

文章编号: 1000-8055(2003)02-0299-06

行星齿轮传动动力学特性研究进展

杨建明^{1,3} 张 策², 林忠钦¹, 陈关龙¹, 来新民¹

(1 上海交通大学 机械工程学院, 上海 200030;

2 天津大学, 天津 300072;

3 桂林电子工业学院, 桂林 541004)

摘要: 行星齿轮传动由于结构紧凑、承载能力强等优点而广泛应用在各个工业领域。振动和噪声是行星齿轮传动的主要问题。本文从动力学模型、自由振动、响应求解、均载及振动抑制等几个方面对国内外行星齿轮传动系统弹性动力学及相关研究进行了综述。介绍了行星齿轮传动弹性动力学研究中常用的纯扭转振动模型、横向—回转耦合振动模型以及有限元模型, 对三种常用的响应求解方法进行了分析和评述。最后指出了需要进一步研究的几个问题。

关键词: 机械设计; 行星齿轮传动; 评述; 弹性动力学; 模型; 自由振动

中图分类号: TH 132

文献标识码: A

An Extensive Review of Elasto-Dynamics of Planetary Gear Trains

YANG Jian-ming^{1,3}, ZHANG Ce², LIN Zhong-qin¹,
Chen Guan-long¹, LAI Xin-min¹

(1 Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;

2 Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3 Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Planetary gear trains are widely used in industry due to their unique advantages, such as compact volume and high-load capability etc, over other kinds of transmissions. In the past years, several mathematical models for the elasto-dynamics have been developed for different purposes. In this paper, the models used in elasto-dynamics of planetary trains are discussed and a classification of the models is made. The algorithms frequently utilized to search for the response of the system are also outlined. Some aspects relating to dynamics of planetary gear trains, such as vibration mode shape, load-sharing and vibration control are discussed. Finally some important problems deserving more efforts to study in the future are pointed out.

Key words: mechanical design; planetary gear trains; elasto-dynamics; model;
free vibration

收稿日期: 2002-04-01; **修订日期:** 2002-07-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50205019)

作者简介: 杨建明(1964-), 男, 河北河间人, 上海交通大学机械工程学院高级工程师, 博士后, 主要从事机械动力学和汽车制造技术的研究

1 前言

行星齿轮传动由于其结构紧凑、承载能力强以及较低的轴承载荷而广泛应用于航空、船舶、汽车、军事、机械、冶金等各个领域。尽管和普通齿轮传动相比,行星齿轮传动有着很多独特的优越性,但是其噪声和振动一直是学术界和工业界研究和关注的焦点。比如在直升飞机中,行星齿轮传动产生的噪声就超过 100 dB,是主要的噪声源^[1,2]。由于行星齿轮传动是过约束传动,而且结构复杂,对其进行动力学研究时采用刚体动力学的方法不能得到理想的结果,因此,除早期的研究者^[3]外,一般都考虑了构件和运动副的弹性,即采用弹性动力学的方法。与其他机构相比,动力学研究的难度更大。国际上对行星齿轮传动进行系统的弹性动力学理论研究是从 80 年代末才开始的^[4],1994 年以后在美国国家航空航天局、美国军事研究中心^[5,6]以及福特汽车公司^[7]等的资助下,美国对行星齿轮传动弹性动力学的诸多方面,如:自由振动、动态响应、均载、振动抑制、动态稳定性等,进行了较系统的研究工作。而我国对这一重要的研究课题则研究较少^[8~12]。本文试图对国内、外行星齿轮传动的弹性动力学研究工作加以综述,以期对推动我国学术界对这一重要传动的研究起到抛砖引玉的作用。需要说明的是,日本学者 Hidaka 等在 1976~1980 年期间围绕行星齿轮传动发表了一系列重要的实验研究报告^[13~19],这些报告的实验结果对于行星齿轮传动的动力学研究非常重要,至尽仍为许多理论研究者引用,有兴趣的读者可参阅这些文献。限于篇幅,本文对这些实验研究,不做过多的评述。

