

ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ ТУРБОМАШИН

© 2013 Л.С. Шаблий, Г.М. Попов, О.В. Батурич, В.Н. Матвеев

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

Поступила в редакцию 02.12.2013

В данной статье описаны основные особенности оптимизации многоступенчатых лопаточных машин. Показано, что оптимизация многоступенчатых турбомашин зачастую является сложной научно-технической задачей с большим количеством переменных и критериев, а также явной нелинейностью целевой функции.

Ключевые слова: турбомашин, оптимизация, КПД, CFD.

На современных авиационных и ракетных двигателях компрессоры, турбины и насосы являются распространенными агрегатами, от качества работы которых во многом зависит общая эффективность как ракетных, так и газотурбинных двигателей (ГТД). В этой связи повышение КПД и других эксплуатационных параметров [1] лопаточных машин является актуальной задачей аэрокосмического машиностроения.

Сложность создания эффективных турбомашин обусловлена многими причинами, среди которых не последнее место занимает проблема снижения потерь в лопаточных венцах, количество которых, например, в современных компрессорах иногда достигает 20-ти. Из-за сильного уменьшения объёма газа при его сжатии высота проточной части первых и последних ступеней может отличаться более, чем на порядок. При этом для первых ступеней определяющими являются профильные потери, в том числе в значительной мере волновые, вызванные сверхзвуковым обтеканием профиля на большой радиусах, в то время как для последних ступеней, где высота межлопаточного канала сопоставима с шагом решётки, и имеет место ярко выраженное трёхмерное течение, наиболее актуальны концевые потери, среди которых особенно выделяются вторичные (потери, вызванные парным вихрем). Ситуация ещё более осложняется взаимным влиянием ступеней компрессора друг на друга. Изменение параметров одной ступени компрессора с целью повышения её эффективности в услови-

ях совместной работы может привести к ухудшению условий работы соседних ступеней и снижению общей эффективности компрессора. Кроме того, стоит особо отметить тот факт, что течение в лопаточной машине носит ярко выраженный нестационарный характер, поскольку закрученные следы, формируемые каждым выходящим венцом “разрезаются” следующим венцом, формируя локальные пульсации параметров. При этом влияние нестационарности, вызванной каждым венцом, может распространяться по тракту компрессора на 3-5 венцов вниз по течению, а также может вызывать изменение структуры потока на 1-2 венца вверх по течению (рис. 1). При неблагоприятном наложении нестационарных эффектов от нескольких венцов, возможно возникновение в потоке сильных пульсаций параметров газа (давления, скорости, плотности), что отрицательно сказывается на эффективности и устойчивости компрессора. В этой связи при проектировании компрессора необходимо оценивать совместную работу всех ступеней компрессора, в том числе с учётом нестационарных процессов.

Тот факт, что для отыскания наиболее эффективного облика многоступенчатых турбомашин необходимо учитывать большое количество вышперечисленных факторов, влияющих одновременно и зачастую в противоположных направлениях, делает задачу оптимизации чрезвычайно сложной. При её решении следует обращать внимание на следующие особенности.

1. *Многокритериальность*, вызванная необходимостью оптимизации одновременно по нескольким показателям. Например, основными параметрами компрессора являются π_Σ , КПД и коэффициент запаса устойчивой работы, но в качестве дополнительных критериев также могут ставиться параметры шума, прочности, технологичности. Необходимо также помнить, что перечисленные критерии качества компрессора

Шаблий Леонид Сергеевич, кандидат технических наук, ассистент. E-mail: afroaero@hotmail.ru

Попов Григорий Михайлович, аспирант.

E-mail: grishatty@gmail.com

Батурич Олег Витальевич, кандидат технических наук, доцент. E-mail: udet@mail.ru

Матвеев Валерий Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теории двигателей летательных аппаратов. E-mail: tdla@ssau.ru

