

Tailieu.vn

TRƯỜNG ĐẠI HỌC GIAO THÔNG VẬN TẢI
KHOA CÔNG TRÌNH
BỘ MÔN KẾT CẤU
* * *

ĐỘNG LỰC HỌC CÔNG TRÌNH

Nguyễn Trung Kiên

Mục lục

1	Khái niệm cơ bản	1
1.1	Khái niệm về động lực học công trình	1
1.2	Tải trọng động	2
1.2.1	Tải trọng có chu kỳ	2
1.2.2	Tải trọng không có chu kỳ	3
1.3	Bậc tự do của hệ dao động	3
1.4	Phân loại dao động	4
1.5	Phương pháp lập phương trình vi phân dao động	5
1.5.1	Phương pháp trực tiếp	5
1.5.2	Phương pháp công khả dĩ	6
1.5.3	Phương pháp năng lượng-Nguyên lý Hamilton	7
1.6	Mô hình hóa bài toán động lực học	7
1.6.1	Phương pháp khối lượng tập trung	7
1.6.2	Phương pháp chuyển vị tổng quát (phương pháp Rayleigh-Ritz)	9
1.6.3	Phương pháp phần tử hữu hạn	9
2	Dao động hệ một bậc tự do	13
2.1	Mô hình hệ dao động một bậc tự do	13
2.2	Phương trình vi phân dao động tổng quát	14
2.3	Phương pháp giải phương trình vi phân dao động	15
2.3.1	Phương pháp cổ điển	15
2.3.2	Tích phân Duhamel	15
2.3.3	Phương pháp biến đổi Fourier	16
2.3.4	Phương pháp số	16
2.4	Dao động tự do của hệ một bậc tự do	16
2.4.1	Dao động tự do không lực cản	17

2.4.2	Dao động tự do có lực cản	21
2.4.3	Độ suy giảm logarithme	25
2.5	Dao động hệ một bậc tự do chịu tác dụng của tải trọng xung .	27
2.6	Dao động cưỡng bức hệ một bậc tự do	28
2.6.1	Trường hợp không có lực cản	29
2.6.2	Trường hợp có lực cản	35
3	Dao động hệ hữu hạn bậc tự do	43
3.1	Mô hình hệ hữu hạn bậc tự do	43
3.2	Phương trình vi phân dao động hệ hữu hạn bậc tự do	44
3.3	Dao động tự do hệ hữu hạn bậc tự do	46
3.3.1	Ý nghĩa vật lý của tần số dao động riêng và dạng dao động riêng	46
3.3.2	Tần số dao động riêng	49
3.3.3	Dạng dao động riêng	51
3.3.4	Tính chất trực giao các dạng dao động	54
3.3.5	Chuẩn hóa dạng dao động	56
3.3.6	Khai triển véc tơ chuyển vị theo dạng dao động	57
3.3.7	Phương trình dao động	58
3.4	Dao động cưỡng bức hệ hữu hạn bậc tự do	61
4	Hệ vô hạn bậc tự do - Dao động của thanh thẳng	65
4.1	Phương trình vi phân dao động	65
4.2	Dao động tự do của thanh thẳng	66
4.2.1	Phương trình dao động tự do	66
4.2.2	Tính chất trực giao của các dạng dao động riêng	68
4.3	Dao động tự do của thanh thẳng có khối lượng phân bố đều và tiết diện không đổi	69
4.4	Dao động cưỡng bức của thanh thẳng có khối lượng phân bố đều và tiết diện không đổi	76
4.5	Dao động cưỡng bức của thanh thẳng chịu tải trọng bất kỳ - Khai triển theo dạng dao động	78
5	Dao động của hệ phức tạp	81
5.1	Phương pháp chuyển vị tính dao động của khung	81
5.1.1	Dao động cưỡng bức	81
5.1.2	Dao động riêng	83
5.2	Phương pháp gần đúng tính dao động của khung	88