2 动力学模型

由于行星齿轮机构结构复杂,且为过约束,对其进行动力学研究时必须考虑零件或运动副的弹性,根据建立动力学模型时所使用的方法和考虑的因素不同,可以把行星齿轮传动的动力学模型分为如下两类:即集中参数模型和有限元模型。

2.1 集中参数模型

集中参数模型将行星齿轮传动中的各个构件简化为集中质量,各个构件之间以及构件与基础之间的连接简化为弹簧。将构件的运动看成刚体运动和弹性变形的叠加,将机构在各个运动位置固化为各个位置的结构,从而构成一个多自由度

的振动系统。如图 1,2 所示。根据模型中对集中质量运动模式的处理不同,有两种不同的模型:纯扭转振动模型和扭转—横向耦合振动模型。

图 1 纯扭转模型

Fig 1 Torsional model

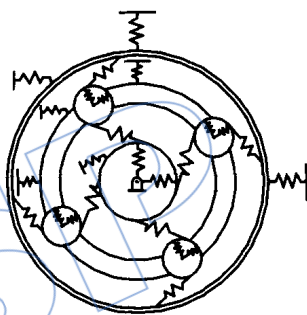


图 2 扭转—横向振动耦合模型

Fig 2 Transverse-torsional model

2.1.1 纯扭转振动模型

在这种模型中,仅考虑零件的扭转运动,如图 1 所示,使用这种模型的研究有^[20~22]。这种模型建模简单,考虑的因素少,在一般情况下,轮齿的综合啮合刚度较轴承的支撑刚度要小得多。文献^[20]的计算表明:在计算传动系统的固有频率时,这种模型与扭转—横向振动耦合型模型的计算结果相差很小。因而可以用这种模型来预估系统的固有频率。在求解传动系统的动力学响应时,除文献^[22]外,很少使用纯扭转振动模型而多用扭转—横向振动耦合模型。

2.1.2 扭转—横向振动耦合模型

该类模型除了考虑零件的扭转振动外,对直齿轮传动,还考虑了零件的横向振动;对螺旋齿轮传动,还考虑零件的轴向运动。August^[4],孙涛等^[11,12]建立的模型中,考虑了输入端转子、输出端转子、行星轮、齿圈和系杆的扭转位移,中心太阳轮的扭转和横向位移,齿侧间隙,以及齿轮的啮合刚度波动。孙涛等用该模型研究了行星齿轮传动的非线性现象:如跳跃和多解等问题。

Kahraman A^[7]建立的模型则考虑了更多的影响因素,如所有构件的扭转和横向位移,齿轮的啮合刚度波动,齿侧间隙,综合传动误差、制造误差和磨损误差。如图 2 所示。Kahraman A. 用该模型研究了行星齿轮的均载特性。

对螺旋齿轮行星传动系统除了考虑各个齿轮的扭转和横向振动外,还必须考虑其轴向运动。研究螺旋齿轮的典型文献有^[23~25]。由于螺旋齿轮的重叠系数较大,都没有考虑齿轮的啮合刚度波动。

考虑到齿圈的厚度较薄,柔性较大。有些研究者在他们的动力学模型中还考虑了齿圈的弹性^[26,27]。在这类模型中,一般仅考虑刚体位移和弹性变形的叠加,而不考虑两者之间的耦合(陀螺效应)。JIAN L in^[1]曾提出了考虑刚体位移和弹性变形之间耦合的动力学方程,但没有进行任何分析,而实际上,随着机构运转速度的提高,这种耦合响应会越来越大,在某些应用场合,机构转速可高达 30000 r/min,此时,陀螺响应将变得不可忽略^[28]。

由于齿轮的齿侧间隙为强非线性因素,齿轮的啮合刚度波动为参数激励。以上介绍的动力学模型多为非线性模型。

用集中参数模型建立的行星齿轮传动系统的动力学方程有如下标准形式:

$$\begin{aligned} [M] \{\ddot{X}\} + ([C] + \Omega[G])\{\dot{X}\} + \\ ([K] + \Omega[K_\Omega])\{X\} = \\ \{P_0\} + \{\Delta P\} \end{aligned} \tag{1}$$