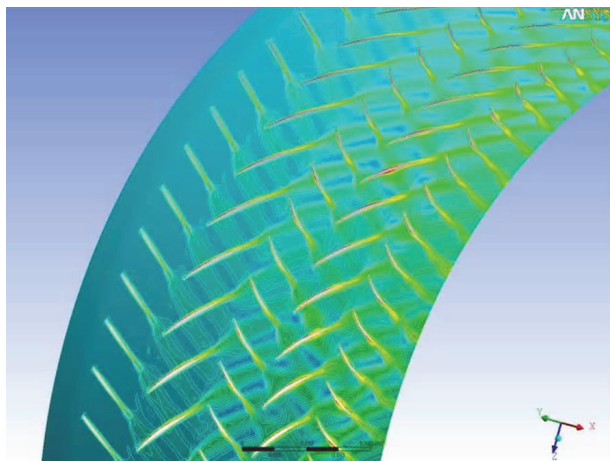


Рис. 1. Картина нестационарного потока в пятиступенчатом компрессоре

рассматриваются не в одной рабочей точке, а в диапазоне режимов, образуя оптимизируемые характеристики: напорную ($\pi_{\Sigma} = f(G_B; n)$), КПД ($z = f(G_B; n)$) и др.

2. *Многopараметричность*, вызванная большим количеством варьируемых параметров вследствие сложности геометрии лопаток и большого количества венцов. Т.е. при оптимизации п-венцового компрессора по р параметрам возникает $[n \times r]$ независимых параметров. Например, если рассматривать оптимизацию лопаток 6-ступенчатого компрессора по лопаточным углам на входе в трёх сечениях, число оптимизируемых параметров составит $12[\text{венцов}] \times 3[\text{угла}] = 36$. При большем числе оптимизируемых лопаточных параметров их общее число для компрессора становится непригодным для существующих алгоритмов оптимизации.

3. *Сложные, неявные законы влияния параметров на критерии*, вызванные вышеописанными сложностями протекающих процессов. При этом практически невозможно представить задачу оптимизации в классическом виде, выразив критерии K через параметры r явным образом ($K_m = f_m(p_1, p_2, \dots, p_n)$), для отыскания экстремума полученной функции в ограниченной области.

В настоящее время для решения подобных сложных оптимизационных задач используется подход, основанный на построении зависимости критерия от n -параметров в $(n+1)$ -мерном пространстве и поиске экстремума полученной аппроксимирующей функции. На рис. 2 представлены аппроксимирующие поверхности, иллюстрирующая зависимость π_{Σ} и КПД одноступенчатого компрессора от двух углов лопатки в трёхмерном пространстве.

Построение подобных зависимостей выполняется путём многократного решения прямой задачи: с использованием той или иной модели (см. ниже) отыскивается значение всех критериев

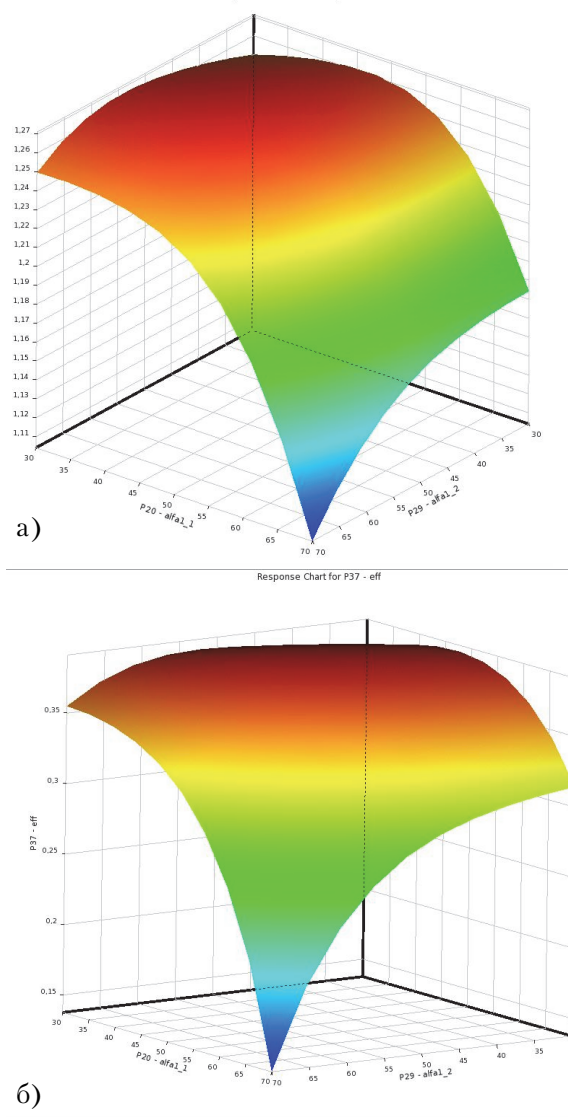


Рис. 2. Зависимость π_{Σ} (а) и КПД (б) компрессора от углов $(\beta_{1л})_{вт}$ и $(\beta_{1л})_{пер}$