5.3	Phương pháp chuyển vị tính dao động của dầm liên tục	89
5.4	Dao động của dàn	91
6	Phương pháp tích phân theo thời gian trong phân tích bài toán động lực học	93
6.1	Hệ tuyến tính một bậc tự do	93
6.1.1	Phương pháp sai phân đúng tâm	94
6.1.2	Phương pháp Newmark	97
6.2	Hệ phi tuyến một bậc tự do	104
6.2.1	Phương trình cân bằng động dưới dạng gia số	104
6.2.2	Phương pháp Newmark	106
6.2.3	Giảm sai số bằng thuật toán Newton-Raphson	109
6.3	Hệ tuyến tính nhiều bậc tự do	113
6.3.1	Phương pháp sai phân đúng tâm	113
6.3.2	Phương pháp Newmark	114
6.3.3	Phương pháp Wilson	115
6.3.4	Phương pháp HHT	118
6.4	Hệ phi tuyến nhiều bậc tự do	119
6.4.1	Phương trình cân bằng động dưới dạng gia số	119
6.4.2	Phương pháp Newmark	119
7	Tính kết cấu chịu tác dụng động đất	121
7.1	Khái niệm về động đất	121
7.1.1	Nguồn gốc của động đất	121
7.1.2	Lan truyền sóng	121
7.1.3	Chuyển động của mặt đất	124
7.1.4	Cường độ	125
7.2	Tính kết cấu chịu tác dụng của động đất	125
7.2.1	Hệ một bậc tự do tuyến tính	126
8	Phương pháp phần tử hữu hạn trong bài toán động lực học	133

Tailieu.vn

Danh sách hình vẽ

1.1	Tải trọng điều hòa	2
1.2	Tải trọng có chu kỳ bất kỳ	2
1.3	Tải trọng tác dụng trong thời gian ngắn-Tải trọng xung	3
1.4	Tải trọng dài hạn	3
1.5	Hệ có khối lượng tập trung: (a) hệ một bậc tự do, (b) hệ hai bậc tự do, (c) hệ bốn bậc tự do	4
1.6	Mô hình khối lượng tập trung	8
1.7	Mô hình Rayleigh-Ritz	8
1.8	Mô hình phần tử hữu hạn	10
2.1	Mô hình hệ dao động một bậc tự do (a), Các lực tác dụng lên khối lượng (b)	13
2.2	Các thành phần của dao động điều hòa: (a) thành phần phụ thuộc vào $u(0)$, (b) thành phần phụ thuộc vào $\dot{u}(0)$, (c) dao động điều hòa: tổng của (a) và (b)	18
2.3	Biểu diễn dao động điều hòa bằng véc tơ quay	19
2.4	Ví dụ hệ một bậc tự do	20
2.5	Dao động của hệ khi có lực cản, trường hợp tham số tắt dần $\xi < 1$	23
2.6	Ảnh hưởng tham số tắt dần ξ đến tần số dao động	23
2.7	Sự thay đổi của chuyển vị và vận tốc của hệ theo thời gian trong trường hợp $\xi = 1$ và $\xi > 1$	25
2.8	Xác định tham số tắt dần ξ	26
2.9	Tải trọng xung (a), dao động hệ một bậc tự do chịu tác dụng của tải trọng xung khi không xét đến lực cản (b)	27
2.10	Sự phụ thuộc của biên độ dao động điều hòa vào tần số tải trọng tác động $\bar{\omega}$	30
2.11	Sự thay đổi của hệ số động R_d và góc lệch pha θ theo tỉ số $\bar{\omega}/\omega$	32

