

准双曲面齿轮的修正节锥设计方法及切齿试验*

张金良¹ 方宗德¹ 曹雪梅¹ 邓效忠² 杨建军³

(1. 西北工业大学机电工程学院 西安 710072;

2. 河南科技大学机电工程学院 洛阳 471003;

3. 东风车桥有限公司齿轮研究所 十堰 442051)

摘要: 为了提高准双曲面齿轮的强度和耐磨性, 提高准双曲面齿轮的使用寿命, 提出准双曲面齿轮的修正节锥设计方法。在不改变大轮外径和中点工作齿高的情况下, 令大轮的齿顶高系数 $f_a \leq 0$, 从而可以导出新的节锥参数, 此时新的节锥与面锥重合或在准双曲面齿轮实体之外。利用齿面接触分析(TCA)、齿面承载接触分析(LTCA)和有限元法(FEM), 分析齿轮副的啮合性态、齿面接触应力、齿根最大拉伸应力和齿根最大压缩应力。计算机模拟显示, 采用修正节锥设计方法设计的准双曲面齿轮的齿面接触应力、齿根最大拉伸应力和齿根最大压缩应力显著减少, 采用修正节锥设计方法设计的准双曲面齿轮在加工过程中可用一般的刀具, 不需要特殊的工具。

关键词: 准双曲面齿轮 修正节锥设计方法 齿面接触分析 有限元法 啮合性态 强度

中图分类号: TH132.421

0 前言

准双曲面齿轮在汽车、工程机械等工业部门都获得了广泛应用, 由于准双曲面齿轮的几何形状复杂、技术问题多、制造难度大, 一直受到众多学者的关注。杨宏斌等^[1]对高齿准双曲面齿轮做了研究; 罗月新等^[2]摒弃了齿面两侧啮合对称的要求, 以大轮大端分度圆直径、大轮齿宽、小轮螺旋角和大轮节锥角为控制参数, 推导出计算分度锥面几何参数的新方法。

在圆柱齿轮设计中, 为了提高齿轮的强度和耐磨性, 常采用变位设计。梁桂明等^[3-4]依据圆柱齿轮变位的思想, 提出了锥齿轮的非零变位设计方法, 并已成功应用于弧齿锥齿轮的设计中; 万小利等^[5-6]在准双曲面齿轮的设计中, 也成功地运用了非零变位设计方法。由于非零变位为角度变位, 利用节锥和分锥的分离来改变节锥上的压力角, 以实现齿厚的变化, 从而改变锥齿轮的强度。因此, 采用非零变位设计方法设计出的锥齿轮, 在加工大轮时只能采用展成法, 这就限制了非零变位锥齿轮设计方法的应用, 对于在汽车工业广泛应用的采用 HFT 切齿法加工的准双曲面齿轮来讲尤其如此。

在传统的 Gleason 轮坯设计中^[7], 根据工程实际需求确定大、小轮的齿数, 小轮偏置距和齿轮的旋向, 由齿轮的承载能力和强度确定大轮大端节圆

直径、大轮齿面宽和小轮的螺旋角, 利用上述参数以及刀盘半径等参数, 可以逐一地计算出准双曲面齿轮的轮坯参数。由于大轮大端节圆直径、大轮齿面宽和小轮的螺旋角是计算轮坯参数的基础, 并且对齿轮的强度和承载能力有较大的影响, 本文提出了在不改变大轮外径的情况下(这样汽车后桥桥壳不必改变), 采用修正节锥设计方法, 以此改变准双曲面齿轮的节锥参数, 提高齿轮的强度。

1 修正节锥设计方法

对于一对按 Gleason 轮坯设计方法设计好的准双曲面齿轮副, 在大轮中点处的齿高、外径不变的情况下, 将大轮的节锥移至面锥之外, 这样形成新的大轮节锥, 利用新节锥参数, 可计算出变位后齿轮副的节锥参数。

