

舰载天线座少齿差行星减速器的优化设计*

吴学群

(船舶重工集团公司 723 研究所, 江苏 扬州 225001)

摘要 结合工程实际, 从建立数学模型、确定算法、编制计算程序等方面, 对舰载天线座少齿差行星减速器的优化设计进行研究和总结, 并通过工程应用实例验证了研究结果的正确性。

关键词 舰载天线座; 少齿差行星减速器; 优化设计; 数学模型; 算法

中图分类号: TH122, TH132.425 文献标识码: B 文章编号: 1008-5300(2005)03-0042-04

The Optimized Design of the Planetary Gearbox with Small Tooth Number Difference in Shipborne Antenna Pedestal

WU Xue-qun

(The 723 Institute of CSIC, Yangzhou 225001, China)

Abstract: Combined with the practical application, this paper studies and summarizes the optimized design of the involute planetary gearbox with small tooth number difference in shipborne antenna pedestal by means of establishing its mathematical model and algorithm and program writing. The validity of the design has been verified by an engineering practice.

Key words: ship-borne antenna pedestal; planetary gearbox with small tooth number difference; optimized design; mathematical model; algorithm

0 引言

渐开线少齿差行星齿轮减速器(简称少齿差行星减速器)的优点很多, 将其应用于舰载天线座, 对于简化设备结构、减小设备体积和重量, 效果显著。但少齿差行星传动的几何参数计算很复杂, 加之舰载天线座对减速器的传动比、体积(重量)、传动平稳性、传动效率、回差等有特殊要求, 限制条件增多, 更使得计算工作量增大。因此在舰载天线座少齿差行星减速器的设计过程中, 如果采用常规的人工计算, 不仅周期长, 而且很难实现参数的优化。在此情况下, 充分运用现代优化设计手段, 对于提高设计质量和效率十分 important。

结合工程实际, 以 2K-H 型渐开线少齿差行星直齿齿轮减速器的计算和设计为例, 从建立数学模型、确定算法、编制计算程序等方面, 对其优化设计进行研究和总结。

1 数学模型的建立

少齿差行星减速器的设计包括齿轮传动设计、轴

的结构设计、轴承选型设计以及壳体结构设计。其中, 齿轮传动部分是优化设计的主要对象, 这部分的参数确定后, 其他部分的设计可采用校核的方式进行, 以下着重对齿轮传动部分的优化设计进行讨论。

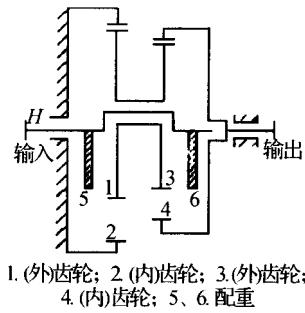


图 1 2K-H 型少齿差行星传动
(内齿轮输出)机构简图

图 1 是以内齿轮输出的 2K-H 型少齿差行星传动机构简图。它含有二级内啮合齿轮副, 为了便于设计和加工, 取二级齿轮副的齿轮模数和啮合角相等, 这时有:

$$z_2 - z_1 = z_4 - z_3 = z_d \quad (1)$$

$$z_2 - z_4 = z_1 - z_3 = z_e \quad (2)$$

$$i_{H4} = \frac{z_1 z_4}{z_1 z_4 - z_2 z_3} \quad (3)$$

式中 通常 $z_d = 1 \sim 4$ (对于动力传动 $z_d \geq 2$) ; $z_e = 1 \sim 25$; z_1, z_2, z_3, z_4 分别为齿轮 1、2、3、4 的齿数 ; i_{H4} 为构件 H(输入) 到齿轮 4(输出) 的传动比。

对上述齿轮传动进行优化设计 , 首先要建立数学模型 , 包括目标函数的建立和约束条件的确立。

1.1 目标函数

少齿差行星传动采用变位齿轮设计 , 其齿轮几何参数的计算比标准齿轮传动复杂得多 , 而且求解结果不是惟一的 ; 另一方面 , 对于舰载天线座来说 , 在满足所需传动比和传递功率(扭矩) 的前提下 , 体积(重量) 小的减速器无疑是理想的。因此 , 可将少齿差行星传动的优化分为两个层次进行 : 内层为齿轮几何参数的优化 外层是体积的优化。

