

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2017.03.001

单环路复合行星齿轮系统动态跟随性能分析

徐琳, 刘凯, 崔亚辉, 王宏江, 张宝锋, 刘晓琳

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 以单环路复合行星齿轮系统为研究对象,分析了系统转速与转矩的影响因素以及调节方式,在此基础上提出了反映系统动态跟随性能的转速灵敏度与转矩灵敏度概念,并获得对应的表达式。此后进一步研究了转速与转矩灵敏度的影响参数以及影响规律,结合系统结构参数对传动效果的影响规律提出了基于动态跟随性能以及传动效果的系统设计准则。最后,通过试验验证了文中分析方法的正确性。研究表明:输出转速相对于输入转速灵敏度以及输出转矩相对于输入转矩灵敏度由差动轮系特性参数 K 以及封闭机构传动比 i_p 共同决定,而输出转速与输出转矩相对于 i_p 的灵敏度可通过选用合适的 K 来得到。

关键词: 单环路复合行星齿轮系统; 动态跟随性能; 灵敏度; 设计准则

中图分类号: TH132.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2017)03-0253-06

Dynamic tracking performance analysis of single-loop compound epicyclic gear system

XU Lin, LIU Kai, CUI Yahui, WANG Hongjiang, ZHANG Baofeng, LIU Xiaolin

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering,

Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on the analysis of the influencing factors and the adjustment methods for speed and torque among the basic components of the single-loop compound epicyclic gear transmission system, the concept of dynamic tracking performance is proposed, which is different from the static and dynamic analysis. The speed sensitivity and torque sensitivity reflecting dynamic tracking performance of the system is calculated. Then, the influence parameters and influence rule of speed and torque sensitivity, and the influence of system structure parameters on transmission effect are analyzed. Based on the combination of dynamic tracking performance and transmission effect, the design criterion of the single-loop system is proposed. Finally, the correctness of the analytical method is verified by experiments. The results show that the sensitivity of the output speed relative to the input speed and the output torque relative to the input torque are determined by the characteristic parameter K of the differential epicyclic system and the closing mechanism transmission ratio i_p , and the output speed and output torque relative to the sensitivity of the i_p can be achieved by selecting the appropriate K .

Key words: single-loop compound epicyclic gear system; dynamic tracking performance; sensitivity; design criteria

单环路复合行星齿轮系统(简称单环路系统)由一个差动轮系(X)与一个单自由度的封闭机构(P)组合而成(见图1),是组合行星传动机构的一种。因具有结构紧凑、功率密度高以及传动稳定等诸多

优点而被广泛用于航空器、风力发电机、车辆和自动化工业中^[1-4]。

围绕单环路系统的运动、力学与功率特性,学者们分别以动、静力学方法展开了大量的研究^[2,4-18],

收稿日期: 2016-07-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175419),陕西省机械制造装备重点实验室建设项目

作者简介: 徐琳,女,博士生,研究方向为行星齿轮传动。E-mail: vsxulin@gmail.com

通讯作者: 刘凯,男,教授,博导,研究方向为现代传动技术、无级变速器传动系统与车辆系统人机工程。

E-mail: kliu@mail.xaut.edu.cn

所得结论对系统的设计选型具有重要的指导意义。但在风力发电机和车辆等应用中,单环路系统多处于不稳定状态,速度与载荷的变化迅速且复杂。如何快速有效地调整速度和转矩,使得轮系能跟随工作情况的变化而正常运行也是设计选型中需要重点考虑的。

行星齿轮传动系统的动态跟随性是指其主、从动构件之间物理量变化的相互响应特性,它反映了系统随负载变化的响应速度以及能否在动态工况下正常工作。动态跟随性能包括灵敏度与贡献度两方面,其中灵敏度反映的是轮系不同基本构件在运动过程中转速、转矩特性的调整速度。由于本文所研究单环路系统为单动力源系统,因而不涉及贡献度问题,所以本文只开展灵敏度问题的研究,用以描述和判定系统的动态跟随性能。

1 单环路系统运动学与力学分析

单环路系统根据输入构件的不同可以对其进行简化而得到图 1 所示的 XP 系统与 PX 系统的简化模型。图中 a、b、c 为差动轮系 X 的 3 个基本构件,α、β 为封闭机构 P 的基本构件。

