

werktuigkundige systemen

Jan C. Cool

© Delft Academic Press

Paperback herdruk 2021

Derde druk 1992, 1997, 2003, 2006, 2008, 2011, 2013

Eerste druk 1987

Uitgegeven door

Delft Academic Press (VSSD uitgeverij)

Leeghwaterstraat 42, 2628 CA Delft, The Netherlands

tel. +31 15 27 82124

www.delftacademicpress.nl/m005.php

Voor docenten die dit boek in cursusverband gebruiken zijn de illustraties in het boek digitaal beschikbaar. Men kan de collectie aanvragen bij dap@vssd.nl

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of op enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

Printed in the Netherlands

NUR 978

Trefw.: werktuigkunde, systeemleer

ISBN 97890-6562-4338

Voorwoord

De oorsprong van dit boek is een college geweest, waarin op eenvoudige wijze de werking van bestaande apparaten en machines werd geanalyseerd. In een later stadium is deze stof uitgebreid met een aantal constructieve bijzonderheden. Dit totaal is opgenomen in het boek 'Inleiding Werktuigbouwkunde'.

Het boek is thans herschreven op basis van de systeemleer en de modelvorming. Er zijn hoofdstukken toegevoegd en een aantal andere is uitgebreid. De fundamentele principes bij ontwerpen komen in dit boek 'Werktuigkundige Systemen' meer naar voren.

In het eerste hoofdstuk is de systeemleer toegepast op werktuigkundige constructies.

In het hoofdstuk over modelvorming wordt de weg aangegeven om de complexe fysische werkelijkheid om te zetten in een overzichtelijk werkingsinzicht. De hier geïntroduceerde beschouwing met vierpolen maakt het eenvoudig om belaste systemen te berekenen.

In het hoofdstuk mechanische versterkers is de modelvorming toegepast. Verschillende manieren om kracht/moment te versterken zijn aan de hand van blokschema's toegelicht. De invloed van de last komt naar voren.

Daarnaast is een hoofdstuk gewijd aan de belangrijke begrippen sterkte en stijfheid.

Omdat de materiaalkeuze bij een ontwerp vaak van doorslaggevende betekenis is, wordt in een afzonderlijk hoofdstuk inzicht gegeven in het hoe en waarom van bepaalde materiaaleigenschappen.

Het hoofdstuk over comparalogie laat de problemen zien bij het verkleinen of vergroten van reeds bestaande constructies en bij de vaak noodzakelijke modelproeven.

Er is ruim aandacht gegeven aan wrijving en weerstand, alsmede aan de middelen om deze te vergroten of te verkleinen.

Omdat veren tot de essentiële werktuigonderdelen behoren is een hoofdstuk gewijd aan de toepassing van veren in een ontwerp. Hier is het belangrijke begrip voorspanning behandeld.

Het hoofdstuk over energie geeft een inleiding in de 'warme werktuigbouwkunde'. Hierin is een technologisch rendement beschreven dat aangeeft in welke mate een machine warmtetechnisch goed is geconstrueerd.

Tenslotte wordt aangegeven op welke wijze een motor met een last moet worden gekoppeld. Ook hier wordt een nuttig gebruik gemaakt van de vierpool-beschrijving.

In zijn huidige vorm wordt het boek gebruikt bij de opleiding van ingenieurs van de faculteiten der Werktuigbouwkunde en Maritieme Techniek en van het Industrieel Ontwerpen. Dit onderwijs wordt verzorgd vanuit de sectie instrumenten van de vakgroep voor Werktuigkundige Meet- en Regeltechniek, waar veel praktische ontwerpervaring op het gebied van de proteseologie aanwezig is.

De schrijver meent dat dit boek gebruikt zal kunnen worden bij verschillende soorten technisch hoger onderwijs; zowel door het globale overzicht van de gehele werktuigbouwkunde, de introductie van systeemleer en modelvorming, als door de specialistische behandeling van enkele bijzondere onderwerpen.

De schrijver betreurt het dat ir. P.V. Pistecky niet aan de bovengenoemde uitbreiding van het boek kon meewerken. Veel dank aan ir. D.H. Plettenburg voor zijn bereidwillige steun en voor de medewerkers van de VSSD voor de prettige samenwerking bij het tot stand komen van dit boek.

Alle opmerkingen betreffende dit boek zijn welkom bij de schrijver.

september 1987

J.C. Cool

Bij de tweede druk

In de nieuwe druk zijn de systeemtechnische overwegingen, die ten grondslag moeten liggen aan het ontwerp van werktuigkundige constructies, uitgebreid.