1.1.1 齿轮几何参数的优化

内啮合齿轮传动的无齿侧隙啮合方程为 :

$$\operatorname{inv}\alpha' = \operatorname{inv}\alpha - \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{z_2 - z_1} \quad (4)$$

式中 inv 为渐开线函数 ; Δ_1 和 Δ_2 分别为啮合齿轮副外齿轮和内齿轮的分度圆齿厚增量系数 , 它们与外齿轮和内齿轮的变位系数 x_1, x_2 , 插制内齿轮的插齿刀齿数 z_0 等有关。 Δ_1 和 Δ_2 的具体计算公式可见参考文献 [1] 。 最终 , 传动啮合角 α' 可表达为 z_1, z_2, z_0, x_1, x_2 和齿顶高系数 h_a^* 的函数 , 即 :

$$\alpha' = f(z_1, z_2, z_0, x_1, x_2, h_a^*) \quad (5)$$

啮合角越小 , 对提高传动效率和轴承寿命越有利。因此 , 几何参数的优化可将啮合角最小作为目标函数 , 即 :

$$\begin{aligned} \alpha'(X) &= \min f(z_1, z_2, z_0, x_1, x_2, h_a^*) \\ X &= [z_1, z_2, z_0, x_1, x_2, h_a^*]^T \end{aligned} \quad (6)$$

需要指出的是 , Δ_1 和 Δ_2 的计算与齿轮的加工方法有关。由于舰载天线座对传动精度要求较高 , 外齿轮磨齿后才能达到所需的较高精度(6 级以上) , 对应于蜗杆型磨齿刀具 , 应按外齿轮滚齿进行相关计算。另外 , 由于两级内啮合齿轮的啮合性质相同 , 齿轮几何参数的优化可看成过程相同的二次重复。

1.1.2 体积的优化

如图 1 所示 , 二级齿轮副中的外齿轮体积之和决

定了内齿圈或整个机构的尺寸和体积 , 因此可选择齿轮 1、3 的体积之和最小作为体积优化的目标。

$$\begin{aligned} V_1 + V_3 &= \frac{\pi}{4} m^2 z_1^2 b_{12} \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \alpha'} + \frac{\pi}{4} \times \\ m^2 z_3^2 b_{34} \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \alpha'} &= \frac{\pi}{4} m^2 \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \alpha'} (z_1^2 b_{12} + z_3^2 b_{34}) \end{aligned} \quad (7)$$

其目标函数可表达为 :

$$\left. \begin{aligned} V(Y) &= \min g(m, z_1, z_3, b_{12}, b_{34}, \alpha') \\ Y &= [m, z_1, z_3, b_{12}, b_{34}, \alpha']^T \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中 m 为模数 mm ; b_{12}, b_{34} 为 I 、 II 级齿轮副的齿宽 , mm ; α 为基准齿形角 , 国家标准 $\alpha = 20^\circ$; α' 为传动啮合角。

1.2 约束条件

与标准齿轮传动相比 , 少齿差行星传动涉及参数和约束条件较多。将一些关键的约束作为程序中的判断、控制条件 , 而将一些次要的约束作为校核项目 , 这样既简化了编程 , 又可避免疏漏。

1.2.1 传动比偏差约束

根据公式(1)、(2)和(3) , 得 :

$$z_2 = \frac{1}{2} [z_d + z_e + \sqrt{(z_d - z_e)^2 - 4z_d z_e (1 - i_{H4})}] \quad (9)$$

