

CONTENIDO

Prefacio	xiii
Reconocimientos	xviii
Lista de símbolos	xviii

CAPÍTULO 1

Fundamentos de vibración	2
1.1 Comentarios preliminares	3
1.2 Breve historia del estudio de la vibración	4
1.2.1 Orígenes del estudio de la vibración	4
1.2.2 De Galileo a Rayleigh	6
1.2.3 Contribuciones recientes	9
1.3 Importancia del estudio de la vibración	10
1.4 Conceptos básicos de la vibración	13
1.4.1 Vibración	13
1.4.2 Partes elementales de sistemas vibratorios	13
1.4.3 Cantidad de grados de libertad	14
1.4.4 Sistemas discretos y continuos	15
1.5 Clasificación de la vibración	16
1.5.1 Vibración libre y forzada	16
1.5.2 Vibración no amortiguada y amortiguada	16
1.5.3 Vibración lineal y no lineal	16
1.5.4 Vibración determinística y aleatoria	16
1.6 Procedimiento del análisis de la vibración	17
1.7 Elementos de resorte	21
1.7.1 Resortes no lineales	22
1.7.2 Linealización de un resorte no lineal	23
1.7.3 Constante de resorte de elementos elásticos	25
1.7.4 Combinación de resortes	28
1.7.5 Constante de resorte asociada con la fuerza de restauración producida por la gravedad	36
1.8 Elementos de masa o inercia	37
1.8.1 Combinación de masas	38
1.9 Elementos de amortiguamiento	42
1.9.1 Construcción de amortiguadores viscosos	43
1.9.2 Linealización de un amortiguador no lineal	49
1.9.3 Combinación de amortiguadores	49

1.10 Movimiento armónico	51
1.10.1 Representación vectorial del movimiento armónico	52
1.10.2 Representación por medio de números complejos del movimiento armónico	53
1.10.3 Álgebra compleja	55
1.10.4 Operaciones con funciones armónicas	55
1.10.5 Definiciones y terminología	58
1.11 Análisis armónico	61
1.11.1 Expansión de la serie de Fourier	61
1.11.2 Serie de Fourier compleja	63
1.11.3 Espectro de frecuencia	64
1.11.4 Representaciones en el dominio del tiempo y la frecuencia	65
1.11.5 Funciones par e impar	65
1.11.6 Expansiones de medio rango	67
1.11.7 Cálculo numérico de coeficientes	68
1.12 Ejemplos resueltos utilizando MATLAB	72
1.13 Literatura acerca de la vibración	75
Resumen del capítulo	76
Referencias	76
Preguntas de repaso	78
Problemas	81
Proyectos de diseño	111

CAPÍTULO 2

Vibración libre de sistemas de un solo grado de libertad	114
2.1 Introducción	116
2.2 Vibración libre de un sistema traslacional no amortiguado	118
2.2.1 Ecuación de movimiento basada en la segunda ley del movimiento de Newton	118
2.2.2 Ecuación de movimiento utilizando otros métodos	120
2.2.3 Ecuación del movimiento de un sistema de resorte-masa en posición vertical	121
2.2.4 Solución	123
2.2.5 Movimiento armónico	124
2.3 Vibración libre de un sistema torsional no amortiguado	135
2.3.1 Ecuación de movimiento	136
2.3.2 Solución	136

