

CHAPTER 6 FLEXIBLE-ROTOR BALANCING

6.1 Preliminary Considerations

Flexible rotors represent a special topic in balancing practice because of additional considerations raised by rotor flexure. Many flexible rotors are large and may rotate at high speeds; therefore, they can experience significant bending deformations along their length caused by interactions between the rotor residual unbalance and the rotor whirl modes. Bending deformations are usually largest in the vicinity of some flexural critical speed of the rotor system. Rotor deformations are speed-dependent in both magnitude and shape, and maximum modal amplitudes occur at resonant speeds. A given rotor may have several critical speeds within its operating range, and significant vibrations may occur at any of these speeds unless the rotor is adequately balanced.

To balance a flexible rotor requires cancelling the effects of its residual unbalance on all modes likely to cause rotor vibrations. Procedures that can be used to achieve multiplane corrections are described in this chapter. To select a suitable balancing procedure it is first necessary to know whether the rotor can be balanced adequately by the addition of correction weights in two correction planes, i.e., as a class 1 rigid rotor. For an unproven rotor type, a two-plane balance should first be attempted, in a low-speed balancer. If the rotor remains unacceptably out of balance at its operating speed after two-plane correction at low speed, the rotor is classified as a class 3 flexible rotor. If the residual unbalance is acceptable for operation, the rotor needs no further correction and is classified as a class 2 quasi-flexible rotor. This category includes rotors that experience some bending but remain in satisfactory balance after being corrected as rigid rotors. Other special types of flexible rotors—for example, impellers with long flexible blades and high-constant-speed armatures—can also be balanced in two correction planes for satisfactory operation with low transmitted-force levels. These rotors are respectively class 4 and class 5 flexible rotors.

Class 3 flexible rotors require multiplane balancing to operate smoothly. They commonly have one or more critical speeds within their operating range, with uncorrected mode shapes that may involve substantial bending of the rotor. Excitation of these modes by the rotor

residual unbalance may lead to noticeable (or even dangerous) transmitted vibrations, unless the rotor is balanced by some effective multiplane balancing procedure. The rotor must be balanced in such a manner that correction weights added in the balance will effectively cancel all rotor unbalance effects within the operating range.

Commonly used methods for multiplane balancing of flexible rotors are

1. Various iterative modal methods (Lindsay, others)
2. Modal averaging method (Moore, Bishop)
3. Comprehensive modal method (Kellenberger, Federn)
4. Influence coefficient method (Goodman, others).

Each method is described in this chapter. Also included is a discussion of experiences, from the published literature, associated with the use of each method. Each method has the following qualifications:

1. It is a general balancing procedure, i.e., capable of balancing any flexible rotor.
2. It has been verified in practice on real rotors.
3. It is supported by significant published literature.

There is at present some controversy concerning the various methods used in multiplane balancing. It centers around the need to remove the rigid-body modes before multiplane balancing. This leads to the larger question as to the "best" balancing method. Present information suggests that there is no simple answer to this question. The practical answer must always consider the availability of the requisite operator skills, the availability of suitable instrumentation, and the number of repetitions needed to balance the rotor to a degree that is suited to the application involved, in addition to considering which multiplane algorithm should be used.

Factors Affecting Flexible-Rotor Balance

This section discusses various questions that must be decided before attempting to balance a flexible rotor. Many of these questions can be answered from previous experience with related equipment or with similar types of equipment. Some are related to facility scheduling demands.

Type of rotor. Rotor size, speed, and previous operational characteristics determine the type of balance facility required. A small rotor may be shop-balanced in its casing; a large rotor will require special supports to simulate field conditions in the spin pit. Rotor type also determines the planes available for balancing.