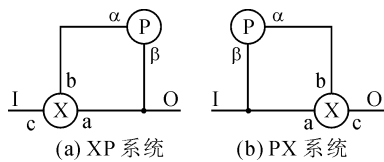


图 1 单环路系统的简化模型
Fig. 1 Simplified models of single-loop compound epicyclic gear system

差动轮系 X 的基本构件之间的转速关系满足 Willis 公式^[12]:

$$\omega_a = K \cdot \omega_b + (1 - K) \cdot \omega_c \quad (1)$$

式中, $K = (\omega_a - \omega_c) / (\omega_b - \omega_c)$ 为 X 的特性参数, ω_i ($i = a, b, c$) 为 X 基本构件 i 的转速。

在单环路系统中,构件 b 与构件 α 相连,构件 a 与构件 β 相连,结合式(1)可得系统各基本构件之间的转速满足如下约束条件:

$$\mathbf{L}_\omega \boldsymbol{\omega} = \mathbf{0} \quad (2)$$

式中:

$$\mathbf{L}_\omega = \begin{bmatrix} -1 & K & 1-K & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -i_p \end{bmatrix}$$

$\boldsymbol{\omega} = [\omega_i]^T = [\omega_a \ \omega_b \ \omega_c \ \omega_\alpha \ \omega_\beta]^T$ 为单环路系统的转速向量, ω_i ($i = a, b, c, \alpha, \beta$) 为各基本构件 i 的转速,

$i_p = \omega_\alpha / \omega_\beta$ 为封闭机构 P 的传动比。

对于 XP 系统,其系统输入转速 $\omega_1 = \omega_c$,输出转速 $\omega_0 = \omega_a$,可得 XP 系统的总传动比 i_{10}^{XP} 为:

$$i_{10}^{XP} = \frac{\omega_1}{\omega_0} = \frac{1 - K \cdot i_p}{1 - K} \quad (3)$$

系统的力学关系满足:

$$\frac{T_0}{T_1} = -i_{10}^{XP} = -\frac{1 - K \cdot i_p}{1 - K} \quad (4)$$

式中, T_1 、 T_0 分别为系统的输入转矩和输出转矩。

在 PX 系统中,系统输入转速 $\omega_1 = \omega_a$,输出转速 $\omega_0 = \omega_c$,可得系统的总传动比 i_{10}^{PX} 为:

$$i_{10}^{PX} = \frac{\omega_1}{\omega_0} = \frac{1 - K}{1 - K \cdot i_p} \quad (5)$$

系统的力学关系满足:

$$\frac{T_0}{T_1} = -i_{10}^{PX} = -\frac{1 - K}{1 - K \cdot i_p} \quad (6)$$

2 转速灵敏度

单环路系统虽为单自由度系统,但当其封闭机构 P 为可调速机构,如 CVT 时,系统的输出转速 ω_0 由输入转速 ω_1 、差动轮系特性参数 K 与封闭机构的传动比 i_p 共同决定。在系统的运动过程中,可以通过调整 ω_1 和 i_p 以达到调整 ω_0 的目的。在此,将 ω_0 相对于 ω_1 变化和 i_p 变化的灵敏性称为转速灵敏度,它反映了输出构件相对于输入构件速度跟随性的优劣以及对封闭机构的调速响应的速度,是机械传动的重要动态指标之一。

2.1 XP 系统转速灵敏度

分别标记 XP 系统中 ω_0 对 ω_1 的转速灵敏度为 S_{O1}^{nXP} , ω_0 对 i_p 的转速灵敏度为 S_{Op}^{nXP} ,由式(3)可知 XP 系统的输出转速可表达为:

$$\omega_0 = \frac{1 - K}{1 - K \cdot i_p} \omega_1 \quad (7)$$

计算可得 S_{O1}^{nXP} 、 S_{Op}^{nXP} 表达式为:

$$\begin{cases} S_{O1}^{nXP} = \frac{\partial \omega_0}{\partial \omega_1} = \frac{1 - K}{1 - K \cdot i_p} \\ S_{Op}^{nXP} = \frac{\partial \omega_0}{\partial i_p} = \omega_1 \frac{K(1 - K)}{(1 - K \cdot i_p)^2} \end{cases} \quad (8)$$

