

Chaos v modelech dynamických systémů

Publications Vice President, System Dynamics Society

Badatelé, zabývající se dynamickými systémy vědí, "tak pevně jako součást své víry", že modely chování nelineárních struktur mohou být složité a podivné. Výzkum v aplikované matematice, ale i ve fyzice, biologii a atmosféře, prováděný během posledních let, objevil celou třídu neobvyklých a složitých modelů chování, která se označuje jako chaos. Ty mohou vznikat z párů nelineárních diferenciálních rovnic, podobných těm, které modelují ti, kdo se zabývají dynamikou systémů. Například opakující se a sebeudržující chaotické oscilace mají tu vlastnost, že v ustáleném stavu se trajektorie systému nikdy neopakují. Představa turbulentního ustáleného stavu se nám zdá být jako naprostý rozpor mezi tím, co myslíme pojmy dynamika a klidový stav. Jak je však ukázáno právě v tomto čísle "System Dynamic Review" tato zdánlivě protikladná a podivná dynamika existuje v řadě modelů, kterými se běžně zabývají jak badatelé v oblasti dynamiky systémů, tak jejich uživatelé v praxi.

Doklady v literatuře z nedávné doby vedou k závěru, že velký počet struktur, běžně se objevujících v modelech řízení (generic management models) může nabývat chaotického módu chování v případě jsou-li dosazeny vybrané hodnoty parametrů nebo tabulkové funkce. Různé výzkumy za posledních 20 let, ale i modely používané pro výuku naznačují, že existují neanalyzované chaotické stavy u modelů různého druhu - počínaje jednoduchým systémem produkce - distribuce, přes chování pracovních sil a výkyvy v zásobách až po modely dlouhodobých výkyvů ekonomie. Navíc, tento zajímavý způsob chování modelů zůstal prakticky až do poslední doby nepovšimnut.

V tomto (úvodním) textu vyložím jak toto zvláštní číslo časopisu vzniklo, zběžně se zmíním o některých příkladech chaosu, uváděných v literatuře a připojím úvahu o tom, proč tento druh chování zůstal tak dlouho nepovšimnut. Nakonec připojím důvody, pro které by se chaosem měli zabývat i specialisté ne dynamiku systémů a proč by měli do svých úvodních přednášek o dynamice systémů zahrnout alespoň jeden příklad toho druhu.

Historický přehled

Erik Mosekilde a Javier Aracil společně obdrželi v r.1986 Cenu Jay W. Forrestera, udělovanou za nejhodnotnější práci v oblasti dynamiky systémů, publikovanou v období od r.1980 - 85. Cenu dostali za práci o kvalitativní analýze nelineárních systémů, operujících v chaotickém režimu. Udělení ceny za tuto práci bylo pro všechny odborníky signálem, že vzniká celá nová třída technik a přístupů ke zkoumání nelineárních dynamických systémů.

V r. 1987 byli Erik Mosekilde, Javier Aracil a Peter Allen pozváni, aby redigovali zvláštní číslo "System Dynamic Review" a soustředili je na svou práci o kvalitativní analýze chaotických systémů. Tito vědci představují tři skupiny v Evropě, které se zabývají zajímavým a inovativním výzkumem uvnitř totožné oblasti. I když se zájmová a pracovní oblast těchto tří překrývá, v jejich výzkumu, kterým se tyto skupiny zabývají, existují zajímavé rozdíly. Aracil a jeho kolegové ve Španělsku již nějaký čas pracují na kvalitativní analýze dynamických systémů a na chaos pohlížejí jako na zvláštní případ obecnějšího jevu. Mosekilde a jeho spolupracovníci zaujali vedoucí místo mezi skupinami, zabývajícími se dynamikou systémů, v technické analýze chaotických modelů sociálních, ekonomických a biologických systémů. Allen, díky svému spojení s Prigoginovu skupinou v Bruselu, zkoumal sebeorganizující se struktury a evoluci struktur v nelineárních systémech. Všechny tři tyto přístupy jsou v jejich společném redakčním článku spojeny a dále plněji rozvinuty v samostatných dalších článcích.