将 z_2 圆整为整数 , 即可求得其余各齿轮的齿数 , 但这些齿数组合不可能完全满足设计任务书提出的传动比要求 , 求出的齿数还必须满足传动比偏差约束条件 , 即 :

$$\frac{|i_{H4L} - i_{H4S}|}{i_{H4L}} \leq \lambda \quad (10)$$

式中 i_{H4L}, i_{H4S} 分别为所需传动比和实际传动比 ; λ 为精度 , 程序中设定 $\lambda = 4\%$ 。

1.2.2 重合度约束

重合度是少齿差行星齿轮传动连续性和平稳性的重要指标 , 对于少齿差行星齿轮传动 , 喷合齿轮副的重合度应满足下列不等式 :

$$\varepsilon = \frac{1}{2\pi} [z_1(\operatorname{tg}\alpha_{a1} - \operatorname{tg}\alpha') - z_2(\operatorname{tg}\alpha_{a2} - \operatorname{tg}\alpha')] \geq [\varepsilon] \quad (11)$$

式中 z_1, z_2 分别为喷合齿轮副外齿轮和内齿轮的齿数 ; α_{a1}, α_{a2} 分别为喷合齿轮副外齿轮和内齿轮的齿顶圆压力角 ; $[\varepsilon]$ 为重合度预期值 , 对于 $z_d = 1 \sim 4$ 的少齿差行星传动 , 通常取 $[\varepsilon] = 1.05 \sim 1.15$ 。由于舰载天线座对传动连续性和平稳性要求较高 , 设计时 $[\varepsilon]$ 取

值可略微偏大一些。

两级齿轮副的重合度根据公式(11)分别计算。

1.2.3 齿廓不重叠干涉约束条件

少齿差行星传动中,由于啮合齿轮齿数相差很少,非啮合区容易发生齿廓重叠干涉。为了避免这种干涉,必须满足:

$$G_s = z_1(\operatorname{inv}\alpha_{a1} + \delta_1) - z_2(\operatorname{inv}\alpha_{a2} + \delta_2) + z_d \operatorname{inv}\alpha' \geq [G_s] \quad (12)$$

式中: $\delta_1 = \arccos \frac{d_{a2}^2 - d_{a1}^2 - 4a'^2}{4a'd_{a1}}$, rad; $\delta_2 = \arccos \frac{d_{a2}^2 - d_{a1}^2 + 4a'^2}{4a'd_{a2}}$, rad; a' 为中心距, mm; $[G_s]$ 为齿廓重叠干涉验算预期值; d_{a1}, d_{a2} 为啮合外齿轮和内齿轮的齿顶圆直径, 其他符号同公式(11)。

两级齿轮副的 G_s 根据公式(12)分别计算。

重合度和齿廓不重叠干涉约束是少齿差行星传动啮合齿轮副几何参数计算和优化的两个关键的约束条件。

1.2.4 齿轮的强度约束条件

齿轮强度指齿轮齿面接触疲劳强度和轮齿的弯曲疲劳强度。在少齿差行星传动中,由于啮合齿轮副的内外齿轮的齿廓曲率中心在同一侧,并且齿数差少、曲率半径接近相等,使得接触面积增加,接触应力相应地降低。满足了弯曲疲劳强度条件,接触疲劳强度条件一般能够满足,因此,将弯曲疲劳强度约束条件作为程序中相关的判断、控制依据,即:

$$S_F = \frac{\sigma_{\text{Flim}} Y_{ST} Y_{NT} Y_{\delta\text{relT}} Y_{\text{RrelT}} Y_x}{\sigma_{F0} K_A K_V K_{FB} K_{Fa}} \geq S_{F\min} \quad (13)$$

式中: σ_{F0} 为齿根应力基本值, $\sigma_{F0} = \frac{F_t}{bm} Y_{Fa} Y_{Sa} Y_e$, N/mm²; F_t 为分度圆上的名义切向力, N; b 为工作齿宽, mm; S_F 为弯曲疲劳强度的计算安全系数; $S_{F\min}$ 为弯曲疲劳强度的最小安全系数, 程序中设定 $S_{F\min} = 1.5$ 。