其中: $[M]$, $[C]$, $[K]$ 分别为系统的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $[K_\Omega]$, $[G]$ 分别为由于陀螺效应引起的附加阻尼项和刚度项; Ω 为系杆的回转

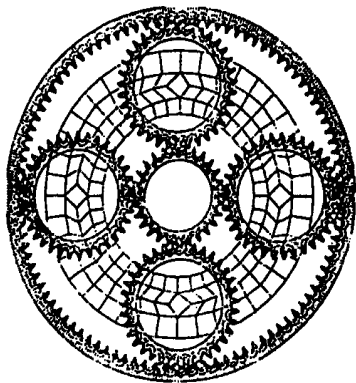


图 3 行星齿轮传动的有限元模型
Fig 3 Finite element model

角速度; $\{X\}$, $\{P_0\}$, $\{\Delta P\}$ 分别为广义坐标向量、平均外载荷向量和波动外载荷向量。

2 2 有限元模型

Robert G Parker, et al^[2]认为集中参数模型与实际情况相差较远,因而建立了行星齿轮机构的有限元分析模型,如图 3 所示。为了减少计算量,采用了一种独特的半分析有限元公式。这种有限元模型对齿轮接触表面的网格划分要求不很严格。计算结果表明:用有限元模型计算的系统固有频率和振动模态与用分析模型计算的结果十分吻合,但并没有将其计算结果和实验结果比较。

3 自由振动特性

对自由振动的研究可以帮助设计者在设计阶段预估行星齿轮传动系统的振动特性,以使激励频率尽量避开机构的共振频率,即避开共振点。这方面的研究文献有^[1,20,21,41~43]。在这些研究中,均利用了行星齿轮机构刚度矩阵的对称特性和耦合特性来简化分析过程,甚至可以用解析法进行研究。其中 Kahraman A^[20,21]用了纯扭转模型,JIAN L in, et al^[1]则用了扭转—横向振动耦合模型,因而其结论也更有普遍意义。在扭转—横向振动耦合模型中,行星齿轮传动共存在三种振动模态。

3 1 行星轮模态 (planet modes)

在该模态下的固有频率为多重根,重根数为 $N - 3$ (N 为行星轮个数)。此种固有频率共有 3 个,而且只在有 4 个以上的行星轮的系统中,这些模态才存在。这些模态的振动特点为:中心构件(系杆、内齿圈和中心太阳轮)的横向和回转运动都为零,只有行星齿轮发生振动,因而称为行星轮模态,如图 4 所示。

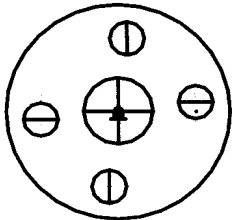


图 4 行星轮模态
Fig 4 Planet mode

3 2 回转模态 (rotational modes)

在回转模态的固有频率均为单根,这些固有频率共有 6 个,其中一个为 0,表征系统的刚体运动,另 5 个的值随着机构中行星轮个数的增加而增大。这些振动模态中,所有的行星轮的运动模式相同,而系杆、内齿圈和中心太阳轮只有回转运动

而横向运动为零。如图 5 所示。

图 5 扭转模式

Fig 5 Rotational mode

3.3 横向振动模式(translational modes)

在这些振动模式下的固有频率共有 6 个, 均为双重根, 其对应的 6 对振动模式为: 系杆、内齿轮和中心太阳轮只有横向运动, 而无回转运动。如图 6 所示。

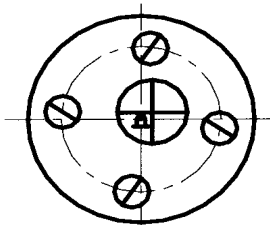


图 6 横向振动模式

Fig 6 Translational mode

在一般的行星齿轮传动系统中, 行星轮的个数均为 3 或 3 以上, 因此, 可以得出如下结论: 对有 3 个行星轮的系统, 共有 12 个固有频率, 其中一个为刚体运动模式, 5 个为回转振动模式和 6 对横向振动模式; 对有 4 个以上行星轮的系统, 系统共有 15 个固有频率, 其中除一个刚体运动模式, 5 个回转运动模式, 6 对横向运动模式外, 还有 3 组行星轮运动模式。