для каждого сочетания параметров в интересующей области. Естественно, что найденные значения покрывают исследуемую область сеткой конечной густоты, поэтому такой подход к оптимизации содержит методологическую ошибку и, строго говоря, не может гарантировать отыскание глобального экстремума при очень резких изменениях критерия (рис. 3). Однако, как показывает практика, при оптимизации лопаточных машин все критерии изменяются достаточно плавно, что сводит вероятность ошибки к минимуму.

Описанная методика поиска оптимального сочетания параметров компрессора в настоящее время реализована в таких программных продуктах как ANSYS Design Explorer и Sigma Technology IOSO. Алгоритм поиска оптимального решения путём переборки вариантов CFD-моделирования можно представить в виде схемы, изображенной на рис. 4.



Рис. 3. Потенциальная ошибка отыскания глобального максимума при частоте колебаний критериальной зависимости меньшей шага дискретизации исследуемой области

Процесс оптимизации выполняется в автоматическом режиме на основе многократного повторения цикла определения значений критериев, соответствующего каждому новому набору оптимизируемых параметров. При этом алгоритм оптимизации не зависит от модели прямой задачи: это может быть как CFD-модель, так и функциональная зависимость.

4. *Сложность точного моделирования рабочего процесса турбомашин.* Для решения задачи оптимизации рабочий процесс лопаточной машины может быть представлен моделями разных уровней: от одномерных функциональных моделей, описывающих лишь термодинамические процессы между характерными сечениями до трёхмерных нестационарных CFD-моделей, описывающих все происходящие рабочие процессы максимально достоверно.

Модели малых порядков дают лишь самое общее представление о процессах, происходящих в компрессоре, основаны на ряде допущений и содержат соответствующие методологические погрешности и ограничения. Например, одномерная модель течения в осевом лопаточном венце не учитывает распределение параметров по высоте лопатки, двумерная модель (модель треугольников скоростей) – радиальное перетекание газа в межлопаточном канале (парный вихрь). Данные погрешности могут быть признаны незначительными на начальном этапе проектирования, когда определяется основной облик турбомашин, поскольку большие изменения параметров ступеней вызывают изменение энергоэффективности, сильно перекрывающее имеющуюся в модели погрешность. Но на последних этапах проектирования: при доводке или перепроектировании, изменение КПД при варьировании параметров ступеней оказывается меньшим. Это требует использования моделей более высокого порядка, с погрешностями тем меньше, чем меньше вариации КПД, которые происходят в процессе доводки.

На сегодняшний день наиболее точными мо-

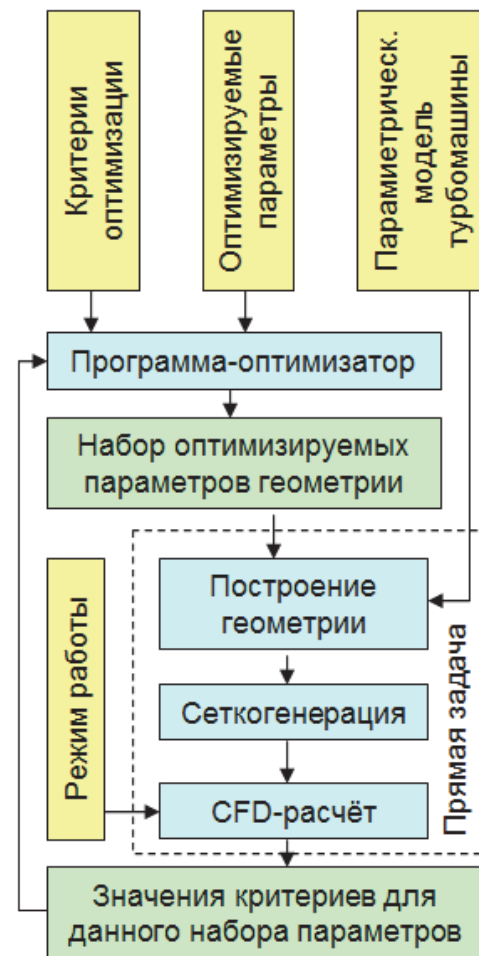


Рис. 4. Блок-схема алгоритма оптимизации решением прямых задач (на примере CFD-моделирования)