图 2 所示为 XP 系统输出转速对输入转速的灵敏度。由式(8)可知, S_{O1}^{nXP} 同时受 K 值与 i_p 状态影响,与 ω_1 数值无关。

从图 2 可知,对不同的差动轮系特性参数 K 以及 i_p ,灵敏度有着不同的大小。在 i_p 的 $(-\infty, 1/K)$, $(1/K, +\infty)$ 区间内, S_{O1}^{nXP} 在 $K < 0$ 、 $0 < K < 1$ 和 $K > 1$ 三种参数情况下分别呈现为单调减、单调增和单调减趋势。期间, S_{O1}^{nXP} 数值可能为正,也可能

为负。需要注意的是当 $i_p=1$ 时, $\omega_a=\omega_b=\omega_c=\omega_a=\omega_\beta=\omega_\gamma$, 即 $\omega_1=\omega_0$, 此时系统处于联轴器状态, $S_{O_1}^{nXP}=1$ 。

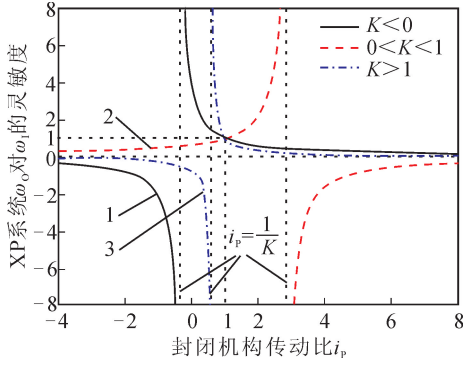


图2 XP系统输出转速对输入转速的灵敏度
Fig.2 XP system speed sensitivity of output speed relative to input speed

由式(8)可知, $S_{O_1}^{nXP}$ 同时受 K 值、 ω_1 与 i_p 状态影响。通常定义 $\omega_1 > 0$, ω_1 对于 $S_{O_1}^{nXP}$ 的影响是对数值的成倍放大或缩小, 而不影响曲线趋势, 因而文中不讨论 ω_1 的变化。令 $\omega_1 = 1$ r/min, 得到图3所示的XP系统输出转速对 i_p 的灵敏度曲线。

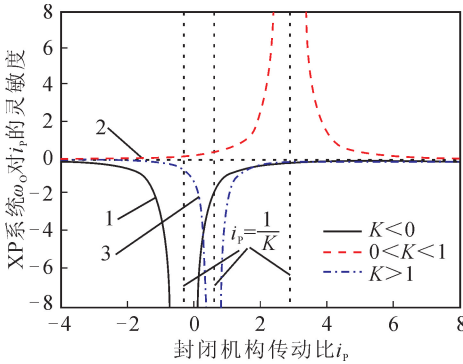


图3 XP系统输出转速对封闭机构传动比 i_p 的灵敏度
Fig.3 XP system speed sensitivity of output speed relative to i_p

图3表明, $S_{O_1}^{nXP}$ 的符号由 K 与 ω_1 决定, 而与 i_p 无关。换言之, 对于确定结构的XP型单环路系统, $S_{O_1}^{nXP}$ 的符号确定。

对比图2与图3可知, 在 $i_p < 1/K$ 时图2与图3中曲线1、2与3分别相似, 表现出相同的趋势, 说明当 $i_p < 1/K$ 时, 系统的 $S_{O_1}^{nXP}$ 与 $S_{O_1}^{nXP}$ 相似。同理可知, 当 $i_p > 1/K$ 时, 系统的 $S_{O_1}^{nXP}$ 与 $-S_{O_1}^{nXP}$ 相似。

2.2 PX系统转速灵敏度

对于PX系统, 同样可以通过调整 ω_1 和 i_p 以达到调整 ω_0 的目的。分别标记PX系统中 ω_0 对 ω_1 的灵敏度为 $S_{O_1}^{nPX}$, ω_0 对 i_p 的灵敏度为 $S_{O_1}^{nPX}$, 同上文推导, 由式(5)计算可得:

$$\begin{cases} S_{O_1}^{nPX} = \frac{\partial \omega_0}{\partial \omega_1} = \frac{1 - K \cdot i_p}{1 - K} \\ S_{O_1}^{nPX} = \frac{\partial \omega_0}{\partial i_p} = \omega_1 \frac{-K}{1 - K} \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可知, $S_{O_1}^{nPX}$ 同时受 K 值与 i_p 状态影响, 与 ω_1 数值无关。对于确定结构, $S_{O_1}^{nPX}$ 与 i_p 状态之间呈现为线性关系, 可绘得如图4所示的PX系统输出转速对输入转速的灵敏度。从图4可知, $K < 0$ 与 $K > 1$ 参数情况下 $S_{O_1}^{nPX}$ 与 i_p 状态之间为增函数关系, $0 < K < 1$ 参数情况下 $S_{O_1}^{nPX}$ 与 i_p 状态之间为减函数关系。当 $i_p=1$ 时, $\omega_1=\omega_0$, $S_{O_1}^{nPX}=1$ 。当 $i_p=1/K$ 时, $\omega_0=0$ 且 $S_{O_1}^{nPX}=0$ 。

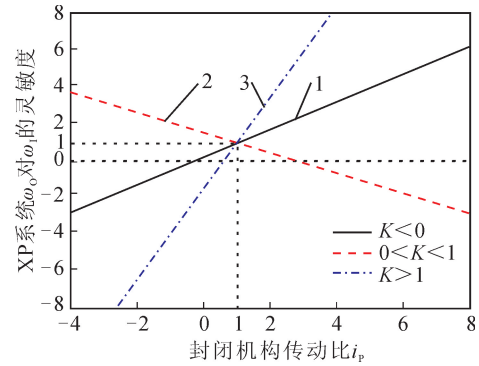


图4 PX系统输出转速对输入转速的灵敏度
Fig.4 PX system speed sensitivity of output speed relative to input speed

根据式(9)计算结果, ω_0 对 i_p 的灵敏度 $S_{O_1}^{nPX}$ 的数值由 K 与 ω_1 决定, 与 i_p 数值无关。即对于确定结构的PX单环路系统, 其 $S_{O_1}^{nPX}$ 的符号已经确定(仍认定 $\omega_1 > 0$)。当 $K < 0$ 以及 $K > 1$ 时, $S_{O_1}^{nPX} > 0$, 说明在该情况下, ω_0 随着 i_p 的增大而增大; 当 $0 < K < 1$ 时, $S_{O_1}^{nPX} < 0$, 说明在该情况下, ω_0 随着 i_p 的增大而减小。

3 系统转矩灵敏度

当单环路系统的封闭机构P为CVT等传动比可调机构时, 系统的带载能力 T_0 由输入转矩 T_1 、差动轮系特性参数 K 与封闭机构的传动比 i_p 共同决定。将 T_0 相对于可变参数 T_1 变化与 i_p 变化的灵敏性称为转矩灵敏度, 其反映了输出构件相对于输入构件转矩跟随性的优劣以及对封闭机构调矩响应的速度, 是机械传动的重要动态指标之一。

3.1 XP系统转矩灵敏度

分别记XP系统中 T_0 对 T_1 的转矩灵敏度为 $S_{O_1}^{tXP}$, T_0 对 i_p 的转矩灵敏度为 $S_{O_1}^{tXP}$ 。由式(4)计算可得:

$$\begin{cases} S_{O_1}^{TXP} = \frac{\partial T_O}{\partial T_1} = -\frac{1-K \cdot i_p}{1-K} \\ S_{O_p}^{TXP} = \frac{\partial T_O}{\partial i_p} = T_1 \frac{K}{1-K} \end{cases} \quad (10)$$

3.2 PX 系统转矩灵敏度

记 PX 系统中 T_O 对 T_1 的转矩灵敏度为 $S_{O_1}^{TPX}$, T_O 对 i_p 的转矩灵敏度为 $S_{O_p}^{TPX}$ 。由式(6)计算可得:

$$\begin{cases} S_{O_1}^{TPX} = \frac{\partial T_O}{\partial T_1} = -\frac{1-K}{1-K \cdot i_p} \\ S_{O_p}^{TPX} = \frac{\partial T_O}{\partial i_p} = -T_1 \frac{K(1-K)}{(1-K \cdot i_p)^2} \end{cases} \quad (11)$$

分别对比式(9)与式(10)、式(8)与式(11)可知, 转速灵敏度与转矩灵敏度的表达式交叉相似: $S_{O_1}^{TPX} = -S_{O_1}^{nPX}, S_{O_1}^{TPX} = -S_{O_1}^{nXP}, S_{O_p}^{TPX} = -S_{O_p}^{nPX} \cdot T_1/\omega_1, S_{O_p}^{TPX} = -S_{O_p}^{nXP} \cdot T_1/\omega_1$ 。

