

Samenvatting

Dynamica van vloeistofgevulde ruimtevaartuigen

Ruimtevaartprojecten zijn vaak geldverslindend: de bouw en lancering van een kleine satelliet kost al gauw tientallen miljoenen euro. Het verloren gaan van een ruimtevaartuig is dan ook een hoogst onwenselijke gebeurtenis. Daarom wordt er bij de bouw van een satelliet weinig aan het toeval overgelaten; er worden hoge veiligheidseisen gesteld en met talloze rampscenario's wordt rekening gehouden. Dit is noodzakelijk, omdat de vluchtleiding na de lancering slechts een beperkte controle over een satelliet heeft.

Helaas is anticipatie op problemen niet altijd mogelijk, omdat met betrekking tot de dynamica van ruimtevaartuigen een aantal zaken nog niet goed begrepen is. Een cruciale rol hierbij speelt de aanwezigheid van vloeistoffen (bijvoorbeeld brandstof) aan boord van een satelliet.

Ten eerste is het gedrag van vloeistoffen in een gewichtsloze omgeving anders dan op aarde. Op aarde worden vloeistoffen onder invloed van de zwaartekracht naar het zwaartepunt van de aarde getrokken en bij afwezigheid van andere krachten zal het vloeistofoppervlak in de rusttoestand horizontaal zijn. In de ruimte, waar de invloed van de zwaartekracht te verwaarlozen is, spelen capillaire krachten een belangrijke rol. Dit zijn krachten die geconcentreerd zijn op het vloeistofoppervlak en zorgen voor een zekere weerstand tegen het opbreken van het oppervlak en proberen de grootte van het oppervlak te minimaliseren (denk aan een zeepbel). Op de plek waar het vloeistofoppervlak in aanraking is met een vaste wand zorgen capillaire krachten ervoor dat de vloeistof bij de wand omhoog kruipt (of, afhankelijk van vloeistofeigenschappen en type wand, zich van de wand verwijdert); het vloeistofoppervlak en de vaste wand snijden elkaar onder een zekere hoek, de zogenaamde contacthoek. Dit effect is ook op aarde waarneembaar: in een glas water is duidelijk te zien dat het wateroppervlak schuin tegen het glas omhoog staat.

Ten tweede beïnvloeden de beweging van de satelliet en de zich aan boord bevindende klotsende vloeistof elkaar. Dit is als volgt te begrijpen: Ten einde een satelliet in een juiste baan te krijgen en te houden, zijn af en toe koerscorrecties nodig. Deze worden bereikt door het afvuren van stuurraketjes, hetgeen niet alleen de satelliet maar ook de vloeistof in beweging zet. De klotsende vloeistof, op zijn beurt, veroorzaakt krachten op de satelliet en beïnvloedt diens beweging, enzovoort. Deze complexe interactie tussen de vloeistofdynamica en de dynamica van het ruimtevaartuig (kortweg dynamische interactie genoemd) is moeilijk te voorspellen en kan vervelende gevolgen hebben, zoals in 1998 is gebeurd met de NEAR satelliet (NEAR is een acroniem voor Near Earth Asteroid Rendezvous). Deze satelliet werd gelanceerd met de bedoeling in een baan rond de asteroïde Eros te geraken en vervolgens ook een landing op dit rotsblok van $13 \times 13 \times 33$ kubieke

kilometer te maken. Onderweg naar Eros werd de satelliet tijdens een koerscorrectie uit voorzorg door de boordcomputer uitgeschakeld, omdat interne sensoren versnellingen van de satelliet registreerden die groter waren dan de veiligheid toeliet. Na nader onderzoek werden deze excessieve versnellingen toegeschreven aan het klotsen van de brandstof. Uiteindelijk heeft het tuimelen van de satelliet een vertraging van ruim een jaar in de missie veroorzaakt; de landing op Eros vond plaats op 12 februari 2001.

