

# Metoda moire a její modifikace pro realizaci postupu na osobních počítačích

Prof. Ing. František Plánička, CSc.

Doc. Ing. Josef Hrušák, CSc.

Ing. Antonín Bulín

Vysoká škola strojní a elektrotechnická  
Nejedlého sady 14, Plzeň

Článek se zabývá aplikací moire metody na počítání s využitím techniky zpracování digitalizovaného obrazu. Je uveden postup při určování stavu deformace a napjatosti klasickou metodou moire a postup při modifikované metodě bez nutnosti použití analyzační mřížky.

## 1. Úvod

Metoda moire umožňuje určit pole deformací při rovinné úloze. Na základě mechanické interference, která vzniká složením deformované měřicí mřížky na povrchu součásti s analyzační mřížkou, dostaneme pole interferenčních pruhů. Ty jsou geometrickými místy složek posuvu o stejné velikosti, jež jsou celistvými násobky rozteče mřížky  $p$ . V důsledku deformace tělesa se obecný bod posune do nové polohy. To lze v ortogonálním souřadném systému vyjádřit vektorem  $\vec{u} = \vec{u}_x + \vec{u}_y$ . Směr složek vektoru  $\vec{u}_x, \vec{u}_y$ , je určen orientací měřicí mřížky a přiložené analyzační mřížky, obr. 1. Absolutní hodnoty složek posuvu  $u_x = u_x(x, y)$ ,  $u_y = u_y(x, y)$  jsou nějakými funkcemi nezávisle proměnných  $x, y$ . Tyto funkce nad uvedenou oblastí představují plochy. Interferenční pruhy  $u_x = u_y = k \cdot p$ , kde  $k$  jsou celá čísla, představují vrstevnice těchto ploch.

Deformace při rovinné úloze jsou určeny vztahy

$$\epsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \epsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \gamma_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} = \gamma_1 + \gamma_2 \quad (1)$$

Chceme-li tedy určit stav deformace a napjatosti, musíme při rovinné úloze použít ortogonální mřížku, obr. 1. Pomocí vztahů (1) a odpovídajících fyzikálních, popř. dalších geometrických rovnic, lze určit napětí v pružné i v pružněplastické oblasti pro malé či velké deformace.

Při běžném postupu se pole interferenčních pruhů fotografuje při každém stupni zatížení. Odtud lze pak pomocí diskrétních bodů získat závislosti vyjadřující potřebné složky posuvu  $u_x(x, y_1)$ ,  $u_x(x_1, y)$ ,  $u_y(y, x_1)$ ,  $u_y(y_1, x)$  ve dvou navzájem kolmých rovinách, které se protínají v bodě, kde nás zajímá stav deformace a napjatosti. Z obrázku 2 je zřejmý postup získání křivek  $u_x(x, y_1)$ ,  $u_x(x_1, y)$ . Potom poměrné prodloužení v uvažovaném bodě představuje směrnici tečny  $\epsilon_x = tg\alpha_x$ . Obdobně je tomu pro složku zkосу  $\gamma_1 = \frac{\partial u_x}{\partial y} = tg\alpha_y$ . Odtud vyplývá, že potřebné derivace lze získat graficky, či analyticky proložením křivek diskrétními body získanými uvedeným způsobem a jejich derivováním. Poslední způsob umožňuje zpracování výsledků měření počítačem. Neodstraňuje však popsanou složitou cestu získání potřebných souborů diskrétních bodů a jejich zadání počítači jako vstupní data.

Byla proto hledána cesta k automatizaci tohoto procesu. To lze provést přímou algoritmizací uvedeného postupu, která spočívá v sejmutí obrazu interferenčních pruhů, jeho zpracování, vyhodnocení a zobrazení polí deformace a napětí.

Uvedený přístup nabízí možnost modifikace tohoto klasického postupu. V tomto případě je snímána pouze deformovaná mřížka z povrchu tělesa. Při vyhodnocování výsledků měření je analyzační mřížka generována v paměti počítače. Zde po složení s deformovanou mřížkou vzniknou interferenční pruhy. Jistým nedostatkem této metody je, že citlivost metody je omezena rozlišovací schopností snímací kamery. Tím je určena nejmenší použitelná rozteč mřížky  $p$ . Tak se může stát, že použitá mřížka má nedostatečnou hustotu čar vzhledem k velikosti

měřené deformace. Potom dostáváme malý počet interferenčních pruhů a měření ztrácí na přesnosti. Je to stejná situace jako při klasickém postupu, pokud byla hustota mřížky zvolena nevhodně. Proto lze tento nedostatek snadno překonat známými metodami pro zvýšení citlivosti metody: změna parametru analyzační mřížky, natočení analyzační mřížky o malý úhel a posouvání analyzační mřížky o hodnotu  $k_1 p$ . Zde  $k_1 \in (0, 1)$  a dostáváme tak interferenční pruhy neceých řádů  $p(k + k_1)$ . Oproti klasické metodě je výhodou uvedeného postupu to, že umožňuje volbu nevhodnější metody jednoduchým interaktivním způsobem až v průběhu vyhodnocování výsledků.

