

行星滚柱丝杠运动原理及有限元分析

王家健,张庆

(南京理工大学 机械工程学院,江苏 南京 210094)

摘要:为优化行星滚柱丝杠的设计,对标准式行星滚柱丝杠的运动原理进行了分析,得出丝杠、滚柱和螺母的螺纹旋向和头数的关系;建立行星滚柱丝杠三维模型,运用 ANSYS Workbench 软件进行螺纹的接触应力有限元仿真分析;并研究螺纹的牙型角和螺距对接触应力的影响。该分析结果可为行星滚柱丝杠的设计及选型提供参考依据。

关键词:行星滚柱丝杠;运动原理;有限元分析

中图分类号:TH132 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)04-0109-03

Motion Principle and Finite Element Analysis of Planetary Roller Screw

WANG Jiajian, ZHANG Qin

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To optimize the design of planetary roller screw, the motion principle of standard planetary roller screw is established, and the relationship between screw, roller and nut thread direction and head number is obtained. The three-dimensional model of planetary roller screw is built, and ANSYS Workbench software is used to simulate the contact stress of thread by finite element method. The influence of thread profile angle and pitch on contact stress is studied. The analysis result provides reference basis for the design and model selection of planetary roller screw.

Keywords: planetary roller screw; motion principle; finite element analysis

0 引言

标准式行星滚柱丝杠(下面简称行星滚柱丝杠)是将螺旋运动和行星运动结合在一起,将丝杠旋转运动转变为螺母直线运动的传动机构,具有承载能力强、刚度大、精度高、耐磨损、耐冲击和寿命长等特点,广泛应用于工业和国防军工领域^[1]。

国内对行星滚柱丝杠的理论研究已经有一定的基础。靳谦忠和马尚君通过对行星滚柱丝杠的运动原理分析给出了相关参数的匹配设计条件^[2-3]。在螺纹接触分析方面,许多学者基于赫兹接触理论和有限元方法进行研究,分析了螺距、牙型角、滚柱个数、载荷等因素对接触应力的影响,为提高行星滚柱丝杠的承载能力提供了参考^[4-6]。但是目前对行星滚柱丝杠的有限元接触分析,都是将丝杠与滚柱、滚柱与螺母分开分析,而且只是分析一组或者几组螺纹接触对,没有对整体结构进行有限元分析。

1 行星滚柱丝杠运动原理分析

行星滚柱丝杠主要由丝杠、滚柱、螺母、内齿圈、保持架和弹性挡圈组成,结构形式如图 1 所示。

行星滚柱丝杠在工作时,丝杠通常作为动力输入端,只绕自身轴线转动;螺母通常与负载连接,只沿自身轴线移动;滚柱在螺母和丝杠之间做行星运动,并且与螺母相

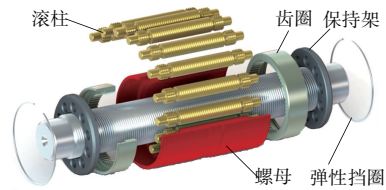
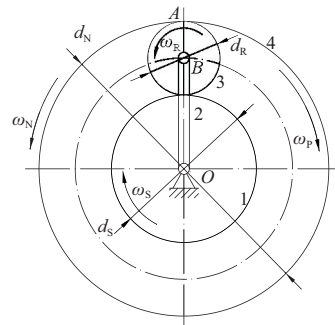


图 1 行星滚柱丝杠结构形式

对轴向位移为零,与螺母一起沿轴向移动。行星滚柱丝杠运动简图如图 2 所示。



1—丝杠;2—保持架;3—滚柱;4—螺母。
图 2 标准式行星滚柱丝杠运动简图

图 2 中: d_s 、 d_r 和 d_N 分别为丝杠、滚柱和螺母的螺纹中径,由图 1 中几何关系有 $d_N = d_s + 2d_r$; ω_s 、 ω_N 、 ω_r 和 ω_p

第一作者简介:王家健(1990—),男,江苏南京人,硕士研究生,研究方向为机械传动技术。

为丝杠、螺母、滚柱和保持架的旋转角速度, ω_N 通常为 0; p_S 、 p_R 和 p_N 分别为丝杠、滚柱和螺母的螺纹螺距; n_S 、 n_R 和 n_N 分别为丝杠、滚柱和螺母的螺纹头数, n_R 通常取 1。