Rostoucí zájem vědců o chaos, odrážející se také v našem rozhodnutí o zvláštním čísle věnovaném chaosu, vyústil v záplavu článků o tomto tématu v populárním tisku. Například New York Times v listopadu 1987 (Gleick, 1987c) zveřejnil na titulní stránce ekonomické sekce rozbor krachu burzy v říjnu 1987, která z teorii chaosu explicitně vycházela. Gleick (Gleick 1987b) publikoval populární verzi teorie chaosu ve "Smithsonian" a jeho nedávno vydaná kniha (Gleick, 1987a, český překlad 1996) slibuje stát se v USA bestsellerem. Alespoň v populárním tisku je chaos stavěn jako revolučně nový přístup k řešení vědeckých problémů.

Ti, kdo se zabývají dynamikou systémů, však žili v sousedství chaosu už po nějaký čas. Technicky vzato, chaos je studium třídy komplikovaných dynamik, vznikajících ze souboru deterministických dynamických rovnic, které jsou často totožné s páry nelineárních diferenciálních rovnic, které dynamické systémy studují. Proto je cílem tohoto zvláštního čísla chaos definovat, ilustrovat širí nástrojů, používaných ke studiu tohoto jevu a položit několik základních otázek o modelování, vznikajících při výzkumu chaotických jevů. Konečně podat

alespoň jeden elementární příklad, který může zaujatý čtenář čtenář zpracovat sám nebo jej použít v úvodním kurzu do dynamiky systémů.

Doufám, že čtení tohoto zvláštního čísla podnítl čtenáře k tomu, aby sám pro sebe zhodnotil dopad tohoto nového výzkumu na oblast dynamiky systémů.

Růst dokladů o chaosu v modelech dynamiky

Již koncem 19. a začátkem 20. století počali v souvislosti s problémy mechaniky nebeských těles Poincaré (1880) a Birkhoff (1972, 1950) zkoumat složitou a podivnou dynamiku, později známou jako chaos. Rovnice, které poprvé zevrubně studovali Duffing (1918), Lord Rayleigh (1896) a Van der Pol (1927) poskytly několik obecných a vydatných příkladů, které sloužily badatelům po následujících pět desetiletí.

I když jsou příklady toho, že chaotické dynamice byla pozornost věnována již dávno, široce založený výzkum v této oblasti čekal na objev a zdokonalení velkokapacitních digitálních počítačů, schopných řešit nelineární diferenciální rovnice pomocí numerické integrace. Lorenz (1963) studoval variantu Rayleighových rovnic a poskytl první příklad turbulentní dynamiky stabilizovaných stavů ve zjednodušeném modelu proudění tekutiny, který byl použitelný pro modelování atmosféry. Jak výzkum chaosu pokračoval, výzkumníci jako Feigenbaum (1980) počali formulovat obecné zákonitosti, řídící v chaoticky se chovajících systémech vztahy mezi strukturou systému a jeho chováním. Nedávno se objevila kniha, editovaná Cvitanovicem (1984) i plně plnohodnotný úvodní text od Thompsona a Stewarta (1986).

Dále, průkopnické práce Nicolise a Prigogina (1977), Allena (1982, 1985) a dalších naznačují, že tyto chaotické dynamiky ve skutečnosti mohou být předchůdci i složitějších jevů. Nelineární systémy, operující mimo rovnovážný stav, mohou v sobě obsahovat možnost vzniku sebeorganizujících struktur. Když simulujeme chování těchto systémů, produkují vzorce chování, které se může dramaticky měnit v závislosti na počátečních podmínkách a dokonce stochastických vstupech. V tomto čísle časopisu Allen tento jev popisuje.

Přes explozi prací o chaosu ve fyzice, biologii a výzkumu atmosféry za poslední léta se zájem a znalost těchto prací směrem do společenství lidí zabývajících se dynamikou systémů rozšiřuje celkem pomalu a výzkum chaosu v dynamice systémů probíhal zpočátku jen v několika výzkumných střediscích. Několik prací Aracila (1981, 1984) a Aracila a Tora (1984) se zabývalo předběžným výzkumem aplikací pojmu kvalitativní analýzy dynamiky v modelech dynamických systémů.

Výzkum Tora a Aracila (1986), zabývající se dynamikou chování dravce a kořisti a výzkum Jensena, Mosekilda a Holstein-Rathlouse (1986) zabývající se sebeudržitelnými se oscilacemi jednotlivého nefronu ledviny poskytly zajímavé a konkrétní příklady chaotického chování v modelech dynamiky systémů v biologii. Další práce o biologických a technických systémech Jensena a kol. (1986), Togebyho, Mosekilda a Sturise (1987) a Rasmussena, Mosekilda a Engelbrechta (1987) posloužily k prohloubení našeho chápání jak chaos může vznikat a skutečně vzniká v modelech dynamiky systémů.

