

MODIFIKACE KARDANOVA KLOUBU

On Modification of the Cardan Joint

Zicha J.

Abstract: Aplikace Kardanova kloubu lze najít v rozsáhlém souboru přístrojů, strojů a zařízení. Mechatronika přinesla nové požadavky na tento strojní prvek, které souvisejí s jiným způsobem namáhání a se zvýšenými požadavky na tuhost, minimalizaci pasivních odporů a eliminaci vůlí s cílem dosažení vyšší kinematické přesnosti. Jsou stručně popsány některé netradiční způsoby použití.

Key words: Kardanův kloub, pohon měřicího stolku, altazimutální montáž

1. Úvod

Od svého objevení byl Kardanův (též Hookeův nebo křížový) kloub (Hieronimus Cardanus, 24.9.1501 - 20.9.1576, Robert Hooke, 16.7.1635 – 3.3.1703) používán jako spojka dvou různoběžných hřídelí a tedy sloužil k přenosu krouticího momentu. Ohromný počet jeho současných modifikací a aplikací v konstrukci motorových vozidel, výrobních strojů a měřicích přístrojů využívá právě této funkce. Další aplikací byl Kardanův závěs užívaný např. k uložení námořních chronometrů.

Z obecného pohledu však jeho aplikační možnosti nejsou zdaleka vyčerpány. Zajímavé je např. spojení matice vysoce přesného pohybového šroubu s měřicím stolcem. V této aplikaci - při možnosti axiálního posuvu čepů - je možná kompenzace chyby způsobené mimoběžností a nepřímostí reálných os šroubu a přímého vedení. Tohoto systému bylo patrně poprvé použito Rowlandem (1848 – 1901) při konstrukci rycího stroje na výrobu difrakčních mřížek. V r. 1975 bylo podobného konstrukčního uzlu použito při konstrukci mikrofotometru k pohonu stolku se spektrogramem [1]. Spojení přesného šroubu a stolku Kardanovým kloubem dovoluje navíc kompenzovat první harmonickou periodické chyby zmíněného šroubu. V těchto případech je funkce kloubu odlišná od prvotního použití (spojka), protože se jedná zejména o přenos posouvající síly, schopnost přenosu krouticího momentu je využita jen na zachycení reakce momentu pasivního odporu mezi maticí a šroubem.

Velmi zajímavou aplikací myšlenky dvouosého kloubu jsou montáže astronomických dalekohledů, přičemž zejména na montáži altazimutální lze dobře ukázat limity jeho použitelnosti. Prochází-li totiž pozorovaný objekt zenitem, vyžaduje sledování objektu nekonečnou rychlost rotace kolem azimutální osy, což je technicky nemožné - jedná se o singularitu. K té dojdeme tehdy, když osy vstupní a výstupní hřídele kloubu svírají úhel 90^0 [2].

Možnosti, které se otevřely díky pokroku výpočetní a řídicí techniky, dovolují konstruovat mechanická zařízení s nadměrným počtem stupňů volnosti (paralelní kinematické struktury, redundantní soustavy), jejichž aplikace v oblasti robotů a manipulátorů se stále rozšiřují [3], [4]. Protože funkce těchto systémů je možná pouze v součinnosti s řídicí výpočetní technikou, dostáváme se tak do oblasti známé pod pojmem mechatronika. Pohyby ve zmíněných systémech jsou zpravidla odvozeny od řízeného pohybu táhel, která spojují rám s funkčním prvkem (platformou). Spojení táhel s platformou je zabezpečováno zajímavou modifikací Kardanova kloubu, který není určen pro přenos kroutícího momentu, ale výlučně k přenosu tahové nebo tlakové osové síly v táhle.

Celkově lze i v této oblasti strojírenství nalézt dlouhodobý obecný trend, který směřuje ke kompaktním a přesným prvkům s velkou tuhostí.

2. Mechatronická modifikace Kardanova kloubu

Základní odlišnost mechatronické modifikace od normálního provedení spočívá v podstatném zvětšení dosažitelného úhlu mezi vstupní a výstupní osou a dále v přidání dalšího stupně volnosti - rotace vidlice kolem příslušné osy. Zmíněným způsobem lze při přenosu osových sil překonat dříve uvedenou singularitu a používat tuto úpravu jako náhradu sférického kloubu tvořeného kulovou plochou.

