

ROBERT L. NORTON

DISEÑO DE MAQUINARIA



Tercera edición

Síntesis y análisis
de máquinas y mecanismos

**Mc
Graw
Hill**



DISEÑO DE MAQUINARIA

SÍNTESIS Y ANÁLISIS DE MÁQUINAS Y MECANISMOS

Tercera edición

Robert L. Norton

Worcester Polytechnic Institute
Worcester, Massachusetts

Traducción

Rodolfo Navarro Salas

Traductor profesional

Revisión técnica

M.C. José de Jesús Villalobos Luna

Jefe del Departamento de Diseño de Sistemas Mecánicos
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
UANL

Ángel Hernández Fernández

Departamento de Ingeniería Mecánica
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Unidad Culhuacán
Instituto Politécnico Nacional

M.C. Sergio Alberto Ruiz Guzmán

Catedrático de la materia de mecanismos
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
UANL

Sergio Saldaña Sánchez

Departamento de Ingeniería Mecánica
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Unidad Culhuacán
Instituto Politécnico Nacional



MÉXICO • BOGOTÁ • BUENOS AIRES • CARACAS • GUATEMALA
LISBOA • MADRID • NUEVA YORK • SAN JUAN • SANTIAGO
AUCKLAND • LONDRES • MILÁN • MONTREAL • NUEVA DELHI
SAN FRANCISCO • SINGAPUR • ST. LOUIS • SIDNEY • TORONTO

CONTENIDO

Prefacio de la tercera edición	XVII
Prefacio de la primera edición	XIX

PARTE I CINEMÁTICA Y MECÁNICA 1

Capítulo 1 Introducción 3

1.0 Propósito	3
1.1 Cinemática y cinética	3
1.2 Mecanismos y máquinas	4
1.3 Una breve historia de la cinemática	4
1.4 Aplicaciones de la cinemática	6
1.5 El proceso de diseño	7
<i>Diseño, invención, creatividad</i>	7
<i>Identificación de la necesidad</i>	8
<i>Investigación preliminar</i>	8
<i>Planteamiento de objetivos</i>	8
<i>Especificaciones de desempeño</i>	9
<i>Ideación e invención</i>	9
<i>Análisis</i>	10
<i>Selección</i>	11
<i>Diseño detallado</i>	11
<i>Creación de prototipos y pruebas</i>	12
<i>Producción</i>	12
1.6 Otros enfoques al diseño	13
<i>Diseño axiomático</i>	13
1.7 Soluciones múltiples	13
1.8 Factores humanos en la ingeniería	14
1.9 El reporte en ingeniería	14
1.10 Unidades	14
1.11 Lo que viene	16
1.12 Referencias	16
1.13 Bibliografía	17

Capítulo 2 Fundamentos de cinemática 21

2.0 Introducción	21
2.1 Grados de libertad (GDL) o movilidad	21
2.2 Tipos de movimiento	22
2.3 Eslabones, juntas y cadenas cinemáticas	23
2.4 Determinación del grado de libertad o movilidad	26
<i>Grado de libertad (movilidad) en mecanismos planos</i>	27
<i>Grado de libertad (movilidad) en mecanismos espaciales</i>	28
2.5 Mecanismos y estructuras	29
2.6 Síntesis de número	30
2.7 Paradojas	34
2.8 Isómeros	35
2.9 Transformación de eslabonamientos	36
2.10 Movimiento intermitente	37
2.11 Inversión	39
2.12 La condición de Grashof	42
<i>Clasificación del eslabonamiento de cuatro barras</i>	45
2.13 Eslabonamientos de más de cuatro barras	47
<i>Eslabonamientos de cinco barras engranadas</i>	47
<i>Eslabonamientos de seis barras</i>	48
<i>Criterios de rotabilidad tipo Grashof para eslabonamientos de orden alto</i>	48

2.14	Los resortes como eslabones	50
2.15	Mecanismos flexibles	50
2.16	Sistemas microelectromecánicos (MEMS)	52
2.17	Consideraciones prácticas	53
	<i>Juntas de pasador contra correderas y semijuntas</i>	53
	<i>¿En voladizo o en doble voladizo?</i>	55
	<i>Eslabones cortos</i>	55
	<i>Relación de apoyo</i>	56
	<i>Correderas comerciales</i>	57
	<i>Eslabonamientos contra levas</i>	57
2.18	Motores y propulsores	57
	<i>Motores eléctricos</i>	58
	<i>Motores neumáticos e hidráulicos</i>	62
	<i>Cilindros neumáticos e hidráulicos</i>	62
	<i>Solenoides</i>	63
2.19	Referencias	63
2.20	Problemas	64