2.12	Ví dụ hệ một bậc tự do chịu tác dụng của tải trọng điều hòa	33
2.13	Ví dụ xác định biểu đồ moment uốn động hệ một bậc tự do chịu tác dụng của tải trọng điều hòa	34
2.14	Sự thay đổi của hệ số động R_t theo thời gian khi xảy ra hiện tượng cộng hưởng	35
2.15	Dao động điều hòa khi xét đến lực cản	36
2.16	Biên độ ở trạng thái dao động ổn định	37
2.17	Sự thay đổi hệ số động R_d và góc lệch pha θ theo tỉ số $\overline{\omega}/\omega$ và tham số tắt dần ξ	39
2.18	Sự thay đổi hệ số động R_t theo tham số tắt dần ξ khi $\beta = 1$	41
3.1	Mô hình hệ dao động hữu hạn bậc tự do	44
3.2	Lực tác dụng lên các khối lượng	44
3.3	Chuyển động của hệ với điều kiện ban đầu bất kỳ	47
3.4	Dạng dao động thứ nhất của hệ	47
3.5	Dạng dao động thứ hai của hệ	48
3.6	Kết cấu nhà hai tầng, khối lượng tập trung ở hai sàn	50
3.7	Dạng dao động riêng : (a) dạng dao động thứ nhất, (b) dạng dao động thứ hai	52
3.8	Hệ dao động hai bậc tự do	53
3.9	Dạng dao động riêng : (a) dạng dao động thứ nhất, (b) dạng dao động thứ hai	54
3.10	Khai triển véc tơ chuyển vị theo dạng dao động	58
3.11	Hệ dao động hai bậc tự do chịu tác dụng của tải trọng điều hòa	62
4.1	Quy luật đạo hàm của A_{kx} , B_{kx} , C_{kx} và D_{kx}	72
4.2	Dầm một đầu ngàm một đầu tự do (a), dạng dao động thứ nhất (b), dạng dao động thứ hai (c), dạng dao động thứ ba (d)	74
4.3	Dầm hai đầu khớp (a), dạng dao động thứ nhất (b), dạng dao động thứ hai (c), dạng dao động thứ ba (d)	75
5.1	Khung chịu tác dụng của tải trọng động (a), Hệ cơ bản (b)	84
5.2	Biểu đồ moment uốn động của khung	88
5.3	Khung có khối lượng phân bố (a), Khung có khối lượng tập trung (b)	88
5.4	Dầm liên tục (a), Dạng dao động đối xứng của dầm liên tục (b)	90
5.5	Dàn có khối lượng tập trung tại nút dàn (a), Chuyển khối lượng về đường biên có xe chạy (b)	92

6.1	<i>Phương pháp sai phân đúng tâm</i>	94
6.2	<i>Trụ cầu chịu tác dụng của tải trọng động (a), Tải trọng động (b)</i>	97
6.3	<i>So sánh nghiệm chính xác và nghiệm tính theo phương pháp sai phân đúng tâm với các bước thời gian khác nhau</i>	98
6.4	<i>Phương pháp gia tốc trung bình (a), Phương pháp gia tốc tuyến tính (b)</i>	101
6.5	<i>So sánh nghiệm chính xác với nghiệm tính theo phương pháp gia tốc tuyến tính và gia tốc trung bình</i>	104
6.6	<i>Hệ một bậc tự do (a), Tải trọng động (b), Độ cứng phi tuyến (c), Lực cản phi tuyến (d)</i>	105
6.7	<i>Quan hệ lực-chuyển vị</i>	109
6.8	<i>Thuật toán Newton-Raphson (a), Thuật toán Newton-Raphson cải tiến (b)</i>	110
6.9	<i>Phương pháp Wilson</i>	116
7.1	<i>Các khái niệm về động đất</i>	122
7.2	<i>Sóng Rayleigh và sóng Love</i>	123
7.3	<i>Thành phần gia tốc của đất theo hướng Bắc-Nam được ghi lại tại El Centro, California trong trận động đất ngày 18 tháng 5 năm 1940. Vận tốc và chuyển vị của đất được xác định bằng cách tích phân gia tốc của đất</i>	126
7.4	<i>(a) Hệ một bậc tự do chịu ảnh hưởng của động đất, (b) Các lực tác dụng lên khối lượng</i>	127
7.5	<i>(a) Nghiệm chuyển vị của hệ một bậc tự do với ba chu kỳ dao động riêng khác nhau, (b) Phổ chuyển vị</i>	129
7.6	<i>(a) Phổ chuyển vị, (b) Phổ giả vận tốc, (c) Phổ giả gia tốc</i>	131
7.7	<i>Kết hợp phổ nghiệm D-V-A, trường hợp $\xi = 2$</i>	132