Mimo práce o biologických a fyzikálních systémech další práce z nedávné doby doložily příklady chaotického chování v sociálních, ekonomických a manažerských systémech. Reiner a Weidlich (1986) a Weidlich a Haag (1983) studovali dynamiku migrace mezi regiony a zjistili, že za jistých vymezených podmínek mohou mít vzorce migračního chování chaotický charakter. Mosekilda a kol. (1985) předložili rozbor podobného problému při migraci mezi regiony s podobnými výsledky.

Rasmussen, Mosekilde a Sterman (1985) vyšetřovali klidovou dynamiku ve zjednodušeném modelu dlouhodobých ekonomických vln a zjistili, že tento model, založený na modelu ekonomie Spojených států, používaném v M.I.T., se může chovat chaoticky. Tento řetěz prací dále rozvíjeli Szymkat a Mosekilde (1986), kteří zpracovali dlouhodobou analýzu stability zjednodušeného modelu ekonomických vln.

Na konferenci o dynamice systémů v r. 1986 v Seville, ve Španělsku, Mosekilde a Larsen (1988) ukázali, že jednoduchý model distribučních procesů o více řetězcích vykazuje velmi složité dynamiky, včetně chaosu, v případě vybraných hodnot parametrů. Tento příklad je zejména zajímavý, protože stejný model byl mnoho let používán jako příklad ve výuce v úvodních kurzech systémové dynamiky. Rok za rokem, téměř dvacet let, používali studenti těchto kurzů a jejich instruktoři tento model aniž by si všimli, že model umožňuje chaotické chování. V tomto případě by diagnostika chaosu a celého rozsahu možných dynamik chování modelu vyžadovala, aby model "běžel" mnohem delší čas a navíc věnovat pozornost "klidové" dynamice systému poté, co počáteční a přechodné (ale relativně dlouhodobě působící) efekty již pominuly.

A konečně Rasmussen a Mosekilde (1988) zkoumali interakce mezi produkcí a prodejními silami, zásobami a zákazníky ve zjednodušeném modelu zásob a přizpůsobování pracovních sil na trhu, kde zákazníci reagovali na

nízký stav zásob. I v tomto případě byl tento model používán v kurzech dynamiky systémů několik desítek let. Pečlivá analýza dlouhodobé "klidové" (steady - state) dynamiky tohoto modelu (a opět s tím, že se počkalo, až přechodné jevy za poměrně dlouhou dobu vymizí) ukázala, že možná dynamika jejich modelu zahrnuje jednoduchý limitní cyklus, zdvojení periody 2, periody 4 a periody 8 a chaotické chování modelu. Je zcela možné, že celé generace studentů v úvodních kurzech dynamiky systémů modely jako je tento budovali a pak je odložili, zapomenuli na ně nebo jen nerozpoznali potenciální možnost vzniku chaotického chování v tom, co udělali. Rasmussenův a Mosekildův model tvoří základ pedagogických cvičení, které jsou uvedeny v Poznámkách v tomto čísle.

Proč jsme chaos tak dlouho nezjistili?

Když uvážíme záplavu "objevů" chaotického chování modelů - používaných běžně jako školní příklady - v posledních letech vzniká logická otázka jak je možné, že toto chaotické chování nezjištěno unikalo po tak dlouhou dobu naší pozornosti. Odpovědí může být několik.

Základní výzkum chaosu je relativně nedávného data.

I když několik badatelů se touto oblastí zabývalo již koncem 19. století, většina publikovaných prací o chaotické dynamice se objevila až v 80. letech. Proto chaotické jevy vstoupily do povědomí vědeckých kruhů poměrně nedávno.

Výzkum chování dynamických systémů chaotického typu je ještě čerstvější.

I v dnešní době je výzkum existence a důležitosti chaotických jevů v dynamice systémů omezen jen do několika středisek, většinou v Evropě. Jak základní, tak i aplikovaný vzhled do chaotických jevů se rozšiřuje pomalu mezi badatele souvisejících oblastí.

Základní i náročnější techniky jsou málo známy.