Capítulo 3 Síntesis gráfica de eslabonamientos 75

3.0	Introducción	75
3.1	Síntesis	75
3.2	Generación de función, trayectoria y movimiento	77
3.3	Condiciones límite	78
3.4	Síntesis dimensional	80
	<i>Síntesis de dos posiciones</i>	81
	<i>Síntesis de tres posiciones con pivotes móviles especificados</i>	86
	<i>Síntesis de tres posiciones con los pivotes móviles alternos</i>	87
	<i>Síntesis de tres posiciones con pivotes fijos especificados</i>	89
	<i>Síntesis de posición para más de tres posiciones</i>	93
3.5	Mecanismos de retorno rápido	93
	<i>Mecanismo de retorno rápido de cuatro barras</i>	93
	<i>Mecanismo de retorno rápido de seis barras</i>	95
3.6	Curvas de acoplador	98
3.7	Cognados	106
	<i>Movimiento paralelo</i>	110
	<i>Cognados de cinco barras engranados del mecanismo de cuatro barras</i>	112
3.8	Mecanismos de línea recta	113
	<i>Diseño óptimo de mecanismos de cuatro barras de línea recta</i>	115
3.9	Mecanismos con detenimiento	118
	<i>Mecanismos con detenimiento simple</i>	118
	<i>Mecanismos con doble detenimiento</i>	120
3.10	Otros mecanismos útiles	121
	<i>Movimiento del pistón de velocidad constante</i>	122
	<i>Movimiento de balancín con excursión angular grande</i>	124
	<i>Movimiento circular con centro remoto</i>	124
3.11	Referencias	125
3.12	Bibliografía	127
3.13	Problemas	128
3.14	Proyectos	138

Capítulo 4 Análisis de posición 143

4.0	Introducción	143
4.1	Sistemas de coordenadas	144
4.2	Posición y desplazamiento	145
	<i>Posición</i>	145
	<i>Transformación de coordenadas</i>	145
	<i>Desplazamiento</i>	146
4.3	Traslación, rotación y movimiento complejo	147
	<i>Traslación</i>	147
	<i>Rotación</i>	147

	<i>Movimiento complejo</i>	148
	<i>Teoremas</i>	149
4.4	Análisis gráfico de la posición de mecanismos articulados	149
4.5	Análisis algebraico de posición de mecanismos	150
	<i>Representación en configuración de lazo vectorial de mecanismos</i>	151
	<i>Números complejos como vectores</i>	152
	<i>Ecuación de lazo vectorial para un mecanismo de cuatro barras</i>	153
4.6	Solución de posición de un mecanismo de cuatro barras de manivela-corredera	156
4.7	Solución de posición de un mecanismo de manivela-corredera invertido ..	158
4.8	Mecanismos de más de cuatro barras	160
	<i>Mecanismo de cinco barras engranado</i>	160
	<i>Mecanismos de seis barras</i>	162
4.9	Posición de cualquier punto en un mecanismo	163
4.10	Ángulos de transmisión	164
	<i>Valores extremos del ángulo de transmisión</i>	165
4.11	Posiciones de agarrotamiento	166
4.12	Circuitos y ramas en mecanismos	168
4.13	Método de solución de Newton-Raphson	168
	<i>Determinación de una raíz unidimensional (método de Newton)</i>	169
	<i>Determinación de raíces multidimensionales (método de Newton-Raphson)</i>	170
	<i>Solución de Newton-Raphson para el mecanismo de cuatro barras</i>	171
	<i>Resolvedores de ecuaciones</i>	172
4.14	Referencias	172
4.15	Problemas	173

Capítulo 5 Síntesis analítica de mecanismos 185

5.0	Introducción	185
5.1	Tipos de síntesis cinemática	185
5.2	Puntos de precisión	186
5.3	Generación de movimiento de dos posiciones mediante síntesis analítica ..	186
5.4	Comparación de síntesis analítica y gráfica de dos posiciones	192
5.5	Solución de ecuaciones simultáneas	194
5.6	Generación de movimiento de tres posiciones mediante síntesis analítica ..	196
5.7	Comparación de síntesis analítica y gráfica de tres posiciones	200
5.8	Síntesis para la localización de un pivote fijo especificado	204
5.9	Círculos con punto en el círculo y punto en el centro	208
5.10	Síntesis analítica de cuatro y cinco posiciones	210
5.11	Síntesis analítica en un generador de trayectoria con temporización prescrita	211
5.12	Síntesis analítica de un generador de función de cuatro barras	212
5.13	Otros métodos de síntesis de mecanismos	214
	<i>Métodos de puntos de precisión</i>	216
	<i>Métodos de ecuación de curva de acoplador</i>	217
	<i>Métodos de optimización</i>	218
5.14	Referencias	220
5.15	Problemas	222