Tailieu.vn

Ký hiệu dùng trong bài giảng

• Các ký hiệu chung

u	chuyển vị của hệ,
$\dot{u}$	vận tốc của hệ,
$\ddot{u}$	gia tốc của hệ,
m	khối lượng của hệ,
k	độ cứng của hệ,
c	hệ số cản nhớt,
$\bar{\omega}$	tần số lực cưỡng bức,
ω	tần số dao động riêng,
T	chu kỳ dao động,
f	tần số riêng,
θ	góc pha,

• Ký hiệu chương 1

$\hat{u}$	chuyển vị khả dĩ,
$P_i(\hat{u})$	công khả dĩ của nội lực,
$P_e(\hat{u})$	công khả dĩ của ngoại lực,
$A(\hat{u})$	công khả dĩ của lực quán tính,
T	động năng của hệ,
V	thế năng của hệ,
W_{nc}	công của các lực không bảo toàn,

• Ký hiệu chương 2

f_I	lực quán tính,
f_D	lực cản nhớt,
f_S	lực đàn hồi,
$p(t)$	tải trọng động,
$\mathcal{F}$	biến đổi Fourier,
ξ	tham số tắt dần,
$\mathcal{I}$	xung lượng của tải trọng xung,

• Ký hiệu chương 3

M	ma trận khối lượng,
K	ma trận độ cứng,
C	ma trận hệ số lực cản,

• Ký hiệu chương 4

E	module đàn hồi của vật liệu,
$I(x)$	momen quán tính của thanh,
M	moment uốn nội lực,
Q	lực cắt,
$p^{(n)}$	đạo hàm bậc n của p ,
$\frac{\partial y}{\partial x}$	đạo hàm riêng của y theo x ,

• Ký hiệu chương 5

Z	biên độ chuyển vị tại các nút của kết cấu,
R	biên độ phản lực tại các liên kết đặt thêm vào,

Tailieu.vn

Tailieu.vn

Chương 1

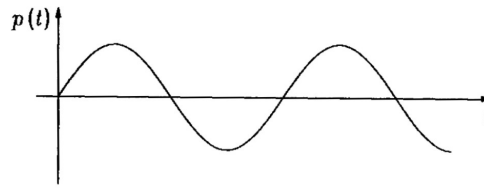
Khái niệm cơ bản

Bài giảng Động lực học công trình này được viết dành cho sinh viên các trường kỹ thuật, xây dựng dân dụng. Nó đề cập đến vấn đề cơ bản của lý thuyết dao động công trình, từ dao động hệ một bậc tự do đến hệ hữu hạn bậc tự do và hệ vô hạn bậc tự do. Phần cuối của bài giảng đề cập đến cách vận dụng các lý thuyết để tính toán một số kết cấu thường gặp trong xây dựng dân dụng cũng như trong các công trình giao thông như dầm, khung, dàn.