4 动态响应求解方法

4.1 数值积分法

数值积分法是最广泛使用的方法, 如文献[4, 7, 8]等都使用了该方法。但数值积分方法有两个缺点: 一是随着方程自由度数目的增大, 积分至稳态响应的时间太长, 二是在有些情况下, 如: 轻阻尼、轻载荷以及在临界速度下等, 无论用多小的积分步长永远也得不到稳态解^[29]。

4.2 Ritz 方法

该方法先对动力学方程做如下变换:

$$[K] = [K_0] + [\Delta K] \quad (2)$$

$$\{X\} = [X_0] + [\Phi]\{\delta\} \quad (3)$$

其中: $\{X_0\}$ 为在平均载荷下的静态变形; $\{\delta\}$ —选择的缩减模式集。 $\{X_0\}$ 由下式求得

$$[K_0][X_0] = \{P_0\} \quad (4)$$

用式(2), (3) 计算系统的动能和弹性势能, 并代入 Lagrange 方程可得:

$$\begin{aligned} & [\Phi]^T [M] [\Phi] \{\ddot{\delta}\} + [\Phi]^T [C] [\Phi] \{\dot{\delta}\} + \\ & [\Phi]^T [K] [\Phi] \{\delta\} = \\ & - [\Phi]^T [\Delta K] [\Phi] \{X_0\} + \{\Delta P\} \end{aligned} \quad (5)$$

上述方程可以用数值积分法积分。由于自由度已经缩减, 计算时间大大缩短。此方法为近似方法, 计算精度取决于所选择的模式精度。由于行星齿轮传动结构的对称性以及独特的自由振动特性, 在某一具体参数下, 一般总是少数几个模式占主要成分。据 Saada A^[24] 的研究, Ritz 方法比数值积分法计算速度要快很多, 且有足够的精度。

4.3 模态叠加法

在不计齿轮啮合刚度的时变特性时, 可用传统的模态叠加法求行星齿轮传动系统的响应^[23]。当考虑方程的时变系数时, 可用封闭解法。封闭解法在求解弹性连杆机构^[30]、凸轮机构^[31]及三环传动系统^[32]的动力学响应时, 非常有效。

4.4 谐波平衡法

Kahraman A 在 1996 年用谐波平衡方法研究了含齿侧间隙的单级平行轴齿轮传动的非线性动力学^[33], 孙涛^[12]等则将此方法扩展到多自由度系统, 用于求解行星齿轮传动的动力学响应。该方法用于解释齿轮传动的非线性振动现象是有优越性的, 但由于解的精度依赖于所取的谐波次数, 当只取一次谐波项时, 对其解的精度分析却未见报道。

5 均载和振动抑制

行星齿轮传动中有多个行星齿轮同时与中心轮啮合, 由于不可避免的制造及安装误差以及磨损等, 使得各个行星齿轮之间的载荷不均衡。一般均需采用各种均载装置, 如: 浮动中心构件、加均载元件或均载机构以及油膜均载等。从动力学角度对行星齿轮机构的均载进行研究的只有 Kahraman A^[7]。在该文献中, 作者定义了动态均载系数、静态均载系数和动态系数 3 个系数。用他们来表征行星齿轮传动的均载效果, 研究表明: 浮动中心太阳轮能有效地均衡载荷, 在低速运行时, 动态系数接近于 1, 因此, 可以用传统的静态均载