2.4 Respuesta de sistemas de primer orden y constante de tiempo 139

2.5 Método de la energía de Rayleigh 141

2.6 Vibración libre con amortiguamiento viscoso 146

2.6.1 Ecuación de movimiento 146

2.6.2 Solución 147

2.6.3 Decremento logarítmico 152

2.6.4 Energía disipada en amortiguamiento viscoso 154

2.6.5 Sistemas torsionales con amortiguamiento viscoso 156

2.7 Representación gráfica de raíces características y soluciones correspondientes 162

2.7.1 Raíces de la ecuación característica 162

2.7.2 Representación gráfica de raíces y soluciones correspondientes 163

2.8 Variaciones de parámetros y representaciones del lugar geométrico de las raíces 164

2.8.1 Interpretaciones de ω_n , ω_d , ζ y τ en el plano s 164

2.8.2 Lugar geométrico de las raíces y variaciones de parámetro 167

2.9 Vibración libre con amortiguamiento de Coulomb 173

2.9.1 Ecuación de movimiento 174

2.9.2 Solución 175

2.9.3 Sistemas torsionales con amortiguamiento de Coulomb 177

2.10 Vibración libre con amortiguamiento histerético 179

2.11 Estabilidad de sistemas 185

2.12 Ejemplos resueltos utilizando MATLAB 189

Resumen del capítulo 195

Referencias 196

Preguntas de repaso 196

Problemas 201

Proyectos de diseño 237

CAPÍTULO 3

Vibración armónicamente excitada 240

3.1 Introducción 242

3.2 Ecuación de movimiento 242

3.3 Respuesta de un sistema no amortiguado sometido a una fuerza armónica 243

3.3.1 Respuesta total 247

3.3.2 Fenómeno de batido 247

3.4 Respuesta de un sistema amortiguado sometido a una fuerza armónica 250

3.4.1 Respuesta total 254

3.4.2 Factor de calidad y ancho de banda 255

3.5 Respuesta de un sistema amortiguado sometido a $F(t) = F_0 e^{i\omega t}$ 257

3.6 Respuesta de un sistema amortiguado sometido al movimiento armónico de la base 259

3.6.1 Fuerza transmitida 261

3.6.2 Movimiento relativo 262

3.7 Respuesta de un sistema amortiguado sometido a desbalance rotatorio 265

3.8 Vibración forzada con amortiguamiento de Coulomb 269

3.9 Vibración forzada con amortiguamiento de histéresis 273

3.10 Movimiento forzado con otros tipos de amortiguamiento 275

3.11 Autoexcitación y análisis de estabilidad 276

3.11.1 Análisis de estabilidad dinámica 276

3.11.2 Inestabilidad dinámica provocada por el flujo de un fluido 279

3.12 Método de la función de transferencia 285

3.13 Soluciones obtenidas utilizando transformadas de Laplace 288

3.14 Funciones de transferencia de frecuencia 291

3.14.1 Relación entre la función de transferencia general $T(s)$ y la función de transferencia de frecuencia $T(i\omega)$ 293

3.14.2 Representación de las características de respuesta de frecuencia 294

3.15 Ejemplos resueltos utilizando MATLAB 297

Resumen del capítulo 302

Referencias 302

Preguntas de repaso 303

Problemas 307

Proyectos de diseño 328

CAPÍTULO 4

Vibración en condiciones forzadas 330

4.1 Introducción 331

4.2 Respuesta bajo una fuerza periódica general 332

4.2.1 Sistemas de primer orden 333

4.2.2 Sistemas de segundo orden 339

4.3 Respuesta bajo una fuerza periódica de forma irregular 345

4.4 Respuesta bajo una fuerza no periódica 347

4.5 Integral de convolución 347

4.5.1 Respuesta a un impulso 348

4.5.2 Respuesta a una condición forzada general 351

4.5.3 Respuesta a excitación de la base 352

4.6 Espectro de respuesta 359

4.6.1	Espectro de respuesta para excitación de la base	361
4.6.2	Espectros de respuesta a sismos	365
4.6.3	Diseño bajo un ambiente de choque	368
4.7	Transformada de Laplace	371
4.7.1	Respuestas transitoria y de estado estable	371
4.7.2	Respuesta de sistemas de primer orden	372
4.7.3	Respuesta de sistemas de segundo orden	374
4.7.4	Respuesta a una fuerza gradual	379
4.7.5	Análisis de la respuesta escalonada	385
4.7.6	Descripción de una respuesta transitoria	386
4.8	Métodos numéricos	392
4.8.1	Métodos de Runge-Kutta	393
4.9	Respuesta a condiciones forzadas irregulares obtenida aplicando métodos numéricos	396
4.10	Ejemplos resueltos utilizando MATLAB	400
	Resumen del capítulo	403
	Referencias	404
	Preguntas de repaso	404
	Problemas	407
	Proyectos de diseño	428

CAPÍTULO 5

Sistemas de dos grados de libertad 430

5.1	Introducción	431
5.2	Ecuaciones de movimiento para vibración forzada	435
5.3	Análisis de vibración libre de un sistema no amortiguado	436
5.4	Sistema torsional	444
5.5	Acoplamiento de coordenadas y coordenadas principales	449
5.6	Análisis de vibración forzada	455
5.7	Sistemas semidefinidos	458
5.8	Autoexcitación y análisis de estabilidad	461
5.9	Método de la función de transferencia	462
5.10	Soluciones obtenidas aplicando la transformada de Laplace	464
5.11	Soluciones obtenidas utilizando funciones de transferencia de frecuencia	472
5.12	Ejemplos resueltos utilizando MATLAB	475
	Resumen del capítulo	481