V důsledku relativně pozdního rozšiřování výzkumu týkajícího se chaosu mezi badateli v oblasti dynamiky systémů nejsou ani základní techniky pro analýzu chaotických systémů běžně používány. Například, většina analýz se stále zabývá především přechodnou dynamikou (transient dynamics) jen v oscilujících systémech a techniky pro vyloučení (settling out) přechodných jevů se běžně nepoužívají. Při studiu chování systémů se v mnoha oblastech se běžně nepoužívá techniky fázových diagramů (oproti diagramům s časovými řadami údajů) k zachycení stavu proměnných systému. Navíc, počítačové programy pro vynášení dat do fázových rovin, jak např. DYNAMO, až donedávna neexistovaly. Dále, složitější techniky pro analýzu chaosu, jak ty, o kterých pojednáváme v tomto čísle, ještě nebyly dostupné v podobě dobře vyzkoušených a snadno použitelných balíků programů.

Zahazovaly se výsledky, které ve skutečnosti byly stopami a náznaky.

Většina zkušených praktiků, kteří pracovali s modely limitních cyklů, jistě příležitostně viděla oscilaci se dvěma vrcholy, znamená charakteristické pro oscilaci periody 2. Pokud však badatel není cvičen ve vyhledávání oscilací periody 2, jako předchůdce komplikovanější a snad i chaotické dynamiky, pak takové výsledky pravděpodobně dává stranou a zanedbává je. "Modeláři" s minimálním výcvikem v chaotické dynamice mohou mít sklon zabývat se stabilizovanější dynamikou systémů podrobněji, když se jim objeví charakteristické znaky oscilace periody 2.

Chaos se vyskytuje zřídka a je těžko postižitelný.

Chaos není obecně se vyskytující jevem. Na základě současných znalostí se dnes dokonce zdá, že, alespoň v relativně jednoduchých systémech, dosud studovaných, můžeme chaos očekávat jen u třech spíše speciálních typů struktur. Prvním případem je, když se limitní cyklus vymkne ("zdivočí"). To znamená, že na stabilní oscilátor dynamického cyklu, stabilní v jistém rozpětí, "působí tlak" až se pohne skrze oscilace periody 2, periody 4 a periody 8 a dosáhne chaotického módu. Druhý případ se týká dva sebegenerující se oscilátory, které jsou navzájem propojené. Třetí se týká oscilujícího systému, který je zvenčí hnán oscilující silou (obvykle sinusového tvaru). A proto, kdyby si člověk uměl představit všechny struktury, studované v rámci dynamických systémů, tyto tři speciální případy tvoří spíše malý podsoubor celku. Odtud plyne, že možná místa, kde by mohl chaos existovat v rámci modelů dynamických systémů, nejsou příliš početná.

Navíc, i v těch systémech, které v sobě možnost vzniku chaosu zahrnují, chaos se objevuje jen těžko postižitelně. Chaos bude existovat jen pro některé specificky definované oblasti nebo objemy v rámci myslitelného prostoru, které parametry mohou nabývat. Protože platí, že pro většinu modelů tento parametrový prostost je mnohorozměrný, a protože všechny chaotické modely jsou nelineární, pak pohyb po přímce nebo

podél roviny v parametrovém prostoru může badatele vést dovnitř i vně chaotických oblastí i několikrát, neuspořádaným způsobem. Tudiž i když se člověk pohybuje v blízkosti chaotického módu v parametrovém prostoru, chaos může zdánlivě mizet - bereme-li v úvahu zdánlivě malou šanci v rámci jednoho z parametrů modelu.

Chaos obvykle existuje jen uvnitř relativně malého objemu parametrového prostoru.

Kdyby člověk spočítal úplný objem parametrového prostoru, ve kterém může model působit, pak chaotická oblast z celku tohoto prostoru je obvykle relativně malá a zakřivená k těm regionům parametrového prostoru, ve kterých se model stává méně stabilní. Vezmeme-li v úvahu, že tato relativně malá oblast je právě v důsledku nelineárností, obsažených v modelu eluzivní aťž k pozorování chaosu je třeba užít zvláštních technik (vyloučení, ustálení přechodných jevů, pozorování fázových diagramů, použití náročnějších matematických technik atd.), pak se není co divit, že chaosu byl poprvé zpozorovánv modelech dynamických systémů.

Proč se tedy vůbec zabývat chaosem?

