



齿轮设计
丛书

CHILUN SHEJI
CONGSHU

渐开线行星齿轮 传动设计

马从谦 陈自修 张文照 编著
张 展 蒋学全 吴中心

机械工业出版社

本书是齿轮设计丛书之一。本书全面、系统地介绍了各类渐开线行星齿轮传动的原理与设计方法；书中内容总结了作者多年来的研究成果，同时也介绍、反映了国内外行星齿轮传动的先进经验与技术。

全书分十二章，主要包括行星齿轮传动的分类、传动比和效率计算、啮合参数的选择和计算、齿轮承载能力计算、均载机构设计、各种减速器和差速器的结构及主要构件的设计以及少齿差传动的设计与计算等。此外，书中还列举了许多例题以利读者参考学习。

本书可供从事齿轮传动设计和制造方面的工程技术人员及大专院校师生参考。

渐开线行星齿轮传动设计

马从谦 陈自修 张文照 编著
张展 蒋学全 吴中心

*

责任编辑：冯宗青

封面设计：田淑文

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业登记证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₃₂·印张20³/₄·插页1·字数460千字

1987年10月北京第一版·1987年10月北京第一次印刷

印数 0,001—4,200·定价：4.95元

*

统一书号：15033·6779

《齿轮设计丛书》

出版说明

齿轮是应用非常广泛的重要传动元件。随着科学技术的飞跃发展，对齿轮传动提出了越来越高的要求。为适应形势的需要，总结、介绍国内外先进经验与技术，特决定组织出版这套《齿轮设计丛书》，以利提高我国的齿轮设计、生产水平。

本丛书内容包括：齿轮啮合原理、齿轮传动的精度、各类齿轮传动（包括特种齿轮）和各类蜗杆传动的设计、齿轮的试验技术与设备等等。内容着重于介绍设计的理论基础、设计方法、设计参数以及数据的分析选择等，力图满足齿轮传动设计者的需要。因此，本丛书主要供从事齿轮设计、制造工作的工程技术人员参考。丛书将分若干分册陆续出版。

由于水平有限，书中难免有错误和不妥之处，欢迎读者批评指正。

前 言

渐开线行星齿轮传动与普通定轴齿轮传动相比具有承载能力大、寿命长、可靠性高、效率高、传动平稳、传动比大、体积小、重量轻等优点，因此获得了迅速发展，并被广泛应用于冶金、矿山、起重运输、建筑、航空、船舶、透平、纺织、化工、食品等机械上。

渐开线行星齿轮传动除大量用作减速和增速传动外，还广泛用于差动传动，如汽车后桥和机床传动系统中的差速器、起重机提升机构和连轧机的差动调速装置等。

世界上一些工业发达的国家，如西德、日、英、美等，对行星齿轮传动的研究、生产和应用十分重视，在结构、品种、传递功率、扭矩、速度等方面的发展处于领先地位。目前高速行星传动的速度已超过 100m/s ，功率超过 20000kW ；低速传动的扭矩已超过 $4150\text{kN}\cdot\text{m}$ ，内齿轮直径已超过 5m 。

渐开线行星齿轮传动在我国很早就有应用，而比较深入、系统的研制工作则是在六十年代以后。一方面是从理论上做了很多分析研究工作，另一方面进行了大量的实验室试验和工业性试验，取得了不少科研成果。在此基础上设计、制订了我国的 NGW 型 (JB1799-76)、NGW-Z 型 (JB3722-84)、NGW-S 型 (JB3723-84) 和 NGW-L 型 (JB3724-84) 四个行星齿轮减速器标准。并且组织了专业化成批生产，在国内进行了推广应用。

大规格低速重载行星齿轮传动的研制工作在我国正在开展，并已先后试制成功出轴转矩 $200\text{kN}\cdot\text{m}\sim 400\text{kN}\cdot\text{m}$ 的产

品，如用于大型胶带输送机的 NGW172 型和 NGW153 型双排直齿行星减速器、用于矿井提升机的 XL-30 型行星减速器等。双排直齿行星减速器是我国自行设计的，由于结构上的特点，作为大型传动的一种类型，将会得到应有的发展。

高速行星齿轮传动在我国也得到了成功的设计与应用，如用于列车电站燃气轮机 (3000kW)、工业高速汽轮机 (500kW)、万立方米制氧透平压缩机 (6300kW) 等设备上的行星减速器和增速器。