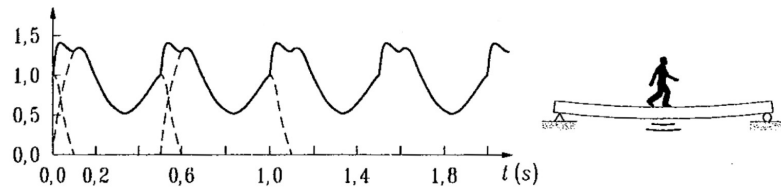
1.1 Khái niệm về động lực học công trình

Động lực học công trình nghiên cứu dao động của kết cấu gây ra bởi các tải trọng động là các tải trọng biến đổi theo thời gian. Tải trọng động này gây ra các chuyển vị, nội lực, phản lực và ứng suất cũng phụ thuộc thời gian. Do vậy, trong bài toán động không tồn tại nghiệm duy nhất như trong bài toán tĩnh. Trong bài toán động lực học, cần phải xác định các giá trị liên tiếp của chuyển vị theo thời gian trước khi đi xác định giá trị lớn nhất của lực, phản lực hay ứng suất được dùng để thiết kế và kiểm tra kết cấu.

Mặc dù sự khác nhau của việc phân tích động lực học kết cấu và phân tích tĩnh học được thể hiện thông qua thông số thời gian nhưng về bản chất là do lực quán tính. Đặc trưng động lực học của bài toán được xét đến nếu lực quán tính đóng vai trò quan trọng so với các lực tác dụng lên kết cấu. Ngược lại, bài toán sẽ được giải quyết như bài toán tĩnh học nếu như tải trọng tác dụng chỉ gây ra các lực quán tính mà ta có thể bỏ qua trong khi tính toán.



Hình 1.1: Tải trọng điều hòa



Hình 1.2: Tải trọng có chu kỳ bất kỳ

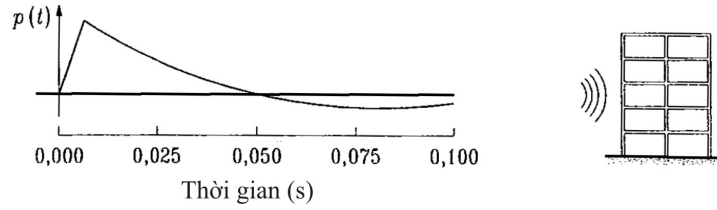
1.2 Tải trọng động

Tải trọng động là tải trọng mà giá trị, phương chiều hay điểm tác dụng của nó thay đổi theo thời gian. Nếu sự thay đổi theo thời gian của tải trọng được biểu diễn bằng một hàm số nào đó, người ta gọi đó là tải trọng xác định. Nếu sự thay đổi không được biểu diễn bằng một hàm cụ thể mà chỉ được biểu diễn qua các số liệu thống kê thì gọi là tải trọng bất kỳ. Để phân tích kết cấu dưới tác dụng của loại tải trọng này cần dùng đến lý thuyết xác suất. Trong phạm vi của bài giảng này sẽ chỉ trình bày các vấn đề liên quan đến tải trọng xác định. Tải trọng động được chia làm hai loại: tải trọng có chu kỳ và tải trọng không có chu kỳ.

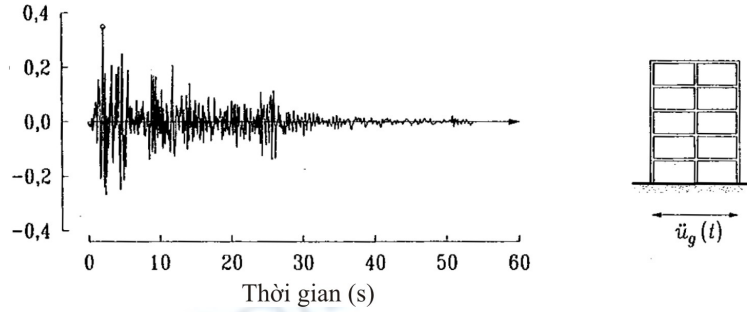
1.2.1 Tải trọng có chu kỳ

Tải trọng có chu kỳ là tải trọng mà sự biến thiên theo thời gian của nó sẽ lặp lại sau một khoảng thời gian T . Tải trọng có chu kỳ lại được chia thành hai loại: tải trọng điều hòa và tải trọng chu kỳ bất kỳ.