Capítulo 6 Análisis de la velocidad 231

6.0	Introducción	231
6.1	Definición de velocidad	231
6.2	Análisis gráfico de la velocidad	233
6.3	Centros instantáneos de velocidad	237
6.4	Análisis de velocidad con centros instantáneos	243
	<i>Relación de velocidad angular</i>	244
	<i>Ventaja mecánica</i>	246
	<i>Utilización de los centros instantáneos en el diseño de mecanismos</i>	248
6.5	Centrodos	249
	<i>Mecanismo "sin eslabones"</i>	252
	<i>Cúspides</i>	252

6.6	Velocidad de deslizamiento	253
6.7	Soluciones analíticas para el análisis de velocidad	256
	<i>Mecanismo de cuatro barras con juntas de pasador</i>	256
	<i>Manivela-corredera de cuatro barras</i>	258
	<i>Mecanismo de cuatro barras manivela-corredera invertido</i>	260
6.8	Análisis de velocidad del mecanismo de cinco barras engranado	262
6.9	Velocidad de cualquier punto de un mecanismo	263
6.10	Referencias	264
6.11	Problemas	264
Capítulo 7 Análisis de la aceleración		287
7.0	Introducción	287
7.1	Definición de la aceleración	287
7.2	Análisis gráfico de la aceleración	290
7.3	Soluciones analíticas para el análisis de la aceleración	294
	<i>Mecanismo de cuatro barras con juntas de pasador</i>	294
	<i>Mecanismo de cuatro barras manivela-corredera</i>	296
	<i>Aceleración de Coriolis</i>	298
	<i>Mecanismo de cuatro barras manivela-corredera invertido</i>	300
7.4	Análisis de aceleración del mecanismo de cinco barras engranado	302
7.5	Aceleración de cualquier punto de un mecanismo	303
7.6	Tolerancia humana a la aceleración	305
7.7	Sacudimiento	307
7.8	Mecanismos de n barras	309
7.9	Referencias	309
7.10	Problemas	309
Capítulo 8 Diseño de levas		329
8.0	Introducción	329
8.1	Terminología de levas	330
	<i>Tipo de movimiento de seguidor</i>	330
	<i>Tipo de cierre de junta</i>	331
	<i>Tipo de seguidor</i>	332
	<i>Tipo de leva</i>	333
	<i>Tipo de restricciones de movimiento</i>	334
	<i>Tipo de programa de movimiento</i>	334
8.2	Diagramas S V A J	335
8.3	Diseño de levas con doble detenimiento: selección de las funciones S V A J ..	335
	<i>Ley fundamental de diseño de levas</i>	338
	<i>Movimiento armónico simple (MAS)</i>	339
	<i>Desplazamiento cicloidal</i>	340
	<i>Funciones combinadas</i>	343
	<i>Familia SCCA de funciones de doble detenimiento</i>	347
	<i>Funciones polinomiales</i>	354
	<i>Aplicaciones de polinomios con doble detenimiento</i>	355
8.4	Diseño de una leva con detenimiento simple: selección de las funciones S V A J ..	358
	<i>Aplicaciones de polinomios a detenimiento simple</i>	361
	<i>Efecto de la asimetría en la solución polinomial al caso de subida-bajada</i>	362
8.5	Movimiento de trayectoria crítica (CPM)	366
	<i>Polinomios utilizados para movimiento de trayectoria crítica</i>	367
8.6	Dimensionamiento de la leva: ángulo de presión y radio de curvatura	373
	<i>Ángulo de presión: seguidores de rodillos trasladantes</i>	374
	<i>Selección del radio de un círculo primario</i>	376
	<i>Momento de volteo: seguidor de cara plana trasladante</i>	377
	<i>Radio de curvatura: seguidor de rodillo trasladante</i>	378
	<i>Radio de curvatura: seguidor de cara plana trasladante</i>	382
8.7	Consideraciones en la fabricación de levas	386
	<i>Maquinado de una leva</i>	386
	<i>Desempeño real de la leva comparado con el desempeño teórico</i>	387
8.8	Consideraciones prácticas de diseño	390
	<i>¿Seguidor trasladante u oscilante?</i>	390
	<i>¿Con cierre de forma o de fuerza?</i>	391