渐开线少齿差行星传动，由于齿形（与摆线相比）易于加工，近 20 多年来，在我国逐步对几何参数、传动效率和结构设计等问题进行了比较深入的研究，发表了一些论文和著作，其产品已被大量用于各类小功率机械上传动比要求较大的减速装置中。

本书由陕西工学院马从谦同志（概论、第六、七、九章）、西安重型机械研究所陈自修同志（第三、四、八章）、华东化工学院张文照同志（第十、十二章）、上海水工机械厂张展同志（第五、十一章）、陕西工学院蒋学全同志（第一、二、十二章）等共同编写，由马从谦同志对全书进行了补充、修改、统一和整理。

华南工学院吴中心同志曾为本书第一、二章提供过初稿。蒋学全同志曾参与过第八、九两章的部分补充编写工作，并在稿件整理过程中做了不少工作。在第十章的编写过程中王光华同志曾给予大力协助。全书由郑州机械科学研究所许元礼同志进行了审查，提出了不少宝贵意见。在此一并表示感谢。

鉴于作者水平所限，书中难免有错误和不妥之处，望读者批评指正。

主要符号

- a —— 标准齿轮及高度变位齿轮中心距 mm
- a' —— 角度变位齿轮中心距 mm
- a_{ac} 、 a_{cb} 、 a'_{ac} 、 a'_{cb} —— $a - c$ 、 $c - b$ …啮合副中心距
- b —— 齿宽 mm
- c —— 径向间隙、半径间隙 mm
- c^* —— 径向间隙系数
- d —— 直径、分度圆直径 mm
- $(d)_a$ 、 $(d)_b$ … —— 齿轮 a 、 b …的分度圆直径
- d' —— 节圆直径 mm
- $(d')_a$ 、 $(d')_b$ … —— 齿轮 a 、 b …的节圆直径 mm
- d_a —— 齿顶圆直径 mm
- $(d_a)_a$ 、 $(d_a)_b$ … —— 齿轮 a 、 b …的齿顶圆直径 mm
- d_b —— 基圆直径 mm
- d_f —— 根圆直径 mm
- e —— 偏心距 mm
- E —— 偏差、误差
- F —— 力 N
- h —— 高度、齿高、全齿高 mm
- h_a —— 齿顶高 mm
- h^* 、 h_a^* —— 齿高系数，齿顶高系数
- h_f —— 齿根高 mm
- i —— 传动比
- i_{ab}^X … —— 构件 a (主动)、 b (从动)…相对于构件 X …的传动比
- j_n —— 法向侧隙

- K ——系数、载荷系数
 m ——齿轮模数 mm
 n ——转速 r/min、机构运动构件数
 $n_a^X \dots$ ——构件 $a \dots$ 相对于构件 $X \dots$ 的转速
 n_p ——行星轮数
 N_L ——应力循环次数
 P ——功率 kW；机构运动副
 p ——转化机构传动比、比压、压强 N/mm²
 r ——半径、分度圆半径 mm
 S ——安全系数、面积、机构静定度
 s ——齿厚 mm
 T ——转矩 N·m
 t ——时间 h、s
 u ——齿数比
 v ——线速度 m/s
 v^X ——相对于构件 X 的速度 m/s
 W ——公法线长度 mm、机构自由度
 x ——变位系数
 Y ——齿数 z_a 与 z_b 之和
 y ——中心距变动系数
 z ——齿数
 z_a, z_b, z_c ——中心轮 a, b, c 的齿数
 z_c, z_d ——行星轮 c, d 的齿数
 z_D ——齿数差
 z_E ——齿数代数和
 α ——压力角、齿形角
 α' ——啮合角
 $\alpha'_{ac}, \alpha'_{cb} \dots$ —— $a - c, c - b \dots$ 啮合副的啮合角
 β ——螺旋角、分度圆螺旋角

- ΔE ——均载构件等效误差
- Δy ——齿顶高变动系数
- e ——重合度
- $\varepsilon_a, \varepsilon_\beta$ ——端面和轴向重合度
- ε_γ ——总重合度
- η ——效率、滑动系数、动力粘度
- η^X ——转化机构效率
- μ ——摩擦系数
- ν ——泊松比、运动粘度 m^2/s
- σ ——正应力 N/mm^2
- τ ——切应力 N/mm^2
- φ_a ——齿宽系数 ($\varphi_a = b/a$)
- φ_d ——齿宽系数 ($\varphi_d = b/d_1$)
- $(\varphi_d)_a, (\varphi_d)_d \dots$ ——齿轮 $a, d \dots$ 的齿宽系数
- ψ ——功率损失系数
- ψ^X ——转化机构功率损失系数