Hình 1.1 biểu diễn tải trọng điều hòa gây ra do chuyển động quay của động cơ có khối lượng lệch tâm. Hình 1.2 biểu diễn tải trọng có chu kỳ gây ra do



Hình 1.3: Tải trọng tác dụng trong thời gian ngắn-Tải trọng xung



Hình 1.4: Tải trọng dài hạn

người đi bộ trên cầu gây ra.

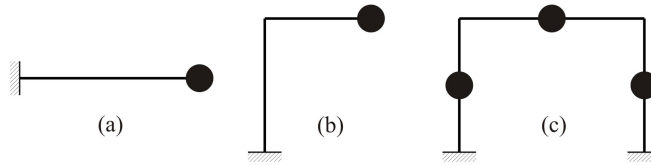
1.2.2 Tải trọng không có chu kỳ

Tải trọng không có chu kỳ là tải trọng là tải trọng biến đổi một cách bất kỳ theo thời gian. Tải trọng không có chu kỳ được chia thành tải trọng tác dụng ngắn hạn như tải trọng xung và tải trọng tác dụng dài hạn.

Hình 1.3 biểu diễn tải trọng tác dụng trong thời gian ngắn so với chu kỳ dao động của hệ. Nguyên nhân gây ra dạng tải trọng này có thể là do một vụ nổ, va đập hay đứt gãy một cấu kiện trong hệ. Hình 1.4 biểu diễn tải trọng dài hạn gây ra do động đất.

1.3 Bậc tự do của hệ dao động

Bậc tự do của hệ dao động là số thông số độc lập cần thiết để xác định vị trí của tất cả các khối lượng trên hệ đó khi dao động.



Hình 1.5: Hệ có khối lượng tập trung: (a) hệ một bậc tự do, (b) hệ hai bậc tự do, (c) hệ bốn bậc tự do

1. **Hệ có các khối lượng tập trung:** trong trường hợp này ta chỉ xét đến lực quán tính phát sinh do các khối lượng tập trung và chấp nhận các giả thiết sau:

- Các khối lượng tập trung được coi là chất điểm.
- Bỏ qua biến dạng dọc trục khi các thanh chịu uốn.

Bậc tự do được xác định bằng tổng số các liên kết tối thiểu cần thiết đặt thêm vào hệ tại vị trí các khối lượng để sao cho các khối lượng đó trở thành bất động.

2. **Hệ có khối lượng phân bố:** trong trường hợp này lực quán tính phụ thuộc vào cả tọa độ và thời gian $f_I = f_I(x, t)$, do đó phải giải hệ phương trình vi phân với các đạo hàm riêng. Bậc tự do của hệ có khối lượng phân bố là vô cùng.

1.4 Phân loại dao động

Do cấu tạo của kết cấu (sự phân bố khối lượng, độ cứng, kích thước) có nhiều hình thái khác nhau cũng như tải trọng tác dụng có tính chất khác nhau mà ta có nhiều cách để phân loại dao động

- **Theo tính chất của nguyên nhân gây ra dao động**
 - Dao động tự do (dao động riêng): là dao động không có tải trọng động duy trì trên hệ.
 - Dao động cưỡng bức: là dao động sinh ra bởi các ngoại lực tác dụng theo một quy luật nào đó và tồn tại trong suốt quá trình dao động.

- **Theo bậc tự do của hệ dao động**

Theo cách phân loại này, người ta chia hệ thành 3 loại dao động:

- Dao động hệ một bậc tự do.
- Dao động hệ hữu hạn bậc tự do.
- Dao động hệ vô hạn bậc tự do.

- **Theo sự tồn tại hay không tồn tại của lực cản**

- Dao động có lực cản (dao động tắt dần) là dao động bị mất một phần năng lượng do ảnh hưởng của hiệu ứng nhiệt, của ma sát trong khi vật rắn biến dạng, ma sát tại mối nối thép hay sự đóng mở các vết nứt trong bê tông.
- Dao động không có lực cản (dao động không tắt dần) là dao động mà năng lượng của hệ được bảo toàn.

