.

Рациональное сочетание перечисленных способов ввода позволяет существенно снизить трудоемкость описания конструкций без нарушения принципа универсальности.

Описанная в статье идея выделения формальной топологической схемы конструкции пополняет перечень приемов эффективного

описания силовых конструкций и может использоваться для различных целей.

Формальная топологическая схема (ФТС)—это эквивалент топологической структуры расчетной схемы, который может быть дополнен произвольной, удобной для конкретных целей, метрикой.

Использование ФТС позволяет существенно ускорить подготовку входной информации для ЭВМ путем независимого ведения работ по контролю и отладке различных разделов исходных данных.

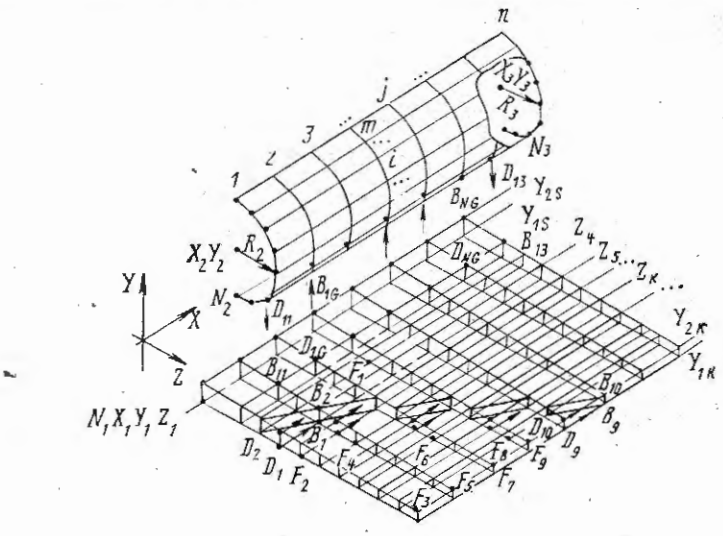


Рис. 1

Для формирования ФТС подконструкции ее силовая схема „раскраивается" на регулярную генерационную сетку (рис. 1). Простейший набор сведений, описывающий свойства сетки, включает следующие параметры:

$$\boldsymbol{W}\left[\begin{array}{l} N_1\ X_1\ Y_1\ Z_1\ L_x\ L_y\ L_z\ N_F\ N_{BD} \\ \underbrace{O\ F_1}\ \underbrace{F_2\ F_3}\ \underbrace{F_4\ F_5}\ \ldots\ . \\ \underbrace{B_1\ D_1}\ \underbrace{B_2\ D_2}\ \underbrace{B_3\ D_3}\ \ldots\ . \end{array}\right], \qquad (1)$$

где $\boldsymbol{W}$ оператор описания,

N_1, X_1, Y_1, Z_1 — номер первого узла подконструкции и его координаты,

L_x, L_y, L_z — число сечений сетки в направлениях X, Y и Z соответственно,

N_F, N_{BD} — число пар фиктивных и пар связей базовых и дубль-узлов в описании,

O, F_1, F_2, F_3 — узлы с номерами F_1, $F_2 \div F_3$, $F_4 \div F_5$ ... являются фиктивными (не принадлежат конструкции),

B_1, D_1, B_2, D_2 — узлы с номерами B_1 и D_1, B_2 и D_2, ... (соответственно) в конструкции представляют единое целое.

Размеры ячеек сетки (l_x, l_y, l_z) задаются программой в соотношении:

$$l_x = l_z = l_z(L_z + 2), \qquad (2)$$

которое удобно для работы с изометрической проекцией схемы.

Исходной информацией для операторов генерации элементов G_E служит перечень номеров узлов (I_1 J_1 K_1 L_1), описывающих первый из элементов генерируемой последовательности (N_{E1}) и параметры генерации (G_{E1} G_{E2} G_{E3}), определяющие закон формирования последующих элеменов:

$$\boldsymbol{G_E}\begin{bmatrix} N_{E1}\ I_1\ J_1\ K_1\ L_1\ G_{E1}\ G_{E2}\ G_{E3} \\ N_{E2}\ \ldots \end{bmatrix}. \qquad (3)$$

Генератор $\boldsymbol{G_E}$ обрабатывает все ячейки заданной области сетки, однако получают номер и преобразуются в элементы конструкции только те из них, которые не содержат в описании фиктивных узлов.