系数来反应均载效果。但对高速行星传动, 动态系数远大于 1, 因此动态均载系数远远大于静态均载系数, 因此, 只能用动态均载系数才能反映传动的均载效果。

该研究的另一个有重要意义的结论是: 在高速下, 浮动中心太阳轮均载有可能恶化系统的动态响应。从静态角度研究行星齿轮均载的文献较多, 如文献[34, 35]等。

为了降低行星齿轮传动的振动和噪声, 学术界和工程界一般采用如下的一些措施: 提高齿轮及其它零件的加工精度; 采用附加阻尼等减振措施; 齿轮修形等。

沈允文^[36, 37]开展的用附加阻尼材料实现行星齿轮减振的理论和实验研究。给出了阻尼材料阻尼的计算方法。但这种方法属于事后采取的被动措施。

近几年来, 一些研究者利用行星齿轮传动结构的对称性和激励特征, 开始了从设计阶段实现振动抑制的理论研究。其基本思想为: 传动误差(transmission error)是引起齿轮振动的重要激励, 它是一个综合了设计和制造因素的综合参数。由于行星齿轮传动的对称结构, 同时有多个行星轮和中心轮啮合, 从而可以通过匹配各个齿轮的齿数和相位(mesh phasing)来使同时啮合的多个啮合副之间的传动误差激励相互抵消, 进而降低行星齿轮传动的振动和噪声, 最早提出这一思想的是 Schlegel 和 Mard^[38], 通过试验, 他们成功地将直齿轮行星传动的噪声降低了 11 dB。Plat R L, eatl^[39]也从试验的角度证实了这一方法的有效性, 而 Kahraman A^[7]则通过假设传动误差的函数, 用计算机仿真也证实在某些特殊的齿轮齿数和个数组合时, 系统的动态响应比较小。对于这一思想的理论依据, 最近 Parker R G^[5, 6, 40]以傅立叶展开为工具, 从静力学角度给予了严密的解释。这些研究说明: 在行星齿轮传动的齿轮之间的相位匹配(mesh phasing)和行星齿轮传动系统的激励之间存在着映射关系。如果能够找到这种映射关系, 就可以在设计阶段来控制系统的动态激励, 设计出低振动、低噪声的行星齿轮传动装置。

6 其它需要进一步研究的问题

6.1 精简的动力学模型的研究

由于行星齿轮传动结构复杂, 零件多, 为了比较全面的反应系统真实的动力学面貌, 迄今为止,

所建立的动力学方程自由度均较多。这样, 为了解系统的动力学响应, 所花的计算时间均较长。用这些模型来进行行星齿轮传动的动态优化设计几乎不可能。因此, 必须寻求即能反映系统的动力学本质, 形式又较简单, 自由度较少的动力学模型或者计算时间较少的仿真方法。根据对行星齿轮传动自由振动特性的研究, 建立这种模型是可能的。

6.2 低振动、低噪声行星齿轮传动的设计

文献[5, 6]只是说明了通过匹配行星轮个数及相位(mesh phasing)来消除一部分内激励, 进而减轻行星齿轮振动的可能。但对于如何具体操作, 及内激励与行星轮个数及相位的具体的映射关系, 到目前为止, 还无人研究, 因此, 寻求这种具体的映射关系, 对于从设计阶段来实现振动的抑制有重要意义, 需要进一步的深入研究。

6.3 多级行星齿轮传动的动力学

到目前为止, 对行星齿轮传动的动力学研究多以简单的单级传动为对象。而实际应用中, 大多为多级行星齿轮传动和行星齿轮与其他传动(如星形传动)的组合传动。对多级行星齿轮传动动力学进行研究的很少, 目前见到的文献只有 Kahraman A^[21]和孙智民等^[10]。Kahraman A 研究了多级行星齿轮传动的自由振动, 所用的模型为纯扭转振动模型。孙智民等^[10]则研究了行星传动和星形传动的组合传动的动力学响应。较之单级行星齿轮传动, 多级行星齿轮传动的动力学表现更复杂。因此, 如何建立合适的多级行星齿轮传动的动力学模型并研究其动力学表现仍是需要进一步研究的重要课题。