1.1 角速度分析

参照行星齿轮传动的分析方式^[7], 给整体一个公共角速度, 大小等于 ω_p , 方向与保持架旋转方向相反, 各构件的角速度变化如表 1 所示。

表 1 角速度变化对比

构件	原始角速度	转化后角速度
丝杠	ω_S	$\omega_S - \omega_p$
滚柱	ω_R	$\omega_R + \omega_p$
螺母	0	ω_p
保持架	ω_p	0

根据表 1, 由传动比关系可得:

$$\frac{\omega_S - \omega_p}{\omega_p} = \frac{d_R}{d_S} \cdot \frac{d_N}{d_R} \quad (1)$$

$$\frac{\omega_R + \omega_p}{\omega_p} = \frac{d_N}{d_R} \quad (2)$$

由式(1)、式(2)及 $d_N = d_S + 2d_R$ 可得:

$$\omega_p = \frac{d_S}{2(d_S + d_R)} \omega_S \quad (3)$$

$$\omega_R = \frac{d_S}{2d_R} \omega_S \quad (4)$$

以上是假设滚柱与丝杠之间为无滑动的滚动, 实际上滚柱与丝杠啮合可能存在滑动, 所以 ω_R 和 ω_p 的实际数值要比理论值偏小。

1.2 螺纹旋向和头数分析

通常螺纹啮合需要保证螺距相等, 即 $p_S = p_R = p_N = p$ 。螺旋副在旋转啮合过程中螺旋曲面的变化可以等效为其沿轴线的平移, 移动方向可以通过左右手法则判断^[8]。

1) 滚柱和螺母螺纹旋向和头数分析

经过时间 t , 根据表 1 的角速度关系及相对运动的分析, 当螺母静止时, 滚柱相对于螺母的位移为 $\frac{(\omega_R + \omega_p)t}{2\pi}$ 。

$n_R p_R$; 当滚柱静止时, 螺母相对于滚柱的位移为 $\pm \frac{\omega_p t}{2\pi} n_N p_N$ 。

其中“+”号表示螺母旋向与滚柱相反, “-”号表示螺母旋向与滚柱相同。由 $n_R = 1, p_R = p_N = p$, 可得滚柱和螺母的相对位移 L_{RN} 为

$$L_{RN} = \frac{(\omega_R + \omega_p)t}{2\pi} p \pm \frac{\omega_p t}{2\pi} n_N p \quad (5)$$

因为滚柱与螺母相对位移必须为 0, 所以式(5)中应取“-”, 即滚柱与螺母螺纹旋向相同。由式(3)、式(4)、式(5)及 $L_{RN} = 0$ 可得

$$n_N = d_S / d_R + 2 \quad (6)$$

2) 滚柱和丝杠螺纹旋向和头数分析

与滚柱和螺母的相对位移分析方法相同, 滚柱和丝杠

的相对位移 L_{RS} 可以表示为

$$L_{RS} = \frac{(\omega_S - \omega_p)t}{2\pi} n_S p \pm \frac{(\omega_R + \omega_p)t}{2\pi} p \quad (7)$$

其中“+”号表示丝杠与滚柱旋向相同, “-”号表示丝杠与滚柱旋向相反。由式(3)、式(4)、式(7)可得

$$L_{RS} = \frac{\omega_S t}{2\pi} n_S p + \frac{\omega_p t}{2\pi} p [-n_S \pm (d_S / d_R + 2)] \quad (8)$$

式中 $\frac{\omega_S t}{2\pi} n_S p$ 在丝杠转速已知的情况下是确定值; 因为滑动的存在, ω_p 是不确定的, 那么 L_{RS} 也是不确定的。为了保证传动的稳定, 即 L_{RS} 与 ω_p 无关, 令公式中括号部分为 0, 即括号中取“+”号, 滚柱与丝杠螺纹旋向相同, 由此可得