图 1 为大轮轮坯变化情况。 $P_1Q_1 = X_2/2$, X_2 为变位前大轮外径, O_2 、 O_{a2} 、 O_{f2} 、 H_2 分别为准双曲面齿轮变位前的交叉点、面锥与大轮轴线的交点、根锥与大轮轴线的交点和节锥与轴线的交点, P'_2 是变位后大轮节锥上的齿宽中点, r'_2 为变位后大轮的中点节圆半径。

下面讨论变位后轮坯的计算。

变位后, 大轮大端的齿顶高

$$h'_{ae2} = f_a h + \frac{1}{2} b_2 \tan(\delta_{a2} - \delta'_2) \quad (1)$$

式中 h'_{ae2} ——变位后大轮大端齿顶高

h ——变位前大轮中点处的齿高

δ'_2 ——变位后大轮节锥角

* 国家自然科学基金(50475148)、航空基金(04C53015)和河南科技大学科研基金(2006ZY018)资助项目。20060715 收到初稿, 20070420 收到修改稿

f_a ——变位后齿顶高系数(小于 0)
 b_2 ——变位前大轮齿宽
 δ_{a2} ——变位前大轮面锥角

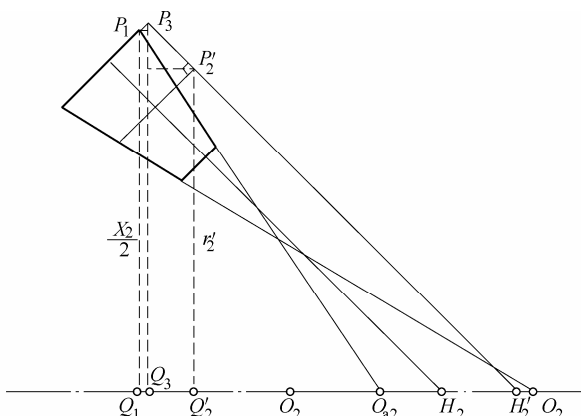


图 1 大轮轮坯变化情况

当 $f_a < 0$ 时, $h'_{ae2} < 0$ 。变位后, 节锥在面锥之外, 也就是说节锥在轮坯实体之外, 因此, 称之为虚节锥。

由图 1 可知, 变位后大轮的中点节圆半径 r'_2 可由下面的公式计算

$$r'_2 = \frac{X_2}{2} - h'_{ae2} \cos \delta'_2 - \frac{1}{2} b_2 \sin \delta'_2 \quad (2)$$

变位后大轮的中点节锥距 R'_2 为

$$R'_2 = \frac{r'_2}{\sin \delta'_2} \quad (3)$$

1.1 采用标准收缩齿制

由式(4)可计算出变位后大轮节锥角 δ'_2

$$\delta'_2 = \delta_{a2} - \frac{57.3 h f_a}{R'_2} \quad (4)$$

式中 δ_{ae2} ——变位前齿轮的面锥角

1.2 采用双重收缩齿制

由式(5)可计算出变位后大轮节锥角 δ'_2

$$\delta'_2 = \delta_{a2} - \frac{176}{z_2 \tan \alpha} \left(1 - \frac{R'_2 \sin \beta'_2}{r_0} \right) \quad (5)$$

式中 z_2 ——大轮齿数

β'_2 ——小轮初始螺旋角

1.3 变位后轮坯参数的计算

若采用标准收缩齿制, 则由式(1)~(4)计算出变位后大轮节锥角 δ'_2 、变位后大轮的中点节圆半径 r'_2 等轮坯参数, 然后利用已有的轮坯参数计算公式即可计算出余下的大、小轮轮坯参数。

若采用双重收缩齿制, 则由式(1)~(3)、(5)计算出变位后大轮节锥角 δ'_2 、变位后大轮的中点节圆半径 r'_2 等轮坯参数, 然后利用已有的轮坯参数计算公式即可计算出余下的大、小轮轮坯参数。

2 修正节锥设计方法设计出的准双曲面齿轮算例

在这一部分中, 考虑一对由修正节锥设计方法设计出的准双曲面齿轮副, 利用齿面接触分析 (Tooth contact analysis, TCA)、齿面承载接触分析 (Loaded tooth contact analysis, LTCA) 及有限元法 (Finite element method, FEM) 分析这一对齿轮副的啮合状态、齿面接触应力、齿根最大拉伸应力以及齿根最大压缩应力。