	¿Leva radial o axial?	391
	¿Seguidor de rodillo o de cara plana?	392
	¿Con detenimiento o sin detenimiento?	392
	¿Rectificar o no rectificar?	393
	¿Lubricar o no lubricar?	393
8.9	Referencias	393
8.10	Problemas	394
8.11	Proyectos	398

Capítulo 9 Trenes de engranes 403

9.0	Introducción	403
9.1	Cilindros rodantes	403
9.2	Ley fundamental de engranaje	405
	<i>La forma de involuta en dientes de engrane</i>	405
	<i>Ángulo de presión</i>	407
	<i>Cambio de la distancia entre centros</i>	407
	<i>Juego entre dientes</i>	409
9.3	Nomenclatura de diente de engrane	410
9.4	Interferencia y socavado	411
	<i>Formas de diente de cabeza desigual</i>	413
9.5	Relación de contacto	413
9.6	Tipos de engranes	415
	<i>Engranes rectos, helicoidales y de espina de pescado</i>	415
	<i>Tornillos sinfín y engranes de tornillo sinfín</i>	416
	<i>Cremallera y piñón</i>	417
	<i>Engranes cónicos e hipoidales</i>	418
	<i>Engranes no circulares</i>	419
	<i>Transmisiones de banda y cadena</i>	419
9.7	Trenes de engranes simples	421
9.8	Trenes de engranes compuestos	422
	<i>Diseño de trenes compuestos</i>	423
	<i>Diseño de trenes compuestos revertidos</i>	423
	<i>Un algoritmo para el diseño de trenes de engranes compuestos</i>	426
9.9	Trenes de engranes epicíclicos o planetarios	429
	<i>Método tabular</i>	431
	<i>Método de la fórmula</i>	435
9.10	Eficiencia de los trenes de engranes	436
9.11	Transmisiones	439
9.12	Diferenciales	443
9.13	Referencias	446
9.14	Bibliografía	446
9.15	Problemas	446

PARTE II DINÁMICA DE MAQUINARIA 457

Capítulo 10 Fundamentos de dinámica 459

10.0	Introducción	459
10.1	Leyes del movimiento de Newton	459
10.2	Modelos dinámicos	460
10.3	Masa	460
10.4	Momento de masa y centro de gravedad	461
10.5	Momento de inercia de masa (segundo momento de masa)	463
10.6	Teorema de ejes paralelos (teorema de transferencia)	464
10.7	Determinación del momento de inercia de masa	464
	<i>Métodos analíticos</i>	465
	<i>Métodos experimentales</i>	465
10.8	Radio de giro	466
10.9	Modelado de eslabones rotatorios	466
10.10	Centro de percusión	467
10.11	Modelos dinámicos con parámetros concentrados	469
	<i>Constante de resorte</i>	470
	<i>Amortiguamiento</i>	470

