

OPTICAL METHODS IN EXPERIMENTAL MECHANICS

OPTICKÉ METODY V EXPERIMENTÁLNÍ MECHANICE

Miroslav Hrabovský¹

Abstract. *The paper deals with optical experimental methods used in experimental mechanics, especially in experimental stress analysis. High attention is given to optical methods – classical and modern optical methods and its future in mechanics. They are classical optical interferometry based on optical interference and superposition, stereometry, stereofotogrametry, photoplasticity, heterodyne interference, moiré, holography and holographic interferometry, speckle photography and speckle correlation methods etc.*

Keywords: experimental mechanics, experimental stress analysis, optical methods, interferometry, holography, holographic interferometry, moiré, speckle.

1. Úvod

Interferenční a difrakční jevy světelných elektromagnetických vln jsou v optice již letitým fenoménem, který inspiruje generace optiků, fyziků a techniků k novým přístupům popisu těchto jevů a s rozvojem techniky i novým, mnohdy netradičním, aplikacím v řadě přírodních a technických oborů, zejména pak v mechanice.

Klasická optika popisuje interferenční a difrakční jevy pomocí pojmů *ideálně koherentních* a *ideálně nekoherentních* světelných svazků, nověji potom pomocí pojmu *částečně koherentních* světelných svazků. Superpozice ideálně koherentních nebo částečně koherentních světelných svazků dovoluje pozorovat, například na stínítku, interferenční obrazec, ve druhém případě však s kontrastem interferenčních proužků menším, než je kontrast interferenčních proužků vytvořených koherentními svazky. U interferenčního obrazu požadujeme zpravidla časovou stacionárnost a stejnou frekvenci interferujících svazků, což lze poměrně jednoduše zajistit požadavkem jednoho primárního koherentního zdroje záření. V případě užití nekoherentních světelných svazků je interferenční obraz nepozorovatelný, lze však pozorovat, a tedy i technicky využívat, jevy plynoucí ze superpozice těchto, většinou intenzitních, světelných polí.

Obecně, velkému množství optických interferenčních metod a jejich technických variant provedení, s důrazem na užití v mechanice, snad nejlépe vyhovuje dělení podle fyzikálního principu, které také poměrně dobře vystihuje i jejich historický vývoj.

2. Klasické optické metody

Období před objevením fenomenálního zdroje koherentního záření - laseru, tedy zdroje záření s do té doby nemyslitelnými parametry, byla charakterizována následujícími skupinami metod.

- **Optické interferometry**

Klasické optické interferometry jsou zpravidla děleny na:

⇒ *dvousvazkové*, například interferometr Michelsonův, Machův-Zehnderův, Sagnacův aj. Z těchto

¹ Společná laboratoř optiky UP a FZÚ AV ČR, tř.17.listopadu 50, 772 07 Olomouc; tel.: +420-68-5223936; fax: +420-68-5224047; e-mail: hrabovsky@sloup.upol.cz

základních typů jsou dále odvozeny různé technické varianty interferometrů, a to podle četných účelů jejich užití

⇒ *mnohasvazkové*

⇒ *heterodynní*

⇒ *jiné*; do této skupiny zahrnujeme buď interferometry klasické, do jisté míry zvláštního typu (například Newtonův interferometr aj.) nebo interferometry vyvinuté později (například laserový interferenční anemometr, známý spíše pod názvem LDA aj.).

- **Stereometrické a stereofotogrammetrické metody**, užívané pro měření křivosti, deformace, napětí apod.
- **Moiré**, respektive v dělení na metody *moiré* a na metody *projekční moiré*.
- **Fotoelasticimetrie** – transmisní, reflexní, fotoplasticita, teplotní fotoelasticimetrie.

Předchozí metody využívají principu superpozice interagujících vln nebo jiných jevů (polarizace aj.), tedy principů nevyžadujících vždy striktně zdroje světla s dobrou koherencí. Především metody klasické optické interferometrie byly závislé na využití tehdy dostupných tzv. monochromatických zdrojů světla, avšak z jejich principu (s velmi malým stupněm koherence) byl poměrně jednoznačně vymezen rozsah jejich užití. Přesto lze v tomto období vysledovat uplatnění této skupiny metod v rozsahu a kvalitě špičkové, a to i z dnešního pohledu. Objev laseru a jeho technické uplatnění v měření přineslo renesanci i do těchto metod, respektive v kombinaci s metodickými přístupy později objevených metod (například holografie) a uplatněním nových optoelektronických prvků, výpočetní techniky a matematických algoritmů vyhodnocování naměřených výsledků přineslo nové, především kvalitou, ale i kvantitou, aplikace. Metody převážně (z různých důvodů) kvalitativní nebo omezené v jejich využití dostupnou metodikou, respektive pracností při vyhodnocování, byly následně (a doposud tento trend pokračuje) významně zlepšovány a aplikovány do nečekané kvality, a to i přes známé trendy v mechanice spojené s rozvojem aplikací numerických metod.