2.1 准双曲面齿轮副轮坯参数之间的比较

表 1 为本文所研究的准双曲面齿轮副的轮坯基本参数。

表 1 准双曲面齿轮副的轮坯基本参数

参数	小轮	大轮
齿数 z	7	39
齿宽 b/mm	—	63
小轮偏置距 E/mm	35	—
大轮大端节圆直径 d/mm	—	434.09
平均压力角 $\alpha/^\circ$	—	22.5
轴交角 $\Sigma/^\circ$	—	90
小轮中点名义螺旋角 $\beta/^\circ$	47	—
旋向	左旋	右旋

表 2 为借助于表 1 的基本轮坯参数计算出的利用 Gleason 方案、修正节锥设计方案 ($f_a = -0.12$) 设计出的齿轮副其他轮坯参数之间的比较。

表 2 两种设计方案所得齿轮副轮坯参数之间的比较

参数	Gleason 轮坯设计方案		修正节锥轮坯设计方案	
	大轮	小轮	大轮	小轮
外锥距 R_e/mm	222.60	—	222.75	—
中点节锥距 R/mm	191.02	—	191.25	—
节锥角 $\delta/^\circ$	77.170	—	78.013	—
面锥角 $\delta_a/^\circ$	77.609	15.513	77.609	15.506
根锥角 $\delta_f/^\circ$	74.231	12.186	74.240	12.188
节锥顶点到交叉点的距离 Z/mm	3.003	—	-0.000 008	—
面锥顶点到交叉点的距离 Z_a/mm	3.34	3.88	-0.32	17.16
根锥顶点到交叉点的距离 Z_f/mm	-1.53	-19.16	-5.23	-2.24
中点齿顶高 h_a/mm	1.798	—	-1.660	—
中点齿根高 h_f/mm	14.162	—	17.620	—

从表 2 可以看出，修正节锥设计方法得到的大轮中点齿顶高为负值，节锥角比面锥角大，这样新设计的大轮节锥在大轮实体之外。

2.2 计算机啮合仿真与应力分析

借助于局部综合法、TCA 和 LTCA^[9-14]，修正节锥设计方法设计出准双曲面齿轮的齿面啮合印痕、传动误差曲线、齿面接触应力曲线见图 2~4。

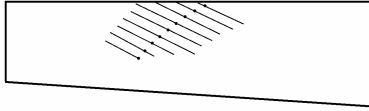


图 2 齿面啮合印痕

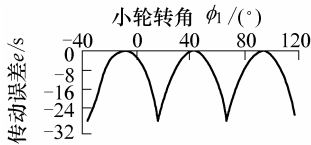


图 3 传动误差曲线

借助于局部综合法、TCA 和 FEM，在此分析准

双曲面齿轮的齿面接触应力、齿面最大拉伸应力和齿面最大压缩应力。

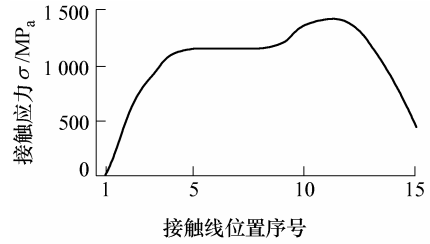


图 4 齿面接触应力曲线

表 3 是在相同单载荷(载荷为 10 kN，作用在齿长中部、距齿根相同距离点处)的条件下，采用相同的刀具(切齿小轮用的刀具齿形角为 17°、35°)。分别采用修正节锥轮坯设计方案($f_a = -0.12$)和 Gleason 轮坯设计方案利用有限元法^[8-9]计算得到的齿根应力、齿面最大接触应力、外径之间的比较；表 4 是修正节锥设计方法和 Gleason 轮坯设计方法法向弦齿厚比较。

