

超环面行星蜗杆传动研究综述

许立忠, 杨育林, 黄真

(燕山大学机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

[摘要] 超环面行星蜗杆传动将滚动接触技术与行星蜗杆传动技术融为一体, 是机械传动领域的前沿技术, 具有承载能力大、传动效率高、传动比大和噪音小等优点。文章全面论述了该种传动的起源、研究现状及存在的问题, 并提出未来应从啮合理论、制造技术和承载能力三个方面进一步开展研究工作, 探索一套综合设计理论与制造技术, 以实现超环面行星蜗杆传动设计与制造过程的合理化。

[关键词] 超环面行星蜗杆传动; 研究现状; 存在问题; 未来研究方向

1 引言

机械传动技术是机械工程技术的重要组成部分, 在一定程度上标志着机械工程的水平。随着机器设备功率和速度参数的日益提高, 各种新型传动不断出现。1984年德国学者 S. Cierniak 提出的滚柱蜗杆传动装置, 由具有矩形齿的环面蜗杆和具有滚柱的蜗轮组成, 成功地实现了蜗轮与蜗杆之间的滚动接触^[1]; 90年代初, 国内学者张光辉、王进戈和王连明、丁希伦等人又分别研制成功了滚锥包络环面蜗杆传动^[2,3]。以上两种传动的共同优点是以滚动接触代替滑动接触, 并且可以用硬齿面材质代替有色金属制作蜗轮, 从而不仅降低了制造成本, 而且可以提高工作效率和承载能力。此外, 美国和前西德两国学者于80年代初共同研制出超环面行星蜗杆传动样机^[4]; 1995年美国学者提出行星蜗杆传动原理^[5]; 与此同时, 还有许多类似的新型传动问世。

从机械传动系统的发展趋势, 可以看出两个很有前景的发展方向^[6]: 第一个发展方向是传动啮合表面由滑动接触向滚动接触发展。如上述滚柱蜗杆传动和滚锥包络环面蜗杆传动; 第二个发展方向是传动形式由单一传动向综合多种传动优势的复合

传动发展, 如上面提到的行星蜗杆传动和超环面行星蜗杆传动, 其中超环面行星蜗杆传动将滚动接触技术与行星蜗杆传动技术融为一体, 兼有两者的优点, 因而被认为是已知机械传动的最佳形式。

2 超环面行星蜗杆传动组成原理和优点

超环面行星蜗杆传动由美国 Coulter 系统公司 M. R. Kuehnle 于1966年提出^[7]。80年代初, 前西德亚琛大学派出一个由 H. Peeken 教授领导的研究小组与美国 Coulter 公司共同研究四年才研制出首台试验样机^[4]。从传统观点来看, 实际上该种传动机构主要由两大部件组成: a. 中心蜗杆组合件, 包括中心蜗杆、行星轮组和行星架三部分。b. 凹形槽定子, 由两个半片弧形零件组成。行星轮的轮齿可以是滚珠、滚柱或滚锥。该传动机构的结构简图如图1所示。其旋转运动由蜗杆2输入, 带动固联于行星架H上的行星轮1转动, 通过定子螺旋槽和行星轮轮齿的啮合带动行星架旋转, 从而实现运动的输出。圆柱齿轮、行星齿轮和摆线齿轮传动的运动都发生在一个平面上; 蜗杆传动和螺旋齿轮传动的运动则发生在两个变换的旋转平面上; 而超环面行星蜗杆传动的运动是以三个方向的圆周运动