主要下角标

- a ——齿顶的，中心轮、太阳轮
- b ——基圆的，中心轮、内齿轮
- c ——行星轮
- d ——行星轮
- e ——中心轮、内齿轮
- F ——齿根弯曲的
- f ——齿根的
- H ——接触的
- lim——疲劳极限值
- m ——平均的
- max——最大的

- min**——最小的
- n**——法面的, 法向的
- P**——许用的
- r**——径向的
- rel**——相对的
- τ** ——试验齿轮的
- t**——端面的
- X**——行星架
- Σ** ——代数和
- τ** ——切向的
- 0**——工具上的
- 1**——小齿轮上的
- 2**——大齿轮上的

关于齿轮承载能力计算方面的有关代号详见第六章, 此处从略。

目 录

主要符号

| | |
|-----------------------------------|-----|
| 概论 | 1 |
| 第一章 周转轮系的类型 | 8 |
| 一、各种轮系的定义 | 8 |
| 二、周转轮系的基本类型和命名 | 13 |
| 三、周转轮系的特点与应用 | 22 |
| 第二章 周转轮系的传动比 | 35 |
| 一、基本概念 | 35 |
| 二、用转臂固定法计算周转轮系的传动比 | 38 |
| 三、行星轮系传动比计算的普遍关系式 | 42 |
| 四、 $2Z-X$ 类和 $Z-X-F$ 类行星轮系的传动比计算 | 43 |
| 五、 $3Z$ 类行星轮系的传动比计算 | 52 |
| 六、差动轮系的转速计算 | 54 |
| 七、周转轮系中行星轮转速的计算 | 63 |
| 八、 $C-I$ 封闭行星轮系的传动比计算 | 65 |
| 九、研究周转轮系运动学的图解分析法 | 72 |
| 第三章 行星齿轮传动的效率 | 85 |
| 一、行星齿轮传动效率的特点和计算途径 | 85 |
| 二、定轴齿轮传动中功率损失系数和效率的计算 | 88 |
| 三、计算行星齿轮传动效率的啮合功率法 | 97 |
| 四、行星齿轮传动中不同构件固定时计算效率的普遍关系式 | 100 |
| 五、 $2Z-X$ 类和 $Z-X-F$ 类行星齿轮传动的效率计算 | 106 |
| 六、 $3Z$ 类行星齿轮传动的效率计算 | 121 |
| 七、差动行星齿轮传动的效率计算 | 135 |

| | |
|-------------------------------|-----|
| 八、C-I 封闭行星齿轮传动的效率计算 | 140 |
| 第四章 行星齿轮传动的齿数选择 | 157 |
| 一、选择齿轮齿数应满足的条件 | 157 |
| 二、选择齿轮齿数的方法 (配齿数法) | 171 |
| 第五章 变位齿轮及几何计算 | 223 |
| 一、变位齿轮的种类及比较 | 223 |
| 二、齿轮变位系数的选择 | 225 |
| 三、齿轮的几何计算 | 241 |
| 四、重合度计算 | 252 |
| 五、变位齿轮在行星传动中的应用 | 255 |
| 第六章 行星齿轮传动承载能力计算 | 266 |
| 一、齿轮失效形式 | 266 |
| 二、行星齿轮传动的受力分析 | 268 |
| 三、关于承载能力计算方法的几点说明 | 271 |
| 四、齿轮主要尺寸的初步确定 | 277 |
| 五、齿面接触疲劳强度校核计算 | 284 |
| 六、齿根弯曲疲劳强度校核计算 | 300 |
| 第七章 行星齿轮传动装置的均载机构 | 311 |
| 一、均载机构的分析与设计 | 311 |
| 二、均载机构的选择及误差计算 | 335 |
| 三、行星轮间载荷不均衡系数 K_p 的确定 | 348 |
| 第八章 行星减(增)速器和差速器 | 354 |
| 一、行星减(增)速器 | 354 |
| 二、行星差速器 | 403 |
| 三、行星减(增)速器的润滑 | 420 |
| 第九章 行星齿轮传动主要构件的设计计算 | 441 |
| 一、浮动用齿式联轴器的结构设计与计算 | 441 |
| 二、齿轮的结构设计与计算 | 457 |