式中其他符号的含义及计算可参照参考文献[5],限于篇幅,不再一一说明。齿轮1、2、3、4的弯曲疲劳强度根据公式(13)分别计算。

1.2.5 其他约束条件

除了上述约束条件外,还应根据设计经验和工艺要求,对模数、齿宽、齿数等取值范围做出限制。根据强度初步计算公式可大致确定模数的取值下限,对于少齿差行星传动,齿宽系数取 $\Phi_d = 0.1 \sim 0.4$,据此可限定齿宽的取值范围;齿轮齿数的取值范围可根据外齿轮的最小齿根圆直径、内齿轮的最小齿数以及加工设

备所允许的最大内齿圈直径联合确定;根据传递功率估算轴径对初步推定齿轮最小分度圆直径也很有帮助。

总之,对上述这类约束考虑得愈周密,就愈能增加方案的可行性。

1.2.6 校核项目

变位内、外齿轮在加工和啮合过程中还可能存在其他若干干涉,如滚切外齿轮时的根切,插制内齿时的范成顶切、退刀干涉,齿轮副啮合过程中的渐开线干涉和过渡曲线干涉等。对于少齿差行星传动,发生这类干涉的概率不大,可将这类干涉的限制条件作为校核项目。作为校核项目的还有:齿轮的接触强度、齿顶厚度、滑动率、传动效率等等。这样,既使问题得到了简化,又避免了疏漏,并可在方案阶段就对各项参数和指标有比较详细的把握。

2 计算程序的编制

2.1 优化算法

通过数学模型的建立,可将图1所示的2K-H型少齿差行星传动的优化归结为11维($m, z_1, z_3, z_d, z_0, b_{12}, b_{34}, \alpha', x_1, x_3, h_a^*$)和多个等式(或不等式)约束的非线性规划问题。根据数学模型既有连续变量又有离散变量的特点,将这两种变量进行分离,使两种变量在各自的特殊空间内优化;通过控制步长的方法将某些连续变量当作离散变量处理。程序设计时,联合运用降维可行枚举算法和微分迭代算法,将多维问题变为一系列一维问题求解,并在求解过程中利用有关约束条件检验各个设计变量的可行性,将不满足约束条件的设计变量组合随时剔除;同时,求解变位系数等变量时运用微分迭代算法,进一步加快求解过程。两种算法的联合运用,既保证了精度又大大缩短了程序的运行时间。

2.2 程序结构和流程图

为了方便程序的编制、检查、引用和更改,程序采用块状结构。整个程序由主程序和若干子程序组成,每一程序块功能相对独立,子程序由主程序调用。程序用FORTRAN语言编写,其流程如图2所示。图2中,MOS为模数存放数组;NM为模数存放数;Z1S、Z2S、Z3S、Z4S分别为齿轮1、2、3、4满足传动比和传动比精度要求的齿数存放数组;IZ为齿数存放数;BLS为设计变量值的存放数组; V_{\max} 为两级外齿轮最大体积之和的粗略估算值; $z_{n\min}$ 为内齿轮最小齿数值; $z_{n\max}$ 为内齿轮最大齿数值; $z_{1\min}, z_{3\min}$ 分别为外齿轮1、3的最小