Následující metody jsou již založeny výhradně na principu interferometrie koherentních nebo kvazikoherentních optických vln.

3. Holografie a holografická interferometrie

Mnohé známé způsoby dělení holografie a holografické interferometrie vesměs vycházejí ze dvou základních postupů užití této metody. Jsou to *metoda v reálném čase* a *metoda dvojexpozice*. Na jejich principu jsou založeny další, již speciálněji užitečné základní metody, *metoda time-average*, *metoda stroboskopická*, *metoda hyperbolická* aj.

Holografie, tato bezesporu revoluční metoda vyvolala velká očekávání a mnohá byla také realizována. V kombinaci s klasickými interferenčními metodami (například využitím holografických postupů při aplikaci Machova-Zehnderova interferometru), nové holografické metodické přístupy a nové metody přinesly bezesporu nebývalé zjednodušení vlastní experimentální práce a pokroky při uplatnění v mechanice, avšak dnes lze již tvrdit, že klasická holografická interferometrie spadá ještě do oboru klasických interferenčních metod, vyžadujících převážně dobré laboratorní zázemí (metoda výrazně nepřekročila prostory laboratoří) a také vysoce kvalifikovanou obsluhu. Naopak, některé klasické metody, dříve jen obtížně aplikovatelné, jsou díky užití moderních optických a optoelektronických prvků (vláknová optika, nelineární optika, CCD, optické korelátoři aj.), výpočetní techniky, numerických a zejména statistických metod, nově a neočekávaně aplikovány v nejrůznějších oborech, a to běžným uživatelským způsobem, technicky dostupným široké technické veřejnosti.

4. Metody koherenční zrnitosti

Pozdější rozvoj holografických metod, zejména uplatnění metody tzv. *spekle holografie* a jejich variant, však již tuto pomyslnou laboratorní bariéru překračují, nikoliv však pro svůj princip, ale především pro možnost uplatnění moderních technických a optoelektronických prvků současné doby.

Nověji jsou však metody spekle holografie, na základě jejich principu a popisu, zařazovány do skupiny nazývané souhrnně

koherenční interferometrické metody, také **metody koherenční zrnitosti**, respektive **spekl metody**. Tyto metody využívají statistické vlastnosti optických polí koherenční zrnitosti (speklu) a jsou zřejmě představitelé nového směru i v oboru aplikací v mechanice.

Z tohoto pohledu tyto metody jsou děleny na:

- ⇒ **spekl interferometrie (spekl fotografie)**; metoda pracuje na principu interferometrie koherenčních (speklových) polí, přičemž výstupem je zpravidla systém jednoduchých interferenčních proužků se zřejmou speklovou strukturou
- ⇒ **statistická korelační spekl metoda**; výstupem metody již není charakteristický interferenční obraz, metoda zpravidla pracuje se soubory dvou nebo více polí koherenční zrnitosti, které jsou statisticky vyhodnocovány.

Statistickým popisem šíření a stavu světelného pole se zabývá *statistická optika*. Matematický aparát statistické optiky umožňuje nové pohledy na problematiku optické interference a difrakce světelných vln.

5. Závěr

Technické pokroky v oblasti světelných zdrojů, detektorů a výpočetní techniky dále umožňují i nové pohledy na aplikace, zejména v tradičních technických oborech. Lze hovořit o renesanci klasických optických měřicích metod co do jejich technické realizace a zejména užití, a to kvalitativně a kvantitativně.

Soudobé uplatnění optických experimentálních metod v mechanice je všeobecně zřejmé, přičemž výhodou a zřejmou perspektivou je především variabilnost, bezkontaktnost a možný vysoký stupeň mechanizace zpracování naměřených dat. Rozšíření uplatnění lze očekávat, například, v oblasti lomové mechaniky, v biomechanice, stanovení zbytkové napjatosti, při výzkumu kompozitních materiálů, bezdemontážní diagnostice, průkazu jakosti výrobků aj.

Samostatným, a dnes ještě i poněkud předčasným, rozvojovým přístupem je přístup ke klasickým interferometrům z pohledu kvantového popisu, tj. z pohledu kvantové optiky. Tento příslib současného stavu je ještě poněkud vzdálen aplikacím v mechanice, ale již velmi žhavým tématem v příbuzných oborech, například, v komunikacích pro zajištění bezpečného přenosu informace aj.