In een hoofdstuk Stabiliteit is aangegeven waar de grenzen liggen van goed mechanisch functioneren. De theorie is vooral toegepast op voertuigen en vaartuigen. De stabiliteitsvoorschriften leiden ook tot ontwerpregels voor de energetisch voordelige indifferente systemen.

In het boek worden nu ook de dynamische systemen geïntroduceerd. Juist hier leidt een modelvorming in blokschema's tot een goed inzicht in de functionele werking. Er is veel aandacht gegeven aan het onderscheiden van de frequentiegebieden waarbinnen een systeem zich anders manifesteert. Voorts zijn op een aantal plaatsen in het boek verbeteringen en aanvullingen aangebracht.

oktober 1989

J.C. Cool

Bij de derde druk

In deze druk is een nieuw hoofdstuk toegevoegd over evenwichten. Reden voor opname van dit hoofdstuk is dat in het onderwijs blijkt steeds weer dat veel studenten bij deze elementaire stof moeilijkheden ondervinden.

Verder is een flink aantal ogenschijnlijk saaie blokschema's wat 'opgefrist', waardoor ze hopelijk beter toegankelijk geworden zijn.

augustus 1992

J.C. Cool

Inhoud

1. SYSTEMEN	11
1.1. Inleiding	11
1.2. Begrippen	11
1. Systeem en omgeving / 2. Systeembeschrijving / 3. Statische en dynamische systemen / 4. Statische systemen / 5. Systeem in rust / 6. Evenwichtsvoorwaarden	
1.3. Uitwendige krachten/momenten	17
1. Systeemgrens / 2. Contactkracht bij punt- of lijncontact / 3. Contactkracht bij vlakcontact / 4. Contactkracht bij stromende media / 5. Contactkracht/moment bij inklemming / 6. Reactiekrachten en reactiemomenten / 7. Omgeving	
1.4. Inwendige krachten/momenten	23
1. Bepalen van inwendige krachten/momenten / 2. Riemoverbrengingen / 3. Tandwieloverbrengingen / 4. Momentversterking algemeen	
1.5. Toepassing	28
1. Een systeem / 2. Deelsystemen	
1.6. Optimaliseren	30
1. Functionele optimalisering / 2. Geometrische optimalisering / 3. Technische optimalisering / 4. Ergonomische optimalisering / 5. Technologische optimalisering	
1.7. Samenvatting	32
2. MODELVORMING	34
2.1. Inleiding	34
2.2. Blokschema's	35
1. Voordelen / 2. Definities / 3. Totale overbrengingsverhoudingen / 4. Herleiden van blokschema's / 5. Niet-lineariteiten	
2.3. Interactie	43
1. Belaste systemen / 2. Invloed van de omgeving / 3. Vierpolen	
2.4. Benaderingen	48
1. Stijfheid / 2. Wrijving / 3. Speling / 4. Tweedimensionaliteit / 5. Dynamische krachten / 6. Overzicht	
2.5. Voorbeelden	51
1. Blikopener / 2. Elektromotor	
2.6. Samenvatting	54
3. EVENWICHTEN	55
3.1. Inleiding	55
3.2. Kracht, krachtcomponenten en resultante van krachten	56
1. Definiëring van een kracht / 2. Componenten van een kracht / 3. Verschuiven van een kracht / 4. Samenstellen van krachten / 5. Samenstellen van evenwijdige krachten	
3.3. Evenwicht van een systeem	68
1. Principiële opzet / 2. Algemene evenwichtsvoorwaarden / 3. Gebruik van de evenwichtsvoorwaarden / 4. Belang van modelvorming / 5. Evenwicht van systeem	