Referencias	481
Preguntas de repaso	482
Problemas	484
Proyectos de diseño	507

CAPÍTULO 6

Sistemas de varios grados de libertad 508

6.1	Introducción	510
6.2	Modelado de sistemas continuos como sistemas de varios grados de libertad	510
6.3	Uso de la segunda ley de Newton para derivar ecuaciones de movimiento	511
6.4	Coefficientes de influencia	516
6.4.1	Coefficientes de influencia de rigidez	517
6.4.2	Coefficientes de influencia de flexibilidad	521
6.4.3	Coefficientes de influencia de inercia	525
6.5	Expresiones de energía potencial y cinética en forma matricial	527
6.6	Coordenadas generalizadas y fuerzas generalizadas	529
6.7	Uso de las ecuaciones de Lagrange para derivar ecuaciones de movimiento	530
6.8	Ecuaciones de movimiento de sistemas no amortiguados en forma matricial	534
6.9	Problema de valor eigen	535
6.10	Solución del problema de valor eigen	537
6.10.1	Solución de la ecuación característica (polinomial)	537
6.10.2	Ortogonalidad de los modos normales	542
6.10.3	Valores eigen repetidos	545
6.11	Teorema de expansión	547
6.12	Sistemas no restringidos	547
6.13	Vibración libre de sistemas no amortiguados	551
6.14	Vibración forzada de sistemas no amortiguados mediante análisis modal	554
6.15	Vibración forzada de sistemas viscosamente amortiguados	561
6.16	Autoexcitación y análisis de estabilidad	566
6.17	Ejemplos resueltos utilizando MATLAB	568
	Resumen del capítulo	576
	Referencias	576
	Preguntas de repaso	577
	Problemas	581
	Proyectos de diseño	601

CAPÍTULO 7

Determinación de frecuencias y modos naturales 602

7.1	Introducción	603
7.2	Fórmula de Dunkerley	604
7.3	Método de Rayleigh	606
7.3.1	Propiedades del cociente de Rayleigh	607
7.3.2	Cálculo de la frecuencia natural fundamental	609
7.3.3	Frecuencia fundamental de vigas y flechas	610
7.4	Método de Holzer	613
7.4.1	Sistemas torsionales	613
7.4.2	Sistemas de resorte-masa	616
7.5	Método de iteración matricial	617
7.5.1	Convergencia a la frecuencia natural más alta	619
7.5.2	Cálculo de frecuencias naturales intermedias	619
7.6	Método de Jacobi	624
7.7	Problema de valor eigen estándar	626
7.7.1	Descomposición de Choleski	627
7.7.2	Otros métodos de solución	629
7.8	Ejemplos resueltos utilizando MATLAB	629
	Resumen del capítulo	632
	Referencias	632
	Preguntas de repaso	633
	Problemas	636
	Proyectos de diseño	643

CAPÍTULO 8

Control de la vibración 644

8.1	Introducción	646
8.2	Nomógrafo de vibración y criterios de vibración	646
8.3	Reducción de la vibración en la fuente	650
8.4	Balanceo de máquinas rotatorias	651
8.4.1	Balanceo en un plano	651
8.4.2	Balanceo en dos planos	654
8.5	Remolineo de flechas rotatorias	659
8.5.1	Ecuaciones de movimiento	659
8.5.2	Velocidades críticas	661
8.5.3	Respuesta del sistema	661
8.5.4	Análisis de estabilidad	663
8.6	Balanceo de motores recíprocos	665
8.6.1	Fuerzas desbalanceadas debido a fluctuaciones en la presión de gas	665

8.6.2	Fuerzas desbalanceadas debido a inercia de las partes móviles	667
8.6.3	Balanceo de motores recíprocos	669
8.7	Control de vibración	671
8.8	Control de frecuencias naturales	671
8.9	Introducción al amortiguamiento	672
8.10	Aislamiento de la vibración	673
8.10.1	Sistema de aislamiento de vibración con cimiento rígido	676
8.10.2	Sistema de aislamiento de vibración con movimiento de la base	685
8.10.3	Sistema de aislamiento de vibración con cimiento flexible	692
8.10.4	Sistema de aislamiento de vibración con cimiento parcialmente flexible	693
8.10.5	Aislamiento contra choques	694
8.10.6	Control de vibración activo	698
8.11	Absorbedores de vibración	702
8.11.1	Absorbedor de vibración dinámico no amortiguado	703
8.11.2	Absorbedor de vibración dinámico amortiguado	708
8.12	Ejemplos resueltos utilizando MATLAB	712
	Resumen del capítulo	718
	Referencias	718
	Preguntas de repaso	720
	Problemas	722
	Proyecto de diseño	735
	Respuestas a problemas seleccionados	736
	Índice	744

Los capítulos 9 al 12 y apéndices se encuentran (en español) en el sitio web de este libro.