Внутренние преобразования подконструкций (рис. 1 и 2) и компоновка сведений о подконструкциях в единый пакет данных производится оператором преобразоваиий $\boldsymbol{R}$ на основе сведений о связях базовых (B) и дублирующих (D) узлов (BD-связи).

Вывод на графопостроительное устройство сформированной таким образом ФТС позволяет осуществить визуальный контроль топологических данных и при необходимости произвести их коррекцию в условиях отсутствия метрических даиных реальной конструкции.

2. Приемы генерации и уточнения регулярных метрических данных. На ранних этапах проектирования сопоставление вариантов реализации силовой конструкции в ряде случаев может выполняться с использованием приближенной метрической информации.

Для таких задач построеиы генераторы регулярных метрических даиых, работающие в цилиндрической и декартовой системах координиат. Для описания метрических данных узлов, расположенных иа цилиндрической, либо конической поверхиости необходимо заготовить иа двух перфокартах следующие данные о подконструкции (рис. 1)

$$\boldsymbol{W}\begin{bmatrix} N_2\ X_2\ Y_2\ R_2\ G_R\ G_X\ G_m \\ N_3\ X_3\ Y_3\ R_3\ \ldots \end{bmatrix}, \qquad (4)$$

где N_2, N_3 — номера первых узлов на граничных окружностях,

X_2 Y_2, X_3 Y_3, R_2 R_3 — координаты центров и радиусы окружиостей,

G_R, G_X — шаг номеров узлов по окружности и вдоль образующей соответствеино,

G_m — число узлов на полуокружности.

Генерация координат и перевод их в декартову систему производится по соотношениям:

$$\left.\begin{aligned} X_{ij} &= X_2 + (j-1)\frac{X_3 - X_2}{n-1}; \\ Y_{ij} &= \left[Y_2 + (j-1)\frac{Y_3 - Y_2}{n-1}\right] - \left[R_2 + (j-1)\frac{R_3 - R_2}{n-1}\cos\left(\frac{i\pi}{G_m - 1}\right)\right]; \\ Z_{ij} &= \left[R_2 + (j-1)\frac{R_3 - R_2}{n-1}\right]\sin\left(\frac{i\pi}{G_m - 1}\right), \end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

где $n = [(N_3 - N_2)/G_x] + 1$ — число сечений, $i = (1, 2, \ldots, G_m)$, $j = (1, 2, \ldots, n)$. Параметры G_x, G_R и G_m используются для формирования номера узла N_{ij}.

Для подконструкций с ортогональной в плане структурой и неравномерным шагом узлов соотношение (2) заменяется перечнем координат сечений вдоль осей X и Z соответственно:

$$X_j\,(j = 1, 2, \ldots, p), \qquad Z_k\,(k = 1, 2, \ldots, q). \tag{6}$$

Строительные высоты узлов в простейшем случае получаются путем линейной аппроксимации между значениями координат Y_{1S}, Y_{2S} в плоскости симметрии и значениями Y_{1K}, Y_{2K} на конце крыла.

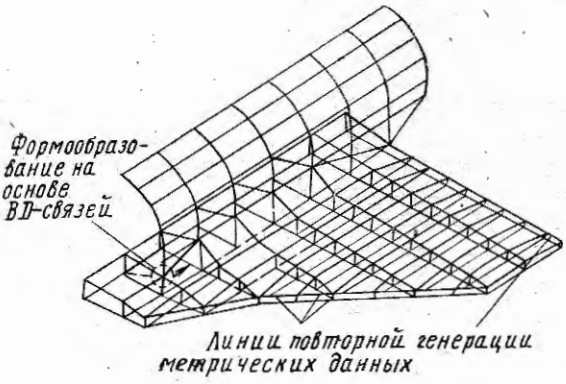


Рис. 2

Коррекция некоторых данных может выполняться повторной генерацией по избранным линиям. Такая операция показана на рис. 2, где произведено выравнивание кромок и уменьшение их строительных высот.