参考文献

- [1] Jian L in, Parker R G. Analytical Characterization of the Unique Properties of Planetary Gear Free Vibration[J]. Journal of Vibration and Acoustics Transaction of the ASME, 1999, 116: 316- 322
- [2] Parker R G, et al Dynamic Response of a Planetary Gear System Using a Finite Element/Contact Mechanics Model[J]. Journal of Mechanical Design, Transaction of the ASME, 2000, 122: 304- 310
- [3] Bahgat B M, et al On the Dynamic Gear Tooth Loading of Planetary Gearing as Affected by Bearing Clearances in High-Speed Machinery[J]. Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design, Transaction of the ASME, 1985, 107: 430- 436
- [4] August A, Kasuba R. Torsional Vibration and Dynamic Loads in a Basic Planetary Gear System[J]. Journal of Acoustics, Stress, and Reliability in Design Transaction of the ASME 1986, 108: 348- 253
- [5] Parker R G. A Physical Explanation for the Effectiveness of

- Planet Phasing to Suppress Planetary Gear Vibration[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 236(4): 561- 573
- [6] Parker R G Mesh Phasing for Epicyclic Gear Vibration[A]. Proceedings of the International Conference on Mechanical Transmission. [C] Chongqing, P. R. China, 2001, 4: 53- 57.
- [7] Kahraman A. Load Sharing Characteristics of Planetary Transmission[J]. Mech., Mach., Theory., 1994, 29(8): 1151- 1165
- [8] 袁茹, 纪名刚. 航空行星减速器的振动特性分析[J]. 航空动力学报, 1995, 10(4): 395- 398
- [9] 张正元, 谷燕. 具有行星传动的机械传动系统的弹性动态建模[J]. 同济大学学报, 1996, 21(4): 427- 432
- [10] 孙智民, 沈允文, 李素有. 封闭行星齿轮传动系统的扭振特性研究[J]. 航空动力学报, 2001, 16(2): 163- 166
- [11] 孙涛, 沈允文. 行星齿轮传动非线性动力学模型与方程[J]. 机械工程学报, 2002, 38(3): 6- 9
- [12] 孙涛, 沈允文. 行星齿轮传动非线性动力学方程求解与动态特性分析[J]. 机械工程学报, 2002, 38(3): 10- 15
- [13] Teruaki Hidaka, Yoshio Terauchi Dynamic Behavior of planetary Gear [J]. (1st Report: Load Distribution in Planetary Gear), Bulletin of the JSME, 1976, 132(19): 690 - 698
- [14] Teruaki Hidaka, Yoshio Terauchi Dynamic Behavior of planetary Gear [J]. (2nd Report: Displacement of Sun and Ring Gear), Bulletin of the JSME, 1976, 138(19): 1563- 1570
- [15] Teruaki Hidaka, Yoshio Terauchi Dynamic Behavior of planetary Gear [J]. (3rd Report: Displacement of Ring Gear in Direction of Line of Action), Bulletin of the JSME, 1977, 150(20): 1663- 1672
- [16] Teruaki Hidaka, Yoshio Terauchi Dynamic Behavior of Planetary Gear [J]. (4th Report: Influence of the Transmitted Tooth Load), Bulletin of the JSME, 1979, 167(22): 877- 884
- [17] Teruaki Hidaka, Yoshio Terauchi Dynamic Behavior of Planetary Gear [J]. (5th Report: Dynamic Increment of Torque), Bulletin of the JSME, 1979, 169(22): 1017- 1025
- [18] Teruaki Hidaka, Yoshio Terauchi Dynamic Behavior of planetary Gear [J]. (6th Report: Influence of Meshing-Phase), Bulletin of the JSME, 1979, 169(22): 1026- 1033
- [19] Teruaki Hidaka, Yoshio Terauchi Dynamic Behavior of Planetary Gear [J]. (7th Report: Influence of the Thickness of the Ring Gear), Bulletin of the JSME, 1979, 170(22): 1142- 1149
- [20] Kahraman A. Natural Modes of Planetary Gear Trans[J]. Journal of Sound and Vibration, 1994, 173(1): 125- 130