CAPÍTULO 9

Sistemas continuos 9-1

9.1	Introducción	9-3
9.2	Vibración transversal de una cuerda o cable	9-3
9.2.1	Ecuación de movimiento	9-3
9.2.2	Condiciones iniciales y límite	9-5
9.2.3	Vibración libre de una cuerda uniforme	9-6
9.2.4	Vibración libre de una cuerda con dos extremos fijos	9-6
9.2.5	Solución de la onda viajera	9-10
9.3	Vibración longitudinal de una barra o varilla	9-11
9.3.1	Ecuación de movimiento y solución	9-11
9.3.2	Ortogonalidad de funciones normales	9-13

9.4	Vibración torsional de una flecha o varilla	9-18			
9.5	Vibración lateral de vigas	9-21			
9.5.1	Ecuación de movimiento	9-21			
9.5.2	Condiciones iniciales	9-23			
9.5.3	Vibración libre	9-23			
9.5.4	Condiciones límite	9-24			
9.5.5	Ortogonalidad de funciones normales	9-26			
9.5.6	Vibración forzada	9-29			
9.5.7	Efecto de una fuerza axial	9-31			
9.5.8	Efectos de inercia rotatoria y deformación por cortante	9-34			
9.5.9	Otros efectos	9-38			
9.6	Vibración de membranas	9-38			
9.6.1	Ecuación de movimiento	9-38			
9.6.2	Condiciones iniciales y límite	9-40			
9.7	Método de Rayleigh	9-41			
9.8	Método de Rayleigh-Ritz	9-43			
9.9	Ejemplos resueltos utilizando MATLAB	9-46			
	Resumen del capítulo	9-48			
	Referencias	9-49			
	Preguntas de repaso	9-50			
	Problemas	9-53			
	Proyecto de diseño	9-65			
			10.7.1	Uso de las mediciones operacionales de deflexión	10-28
			10.7.2	Uso de una prueba modal	10-28
			10.8	Análisis modal experimental	10-29
			10.8.1	La idea básica	10-29
			10.8.2	Equipo necesario	10-29
			10.8.3	Procesamiento de señales digitales	10-31
			10.8.4	Análisis de señales aleatorias	10-33
			10.8.5	Determinación de datos modales a partir de picos observados	10-35
			10.8.6	Determinación de los datos modales con la gráfica de Nyquist	10-38
			10.8.7	Medición de modos	10-39
			10.9	Monitoreo y diagnóstico de la condición de una máquina	10-42
			10.9.1	Criterios de severidad de vibración	10-42
			10.9.2	Técnicas de mantenimiento de máquinas	10-42
			10.9.3	Técnicas de monitoreo de la condición de máquinas	10-44
			10.9.4	Técnicas de monitoreo de vibración	10-45
			10.9.5	Sistemas de instrumentación	10-50
			10.9.6	Selección del parámetro de monitoreo	10-50
			10.10	Ejemplos resueltos utilizando MATLAB	10-51
				Resumen del capítulo	10-54
				Referencias	10-54
				Preguntas de repaso	10-55
				Problemas	10-58
				Proyectos de diseño	10-64
CAPÍTULO 10					
Medición de vibración y aplicaciones 10-1					
10.1	Introducción	10-2			
10.2	Transductores	10-4			
10.2.1	Transductores de resistencia variable	10-4			
10.2.2	Transductores piezoeléctricos	10-7			
10.2.3	Transductores electrodinámicos	10-8			
10.2.4	Transductor de transformador diferencial variable lineal	10-9			
10.3	Detectores de vibración	10-10			
10.3.1	Vibrómetro	10-11			
10.3.2	Acelerómetro	10-13			
10.3.3	Velómetro	10-15			
10.3.4	Distorsión de fase	10-17			
10.4	Instrumentos de medición de frecuencia	10-19			
10.5	Excitadores de vibración	10-21			
10.5.1	Excitadores mecánicos	10-21			
10.5.2	Agitador electrodinámico	10-22			
10.6	Análisis de señales	10-24			
10.6.1	Analizadores de espectros	10-24			
10.6.2	Filtro pasabanda	10-25			
10.6.3	Analizadores de ancho de banda de porcentaje constante y de ancho de banda constante	10-27			
10.7	Prueba dinámica de máquinas y estructuras	10-28			
			10.7.1	Uso de las mediciones operacionales de deflexión	10-28
			10.7.2	Uso de una prueba modal	10-28
			10.8	Análisis modal experimental	10-29
			10.8.1	La idea básica	10-29
			10.8.2	Equipo necesario	10-29
			10.8.3	Procesamiento de señales digitales	10-31
			10.8.4	Análisis de señales aleatorias	10-33
			10.8.5	Determinación de datos modales a partir de picos observados	10-35
			10.8.6	Determinación de los datos modales con la gráfica de Nyquist	10-38
			10.8.7	Medición de modos	10-39
			10.9	Monitoreo y diagnóstico de la condición de una máquina	10-42
			10.9.1	Criterios de severidad de vibración	10-42
			10.9.2	Técnicas de mantenimiento de máquinas	10-42
			10.9.3	Técnicas de monitoreo de la condición de máquinas	10-44
			10.9.4	Técnicas de monitoreo de vibración	10-45
			10.9.5	Sistemas de instrumentación	10-50
			10.9.6	Selección del parámetro de monitoreo	10-50
			10.10	Ejemplos resueltos utilizando MATLAB	10-51
				Resumen del capítulo	10-54
				Referencias	10-54
				Preguntas de repaso	10-55
				Problemas	10-58
				Proyectos de diseño	10-64
CAPÍTULO 11					
Métodos de integración numérica en el análisis de vibración 11-1					
11.1	Introducción	11-2			
11.2	Método de diferencia finita	11-3			
11.3	Método de diferencia central para sistemas de un solo grado de libertad	11-4			
11.4	Método de Runge-Kutta para sistemas de un solo grado de libertad	11-7			
11.5	Método de diferencia central para sistemas de varios grados de libertad	11-8			
11.6	Método de diferencia finita para sistemas continuos	11-12			
11.6.1	Vibración longitudinal de barras	11-12			
11.6.2	Vibración transversal de vigas	11-16			
11.7	Método de Runge-Kutta para sistemas de varios grados de libertad	11-20			
11.8	Método de Houbolt	11-22			