| | |
|------------------------------------|------------|
| 三、行星架的设计与计算 | 478 |
| 四、基本构件和行星轮的支承结构设计与计算 | 494 |
| 五、行星减(增)速器的机体结构 | 507 |
| 第十章 渐开线少齿差行星齿轮传动 | 512 |
| 一、少齿差变位原理及几何计算 | 512 |
| 二、渐开线零齿差变位内啮合的原理及有关计算 | 527 |
| 三、少齿差传动的齿轮强度及转臂轴承受力计算 | 532 |
| 四、少齿差行星传动的结构设计 | 536 |
| 五、齿轮几何尺寸及参数选用表 | 548 |
| 第十一章 行星齿轮传动的设计及制造技术条件 | 574 |
| 一、主要构件的技术条件 | 574 |
| 二、材料和热处理要求 | 585 |
| 三、主要零件的加工及装配工艺要点 | 592 |
| 四、行星传动典型零件图 | 601 |
| 第十二章 设计举例 | 608 |
| 一、NGW型行星减速器设计 | 608 |
| 二、渐开线少齿差行星减速器设计 | 633 |
| 参考文献 | 646 |

概 论

一、发展渐开线行星齿轮传动的意义

随着近代工业技术的高度发展,对齿轮传动的承载能力、可靠性、效率、圆周速度、体积和重量等技术和经济指标提出愈来愈高的要求。渐开线行星齿轮传动就是近30多年来为满足这种需要而发展起来的新型齿轮传动之一。

这里所讲的行星齿轮传动,在机构学上就是通常所说的周转轮系,它包括行星轮系和差动轮系等。因为这种轮系中有一个(或几个)齿轮的轴线是转动的,所以也可称之为动轴线齿轮传动。

渐开线行星齿轮传动的类型很多,按组成机构的基本构件可分为 $2Z-X$ 、 $3Z$ 、和 $Z-X-F$ 三大类,按齿轮啮合方式又可分为 NGW 、 NW 、 NN 、 WW 、 $NGWN$ 和 N 等型号。不同类型传动的性能和应用范围大不相同(详见第一章)。设计行星齿轮传动时,第一步就是要针对已知条件正确地选择传动类型。

由于行星齿轮传动具有功率分流和动轴线的运动特点,以及内啮合的合理应用,使其相对于普通定轴线齿轮传动在技术上和经济上具有很多优点,如众所周知的体积小重量轻;低速轴转矩与重量之比较大(一般为 $30\sim 110N\cdot m/kg$);啮合功率小于要传递的功率(对 NGW 型和 NW 型而言),功率损失小,效率高;工作平稳、噪音小;可进行运动的合成与分解等等。因此,行星齿轮传动被人们广泛用来代替普

通齿轮传动作为减速、增速和变速装置。尤其在那些普通齿轮传动难以满足要求的场合，如要求重量最轻、结构最紧凑的航空机械和某些运输机械；需要差速机构的车辆传动等，行星齿轮传动更可发挥其无可比拟的特长。

总之，渐开线行星齿轮传动的研究与应用，对促进技术进步和国民经济的发展具有重要意义。

二、渐开线行星齿轮传动的结构特点

体现行星齿轮传动优越性的前提是必须保证功率在各行星轮之间均匀分流（分配），而保证均匀分流的措施是合理的结构设计和必要的加工质量。

近代行星齿轮传动在结构设计上的重大突破就是成功的采用了均载机构，解决了由于制造、装配和构件变形等因素引起的各行星轮之间的载荷不均匀问题，使功率在各行星轮间均匀分流，从而使这种传动的特点得以充分发挥。在未出现均载机构以前，人们靠减小制造误差来解决均载问题，但这是很不经济、又十分困难的事，而且误差和变形总是难免的。

均载机构的形式很多，可归纳为三大类：基本构件浮动的均载机构、弹性件均载机构和杠杆联动均载机构（详见第七章）。其基本原理是利用渐开线齿轮传动的可分性，通过均载构件在受力不平衡时能自动调位或产生附加弹性变形来补偿误差，达到受力均衡使功率均匀分流。不同类型的均载机构有不同的特点和适用范围。

均载机构的出现，使渐开线行星齿轮传动进入新的发展阶段。但是，到目前为止，均载机构的形式虽然很多，且有些已很成熟，然而系统地分析和测定各种均载机构的动力特

性和均载效果, 寻求最佳的均载方案, 仍是设计与研究者所关心的主要课题。

从整体结构设计的方向来看, 渐开线行星齿轮传动的结构形式与传递负荷大小和速度高低等条件有关。概括起来, 可分为四个方面:

1. 中小规格低速传动

这种传动的最高转速一般不大于 1500 r/min , 当功率小于 100 kW 时, 可以到 3000 r/min 。低速轴转矩在 $50 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 以下。主要采用直齿轮, 个别情况下也有用斜齿轮的。基本构件和行星轮的支承主要采用滚动轴承。普遍采用一个基本构件浮动的均载机构, 也有利用弹性均载或其他方法的。一般用油池润滑方式润滑齿轮和轴承, 当速度偏高或过低, 或散热条件不好时, 也有用其他润滑与冷却措施的。

这种传动型式一般为 NGW 型和 NW 型。功率较小、传动比较大情况下也常用 N 型(少齿差)和 NGWN 型等传动。

2. 大规格中、低速传动

这种传动型式主要是 NGW 型。最高转速不大于 1500 r/min , 低速轴转矩大于 $50 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 在多级传动中已达 $4150 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 以上。其齿轮仍以直齿为主, 分单排直齿和双排直齿两种, 中速时亦可采用斜齿轮或人字齿轮。所用轴承主要为滚动轴承, 中速时也可采用滑动轴承。均载方法基本与中小规格传动相同。当采用双排直齿结构时, 要增加两排内齿轮之间的均载机构; 当采用斜齿或人字齿轮时, 均载方法与高速传动相同。这种传动一般采用循环润滑或油池循环润滑。散热条件较好、非连续工作时也可采用油池润滑。

3. 中等功率高速传动

这种传动的高速轴转速在 3000 r/min 以上, 传递功率从

4

500kW 到1500kW，主要为 NGW 型。其齿轮可用直齿或斜齿，推荐用斜齿轮较好。旋转件采用滑动轴承支承。传动中通过一个或两个基本构件浮动来保证行星轮之间的载荷均衡。啮合处和滑动轴承均用循环油润滑。

4. 大功率高速传动

这种传动的高速轴转速在3000r/min 以上，传递功率从1000kW 起到 20000kW 以上，为 NGW 型。其齿轮主要为人字齿轮，用斜齿的很少。旋转件支承在滑动轴承上。太阳轮和内齿轮同时浮动，以减少浮动补偿运动中的惯性力，提高均载效果和工作平稳性。结构中的主要零件要求高精度，齿轮的精度应不低于 5 级，并要求采用可靠的循环润滑措施。

三、产品发展方向

从各国的生产和市场供应情况来看，渐开线行星齿轮传动作为一种独立的传动装置，其产品方向是：

1. 标准化、多品种

据不完全统计，世界上已有50多个渐开线行星齿轮传动系列设计，并且在基本系列的基础上派生出多种型式的组合式减速器、差速器和变速器等系列产品。一般都有专业化生产厂进行成批或大量生产，可满足各行业和各类机械的多种需要。

2. 硬齿面、高精度

渐开线行星齿轮传动中广泛采用渗碳淬火和氮化齿轮。齿轮精度一般都在 6 级以上。因为这种传动中齿轮的尺寸相对较小，有利于实现硬齿面和高精度。而硬齿面、高精度的结果又可提高承载能力，使齿轮尺寸进一步减小。

3. 高速度、大功率

在高速传动中,渐开线行星齿轮传动的应用愈来愈广泛,速度愈来愈高,功率愈来愈大。因为它与普通定轴齿轮传动相比在同功率同转速情况下,由于齿轮尺寸小,且具有相对运动的特点,所以齿轮的圆周速度相对减小,运转平稳。适宜于在高转速下工作。

4. 大规格、大转矩

在中、低速重载传动中,传递大转矩的大型行星齿轮传动有了很大发展。因为尽管规格很大,但比普通齿轮传动的尺寸和重量大为减小,加工用机床规格也小,台时费用下降,从而可降低制造成本。同时因可解决普通齿轮传动零件(主要是齿轮)尺寸过大而给制造带来的困难,所以实践证明这种传动的规格越大经济效益越显著。

四、渐开线行星齿轮传动的缺点

为了引起读者注意,有必要说明一下这种传动的缺点和使用方面的限制。因为只讲优点忽视缺点和使用界限是不现实的,也不利于这种传动技术的推广和发展。

1. 缺点

- (1) 结构形式比定轴齿轮传动复杂;
- (2) 对制造质量要求比较高;
- (3) 小规格、单台生产时,制造成本比较高;
- (4) 有些传动型式的效率不高,甚至在某种情况下有自锁可能;
- (5) 由于体积小,散热面积小,导致油温升高,因此要严格的润滑与冷却装置和措施。

作为行星齿轮传动的设计者,应该在自己的设计中尽可