齿数值 $[b_{I\min}, b_{I\max}]$ 、 $[b_{II\min}, b_{II\max}]$ 分别为 I、II 级齿轮副的齿宽取值区间。

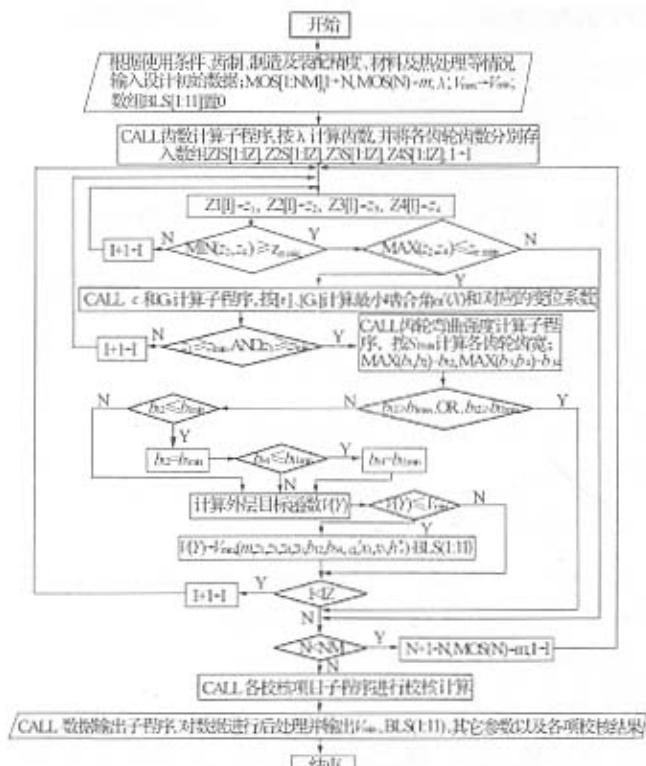


图2 2K-H型少齿差行星传动优化设计的计算程序流程图

3 工程应用实例

图3是某型舰载雷达天线座中的大速比高精度(回差<3 arcmin)少齿差行星减速器,啮合齿轮副齿数差为3。该减速器的设计运用了上述优化程序,取得了满意的效果:减速器传动比和额定输出扭矩分别为70和330 N·m,重量仅10 kg。相同重量下的传动比和额定输出扭矩超过了某些国际知名品牌的精密行星减速器; ε 和 G_s 设计计算值准确地达到了理想预期($[\varepsilon] = 1.126$ [$G_s] = 0.051$),传动啮合角仅为28.3°,小于设计手册中通常推荐的最小值(对于3齿差行星齿轮传动,啮合角通常的推荐范围是28.5°~30.5°)。

(上接第7页)

- [3] 高霄汉 , 张予川 . 基于参数化技术的 Pro/E 二次开发和应用 [J]. 交通与计算机 , 2003, 21(1): 69 - 72.
 - [4] 林湖 , 陈强努 , 周银龙 , 等 . PDM 系统在中小型企业的设计及实现 [J]. 计算机辅助工程 , 2002, 11(4): 47 - 52.
 - [5] 扬威 . 传统技术管理模式的重大革新 [J]. CAD/CAM 与制造业信息化 , 2003, (2).

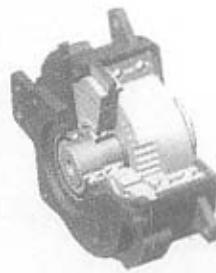


图 3 少齿差行星减速器优化设计实例

4 结 论

(1)运用上述优化程序,能在准确满足 $[e]$ 和 $[G_s]$ 的理想预期值的前提下获得最小啮合角,实现齿轮几何参数的最优组合。能在满足特定传动比、额定输出扭矩等要求的前提下,有效地减小少齿差行星减速器的结构尺寸和重量。

(2)优化程序使原本复杂的计算变得简单易行，大大提高了设计效率。

(3) 上述优化设计方法及程序对舰载天线座少齿差行星减速器的系列化设计有较高的工程实用价值。

参考文献：

- [1] 饶振钢. 行星传动机构设计[M]. 北京 :国防工业出版社 , 1996.
 - [2] 张少名. 行星传动[M]. 西安 :陕西科学技术出版社 , 1988.
 - [3] 刘惟信. 机械最优化设计[M]. 北京 :清华大学出版社 , 1994.
 - [4] 成大先. 机械设计手册[M]. 第 3 卷. 北京 :化学工业出版社 , 1993.
 - [5] 国家技术监督局. 渐开线圆柱齿轮承载能力计算方法 [M]. 北京 :中国标准出版社 , 1998.

作者简介 :吴学群(1964 -) ,男 ,江苏扬州人 ,高级工程师 ,主要从事舰载雷达设备结构研究与设计 ,以及现代设计技术的研究工作。

- [6] 代红 , 郭钢 , 王宁 , 等 . 现代企业对 PDM 的新要求 [J].
重庆大学学报 , 2003, 26(1): 116 - 118.

作者简介：鲍成艳（1962—），男，江苏宜兴人，高级工程师。现从事雷达发射机结构及冷却专业工作。

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>