11.9	Método de Wilson	11-25	
11.10	Método de Newmark	11-28	
11.11	Ejemplos resueltos utilizando MATLAB	11-31	
	Resumen del capítulo	11-37	
	Referencias	11-37	
	Preguntas de repaso	11-38	
	Problemas	11-40	

CAPÍTULO 12

Método de los elementos finitos 12-1			
12.1	Introducción	12-2	
12.2	Ecuaciones de movimiento de un elemento	12-3	
12.3	Matriz de masa, matriz de rigidez y vector de fuerza	12-5	
	12.3.1 Elemento de una barra	12-5	
	12.3.2 Elemento de torsión	12-7	
	12.3.3 Elemento de una viga	12-8	
12.4	Transformación de matrices y vectores de un elemento	12-11	
12.5	Ecuaciones de movimiento del sistema completo de elementos finitos	12-13	
12.6	Incorporación de condiciones límite	12-15	
12.7	Matrices de masa consistente y de masa concentrada	12-24	
	12.7.1 Matriz de masa concentrada para un elemento de una barra	12-24	
	12.7.2 Matriz de masa concentrada para un elemento de una viga	12-24	
	12.7.3 Matrices de masa concentrada en comparación con matrices de masa consistente	12-25	
12.8	Ejemplos resueltos utilizando MATLAB	12-27	
	Resumen del capítulo	12-30	
	Referencias	12-30	
	Preguntas de repaso	12-31	
	Problemas	12-33	

APÉNDICE A

Relaciones matemáticas y propiedades de materiales	A1
-----------------------------------------------------------	-----------

APÉNDICE B

Deflexión de vigas y placas	A4
------------------------------------	-----------

APÉNDICE C

Matrices	A6
-----------------	-----------

APÉNDICE D

Transformada de Laplace	A13
--------------------------------	------------

APÉNDICE E

Unidades	A21
-----------------	------------

APÉNDICE F

Introducción a MATLAB	A24
------------------------------	------------

Material en inglés en sitio web

CAPÍTULO 13

Nonlinear Vibration	13-1
----------------------------	-------------

CAPÍTULO 14

Random Vibration	14-1
-------------------------	-------------