met drie uitwendige krachten / 6. Evenwicht van systeem met drie evenwijdige uitwendige krachten. / 7. Algemene beschrijving van evenwicht / 8. Voorbeelden	
3.4. Contactkrachten	81
1. Aangrijpingspunt / 2. Normaalkracht en wrijvingskracht	
3.5. Evenwicht van twee gekoppelde systemen	83
3.6. Evenwicht van meerdere gekoppelde systemen	85
1. Procedure / 2. Voorbeelden	
4. STABILITEIT	95
4.1. Inleiding	95
4.2. Theorie	95
1. Begrippen / 2. Stabiliteitsbalken / 3. Stabiliteitsgebied / 4. Stabiliteit en blokschema's	
4.3. Stabiliteit van vaartuigen	103
1. Inleiding / 2. Drukkingspunt / 3. Stabiliteit / 4. Invloed van de vorm	
4.4. Stabiliteit van voertuigen	109
1. Het weggedrag van een geblokkeerd wiel / 2. Het weggedrag van een vrij rollend wiel / 3. Het weggedrag van een geremd rollend wiel / 4. Stabiliteit van geremde voertuigen	
4.5. Stabiliserende systemen	115
1. Stabiliseren met massa / 2. Stabiliseren met veer / 3. Stabiliseren met wrijving	
4.6. Indifferente systemen	118
4.7. Overzicht	120
5. MECHANISCHE VERSTERKERS	121
5.1. Inleiding	121
5.2. Hefboomwerking	121
1. Overbrengingen voor translerende beweging / 2. Overbrengingen voor roterende beweging / 3. Bijzondere overbrengingen	
5.3. Krachtontbinding	129
5.4. Hellend vlak	131
1. Hellend vlak zonder wrijving / 2. Hellend vlak met wrijving / 3. Schroefdraad, theorie / 4. Schroefdraad, toepassingen / 5. Roterende overbrengingen / 6. Hydraulisch hellend vlak	
5.5. Meekoppeling	144
5.6. Servosystemen	147
1. Algemeen / 2. Hydraulisch servosysteem / 3. Pneumatische versterker	
5.7. Compensatie	150
1. Zwaartekrachtcompensatie / 2. Veerkrachtcompensatie / 3. Algemeen	
5.8. Samenvatting	154
6. SPANNINGEN EN VERVORMINGEN	156
6.1. Spanningen	156
6.2. Vervormingen, wet van Hooke	161
6.3. Sterkte en stijfheid	166

7. MATERIALEN	171
7.1. Atomaire opbouw van materialen	171
1. Typen bindingen / 2. Bindingskrachten en bindingsenergie / 3. Rangschikking van de atomen / 4. Elastische en plastische vervormingen	
7.2. Materiaaleigenschappen	177
1. Onderverdeling van materialen / 2. Metalen / 3. Keramische materialen / 4. Polymeren / 5. Composieten	
8. COMPAROLOGIE	189
8.1. Inleiding	189
1. Schaalfactoren / 2. Afhankelijke schaalfactoren / 3. Moeilijkheden bij modelproeven	
8.2. Statische schaalwetten	191
1. Belasting door uitwendige krachten / 2. Belasting door zwaartekracht / 3. Belasting door pneumatische of hydraulische drukken / 4. Belasting op knik / 5. Stijfheid	
8.3. Dynamische schaalwetten	202
1. Heen en weer gaande massa's / 2. Roterende massa / 3. Eigenfrequentie	
8.4. Energetische schaalwetten	208
8.5. Vertakking en onderverdeling	211
8.6. Kental	212
1. Schaalwet en kental / 2. Invloed van de vorm / 3. Stromingen in vloeistoffen en gassen / 4. Moeilijkheden bij modelproeven	
9. WRIJVING EN WEERSTAND	218
9.1. Droge wrijving	218
1. Theorie / 2. Verminderen droge wrijving / 3. Vergroten droge wrijving / 4. Remweg	
9.2. Vloeistofwrijving	228
1. Theorie / 2. Hydrodynamische aslagers / 3. Luchtweerstand, vloeistofweerstand / 4. Draagvlakken / 5. Verminderen luchtweerstand / 6. Leidingweerstand	
9.3. Rollende wrijving	236
1. Modelvorming / 2. Toepassingen / 3. Afrollende ringen	
10. VEREN	244
10.1. Algemeen	244
1. Veercharacteristieken / 2. Werkpunt / 3. Samenwerkende veren, parallelschakeling / 4. Samenwerkende veren, serieschakeling / 5. Samenwerkende veren, nadere beschouwing / 6. Voorspanning	
10.2. Energieopslag in veren	254
1. Theorie / 2. Energieopslag, invloed van de vorm	
10.3. Veerkeuze	260
1. Invloed van de ontwerpeisen / 2. Invloed van de overbrenging / 3. Keuze van veermateriaal / 4. Veerberekening	
11. ENERGIE	269