Следует отметить, что при осуществлении *BD*-связей дубль-узлы, соединяясь с базовыми, получают их координаты и этот вторичный эффект можно использовать как дополнительный элемент формообразования конструкции.

3. Симметричное отображение информации. В случае когда симметричные элементы конструкцнй имеют разные жесткостные характеристики и при оптимизации конструкций на несимметричные случаи нагружения, целесообразно рассмотрение расчетной схемы в целом.

Основную сложность в построении алгоритма симметричного отображения информации представляет формирование алгоритма для нахождения номера узла I_S, симметричного заданному I. Использование упорядоченно пронумерованных сеток упрощает эту проблему, позволяя вывести требуемую формулу для принятого порядка нумерации узлов. Введем идентификаторы порядка нумерации узлов вида: „$Y - X - Z$“, в которых порядок перечисления координат соответствует последовательности переходов при нумерации узлов (рис. 3).

Вывод формул ведется в целочисленной форме (частное от деления округляется путем отбрасываиия дробной части).

Рассмотрим сетку „$Y - X - Z$“. Число плоскостей P_{xy} до узла I равно:

$$P_{xy} = \frac{(I-1)}{(L_x L_y)}. \tag{7}$$

Номер первого (J_{1k}) и последнего (J_{kz}) узлов на Z-линии, содержащей узел I:

$$\left.\begin{aligned} J_{1z} &= I - P_{xy}\ L_x\ L_y; \\ J_{kz} &= J_{1z} + L_x\ L_y\ (L_z - 1). \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

Условие симметрии узлов I и I_s можно представить в виде (см. рис. 3)

$$J_{kz} - I_S = I - J_{1z}, \tag{9}$$

откуда с учетом (7) и (8) получим выражение для определения I_S:

$$I_s = I + L_x\ L_y \left(L_z - 2\frac{(I-1)}{(L_y L_z)} - 1 \right). \tag{10}$$

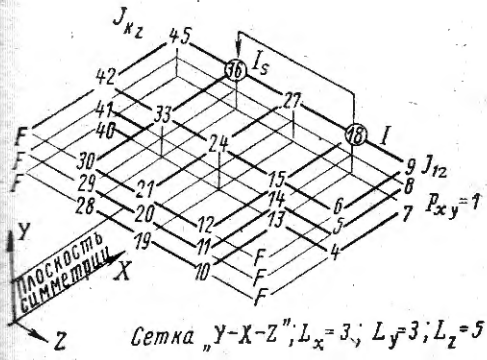


Рис. 3

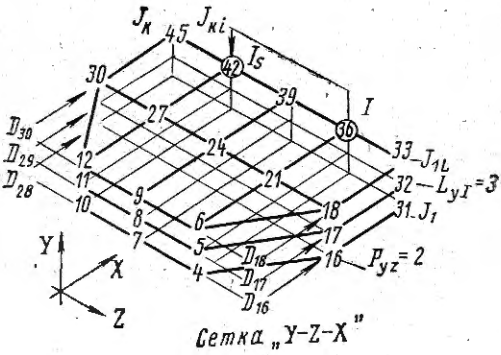


Рис. 4

Для сетки „$Y - Z - X$" (рис. 4) число плоскостей P_{yz} до узла I равно:

$$P_{yz} = \frac{(I-1)}{(L_y L_z)}. \tag{11}$$

Номер слоя L_{yI}, в котором расположен узел I:

$$L_{yI} = I - \frac{(I-1)}{L_y} L_y. \tag{12}$$

Номер первого (J_1) и последнего (J_k) узлов в плоскости YZ, содержащей узел I:

$$\left.\begin{aligned} J_1 &= L_y\ L_z\ P_{yz} + 1, \\ J_k &= L_y\ L_z\ (P_{yz} + 1). \end{aligned}\right\} \tag{13}$$

Номер первого (J_{1L}) и последнего (J_{kL}) узлов на линии Z, содержащей узел I:

$$\left.\begin{aligned} J_{1L} &= J_1 + L_{yI} - 1\ ; \\ J_{kL} &= J_k + L_{yI} - I\ . \end{aligned}\right\} \tag{14}$$