根据分析, $S_{O_1}^{TPX}$ 相对于 i_p 状态之间的关系曲线与图 4 关于 X 轴的镜像曲线相同, 可知在 $K < 0$ 与 $K > 1$ 参数情况下 $S_{O_1}^{TPX}$ 与 i_p 状态之间为减函数关系, $0 < K < 1$ 参数情况下 $S_{O_1}^{TPX}$ 与 i_p 状态之间为增函数关系。当 $S_{O_1}^{TPX}$ 数值为正, 说明 XP 系统的带载能力随着 T_1 的增大而增大; 若 $S_{O_1}^{TPX}$ 数值为负则反之。由于图片相似, 此处不再重复插图, 下同。

$S_{O_1}^{TPX}$ 与 i_p 状态的关系曲线与图 2 关于 X 轴的镜像曲线相同。 $S_{O_1}^{TPX}$ 在 $K < 0, 0 < K < 1$ 和 $K > 1$ 三种参数情况下, 在各自封闭机构传动比 i_p 的 $(-\infty, 1/K), (1/K, +\infty)$ 区间内分别呈现为单调增、单调减和单调增趋势。期间, $S_{O_1}^{TPX}$ 数值各有正负。

$S_{O_p}^{TPX}$ 的表达式表明, 对于结构确定的 XP 系统, 其 $S_{O_p}^{TPX}$ 的符号确定(此处认为 $T_1 > 0$)。当 $K < 0$ 以及 $K > 1$ 时, $S_{O_p}^{TPX} < 0$, 系统带载能力随着 i_p 的增大而减小; 当 $0 < K < 1$ 时, $S_{O_p}^{TPX} > 0$, 系统带载能力随着 i_p 的增大而增大。

若令 T_1 与 ω_1 数值相等, 则 $S_{O_p}^{TPX}$ 与 i_p 状态的关系曲线与图 3 关于 X 轴的镜像曲线相同。在确定结构的 PX 系统中, $S_{O_p}^{TPX}$ 的数值变化遵循图 3 关于 X 轴镜像图的曲线规律, 其符号确定且不随 i_p 状态改变。在 $K < 0$ 与 $K > 1$ 情况下, $S_{O_p}^{TPX}$ 为正值, $0 < K < 1$ 情况下, $S_{O_p}^{TPX}$ 为负值。

4 设计准则

图 5 所示为单环路系统在不同参数 K 与 i_p 匹配条件下的传动效果图。图中 I、II、III 与 IV 代表传动比关系, 对于 XP 系统, 分别对应输出轴相对于输入轴的同向增速、同向降速、反向增速与反向降速区域; 对于 PX 系统, 分别对应输出轴相对于输入轴的

同向降速、同向增速、反向降速与反向增速区域。图 5 曲线表明, 在 $K < 0, 0 < K < 1$ 和 $K > 1$ 这三种参数下, 分别都存在 I、II、III 与 IV 区域, 且都在 $i_p = 1, i_p = 1/K$ 以及 $i_p = 2/K - 1$ 附近, 系统传动效果发生变化。

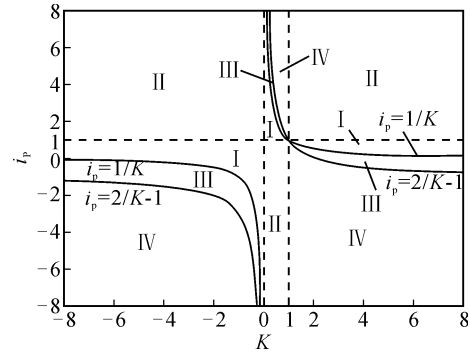


图 5 不同参数匹配下的传动效果
Fig. 5 Transmission effect of different parameters matching

文中研究表明, 对于 XP 系统而言, 当封闭机构传动比状态 i_p 越靠近 $1/K$, 系统的转速灵敏度越高, 反之则转速灵敏度降低, 其中转速灵敏度 $S_{O_p}^{nXP}$ 的大小还可通过调整输入转速大小调节。而转矩灵敏度 $S_{O_1}^{TPX}$ 则与 i_p 表现为线性关系且当 $i_p = 1$ 时, $S_{O_1}^{TPX} = 1$, 当 $i_p = 1/K$ 时, $S_{O_1}^{TPX} = 0$, 此时 $T_O = 0$ 。 $S_{O_p}^{TPX}$ 则与 i_p 无关, 由输入转矩与差动轮系结构参数 K 决定。