同时发生在三个平面上，见图 2。

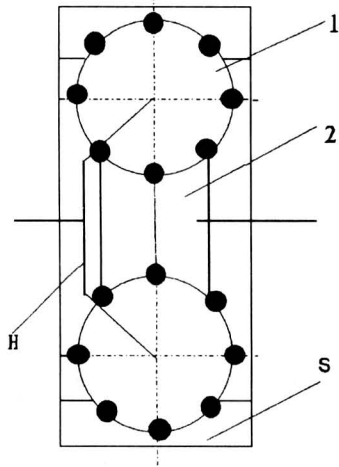


图 1 超环面行星蜗杆传动

S—定子 1—行星轮 2—蜗杆 H—行星架

Fig.1 The toroidal drive

S—Stator 1—Planet gear 2—Worm H—Arm

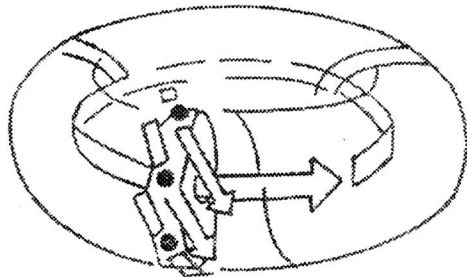


图 2 超环面行星蜗杆传动行星轮运动轨迹

Fig.2 The motion path of planet gear for toroidal drive

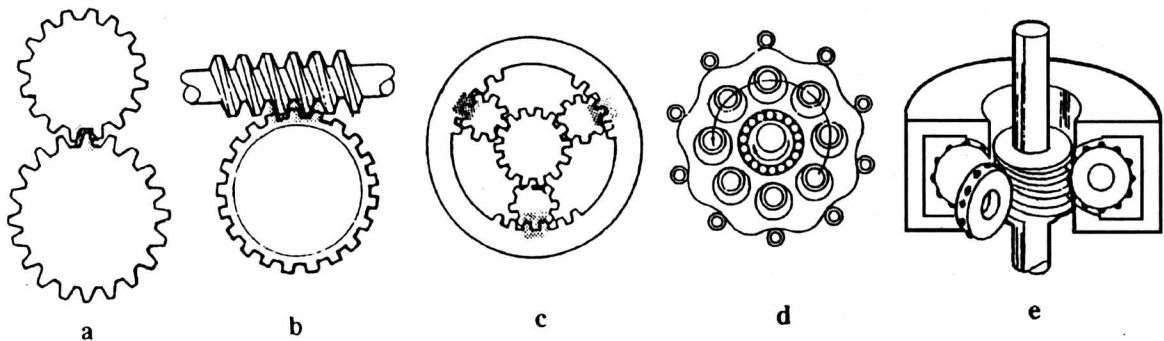


图 3 不同传动类型传力点数目比较

a—直齿圆柱齿轮传动；b—蜗轮蜗杆传动；c—行星齿轮传动；d—摆线齿轮传动；e—超环面行星蜗杆传动

Fig.3 Number of transfer points for various gear types

超环面行星蜗杆传动机构具有以下优点：

1) 可以实现较大的传动比，一般可以在 6~240 范围内进行设计并且具有可逆性。

2) 有较小的质量与功率之比，从而使得结构紧凑、减轻机器质量并降低造价。对于一对直齿圆柱齿轮传动而言，一般只有一对齿啮合；蜗轮蜗杆传动可以实现两对齿啮合；行星齿轮传动如果安排得当可以同时实现 3~5 对齿啮合；以结构紧凑而见长的摆线齿轮传动最多也只能实现 6~12 对齿同时啮合。在给定功率和传动比的条件下，由于传动力在啮合齿上过于集中，按这四种形式设计的传动机构必然庞大、笨重和耗能多。而超环面行星蜗杆传动可以实现 36 个滚动元件的同时啮合，因而力的传递可以均布于单位啮合元件上，使得机构的质量与功率之比大大降低。不同传动类型传力点数目比较见图 3。在传递 30 kW 电机功率时，超环面行星蜗杆传动机构质量与输出功率之比值 (kg/kW) 与其它传动机构的比较如下：

超环面行星蜗杆传动：1.2；

摆线齿轮传动：2.4；

行星齿轮传动：3.8；

蜗轮蜗杆传动：6.2。

3) 噪音极小。行星轮上滚动元件可以采用横向可伸缩的滚动体，下设弹簧，不仅使滚动元件之间负荷完全均衡化，而且具有减振、降噪作用。

4) 工作效率高。

由于具有上述优点，超环面行星蜗杆传动具有很强的竞争能力，是当今一种比较完美、高效能的传动机构。

3 国内外研究现状及存在的问题

超环面行星蜗杆传动机构一经出现,立即引起国内外学术界和企业界的高度重视。由于技术的保密性,所见公开发表的研究资料并不多。不过可以看出:迄今为止,对于超环面行星蜗杆传动的研究主要有以下几个方面:**a.** 啮合理论研究;**b.** 关键零件定子加工制造技术研究;**c.** 承载能力研究;**d.** 其它问题研究。其中前两方面的研究相对较多,而后两方面的研究则很少。在啮合理论研究方面,国内研究相对较多^[8~11],国外尚未见资料报道。文献[8~10]给出了超环面行星蜗杆传动定子齿面方程、蜗杆齿面方程、接触线方程和螺旋线方程等。文献[11]在该种传动啮合理论的研究方面有很大突破,文中不仅求解并比较了在三种不同行星轮齿形时行星轮与定子及蜗杆的接触线,而且讨论了根切界限点,并依据定子法截面内齿形设计定子飞刀,把超环面行星蜗杆传动的啮合理论与实际加工过程联系起来。综合而言,对于该种传动的啮合特性,尚需进行深入系统的研究。因为对于该种传动啮合特性的影响因素和影响规律等问题的研究尚属空白,并很少对该种传动的啮合特性进行具体的分析和计算,以至于缺乏在传动设计和制造中直接可用的具体研究成果。当前亟须解决的问题,是将传动啮合理论的研究成果与具体的设计及制造过程结合起来。