表 3 修正节锥轮坯设计方法和 Gleason 轮坯设计方法齿根应力、齿面最大接触应力、外径的比较

参数	Gleason 轮坯设计方案	修正节锥设计方案	应力变化比例新方案减少 $d/\%$
小轮齿根最大拉伸应力 σ_{c1}/MPa	29.828 890	26.174 860	10.33
小轮齿根最大压缩应力 σ_{c1}/MPa	52.354 930	50.570 630	3.41
大轮齿根最大拉伸应力 σ_{c2}/MPa	49.857 910	48.738 750	2.24
大轮齿根最大压缩应力 σ_{c2}/MPa	74.536 970	73.442 430	1.47
齿面最大接触应力 $\delta_{\text{max}}/\text{MPa}$	1 484.661 000	1 431.185 000	3.60
小轮外径 d_{e1}/mm	120.71	128.00	—
大轮外径 d_{e2}/mm	434.99	434.99	—

表 4 修正节锥设计方法和 Gleason 轮坯设计方法法向弦齿厚比较

参数	Gleason 轮坯设计方案		修正节锥轮坯设计方案	
	大轮	小轮	大轮	小轮
大端齿顶弦齿厚 δ_1	6.73	10.68	6.76	8.38
大端齿根弦齿厚 δ_2	23.92	31.96	24.19	34.89
小端齿顶弦齿厚 δ_3	5.41	7.52	5.55	4.69
小端齿根弦齿厚 δ_4	16.09	20.69	16.34	23.87

从表 3 可以看出，修正节锥设计方法得到的小轮齿根最大拉伸应力、齿面最大接触应力减少，大轮外径不变，小轮外径增大。

从表 4 可以看出，修正节锥设计方法设计出的小轮齿根弦齿厚都有所增加。

3 试验

小轮精切是采用天津机床厂制造的 YKD2250 数控铣齿机，见图 5。

表 5、6 分别为修正节锥加工方法设计出的准双曲面齿轮大轮加工参数和小轮加工参数。



图 5 YKD2250 数控铣齿机

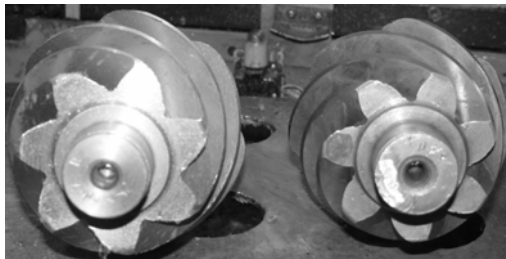
图 6 为修正节锥设计方法设计出的小轮与 Gleason 设计方法设计出的小轮小端形状。

表 5 大轮加工参数

参数	指标
大轮刀盘名义半径 r_0/mm	152.4
刀具齿形角 $\alpha_2/(\text{°})$	22.5
刀顶距 d_2/mm	5.588
机床根锥角 $\gamma_2/(\text{°})$	74.53
大轮水平轮位 G_2/mm	-6.25
大轮水平刀位 H_2/mm	100.19
大轮垂直刀位 V_2/mm	118.93

表 6 小轮加工参数

参数	凹面	凸面
刀尖半径 r_1/mm	149.68	148.73
刀具齿形角 $\alpha_1/(\text{°})$	14	35
机床根锥角 $\gamma_1/(\text{°})$	-1	-1.55
刀倾角 $\alpha_i/(\text{°})$	10.03	10.63
刀转角 $\alpha_j/(\text{°})$	296.73	264.65
床位 B_1/mm	36.35	51.78
垂直轮位 G_2/mm	19.88	16.81
水平轮位 G_1/mm	-9.26	-7.29
垂直刀位 V_1/mm	-125.96	-102.59
水平刀位 H_1/mm	46.12	83.01
滚比 γ	4.856	4.936



(1) 修正节锥设计方法设计出的小轮小端
(2) Gleason 设计方法设计出的小轮小端

图 6 小轮小端形状比较

从图 6 可见,用本文提出的修正节锥设计方法设计出的准双曲面齿轮的小轮和 Gleason 设计方法设计出的小轮相比外径增大,小轮齿根齿厚也增大,与表 3、4 仿真结果相符;同时也证实了采用常规的切齿方法可以加工出用修正节锥设计方法设计出的准双曲面齿轮。