$$n_S = d_S / d_R + 2 \quad (9)$$

滚柱和螺母相对丝杠的位移可以表示成

$$L = \frac{\omega_S t}{2\pi} n_S p \quad (10)$$

1.3 滚柱齿轮与内齿圈传动分析

1) 因为齿轮传动为非承载部分, 所以通常采用直齿圆柱齿轮啮合。设滚柱端齿轮和内齿圈齿数分别为 z_R 和 z_N , 模数为 m 。齿圈与螺母固连在一起, 要满足滚柱与螺母纯滚动, 则齿轮传动比与螺纹传动比相等, 即

$$z_N / z_R = d_N / d_R \quad (11)$$

2) 因为滚柱端齿与丝杠也要啮合, 为了防止齿顶圆与丝杠螺纹牙底干涉, 滚柱端齿齿顶圆直径不能大于滚柱螺纹大径 d_{ra} ^[2], 即

$$m(z_R + 2h_a^*) \leq d_{ra} \quad (12)$$

3) 齿轮啮合传动必须要满足最小齿数要求, 避免根切, 即

$$z_R \geq 2h_a^* / \sin^2 \alpha \quad (13)$$

当调整齿数和模数无法满足最小齿数要求时, 可以采用变位齿轮设计或者改用短齿制, 必要时可以采用非标准压力角齿轮设计^[2]。

2 行星滚柱丝杠有限元建模

根据技术指标要求, 结合上一节中运动分析结果, 进行行星滚柱丝杠的结构设计; 然后建立行星滚柱丝杠的三维建模; 再把模型导入到 ANSYS Workbench 软件中, 进行有限元建模^[9]。

行星滚柱丝杠主要螺纹零件的主要参数如表 2 所示, 齿轮零件的主要参数如表 3 所示。

表 2 螺纹零件参数

参数	丝杠	螺母	滚柱
中径/mm	30	50	10
大径/mm	30.8	51.0	10.8
小径/mm	29.0	49.2	9.0
螺距/mm	2	2	2
螺纹头数	5	5	1
牙型角/(°)	90	90	90

表3 齿轮零件参数

参数	滚柱端齿	内齿圈
齿数	20	100
模数/mm	0.5	0.5
压力角/(°)	20	20
齿顶高系数	1	1
顶系系数	0.35	0.35
节圆直径/mm	10	50

2.1 三维模型简化

对模型进行简化,去除挡圈等零件以及零件的倒角和孔等特征,丝杠只截取啮合部分;行星滚柱丝杠为对称结构,滚柱个数为10且均匀布置,所以取模型的1/10进行研究。螺母上承受的轴向载荷为150kN,所以简化后的模型承受的轴向载荷为15kN;将简化后的三维模型导入到ANSYS Workbench中,如图3所示。

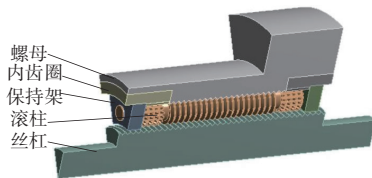


图3 有限元简化模型

2.2 材料分配及网格划分

对导入的模型进行材料分配,材料选用淬硬的轴承钢GCr15,其耐磨性好、硬度高,适合行星滚柱丝杠高承载、高刚度的要求。弹性模量 $E=200\text{ GPa}$,泊松比 $\nu=0.3$,屈服极限 $\sigma_s=1\ 667\sim 1\ 814\text{ MPa}$ 。材料分配后对模型进行网格划分,如图4所示。

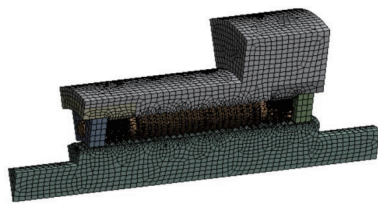


图4 有限元网格模型

2.3 接触设置

丝杠螺纹与滚柱螺纹、滚柱螺纹与螺母螺纹、滚柱端齿与内齿圈,这3处接触采用Frictional接触类型,可以法向分离和切向滑动。当切向分力大于最大静摩擦力时发生切向滑移,这样更符合行星滚柱丝杠的实际运动情况。