超环面行星蜗杆传动制造技术研究的关键是内圆环面定子加工制造的可能性和精确性。综合国内外在定子加工技术方面的研究成果,笔者认为,采用非切削加工成形方法主要有以下研究方向:

1) 精密铸造法 由于定子形状比较复杂,采用精密铸造方法是非常适合的,它可以省去齿槽的精加工,整个定子只需部分机械加工。不过这种成形方法用于合成材料如尼龙6时比较方便。

2) 粉末冶金法 这种成形方法的优点是定子齿面硬度高、耐磨损、寿命长,而且很少需要后续机械加工。缺点是成形压力很大,特别是尺寸较大的定子成形更为困难,容易出现压力分布不均现象。

3) 精密模锻法 分热锻和冷锻两种方式。采用该方法加工成形的定子,所需机械加工量也很少,缺点是成形压力大,模具费用高。

4) 电化学成形法 由于受电解池尺寸的限制,

该种成形方法仅适于小尺寸定子的成形。

以上四种定子成形方法只适于小尺寸定子的成形,且行星轮的齿形只能是滚珠。

下面三个研究方向属于切削加工成形方法,切削成形法的优点是既适于球形齿又适于柱形齿超环面行星蜗杆传动,而且可用于大尺寸定子的成形。

1) 数控中心加工法 前西德采用五轴联动数控中心加工定子属于这种成形方法。这种加工方法的优点是既适于单件、小批量生产,又适于大批量生产,而且加工精度很高;缺点是需用贵重的数控加工设备,而目前国内五轴联动数控中心还比较少见,并且其回转半径较大,不适于大部分尺寸定子的成形。

2) 专用机床加工法 这种成形方法的优点是生产效率高,但设备成本高。

3) 普通机床改装加工法 如文献[12]中所述,对滚齿机等设备进行改装以加工超环面定子。这种成形方法一般是依据范成加工原理,刀具形状与行星轮轮齿形状相同,但往往是两片定子分别加工而后再组装,所以加工精度不高。文献[11, 13]中介绍了一种在滚齿机上采用范成法加工定子的方法。其显著的优点是两片定子的螺旋槽同时成形,因而使得加工精度提高的可能性大大增加。

上述共计七种定子加工方法当中,国内的研究仅限于普通机床改装加工法。在普通机床改装加工法中,文献[11, 13]所述的加工方法是目前国内最为成功的一种,已用这种方法加工出国内首台超环面行星蜗杆传动试验样机。当然,尚有些问题需要进一步完善。该种定子加工方法是采用飞刀粗切和磨削两道工序完成的。由于飞刀切削速度很低,切削定子的齿面精度较差,磨削后并未达到预期精度指标,而且在磨削过程中,磨头(因其尾部装有微型电机)在定子中旋转限制了所能切削定子的尺寸,为此,应进一步探索更有效的加工方法以解决这些问题。

在超环面行星蜗杆传动承载能力研究方面,国内外很少有研究资料报道。在文献[14]中,Peeken给出了超环面行星蜗杆传动载荷分布的计算公式,并对该种传动的载荷分布情况进行了实际测试;在文献[15]中,Peeken介绍了有关超环面行星蜗杆传动定子点蚀的研究成果,并确定了几种聚合物材质用于定子时的许用扭矩,在该种传动的承载能力研究方面,这是一个很大的突破;在文献[16]中,