- **Theo dạng của phương trình vi phân mô tả dao động**

- Dao động tuyến tính khi phương trình vi phân mô tả dao động là tuyến tính.
- Dao động phi tuyến khi phương trình vi phân mô tả dao động là phi tuyến.

- **Theo kích thước và cấu tạo của hệ**

- Dao động của hệ thanh: dầm, dàn, khung.
- Dao động của tấm, vỏ.
- Dao động của khối đặc.

1.5 Phương pháp lập phương trình vi phân dao động

Lập phương trình vi phân dao động là một bước quan trọng trong phân tích dao động của một hệ. Dưới đây sẽ trình bày một số phương pháp thiết lập phương trình vi phân dao động dựa trên các đại lượng véc-tơ hay đại lượng vô hướng.

1.5.1 Phương pháp trực tiếp

Phương pháp này dựa trên việc xác định hợp lực tác dụng lên hệ và viết phương trình cân bằng với biến thiên động lượng của hệ. Đây là kết quả của

*định luật II Newton*¹ hay còn gọi là định luật cơ bản của động lực học. Một cách tổng quát, hợp lực gồm 6 thành phần, 3 lực theo 3 phương của hệ tọa độ và 3 momen quay quanh 3 trục.

Gọi $p(t)$ là hợp lực tác dụng lên khối lượng m , $v = \frac{du}{dt}$ là vận tốc của khối lượng. Động lượng của hệ là $m.v = m\frac{du}{dt}$. Theo định luật biến thiên động lượng ta có phương trình sau:

$$p(t) = \frac{d}{dt} \left(m \frac{du}{dt} \right) = m \frac{d^2u}{dt^2} = m\ddot{u} \quad (1.1)$$

hay

$$p(t) - m\ddot{u}(t) = 0 \quad (1.2)$$

Số hạng $m\ddot{u}$ biểu diễn lực quán tính tác dụng lên hệ. Phương trình cân bằng động của hệ (1.2) được thiết lập dựa trên nguyên lý *Alembert*².

Phương trình (1.2) là một hệ N phương trình gắn với mỗi bậc tự do của khối lượng m . Tổng quát, $N = 6$, trong đó gồm 3 chuyển vị đường và 3 góc xoay. Tùy theo bậc tự do được xét, m chỉ khối lượng hoặc là moment quán tính của khối lượng quanh một trục.

Phương pháp trực tiếp thích hợp với lập phương trình cân bằng của hệ mà trong đó các khối lượng tập trung tại một số vị trí trên hệ.

1.5.2 Phương pháp công khả dĩ

Phương pháp này đặc biệt thích hợp với hệ liên tục mà khối lượng và độ cứng được phân bố trên toàn hệ.

Theo định luật cơ bản của động lực học, tổng công khả dĩ của ngoại lực và nội lực bằng công khả dĩ của lực quán tính trên tất cả các chuyển vị khả dĩ $\hat{u}$ của hệ:

$$P_i(\hat{u}) + P_e(\hat{u}) = A(\hat{u}) \quad (1.3)$$

trong đó:

$P_i(\hat{u})$: công khả dĩ của nội lực

$P_e(\hat{u})$: công khả dĩ của ngoại lực

$A(\hat{u})$: công khả dĩ của lực quán tính

¹Isaac Newton, nhà vật lý, toán học, triết học, sinh ngày 25/12/1642 tại Woolsthorpe, Lincolnshire, Anh, mất ngày 20/03/1727 tại London, Anh

²Jean Le Rond d'Alembert, luật sư, nhà toán học, triết học, sinh ngày 17/11/1717 tại Paris, Pháp, mất ngày 19/10/1783 tại Paris, Pháp