Ook op aarde zijn voorbeelden van dynamische interactie te vinden. Denk bijvoorbeeld aan tankwagens op de weg die gevuld met vloeistof een aanzienlijk langere remweg hebben. Aan boord van olietankers wordt juist dankbaar gebruik gemaakt van de effecten van dynamische interactie. In zogenaamde antislingertanks, mits goed ontworpen, zorgt klotsende vloeistof ten gevolge van het slingeren van het schip voor een stabiliserende werking.

Theorie, experiment en simulatie

Van oudsher is het experiment de voornaamste methode om stroming van vloeistoffen te bestuderen. Tot op de dag van vandaag zijn experimenten zeer populair. Een nieuw vliegtuigontwerp wordt dan ook nog steeds maandenlang onderworpen aan windtunneltesten. Echter, experimenten met als doel het gedrag van vloeistoffen in de ruimte beter te begrijpen zijn zeer schaars. In de eerste plaats is het natuurlijk erg lastig om deze experimenten op aarde uit te voeren, omdat de zwaartekracht in de weg zit. Dit is weliswaar te omzeilen door te gaan experimenteren in een valtoeren of in een vliegtuig dat een paraboolvlucht maakt, maar dan nog is een toestand zonder invloed van zwaartekracht slechts enkele seconden haalbaar. In de tweede plaats is het daadwerkelijk experimenteren in de ruimte vaak kostbaar en in ieder geval zeer omslachtig.

Toch komen experimenten in de ruimte voor en een bekend experiment dat in 1992 heeft plaatsgevonden is het zogenaamde Wet Satellite Model (WSM) experiment. Tijdens dit experiment werd een kleine satelliet, de zogenaamde Ejectable Ballistometer (EB), gelanceerd vanuit een MASER 5 raket en raakte vervolgens in een vrije val van 370 seconden. De EB bestond uit een cilindrische, ringvormige tank die voor de helft gevuld was met water. Tijdens de lancering werd de EB een roterende beweging om de as van de cilinder meegegeven. Uit de fysica is bekend dat een roterend lichaam evolueert naar een toestand van minimale kinetische energie. In het geval van de EB is dit een rotatie om een as loodrecht op de initiële rotatieas. Dit betekent dat enige tijd na de lancering de satelliet om al zijn assen begon te draaien en hierbij ook de aan boord zijnde vloeistof in beweging zette. Gedurende het verdere verloop van het experiment werd de rotatie om de as van de cilinder gedempt door de viskeuze vloeistof en settelde het systeem zich in een stationaire toestand. De overgang van rotatie rond de initiële as naar rotatie rond een andere as wordt een flat spin genoemd en is een bekend voorbeeld van dynamische interactie. Het WSM experiment heeft veel waardevolle data opgeleverd met betrekking tot dit complexe verschijnsel.

Halverwege de negentiende eeuw kwam er een methode bij om onderzoek te doen naar het gedrag van vloeistoffen. Rond deze tijd schreven Navier (1823) en Stokes (1845) de wiskundige vergelijkingen op die de stroming van een vloeistof beschrijven. Deze zijn gebaseerd op een aantal fysische behoudswetten, namelijk behoud van massa, impuls en energie. Ondanks de ogenschijnlijk eenvoudige vorm van de Navier-Stokes vergelijkingen,

zijn ze alleen in sterk vereenvoudigde gevallen met pen en papier op te lossen.

In de twintigste eeuw is er een derde methode bijgekomen om de stroming van vloeistoffen beter te leren begrijpen, namelijk die van de numerieke simulatie. Hierbij wordt getracht de Navier-Stokes vergelijkingen, op een benaderende manier, met behulp van de computer op te lossen. Hiertoe wordt het gebied waarin de vloeistof kan stromen verdeeld in kleine cellen; hoe meer cellen des te nauwkeuriger het resultaat (en des te langer duurt de berekening). In elk van die cellen wordt een behoudswet voor massa, impuls en energie opgesteld. Die van massabehoud is eenvoudig te begrijpen: de totale hoeveelheid vloeistof die door de rand van een cel naar binnen stroomt, moet gelijk zijn aan de totale hoeveelheid vloeistof die door de rand naar buiten stroomt. Tezamen vormen alle behoudswetten voor alle cellen een groot stelsel vergelijkingen, waaruit met behulp van de computer fysische grootheden van de vloeistof, zoals druk, snelheid en temperatuur, worden opgelost.