Условие симметрии узлов запишем в виде (см. рис. 4):

$$J_{kL} - I_S = \quad - J_{1L}\ . \tag{15}$$

Из условия (15) с учетом (9) — (14) получим выражение для определения I_s:

$$I_s = I + L_y\ L_z\left(2\frac{(I-1)}{(L_y L_z)} + 1\right) - L_y\left(2\frac{(I-1)}{L_y} + 1\right). \qquad (16)$$

Зависимости (10) и (16) соответствуют наиболее распространенным сеткам.

Далее производится собственно операция симметричного отображения информации. Метрические данные и узловые нагрузки (P, M) отображаются по соотношениям:

$$\left.\begin{array}{l} X(I_S) = X(I),\quad Y(I_S) = Y(I),\quad Z(I_S) = -Z(I), \\ P_x(I_S) = SP_x(I),\quad P_y(I_S) = SP_y(I),\quad P_z(I_S) = -SP_z(I), \\ M_x(I_S) = -SM_x(I),\quad M_y(I_S) = -S\ M_y(I),\quad M_z(I_S) = S\ M_z(I), \end{array}\right\}, \qquad (17)$$

где S есть знак + для симметричного нагружения и знак — для антисимметричного нагружения.

Степени свободы (dof-degrees of freedom) и классы (Cl) симметричных узлов тождественны:

$$\left.\begin{array}{l} \mathrm{dof}(I_S) = \mathrm{dof}(I), \\ \mathrm{Cl}(I_S) = \mathrm{Cl}(I). \end{array}\right\} \qquad (18)$$

После установления соответствия (18) генерация топологических данных (3) правомерна во всей области существования расчетной схемы.

На рис. 3 и 4 показаны также примеры формирования ФТС в зависимости от классификации узлов.

4. Использование ФТС при параметрическом синтезе конструкций. Один из путей синтеза конструкции заключается в выполнении серии оптимизационных расчетов схем, отличающихся значением базовых параметров. При этом ФТС подконструкций остаются неизменными, а варьируется их компоновка. Например, при синтезе силовой схемы летательного аппарата с тандемно расположенными крыльями, соединенными концами в жесткую конструкцию, базовыми являются параметры разнесения корневых сечений крыльев по высоте и по длине фюзеляжа. Для таких серий расчетов можно использовать единственную запись исходных данных на магнитной ленте, модифицируя ее в каждом из вариантов специальной подпрограммой, основой работы которой служит информация об „опорных" точках N_4 и N_5 базовых (профильных) сечений. Для всей серии расчетов устанавливается единая связь опорных точек с узлами базовых сечений, которые, в свою очередь, используются для генерации новых метрических данных промежуточных узлов (рис. 5).

Программа такого рода апробирована на силовом кессоне, для формирования которого задается информация:

$$\boldsymbol{G}_2\left[\boldsymbol{G}_1\begin{bmatrix} N_4 & X_4 & Y_4 & Z_4 & \Delta X_4 & \Delta Y_4 & G_N \\ N_5 & X_5 & Y_5 & Z_5 & \Delta X_5 & \Delta Y_5 & \end{bmatrix}\right], \qquad (19)$$

где на первом этапе генератор $\boldsymbol{G}_1$, используя параметры связи опорных точек ($\Delta X_4\ \Delta Y_4\ \Delta X_5\ \Delta Y_5$) с узлами базовых сечений, определяет координаты этих узлов, а на втором этапе генератор

G_2 используя шаг номера узла G_N формирует метрику остальных узлов конструкции.

Алгоритмы такого рода описаны в ряде работ, например [2], однако в данном примере сокращается не только объем описания узловых точек, но ликвидируется описание остальных разделов исходных данных для всех вариантов, кроме первого.