Tooten 研究了有关超环面行星蜗杆传动中行星轮轮齿滚柱的偏载问题,并提出了改进措施;文献[17]中给出了超环面行星蜗杆传动效率分析的简单方法,其效率计算公式是近似采用螺旋传动的效率公式形式给出的,其中主要考虑了螺旋升角的影响。综合而言,国内外对于该种传动承载能力方面的研究基本处于起步阶段,迫切需要对该种传动从强度及摩擦学等多方面进行综合的承载能力研究。在强度分析方面,可以在 Peeken 教授的载荷分布研究成果的基础上,进一步开展以下三个方面的研究工作。第一,Peeken 关于超环面行星蜗杆传动载荷分布的研究是针对滚柱齿进行的,而滚柱齿超环面行星蜗杆传动中行星轮轮齿的受力只有位于同一平面内的两个分力,分析相对简单。应进一步对滚珠齿和滚锥齿超环面行星蜗杆传动的载荷分布情况进行研究。通过进一步的研究,最好能给出适于三种不同行星轮齿形的统一的载荷分布计算公式。第二,Peeken 关于超环面行星蜗杆传动载荷分布的试验表明,载荷分布相对于两片定子的对称中心并不是对称的,沿蜗杆轴线方向存在着偏载现象,而 Peeken 公式给出的载荷分布却是对称的。所以应进一步考虑沿蜗杆轴线方向的偏载现象,对超环面行星蜗杆传动的载荷分布进行更为切合实际的分析。第三,Peeken 未对超环面行星蜗杆传动接触线和诱导法曲率等啮合特性进行研究,因而未能在载荷分析之后解决超环面行星蜗杆传动齿面接触应力的计算问题。因此,完成超环面行星蜗杆传动齿面接触疲劳强度的研究是一个重要课题。在超环面行星蜗杆传动效率和润滑等摩擦学的研究方面,研究成果则更为缺乏,以至于国内外研制出来的超环面行星蜗杆减速器样机普遍存在摩擦学方面的问题。因此,对于超环面行星蜗杆传动从摩擦、磨损和润滑三个方面进行全面的具有重要的实际意义。

此外,国内外专家学者针对超环面行星蜗杆传动还进行了其他一些方面的研究工作:S.Cierniak 研究了超环面行星蜗杆传动行星轮轮齿的运动阻力问题^[18];文献[19]和[20]探讨了超环面行星蜗杆传动中心蜗杆的加工问题;文献[21]中初步探讨了超环面行星蜗杆传动定子的 CAD 设计系统;为了简化加工过程,国内外专家学者还在研究探索由超环面行星蜗杆传动衍生而成的新型超环面传动机构^[22]。

4 未来的研究方向

国内外对超环面行星蜗杆传动的研究成果主要集中在啮合原理和加工制造方法两个方面。其中啮合原理方面的研究还不够深入;对定子制造问题也未很好地解决;在传动接触强度、效率、润滑和耐磨寿命等方面的研究基本处于起步阶段。为此,笔者对该种传动的啮合特性进行了深入系统的研究,并以此为基础,研究探索了超环面行星蜗杆传动的载荷分布、齿面接触应力分布、油膜厚度分布、啮合效率及其随传动啮合参数的变化规律;综合考虑机构运动、齿面接触疲劳强度、工作效率、润滑状态和加工制造等因素,完成了超环面行星蜗杆传动的样机设计;研究探索了有范成运动的铣齿法,在滚齿机上实现了定子螺旋槽的加工,取得了更高的切削效率和加工精度。研究成果已初步形成超环面行星蜗杆传动的设计理论框架^[23~27]。未来应该进一步开展超环面行星蜗杆传动啮合理论、制造技术和承载能力三个方面的研究工作,在此基础上,探索一套能综合考虑机构运动、接触强度、效率、润滑状态、耐磨寿命和加工制造等因素的成熟的综合设计理论与制造技术,从而实现超环面行星蜗杆传动设计与制造过程的合理化,以便把超环面行星蜗杆传动这一高效能的传动机构在我国真正从理论转化为实际,并投入市场,为我国经济建设服务。

参考文献

- [1] Cierniak S. Das Rollenschneckengetriebe [J]. VDI-Z, 1984, 126 (12): 455~458
- [2] 王进戈,张光辉.滚锥包络环面蜗杆传动的原理研究与参数优化 [J].重庆大学学报,1992,14(2):58~64
- [3] Wang Lianming, Ding Xilun, Wu Hongye. The analysis of the character of contact line on rolling cone worm gearing [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1995, 27 (3): 135~140
- [4] Kuehnle M R, Peeken H, Troeder C, et al. The Toroidal drive [J]. Mechanical Engineering, 1981, 32 (2): 32~39
- [5] Yang Taiher. Planetary worm type gear and application device [P]. USA Patents: 5 387 162
- [6] 张启先,张玉茹.我国机械学研究的新进展与展望 [J].机械工程学报,1996,32(4):1~4
- [7] Kuehnle M R. Toroidgetriebe [P]. Urkunde über die Erteilung des deutschen Patents, 1966, 1 301 682