делями течения газа в компрессоре являются трёхмерные CFD-модели. Кроме учёта всех видов потерь эти модели однозначно определяют физическую форму проточной части, в отличие от других моделей. Так, например, 2D-модель позволяет описать перо лопатки набором плоских сечений. Однако при формировании 3D-модели появляется вариативность формы [2], связанная с заданием законов аппроксимации между 2D сечениями, и экстраполяции за втулочное сечение. Кроме того, 3D-модель способна описать все элементы формы, расположенные вне плоскости 2D-модели: галтели, бандажные полки, отверстия в лопатке, – для определения влияния этих элементов на КПД.

Цикл решения прямой CFD-задачи состоит из трёх этапов [3] (см. рис. 4): создания геометрии проточной части по текущему набору параметров, создание по данной геометрии расчётной сетки и решения задачи на данной сетке с получением нового значения критерия. Этапы сеткогенерации и CFD-расчёта являются на сегодняшний день достаточно хорошо отлаженными, часто автоматическими операциями, выполняемыми с помощью специального

программного обеспечения. Первый же этап, связанный с построением геометрических моделей проточной части турбомашин также представляет сложность, поскольку для автоматической оптимизации должна существовать параметрическая модель, которая могла бы модифицироваться при изменении входных геометрических параметров. Один из приёмов создания такой модели описан в [4].

5. Сложность создания параметрической геометрической модели проточной части турбомашин заключается, во-первых, непосредственно в достаточно сложной геометрической форме моделируемых каналов, а во-вторых, обусловлена сложностью их параметрического описания малым числом параметров с целью минимизации числа оптимизационных переменных.

Таким образом, в настоящее время оптимизационные исследования турбомашин являются актуальной и достаточно сложной задачей. Тем не менее, несмотря на описанные сложности, существующие пути решения описанных трудностей позволяют уже на нынешнем этапе проводить оптимизационную доводку компрессоров [5].

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании Постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шаблий Л.С. Проблемы оптимизации многоступенчатых компрессоров при создании перспективных ГТД // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени акад. С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. №3 (34). Часть 2. С.192-196.
2. Подходы к формированию параметрических моделей лопаточных машин / Л.С. Шаблий, Г.М. Попов, Д.А. Колмакова // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени акад. С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. №3 (34). Часть 3. С.285-291.
3. Кривоцгов А.В. Разработка компьютерной модели многоступенчатого осевого компрессора и исследование влияния основных геометрических параметров на его энергетическую эффективность // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьёва. 2012. №2 (23). С.16-19.
4. Шаблий Л.С. Реверс-инжиниринг компрессорного лопаточного профиля: построение средней линии и симметричного профиля // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени акад. С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. №3 (34). Часть 2. С.229-234.
5. Повышение КПД многоступенчатого компрессора за счёт оптимизации углов установки лопаток / В.Н. Матвеев, И.Н. Егоров, Д.А. Колмакова, Г.М. Попов // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15. №4(2). С.560-563.

OPTIMIZATION OF MULTI-STAGE TURBO MACHINES

© 2013 L.S. Shabliy, G.M. Popov, O.V. Baturin, V.N. Matveev

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

In this paper are described main features of multi-stage blade machines optimization. Was showed difficulty of optimization task for multi-stage turbo-machines caused a large number of variables and criteria, and non-linearity of target function.

Key words: turbo-machine, optimization, efficiency, CFD.

Leonid Shabliy, Candidate of Technical Sciences, Assistant Lecturer. E mail: afroaero@hotmail.ru

Grigoriy Popov, Graduate Student.

E-mail: grishatty@gmail.com

Oleg Baturin, Candidate of Technical Sciences, Associated Professor. E mail: udet@mail.ru

Valeriy Matveev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head at the Theory of Aircraft Engines Department.

E-mail: tdla@ssau.ru