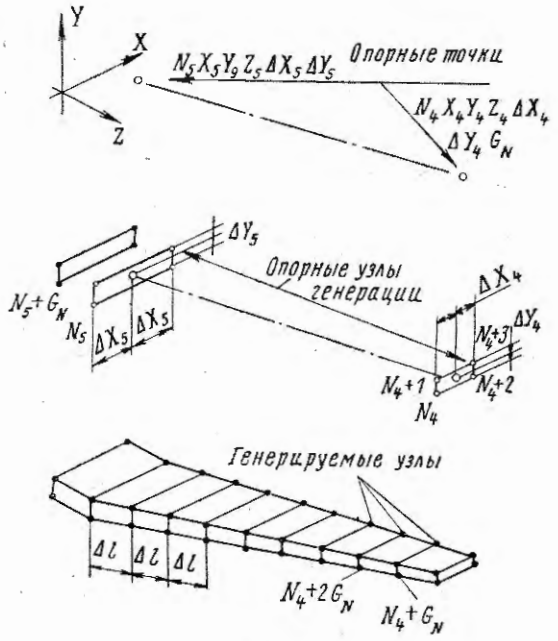


Рис. 5

Сборка подконструкций по линиям с регулярной нумерацией узлов осуществляется генератором *BD*-связей на основе информации:

$$G\ [B_{1G}\ D_{1G}\ B_{NG}\ G_{BD}]\ , \qquad (20)$$

где B_{1G}, B_{NG} — номера первого и последнего базовых узлов в генерируемой последовательности, D_{1G} — номер дубль-узла к базовому B_{1G}, G_{BD} — шаг нумерации узлов в генерируемой последовательности.

При необходимости изменения условий нагружения ввод нагрузок может осуществляться индивидуально по узлам, генерироваться по линейному закону, вводиться как фунция от длины мембранных, либо площади оболочечных элементов в ходе их генерации (3).

5. Применение. Описанные алгоритмы использованы при подготовке исходных данных для ряда задач.

Ниже в таблице приведены сведения, характеризующие объем входной информации для программного формирования некоторых разделов исходных данных.

Следует отметить, что алгоритмы генерации информации широко используются во многих программах МКЭ, что позволяет при описании схем мощностью в 100—300 узлов затрачивать в среднем не более 30—50 единиц информаций на один узел схемы. Внедрение методики раскроя силовых схем на регулярные генерационные сетки [1] позволило снизить этот показатель до 12—15 единиц

Задача	Раздел исходной информации	Количество узлов, элементов, узловых нагрузок	Информация		Абсолютный показатель сжатия*
			число перфокарт	количество чисел	
1	Метрические данные для формирования ФГС на 146 узлах	146			14
	Описание генерационной сетки		1	8	
	Перечисление F-узлов	122	2	20	
	Перечисление B и D-узлов	12	1	12	
2	Симметричное отображение информации о 264 узлах	264	1	3	2
	Данные для генераторов формирования ФТС:				
	стержневые элементы	510	7	37	41
	мембранные элементы	476	9	62	38
3	Получение метрических данных на основе „опорных точек"	96	4	28	14
	Линейная генерация нагрузок	88	4	24	5

* Абсолютный показатель сжатия информации характеризует соотношение ее объема при поэлементном (поузловом) и генераторном описании.

информации на узел. Описанные в статье алгоритмы наиболее эффективны на ранних этапах проектирования, когда сопоставляется ряд упрощенных реализаций силовой схемы и выбирается лучшая из них. Для таких схем показатель трудоемкости понижен до 2,5 единиц информации на узел. При параметрическом синтезе, основанном на серии однотипных оптимизационных расчетов этот показатель может быть еще более низким.

Автономность ФТС относительно метрических данных позволяет использовать единый пакет данных о ФТС в проектировании различных летательных аппаратов, отличающихся метрическими данными. При этом становится целесообразным накопление библиотеки комплектов наиболее распространенных ФТС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Семенов В. Н. Метод задания и автоматизация ввода в ЭВМ исходных данных на начальных этапах проектирования конструкции. В сб. „Расчет напряженно-деформированного состояния авиационных конструкций". Труды ЦАГИ, вып. 2063, 1980.

2. Гурьев Н. И., Поздышев В. Л., Старокадомская З. М. Матричные методы расчета на прочность крыльев малого удлинения. М., „Машиностроение", 1972.

Рукопись поступила 2/VI 1980 г.