结合图 5 可知, 在 XP 系统的设计中, 若设计具有较高转速灵敏度 $S_{O_p}^{nXP}$ 的系统, 则该系统必然具有同向或反向增速效果, 对应图 5 中 I、III 区域; 若设计具有较高转矩灵敏度 $S_{O_1}^{TPX}$ 的系统, 则该系统的传动效果为同向或反向降速效果, 对应图中 II、IV 区域; 若设计具有较高的转速灵敏度 $S_{O_p}^{nPX}$ 的系统, 除了选择接近 $1/K$ 的 i_p , 还可在选择差动轮系时选用使 $K(1-K)$ 数值较大的特性参数; 若设计具有较高转矩灵敏度 $S_{O_1}^{TPX}$ 的系统, 应选用使 $K/(1-K)$ 数值较大的差动轮系特性参数。

在 PX 系统的设计中, 具有较高转速灵敏度 $S_{O_p}^{nPX}$ 的系统位于图 5 中 II、IV 区域, 传动效果为同向或反向增速; 具有较高转矩灵敏度 $S_{O_1}^{TPX}$ 的系统位于图中 I、III 区域, 传动效果为同向或反向降速; 若设计具有较高的转速灵敏度 $S_{O_p}^{nXP}$ 的系统, 应选用使 $K/(1-K)$ 数值较大的差动轮系特性参数 K ; 若使系统具有较高转矩灵敏度 $S_{O_1}^{TPX}$, 除选用接近 $1/K$ 的 i_p , 还可选用使 $K(1-K)$ 数值较大的 K 。

5 试验验证

本文利用图 6 所示单环路系统试验台对转速灵敏度进行了验证。该试验台由差动轮系、定轴轮系、减速器以及带传动机构复合而成,由电机驱动,磁粉加载器作为负载输出。对其中的中间环节进行简化后得到图 7 所示试验台的结构示意图。图中, Z_7 、 Z_{10} 、 Z_{11} 、 Z_{12} 、 Z_{13} 组成差动轮系部分,其中, Z_7 为行星架, Z_{10} 为行星轮, Z_{11} 为太阳轮, Z_{12} 与 Z_{13} 分别代表内、外齿圈。其余部分为定轴轮系部分。各齿轮的齿数分别为 $Z_1=Z_2=50$, $Z_{10}=24$, $Z_{11}=33$, $Z_{12}=81$, $Z_3=Z_4=Z_5=Z_6=Z_7=Z_8=Z_9=Z_{13}=100$ 。



图 6 单环路系统试验台

Fig. 6 Test rig of single-loop compound epicyclic gear system

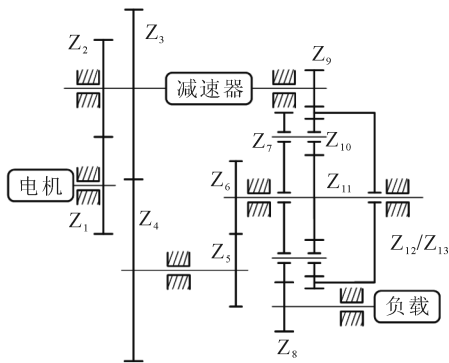


图 7 试验台结构示意图

Fig. 7 Structure schematic of test rig

根据电机、负载与各构件的连接关系可知该结构为 PX 型单环路系统。根据齿数关系,计算可得差动轮系特性参数 $K = -81/33$, 封闭机构传动比 i_p 等于减速器传动比。试验中选用两款减速器,其传动比分别为 $1/1.4$ 与 $1/2.54$ 。根据式(5)可算得配备两款减速器时,系统的传动比分别为 $i_{i_0}^{\text{PX}} = 1.255$ ($i_p = 1/1.4$) 与 $i_{i_0}^{\text{PX}} = 1.757$ ($i_p = 1/2.54$)。据此可算得电机与负载的理论转速关系,绘得图 8 所示理论转速与试验测得转速对比图。