内齿圈与螺母之间为Bonded接触类型,法向和切向均无相对位移。

保持架只对滚柱起导向作用,不是承载及定位的零件,所以滚柱与保持架、保持架与内齿圈之间为Frictionless接触类型,法向和径向都可以有小位移。

2.4 边界条件设置

螺母只沿自身轴向平移,采用Displacement约束,只保留

轴向移动自由度;对螺母法兰面施加15kN的轴向载荷。

滚柱即做行星运动又沿轴线平移,采用Cylindrical Support约束,保留旋转和轴向平移自由度。保持架同样既有旋转运动又有轴向移动,也采用Cylindrical Support约束,保留旋转和轴向平移自由度。

丝杠一端固定一端支承,所以固定端采用Fixed Support约束,完全限制6个自由度,支撑端采用Displacement约束,只保留轴向移动自由度。

因为模型只有1/10,所以对丝杠、保持架、内齿圈和螺母的剖面施加Frictionless Support约束,即法向无变形,其他方向可以自由变形。

3 行星滚柱丝杠有限元求解结果分析

3.1 有限元求解结果

图5和图6分别给出了螺母和滚柱螺纹接触点以及丝杠和滚柱接触点的等效应力云图。从图5中可以看出,螺母和滚柱螺纹接触点最大应力在滚柱螺纹牙上,为1499.5 MPa;从图6中可以看出,丝杠和滚柱螺纹接触点最大应力在丝杠螺纹牙上,为1491.4 MPa。

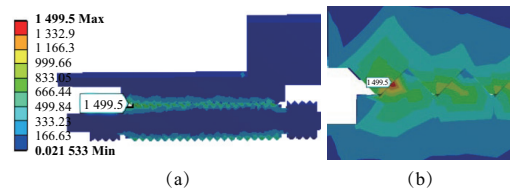


图5 丝杠与滚柱接触点等效应力云图

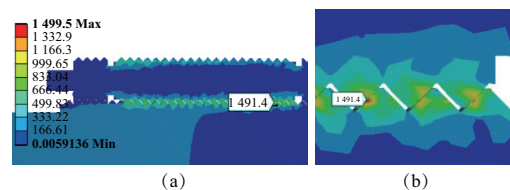


图6 螺母与滚柱接触点等效应力云图

丝杠、滚柱和螺母螺纹的接触应力都小于屈服极限,满足强度要求。但是螺纹牙存在载荷分布不均的情况,如图7所示,螺母左端第一个螺纹牙的等效应力最大,然后往右呈现减小的趋势。滚柱和丝杠螺纹牙的应力情况与螺母类似。

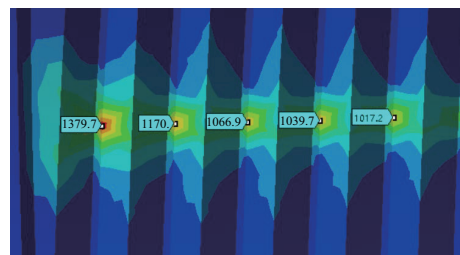


图7 螺母螺纹等效应力云图

整。希望本设计能够为广大学者及对智能售药设备的研究提供借鉴,为“智慧医疗”的发展添砖加瓦,为“健康中国”的建设献出绵薄之力。

参考文献:

- [1] 郑功成, 桂琰. 中国特色医疗保障制度改革与高质量发展[J]. 学术研究, 2020(4): 79-86.
- [2] 于保荣. 未来5-10年中国医疗保障制度的设计与思考——“中共中央国务院关于深化医疗保障制度改革的意见”的解读[J]. 卫生经济研究, 2020(4): 3-7.
- [3] 樊长佳, 王力男, 杨永梅. 我国公立医院药品零差率政策实施效果研究[J]. 卫生经济研究, 2019, 36(2): 53-56.
- [4] 刘影, 文争为, 罗云. 公立医院药品零差率实施效果分析与评价[J]. 中国医院, 2018, 22(3): 71-74.

- [5] 朱佳英, 任晋文, 华恃彬. “4+7”城市药品带量采购在公立医院的实施效果预测与探讨[J]. 浙江医学, 2019, 41(10): 1103-1107.
- [6] 陆濛洲, 罗印升, 宋伟. 智能售药设备的研究与应用[J]. 科技和产业, 2017, 18(8): 147-152.
- [7] 梁实, 王益新. 深圳智慧医疗云服务平台建设[J]. 测绘科学, 2014, 39(8): 74-77.
- [8] 丁那涛, 钟伯成, 朱淑文, 等. 基于混合加密的无线医疗传感网数据安全与隐私保护[J]. 医疗卫生设备, 2017, 38(12): 11-15.