Zdánlivě jednoduchý úkol – prodloužení obou vidlic a aplikace dalších dvou ložisek je ovšem zdrojem několika problémů, zejména požadujeme-li aby všechna otočná uložení byla bez axiálních a radiálních vůlí. Je zřejmé, že ke splnění shora uvedených podmínek je nutná aplikace předepnutých valivých ložisek. Kromě speciálních ložisek různých firem vyhovují uvedené podmínce ložiska řady 33xx D (dvouřadá se šikmým stykem a s děleným vnitřním kroužkem nabízející možnost předepírání), případně ložiska 32xx, která jsou „lehčí“, než ta dříve uvedená a pokud nejsou předepnutá z výroby, lze je předepnout vhodnými tolerancemi protikusů.

Zde je nezbytné upozornit na další omezující parametr, který charakterizuje velikost kloubu – průměr kružnice opsané mechanismu v rovině kardanova kříže. Systémy zahrnující větší počet vzpěr (např. Hexapod či HexaSphere) nemají vzpěry rozmístěné po obvodě platformy a rámu rovnoměrně, ale páry přípojovacích kloubů jsou umístěny co nejbližší u sebe. V tom případě jejich velké rozměry způsobují potíže. Protože řada ložisek 32xx začíná s průměrem díry 10 mm, vyhovují tyto typy jen u značně rozměrných systémů vhodných pro přenos velkých sil.

Běžně užívaná jehlová ložiska jsou bez axiálně účinných doplňků nevhodná. Nutné úpravy automaticky vedou ke zvětšování kloubu a to je v rozporu s předcházejícím požadavkem. Některé firmy (např. INA, NTN) však nabízejí kombinaci jehlových ložisek s kuličkovým věncem v jednom prvku, což vede k žádané kompaktnosti konstrukce. Využití těchto prvků se předpokládá v krátké budoucnosti.

Pro rychlé posuzování kompaktnosti kloubů různých konstrukčních řešení je žádoucí nalézt vhodné bezrozměrné číslo, které bude vypovídat i o možném zatížení (tuhosti) této součásti. Jednou z možností je snadno zjiřitelný poměr mezi průměrem kružnice opsané kloubu v rovině kardanova kříže a průměrem čepů ložisek tohoto kříže, tedy D/d . Smyslem optimalizace konstrukčního řešení pak je dosažení poměru co nejmenšího.

3. Realizovaná a navržená řešení

V rámci experimentů byl navržen a vyroben kloub s uložením čepů kardanova kříže do malých kuličkových ložisek 619/7. Poměr D/d mezi průměrem opsané kružnice a průměrem čepu má hodnotu 15. Úhel možného odklonu os dosáhl $\pm 135^0$ a díky tomu, že vidlice je vyrobena z rotačních prvků (koule, válec) nedochází při změnách úhlů os v celém rozsahu k zablokování vzájemného pohybu v důsledku kolizí ostrých hran.

Při posuzování použitelnosti jednotlivých typů ložisek se objevila možnost, jak uvedený poměr výrazně zmenšit - a to tak, že koncepce otočného uložení bude „obrácená“. Zatím co standardní konstrukce vychází z kardanova kříže a z ložisek, jejichž vnější kroužky jsou uloženy ve vidlicích, bylo navrženo dělené pouzdro pro uložení všech čtyř ložisek za vnější kroužky (analogický termín „kardanovo pouzdro“, nejlépe však „kardanova dutina“) a vidlice byly integrovány s čepy. Z kontrolní konstrukce (ložisko 3205) plyne, že zmíněný poměr poklesl na 6, přičemž konstrukci zvětšují těsnící kroužky Gufero a neoptimalizované vidlice. Na průměru D lze ušetřit jiným těsněním a upravenou vidlicí ještě cca 20mm, takže je dosažitelný poměr 5,2. Připomínám, že ložisko 3200 má statickou únosnost 14,3 kN, takže tento kloub je vhodný pro velké osové síly – cca 20 kN. Jedna z výhod tohoto řešení spočívá v tom, že ložiska pracují v uzavřeném prostoru. To umožňuje použití trvalé tukové náplně a omezuje interakci ložisek s vnějším prostředím.