由图 8 可知,试验测得数据与理论值十分接近。

根据式(9)可算得 PX 系统 ω_0 对 ω_1 灵敏度的理论值分别为 $S_{\text{OI}}^{\text{PX}} = 0.800$ ($i_p = 1/1.4$) 与 $S_{\text{OI}}^{\text{PX}} =$

0.569 ($i_p = 1/2.54$)。结合试验数据可绘得图 9 所示 $S_{\text{OI}}^{\text{PX}}$ 的理论值与试验值对比图。

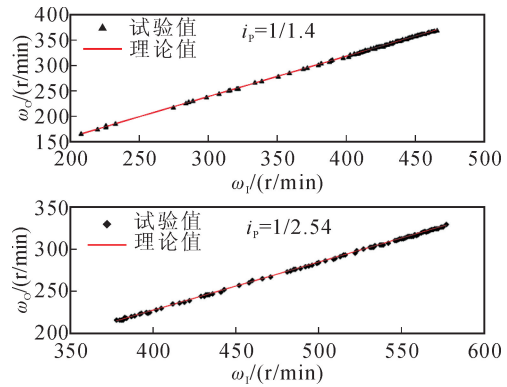


图 8 试验测量转速与理论转速图

Fig. 8 Experimentally measured and theoretical speed

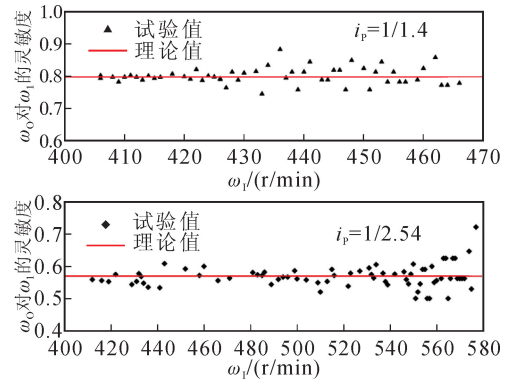


图 9 $S_{\text{OI}}^{\text{PX}}$ 理论值与试验值对比图

Fig. 9 Graph comparison of theoretical sensitivity value with experimental values

经数据归一化处理得到试验所得灵敏度分别为 $S_{\text{OI}}^{\text{PX}} = 0.797$ ($i_p = 1/1.4$) 与 $S_{\text{OI}}^{\text{PX}} = 0.569$ ($i_p = 1/2.54$), 均方根误差分别为 $\sigma = 6.76 \times 10^{-4}$ ($i_p = 1/1.4$)、 $\sigma = 1.21 \times 10^{-3}$ ($i_p = 1/2.54$)。试验结果表明本文分析方法正确。

6 结论

1) 深入研究了 XP 型与 PX 型单环路系统理想模型的转速灵敏度与转矩灵敏度的影响参数以及影响规律,并通过试验验证了文中分析方法的正确性。结合系统结构参数对传动效果的影响规律提出了基于动态跟随性能以及传动效果的单环路系统设计准则。

2) 输出转速相对于输入转速灵敏度较高的系统位于增速区域,输出转矩相对于输入转矩灵敏度较高的系统位于降速区域,它们由系统结构参数 K 与 i_p 共同决定。而输出转速与输出转矩相对于 i_p 的灵敏度可通过选用合适的 K 来得到。

3) 本文初次提出单环路系统动态跟随性的研究,是对轮系运动学分析及静、动力学分析的补充,完善了轮系传动理论,为进一步的研究提供了坚实的理论基础。在实际应用中,还存在封闭机构滑动率、齿轮材料以及安装误差等影响因素,这些因素也是本课题在进一步研究中所需要考虑的。

参考文献:

- [1] YILDIZ A, PICCININNI A, BOTTIGLIONE F, et al. Modeling chain continuously variable transmission for direct implementation in transmission control [J]. Mechanism and Machine Theory, 2016, 105(11): 428-440.
- [2] BOTTIGLIONE F, PINTO S D, MANTRIOTA G. Infinitely variable transmissions in neutral gear: torque ratio and power re-circulation [J]. Mechanism and Machine Theory, 2014, 74(4): 285-298.
- [3] 董泳, 周绪强, 毕强. 风力机与液力变速传动装置匹配工作特性研究 [J]. 中国机械工程, 2012, 23(6): 660-666.
DONG Yong, ZHOU Xuqiang, BI Qiang. Research on working characteristics about wind rotor matching with hydrodynamic variable speed drive unit [J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(6): 660-666.
- [4] 王振, 崔亚辉, 刘凯, 等. 车用 IVT 设计与仿真研究 [J]. 西安理工大学学报, 2017, 33(1): 53-59.
WANG Zhen, CUI Yahui, LIU Kai, et al. IVT design and simulation research on automotive application [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2017, 33(1): 53-59.
- [5] 马雅丽, 张永珍. 复杂轮系基本单元的运动特征状态数学建模 [J]. 中国机械工程, 2014, 25(15): 1999-2003.
MA Yali, ZHANG Yongzhen. Kinematic characteristic state models for basic units of compound gear train [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(15): 1999-2003.
- [6] 曹士鑫, 陈文菁. PX 型差动无级变速器的功率流和效率分析 [J]. 中国纺织大学学报, 1987, 13(3): 19-26.
CAO Shixin, CHEN Wenjing. Analysis of the power flow and efficiency of PX type differential infinite variable speed reducer [J]. Journal of China Textile University, 1987, 13(3): 19-26.
- [7] MANGIALARDI L, MANTRIOTA G. Power flows and efficiency in infinitely variable transmissions [J]. Mechanism and Machine Theory, 1999, 34(7): 973-994.
- [8] WU Yichang, CHENG Chiahao. Computing the power flow and mechanical efficiency of in-hub bicycle transmissions [J]. Engineering Computations, 2014, 31(2): 267-282.
- [9] YANG Fuchun, FENG Jianxiong, ZHANG Hongcai. Power flow and efficiency analysis of multi-flow planetary gear trains [J]. Mechanism and Machine Theory, 2015, 92(10): 86-99.
- [10] WHITE G. Derivation of high efficiency two-stage epicyclic gears [J]. Mechanism and Machine Theory, 2003, 38(2): 149-159.
- [11] 郗向儒, 薛隆泉, 崔亚辉. 封闭差动无级变速传动的研究 [J]. 机械, 1997, 24(1): 2-6.
XI Xiangru, XUE Longquan, CUI Yahui. Research on closed differential variable speed transmission [J]. Mechanical, 1997, 24(1): 2-6.
- [12] 崔亚辉, 阮忠唐, 曹惟庆. 封闭差动行星传动研究 [J]. 机械科学与技术, 1998, 17(1): 73-75.
CUI Yahui, RUAN Zhongtang, CAO Weiqing. Research on closed differential gear train [J]. Mechanical Science and Technology, 1998, 17(1): 73-75.
- [13] 同长虹, 黄建龙, 李俊文, 等. 周转轮系的传动效率分析 [J]. 机械研究与应用, 2011, (5): 41-45.
TONG Changhong, HUANG Jianlong, LI Junwen, et al. Analysis of an efficiency of an epicyclic gear train [J]. Mechanical Research & Application, 2011, (5): 41-45.
- [14] CHEN Chao. Power flow and efficiency analysis of epicyclic gear transmission with split power [J]. Mechanism and Machine Theory, 2013, 59(1): 96-106.
- [15] 胡青春, 李剑英, 段福海. 带有圆锥齿轮的复合行星传动功率流与传动效率分析 [J]. 机械工程学报, 2015, 51(21): 42-48.
HU Qingchun, LI Jianying, DUAN Fuhai. Power flow and efficiency analysis of compound planetary gears transmission with bevel gears [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(21): 42-48.
- [16] KAHRAMAN A, HILTY D R, SINGH A. An experimental investigation of spin power losses of a planetary gear set [J]. Mechanism and Machine Theory, 2015, 86(4): 48-61.
- [17] 秦大同, 杨军, 周志刚, 等. 变载荷激励下风电行星齿轮系统动力学特性 [J]. 中国机械工程, 2013, 24(3): 295-301.
QIN Datong, YANG Jun, ZHOU Zhigang, et al. Dynamics characteristic of planetary gear system of wind turbines under varying load [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(3): 295-301.
- [18] 王振, 崔亚辉, 刘凯, 等. 装备单环路系统的整车行驶动力学研究 [J]. 中国机械工程, 2016, 27(8): 1123-1129.
WANG Zhen, CUI Yahui, LIU Kai, et al. Research on driving dynamic for vehicles equipped with a single loop system [J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(8): 1123-1129.

(责任编辑 王卫勋)