- [8] 杨传民, 祝毓虎. 螺环传动啮合理论(一)[J]. 机械设计, 1988, (5): 44~48
- [9] 王景连. 圆环传动及其啮合原理[J]. 大连工学院学报, 1986, 25(4): 57~62
- [10] 徐晓俊, 张跃明, 唐德威, 等. 球形齿超环面行星传动的啮合理论研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1995, 27(1): 123~126
- [11] 姚立刚. 超环面行星蜗杆传动啮合分析及加工方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1996
- [12] Cierniak S, Quint M. Qualitätskontrolle der Zahnflanken des Toroidgetriebe-Stators [J]. VDI - Z, 1983, 125(7): 233~236
- [13] 姚立刚, 徐晓俊, 李华敏, 等. 包络法加工超环面行星蜗杆传动定子的研究[J]. 机械传动, 1996, 20(3): 24~26
- [14] Peeken H, Troeder C, Tooten K H. Berechnung und Messung der Lastverteilung im Toroidgetriebe [J]. Konstruktion, 1984, 36(3): 81~86
- [15] Peeken H, Cierniak S, Troeder C. Walzfestigkeiten moderner Werkstoffe der Walzpaarung "Kugel-Kugellauftrinne"[J]. Konstruktion, 1980, 32(3): 89~95
- [16] Tooten K H. Optimierung des Kraftübertragungsverhaltens in Getrieben mit Walzkontakten [J]. Antriebstechnik, 1985, 24(7): 49~55
- [17] 杨传民. 螺环传动装置的效率[J]. 机械设计, 1997, (2): 35~38
- [18] Cierniak S. Rollverhalten von Kugeln zwischen geschrankten Rinnen [J]. Konstruktion, 1981, 33(4): 155~158
- [19] Cierniak S, Quint M, Kretzer W. Drei-Koordinaten-Meßtechnik zur Kontrollraumlich gekrumter Zahnflanken [J]. Werkstatt und Betrieb, 1982, 115(11): 721~723
- [20] 张春丽, 徐晓俊, 董申. 在数控铣床上加工超环面蜗杆的数值简单计算方法[J]. 机械传动, 1999, 23(2): 13~15
- [21] Yao Ligang, Xu Xiaojun, Li Huamin. The intelligent CAD system for toroidal drive [A]. Proc. of 18th Int. Conference on Computer in Engineering [C]. China, 1995, 744~746
- [22] 徐晓俊, 张春丽, 董申. 新型超环面传动的内齿轮齿面展成原理[J]. 机械传动, 1999, 23(1): 32~34
- [23] Xu Lizhong. Study on loads and contact stresses for toroidal drive [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1997, 10(4): 275~278
- [24] 许立忠, 王灵忠, 赵永生. 超环面行星蜗杆传动啮合特性研究[J]. 农业机械学报, 1997, 28(4): 139~143
- [25] 许立忠, 赵永生. 滚柱式超环面行星蜗杆传动啮合特性和接触应力研究[J]. 工程设计, 1998, (1): 35~37
- [26] 许立忠, 曲继方, 赵永生. 滚柱式超环面行星蜗杆传动弹流润滑研究[J]. 润滑与密封, 1997, (6): 36~24 (入选美国化学文摘)
- [27] 杨育林, 许立忠, 赵永生. 滚柱式超环面行星蜗杆传动接触疲劳强度研究[J]. 中国机械工程, 1998, 9(6): 19~24

General Review of the Study on the Toroidal Drive

Xu Lizhong, Yang Yulin, Huang Zhen

(Yanshan University, Qinhuang Island, Hebei 066004, China)

[Abstract] The toroidal drive combines rolling contact technique with planet worm drive. The drive has many advantages such as high carrying capacity, large speed ratio, high operating efficiency and low noise. It is the frontier in the mechanical drive field. The paper reviews the origin and present study conditions of the drive. The present problems for the drive are also analyzed. The authors think that the engaging theory, manufacturing technique and the carrying capacity for the drive should be further studied so that a set of synthetic design theory and manufacturing technique can be developed and the rationalization of design and manufacture process is realized.

[Key words] toroidal drive; present study situation; present problems; future study direction