Protože víme, že se chaotické chování může vyskytnout jen v malé části dynamických modelů, můžeme se oprávněně ptát: "Proč se tím vůbec zabývat?", "Je to pro lidi, zabývající se dynamikou systémů skutečně tak důležité?", "Koho chaos skutečně zajímá?", "Nakolik by nás zajímat měl?" Abychom mohli tyto otázky zodpovědět, podíváme se nyní na tři potenciální okruhy zájemců, ty, které by mohlo zajímat lepší porozumění chaotickým jevům, vážícím se na sociální a ekonomické systémy: manažery reálně existujících organizací, odborníky na aplikovanou matematiku, zajímající se o dynamiku nelineárních systémů a odborníky na dynamiku systémů, kteří se do jisté míry musí zabývat jak aplikací a praxí, tak i abstraktní dynamikou. Z ní se totiž učí o struktuře systémů a jejím vztahu k chování systému.

Ve článku, napsaném Andersenem a Sturisem (1988), který má poněkud učebnicový charakter a je obsažen v Poznámkách v tomto čísle, autoři podrobně analyzují potenciálně chaotický systém produkce a zásob na příkladu Continental Cash Register Systems Corporation (CCRS). V tomto modelu generují cykly produkce a zásob, propojeny se zákaznickým sektorem chaotické oscilace alespoň pro vybrané parametry hodnot modelu.

Předpokládejme na okamžik, že model CCRS, podaný ve zmíněném článku, je pravdivým obrazem fungování korporace. Jinými slovy, že operace CCRS mají sklon k bifurkacím a chaotickým oscilacím, které se v ustálené situaci nikdy neopakují. Zajímá to vůbec manažery dané korporace? Asi ne. Oni v oné situaci žijí a znají ji. Znalost toho, co korporace ve stabilizovaných podmínkách (to je v nekonečném čase) bude dělat nemá pro ně žádný význam. Aby bylo možno diagnostikovat chaos v jejich systému, výzkumník by musel simulovat chování firmy v rozsahu 55 - 60 let jen proto, aby přechodné jevy vymizely. Dnešní manažeři ví s jistotou, že v tu dobu už v korporaci nebudou působit a (správně) vnímají, že se struktura této korporace v průběhu doby dramaticky změní. Existence či neexistence chaosu, konceptu, který je doslova definován v časovém horizontu, blízcím se nekonečnu, není pro ně moc zajímavý. Manažeři musí žít v přechodném stavu působeném aktivitami, definujícími současnost.

Může matematika zajímat závěr, že CCRS korporace potenciálně obsahuje chaos ve svém chování? Možná ano. tento závěr potvrzuje zjištění, že struktury, se kterými již nějaký čas pracují, je možno aplikovat i mimo oblast fyzikálních a biologických systémů. Tento řídicí systém by jim poskytl další použitelný příklad pro využití nově vznikajících analytických technik. A nakonec takový výsledek vede ke kladení fundamentálních otázek o tom, jak může nebo měla by být matematika aplikována k analýze sociálních, ekonomických a řídicích systémů.

Mělo by lidi, zabývající se dynamikou systémů zajímat, že CCRS korporace je chaotická? Ano i ne. Přesně z těch důvodů, pro které manažery nezajímají závěry o klidové dynamice v horizontu nekonečna, by se asi i badatelé v oblasti dynamických systémů o teoretické výsledky moc nezajímali. Klíčovou je otázka - přispívají závěry o klidové dynamice v horizontu nekonečna významně k našemu chápání těchto systémů, které získáváme zkoumáním jen krátkodobé dynamiky - což se dělo doposud? Odpověď na tuto praktickou otázku, i když vše doposud není jasné - je v tuto chvíli asi ne.

Na druhé straně, věda a dynamice systémů by měla nacházet uspokojení v tom, že rozumíme systémům přesněji a důkladněji. Výsledek, že oscilace zásob korporace CCRS jsou chaotické posiluje některé apriorní metodologické názory - to, nelineární dynamika může být velmi složitá a zajímavá a že potřebujeme o ní dozvědět více - jak o dynamice "klidové" (steady-state), tak i přechodové (transient). Existence chaosu v CCRS korporaci by měla analytiku dynamických systémů vést k tomu, aby se snažili porozumět svému oboru lépe, aby se naučili vyladit a docenovat nová pravidla, ovládající nelineární dynamiku a aby si znovu kladli základní otázky o povaze společenských systémů, jejich vhodnosti pro modelování a jejich předpověditelnosti.