## 2. Aplikace techniky moire a jejích modifikací na počítání

### 2.1. Číslíkové zpracování obrazu

Při snaze o automatizaci vyhodnocování deformací a napjatosti pomocí počítače je, kromě vlastní algoritmizace vyhodnocovacího postupu, klíčovou otázkou transformace naměřených hodnot do tvaru vhodného pro počítačové zpracování. V případě algoritmizace klasické techniky moire, případně její modifikace, se jeví vhodné použít technik číslíkového zpracování obrazu. Tyto techniky umožňují počítání "vidět" a vyhodnocovat pozorovanou scénu, která může být vyjádřena a zpracovávána jednotným způsobem bez ohledu na rozdílnou fyzikální podstatu původních signálů. Abychom mohli upřesnit reprezentaci obrazu pro číslíkový počítač uvažujme obraz, (který je obecně vektorovou funkcí vektorového argumentu) jako spojitou skalární funkci (monochromatický obraz) plošných souřadnic resp. plošných souřadnic a času v případě dynamických dějů. Nejprve musí být obraz vzorkován, tj. rozložen do plošné a v případě obrazového toku i do časové struktury diskrétních vzorků. Protože tyto vzorky mohou nabývat hodnot ze spojitého intervalu, je nutno je amplitudově kvantovat, tv. rozložit tento interval na  $k$ -disjunktních podintervalů. Potom všechny hodnoty z téhož podintervalu jsou reprezentovány tímžé číslem. Rozumným požadavkem kladeným na digi-

talizovaný obraz je, aby kvantované vzorky umožňovaly rekonstrukci původního obrazu. Volba počtu vzorků, stejně jako počtu diskrétních hladin dynamického rozsahu veličiny charakterizující obrazovou informaci v prostoru a čase je kompromisem mezi možnostmi počítací a požadavkem kvality rekonstrukce. Pod pojmem možnosti je nutné mít především na mysli kapacitu operační paměti a splnění časových limitů kladených na algoritmy zpracování obrazu. Je zřejmé, že z hlediska optimálního využití operační paměti a programového vybavení při daném typu sledované scény, nemusí být výhodné udržovat ekvidistantní rozestup jednotlivých diskretizačních hladin při amplitudovém kvantování. Tyto otázky vedou na problém optimálního resp. adaptivního kvantování obrazu.

Protože požadavek možnosti rekonstrukce originálu na základě číslicového obrazu je v podstatě jediným omezením při procesu digitalizace, dovoluje dva rozdílné přístupy k dalšímu zpracování. V jednom z nich je obraz vyjádřen rozvojem nějakých ortonormálních funkcí a koeficienty tohoto rozvoje jsou hledanými vzorky reprezentujícími původní obraz. Ve druhém případě, který budeme nadále uvažovat, je obraz charakterizován pravoúhlým polem obrazových vzorků, získaných na základě zobecněného vzorkovacího teorému, přičemž funkční hodnota vzorku přímo odpovídá funkční hodnotě veličiny charakterizující obraz v odpovídajícím bodě (resp. v jeho okolí) originálu, tyto body jsou dány průsečíky ortogonální vzorkovací mříže.

## 2.2. Aplikace klasické metody moire

Po zatížení modelu nastane deformace mřížky na povrchu tělesa a po přiložení analyzační mřížky vzniknou, v důsledku mechanické interference, pruhy moiré. Jsou-li čáry analyzační mřížky rovnoběžné s osou  $x$ , vzniknou interferenční pruhy moire, ze kterých získáme proměnné deformace  $\epsilon_y$  a složku deformace ve smyku  $\gamma_2$ . Po pootočení analyzační mřížky o devadesát stupňů vzniknou interferenční pruhy, z nichž získáme poměrné deformace  $\epsilon_x$  a složku deformace ve smyku  $\gamma_1$ . Z takto získaných hodnot můžeme pro libovolný bod určit odpovídající napětí

$\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  a hlavní napětí  $\sigma_1$  a  $\sigma_2$ .