V souvislosti s vývojem měřicí stanice pro měření spektrální emisivity ekosystémů se stožárem o výšce 30 m (grantový projekt ENKI a našeho ústavu s názvem TOKENELEK) je navržena a potenciálním výrobcem schválena konstrukce popsáního kloubu, kterého bude použito k uložení paty stožáru i k uložení manipulačních vzpěr.

K minimalizaci rozměrů kloubu může dále přispět i vhodný výběr ložisek. Shora uvedený průměr kloubu D roste s vnějším průměrem ložiska a jeho šířkou a proto je nutné pečlivě hledat kompromis mezi zatížením, dostupnými typy ložisek a dalšími konstrukčními prvky, jako jsou např. těsnění. Další vývoj – zejména pro asymetrická řešení – vyjde z kombinace jehlového a dvou jednosměrných válečkových axiálních ložisek. Tyto typy valivých ložisek jsou totiž při velké únosnosti rozměrově nejúspornější.

První kinematický model HexaSphere měl Kardanovy klouby vyrobené z modelářských prvků. Uložení čepů (hlavní čep Φ 3 mm, vrtaný čep Φ 4,5 mm) jsou kluzná, takže vůle radiální i axiální dosahují hodnoty několika setin mm. Průměr opsané kružnice D je 20 mm, takže poměr D/d je 6,67.

Druhý model je vylepšen v tom smyslu, že vidlice kloubů jsou za cenu komplikovanější technologie lépe tvarově řešeny a je optimalizována materiálová kombinace otočného uložení (titan a bronz). Poměr D/d zůstává stejný.

Konstrukce kloubů pro nový typ HexaSphere s valivým otočným uložením (minimalizovány vůle a pasivní odpory) vyšla z toho, že kluzná uložení s čepy jsou nahrazena malými kuličkovými ložisky 618/7 s dírou o Φ 7 mm. Průměr D sice vzroste z 20 na 33 mm, ale ze systému zmizí velké vůle, které doposud negativně ovlivňovaly přesnost nastavení. Podstatné zmenšení pasivních odporů zlepší pohyblivost kloubu v oblasti blízké k singularitě. Poměr D/d dosáhne hodnoty 4,7.

4. Závěr

Z obecnějšího pohledu lze konstatovat, že nástup mechatronických systémů konstruovaných na bázi tyčových struktur vyžaduje jednak konstrukci velice tuhých táhel (nejlépe s proměnnou a přesně měřenou délkou) a přímých vedení a dále konstrukci Kardanových kloubů, jejichž tuhost bude s tuhostí táhel korespondovat při malých vnějších rozměrech. Neopomenutelnými parametry, které přímo ovlivňují přesnost mechanismů, jsou minimální pasivní odpory a eliminované vůle mezi pohyblivými prvky. Je zřejmé, že na cestě za prvky s komplexními optimálními vlastnostmi (m.j. též servopohony, odměřovací systémy, atd.) budou nalezena četná nová a zajímavá technická řešení.

V tomto příspěvku jsou shrnuty dosavadní praktické zkušenosti získané při práci v dané oblasti. Za tuto možnost autor děkuje Prof. Ing. Jiřímu Bílovi, DrSc. a řešitelskému týmu projektu TOKENELEK a Prof. Ing. Michaelovi Valáškovvi, DrSc. a jeho spolupracovníkům v projektu HexaSphere.

References

- [1] Zicha J.: Mikrofotometr a komparátor pro vyhodnocování stelárních spektrogramů. Kandidátská disertační práce, Fakulta strojní ČVUT v Praze, 1979.
- [2] Chýlek T., Zicha J.: *SET – Simple Expeditionary Telescope*. Proc. ESO Conference: Progres in Telescope and Instrumentation Technologies, ESO Garching, 27-30 April 1992.
- [3] Karásek M., Večeřa F.: *Funkční model HexaSphere*. Proc. Nadace Czech Technical University Media Laboratory, Workshop 2008, Praha.
- [4] Jakubský O.: *Aplikace nových materiálů a pohonů v konstrukci manipulátorů s paralelní strukturou*. Disertační práce, Fakulta strojní ČVUT v Praze, 2009.

Kontaktní adresa

ČVUT FS, Ústav přístrojové a řídicí techniky, Technická 4, 166 07 Praha 6

Doc. Ing. Josef Zicha, CSc., josef.zicha@fs.cvut.cz