Konkrétněji řečeno, poznatky o chaotickém chování nelineárních dynamických systémů by umožnily lidem, zabývajícími se dynamickými systémy následující:

Přesně porozumět celé řadě tříd komplexního nelineárního chování a obecných tříd chování.

Vzato matematicky, odborníci na dynamiku systémů se běžně učili zabývat se obecným případem lineárních systémů a také malému počtu relativně jednoduchých nelineárních případů (jako je logistický růst, nebo oscilátory jednoduchého limitního cyklu). Na všechny ostatní případy jsme se naučili aplikovat toto menu dobře známých systémů a intuitivně získávat vzhled do složitějších nelineárních systémů. Výzkum chaosu rozšiřuje rozsah nelineárních jevů, které je možno přesně vysvětlit a zpevňuje tak základy jen intuitivně chápaných analýz, které používáme na větší a složitější systémy.

Plněji docenit celý rozsah bohatosti a složitosti chování, které mohou nelineární systémy vykazovat.

Skutečnost, že nelineární systémy mohou a vykazují širokou škálu chování je jeden ze základních poznatků profesionálů v oblasti systémové dynamiky. V praxi se však ukolébáváme falešným pocitem bezpečí tím, že se opakovaně vracíme ke známým příkladům, kde máme zmapovány vztahy mezi strukturou a chováním. Výzkum různých cest k chaosu, o kterých je v tomto čísle časopisu řeč, slouží k poznání a popsání dalších malých ostrůvků v rozsáhlých a bouřlivých mořích nelineární dynamiky. Plným porozuměním tomu, jak složitá může být dynamika těchto relativně jednoduchých struktur, lépe oceníme složitost nelineárních systémů obecně (i toho, jak málo o nelineární dynamice víme). Jinak řečeno, porozumění chaosu do hloubky nám umožní pochopit složitost nelineární dynamiky a - obecně vzato - jak málo o ní víme.

Naučit se významným novým technikám pro analýzu nelineárních systémů.

Badatelé, pracující s chaotickými systémy vyvinuli řadu technik, od jednoduchých po složité, určených pro analýzu komplexních systémů. Mezi jednoduché techniky patří jednoduše nechat systém oscilovat mnohem delší dobu než bývá obvyklé, aby byla jistota že dlouhodobá dynamika je stabilizovaná. Také podívat se na data vynesena do fázových diagramů (na rozdíl od časových diagramů) abychom lépe rozuměli vzorcům v oscilacích. Poincarého sekce (Poincaré sections) a návratové mapy (return maps) umožňují redukovat velmi složité nelineární oscilující systémy do jednorozměrného případu a dále jej analyzovat. Bifurkační diagramy, čertovy schody (devil's staircases) Lyapunovovy exponenty a další analytické prostředky, popisované v tomto čísle, představují aplikované metody pro analýzu dynamik nelineárních systémů. Kde se tyto metody ukáží jako užitečné pro obecnější analýzy, tam pak bude třeba rozhodnout o vývoji programových produktů, které by umožnily snadno tyto analýzy provádět na modelových cvičeních.

Naučit se rozpoznávat, analyzovat a neopomíjet nové způsoby chování.

Studenti se v předmětu dynamika systémů po několik desetiletí učili opomíjet, zanedbávat či prostě nevidět vzorec dvouvrcholové oscilace v příkladech s oscilátory limitních cyklů. Oscilacím periody 2 nyní docela rozumíme v tom smyslu, že se dají brát jako jasné příznaky toho, že systém operuje blízko komplexního, či dokonce chaotického regionu parametrového prostoru. Je docela možné, že pozorujeme jiné vzorce chování, které jsou příznaky jiných, daleko složitějších nelineárních režimů - a pomíjíme je, zanedbáváme je a neanalyzujeme je, protože se všichni soustředíme na to, co rozpoznáme a umíme vysvětlit. Nedávný objev chaosu ve známých modelech by měl být lekcí jak věnovat více pozornosti neznámým dynamikám.

Ptejte se jak a kdy se struktura mění.