- [21] Kahraman A. Free Torsional Vibration Characteristics of Compound Planetary Gear Sets[J]. Mech. Mach. Theory, 2001, 36: 953- 971
- [22] Hidaka, Yoshio et al Analysis of Dynamic Tooth Load on Planetary Gear [J]. Bulletin of the JSME, 1980, 23(176): 315- 323
- [23] Kahraman A. Planetary Gear Train Dynamics[J]. Journal of Mechanical Design, Transaction of the ASME, 1994, 116: 713- 720
- [24] Saada A, Velez P. An Extended Model for the Analysis of the Dynamic Behavior of Planetary Trains[J]. Journal of Mechanical Design, Transaction of the ASME, 1995, 117: 241- 247
- [25] Velez P, Flamand L. Dynamic Response of Planetary Trains to Mesh Parametric Excitations[J]. Journal of Mechanical Design, Transaction of the ASME, 1996, 118: 7- 14
- [26] Lin L, Liu, et al The Effect of Ring Gear Flexibility on Planetary Geartrain Dynamics [A]. Proceedings of the International Conference on mechanical transmissions [C]. Chongqing, P. R. China: 2001: 687- 690
- [27] Boyd L, et al Epicyclic Gear Dynamics[J]. ASME Journal, 1989, 27(5): 603- 609
- [28] Rajiv Dama, et al Modeling And Analysis of a High-Speed Transmission with Multi-Path Elastomeric Load-Share Gears[J]. Mech. Mach. Theory, 1997, 32(3): 295- 312
- [29] Velez P, et al Some Numerical Methods for the Simulation of Geared Transmission Dynamic Behavior Formulation and Assessment[J]. Journal of Mechanical Design. Transaction of the ASME, 1997, 119: 292- 298
- [30] 张策. 弹性连杆机构的分析于设计(第二版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999
- [31] 杨玉虎. 高速凸轮分度传动系统动力学理论与实验研究 [D]. 天津: 天津大学, 2000
- [32] 杨建明, 张策. 三环减速机的弹性动力学分析[J]. 机械工程学报, 2000, 36(10): 54- 58
- [33] Kahraman A, et al Interactions Between Commensurate Parametric and Forcing Excitations in a System with Clearance [J]. Journal of Sound and Vibration 1996, 194(3): 317- 336
- [34] 刘伟强. 行星减速器油膜均载的分析计算[J]. 航空学报, 1994, 15(4): 428- 432
- [35] 施永安, 朱民龙. 双油膜浮动轴承均载行星齿轮传动技术研究[J]. 传动技术, 1994, (3): 32- 42
- [36] 沈允文, 邵长键. 利用行星架附加阻尼的行星齿轮系统减振研究[J]. 机械传动, 1999, 23(4): 29- 32
- [37] 孙涛, 沈允文, 邵长键. 附加粘弹性阻尼齿轮结构的阻尼计算[J]. 航空动力学报, 1998, 3(13): 301- 349
- [38] Schlegel R G, Mard K C. Transmission Noise Control Approaches in Helicopter Design [C]. ASME Design Engineering Conference, New York: 1967. ASME Paper 67 - DE- 58
- [39] Platt R L, Leopold R D. A Study on helical Gear Planetary Phasing Effects on Transmission Noise [R]. 1966 VDI Berichte 1230, 793- 807.
- [40] Jian Lin, Parker R G. Parametric Resonance in Two Stage Gears From Fluctuating Mesh Stiffness [C]. Proceedings of the International Conference on Mechanical Transmission. Chongqing, P. R. China: 2001. 4: 233- 238
- [41] Lin J, Parker R. Sensitivity of Planetary Gear Natural Frequencies and Vibration Modes to Model Parameters[J]. Journal of Sound and Vibration 1999, 1(228).
- [42] Lin J, Parker R. Structured Vibration Characteristics of Planetary Gears with Unequally Spaced Planets[J]. Journal of Sound and Vibration 2000, 233(5): 921- 928
- [43] 杨建明, 张策. 行星齿轮传动固有频率对设计参数的灵敏度分析[J]. 机械设计, 2001, (4): 40- 43