4 结论

(1) 采用修正节锥设计方法设计出的准双曲面齿轮,大轮外径不变,小轮齿根弦齿厚增大,小轮外径也增大。

(2) 采用修正节锥设计方法设计出的准双曲面齿轮,齿面接触应力、齿根最大弯曲应力和齿根最大压缩应力有所减少。

(3) 采用修正节锥设计方法设计出的准双曲面齿轮,仍可以用原来的切齿小轮用的方法以及切齿刀具进行切齿,不必选用新刀具(齿形角为 14° 、 35° ,

不变)。

参 考 文 献

- [1] 杨宏斌, 范明, 周彦伟, 等. 高齿准双曲面齿轮的研究[J]. 中国机械工程, 2000, 11(8): 897-899.
- [2] 罗月新, 毛世民, 吴序堂. 准双曲面齿轮副几何参数计算新方法[J]. 机械设计, 2000, 17(4): 11-13.
- [3] 梁桂明. 螺旋锥齿轮的新齿形——分锥角综合变位原理[J]. 齿轮, 1981(2): 19-34.
- [4] 梁桂明, 邓效忠, 何兆旗. 新型非零传动曲齿锥齿轮技术[J]. 中国机械工程, 1997, 8(1): 97-101.
- [5] 万小利, 梁桂明, 魏任之, 等. 准双曲面齿轮设计新方法[J]. 机械工程学报, 1993, 29(6): 8-11.
- [6] 万小利. 准双曲面齿轮广义非零变位系统的研究与运用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 1992.
- [7] 曾韬. 螺旋锥齿轮设计与加工[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1989.
- [8] 方宗德, 杨宏斌, 邓效忠. 弧齿锥齿轮齿面优化修正及计算机仿真[J]. 航空动力学报, 2002, 17(1): 140-144.
- [9] 邓效忠, 方宗德, 杨宏斌, 等. 高重合度弧齿锥齿轮的强度分析[J]. 航空动力学报, 2002, 17(3): 367-372.
- [10] 邓效忠, 方宗德, 杨宏斌. 准双曲面齿轮齿面接触应力过程计算[J]. 中国机械工程, 2001, 12(12): 1362-1364.
- [11] FANG Z D, YANG H B. Loaded tooth contact analysis with friction on hypoid gear[C]//Proc. of 4th World Congress on Gearing and Power Transmission, Paris, 1999: 703-710.
- [12] LITVIN F L. Gear geometry and applied theory[M]. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall. Inc., 1994.
- [13] LITVIN F L, GUTMAN Y A. Method of local synthesis of gears grounded on the connection between the principal and geodesic curvatures of surfaces[J]. ASME J. of Mech. Design, 1981, 10(3): 114-125.
- [14] LITVIN F L, ZHANG Y. Local synthesis and tooth contact analysis of face-milled spiral bevel gears[R]. NASA CR-4342, Chicago: NASA Lewis Research Center, 1991.

MODIFIED PITCH CONE METHOD IN THE HYPOID GEAR DESIGN AND TOOTH-CUTTING EXPERIMENT

ZHANG Jinliang¹ FANG Zongde¹ CAO Xuemei¹
DENG Xiaozhong² YANG Jianjun³

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072;

2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003;
3. Dong-Feng Vehicle-Bridge Company, Shiyan 442051)

Abstract: In order to improve the strength and endurance of hypoid gear, and extend the lifetime of hypoid gear, the modified pitch cone method is firstly introduced. On the condition of the invariant mean working tooth depth, invariant outer diameter of gear and the gear addendum coefficient $f_a \leq 0$, the new pitch cone parameters are derived. The new pitch cone is coincident to face cone or out of the gear solid. The meshing behavior, the tooth surface contact stress, the maximum tensile bending stress and the maximum compressive bending stress

are researched by using tooth contact analysis (TCA), loaded tooth contact analysis (LTCA) and finite element method (FEM). The computer simulation results show that the tooth surface contact stress, the maximum tensile bending stress and the maximum compressive bending stress of the pinion to hypoid gear pair designed by new method are markedly reduced. The results of the experiment show that the new type hypoid gear can be processed by the general cutter, and doesn't need other special tools.