Výzkum chaotických struktur přitahuje pozornost spíše k deštrujícím vzorcům dynamiky než k těm, které jsou typicky analyzovány ve výzkumech dynamiky systémů. Například stabilní oscilace v modelu CCRS korporace byly prověřovány za dobu delší než 60 let. Chaotické oscilace u modelů dlouhodobých ekonomických vln lze vidět jen po staletích či dokonce tisíletích. Většina badatelů v oblasti dynamiky systémů nemyslí v tak širokých časových rámcích. Na rozdíl od mnoha fyzikálních a biologických systémů jsou oscilace ve společenských ekonomických systémech relativně pomalé. Existuje tedy silná možnost, že se může změnit základní struktura systému ještě předtím, než proběhne tolik oscilací, aby se dal rozpoznat jejich chaotický režim. Proto se badatelé, zabývající se chaosem ve společenských a ekonomických systémech, přirozeně ptají kdy a jak se struktury systému v průběhu času mění a vyvíjejí. Je pravděpodobné, že oblast evoluce struktur systémů se stane jednou z významných růstových vrcholů výzkumu systémové dynamiky.

Ptejte se, zda je možné nelineární budoucnosti poznat.

Jedním z nejzapeklitějších výsledků výzkumu chaosu je důkaz, že zcela deterministický soubor rovnic s počátečními podmínkami, jež jsou známy téměř s nekonečnou přesností, bude generovat časovou řadu výsledků, kterou nemůžeme poznat nebo předpovědět. Když to aplikujeme na pohyb kapaliny v atmosféře

pomocí Lorenzových rovnic, pak výsledky ukazují, že i když jde o plně deterministický systém, dynamika, řídicí počasí, není předpověditelná. Analogicky s počasím, mnoho společenských a ekonomických systémů nemusí být poznatelných a do budoucna předpověditelných i když bychom plně znali jejich dynamiku, počáteční podmínky a tyto systémy by neobsahovaly žádné náhodné prvky. Tato hypotéza, svou povahou hodně filozofická, nás staví před základní otázky - co můžeme nebo bychom měli očekávat od matematických modelů sociálních a ekonomických systémů. Přesněji řešeno, chaos nás staví před jak praktické "malé" otázky, tak i mnohem širší filozofické otázky týkající se celého oboru dynamiky systémů a matematického modelování společenských a ekonomických systémů obecně.

Články v tomto čísle poskytují důkladný a provokativní úvod do témat z oblasti chaosu v modelech dynamických systémů. Úvodní článek od Mosekilda, Aracila a Allena představuje přehled celé oblasti a probírají v něm některé významné techniky, používané k doplnění matematických analýz chování systému. Následující články podávají přehled o aplikacích a poskytují podrobné příklady různých technik analýz, aplikovaných na konkrétní modely. Poslední, spíše výukově laděný článek poskytuje jednoduše zvladatelný model, který nabízíme zájemcům k vlastnímu vyzkoušení a snad i použít v úvodních kurzech dynamiky systémů.

Doufám, že se vám bude toto první zvláštní číslo časopisu System Dynamics Review líbit.

Literární odkazy:

- Allen P.M., 1985. Towards a New synthesis in the Modeling of Evolving Complex Systems. Environment and Planning B: Planning and Design, 12:65 - 84.
- Allen P.M., M.Salinger, G.Engelew, F.Boon, 1982. Dynamic Modeling in Evolving Complex Systems: Toward new Synthesis. In Proceedings of the 7th International Conference on System Dynamics (Brussels).
- Andersen D.F., J.Sturis, 1988. Chaotic Structures in Generic Management Models. System Dynamics Review 4 (1-2): 218 - 245.
- Aracil J., 1981. Further Results on Structural Stability of Urban Dynamics Models. In System Dynamics and the Analysis of Change: Proceedings of the 6th International Conference on System Dynamics (Paris), ed.E.Paulré, 315 - 334. Ne. Y., North-Holland.
- Aracil J., 1984. Qualitative Analysis and Bifurcations in System Dynamics Models. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics SMC-14 (4): 688-696.
- Aracil J., M.Toro, 1984. A Case Study of Qualitative Change in Systems Dynamics. International Journal of Systems Science 15: 575-599.
- Birkhoff G.D., 1927. Dynamical Systems. Providence, R.I.: American Mathematical Society.
- Birkhoff G.D., 1950. Collected Mathematical Papers. Providence, R.I.: American Mathematical Society.
- Cvitanovic P., ed. 1984. Universality in Chaos. Bristol, Hilger.
- Duffing G. 1918. Erzwungene Schwingungen bei Veränderlicher Eigenfrequenz. Braunschweig.
- Feigenbaum M.J., 1980. Universal Behavior in Nonlinear Systems. Los Alamos Science 1:4. Also Physica D 7 (1983):16-39.
- Gleick J., 1987a. Chaos: Making a New Science. New York, Viking.
- Gleick J., 1987b. New Images of Chaos That Are Stirring a Science Revolution. Smithsonian 18 (9):122-135.
- Gleick J., 1987c. When Chaos Rules the Market. New York Times, Nov.22, Section 3 (Business),1.
- Jensen K.S., E.Mosekilde and N.-H.Holstein-Rathlou. 1986. Self-Sustained Oscillations and Chaotic Behavior in Kidney Pressure Regulation. Mondes en Développement 14:54-55, 91-109. Also in Laws of Nature and Human Conduct, ed.I.Prigogine and M.Salinger. Brussels: Task Force of Research, Information and Study of Science, 1987.
- Lorenz, E.N., 1963. Deterministic Nonperiodic Flow. Journal of Atmospheric Sciences 20:130-141.
- Mosekilde E., and E.R.Larsen, 1988. Deterministic Chaos in the Beer Production-Distribution Model. System Dynamics Review 4(1-2):130-141.