10.12	Sistemas equivalentes	472
	<i>Amortiguadores combinados</i>	473
	<i>Combinación de resortes</i>	473
	<i>Combinación de masas</i>	474
	<i>Relaciones de palanca y engranes</i>	474
10.13	Métodos de solución	479
10.14	Principio de d'Alembert	480
10.15	Métodos de energía: trabajo virtual	481
10.16	Referencias	483
10.17	Problemas	484
Capítulo 11 Análisis de fuerzas dinámicas		489
11.0	Introducción	489
11.1	Método de solución newtoniano	489
11.2	Un solo eslabón en rotación pura	490
11.3	Análisis de fuerzas de un mecanismo articulado de tres barras de manivela-corredera	492
11.4	Análisis de fuerzas de un mecanismo de cuatro barras	497
11.5	Análisis de fuerzas de un mecanismo de cuatro barras de manivela-corredera	503
11.6	Análisis de fuerzas del mecanismo de manivela-corredera invertido	505
11.7	Análisis de fuerzas: mecanismos con más de cuatro barras	508
11.8	Fuerzas y par de torsión de sacudimiento	508
11.9	Programa FOURBAR	509
11.10	Análisis de fuerzas en mecanismos mediante métodos de energía	510
11.11	Control del par de torsión de entrada: volantes	511
11.12	Índice de transmisión de fuerza en un mecanismo	517
11.13	Consideraciones prácticas	518
11.14	Referencias	519
11.15	Problemas	519
11.16	Proyectos	529
Capítulo 12 Balanceo		531
12.0	Introducción	531
12.1	Balanceo estático	531
12.2	Balanceo dinámico	534
12.3	Balanceo de mecanismos articulados	538
	<i>Balanceo completo de fuerzas de mecanismos articulados</i>	539
12.4	Efecto del balanceo en fuerzas de sacudimiento y fuerzas en pasadores ..	542
12.5	Efecto del balanceo en el par de torsión de entrada	543
12.6	Balanceo del momento de sacudimiento en mecanismos	544
12.7	Medición y corrección del desbalanceo	547
12.8	Referencias	549
12.9	Problemas	550
Capítulo 13 Dinámica de motores		557
13.0	Introducción	557
13.1	Diseño del motor	557
13.2	Cinemática del mecanismo de manivela-corredera	563
13.3	Fuerzas del gas y pares de torsión de gas	568
13.4	Masas equivalentes	570
13.5	Fuerzas de inercia y de sacudimiento	573
13.6	Pares de torsión de inercia y de sacudimiento	576
13.7	Par de torsión total del motor	577
13.8	Volantes	577
13.9	Fuerzas de pasador en un motor de un cilindro	579
13.10	Balanceo del motor de un cilindro	585
	<i>Efecto del balanceo del cigüeñal en las fuerzas de los pasadores</i>	588

13.11	Cambios y relaciones de diseño	589
	<i>Relación biela/manivela</i>	589
	<i>Relación diámetro interno del cilindro/carrera</i>	589
	<i>Materiales</i>	590
13.12	Bibliografía	590
13.13	Problemas	591
13.14	Proyectos	595
Capítulo 14 Motores multicilíndricos		597
14.0	Introducción	597
14.1	Diseños de motores multicilíndricos	597
14.2	Diagrama de fase de manivelas	600
14.3	Fuerzas de sacudimiento en motores en línea	604
14.4	Par de torsión de inercia en motores en línea	605
14.5	Momento de sacudimiento en motores en línea	606
14.6	Encendido uniforme	608
	<i>Motor con un ciclo de dos tiempos</i>	609
	<i>Motor de cuatro tiempos</i>	610
14.7	Configuraciones de motores en V	618
14.8	Configuraciones de motores opuestas	626
14.9	Balanceo de motores multicilíndricos	626
	<i>Balanceo secundario en motores de cuatro cilindros en línea</i>	630
	<i>Motor de dos cilindros perfectamente balanceado</i>	632
14.10	Referencias	632
14.11	Bibliografía	633
14.12	Problemas	633
14.13	Proyectos	634
Capítulo 15 Dinámica de levas		637
15.0	Introducción	637
15.1	Análisis de fuerzas dinámicas del sistema leva-seguidor con cierre de fuerza	637
	<i>Respuesta no amortiguada</i>	638
	<i>Respuesta amortiguada</i>	640
15.2	Resonancia	646
15.3	Análisis de fuerzas cinetostáticas del sistema seguidor-leva con cierre de fuerza	648
15.4	Análisis de fuerzas cinetostáticas del sistema de leva-seguidor con cierre de forma	651
15.5	Par de torsión cinetostático en un árbol de levas	655
15.6	Medición de fuerzas dinámicas y aceleraciones	659
15.7	Consideraciones prácticas	660
15.8	Referencias	660
15.9	Bibliografía	661
15.10	Problemas	661
Capítulo 16 Diseño de ingeniería		665
16.0	Introducción	665
16.1	Estudio de un caso de diseño	665
16.2	Conclusión	670
16.3	Referencias	670
Apéndice A Programas de computadora		671
A.0	Introducción	671
A.1	Información general	672
A.2	Operación general de los programas	673
A.3	Programa FOURBAR	678
A.4	Programa FIVEBAR	687
A.5	Programa SIXBAR	688
A.6	Programa SLIDER	691

A.7	Programa DYNACAM	693
A.8	Programa ENGINE	698
A.9	Programa MATRIX	705
Apéndice B	Propiedades de materiales	707
Apéndice C	Propiedades geométricas	711
Apéndice D	Características de resortes	713
Apéndice E	Atlas de curvas de acoplador para mecanismos de cinco barras engranados	717
Apéndice F	Respuestas de problemas seleccionados	723
	Índice	737
	Contenido del CD-ROM	750