收稿日期: 2020-07-29

(上接第111页)

3.2 牙型角对接触应力的影响

为了研究牙型角对螺纹接触应力的影响,不改变螺纹的其他参数,在螺距为2mm时,分别对牙型角为60°、70°、80°、90°、100°时进行有限元仿真求解,有限元求解结果如表4所示。

表4 不同牙型角的螺纹最大接触应力对比

单位:MPa

螺纹配置	牙型角/(°)				
	60	70	80	90	100
丝杠和滚柱	1 505.1	1 353.9	1 557.4	1 491.14	1 418.5
螺母和滚柱	1 245.7	1 386.7	1 330.5	1 499.5	1 584.6

从表4可以看出牙型角在70°时螺纹接触应力最小,其次是90°,而在60°、80°和100°时,最大接触应力都超过了1 500 MPa。根据文献[10],牙型角与行星滚柱丝杠的传动效率有着紧密的联系,牙型角越大传动效率越高,所以综合考虑传动效率和螺纹接触强度,通常选择牙型角为90°。

3.3 螺距对螺纹接触应力的影响

为了研究螺距对螺纹接触应力的影响,不改变螺纹的其他参数,在牙型角为90°时,分别对螺距 p 为1.5mm、2mm、2.5mm、3mm和3.5mm时进行有限元仿真求解,有限元求解结果如表5所示。

表5 不同螺距的螺纹接触应力对比 单位:MPa

螺纹配置	螺距/mm				
	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
丝杠和滚柱	1 345.3	1 491.4	1 638.3	1 726.7	2 159.0
螺母和滚柱	1 262.1	1 499.5	1 681.4	1 595.1	1 716.5

从表5可以看出,随着螺距的增大,接触应力变化较

大,而且接触应力有增大的趋势。因为螺纹总长度相同,当螺距越大时,相应的螺纹接触点越少,从而降低了行星滚柱丝杠的承载能力。

4 结语

1)通过类比行星齿轮传动的分析方法,对行星滚柱丝杠的运动原理分析,得出丝杠、滚柱和螺母的螺纹旋向相同,螺纹头数满足 $n_s = n_n = d_s/d_r + 2$ 。

2)对行星滚柱丝杠螺纹的接触应力进行有限元仿真分析,并且研究了螺纹的牙型角和螺距对接触应力的影响,牙型角通常选择90°,螺纹最大接触应力随螺距的增大而增大。

参考文献:

- [1] 邓琦. 行星滚柱丝杠电动缸应用现状[J]. 船舶工程, 2017, 39(增刊1): 149-152.
- [2] 靳谦忠, 杨家军, 孙健利. 行星式滚柱丝杠副的运动特性及参数选择[J]. 制造技术与机床, 1998(5): 3-5.
- [3] 马尚君. 行星滚柱丝杠副结构设计方法及其传动性能研究[D]. 西安:西北工业大学, 2013.
- [4] 佟瑞庭, 刘更, 史佑民, 等. 螺纹牙型角对行星滚柱丝杠副接触特性影响研究[J]. 机械设计, 2016, 33(5): 31-34.
- [5] 程远. 行星滚柱丝杠副啮合运动与接触特性理论分析与研究[D]. 南京:南京理工大学, 2018.
- [6] 刘佳, 彭航, 罗英, 等. 行星滚柱丝杠传动副基于Hertz接触理论的接触模型研究[J]. 核动力工程, 2020, 41(1): 185-188.
- [7] 郑文纬, 吴克坚, 郑星河. 机械原理[M]. 7版.北京:高等教育出版社, 1997.
- [8] 付晓军, 刘更, 马尚君, 等. 行星滚柱丝杠副螺旋曲面啮合机理研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(3): 32-39.
- [9] 岳琳琳. 行星滚柱丝杠机构运动仿真及承载特性研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2014.
- [10] 马尚君, 刘更, 佟瑞庭. 行星滚柱丝杠副摩擦力矩及传动效率研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(11): 80-85.

收稿日期: 2020-07-27