Key words: Hypoid gear Modified pitch cone method

Tooth contact analysis Finite element method

Meshing behavior Strength

作者简介: 张金良, 男, 1966 年出生, 副教授。主要研究领域为机械设计及理论。

E-mail: zhangjin6602@163.com

国家自然科学基金重点资助项目成果简介

项目名称: 网络环境下的数字制造理论与关键技术

项目批准号: 50335020

项目单位: 华中科技大学、武汉理工大学

研究成果: (1) 数字制造是提高产品自主创新和增强企业竞争力的重要技术手段。项目组提出新的螺旋边三角网格重构算法, 以及基于三角网格的 TICP 数据拼合方法, 开发了集成曲面重构和误差评定的数字建模软件模块, 应用于汽车发动机和自动变速箱的快速自主开发, 建立了汽车发动机和自动变速箱的数字模型, 可实现发动机等产品的无图纸制造。

(2) 提出复合形夹持新概念, 建立了复合夹具的可接近性、可达性和力封闭分析理论与方法, 纠正有关文献上的错误, 澄清了以往的模糊概念, 建立了复合夹持、力装配和误差评定的统一模型。

(3) 建立了七轴五联动重型数控车铣复合机床的多约束融合非线性动力学模型, 揭示了加速度、插补周期、插补精度等参数对插补的影响规律, 提出了 NURBS 曲线和连续小线段的前瞻控制自律规划算法, 在华中数控系统上得到了应用, 实现了高速插补运算。

(4) 提出了基于切深—进给速度—负荷映射关系和负荷特征—加工参数关系模型, 实现了数控铣床加工过程的恒切削负荷自律适应控制, 在东方电机厂大型叶片加工中得到应用, 试验表明粗加工提高效率约 18%, 精加工提高 36.7%。

(5) 基于嵌入式技术构建分布式网络数控系统, 实现了对数控机床的远程控制和多机床的并发操作管理。鉴定专家认为: 基于嵌入式的光纤传感技术达到国际领先水平。

(6) 提出包括用户层、应用层、数据层和 Agent 层的网络环境下数字制造资源共享平台体系结构和基于移动 Agent 的制造资源封装机制, 提出了基于协作规划交换的显式协调机制和基于生物习性学原理的隐式协调机制, 实现制造设备间的整体协调, 具有更强的适应环境变化的能力。基于三元组和层次分析法提出制造资源服务多指标综合量值优选算法, 并在数字制造资源共享平台上成功应用。

项目组在以上研究内容方面取得了突出进展和创新性成果, 部分研究成果已经在江淮汽车股份有限公司、华中数控公司、武汉滨湖机械厂、山东鲁北企业集团和东方电机厂等企业得到了实际应用, 为提高我国制造企业的产品创新能力提供理论基础和技术支撑, 为提高我国装备制造水平作出贡献。

项目组共发表论文 115 篇, 其中 SCI 收录(包括 SCI 索源刊物录用论文)11 篇, EI 收录 34 篇, 出版专著 3 部, 在国内外学术会议上应邀做大会报告 7 次, 发明专利 12 项; 获国家科技进步二等奖 2 项, 湖北省自然科学奖一等奖 1 项, 湖北省科技进步一等奖 1 项, 湖北省科学技术发明二等奖 1 项; 依托本项目已培养博士后 5 名, 博士 15 名, 硕士 60 名, 获湖北省优秀博士论文奖、湖北省优秀硕士论文奖各 1 人。项目执行过程中, 两校分别建立了国家重点实验室“数字制造装备与技术”和湖北省重点实验室“数字制造”, 主办了两次国际学术会议: 2004ICMA-International Conference on Manufacturing Automation 和 2006CIRP-International Conference on Digital Manufacture, 进行了广泛的国际交流与合作; 有五位青年教师晋升教授和博士生导师, 一名教师获杰出青年基金, 华中科技大学和武汉理工大学都基本形成了数字制造领域的优秀研究团队。