11.1. Inleiding	269
11.2. Warmteleer	271
1. Theorie / 2. Carnot proces / 3. Eerste hoofdwet rendement	
11.3. Warmtemotoren	275
1. Zuigermotoren / 2. Turbines	
11.4. Warmtepompen	279
1. Koelprocessen / 2. Rendement / 3. Absorbtie-koelsystemen / 4. Verwarming met warmtepomp / 5. Gecombineerde verwarmings- en koelinstallatie	
11.5. Vermogens en rendementen	284
1. Algemeen / 2. Tweede hoofdwet-rendement ϵ	
11.6. Energieopslag	289
11.7. Energietransport	291
12. AANDRIJVING	294
12.1. Inleiding	294
12.2. Karakteristieken	294
1. Motorkarakteristieken / 2. Lastkarakteristieken	
12.3. Motor-last-koppeling	297
1. Directe koppeling / 2. Koppeling via een overbrenging / 3. Keuze overbrengingsverhouding / 4. Veranderende lastkarakteristieken	
12.4. Dynamisch gedrag	306
13. DYNAMISCHE SYSTEMEN	309
13.1. Inleiding	309
13.2. Signalen voor dynamische systemen	309
1. De sprongfunctie / 2. Sinusvormige signalen	
13.3. Systeembeschrijving in blokschema's	312
1. Integreernde systemen / 2. Differentiërende systemen / 3. Massawerking	
13.4. Grafische systeembeschrijving	317
1. Integreerend systeem / 2. Differentiërend systeem	
13.5. Scheidingsfrequenties	320
1. Eigenfrequentie / 2. Eigenfrequentie als scheidingsfrequentie / 3. Veer-demper systemen / 4. Gedempte massa-veer systemen	
13.6. Voorbeelden	328
1. Meetsystemen / 2. Trillingsisolatie / 3. Motor en vliegwiel / 4. Compensatie bij dynamische systemen	
14. EENHEDEN	337
LITERATUUR	341
TREFWOORDEN	342

1. Systemen

1.1. Inleiding

De systeembenadering is een universele manier van werken om iets te bestuderen. Dat 'iets' kan zeer algemeen worden opgevat. Het kan een technisch apparaat of proces zijn, maar ook een administratieve handeling, een waterhuishouding, een biologische kringloop of een sociaal gedrag. In alle gevallen wordt het te beschouwen gedeelte – dat systeem genoemd wordt – afgezonderd van zijn omgeving bestudeerd. Het systeem wordt begrensd door de systeemgrens. Het is zinvol de systeemgrens nauwkeurig vast te leggen. Binnen de systeemgrens bevindt zich het te bestuderen systeem; daarbuiten de omgeving.

In dit hoofdstuk zal de systeembenadering op mechanische werktuigen worden toegepast. De invloed van de omgeving op een mechanisch systeem is te beschrijven door een aantal krachten, momenten, verplaatsingen en hoekverdraaiingen op de systeemgrens in te voeren. De krachten en momenten die de omgeving op een systeem uitoefent worden de uitwendige krachten en momenten genoemd. In § 1.3 is toegelicht op welke wijze die worden ingevoerd en hoe daarmee verder gewerkt kan worden. Binnen het systeem werken de inwendige krachten en momenten. Hoe daarmee gewerkt kan worden en hoe de relatie met de uitwendige krachten /momenten is, staat beschreven in § 1.4.

1.2. Begrippen

1.2.1. Systeem en omgeving

De omgeving heeft invloed op het systeem en het systeem beïnvloedt de omgeving. Deze invloeden zijn veelsoortig. Het kunnen mechanische invloeden (krachten, momenten, drukken, verplaatsingen, enz.) zijn, maar ook thermische (warmtestromen, temperaturen), elektrische (spanningen, stromen, velden, enz.), magnetische en andere invloeden zijn.

De invloeden van systeem en omgeving op elkaar zijn gelijk en tegengesteld. Als de omgeving een kracht F op het systeem uitoefent, dan oefent het systeem tegelijkertijd een kracht F van gelijke grootte, tegengesteld gericht langs dezelfde werklijn op de omgeving uit. Zie figuur 1.1. Hetzelfde geldt voor momenten. Als de omgeving een moment M op een systeem uitoefent, dan oefent het systeem een even groot moment met tegengestelde draaizin op de omgeving uit. Ook voor andere dan mechanische grootheden geldt dat de onderlinge beïnvloeding van een systeem en zijn omgeving gelijk en tegengesteld is. Als bijvoorbeeld een systeem een warmtestroom Q uit de omgeving krijgt toegevoerd (dus $+Q$), dan staat de omgeving