Prvním z možných způsobů pro transformaci měřených hodnot do paměti počítače je snímání obrazu interferenčních prvků moire, vzniklých po přiložení analyzační mřížky na zkoumaný model.

Pro získání obrazu interferenčních pruhů můžeme postupovat podle následujícího algoritmu

A - Získání obrazu moire pruhů ve formě jejich středů

1. krok - sejmoutí obrazu interferenčních pruhů
2. krok - základní předzpracování obrazu, odstranění šumu, snížení počtu úrovní pomocí prahování
3. krok - nalezení moire pruhů a jejich ztenčení, tj. nalezení jejich středů
4. krok - aproximace křivky středů moire pruhů polynomem

B - Určování deformací ve zvoleném tezu

1. krok - pro rovnoběžný tez postupně s-osou  $x$  a  $y$  se určí průsečíky moire pruhů a tohoto tezu
2. krok - získanými body se proloží polynom 3. řádu. Takto získané aproximační křivky jsou východiskem pro výpočet deformací.

Výsledkem jsou dva soubory aproximačních křivek  $u_x, u_y$ .

C - Vlastní výpočet deformací  $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy} = \gamma_1 + \gamma_2$

Obecný vzorec pro deformace lze psát ve tvaru

$$def. = \frac{f(i + \Delta) - f(i)}{\Delta} \quad (2)$$

def. je příslušná deformace  $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_1, \gamma_2$

$i$  je bod, v němž se deformace počítá

$\Delta$  přírůstek

$f(\dots)$  hodnota aproximační křivky v daném bodě

### Postup výpočtu při určení poměrných deformací

1. krok - vybere se požadovaný tez rovnoběžný s osou  $x$
2. krok - z datového souboru křivek  $u_x$  se získají v tomto rezu hodnoty pro výpočet deformace  $\epsilon_x$
3. krok - podle (2) se získá deformace  $\gamma_{11}$
4. krok - z důvodů vyloučení extrémně odchylených hodnot se deformace ve smyku aproximují metodou nejmenších čtverců
5. krok - podle (2) se určí hodnoty  $\epsilon_y$ , které jsou opět z důvodu odstranění extrémních hodnot aproximovány nejmenšími čtverci
6. krok - zobrazení výsledků

D - Výpočet hlavních napětí  $\sigma_1, \sigma_2$  se provede pro libovolný bod  $M(x_1, y_1)$

1. krok - v rezu, určeném odpovídající souřadnicí  $y_1$  uvažovaného bodu, se určí hodnoty deformací  $\epsilon_x, \gamma_{11}$
2. krok - v rezu, určeném odpovídající souřadnicí  $x_1$  uvažovaného bodu, se určí hodnoty deformací  $\epsilon_y, \gamma_{12}$
3. krok - provede se vlastní výpočet
4. krok - zobrazení závislosti  $\epsilon_x, \gamma_{11}$  nebo  $\epsilon_y, \gamma_{12}$

### 2.3. Modifikace klasické moire metody

Rozborem postupu zpracování klasické moire metody na počítači vidíme možnost snímat přímo deformovanou mřížku na povrchu tělesa a mechanickou interferencí vytvořit programovými prostředky v počítači, v první fázi vyhodnocení.

Tento postup nám umožňuje oddělit fázi měření (snímání deformované mřížky) od vlastního zpracování obrazu a výpočtu. Můžeme tedy získat posloupnost snímků v různých fázích zatížení, přičemž teoretická doba pořízení jednoho snímku je 20 ms. Tento čas je samozřejmě ovlivněn rychlostí celého měřicího řetězce, tj. rychlostí digitizéru obrazu, počítače a jeho schopností

archivovat data. To nám umožňuje určovat závislost deformace na zatěžovací síle. Možnost generování analyzační mřížky počítačem nám současně dovoluje programovým způsobem

- měnit pootočení analyzační mřížky
- měnit rozteč analyzační mřížky
- posouvat analyzační mřížku pro zvýšení počtu interferenčních pruhů.

Relativní nevýhodou tohoto postupu je nutnost, získat dostatečně kvalitní obraz deformované mřížky, což omezuje její hustotu s ohledem na rozlišovací schopnosti dostupných optických systémů.