Literatura

- [1] Kolektiv: Experimentální pružnost. SNTL, Bratislava, 1970.
- [2] Milbauer M.: Fotoelasticimetrie. SNTL, Praha, 1953.
- [3] Brepta R., Prokopec M.: Šíření napěťových vln a rázy v tělesech. Academia, Praha, 1972.
- [4] Javornický J.: Photoplasticity. Academia, Praha, 1974.
- [5] BORN M., WOLF E.: Principles of Optics. Pergamon Press, Oxford, 1980.
- [6] HARIHARAN P.: Optical Interferometry. Academic Press, Sydney, 1985.
- [7] HECHT E.: Optics. Addison Wesley, Reading, 1987.
- [8] SALEH B.E.A., TEICH M.C.: Fundamentals of Photonics. John Wiley & Sons Inc., New York, 1991.
- [9] MALACARA D.: Optical Shop Testing. John Wiley & Sons Inc., New York, 1992.
- [10] SCHRODER G.: Technická optika. SNTL, Praha, 1981.
- [11] DURST R., MELLING A., WHITELOW J. H.: Principles and Practice of Laser Doppler Anemometry. Academic Press, London, 1981.
- [12] Ed. by CHA S. S., BRYANSTON-CROSS P. J., MERCER C. R.: Optical Diagnostic for Fluid, Heat, Combustion and Photomechanics for Solids. Proc. SPIE, Vol. **3783**, 1999.
- [13] KEPRT J., HRABOVSKÝ M., BARTONĚK L., TŮMA J.: Projekční moiré topografie. *Jemná mechanika a optika* **1** (2000) 4-10.
- [14] WEST Ch. M.: Holographic Interferometry. John Wiley & Sons Inc., New York, 1979.
- [15] Ed. by RASTOGI P. K.: Holographic Interferometry. Principles and Methods. Springer-Verlag, Berlin, 1994.
- [16] MEHTA P. C., RAMPAL V. V.: Lasers and Holography. World Scientific, London, 1993.
- [17] ABRAMSON N.: Light in Flight on the Holodiagram. SPIE Opt. Eng. Press, SPIE – Bellingham, Washington, 1996.
- [18] DUBAS M., SCHUMANN W.: Sur la détermination holographique de l'état de déformation a la surface dun corps non transparent. *Optice Acta* **21** (1974) 547.
- [19] DUBAS M., SCHUMANN W.: On Direct Measurements of Strain and Rotation in Holographic Interferometry Using the Line of Complete Lokalization. *Optica Acta* **22** (1975) 807.

- [20]SCHUMANN W., DUBAS M.: On the Holographic Interferometry Used for Deformation Analysis with One Fixed and One Movable Reconstruction Source. *Optik* **47** (1977) 391.
- [21]HRABOVSKÝ M.: Experimentální analýza rozložení napětí na lopatce regulačního diagonálního čerpadla. *Sborník referátů z 18. mez. konf. o experimentální analýze napětí EAN'80*, 20.-22.5.1980, Tále, Čs. Společnost pro mechaniku při ČSAV a DT Banská Bystrica, 1980, 73-92.
- [22]YAMAGUCHI I.: Fringe Formation in Deformation and Vibration Measurement Using Laser Light. Ed. by Wolf E., *Progress in Optics* **22** (1985) 271.
- [23]ARCHBOLD E., BURCH J. M., ENNOS A. E.: Recording of in-Plane Surface Displacement by Double-Exposure Speckle Photography. *Opt. Acta* **17** (1970) 883.
- [24]TIZIANI H. J.: Application of Speckling for in-Plane Vibration Analysis. *Opt. Acta* **18** (1971) 891.
- [25]TIZIANI H. J.: A Study of the Use of Laser Speckles to Measure Small Tilts of Optically Rough Surface. *Opt. Commun.* **5** (1972) 271.
- [26]ARCHBOLD E., BURCH J. M., ENNOS A. E.: Displacement Measurement from Double-Exposure Lasers Photography. *Opt. Acta* **19** (1972) 253.
- [27]YAMAGUCHI I.: Real-Time Measurement of in-Plane Translation and Tilt by Electronic Speckle Correlation. *Jpn. J. Appl. Phys.* **19** (1980) L131.
- [28]PETERS W. H., RANSON W. F.: Digital Imaging Techniques in Experimental Stress Analysis. *Opt. Eng.* **21**, 3(1982) 427.
- [29]PAVLÍČEK P.: Měření profilu předmětu pomocí interferometrie v bílém světle. *Jemná mechanika a optika* **3** (2002) 83-85.
- [30]HRABOVSKÝ M., BAČA Z., HORVÁTH P.: Koherenční zrnitost v optice. UP Olomouc, 2001.

Výsledky publikované v této práci byly získány za finančního přispění MŠMT ČR v rámci podpory projektu výzkumu a vývoje č. LN 00A015 „Výzkumné centrum pro optiku“.