Dit proefschrift

In dit proefschrift wordt een methode beschreven om eerder genoemde stromingsproblemen met behulp van een computer te simuleren. Het proefschrift is opgesplitst in twee delen: in het eerste deel wordt een numeriek model ontwikkeld voor de simulatie van vloeistofstromingen in een gewichtsloze omgeving en in het tweede deel wordt dit model uitgebreid voor het simuleren van dynamische interactie. De inhoud van beide delen wordt hieronder in meer detail beschreven.

Het proefschrift begint met het formuleren van de Navier-Stokes vergelijkingen. Zoals al eerder vermeld, worden deze vergelijkingen in het vakgebied van de numerieke stromingsleer benaderend opgelost door het rekengebied (het gebied waarin de vloeistof zich beweegt) op te delen in cellen. In dit proefschrift is gekozen voor kubusvormige cellen (de kubusvormige cellen vormen samen een zogenaamd Cartesisch rekenrooster). Het voordeel van kubussen is dat het rekenrooster een overzichtelijke, regelmatige ordening bezit; elke kubus is op een zelfde manier geïoriënteerd en heeft evenveel burens als alle andere roostercellen. Dit maakt de boekhouding in het computerprogramma relatief eenvoudig (vergeleken met een rekenrooster dat niet netjes geordend is).

Nadeel van een Cartesisch rekenrooster is dat het niet altijd goed aansluit bij de geometrie van het rekengebied. Als het rekengebied bestaat uit ronde vormen, zoals bij brandstoftanks aan boord van satellieten vaak het geval is, dan snijdt de rand van het rekengebied schuin door de kubussen in het rekenrooster. Hiermee moet rekening worden gehouden bij het opstellen van de discrete (d.w.z. voor elke kubus) vergelijkingen voor massa-, impuls- en energiebehoud.

Een belangrijk onderdeel van het numeriek model is het bijhouden van de positie van het vloeistofoppervlak. In dit proefschrift wordt hiervoor gebruik gemaakt van de zogenaamde VOF methode (VOF is een acroniem voor Volume Of Fluid). Bij deze methode wordt in elke rooster cel een getal geïntroduceerd, de zogenaamde VOF functie, dat aangeeft welke fractie van die cel gevuld is met vloeistof; 0 is helemaal leeg, 1 is helemaal vol en een waarde tussen 0 en 1 geeft aan dat de desbetreffende cel een deel van het vrije oppervlak bevat (zo'n rooster cel wordt een oppervlakte cel genoemd). Het daadwerkelijke oppervlak wordt vervolgens gereconstrueerd aan de hand van de VOF functie. Dit kan heel grof door te zeggen dat in elke oppervlakte cel het vrije oppervlak

evenwijdig loopt aan het Cartesisch rooster (in dit geval zijn er in elke cel dus drie mogelijke oriëntaties van het oppervlak). Deze methode is geïntroduceerd door Hirt en Nichols. Een meer verfijnde methode, de methode van Youngs, staat toe dat het oppervlak in een oppervlaktecél ook schuin ten opzichte van het rekenrooster mag staan. Echter, deze ogenschijnlijk meer nauwkeurige methode blijkt in de praktijk erg gevoelig voor kleine verstoringen in de VOF functie, zoals wordt aangetoond in dit proefschrift. Daarom is voor de methode van Hirt en Nichols gekozen om het oppervlak te traceren.

Helaas is de originele methode van Hirt en Nichols vrij onnauwkeurig, omdat er ten gevolge van numerieke fouten nogal eens vloeistof wordt verloren of gewonnen. Bovendien raken er tijdens het transporteren van het oppervlak veel druppels los van de bulk van de vloeistof. Deze problemen, het ontbreken van massabehoud en loslatende druppels, zijn opgelost door de transportmethode in de buurt van het vrije oppervlak aan te passen. Deze gemodificeerde methode van Hirt en Nichols geeft, met name in simulaties waar de vloeistof heftig klotst, aanzienlijk betere resultaten.