#### A. Postup při generování analyzační mřížky počítačem

1. krok - sejmутí obrazu deformované mřížky
2. krok - základní předzpracování, odstranění šumu, snížení počtu úrovní pomocí prahování
3. krok - nalezení pruhů mřížky a jejich ztenčení
4. krok - generace moire obrazu po programovém přiložení analyzační mřížky
5. krok - aproximace křivky středů moire prvků polynomem

Další postup je shodný s postupem klasické moire metody dle 2.2.

### 3. Závěr

Príspevek se zabývá dvěma způsoby automatizace měření deformací a určení napjatosti metodou moire využitím možností daných osobním počítačem. První z cest je přímou algoritmizací klasického postupu. Ta realizuje sejmутí pole interferenčních pruhů v uvažované oblasti, jeho zpracování, vyhodnocení a zobrazení polí deformace a napětí.

Ve druhém případě je využito možností generovat analyzační síť a vytvoření moire pruhů v paměti počítače jejím složením se sejmутou deformovanou mříží.

Předností obou postupů je urychlení a zjednodušení celého měření a vyhodnocování výsledků. Rychlost snímání obrazů a jejich ukládání do paměti

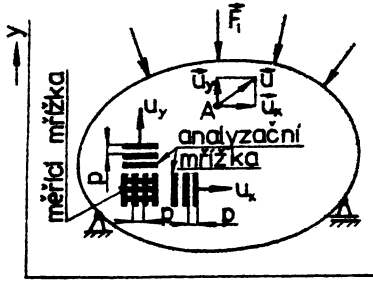
počítač umožňuje i měření dynamických jevů. Velkou výhodou je také to, že výsledky lze zpracovávat dodatečně. To v případě modifikované metody umožňuje interaktivní výběr a použití metod pro zvýšení citlivosti metody, event. změnu této metody v průběhu vyhodnocování měření počítačem. Závažnou předností je také odpadnutí možnosti, že v průběhu měření či při zpracování filmového materiálu dojde k jeho zničení a tím k nenávratné ztrátě výsledků. Toto nebezpečí při zaznamenávání výsledků fotografickou cestou existuje vždy. Obě uvedené metody umožňují průběžnou kontrolu snímaného obrazu na obrazovce.

Předností obou uvedených postupů je také to, že lze s výhodou využít možnosti počítače pro extrapolaci křivek a ploch, grafického zpracování výsledků a určení extrémů. Nezanedbatelnou výhodou je také jednoduchost zařízení potřebného pro realizaci, které sestává ze snímací kamery, digitizéru obrazu a osobního počítače.

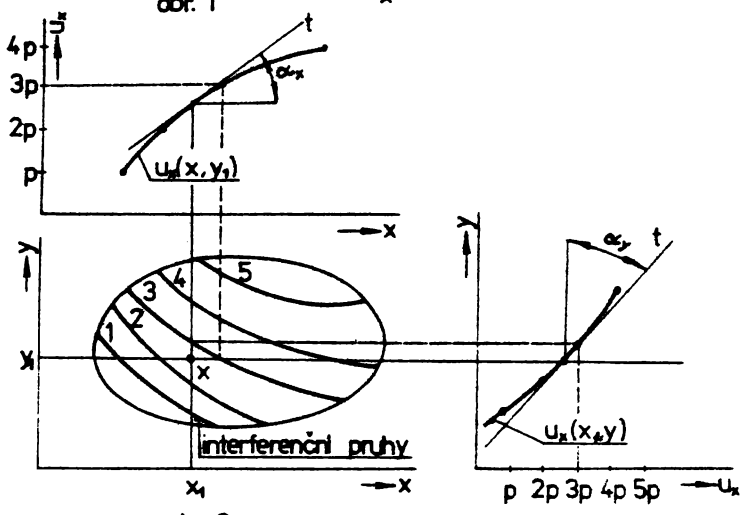
#### 4. Literatura

- Plánička F.: Metoda moire a její aplikace na měření plastických deformací na povrchu plochých součástí. *Strojírenství* 28. 1978. č.5 (str. 289).
- Plánička F.: Plane Stress, Plane Strain Transition in Rectangular Steel Bars a Central Hole, University of Wales, Swansea 1974.
- Plánička F.: Teoreticko-experimentální analýza mezních stavů vybraných vrubovaných součástí. Habilitační práce, VŠSE Plzeň, 1975.
- Luxmoore A.R.: Application of the Moire Technique to Experimental Micromechanics. The Proceedings of the Southampton 1969 Civil Engineering Material Conference.
- Bulín A.: Stavový přístup ke zkvalitnění obrazu. Digitální zpracování obrazu 87. Praha 1987, ČSVTS Tesla VÚST.





obr. 1



obr. 2