ГИБКИЙ РОТОР. БАЛАНСИРОВКА

6.1 Предварительные рассуждения

Гибкие роторы представляют собой особую тему в практике проведения балансировки из-за дополнительных аспектов, возникающих в связи с изгибом ротора. Многие гибкие роторы имеют большие размеры и могут вращаться на высоких скоростях; поэтому они могут испытывать значительные деформации изгиба по длине, вызванные взаимодействием между остаточным дисбалансом ротора и вихревыми режимами ротора. Изгибные деформации обычно наибольшие в непосредственной близости от некоторой критической скорости изгиба роторной системы. Деформации ротора зависят от скорости как по величине, так и по форме, а максимальные амплитуды форм возникают при резонансных скоростях. Данный ротор может иметь несколько критических скоростей в пределах своего рабочего диапазона, и значительные вибрации могут возникнуть при любой из этих скоростей, если ротор не сбалансирован должным образом.

Для балансировки гибкого ротора необходимо устранить влияние его остаточного дисбаланса на все режимы, способные вызвать вибрации ротора. Процедуры, которые могут быть использованы для достижения многоплоскостной коррекции, описаны в этой главе. Для выбора подходящей процедуры балансировки необходимо сначала узнать, может ли ротор быть адекватно сбалансирован добавлением корректирующих грузов в двух плоскостях коррекции, т.е. как жесткий ротор класса 1. Для непроверенного типа ротора сначала следует попытаться провести балансировку в двух плоскостях на низкоскоростном балансировочном станке. Если ротор остается недопустимо неустойчивым при его рабочей скорости после коррекции в двух плоскостях на низкой скорости, ротор классифицируется как гибкий ротор класса 3. Если остаточный дисбаланс приемлем для эксплуатации, ротор не нуждается в дальнейшей коррекции и классифицируется как квазигибкий ротор 2 класса. К этой категории относятся роторы, которые подвергаются некоторому изгибу, но остаются в удовлетворительном равновесии после коррекции, как жесткие роторы. Другие специальные типы гибких роторов - например, рабочие колеса с длинными гибкими лопастями и высокопостоянной скоростью вращения якоря - также могут быть сбалансированы в двух плоскостях коррекции для обеспечения удовлетворительной работы с низким уровнем передаваемого усилия. Такие роторы относятся соответственно к гибким роторам 4 класса и 5 класса.

Гибкие роторы 3 класса требуют многоплоскостной балансировки для бесперебойной работы. Они обычно имеют одну или несколько критических скоростей в своем рабочем диапазоне, с некорректированными собственными формами изгиба, которые могут включать значительный изгиб ротора. Возбуждение этих форм изгиба остаточным дисбалансом ротора может привести к заметным (или даже опасным) передаваемым вибрациям, если ротор не сбалансирован с помощью какой-либо эффективной процедуры многоплоскостной балансировки. Ротор должен быть сбалансирован таким образом, чтобы корректирующие грузы, добавленные при балансировке, эффективно аннулировали все эффекты дисбаланса ротора в пределах рабочего диапазона.

Для многоплоскостной балансировки гибких роторов обычно используются следующие методы

1. Различные итерационные модальные методы (Линдсей, другие)
2. Метод модального усреднения (Мур, Бишоп)
3. Комплексный модальный метод (Келленбергер, Федерн)
4. Метод коэффициента влияния (Гудман, другие).

Каждый метод описан в этой главе. Также включено обсуждение опыта, полученного из опубликованной литературы, связанного с использованием каждого метода. Каждый метод имеет следующие характеристики:

1. Относится к общей процедуре балансировки, т.е. способен уравновесить любой гибкий ротор.
2. Был проверен на практике на реальных роторах.
3. Подтверждается значительными литературными публикациями.

В настоящее время существует определенная полемика относительно различных методов, используемых при многоплоскостной балансировке. Они сосредоточены вокруг необходимости устранения режимов жесткого тела перед многоплоскостной балансировкой. Это подводит к более широкому вопросу о "лучшем" методе балансировки. Имеющаяся информация говорит о том, что простого ответа на этот вопрос не существует. Практический ответ всегда должен учитывать наличие необходимых навыков у оператора, наличие подходящего оборудования и количество повторений, необходимых для балансировки ротора до степени, подходящей для конкретного применения, в дополнение к рассмотрению того, какой алгоритм многоплоскостной балансировки следует использовать.

Факторы, влияющие на балансировку гибкого ротора