Het vrije oppervlak speelt nog op een andere manier een belangrijke rol in het numeriek model. In een omgeving zonder invloed van de zwaartekracht kunnen capillaire krachten aan het vloeistofoppervlak namelijk niet verwaarloosd worden. Wiskundig gezien betekenen capillaire krachten dat de druk op het vloeistofoppervlak een functie is van de kromming van dit oppervlak. Om deze kromming nauwkeurig te kunnen bepalen is een precieze beschrijving van de positie van het oppervlak vereist, waarbij in oppervlaktecellen nabij de vaste wand de contacthoek additionele informatie verschaft.

In het tweede deel van het proefschrift wordt het numeriek model uitgebreid ten behoeve van simulatie van dynamische interactie. Hiertoe moet een model worden opgesteld voor de dynamica van het rekengebied. Dit model bestaat uit vergelijkingen voor translatie en rotatie en bevat termen die de krachten ten gevolge van de klotsende vloeistof representeren. Het is vrij natuurlijk om deze vergelijkingen te formuleren in een inertiaal coördinatenstelsel (d.w.z. een stelsel dat niet met het rekengebied meebeweegt). Deze aanpak heeft echter een groot nadeel: het oplossen van de zo verkregen vergelijkingen met behulp van een computer is instabiel als de vloeistofmassa te groot is in vergelijking met de massa van het rekengebied. Daarom wordt het model voor de dynamica van het rekengebied zodanig herschreven, dat de termen ten gevolge van de klotsende vloeistof geformuleerd zijn in het coördinatenstelsel dat met het rekengebied meebeweegt. Middels deze herschrijving kunnen de vergelijkingen voor de dynamica van het rekengebied voor willekeurige massaverhoudingen numeriek worden opgelost zonder stabiliteitsproblemen.

Het model dat in het proefschrift wordt besproken, is geïmplementeerd in een computerprogramma genaamd COMFLO. Met dit programma zijn veel simulaties gedaan om te testen of alle aspecten van het model goed functioneren. Een representatief deel van deze simulaties is beschreven in dit proefschrift en uit de resultaten mag geconcludeerd worden dat COMFLO in staat is stromingen in een omgeving zonder zwaartekrachtinvloeden, waarbij dynamische interactie een rol speelt, te simuleren. Ter afsluiting is ook de flat spin van het eerder genoemde Wet Satellite Model experiment gesimuleerd.

Epiloog

Ondanks het vermogen van COMFLO om capillaire stromingen en dynamische interactie te simuleren, blijft er nog veel onderzoek nodig in dit vakgebied. Zo zijn er nog open

vragen over de fysica van de contacthoek en is het nog steeds een probleem om de positie van ruimtevaartuigen met klotsende brandstof aan boord te regelen. Numerieke simulatiemethoden, zoals beschreven in dit proefschrift, zullen een belangrijke rol spelen bij het vinden van antwoorden op deze vragen, maar ook experimenten blijven van grote waarde.

Eén experiment dat op het programma staat en nauw aansluit bij dit proefschrift is het SlosSat FLEVO experiment (FLEVO is een acroniem voor Facility for Liquid Experimentation and Verification in Orbit). SlosSat is een experimenteesatelliet, gebouwd door het Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium NLR, die hopelijk binnen niet al te lange tijd vanuit de Space Shuttle gelanceerd zal worden. Doel van het SlosSat experiment is het onderzoeken van het gedrag van vloeistoffen in een gewichtsloze omgeving en het bestuderen van dynamische interactie. De lancering van SlosSat stond oorspronkelijk gepland voor 1999 en de resultaten van het experiment hadden ter validatie moeten dienen voor het model dat in dit proefschrift is beschreven. Dit is door herhaald uitstel van het experiment helaas niet mogelijk gebleken, maar zeker is dat de toekomstige vlucht van SlosSat waardevolle data zal opleveren en op die manier zal bijdragen aan een beter fysisch begrip en de verdere ontwikkeling van numerieke simulatiemethoden.