- Mosekilde E., Rasmussen S., Jorgensen, F.Jaller C.Jensen. 1985. Chaotic Behavior in the Simple Model of Urban Migration. In Proceedings of the 1985 International System Dynamics Conference (Keystone, Colo.).
- Nicolis G., I.Prigogine.1977.Self-Organization in Nonequilibrium Systems. New York,Wiley.
- Poincaré H. 1880. Mémoire sur les courbes définies par les équations différentielles. Oeuvre I. Paris:Gauthier-Villars.
- Rasmussen D.R., E.Mosekilde. 1988. Bifurcation and Chaos in a Generic Management Model. European Journal of Operational research. Forthcoming.
- Rasmussen S., E.Mosekilde, F.Engelbrech.1987. Time of Emergence and Dynamics of Cooperative Gene Networks. In Proceedings of MIDIT Workshop on Structure, Coherence and Chaos in Nonlinear Science, Theory and Applications. Cambridge: Cambridge University Press.
- Rasmussen S., E.Mosekilde, J.D.Sterman. 1985. Bifurcation and Chaotic Behavior in a Simple Model of the Economic Long Wave. System Dynamics Review 1:92-110.
- Rayleigh J.W.S. 1896. The Theory of Sound. New York:Dover (reprint).
- Reiner R., W.Weidlich, 1986. Chaotic and Regular Dynamics in Migratory Systems. In Proceedings of the 2nd European Simulation Congress. Antwerp: Simulation Councils, Inc.
- Szymkat M., E.Mosekilde, 1986. Global Bifurcation Analysis of an Economic Long-Wave Model. In Proceedings of the 2nd European Simulation Congress, Antwerp: Simulation Councils, Inc.
- Thompson J.M.T., H.G.Stewart.1986. Nonlinear Dynamics and Chaos: Geometric Methods for Engineers and Scientists. New York, Wiley.
- Togebly M., E.Mosekilde, J.Sturis. 1987. Mode-Locking and Quasiperiodic Behavior in a Model of Two Coupled Thermostatically Controlled Radiators. Working paper, Physics laboratory III, technical University of Denmark, 2800 Lyngby, Denmark. Also Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, forthcoming, 1988.
- Toro M., J.Arakil. 1986. Chaotic Motion in Predator-Prey-Food System Dynamics Models. In Proceedings of the 1986 System Dynamics Conference (Sevilla, Spain), 353-369.
- Van der Pol,B. 1927. Forced Oscillations in a Circuit With Nonlinear Resistance (Reception with ractive triode). Phil.Magazine 7 (3):65-80.
- Weidlich W., G.Haag.1983. Concepts and Models of Quantitative Sociology. Series in Synergetics. Vol.14. Berlin:Springer.
- Winfree A.T. 1980. The Geometry of Biological Time. Berlin: Springer.

David F.Andersen "Foreword: Chaos in system dynamics models", System Dynamics Review, vol.4, No.1-2, 1988

Překlad :

dr.Lubomír Kostrůň, Psychologický ústav FF MU Brno, únor 1997

Jen pro studijní potřebu posluchačů!